

# 博士學位論文

氏名（本籍）	岡 健太郎（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博乙第121号
学位授与年月日	令和 5年 12月 4日
学位授与の要件	学位規則第4条第 2項
学位論文題目	木摺り漆喰吊り天井の力学的挙動と 持続可能な利活用に向けた 健全度評価手法の提案

論文審査委員	主査 田村 雅紀 教授
	副査 遠藤 和義 教授
	〃 河合 直人 教授
	〃 後藤 治 教授
	〃 鈴木 澄江 教授
	〃 清家 剛 教授
	（東京大学大学院）





木摺り漆喰吊り天井の力学的挙動と  
持続可能な利活用に向けた健全度評価手法の提案

Mechanical Behavior and Soundness Assessment for Sustainable Utilization of  
Suspended Lath and Plaster Ceilings

岡 健太郎

Kentaro OKA

職業能力開発総合大学校 能力開発院  
基幹ものづくり系 特任助教（建築仕上・材料評価ユニット）

2023 年 12 月



## 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	3
1.1.1 非構造部材の地震時の対策	3
1.1.2 文化財建築物を取り巻く状況	4
1.1.3 木摺り漆喰天井について	6
1.2 本研究における健全度の考え方と研究目的	8
1.3 研究の流れ	9
1.4 本論文の各章の構成	10
1.5 用語の整理	11
第1章の参考文献	13
<b>第2章 木摺り漆喰天井の力学的特性と健全度評価・維持保全手法に関する既往の研究</b>	<b>15</b>
2.1 第2章の概要	17
2.2 木摺り漆喰工法の工法的研究について	17
2.2.1 木摺り漆喰工法が適用された壁部材・天井部材の扱いの差異	17
2.2.2 壁部材に関する研究	17
2.2.3 天井部材に関する研究	18
2.2.4 施工法の観点で見た研究	18
2.3 木摺り漆喰天井等における修繕・保存事例	21
2.4 木摺り漆喰天井の損傷要因を踏まえた本研究の位置づけ	24
2.4.1 既往研究の概観	24
2.4.2 既往研究を踏まえた本研究の位置づけ	24
2.5 木摺り漆喰天井の損傷要因の洗い出しと本研究での評価項目	26
第2章のまとめ	29
第2章の参考文献	31
<b>第3章 木摺り漆喰工法に関わる歴史的変遷の調査</b>	<b>33</b>
3.1 第3章概説	35
3.2 木摺り漆喰工法の出現から日本へ導入される過程	35
3.2.1 西洋における木摺り漆喰工法の出現と発展	35
3.2.2 日本における木摺り漆喰に類する工法と小舞土壁との対比	38
3.3 日本における木摺り漆喰工法の体系化と実仕様に関する文献調査（調査3-1）	40
3.3.1 調査の背景と概要（調査3-1）	40
3.3.2 文献調査の方法（調査3-1）	42
3.3.3 文献調査の結果（調査3-1）	43
(1)文献によって調査した実物件、技術書の内訳	43
(2)木摺り下地の諸寸法でみた評価	49

3.4 木摺り漆喰天井を支持する木製吊り天井下地の年代別仕様に関する文献調査（調査 3-2） .....	51
3.4.1 背景と目的（調査 3-2） .....	51
3.4.2 文献調査の方法（調査 3-2） .....	51
3.4.3 文献調査の結果（調査 3-2） .....	52
第 3 章のまとめ .....	56
第 3 章の参考文献 .....	58
 <b>第 4 章 木摺り漆喰工法における基礎力学的特性の実験的検討</b> .....	<b>65</b>
4.1 第 4 章概説 .....	67
4.2 木摺り漆喰天井の外力抵抗要素 .....	67
4.3 材料の調合比について .....	68
4.4 漆喰材料の基礎力学的特性に関する実験概要（実験 4-1） .....	70
4.4.1 基礎力学的特性に関する実験条件 .....	70
4.4.2 基礎力学的特性に関する実験方法 .....	73
4.5 漆喰材料の基礎力学的特性に関する実験結果および考察 .....	74
4.5.1 試験別・材齢別の評価 .....	74
4.5.2 調合別の評価 .....	77
4.6 木摺り下地と漆喰の外力抵抗性に関する実験概要（実験 4-2 シリーズ） .....	82
4.6.1 木摺り漆喰要素試験体に関する試験条件 .....	82
4.6.2 要素試験体の施工・引張試験方法 .....	85
4.7 要素試験体による木摺り漆喰天井の力学的特性に関する実験結果および考察 .....	88
4.7.1 食い込み深さやテーパ角による基礎物性（実験 4-2-1） .....	88
4.7.2 抵抗要素の評価（実験 4-2-2） .....	91
4.7.3 木摺り下地と漆喰の界面における抵抗要素の算定 .....	93
(1) 目透かし部漆喰の最大引張応力度( $R_1\sigma_{\max}$ ) .....	93
(2) 小幅板下面と漆喰の最大引張付着応力度( $R_2\sigma_{\max}$ ) .....	93
(3) 小幅板側面と漆喰のせん断付着、せん断、嵌合( $R_3$ 、 $R_4$ ) .....	93
(4) 小幅板上面と漆喰のせん断抵抗 ( $R_5$ ) .....	93
第 4 章のまとめ .....	95
第 4 章の参考文献 .....	97
 <b>第 5 章 実在する建築物から採取した木摺り漆喰吊り天井を対象とした各種評価</b> .....	<b>99</b>
5.1 第 5 章概説 .....	101
5.2 調査・検証概要 .....	102
5.2.1 天井部位ごとの検証内容の整理 .....	102
5.2.2 実試験体の実測調査について .....	103
5.2.3 現地調査を含めた天井仕様（一般部）の把握と模擬試験体に適用する基本仕様の策定 .....	107
5.3 模擬試験体の実験概要（実験 5-1） .....	110
5.3.1 模擬試験体仕様 .....	110

5.3.2 模擬試験体の実験結果（実験 5-1） .....	116
(1) (A)吊木受け～(B)吊木(A-B シリーズ) .....	116
(2) (B)吊木～(C)野縁受け(B-C シリーズ).....	119
(3) (C)野縁受け～(D)野縁(C-D シリーズ) .....	122
(4) (D)野縁～(E)小幅度板(D-E シリーズ).....	125
5.3.3 模擬試験体の結果を踏まえた今後の展開 .....	127
5.4 実試験体を用いた漆喰付着強度試験（実験 5-2 シリーズ） .....	128
5.4.1 実試験体を用いた漆喰付着強度試験の概要 .....	128
5.4.2 実試験体に対する引張試験の方法 .....	128
(1)実試験体の加工 .....	128
(2)試験方法 .....	130
5.4.3 実試験体に対する引張試験の結果および考察(実験 5-2-1,2) .....	132
(1)全体の傾向 .....	132
(2)目透かし幅で見た傾向 .....	133
5.5 木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の算定（実験 5-2-2） .....	136
5.5.1 目透かし部漆喰の最大引張応力度( $R_1\sigma_{max}$ ) .....	136
5.5.2 小幅度下面と漆喰の最大引張付着応力度( $R_2\sigma_{max}$ ) .....	136
5.5.3 漆喰塗り重ね部の引張付着( $R_6\sigma_{max}$ ) .....	136
第 5 章のまとめ .....	138
第 5 章の参考文献 .....	140
 <b>第 6 章 実在する建築物から採取した</b>	
<b>木摺り漆喰吊り天井に対する非破壊試験による力学的健全度評価 -----</b>	<b>141</b>
6.1 第 6 章の概要 .....	143
6.2 天井裏からの撮影画像による各種画像解析（実験 6-1） .....	144
6.2.1 引掛り形状評価の位置づけ（実験 6-1） .....	144
6.2.2 画像解析対象の試験体（実験 6-1） .....	144
6.2.3 画像解析による評価項目（実験 6-1） .....	146
(1)目透かし開口率 GR.....	146
(2)引掛り率 AR.....	147
(3)平均引掛り幅 AAW .....	147
(4)開花率 BR.....	147
6.2.4 画像解析による評価結果と考察（実験 6-1） .....	148
(1)実試験体ごとに見た各評価値.....	148
(2)目透かし幅ごとの食い込み漆喰の開き量.....	150
(2.1)評価方法 .....	150
(2.2)評価結果 .....	151
6.3 天井仕上面からの打撃試験による健全度評価（実験 6-2 シリーズ） .....	152

6.3.1 打撃試験の目的とその課題.....	152
6.3.2 打撃試験の方法と考え方.....	153
6.3.3 漆喰の浮きと HLD 値の相関関係の検証（実験 6-2-1） .....	154
(1)打撃試験体(付着)概要 .....	154
(2)試験方法.....	156
(3) LR 法による検証結果（実験 6-2-1） .....	157
6.3.4 漆喰の塗り厚による HLD 値への影響（実験 6-2-2） .....	162
(1)打撃試験体(塗厚)概要 .....	162
(2) LR 法による算定結果（実験 6-2-2） .....	163
6.3.5 各評価値のクラスタリングによる脆弱部判定方法の検討 .....	169
(1)検討の概要.....	169
(2)クラスタリング法での算定方法.....	169
(3)クラスタリング法での算定の結果.....	172
6.3.6 実試験体に対する打撃試験による検証（実験 6-2-3 シリーズ） .....	175
(1)試験対象試験体（実験 6-2-3 共通） .....	175
(2)打撃試験の内容.....	176
(2.1)表面塗装膜の有無による比較検討（実験 6-2-3-1） .....	176
(2.2)試験体全面の打撃による HLD 値分布把握（実験 6-2-3-2） .....	176
(3)表面塗装膜の有無による比較検討結果（実験 6-2-3-1） .....	177
(4)試験体全面の打撃による評価値分布把握結果（実験 6-2-3-2） .....	178
第 6 章のまとめ .....	181
第 6 章の参考文献 .....	183
<b>第 7 章 実験結果を基にした木摺り漆喰天井の保有耐力に関する解析的検討 -----</b>	<b>185</b>
7.1 第 7 章の概要 .....	187
7.2 天井全体でみた各保有耐力・余裕度の算定（分析 7-1） .....	188
7.2.1 吊り天井下部・漆喰部における評価の考え方 .....	188
7.2.2 吊り天井下部・漆喰部における評価方法.....	189
7.2.3 水平・鉛直方向における余裕度の評価結果と考察.....	191
7.2.4 天井の許容耐力の考え方に則った場合の地震時想定荷重との関係 .....	193
7.2.5 本検討を踏まえた今後の展開.....	194
7.3 木摺り漆喰部材の剥落抵抗性における統計学的手法を用いた分析（分析 7-2） .....	195
7.3.1 分析方法 .....	195
(1)実験 4-2 シリーズの結果を用いた分析（数量化第 1 類） .....	195
(2)実験 5-2-2 における結果を用いた分析（拡張型数量化第 1 類） .....	196
7.3.2 分析結果 .....	199
第 7 章のまとめ .....	203
第 7 章の参考文献 .....	205

<b>第 8 章 木摺り漆喰天井部材における外力抵抗条件ごとの剥離・剥落状況の実験的検証-----</b>	<b>207</b>
8.1 第 8 章概説 .....	209
8.2 振動試験準備の概要 .....	209
8.2.1 振動装置の概要 .....	209
8.2.2 評価対象範囲 .....	209
8.2.3 試験体仕様 .....	210
8.2.4 試験体作製概要 .....	214
(1)下地の組み立て .....	214
(2)漆喰の施工 .....	214
(3)振動試験の準備 .....	214
8.3 振動試験の概要 .....	219
8.3.1 加振前後における模擬振動試験体の画像解析 .....	219
8.3.2 加振条件 .....	219
8.3.3 試験体の記録条件 .....	221
8.4 画像解析・振動試験結果・考察 .....	222
8.4.1 画像解析結果 .....	222
8.4.2 振動試験の結果 .....	223
(1)模擬振動試験体 .....	223
(1.1)基本条件 .....	223
(1.2)付着抑制条件 .....	227
(1.3)食込抑制条件 .....	232
(1.4)漆喰強度抑制条件 .....	236
(2)実試験体 .....	241
(2.1)AMS-2 .....	241
(2.2)AMS-4 .....	246
(2.3)AMS-4 における剥落形態と非破壊試験による脆弱部判定結果との比較 .....	255
(3)本試験の剥落性状を踏まえた今後の実験について .....	256
8.5 第 8 章のまとめ .....	257
<b>第 9 章 本研究の結論と今後の展望 -----</b>	<b>261</b>
9.1 本研究の結論 .....	263
9.1.1 本研究の背景と目的の導出 .....	263
9.1.2 研究目的との対応 .....	266
9.2 木摺り漆喰天井とその関連工法の健全度評価手法の拡充に向けた展望 .....	275
9.2.1 本研究での成果と今後の研究課題の整理 .....	275
9.2.2 今後の研究課題の詳細 .....	278

本研究に関わる発表論文リスト .....	283
技術展開資料 .....	289
1.木製天井吊り下地の接合部試験に関わる試験体詳細図面 .....	293
1.1 吊木受け～吊木(X,Y,Z 軸) .....	294
1.2 吊木～野縁受け(X,Y,Z 軸) .....	296
1.3 野縁受け～野縁～木摺り下地(Z 軸).....	298
1.4 野縁受け～野縁(X, Y 軸) .....	299
1.5 接合部試験体設置用治具.....	300
1.6 接合部試験体設置用治具のアムスラー試験機据え付け状態 .....	301
2.木摺り漆喰天井部材の振動試験における剥落時の状況 .....	303
2.1 キャプチャ画像の見方 .....	304
2.2 模擬試験体 基本条件（加振順序 13：ナット緩め, 980gal, 9.7Hz の 3 回目） .....	305
2.3 模擬試験体 付着抑制条件.....	309
2.4 模擬試験体 食い込み抑制条件（加振順序 10：ナット緩め,980gal,9.5Hz の 1 回目） .....	311
2.5 模擬試験体 漆喰強度抑制抑制条件.....	314
2.6 実試験体 AMS-4 .....	320
3.木摺り漆喰天井のアクリル樹脂による補修工法の開発とその実証化記録 .....	323
3.1 補修工法の基本的考え方.....	324
3.2 本研究における補修工法の方針.....	324
3.3 木摺り漆喰天井における特殊アクリル樹脂を用いた補修工法案の検討 .....	325
3.4 本補修工法の実証化試験施工の対象となった歴史的建築物 .....	327
3.5 木摺り漆喰天井部材における補修工法の開発 .....	336
3.6 岩手銀行旧営業室天井への補修工法の実証化記録.....	386

## 謝辞



# 第 1 章

## 序論

## 第1章 序論

1.1 研究の背景 .....	3
1.1.1 非構造部材の地震時の対策.....	3
1.1.2 文化財建築物を取り巻く状況.....	4
1.1.3 木摺り漆喰天井について.....	6
1.2 本研究における健全度の考え方と研究目的.....	8
1.3 研究の流れ .....	9
1.4 本論文の各章の構成 .....	10
1.5 用語の整理 .....	11
第1章の参考文献 .....	13

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 非構造部材の地震時の対策

近年、建築物の長期使用や長寿命化を考える際に、材料の観点による力学的特性や耐久性などといった狭義の品質だけでなく、損傷率、故障率、安全性などを含めた広義の品質という視点を加えて、平常時のみならず災害時の時間変化を含む使用環境を考慮した品質を確保する動きがある[1-1, 1-2]。そのような状況下で建築物全体の品質を概観すると、地震等の外力に対する耐震性が求められる構造部材は、要求される性能を実現するために多くの規基準が設けられている一方、構造部材の内外に付加される仕上材料は、居住性や美観性、躯体の保護等の多様な機能・性能が求められながらも、必ずしも規基準が拠り所とされているわけではない。このような観点から考えれば、必ずしも構造的な性能や安全性が求められるわけではないことが非構造部材として扱われる所以ではあるものの、地震等の外力が作用しても損傷等が発生しないことを示しているわけではなく、本来有していた使用状態が変化し建築物としての利用が困難になる場合があることは考慮する必要がある。

実際、平成23年に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、東日本大震災）では多くの建築物で非構造部材の損傷が報告された[1-3]。この背景には構造体の耐震性能が一定の水準にまで達したことや、地震動の卓越周期との関係によって、非構造部材の被害が顕在化しやすい環境下に置かれていたと捉えることもできる。したがって東日本大震災以降は、平成25年国土交通省告示第771号をはじめ、天井材等の非構造部材の落下における安全対応策の指針の制定などが進められており、構造部材に加えて非構造部材も包括した建築物の耐震性能を再考する段階へ移行したといえる。

非構造部材のうち特に吊り天井は、その納まりによっては構造部材と仕上材の挙動に乖離が生じることで損傷を起こしやすく、高所からの重量物の落下事象に繋がることもあるため、空間の用途・規模によっては直接的に人命に影響を及ぼす被害が生ずる可能性がある。そのため、東日本大震災を始めとする地震被害や規基準を踏まえた実現場での対応として、新規建築物における天井の耐震設計だけでなく、既存建築物の天井部材へも改修範囲が拡大されており、天井部材撤去による直天井化や仕上材の変更による軽量化、耐震工法による補強・再施工などが提案・実施されている[1-4]。

### 1.1.2 文化財建築物を取り巻く状況

東日本大震災以降、吊り天井における脱落対策が既存建築物含め急速に策定されている一方で、現段階において耐震改修の検討対象となる既存天井は、昭和30年代以降に導入された主に乾式仕上材と鋼製下地で施工された、いわゆる在来天井やシステム天井にとどまる[1-5]。それ以前の吊り天井下地は野縁や吊り木など、ほとんどの部材が写真1-1に示すように木材の軸組をもって構成されており、現在も歴史的建築物として多く残る。これらの天井納まりは幕末期以降から導入された西洋由来の建築技術や、日本古来の工法との組み合わせによって経験的に確立された経緯がある。それ故、近代建築技術の黎明期～発展期の建築物で適用された吊り天井下地・工法は、後年になって一般に体系化されたものとは異なる納まりや寸法、材料によって施工されていることがあり、個体差が大きい傾向がある[1-6]。また建設当時に西洋より伝来した技術が十分に咀嚼されないまま適用されたことで、不備が生じやすくなっている可能性も指摘されており[1-7]、仕様に則った耐力評価が困難であることが課題とされている[1-8]。

図1-1に文化庁の統計[1-9]を基に整理した文化財指定・登録数の年代別の変遷を示す。2020年の時点で文化財指定・登録された建造物は15000棟を超える。国宝・重要文化財・登録有形文化財に指定・登録されているもののうち近代以降～大正年間までに建設された築90年を超える建造物が全体の75%を占め、文化財登録制度が創設された1996年以降は登録数が急激に増加している。登録された建造物は保存活用の際し、意匠性・技術性・社会性などといった各側面からの保全が求められる。加えて、保全後の用途によっては建築物としての継続利用を図るために必要な使用安全性の確保を、文化的価値の保存と両立、もしくは優先順位を決定する必要がある。本研究で取り扱う天井部材であれば、改修後の用途や災害の想定規模に応じて、損傷の許容度やその場合の保存修復の可否を区分する必要性が問われている[1-10]。実際、長期使用された建築物で室内外の仕上材に損傷が発生すると、人的被害や躯体への影響の有無に関わらず、以降の安全性や部材補修の問題、心理的影響等の要因によって取り壊しが選択される事例が報告されているため[1-2]、材料・意匠を保持しつつ“使いながら保存”を目的とする文化財建築物において、仕上材については非構造部材の耐震性は重要な懸案事項となる。文化財の指定登録数および保護措置が必要な建築物の増加は、適用されている工法や、施工状態、経年状態も多様化していることを意味する。それに対応しうる、文化財保護の観点に立脚した劣化状態の統一的な評価方法、補修・修復方法の検討は、十分になされているわけではなく、より一層の知見の蓄積が必要といえる。

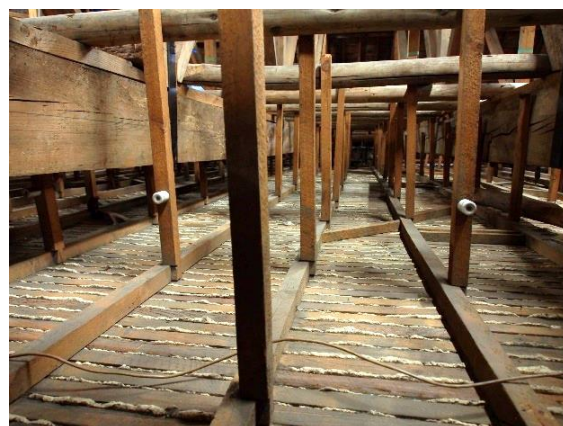
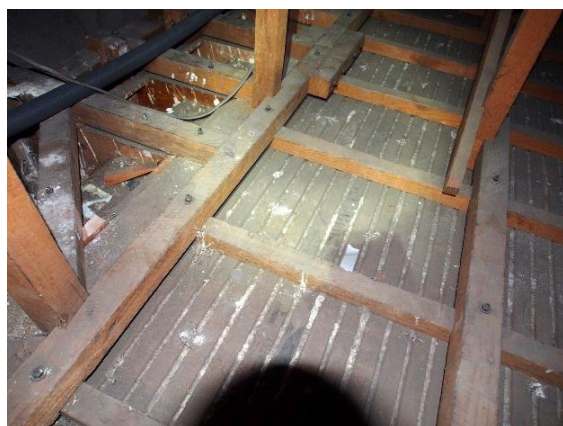


写真 1-1 木摺り漆喰吊り天井下地の例

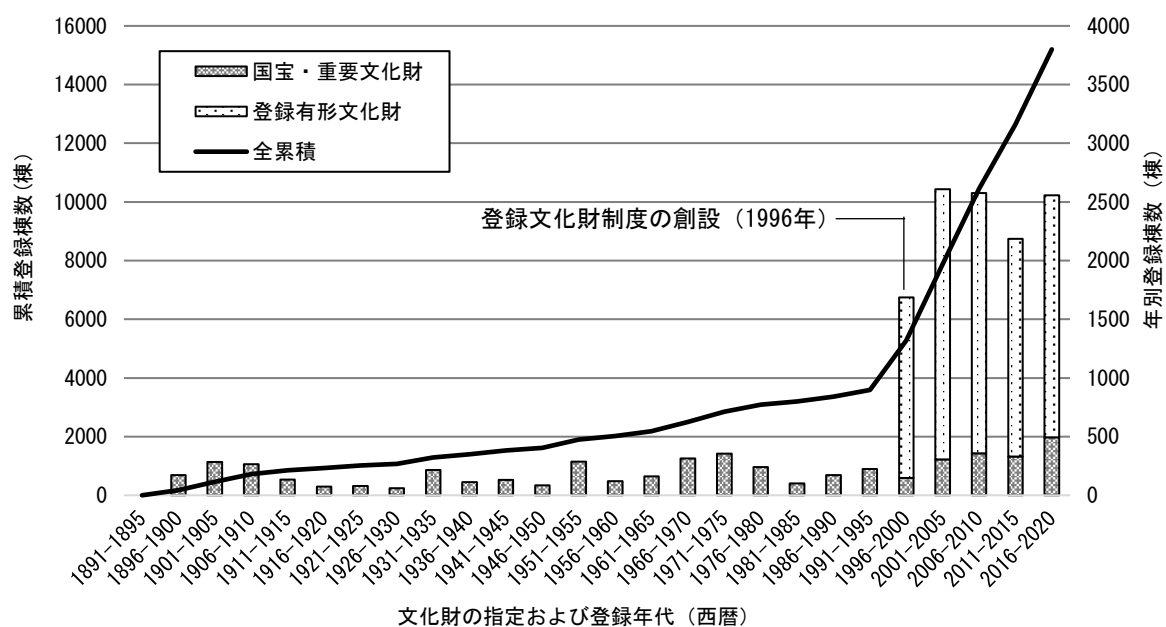


図 1-1 文化庁の統計により整理した文化財指定・登録数の年代別の変遷

### 1.1.3 木摺り漆喰天井について

吊り天井における仕上材は耐火性を考慮して不燃材料を選択する場合、昭和30年代に石膏ボードなどによる乾式工法が登場[1-5]するまでは漆喰やモルタル等の左官材に限られ、塗り厚にもよるが乾式材と比較して固定荷重が大きくなりやすい。例えば建築学会の荷重指針[1-11]において、一般的な厚さで乾湿仕上材を比較すると、漆喰  $t=15\text{mm}$  は  $88.5\sim 399\text{N/m}^2$  ( $5.9\sim 26.6\text{N/m}^2/\text{mm}$ ) で、石膏ボード  $t=12.5$  は  $73.8\sim 111\text{N/m}^2$  となり、漆喰のほうが4~5倍重くなることがある。左官材の塗り厚は現場の施工仕様や技術書等で目安（多くは3~6分：9~18mm厚）が設けられているものの、塗り下地の不陸やあばれ、剛性、ひいては職人が有する技能の程度などに影響を受ける。特に天井を施工する場合、塗り下地の種類・納まりによっては左官材を塗り付けた際にその質量や吸水によって鉛直方向に変形しやすく、平滑で上等な仕上がりを狙うほど塗り重ね回数が多く設けられることがあるので厚塗りになりやすい。また格調高く、かつ大勢人を集めるような建築・空間の天井はそれに見合う外観や天井高で設計されるため、その場合の仕上材は意匠や形状の自由度が高い左官材が自ずと選択されることが多い。つまり、人が多く集まることを念頭に置いた空間の天井は高く重厚に製作されることが多く、用途と意匠が相まって、天井材が損傷した際の人的被害のリスクが一般の居室よりも大きくなる可能性がある。実際に東日本大震災では経年した公共建築物の大空間において、ラスモルタルなどで仕上げられた天井（約  $755\text{N/m}^2$ ）の崩落事故が発生し、天井材の下敷きになるなどして死傷者が出た[1-12,13]。

建築工事標準仕様書の左官工事（以下、JASS15）においては、2019年改訂版[1-14]より「剥落安全性の確保」の項目から天井左官仕上仕様に関する内容が削除され、もし適用する場合は入念な施工とするよう記載されている。これは2007年改訂の前版[1-15]以降、先述の例に限らず様々な災害において天井左官仕上材の剥落が報告されていることを鑑みた措置であり、新規建築物において左官仕上天井がほとんど適用されていない、もしくは推奨していない現状を具現化したものといえ、左官天井が常用されていた時代の部材が多く残る歴史的建築物を持続的に活用していく際の整備・修復時の計画などではより一層の留意が求められる。

以上の背景を概観すると、現在も残存する天井左官仕上材は損傷時の懸念の大きさが顕在化しつつあるが、そこで多く適用されている工法のうちの一つが本研究で扱う「木摺り漆喰工法」である。これは幅40mm、厚さ10mm前後の小幅板を10mm程度の隙間（以下、目透かし）を空けて野縁や胴縁に打ち付けた下地（以下、木摺り下地）に漆喰を食い込ませて仕上げたもので、幕末期以降の近代洋風建築技術の伝来と時期を同じくして、日本古来の左官技術に組み込まれるかたちで天井や壁に広く普及したものである[1-16]。当該工法で施工された建築物は今日でも全国に数多く残存しているが、ひび割れ・浮きなどの不具合が発生しているものもある。また地震等の外力によって、美観性が顕著に損なわれたり、安全性・耐久性・使用性の低下が生じたりする懸念があることは、現在までの剥落事象からも明らかである。

木摺り漆喰工法の適用が進んだ背景には、大壁工法の洋風建築が多く建設された仕様の理由だけでなく、従来の小舞壁工法よりも工期が短縮できるメリットがあったことも挙げられる。他方では、洋風建築によくみられる壁と天井を蛇腹で繋いだ連続的な意匠を導入したり、天井材へ耐火性を取り入れたりすることもできたため、意匠面・機能面などのアプローチによって壁で適用された工法がそのまま天井にも拡大していった見方もできる。それを裏付けるが如く、木摺り漆喰工法普及期の文献・技

術書の一部では、「木摺り漆喰で天井を施工する場合の下地仕様は壁に倣う」旨の記載が散見される。連続的な意匠や性能を同一の工法で実現するのであれば合理的・効率的な施工方法であるといえるが、同一の工法・仕様で仕上げたとしても天井と壁では荷重の作用方向が異なるうえ、天井は剥落の懸念が壁と比較して高いため、別物として扱うのが妥当である。実際、塗り下地の仕様を壁と天井で区別する（目透かしを広く取る・下地は厚手のものを用いるなど）ように記載される文献も存在する[1-17]。

木摺り漆喰工法の普及に伴って、漆喰材料に加えて壁部材として見た場合の力学的特性・構造特性に関する研究は、テーブルテスト・実大試験などが昭和初期から行われており、一定量の知見[1-18～22 など]が蓄積されている一方で、天井材を対象にした検討例は非常に少ない。これは耐震性が特に重要視されていた我が国の土壌も影響していると考えられ、木摺り漆喰の大壁工法なる従来と異なる施工法が導入されれば、それが建物の耐震性への寄与の有無を判断したうえで適用された工法であるか否かは別として、その壁工法の耐震特性が研究対象として優先的に扱われることとなり、構造的に寄与するとは考えにくい天井部材の力学的特性が長らく触れられてこなかったことが合理的な解釈である。地震動の卓越周期との兼ね合いによって損傷を受ける部位が異なることもあろうが、壁体を含む構造体の耐震性評価の知見量、もしくは耐震性が後年の修復などで一定の水準を満足するようになったからこそ、木摺り漆喰天井を始めとする左官仕上天井の不具合が報告されるようになったといえる。その意味では、左官仕上天井も在来天井と同じ道を辿っていると考えられる。

木摺り漆喰天井を対象にした検討例は近年のものがほとんどであり、本論文の筆者らが関連する研究のほか、力学的特性や設計手法に関する検討がわずかに行われている程度[1-10, 23]であり、工法の変遷や、既存部材の具体的な健全度評価手法、保有耐力診断手法などは提案されていない。先述したように、新設の木摺り漆喰天井部材はかなり少ないことや、文化財登録数の増加を勘案すれば、既存の天井部材の力学的特性ならびに健全度を評価し、維持保全に繋げてゆくことで、補強の要不要だけでなく、適切な補強箇所・補強量の策定、不用意な部材撤去なども減らすことができ、歴史的建築物の保存活用にも寄与すると考えられる。

## 1.2 本研究における健全度の考え方と研究目的

図 1-2 に本研究の主たる範囲と健全度の位置づけのイメージを示す。本論文の主題にもある健全度という語は、取り扱う分野によって対象や解釈が異なるため、横断的な定義づけを行うことはできない。本研究における健全度の意味合いは、「木摺り漆喰吊り天井の材料や構工法、保有耐力（施工当初に有していたもの、現状で残存しているものを含め）を含めた力学的挙動」と位置づけた。それを評価するための力学的特性や評価手法そのものを策定するため、前項の背景も踏まえて本研究は以下の 6 つの目的で研究を行った。

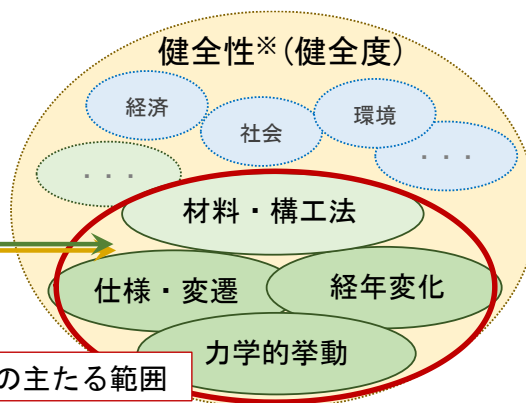
- 1) 木摺り漆喰工法ならびにそれを支持する木製吊り天井下地における構成部材の納まり・寸法などの仕様に関する年代の変遷を明らかにする。
- 2) 年代の変遷や実建物の天井仕様を反映させた試験体仕様で実験を行い、漆喰自体の力学的特性や木摺り漆喰部材、木製吊り天井における構成部材の各接合部を実情に即した形で明らかにする。
- 3) 既存木摺り漆喰天井部材を対象にした非破壊（画像解析・打撃試験）での健全度診断手法の検討と、診断結果と実物性との関連度を評価することで有用性を明らかにする。
- 4) 木製吊り天井下地および木摺り漆喰天井部材の力学的特性評価結果を踏まえて、当該工法の実際の保有耐力や余裕度（想定荷重に対する耐力の比）の予測を試みる。
- 5) 木摺り漆喰天井部材にいくつかのパラメータを設けたうえで振動試験を行い、動的な外力が作用した場合の損傷・剥落の挙動とパラメータの関係を明らかにする。
- 6) 実験室レベルで新規作製した試験体と実建物からの採取した経年材の力学的特性を比較して再現性を確認し、経年材採取等による歴史的建築物の負担を減らせるかどうか検討する。

### 本研究の主題：

「木摺り漆喰吊り天井の力学的挙動と  
持続可能な利活用に向けた  
健全度評価手法の提案」

広義な意味合いを持つ「健全性・健全度」  
本研究では建築材料的アプローチを図る

本研究の主たる範囲



※これは概念的な図であるため、研究主題とは異なる定性的な表現とした

図 1-2 本研究の主たる範囲と健全度の位置づけのイメージ



### 1.3 研究の流れ

図 1-3 に本研究の主題・本論構成・研究の流れとのつながりを示す。第4章までは、木摺り漆喰工法の変遷や基礎的な力学的特性といった一般解としうる要素を論ずる。第5章以降は、実建物を対象とした個別解にはなるが、第4章までの結果を用いながら既存天井部材の経年変化や保有耐力の評価方法、天井の損傷メカニズムに関する検証を行ったうえで、木摺り漆喰天井における材料的観点に立脚した健全度評価に繋がる一連のプロセスを提案する。

## 「木摺り漆喰吊り天井の力学的挙動と持続可能な利活用に向けた健全度評価手法の提案」

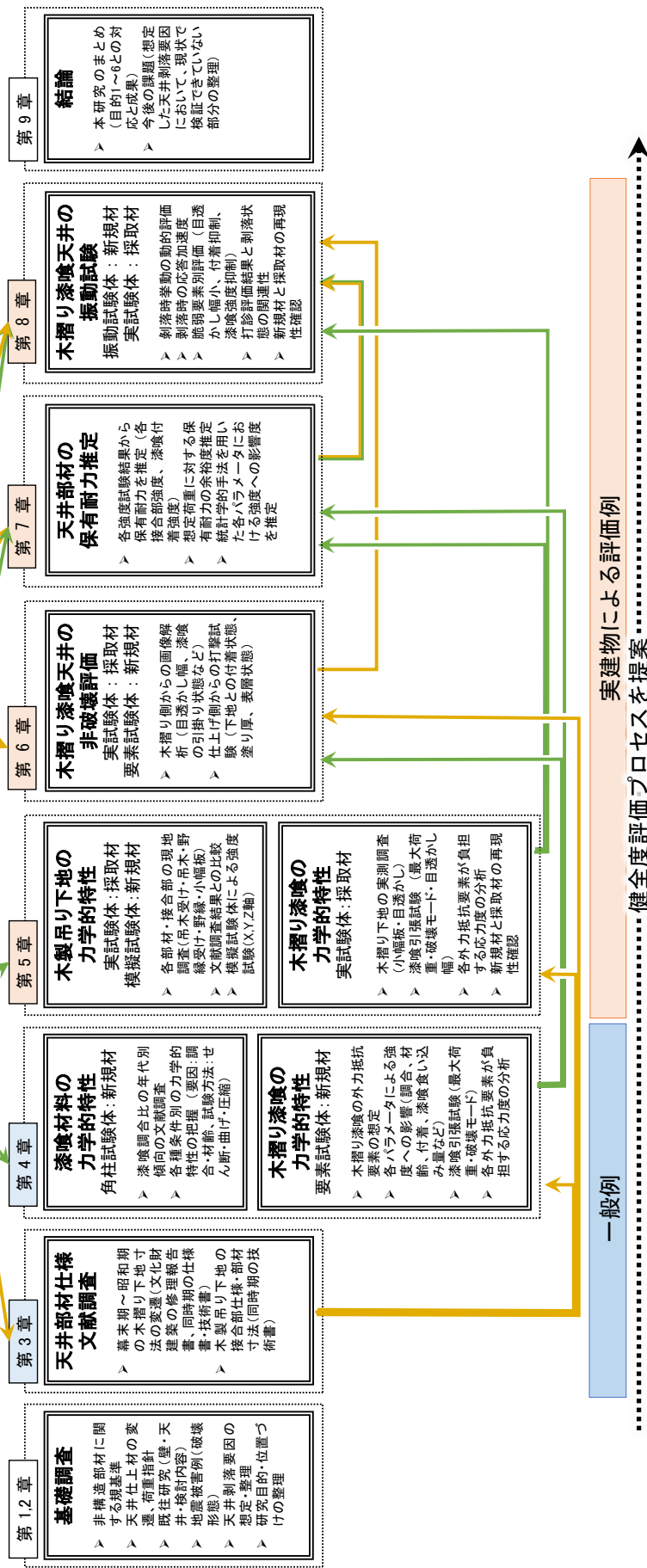


図 1-3 本研究の主題・本論構成・研究の流れとのつながり

## 第1章 序論

### 1.4 本論文の各章の構成

#### 第1章 序論

- ・ 研究の背景
- ・ 本研究における健全度の考え方と研究目的
- ・ 研究の流れ
- ・ 本論文の各章の構成
- ・ 用語の整理

#### 第2章 木摺り漆喰工法の力学的特性と健全度評価・維持保全手法に関する既往の研究

- ・ 木摺り漆喰工法の工法的研究について
- ・ 木摺り漆喰天井等における修繕・保存事例
- ・ 木摺り漆喰天井の損傷要因を踏まえた本研究の位置づけ
- ・ 木摺り漆喰天井の損傷要因の洗い出しと本研究での評価項目

#### 第3章 木摺り漆喰工法に関わる時代的変遷の調査

- ・ 木摺り漆喰工法の出現から日本へ導入される過程
- ・ 日本における木摺り漆喰工法の体系化と実仕様に関する文献調査
- ・ 木摺り漆喰天井を支持する木製吊り天井下地の年代別仕様に関する文献調査

#### 第4章 木摺り漆喰天井における基礎力学的特性の実験的検討

- ・ 木摺り漆喰天井の外力抵抗要素
- ・ 材料の調合比について
- ・ 漆喰材料の基礎力学的特性に関する実験概要
- ・ 漆喰材料の基礎力学的特性に関する実験結果および考察
- ・ 木摺り下地と漆喰の外力抵抗性に関する実験概要
- ・ 要素試験体による木摺り漆喰天井の力学的特性に関する実験結果および考察

#### 第5章 実在する建築物から採取した木摺り漆喰吊り天井を対象とした各種評価

- ・ 調査・検証概要
- ・ 模擬試験体の実験概要
- ・ 実試験体を用いた漆喰付着強度試験
- ・ 木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の算定

#### 第6章 実在する建築物から採取した木摺り漆喰吊り天井に対する非破壊試験による力学的健全度評価

- ・ 天井裏からの撮影画像による各種画像解析
- ・ 天井仕上面からの打撃試験による健全度評価

#### 第7章 実験結果を基にした木摺り漆喰天井の保有耐力に関する解析的検討

- ・ 天井全体でみた各保有耐力・余裕度の算定
- ・ 木摺り漆喰部材の剥落抵抗性における統計学的手法を用いた分析

#### 第8章 木摺り漆喰天井部材における外力抵抗条件ごとの剥離・剥落状況の実験的検証

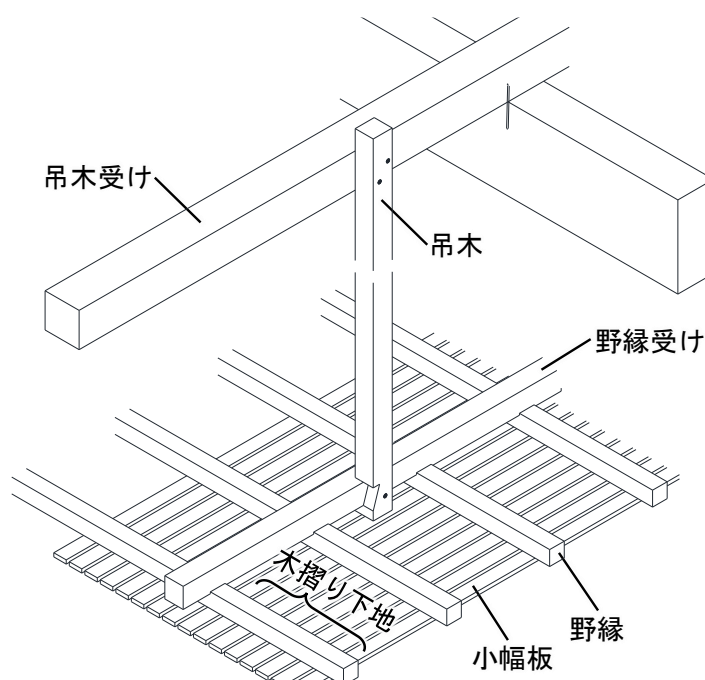
- ・ 振動試験準備の概要
- ・ 振動試験の概要
- ・ 画像解析・振動試験結果・考察

#### 第9章 本研究の結論と今後の展望

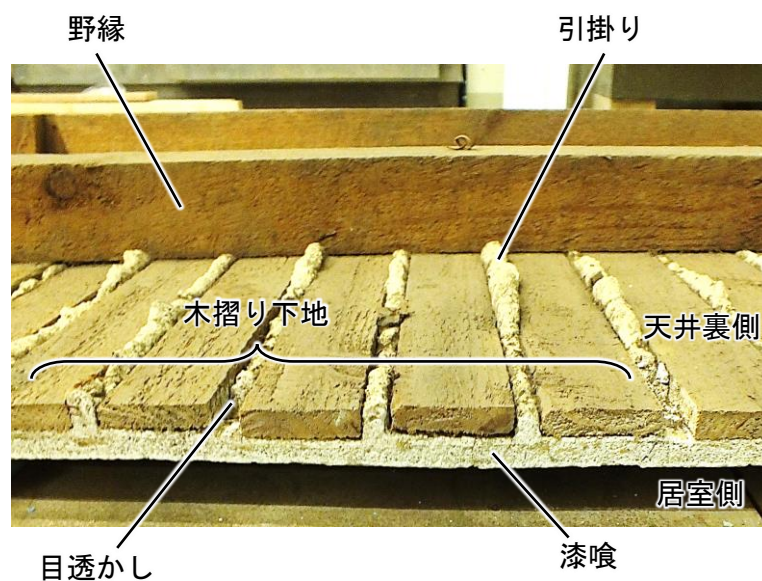
- ・ 本研究の結論
- ・ 木摺り漆喰天井とその関連工法の健全度評価手法の拡充に向けた展望

## 1.5 用語の整理

ここでは本論で取り扱う木摺り漆喰工法に関連する主な用語とその定義を図1-4、表1-1のとおりに整理する。天井部材の用語は文献によって異なることが多く、例えば「木摺り下地」では「木摺下地」「木ずり下地」、「目透かし」では「明き」「空き」「透かし目」などの表現が散見される。よって本論で用いる用語は JASS11 木工事[1-24]、JASS15 左官工事[1-14,15]、日本建築辞彙[1-25]を始めとする学術資料内の使用頻度を参考に統一して使用することとし、各章で単独で用いる用語はその都度注釈する。



a) 木製吊り天井下地の各部位



b) 木摺り漆喰天井の各部位

図1-4 一般的な木摺り漆喰天井の部材納まりと名称

表 1-1 木摺り漆喰工法に関連する主な用語とその定義

総称	名称	説明
木摺り漆喰	吊り天井下地	吊木受け
		吊木
		野縁受け
		野縁
	木摺り下地	小幅板
		目透かし
		下げ苧
		寒冷紗
		食い込み
		ひら開き
		引掛り
		漆喰
		石灰
		貝灰
		スサ
		糊

第1章の参考文献

- [1-1] 田村雅紀, 野口貴文, 友澤史紀: コンクリート構造物における環境側面と社会ニーズ抽出手法に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.1501-1506, 2005
- [1-2] 岡健太郎, 田村雅紀: 構造物の災害対応を含めた LCM 戦略, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, Vol.14, pp.295-302, 2014
- [1-3] 日本建築学会: 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 丸善出版, 東京, 2011
- [1-4] 日本建築学会: 天井等の非構造物材の落下に対する安全対策指針・同解説, 丸善出版, 東京, 2015
- [1-5] 真鍋恒博, 大元康司: 我が国におけるシステム天井構法の変遷: 現代の建築部品・構法の変遷に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 67 巻, 第 560 号, pp.143-149, 2002
- [1-6] 源愛日児: 木造軸組構法の近代化, 中央公論美術出版, 東京, 2009
- [1-7] 長谷川直司: 歴史的建造物の保存・再生・活用 -守るべき価値・困難な状況・求められる技術-, 実験力学, Vol.21, No.2, pp.73-76, 2021
- [1-8] 日本建築学会: 天井等の非構造物材の落下事故防止ガイドライン, 2013
- [1-9] 文化庁: 国宝・重要文化財等都道府県別指定件数一覧,  
<http://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/shokai/shitei.html>, (参照 2022.12)
- [1-10] 岩田昌之, 津和佑子: 天井部材の構造安全性について, 文建協通信, 121 号, pp. 34-41, 2015
- [1-11] 日本建築学会: 建築物荷重指針を活かす設計資料 1, 2016
- [1-12] 川口健一, 木村勉, 津村泰範, 大場康史, 中楚洋介, 川崎香織, 岡 建司, 上村一貴: 九段会館ホール天井落下事故に関する調査報告(その 1: 天井の力学的挙動調査と落下過程の推定), 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 56 号, pp.461-466, 2018
- [1-13] 木村勉, 津村泰範, 川崎香織, 岡 建司, 川口健一, 大場康史, 中楚洋介, 上村一貴: 九段会館ホール天井落下事故に関する調査報告(その 2: 歴史的背景と天井工法の復元考察), 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 57 号, pp.855-860, 2018
- [1-14] 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 15 左官工事 2019 改訂版, 2019
- [1-15] 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 15 左官工事 2007 改訂版, 2007
- [1-16] 近藤豊: 明治初期の擬洋風建築の研究, 理工学社, 1998
- [1-17] 吉田亨二: 漆喰壁の知識、建築學會パンフレット 第 3 輯第 10 号、1930.7
- [1-18] 田邊 平學, 後藤 一雄, 菊田 守雄: 交番水平荷重を受ける木造有壁骨組(大壁)の實驗, 建築學會論文集, 13 巻, pp.210-219, 1939
- [1-19] 朝倉均, 鈴木秀三: 木摺り両面張り真壁耐力壁の倍率評価に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.321-322, 2001
- [1-20] 松本直之, 藤田香織, 佐藤利昭, 朝光拓也: 近代木造建築における洋風壁構法の研究 構成要素分析及び構造性能の実験的検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.573-574, 2011
- [1-21] 藤原大輔, 石 大樹, 宮原作太, 木村将士, 古川 洋: 旧岩崎家住宅の耐震性能を確認するための実験的研究 その 3 木摺漆喰壁、木摺漆喰+斜め板貼り壁の水平加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.315-316, 2016

## 第1章 序論

- [1-22] 松本直之, 藤田香織: 近代木造建築の外周壁構法に関する研究 その6 木摺漆喰壁(真壁)の要素せん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.277-278, 2017
- [1-23] 津和佑子, 今井琢也, 藤本貴之, 岩田昌之, 腰原幹雄: 木摺漆喰天井における漆喰の喰いつきに関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第23巻, 第54号, pp.493-496, 2017
- [1-24] 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 11 木工事 2005年改訂版, 2020
- [1-25] 中村達太郎: 日本建築辞彙, 改訂増補版, 丸善, 1948

## 第2章

### 木摺り漆喰工法の力学的特性と

### 健全度評価・維持保全手法に関する既往の研究

## 第2章 木摺り漆喰工法の力学的特性と 健全度評価・維持保全手法に関する既往の研究

2.1 第2章の概要 .....	17
2.2 木摺り漆喰工法の工法的研究について .....	17
2.2.1 木摺り漆喰工法が適用された壁部材・天井部材の扱いの差異 .....	17
2.2.2 壁部材に関する研究 .....	17
2.2.3 天井部材に関する研究 .....	18
2.2.4 施工法の観点で見た研究 .....	18
2.3 木摺り漆喰天井等における修繕・保存事例 .....	21
2.4 木摺り漆喰天井の損傷要因を踏まえた本研究の位置づけ .....	24
2.4.1 既往研究の概観 .....	24
2.4.2 既往研究を踏まえた本研究の位置づけ .....	24
2.5 木摺り漆喰天井の損傷要因の洗い出しと本研究での評価項目 .....	26
第2章のまとめ .....	29
第2章の参考文献 .....	31



### 2.1 第2章の概要

木摺り漆喰工法は壁や天井で適用されたのは先述したとおりであるが、構造的要素のある壁工法は昭和初期から実大サイズでの検証が行われてきたのに対し、天井工法は非構造部材として扱われてきた経緯があり、主たる研究対象として扱われたのは、近年の地震等における天井部材の損傷が特に顕在化した以降である。本章では、木摺り漆喰工法の壁部材・天井部材に既往の知見について力学的特性や災害等での損傷事例、維持保全手法に関して壁・天井を包含して整理したうえで、本研究の位置づけを示すこととする。

### 2.2 木摺り漆喰工法の工法的研究について

#### 2.2.1 木摺り漆喰工法が適用された壁部材・天井部材の扱いの差異

西洋由来の技術である木摺り漆喰工法の我が国における適用は壁・天井部材ともに幕末期から用いられた記録が残っているが（第3章で詳説）、その力学的特性に関する研究は建物の耐震性などの観点から主に壁部材を対象に実施されている。基本的な納まりは類似しているので壁と天井で互換できる考え方があることは先に述べたとおりであるが、荷重の作用方向（部材面の向き）が壁と天井では異なり、天井部材ならびにその仕上材に作用する外力は基本的に面外方向と考えられるため、壁部材より危険側の条件にあると考えられる。そのほか、吊り下地を有する天井であるならば、その接合部の経時的な寸法変化に起因する仕上材に対する面内、面外方向の外力や、壁との取り付け部における挙動など複数あるが、そのような内容を取り扱う知見は確認できておらず、木摺り下地と漆喰の付着性などといった力学的特性について論じた近年の研究にとどまる。

#### 2.2.2 壁部材に関する研究

木摺り漆喰壁に関する知見は、木造建築の壁体工法全般を扱う研究において木摺り漆喰工法も対象となっている形態が大半を占める。古くは河野（1938(昭和13)年、[2-1])、田邊ら（1939(昭和14)年、[前掲 1-18]) による報告があり、当時一般に用いられていた小舞壁や羽目板などとのせん断抵抗や破壊性状の比較を柱1スパン（半間程度）の試験体によって試みていた。また2000年代までの実験的研究報告は、伝統木造建築の構造評価・設計資料化を目的としたもの[2-2]や、個別物件の対応を絡めた現行の耐力壁倍率評価法（仕上材の耐力が考慮されていないもの）に則ったもの [前掲 1-19]などに留まっていた。

2010年代に入り、木摺り漆喰工法を含む近代木造建築の壁工法に関する年代の変遷・力学的特性を体系的に分析したものとして、松本らをはじめとする一連の研究が主要な成果として挙げられる。これは、幕末期～昭和初期に建設された近代洋風建築の修理工事報告書など61件を調査し、壁工法や木摺り下地寸法の時代的変遷[2-3, 4]を明らかにすると共に、その結果や実物件仕様を基にした構造性能の検証[前掲 1-20～22]を実施し、耐力推定のための基礎的資料や評価手法の提案を行っている。

また同氏は東日本大震災による木摺り漆喰壁の振動被害例についても調査を行っており、それによると損傷形態は仕上材（塗土、漆喰）の亀裂および剥落がほとんどで、木摺り下地に座屈や折損は認められないと報告されている[2-5～8]。

### 2.2.3 天井部材に関する研究

先述のとおり、木摺り漆喰工法の天井部材が研究対象とされたのは東日本大震災以降が主であり、本論文で扱う筆者らのほかは、津和らによる研究に留まっているのが現状である。津和らは、木摺り漆喰天井における木摺り下地と漆喰の付着条件（喰いつきと呼称）に関し、漆喰引掛り部分や小幅板との付着部分等の抵抗バネを詳細に定義して実験的検討を行っている。試験体のパラメータには目透かし幅・漆喰食い込み深さ・小幅板の断面形状・寒冷紗伏せ込みの有無などを設け、面外・面内載荷によって強度試験を行い、破壊モードと最大強度から各抵抗バネの特性値および力学的モデルを構築しており、設計時を念頭に置いた部材最大耐力の算定式を提案している[前掲 1-23]。

また、「重要文化財（建造物）耐震診断指針」における機能維持水準、安全確保水準、復旧可能水準の区分を例に出しつつ、修理対象建築物の部屋の機能によっても天井部材に求められる性能が異なるため、それに応じた改修・補修方法を取捨選択する必要性を指摘している。また、改修・補修の対象となりうる部位は吊り天井であるならば、吊り元（吊木、野縁受け、野縁など。構造体は十分な耐力を有していることが前提）から考慮する必要があるとし、全ての部材の強度を確認しなければ安全な天井と判断できないため、調査や補強の難しさも重ねて指摘している[前掲 1-10]。

加えて同氏は木摺り漆喰天井の損傷例についても調査を行っており、損傷部材が置かれていた環境と破壊モードを照合し長期的要因・短期的要因を整理しており、剥落の発生にはこれらの要因が複合的に影響しあうとしている。長期的要因は経年劣化による木摺り下地の収縮、雨漏り、乾湿繰り返しによるムーブメントなど、短期的要因は地震力による部材の面外・面内変形によるものとされている。施工要因は漆喰の目透かしへの食い込みムラ・不足や、特殊な例では音楽ホールのパイプオルガン上部の音波振動によるダメージ蓄積を列挙している。そのほかの例として2016(平成28)年の熊本地震では、当時築97年の銀行建築（煉瓦と鉄筋コンクリートの混構造）において木摺り漆喰天井の剥落記録があり、壁に近い天井外周部や天井飾り周辺で発生、漆喰の塗り厚は40mm程度であったことが報告されている[2-21]。いずれの損傷例も木摺り下地と漆喰の界面で剥落するもので、損傷形態は壁部材と類似するものとなっている。また、木摺りと漆喰の肌別れが起きると当該部の荷重が周辺部へ転嫁される状態となって最終的に剥落へ繋がると分析しており[前掲 1-10]、この事象は常に鉛直荷重が作用する天井部材特有の破壊形態であると推察される。

木摺り漆喰天井は出自が非構造部材であり、かつ天井材の損傷自体が近年顕在化した課題であるので、災害等における損傷報告例が少ないのが現状であるため、今後は調査・報告対象に含めてゆくことが肝要であると考えらる。

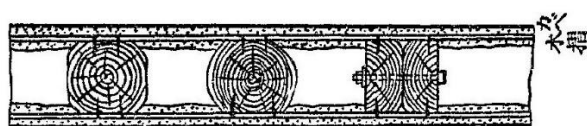
### 2.2.4 施工法の観点でみた研究

壁や天井といった部材としての力学的特性だけでなく、施工法の観点から木摺り漆喰工法の導入期～成熟期の教育者や研究者が著した文献を以下にまとめる。なお、文献では施工法と併せて木摺り下地の寸法仕様などにも触れられていることが多いが、本節で扱うのは前者に限定し、後者の解説は第3章に譲る。また、文献内の表現を一部抜粋しているが、「(ママ)」と記載なき限りは筆者による現代語訳を掲載している。

木摺り漆喰工法の施工の観点で触れられている最初期の例は、中村（達）著の「建築学階梯」（1888(明治21)年、[2-9]）であり、木摺り下地の寸法や固定方法、漆喰の施工方法に至るまでの内容が、壁と天

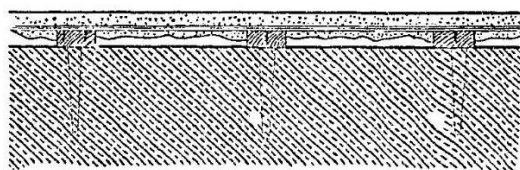
井を区分して詳細に記載されており、「目透かしに漆喰を食い込ませると落ちにくくなる」、「木摺り下地の端は重ねない」といった表現がみられる。

続いて滝著の「建築学講義録」(1898(明治31)年、[2-10])では漆喰の食い込ませ方に関して、「木摺りを打ち付ける下地(胴縁・野縁など)の幅は二寸以下しなければその部分の漆喰の食いつきが悪くなる」「柱などの太い角材の場合は面取りを行うか、一寸六分幅くらいの小幅板をかませて木摺り下地をふかすと良い」と述べられている。同様の表現は三橋著の「和洋改良大建築学」(1904(明治37)年、[2-11])にもみられ、さらに「漆喰を塗るときは十分に鋤で押し付けて、第百八十六図(図2-1a)、第百八十八図(図2-1b)の如く木摺りの裏面に飛び出すようにすると良い」、「漆喰が厚くなる部分には第百八十七図の如く(図2-1c)釘や麻苧を取り付けると剥落を防げる」など、図解付きでより詳細に施工仕



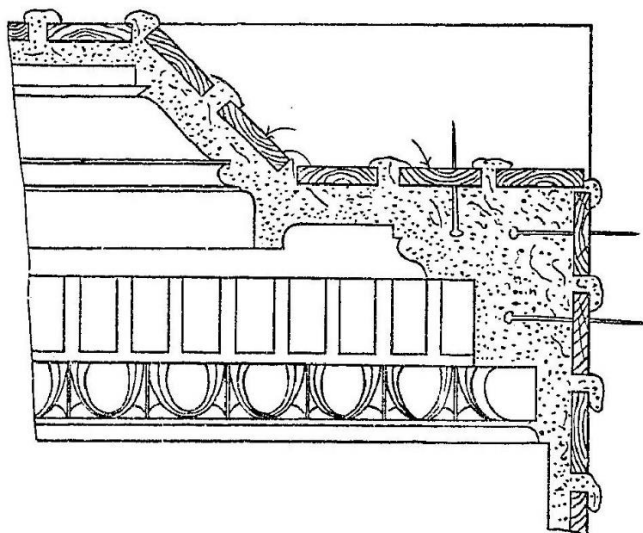
第百八十六図

a) 木摺りを取り付ける下地を面取りした様子(左側2部材)を示したもの



第百八十八図

b) 漆喰の食い込み状態や、それを促すために木摺り下地をふかした様子を示したもの



第百八十七図

c) 漆喰の引掛けや蛇腹の厚塗り部分の納まりを示したもの

図2-1 「和洋改良大建築学」[2-11]における附図

様に触れられている。これらは木摺り漆喰工法の導入初期～普及期に刊行された文献であるが、この頃には既に漆喰の食い込みや開きに関する特性が認識されていたことが伺える内容となっている。

大正期に入ると各建築工事施工仕様の標準化を図るため、建築學會（現、日本建築学会に）によって「建築工事標準仕様書」（1923(大正 12)年、[2-12]）が編纂された。今日の JASS15 左官工事（以下、JASS15）に該当する項目も当然に記載はあるが、この仕様書の編纂までに多く出現していた技術書や工法を網羅的に整理する役目があったためか、先述の明治期の技術書と比較して木摺り漆喰工法に関する内容は「下げ苧は六寸間隔で千鳥に打ち、下塗りは木摺り面より厚さ一分、斑直しは二分…」など、より仕様の、定量的な表現へ変化している。ただし、「下塗ハ裏面ニはみ出スヤウ押附ケ…（ママ）」との記載はあることから、漆喰の引掛りを施工者に留意させたい意図は伝わるようにしていることが推察される。

建築工事仕様の標準化は第二次世界大戦を挟んだ 10 年間の中断後、1951(昭和 26)年から仕様書の改正が再開された。JASS15 初版は 1957(昭和 32)年に刊行されており、その仕様書案が「日本壁の研究」（1954(昭和 29)年、[2-13]）の付録に掲載されている。この文献は JASS15 初版編集委員の幹事であった中村(伸)によるもので、当時、伝習的な性格が強かった日本の左官材料・技法について材料学的に定量化された研究成果がまとめられており、この過程での知見が JASS15 初版の内容に影響を与えている。木摺り漆喰工法の施工法については、小幅板の素性がよいもの（節があるものはシミになる、乾燥不十分なものは後で暴れる）を選ぶことや、天井を施工する場合は漆喰の砂を少なく、ノリは多く、塗り厚は薄くして軽量化を図ることに触れられている。漆喰の食い込みに関しては述べられていないが、既に一般化した施工事項であったとの解釈もできる。

明治期以前の日本・西洋における左官工法の歴史をまとめた資料として、山田著の「日本の壁」（1982(昭和 57)年、[2-14]）がある。同氏は、1961(昭和 36)年に博士論文「日本壁の歴史的研究」を執筆しており、それに関連する研究成果を整理するかたちで同書を著している。同氏は、西洋の建築技術が導入されるタイミングで、日本の左官技術は既にそれを比肩、または凌駕する水準になっていたとし、新たに導入された技術を当時の日本の左官職人が咀嚼するのに、それほどの困難はなかったと考察している。一方では、同時期に導入された木摺り漆喰工法については、工期の短さによる利点を認めつつも日本の土壌や建築とは相性が悪く、「構造的な問題」があると述べている（第3章で詳述）。

古くから発展してきた左官材料・技法を、材料学、施工、性能、不具合などの各側面から体系的にまとめた文献として、馬場著の「塗り壁と建築」（1988(昭和 63)年、[2-15]）がある。同氏は、左官材料をはじめとする広範な仕上材料に関して多くの学術的資料を残しており、土壁、ラスモルタル、メーソソリ、押出成形セメント板まで材料的・年代的に幅広い分野で研究を行っている。また、左官材料の損傷要因として材料の不良（材料自体の品質、材料の組み合わせ）のほか、面内外のムーブメント（地震荷重や温湿度変化による）を述べており、特に後者についてはムーブメントに対する追従性や接合部の靱性確保など、現在でも課題とされている内容を提唱している。

### 2.3 木摺り漆喰天井等における修繕・保存事例

歴史的建築物の保存修理工事時などにおいて天井は非構造部材であるが故に、その工事区分（耐震補強、外観修繕、解体、半解体など）によって扱いが大きく異なり、そのまま存置（修繕対象外という意味合い）や、仕上面の清掃・再塗装、漆喰層または下地ごとの再施工など例が多く、既存材料を活用して改修・修繕等を行った事例は非常に少ない。ここでは木摺り漆喰天井等（そのほかの左官塗り天井も含む）における既存天井部材の保存活用事例を表 2-1 に整理した。

既存天井部材の保存事例として、対象部材の歴史性を鑑みて一切手を加えず、剥落を前提としたシェルターを新設するような設計がなされたり、剥落を防止するために仕上面側から補強材を面的に被覆して縫い付けたりなど、両極端ともいえる事例がある。歴史的建築物の保存では、対象建築が有する文化的価値の大きなウエイトを占めることが多い「外観意匠」と、不特定多数の利用者をもって建築物を活用するために不可欠な「安全性」が常にトレードオフの関係にあると言っても過言ではない。筆者らが以前実施した木摺り漆喰天井における浸透性アクリル樹脂による補修も、天井裏からの施工で完結することや、仕上面の外観に影響が出にくいなどの利点がある一方で、既存漆喰の疎密やひび割れによっては樹脂が漏れ出す可能性があるほか、金物などによる補強と異なり、既存材料へ樹脂を浸透・一体化させるため、可逆性を有していないなどの課題もある。天井部材に限定されたことではないが、建築物の安全性を考える上での最低条件は「人的被害が発生しないこと」であり、それに既存天井部材の保存活用を当てはめると「部材の損傷をどこまで許容するか」という要素が加わる。すなわち、補強対象部材の状態を事前に評価して、[前掲 1-10]で述べられていたように「守るべき価値」や、修復工事の工程、修復工事後の建物用途、要求される安全性などを総合的に鑑みてから、既存部材への手の手の加え方を選択する必要があるといえる。

図 2-2 に既存天井部材の改修・修繕の概念図を示す。a)～c)は、表 2-1 で示した修繕事例を模式図化したうえで、「既存材に付加される外力抵抗性」「既存材の意匠・材料保存性」の尺度をもって評価した。それを背景にすると、天井部材の技術・工法的価値が高かったり、再現が難しい装飾などが施されていたりした場合は、オリジナル部材が被覆されるような方法（ここでの c)）はできる限り避け、外観が維持される補修工法（a), b)など）を適用することも選択肢としてある。

そのほか、天井材の剥落に対する安全性向上について考え得るの方法例を図 2-2 の d), e)に示す。d)は、利用者や文化的価値の影響が少ない領域を剥落させてエネルギーを相殺するものであり、e)は破片が軽く小さくなるような剥落形態へ誘導したりすることで、人命および最低限の重要区画を保護する考え方である。これらはまだ実現していないものであるが、このようなアプローチもあるものとしてここで示しておく。

表 2-1 既存天井部材を活用した改修・修繕の事例 [2-16~20]

建築物	既存天井の工法	保存方法
1872(明治 5)年竣工 旧富岡製糸場 ・西置繭所 (第 3 章でも解説)	木摺り漆喰 (現存最古)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤現存する最古の木摺り漆喰天井であることから、オリジナル部材に手を加えずに安全に保存することを目的としている。</li> <li>➤ガラス・鉄骨フレームを建物内部に新設したハウス・イン・ハウス方式とし、躯体の補強と天井剥落時のシェルターを兼ねている。</li> </ul>
1911(明治 44)年竣工 岩手銀行旧本店本館 (筆者らによる施工。技術展開資料にて詳説)	木摺り漆喰	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤天井裏側(ふところ側)から木摺り下地を貫通、漆喰中塗り程度まで穿孔し、浸透性アクリル樹脂を注入・浸透させて下地と漆喰、および漆喰層自体の固着を目的としている。</li> <li>➤樹脂施工は漆喰に生じた貫通ひび割れの外縁部に沿って行い、剥落の起点になりうる漆喰の片持ち支持部位を縫い付けるように補強している。</li> </ul>
1925(大正 14)年竣工 早稲田大学 2 号館	ラスモルタル (漆喰仕上げ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤天井の仕上面側から外壁複合改修構工法(ピンネット工法)を応用した方法で補強を行い、仕上材の剥落防止としている。</li> </ul>
1927(昭和 2)年竣工 某ホテル・宴会場	ラスモルタル (漆喰および石膏 レリーフ仕上)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤天井下地と躯体を緊結し、地震時の揺動を抑制する。</li> <li>➤漆喰表面に PP 製メッシュシートを貼り付け、仕上層を貫通ボルトとアングル材で挟み込んで縫い付け、肌別れ剥落を防止する。</li> <li>➤アングル材と躯体大梁をワイヤーで締結して落下時の冗長性を向上させている。</li> <li>➤レリーフは生かし取りして裏面を裏打ち補強し、天井との固定ワイヤーは銅線からステンレス線へ変更して再取付している。</li> </ul>

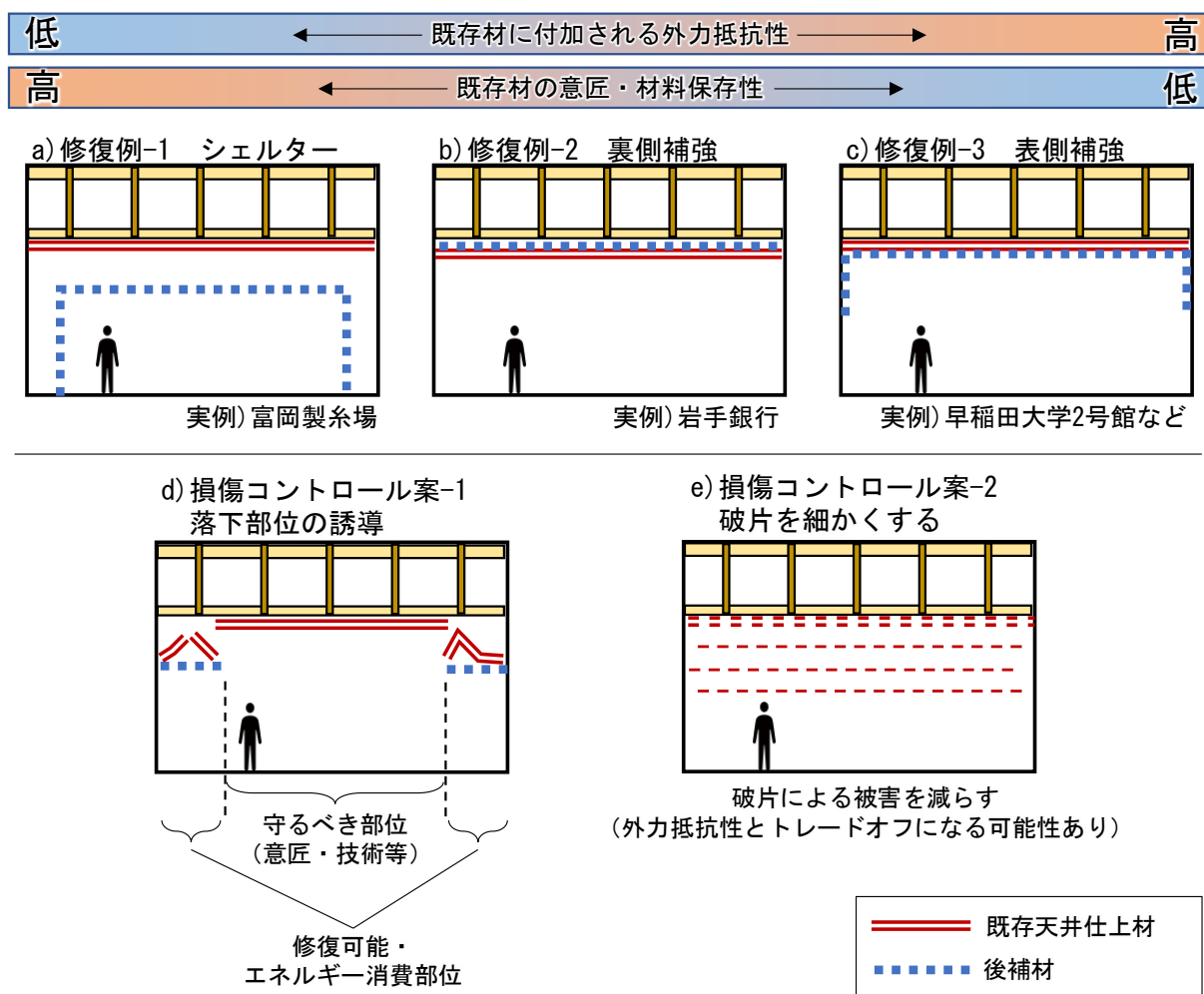


図 2-2 既存天井部材の改修・修繕の概念図

## 2.4 木摺り漆喰天井の損傷要因を踏まえた本研究の位置づけ

### 2.4.1 既往研究の概観

前節までに、木摺り漆喰天井に関連する先行研究を整理した。これらにおいて現時点で未検討な部分、および言及できる部分は以下のとおりである。

- 1) 木摺り漆喰壁については下地の変遷等の工法的特徴やそれを踏まえた構造的性能の評価が行われ知見が拡充しつつあるも、天井部材については特に工法的特徴に関する情報の蓄積が無く、木摺り下地と漆喰の付着性能に関わると考えられる目透かし幅等の年代別整理がなされていない。
- 2) 木摺り下地と漆喰の付着条件に関する抵抗要素は細かく区分され、各要素の特性値が提案されているが、実際の建物仕様を踏まえたモデル化や既存天井の構造性能評価手法の検証を進めることが課題とされている。
- 3) 天井の安全性は木摺り漆喰部材だけでなく、その上部架構（吊り下地など）の安全性判断も必要と言及されているが、実仕様の複雑さや時代的変遷も整理がなされていないことも相まって、具体的な検討事例が不足している。
- 4) 木摺り漆喰天井の剥落条件は木摺り下地と漆喰の肌別れが発端で、かつ鉛直荷重が重要な要素になっていることが判明しつつあるも、その状態の判定手法に関する検討が不足しているだけでなく、肌別れから剥落に至るメカニズムが実験的に実証されているわけではない。また、肌別れの判定手法の検討不足は、既存天井部材を活用した保存手法の難しさにも影響を及ぼしており、不必要な材料の滅失、過剰な補強に繋がる可能性がある。

### 2.4.2 既往研究を踏まえた本研究の位置づけ

図2-3に本研究の位置づけの概念を示す。現段階で検討が不足している領域について、建築材料学観点に立脚した本研究での位置づけを第1章1.2に示した「研究の目的」と関連づけて下記に整理する。この位置づけから研究を実施することで、本研究における健全度評価の観点による「歴史的建築物における木摺り漆喰天井の既存材の耐震性評価および保存活用」に寄与できると考える。

- 1) 木摺り漆喰工法を用いた内装材のうち、検討範囲は現状で知見が不足している「木摺り漆喰天井」「木製吊り天井下地」とし、時代的変遷の整理から行う。（目的1）
- 2) 「木摺り漆喰天井」と「木製吊り天井下地」の強度試験体の基となる仕様情報は、修理工事報告書や実建物の調査結果を踏まえたものとして、より実情に沿った検討を行う。（目的1,2）
- 3) 現在までほとんど試みられてこなかった既存天井の健全度評価手法の策定を行うことで、歴史的建築物の保存にあたって既存天井の存置・活用の一助となるような情報の蓄積を図る。（目的3,4,6）
- 4) 漆喰剥落のメカニズムを実大試験体で動的に検証することで、破壊の起点や進展の形態を確認し、効率的かつ的確な補修に繋げられるようなデータの蓄積を図る。（目的5）



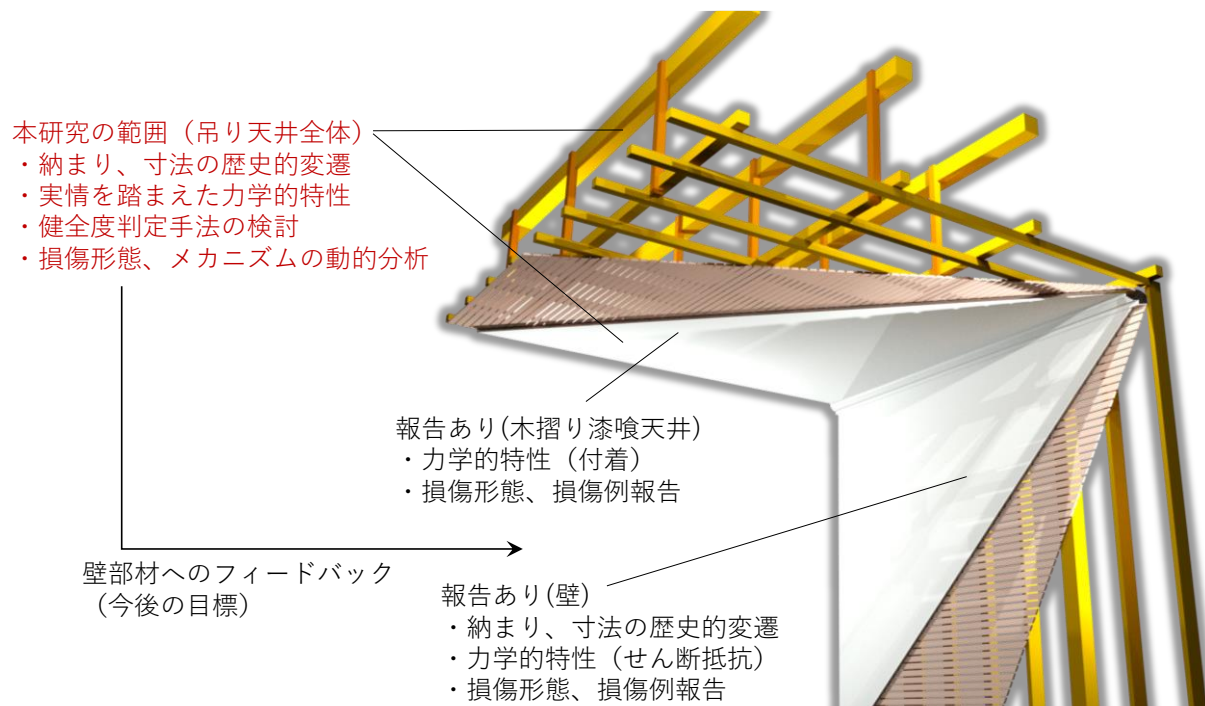


図 2-3 本研究の位置づけの概念

## 2.5 木摺り漆喰天井の損傷要因の洗い出しと本研究での評価項目

図 2-4 に木摺り漆喰の剥落に影響すると考えられる特性要因図、表 2-2 に特性要因図の各因子における時系列的視点を示す。津和らは、木摺り漆喰天井は長期的要因・短期的要因が複合的に影響して損傷を引き起こすと述べている[前掲 1-10]。それを踏まえて、損傷に影響すると考えられる要素を因子として細分化し特性要因図（一般にフィッシュボーンチャートとも称す。以下、天井チャート）として可視化した。天井チャートの”背骨”の頭にあたる解決すべき課題は「木摺り漆喰天井の損傷」であるが、漆喰層の剥落が損傷例として多いことを踏まえ、「漆喰の支持力が自重ならびに地震荷重を下回った状態」と位置づけた。天井チャート内における”大骨”は時系列順に背骨へ合流するようになっており、それぞれ「材料」、「設計・施工」、「使用環境」、「外力」の4種に分けた上で、それらは”中骨”、”小骨”、”孫骨”と分岐させて各要因を示した。なお、漆喰剥落への悪影響が明確と考えられる因子は要因を記載（漆喰の食い込みが甘い、など）しているが、現状で影響の良悪や程度が判断できないものは要素として記載（漆喰層の剛性、など）した。

また各要因・要素を時間軸的視点として表 2-2 に示す「初期的因子」「長期的因子」「短期的因子」の3要素を設けると共に、ベン図によって視覚的に7領域・色を定義し、天井チャート内の各要因を色分けした。第3章以降は、天井チャートの各要因に対応する形で検証を進めることとし、各章冒頭に対応領域を図示する。なお、天井チャートは漆喰剥落における各要因を大局的に可視化した例を示したものであり、天井部材の維持保全や、建築物の使用継続性、人的被害の抑制などを含む要求性能などは今後さらに洗い出していく必要があることを付言しておく。

加えて、表 2-3 に既往研究・天井チャートを踏まえた本研究での評価項目を示す。既往研究や図 2-4 に示したとおり、漆喰の剥落に係る想定要因は非常に多い一方、知見は少ない状態である。本研究で実施する木摺り漆喰吊り天井の力学的特性に関する実験は、実情に沿った検討と共に基礎的な部分を重点的に行うこととし、当該工法の潜在的な耐力を把握することを主眼とする。また図 2-4 で整理した要素は初期的因子（設計・施工要因）が多いことから、第3章以降で扱う基本的な調査・実験要因はそれに対応したものとし、剥落として顕在化する要因であることの多い鉛直方向の外力（地震時荷重など：短期的因子）に対する抵抗性を確認する。

表 2-2 特性要因図の各因子における時系列的視点

要素	内容
初期的因子	建築物の設計・施工仕様やその精度等に起因する、建設段階に決定づけられるもの
長期的因子	建築物の共用期間中における、使用用途・環境や、継続的な外力（固定荷重、経年変化、雨漏り等）によるもの
短期的因子	地震等を起因とする、比較的大きな外力によるもの

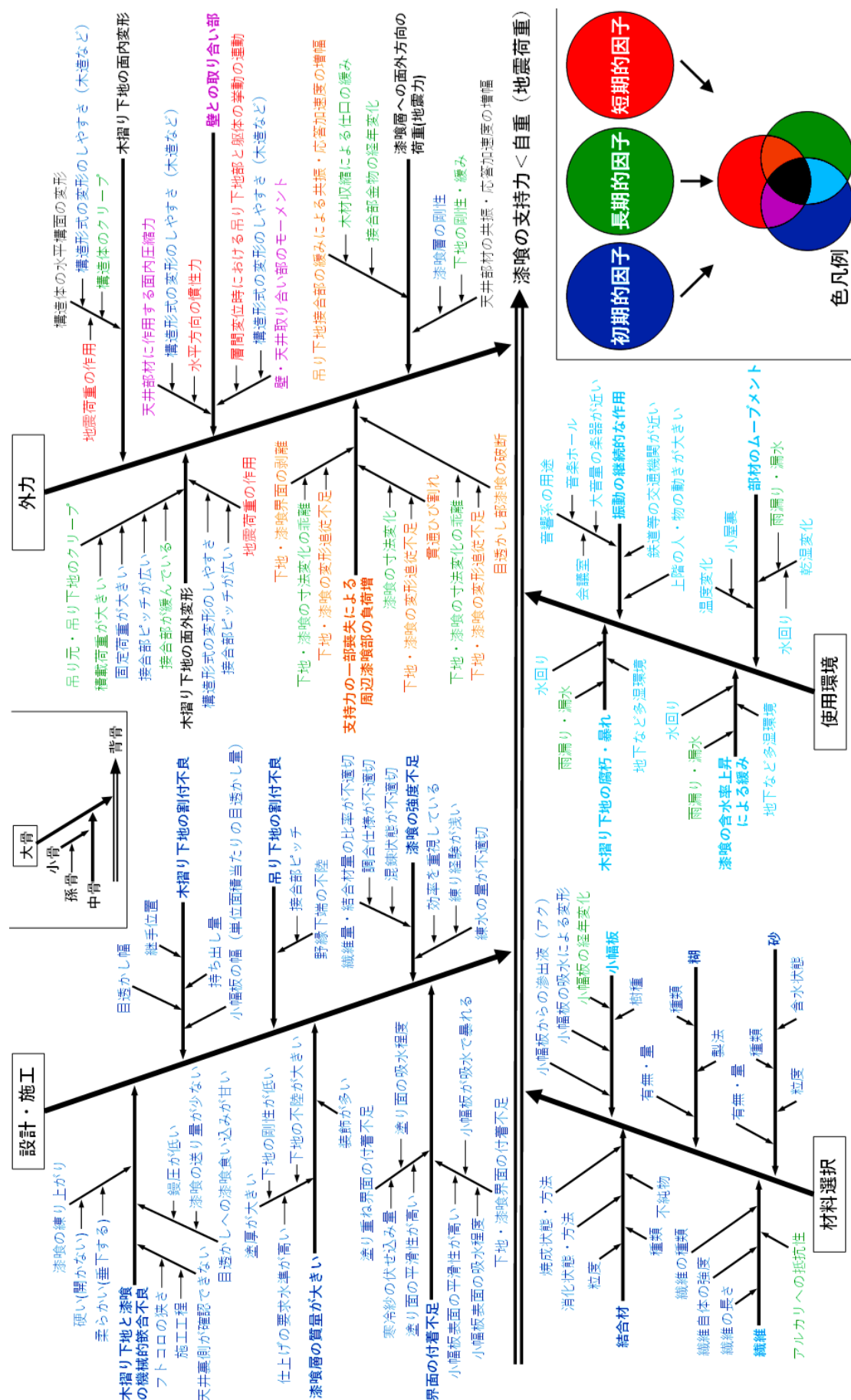


図2-4 木摺り漆喰の剥落に影響すると考えられる特性要因図

表 2-3 既往研究・天井チャートを踏まえた本研究での評価項目

大骨	中骨	本研究での評価項目（小骨）	内容
設計・施工	木摺り下地と漆喰の機械的嵌合不良	目透かしへの漆喰の食い込み量（第4,5,7章）	天井全体の耐力に関連する基礎的な部分を評価する。
	漆喰層の質量が大きい	上等な仕上がりを意図した厚塗りの漆喰（第7,8章）	固定荷重の観点から不利側の検討とする。
	界面の付着不足	木摺り下地と漆喰の界面（第4～6章）	実物件や技術書等から当時の施工仕様を抽出した上で試験条件を決定し、天井全体の耐力に関連する基礎的な部分を評価する。
	木摺り下地の割付不良	目透かし幅（第3～8章）	
	吊り下地の割付不良	接合部のピッチ、接合物の耐力（第5,7章）	接合部1カ所あたりの想定負担荷重と実際の耐力の関係を評価する。
	漆喰の強度不足	スサの不足（第4,8章）	施工誤差・不具合によるスサ量が下振れした場合の挙動を評価する。
外力	漆喰層への面外方向への荷重	漆喰剥離時の最大荷重（静的載荷）（第4,5章）	木摺りと漆喰の面外荷重に対する抵抗性に関する知見が不足しており、まずは基礎的な力学的特性を把握する。
		応答加速度（第8章）	動的（振動）試験によるため短期的因子の評価となる。経年状態を想定した下地で漆喰部分に作用する応答加速度が増幅した場合の抵抗性を静的試験の結果と併せて評価する。
		吊り天井下地接合部の緩みによる揺れの増幅（第8章）	
		天井部材の共振（第8章）	
	支持力の一部喪失による周辺漆喰部の負荷増	下地・漆喰界面の剥離（第8章）	動的（振動）試験によるため短期的因子の評価となる。界面剥離、ひび割れ、目透かし漆喰の破断等の剥落に至る一連のメカニズムを把握する。
		貫通ひび割れ（第8章）	
		目透かし部漆喰の破断（第8章）	
	木摺り下地の面外変形	本研究の実験条件では影響しないものと想定	振動試験において作用すると考えるが、試験体寸法的にわずかであると考えられる。 漆喰層の面外荷重抵抗性を本研究によって確認したのち、吊り下地接合部試験結果も踏まえながら、木摺り漆喰部材による大盤曲げ試験（静的載荷）によって今後評価する。
	木摺り下地の面内変形	本研究の実験条件では影響しないものと想定	面内変形は振動試験において作用すると考えるが、試験体寸法的にわずかであると考えられる。 構造形式や別部材も関連する部分であり、今後の評価対象とする。壁部材に関する知見を応用できる可能性がある。
	壁との取り合い部		
材料	全て	理想的な条件と想定	本研究では全て市場品を用いて、材料影響を小さくして理想的な条件下におけるものとして試験を実施する。
使用環境	全て	理想的な条件と想定	本研究では理想的な共用環境下での潜在的な耐力を評価したのち、今後、各種劣化要因を考慮した検討を行う。

## 第2章のまとめ

木摺り漆喰天井に関する既往の知見について、力学的特性、損傷事例、既存材の保存活用例の3つの視点で整理した。そのうえで漆喰の剥落へ影響すると考えられる要因を洗い出し、本研究で扱う評価項目や研究の位置づけを行った。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 木摺り漆喰工法は西洋由来の技法として明治初期から壁・天井で適用されてきたものの、力学的特性の研究は耐震性などの観点から主に壁を中心に実施されており、天井の力学的特性等に関する知見は非常に少なく、地震による天井部材の損傷が顕在化した近年のものにとどまる。
- 2) 木摺り漆喰工法の施工法に関して技術書で触れられているのは、明治中頃の文献が最初期の例である。漆喰を十分に鏝で押し付けることや、小幅板を取り付ける下地（壁なら胴縁、天井なら野縁）の幅に制限を与えて漆喰を小幅板の裏側まで飛び出させることを意図した表現がみられた。時期的には木摺り漆喰工法の導入初期～普及期に刊行された文献であるが、この頃には既に漆喰の食い込みや開きに関する特性が認識されていたことが伺える内容となっている。
- 3) 津和らは、木摺り漆喰天井における木摺り下地と漆喰の付着条件（喰いつきと呼称）に関し、漆喰引掛り部分や小幅板との付着部分等の抵抗バネを詳細に区分し実験的検討を行っている。目透かし幅や漆喰食い込み量などのパラメータを設けて面外・面内載荷によって強度試験を行い、破壊モードと最大強度から各抵抗バネの特性値および力学的モデルを構築しており、新規施工時を念頭に置いた部材最大耐力の算定式を提案している。
- 4) 歴史的建築物の修繕に際し、津和らはその建物および部屋の機能・用途によって天井部材に要求される性能は異なるため、それに応じた改修・補修方法を取捨選択する必要性を指摘している。また天井部材は木摺り漆喰部分だけでなく吊り下地部分も併せて確認する必要がある、安全性の判断要素が複雑化しているため調査や補強の難しさを指摘している。
- 5) 木摺り漆喰天井の損傷事例について、津和らは損傷要因として長期的・短期的・施工的要因をそれぞれ整理している。長期的要因は経年劣化による木摺り下地の収縮、雨漏り、乾湿繰り返しによるムーブメントなどで、短期的要因は地震力による部材の面外・面内変形によるもの、施工要因としては漆喰の目透かしへの食い込みムラ・不足としている。いずれの損傷例も木摺り下地と漆喰の界面で剥落が発生しており、一度剥落が起きると連鎖的に広がる点を指摘している。

- 6) 木摺り漆喰天井等の既存材を活用した修繕・保存は、長らく非構造部材として扱われ重要視されていなかっただけに事例は多くはない。その中でも、天井部材の歴史的価値に着目した旧富岡製糸場の例では、対象部材に可能な限り手を加えず、剥落を前提としてシェルターを後補する方法を採っていた。また剥落防止を重点に置いた場合は、仕上面をガラス繊維ネットなどで被覆してピン・アンカーなどで縫い付ける外壁補強工法の応用例もみられた。筆者らが過去に実施した浸透性アクリル樹脂を用いた補修例は、仕上面への影響は少なく天井裏からの施工で完結できるため簡便であるが、既存材料に樹脂を浸透させて一体化させるため、文化財保存で求められる場合がある「可逆性」が無い。そのため、対象部材含めた「守るべき価値」の精査や、空間用途を踏まえた天井へ要求される安全性などから総合的に判断する必要がある。
- 7) 天井部材に技術的・意匠的価値が見出せる場合は、外観保持に重きを置いた補修工法を適用することを推奨するが、剥落に対して特に配慮が必要となる。また、人命や文化的価値に影響が及ばない領域での剥落や、小さく軽い破片で落下するような破壊モードへ誘導する、一種のクラッシュブルゾーンのような設計手法も一案と考えられる。
- 8) 既往研究で提案されていた木摺り漆喰天井の損傷に影響する長期的・短期的要素をさらに細分化・発展させ、特性要因図（天井チャート）に整理した。本研究では各要素を時間軸的視点によって区分することとし、「初期的因子：設計施工段階で決定される部材特性」「長期的因子：共用期間中に作用を受けて変化する部材特性」「短期的因子：地震等による急激な作用を受けて変化する部材特性」の3要素を設けると共に、ベン図を用いて視覚化して7領域を定義し、チャート内の各要項目を色分けし、より細かく要因分析ができるようにした。また、木摺り漆喰天井の基礎的な力学的特性を検討するため、使用材料や養生環境は理想的な条件と想定したうえで、当該工法の潜在的な耐力を把握することに主眼を置くこととした。

## 第2章の参考文献

- [2-1] 河野 輝夫：木造壁體の剪斷抵抗の實驗的研究，建築學會論文集，8 卷，pp.24-33, 1938
- [2-2] 森田仁彦，柳澤孝次，小林美菜子，山田敏夫，伝統的木造建築の構造性能評価 その2 木摺壁のせん断実験，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.171-172, 1999
- [2-3] 松本直之，佐藤利昭，藤田香織：近代木造建築における外周壁構法の研究 その1 構成要素分析及び構造性能の實驗的検証，日本建築学会関東支部研究報告集，pp. 485-488, 2012
- [2-4] 松本直之，藤田香織：近代木造建築の外周壁構法に関する研究 その5 木摺下地の寸法と仕様に関する文献調査，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.441-442, 2015
- [2-5] 松本直之，藤田香織：近代木造建築の構法と地震被害に関する研究 平成23年東北地方太平洋沖地震を事例に その2 調査結果と分析，日本建築学会関東支部研究報告集，pp. 293-296, 2015
- [2-6] 松本直之，林 弘倫，似内遼一，タン チーシャン，齊藤嘉一，藤田香織：近代木造建築における外周壁構法の研究 その2 福島県桑折町・旧伊達郡役所の耐震診断と被害調査，日本建築学会関東支部研究報告集，pp. 489-92, 2012
- [2-7] 松本直之，藤田香織：近代木造建築の外周壁構法に関する研究 その4 旧伊達郡役所の静的増分解析と地震被害との比較検証，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，pp.131-132, 2014
- [2-8] 松本直之，藤田香織：近代木造建築の地震被害に関する研究 平成23年東北地方太平洋沖地震による振動被害を事例に，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，pp.339-340, 2013
- [2-9] 中村達太郎：建築学階梯 卷之下，米倉屋書店，1889
- [2-10] 滝大吉，建築学講義録 卷の3，第2版，建築書院，1898
- [2-11] 三橋四郎：和洋改良大建築学 上，大倉書店，1904
- [2-12] 建築學會：建築工事仕様書，1923
- [2-13] 中村伸：日本壁の研究，相模書房，1954
- [2-14] 山田幸一：日本の壁，駸々堂出版，大阪，1982
- [2-15] 馬場明生：塗り壁と建築，朝倉書店，東京，1988
- [2-16] 齋賀英二郎，齋藤英俊，木村勉：旧富岡製糸場西置繭所，2022年日本建築学会賞(作品)資料，日本建築学会，2022
- [2-17] 岡健太郎，田村雅紀，後藤治：木摺り漆喰天井部材における補修工法の開発，日本建築学会技術報告集，23 卷，54 号，pp.403-408, 2017
- [2-18] 岡健太郎，田村雅紀，後藤治，津村泰範：文化財建造物の木摺り漆喰天井における浸透性樹脂を用いた補修工法の実施工検討，日本建築学会技術報告集，23 卷，55 号，pp.789-794, 2017
- [2-19] 杉江夏呼，西谷 章，古谷誠章，矢崎裕信，鈴木裕美，藤村太史郎，永井香織：早稲田大学 2 号館（旧図書館）保存改修工事の概要，日本建築学会技術報告集，20 卷，46 号，pp.1105-1110, 2014
- [2-20] 松原 正芳，半澤 徹也，鈴木 健司，竹内 啓五：既存漆喰仕上げ大規模天井の耐震補強工法の開発と歴史的建造物への実適用，日本建築学会技術報告集，24 卷，57 号，pp.861-866, 2018
- [2-21] 日本建築学会：2016年熊本地震災害調査報告，日本建築学会，2018







### 第3章 木摺り漆喰工法に関わる時代的変遷の調査

3.1 第3章概説.....	35
3.2 木摺り漆喰工法の出現から日本へ導入される過程.....	35
3.2.1 西洋における木摺り漆喰工法の出現と発展.....	35
3.2.2 日本における木摺り漆喰に類する工法と小舞土壁との対比.....	38
3.3 日本における木摺り漆喰工法の体系化と実仕様に関する文献調査（調査3-1）.....	40
3.3.1 調査の背景と概要（調査3-1）.....	40
3.3.2 文献調査の方法（調査3-1）.....	42
3.3.3 文献調査の結果（調査3-1）.....	43
(1)文献によって調査した実物件、技術書の内訳.....	43
(2)木摺り下地の諸寸法でみた評価.....	49
3.4 木摺り漆喰天井を支持する木製吊り天井下地の年代別仕様に関する文献調査（調査3-2）.....	51
3.4.1 背景と目的（調査3-2）.....	51
3.4.2 文献調査の方法（調査3-2）.....	51
3.4.3 文献調査の結果（調査3-2）.....	52
第3章のまとめ.....	56
第3章の参考文献.....	58
脚注.....	64

### 3.1 第3章概説

本章では、左官仕上天井における歴史的・工法的移り変わりについて、文献調査結果を交えながら解説する。木製吊り天井下地ならびに天井木摺り下地は、現在に至るまでその仕様の変遷に関する知見が少ないのが現状である。そのため、西洋由来の技術と従前工法の融合によって経験則的に確立された経緯を持つ天井の仕様を年代別に整理し、データベース化することで、調査・修繕対象の建築物の竣工年代によっておおよそその納まりや、それに起因する力学的特性を推測できることが期待される。

力学的特性に影響する”仕様”は、設計・施工要因や材料要因など多岐に渡るが、ここではまず、設計・施工要因の中でも木摺り下地と吊り下地の納まりや寸法的仕様を中心に検討を進める。まず本研究の根幹たる木摺り下地に関しては、当該工法の源流から確立、日本への導入や普及を概観したうえで、当該工法が一般に普及していた時期の技術書や実物件の仕様（小幅板断面寸法、目透かし幅）から、年代の変遷を整理する。続いて吊り下地については、躯体と天井面を紡ぐ各時代の技術書の納まり（部材断面、接合部、接合ピッチ）を評価し、各部材の分化の過程などといった工法発展の変遷をたどる。

### 3.2 木摺り漆喰工法の出現から日本へ導入される過程

#### 3.2.1 西洋における木摺り漆喰工法の出現と発展

日本において、木摺り漆喰工法が適用された壁・天井が広範に普及したのは西洋由来の工法が技術導入されたことに端を発する。それ故ここでは、当該工法の源流たる西洋での技術発展についてまずは触れることとする。

左官仕上天井は、西洋にて数千年前から既に出現していたことがわかっている[3-1]。その説を補強するものとして、古代ローマの建築家ウィトルウィウスによって紀元前25年頃に著された[3-2]とされる「建築十書- De architectura」を挙げる。同書は現存する最古の建築技術書として知られており、そこに左官仕上天井に関する記述が認められる。森田の訳書[3-2]の該当部分を要約すると、「杉の長材を2ペース以下（1ペース 296mm）の間隔で円弧状に配置し、吊束や釘を介して床組や小屋組に緊結した後、そこに紐でヨシを結びつけ、石灰と砂を混ぜたものを塗り付ける」とある。訳者による解釈をそのまま受け取ると、木製の吊木や野縁、ヨシの塗下地（葦簀下地[注 1]のようなものと思われる）、左官材の塗り付けに至るまで後年の左官天井工法と遜色ない水準の内容が記述されており、古代ローマにおける建築技術水準の高さや後の建築工法へ与えた影響を垣間みることができる。

同書では天井野縁を円弧状に配置するとあり、ヴォールト天井を意図したものと推察される。ヴォールト天井は西洋で主に用いられた組積造において大空間を確保しつつ、上方の荷重を下方へ流すのに合理的な構造に由来するものである。現在の視点でいえば、下地を設ける時点で躯体形状に依存しない内装にできるため、あえてヴォールト天井に倣った理由は意匠的なものか、慣例によるものなのかは議論の余地がある。ただしそのような曲面を仕上げるためには形状の自由度が高い左官材が適していたことは想像に難くなく、天井およびそれに連続的な面を構成する壁体を左官材で仕上げるための土壌が早い段階で構築されていたことがわかる。

左官下地として木材よりも先にヨシが用いられたことは、しなやかな材料による曲面の下地作りや製材等の加工の手間がほとんど無い面から考えれば合理的である。一方で、以降の木摺り下地との共

通項として、左官材を片面から施工することを考えると、下地と左官材の定着を考慮して下塗りを強く擦り付けたい心理になることは想像に難くない。その場合、下地の剛性が低いと鋳圧に負けて変形するため不陸が生じやすくなり、それを修正するために塗り厚が増すことで仕上材のボリュームが増加し、剥落を誘発することとなり悪循環である。したがって下地にも一定の剛性が求められるようになるのは自然の流れであり、その解決策としてヨシよりも剛性のある木材が選択されるようになったと考えられる。木材に取って代わられた後には、左官材と下地の付着の改善を図るため下地表面をはつるなどの過程を経て、等間隔で設けた目透かしに左官材を食い込ませることで機械的な嵌合を確保し、支持する納まりが考案されている。

図 3-1 に木摺り下地断面の種類（壁の例）を示す。初期の小幅板（図 3-1a）は、縦割りした小径木の本表側を胴縁や野縁に取り付けたものが用いられており、後年になって台形断面（図 3-1b）や矩形断面（図 3-1c）などの製材品へ変化していったとされる[3-3]。初期の小幅板は木材加工の手間の少なさもさることながら、目透かし内に食い込んだ左官材が扇状に広がって小幅板と嵌合することによる脱落抑制にも効果が期待でき、合理的な納まりといえる。ただし、下地面の通りや小幅板一枚の幅が原木の太さに影響されやすく、一様な面に仕上げるうえでは不都合となるため製材品が用いられるようになり、小幅板と左官材を嵌合させるために通常版は台形断面、簡易版は矩形断面と使い分けがなされている。

続いて、図 3-2 に天井木摺り下地の例を示す。天井下地においては左官材の脱落防止のため、台形断面の小幅板（図 3-2a）が特に推奨されていたとされる。一方で、製材加工の手間を抑えるためか、矩形断面の弱点を補完しようとした試みもあり、下塗りに繊維（人や動物の毛）を添加して漆喰自体の強度を向上させ、かつ下地の裏面側へはみ出させる[3-3]ことで嵌合させる（図 3-2b）もので、後年に体系化される木摺り漆喰工法と遜色ない納まりに発展している。

これらの一連の技術は、1755 年のリスボン地震の教訓を踏まえた「ポンバル様式建築」によって結実している[3-3]。鳥かご（gaiola）と形容される筋交いを多用したトラスの如き木質軸組構造は、本格的な耐震建築としては世界初のものであり、以後のヨーロッパ各国の建築・防災基準の礎となったとされている[3-4]。天井や壁仕上げに限っても、小幅板の断面形状や漆喰の調合を工夫することによる漆喰脱落への配慮がなされていた要因をここに求めることができ、木摺り漆喰工法が本邦へ導入される 100 年以上前には原型がほぼ整っていたといえる。

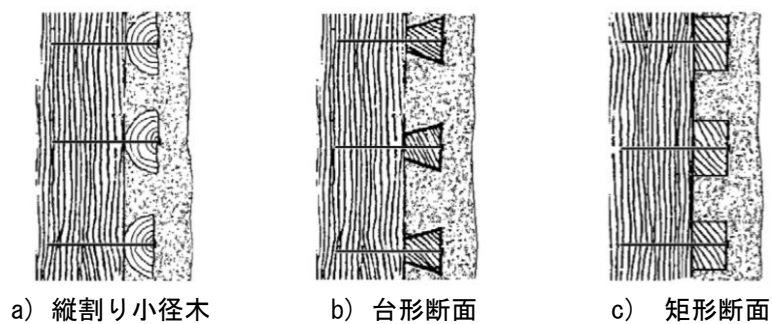


図 3-1 木摺り下地断面の種類（壁の例）[出典：文献 3-3]

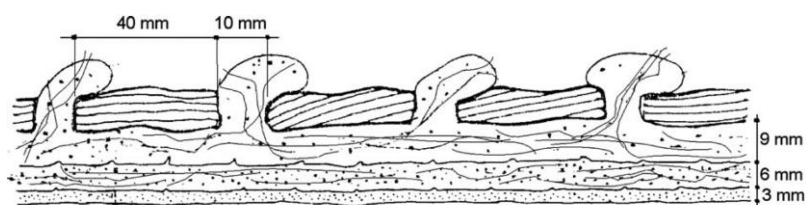
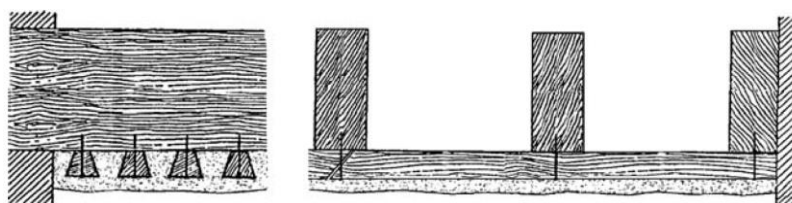


図 3-2 天井木摺り下地の例[出典：文献 3-3]

#### 3.2.2 日本における木摺り漆喰に類する工法と小舞土壁との対比

日本古来の左官技術は、ほとんどが小舞下地に土（荒壁・中塗りなど）を組み合わせた工法である。間仕切り壁下地の配置で考えると、西洋由来の木摺り下地は真壁・大壁問わず、一つの仕上面に対し下地材を一組設ける必要がある一方、小舞下地は壁芯に1体設ければ壁の両面を仕上げることができる。すなわち、裏返し塗りの可不可も大きな違いであり、下地を包むように塗られる土壁は自ずと表裏の仕上材の一体化が図られ、下地との定着もなされる。

ただし、下地を挟んで表裏一体化させる土壁は塗り厚も相応なものとなるため、城郭の軒裏・破風や数寄屋建築等の細い軸組を用いる部分の壁[前掲 2-14,3-5~6]など、裏返し塗りが不可能であるか、もしくは塗り厚（部材厚）が確保できない部位などにおいては限定的に、小幅板を並べた下地（以下、「本邦木摺り」と呼称し西洋由来の木摺り下地と区別する）が適用されていたことがわかっている。本邦木摺りを用いた場合でも、当時の土壁工法の例に漏れず下塗りから土が用いられた例がほとんどであり、石灰・石膏系の左官材よりも材料強度・付着力共に劣るため、剥離剥落などの不具合が目立った記録がある[前掲 2-14]。その教訓を踏まえてか、本邦木摺りには小幅板1枚ずつに麻や棕櫚の縄を螺旋状に巻いて下塗りの足がかりとする工夫がなされ、西洋における木摺り下地の発生の過程と類似する点を見出すことができるものの、以降にその工夫が普及した記録は無い。そのため、本邦木摺りは小舞土壁が適用できない部位にやむを得ず適用された工法、すなわち小舞下地の亜型としての扱いに留まっていたと解釈できる。一部の壁面や軒裏といった限られた部位でも斯様な状況であるから、一般に剥落が発生しやすいとされる天井面（水平面）の下地として用いることは困難であったと推察される。

西洋由来の木摺り漆喰工法との明確な差である“下塗りからの漆喰（石灰）を使用”であるが、藤原頼長の文倉（平安時代）はその稀有な例として知られている。当時は板蔵・校倉が一般的であったところ、板張りの壁（板下地）へ耐火被覆の如く石灰を直接塗り付けた記録が残っており、これは既知の防火への配慮例で日本最古といわれている[3-7]。ただし、それ以降の一般的な防火建築には土蔵が台頭していることからわかるように、木下地に石灰・石膏系左官材を直接塗り込む方法は天井・壁共に普及していないため、本格的な発展は西洋由来の建築技術導入を待たなければならない。

日本において、木摺り下地と類似する考え方があったにも関わらず普及しなかった要因として、山田は構造形式と壁部材を関連付け、日本と西洋における設計思想の違いを指摘している[前掲 2-14]。同氏は、日本における伝統木造構法は太い軸組をもって仕口や貫で地震力を負担する構造形式であり、小舞下地の端部は軸組と構造的に縁が切れていることから、そもそも土壁に耐力負担を期待しておらず、「躯体から浮いた壁」と表現している。加えて、小舞土壁は地震時に躯体が変位しても散り際が若干破壊される程度で済むため、外観上の故障が少なく済む一方で、西洋では組積造が長らく主流であり、筋交いを用いた木造軸組であっても柱間の壁は組積造で埋めることが多く、壁体は躯体の一部という考え方が根底にあると言及している。さらに同氏は、木摺り下地も例に漏れず躯体と緊密に接続される耐力壁的な性格を持っているとし、地震時に躯体が変形した場合は小舞土壁と比較にならない範囲で外観上の影響を受けることを覚悟しなければならず、故障の少ない仕上げを得ることが要求条件である日本の左官工事の立場からいえば、日本建築においては小舞土壁のほうが相性のよい選択であったと述べている。

### 第3章 木摺り漆喰工法に関わる時代的変遷の調査

木摺り漆喰壁の構造性能としての評価は、建築基準法施行令第46条の壁倍率において、数値こそ低い木摺り下地（仕上材は対象外）が定められていることから窺い知ることができる[注2]。学術資料の例としては田邊ら[前掲 1-18]、朝倉ら[前掲 1-19]、松本ら[前掲 1-20]が実大試験体による検討を行っている。ここでは仕上材込みの木摺り漆喰壁部材として、また小幅板を水平ではなく斜めに張る仕様[注3]でも耐力評価が行われている。前者は漆喰の面内抵抗、後者は斜めに張られた小幅板が筋交いのような振る舞いをするすることで、基準法規定の壁倍率を超える耐力が確認できているものの、載荷後の試験体は仕上材が大きく損傷しており、山田が言及しているような耐震壁故の影響が現れた格好となっている。

なお、ポンバル様式建築では壁や天井に木摺り漆喰が多く用いられたことは先述のとおりであるが、そこで特徴的なのは地震時における壁面の仕上材の剥落を意図していたことである[3-8]。仕上材の損傷によってエネルギーを吸収させて軸組の先行破壊を抑制する意図を持っていたことが推察され、壁部材および仕上材に対する設計思想の違いが現れている。

#### 3.3 日本における木摺り漆喰工法の体系化と実仕様に関する文献調査（調査 3-1）

##### 3.3.1 調査の背景と概要（調査 3-1）

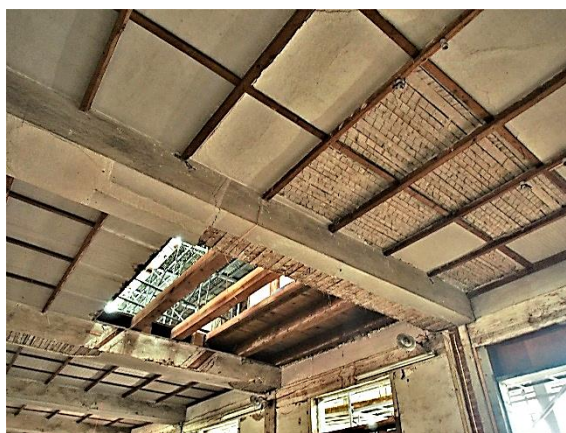
木摺り漆喰工法は幕末期に西洋から持ち込まれた建築技術の一つとして壁や天井へ適用されていったとされる。先述のとおり、特に天井の左官仕上げはそれまでの日本建築ではほとんど例が無かったため、木摺り漆喰工法導入初期は、外国人技術者による設計を基に日本人技術者や施工者が自身の持つ知識・技法と組み合わせ、試行錯誤しながら工事を行っていたこともあり、現在の尺度でみると技術的に拙い部分が散見される。

例として、写真 3-1 に富岡製糸場の西置繭所（1872(明治 5)年竣工、現存）の木摺り下地を示す。ここでは繭の保管環境（防火、防カビ、調湿など）の確保を意図し、竣工当時から壁は煉瓦下地、天井は木摺り下地で漆喰仕上げとなっていた。2015～2020 年に実施された保存活用工事にあたって、1 階に竣工当時の木摺り漆喰天井が現存（東置繭所も同仕様であったが天井は撤去済み）していることがわかり、黎明期の木摺り漆喰天井の技術水準がわかるものとして貴重であるため、撤去する方針であったものを存置へ変更した経緯がある[注 4]。当該部の木摺り下地は小幅板一枚当たりの幅が広いことに加え、目透かしがほとんど無く、板下地に近い状態である（写真 3-1a、詳細の寸法は後述）。また 3.2.2 で述べた本邦木摺りの仕様に類似する繊維巻きの小幅板が用いられており、塗籠城郭における軒裏の下地と同様に剥落への配慮が見て取れる一方、十分な目透かしを設ける発想には至っていないことが推察される。実際に漆喰の剥落が懸念されていた様で、天井面の格縁はそれを抑制するために遅くとも 1921(大正 10)年の段階では設置されていたものである[3-9]。その対策をもってしても一部に剥落が認められており、床根太と近接する位置に木摺り下地が取り付けられていることで上階の振動や変形が伝わりやすい納まりになっていたことも要因と考えられる。木製吊り天井下地の時代的変遷については 3.4 で詳述する。

富岡製糸場の竣工と同じ 1872(明治 5)年にイギリスの建築家 C. Bruce Allen による文献「Cottage Building」（以下、原著）の翻訳書「西洋家作ひながた」（以下、訳書）が刊行されており、日本で最も古く出版された洋風建築の建築技術書とされている[3-10]。富岡製糸場の着工はそれ以前であることを考えると、木摺り下地に関する情報は訳書の刊行時点で既に日本へ入ってきていたと解釈でき、



a) 小幅板に繊維が螺旋状に巻かれ、目透かしがほとんどない



b) 格縁の内部で剥落が認められ、床根太と近接する位置に木摺り下地が設置されている

写真 3-1 富岡製糸場西置繭所の木摺り下地



### 第3章 木摺り漆喰工法に関わる時代的変遷の調査

訳書でも実際に「…天井<sup>ならび</sup>并に界壁をラッス（塗土を<sup>とど</sup>める薄くして狭き木片）また<sup>おお</sup>掩ひ土塗りし<sup>しか</sup>朧と<sup>とど</sup>其上を白く塗るべき事…（ママ）」[3-11]とあり、「塗土を<sup>とど</sup>める薄くして狭き木片」と表現された木摺り下地（ラッス：Lath）に関する記述がある。一方で、目透かしに関する記述は原著・訳書共に確認できていない。

原著は労働者階級の住宅環境の改善策に重きを置いた内容であり[3-12]、その仕様として木摺り漆喰を施工する旨は記述されているものの、具体的な施工方法には触れられておらず、刊行時点で一般に普及していた工法に関する部分は、既知の内容として詳細な説明が省略されていたことが考えられる。さらに、「木摺り下地は防火の観点からメタルラスに置き換えることが最近では提案されている（本論筆者訳）」など、より発展的な内容が記載されている[3-13]。そのため訳書は、西洋建築技術の導入書という観点でいえば、訳者による翻訳への相当な配慮があったにしろ、原著で触れられていない当時の日本で類例の無い工法に関して、詳細な仕様を記述することは困難であったといえる。また近年は訳書の目的として、導入書という観点だけでなく、建築物の防耐火や救済行政といった社会的側面を啓蒙するような大局的な視点があり、原著と近い位置づけであった解釈もなされている[3-14]。その意味でいえば、木摺り漆喰工法の基本原理や施工法が記載できるような条件ではなかったといえ、それが明文化されるのは技術的な解釈が進んだ後の「建築学階梯」（1889（明治22）年、前掲2-9）などを待たなければならない。「建築学階梯」における施工法の記載内容は2章で触れている。

木摺り漆喰の導入以降、その仕様は1957（昭和32）年のJASS15・左官工事（以下「JASS15」）の制定をもって最終的な体系化をみるが、そこまでの90年程度の間で試行錯誤が繰り返されながら経験則的に技術が蓄積されていった性格があり、その過程には下地寸法の変動が幾分かあると考えられる。目透かしは下地と漆喰を機械的に嵌合させる重要な部位というのは先にも述べたとおりであり、目透かし幅そのものに加えて小幅板の断面寸法も、面積あたりの目透かし開口面積や漆喰食い込み形状・量に影響し、力学的特性を決定する要素と考えられる。壁部材については松本らの調査・研究[前掲2-4]によって詳細仕様が報告されているが、天井部材については調査が進んでおらず、力学的特性評価のための基礎情報が不足している状態である。

そこで本節では、1863（文久3）～1938（昭和13）年に竣工した実物件104件の施工仕様記録や修理報告書[3-15～117]、およびそれらに近い年代に刊行された技術書22件[前掲2-9～13, 3-119～135]から天井木摺り下地の寸法を調査・抽出し、現行の建築工事標準仕様書（JASS15 および JASS11・木工事、以下「JASS11」）初版制定までの系譜をたどり、日本における天井木摺り下地の採用時期、変遷、ならびに諸寸法（幅、厚さ、目透かし等）を把握することを目的とした。

#### 3.3.2 文献調査の方法（調査 3-1）

実物件における内装仕様の設計検討時期と竣工時期には一般に乖離があり、かつ、それは物件ごとに差異があると考えられるため、今回は下地仕様を竣工年と紐づけて扱うこととした。そのうえで、木摺り下地寸法が記載されている初期の技術書「建築学階梯」（1889(明治 22)年、[前掲 2-9]、以下「階梯」）、建築學會（現：日本建築学会）による最初期の体系化資料「建築工事仕様書」（1923(大正 12)年、[前掲 2-12]、以下「學會仕様書」）、JASS15 の原案が掲載されている技術書（1954(昭和 29)年、[前掲 2-13]、以下「JASS15 原案」）の刊行時期を踏まえながら、寸法の変遷を考察した。

本検討では天井木摺り下地の仕様を対象としているため、諸文献から抽出する寸法は天井下地を明確に示すもの、および「天井下地は壁下地と同様とする」のような表現が確認できたものに限定した。また小幅板の寸法は数値によるもののほか、「四分板」、「三寸貫」等の規格品を使用するような表記もあるが、規格品はその名称と実寸に乖離があり、年代別にも若干の差異があるため、「建築学講義録 第 16 版」（1909(明治 42)年、[3-136]）および「學會仕様書」に記載されている規格品寸法を代表値とし、対象技術書の刊行年に近い方の文献の代表値を基にした。寸法に曖昧な表現がある場合、例として「一寸五分以内」「八分程」「8mm 内外」などはその記載寸法、「二分乃至三分」のように範囲がある場合は両寸法を下限・上限として採用した。寸法情報の最終的な整理に際し、尺貫法などは全て SI 単位系に換算した。

#### 3.3.3 文献調査の結果（調査 3-1）

##### (1) 文献によって調査した実物件、技術書の内訳

本稿では天井材を扱うため、下地材における仕上側を「下面」、天井裏側を「上面」と表現する。図 3-3 に調査した実物件 104 件における天井仕上げ・下地の比率、表 3-1 に実物件 104 件の天井を主とした諸仕様、表 3-2 に建築技術書 22 件における木摺り下地に関する記載内容を示す。調査した実物件 104 件のうち 63%が漆喰系仕上げであり、初期の物件では下塗りとして土や、石灰を混ぜた土の使用が認められ、日本古来の技法の応用がみられる。今回の調査範囲においては 1865(元治 2/慶応元)年竣工の旧オルト住宅が最初期の木摺り漆喰天井の適用例とみられるが、下地の表面に割竹あじろ組が張られている（メタルラスのように用いられている）ほか、諸寸法の記録が無く不明な点が多い。また 1887(明治 20)年前後までは左官のほか、紙・布系の仕上げも多く認められ、擬洋風建築の終焉と時期を同じくして西洋由来の技術である漆喰（左官仕上げ）天井の導入が進んでいった様子が伺える。木摺り下地、葦簀下地といった主に塗り下地として用いられるものは調査物件の 70%を占めており、左官仕上天井の比率を上回る。これは紙・布張り天井であっても木摺り下地を用いている場合があるため、特に迎賓館赤坂離宮ではカンバス貼りでありながらも目透かしを有する木摺り下地へ膠を用いて和紙を捨て貼りしており、経師技術の応用とみられている。西洋の技法であれば木摺り漆喰を施工してからカンバスを貼り付けるのが一般的であるため、当該物件のみで用いられた我が国独特の特異な例とされている[3-137]。当時の技能者の創意工夫の結果とみられ貴重な工法である一方、小幅板の暴れなどによる目透かしに沿ったカンバスのひび割れなどが発生していることから、その納まり自体が損傷の要因とも指摘されている。

木摺り下地の小幅板に繊維が巻かれた形態のものは、先述の富岡製糸場西置繭所を筆頭に 1872～1884(明治 5～17)年で 5 件あるが、比較的初期段階でみられなくなっている。漆喰下塗りの足掛かりとして、特に水平面においては本邦木摺りの繊維巻よりも、目透かしによるもののほうが効果的に作用することが経験的に認知されていたことが垣間みえる。

木摺り下地の仕様に関し、その多くは寸法に関する記述に限られたが、一部で“蟻型”に削る旨を指示した施工仕様書と実物件が共に存在した。これは小幅板断面を台形状に加工することで、目透かし部の左官材が下地と嵌合しやすくする意図があったと考えられるが、削り角度等を指定する記述は確認されておらず、作業者に一任されていたことが推察される。この考え方が西洋から導入されたものか、日本の大工技術（継手・仕口）の応用によるものかは定かではなく、小幅板を台形状に加工することを記した技術書は確認できていない。西洋における木摺り下地の黎明期には、台形断面の小幅板（図 3-2 a）が既に存在していたので、漆喰の脱落抑制を考慮すると類似する設計思想に至る可能性もある。また図 3-4a)に和洋改良大建築学で掲載された「大板木摺り」[前掲 2-11]を示す。当該文献刊行の 15 年程前に、図 3-4b)に示す米国のビルキホール社(The Byrkit-Hall Sheathing Lath Co.) [3-118]によって開発されたものが、「大板木摺り」として紹介されている。これは大判の板に左官材を食い込ませるための蟻型の溝が穿ってある下地で、一般の木摺り下地と異なり胴縁側が閉塞されているため気密性や耐水性などが高い、と謳われている。半面、下地の裏面側に漆喰が開かない構造で嵌合しにくい、それを補うために溝断面が台形になっていると考えられる。

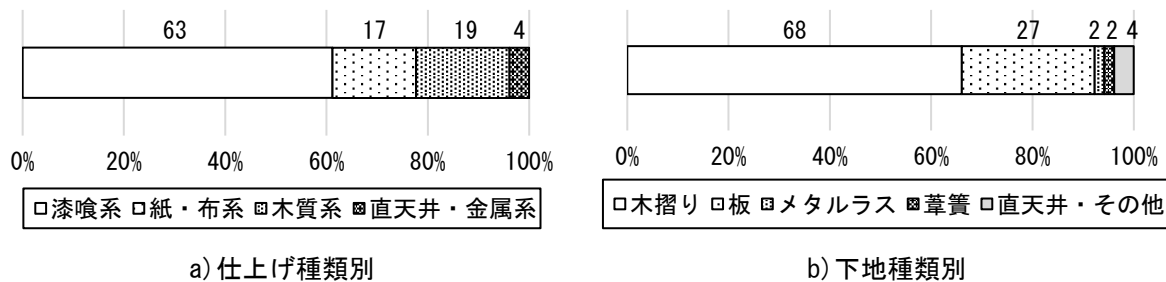
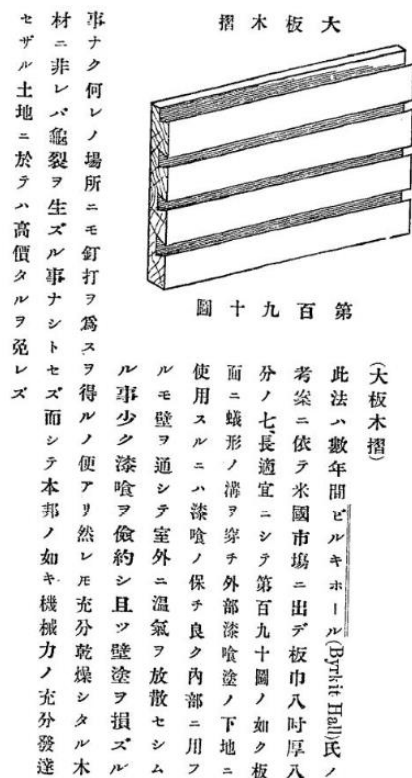
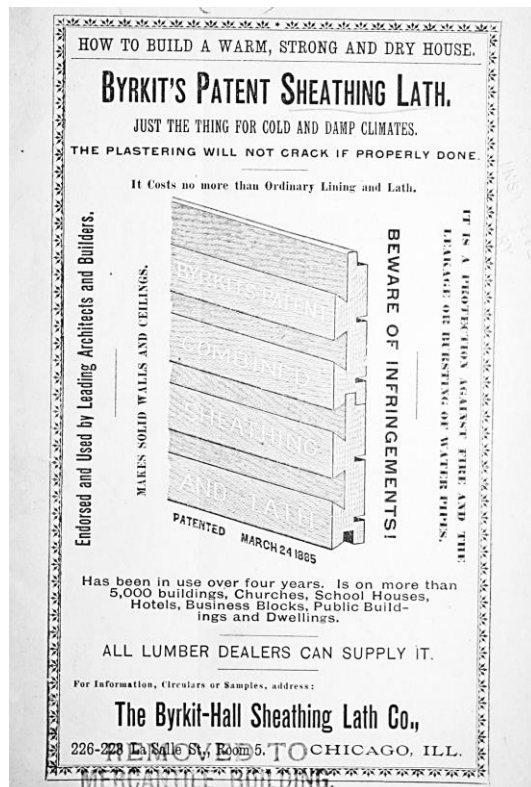


図 3-3 調査した実物件 104 件における天井仕上げ・下地の比率



a) 大板木摺り (1904 年, 前掲 2-11)



b) 大板木摺りの出典元とみられる Byrkit-Hall Sheathing Lath の記事 (1890 年, 文献 3-118)

図 3-4 台形状の溝形状 (目透かし) を持つ左官下地の例

表 3-1 実物件 104 件の天井を主とした諸仕様（No. 1～50）

No.	実物件名（文献記載の名称を抜粋）	竣工年		建設地	構造形式	階数	修理工事報告書・仕様書記載内容 <sup>注1)</sup>						備考	文化財指定 <sup>注3)</sup>	所有・管理	文献
		西暦	和暦				天井仕上 <sup>注2)</sup>	天井下地 <sup>注2)</sup>	木摺り下地 繊維巻き	板幅 (mm)	板厚 (mm)	目透かし 幅 (mm)				
1	旧グラバー住宅	1863	文久3	長崎	木造	1	唐紙	板	-	-	-	-		重要文化財	長崎市	3-15
2	旧オルト住宅	1865	元治2/慶応元	長崎	木造	1	漆喰	木摺り＋割竹あじろ組	-	-	-	-	蛇腹は荒壁塗り	重要文化財	長崎市	3-16
3	旧鹿児島紡績所技師館	1867	慶応3	鹿児島	木造	2	板	板	-	-	-	-		重要文化財	鹿児島市	3-17
4	旧リンガー（弟）住宅	1868	慶応4/明治元	長崎	木造・石造	1	唐紙	板	-	-	-	-		重要文化財	長崎市	3-18
5	東山手十二番館	1868	慶応4/明治元	長崎	木造	1	漆喰	木摺り		-	7.6	10	下塗りは土、後年にボード張りへ変更	重要文化財	長崎市	3-19
6	旧新潟税関庁舎	1869	明治2	新潟	木造	1	漆喰	木摺り		45	15	-		重要文化財	文部科学省	3-20
7	檜野崎灯台旧官舎	1870	明治3	和歌山	石造	1	漆喰	木摺り		-	-	-		登録有形文化財	海上保安庁	3-21
8	旧富岡製糸場西置繭所	1872	明治5	群馬	木骨煉瓦造	2	漆喰	木摺り	○	30～90	17～33	3		国宝	富岡市	3-22
9	旧見付学校々舎	1873	明治6	静岡	木造	3	漆喰	木摺り		30～90	17～33	-		史跡	磐田市	3-23
10	旧富岡製糸場女工館	1873	明治6	群馬	木骨煉瓦造	2	漆喰	木摺り	○	45	-	15		重要文化財	富岡市	3-22
11	旧羅典神学校	1873	明治6	長崎	木骨煉瓦造	3	漆喰	木摺り		-	-	-	下塗りに土を用いる	重要文化財	カトリック長崎大司教区	3-24
12	釣島灯台旧官舎	1873	明治6	愛媛	石造	1	漆喰	木摺り		35	8	-		松山市有形文化財	海上保安庁	3-25
13	郡山市開成館	1874	明治7	福島	木造	3	紙	板	-	-	-	-		福島県指定重要文化財	郡山市	3-26
14	旧中込学校	1875	明治8	長野	木造	2	紙	板	-	-	-	-		重要文化財	佐久市	3-27
15	旧睦沢学校校舎	1875	明治8	山梨	木造	2	竿縁	板	-	-	-	-		重要文化財	甲府市	3-28
16	旧開智学校	1876	明治9	長野	木造	2	紙	板	-	-	-	-		国宝	松本市	3-29
17	旧田代家西洋館	1876	明治9	佐賀	木造	2	和紙	板	-	-	-	-		重要文化財	有田町	3-30
18	旧開拓使工務局庁舎	1877	明治10	北海道	木造	2	板	板	-	-	-	-		重要文化財	北海道	3-31
19	旧群馬県衛生所	1878	明治11	群馬	木造	2	漆喰	木摺り		50	7.5	-	天井木摺り下地は壁板割り材	重要文化財	桐生市	3-32
20	旧済生館本館	1878	明治11	山形	木造	4	漆喰	木摺り		45	15	-		重要文化財	山形市	3-33
21	旧西村山郡役所	1878	明治11	山形	木造	2	紙	木摺り		-	-	-	紙貼り仕上げなれど下地は「木摺り」	山形県指定有形文化財	寒河江市	3-34
22	四階楼	1879	明治12	山口	木造	4	漆喰、紙、板	木摺り	○	-	-	-		重要文化財	上関町	3-35
23	龍谷大学本館	1879	明治12	京都	木造	2	紙	木摺り		-	-	-	紙貼り仕上げなれど下地は「木摺り」	重要文化財	学校法人龍谷大学	3-36
24	旧岩科学学校校舎	1880	明治13	静岡	木造	2	竿縁	板	-	-	-	-		重要文化財	松崎町	3-37
25	豊平館	1880	明治13	北海道	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	札幌市	3-38
26	上野博物館旧本館	1881	明治14	東京	煉瓦造	2	漆喰	木摺り	○	51.5	9.1	12.1	関東大震災で滅失	-	-	3-39
27	旧神戸居留地十五番館	1881	明治14	兵庫	木骨煉瓦造	2	漆喰	木摺り		24～30	8～9	6～9		重要文化財	株式会社ノザワ	3-40
28	旧西田川郡役所	1881	明治14	山形	木造	2	紙	木摺り		-	-	-	紙貼り仕上げなれど下地は「木摺り」	重要文化財	公益財団法人致道博物館	3-41
29	新潟県議会旧議事堂	1882	明治15	新潟	木造	2	紙	木摺り		-	-	-	紙貼り仕上げなれど下地は「木摺り」	重要文化財	新潟県	3-42
30	旧伊達郡役所	1883	明治16	福島	木造	2	紙	木摺り		60	8～12	-	仕上げの変遷：紙→漆喰→紙	重要文化財	桑折町	3-43
31	同志社彰栄館	1884	明治17	京都	煉瓦造	2	漆喰	木摺り	○	45	9～12	-		重要文化財	学校法人同志社	3-44
32	旧鶴岡警察署庁舎	1884	明治17	山形	木造	2	板	板	-	-	-	-		重要文化財	公益財団法人致道博物館	3-45
33	旧水上高等小学校	1885	明治18	兵庫	木造	2	石灰入り下塗り土	木摺り		-	-	-		兵庫県重要有形文化財	丹波市	3-46
34	旧南会津郡役所	1885	明治18	福島	木造	2	紙	木摺り		-	-	-	紙貼り仕上げなれど下地は「木摺り」	福島県指定重要文化財	南会津町	3-47
35	旧吾妻第三小学校	1885	明治18	群馬	木造	2	竿縁	板	-	-	-	-		群馬県指定重要文化財	中之条町	3-48
36	旧西村山郡会議事堂	1886	明治19	山形	木造	2	紙	木摺り		-	-	-	紙貼り仕上げなれど下地は「木摺り」	山形県指定有形文化財	寒河江市	3-49
37	神戸山手西洋人住居	1887	明治20	兵庫	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-	現在、明治村へ移設	登録有形文化財	公益財団法人明治村	3-50
38	東北学院デフォレスト館	1887	明治20	宮城	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	学校法人東北学院	3-51
39	北海道庁旧庁舎	1888	明治21	北海道	煉瓦造	2	メタルシーリング	野縁直打ち	-	-	-	-	当初漆喰仕上→1910年火災復旧でメタルシーリング化	重要文化財	北海道	3-52
40	旧登米高等尋常小学校校舎	1888	明治21	宮城	木造	2	竿縁	板	-	-	-	-		重要文化財	登米町	3-53
41	旧福島県尋常中学校	1889	明治22	福島	木造	2	大和張り	板	-	-	-	-		重要文化財	公益財団法人安積歴史博物館	3-54
42	明治学院インブリー館	1889	明治22	東京	木造	2	紙	木摺り		30	9	-	紙貼り仕上げなれど下地は「木摺り」	重要文化財	学校法人明治学院	3-55
43	旧トーマス住宅	1890	明治23	兵庫	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	神戸市	3-56
44	旧東京音楽学校奏楽堂	1890	明治23	東京	木造	2	漆喰	木摺り		45	11	-		重要文化財	台東区	3-57
45	同志社クラーク記念館	1894	明治27	京都	煉瓦造	2	漆喰	木摺り		45	10	8		重要文化財	学校法人同志社	3-58
46	旧岩崎家住宅	1896	明治29	東京	木造	2	格天井	板	-	-	-	-		重要文化財	文部科学省	3-59
47	旧学習院初等科正堂	1899	明治32	千葉	木造	1	格天井	板	-	-	-	-	居室部板張り、一部ベランダに木摺り漆喰	重要文化財	千葉県	3-60
48	旧石川県立第二中学校本館	1899	明治32	石川	木造	2	竿縁	板	-	-	-	-		重要文化財	金沢市	3-61
49	旧山形師範学校本館	1901	明治34	山形	木造	2	筋違い張り打ち上げ	板	-	-	-	-		重要文化財	山形県	3-62
50	旧ハッサム住宅	1902	明治35	兵庫	木造	2	漆喰	木摺り		45	9	-		重要文化財	神戸市	3-63

注 1) 「-」は木摺り下地を有しないため対象外、もしくは木摺り下地を有するが寸法の記載が認められないものを示す。

注 2) 調査対象の実物件のうち、本研究に関連の深い「漆喰（系）仕上げ」「木摺り下地」を網掛とした。

注 3) 市町村指定の文化財はその名称を記載し、国指定のものは「重要文化財」などとした。

表 3-1 実物件 104 件の天井を始めとした諸仕様（No. 51～104）

No.	実物件名（文献記載の名称を抜粋）	竣工年		建設地	構造形式	階数	修理工事報告書・仕様書記載内容 <sup>注1)</sup>						備考	文化財指定 <sup>注3)</sup>	所有・管理	文献
		西暦	和暦				天井仕上 <sup>注2)</sup>	天井下地 <sup>注2)</sup>	木摺り下地 繊維巻き	板幅 (mm)	板厚 (mm)	目透かし 幅 (mm)				
51	旧旭川偕行社	1902	明治35	北海道	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-	1911年漆喰天井化	重要文化財	旭川市	3-64
52	旧東田川郡会議事堂	1902	明治35	山形	木造	2	竿縁、紙	板	-	-	-	-		山形県指定有形文化財	東田川文化記念館	3-65
53	旧奈良県物産陳列所	1902	明治35	奈良	木造	2	漆喰	葦簀	-	-	-	-		重要文化財	独立行政法人国立博物館	3-66
54	旧福岡県立豊津中学校講堂「思永館」	1902	明治35	福岡	木造	1	板	板	-	-	-	-		福岡県重要文化財	福岡県	3-67
55	旧富山県立農学校本館	1903	明治36	富山	木造	2	敷目板	板	-	-	-	-		重要文化財	富山県	3-68
56	旧香港上海銀行長崎支店	1904	明治37	長崎	煉瓦造、石造	3	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	長崎市	3-69
57	旧第五十九銀行本店	1904	明治37	青森	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	弘前市	3-70
58	旧呉鎮守府司令長官官舎	1905	明治38	広島	木造	1	漆喰	木摺り		36	9	-		重要文化財	呉市	3-71
59	旧下関英国領事館 本館	1906	明治39	山口	煉瓦造	2	漆喰	木摺り		36	7.5～9	-		重要文化財	下関市	3-72
60	旧日本郵船株式会社小樽支店	1906	明治39	北海道	石造	2	漆喰	木摺り		36	9	-		重要文化財	小樽市	3-73
61	旧日本銀行京都支店	1906	明治39	京都	煉瓦造	2	板	板	-	-	-	-		重要文化財	京都府	3-74
62	弘前学院外人宣教師館	1906	明治39	青森	木造	2	漆喰	葦簀	-	-	-	-	麻縄巻木摺りを葦簀の表側から当て材として用いる	重要文化財	学校法人弘前学院	3-75
63	旧弘前偕行社	1907	明治40	青森	木造	1	漆喰	木摺り		39	11	9		重要文化財	財団法人弘前女子厚生学院	3-76
64	旧日本聖公会京都聖約翰教会堂	1907	明治40	愛知	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	公益財団法人明治村	3-77
65	仁風閣	1907	明治40	鳥取	木造	2	紙	板	-	-	-	-		重要文化財	鳥取市	3-78
66	天鏡閣	1908	明治41	福島	木造	2	漆喰、格天、竿縁	木摺り、板		-	-	-		重要文化財	福島県	3-79
67	表慶館	1908	明治41	東京	煉瓦造、石造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	独立行政法人国立文化財機構	3-80
68	旧日本生命保険株式会社九州支店	1909	明治42	福岡	煉瓦造	2	漆喰、板	木摺り、板		-	-	-		重要文化財	福岡市	3-81
69	旧伊勢郵便局舎	1909	明治42	愛知	木造	1	板	板	-	-	-	-		重要文化財	日本郵政株式会社	3-82
70	旧中越銀行本館	1909	明治42	富山	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-	一部にメタルラス	砺波市指定文化財	砺波市	3-83
71	迎賓館赤坂離宮	1909	明治42	東京	鉄骨煉瓦造	2	カンバス	木摺り		24	9	8	カンバス部分も下地は目透かしを有する木摺り下地で、「特異な納まり」との評。一部に漆喰仕上げもあり。	国宝	内閣府	3-84
72	米沢高等工業学校本館	1910	明治43	山形	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	国立大学法人山形大学	3-85
73	旧近衛師団司令部庁舎	1910	明治43	東京	煉瓦造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	独立行政法人国立美術館	3-86
74	旧函館区公会堂	1910	明治43	北海道	木造	2	漆喰	木摺り		48	9～12	5～12		重要文化財	函館市	3-87
75	福岡県公会堂貴賓館	1910	明治43	福岡	木造	2	漆喰	木摺り		50	9～12	5～12		重要文化財	福岡県	3-88
76	岩手銀行旧本店本館	1911	明治44	岩手	木骨煉瓦造	2	漆喰	木摺り		43～47	7.6～9.9	11		重要文化財	株式会社岩手銀行	3-89
77	旧松本家住宅洋館	1911	明治44	福岡	木造	2	格天井	板	-	-	-	-		重要文化財	社団法人西日本工業倶楽部	3-90
78	慶應義塾図書館	1912	明治45/大正元	東京	煉瓦造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	学校法人慶応義塾	3-91
79	岩手大学農学部 旧本館	1912	明治45/大正元	岩手	木造	2	漆喰	木摺り		54	9	-		重要文化財	国立大学法人岩手大学	3-92
80	旧唐津銀行本店	1912	明治45/大正元	佐賀	煉瓦造	2	和紙	板	-	-	-	-		登録有形文化財	唐津市	3-93
81	門司港駅(旧門司駅)本屋	1914	大正3	福岡	木造	2	板	板	-	-	-	-		重要文化財	九州旅客鉄道株式会社	3-94
82	東京駅丸ノ内本屋	1914	大正3	東京	鉄骨煉瓦造	3	漆喰	木摺り	-	45	11	12		重要文化財	東日本旅客鉄道株式会社	3-95
83	旧ドレウエル邸	1915	大正4	兵庫	木造	2	漆喰	木摺り		36	7.5			神戸市認定伝統的建造物	神戸市	3-96
84	北里研究所本館・医学館	1915	大正4	東京	木造	2	漆喰	木摺り		45	10		現在、明治村へ移設	登録有形文化財	公益財団法人明治村	3-97
85	旧山形県会議事堂	1916	大正5	山形	煉瓦造	2	漆喰	木摺り		21	9	9		重要文化財	山形県	3-98
86	旧山形県庁舎	1916	大正5	山形	煉瓦造	3	漆喰	木摺り		21	9	9		重要文化財	山形県	3-99
87	山口県旧県庁舎及び県会議事堂 旧県庁舎	1916	大正5	山口	煉瓦造	2	漆喰	木摺り		28	8	5		重要文化財	山口県	3-100
88	函館ハリストス正教会復活聖堂	1916	大正5	北海道	煉瓦造	1	漆喰	木摺り		36	9	9		重要文化財	函館ハリストス正教会	3-101
89	旧古河邸	1917	大正6	東京	煉瓦造	2	漆喰	メタルラス	-					名勝	財務省	3-102
90	大阪市中央公会堂	1918	大正7	大阪	鉄骨煉瓦造	3	漆喰	木摺り		24	12	12	一部にメタルラス	重要文化財	大阪市	3-103
91	旧門司三井倶楽部本館	1921	大正10	福岡	木造	2	漆喰	木摺り		40	10～12	6		重要文化財	北九州市	3-104
92	自由学園明日館	1921	大正10	東京	木造	2	漆喰	木摺り		45～55	8～10	-		重要文化財	学校法人自由学園	3-105
93	旧池田家住宅洋館	1922	大正11	秋田	RC造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		重要文化財	大仙市	3-106
94	旧名古屋控訴院地方裁判所区裁判所庁舎	1922	大正11	愛知	煉瓦造、RC造	3	漆喰	メタルラス	-	-	-	-		重要文化財	文部科学省	3-107
95	旧愛知郡役所	1922	大正11	愛知	木造	2	漆喰	木摺り		30～35	7.5	10		愛荘町指定文化財	愛荘町	3-108
96	旧通信省下関電話局	1924	大正13	山口	RC造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		下関市有形文化財	下関市	3-109
97	滝部小学校本館	1924	大正13	山口	木造	2	漆喰	木摺り		-	-	-		山口県有形文化財	下関市	3-110
98	旧前田家本邸洋館	1929	昭和4	東京	RC造	2	漆喰	木摺り		37	7	-		重要文化財	財務省	3-111
99	旧李王家東京邸	1930	昭和5	東京	RC造	2	漆喰	木摺り						東京都指定有形文化財	株式会社西武リアルティソリューションズ	3-112
100	名古屋市役所本庁舎	1933	昭和8	愛知	SRC造	5	直天井(モルタル)	直天井	-					重要文化財	名古屋市	3-113
101	高島屋東京店	1933	昭和8	東京	SRC造	8	直天井(石膏、漆喰)	直天井(石膏、漆喰)	-	-	-	-		重要文化財	株式会社高島屋	3-114
102	旧琵琶湖ホテル本館	1934	昭和9	滋賀	RC造	3	直天井(モルタル)	直天井	-					大津市指定有形文化財	大津市	3-115
103	国会議事堂	1936	昭和11	東京	SRC造	3	漆喰	木摺り		36.4	12.1	9.1		-	国	3-116
104	旧公衆衛生院	1938	昭和13	東京	SRC造	7	漆喰	木摺り		40	10			港区指定文化財	港区	3-117



表 3-2 建築技術書 22 件の木摺り下地に関する記載内容

規格品参考寸法

	建築学講義録(1909)		學會仕様書(1923)	
	幅	厚さ	幅	厚さ
四分板	極摺:ニ分落ち、 並:五分落ち	二分～二分五厘	正寸	二分五厘
六分板		三分五厘～四分		四分
三寸貫	一寸九分～二寸一分	二分五厘～三分五厘	一寸七分	三分

No.	技術書名	年代		文献内での表現（抜粋）		文献での記載・規格品換算値			SI単位系変換値 (mm)			壁と天井を 同一視する記述	文献
		西暦	和暦	材料、断面寸法	目透かし幅	小幅板		目透かし 幅	小幅板		目透かし 幅		
						幅	厚さ		幅	厚さ			
1	「建築学階梯 巻之下」	1889	明治22	幅八分程厚三分以下一分五厘なり	凡そ三分づゝ間を疎し	八分	三分	三分	24.2	9.09	9.09	-	前掲2-9
2	「建築学講義録 巻の3」	1898	明治31	六分板を八分幅くらいに挽割りたるもの	三分以上「スカシ」打付くものとす	八分	三分五厘～四分	三分	24.2	10.6-12.1	9.09	-	前掲2-10
3	「和洋改良大建築学 上」	1904	明治37	杉六分板ヲ八分幅位ニ挽割リ	間隔参分位ニ打付クルモノトス	八分	三分五厘～四分	三分	24.2	10.6-12.2	9.09	-	前掲2-11
4	「建築工事仕様便覧」	1905	明治38	三寸貫	三分明キ	一寸九分～二寸一分	二分五厘～三分五厘	三分	57.6-63.6	7.6-10.6	9.09	-	3-119
5	「和洋建築工事仕様設計実例 上」	1905	明治38	杉四分板巾一寸五分以内ニ挽割	三分透ニシテ	一寸五分	二分～二分五厘	三分	45.5	6.1-7.6	9.09	-	3-120
6	「日本建築辞彙 初版」	1906	明治39	幅ハ一寸程ナルヲ適當トス	三分明キ程ニスルヲ宜トス	一寸	-	三分	30.3	-	9.09	-	3-121
7	「日本建築辞彙 増補10版」	1919	大正8	幅ハ一寸程ナルヲ適當トス	三分明キ程ニスルヲ宜トス	一寸	-	三分	30.3	-	9.09	-	3-122
8	「學會仕様書」	1923	大正12	木摺（杉三寸貫ニツ割）	明キ（四分）	一寸七分/2	三分	四分	25.8	9.09	12.1	-	前掲2-12
9	「建築仕様全集」	1925	大正14	四分板巾八分以内大節アル所ハ切捨テ	目透キ二分五厘	八分	二分五厘	二分五厘	24.2	7.58	7.58	-	3-123
10	「実用洋風建築構造学」	1931	昭和6	巾は四厘厚〇、八厘	一厘内外の目透き	四厘	〇、八厘	一厘	40.0	8.00	10.0	-	3-124
11	「実用建築構造 下巻」	1932	昭和7	木摺貫杉材幅5cm内外厚1cm	目透ハ8mm位トシ	5cm	1cm	8mm	50.0	10.0	8.00	-	3-125
12	「高等建築学 第7巻」	1933	昭和8	幅は4-6cm位で餘り廣過ぎては 漆喰の付きが悪い	間隔は6-12mm位で木摺の幅に應じて加減す べきであるが、成る可く廣い方が下塗の付 きが好ので少くとも9mm位にしたい	4-6cm	-	6-12cm	40.0-60.0	-	6.00-12.0	-	3-126
13	「左官技法壁の作り方」	1935	昭和10	厚さ六・五耗 幅五・二厘	二分乃至三分目透し	五・二厘	六・五耗	二分五厘	52.0	6.50	6.06-9.09	天井木摺りは側壁 とほとんど同様…	3-127
14	「誰にでも解る・直ぐ役に立つ 和洋建築構造図解 9版」	1937	昭和12	杉四分板を一寸以内に割り裂いたもの	目透し二分五厘位	一寸	二分五厘	二分五厘	30.3	7.58	7.58	内壁の仕上方と同じ 工程を行ふ…	3-128
15	「現代建築我家の知識」	1940	昭和15	幅一寸二、三分の厚み二分位	三分隙位	一寸二、三分	二分	三分	36.4-39.4	6.06	9.09	壁と場合と同様…	3-129
16	「西洋家屋構造」	1941	昭和16	杉三寸貫	-	一寸七分	三分	-	51.5	9.09	-	-	3-130
17	「建築構造学」	1947	昭和22	杉四分板を幅3cm以内に挽割つて	目透0.8-0.9cm	3cm	二分五厘	0.8-0.9cm	30.0	7.58	8.00-9.00	-	3-131
18	「最新和洋建築木構造」	1950	昭和25	杉三分×一寸三分 二つ割位	木摺間の間隔は四分	一寸三分/2	三分	四分	19.7	9.09	12.1	壁下地と同様の手法 で…	3-132
19	「日本壁の研究」	1954	昭和29	幅39mm厚さ7mmのものが普通である	6-9mmの目透し	39mm	7mm	6-9mm	39.0	7.00	6.00-9.00	壁と同様…	前掲2-13
20	「JASS 15（案）」	1954	昭和29	厚7mm，幅33mm	7mm内外の目透し	33mm	7mm	7mm	33.0	7.00	7.00	-	
20	「新制建築構造 第1」	1956	昭和31	木ずり（約7×36mm）	8mm内外の目すかし	36mm	7mm	8mm内外	36.0	7.00	8.00	-	3-133
21	「JASS15初版」	1957	昭和32	厚7mm，幅33mm	7mm内外の目透し	33mm	7mm	7mm	33.0	7.00	7.00	-	3-134
22	「JASS11初版(図解)」	1959	昭和34	厚7mm，幅36mm	7mm内外	36mm	7mm	7mm	36.0	7.00	7.00	-	3-135





#### (2) 木摺り下地の諸寸法でみた評価

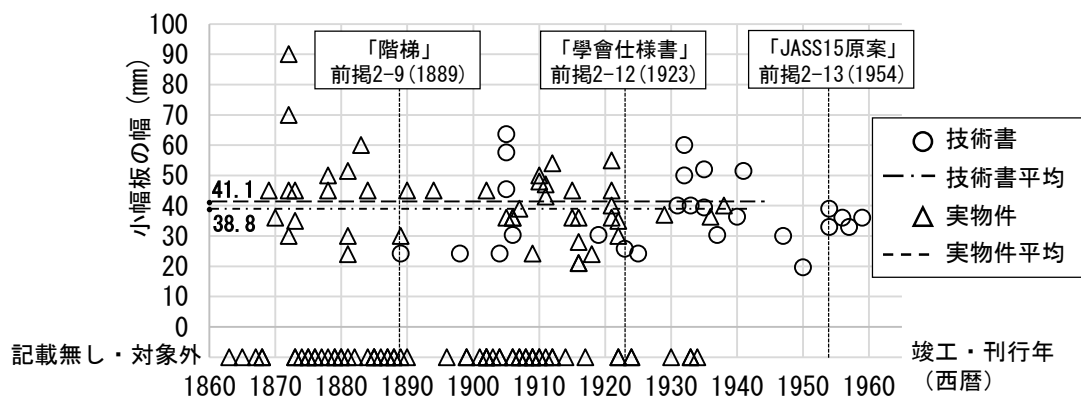
図 3-5 に木摺り下地寸法と竣工・刊行年代の関係を示す。各下地寸法の平均値算出のための年代範囲は、調査した実物件の竣工年を基準とする 1865～1940(元治 2/慶応元～昭和 15)年とした。

まず図 3-5a)の小幅板の幅について、技術書平均は 38.8mm、実物件平均は 41.1mm で実物件のほうが 6.0%程度広い結果となった。技術書、実物件、年代を問わず 21～90mm の範囲でばらつきが大きく後年まで安定しないものの、実物件平均でみた場合は「日本壁の研究」[前掲 2-13]に近い。当文献は JASS15 初版の制定委員の一人である中村が著者であり、「JASS15 原案」はこの文献の巻末付録に掲載されているものである。JASS15 制定にあたって板幅を 2 分ほど狭くした理由は現状不明であるが、単位面積当たりの目透かし量が増えることになるので、安全側に立脚した判断がなされたと解釈できる。

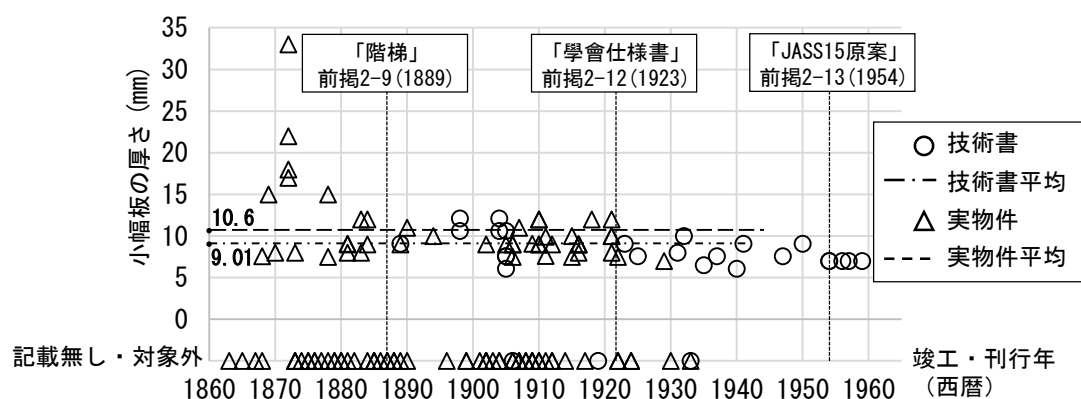
続いて図 3-5b)の小幅板の厚さについて、技術書平均は 9.01mm、実物件平均は 10.6mm で、実物件のほうが 18%程度厚い結果であった。一部の技術書には天井用に厚手の木摺り板を推奨する記述があり、下地の狂い抑制、面剛性の確保を考慮した可能性がある。実物件の寸法は最初期こそばらつきがあるが、「階梯」の刊行以降は安定している一方、技術書の寸法は後年になるにつれて徐々に薄くなる傾向を示していた。木摺り板厚が大きい場合、目透かし部に食い込んだ左官材が木摺り下地の上面まで達せず開きにくくなり、構造上で危険側に作用する懸念もあることから、経験的に厚さを抑えた可能性がある。そのほか、時期的に戦時体制等による材料調達の困難度といった社会的要因も一因として考えられる。

最後に図 3-5c)の目透かしの幅について、技術書平均は 8.89mm、実物件平均は 9.07mm で、実物件のほうが 2.1%程度広く、わずかな差に留まった。一方で「階梯」の刊行前はばらつきが大きく、一番狭い物件は先述の富岡製糸場西置繭所（1872(明治 5)年）の 3mm で、その翌年の同製糸場女工館では 15mm となっており、試行錯誤の跡が伺える。「階梯」刊行以降は寸法が安定し、さらに 1930 年代中頃以降は技術書記載の寸法がわずかに幅の狭い仕様へ移行しており板厚と類似する傾向を示した。目透かし幅が広いほうが食い込んだ左官材の断面積が増すため、耐荷重性という点では有利側に作用すると考えられる一方で、一度目透かしへ食い込んだ左官材が垂下しやすくなり、施工性の悪化や左官材の食い込み不良が起こりうるため、こちらも経験的な要因が含まれると推察する。

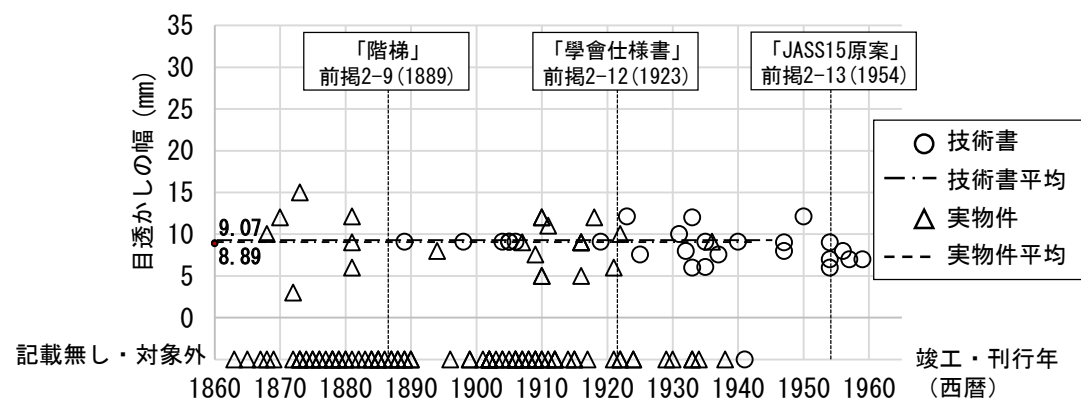
以上より、実物件の天井木摺り下地は導入初期にばらつきがみられるものの、平均的な仕様は技術書と顕著な乖離が認められず、慣用的に蓄積された仕様・技術を体系化した JASS15 へのつながりを確認することが出来た。第 4・5 章での新規作製による木摺り漆喰試験体仕様は、本章で得られた寸法の分析結果を基に決定づけることとした。



a) 小幅板の幅



b) 小幅板の厚さ



c) 目透かしの幅

図 3-5 木摺り下地寸法と竣工・刊行年代の関係

### 3.4 木摺り漆喰天井を支持する木製吊り天井下地の年代別仕様に関する文献調査（調査3-2）

#### 3.4.1 背景と目的（調査3-2）

左官仕上天井は直塗り仕上げなどを除き、原則として躯体から吊木受け、吊木、野縁受け、野縁などの各部材で構成される木製軸組架構物（以下、木製吊り天井下地）を介して木摺り下地ひいては仕上面を支持する納まりとなっている。左官仕上材は乾式などの仕上材と比較して固定荷重が大きくなりやすく、木製吊り天井下地の負担も相応に大きくなるため、各部材における接合部等の耐力評価も不可分な要素とされている[前掲 1-23]。東日本大震災の被害を受けて策定されつつある天井落下対策指針なども、主対象は軽量鉄骨天井下地やシステム天井に留まっており、木製吊り天井下地は対策が遅れているのが現状である。木製吊り天井下地は木摺り下地と同様に、洋風建築技術の導入に合わせて普及し、経験則や既存の技術を含みながら発展した経緯があるため、納まりが多岐に渡り、画一的な耐力評価が困難であることが挙げられており[前掲 1-6,8]、その仕様の時代的変遷や、耐力評価のための基礎的知見の蓄積、技術的検討がほとんどなされていないのが現状である。そこで本節では、木製吊り天井下地に関して幕末期の技術導入から JASS11 木工事 1960 年初版（以下、JASS11）[3-138]までの体系化の変遷を把握することを目的とする。

#### 3.4.2 文献調査の方法（調査3-2）

先述の3.3.2で示した方法と同様に、木製吊り天井下地仕様の時代的変遷について技術書文献の記述内容を整理する。図3-6に、JASS11の記載内容を基にした木製吊り天井下地（木摺り下地含む）の概略図を示す。現在の一般的な木製吊り天井下地の躯体から天井面まで構成部材は、上部（構造部）から吊木受・吊木・野縁受け・野縁であり、それらを介して天井仕上材の下地面が取り付けが、今回は木摺り下地とした。5部材に対してA～Eを附番し、それらの「材種」、「取付間隔」、「接合部（各部材同士の取り付け部）」、「継手」の仕様に関連する記述を抽出した。

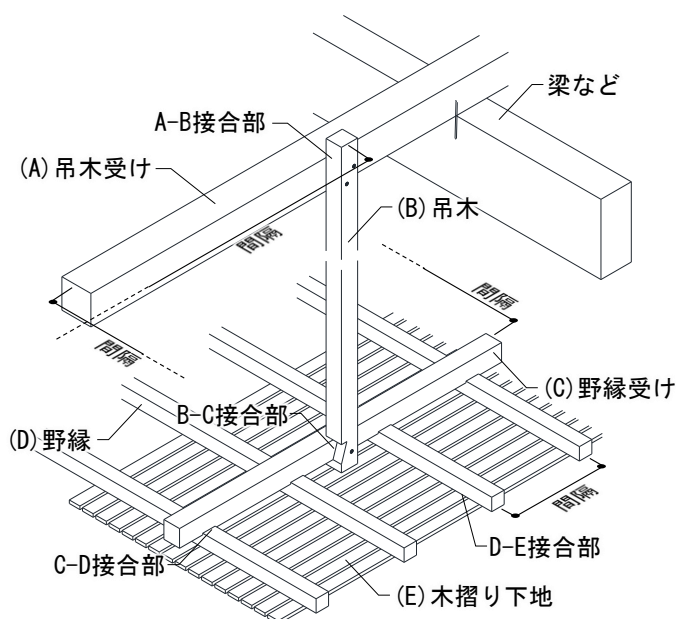


図3-6 JASS11の記載内容を基にした木製吊り天井下地（木摺り下地含む）の概略図

#### 3.4.3 文献調査の結果（調査 3-2）

表 3-3 に年代ごとの技術書における木製吊り天井下地（木摺り下地含む）仕様の例、表 3-4 に年代別の木製吊り天井下地仕様の概念図を示す。表 3-3 では文献の記述は現代語訳しているが、寸法単位は表現の移り変わりを確認するため尺貫法・SI 単位系をそのまま表記した。表 3-4 では、各納まりが記述されていた文献の年代と吊元（ここでは小梁）から下部の部材数、記述内容から想定される納まりの概念図を示した。また、一部の文献では木摺り下地に関する記述がみられないものもあったが、左官工事の項目で扱われることもあるため、左官天井の場合には野縁の下部には木摺り下地が取り付けられるものとみなして作図した。

1872 (明治 5) 年刊行の洋風建築に関する初期の技術書「西洋建築ひながた」[3-11]では、(E)木摺り下地に関して触れられていたことは先述したが、その上部構造である A～D の 4 部材に関する記述は確認できず、(E)木摺り下地の接合方法は小屋組や上階の根太への直接取り付けを想定したものとみられ、これは同時期竣工である富岡製糸場の東・西置繭所の天井納まり（写真 3-1）とも類似している。1888 (明治 21) 年の「建築学階梯 巻之中」[3-139]では、(D)野縁を介して(E)木摺り下地を取り付ける記述となったのに加えて、上階からの音響伝播抑制を目的に(B)吊木を用いる例を示す記述も現れはじめ、下地部材が徐々に分化した様子を確認できる。A～E までの下地 5 部材全てに関する記述が認められたのは明治 38 (1905) 年の「和洋建築工事仕様設計実例 上」[3-120]であり、各部材の断面寸法含め、この時点で 1960 (昭和 35) 年の JASS11 [3-138]に繋がる基本的な仕様が定まっていたことがわかる。

ただし、以降は 1947 (昭和 22) 年の文献まで(C)野縁受けの記述が再びなくなる時期があり、やや逆行する傾向がみられ、(C)野縁受けの扱いには時系列に並べると以下の 3 種があった。①：表 3-4 f) に示す、今日における一般的な構成のもの[3-120,131,138]、②：表 3-4 d) に示す、(C)野縁受けを省略して(B)吊木を(D)野縁へ直接接合したもの[前掲 2-12,3-124,3-140]、③：表 3-4 e) に示す、(C)野縁受けを設けるが、吊木は(D)野縁へ接合したもの（野縁受けは「振れ止め」の目的）[3-141]がみられた。(C)野縁受けを有するほうが施工時の工数が増えるものの、(D)野縁の直交方向の剛性向上や、天井下地面の通りが(E)木摺りに支配されにくくなる効果があると考えられる。加えて、(B)吊木の下端は片蟻や釘打ちによる接合が求められていることから、(C)野縁受けと(B)吊木を接合したほうが、(D)野縁の高さ分だけ吊木を下方へ伸ばせるため、釘打ち部から(B)吊木の小口までの縁端距離を長くとることができ、割裂破壊を抑制できる可能性がある。そのため力学、構成の両面で合理性があると考えられる。

接合部について、まず(C)吊木上下端の接合部は木材の繊維方向に荷重が加わるため割裂が起きやすく、それは接合部からの縁端距離に依存する傾向があるため、下方に木摺り下地が存在する吊木下端側が不利になりやすい。その意味で考えると、A-B 接合部は添え付け・釘打ち、B-C 接合部は片蟻や寄せ蟻加工が多く記載されており、ホゾ等の既存の加工技術が応用しつつ、縁端距離の長さによって技法の効率的な使い分けがなされている。また(D)野縁、(E)木摺りの固定は主に釘打ち、または記載無しもあり、現場の裁量に一任していた可能性がある。

各部材の断面寸法は後年ほど小さい値に変化しており、3.3.3(2)の木摺り下地と類似する傾向を示しており、これは経済性のみならず経験則による小断面化、省力化とも考えられる。

表 3-3 年代ごとの技術書における木製吊り天井下地（木摺り下地含む）仕様の例

文献	年代		(A) 吊木受け	(B) 吊木	(C) 野縁受け	(D) 野縁	(E) 木摺り下地	文献	
	西暦	和暦							
「西洋家作ひながた」	1872	明治 5	“天井根板”との文言あり。小屋組の下弦材や根太、小梁のことを示すとみられ、そこへ木摺り下地を直接打ち付けていたと考えられる。					天井と界壁をラッス：Lath(塗土を留める薄くて幅の狭い木片)で覆い土塗りし十分に固定し、その上を白く塗るべき事。	3-11
「建築学階梯巻之中」	1888	明治 21	記載なし	吊木を用いて野縁を根太に取り付ける方法もしばしば行われる。この方法は床と天井を隔離することで音響伝播が少ない。	記載なし	接合部：根太か小梁に取り付ける。 間 隔：木摺り厚 3 分では 1 尺 1 寸 5 分、それより薄い場合は間隔を狭める	野縁の下に釘付ける。又は根太に取り付けることも少なからずある。	3-139	
「和洋建築工事仕様設計実例上」	1905	明治 38	材 種：杉丸太 4 寸角に面付け 接合部：吊木との当りは欠き込み、両端を梁側面へほぞ差し。	材 種：檜、1 寸 5 分角 接合部：上下面を蟻加工し、ほぞ毎に 3 寸 5 分釘を 2 本ずつ打つ。 間 隔：4 尺 5 寸以内	材 種：杉丸太、3 寸 5 分角に面付け 接合部：吊木との当りは欠き込み、野縁下端より 4 寸釘打ち付け、野縁毎に 3 寸手違い鋸打ち付け 継 手：金輪継ぎ 間 隔：4 尺 5 寸以内 その他：下部は通りよく削る	材 種：松 2 寸角 接合部：記載なし 継 手：いすか継ぎ 間 隔：1 尺 2 寸以内 その他：野縁受との当り・吊り高さを見極める、下端は墨うち削り。	材 種：杉 4 分板、幅 1 寸 5 分以内 接合部：野縁毎に 1 寸釘を幅方向に 2 本ずつ打つ。 継 手：記載なし 目透し：3 分 その他：狂いを生じた部分は打換えをする	3-120	
「學會仕様書」	1923	大正 12	材 種：松丸太 末口 3 寸 接合部：架け渡し、釘や鋸で固定。	材 種：松 2 寸角 接合部：上端腮欠き、下端は片蟻 間 隔：3 尺以内	記載なし	材 種：松 2 寸角 接合部：記載なし 継 手：乱継ぎ 間 隔：1 尺 2 寸 その他：下端鉋削り不陸なく通りよく設置	材 種：杉三寸貫二ツ割 接合部：野縁等に釘 2 本ずつ打ち付け。 継 手：乱継ぎ 目透し：4 分	前掲 2-12	
「実用洋風建築構造学」	1931	昭和 6	材 種：松丸太 末口 8cm 接合部：記載なし	材 種：松六本三寸 (1 寸 5 分×1 寸 2 分) 接合部：記載なし 間 隔：450mm	記載なし	材 種：1 寸 5 分～2 寸 接合部：記載なし 継 手：記載なし 間 隔：450mm	記載なし	3-124	
「建築構造学」 (著：鈴木忠五郎)	1933	昭和 8	材 種：径 10cm 内外の丸太又は角材 接合部：小屋組又は床梁に架け渡しボルト締め 間 隔：1m 内外	材 種：3～4cm 角材 接合部：上部は釘打ちか根太に取り付け、下部は野縁に寄せ蟻、又は釘打ち 間 隔：記載なし	記載なし	材 種：記載なし 接合部：記載なし 継 手：記載なし 間 隔：0.5m 内外	記載なし	3-140	
「建築構造学」 (著：堀紫朗)	1947	昭和 22	材 種：杉 9cm 以上の角材または径 10cm 以上の丸太 接合部：梁間または各小屋梁上に釘、鋸で留付け、スラブ下に取り付ける場合は径 15mm 以上の埋め込みボルトを以て 1.35m 以内で留付け 間 隔：90cm 以内	材 種：垂木 接合部：野縁と野縁受けの交差部に配置し、下部は野縁と片蟻、上部は吊木受けに挟入れ、2 本以上で釘打ち 間 隔：記載なし	材 種：垂木 接合部：野縁とは手違い鋸 2 丁打ち 継 手：記載なし 間 隔：80cm	材 種：垂木 接合部：吊木下端に釘打ち 継 手：いすか継ぎ 間 隔：45cm 以内	材 種：杉山挽四分板 幅 3cm 以内に挽割り 接合部：釘 2 本打ち 継 手：5 枚以内の乱継ぎ 目透し：0.8-9cm	3-131	
「建築構造一般」	1957	昭和 32	材 種：杉丸太末口 8cm または松 9cm 角 接合部：記載なし 間 隔：90cm	材 種：松、杉 3～4.5cm 角 接合部：上端釘打ち、野縁とは寄せ蟻または片蟻 間 隔：90cm	材 種：松、杉 3～4.5cm 角 接合部：記載なし 継 手：記載なし 間 隔：90cm その他：野縁の振れ止めとして設けることがある。	材 種：松、杉 3～4.5cm 角 接合部：吊木と寄せ蟻または片蟻 継 手：いすか継ぎ 間 隔：45-60cm	記載なし	3-141	
「JASS11 木工事初版」	1960	昭和 35	材 種：受材間隔 2.7m 以下：丸太末口 80 内外、同・3.6m 以下：同・90 内外 接合部：受材上端に、やり違いに配置し、なじみ欠き、乗せ掛け、手違いかすがいまたは釘打ち。 (床梁) 床梁側面に受け木取付け、受け木当り欠き、乗せ掛け、鋸または釘打ち。 (鉄骨梁または鉄骨小屋組) 吊木受けを鉄骨の上端に欠き込み、必要に応じかい木飼い乗せ掛け、またはなじみ取り乗せ掛け、鉄線にて緊結する。 間 隔：900mm 内外	材 種：厚 30、幅 36mm 接合部：下部は野縁受、または野縁へ片ありに欠き込み、釘打ち。上部は吊木受けに添え付け、釘 2 本打ち。 間 隔：900mm 内外	材 種：厚 39、幅 45mm 接合部：野縁上端に添え付け、野縁当たり釘打ち。壁際の野縁受は柱及び間柱その他に、添え付け釘打ち。コンクリート造・組積造壁際の野縁受は、間隔 600mm 内外に埋め込まれた木レンガに添え付け釘打ち。 継 手：継手位置は乱とし、野縁の継手箇所を避け、いすか継ぎ、釘打ち。ただし C 種の継ぎ手は突付け継ぎ、両面添え板当て、釘打ち。壁際の野縁受は、柱・間柱または木レンガ心で突付け継ぎ。 間 隔：900mm 内外	材 種：厚 39、幅 45mm 接合部：塗天井などの野縁は一方向に配置し、野縁受下端に添え付け、釘打ち。野縁がコンクリート造・組積造の壁付きとなるときは、間隔 600mm 内外に埋め込まれた木レンガに添え付け釘打ち。 継 手：継手位置は乱とし、野縁受当たりを避け、いすか継ぎ釘打ち。ただし C 種の継ぎ手は突付け継ぎ、両面添え板当て、釘打ち。壁際の野縁受は、柱・間柱または木レンガ心で突付け継ぎ。 間 隔：塗天井は 360mm 内外	材 種：厚 7、幅 36mm 接合部：木摺りうち方向はなるべく受材に直角とし、通りよく 7mm 内外の目透しにし、受材当り幅方向に、釘 2 本ずつ打つ。 継 手：受材芯で 6mm 内外の目透し継ぎ。木摺り 6 枚以下毎に乱継ぎとし、開口部・隅・角などの周囲 240mm 以内には木摺りの継ぎ手を設けてはならない。開口部またはスイッチボックスなどの切欠きは木摺りが 50mm 以上持ち出しにならないように、予め受木を設ける。 目透し：7mm 内外	3-138	



表 3-4 年代別の木製吊り天井下地仕様の概念図

<p>a) 1872(明治 5)年 部材数：1 対象文献：3-11</p>	<p>b) 1888(明治 21)年 部材数：2 対象文献：3-139</p>
<p>c) 1888(明治 21)年 部材数：3 対象文献：3-139</p>	<p>d) 1923～1933(大正 12～昭和 8)年 部材数：4 対象文献：前掲 2-12,3-124,140</p>
<p>e) 1957(昭和 32)年 部材数：5 対象文献：3-141</p>	<p>f) 1905, 1947, 1960～(明治 38, 昭和 22, 35～)年 部材数：5 対象文献：3-120,131,138</p>

#### 第3章のまとめ

本章では、木摺り漆喰天井の歴史的・工法的移り変わりについて文献調査・分析を行い、木摺り下地の確立の過程を整理し、幕末期以降の日本への導入と発展、体系化の過程を部材寸法、納まりの観点から明らかにした。また木摺り漆喰天井の導入以後における木摺り下地の寸法について実物件関連資料 104 件、同時期の技術書 22 件を調査し、年代別の変遷を分析した。加えて、天井面を支持する木製吊り天井下地の納まりについても技術書による調査を行い、天井部材の分化や接合部の仕様を把握した。これらの調査によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 古代ローマの建築家ウィトルウィウスが紀元前 25 年頃に著したとされる「建築十書- De architectura」には、左官仕上げのヴォールト天井に関する記述があり、現代の吊り天井の納まりと遜色ない水準の仕様が定まっていた。曲面の天井を仕上げる意味で左官材の利用は合理的であり、幕末期以降に西洋から日本へ導入される左官仕上天井の技法が相当に早い段階で構築されていた。
- 2) 西洋における初期の木摺り下地は小径木を縦割りしたものを小幅板に用い、木表側を胴縁や野縁に取り付けたものになっており、目透かしの断面が扇型となるため、漆喰との嵌合に効果的であったと考えられる。目透かし部の漆喰形状は部材耐力を確保するうえでは重要な要素であり、製材された小幅板に移行した後も、断面形状の調整（台形断面、矩形断面）や、左官材に繊維を混ぜたり天井裏側へはみ出させたりすることで、左官材を嵌合させるための工夫が行われており、本工法が日本へ導入される 100 年以上前には原型がほぼ整っていたといえる。
- 3) 日本古来の左官技法は小舞土壁が一般に普及しており、日本で発展した木造建築構法の地震時の挙動との相性がよいものであった。一方で、小舞土壁が施工できない部位では木摺り下地のようなものが存在していたが、目透かしが無い、下塗りに漆喰が用いられていない、などの違いによって不具合が起きやすいものであったため、木摺り漆喰工法とは根本は異なり、あくまで小舞土壁の亜種と解釈すべきである。
- 4) リスボン地震の教訓を踏まえたポンバル様式建築では、左官壁に耐力壁的な性格を持たせつつ、許容範囲を超えると意図的に剥落させて軸組みの先行破壊を抑制させる考え方を持っている。これは、軸組みと左官下地の締結度をあえて低くすることで、外観上の不具合が抑制されるような納まりになっている日本の左官技法と対照的であり、壁や仕上材料に対する設計思想の違いがみられた。



### 第3章 木摺り漆喰工法に関わる時代的変遷の調査

- 5) 幕末期～昭和期に竣工した実物件の関連資料 104 件、同時期に刊行された建築技術書 22 件から天井木摺り下地の仕様を調査した結果、小幅板の平均寸法は板幅、厚さ共に技術書よりも実物件のほうが大きいことがわかった。目透かし幅は両者共に類似した寸法を示し、一部の仕様記録では、小幅板の断面形状を指定する記述もみられた。また板厚、目透かし幅は建築工事標準仕様書などの刊行時期に合わせて、所定の値へ安定化する傾向があるが、板幅は各年代を通してばらつきが大きい傾向がみられた。
- 6) 木製吊り天井下地の仕様変遷について、明治期～昭和期に刊行された建築技術書を調査した結果、明治初期の文献では木摺り下地を床根太などに直接取り付ける仕様となっており、同時期に竣工した富岡製糸場西置繭所の天井仕様と類似するものであった。そののち、下地部材（吊木、野縁受けなど）が徐々に分化し、1905(明治 38)年の段階で 1960(昭和 35)年の JASS11 初版に繋がる基本的な仕様が定まっていたが、以降は 1947(昭和 22)年まで再び野縁受けの記述が消え、やや逆行した傾向を示した。納まりとしては、野縁受けがあるほうが天井面の仕上がり、下地自体の力学的特性は良好なものになる可能性がある。

第3章の参考文献

- [3-1] Helena M. Currie, Matthew B. Bronski, and Rachel M. Lynde: Stability Assessment of Historic Plaster Ceilings on Wood Lath, *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components*, DBMC 2020, Barcelona, 2020
- [3-2] 森田慶一 訳：ウィトル-ウィウス建築書, 生活社, 1943
- [3-3] Paulo Malta da Silveira, Maria do Rosario Veiga, Jorge de Brito: Gypsum coatings in ancient buildings, *Construction and Building Materials*, Vol.21, pp.126-131, 2007
- [3-4] (公財) ひょうご震災記念21世紀研究機構 研究調査本部：リスボン地震とその文明史的意義の考察 研究調査報告書, 2015
- [3-5] 近藤豊：明治初期の擬洋風建築の研究, 理工学社, 東京, 1999
- [3-6] 西澤正浩, 中川武：「彦根城楽々園地震の間」の耐震計画における一考察, 日本建築学会学術講演梗概集, 建築歴史・意匠, pp.211-212, 1997
- [3-7] 太田静六：文倉と防火対策, 日本建築学会論文報告集, 第63号, pp.565-568, 1959
- [3-8] Jorge Morarji Dias Mascarenhas: *A Study of the design and construction of Buildings in the pombaline quarter of Lisbon*, University of Glamorga, Doctoral thesis, 1996
- [3-9] 岡野雅枝：富岡製糸場西置繭所保存修理工事関連調査報告 歴史的木摺り漆喰天井及び漆喰壁の保存修理について, 平成27年度 富岡製糸場総合研究センター報告書, 富岡市, 2016
- [3-10] 菊池重郎：明治期洋風建築術書「西洋家作ひながた」第2報-その刊行の意図と原書との関係について、日本建築学会研究報告(33-2)、pp.235-236、1955
- [3-11] 村田文夫、山田貞一郎(訳)：増補 西洋家作ひながた 三, 千鍾書房, 1872
- [3-12] 根来美和, 中谷礼仁, 本橋 仁, 丸茂友里, 廣瀬翔太郎：『西洋家作雛形』・『Cottage Building』の比較研究2：産業革命後英国における住宅改善の取り組みと本書の位置づけ, 日本建築学会学術講演梗概集, 建築歴史・意匠, pp.741-742, 2015
- [3-13] C. Bruce Allen: *Cottage Building*, London, John Weale, 1854
- [3-14] 本橋 仁, 中谷礼仁, 丸茂友里, 根来美和, 廣瀬翔太郎：『西洋家作雛形』・『Cottage Building』比較研究1：明治初期日本における救貧行政からみる出版意図の再考察, 日本建築学会学術講演梗概集, 建築歴史・意匠, pp.739-740, 2015
- [3-15] 長崎市：重要文化財旧グラバー住宅修理工事報告書, 長崎市, 1968
- [3-16] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧オルト住宅修理工事報告書, 長崎市, 1979
- [3-17] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧鹿児島紡績所技師館修理工事報告書, 鹿児島市, 1979
- [3-18] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧リンガー(弟)住宅修理工事報告書, 長崎市, 1974
- [3-19] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財東山手十二番館主屋・附属屋保存修理工事報告書, 長崎市, 2005
- [3-20] 新潟市：重要文化財旧新潟税関庁舎修理報告書, 新潟市, 1971
- [3-21] 本多 友常, 島田 聖, 安中 正憲：紀伊大島樫野埼灯台官舎調査報告, 紀州経済史文化史研究所紀要, vol.23, pp.1-37, 2003

- [3-22] 文化財建造物保存技術協会：国宝旧富岡製糸場西置繭所保存修理工事報告書 建造物編 (旧富岡製糸場建造物保存修理工事報告書；2), 富岡市, 2020
- [3-23] 文化財建造物保存技術協会：国指定史跡旧見付学校々舎修理工事報告書, 磐田市, 1977
- [3-24] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧羅典神学校修理工事報告書, カトリック長崎大司教区, 1981
- [3-25] 文化財建造物保存技術協会：松山市指定文化財釣島灯台旧官舎保存修理工事報告書, 松山市, 1998
- [3-26] 東京大学工学部建築学科太田研究室：福島県重要文化財開成館修理工事報告書, 郡山市教育委員会事務局, 1967
- [3-27] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧中込学校々舎修理工事報告書, 長野県佐久市, 1974
- [3-28] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧睦沢学校校舎(甲府市藤村記念館)移築保存修理工事報告書, 甲府市, 2010
- [3-29] 重要文化財旧開智学校本館移転修理工事事務所：重要文化財旧開智学校本館移転修理工事報告書, 松本市教育委員会, 1965
- [3-30] 松尾建築設計室：有田異人館保存修理工事報告書, 有田町教育委員会, 2018
- [3-31] 北海道開拓記念館：旧開拓使工業局庁舎復元修理工事報告書, 北海道開拓記念館, 1992
- [3-32] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧群馬県衛生所保存修理工事報告書, 桐生市教育委員会, 1986
- [3-33] 山形市：重要文化財山形市立病院済生館本館移築修理工事報告書, 山形市, 1969
- [3-34] 文化財建造物保存技術協会：山形県有形文化財旧西村山郡役所修理工事報告書, 寒河江市教育委員会, 1982
- [3-35] 上関町教育委員会教育文化課：山口県指定文化財四階楼保存修理工事報告書, 上関町教育委員会, 2002
- [3-36] 京都府教育庁指導部文化財保護課：重要文化財竜谷大学本館並びに附守衛所保存修理工事報告書, 京都府教育委員会, 1997
- [3-37] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧岩科学学校校舎修理工事報告書, 松崎町, 1993
- [3-38] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財豊平館保存修理工事報告書, 札幌市, 1986
- [3-39] 小野木重勝：上野博物館の仕様書および主要構造：コンドル設計上野博物館に関する考察・IV, 日本建築学会論文報告集, 第186号, pp.79-85, 94, 1971
- [3-40] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧神戸居留地十五番館保存修理工事報告書, ノザワ, 1993
- [3-41] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧西田川郡役所保存修理工事報告書, 致道博物館, 1972
- [3-42] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財新潟県議会旧議事堂修理工事報告書, 新潟県, 1974
- [3-43] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧伊達郡役所保存修理工事報告書, 桑折町, 1979
- [3-44] 京都府教育庁指導部文化財保護課：重要文化財同志社彰栄館修理工事報告書, 京都府教育委員会, 1981

- [3-45] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧鶴岡警察署庁舎保存修理工事報告書, 致道博物館, 2018
- [3-46] 丹波市教育委員会：兵庫県指定重要有形文化財旧氷上高等小学校校舎修理工事報告書, 丹波市教育委員会, 2016
- [3-47] 東北工業大学建築史研究室：福島県重要文化財旧南会津郡役所調査修理工事報告書, 福島県南会津郡田島町教育委員会事務局, 1972
- [3-48] 群馬県吾妻郡中之条町教育委員会：群馬県指定重要文化財旧吾妻第三小学校保存修理工事報告書, 群馬県吾妻郡中之条町教育委員会, 1982
- [3-49] 文化財建造物保存技術協会：山形県有形文化財旧西村山郡会議事堂修理工事報告書, 寒河江市教育委員会, 1984
- [3-50] 博物館明治村：国登録有形文化財(建造物)森鷗外・夏目漱石住宅及び神戸山手西洋人住居保存修理工事報告書, 博物館明治村, 2006
- [3-51] 野村俊一：デフォレスト館建造物調査報告書, 東北学院, 2014
- [3-52] 北海道庁：重要文化財北海道庁旧本庁舎復原改修工事報告書, 北海道, 1970
- [3-53] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧登米高等尋常小学校校舎保存修理工事報告書, 登米町, 1990
- [3-54] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧福島県尋常中学校本館修理工事報告書, 安積高等学校旧本館保存会, 1980
- [3-55] 文化財建造物保存技術協会：明治学院旧宣教師館(インブリー館)保存修理工事報告書, 明治学院, 1998
- [3-56] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧トーマス住宅保存修理工事報告書, 神戸市, 1985
- [3-57] 文化財建造物保存技術協会：旧東京音楽学校奏楽堂移築修理工事報告書, 東京都台東区, 1987
- [3-58] 京都府教育庁指導部文化財保護課：重要文化財同志社クラーク記念館修理工事報告書, 京都府教育庁指導部文化財保護課, 2008
- [3-59] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧岩崎家住宅（洋館・撞球室・大広間・附煉瓦塀）保存修理工事報告書, 文化庁, 2005
- [3-60] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧学習院初等科正堂修理工事報告書, 千葉県教育委員会, 1976
- [3-61] 金沢市文化スポーツ局文化財保護課, 松川秀幸建築設計事務所：県指定有形文化財旧石川県立第二中学校三尖塔校舎修理工事報告書, 金沢市, 2017
- [3-62] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧山形師範学校本館正門修理工事報告書, 山形県教育委員会, 1980
- [3-63] 神戸市建築局営繕第一課：重要文化財旧ハッサム住宅修理工事報告書, 神戸市教育委員会事務局社会教育課, 1963
- [3-64] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧旭川偕行社保存修理工事報告書, 旭川市教育委員会社会教育部文化振興課, 2017

### 第3章 木摺り漆喰工法に関わる時代的変遷の調査

- [3-65] 文化財建造物保存技術協会：山形県指定有形文化財(建造物)旧東田川郡役所及び郡会議事堂保存修理工事報告書, 文化財建造物保存技術協会, 1996
- [3-66] 文化庁：重要文化財旧奈良県物産陳列所保存修理工事報告書, 文化庁, 2000
- [3-67] 文化財建造物保存技術協会：福岡県指定文化財旧福岡県立豊津中学校講堂「思永館」保存修理工事報告書, 福岡県教育委員会, 1993
- [3-68] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧富山県立農学校本館（富山県立福野高等学校蔵浄閣）保存修理工事報告書, 富山県教育委員会, 2006
- [3-69] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧香港上海銀行長崎支店保存修理工事報告書, 長崎市, 1996
- [3-70] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧第五十九銀行本店本館保存修理工事報告書, 青森銀行, 1985
- [3-71] 文化財建造物保存技術協会：広島県重要文化財旧呉鎮守府司令長官官舎修理工事報告書, 呉市, 1996
- [3-72] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧下関英国領事館本館ほか2棟 修理工事報告書, 下関市, 2014
- [3-73] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧日本郵船株式会社小樽支店保存修理工事報告書, 小樽市, 1987
- [3-74] 京都府教育庁指導部文化財保護課：重要文化財旧日本銀行京都支店修理工事報告書, 京都府, 1988
- [3-75] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財弘前学院外人宣教師館移築修理工事報告書, 重要文化財弘前学院外人宣教師館保存修理実行委員会, 1980
- [3-76] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧弘前偕行社保存修理工事報告書, 弘前厚生学院, 2019
- [3-77] "博物館明治村：明治村建造物移築工事報告書 第5集(聖ヨハネ教会堂(重要文化財旧日本聖公会京都聖約翰教会堂))", 博物館明治村, 1988"
- [3-78] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財仁風閣保存修理工事報告書, 鳥取市, 1977
- [3-79] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財天鏡閣本館・別館・表門保存修理工事報告書, 福島県, 1983
- [3-80] 国立博物館東京国立博物館：重要文化財表慶館保存修理工事報告書, 国立博物館東京国立博物館, 2007
- [3-81] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧日本生命保険株式会社九州支店保存修理工事報告書, 福岡市教育委員会, 2007
- [3-82] 博物館明治村：明治村建造物移築工事報告書第10集：宇治山田郵便局（旧伊勢郵便局）, 博物館明治村, 1997
- [3-83] 旧中越銀行本館建物調査委員会：旧中越銀行本館移築修理工事報告書, 砺波市, 1979
- [3-84] 小野木重勝：赤坂離宮の内・外装材と加工・施工技法に関する研究, 平成3年度科学研究費補助金（一般研究C）研究成果報告書, 1992
- [3-85] 文化庁：重要文化財旧米沢高等工業学校本館保存修理工事報告書, 文化庁, 1988

- [3-86] 文化庁：重要文化財旧近衛師団司令部庁舎保存整備工事報告書, 文化庁, 1978
- [3-87] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧函館区公会堂保存修理工事報告書, 函館市, 2021
- [3-88] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧福岡県公会堂貴賓館保存修理工事報告書, 福岡県, 1987
- [3-89] 文化財保存計画協会：重要文化財岩手銀行(旧盛岡銀行)旧本店本館保存修理工事報告書, 岩手銀行, 2016
- [3-90] 文化財保存計画協会：重要文化財旧松本家住宅 洋館・日本館・壱号蔵・貳号蔵 修理工事報告書, 西日本工業倶楽部, 1982
- [3-91] 慶應義塾：重要文化財慶應義塾図書館保存修理工事報告書(本編), 文化財保存計画協会, 1983
- [3-92] 三四五建築研究所：重要文化財岩手大学農学部(旧盛岡高等農林学校)旧本館耐震対策工事報告書, 岩手大学, 2013
- [3-93] 文化財建造物保存技術協会：唐津市指定重要文化財旧唐津銀行本店保存修理工事報告書, 唐津市, 2011
- [3-94] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財門司港駅(旧門司駅)本屋ほか1棟保存修理工事報告書, 九州旅客鉄道, 2020
- [3-95] 金井彦三郎：東京停車場建築工事報告(続き), 土木學會誌, 第1巻, 第2号, pp.601-636, 1915
- [3-96] 神戸市教育委員会事務局文化財課：旧ドレウエル邸(ラインの館)保存修理工事報告書, 神戸市教育委員会事務局文化財課, 2020
- [3-97] 明治村(北里研究所 監修・協力)：北里研究所本館・医学館保存修理工事報告書, 明治村, 2012
- [3-98] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財山形県旧県庁舎及び県会議事堂保存修理工事報告書1(旧県会議事堂編), 山形県生活福祉部生活文化課, 1991
- [3-99] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財山形県旧県庁舎及び県会議事堂保存修理工事報告書2(旧県庁編), 山形県企画調整部文化振興課, 1995
- [3-100] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財山口県旧県会議事堂保存修理工事報告書, 山口県, 2005
- [3-101] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財函館ハリストス正教会復活聖堂保存修理工事報告書, 函館ハリストス正教会, 1989
- [3-102] 東京都指定名勝旧古河庭園旧古河邸本館修理委員会：東京都指定名勝旧古河庭園旧古河邸本館修理工事報告書, 東京都, 1989
- [3-103] 大阪市教育委員会：重要文化財大阪中央公会堂保存・再生工事報告書, 大阪市, 2003
- [3-104] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧門司三井倶楽部移築修理工事報告書, 北九州市, 1995
- [3-105] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財自由学園明日館保存修理工事報告書, 自由学園, 2002
- [3-106] 文化財建造物保存技術協会：国指定名勝旧池田氏庭園洋館保存修復工事報告書, 秋田県大仙市, 2011
- [3-107] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧名古屋控訴院地方裁判所区裁判所庁舎保存修理工事報告書, 名古屋市, 1989

- [3-108] 愛荘町：愛荘町指定文化財旧愛知郡役所修理工事報告書, 愛荘町, 2018
- [3-109] 文化財保存計画協会：下関市指定有形文化財旧通信省下関電信局電話課庁舎(下関市立近代先人顕彰館)保存活用整備工事報告書, 下関市, 2010
- [3-110] 文化財建造物保存技術協会：山口県指定有形文化財旧滝部小学校本館(下関市立豊北歴史民俗資料館)保存修理工事報告書, 下関市教育委員会, 2012
- [3-111] 文化財建造物保存技術協会：重要文化財旧前田家本邸洋館ほか一棟保存修理工事報告書, 東京都教育委員会, 2019
- [3-112] 日建設計：東京都指定有形文化財(建造物)旧李王家東京邸保存修理工事報告書, 西武プロパティーズ, 2017
- [3-113] 名古屋市：国登録有形文化財名古屋市役所本庁舎保存修理工事報告書, 名古屋市, 2010
- [3-114] 文化財保存計画協会：重要文化財高島屋東京店保存修理工事報告書, 高島屋, 2019
- [3-115] 大津市, 大津市教育委員会：大津市指定有形文化財旧琵琶湖ホテル本館修理工事報告書, 大津市, 2002
- [3-116] 大蔵省営繕管財局：帝国議会議事堂建築報告書, 営繕管財局, 1938
- [3-117] 東京都港区教育委員会：港区指定文化財旧公衆衛生院(港区立郷土歴史館等複合施設「ゆかしのかし」)保存修理工事報告書, 港区教育委員会, 2020
- [3-118] Byrkit-Hall Sheathing Lath Co. : Byrkit's-Patent Sheathing Lath, 1890
- [3-119] 小国巳一：建築工事仕様便覧, 建築書院, 1905
- [3-120] 田中豊太郎：和洋建築工事仕様設計実例 上, 建築書院, 1905
- [3-121] 中村達太郎：日本建築辞彙, 初版, 丸善, 1906
- [3-122] 中村達太郎：日本建築辞彙, 増補10版, 丸善, 1919
- [3-123] 田中豊太郎：建築仕様全集, 建築書院, 1925
- [3-124] 溝口松雄：実用洋風建築構造学, 須原屋書店, 1931
- [3-125] 庄司富重：実用建築構造 下巻, 鈴木書店, 1932
- [3-126] 八木憲一ほか4名：高等建築学 第7巻, 常磐書房, 1933
- [3-127] 森規矩郎：左官技法壁の作り方, 東学社, 1935
- [3-128] 山本悟郎：誰にでも解る・直ぐ役に立つ和洋建築構造図解 9版, 金竜堂書店, 1937
- [3-129] 西田竹治：現代建築我家の知識, 須原屋書店, 1940
- [3-130] 伊保内富弥：西洋家屋構造, 工務学会, 1941
- [3-131] 堀紫朗：建築構造学, 丸善, 1947
- [3-132] 大渡最蔵：最新和洋建築木構造, 中村書店, 1950
- [3-133] 竹山謙三郎：新制建築構造 第1, オーム社, 1956
- [3-134] 日本建築学会：JASS15 左官工事, 初版, 1957
- [3-135] 日本建築学会：JASS 11 木工事図解, 1959
- [3-136] 滝大吉, 建築学講義録 巻の2, 第16版, 建築書院, 1909
- [3-137] 迎賓館：迎賓館赤坂離宮改修記録, 迎賓館, 1977
- [3-138] 日本建築学会：JASS 11 木工事, 1960

### 第3章 木摺り漆喰工法に関わる時代的変遷の調査

[3-139] 中村達太郎：建築学階梯 卷之中, 米倉屋書店, 1888

[3-140] 鈴木忠五郎：建築構造学, 淀屋書店出版部, 1933

[3-141] 十代田三郎, 蛭田捨太郎：建築構造一般, 産業図書, 1957

#### 脚注

[注1] 字の如く葦簀（よしず）を下地とした左官工法で、壁の場合は薄手の小舞替わり、天井の場合は簡易な下地として用いられたようである。日本における明治以降の例を挙げると、天井では野縁の下部に葦簀を据え付け、さらに下から栈木で挟み込んで固定されている。

[注2] 壁倍率は片面で 0.5、両面で 1.0 とされている。木摺り下地部分のみを対象としており、仕上材は規定されていない。施工する仕上材の種類や剥落した場合の耐力の変動が考慮されているようである。

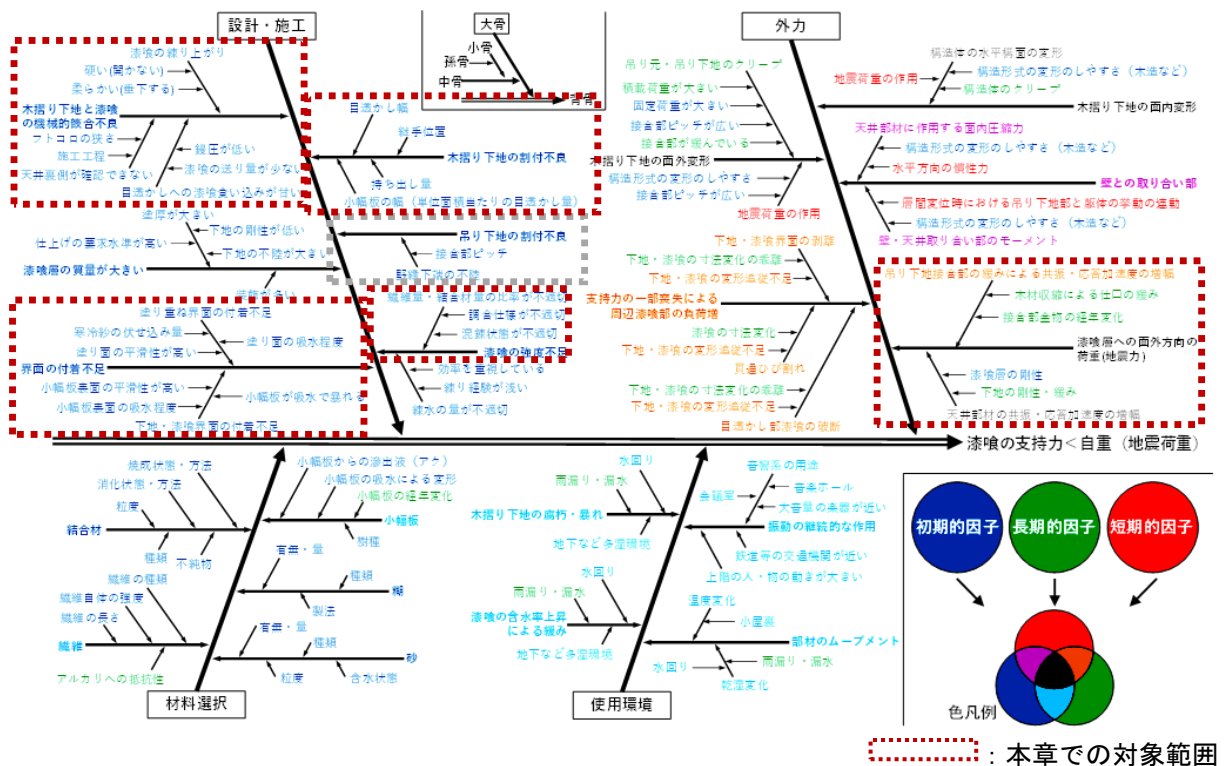
[注3] 「嵐打ち」「拝み打ち」などといわれ、事例では水平から 45° 程度の角度を付けて張られていることが多いようである。

[注4] 2017 年に工事現場調査を実施した際の森田氏（富岡市世界遺産部富岡製糸場保全課・当時）からのヒアリングより。



## 第4章

# 木摺り漆喰工法における基礎力学的特性の実験的検討



## 第4章 木摺り漆喰工法における基礎力学的特性の実験的検討

4.1 第4章概説 .....	67
4.2 木摺り漆喰天井の外力抵抗要素.....	67
4.3 材料の調合比について .....	68
4.4 漆喰材料の基礎力学的特性に関する実験概要（実験 4-1） .....	70
4.4.1 基礎力学的特性に関する実験条件.....	70
4.4.2 基礎力学的特性に関する実験方法.....	73
4.5 漆喰材料の基礎力学的特性に関する実験結果および考察 .....	74
4.5.1 試験別・材齢別の評価 .....	74
4.5.2 調合別の評価 .....	77
4.6 木摺り下地と漆喰の外力抵抗性に関する実験概要（実験 4-2 シリーズ） .....	82
4.6.1 木摺り漆喰要素試験体に関する試験条件.....	82
4.6.2 要素試験体の施工・引張試験方法.....	85
4.7 要素試験体による木摺り漆喰天井の力学的特性に関する実験結果および考察 .....	88
4.7.1 食い込み深さやテーパ角による基礎物性（実験 4-2-1） .....	88
4.7.2 抵抗要素の評価（実験 4-2-2） .....	91
4.7.3 木摺り下地と漆喰の界面における抵抗要素の算定 .....	93
(1)目透かし部漆喰の最大引張応力度( $R_1\sigma_{\max}$ ).....	93
(2)小幅板下面と漆喰の最大引張付着応力度( $R_2\sigma_{\max}$ ).....	93
(3)小幅板側面と漆喰のせん断付着、せん断、嵌合( $R_3$ 、 $R_4$ ).....	93
(4)小幅板上面と漆喰のせん断抵抗 ( $R_5$ ) .....	93
第4章のまとめ .....	95
第4章の参考文献 .....	97

## 4.1 第4章概説

本章では、木摺り漆喰天井部材の基礎的な力学的特性に関して論ずる。木摺り漆喰部材に外力が作用した際の挙動に影響を及ぼす要素は材料や設計・施工要因といった初期的因子のほか、経年変化の程度に影響する使用環境などの長期的因子が挙げられる。剥落、損傷を起こす際にはそれらの要因が複合的に関連することが非常に多いが、相互影響の程度だけでなく、個々の要因であっても現状では十分な検討がなされている訳ではない。ここでは、使用材料・環境は理想的な条件であることを前提とした上で、第3章で報告した木摺り下地寸法の内容も鑑みながら、漆喰調合に起因する力学的特性（実験4-1）、それに木摺り下地の仕様、施工要因を加えた木摺り下地～漆喰の外力抵抗性（実験4-2）を検討し、本章以降の検証内容および当該工法の一般解として適用することを目指すものである。

## 4.2 木摺り漆喰天井の外力抵抗要素

表4-1に木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の想定を示す。ここでは第3章の文献調査結果を踏まえ、想定する小幅板の断面形状は一般的な長方形断面に加えて、一部に記載のあった蟻型断面に加工された2種類に大別し、それぞれで作用する抵抗要素を $R_1 \sim R_6$ とした（4.6.1項で詳説）。

第2章で触れた木摺り漆喰工法の施工法に関する文献にて、明治中頃の段階で既に目透かし部の漆喰のくいこみや開きに関する特性は認識されていたことに加えて、実際に筆者は既報[4-1]により、木摺り下地の上面での漆喰の開きが無い状態が危険側の条件であることを定量化している。したがって今回は安全側の検討として、漆喰が開いていない（せん断抵抗要素 $R_5$ が作用しない）仕様の試験体を作製し、その条件下において面外耐荷重性や破壊モードにどのような影響を及ぼすかを評価した。なおテーパー断面の場合、矩形断面の $R_3$ が $R_4$ に置換されると解釈できるため、その際の挙動も矩形断面と比較した。

表4-1 木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の想定

抵抗要素		小幅板断面形状	
		矩形	テーパー
$R_1$	目透かし部漆喰の引張	○	○
$R_2$	小幅板下面と漆喰の引張付着	○	○
$R_3$	小幅板側面と目透かし部漆喰の面外せん断付着、摩擦	○	-
$R_4$	小幅板側面と目透かし部漆喰の面外せん断、摩擦(嵌合)	-	○
$R_5$	小幅板上面の漆喰の面外せん断(嵌合) <sup>注)</sup>	○	○
$R_6$	漆喰塗り重ね部の引張付着	○	○

注)本研究では安全側に立脚して対象外とした。

### 4.3 材料の調合比について

図4-1に第2,3章にて扱った文献(技術書・施工仕様書)から抽出した漆喰調合を示す。技術書ではその多くにおいて漆喰調合が日本由来・西洋由来のものにそれぞれ区分して記載されており、前者が「漆喰」や「漆喰塗(本邦式)」など、後者は「スタフ塗」、「漆喰塗(欧米式)」などと呼称されているが、図4-1では日本由来の漆喰調合について扱っている。

木摺り漆喰工法自体は幕末期以降の導入であり、下地仕様と併せて左官仕上材の調合ももたらされたが、仕上材は当時既に成熟していた日本由来の左官技法(材料や調合)が適用されたものが多いといわれている。この要因として、江戸時代初期から国内で広がりを見せた白亜総塗籠式城郭によって左官(漆喰)工事の規模が拡大したことで、左官材料の生産能力や技法が急速に発展し、当時の国際水準に比肩、もしくは超越する水準に達していたことによるものとされる[前掲2-14]。これは図4-1より、明治期～昭和期を通じて各層の調合比に顕著な差が認められないことから説明ができ、木摺り漆喰工法の導入期以前の段階で既に一般化されていたことが伺える。

当該工法における漆喰仕上げは一般に、下地に対して下塗り・斑直し・中塗り・上塗りなどと複数回(一般に3～5回、上等な仕上がりを狙う場合はそれ以上)の塗り重ねが繰り返されて施工される。下塗りは下地との付着・荷重伝達を担うため富調合(バインダー比が高く、骨材比が低い)、斑直し以降は不陸調整・剛性確保・ひび割れ抑制などのため貧調合(バインダー比が低く、骨材比が高い)とすることが定石となっている。バインダーとして用いられる貝灰と石灰は共に主成分は水酸化カルシウム(消石灰)であり、ほぼ同じ役目を持つが、鰻伸びの良さ、ひび割れの入りにくさは貝灰が、機械的強度は石灰のほうがそれぞれ有利とされている。そのため図4-1における戦前4文献[前掲2-10,12,3-95,116]のバインダー構成比は、強度が求められる下塗りでは石灰が多く、仕上がり求められる上塗りでは貝灰が多くなっており、目的に応じて使い分けられていたことがわかる。なお1950年代の2調合において貝灰の比率が減少している要因は、貝灰自体の減産によるものや、石灰の低コスト化に起因する普及率の増加によるものである。

左官工法は一般に下塗りから上塗りにかけて調合の異なる材料が厚さ方向に塗り重ねられる特徴から、界面が多く存在することとなり、肌別れを起こしうる部位を内包する傾向にある。木摺り漆喰工法の場合は小舞下地と比較して下地表面が平面に近いため、下地と下塗りの取り合い部も界面に相当する部位と解釈できる。第1,2章で整理したとおり、木摺り漆喰部材の損傷例に関する報告では、界面剥離が発生する部位は、漆喰層の下塗り・斑直し・中塗りなどの塗り重ね界面の例は一部に限られ、そのほとんどが下地と下塗りの界面となっている[前掲1-10,2-5～8,21]。その場合、漆喰の総塗り厚分が落下するため衝撃力が大きくなりやすく、危険側の事象と考えられる。それを鑑み、本稿では木摺り下地～下塗り間の抵抗要素の評価を主軸とした。なお簡略化された漆喰仕上げでは下塗り・中塗り・上塗りの3層となり斑直しが省略される場合があるが、図4-1より斑直しと中塗りは類似した調合比となっているため同様の扱いとした。

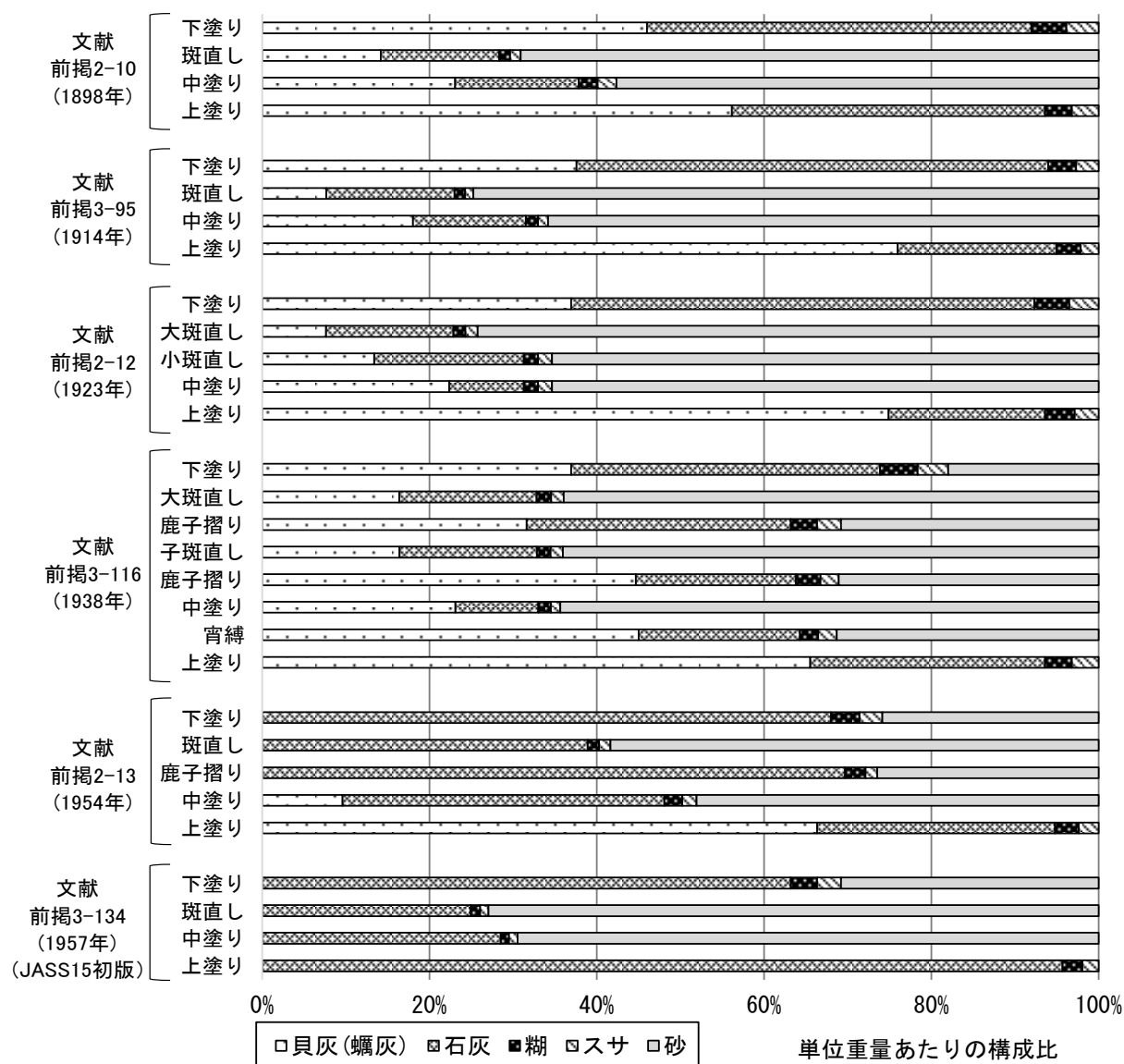


図 4-1 第2, 3章にて扱った文献（技術書・施工仕様書）から抽出した漆喰調合比

### 4.4 漆喰材料の基礎力学的特性に関する実験概要（実験 4-1）

#### 4.4.1 基礎力学的特性に関する実験条件

表 4-2 に使用材料、表 4-3 に要因と水準、表 4-4 に漆喰の調合比、表 4-5 に角柱試験体リストを示す。木摺り漆喰部材として評価する前に、漆喰自体の力学的特性を把握することとした。本研究では幕末期～昭和初期の日本における近代洋風建築を対象としており、前節のとおり仕上材は日本由来のものが多く適用されていたことを勘案し、図 4-1 における戦前 4 文献の漆喰調合を参考として結合材に石灰と貝灰の両方（それぞれ消化済みのもの）、糊材、補強材には植物繊維（以下、スサ）を用いた。今回用いる材料は、現在入手できる市場品を用い、一般的な品質が担保されたものとして扱った。なお、表 4-2, 4-4 の材料と調合比は、「基本調合」として以降の実験でも用いることとした。

各種物性試験は JIS R 5201 セメントの物理試験方法（以下、JIS R 5201）を主に参考とした角柱試験体を作製して実施した。養生期間は標準環境（20℃, 60%RH）のほか、炭酸化促進環境（20℃, 60%RH, CO<sub>2</sub>濃度 50000ppm）に暴露して歴史的建築における長期材齢の左官材料を模擬的に想定した。スサ含有量は基本調合に加えて、漆喰の補強材たるスサ分布量の下振れを想定して基本調合比 26.6%減（F/P で 1 ポイント減相当）の調合を設定した。強度試験項目は曲げ、せん断、圧縮の 3 種設けた。各種強度の傾向によって各パラメータにおける力学的特性の挙動を判断するほか、木摺り漆喰部材として考えた場合、曲げ強度は漆喰層の面外剛性（剥落時の抵抗性）、せん断は表 4-1 の R<sub>4</sub> R<sub>5</sub> を評価する際の参考となる。漆喰調合、試験方法、養生条件・材齢にはそれぞれ記号を設け、表 4-5 に示すとおりに試験体 No. を附番し、同一条件のサンプルには枝番号（1～3）を付けた。

なお表 4-4 に示すとおり、本研究では練り水量の目安を設けた。材料の構成比は多くの文献で記述がみられる一方で、練り水量については明確な規定がほとんどない。これは施工部位、地域（材料の産地、施工地）、季節、職人の技量や好みによって変動する部分であり、成熟している技法であるが故に施工者の裁量に一任されていた側面があると考えられる。本研究では、試験体作製に際して同一の使用材料、施工部位、養生環境とすることを踏まえ、練り水量（練り性状）の条件も可能な限り統一するため、職人に練り具合を判断してもらう予備試験を以下に示す手順で実施し、以降の実験に際して作製する漆喰の練り水量の目安とした。

#### ・練り具合判断のための予備試験の手順

- 1) 表 4-4 に示した調合比の粉体と練り水を筆者らで所定量準備する。練り水は相当に余裕を持った量を準備し、少量の水は分けけてスサを浸しておく。
- 2) 左官職人 3 人へ「天井木摺り下地へ塗る漆喰」を練って頂くように依頼する。準備した粉体とスサ（浸すのに使った水を含む）は全て使い切ることとし、練り水を適宜追加しながら（こちらは使い切らなくてよい）所定の練り具合になるように感覚で調整していただく。この手順を同一調合比で 3 回試行する。
- 3) 準備した練り水量と余った水量の差分で使用水量を求め、回数ごとの練り具合・使用水量のばらつきを確認する。
- 4) 練り具合の安定性が最も高かった職人の熟練度が高いと解釈し、その職人の 3 試行分の練り水量平均を W/L の目安として適用する。本試験では W/L=108%となった。ただし、あくまで目安であり、スサ量、砂量、職人の塩梅に合わせた調整を許容することとした。

#### 第4章 木摺り漆喰工法における基礎力学的特性の実験的検討

表 4-2 使用材料（実験 4-1）

材料	記号	内容
貝灰	SL	有明産赤貝を原料にした左官用貝灰
石灰	L	俵灰（自然風化灰）
糊	SW	海藻糊（粉末つのもた）
砂（骨材）	S	鬼怒川産砂 細目
スサ	F	麻スサ
練り水	W	上水道水

表 4-3 要因と水準（実験 4-1）

要因	水準	記号	備考
漆喰調合	基本調合（下塗り、斑直し）	SS, SB	表 4-4 による。
	スサ減調合（下塗り、斑直し）	SSf, SBf	
養生環境	標準：10 週、26 週	N10, N26	標準：20℃, 60%RH, CO <sub>2</sub> 公称濃度 400ppm
	炭酸化促進：10 週、26 週	A10, A26	促進：20℃, 60%RH, CO <sub>2</sub> 濃度 50000ppm
試験体寸法	40×40×160mm (型枠内寸)	-	JIS R 5201 セメントの物理試験方法 モルタル試験用 3 連鋼製型枠
試験方法	3 点曲げ、2 面せん断、圧縮 (各 N 数=3)	B, S, C	曲げ・圧縮試験：JIS R 5201 参考 せん断試験：JCI-SF6（繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法） 参考

表 4-4 漆喰の調合比（実験 4-1）（貝灰を 10 とした場合の質量比）

調合	想定 塗り層	記号	SL 貝灰 (kg)	L 石灰 (kg)	SW 糊 (kg)	S 砂 (kg)	F スサ (kg)	W 水量 (目安) (kg)	F/P <sup>※1)</sup> (%)	W/L <sup>※2)</sup> (%)
基本	下塗り	SS	10	10	1.2	4.9	0.98	21.6	3.75	108
	斑直し	SB			1.1	39	0.91		1.51	
スサ 減 <sup>※3)</sup>	下塗り	SSf			1.2	4.9	0.72		2.75	
	斑直し	SBf			1.1	39	0.67		1.11	

※1 F/P：粉体とスサの質量比 (F/SL+L+SW+S)

※2 W/P：結合剤と水の質量比 (W/SL+L)

※3 スサ減調合は、基本調合・下塗りの F/P を 1 ポイント減じたものであり、スサの絶対量でみた場合は基本調合比 26.6%減である。なお、斑直しの F/P は基本調合でも 1.51%であり、1 ポイント減すると顕著な差が生ずる可能性があるため、スサ減調合・下塗りにおける F/P 減少量 26.6%を適用する。

例：基本調合・下塗り F/P=3.75%、スサ減調合・下塗り F/P=2.75% →スサ絶対量減少率=1/3.75=26.6%  
基本調合・斑直し F/P=1.51%、スサ減調合・斑直し F/P=1.51%×(100-26.6%)=1.11%

表 4-5 角柱試験体リスト

調合		試験		材 齢		条 件	No.	試験体No.
基本・下塗	SS	曲げ	B	標準10週	N10	SS-B-N10	1	SS-B-N10-1
							2	SS-B-N10-2
							3	SS-B-N10-3
				標準26週	N26	SS-B-N26	1	SS-B-N26-1
							2	SS-B-N26-2
							3	SS-B-N26-3
				促進10週	A10	SS-B-A10	1	SS-B-A10-1
							2	SS-B-A10-2
							3	SS-B-A10-3
				促進26週	A26	SS-B-A26	1	SS-B-A26-1
							2	SS-B-A26-2
							3	SS-B-A26-3
	SS	せん断	S	標準10週	N10	SS-S-N10	1	SS-S-N10-1
							2	SS-S-N10-2
							3	SS-S-N10-3
				標準26週	N26	SS-S-N26	1	SS-S-N26-1
							2	SS-S-N26-2
							3	SS-S-N26-3
				促進10週	A10	SS-S-A10	1	SS-S-A10-1
							2	SS-S-A10-2
							3	SS-S-A10-3
				促進26週	A26	SS-S-A26	1	SS-S-A26-1
							2	SS-S-A26-2
							3	SS-S-A26-3
		圧縮	C	標準10週	N10	SS-C-N10	1	SS-C-N10-1
							2	SS-C-N10-2
							3	SS-C-N10-3
				標準26週	N26	SS-C-N26	1	SS-C-N26-1
							2	SS-C-N26-2
							3	SS-C-N26-3
				促進10週	A10	SS-C-A10	1	SS-C-A10-1
							2	SS-C-A10-2
基本スサ減・下塗	SSf	曲げ	B	標準10週	N10	SSf-B-N10	1	SSf-B-N10-1
							2	SSf-B-N10-2
							3	SSf-B-N10-3
				促進10週	A10	SSf-B-A10	1	SSf-B-A10-1
							2	SSf-B-A10-2
							3	SSf-B-A10-3
		せん断	S	標準10週	N10	SSf-S-N10	1	SSf-S-N10-1
							2	SSf-S-N10-2
							3	SSf-S-N10-3
				促進10週	A10	SSf-S-A10	1	SSf-S-A10-1
							2	SSf-S-A10-2
							3	SSf-S-A10-3
		圧縮	C	標準10週	N10	SSf-C-N10	1	SSf-C-N10-1
							2	SSf-C-N10-2
							3	SSf-C-N10-3
				促進10週	A10	SSf-C-A10	1	SSf-C-A10-1
							2	SSf-C-A10-2
							3	SSf-C-A10-3
基本・斑直	SB	曲げ	B	標準10週	N10	SB-B-N10	1	SB-B-N10-1
							2	SB-B-N10-2
							3	SB-B-N10-3
				促進10週	A10	SB-B-A10	1	SB-B-A10-1
							2	SB-B-A10-2
							3	SB-B-A10-3
		せん断	S	標準10週	N10	SB-S-N10	1	SB-S-N10-1
							2	SB-S-N10-2
							3	SB-S-N10-3
				促進10週	A10	SB-S-A10	1	SB-S-A10-1
							2	SB-S-A10-2
							3	SB-S-A10-3
		圧縮	C	標準10週	N10	SB-C-N10	1	SB-C-N10-1
							2	SB-C-N10-2
							3	SB-C-N10-3
				促進10週	A10	SB-C-A10	1	SB-C-A10-1
							2	SB-C-A10-2
							3	SB-C-A10-3
		促進26週	A26			SB-C-A26	1	SB-C-A26-1
							2	SB-C-A26-2
							3	SB-C-A26-3
							3	SB-C-A26-3
基本スサ減・斑直	SBf	曲げ	B	標準10週	N10	SBf-B-N10	1	SBf-B-N10-1
							2	SBf-B-N10-2
							3	SBf-B-N10-3
				促進10週	A10	SBf-B-A10	1	SBf-B-A10-1
							2	SBf-B-A10-2
							3	SBf-B-A10-3
		せん断	S	標準10週	N10	SBf-S-N10	1	SBf-S-N10-1
							2	SBf-S-N10-2
							3	SBf-S-N10-3
				促進10週	A10	SBf-S-A10	1	SBf-S-A10-1
							2	SBf-S-A10-2
							3	SBf-S-A10-3
		圧縮	C	標準10週	N10	SBf-C-N10	1	SBf-C-N10-1
							2	SBf-C-N10-2
							3	SBf-C-N10-3
				促進10週	A10	SBf-C-A10	1	SBf-C-A10-1
							2	SBf-C-A10-2
							3	SBf-C-A10-3



#### 4.4.2 基礎力学的特性に関する実験方法

写真 4-1 に各実験の様相、図 4-2 に試験方法の模式図を示す。漆喰練りは練り樽と 3 枚翼のハンドミキサーを用いて行った。スサをあらかじめ練り水へ入れて浸しておき、その間に貝灰・石灰・糊を計量して空練りし、そこへスサ・練り水を入れてハンドミキサーで攪拌して生漆喰を練り上げたところで、計量した砂を全量入れ、所定の調合の漆喰を練り上げた。それを JIS R 5201 で規定された鋼製三連型枠へ詰め、20℃、60%RH の環境下で 1 週間存置のち脱型し、それぞれの養生環境にて所定期間（表 4-3）保管した。

強度試験はアムスラー型万能試験機（最大出力 500kN で 20kN レンジを使用）による載荷（1mm/min）とし、曲げ試験・せん断試験は専用の治具を用い、万能試験機に内蔵されたロードセルおよび試験体へ装着した変位計（CDP-25）の出力をデータロガー（TDS-530）へ接続した。変位計の設置位置は図 4-2 で示すとおり、曲げ・せん断試験では試験体中央部、圧縮試験では荷重のみ記録した。

試験体は試験実施前に寸法・重量を測定し、各応力は実測寸法を基にした算定を行った。試験はまず曲げから始め、試験後に破断した片割れをそれぞれ、せん断試験、圧縮試験に用いることとした。圧縮試験に際して、今回は繊維が多く含有される試験体であり、部分圧縮にすると余長部分に意図しない引張・せん断応力が作用する可能性を考慮し、本実験では角柱試験体に対して軸方向力が作用するように配置し、全体圧縮とした。その際、曲げ試験による破断側をディスクグラインダーで平滑に研削してから実施した。各測定は最大荷重到達後、その 50%程度に荷重が低下するか、変位測定が不可能になる時点まで継続した。

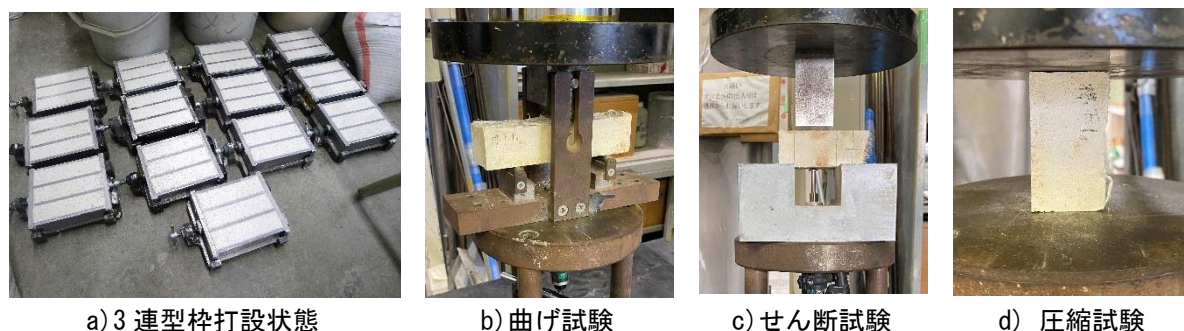


写真 4-1 各実験の様相

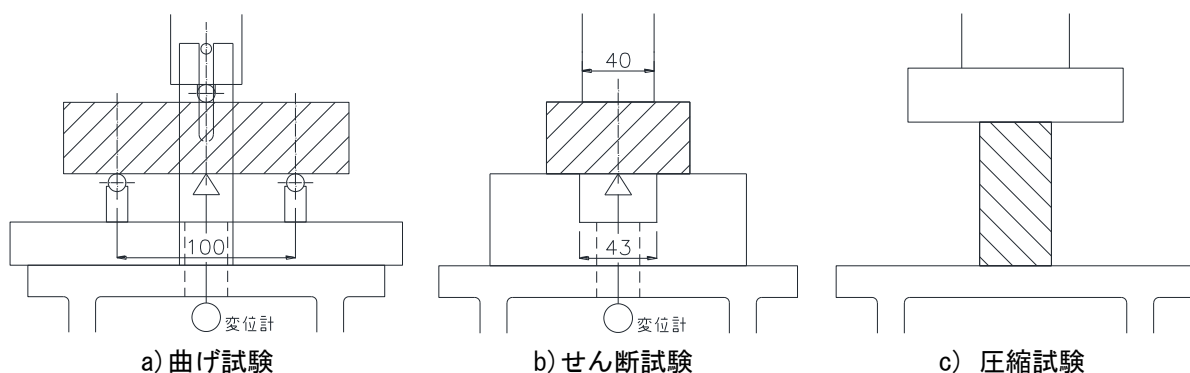


図 4-2 試験方法模式図

### 4.5 漆喰材料の基礎力学的特性に関する実験結果および考察

#### 4.5.1 試験別・材齢別の評価

本節では下地との定着に特に重要となる下塗りについて主に論ずる。図4-3に基本・下塗りにおける材齢別、試験別の平均最大応力度を示す。曲げ強度と圧縮強度はほぼ同等の数値を示しているが、曲げ試験では試験体下端が破断しているため、引張強度はそれよりも小さい値を取ると考えられる。またせん断強度は曲げ・圧縮の約40%に留まっており、これは角柱試験体内のスサが主に試験体長手方向を向いているため、応力方向とスサの向きの不一致（架橋効果が発揮されにくい向き）によって強度が低くなった可能性がある。この現象は実際の部材でも発生する可能性があり、鰻を走らせた方向にスサの向きが影響を受けることによって部材に異方性が生ずることを示唆している。施工要因がスサの向きや部材強度に及ぼす影響は今後検討を行ってゆく必要がある。

材齢別にみると、曲げ・せん断・圧縮試験全てにおいて、標準養生環境（以下、標準環境）26週までに加え、炭酸化促進環境（以下、促進環境）10週までは、材齢に応じて平均最大荷重が上昇する傾向を示しており、気硬性材料としての当調合の耐力を確認した。一方で促進環境26週は、同10週と比較すると平均強度が6%～8%低下しており、筆者の既報[4-1]と類似する結果となった。その傾向から推察すると、促進環境10週周辺の強度増進は一時的なもので、そのピークよりも約10%低い強度で収束すると考えられる。炭酸化による強度低下に類似する事象としてALCの炭酸化によるトバモライトの分解や炭酸化収縮が挙げられる[4-2～5]が、構成材料が漆喰と異なることもあり単純な比較は難しい上、標準環境の試験体ではそのような傾向が認められていないことから、炭酸化促進に何らかの要因があると考えられる。また、漆喰の炭酸化の挙動に関する既往の研究[4-6～8]では炭酸化促進試験の報告もなされているものの、いずれも中和滴定による漆喰の炭酸化率の測定に関するものであるため、強度低下の裏付けとなるデータは現在の段階では十分に把握できていない。

図4-4に基本・下塗り・曲げ試験における材齢ごとの応力たわみ曲線、図4-5に基本・下塗り・せん断試験における材齢ごとの応力変位曲線を示す。全体の傾向として、最大応力を迎えた後の耐力低下がゆるやかであり、スサの架橋効果によって脆性的な破壊を起こしにくいと推定される。これは、せん断試験でも同様の傾向を示しており、最大応力に寄与する繊維は少ないながらも、その範囲内で一定の架橋効果は示すものといえる。促進環境では最大応力が大きいものの、標準環境と比較してバインダーの硬化が進んでいることによる若干の脆性的な性格を示し、最大応力以降の耐力低下は大きいですが、試験終了時点での残存耐力は概ね標準環境と同等である。

図4-6に基本・下塗りにおける材齢別、試験別の弾性係数を示す。図4-4,5において材齢ごとに初期勾配の差異が認められたため、曲げ・せん断試験における各試験体の最大応力度( $\sigma_{max}$ )の10%・50%での割線弾性係数(図4-6a)を算出した。材齢と概ね相関する傾向がみられ、バインダーの硬化程度との関連が認められた。また曲げ弾性係数は促進10週にピークがみられ、最大応力度と同様の傾向がみられた。

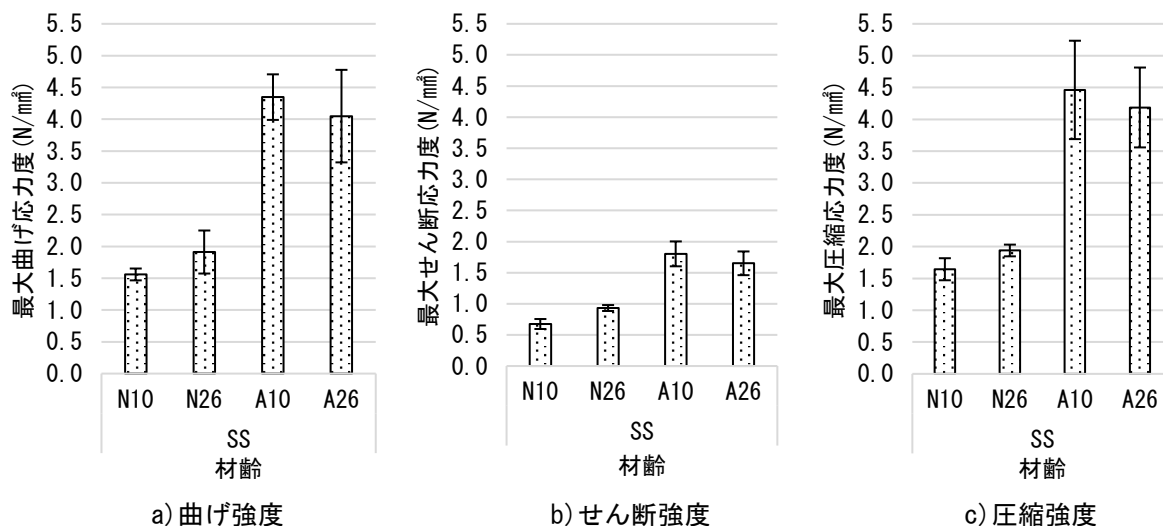


図 4-3 基本・下塗りにおける材齢別、試験別の平均最大応力度

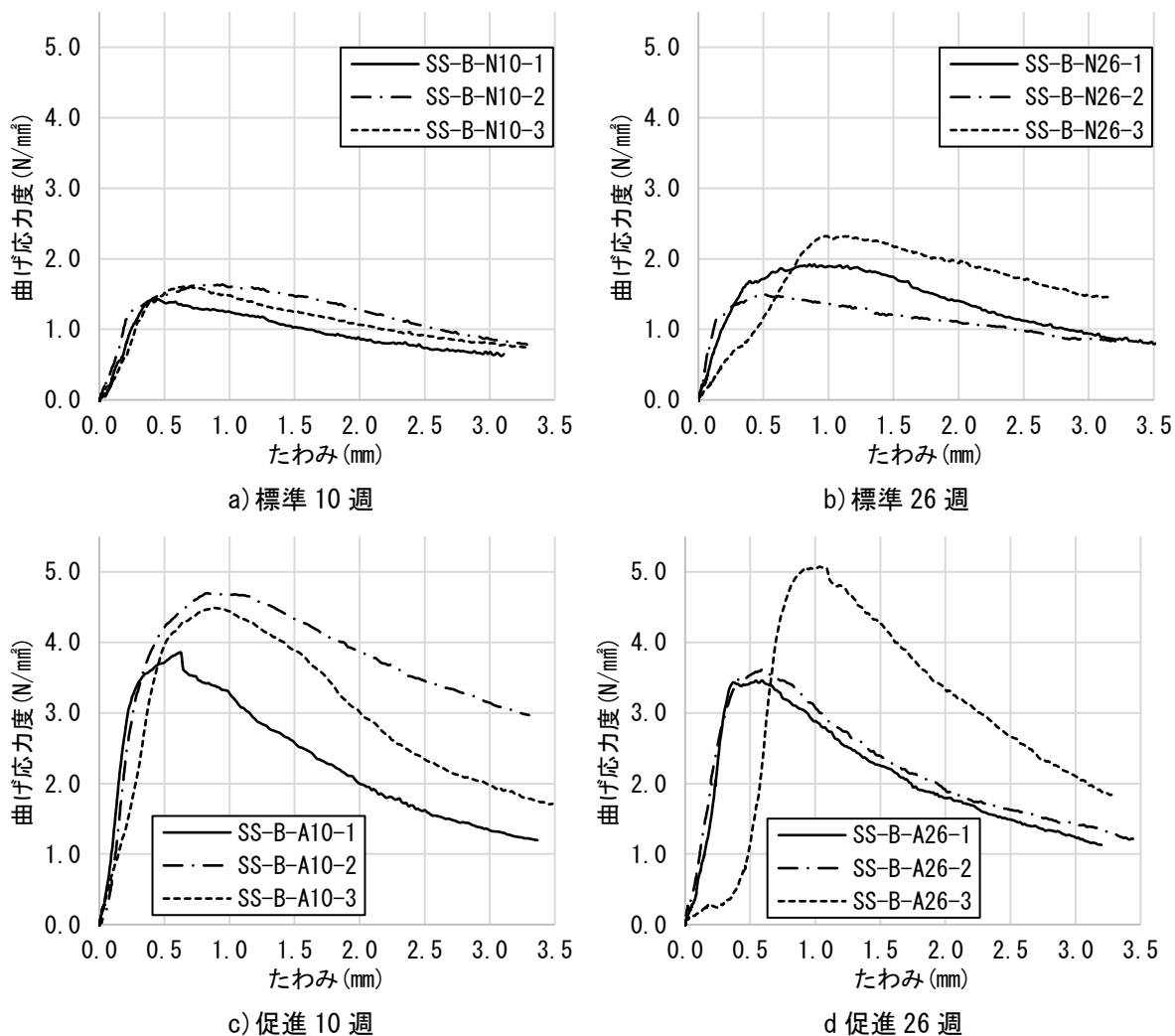


図 4-4 基本・下塗り・曲げ試験における材齢ごとの応力たわみ曲線

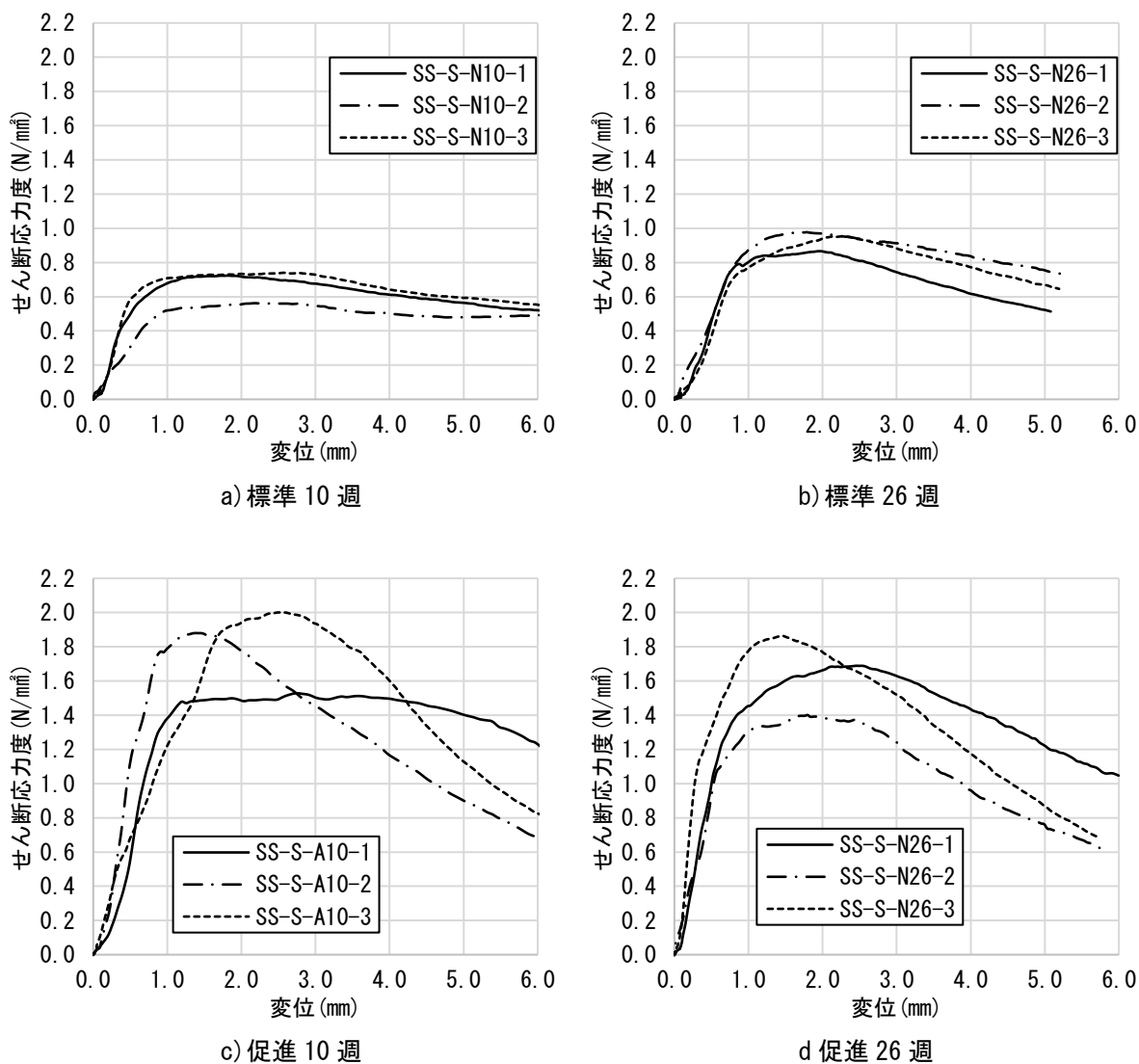


図 4-5 基本・下塗り・せん断試験における材齢ごとの応力変位曲線

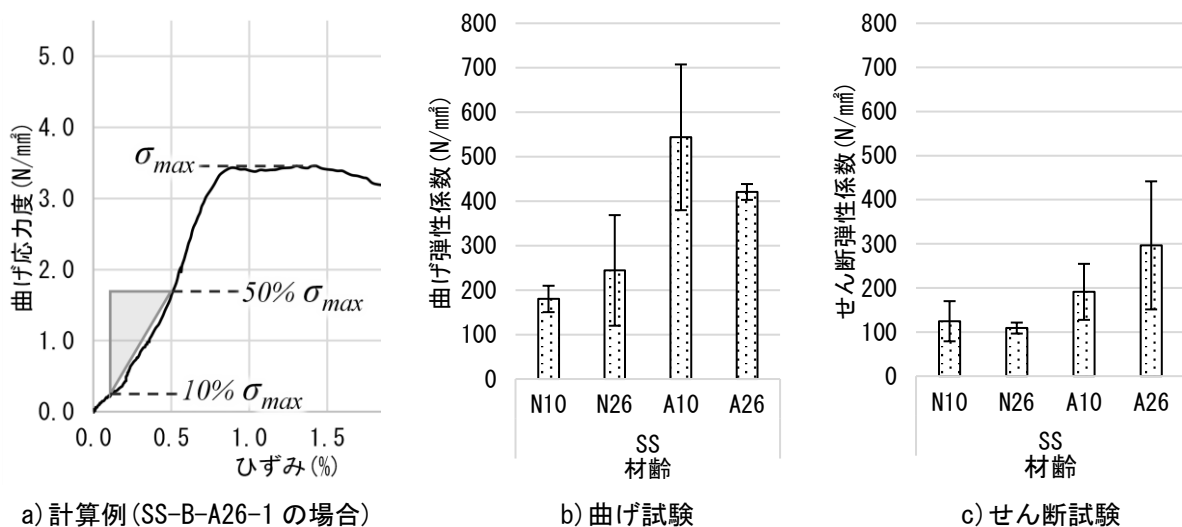


図 4-6 基本・下塗りにおける材齢別、試験別の弾性係数（最大応力度 10-50%割線）

### 4.5.2 調合別の評価

促進養生の条件では各調合の特性が明瞭化したため、本節では標準環境 10 週と促進環境 10 週を比較する。図 4-7 に調合ごとの平均最大応力度を示す。まず下塗り (SS) と斑直し (SB)、すなわち砂量の違いで比較すると、曲げ・せん断では斑直しのほうが最大応力は低い一方、圧縮強度では逆の傾向を示した。斑直しは下塗りと比較してバインダーの絶対量が少なく、曲げ・せん断はその影響を受けやすく、収縮変形等を抑制し、固い仕上がりを狙った貧調合の特性が表れているといえる。またスサ量で比較すると、スサ減調合(f を附番しているもの)は全体的に最大応力が低い上、養生条件問わず最大応力に顕著な差異が無いことから、各強度を決定づける要因にはスサ量による架橋効果が強く影響していると考えられる。また、圧縮強度においても促進環境 10 週においてスサ量との相関が顕著に出ており、バインダーの炭酸化だけが強度発現の要因ではないことがわかる。この背景には、圧縮軸と直交方向に変形しながら圧壊するため、その変形抵抗性へのスサの寄与が考えられるため、スサ量とポアソン効果の相互影響も今後評価する必要がある。

図 4-8 に調合ごとの曲げ試験の応力たわみ曲線、図 4-9 に調合ごとのせん断試験の応力変位曲線、図 4-10 に調合別・材齢別、試験別の弾性係数を示す。図 4-8, 4-9 では比較対象とした調合の曲線をグレーで表記し、図 4-10 の弾性係数は図 4-6 a)と同様の方法で算出した。図 4-8, 4-9 について、最大応力後の耐力低下は 4.5.1 で先述した傾向と同様であるが、スサ減・斑直しはスサの絶対量が全調合条件の中で最も少ないこともあり、試験終了時の残存耐力はほとんどない状態である。またスサ量が初期勾配に及ぼす影響は少なく、砂量による影響のほうが大きいことがわかり、固く仕上げる・面剛性を出すことを意図している斑直しの特性が確認できた。

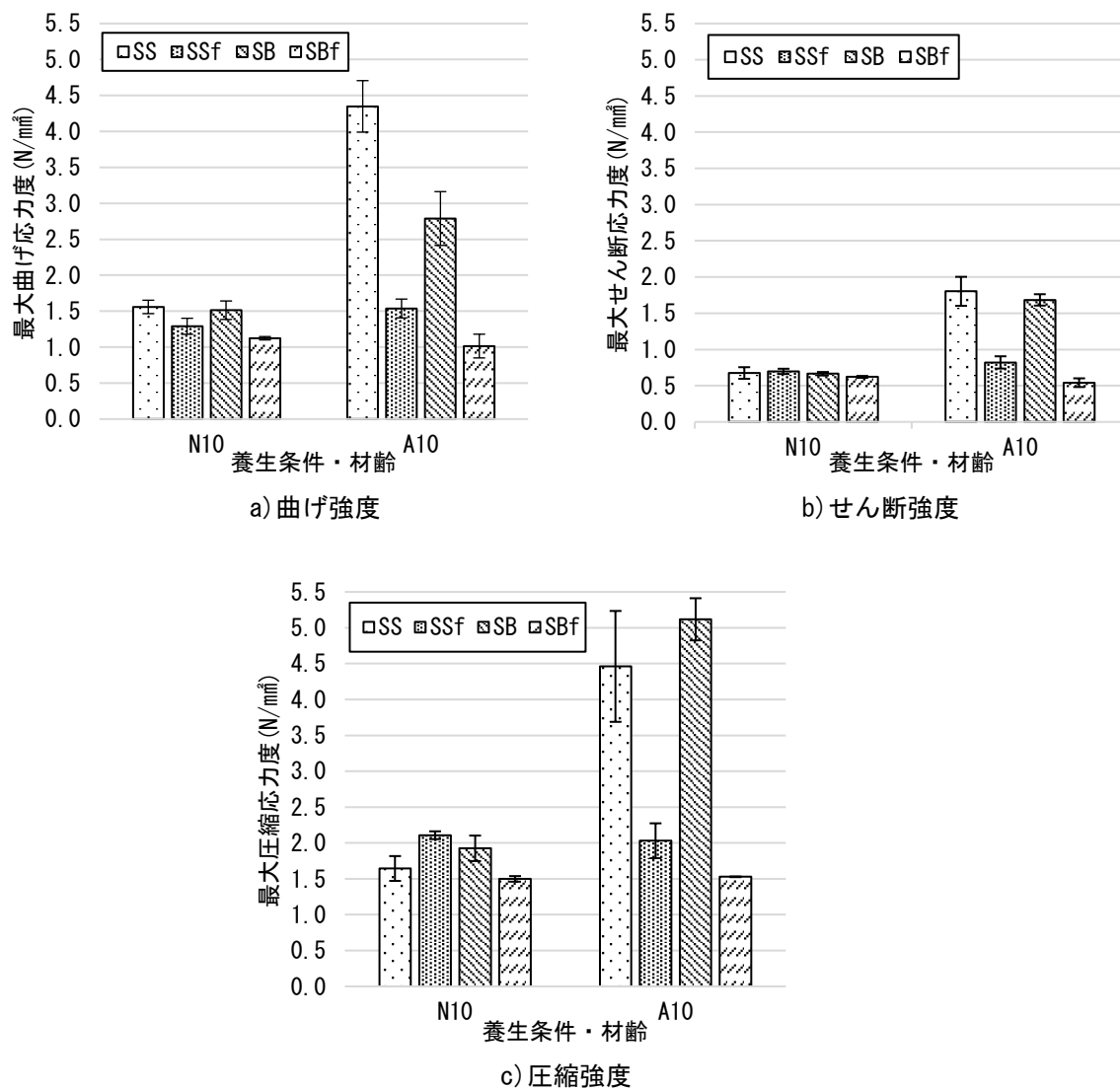


図 4-7 調合ごとの平均最大応力度

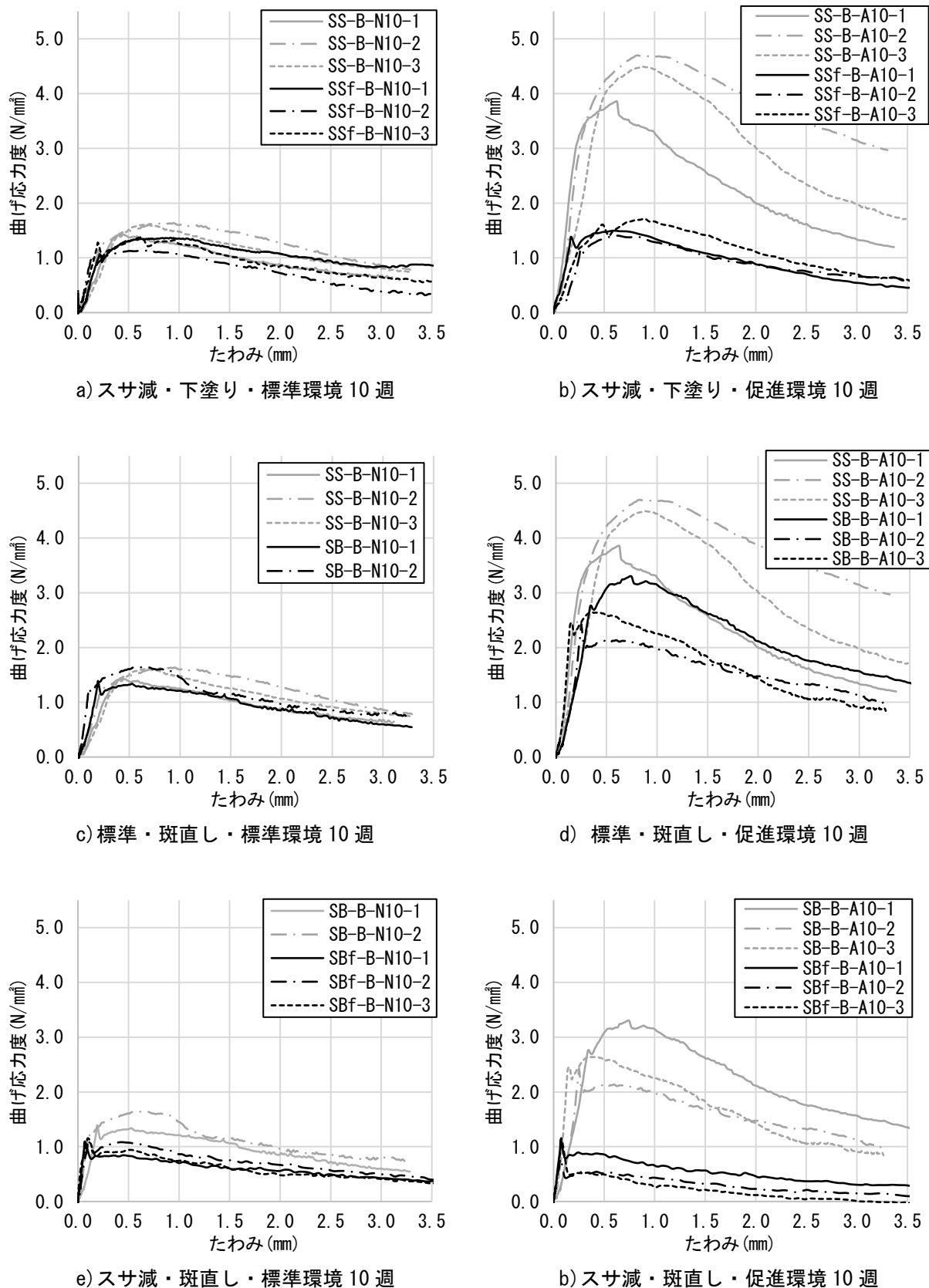
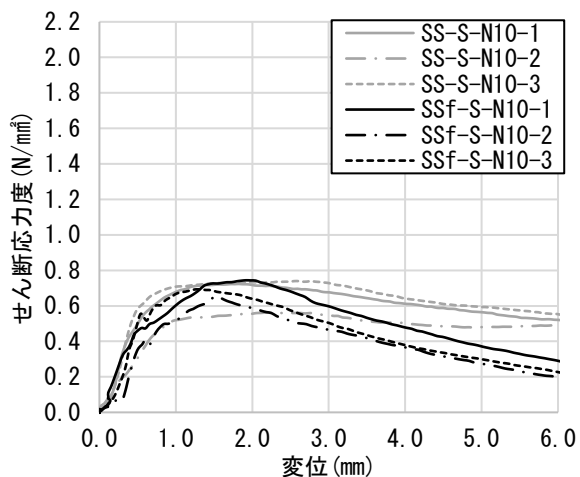
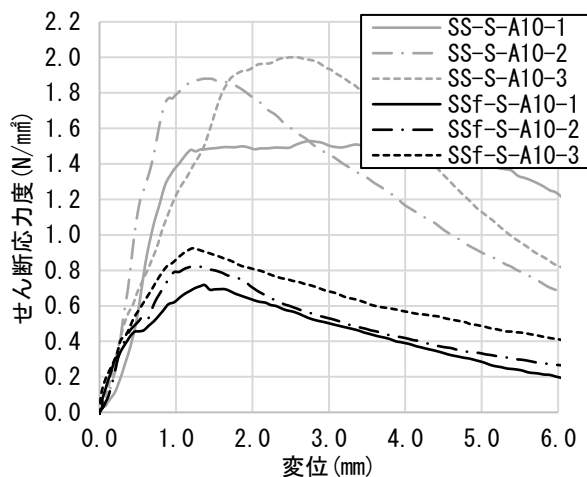


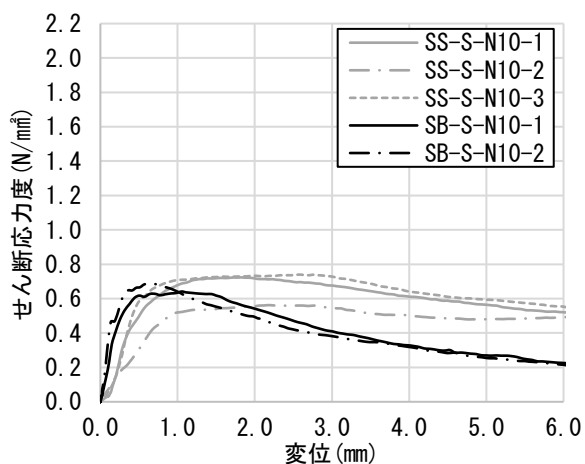
図 4-8 調査ごとの曲げ試験の応力たわみ曲線



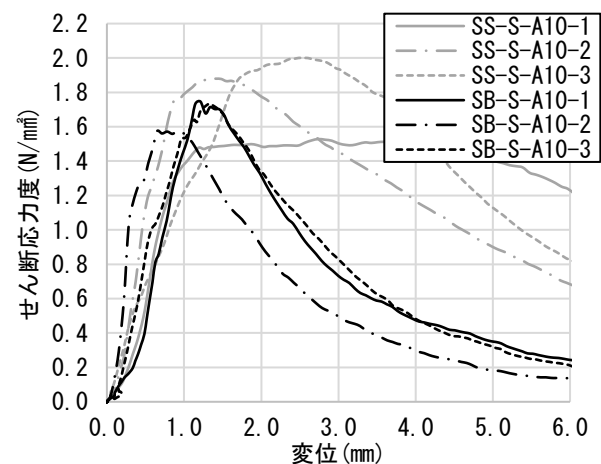
a) スサ減・下塗り・標準環境 10 週



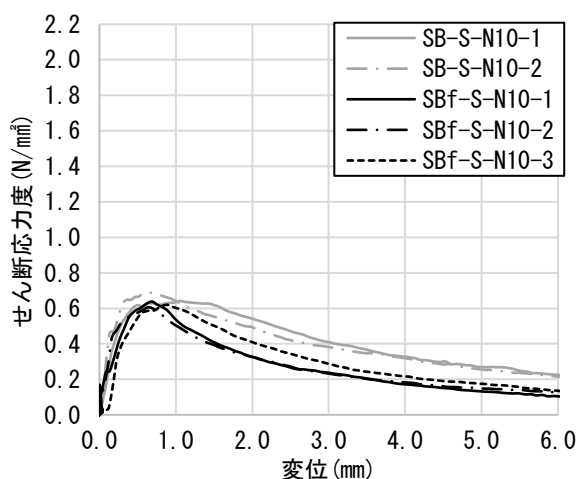
b) スサ減・下塗り・促進環境 10 週



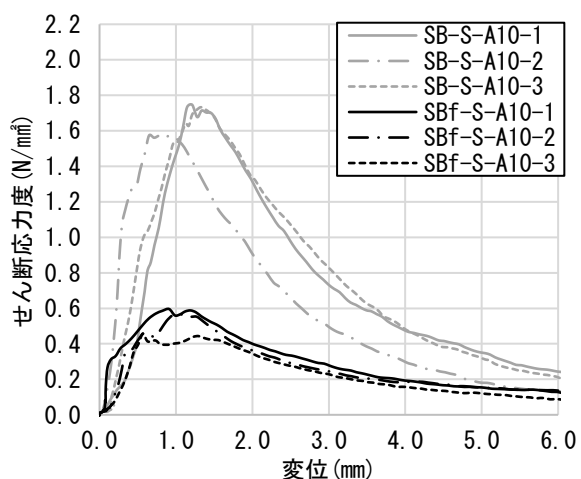
c) 標準・斑直し・標準環境 10 週



d) 標準・斑直し・促進環境 10 週



e) スサ減・斑直し・標準環境 10 週



b) スサ減・斑直し・促進環境 10 週

図 4-9 調合ごとのせん断試験の応力変位曲線



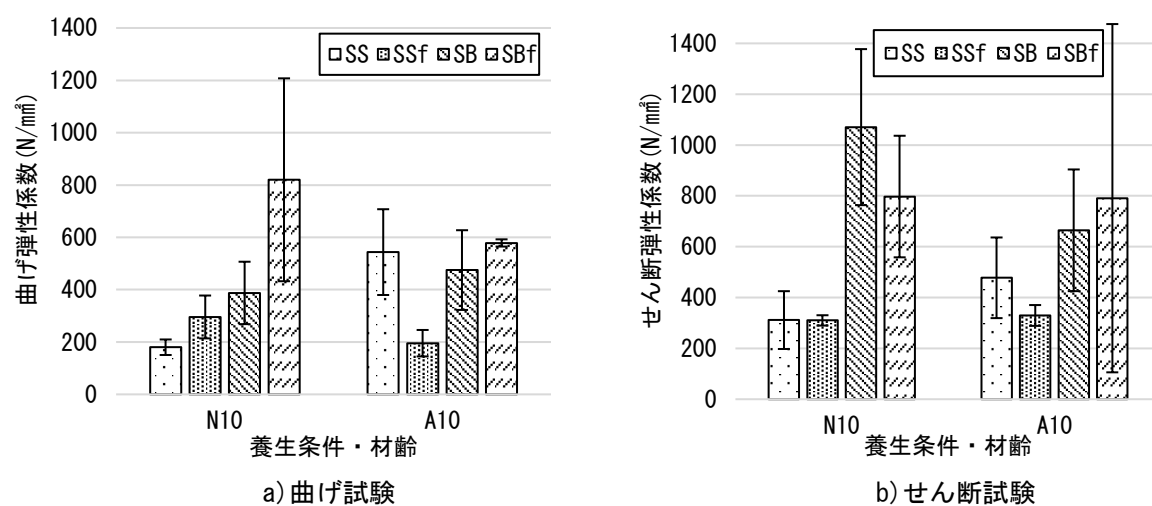


図 4-10 調合別・材齢別、試験別の弾性係数（最大応力度 10-50%割線）

### 4.6 木摺り下地と漆喰の外力抵抗性に関する実験概要（実験 4-2 シリーズ）

#### 4.6.1 木摺り漆喰要素試験体に関する試験条件

表 4-6 に使用材料（実験 4-2 シリーズ）、表 4-7 に要因と水準（実験 4-2 シリーズ）、表 4-8 に漆喰調合比と塗り厚の目安を示す。また 4.2 で示した表 4-1（木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の想定）を再掲する。実験 4-2 シリーズは、木摺り漆喰天井部材を想定した小型の試験体（以下、要素試験体）を作製し、目透かし 1 列あたりの強度に着目して力学的特性を実験的に検証し、天井部材における漆喰の面外方向への剥落抵抗性を評価するものである。

実験 4-2 シリーズの共通事項として、小幅板の断面形状は一般的な長方形断面（以下、矩形断面）に加えて、第 3 章で調査した文献でみられた蟻型断面（以下、テーパ断面）も、断面形状の違いによる力学的特性への影響を判断するために設定した。また、小幅板断面からみた下面と側面の成す角度をテーパ角（以下そのように呼称）と定義したが、角度に関する記述は第 3 章で扱った文献で確認できなかったため、要因ごとの差異を明確にするべく、ここでは学術的観点から 45°、60°の 2 水準を設けて矩形断面（90°）と比較した。以降、小幅板断面のテーパ角について、45°、60°と共に矩形断面に触れる場合は便宜上 90°と呼称する。

小幅板の断面寸法について、幅は 36mm（テーパ断面の場合、最広部）としており、実物件平均よりも幅が狭いものを調達しており部材全体でみると危険側の検討（単位面積あたりの目透かし数が増える）となるが、目透かし 1 列ごとの強度試験としたため耐力評価上の影響は生じないと判断した。厚さは 12mm とし第 3 章で調査した実物件平均よりも厚手のものを用いたが、これは目透かし部の漆喰の食い込み深さに小幅板厚さを基準にしたパラメータを設ける（後述）ため、要因ごとの差異を明確にするためとした。

小幅板の表面について、経年した実際の部材では鋸刃の跡が明瞭なものが多い。これは鋸の技術的な側面や、現仕仕上げではないため外観に特に意識が払われていなかったのと、左官材の付着を良くするための目荒らしの意味合いがあったと考えられるが、目荒らしによる表面積増加に伴って吸水が早くなることで、小幅板の暴れや左官材のドライアウトが起こりうるため、左官材と下地の付着に対する影響の良悪は現時点で判断できない。今回は、要素試験体 1 体の寸法（約 130mm 角）から勘案して小幅板の暴れは無視できると判断した上で、目荒らしによる付着への好影響を考慮して安全側の検討とするため、プレーナー仕上げの小幅板を用いた。

目透かし幅は第 3 章の文献調査結果より実物件・技術書平均に顕著な差が無かったため、一般化させた条件とするべく 9mm に設定した。また、要素試験体は 1 体あたり小幅板 3 枚、目透かし 2 列となるように野縁模擬材で接続した。漆喰調合は実験 4-1 と共通化し下塗り・斑直しの 2 種とし、施工時は漆喰の物性や施工のばらつきを極力低減させるため、要素試験体 8×6 体分の下地を金物で連結し、表 4-6 に示す各パラメータが組み込まれた約 1m 角の下地（以下、親下地）として扱い、漆喰硬化後に要素試験体 1 体ごとに分割する手法を採った。試験体作製の詳細は次節で述べる。

実験 4-2-1 では本仕様における木摺り漆喰の基礎物性を把握するための検討を行った。パラメータは漆喰の食い込み深さ（以下、食い込み深さ）、テーパ角、材齢とした。食い込み深さは、今回は安全側の条件で評価するため木摺り下地の上面で漆喰が開いていない（ $R_5$  が作用しない）ことを想定し、

#### 第4章 木摺り漆喰工法における基礎力学的特性の実験的検討

小幅板厚を基準に板厚同等を D (Deep)、その半分を S (Shallow) とし、漆喰が所定の深さで留まるように目透かし部分に当て材を設けた。材齢は標準環境 10 週・28 週に加えて、促進環境 28 週とした。

実験 4-2-2 は、実験 4-2-1 の結果を踏まえて表 4-1 の抵抗要素を個別に評価するための検討を行った。その方法として、小幅板下面に離型テープを貼り付けることで  $R_2$  の作用を意図的に抑制させ、目透かし部分の抵抗要素 ( $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ ) が卓越するようにしたものである。木摺り下地寸法、漆喰食い込み深さは実験 4-2-1 と共通とし、テーパー角は  $60^\circ$  と  $90^\circ$ 、材齢は標準環境 16 週とした。親下地は実験 4-2-1 と共通仕様で新規に作製し、親下地中心軸を境に片側へ離型テープを貼り付け（以下、付着抑制）、他方は無加工（以下、素地）とし、離型テープの有無による影響を相対的に比較した。離型テープは予備試験によって漆喰との付着力が最も小さいフッ素樹脂テープを選定したが、当該テープと漆喰の組合せでもわずかに付着力を有したため、評価の際には測定値の差分を考慮した。

表 4-6 使用材料（実験 4-2 シリーズ）

分類	材料	記号	内容	備考
木摺り 下地	小幅板	-	無節杉材 (W36×T12×L126mm) 表面プレーナー仕上げ	矩形断面では真物のまま、テーパー断面では所定の角度に削って用いた。
	木摺り 接続金物		SUS304 ジョイント金物 (W15×T2.0×L94mm M4 ビス穴@25mm×4 穴)	金物の当たる小幅板上面側を座ぐり、ビスで固定した。
	漆喰当て材		無節杉材 (W12×T6mm)	食い込み深さ S の目透かし部へ設置し、リミッターとした。
	木摺り支持板 (野縁模擬材)		9mm 厚合板 (食い込み深さ D の漆喰当て材を兼ねる)	親下地の上面側の全面にビスで固定した。
漆喰	貝灰	SL	有明産赤貝を原料にした左官用貝灰	実験 4-1 と共通のものをを用いた。
	石灰	L	俵灰 (自然風化灰)	
	糊	SW	海藻糊 (粉末つものまた)	
	砂 (骨材)	S	鬼怒川産砂	
	スサ	F	麻スサ	
	練り水	W	上水道水	

表 4-7 要因と水準（実験 4-2 シリーズ）

要因	水準		略称	備考
実験	4-2-1 (基礎物性把握)	4-2-2 (抵抗要素評価)		
目透かし幅	9mm		-	最狭部とした。
テーパ角	45°、60°、90°(矩形)	60°、90°(矩形)	45, 60, 90	小幅板下面と成す角度とした。
引張付着 (R <sub>2</sub> )抑制	無し（素地）	無し（素地） あり（テープ貼付）	素地 付着抑制	R <sub>2</sub> 抑制にはフッ素樹脂テープを小幅板下面に用いた。
漆喰食い 込み深さ	Deep（小幅板厚相当:12mm）、 Shallow（小幅板厚/2 相当:6mm）		D, S	木摺り下地の下面からの食い込み深さとした。
漆喰調合	基本調合（下塗り、斑直し）		SS, SB	表 4-8 による。
養生環境	標準環境 10 週、28 週 促進環境 26 週	標準環境 16 週	N10, N28 N16, A26	標準・促進環境は実験 4-1 と共通条件とした。（施工は風通しのよい室内で実施し、特に環境管理は実施しない）
試験方法	加力範囲 40×40mm の面外単軸引張試験		-	タイル接着力試験用の鋼製アタッチメントを使用した。

表 4-8 漆喰の調合比と塗り厚の目安（実験 4-2 シリーズ）（貝灰を 10 とした場合の質量比）

調合	想定 塗り層	記号	SL 貝灰 (kg)	L 石灰 (kg)	SW 糊 (kg)	S 砂 (kg)	F スサ (kg)	W 水量 (目安) (kg)	F/P※2 (%)	W/L※3 (%)	塗り厚 目安 (mm)
基本※1)	下塗り	SS	10	10	1.2	4.9	0.98	21.6	3.75	108	3
	斑直し	SB			1.1	39	0.91		1.51		5

※1 実験 4-1 の基本調合と共通とした。

※2 F/P：粉体とスサの質量比 (F/SL+L+SW+S)

※3 W/P：結合剤と水の質量比 (W/SL+L)

表 4-1（再掲） 木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の想定

抵抗要素		小幅板断面形状		
		矩形	テーパ	
R <sub>1</sub>	目透かし部漆喰の引張	○	○	
R <sub>2</sub>	小幅板下面と漆喰の引張付着	○	○	
R <sub>3</sub>	小幅板側面と目透かし部漆喰の面外せん断付着、摩擦	○	-	
R <sub>4</sub>	小幅板側面と目透かし部漆喰の面外せん断、摩擦(嵌合)	-	○	
R <sub>5</sub>	小幅板上面の漆喰の面外せん断(嵌合)※	○	○	
R <sub>6</sub>	漆喰塗り重ね部の引張付着	○	○	

注)本研究では安全側に立脚して対象外とした。

### 4.6.2 要素試験体の施工・引張試験方法

図 4-11 に要素試験体の作製、試験模式図、写真 4-2 に要素試験体の施工、試験の状況を示す。作業手順は実験 4-2-1, 4-2-2 共に共通である。小幅板は所定の断面形状に加工（写真 4-2a）し、1 本の長さには要素試験体 1 体の寸法と同じ 126mm とした。親下地は、小幅板長さ方向の接続は金物で、幅方向（目透かし幅）の固定は木摺り支持板（野縁模擬材）を用いて全てビス固定とした。金物の留付部位は座ぐり加工を行い、小幅板上面はフラットになるようにした（写真 4-2b）。漆喰硬化後の要素試験体への分割作業にはダイヤモンドカッターを用いた切断を行うが、小幅板にカッターが触れると過熱したり暴れたりするため、小幅板長さ方向の取り合い部はカッターの肉厚程度(3mm)の透き目を設け、小幅板とカッターが干渉したり過度な振動が発生したりしないように配慮した（写真 4-2c）。

表 4-7 に示す目透かし部漆喰の食い込み深さは、目透かし部にリミッター（以下、漆喰当て材）を設けることで管理する。親下地の小幅板は上面側にビス留めされている合板（木摺り支持板）によって固定されており、食い込み深さ D の部分は木摺り支持板が漆喰当て材を兼ねた構成とした。S の部分は、その納まりの目透かし部へ W9×T6mm（目透かし幅×小幅板厚の半分）の角材を漆喰当て材として設け、漆喰が小幅板厚の半分で止まるようにした（写真 4-2c）。

漆喰の練り手順は 4.4.2 と同様とした。漆喰施工は天井の施工環境を想定するため、仮組みした足場へ親下地を吊り下げて上向き作業で実施した（写真 4-2d, f）。漆喰施工、水引き、乾燥までの工程は風通しのよい屋内にて行い、斑直しは下塗りの施工後に水引き状態を見ながら同日中に施工した。施工後 2 週程度は、漆喰硬化のため漆喰仕上面を下向きに吊り下げたままにしておき、要素試験体へ分割作業は地上に下ろして行った。まず表裏を反転させ、分離予定の位置（要素試験体のサイズ）を漆喰に墨出しし、漆喰層をダイヤモンドカッターで切断（写真 4-2g, h）した後、再び表裏を反転させ、木摺り下地板を除去し小幅板を露出させた。速やかに仮設野縁を装着し、要素試験体ごとに小幅板を固定させ、最後に接続金物を取り外し、分離させていった。分離後の要素試験体は所定の環境・期間で保管した（写真 4-2i, j）。

引張強度試験はタイル接着力試験用の 40mm 角フィラーアタッチメントを用いた。図 4-11 に示すように、アタッチメントは目透かしの中心線と合わせて装着することとし、その位置をあらかじめ漆喰表面にけがき、それに沿って木摺り下地表面に達する深さで漆喰層へ 40mm 角の溝切り加工を行い、アタッチメント側にエポキシ系接着剤を塗りつけてから装着した（写真 4-2k）。その際に接着剤がアタッチメントからはみ出し、隣接する試験領域へ越境しないように留意した。接着剤硬化後、デジタルフォースゲージをアタッチメントに接続して面外方向に載荷し、最大荷重と破壊モードを記録した（写真 4-2l）。1 水準ごとの試験回数は 6 回（3 箇所/体×2 体）とした。

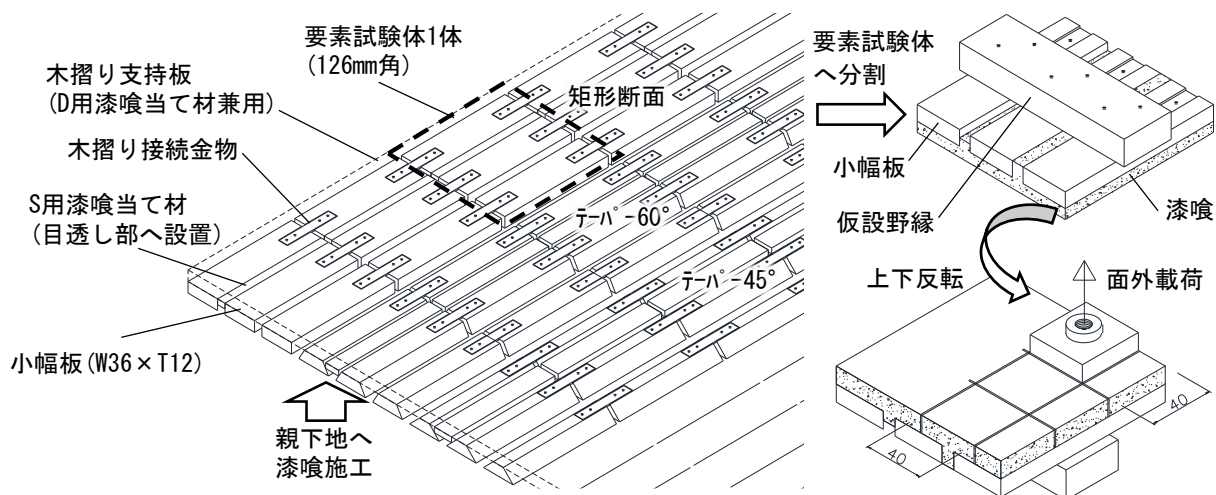


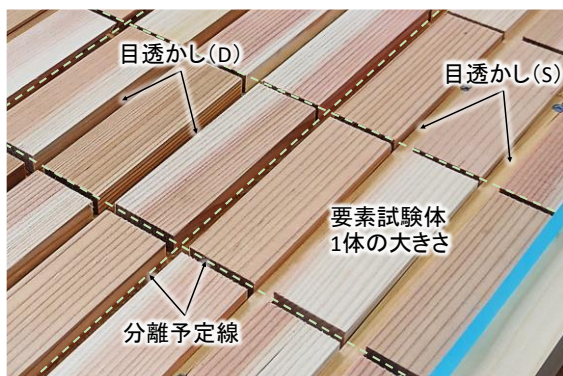
図 4-11 要素試験体の作製、試験模式図



a) 所定の断面に加工された小幅板



b) 小幅板長さ方向の連結部



c) 親下地・要素試験体の詳細（漆喰施工面）



d) 親下地の吊り下げ状態

写真 4-2 要素試験体の施工、試験の状況





e) ハンドミキサーによる漆喰練り



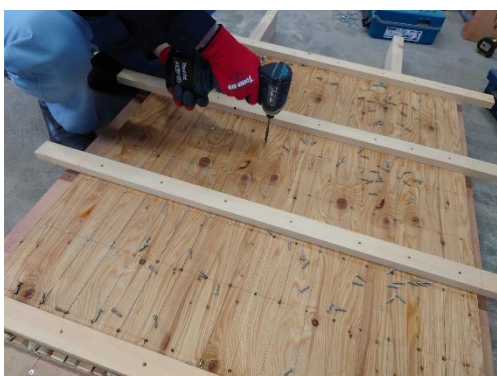
f) 天井面を想定した漆喰塗り（下塗り工程）



g) 要素試験体への分離準備（墨出し状態）



h) 親試験体小口からみた漆喰層の切断状態



i) 木摺り支持板の取り外し



j) 仮設野縁の取り付け



k) 引張試験アタッチメントの装着



l) 面外引張試験の状況

写真 4-2 要素試験体の施工、試験の状況（続き）

### 4.7 要素試験体による木摺り漆喰天井の力学的特性に関する実験結果および考察

#### 4.7.1 食い込み深さやテーパ角による基礎物性（実験4-2-1）

表4-9に各破壊モードの判定例と破壊部分の抵抗要素、図4-12に各要素の平均最大荷重を示す。試験時には最大荷重と併せて、表4-9の破壊モード3種を定義したうえで記録した。ただし実際の天井部材では、複数の破壊モードの組み合わせによる損傷が考えられるため、まず図4-12では、各破壊モードを包含した平均最大荷重を示すこととし、材齢やテーパ角が及ぼす影響について検討した。加えて、本試験では各抵抗要素（ $R_1 \sim R_5$ ）が複合的に影響していると考えられるため、図4-12各グラフは40mm角（アタッチメント1ピース）の荷重で示し、標準偏差を併記した。

気硬性材料の特性として、材齢（促進養生含む）と平均最大荷重の相関関係が読み取れた。また、促進養生28週は、標準養生28週と比較して最大荷重に顕著な差は認められないものの、標準偏差がほかの2材齢より小さい傾向を示しており、物性の均質化が認められる。

表4-10にテーパ角別のS/Dと変動係数を示す。テーパ角と食い込み深さの関係について、Dに対するSの最大荷重比（S/D）が100%に近いほど、最大荷重が食い込み深さに影響を受けないことを示している。3材齢平均で45°、60°で約94~100%、90°で約61%であった。またDとS両条件を包含した変動係数（C.V.）では45°、60°のほうが90°よりも小さい傾向を示した。

続いて、各破壊モードに関して、図4-13に各要素の破壊モードの発生割合、図4-14に材齢、小幅板断面形状、破壊モードごとの最大荷重分布を示す。図4-14凡例の「テーパ」は45°、60°両条件を包含しており、図4-12と同様に40mm角の荷重で表記している。破壊モードの発生割合は45°、60°において食い込み深さ問わず、破断型が最も高い結果となった。また最大荷重は破壊モード問わず広い範囲に分布しており、当工法特有のばらつきが確認できるが、破断型の分布範囲はほかの2つの破壊モードより高強度側へも広がっている。

表4-9に示すように、破断型は漆喰自身の持つ力学的特性（ $R_1$ ）の影響が支配的になり、スサを要因とする架橋効果等が生じ脆性的な破壊を起こしにくくなるため、安全側の破壊モードといえる。一方で、当該破壊モードを発生させるためには $R_3 \sim R_5$ が $R_1$ を上回っている必要がある。その抵抗要素については今回前提としている開きの無い90°の場合、 $R_3$ による影響が大きいものの、小幅板や漆喰の収縮等による寸法変化が生じやすいため、強度発現のための不確定要素が多くなる可能性が高い。一方、小幅板がテーパ断面である場合、漆喰が扇状に硬化するため、寸法変化への許容範囲が大きくなると考えられる。これらは、45°、60°において抜け型の発生割合が下がること、食い込み深さSがDと同等の最大荷重を発現することからも確認できる。食い込み深さへの依存性が低いということは、硬化前の漆喰が目透かしから沈下することによる食い込み深さの減少といった、施工段階のばらつきに対する許容度が大きくなることを示唆しており、破断型を主とした安全側の破壊モードへの誘導が期待できる。



表 4-9 各破壊モードの判定例と破壊部分の抵抗要素

		破壊モード		
		a)破断型	b)抜け型	c)破断+抜け型 (組み合わせ)
破壊状況の例				
判定基準		目透かし部の漆喰が破断し、かつ目透かし内に残存しているもの	目透かし部の漆喰が下塗り層側に道連れとなり引き抜けたもの	a)と b)の組み合わせ
抵抗要素 (破壊)	矩形	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub>	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub>
	テーパ	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> , R <sub>4</sub>	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>4</sub>

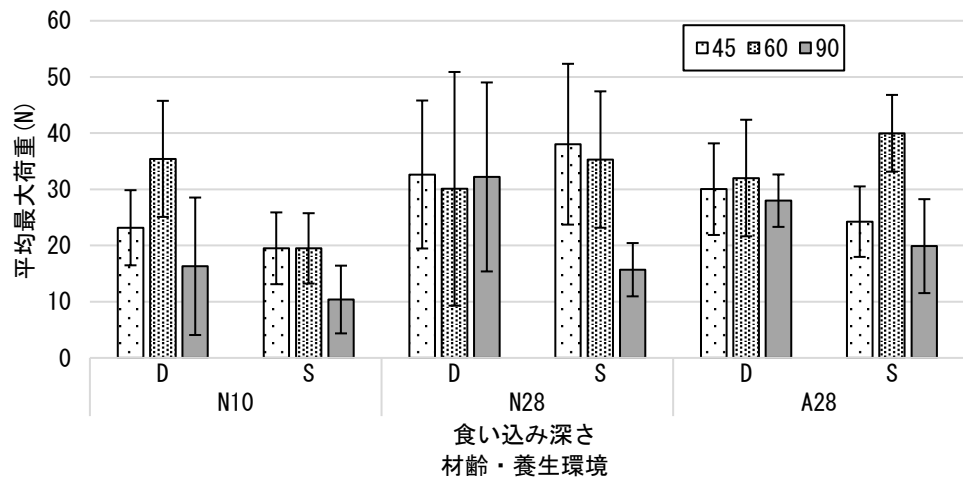


図 4-12 各要素の平均最大荷重 (実験 4-2-1)

表 4-10 テーパー角別の S/D と変動係数

		S/D(%) (D に対する S の 最大荷重比)	C.V.(%) (D と S 両条件を 包含した変動係数)
テーパ角	45	93.8	32.1
	60	99.7	36.3
	90	61.2	45.7

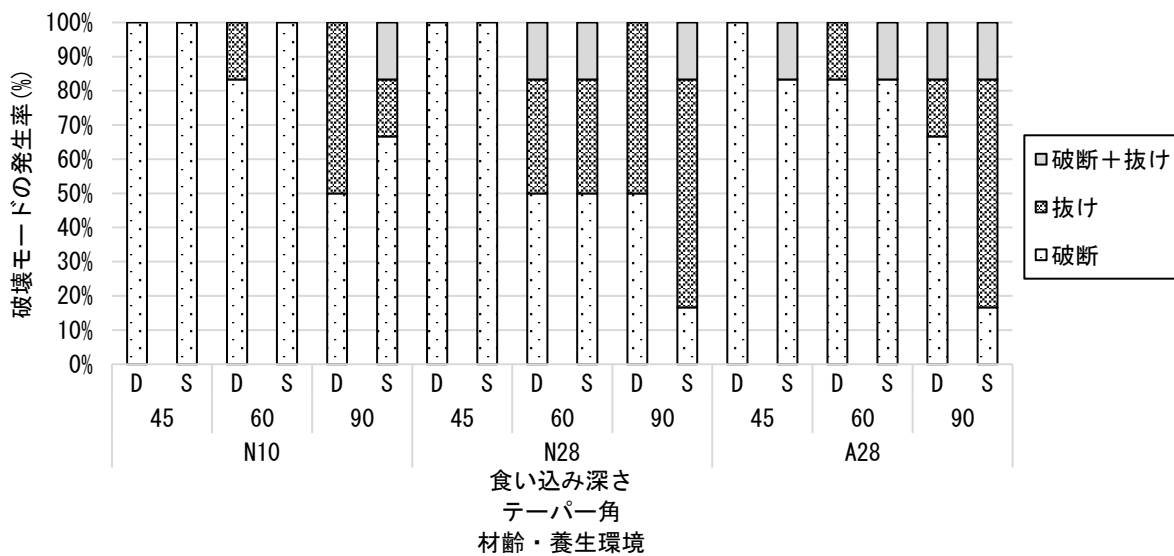


図 4-13 各要素の破壊モードの発生割合

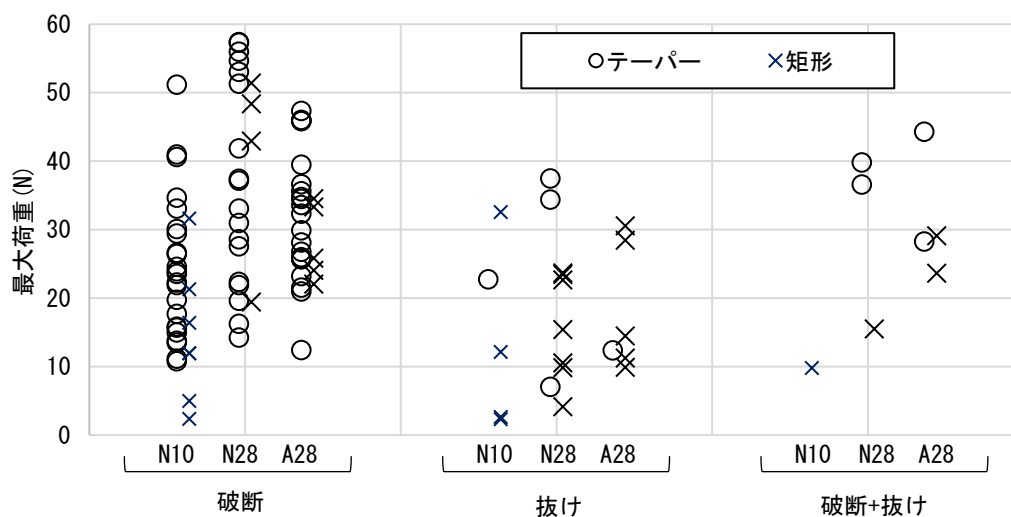


図 4-14 材齢、小幅度断面形状、破壊モードごとの最大荷重分布

### 4.7.2 抵抗要素の評価（実験 4-2-2）

図 4-15 に各要素の平均最大荷重、図 4-16 に破断型の  $R_2$  有無による平均最大荷重を示す。4.7.1 項と同様に、40mm 角（アタッチメント 1 ピース）の値で表す。先の実験 4-2-1 において、平均最大荷重とそのばらつきの小ささは材齢（標準 10 週～促進 28 週）との相関が認められた。一方、実験 4-2-2 の平均最大荷重は、実験 4-2-1 よりも若材齢（標準 16 週）でありながらも大きい傾向を示した。これは施工された親下地、施工者の技能特性等に起因する漆喰物性のばらつきといった複合的な要因が考えられるため、本節では同一試験体の範囲での相対比較とした。

付着条件で比較すると、付着抑制の平均最大荷重は、素地に対して全体で 32.8%減少したことから、 $R_2$  が実際に阻害されていたことを意味する。ただし、アタッチメントサイズの 40mm 角に対する小幅板の面積比は 77.5%である一方、素地と付着抑制の最大荷重の差異は 32.8%であることに加えて、素地における最大荷重時に、 $R_1$ 、 $R_2$  がそれぞれ最大応力度をとっていたと仮定すると、面積比でみた  $R_2$  の耐荷重性は小さいと考えることができる。当該部分の離型テープの影響を考慮した詳細な評価は次項で論ずる。

また、付着抑制の食い込み深さ  $D$  の  $60^\circ$  は、同条件の素地と平均最大荷重が同水準となっている。これは付着抑制のうち 1 体で高強度 (115N) であったためで、その影響で標準偏差も大きくなっている。その要因は目透かし部の漆喰物性の偏りによるものと考えられ、 $R_1$  を変動させる要因といえる。ただし、付着抑制におけるほか 3 条件の標準偏差は、同条件の素地よりも小さい。これは小幅板下面がテープに置換されていたことで  $R_2$  が作用する部分の物性が安定化したことが要因と考えられる。すなわち素地における数値のばらつきは、目透かし部の漆喰物性の偏りに加えて、 $R_2$  の発現程度の影響が関係していると解釈できる。

図 4-17 に各要素の破壊モードの発生割合を示す。付着抑制  $90^\circ$  において、抜け型の発生割合が素地  $90^\circ$  よりも高くなっている。これは、 $R_2$  が作用しない付着抑制の場合、目透かし部漆喰に荷重が集中し破壊モードに影響を及ぼしていることが考えられる。別の見方をすれば、素地において破断型の発生割合が多いとも読み取ることができ、これは耐荷重性の小さい  $R_2$  の作用部分が先行して破壊され、それが小幅板と漆喰の界面に沿って目透かし部まで進展し、破断を生じさせたことが要因と考えられる。

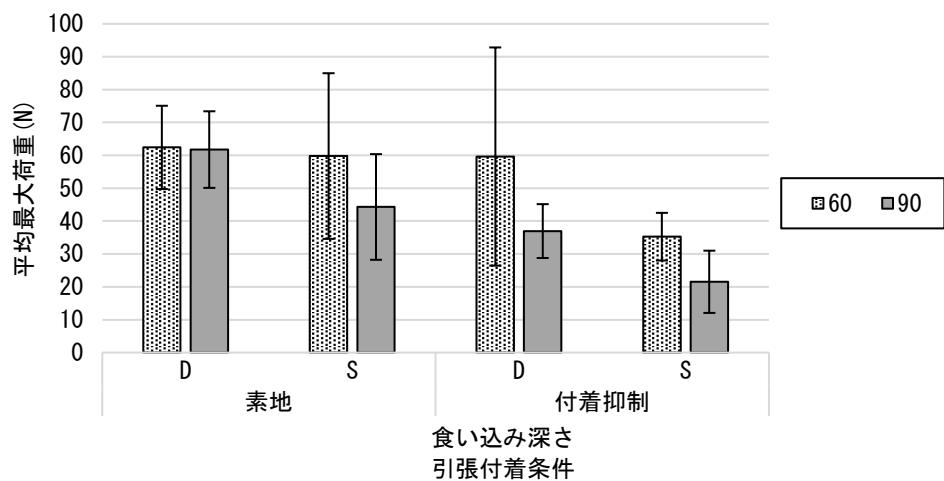


図 4-15 各要素の平均最大荷重

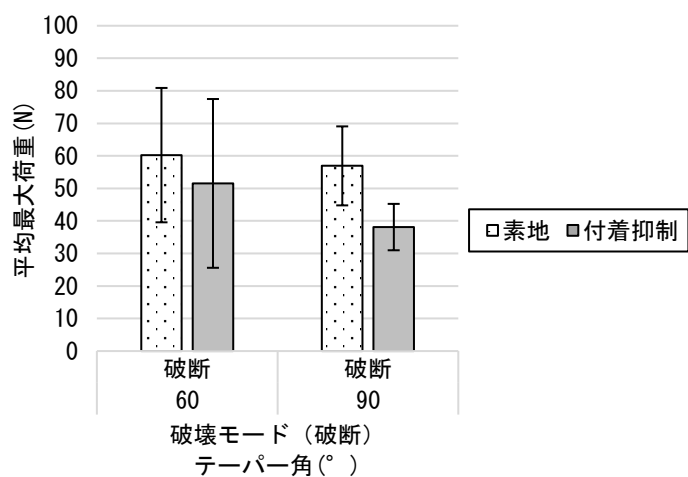


図 4-16 破断型の  $R_2$  有無による平均最大荷重

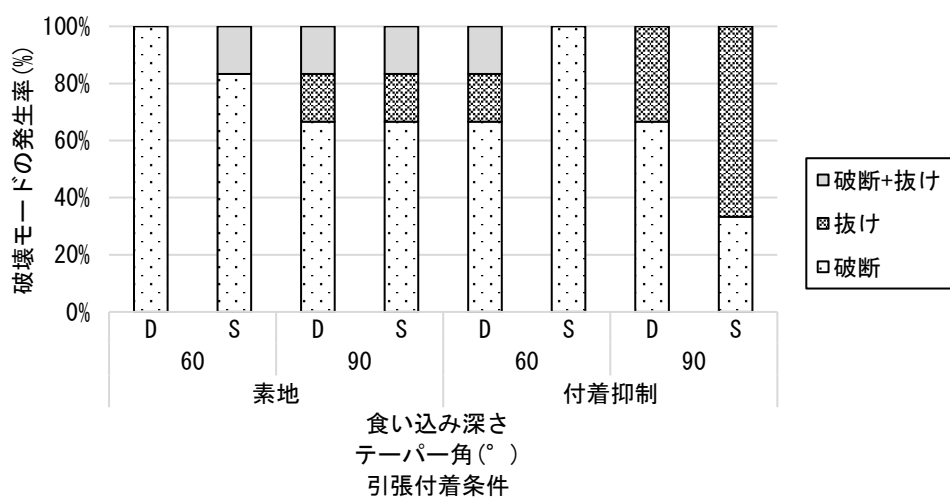


図 4-17 各要素の破壊モードの発生割合

#### 4.7.3 木摺り下地と漆喰の界面における抵抗要素の算定

実験 4-2-2 の結果に基づき、表 4-1 で想定した木摺り下地と漆喰間における抵抗要素の各最大応力度を考察する。最大応力度はその基となる実験条件や破壊モードによる測定値を組み合わせで求めた。その際、各破壊モードに関連する抵抗要素（表 4-9）は全て最大応力度をとっていることを前提とした。また本試験ではばらつきも考慮する必要があるため、分散の加法性を用いて標準偏差も含めた判断とした。

##### (1) 目透かし部漆喰の最大引張応力度 ( $R_1\sigma_{\max}$ )

実験 4-2-2 の付着抑制（60°、90°）の結果から破断型の測定値を抽出し、目透かしの断面積で除した値を  $R_1\sigma_{\max}$  とする。目透かし断面積は、9×40mm(要素試験体仕様×アタッチメント1辺長さ)とした。なお先述のとおり、付着抑制に用いたフッ素樹脂テープがわずかに付着力を有したため（平均=0.00565N/mm<sup>2</sup>、標準偏差=0.00475N/mm<sup>2</sup>）、テープが負担したと考えられる荷重の分を差し引いたうえで計算した。その際の付着面積は小幅板下面と漆喰の接触面全面で作用していたとみなし、アタッチメント 40mm 角の面積から目透かしの断面積を減じたものとした。

図 4-18a)に  $R_1\sigma_{\max}$  の評価結果を示す。60°は 90°よりも  $R_1\sigma_{\max}$  が約 40%大きい結果であったが、元来の測定値にばらつきが多いため、標準偏差を含めて結果に反映される結果となった。

##### (2) 小幅板下面と漆喰の最大引張付着応力度 ( $R_2\sigma_{\max}$ )

実験 4-2-2 の付着抑制・素地における最大荷重の差は、 $R_2$  の作用によるものとして考えて計算する。なお、破断型測定値の抽出、 $R_2$  の作用面積、フッ素樹脂テープ付着力の考え方は前節と同様とした。図 4-18b)に  $R_2\sigma_{\max}$  の評価結果を示す。 $R_2\sigma_{\max}$  は  $R_1\sigma_{\max}$  の約 12~14%に留まった。複数の測定値から算出し各要因のばらつきを包含しているため、60°を筆頭に標準偏差が大きい結果となり、 $R_2$  の効果には不確実性がある。そのため、木摺り漆喰天井の保有耐力評価等を行う際には  $R_2$  は作用しないものとして考えたほうが安全側の検討となる。

##### (3) 小幅板側面と漆喰のせん断付着、せん断、嵌合 ( $R_3$ 、 $R_4$ )

$R_3$  の抵抗力に関しては 90°の結果から考察が可能であるが、破壊モードの種類により相対する解釈となる。破断型は  $R_1 < R_3$  の場合で発生すると考えられ、抜け型ではその逆となった。

同様に、 $R_4$  はテーパ断面の抜け型の結果から考察ができるが、目透かし部の漆喰がせん断破壊を起こした明確な形跡は現段階で確認できず、多くは目透かし幅方向の漆喰充填不良や、小幅板のゆるみなどによるものと考えられる。

以上から、下地仕様や食い込み深さ等が同一設定条件下でありながらも相反する破壊モードが起こりうる要因として、上記のほかに小幅板および漆喰の収縮による嵌合量の減少が考えられた。これは経年による影響が大きいと考えられるが、この課題に関してはさらなる検討が必要である。

##### (4) 小幅板上面と漆喰のせん断抵抗 ( $R_5$ )

小幅板上面で開いた漆喰引掛り部分は、漆喰の練り具合（柔らかさ）、目透かしへの食い込み量と鰻圧に大きく依存する部分であり、非常にばらつきが多いファクターである。そのため今回は施工条件を単純化するため、不利側の条件としてせん断部分が作用しない（食い込みが甘い）施工状態を想定して対象外とした。今回設定したパラメータによる影響は傾向がみえてきたため、より実情に即した条

件として、自然に食い込んだ状態 ( $R_5$  が作用する状態) を再現した試験体を作製し試験を行うことを今後行う必要がある。そのためには、第6章で記述する漆喰の食い込み幅などの画像解析手法も合わせて応用できると考えられ、「せん断が作用するためには何 mm 以上はみ出している必要がある」などの指標が編み出せる可能性がある。

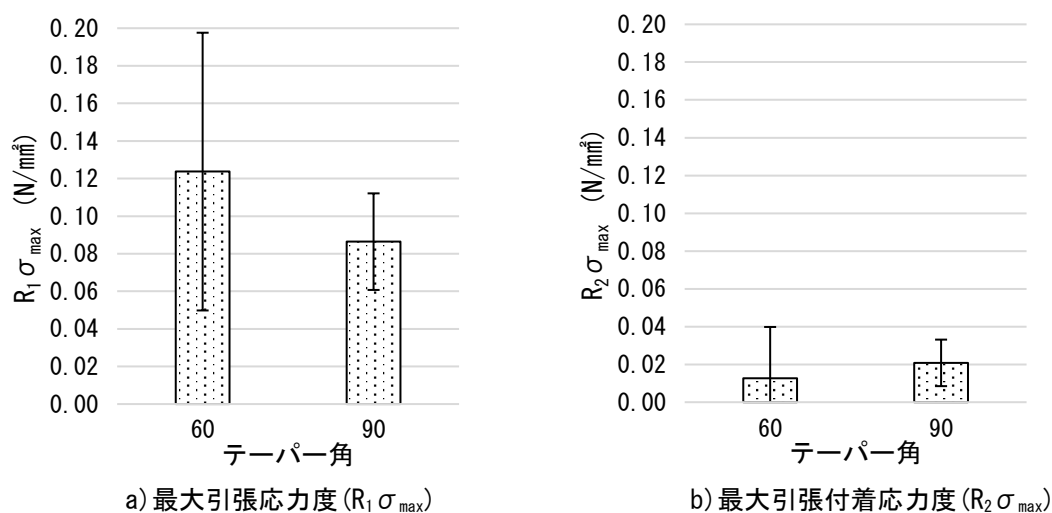


図4-18 各最大応力度の評価結果（破断型を抽出したもの）

### 第4章のまとめ

木摺り漆喰工法の挙動には材料、設計・施工、使用環境などの要因が絡み、それらが複合的に影響していると考えられるが、個々の要因であっても十分な検討がなされていないことが現状である。第4章では、使用材料や使用環境は理想的な条件である前提のもと、漆喰調合、木摺り下地の仕様、施工要因という限定的な範囲ではあるが、それらが及ぼす影響に関して実験的検討を行った。実験 4-1 では、調合、材齢のパラメータをパラメータに設けて漆喰単体の試験体を作製しての曲げ・せん断・圧縮の強度試験、実験 4-2 シリーズでは木摺り漆喰部材を小型化した要素試験体による下地と漆喰の荷重伝達に関して触れており、これらの実験によって得られた知見を以下に示す。

#### 1) 漆喰調合の時代的変遷について

予備的な調査として、日本由来の漆喰調合比を第3章で対象とした各文献から抽出し変遷を把握した結果、明治期～昭和期にかけてバインダー、スサ、砂などの比率に顕著な変化が無いことがわかった。これは、江戸時代初期から国内で広がりを見せた白亜総塗籠式の城郭建築の施工などを経て、木摺り漆喰工法の導入初期にあたる明治期の段階で日本の左官技法は国際水準以上に発展・成熟していたためと考えられる。また、下地が西洋由来の木摺りであっても左官仕上げるの工程は日本由来の工法が多く適用された要因をここに求めることができる。

#### 2) 木摺り下地と漆喰の応力伝達を担う下塗り（富調合）と、面剛性に寄与する斑直し・中塗り（貧調合）、およびそれに対するスサ分布の下振れを考慮したスサ減調合の合計 4 調合にて角柱状の試験体を作製し、養生環境は標準・炭酸化促進、試験方法は曲げ・せん断・圧縮として力学的特性を評価した。

- 2-1) 曲げ・圧縮強度はほぼ同等の結果を示し、せん断強度はその約 40%に留まっており、試験体内部の繊維方向に由来するもの（試験体長手方向に繊維が並びやすい）と考えられる。これは異方性を有することを示唆しており、実際の漆喰部材でも鰻の走らせた方向にスサが影響を受け、結果的に強度にも影響を及ぼす可能性がある。
- 2-2) 標準養生環境下において、材齢と最大強度は概ね相関しており一般的な知見と一致するものとなった。促進炭酸化環境 10 週の最大強度は、標準環境の試験体よりも高く材齢との相関関係の範疇を逸脱するものではないものの、促進 26 週では 6～8%低下する現象がみられた。これは筆者の既報とも類似する結果であり、一応の再現性はある。その意味で、炭酸化による強度増進は一時的なもので、最終的な収束値はピーク時よりも約 10%低い値を取る可能性がある。低下する要因は現在のところ明らかとなっていない。
- 2-3) 富調合と貧調合を比較すると、貧調合はバインダーやスサ絶対量の減少によって曲げ・せん断強度が特に悪影響を受け、圧縮強度ではプラスに寄与しており、固い仕上がりを狙った調合の特性が表れているといえる。スサ量が少なくなると最大強度は低下する傾向は一般的な知見と一致しており、これは材齢による強度増進よりも支配的なものとなっていた。各調合の弾性係数に影響を及ぼす因子は砂が最もウエイトが高く、固く仕上げる・面剛性を出すことを意図している貧調合の合理性が確認できた。

- 3) 漆喰の面外耐荷重性について、目透かし幅を統一したうえで、材齢、目透かし部の漆喰食い込み深さ、小幅板断面形状、破壊モードをパラメータに評価した。小幅板断面および目透かし幅の寸法は第3章で得られた結果を基に決定した。
- 3-1) 本研究の結果では、標準環境での材齢10週と比較して材齢28週のほうが耐荷重性は上昇し、促進環境の28週ではばらつき程度の低減が認められた。また、小幅板断面形状が矩形の場合は、最大荷重や破壊モードが食い込み深さに強く影響を受ける傾向を示した一方で、テーパーの場合はその傾向が弱くなった。漆喰が扇型に硬化するため嵌合しやすくなったことが要因と考えられ、食い込み深さに影響を受けることなく安全側の破壊モード「破断」が生じやすくなり、それに伴い最大荷重も向上した。
- 3-2) 木摺り下地と漆喰間における抵抗要素を区分して挙動を評価した。本研究の結果では、 $R_2$ (引張付着)を阻害した試験体において、素地のものと比較して最大荷重が14~33%低下した。そのため、目透かし部だけでなく小幅板平面部の付着力も耐荷重へ寄与している可能性が示されたものの、応力度で換算すると目透かし部の約10%で、 $R_2$ 作用領域のばらつきも大きいため、保有耐力評価などの際に当該部の作用は考慮しないほうが安全側の検討となる。



第4章の参考文献

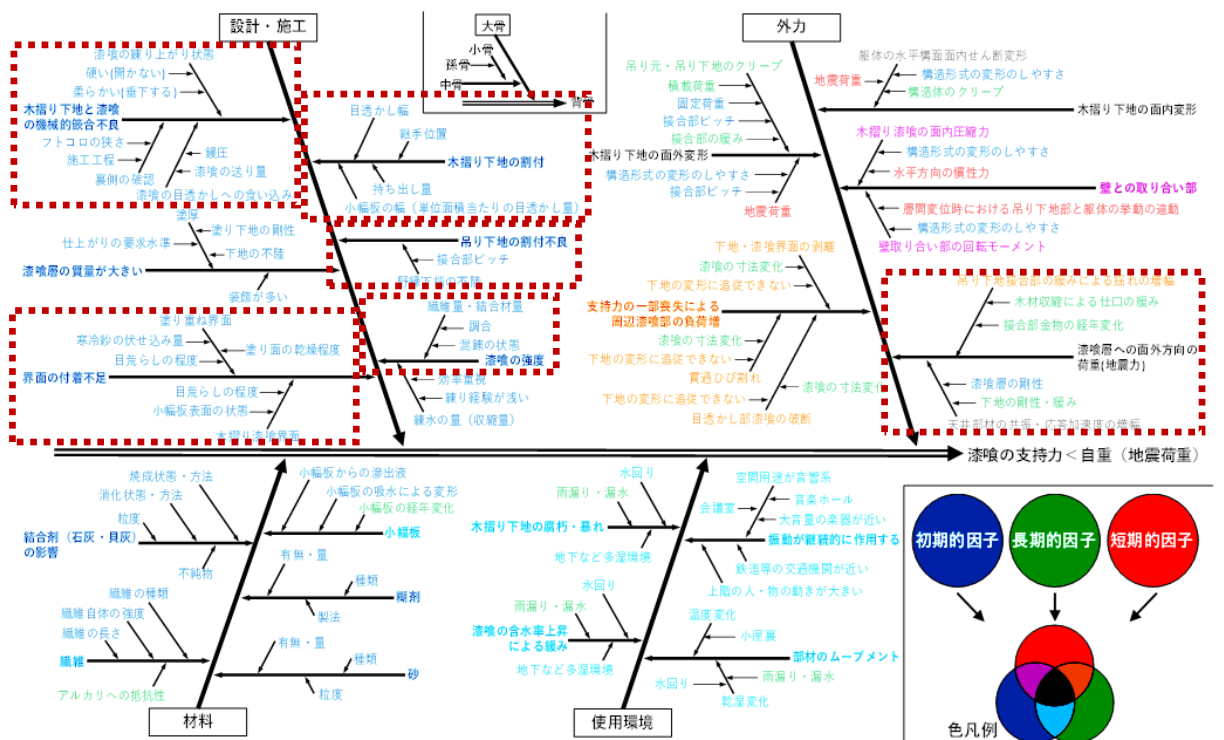
- 4-1) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 材料物性と下地仕様の観点からみた木摺り漆喰天井部材における基本性能と健全度評価に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第731号, pp.33-40, 2017
- 4-2) 浅野駿吉, 釜谷幸典, 井上嘉亀: カルシウム・シリケート化合物の炭酸化反応, 窯業教会誌, No.79(913), pp.303-311, 1971
- 4-3) 落合毅: オートクレーブ養生軽量気泡コンクリートの炭酸化, 石膏と石灰, No.242, pp22-31, 1993
- 4-4) 松下文明, 柴田純夫, 中村文彦, 浅野武彦: 軽量気泡コンクリート(ALC)の耐久性向上 軽量気泡コンクリート(ALC)の炭酸化判定法, 日本建築学会技術報告集, 第9号, pp.29-32, 1999
- 4-5) 水谷吉克, 橘高義典, 松沢晃一, 家田芳幸, 松尾憲樹: 飽和炭酸化状態に基づいた ALC の炭酸化進行度の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 80, 718, pp.1833-1839, 2015
- 4-6) 内村陽介, 本橋健司, 八木沢敬良: しっくい及びしっくい塗料の中性化挙動, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集 2011, 101-104, 2011
- 4-7) 内村陽介, 平本勇也, 本橋健司: 漆喰塗料及び漆喰の各種環境条件下における中性化挙動の把握, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集 2012, 207-210, 2012
- 4-8) 桑島浩恵, 輿石直幸: 漆喰の性質に及ぼす原材料の品質および調合の影響, 日本建築学会関東支部研究報告集 I (75), pp.77-80, 2005



## 第5章

### 実在する建築物から採取した

### 木摺り漆喰吊り天井を対象とした各種評価



：本章での対象範囲

## 第5章 実在する建築物から採取した木摺り漆喰吊り天井を対象とした各種評価

5.1 第5章概説 .....	101
5.2 調査・検証概要 .....	102
5.2.1 天井部位ごとの検証内容の整理.....	102
5.2.2 実試験体の実測調査について .....	103
5.2.3 現地調査を含めた天井仕様（一般部）の把握と模擬試験体に適用する基本仕様の策定 .....	107
5.3 模擬試験体の実験概要（実験 5-1） .....	110
5.3.1 模擬試験体仕様 .....	110
5.3.2 模擬試験体の実験結果（実験 5-1） .....	116
(1) (A)吊木受け～(B)吊木(A-B シリーズ).....	116
(2) (B)吊木～(C)野縁受け(B-C シリーズ).....	119
(3) (C)野縁受け～(D)野縁(C-D シリーズ).....	122
(4) (D)野縁～(E)小幅板(D-E シリーズ).....	125
5.3.3 模擬試験体の結果を踏まえた今後の展開 .....	127
5.4 実試験体を用いた漆喰付着強度試験（実験 5-2 シリーズ） .....	128
5.4.1 実試験体を用いた漆喰付着強度試験の概要 .....	128
5.4.2 実試験体に対する引張試験の方法.....	128
(1)実試験体の加工.....	128
(2)試験方法.....	130
5.4.3 実試験体に対する引張試験の結果および考察(実験 5-2-1,2).....	132
(1)全体の傾向.....	132
(2)目透かし幅で見た傾向.....	133
5.5 木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の算定（実験 5-2-2） .....	136
5.5.1 目透かし部漆喰の最大引張応力度( $R_1\sigma_{max}$ ) .....	136
5.5.2 小幅板下面と漆喰の最大引張付着応力度( $R_2\sigma_{max}$ ).....	136
5.5.3 漆喰塗り重ね部の引張付着( $R_6\sigma_{max}$ ) .....	136
第5章のまとめ .....	138
第5章の参考文献 .....	140

### 5.1 第5章概説

第3章では木製吊り天井・木摺り下地の時代的変遷、第4章では漆喰材料および木摺り漆喰部材の基礎的な力学的特性に関して一般解を得るべく検証を行った。第4章で用いた要素試験体は、木摺り漆喰工法の基礎特性を把握するには有用な手段と考えられるが、経年した建築物の部材に多く含まれる継時的変化の要因（下地の痩せ、漆喰の劣化など）については、新規作製の試験体で再現することは難しく、単純に材齢のみを促進炭酸化などで近似させた場合、健全状態の下地に硬化が進んだ漆喰の組み合わせとなり、危険側の判定になってしまう可能性がある。最も理想的な方法は評価対象の実際の部材を用いた判定であるものの、歴史的建築物の場合では部材そのものにも価値が見出されることもあり、その判定方法を適用できる例は少ないとみられるため、新規作製の試験体による再現試験に頼らざるを得ず、実際の経年部材とは諸物性の乖離を内包する可能性があるのが現状である。

そのような状況のなか筆者らは、ある歴史的建築物の木摺り漆喰天井（1930年代の施工）の健全度評価、耐力診断のためのデータ取得を目的として、天井仕様の詳細調査と、改修工事時（本評価・診断とは関連はない別工事）に撤去・保管されていた天井部材（以下、実試験体）の一部提供の機会に恵まれた。

第5章以降では、この物件の調査・検証内容の一部を基にした議論を展開することとし、実建物の天井仕様調査とその仕様を再現した試験体による吊り天井下地部の強度試験（実験5-1）、ならびに実試験体を用いて第4章・実験4-2シリーズと同様の漆喰引張試験（実験5-2）を実施した結果を報告する。特定の建物を対象にした個別解にはなるが、第4章までの文献調査結果や要素試験体結果と比較しながら、実建物の仕様、経年した部材との関連性、再現性等を確認し、木摺り漆喰天井における材料的観点に立脚した健全度評価に繋がる一連のプロセスを提案する。

なお実建物：調査対象建物（以下、建築物N）の管理者からは、本論文執筆にあたり建物の名称・用途は非公開とする旨の要請を受けているため、一部にそのような記載となっている箇所があることを先に注記する。

## 5.2 調査・検証概要

### 5.2.1 天井部位ごとの検証内容の整理

表 5-1 に天井部位ごとの検証内容を示す。各部材・接合部の名称は第3章・図 3-6 のとおりとした。なお(E)は、下地全体を示す場合は「木摺り下地」、下地に用いられる木材を示す場合は「小幅板」と呼称する。

建築物 N の耐力診断では、対象となる木摺り漆喰天井部材の木製下地～漆喰仕上げまでの全体的な強度を実験的に評価する必要があったため、現地天井の部材寸法や接合部仕様等を調査した。また、実試験体を用いた強度実験のほか、実試験体による実験が不可能な部位は、仕様調査結果を基に天井納まりをリバースエンジニアリングした模擬試験体を部材接合部ごとに作製し、強度実験を行うこととした。部材寸法や納まり、施工状態は、基本的に現地や実試験体の実測によって評価を行ったが、特に施工状態は撮影画像による判定を試みた。これは、歴史的建築物の部材になるべく影響を与えることなく健全度評価を行うことを目的としたもので、詳細は第6章で報告する。

表 5-1 天井部位ごとの検証内容

部材	調査		実験	
	項目	方法	項目	方法
(A)吊木受け	・ 材種 ・ 部材断面寸法 ・ 取付間隔	・ 実測（現地） ・ 撮影画像による判定 ・ 関係者ヒアリング	・ 曲げ強度 ・ A-B 接合部強度 ・ 破壊性状	[模擬試験体（実験 5-1）] ・ 接合部 1 軸載荷試験（面内・面外） <sup>注</sup>
(B)吊木	・ 接合部納まり（仕口加工、金物など）	・ 実測（現地・実試験体） ・ 撮影画像による判定 ・ 関係者ヒアリング	・ B-C, C-D, D-E 接合部強度 ・ 破壊性状	[模擬試験体（実験 5-1）] ・ 接合部 1 軸載荷試験（面内・面外） <sup>注</sup>
(C)野縁受け		・ 実測（実試験体）		
(D)野縁		・ 関係者ヒアリング		
(E)木摺り下地（小幅板）	・ 材種 ・ 部材断面寸法 ・ 目透かし幅	・ 実測（現地・実試験体） ・ 撮影画像による判定	・ E-F 付着強度（破壊形態含む） ・ 天井面の相対的な強度分布 ・ 剥落メカニズム	[模擬試験体（実験 5-1）] ・ 接合部 1 軸載荷試験（面外） <sup>注</sup>
(F)漆喰仕上層	・ 塗り厚 ・ 付属物の種類、間隔（下げ苧など） ・ 漆喰の食い込み状態（施工状態）			[実試験体（実験 5-2）] ・ 面外 1 軸引張試験 ・ 表面硬度分布試験（第 6 章） ・ 振動試験（第 8 章）

注)天井仕上面に対して

### 5.2.2 実試験体の実測調査について

写真 5-1 に各実試験体の天井裏側と断面、表 5-2 に実試験体の実測調査結果（質量と断面寸法）を示す。実試験体は 4 体あり、AMS-1～4 と附番した。全て建築物 N 屋内の異なる 4 カ所において、改修工事の関係で撤去された天井部材の一部を正形状に整形したもので、1930 年代の建物建設時に施工された当初材である。強度試験を行う前の予備調査として、木摺り漆喰部分の破壊を伴わない範囲で天井部材の詳細仕様を確認した。実試験体の切り取り位置の関係上、木摺り漆喰部材に付帯する部材が異なっており、AMS-2,3 からは、(B)吊木と(C)野縁受けの部材寸法だけでなく、B-C 接合部、C-D 接合部を分解することで仕口・金物寸法などの情報が得られた。詳細な納まりは図 5-1 および図 5-2 に示す。

B-C 接合部の仕口加工について、第 3 章での技術書調査結果（表 3-3）ではほとんどが片蟻の蟻掛け仕様であった部分が実試験体では両蟻の蟻掛け（以下、蟻掛け）となっていた。同じく C-D 接合部・(C)野縁受け・(D)野縁の継ぎ手にはボルト・ナット・ワッシャが使用され、両接合部とも文献調査では確認できなかった仕様であり、建設当時に刊行されていた技術書の記載よりも発展的な内容となっていた。なお、ボルト類は実測結果と施工時期を勘案するとインチ規格のもの（ボルト・ナット：W1/4、ワッシャ：1in 角）と考えられ、C-D 接合部のボルトは(D)野縁下端から(C)野縁受け上側に向かって貫通して締結されていたが、(D)野縁より下側の納まりは木摺り漆喰部分の解体を要するため調査の段階では確認ができなかった。想定される合理的な納まりとして、(D)野縁の下端にゼロタッチで釘打ちされている小幅板を通すため、ボルト頭・ワッシャは(D)野縁の下端に座ぐりを設けたうえで納められていると判断した。

木摺り漆喰工法で用いられる面内補強材「下げ苧」は、長い繊維を巻き付けた釘を、下塗りが塗り終わったタイミングで(E)木摺り下地に打ち込んで固定、下塗りや斑直しへ菱柄状に伏せ込むのが一般的である。実試験体の下げ苧においては、釘は通常より大きく、かつ(E)木摺り下地に打ち込まれずに目透かし部に引掛ける（IT ハンガーの如く、木摺り下地下側から釘を差し込んで、下地の上面に引掛ける）形態となっていた。一般的な施工順序の場合、未硬化の漆喰に対して釘打ちを伴う振動を与えることを意味しており、実際に剥落の懸念が高まることが指摘されている[5-1]。天井の場合は特にその懸念が特に大きくなると考えられるため、実試験体の下げ苧の仕様はその対策と解釈することができる。

AMS-1～3 は、漆喰仕上面のさらに下層側に 9.5mm 厚の石膏ボードが貼られていた。これは漆喰層の剥落防止のための後補材で、当該ボードはボードビス（コーススレッド ラップ SUS 製 M3.8 L45）を用いて、(E)木摺り下地へ効かせる形で固定されていた。天井の仕上面は全て塗装仕上げとなっており、AMS-1～3 は石膏ボード、AMS-4 は漆喰上塗りの上層に塗られていた。漆喰層を貫通するひび割れは視認できる範囲で 4 体共に認められず、塗装面の劣化と思われる微細なひび割れが AMS-4 にのみ確認された。

表 5-3 に実試験体で行う実験内容を示す。ここでは本章以降に報告する試験内容も併記する。事前調査ののち、試験体へのダメージが小さい順番で、主に漆喰層に関わる各試験を行った。なお、強度試験にあたっては同一建物内・時期に施工された部材であることから、漆喰の物性はばらつきの内包程度も含め、4 試験体共に同等のものとして扱うこととした。





a) AMS-1

付帯部材：野縁1本、  
小幅板12本（全断面残存部）



b) AMS-2

付帯部材：吊木下端部1本、  
野縁受け1本、  
野縁2本、  
小幅板12本（全断面残存部）



c) AMS-3

付帯部材：吊木下端仕口部（全断面残存部無し）、  
野縁受け1本（継手あり）、  
野縁2本、  
小幅板13本（全断面残存部）



d) AMS-4

付帯部材：野縁2本（うち1本継手あり）、  
小幅板20本（全断面残存部）

写真 5-1 各実試験体の天井裏側と断面



表 5-2 実試験体の各測定結果（質量と断面寸法）

	実試験体 No.	AMS-1	AMS-2	AMS-3	AMS-4
切取り 寸法	(E)木摺り方向(mm)	593	650	655	897
	(D)野縁方向(mm)	601	650	650	910
	仕上部面積(m <sup>2</sup> )	0.36	0.42	0.43	0.82
吊り 下地	(B)吊木 <sup>注1)</sup> (木摺り×野縁方向)(mm)	部材無し	56.4×52.5	測定不可	部材無し
	(C)野縁受け <sup>注1)</sup> (H×W)(mm)		58.9×51.8	57.0×52.0	
断面 寸法	(D)野縁 <sup>注1)</sup> (H×W)(mm)	41.0×39.2	45.1×45.0	42.8×43.1	43.8×48.0
	(@: 間隔)	(野縁 1 本)	(@315)	(@310)	(@340)
(E) 木摺り 下地 寸法	小幅板 <sup>注1)</sup> 上辺幅(mm)	26.3～29.2 (avg.27.7)	24.7～30.2 (avg.27.2)	24.5～30.0 (avg.28.0)	30.0～32.9 (avg.31.5)
	小幅板底辺幅(mm)	33.0～38.4 (avg.36.5)	31.1～38.7 (avg.35.4)	34.6～38.7 (avg.36.7)	35.1～38.8 (avg.37.2)
	小幅板厚さ(mm)	9.9～13.3 (avg.11.0)	9.2～11.9 (avg.10.7)	9.3～12.1 (avg.10.7)	11.1～13.3 (avg.12.1)
	小幅板断面 テーパ角(°)	62.6～77.1 (avg.68.1)	64.8～82.4 (avg.69.2)	60.9～74.5 (avg.68.0)	72.3～83.2 (avg.76.8)
	目透かし幅(mm)	6.0～14.0 (avg.9.4)	8.8～18.0 (avg.11.3)	3.9～17.1 (avg.10.6)	3.1～8.3 (avg.5.5)
	単位目透かし開口率 (%/m <sup>2</sup> ) (第6章の目透かし開口率 GR と同義)	20.4	20.8	18.3	12.0
(F) 仕上層	漆喰塗り厚（端部四点平均）(mm)	24.6	23.2	22.9	21.9
	下げ苧（箇所/体、[箇所/m <sup>2</sup> ]	9、[25.0]	5、[11.9]	10、[23.5]	25、[30.6]
	後補材	GB-NC <sup>注2)</sup> 1 層	GB-NC 1 層	GB-NC 1 層	無し
質量 算定 <sup>注)</sup>	i :全体(kg)（実測値）	17.1	20.1	22.9	30.8
	ii:野縁受け以上(kg) <sup>注3)</sup>	無し	0.949	2.99	無し
	iii:野縁+木摺り(kg) <sup>注3)</sup>	1.44	2.20	2.16	4.91
	iv:後補材(kg) (GB-NC : 7.13kg/m <sup>2</sup> )	2.54	2.92	3.04	部材無し
	v :漆喰部(kg) (v = i-ii-iii-iv)	13.1	14.0	14.7	25.8
単位	野縁+木摺り下地+漆喰 (N/m <sup>2</sup> )	401	389	389	370
荷重	漆喰 (N/m <sup>2</sup> )	362	337	339	311
推定	漆喰塗り厚あたり (N/m <sup>2</sup> /mm)	14.7	14.5	14.8	14.2

注 1) (B)吊木、(C)野縁受け、(D)野縁はマツ材、(E)小幅板はスギ材

注 2) 不燃積層石膏ボード(9.5mm 厚)

注 3) 木製下地部分の質量は実測により体積を求め、密度 0.4g/cm<sup>3</sup> で算出した。

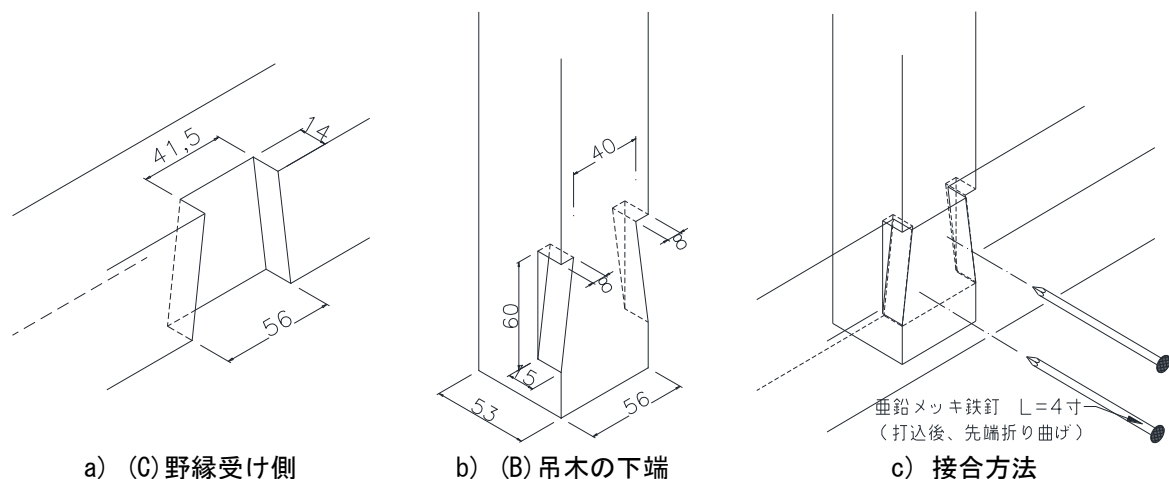


図 5-1 B-C 接合部の実測結果 (AMS-2 より)

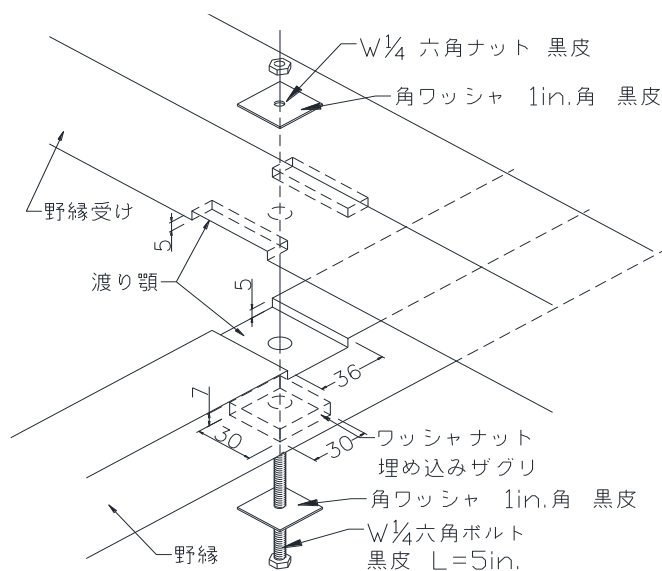


図 5-2 C-D 接合部の実測結果 (AMS-2, 3 より)

表 5-3 実試験体で行う実験内容

実試験体 No.	実験用途	備考
AMS-1	付着試験	各抵抗要素把握 (実験 5-2、本章 5.4 で報告)
AMS-2	振動試験	ボード補強材の挙動を評価する (第 8 章で報告)
AMS-3	付着試験	基礎物性把握 (実験 5-2、本章 5.4 で報告)
AMS-4	非破壊試験	木摺り側画像による施工状態判定、漆喰面が露出している (補強無し) ことによる仕上面の打撃 (反発度) 試験 (第 6 章で報告)
	振動試験	非破壊試験後に実施。無補強材の挙動を評価する。(第 8 章で報告)

### 5.2.3 現地調査を含めた天井仕様（一般部）の把握と模擬試験体に適用する基本仕様の策定

建築物 N の現地調査では、天井裏での部材寸法や納まりの確認、建物管理者や関連調査会社へのヒアリング等を行い、実試験体で得られた情報と併せて天井一般部仕様の把握を行った。本節に示す現地調査に関わる内容は、本研究に関わる部分を抽出したものである。表 5-1 に示すとおり、(A)吊木受け～(E)木摺り下地までの木質架構の部分は基本的に模擬試験体による強度試験とした。建築物 N は吊り天井の納まりが多岐に渡ったため、以下に示す観点から現地および実試験体での調査結果を勘案し、建築物 N 内に存在する天井納まりにおいて安全側の条件の組み合わせとなるように模擬試験体の仕様を策定した。

部材断面：断面の小さいもの

接合部：部材断面が小さいものの中で、特に耐力が低いと考えられる仕口・金物が用いられているもの（金物の耐力はボルト＞釘として扱った）

接合部間隔：広いもの（天井の面密度が均一であると仮定した場合、間隔が広いほうが接合部 1 カ所あたりの負担荷重は大きくなる）

表 5-4 に模擬試験体仕様の基となる、建築物 N の中で安全側と見做した各部材種類・寸法・接合方法の組み合わせを示す。建築物 N に存在する天井仕様の安全側条件を組み合わせた結果、(B)吊木～(E)木摺り下地の仕様は実試験体と概ね類似するものとなったことに加えて、第3章・表 3-3 に示した仕様と同等以上であり、最低限の仕様であっても技術書記載の内容は配慮されていたことが推察される。

表 5-5 に本実験の条件下における各接合部に作用する推定固定荷重を示す。各調査で得られた寸法値・重量を基に、各接合部で生じている荷重を試算した。計算過程の都合上、天井構成材の上下が反転していることに注意されたい。漆喰の単位面荷重（面密度）は実試験体 4 体の平均+2 $\sigma$ の値として塗り厚の上振れを考慮した安全側の推定とした。(E)木摺り下地～(B)吊木は表 5-4 に示す断面寸法と、現地調査で把握した部材間隔の最大値によって、単位面積あたりに存在する部材数・質量から面荷重を算出した。各接合部 1 カ所あたりの負担荷重は、その下部に存在する部材の単位面荷重の積算値を単位接合部数で除したものとした。本試験での結果は、各接合部の耐力に対する想定地震荷重との比という指標でも評価を行っている（第7章で詳述）。

図 5-3 に(E)木摺り下地～(A)吊木受け接合部の実測および推定図を示す。実試験体によって実測ができなかった A-B 接合部の仕様は現地調査結果より補完しており、B-C 接合部を上下反転・大型化させた蟻掛け＋釘打ちの納まりとなっていた。

表 5-4 模擬試験体仕様の基となる

建築物 N の中で安全側と見做した各部材種類・寸法・接合方法の組み合わせ

(A)吊木受け		(B)吊木		(C)野縁受け		(D)野縁		(E)木摺り下地
材種・断面	接合部	材種・断面	接合部	材種・断面	接合部	材種・断面	接合部	材種・断面
スギ 3 寸 5 分 角	蟻掛け + 5 寸丸釘 2 本	マツ 2 寸角	蟻掛け + 4 寸丸釘 2 本	マツ 2 寸角	渡り <sup>あご</sup> 腰 + W1/4 ボルト・ナット (L=5in) +角ワッシャ(1in 角・ 0.1in 厚)	マツ 1 寸 5 分角	1 寸丸釘 2 本	スギ 1 寸 2 分幅 ×4 分厚

表 5-5 本実験の条件下における各接合部に作用する最大固定荷重の推定

部材	間隔(mm) (現地調査より)	単位部材数 (本/m <sup>2</sup> )	単位面荷重(N/m <sup>2</sup> )		単位接合部数 (箇所/m <sup>2</sup> )	接合部 推定固定荷重 (N/箇所)
			部材ごと	累積		
(石膏ボード)	-	-	(69.9)	(69.9) <sup>注1)</sup>	-	-
(F)漆喰	-	-	378	378 (448)	-	-
(E)木摺り 下地	幅 36×厚 12 目透かし幅平均 9	22.2	37.7	416 (486)	60.9	7 (8) <sup>注1)</sup>
(D)野縁	360～365 <sup>注2)</sup>	2.74	21.8	437 (507)	2.34	187 (217)
(C)野縁受け	572～1169 <sup>注2) 注3)</sup>	0.86	11.7	450 (519)	0.83	540 (624)
(B)吊木 <sup>注4)</sup>	313～1170 <sup>注2) 注3)</sup> (野縁方向) 554～1026 <sup>注2)</sup> (野縁受け方向)	0.83	20.4	473 (543)	0.72	568 (652)
(A)吊木受け	313～1169 <sup>注3)</sup> (躯体への留付ピッ チ: 1300)	0.86	37.0	-		

注 1) 括弧内の数値は後補の石膏ボードを含んだもの

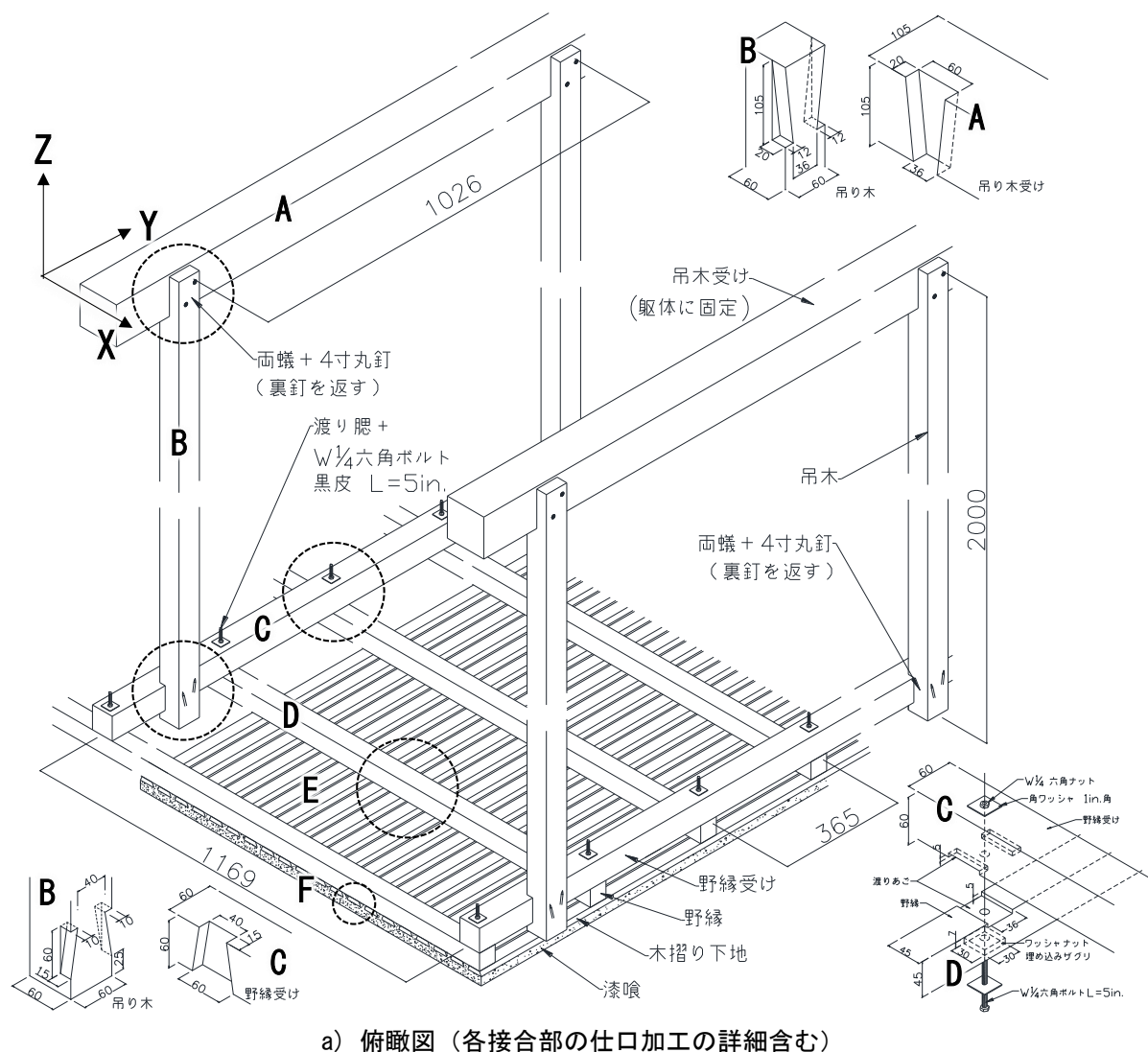
注 2) 間隔の最大値を用いる(天井の面密度が均一であると仮定した場合、間隔が広いほうが接合部 1 カ所あたりの負担荷重は大きくなる)

注 3) (A)(B)(C)部材の間隔は(B)吊木を介して接続されているためほぼ同じとなる

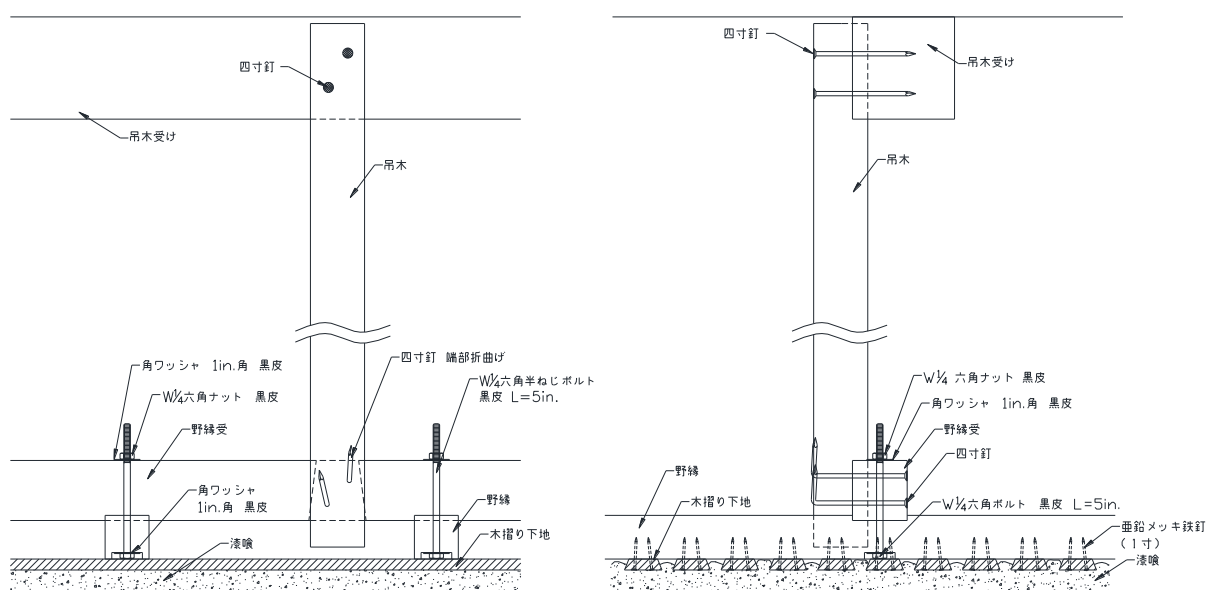
注 4) 吊り長さは 2000mm とする(現地調査より)

注 5) 目透かし 9mm×1000mm×目透かし本数 22 本/m<sup>2</sup>

注 6) 漆喰の面荷重 378N/m<sup>2</sup>を目透かし部の漆喰のみが負担したと仮定し、小数点第 4 位切り上げ



a) 俯瞰図（各接合部の仕口加工の詳細含む）



b) 断面図

図 5-3 (E)木摺り下地～(A)吊木受け接合部の実測および推定図(一般部)

### 5.3 模擬試験体の実験概要（実験 5-1）

#### 5.3.1 模擬試験体仕様

表 5-6 に各接合部・各軸試験体の仕様、図 5-4 に各軸の試験体図、写真 5-2 に治具・試験の様子を示す（各試験体の詳細図面は技術展開資料に示す）。まず図 5-3a)に示すとおり、野縁方向：X、野縁受け方向：Y、鉛直上方向：Z と定義した。以降もそのように表記する。

模擬試験体による実験では吊り下地 5 部材(A～E)の各接合部 4 カ所(A-B～D-E)の天井面に対する面内・面外 (X, Y, Z の 3 軸) の耐荷重性を個別の試験体にて評価した。模擬試験体は表 5-4 の仕様を踏まえ作製することとし、各条件 N=3 とした。木材は市場品を用い、マツは密度  $0.45\text{g/cm}^3$ ・含水率 11%、スギは密度  $0.43\text{g/cm}^3$ ・含水率 10%（それぞれ実測値）、木取は追証程度（吊木受けは芯持ちを許容）とした。ただし、実試験体などで測定した部材寸法をそのまま適用せずに、経年での痩せを勘案し最も近い寸法の定尺品に読み替えた（例：図 5-1b の吊木断面  $53\times 56$  ならば、二寸(約 60mm)角）。また C-D 接合部で用いられている六角ボルトは実試験体の実測により  $W1/4\times L=5\text{in}$  ( $\phi 6.3\times L=127\text{mm}$ )である可能性が高いが、同一品が入手困難であったため、模擬試験体で用いるボルトは公称径が最も近くかつ安全側な  $M6\times L=125\text{mm}$  を用いた。釘を用い、かつ釘に対してせん断力が作用する接合部 (A-B-Y・Z, B-C-Y・Z) は、参考として釘の無い試験体を N=2 で作製し、釘の有無をパラメータにした比較を行った。(B)吊木の長さは表 5-5 の想定では  $L=2000\text{mm}$  としたが、本試験条件では結果へ影響を及ぼす要因とは考えにくいため、治具に設置可能な長さで適宜調整した。

強度試験にはアムスラー型万能試験機（最大出力 500kN で 20kN レンジを使用）を用い、上下のクロスベッドに本試験用の設置治具（詳細は技術展開資料を参照されたし）を取り付け、そこへ試験体をボルト固定し、万能試験機に内蔵されたロードセルおよび試験体へ装着した変位計（CDP-25）の出力をデータロガー（TDS-530）へ接続した。変位計の設置位置は図 5-4 で示すとおりであり、載荷速度 1～2mm/min で引張力を 1 軸ごとに静的載荷して荷重、変位、破壊性状を記録した。試験機のラムストロークは鉛直方向 1 軸であるため、加力方向に応じて試験体の向きを変えた。変位計は固定側部材にも設置し、載荷初期の変位を別途測定し、載荷側部材の変位から差し引くことで接合部自体の変位を評価することとした。なお、C-D-Z 試験体は 1 体目と 2 体目以降で(D)野縁の本数が異なっており、これは 1 体目において(C)野縁受けの折損などの破壊性状も想定したため(D)野縁 2 本仕様（接合部 2 カ所）として加力したが、顕著な破壊が認められないまま治具の荷重上限（12kN）に達したため中断し、以降は(D)野縁 1 本仕様（接合部 1 カ所）としたためである。

表 5-6 各接合部・各軸試験体の仕様（実験 5-1）

想定部位	記号 <sup>注1)</sup>	材種	接合部条件	載荷方向
(A)吊木受け ～(B)吊木	A-B-X-1～3	(A)吊木受け：スギ 105 角 (B)吊木：マツ 60 角	標準：蟻掛け+ N125 丸釘 2 本 釘無：蟻掛け	X <sup>注1)</sup>
	標準：A-B-Y-1～3 釘無：A-B-Y-n-1～2			Y <sup>注2)</sup>
	標準：A-B-Z-1～3 釘無：A-B-Z- n- 1～2			Z <sup>注3)</sup>
(B)吊木 ～(C)野縁受け	B-C-X-1～3	(B)吊木：マツ 60 角 (C)野縁受け：マツ 60 角	標準：蟻掛け+ N125 丸釘 2 本(釘 の裏を返す) 釘無：蟻掛け	X <sup>注1)</sup>
	標準：B-C-Y-1～3 釘無：B-C-Y- n- 1～2			Y <sup>注2)</sup>
	標準：B-C-Z-1～3 釘無：B-C-Z- n- 1～2			Z <sup>注3)</sup>
(C)野縁受け ～(D)野縁	C-D-X-1～3	(C)野縁受け：マツ 60 角 (D)野縁：マツ 45 角	渡り腮+ M6 ボルト・ナット+ 25 角座金 (2.3t) C-D-Z-1 は接合部 2 カ所、 C-D-Z-2, は 1 カ所	X <sup>注4)</sup>
	C-D-Y-1～3			Y <sup>注4)</sup>
	C-D-Z-1～3			Z <sup>注3)</sup>
(D)野縁 ～(E)小幅板	D-E-Z-1～3	(D)野縁：マツ 45 角 (E)小幅板：スギ w36×t12	N32 丸釘 2 本(野縁 2 本、木摺り 8 本)	Z <sup>注1, 3)</sup>

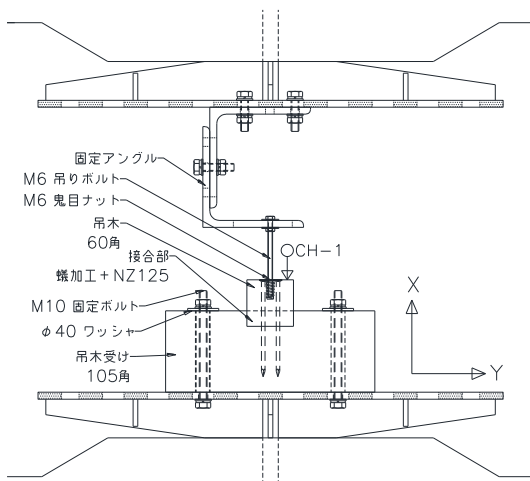
注 1) 仕口(釘)の引抜け方向のみとする。

注 2) (B)吊木の芯に対して線対称のため 1 方向のみとする。

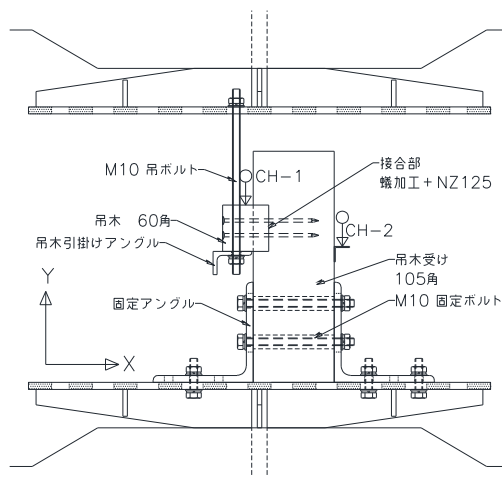
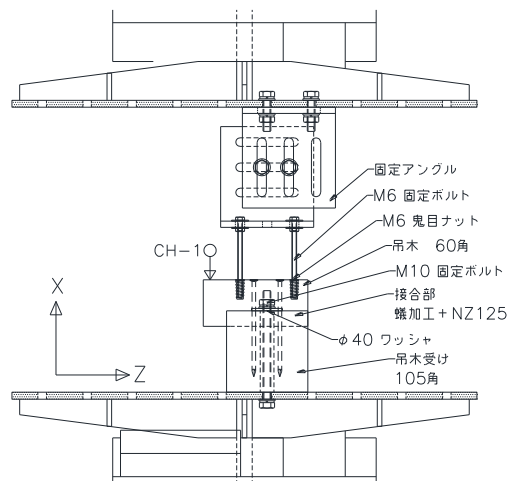
注 3) 鉛直下向き（天井部固定荷重）方向とする。

注 4) ボルト軸に対して点对称のため 1 方向のみとする。

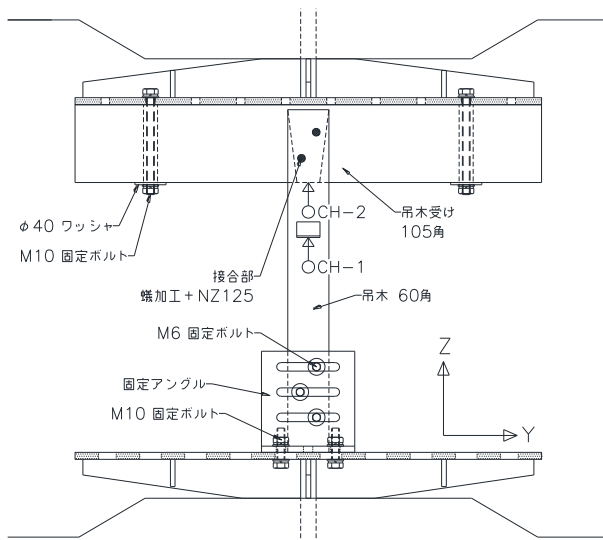
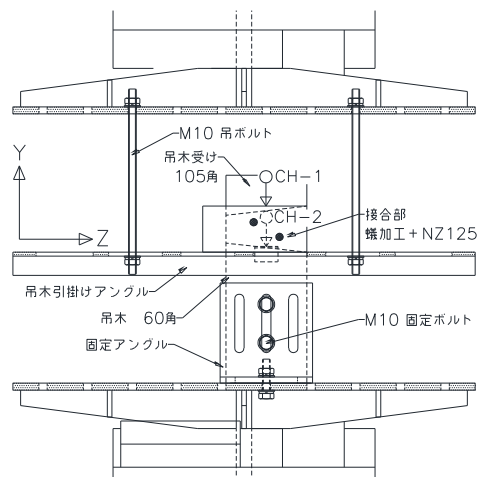
## 第5章 実在する建築物から採取した木摺り漆喰吊り天井を対象とした各種評価



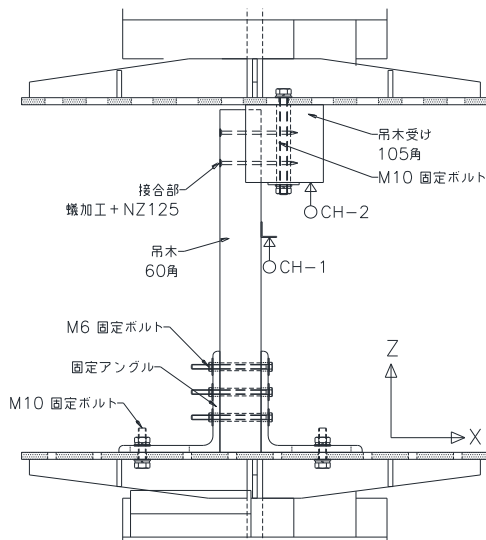
i) A-B-X



ii) A-B-Y



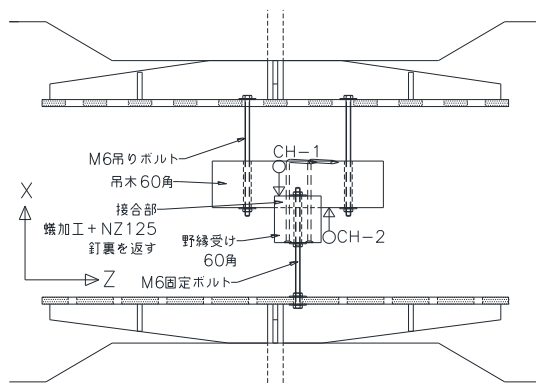
iii) A-B-Z



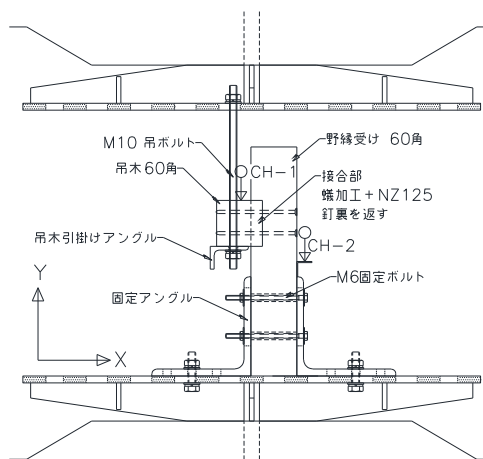
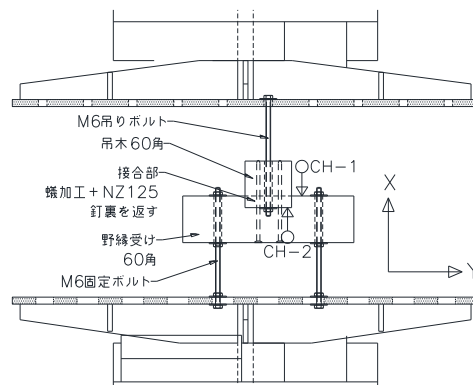
a) (A) 吊木受け～(B) 吊木 (A-B シリーズ)



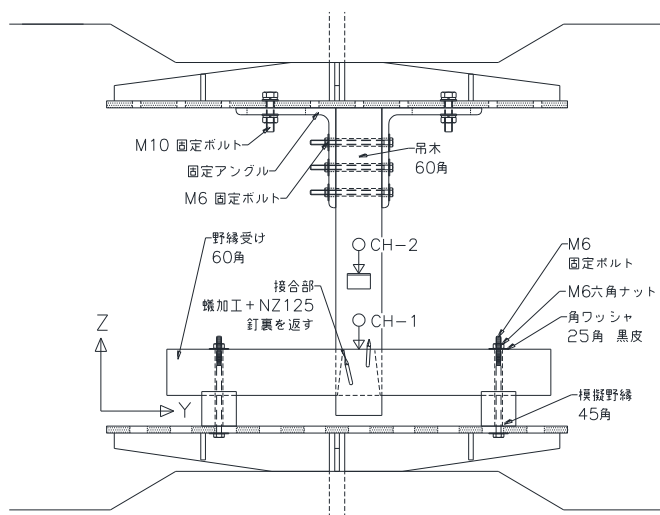
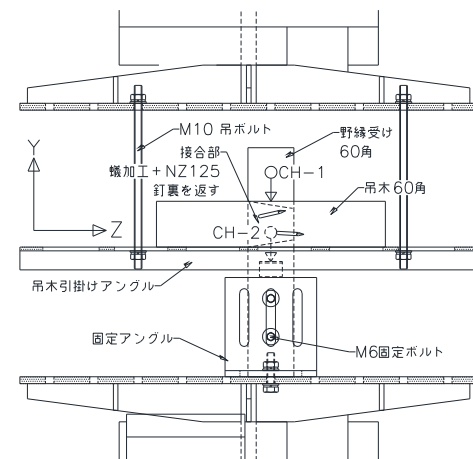
## 第5章 実在する建築物から採取した木摺り漆喰吊り天井を対象とした各種評価



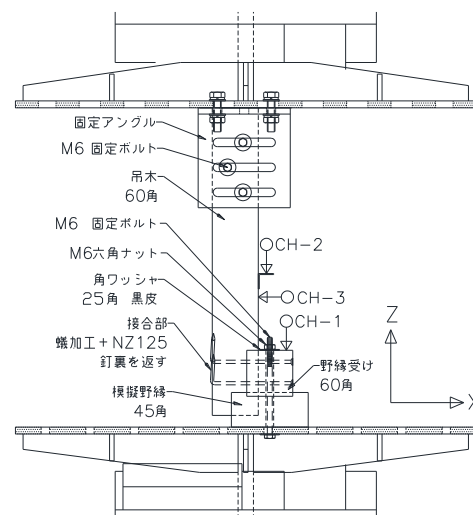
i) B-C-X



ii) B-C-Y

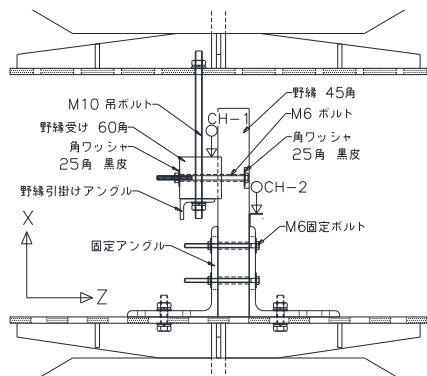


iii) B-C-Z

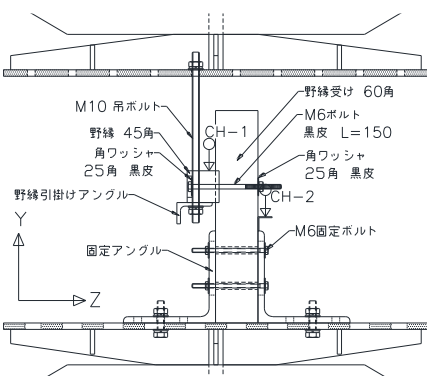
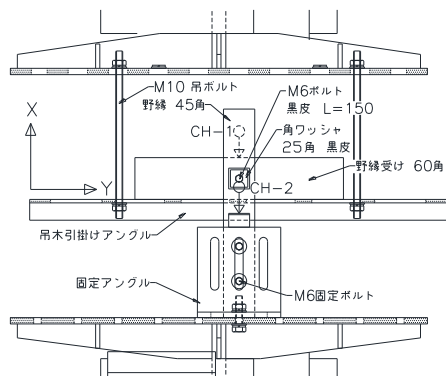


b) (B)吊木～(C)野縁受け (B-Cシリーズ)

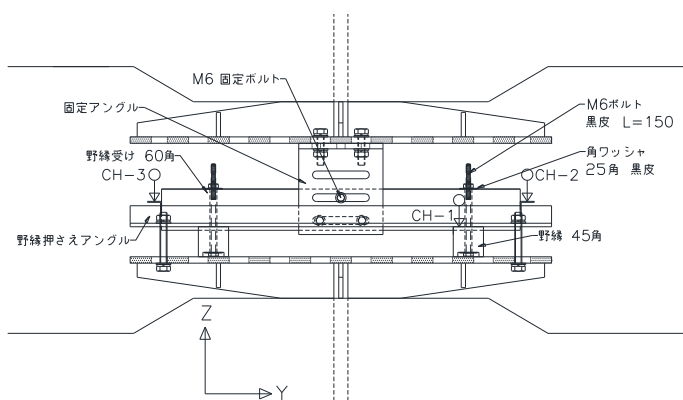
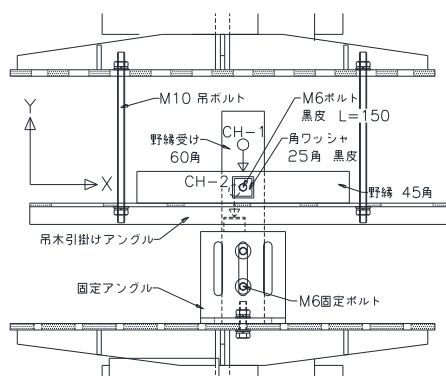
第5章 実在する建築物から採取した木摺り漆喰吊り天井を対象とした各種評価



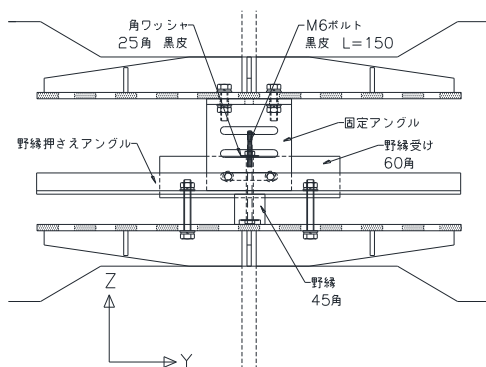
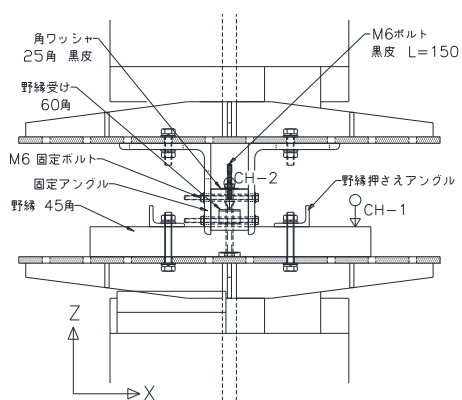
i) C-D-X



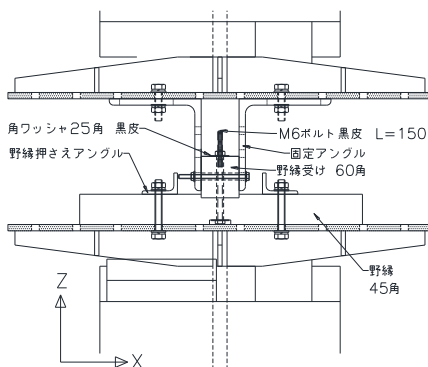
ii) C-D-Y



iii) C-D-Z(1 体目 : 野縁 (ボルト) 2 本仕様)

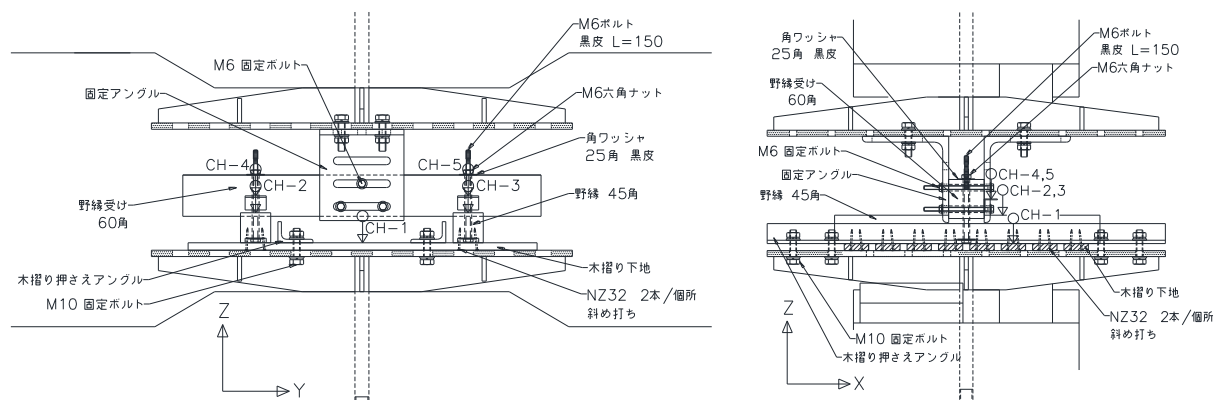


iv) C-D-Z(2, 3 体目 : 野縁 (ボルト) 1 本仕様)



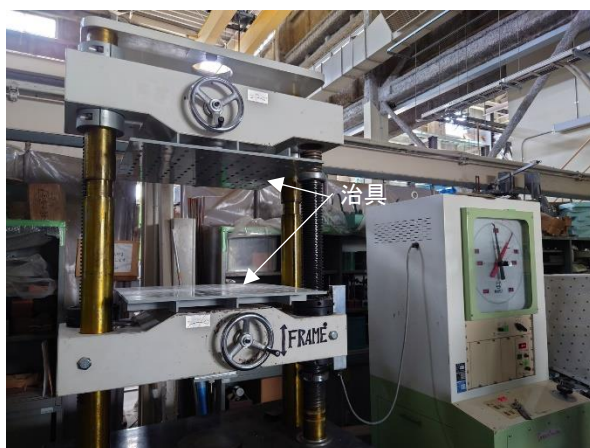
c) (C)野縁受け～(D)野縁 (C-D シリーズ)

## 第5章 実在する建築物から採取した木摺り漆喰吊り天井を対象とした各種評価



d) (D) 野縁～(E) 木摺り下地 (D-E-Z)

図 5-4 各軸の試験体図 (実験 5-1)



a) 万能試験機に治具を装着した状態



b) 治具に試験体を装着した状態 (A-B-Z-2)

写真 5-2 治具・試験の様子 (実験 5-1)

### 5.3.2 模擬試験体の実験結果（実験 5-1）

#### (1) (A) 吊木受け～(B) 吊木 (A-B シリーズ)

表 5-7 に A-B シリーズの試験結果一覧、図 5-5 に A-B シリーズの荷重変位曲線、写真 5-3 に A-B シリーズの各試験体の試験状況を示す。以下に、載荷方向ごとの試験体の破壊性状を示す。

A-B-X：スティックスリップ<sup>注)</sup>を伴った、釘の引抜けが主で、ホゾの破壊は両側共に軽微。釘の破断、頭抜けは認められなかった。

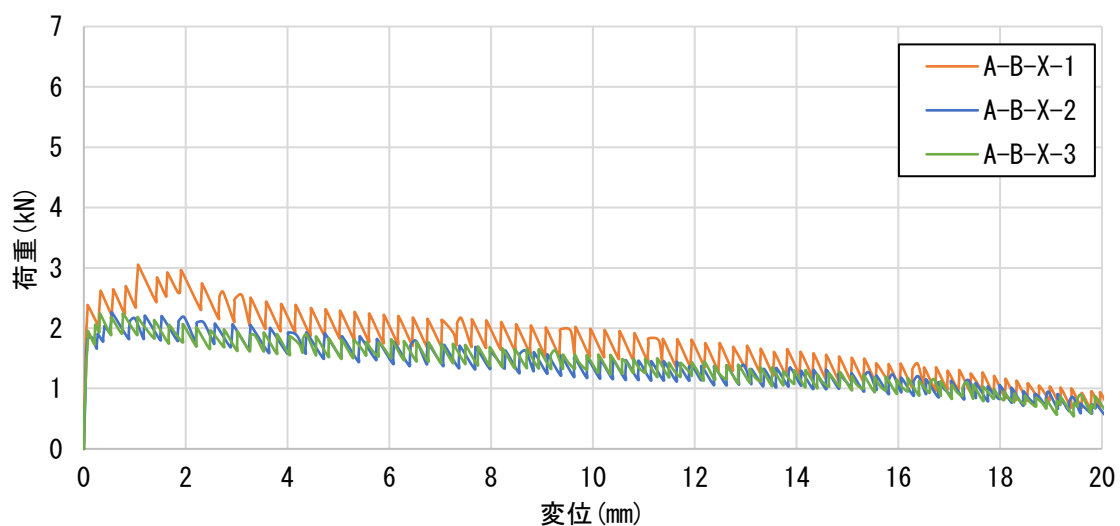
A-B-Y：標準条件は、釘と木部のスティックスリップ<sup>注)</sup>が発生し釘の引抜け、および(B)吊木の回転が主で、回転軸側の(B)吊木ホゾ（男木）の一部で割裂することがあった。(A)吊木受け側(女木)の破損や釘の破断、頭抜けは認められなかった。

A-B-Z：No.1, 2 はスティックスリップ<sup>注)</sup>を伴った、(B)吊木側のホゾ（男木）が支圧変形する破壊形態が主であった。No.3 はそれが認められず、(A)吊木受け側(女木)の割裂破壊が認められた。釘の破断、頭抜けは認められなかった。釘無条件では、標準条件と比較してスティックスリップが細かく生じ破壊形態は同様であるが、最大荷重は半分程度に留まった。

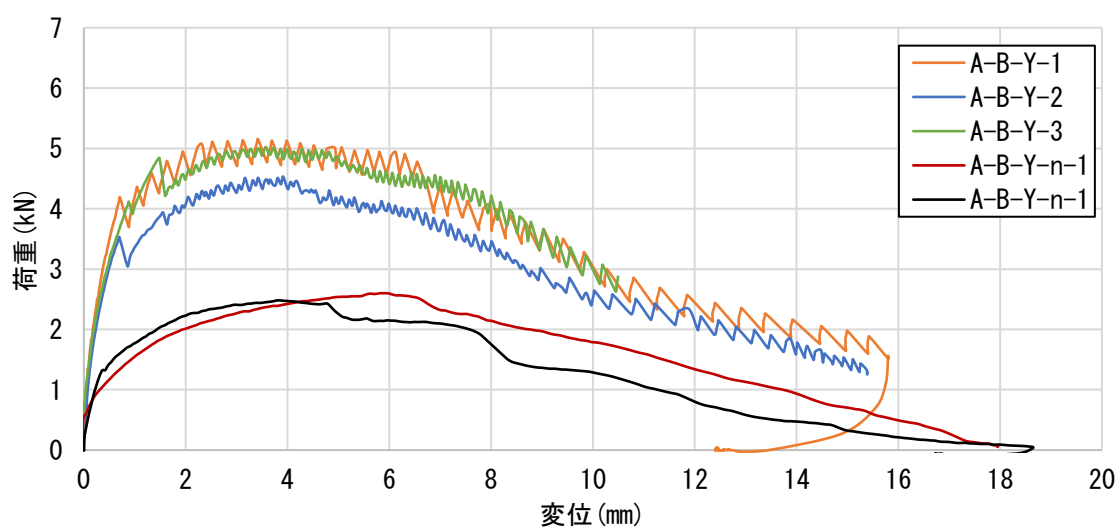
注) すべりと付着を繰り返して荷重値が小刻みに変動する現象

表 5-7 A-B シリーズの試験結果一覧（実験 5-1）

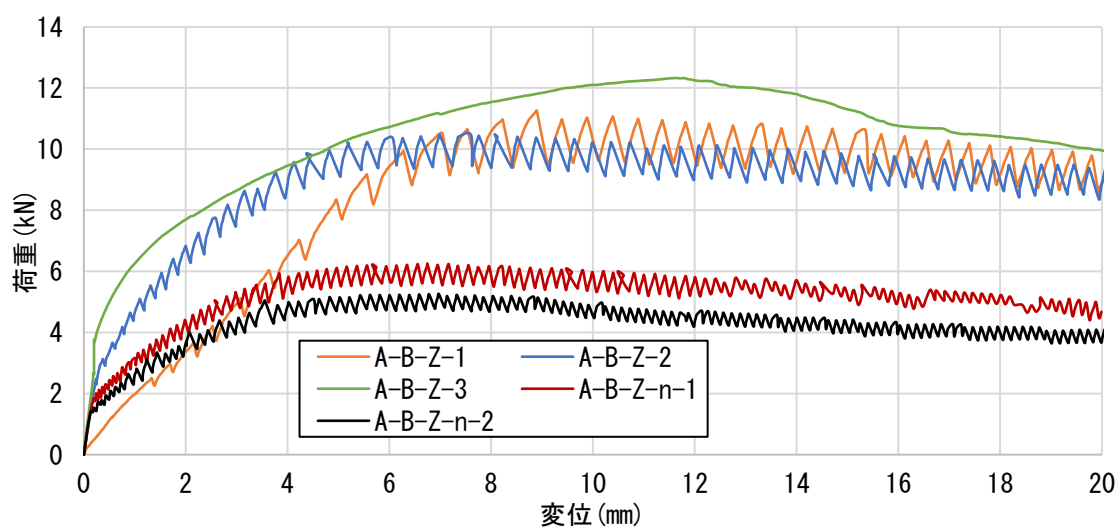
試験体(載荷方向)		A-B-X	A-B-Y		A-B-Z	
接合部条件		標準	標準	釘無(参考)	標準	釘無(参考)
最大荷重 (kN)	No.1	3.05	5.15	2.60	11.3	6.25
	No.2	2.26	4.53	2.48	10.5	5.26
	No.3	2.24	5.02	-	12.2	-
平均		2.52	4.90	2.54	11.3	5.76
標準偏差 (変動係数)		0.377 (0.150)	0.267 (0.054)	0.060 (0.024)	0.694 (0.061)	0.495 (0.086)



a) A-B-X

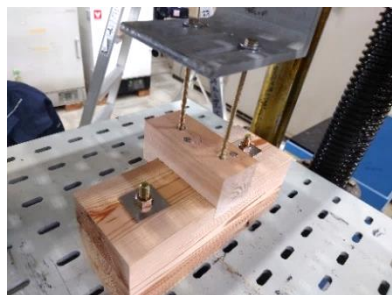


b) A-B-Y



c) A-B-Z

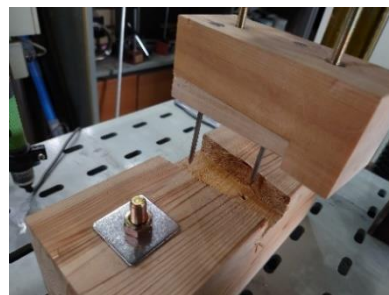
図 5-5 A-B シリーズの荷重変位曲線 (実験 5-1)



i) 試験前



ii) 釘の引抜け状態  
a) A-B-X



iii) 試験後



i) 試験前



ii) 釘の引抜けと吊木の回転  
b) A-B-Y



iii) 釘の引抜けと吊木の割れ



i) 試験前



ii) 吊木側の支圧変形による  
下方への滑り  
c) A-B-Z



iii) 吊木受けの割裂破壊  
(3体目のみ)

写真 5-3 A-B シリーズの各試験体の試験状況 (実験 5-1)



(2) (B) 吊木～(C) 野縁受け (B-C シリーズ)

表 5-8 に B-C シリーズの試験結果一覧、図 5-6 に B-C シリーズの荷重変位曲線、写真 5-4 に B-C シリーズの各試験体の試験状況を示す。以下に、載荷方向ごとの試験体の破壊性状を示す。

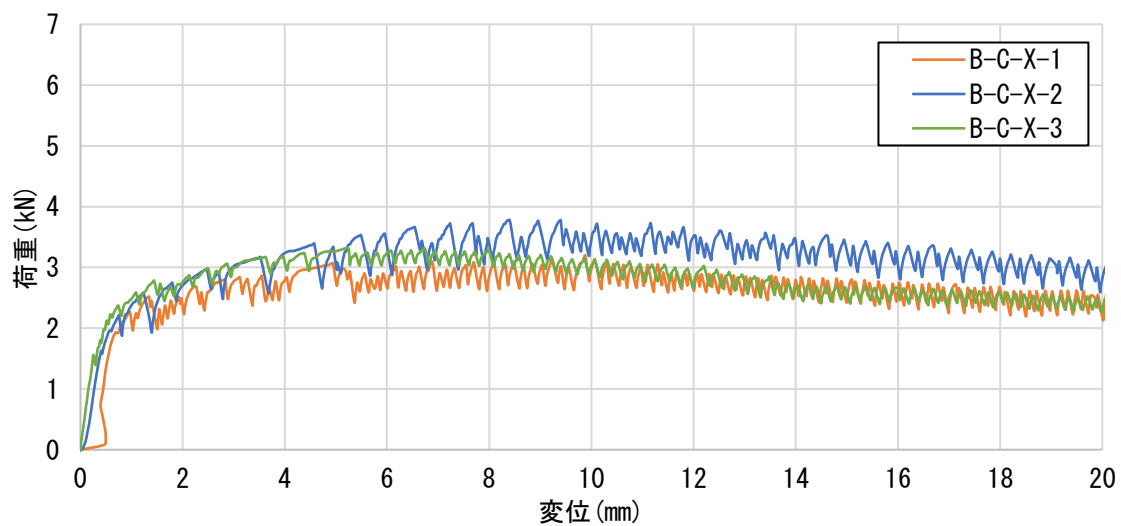
B-C-X：裏釘を返した側の引拔が主で、ホゾの破壊は男木・女木共にほとんどない。釘の破断、頭抜けは認められなかった。

B-C-Y：ホゾの片側を軸に(B)吊木（男木）が回転しながら、裏釘を返した側が引抜けた。ホゾの破壊は男木・女木共にほとんどなく、釘の破断、頭抜けも認められなかった。釘無しの試験体は、主な破壊形態は同様であるが最大荷重が小さく、釘への依存度が高いことを示唆した。

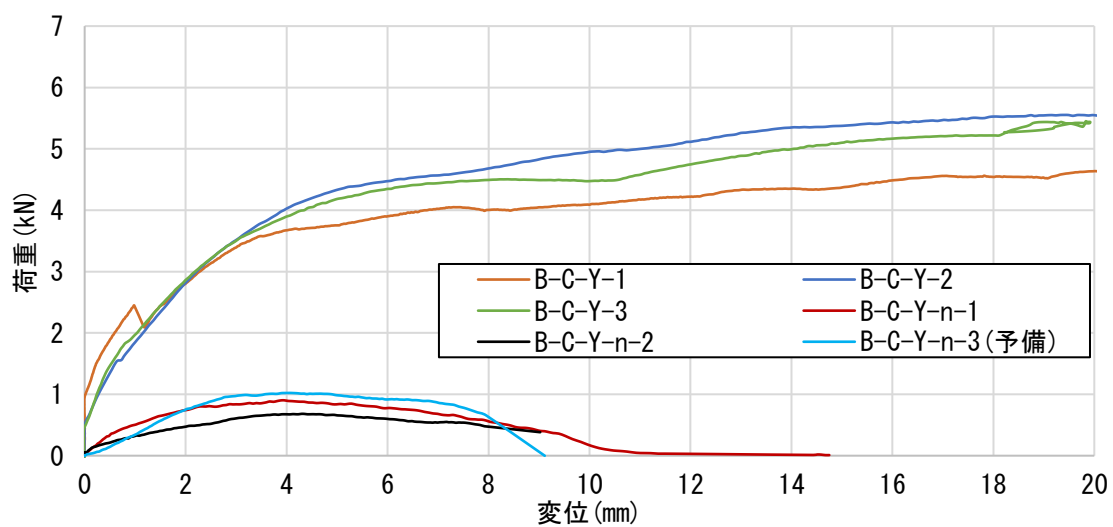
B-C-Z：釘の引抜け、(B)吊木ホゾの圧壊による荷重方向への破壊が主であり、1 体目で(C)野縁受けのホゾ周辺に割れが認められたが、個体差と考えられる。釘の破断、頭抜けは認められなかった。ホゾのみの場合は、主な破壊形態は同様で、荷重が半分程度になった。

表 5-8 B-C シリーズの試験結果一覧（実験 5-1）

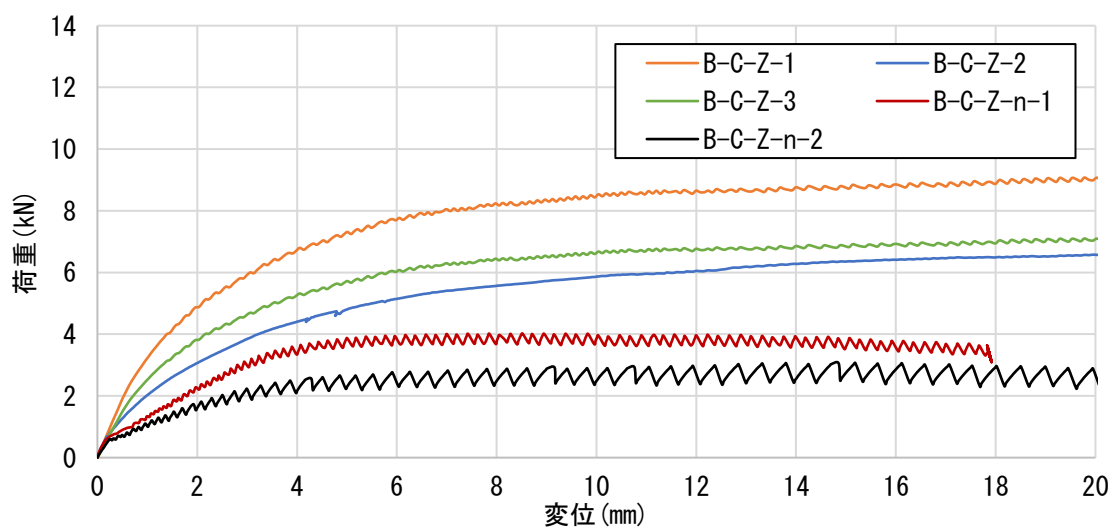
項目		B-C-X	B-C-Y		B-C-Z	
接合部条件		標準	標準	釘無(参考)	標準	釘無(参考)
最大荷重 (kN)	No.1	3.20	4.64	0.903	9.2	4.02
	No.2	3.78	5.61	0.682	6.58	3.07
	No.3	3.31	5.45	1.02	7.1	-
平均		3.43	5.23	0.868	7.63	3.55
標準偏差 (変動係数)		0.252 (0.073)	0.425 (0.081)	0.140 (0.161)	1.13 (0.149)	0.475 (0.134)



a) B-C-X



b) B-C-Y



c) B-C-Z

図 5-6 B-C シリーズの荷重変位曲線 (実験 5-1)





i) 試験前



ii) 釘の引抜け破壊  
a) B-C-X



iii) 釘の引抜け後



i) 試験前



ii) 釘の引抜け破壊  
b) B-C-Y



iii) 吊木の回転



i) 試験前



ii) 野縁受けの回転と割れ  
c) B-C-Z



iii) 吊木ホゾの破壊状態

写真 5-4 B-C シリーズの各試験体の試験状況 (実験 5-1)

(3) (C)野縁受け～(D)野縁(C-D シリーズ)

表 5-9 に C-D シリーズの試験結果一覧、図 5-7 に C-D シリーズの荷重変位曲線、写真 5-5 に C-D シリーズの各試験体の試験状況を示す。以下に、載荷方向ごとの試験体の破壊性状を示す。

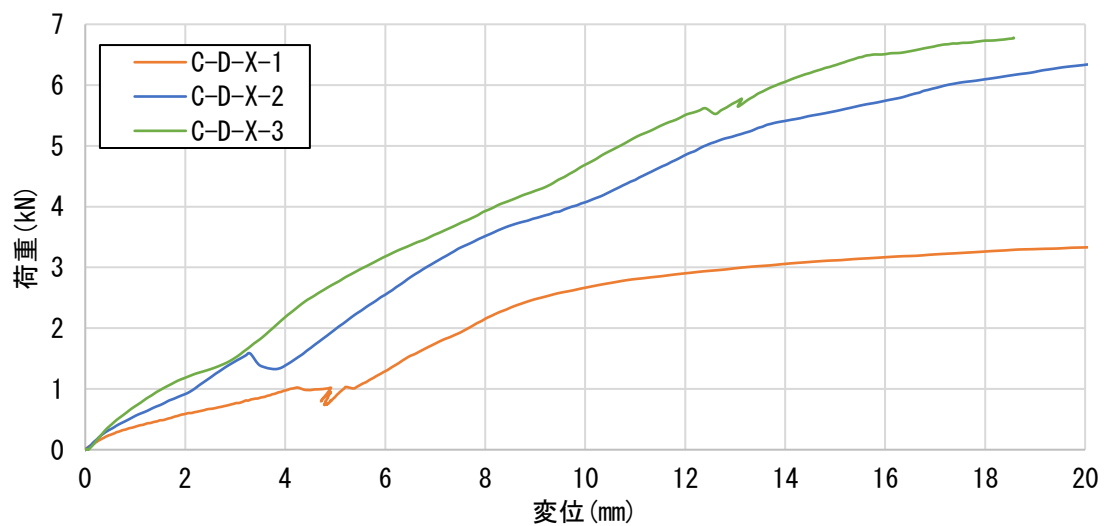
C-D-X : (C)野縁受けの回転によるボルト曲がり、渡り腮（仕口）部のめり込み、角座金のゆがみ、めり込みが認められた。ボルト破断は認められなかった。

C-D-Y : (D)野縁が渡り腮の片側を軸に回転し、それによるボルト曲がり、渡り腮のめり込み、若干のワッシャのめり込みを確認した。ボルト破断は認められなかった。

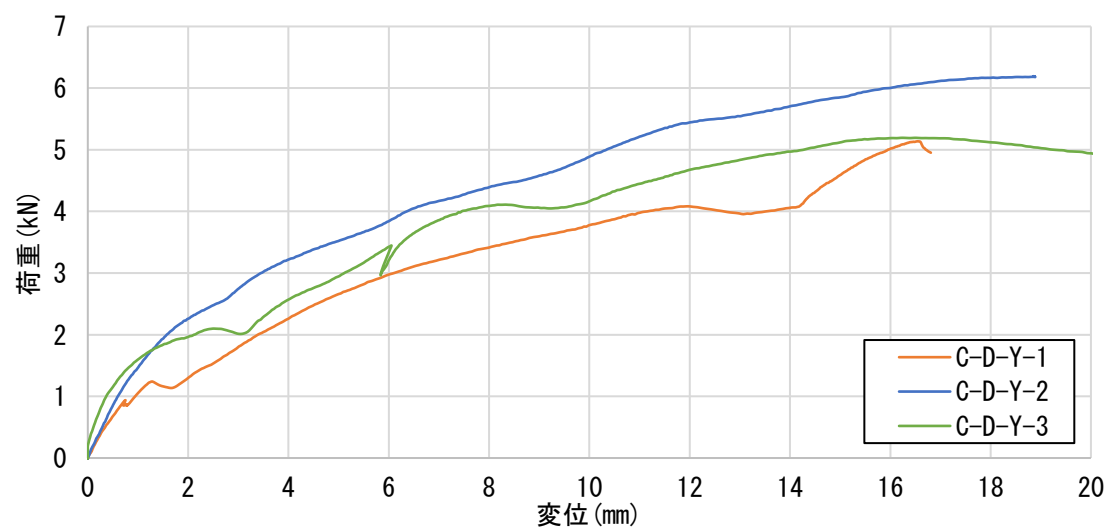
C-D-Z : No.1（接合部 2 カ所）は、荷重が試験治具の設計上限に達したため途中で停止させた。その時点で、B-C-Z 平均最大荷重の 1.68 倍であるが、(C)野縁受けの曲げ破壊等の損傷は確認されなかった。No.2 以降は、ボルト接合部分の最大強度を確認するため、(C)野縁受けを中央部で切断して接合部 1 カ所仕様の試験体を作り替えて再実施した。3 体とも、角ワッシャの変形・木材へのめり込みを認め、不均衡なめり込みによるボルト首元の破壊を No.2 で確認した。今回使用した M6 ボルトの最小引張破断荷重が約 8.4kN なので、ボルト強度が支配的であると考えられる。ただし、経年による木材の痩せやボルトの緩みによって渡り腮の嵌合度が低下すると、接合部が水平方向に動きやすくなり意図しないせん断力がボルトにかかり、ボルト耐力を下回る荷重で破断を起こす可能性がある。

表 5-9 C-D シリーズの試験結果一覧（実験 5-1）

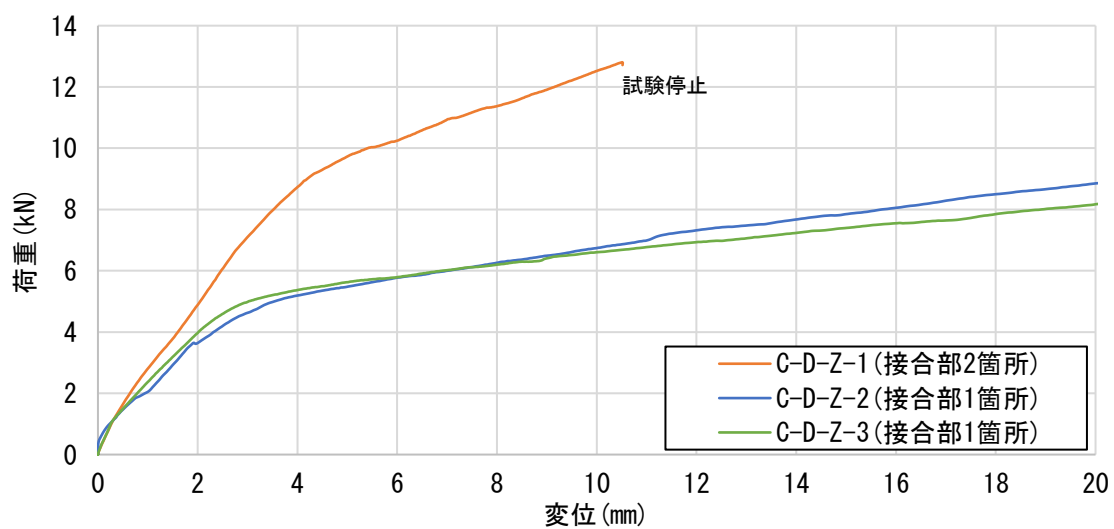
項目		C-D -X	C-D -Y	C-D -Z
最大荷重(kN)	No.1	3.43	5.00	12.8 以上(接合部 2 箇所)
	No.2	6.45	5.89	9.27(接合部 1 箇所)
	No.3	6.82	5.19	9.49(接合部 1 箇所)
平均		5.57	5.36	9.38(No.1, 2)
標準偏差 (変動係数)		1.52 (0.273)	0.383 (0.071)	0.110 (0.012) (No.2, 3 の値)



a) C-D-X



b) C-D-Y

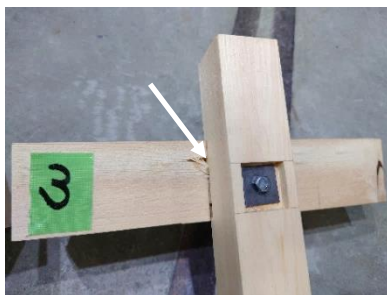


c) C-D-Z

図 5-7 C-D シリーズの荷重変位曲線 (実験 5-1)

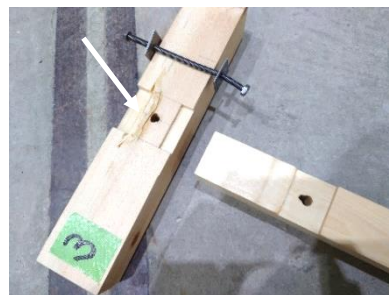


i) 試験前



ii) 相欠き部の破損

a) C-D-X



iii) 相欠き部の破損、ボルトの歪み



i) 試験前



ii) 野縁の回転

b) C-D-Y



iii) 相欠き部のめり込み



i) 試験前



ii) 野縁受けの浮き

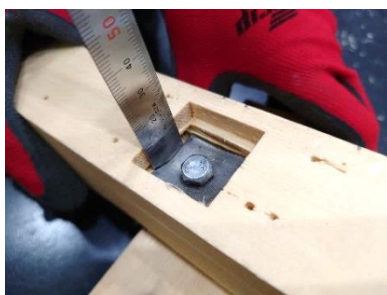
c) C-D-Z-1(接合部2カ所仕様)



iii) 角ワッシャの歪み、野縁受けへのめり込み



i) 試験前



ii) 角ワッシャのめり込み

d) C-D-Z-2,3(接合部1カ所仕様)



iii) ボルト破断の状態  
(野縁側のワッシャ付近)

写真 5-5 C-D シリーズの各試験体の試験状況 (実験 5-1)



(4) (D)野縁～(E)小幅度板(D-E シリーズ)

表 5-10 に D-E-Z の試験結果一覧、図 5-8 に D-E-Z の荷重変位曲線、写真 5-6 に D-E-Z の試験状況を示す。以下に、載荷方向ごとの試験体の破壊性状を示す。

D-E-Z：(D)野縁からの釘抜けが主で、小幅度板側の釘の頭抜け、釘の破断、(D)野縁、小幅度板の損傷は認められなかった。今回の試験体は(D)野縁2列・小幅度板8本、すなわち接合部は合計16箇所あるため、最大荷重を接合部数で除して1カ所あたりの負担荷重を算出する方法を採用した。

表 5-10 D-E-Z の試験結果一覧（実験 5-1）

項目	D-E-X	D-E-Y	D-E-Z	
			最大荷重(kN)	接合部1カ所あたりの負担荷重 (kN/箇所)
No.1			1.92	0.120
No.2			3.49	0.218
No.3			3.15	0.197
平均			2.85	0.178
標準偏差 (変動係数)			0.826 (0.289)	0.0516 (0.289)

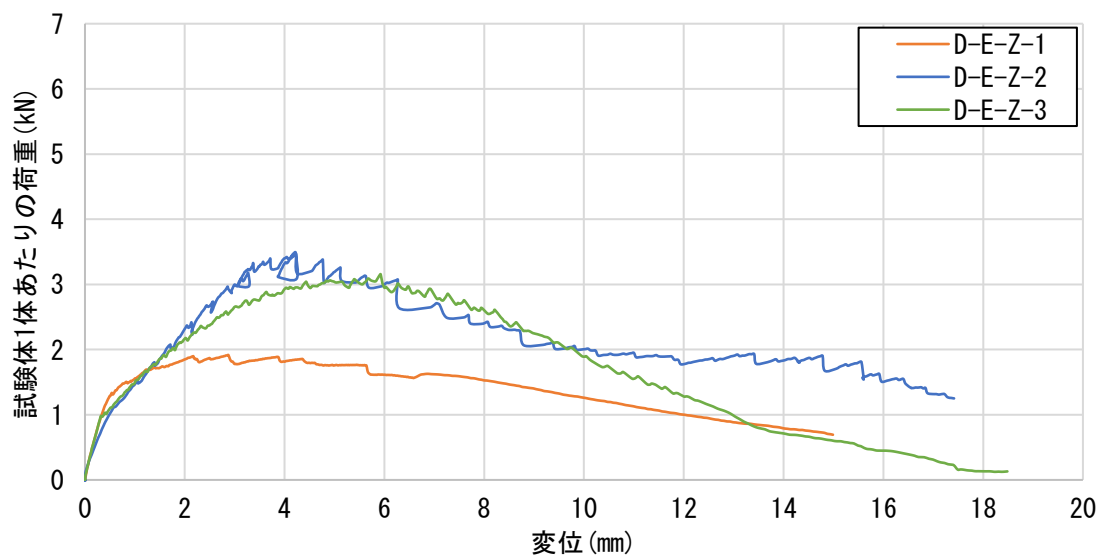
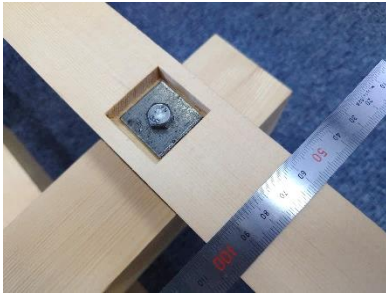


図 5-8 D-E-Z の荷重変位曲線（実験 5-1）



i) 野縁下部（小幅板打ち付け側）のボルト頭・ワッシャ座ぐり部



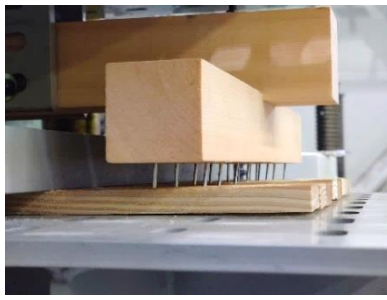
ii) 試験体組み立て状態



iii) 試験体据え付け状態



④釘の引抜け状況



⑤釘の引抜け状況

写真 5-6 D-E-Z の試験状況（実験 5-1）

### 5.3.3 模擬試験体の結果を踏まえた今後の展開

本節では木製吊り天井下地の基礎的な力学的特性の把握をするため、建築物 N の現地調査・実試験体調査結果を踏まえた模擬試験体による実験を行った。歴史的建築物を対象とした物性試験では常に課題になることであるが、今回扱った工法はかつて普及していた工法であるが故に、現状での評価対象は経年材が中心となるため、経年変化も考慮に入れた検証を今後行っていかねばならない。木材は経年で寸法変化を起こすためボルトや仕口部の固定度の変化が生ずる要因となる。ただし力学的特性でみると、新材と比較して古材の破壊強度は同等以上、靱性は低下することが指摘されている[5-2, 3]。また釘は発錆によって引抜き耐力の向上が報告されている[5-4]。それらは風雨に晒されず腐朽しない環境下が前提となるが、天井裏はそれに類似した条件といえる。以上を勘案すると木製下地の耐力へ影響する経年要因は良悪あると考えられ、今後は当該要因を考慮した検証を行う必要がある。

## 5.4 実試験体を用いた漆喰付着強度試験（実験 5-2 シリーズ）

### 5.4.1 実試験体を用いた漆喰付着強度試験の概要

第4章 4.5 では、(E)木摺り下地と漆喰の面外外力抵抗性に関する実験として、新規に作製した要素試験体を用いた漆喰の引張試験結果を報告した。本節では、実試験体に対しても同様の引張試験を実施し、諸物性や破壊性状等における要素試験体との差異や、経年した建材の物性を新規作製の試験体で再現可能かどうかを検証する。

### 5.4.2 実試験体に対する引張試験の方法

#### (1) 実試験体の加工

写真 5-7 に実試験体の引張試験準備状況を示す。引張試験は第4章・4.6.2 と同様にアタッチメントを漆喰面に装着して載荷するものとする。表 5-3 に示すとおり、引張試験の対象は AMS-1・3 の2体であるが、漆喰上塗りの上層に石膏ボードが貼られているため事前に剥がして漆喰面を露出させる作業を行った。ボードの下層からは旧塗装面（漆喰上塗りに塗布されたもの）が良好な状態で現れた。ボードの固定にはビスのほかに接着剤が併用されている状態が見受けられたが、接着部分は旧塗装を連行して容易に剥離したこと、塗布量は点付けの仮止め程度なものであり、ボードの支持力は主にビスによるものと考えられる。

第4章・4.6.1 では目透かし部分における漆喰の食い込み深さを定義しており、木摺り板厚を基準に板厚同等を D (Deep)、その半分を S (Shallow) とした。今回対象の2体の食い込み深さは、要素試験体のように試験を前提としたものではないのではばつきはあるものの、概ね D 相当は確保されていた。ただし(D)野縁がある部分はその裏側の漆喰の食い込み状態が不明であるため、引張試験は(D)野縁を避けた領域で実施することとし、漆喰面に(D)野縁の位置を事前にトレースした。漆喰上層の旧塗装部分も引張試験時に界面剥離を起こす可能性があったため、グラインダーで研削して漆喰の上塗り以下を露出させた。

漆喰層は碁盤目状にカットしてアタッチメントをエポキシ系接着剤で装着するが、接着剤のはみ出しによって隣接するアタッチメントに悪影響を及ぼす可能性があったため、千鳥状に装着して2サイクルに分けて試験を実施した。





a) 野縁位置、漆喰状態を確認し、試験対象部分を策定



b) ボード厚み分の深さにスリットを入れ、ボードを分割する



c) 漆喰・ボード界面に皮スキを差し込んでこじって剥がす



d) ボードの接着剤塗布部の状態 旧塗装の界面で剥離



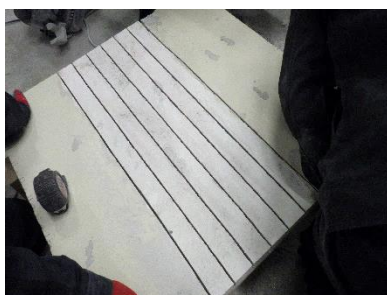
e) ボード除去状況 接着剤塗布部以外の塗膜は健全状態を維持



f) アタッチメント装着予定部分の旧塗装膜を研削し、上塗り下を露出させる



g) 旧塗装部研削状況 拡大 塗膜は4層程度確認



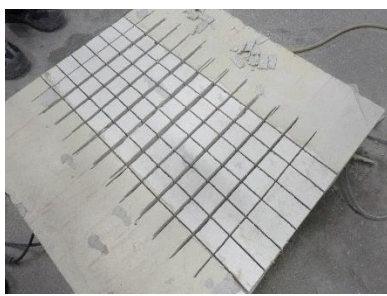
h) 漆喰層へ目透かしと直交方向に40mm幅でスリットを入れる



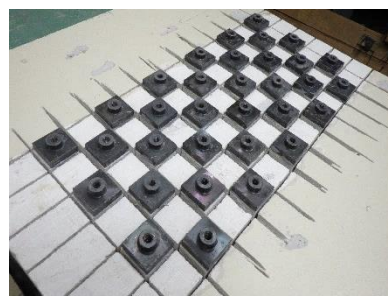
i) 目透かしの芯の位置を漆喰表面へ墨付け



j) 目透かしの芯と合致するようにアタッチメント装着位置を墨付け



k) 40×40mmの碁盤目状にスリットを入れる



l) アタッチメントを千鳥状に装着する(1サイクル目)

写真 5-7 実試験体の引張試験準備状況 (実験 5-2 シリーズ)

## (2) 試験方法

表 5-11 に実験 5-2 シリーズの要因と水準を示す。引張試験の載荷方法や(E)木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素は第4章と同様の考え方をういたため詳細は表 4-1 および 4.6.2 に譲る。本節では本試験に限定される考え方について述べる。

### (1) (E) 木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の検証

実験 5-2-1（基礎物性把握）は AMS-3、実験 5-2-2（抵抗要素評価）は AMS-1 を用いて行った。抵抗要素評価について、実験 4-2-2 では小幅板表面にフッ素樹脂テープを貼って引張付着(以下、 $R_2$ )の有無を区別したが、実験 5-2-2 ではアタッチメントを装着した段階で漆喰部を触診し、ぐらつくものは  $R_2$  が作用していない（目透かし部の機械的な嵌合のみ）もの、ぐらつかない（木摺りと固着している）ものは  $R_2$  が作用している状態と見做し、試験を実施した。

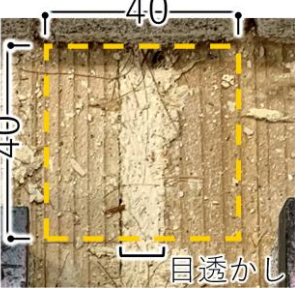
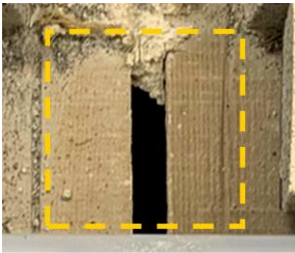
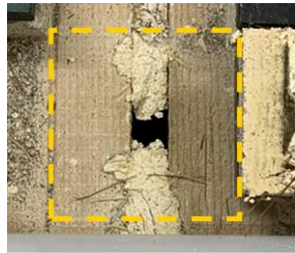
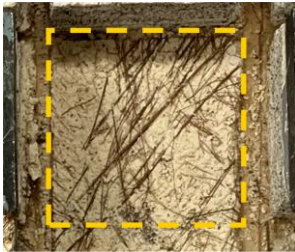
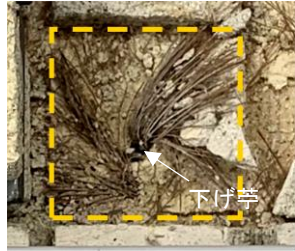
### (2) 破壊モード

表 5-12 に実験 5-2 シリーズにおける破壊モードを示す。第4章・表 4-9 で示した破壊モードに「界面剥離型」「下げ苧露出型」を追加した。実際の天井部材を切り出した実試験体は、当然ながら下塗り～上塗りまで複数層に渡り構成されているため、塗り重ね界面の付着強度が(E)木摺り下地と漆喰のそれを下回る場合は、界面剥離が起こりうる。また写真 5-1 のとおり、下げ苧が目透かしに差し込まれており、試験部分に一部が干渉する。この部分は漆喰が食い込みにくい部分ではあるが、(E)木摺り下地との嵌合は繊維と釘によってなされていると解釈し、ほかの部分と同様に試験は行って差異を確認する。なお下げ苧はその繊維を面内方向に広げることによって広範囲のひび割れ、剥落防止を意図して用いられるものであり、40×40mm の微小面積での試験は参考値として扱うこととした。天井面としての下げ苧の効果は第8章で述べる。

表 5-11 実験 5-2 シリーズの要因と水準

要因	水準		備考
実験	5-2-1（基礎物性把握）	5-2-2（抵抗要素評価）	
試験体	AMS-3	AMS-1	-
目透かし幅	試験部位による（6.0～14.7mm）		強度試験と併せて記録する。
テーパー角	平均 68°		小幅板下面と成す角度とする。
引張付着 ( $R_2$ )区別	区別無し	あり（ぐらつき無し） 無し（ぐらつきあり）	付着の有無は試験前に触診する。
漆喰食い込み深さ	Deep 相当		(E)木摺り下地上面から観察した際の漆喰高さで判断する。
漆喰調合	採取建物、施工時期が共通なため 同一調合と見做す		-
経年環境	屋内天井材 1930 年代施工		-
試験方法	加力範囲 40×40mm の面外単軸引張試験		タイル接着力試験用の鋼製アタッチメント使用(第4章 4.6.2 による)

表 5-12 実験 5-2 シリーズにおける破壊モード

破壊モード	破壊状況の例	判定基準	抵抗（破壊）要素	
			矩形 <sup>注)</sup>	テーパー
a)破断型		目透かし部の漆喰が破断し、かつ目透かし内に残存しているもの。	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>
b)抜け型		目透かし部の漆喰が下塗り層側に連行されて引き抜けたもの。	R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> , R <sub>4</sub>
c)破断＋抜け型		a)と b)の組み合わせ。	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub>	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>4</sub>
d)界面剥離型		小幅板・目透かしが視認できず、塗り重ね界面で剥離したもの。 下塗りと斑直しの界面とみられ、伏せ込まれた寒氈紗（棕櫚皮）が露出している。	R <sub>6</sub>	R <sub>6</sub>
e)下げ苧露出型		目透かしに差し込まれた下げ苧の破断もしくは漆喰との定着切れによって下げ苧が露出したもの。	R <sub>6</sub>	R <sub>6</sub>

注)対象の試験体の(E)木摺り下地は全てテーパー断面であるが、表 4-9 と対にするため掲載した

### 5.4.3 実試験体に対する引張試験の結果および考察(実験 5-2-1, 2)

#### (1) 全体の傾向

図 5-9 に実験 5-2 シリーズと実験 4-2 シリーズの最大荷重の比較を示す。ここで示した実験 4-2 シリーズの結果は、実験 5-2 各条件に類似するものを抽出しており、全グラフにおいて破壊モードや付着の有無、目透かし幅などを区別しない平均最大荷重である。それらの要因を包含した状態で概観すると、実験 5-2 シリーズの結果は実験 4-2-1 および 2 の中間に位置していることから、今回得られた結果では、新規作製の試験体（要素試験体）、および経年した試験体（実試験体）との間で顕著な差異は認められないことがわかった。なお、図 5-9 に示す要素試験体・実試験体の結果は全てテーパー断面を有するもので、 $60^{\circ}$  ～  $66^{\circ}$  と範囲があるが無視できる程度と解釈した。その理由として、今回試験したテーパーあり(E)木摺り下地は、最も鋭角なもので要素試験体の  $45^{\circ}$ 、鈍角なもので実試験体 AMS-4 の  $77^{\circ}$ （振動試験体：第 8 章で詳説）の範囲内において発生しやすい破壊モードは破断型であったことが明らかになっていることによる。

第 2 章で述べたとおり、木摺り漆喰部材の耐力は施工因子や材料因子も影響する可能性があることを勘案すると、現在の一般的な材料・実験室環境で作製した要素試験体と比較して、実試験体の仕様材料や施工環境は異なる条件下にあった可能性は十分にありうる。一方で、第 4 章で報告した材齢と強度の相関について、実試験体の材齢を 90 年程度と解釈すると、経年による強度増進は限定的とも解釈できるほか、今回採取した実試験体は目視評価の限りで顕著な劣化が進んでいる傾向は認められていない。これを一般的な経年状態（健全部）と解釈するのであれば、要素試験体と特段の乖離は認められない結果から推察するに、経年した部材の耐力推定に、当初材を模した新規作製の試験体を適用できる可能性を示唆していると考えられる。ただし、今回の結果はあくまで健全部分の耐力診断を主眼に置いており、一般的な環境下における経年変化や、外力要因による耐力へ及ぼす影響などは別途検討する必要がある。

図 5-10 に実試験体の破壊モードの発生率、図 5-11 に破壊モードごとの平均最大荷重を示す。実試験体 2 体共に、抜け型が少なく破断型が最も多いテーパー断面の特性が現れており、これについても実験 4-2 シリーズと同様の傾向を示している。漆喰の塗り重ね回数が増えれば界面が増えるため、破壊の起点になり得る場所も増えると解釈でき、AMS-1 で界面剥離型が多い傾向からもそれが読み取れる。一方で平均最大荷重は破断型と同等の水準を示しており、これは「どちらの破壊モードも生じうる」ことを示唆している。他方で AMS-3 は界面剥離型の発生率が低く、平均最大荷重も破断型に対して半分以下となっている。これは、漆喰層の強度分布のばらつきが AMS-1 よりも大きいことを示しており、塗り重ね界面の脆弱部分が界面剥離型ならびに低い最大荷重によって顕在化していると考えられる。界面の付着強度の強弱は施工要因も関連すると考えられるが、実験 4-1 で示したように漆喰調合ごとに物性が異なるため、それが塗り重ねされた状態で経年した場合、ディファレンシャルムーブメントに類する現象が発生する可能性も否定できず、さらなる検討が必要である。

## (2) 目透かし幅で見た傾向

図 5-12 に実試験体 2 体の最大荷重と目透かし幅の関係、図 5-13 に実試験体ごとの目透かし幅と破壊モードの関係を示す。図 5-12 より、実試験体 2 体の強度分布はばらつきが大きいものの概ね同様の範囲に広がっており、ごくわずかに目透かし幅との相関もみられる。目透かし幅（目透かし断面積）の影響をさらに詳細にみるため、AMS-1 の付着無し・破断型の最大荷重を抽出したものを図 5-14、さらに図 5-15 には図 5-14 の荷重を目透かし断面積（引張試験部 1 ピース幅  $40 \times$  目透かし幅）で除算した最大応力度（ $R_2$ ）を示す。これらによると目透かし幅と最大荷重にはばらつきが大きいながらも相関が認められるのに対し、応力度と目透かし幅は相関が認められないので、本試験での目透かし幅の範囲内ではスケール効果は発生しておらず、断面積と強度の関係を示す一般論が適用できることがわかった。応力度含めた各抵抗要素の詳細は次節で述べる。

AMS-1 は破断型と界面剥離型の平均最大荷重がほぼ同等と先述した。両破壊モードの目透かし幅ごとの分布は 9mm 周辺を境界に切り替わっている。材料破壊は最も脆弱な部分が起点となること勘案すると、目透かし幅が大きいほど界面剥離型の方へ誘導でき、安全側（剥落物の質量が減る）との解釈もできる一方で、施工時に漆喰が垂下しやすくなる懸念もあり、最も脆性的な破壊モードである抜け型の発生にも繋がる可能性がある。そのため、破壊モードの分水嶺である目透かし幅 9mm は施工性の良さや材料強度の発揮という意味でバランスが取れているといえ、第 3 章・図 3-5 で示した実物件の目透かし平均 9.07mm（約 3 分）との共通点を見出すことができ、経験則によって策定された目透かし幅に定量的な一考察を加えることができたといえる。



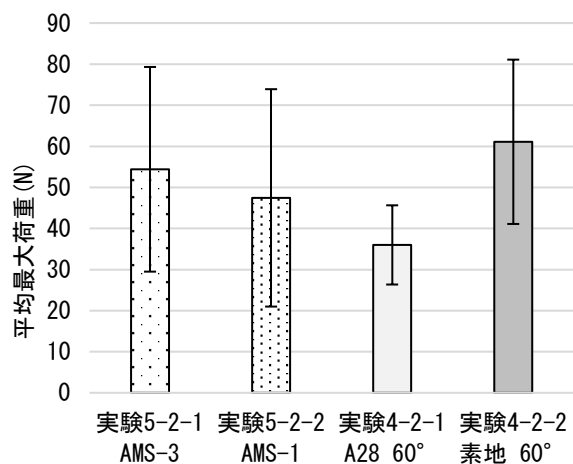


図 5-9 実験 5-2 シリーズと実験 4-2 シリーズの最大荷重の比較

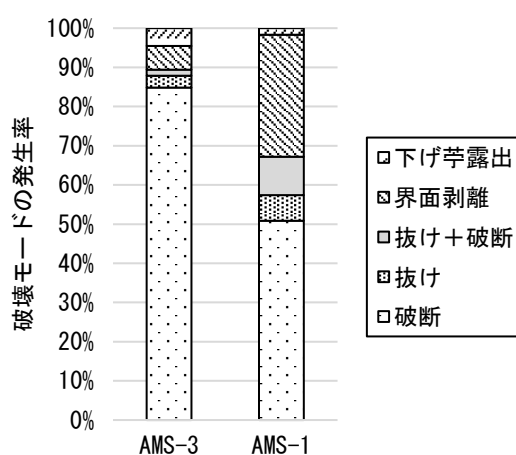


図 5-10 実試験体の破壊モードの発生率

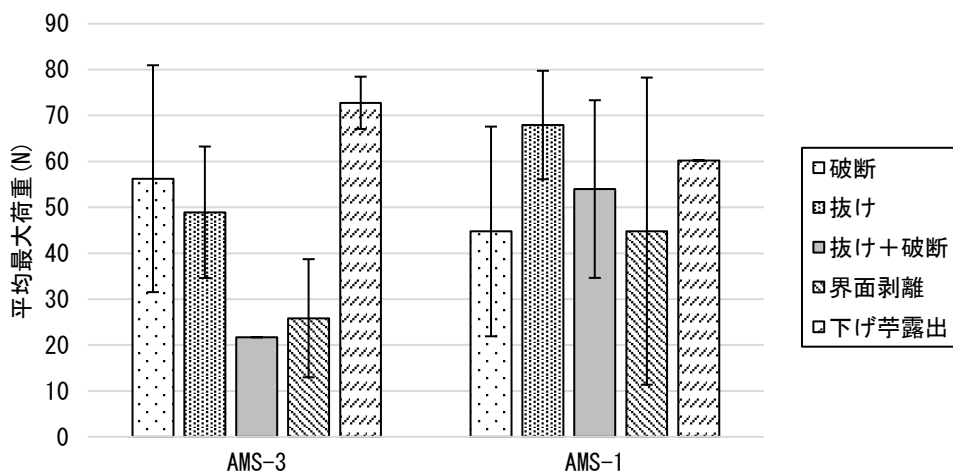


図 5-11 破壊モードごとの平均最大荷重

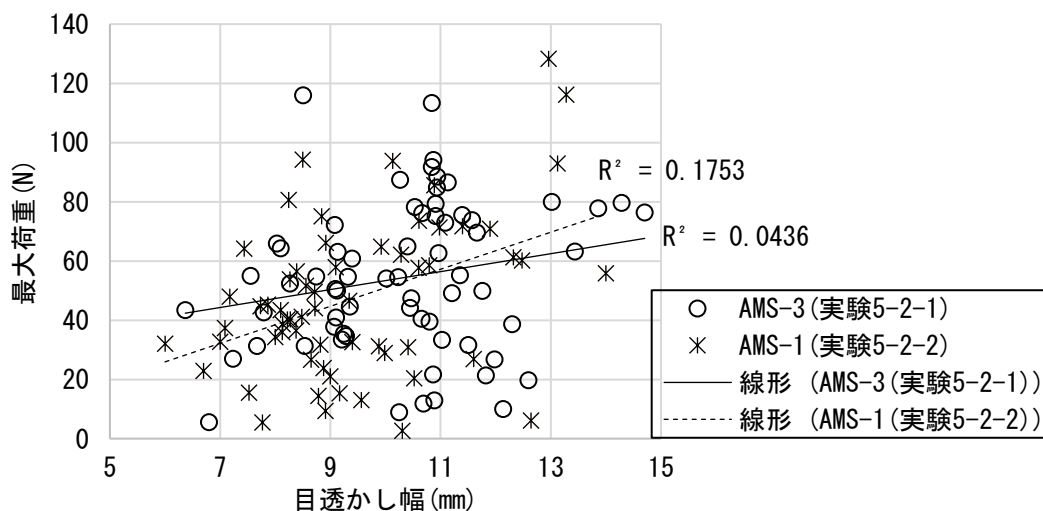
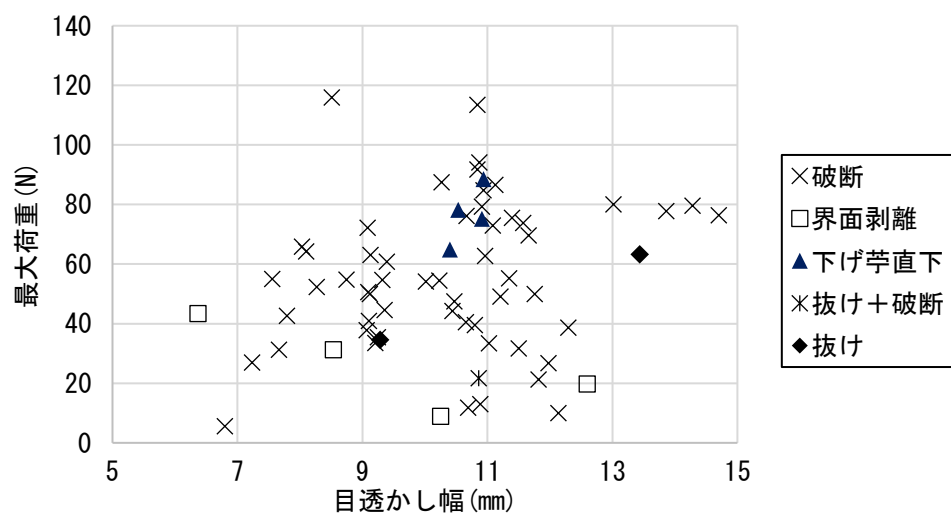
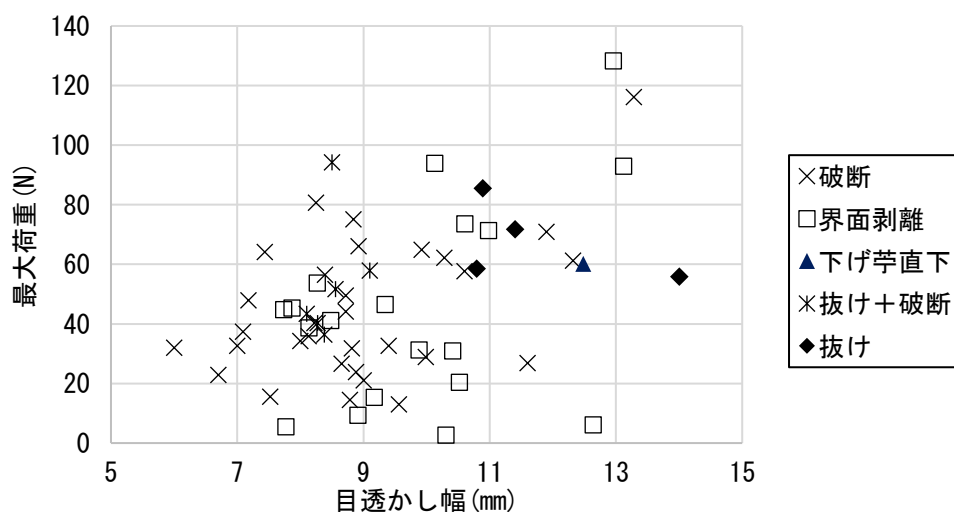


図 5-12 実試験体 2 体の最大荷重と目透かし幅の関係



a) AMS-3 (実験 5-2-1)



b) AMS-1 (実験 5-2-2)

図 5-13 実試験体ごとの目透かし幅と破壊モードの関係

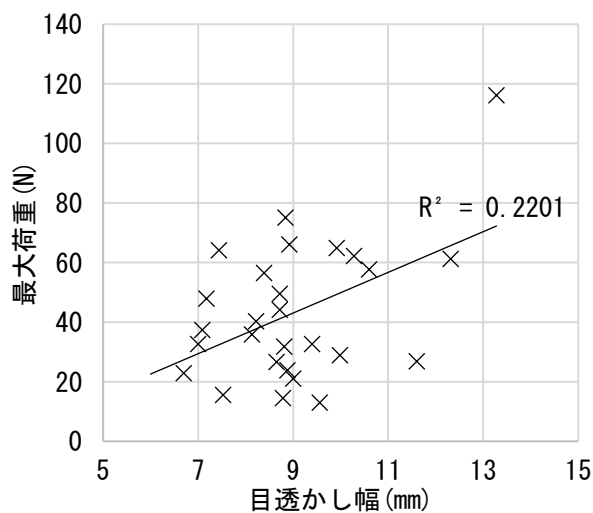


図 5-14 AMS-1 の付着無し・破断型の最大荷重

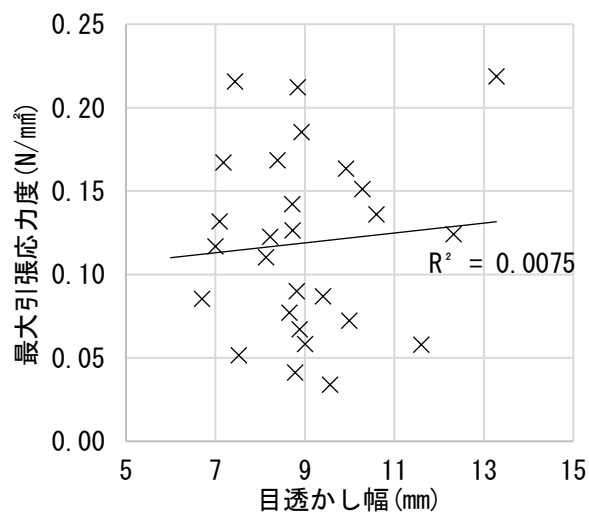


図 5-15 AMS-1 の付着無し・破断型の最大応力度

### 5.5 木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の算定（実験 5-2-2）

AMS-1（実験 5-2-2）の結果から、第4章・表 4-1 に示す木摺り下地と漆喰間における外力抵抗要素の各最大応力度を考察する。基本的な考え方は 4.7.3 と同様とし、最大応力度はその基となる実験条件や破壊モードによる測定値を組み合わせ求めてきた。その際、各破壊モードに関連する抵抗要素（表 5-12）は全て最大応力をとっていることを前提とした。また本試験でもばらつきを考慮し、分散の加法性を用いて標準偏差も含めた判断とした。

#### 5.5.1 目透かし部漆喰の最大引張応力度( $R_1\sigma_{\max}$ )

図 5-16 に  $R_1\sigma_{\max}$  の評価結果を示す。AMS-1 の荷重値から付着無し・破断型を抽出し、目透かし断面積（引張試験部 1 ピース幅 40mm×目透かし幅実測値）で除した値を  $R_1\sigma_{\max}$  とした。また、第4章の要素試験体の結果から求めた値も併載した。AMS-1 と要素試験体 60°は近い水準となり、経年した部材と新規作製した部材との間で再現性が確認できた。これは、歴史的建築物等の経年した材料を破壊することなく、当初材を模擬した新規材によって耐力評価ができる可能性を示唆するものである。ただし、実試験体の材齢や使用材料、施工環境、使用環境の条件が新規材と明らかに違う中で、大きな乖離が生じない部分にかえて疑問点が残し、漆喰材料の強度増進が限定的であったり、強度増進しながらも経年劣化によって相殺されたりする可能性があるため、新規に作製した漆喰の力学的特性を長期的に追跡してゆく必要があると考える。

#### 5.5.2 小幅板下面と漆喰の最大引張付着応力度 ( $R_2\sigma_{\max}$ )

図 5-17 に  $R_2\sigma_{\max}$  の評価結果を示す。AMS-1 の荷重値において、「付着無し・破断型」と「付着あり・破断型」の差は  $R_2$  の作用によるものと解釈する。付着あり条件において  $R_2$  が作用した面積は、引張試験部 1 ピース (40×40mm) から目透かし断面積を差し引いた小幅板部分全面とした。図 5-17 には第4章の要素試験体の結果から求めた値も併載しているが、それよりも小さな値となっており、 $R_1\sigma_{\max}$  の 7.6%程度に留まった。要素試験体よりも低くなった要因は経年の影響による疲労（地震動、温度変化）の蓄積や小幅板の痩せ等による部分があると考えられる。またばらつきに関しては分散の加法性から求めたため平均値よりも標準偏差が大きくなっており、ばらつきの大きさがわかる。なお、0N/mm<sup>2</sup>未満の数値は存在し得ないためグラフ上では切り捨てた。

ばらつきの大きさや、最大応力度の小ささを勘案すると  $R_2$  の効果には不確定性がある。そのため、第4章と同様に、木摺り漆喰天井の保有耐力評価等を行う際には  $R_2$  は作用しないものとして解釈したほうが安全側の判定ができると考える。

#### 5.5.3 漆喰塗り重ね部の引張付着 ( $R_6\sigma_{\max}$ )

図 5-18 に  $R_6\sigma_{\max}$  の評価結果を示す。AMS-1 では界面剥離型の破壊モードも全体の 30%程度で発生したため無視できない要素である。 $R_6\sigma_{\max}$  は界面剥離型を抽出して引張試験部 1 ピース面積 (40×40mm) で除算して求めることとし、付着の有無で要素分けした。応力度で評価すると小さいものの、作用面積が天井全面に及ぶことから、天井全体でみると妥当な値であると考えられる。また付着の有無で差異が生じている要因は、付着ありは塗り重ね面全体が抵抗しているのに対して、付着無しは木摺り下地との応力伝達が目透かし部に限定されるため、塗り重ね面の応力分布が目透かしを軸に山なりになったことにより、見かけ上の最大応力が小さくなったと可能性がある。AMS-1 の界面剥離はほとんどが中間層（下塗り～中塗りの間と考えられる）に伏せ込まれた棕櫚皮の寒冷紗の界面で発生している。面



内ひび割れの抑制を意図して伏せ込まれたものと考えられるが、塗り重ね方向の漆喰の付着をかえって阻害し肌別れを誘発している可能性は否定できない。ただし、先述したように AMS-1 では破断型の平均最大荷重とほぼ同等の水準であり、かつ AMS-3 では発生率が 5%程度なので、施工時の影響やディファレンシャルムーブメントによる疲労の蓄積はあれど、顕著に脆弱な部分ではないことを付言しておく。

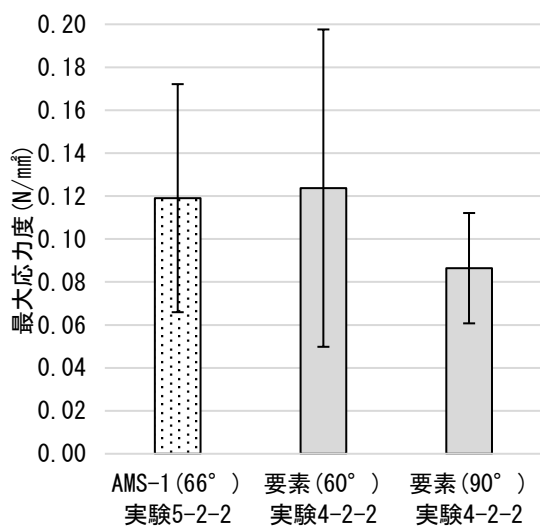


図 5-16  $R_1 \sigma_{\max}$  の評価結果

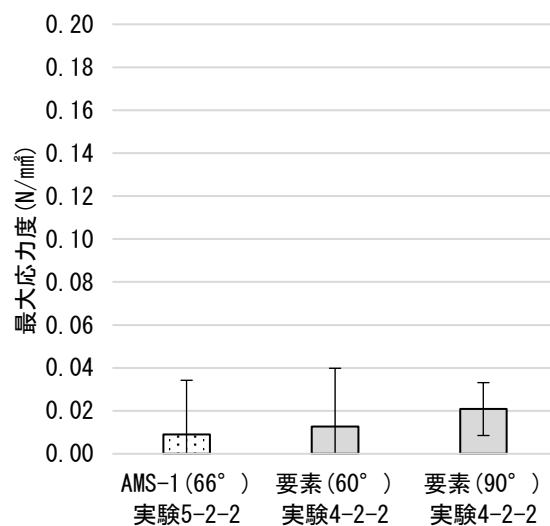


図 5-17  $R_2 \sigma_{\max}$  の評価結果

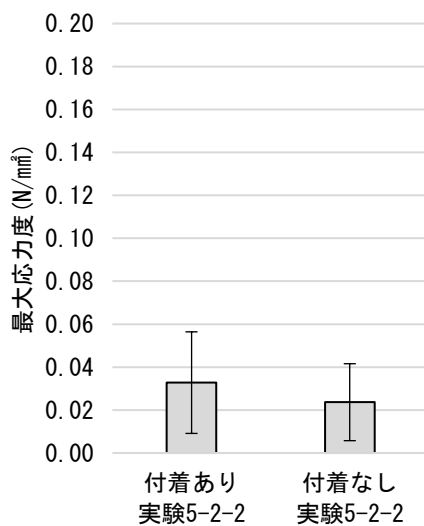


図 5-18  $R_6 \sigma_{\max}$  の評価結果

## 第5章のまとめ

筆者らは、建築物Nの木摺り漆喰天井（1930年代施工）の健全度評価、耐力診断のためのデータ取得を目的として、天井仕様の詳細調査と、改修工事時（本評価・診断とは関連のない別工事）に撤去・保管されていた「実試験体」の一部提供の機会に恵まれた。本章は、その調査・検証内容の中で当論文に関連する一部分を報告するものである。特定の建物を対象にした個別解にはなるが、木摺り漆喰天井における材料的観点に立脚した健全度評価に繋がる一連のプロセスを提案するべく、前章までの文献調査や要素試験体で得られた結果と比較することで、実際の天井部材の納まり、ならびに経年部材の物性などから関連性・再現性を確認し、以下の知見を得た。

- 1) 実試験体、および建築物Nの現地調査の結果、吊り天井下地の接合部仕様は多岐に渡っていたが、最も安全側の仕様を抽出しても第3章での文献調査で整理した仕様と同等以上の水準で施工されていた。顕著な差異は、(C)野縁受けと(D)野縁の接合部にボルト・ナット・ワッシャ（文献調査では、釘打ちや手違い錠）が用いられており、(D)野縁下端から(C)野縁受け上端に貫通する形態でボルトが締結されていた。また(D)野縁下端のボルト頭と小幅板は干渉を避けるため、ボルト頭とワッシャを埋め込むだけの座ぐりが(D)野縁に施されており、工数が掛かるが丁寧な構法が取られていたと考えられる。
- 2) 実試験体の調査の結果、木摺り漆喰部材で一般に用いられる「下げ苧」が、通常は小幅板に釘打ち固定であるところ、(E)木摺り下地の下部から目透かしへ差し込んで下地上端へ引掛ける形態がとられていた。一般に、下げ苧を打ち込むタイミングは下塗り漆喰塗布後とされていることから、釘打ちによる不用意な振動が未硬化の漆喰へ作用するのを避けるための納まりの可能性がある。
- 3) 実試験体、建築物Nの現地調査結果より、最も安全側の仕様（最も小さい断面、脆弱な接合部の組み合わせ）にて天井吊り下地の模擬試験体を作製し、各部材の接合部の強度試験（面内・面外方向）を行った。接合部の破壊性状について、蟻掛け+釘の部位（A-B, B-C）では男木の支圧変形と釘の引抜けが主体で、一部に女木の割裂があるが、釘の折損は各接合部・加力方向問わず認められなかった。渡り腮+ボルト(C-D)の接合部では、水平加力時にホゾ部や座金のめり込みやボルトの曲がり为主で、鉛直加力時にはボルト破断が発生した。破断時は使用ボルトの最小引張破断荷重を超える荷重を記録したので、ボルト耐力に支配された格好となった。
- 4) 模擬試験体の荷重・変形関係について、釘を用いた接合部（A-B, B-C, D-E）では最大荷重後の耐力低下は比較的緩やかであったため、脆性的な破壊は生じにくいと考えられる。ボルトを用いた試験体(C-D)は最大荷重が大きい傾向がある一方で、経年による木材の痩せ・ボルトの緩みや伸びによって渡り腮の嵌合度が落ちると、地震時に意図しないせん断応力がボルトに生じてボルト耐力を下回る荷重で破壊に至る可能性がある。

- 5) 建築物 N から採取した実試験体を用いて、木摺りと漆喰の付着力を測るための引張試験を行い、経年した部材である実試験体と新規作製材である第4章・要素試験体との間で物性を比較した。その結果、平均最大荷重・目透かし部漆喰の引張応力度・木摺りと漆喰界面の引張付着応力度は、実試験体と要素試験体で顕著な差異は認められず、再現性が確認できた。以上より、歴史的価値を帯びた建築部材に対しても、直接的な強度試験を行うことなく新規作製試験体によって強度推定が行えることが期待できる。ただし、実試験体の材齢を勘案すると漆喰の強度増進が限定的である見方や、経年劣化と相殺した結果とみることもできるため、この部分は引続き検討を行う必要がある。
- 6) 目透かし幅にばらつきがある実試験体の特性を用いて、目透かし幅と漆喰付着物性の関係性を評価した結果、目透かし部漆喰の引張応力度は目透かし幅による変動はなく、最大荷重は目透かし幅との相関関係が認められた。以上より、本試験での目透かし幅の範囲内ではスケール効果が発生していないため、断面積と強度の関係を示す一般論が適用できることがわかった。
- 7) 付着試験を行った実試験体2体のうち1体(AMS-1)では、界面剥離型の破壊モード発生率が約30%であり、破断型の約50%の次に多かった。最大荷重でみると両者はほぼ同等の水準であり、目透かし幅約9mmを境界に分布が切り替わっていた(9mmを超えると界面剥離型が増える)。目透かし幅が大きいほど界面剥離型の方へ誘導でき、安全側(剥落物の質量が減る)との解釈もできる一方で、施工時に漆喰が垂下しやすくなる懸念もあり、最も脆性的な破壊モードである抜け型の発生にも繋がる可能性がある。そのため、破壊モードの分水嶺である9mmは施工性と材料強度の側面で見るとバランスが取れた仕様であるといえ、第3章で示した実物件の目透かし平均9.07mmとの共通点を見出すことができ、経験則によって策定された目透かし幅に定量的な一考察を加えることができたといえる。
- 8) 実試験体による強度試験の結果から求めた木摺り下地と漆喰の引張付着応力度は、目透かし部漆喰引張応力度の約7.6%にとどまり、かつばらつきが非常に大きかった。要素試験体の引張付着応力度よりも小さく、経年による疲労(地震動、温度変化)の蓄積や小幅板の痩せ等による影響があると考えられる。以上より、応力度の小ささやばらつきの大きさから不確実性が高いため、木摺り漆喰天井の保有耐力評価等を行う際には引張付着応力度は作用しないものとして解釈したほうが安全側の判定ができると考える。
- 9) 実試験体によって発生した界面剥離型は、そのほとんどが下塗り～中塗りの中間に伏せ込まれた寒冷紗(棕櫚皮)部分の界面剥離によるものであった。この寒冷紗は面内方向のひび割れの抑制を意図して伏せ込まれたものと考えられるが、塗り重ね方向の漆喰の付着をかえって阻害し肌別れを誘発している可能性が否定できない。ただし、平均最大荷重は破断型とほぼ同水準であり、かつ試験体(AMS-3)によっては発生率が約5%であったので、施工時の影響やディファレンシャルムーブメントによる疲労の蓄積はあれど、顕著に脆弱な部分ではないと考えられる。

第5章の参考文献

- [5-1] 日本建築協会：左官工法指針，日本建築協会，大阪，1956
- [5-2] 小原二郎：木材の老化（建築古材について），材料試験，第10巻，第98号，pp. 894-899, 1961
- [5-3] 横山操：木材の経年変化 歴史的建造物由来ヒノキ古材を用いた検討，マテリアルライフ学会誌，27巻，2号，pp.39-45, 2015
- [5-4] 竹内勝正，手代凌一，高橋教司，大内道男，腐食釘の保持力に関する研究，工芸研究 産業工芸試験所報告 No.21，pp.35-39, 1959



## 第6章 実在する建築物から採取した 木摺り漆喰吊り天井に対する非破壊試験による力学的健全度評価

6.1 第6章の概要 .....	143
6.2 天井裏からの撮影画像による各種画像解析（実験 6-1） .....	144
6.2.1 引掛り形状評価の位置づけ（実験 6-1） .....	144
6.2.2 画像解析対象の試験体（実験 6-1） .....	144
6.2.3 画像解析による評価項目（実験 6-1） .....	146
(1)目透かし開口率 GR .....	146
(2)引掛り率 AR .....	147
(3)平均引掛り幅 AAW .....	147
(4)開花率 BR .....	147
6.2.4 画像解析による評価結果と考察（実験 6-1） .....	148
(1)実試験体ごとに見た各評価値 .....	148
(2)目透かし幅ごとの食い込み漆喰の開き量 .....	150
(2.1)評価方法 .....	150
(2.2)評価結果 .....	151
6.3 天井仕上面からの打撃試験による健全度評価（実験 6-2 シリーズ） .....	152
6.3.1 打撃試験の目的とその課題 .....	152
6.3.2 打撃試験の方法と考え方 .....	153
6.3.3 漆喰の浮きと HLD 値の相関関係の検証（実験 6-2-1） .....	154
(1)打撃試験体(付着)概要 .....	154
(2)試験方法 .....	156
(3) LR 法による検証結果（実験 6-2-1） .....	157
6.3.4 漆喰の塗り厚による HLD 値への影響（実験 6-2-2） .....	162
(1)打撃試験体(塗厚)概要 .....	162
(2) LR 法による算定結果（実験 6-2-2） .....	163
6.3.5 各評価値のクラスタリングによる脆弱部判定方法の検討 .....	169
(1)検討の概要 .....	169
(2)クラスタリング法での算定方法 .....	169
(3)クラスタリング法での算定の結果 .....	172
6.3.6 実試験体に対する打撃試験による検証（実験 6-2-3 シリーズ） .....	175
(1)試験対象試験体（実験 6-2-3 共通） .....	175
(2)打撃試験の内容 .....	176
(2.1)表面塗装膜の有無による比較検討（実験 6-2-3-1） .....	176
(2.2)試験体全面の打撃による HLD 値分布把握（実験 6-2-3-2） .....	176
(3)表面塗装膜の有無による比較検討結果（実験 6-2-3-1） .....	177
(4)試験体全面の打撃による評価値分布把握結果（実験 6-2-3-2） .....	178
第6章のまとめ .....	181
第6章の参考文献 .....	183

## 6.1 第6章の概要

木摺り漆喰天井の既存部材における健全度診断では、当該部材の採取などを行い直接的に強度試験を行うことができれば理想であるが、部材自体にも歴史的価値が認められる場合や、外観上やコスト等の問題で困難となりやすいのは先に述べたとおりである。その解決策として模擬試験体等を用いた推測方法を前章までに検証してきており、新規材と経年材との間で一定の再現性を確認することができた。

本章では、既存部材の健全度評価手法の別のアプローチとして、調査対象建物の現地でも実施可能である手法を検討する。木摺り漆喰天井を現地で可能な限り簡便に評価することを考えると、外観や打診といった非破壊検査が挙げられる。外観の例では使用環境要因や外力要因が作用した「ひび割れの有無」や設計・施工要因が絡む「天井裏の施工状態」があり、打診では、反発度や反響音によって材料の空隙・肌別れなどといった外力要因を判別するものがある。非破壊試験の方法例、観測対象は先述以外にも多岐に渡るが、本研究では「引張付着の有無」「漆喰引掛りの状態」「目透かし幅とその数」が木摺り漆喰天井の耐力への影響度が比較的大きいことが判明しているため（第7章で詳述）、その両者の状態を画像解析と反発度（硬度）試験を用いた非破壊・微破壊評価によって確認することを目的とする。

表 6-1 に本章での検証内容を示す。非破壊・微破壊評価の方法は天井裏側からの画像解析、天井仕上面側からの打撃試験の 2 つに大別した。前者は漆喰の食い込み形状から発生しうる破壊モードを天井裏面の水平投影画像から推測するもので、第 5 章で用いた実試験体を対象とした。後者は「漆喰の浮き」を劣化の指標とし、小さい打撃エネルギーで測定できるエコーチップ式の反発度試験機によって実試験体や新規作製の試験体を対象に打撃を行い、天井面の測定値分布の差異から漆喰の劣化状態を相対的に拾い上げるものである。

表 6-1 第 6 章における検証内容

実験	使用試験体	実験内容
6-1	AMS-1～4	天井裏からの撮影画像による各種画像解析
6-2-1	打撃試験体(付着)	漆喰の浮きと打撃試験測定値の相関関係の検証
6-2-2	打撃試験体(塗厚)	漆喰の塗り厚と打撃試験測定値の相関関係の検証
6-2-3	AMS-4	実試験体への打撃試験による漆喰状態の評価

## 6.2 天井裏からの撮影画像による各種画像解析（実験 6-1）

### 6.2.1 引掛り形状評価の位置づけ（実験 6-1）

漆喰引掛り状態を天井裏側からの撮影画像によって判断することで、主に施工要因に起因する性質と、蓄積された経年変化（下地、漆喰の収縮、劣化など）から部材の健全度を推し量るものである。前章までに、漆喰の調合別強度試験によって繊維の架橋効果による靱性の傾向が読み取れ、その特性を発揮できるものが破壊モード「破断型」であり、木摺り・漆喰界面の付着強度試験ではほかの破壊モードよりも最大荷重は大きく安定度が高いことを示した。またテーパー断面の木摺り下地においては破断型の発生頻度が最も高く、かつ食い込み深さの影響を受けにくくなることもわかった。これは、テーパー断面の木摺り下地において目透かし部に食い込んだ漆喰が扇状に開いて硬化するため、引掛りさえ形成されれば食い込み深さに強く依存することなく抜けにくくなることを意味する。他方、矩形断面の木摺り下地の場合、引掛りを形成させるために小幅板の厚さ以上に漆喰を食い込ませることが必要となるが、漆喰の練り具合によっては水平方向へ開かず尖塔状に硬化したり、硬化前に下方へ垂下したりする可能性があり、鉛直方向の外力に十分抵抗しうる簾合形状にならない可能性がある。つまり、漆喰の食い込み深さだけではなく、開き量が木摺り下地と漆喰の嵌合に強く影響し、評価対象部材の剥落抵抗性を推測するうえで重要といえる。

その意味で、漆喰の引掛り状態を把握することで、漆喰が剥離・剥落する際の破壊モードの推測や、損傷を起こしやすい部位を推測し、把握できることが期待される。本節ではその評価方法と評価結果について報告する。

### 6.2.2 画像解析対象の試験体（実験 6-1）

写真 6-1 に画像解析に用いた試験体を示す。対象の試験体は第 5 章で示した実試験体 AMS-1～4 であり、強度試験前の実測調査（5.2.2）でスケールと共に撮影した画像を用い、実際の天井部材と仮定して赤枠で囲んだ領域を評価した。写真 6-1 に示すように天井裏側（木摺り下地が見える位置）直上からの撮影画像を用いて評価するが、基本的に撮影画像は中心投影となり画角の外周部は倒れ込みが発生して解析精度が落ちるため、フトコロ寸法の許す限り下地面から離れた高さでカメラを構えるか、距離を取れない場合は評価領域が画角中心部に近く位置するようにして撮影した。いずれの場合も対象領域をトリミングするが、1Mpixel 程度の解像度を有していれば問題なく解析ができた。なお、本試験の撮影では下地面から約 1500mm の位置にカメラを据えた。

なお、評価対象領域内の吊り下地などによる見え隠れ部分は、以下の如く取り扱う。

野縁等（目透かし・小幅板との直交材）：見え隠れ部分は該当する目透かし・小幅板の見え掛かり部分の寸法から補完する。

野縁受け等（       〃       との平行材）：領域内全長に渡って目透かし・小幅板の寸法が視認不可能な場合は算定から除く。

目透かしに挿入された下げ苧部分：下げ苧の繊維によって漆喰の引掛り形成が阻害されており異なる振る舞いをするため、算定から除く。





写真 6-1 画像解析に用いた試験体（評価対象：赤枠内）

### 6.2.3 画像解析による評価項目（実験 6-1）

図 6-1 に各評価に用いる解析領域の考え方を示す。それらを利用して以下の項目を算定する。

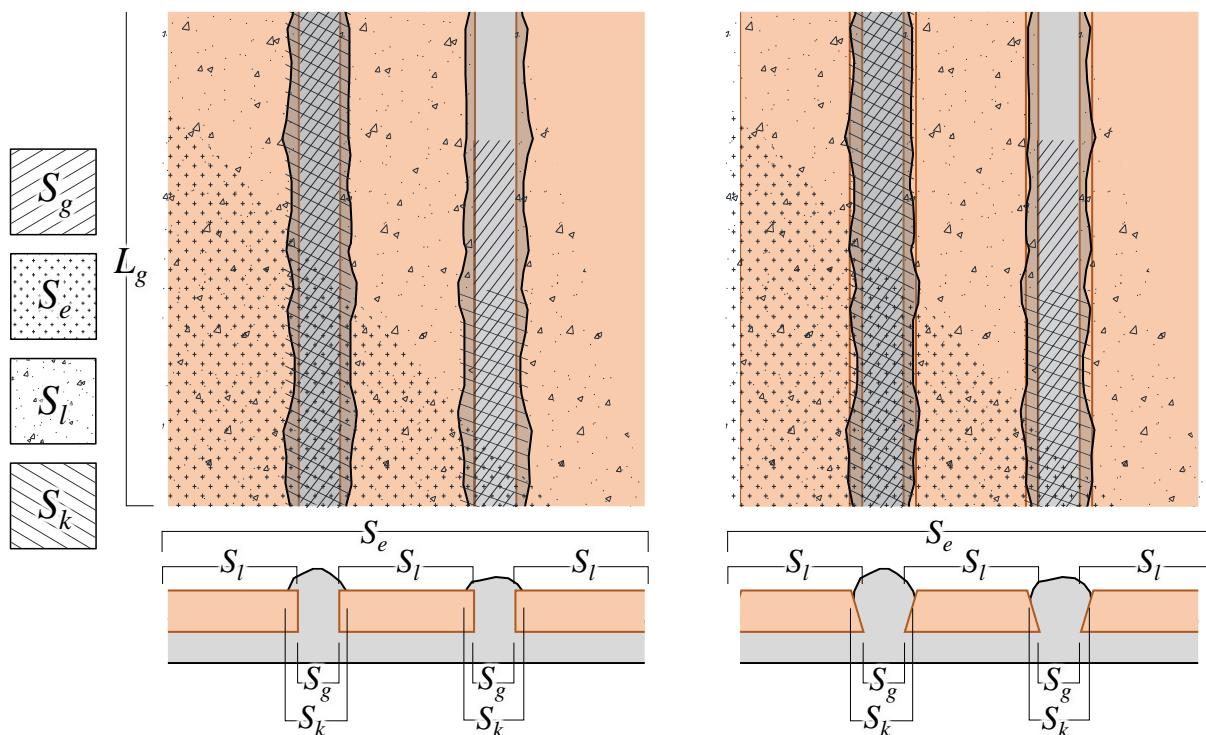


図 6-1 各評価に用いる解析領域の考え方（矩形断面、テーパ断面）

#### (1) 目透かし開口率 GR

前章までの実験結果より、漆喰部分の自重は目透かし部の引掛りを介して木摺り下地に伝達される。故に天井の単位面積あたりの目透かし量は、漆喰引掛りが十分に作用すると仮定した場合の漆喰食い込み部に発生する耐力を推定するうえでの指標となる。ここでは評価対象水平投影面積  $S_e$  に対する目透かし開口面積  $S_g$  を「目透かし開口率 (GR)」とし、式(6-1)で評価した。

$$GR(\%) = \frac{\sum S_g}{\sum S_e} \times 100 \quad (6-1)$$

ここに、 $S_g$ ：評価対象領域の目透かし水平投影面積（ $\text{mm}^2$ ）

$S_e$ ：天井部材の評価対象水平投影面積（ $\text{mm}^2$ ）

## (2) 引掛り率 AR

漆喰の引掛りの程度は、破壊モードに影響を及ぼし、ひいては部材の安全性へも関連する。目透かしに食い込んだ漆喰が、目透かし幅に対してどれだけ面内方向に開いているか、つまり小幅板の上部に漆喰がどれだけ存在しているか算定することで、引掛り量を評価するものである。ここでは、天井裏面を水平投影した場合に視認できる漆喰食い込み部分の面積  $S_k$  から目透かし面積  $S_g$  を差引いたものを、目透かし幅を超えて面内方向に広がった引掛り領域とし、その小幅板面積  $S_l$  に対する比を「引掛り率(AR)」とし、式(6-2)で評価した。

$$AR(\%) = (\sum S_k - \sum S_g) / \sum S_l \times 100 \quad (6-2)$$

ここに、 $S_k$ ：評価対象領域の漆喰食い込み水平投影面積 (mm<sup>2</sup>)

$S_l$ ：評価対象領域の小幅板水平投影面積 (mm<sup>2</sup>)

## (3) 平均引掛り幅 AAW

漆喰引掛り部分における小幅板幅方向への平均的な広がり程度を物理量で示したものである。引掛り領域 ( $S_k - S_g$ ) を評価対象領域の目透かし1列の長さ  $L_g$  で除した値を「平均引掛り幅 AAW」とし式(6-3)で評価した。なお、漆喰の引掛りは目透かしを軸に両側へ開いていると仮定し、その片側の引掛り幅を示したものである。

$$AAW(\text{mm}) = (\sum S_k - \sum S_g) / 2 \times L_g \times n \quad (6-3)$$

ここに、 $L_g$ ：評価対象領域の目透かし1列の長さ (mm)

$n$ ：評価対象領域の目透かし列数

## (4) 開花率 BR

漆喰が小幅板上面で開く量は、目透かし幅（目透かしを通過する漆喰のボリューム）にも影響し、それが引掛り量にも影響すると考えられる。ここでは、目透かし面積  $S_g$  に対する食い込み面積  $S_k$  の比を「開花率 BR」として式(6-4)で評価した。

$$BR(\%) = \sum S_k / \sum S_g \quad (6-4)$$

#### 6.2.4 画像解析による評価結果と考察（実験 6-1）

##### (1) 実試験体ごとに見た各評価値

図 6-2 に画像解析による各評価結果を示す。GR は第 5 章・表 5-2 で示した小幅板幅、目透かし幅と関連付けることができ、小幅板底辺幅がほぼ同等ならば、目透かし幅と連動して GR も変化することとなる。今回の結果では AMS-4 が最も小さい 12% となっており、ほかの 3 体と比較して小幅板幅に顕著に差が無く目透かし幅も狭かったため、耐力評価をするうえで実試験体 4 体の中で最も安全側の条件を持つ。AMS-4 はほかの 3 体と比較して有意に仕様が異なっており、単純な施工誤差と結論付けられない程度の有意差となっていた。同一建物内でも施工仕様が異なっていたか、施工者の違いによるノウハウの差異なのかは不明である。本研究では AMS-4 の下地仕様を実試験体の中で最も安全側の条件として扱い、実試験体の仕様をモデルとした許容耐力推定や振動試験を行った(第 7、8 章で報告)。

AR は全ての試験体において 10% 以上と、漆喰の食い込み部分が目透かし幅よりも広がっていることを示しており、テーパ断面の木摺り下地を有する部材の特性を示しているといえる。それに関連して AAW で引掛け幅の物理量をみると、目透かしと直交方向で片側へ少なくとも約 2mm 開いていることがわかった。ここでも AMS-4 は引掛け量が少なく、目透かし幅が狭いことによる漆喰のボリュームの少なさが開き量にも影響を受けている可能性がある。ただし AMS-1, 2 との差は約 0.5mm であり、第 5 章での AMS-1 の引張試験において抜け型の破壊モードは全体の 10% 以下の水準であったことから、AMS-4 もそれに近い破壊形態になるものと推察される。AMS-3 は 4 試験体で最も大きい 3.3mm で、先述の引張試験結果では AMS-1 よりも抜け型の発生率がわずかに低い要因をここに求めることができる。

BR は AMS-4 が最も大きい結果となっており、ほかの 3 体と比較して目透かし幅が半分程度でありながらも引掛け量には顕著な差が生じていないことが要因と考えられ、目透かし幅が狭いとそこを通過する漆喰のボリュームは小さくなれども面内方向への開き方は大きく変わらない可能性がある。

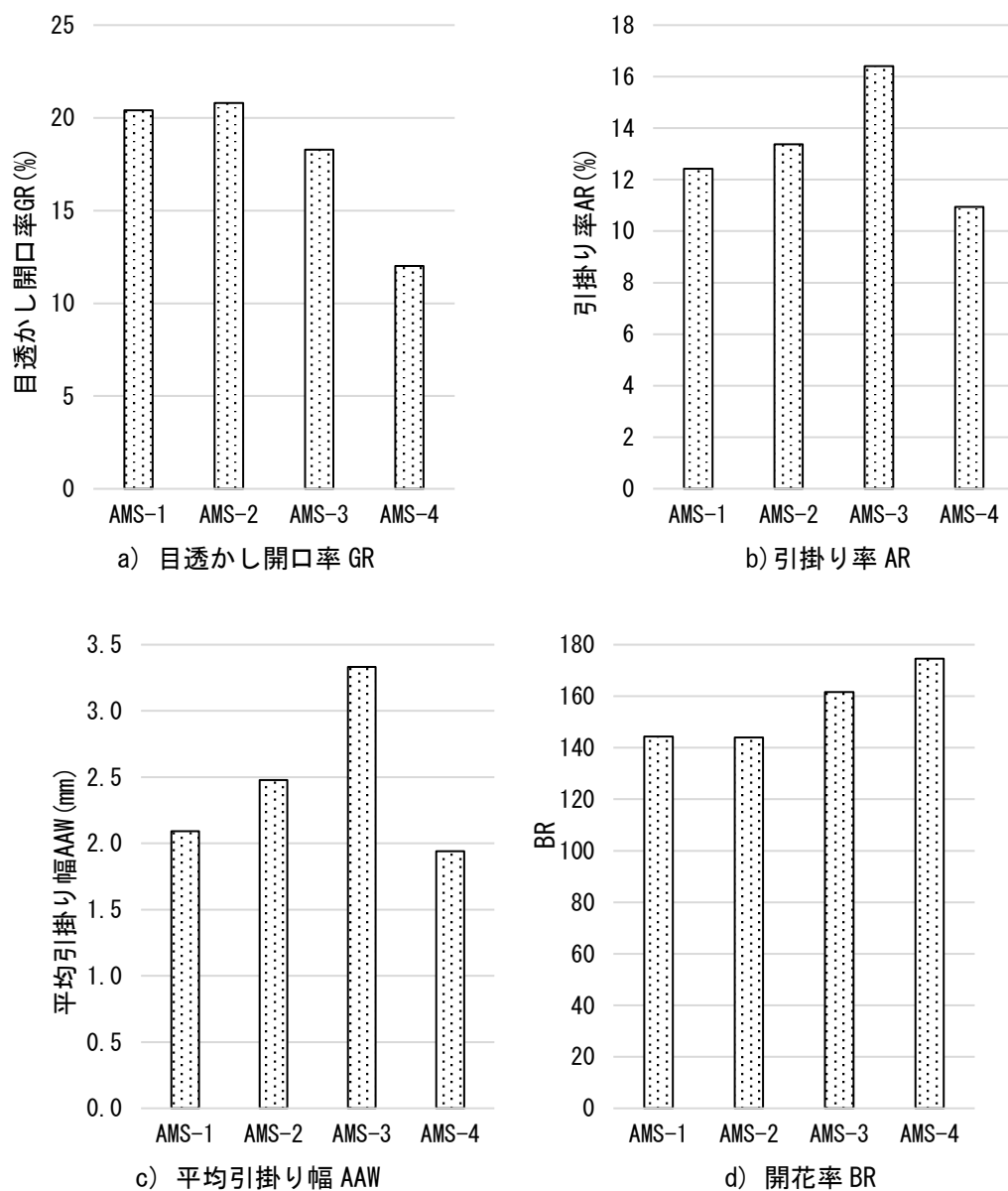


図 6-2 画像解析による各評価結果（実験 6-1）



## (2) 目透かし幅ごとの食い込み漆喰の開き量

### (2.1) 評価方法

BRの結果において目透かし幅と漆喰の開き方には相関が低い可能性がみられた。それを詳細に確認するため、図6-3に示すようにAMS-1の野縁を挟んだ片翼の目透かし長さ方向に10mm刻みとなるようなメッシュを画像上に重ね合わせて、1セルごとに引掛り部分の水平投影面積 ( $S_k - S_g$ ) とBRを算定し当該セルの目透かし幅との関連を検証した。

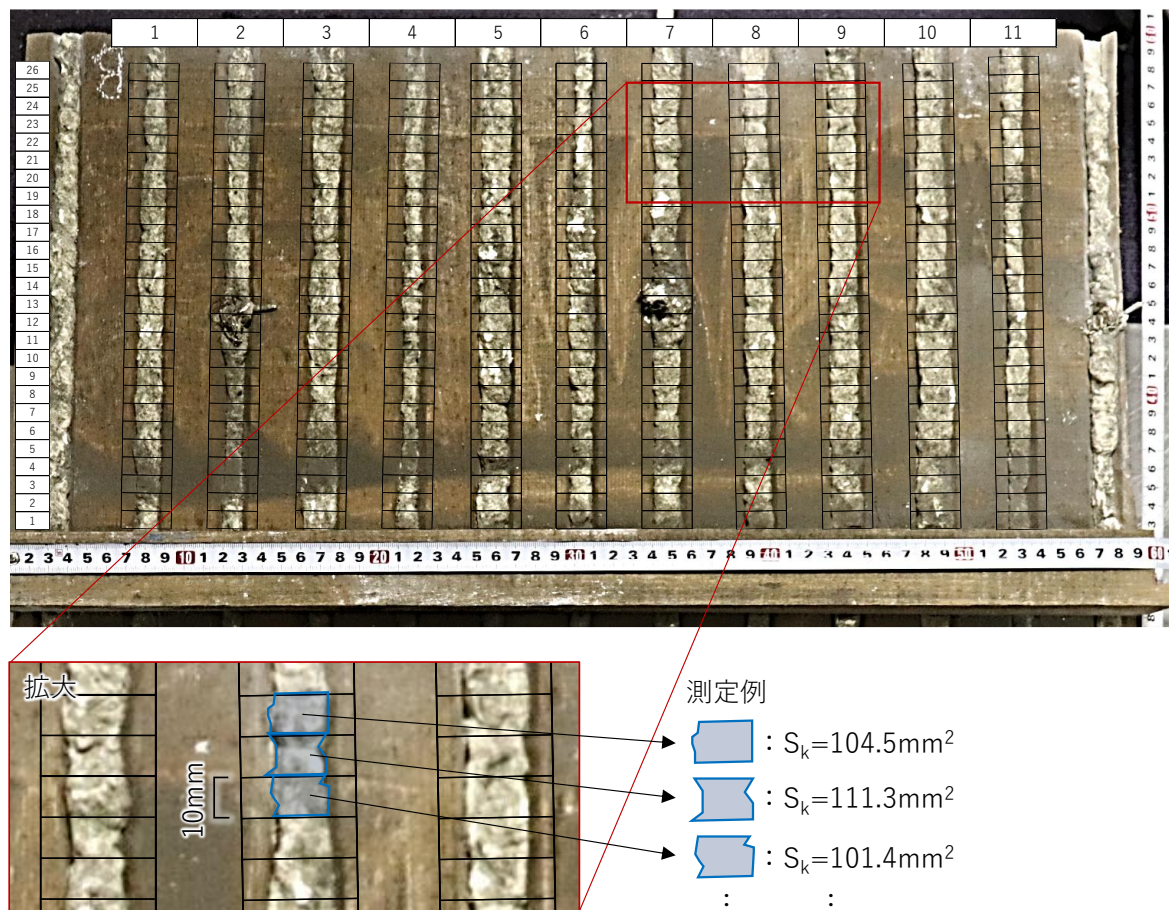


図6-3 メッシュの重ね合わせと食い込み面積算定のイメージ (AMS-1 片翼)

## (2.2) 評価結果

図 6-4 に目透かし幅ごとの食い込み漆喰の開き量の評価結果を示す。目透かし幅と平均引掛り幅（開き方）に目立った相関は認められず、図 6-2 c) d) の結果と調和的であった。AAW では 0mm 以下、BR では 100% 以下（共に縦軸の値）の領域にあるプロットは、その対象セルに引掛りが存在しないことを示している。どの目透かし幅であっても引掛り量のばらつきが大きく、職人の鍔圧や滑らせ方、鍔に乗っていた漆喰の量などにも影響を受けることが推察される。なお、漆喰の開き方に目透かし幅との関連が薄い分、BR の計算式上では目透かし幅が小さくなれば評価値が大きくなるため、見かけ上で危険側の判定となってしまう可能性があり、この考え方の妥当性については広く批判と教示を仰ぎたい。

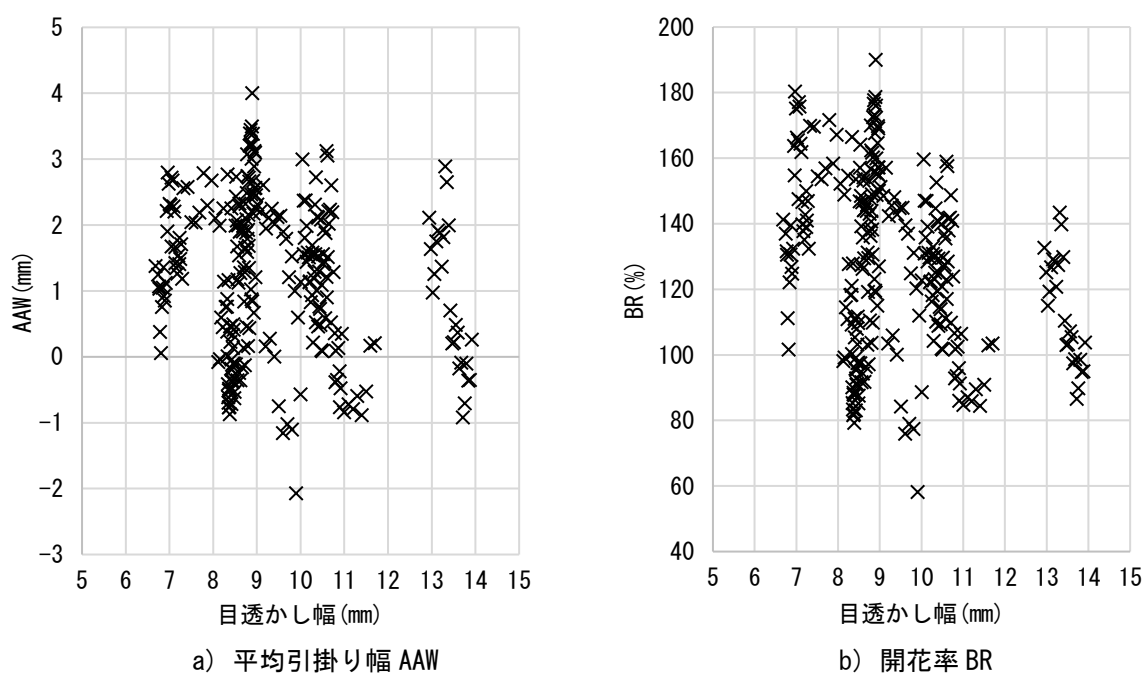


図 6-4 目透かし幅ごとの食い込み漆喰の開き量の評価結果（AMS-1）


### 6.3 天井仕上面からの打撃試験による健全度評価（実験 6-2 シリーズ）

#### 6.3.1 打撃試験の目的とその課題

左官工法は塗り重ねによって構成されるため、剥離の起点となりうる界面が下地と塗り材、および塗り材同士など複数存在する。木摺り漆喰天井の破損事例は漆喰層の剥離によるものが多い[前掲 1-10, 2-5～8, 21]ため、木摺りと漆喰の界面の肌別れや浮きを劣化の尺度として評価することで、剥離・剥落に繋がるような部分（以下、潜在脆弱部）を推測できることが期待できる。一方で、そのような部位はひび割れなどを伴って顕在化するまで外観上ではわかりにくいことに加えて、ひび割れ自体が剥落の起点になることもある。一般建築においても、仕上げモルタルやタイルなどの剥離部分の診断ではテストハンマーによる打音診断や赤外線調査などを行う場合があるが、前者は作業者の熟練度や周辺環境に影響を受けやすいことや定量化しにくいことが課題であり、後者は表面温度に差が生じにくい部分では適用できないため、内装材には不向きである。

そこで筆者は、漆喰部材の潜在脆弱部を非破壊で判定するものとして反発度試験機を用いた方法を検討し、浮き・空隙などを有する部分を打撃するとその幾分かのエネルギーが材料の変形に消費されることによって、健全部と比較して反発度が低く返されるという仮説を立てた。建築物で利用される反発度試験機ではコンクリート用のシュミットハンマーがその代表例として挙げられるが、打撃時のエネルギーが大きく、塗り厚 15mm 程度の漆喰仕上材では材料側が損傷する可能性が高いため、表 6-2 に示すエコーチップ式硬さ試験機（以下、エコーチップ）の適用性を検討した。エコーチップも反発度試験機の一つで元来金属材料の非破壊試験用としてリープ硬さを測定するものであり、先述のシュミットハンマーと比較して打撃力は約 1/190 と、測定対象の低強度側の許容範囲が広く、漆喰系材料との適合性が高いことが期待できる。装置の大きさはコンパクトなものが多く、操作も容易であり検査員による測定誤差が小さく、近年はコンクリート系材料にも試用が行われている一方で、打撃力が小さい故に測定値へ反映される試験体深さ方向の物性は、コンクリートの場合で数 mm 程度といわれている[6-1]。そのため試験体を損傷させないことと、測定範囲（深さ）が狭いことがトレードオフの関係にあるのが現状であり、漆喰系材料における実用性を評価する必要がある。以上の背景により本節からは、漆喰系仕上材の諸特性把握におけるエコーチップの適用性について検証した結果を報告する。

表 6-2 エコーチップ式硬さ試験機の仕様

試験機名	PROCEQ S.A. Equotip Bambino 2 Type D （インパクトデバイス・表示部分一体型）	
試験機寸法	L148×W44×T20mm	
試験機質量	142g	
打撃エネルギー	11.5Nmm	
インパクトボディ質量	5.5g	
テストチップ径	φ3mm	
打撃方向による補正	自動認識・補正	



### 6.3.2 打撃試験の方法と考え方

エコーチップは、インパクトデバイス内部先端部分のテストチップを試験体表面に打ち付ける際の打撃速度と反発速度の比が式(6-5)で定義されており、リープ硬さ（以下、HL 値）として示すものである。またインパクトデバイスの打撃部形状・寸法は試験体の質量・測定箇所によって使い分けるが、本研究では標準（汎用）的な D 型を用いた。D 型のインパクトデバイスによる HL 値は一般に HLD 値と呼ばれるため、本稿もそれに倣って、該当する部分は HLD 値と呼称する。

測定は打撃 1 回ごとに測定点を移動させる（以下、単打法）方法が一般的であるが、岩石状態評価の研究分野では、測定点 1 点に対して移動させずに複数回連続して打撃する方法（以下、連打法）が提案されている[6-2～4]。連打法による HL 値は、同一点で打撃を重ねることによって表層がわずかに圧密され、単打法よりも HL 値が一定量上昇してから収束する傾向があり、その測定値の範囲ならびにそれに達する打撃回数は材料によって異なり、単打・連打の HL 値はそれぞれ異なる物性を拾っている可能性が指摘されている。また、コンクリートの反発度と異なり、エコーチップで得られた測定値と漆喰強度との相関関係について、科学的または統計的な手段を用いて説明できる程の知見が得られていないのが現状である。

以上を踏まえて本研究の測定方法は、HLD 値が大きい（反発度が大きい）ほど打撃部分の材料が固く締まっている（エネルギーが逃げない）という考え方を前提としたうえで、ある測定点周辺と比較した場合の相対評価によって当該部分の健全度状態を推測することとし、対象部材全面をメッシュ状に打診した際の HLD 値の面的分布によって判断した。

測定にあたっては単打法・連打法の考え方にならうこととし、連続打撃回数 10 回以上を基本に、単打法に相当する 1 打目の値（以下、 $L_s$ ）から、連打法の収束値（以下、 $L_c$ ）までの挙動を確認した。なお  $L_c$  は測定点 1 点で連打して得た HLD 値の上位 3 つの平均値として計算した。加えて、 $L_s$  に対する  $L_c$  の比を打点の圧密度と考えてここでは LR と定義し、式(6-6)で求めた。LR が大きいほど、打点部の材料は複数回の打撃によって圧密された（硬度が高まった）と解釈できる。つまり圧密にエネルギーを割かれている、空隙などの逃げ場がない状態を示していると考えられ、LR の大小によって潜在脆弱部を間接的に確認できると仮説を立てた。

$$HL = v/v_0 \times 1000 \quad (6-5)$$

ここに、 $v$ ：インパクトボディの反発速度

$v_0$ ：インパクトボディの打撃速度

$$LR = L_c/L_s \quad (6-6)$$

ここに、 $L_c$ ：収束 HLD 値（測定点 1 点で連打して得た HLD 値の上位 3 つの平均）

$L_s$ ：1 打目の HLD 値（単打法の測定値に相当）

### 6.3.3 漆喰の浮きと HLD 値の相関関係の検証（実験 6-2-1）

#### (1) 打撃試験体(付着)概要

表 6-3 に使用材料と調合、表 6-4 に要因と水準（実験 6-2-1）、写真 6-2 に打撃試験体の状態を示す。漆喰の使用材料と調合は第 4 章・実験 4-1 の下塗りと共通仕様で、木摺り下地と漆喰の剥離・浮きの状態を意図的に制御して潜在脆弱部と見立てたうえで、HLD 値との関連性を評価した。打撃試験体(付着)は潜在脆弱部の有無に HLD 変動の要因を特化させるため、目透かしを省略した 200mm 角の板下地 6 体とし、4 体は素地のまま、残り 2 体には付着抑制条件として第 4 章・実験 4-2-2 と同仕様のフッ素樹脂テープを下地全面に貼り付けた。

漆喰塗り厚は全て 10mm とし、施工時には下地外縁部に塗り厚と同じ高さの側枠を取り付けてガイドとした。漆喰は異なる調合のものが積層されることが一般的であるが、今回は漆喰浮きの HLD 値による認識の基礎的検討を主目的としたため、下塗り調合の漆喰 3 層塗りで厚さを確保することとし、別の要因を排除した。養生は標準環境（20℃, 60%RH）で行い、施工後 4 週で全ての試験体の側枠を外した後、16 週まで保管した。付着抑制の試験体は、側枠撤去と同時に漆喰層ならびにテープを下地から一度剥がし、素地状態の下地の上に漆喰を戻して付着が完全に外れた状態で保管した。なお素地 4 体も、下地や漆喰の暴れによって一部で付着が外れることがあるが許容し、打撃試験前に小口面に視認できる浮きを計測した。

表 6-3 使用材料と調合（実験 6-2-1）

材料	記号	内容	調合（貝灰を 10 とした場合の 質量比、実験 4-1 下塗り相当）
貝灰	SL	有明産赤貝を原料にした左官用貝灰	10
石灰	L	俵灰（自然風化灰）	10
糊	SW	海藻糊（粉末つのもた）	1.2
砂（骨材）	S	鬼怒川産砂 細目	4.9
スサ	F	麻スサ	0.98
練り水	W	上水道水	21.6（目安）

表 6-4 要因と水準（実験 6-2-1）

要因	水準	備考
下地寸法	200×200×側枠高 10mm（内寸）	小幅板と漆喰の付着に着目するため目透かしを省いた板下地とし、側枠を外周に設置した。
漆喰調合	基本・下塗調合（実験 4-1 と同仕様）	1 層 3mm 程度で水引き程度をみて塗り重ねた。
下地表面	素地（4/6 体） 番号：T-1～4	養生中の寸法変化等による剥離は許容し、測定時に確認した。
	付着抑制（2/6 体） 番号：N-1, 2	フッ素樹脂テープを下地表面へ貼り付けた。
塗り厚	10mm	側枠を塗り厚と同等の高さに設置してガイドを兼ねた。
養生環境	標準環境	20°C, 60%RH
打撃試験	向き：鉛直下向き 回数：連続 10 回 試験領域：5×5 マス(40×40mm/マス)	-



a) 塗下地（素地）



b) 漆喰施工後（側枠残存状態）



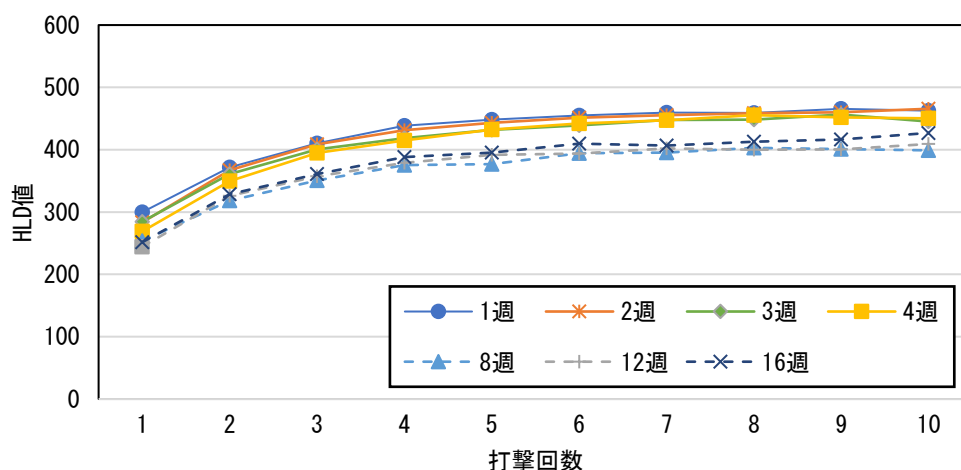
c) 側枠除去後、  
測定部附番・墨付け状態

写真 6-2 打撃試験体の状態

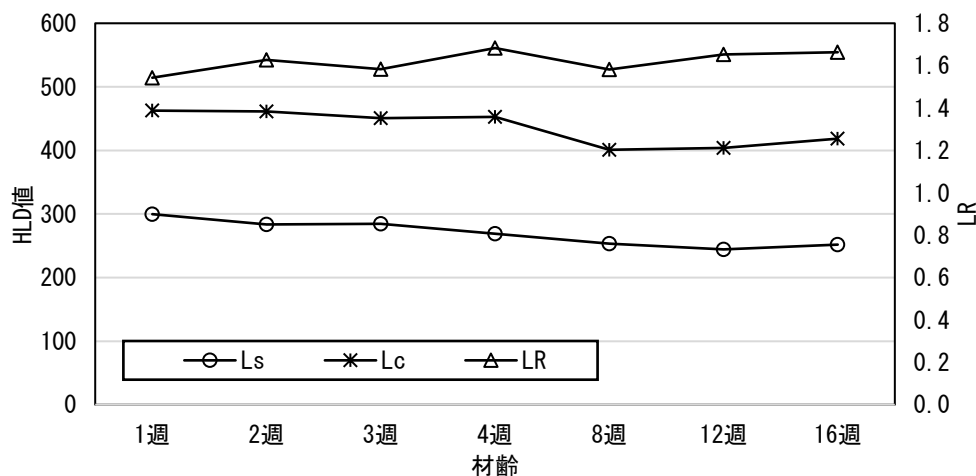
## (2) 試験方法

表 6-4 に実験 6-2-1 の要因と水準を示す。先述のとおり HLD 値を面的な分布で評価するため、写真 6-2 c) に示すように硬化後の打撃試験体(付着)を  $5 \times 5$  マス ( $40 \times 40\text{mm}$ /マス) に区分して墨付けを行い、打撃は各マスの中央部に近い場所で行うこととした。打撃回数は 10 回とし、漆喰仕上面を上向きにした状態でエコーチップを鉛直下向きに手で支持しながら同一の場所で打撃を繰り返した。今回用いた装置は打撃 1 回ごとに算定値が出力されるため、打撃ごとに記録を取って  $L_s$  と  $L_c$  を求めた。

材齢による HLD 値への影響を把握するため、実験 6-2-1 に係る検証を行う前に、漆喰施工後 16 週まで所定の材齢 (1, 2, 3, 4, 8, 12, 16 週) で浮きが確認されていない部分 (以下、健全部) の打撃を行なった。その結果を図 6-5 に示しており、4 週までは  $L_s \cdot L_c$  共に HLD 値が高く、8 週にわずかに低下、それ以降は安定傾向を示したため、打撃試験体(付着)を用いた検証は材齢 12 週の試験体で実施することとし、HLD 値に係る材齢の要因を抑制した。なお、材齢と強度 (硬度) に相関関係があるのは第 4 章・実験 4-1 で示したとおりで、コンクリートでは反発度と強度には統計的に相関が認められているのに対し、HLD 値では逆転現象が生じており、この要因については現時点で不明である。



a) 打撃回数ごとの HLD 実測値



b)  $L_s$  と  $L_c$  の関係

図 6-5 健全部における材齢と HLD 値の関係 (予備試験)

### (3) LR 法による検証結果（実験 6-2-1）

図 6-6 に試験体表面の各領域の附番を示す。先述のように打撃試験体は 25 マスに領域分けして HLD 値を管理しており、図 6-8～13 の a) に示す各グラフの凡例はその各マスの附番に帰属する HLD 値を意味している。また図 6-7 のカラーバーは打撃試験体(付着)全 6 体でそれぞれ算出した 3 つの評価値 (Ls, Lc, LR) の最小・最大値を基に、図 6-8～13 の b)～d) に示す各評価値の色分けを示している。

続いて図 6-14 に、図 6-8～13b)～d) における各打撃試験体(付着)25 データの平均値を示す。ここでは、「LR の大小は潜在脆弱部のエネルギー消費と関連があるため相対的に脆弱部が判別できる」の仮説のもと、LR による潜在脆弱部の判定を行うこととした。以下、当該判定方法を LR 法と呼称する。

打撃回数ごとの HLD 値より、素地（以下、T タイプ）と比較して付着抑制（以下、N タイプ）は HLD 値の上昇傾向が小さく、すなわち LR も小さいことが読み取れる。すなわち漆喰の圧密に必要な打撃エネルギーがほかの要因で消費されていることを示しており、漆喰の剥離による空隙部分があると打撃時に漆喰が振動・変形することによってエネルギー吸収が生じている仮説が支持される結果となった。これと同様の傾向が T タイプの一部でも認められており、特に T-1 の右翼が顕著である。仮説をさらに補強するものとして、図 6-15 に打撃試験体(付着)T シリーズ 4 体の小口部から視認できた漆喰浮き量と LR の関係を示す。マス内右下に記載の数字が浮き実測値となり、そこに T-1～4 の LR 分布を重ね合わせたところ、LR が小さい（青い）部分と浮きの部分が概ね一致した。T-1 右端部(マス番号：10・15・20)は浮きが確認できていないものの、5 と 25 での 3.0mm 浮きによる影響が内側にも伝播していると考えられる。また試験体の端部は浮きや変形が発生しやすい特異点であり、試験体内側と比べて HLD 値に差が出やすいとも考えられるが、端部・内側の差よりも、浮きの有無による HLD 値の際のほうが明確であるため、有意な結果であると判断できる。

以上より、塗り厚 10mm の漆喰においては、浮き・剥離の有無と HLD 値には相関関係があることがわかり、評価値の面的分布を相対評価にすることにより、潜在脆弱部を判定できる可能性が示せた。次節では、エコーチップによって評価可能な漆喰塗り厚の上限について分析を行う。

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

図 6-6 試験体表面の  
各領域の附番

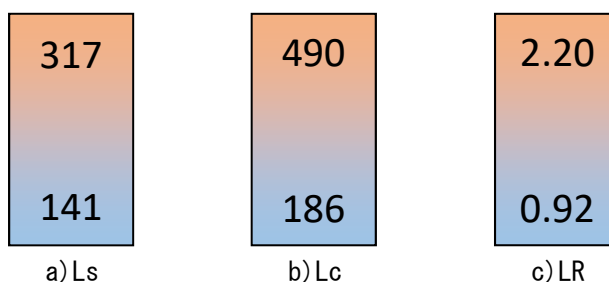
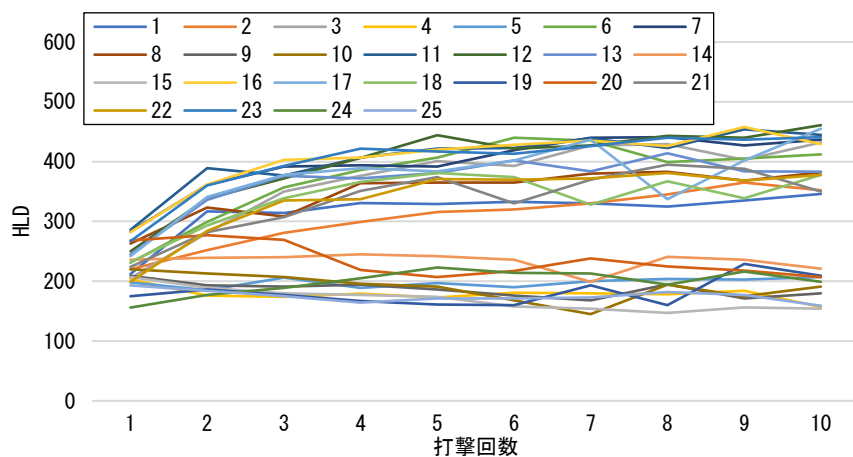


図 6-7 HLD 値の各評価値のカラーバー



a) 打撃回数ごとの HLD 値

212	220	205	203	198
231	283	263	209	220
286	250	245	236	207
282	242	232	175	268
224	199	267	156	193

b) Ls 分布

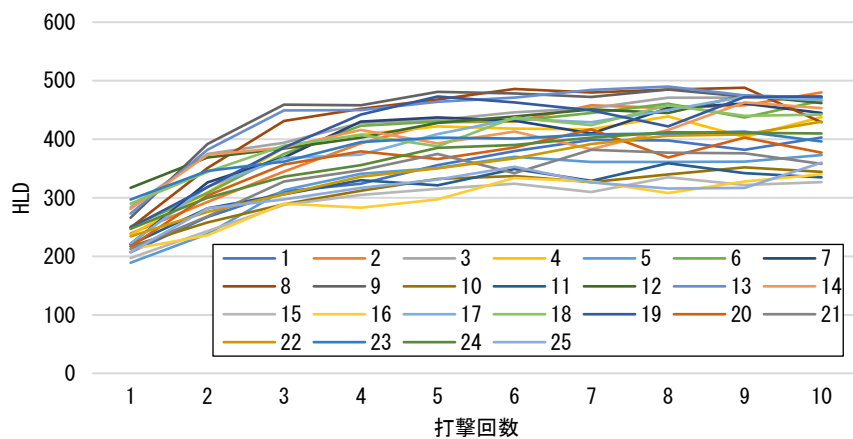
338	354	429	189	206
429	439	382	199	213
446	449	400	243	192
441	431	378	210	271
386	377	439	218	186

c) Lc 分布

1.59	1.61	2.09	0.93	1.04
1.86	1.55	1.45	0.95	0.97
1.56	1.80	1.63	1.03	0.93
1.56	1.78	1.63	1.20	1.01
1.72	1.89	1.65	1.40	0.97

d) LR 分布

図 6-8 T-1 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

207	239	284	237	189
251	221	249	266	217
220	317	273	281	197
212	222	290	249	217
213	234	297	247	207

b) Ls 分布

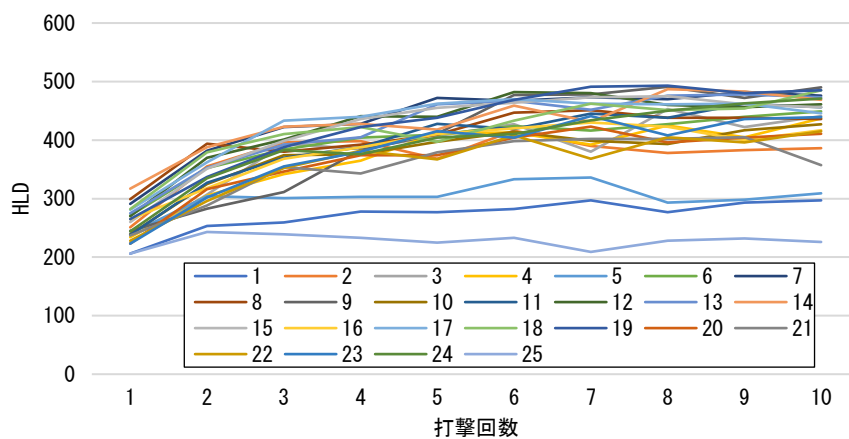
400	465	471	433	368
457	453	486	481	345
350	463	483	444	329
334	463	447	473	402
378	415	410	411	348

c) Lc 分布

1.93	1.95	1.66	1.83	1.95
1.82	2.05	1.95	1.81	1.59
1.59	1.46	1.77	1.58	1.67
1.58	2.09	1.54	1.90	1.85
1.78	1.77	1.38	1.66	1.68

d) LR 分布

図 6-9 T-2 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

206	251	224	234	240
271	291	299	245	239
238	270	275	317	260
265	281	282	265	223
237	228	223	244	206

b) Ls 分布

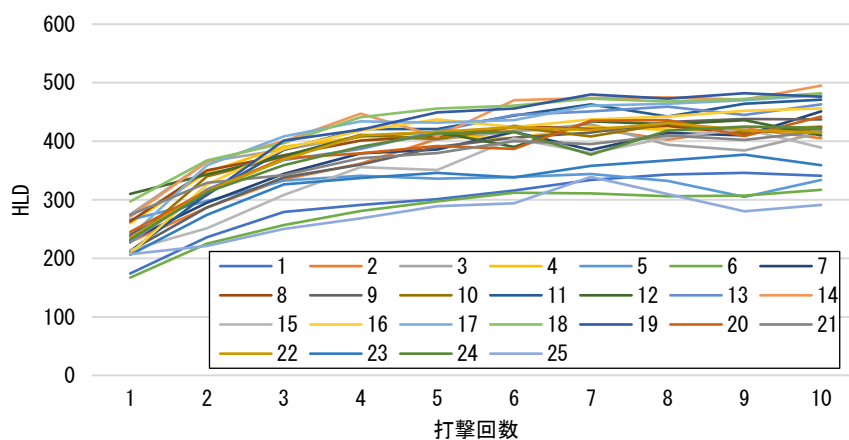
296	403	440	425	326
439	477	445	486	419
454	474	476	480	471
424	465	467	490	413
403	409	439	461	238

c) Lc 分布

1.44	1.61	1.97	1.82	1.36
1.62	1.64	1.49	1.99	1.75
1.91	1.76	1.73	1.51	1.81
1.60	1.65	1.66	1.85	1.85
1.70	1.80	1.97	1.89	1.16

d) LR 分布

図 6-10 T-3 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

174	228	275	260	266
167	231	263	213	227
212	310	228	271	214
208	237	297	240	245
274	236	206	232	207

b) Ls 分布

343	421	420	423	341
313	427	425	436	425
466	433	458	481	411
450	471	476	479	438
410	425	368	422	314

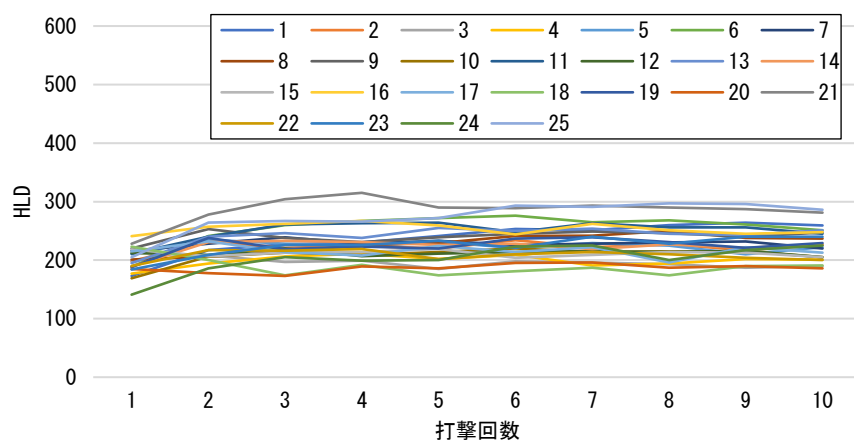
c) Lc 分布

1.97	1.85	1.53	1.63	1.28
1.88	1.85	1.62	2.05	1.87
2.20	1.40	2.01	1.78	1.92
2.16	1.99	1.60	2.00	1.79
1.50	1.80	1.78	1.82	1.52

d) LR 分布

図 6-11 T-4 の結果





a) 打撃回数ごとの HLD 値

173	198	199	177	210
189	216	201	220	169
211	212	195	189	218
241	215	223	188	185
228	190	184	141	205

b) Ls 分布

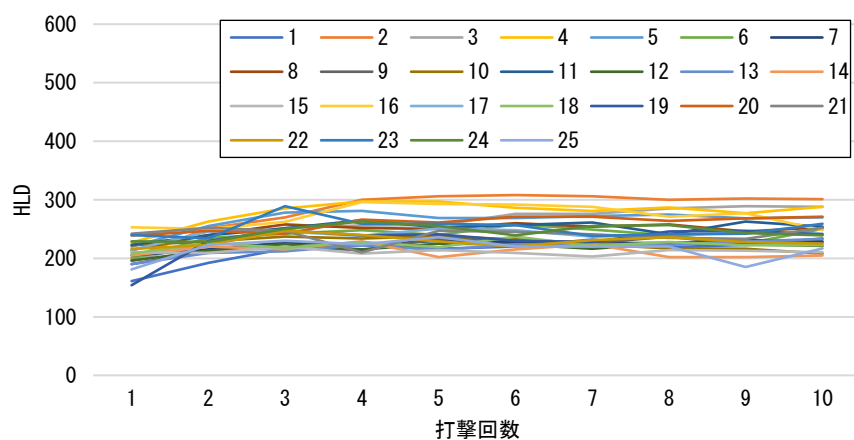
261	231	202	209	232
272	235	244	250	217
263	217	253	232	217
264	226	205	238	194
304	217	240	224	295

c) Lc 分布

1.51	1.17	1.02	1.18	1.10
1.44	1.09	1.22	1.13	1.28
1.25	1.02	1.30	1.23	1.00
1.09	1.05	0.92	1.27	1.05
1.33	1.14	1.30	1.59	1.44

d) LR 分布

図 6-12 N-1 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

161	201	196	227	220
199	205	214	190	222
223	196	190	205	210
253	214	208	154	239
242	216	240	229	181

b) Ls 分布

227	307	287	294	278
252	230	259	235	236
263	225	229	224	216
294	248	231	247	271
250	241	269	258	230

c) Lc 分布

1.41	1.53	1.47	1.30	1.26
1.27	1.12	1.21	1.24	1.06
1.18	1.15	1.20	1.09	1.03
1.16	1.16	1.11	1.60	1.13
1.03	1.12	1.12	1.13	1.27

d) LR 分布

図 6-13 N-2 の結果



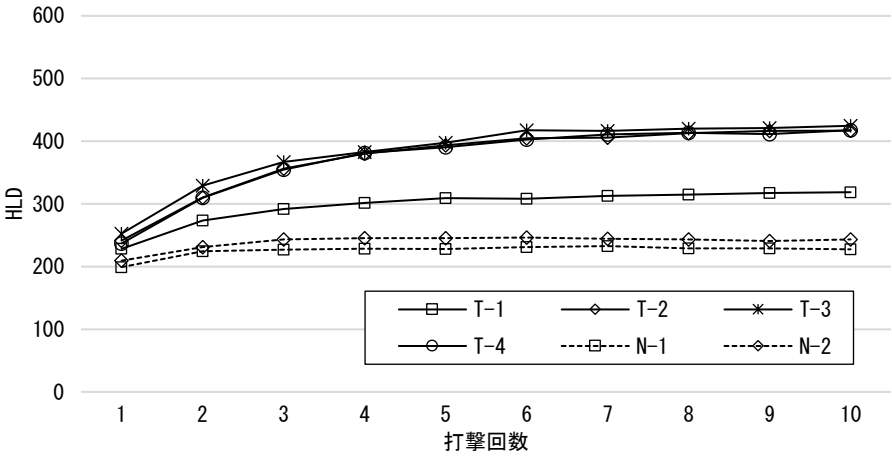


図 6-14 各打撃試験体(付着)25 データの平均値

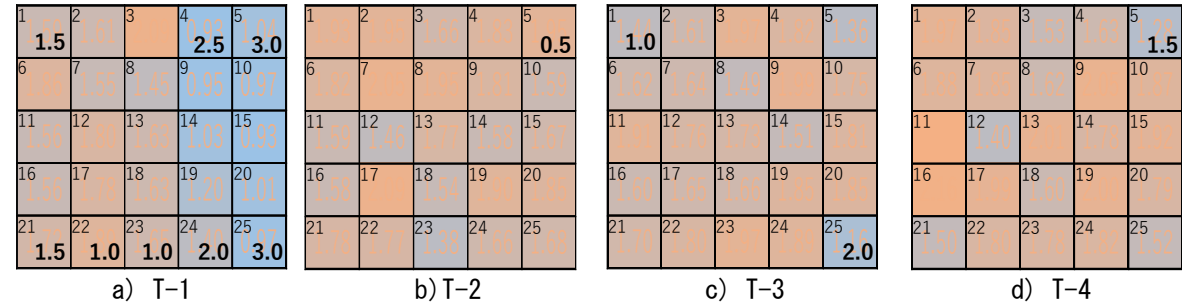


図 6-15 打撃試験体(付着)T シリーズ 4 体の小口部から視認できた漆喰浮き量(mm)と LR の関係

## 6.3.4 漆喰の塗り厚による HLD 値への影響（実験 6-2-2）

## (1) 打撃試験体(塗厚)概要

実験 6-2-1 において、漆喰塗り厚 10mm では木摺りと漆喰の付着・浮き状況によって HLD 値に差異が生じ、間接的に潜在脆弱部を認識できる可能性を示した。実建物の漆喰天井部材の塗り厚は一般に 10~15mm 程度であるが、一部では厚塗りに施工されている部材も存在しており、実試験体（最大塗り厚 24.6mm）もその例である。技術書における天井塗り厚目安は、現行 JASS15（2019 年）で 12mm であるが、「JASS15 原案」（1954 年、前掲 2-13）では 15mm、「學會仕様書」（1923 年、前掲 2-12）は 21mm、「建築学階梯」（1889 年、前掲 2-9）は 18mm と、年代によって差異があり、かつ厚塗りである。これらの技術書と同年代に施工された部材は当該仕様を参考に行っている可能性を勘案すると、エコーチップによる脆弱部判定が適用できる最大塗り厚を把握しておく必要があるため、数種類の塗り厚で施工した打撃試験体(塗厚)を用いて実験を行うこととした。使用材料と調合は表 6-3（実験 6-2-1）を踏襲し、表 6-5 に実験 6-2-2 の要因と水準を示す。漆喰塗り厚は 10, 15, 20, 25mm を準備し、10mm は実験 6-2-1 と重複するが新規に作製した。

試験方法も 6.3.3(2)と同様であり、予備試験の結果を踏まえて材齢 12 週で打撃試験を実施した。

表 6-5 要因と水準（実験 6-2-2）

要因	水準	備考
下地寸法	200×200mm	小幅板と漆喰の付着に着目するため目透かしを省いた板下地とし、側枠を外周に設置した。
漆喰調合	基本・下塗調合（実験 4-1 と同仕様）	1 層 3mm 程度で水引き程度をみて、所定の塗り厚まで塗り重ねた。
塗り厚	10, 15, 20, 25mm	側枠を塗り厚と同等の高さに設置してガイドを兼ねた。
下地表面	素地（各塗り厚で 1 体） 番号：T-塗り厚（塗り厚 15mm ならば T-15）	養生中の寸法変化等による剥離は許容し、測定時に確認した。
	付着抑制（各塗り厚で 1 体） 番号：N-塗り厚（塗り厚 15mm ならば N-15）	フッ素樹脂テープを下地表面に貼り付けた。
養生環境	標準環境	20°C, 60%RH
打撃	向き：鉛直下向き 回数：連続 10 回 試験領域：5×5 マス(40×40mm/マス)	-

(2) LR 法による算定結果（実験 6-2-2）

図 6-17～24 に各打撃試験体（塗厚）の測定値と評価値分布、図 6-25 に各試験体(塗厚)25 データの平均値、図 6-26 に打撃試験体(塗厚)T シリーズの小口部から視認できた漆喰浮き量と LR の関係を示す。25 マスの附番とグラフ凡例（図 6-6）、カラーバー（図 6-16）の考え方は 6.3.3(3)と同様である。

塗り厚 10, 15mm では、実験 6-2-1 と同様に T, N シリーズごとの HLD 値の差異が明瞭で、T シリーズにおいても一部の HLD 値は打撃による上昇が鈍くなっており、図 6-26 の漆喰浮き量と LR の低さが概ね一致していることを鑑みても、付着の有無と HLD 値の関連性が読み取れることがわかる。

一方で塗り厚 20, 25mm の試験体では、T, N シリーズ共に HLD 値の差異が不明瞭であり、漆喰浮き量と LR の関連性も塗り厚が大きい仕様ほど認められなくなっている。これは 25 マスの HLD 平均値（図 6-25）でも同様で、塗り厚 15mm 以下は T, N シリーズのプロットにそれぞれ差異があるのに対し、20mm 以上ではほぼ同一線上にプロットが位置しており、漆喰の付着の有無よりも塗り厚による HLD 値への影響が卓越していることがわかる。

この要因は、木摺りと漆喰の脆弱部に関して「空隙部における漆喰の揺動打撃エネルギーの吸収」を前提条件に LR を用いて判断しているため、漆喰の塗り厚が大きくなると漆喰層の剛性が高まり、空隙部があっても打撃時の変位が起きにくくなることによって、表面の圧密にエネルギーが割かれて LR が高まったためと考えられる。

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

図 6-6 再掲 試験体表面の  
各領域の附番

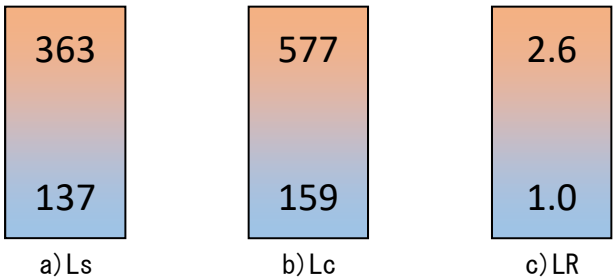
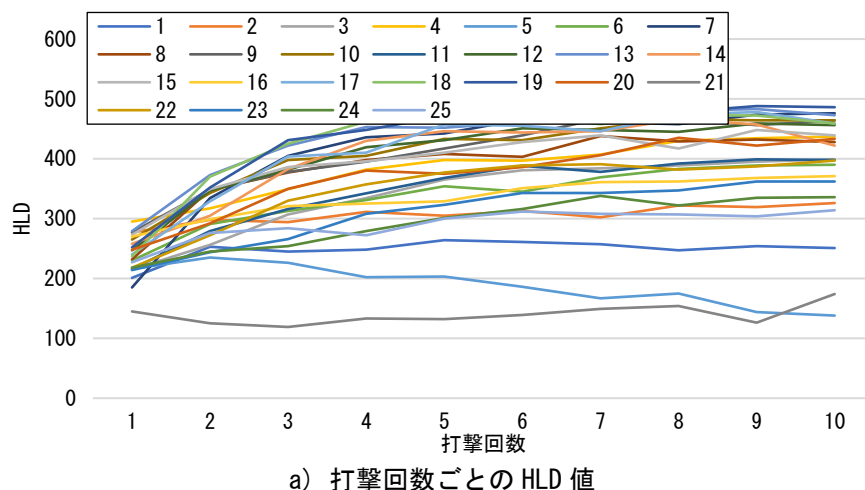


図 6-16 HLD 値の各評価値のカラーバー



201	277	215	295	216
230	185	232	277	265
216	247	279	258	273
270	240	237	252	248
145	218	214	218	227

b) Ls 分布

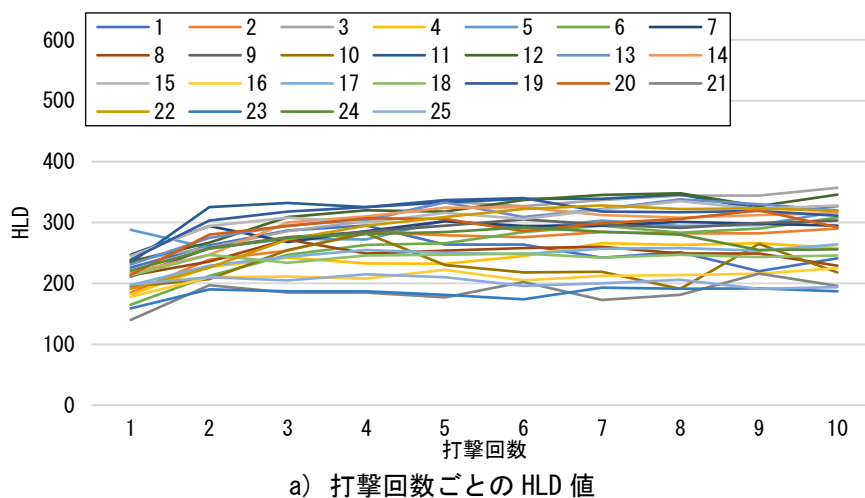
261	322	394	434	226
387	472	433	465	465
396	455	479	456	442
367	470	474	484	430
159	392	357	336	311

c) Lc 分布

1.3	1.2	1.8	1.5	1.0
1.7	2.6	1.9	1.7	1.8
1.8	1.8	1.7	1.8	1.6
1.4	2.0	2.0	1.9	1.7
1.1	1.8	1.7	1.5	1.4

d) LR 分布

図 6-17 T-10 の結果



226	185	237	182	288
165	247	213	211	195
234	236	231	218	245
178	197	213	239	214
140	191	159	221	198

b) Ls 分布

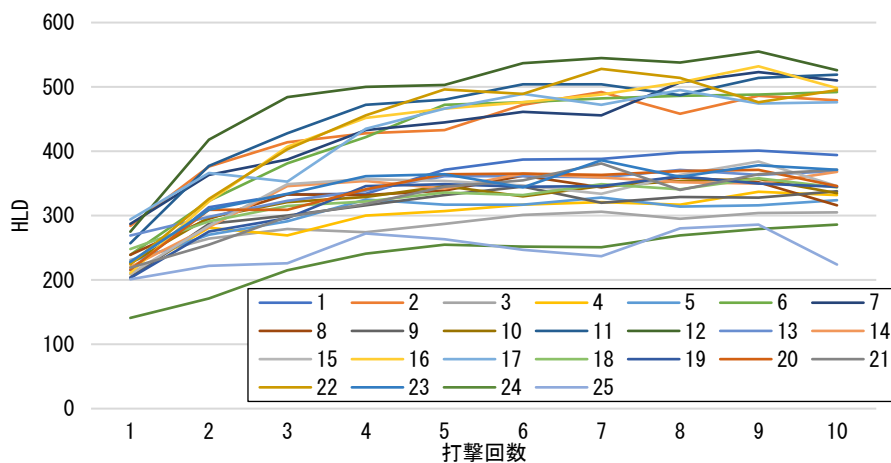
282	286	348	265	308
298	300	263	302	267
341	346	334	321	328
221	260	248	334	311
205	324	192	287	212

c) Lc 分布

1.2	1.5	1.5	1.5	1.1
1.8	1.2	1.2	1.4	1.4
1.5	1.5	1.4	1.5	1.3
1.2	1.3	1.2	1.4	1.5
1.5	1.7	1.2	1.3	1.1

d) LR 分布

図 6-18 N-10 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

215	284	231	209	228
239	287	239	204	226
257	275	269	220	209
211	294	248	203	216
219	224	228	141	201

b) Ls 分布

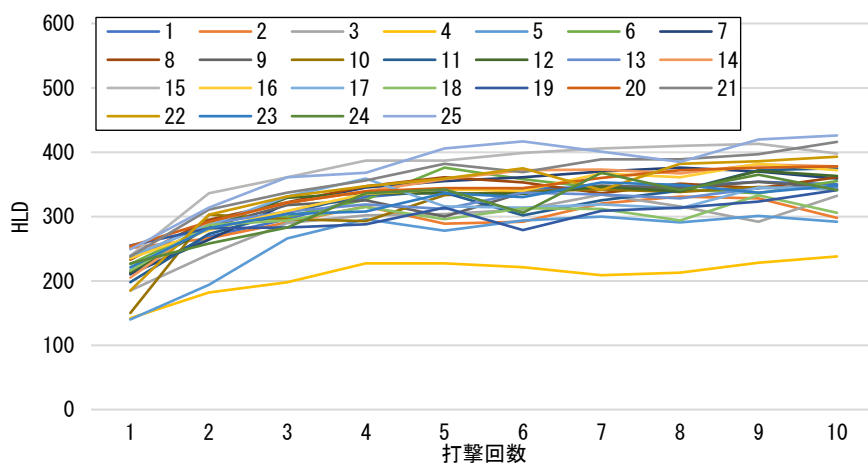
398	486	305	330	326
489	513	358	338	352
512	546	368	364	368
512	487	350	353	368
372	513	378	278	279

c) Lc 分布

1.8	1.7	1.3	1.6	1.4
2.0	1.8	1.5	1.7	1.6
2.0	2.0	1.4	1.7	1.8
2.4	1.7	1.4	1.7	1.7
1.7	2.3	1.7	2.0	1.4

d) LR 分布

図 6-19 T-15 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

210	251	185	142	140
226	211	233	216	150
198	213	236	205	239
235	239	216	255	254
238	185	221	227	249

b) Ls 分布

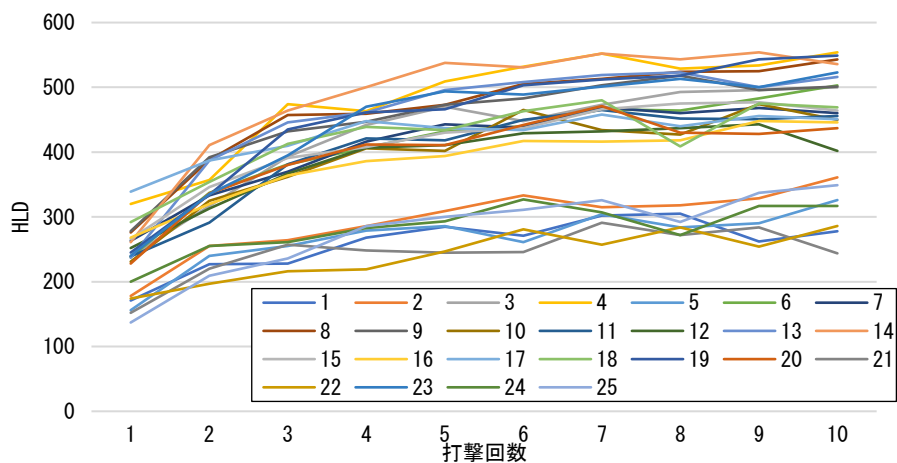
350	326	327	231	299
363	372	358	349	343
362	360	342	377	410
374	349	320	326	375
401	387	350	358	421

c) Lc 分布

1.7	1.3	1.8	1.6	2.1
1.6	1.8	1.5	1.6	2.3
1.8	1.7	1.5	1.8	1.7
1.6	1.5	1.5	1.3	1.5
1.7	2.1	1.6	1.6	1.7

d) LR 分布

図 6-20 N-15 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

171	178	239	320	156
238	263	276	278	231
239	252	237	261	266
268	339	292	245	228
152	174	240	200	137

b) Ls 分布

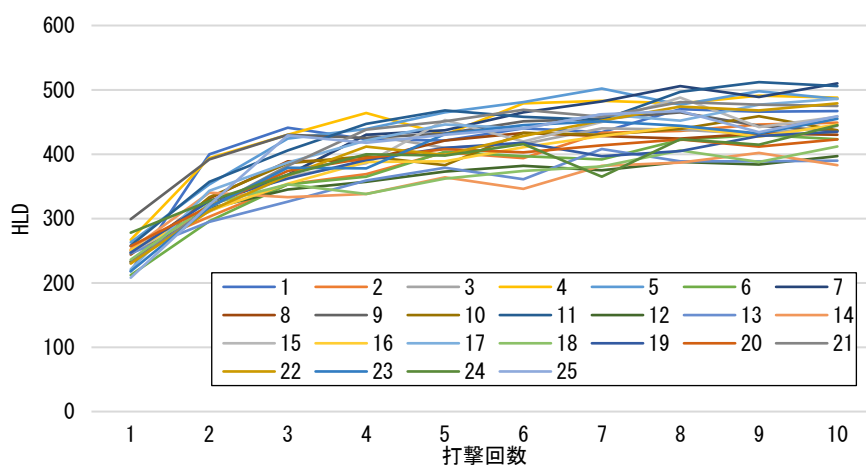
297	341	496	547	307
484	466	531	507	463
458	437	519	550	473
437	455	475	537	450
282	284	512	320	337

c) Lc 分布

1.7	1.9	2.1	1.7	2.0
2.0	1.8	1.9	1.8	2.0
1.9	1.7	2.2	2.1	1.8
1.6	1.3	1.6	2.2	2.0
1.9	1.6	2.1	1.6	2.5

d) LR 分布

図 6-21 T-20 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

218	250	257	267	263
212	233	244	299	233
258	247	246	252	248
251	221	236	247	257
231	230	218	278	208

b) Ls 分布

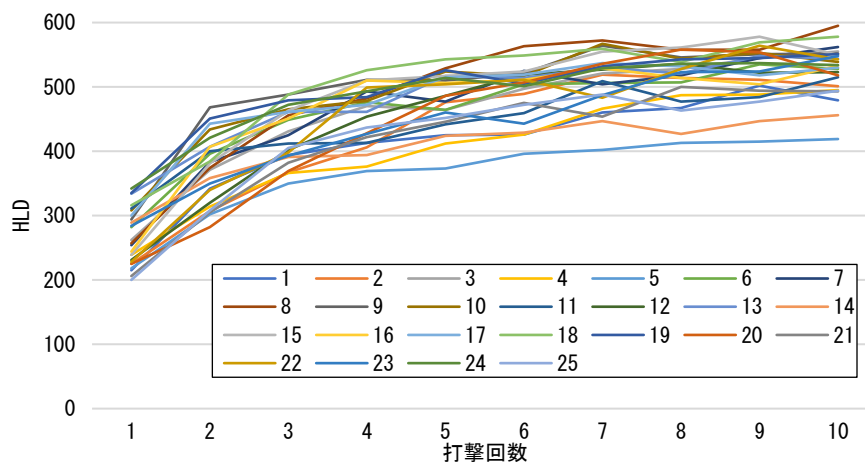
468	444	441	487	495
425	502	432	457	445
505	390	396	391	466
439	475	402	427	420
478	474	450	428	463

c) Lc 分布

2.1	1.8	1.7	1.8	1.9
2.0	2.2	1.8	1.5	1.9
2.0	1.6	1.6	1.6	1.9
1.7	2.1	1.7	1.7	1.6
2.1	2.1	2.1	1.5	2.2

d) LR 分布

図 6-22 N-20 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

215	225	262	239	218
282	254	257	294	308
311	231	334	289	239
244	300	316	335	225
206	228	284	342	200

b) Ls 分布

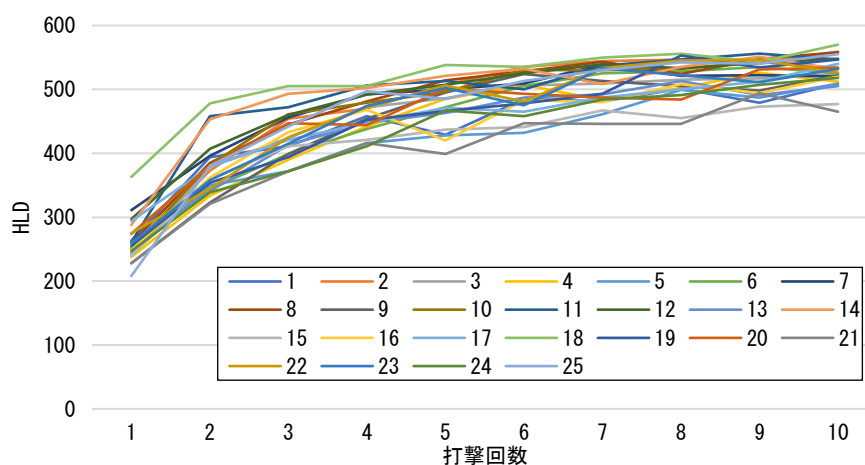
483	515	543	490	416
523	544	577	556	555
503	529	541	450	565
525	533	569	546	549
496	545	532	536	486

c) Lc 分布

2.2	2.3	2.1	2.1	1.9
1.9	2.1	2.2	1.9	1.8
1.6	2.3	1.6	1.6	2.4
2.2	1.8	1.8	1.6	2.4
2.4	2.4	1.9	1.6	2.4

d) LR 分布

図 6-23 T-25 の結果



a) 打撃回数ごとの HLD 値

263	251	239	238	243
252	311	259	228	250
261	297	260	288	240
249	294	363	255	274
228	275	259	247	208

b) Ls 分布

498	550	519	515	498
529	527	550	520	536
550	543	503	539	472
507	517	559	545	522
469	541	529	505	546

c) Lc 分布

1.9	2.2	2.2	2.2	2.1
2.1	1.7	2.1	2.3	2.1
2.1	1.8	1.9	1.9	2.0
2.0	1.8	1.5	2.1	1.9
2.1	2.0	2.0	2.0	2.6

d) LR 分布

図 6-24 N-25 の結果

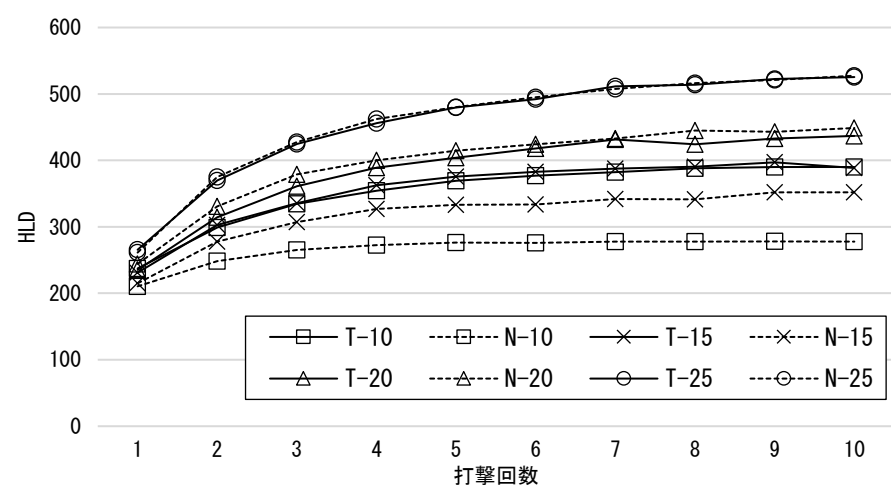


図 6-25 各打撃試験体(塗厚)25 データの平均値

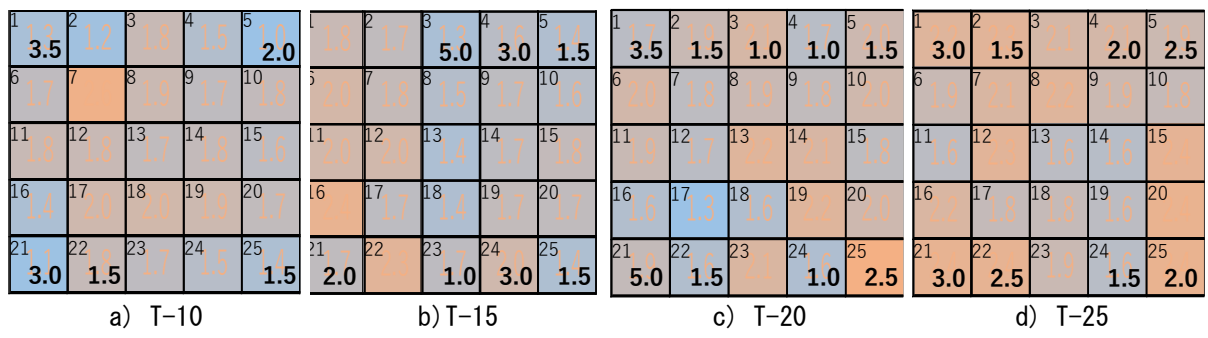


図 6-26 打撃試験体(塗厚)Tシリーズの小口部から視認できた漆喰浮き量(mm)と LR の関係



### 6.3.5 各評価値のクラスタリングによる脆弱部判定方法の検討

#### (1) 検討の概要

LR 法では、漆喰の浮き部分判定可能の塗り厚限界は 15mm 程度にとどまる。当該方法は測定面でみた各評価値を定性的に判断する側面があり、簡便な方法ではあるが判定結果に個人差が生じるため適用範囲は限定的な方法といえる。本節からは、ここまでに求めた各評価値に対してクラスタリング（以下、クラスタリング法）による分析を行うことで、潜在脆弱部を定量的・かつ客観的な方法をもって判定できるか検討することとする。ここでは、実験 6-2-1, 2 で求めた  $L_s, L_c$  をそれぞれ横軸、縦軸に対応させた散布図を用いて可視化したうえで分析する。

#### (2) クラスタリング法での算定方法

図 6-27 に  $L_s, L_c$  を軸にとった散布図による HLD 値・漆喰状態の考え方を示す。当該散布図では LR を赤線の如く示すことができ、打撃部の圧密度を考えるうえでのひとつの指標と考えることができる。つまり  $LR=1.0$  の赤線よりも上側にプロットされるほど圧密度が高いことを示しており、打撃エネルギーが打点の圧密に消費された仮説を示すものとなる。この前提において、例えば T シリーズの 25 マスの評価値は漆喰浮きの「あり」「無し」の 2 要素が混在したサンプル集団とみなすことができるため、非階層クラスタリングの k-means 法を用いて浮き「あり」「無し」の 2 クラスへの割り振りを試行した。

図 6-28 に各評価値を用いた k-means 法によるクラスタリングの手順として、実験 6-2-1 の T-1 の例を示す。当該試験体は 2 クラス（漆喰浮きの有無）が散布図にプロットした段階で明瞭に判別しやすいため、クラスタリングに際して主観・客観の違いが顕著に生ずるものではないと考えられるが、視覚的にわかりやすいデータ群として例示する。

k-means 法の初手で必要なランダムなクラスタリングは、各試験体の  $L_s, L_c$  の最大・最小範囲における乱数座標を基に決定することとし、以降の手順は k-means 法の一般的なプロセスに則って算定した。2 つのクラスに振り分けられたサンプル群のうち、LR が低い方、もしくは原点に近い方に位置する重心をとるサンプル群で構成されるクラスを潜在脆弱部に類するものとして A クラス、そうでないものを健全部として B クラスと識別した。加えて、それぞれのクラスに帰属する各サンプルのマス No. を試験体のマス位置と照合し、両クラスの面的な分布をマッピングした。なお両クラスは同一面上における相対評価によって割り振られたものであり、A クラスが潜在脆弱部、B クラスが健全部と断言するには、実情との兼ね合いを含めた検証が不足している状態であるが、ここでは両クラスがそのように分類されると仮定したうえで、両者をそれぞれ潜在脆弱部・健全部と称した。

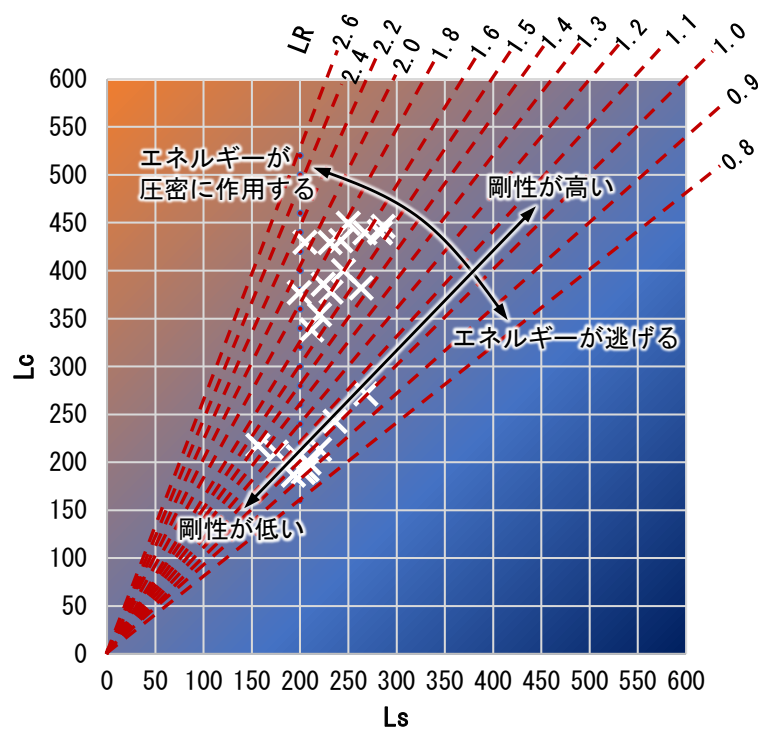
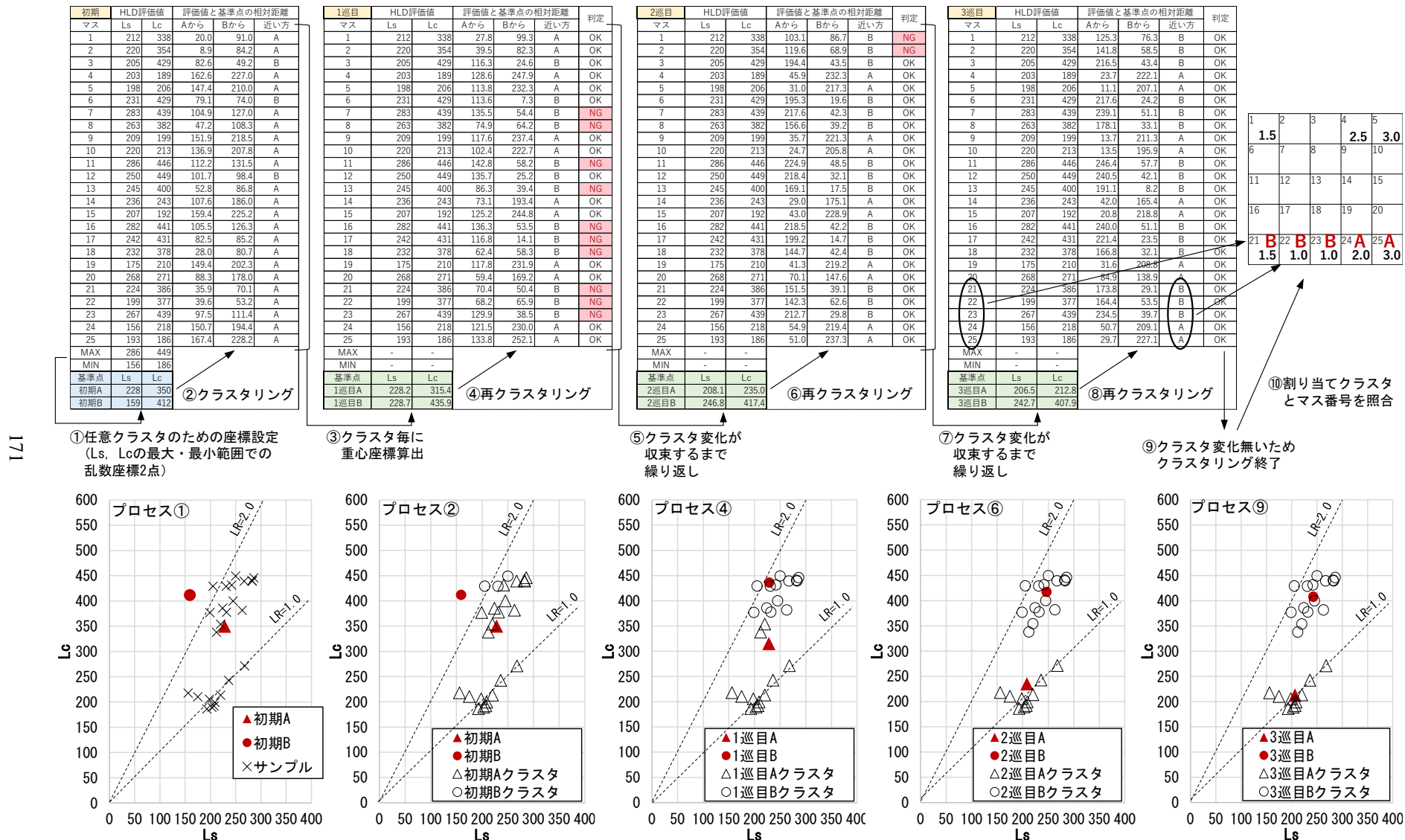


図 6-27  $L_s$ ,  $L_c$  を軸にとった散布図による HLD 値・漆喰状態の考え方 (T-1 の例)



### (3) クラスタリング法での算定の結果

図 6-29～32 に各試験体のクラスタリング結果および漆喰浮き量とクラスタの関係を示す。今回の算定は漆喰の浮きの有無を判断するため、その要素が混在していると考えられる T シリーズを対象とした。k-means 法は初手の設定座標によってクラスタリングや収束までの計算回数へ影響を及ぼすこと（初期値依存性）が一般に知られているが、今回の算定では最大でも 5 巡でクラスタリングは収束しており実用の範囲内であると判断した。

打撃試験体（付着）では、LR 法と類似するようなクラスタリングがなされており、漆喰浮き量との関連も確認できた。クラスタリング法では今回は 2 クラスタで分類を行ったため、カラーバーの色分けは 2 種となり、LR 法のようにあいまいな部分がなく、明確な判断ができる側面がある。

打撃試験体（塗厚）では、T-20, 25 においてもクラスタリング結果と漆喰浮き量との相関が認められたことから、LR 法と比較して漆喰塗り厚の適用範囲が広く、少なくとも 25mm でも判定可能であることがわかった。T-20, 25 の A クラスタと B クラスタにおいて特徴的なのは、両クラスタの重心座標は同等の LR 線上に位置している一方で、A クラスタのほうが原点に近くなっていることによって脆弱部分と判定されていることである。LR は打撃点の圧密程度を示す指標であり、塗り厚が大きくなると剛性が高まるために潜在脆弱部であっても LR が大きくなる点は仮説を支持する結果となり、LR 法による T-20, 25 の脆弱部判定の精度が落ちた要因をここに求めることができる。ただし、浮きによって打撃エネルギーが一定量は逃げた結果が A クラスタ重心の原点への近さに表れていると考えられ、クラスタリング結果を散布図にすることで潜在脆弱部を視覚的に捉えることができる。

塗り厚が大きい試験体において、両クラスタの LR が近い値をとる要因は塗り厚の大きさによる元来のサンプル分布だけでなく、k-means 法の初期値依存性による影響もあると考えられるが、因果関係は現状で推測の域を出ない。

塗り厚が 15mm 以下の試験体であっても、潜在脆弱部において LR が 1.0 程度に留まっているものは T-1 だけなので、付着の有無を問わず、程度の差はあれど打撃点の圧密は生じていることになる。加えて T-2, 4, 20, 25 のように、両クラスタに属するサンプル群・重心が同等の LR 線上に近い位置関係で分布している場合は、LR 法による潜在脆弱部の判定が困難となる。故に LR だけでなく Ls と Lc を判定要素に含めた考え方が必要となる場合があることを勘案すると、クラスタリング法は網羅的な評価ができるため適用範囲が広いといえる。ただし、両クラスタの重心の相対位置が近い場合(T-2、T-25 など)でも必ずクラスタリングはなされるため脆弱部の判断要素の一助にはなるものの、実際の脆弱部の有無が両クラスタで明確に線引きされるかは検討の余地があるため、実情との関連を含めた検証をさらに行う必要がある。

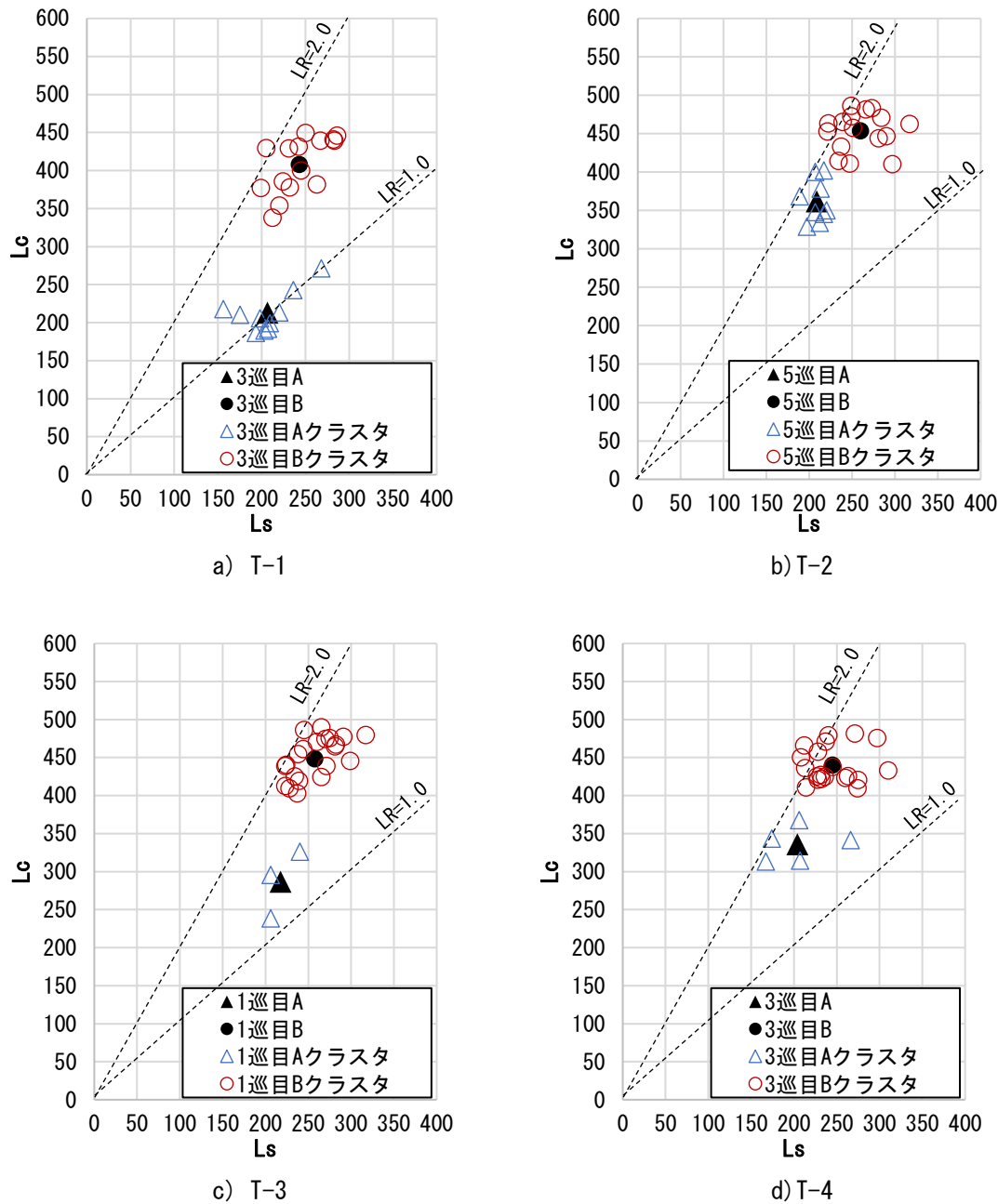


図 6-29 打撃試験体(付着)Tシリーズのクラスタリング結果

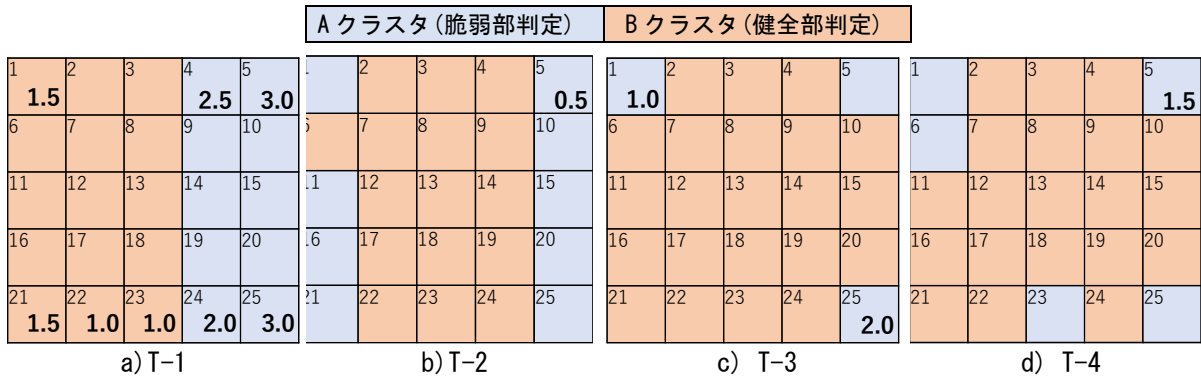


図 6-30 打撃試験体(付着)Tシリーズの小口部から視認できた漆喰浮き量(mm)とクラスタの関係

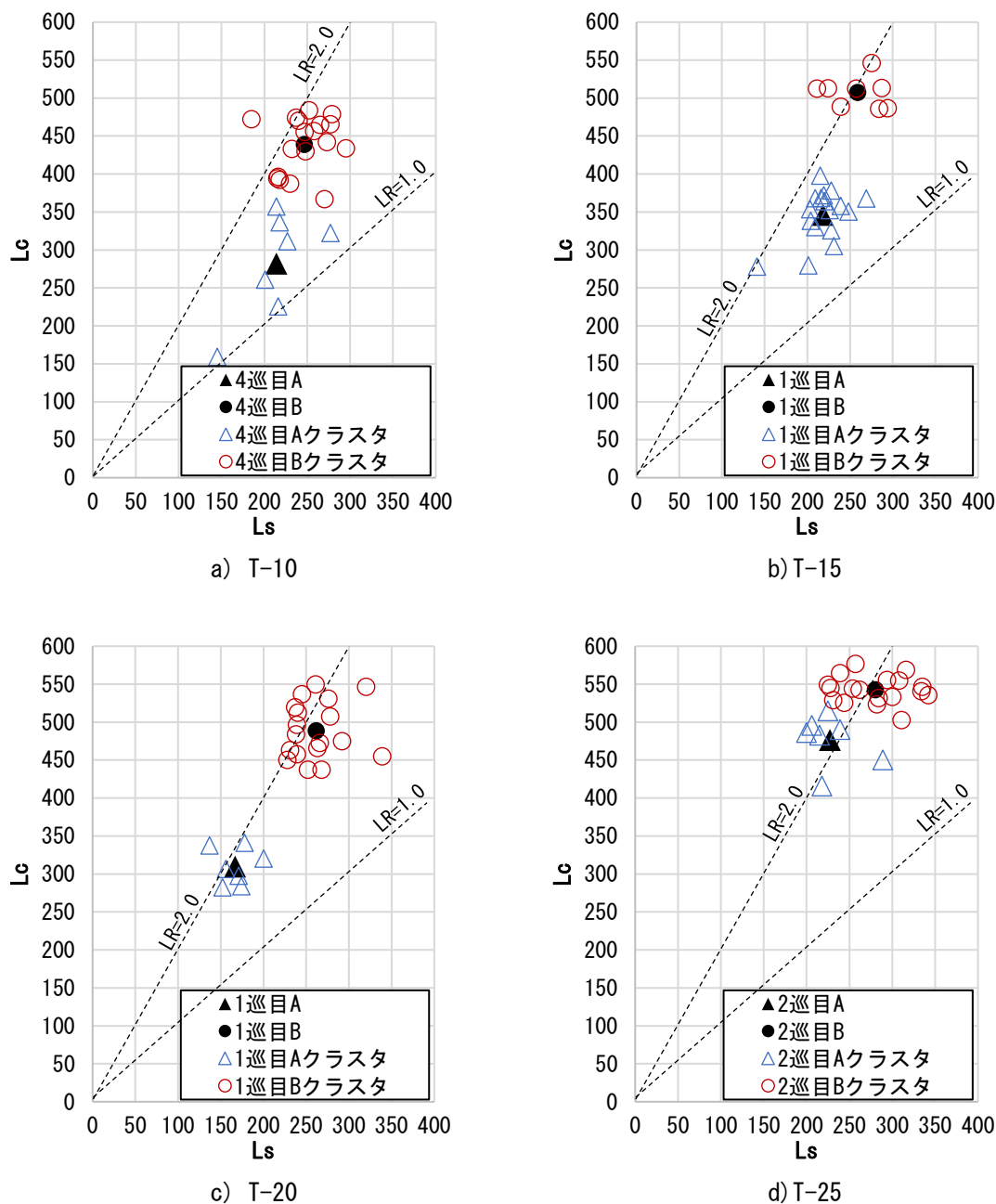


図 6-31 打撃試験体(塗厚)T シリーズのクラスタリング結果

A クラスタ (脆弱部判定)					B クラスタ (健全部判定)				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3.5				2.0			5.0	3.0	1.5
6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	21	22	23	24	25
3.0	1.5			1.5	2.0		1.0	3.0	1.5
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3.5	1.5	1.0	1.0	1.5	3.0	1.5		2.0	2.5
6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	21	22	23	24	25
5.0	1.5		1.0	2.5	3.0	2.5		1.5	2.0

a) T-10

b) T-15

c) T-20

d) T-25

図 6-32 打撃試験体(塗厚)T シリーズの小口部から視認できた漆喰浮き量(mm)とクラスタの関係

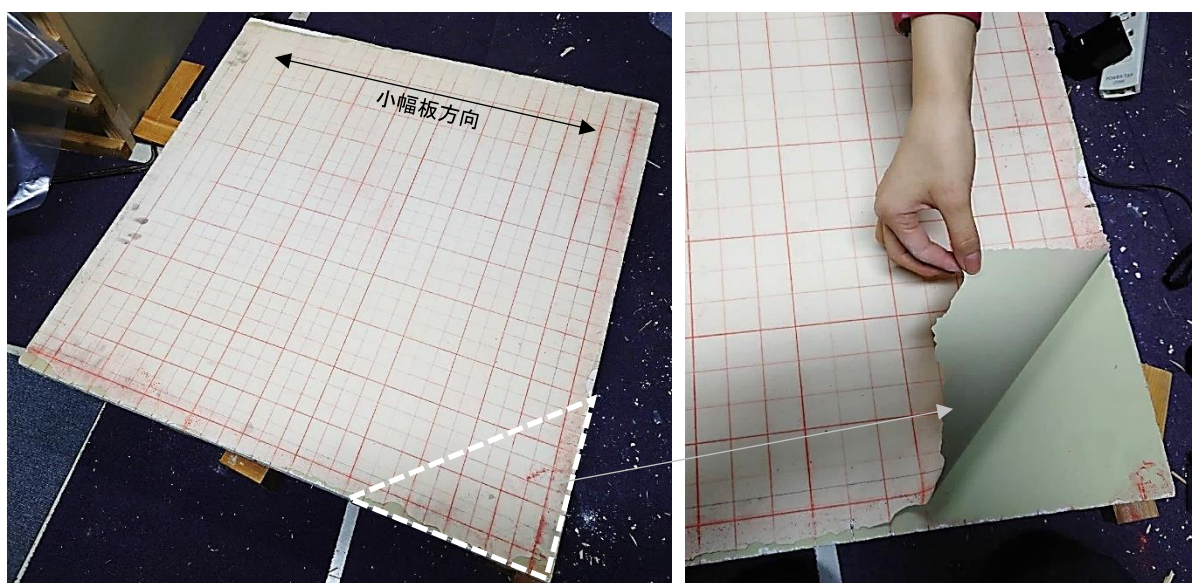
### 6.3.6 実試験体に対する打撃試験による検証（実験 6-2-3 シリーズ）

実験 6-2 シリーズにて、打撃試験によって漆喰の付着外れ・浮きといった潜在脆弱部の判定ができる可能性が示された。それを踏まえ、実試験体仕上面への打撃試験を行い、実際の部材を想定した条件での HLD 値の挙動や物性評価の可能性について検討した。

#### (1) 試験対象試験体（実験 6-2-3 共通）

写真 6-3 に打撃試験に用いた実試験体(AMS-4)の様子を示す。採取した実試験体 4 体のうち、表層の石膏ボード増補が無く施工時の原型を最も留めている AMS-4 を対象とした。当該試験体を含めた実試験体 4 体には漆喰上塗りの上層に塗装仕上げが何度か施された履歴があり、これは採取元の建築物 N における標準的な仕様である。（第 5 章・5.4.2(1)に記述）また、その一部の塗膜は下層との付着が外れた状態となっていた。この下層も色から判断するに漆喰上塗りではなく、旧塗装仕上面か塗装のシーラーや中塗りのいずれかと考えられる。

仕上面や切断面から視認できる漆喰のひび割れ、浮きも認識できないため、顕在化した劣化は生じていないと判断できる。そこで打撃試験による評価値の差異から、潜在的な脆弱部の判定が行えるかどうか検証した。



a) 試験体仕上面全景※)

b) 塗膜が剥がれかかった部分

写真 6-3 打撃試験に用いた実試験体 (AMS-4) の様子

※) 仕上面表面の赤線は打撃点の目安に用いたチョークラインによる墨付けであり、実際の天井は無地のアイボリー色である。



## (2) 打撃試験の内容

表 6-6 に実験 6-2-3 シリーズの要因と水準を、試験の詳細を下記に示す。

## (2.1) 表面塗装膜の有無による比較検討（実験 6-2-3-1）

実試験体における漆喰上塗りの上層の塗装仕上げは建築物 N に限った仕様ではなく、竣工当初からの仕様であったり、後年にオリジナルの仕上面の補修・改修のために塗装されたりなど、経年した左官仕上材ではしばしばみられるものである。シュミットハンマーなどの反発度試験では一般に、強度推定を行いたい材料の上層に塗装・モルタル等の仕上げがなされている場合は測定値への影響を排除するためにそれを除去することが求められている。エコーチップによる試験も基本的な仕組みは同じなので一般論をいえば同様の扱いをすべきであろうが、これまでに論じてきた連打法においては、潜在脆弱部であったとしても打撃点の圧密がわずかでも起きることを鑑みると、表層条件の影響を低減できることが予想される。また歴史的建築物保護の観点に立脚すると、外観に顕著な影響を与えない評価を行うことや、塗装を除去せず簡易に打撃試験を実施可能な方法を選択肢として有しておくことは有意義なものとなる。

そこで、エコーチップにおける表層仕上げの影響を評価するため、潜在脆弱部の検証の前段として、表層塗膜の有無をパラメータにした打撃試験を行った。打撃箇所は写真 6-3 a) 点線内に示す塗膜が剥離しかかっている部位を利用し、塗膜を残した状態（写真 6-3a）・塗膜をめくった状態（同 b)）でそれぞれ任意の 6 点を打撃した。打撃方法は 6.3.3(2) と同様とし、連続打撃回数は試験内容を鑑みて 30 回とした。

## (2.2) 試験体全面の打撃による HLD 値分布把握（実験 6-2-3-2）

試験体表面を複数の測定領域に分割する方法はこれまでの試験と同様とした。

AMS-4 の仕上面に対して、縦横各 10 マス（約 90mm 角/マス）計 100 マスを基盤目状に墨付けし、各マス中央部を塗膜の上から打撃した。今回は現地の居室側で行うことを想定し、目透かし・小幅板部分は意識せず無差別に実施した。打撃方法は 6.3.3(2) と同様とし、連続打撃回数は予備試験（6.3.6(3) に後述）を鑑みて各マス 15 回とした。漆喰塗り厚は約 22mm と比較的厚塗りであるため、これまでの結果を踏まえてクラスタリング法で HLD 値の分析を行うこととした。

表 6-6 要因と水準（実験 6-2-3 シリーズ）

実験	要因	水準	備考
6-2-3 共通	試験体	AMS-4	実試験体の中で漆喰を打撃できるもの。
6-2-3-1	測定部分	表層塗膜剥離部分	-
	打撃	向き：鉛直下向き 回数：連続 30 回 試験部：剥離の有・無の任意の点 6 箇所	打撃回数と HLD 値の関係を確認。
6-2-3-2	測定部分	試験体全面	-
	打撃	向き：鉛直下向き 回数：連続 15 回 試験部：野縁方向 a～j、小幅板方向 1～10 と附番して a1～j10 の 100 マス (90×90mm/マス) に分割、1 マスの中央部を打撃	クラスタリング法により確認。



### (3) 表面塗装膜の有無による比較検討結果（実験 6-2-3-1）

図 6-33 に打撃ごとの塗膜有無による HLD 値の変動と打撃試験体(塗厚)との比較、表 6-7 に塗膜有無による各評価値を示す。まず塗膜の有無で比較すると、 $L_s$  は塗膜があるほうが約 15%低い一方で、 $L_c$  は 1%以下の差となっており、表層の要因に影響されにくいことを示唆している。打撃回数でみると、4 打目から塗膜の有無の差が不明瞭に、10 打目前後で HLD 値が  $L_c$  近傍に達している。塗膜ありの  $L_s$  が低い要因として、30 回打撃後の打撃点は塗膜が圧壊し下層が露出していたことから、塗膜と漆喰の硬度差によるものか、圧壊に打撃エネルギーが割かれた結果のいずれかであると考えられる。

また実試験体の  $L_s$  は全ての打撃試験体よりも高く、 $L_c$  も実試験体の塗厚約 22mm よりも厚い T-25、N-25（塗厚 25mm）と近い HLD 値で収束している。打撃試験体との材齢が大きく異なるので単純な比較はできないが、経年によって炭酸化が進んだ故の硬度の変化が要因としてあるといえるし、経年材と新規材で顕著な差異が認められない点では再現性を有するという考え方もできる。

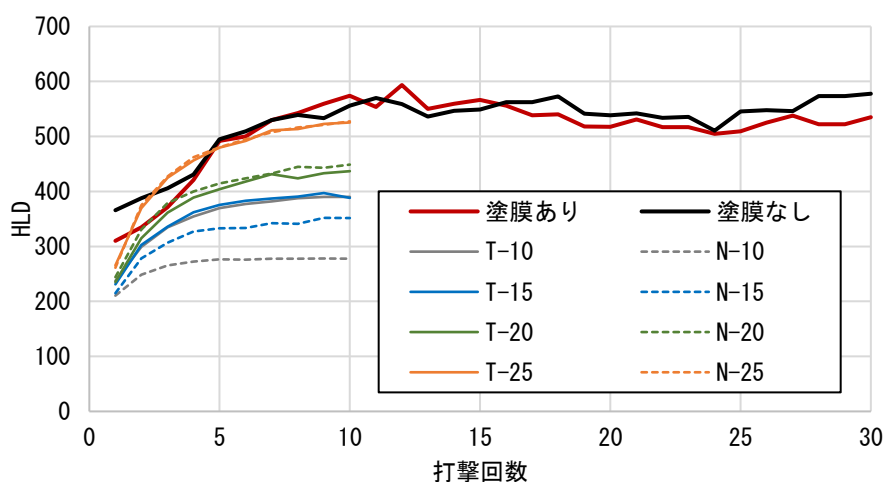


図 6-33 打撃ごとの塗膜有無による HLD 値の変動と打撃試験体(塗厚)との比較

表 6-7 塗膜有無による各評価値

	$L_s$	$L_c$	LR
塗膜無し	366	575	1.57
塗膜あり	310	578	1.86
差(%)	15.2	0.53	18.6

#### (4) 試験体全面の打撃による評価値分布把握結果（実験 6-2-3-2）

図 6-34 に AMS-4 の評価値のクラスタリング結果を示す。打撃試験体の結果と比較すると、サンプル群の分布の仕方や各クラスタ重心が近接する傾向は T-25 と類似しており、漆喰が厚塗りされた場合に認められる傾向である可能性がある。潜在脆弱部の判定は、散布図下方に位置、および重心座標の LR が小さい方のクラスタに属するサンプル群を対象とした。

図 6-35 に両クラスタのサンプル群の打撃ごとの HLD 値、表 6-8 に各クラスタの評価値(クラスタリングで求めた重心座標)を示す。まず Ls について、両クラスタ共に極めて近似する値を取っているほか、本試験は全マスで塗膜の上から打撃をしているため、実験 6-2-3-1 の「塗膜あり」の値に近く、妥当な結果となった。Lc は A クラスタ（潜在脆弱部）のほうが B クラスタ（健全部）よりも低く、この結果もこれまでの試験の傾向と再現性がみられる。

図 6-36 に AMS-4 のマス割とクラスタの関係を示す。打撃試験体と同様に、a1～j10 の 100 マスに領域分けと附番を行い、判定結果をマッピング図として示すことで潜在脆弱部を判断した。その結果、図の向きでいえば下半分に脆弱部が集中しており、目視での判断はできないものの、木摺りと漆喰の付着が外れている可能性が高いことがわかった。また、これまでの試験と同様に脆弱部は試験体判定される傾向があり、小口面を持つ試験体特有の傾向が出ているといえる。この類の試験体において端部はいわば片持ち状態であって、実際の天井では生じにくい特異点であるし、打撃を伴う試験では一般部よりも振動が生じやすい部分ではある。それを勘案して当該試験結果を捉えるべきであるが、マッピング図の 1～5 行目と 6～10 行目とで両クラスタの判定量が異なる点は有意な差としてみるべきである。

なお、これ以降に実施した振動試験では AMS-4 を対象としており、打撃試験で判別した潜在脆弱部の領域と実試験体の破壊領域に一定の関連性が確認できた（第 8 章で詳述）。今回は現地調査の一場面として、天井仕上面から小幅板と目透かしが判別できない状態を想定して打撃試験を実施したが、その条件下であっても剥落し得る部分を想定できる可能性を示すことができた。今後はさらに発展的な視点として、打撃試験のメッシュをより細分化して目透かしと小幅板の部分を判別することや、打撃回数と HLD 値が反映する材料深さの関係、目透かし部分の漆喰の損傷を拾えるか否かなど、当試験の拡張性は期待できる部分が多いため、検証を発展させてゆく。

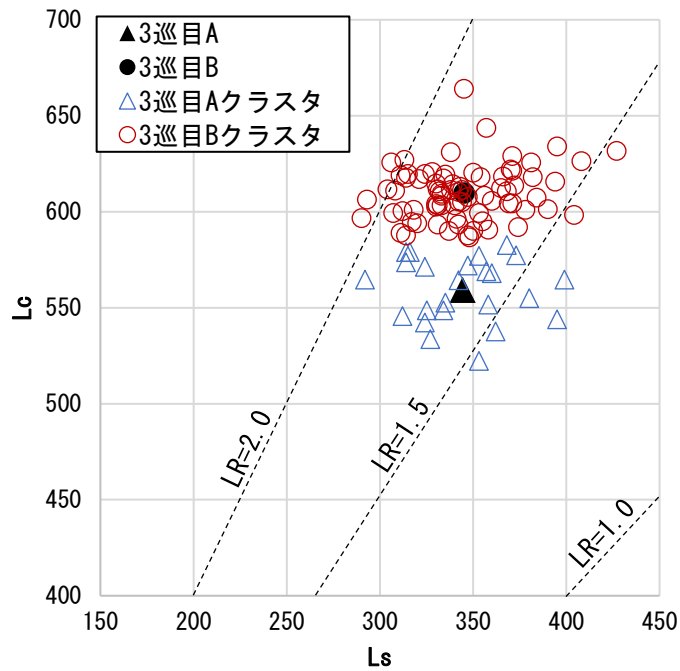


図 6-34 AMS-4 の評価値のクラスタリング結果

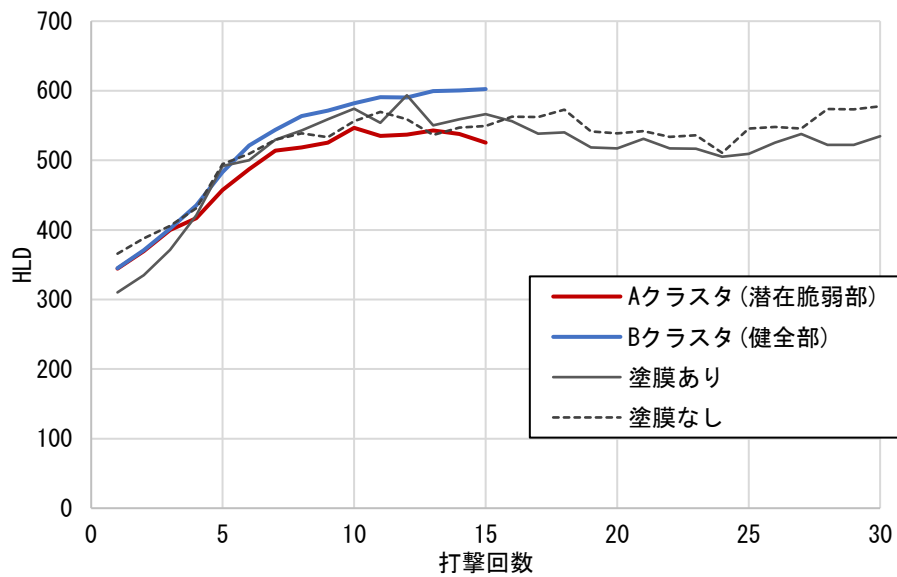
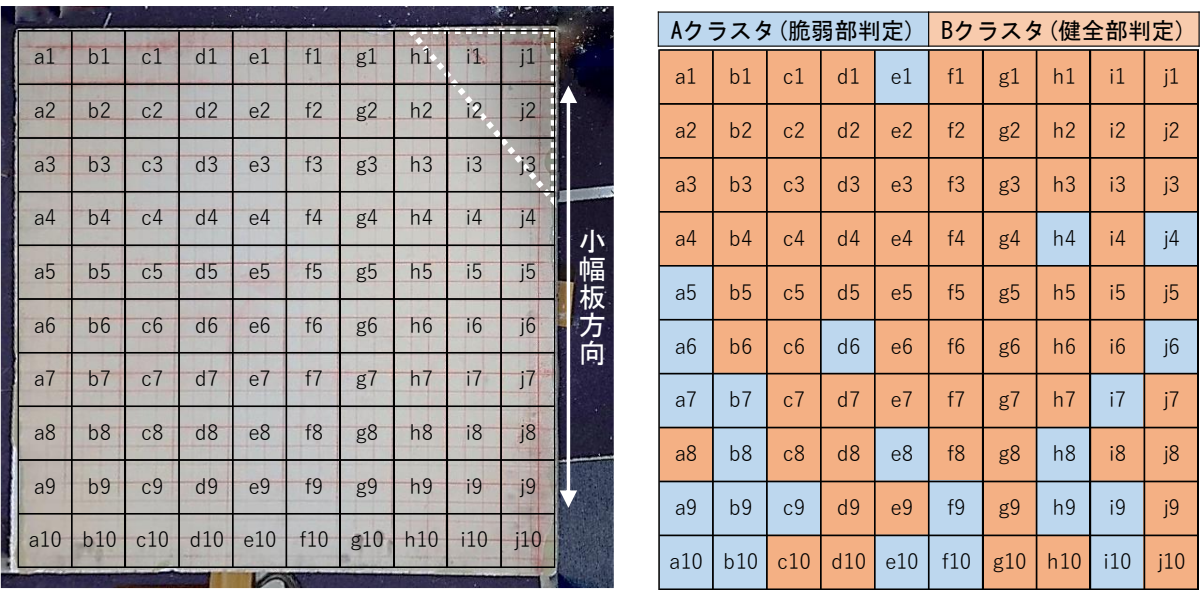


図 6-35 両クラスタのサンプル群の打撃ごとの HLD 値

表 6-8 各クラスタの評価値(クラスタリングで求めた重心座標)

	$L_s$	$L_c$	LR
A クラスタ (潜在脆弱部)	344	559	1.62
B クラスタ (健全部)	345	610	1.77
差(%)	0.19	9.01	8.81



a) AMS-4 の打撃点マス割※)                      b) マスごとの両クラスタマッピング図

図 6-36 AMS-4 のマス割とクラスタの関係

※) 右上の三角形点線内は写真 6-3 で示した塗膜の捲れあがり部分

## 第6章のまとめ

本章は、既存部材になるべくダメージを与えない微破壊・非破壊による診断方法をもって、木摺り漆喰天井部材の施工状態・健全度を評価した結果を報告するものである。漆喰の剥落には複合的な要因が絡むが、本研究では天井の耐力に対する影響度が比較的大きいことがわかっている「引張付着の有無」「漆喰引掛りの状態」「目透かし幅とその数」の各要因に限定した上で、天井裏からの撮影画像を用いた各種解析、天井仕上面からのエコーチップ式硬さ試験機による打撃試験、およびその測定値の統計学的アプローチによる脆弱箇所推定の可能性について検証した。これら一連の実験・検証によって得られた知見を以下に示す。

### 1) 画像解析からの知見

- 1-1) 単位面積当たりの目透かし開口率 GR によって、漆喰層の自重を支持する引掛り部への荷重伝達の特性を評価した。その結果、AMS-1～3 が 18～21% で類似する傾向を示した一方、AMS-4 は約 12% と有意に低く、施工誤差と結論付けられない程度の仕様差となっていることがわかった。同一建物内で施工仕様が異なっていたのか、施工者によるノウハウの差異なのかは現時点で不明である。なお、当該建物の天井を模擬した部材による振動試験を行う際に、耐力判定の観点から安全側である AMS-4 の仕様を適用することとした（第8章で解説）。
- 1-2) 目透かしへ食い込んだ漆喰が上側へはみ出し、面内方向へ広がった量を定量化することが、漆喰層の支持力を推し量るうえで重要となる。そこで小幅板上部に乗っている漆喰を引掛り率 AR、漆喰引掛り量の平均的な幅を平均引掛り幅 AAW として評価した。その結果、全試験体において 10% 以上であることがわかり、目透かし幅よりも漆喰がはみ出して木摺り下地と嵌合していることがわかった。これは本実験で用いた実試験体の小幅板がテーパ断面であることから妥当な結果であるといえる。AMS-4 は AR および AAW がほかの3体よりも低く、これは GR が低さに連動したとみられ、漆喰の食い込み量自体が減少したことによるものと考えられる。
- 1-3) 目透かし開口面積に対する漆喰食い込み面積を開花率 BR として評価した。先述の AR と AAW は、漆喰の引掛りを絶対量で示した指標であるのに対し、BR は目透かし幅と漆喰の広がり方の関係を見るものである。算定の結果、実試験体4体は顕著に差が無く、AMS-4 が最も大きい値となり、ほかの指標と逆転傾向を示した。また目透かしを長さ方向 10mm ごとに同様の算定を行った結果、目透かし幅と広がり方には目立った相関が認められず、AMS-4 の結果を補強するものとなった。ただしどの目透かし幅であっても引掛り量のばらつきが大きく、職人の鍔圧、送り方、鍔に乗っていた漆喰の量などに影響を受けることを示唆している。

## 2) 打撃試験からの知見

2-1) 下塗調合の漆喰のみを複数層有する塗り厚 10mm の木摺り漆喰試験体にて、下地と漆喰の剥離・浮きを部材の経年現象と位置づけたうえで、付着の有無をパラメータにエコーチップの連打法を用いて HLD 値の挙動を評価した。下地との付着（健全部想定）がある部分では打撃回数にしたがって HLD 値は上昇し、所定の値で高止まりの傾向を示す一方で、漆喰の剥離部分（脆弱部想定）では HLD 値の上昇が鈍くなることがわかった。HLD 値の上昇の要因を打撃点における漆喰の圧密による局所的な硬度上昇と仮説づけると、剥離部に生じている空隙によって漆喰が変形する余地があり、それに打撃エネルギーが割かれて圧密には作用しないことが HLD 値の差異として現れていると考えられる。これを、打撃 1 回目の HLD 値を  $L_s$ 、複数回打撃後の収束値  $L_c$ 、両者の比を LR として、LR の面的分布を相対的に判断（LR 法）することで、10mm 厚においては健全部・脆弱部の判定が可能となる可能性が示された。

2-2) 木摺り漆喰に関する技術書での漆喰塗り厚は、現行仕様(2019 年版 JASS15)は 12mm である一方、明治～昭和期の技術書では 15～21mm と厚塗り仕様であることがわかった。当時の建物がそれに倣って施工されていることを想定し、打撃試験による脆弱部判定が可能な漆喰塗り厚を判断するため、塗り厚 10・15・20・25mm の木摺り漆喰試験体を作製し、同様の打撃試験を行った。その結果、塗り厚 20・25mm では付着の有無による LR の差異が不明瞭になり、相対的な判断が難しくなることがわかった。これは、打撃エネルギーが漆喰層の変形に消費されることを脆弱部判定の前提条件としているために起きたもので、漆喰層が厚くなることで剛性が高まるため、その作用が起きにくくなったことが要因と考えられる。そのため、LR 法は簡便な方法ではあるものの判別可能な適用範囲は限られるといえる。

2-3) 塗り厚が大きい場合でも脆弱部を判定可能とするため、非階層クラスタリングの k-means 法を用いて、付着の「あり」「無し」の 2 クラスタへの分類を試みた。測定点の位置と紐づけた各  $L_s$ ,  $L_c$  を軸とした座標値をクラスタリングし、それを面的分布に再度割り振って脆弱部の推定を行った。その結果、塗り厚 20,25mm の試験体においても付着の有無とクラスタリングとの相関が認められ、LR 法よりも塗り厚の適用範囲が広いことがわかった。加えて、クラスタリングによって 2 分割されたサンプル群の各重心座標を基に算定した LR は、両クラスタにおいてほぼ同等の値を示しており、塗り厚が大きくなると剛性が高まるために潜在脆弱部であっても LR が大きくなる点は仮説を支持する結果となった。一方で、剥離によって打撃エネルギーが一定量は逃げているため、その結果が  $L_s$ ,  $L_c$  の低水準の推移として表れていると考えられ、T-20, 25 の脆弱部判定の精度が落ちた要因をここに求めることができる。LR が見かけ上類似する要因は元来のサンプル分布や初期値依存性による影響が大きいとみられるが、塗り厚が大きいことによって斯様なサンプル分布を誘発させる可能性もあり、因果関係は現状で推測の域を出ない。

## 第6章の参考文献

- [6-1] 野中 英, 湯浅 昇, 三谷 和裕, 金森 誠治: エコーチップを用いたコンクリートの圧縮強度推定試験方法の提案, 日本建築学会技術報告集, 23 巻, 54 号, pp. 397-402, 2017
- [6-2] 青木 久, 松倉 公憲: エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察, 地形, 25 巻, 3 号, 267-276, 2004
- [6-3] 朽津 信明: エコーチップ試験による文化財石材の硬さに関する研究, 保存科学, No.46, pp.145-160, 2007
- [6-4] 中家渉, 青木 久, 早川 裕弼, 松倉 公憲: 連打法によるエコーチップ硬さ試験機の反発値と微小窪みとの関係, 筑波大学陸域環境研究センター報告, No.10, 29-36, 2009







## 第7章 実験結果を基にした木摺り漆喰天井の保有耐力に関する解析的検討

7.1 第7章の概要 .....	187
7.2 天井全体で見た各保有耐力・余裕度の算定（分析 7-1） .....	188
7.2.1 吊り天井下地部・漆喰部における評価の考え方 .....	188
7.2.2 吊り天井下地部・漆喰部における評価方法 .....	189
7.2.3 水平・鉛直方向における余裕度の評価結果と考察 .....	191
7.2.4 天井の許容耐力の考え方に則った場合の地震時想定荷重との関係 .....	193
7.2.5 本検討を踏まえた今後の展開 .....	194
7.3 木摺り漆喰部材の剥落抵抗性における統計学的手法を用いた分析（分析 7-2） .....	195
7.3.1 分析方法 .....	195
(1)実験 4-2 シリーズの結果を用いた分析（数量化 1 類） .....	195
(2)実験 5-2-2 における結果を用いた分析（拡張型数量化 1 類） .....	196
7.3.2 分析結果 .....	199
第7章のまとめ .....	203
第7章の参考文献 .....	205

### 7.1 第7章の概要

木製吊り下地が用いられた天井や木摺り漆喰天井などは、仕様の幅広さから画一的な耐力診断が困難とされてきたのは先に述べたとおりであり、その現状も相まって天井耐力に関する研究、知見は甚だ不足している状態である。本章までの中で、第3章では木摺り下地の変遷と一般的な仕様、第4章では木摺り下地と漆喰間における荷重伝達特性ならびに力学的特性の一般解、第5章では建築物Nを対象とした吊り天井下地接合部の力学的特性評価、ならびに現地から採取した実試験体による付着試験によって、天井部材に作用する主に鉛直方向の外力を想定、およびそれに対する試験体の挙動について分析を深めることが出来た。建築物Nの天井仕様は、当時の建築技術書と比較しても大きな乖離はなく堅実な納まりとなっていたことから、特定の建物を対象とした個別解でありつつも、木摺り漆喰天井部材の代表例として扱って差し障りのない仕様であると考えられる。故に、本研究の要素別の実験結果を基にして、当該工法の天井を部材単位でみた場合、一般にどれほどの耐力を持っているかを把握しておくことは、今後の歴史的建築物修復の検討を行ううえで有意義なものとなる。

そこで本章では、既存の木摺り漆喰部材の保有耐力を想定するための考え方を整理することを目的とし、以下に示す2つのアプローチを行った。

#### 分析 7-1

建築物Nの天井部材を代表例にとり、第4・5章で実施した吊り天井下地ならびに木摺り漆喰天井部材における実験値を基に、天井部材一般部を想定した保有耐力を推定する。加えて、平成25年国土交通省告示第771号：特定天井に関する告示を基に地震時想定荷重を算定し、それに対する部材の保有耐力の比を「余裕度」として算定し、木摺り漆喰吊り天井を現行の基準に当てはめた場合の潜在的な耐力を把握する。

#### 分析 7-2

木摺り漆喰天井部材の木摺り下地と漆喰の荷重伝達について、第4・5章では下地の仕様・材齢・食い込み深さ・破壊モードなどをパラメータにして実験的評価を行ってきた。ここでは、統計学的手法を用いて、木摺り漆喰部材における漆喰層の剥落を誘発させるような面外外力に対して、各パラメータが天井耐力に及ぼす影響を重み付けし、健全度評価の指標や効率的な補強方法を検討するための基礎的データを得る。

## 7.2 天井全体で見た各保有耐力・余裕度の算定（分析 7-1）

### 7.2.1 吊り天井下地・漆喰部における評価の考え方

木摺り漆喰工法における木摺り下地と漆喰の付着特性に関する物性は既報[前掲 1-10,23,4-1]、ならびに第4,5章でも整理したとおりである。一方で天井部材自体が面外変形した際の漆喰の追従性や付着性についての検討例はほとんどなく、天井面のひずみ量と仕上材の損傷状態における関係は未だ明らかになっていない。つまり、木製下地接合部の変形が弾性範囲内で収まっていたとしても、漆喰部分はその変形に追従してひび割れで済むか、追従できずに目透かし漆喰が破断するか、または漆喰の剛性によって下地の変形も阻害されるかは、漆喰の面剛性ならびに目透かし部分が複合的に影響する部分であるため、筆者としても今後の重要な研究課題としたい。

それを踏まえて本節では、表 7-1 の考え方を前提にして分析を進めることとした。

表 7-1 各保有耐力・余裕度の算定時に前提とする考え方

	吊り天井下地	木摺り漆喰天井
基となる結果	第5章・実験 5-1：各接合部試験	第5章・実験 5-2-2：付着試験
クライテリア	材料の接合部・界面部が最大強度発揮後の破壊状態にあるものを終局的な段階とみなす。	木摺り下地から漆喰が剥離する状態を終局的な段階とみなす。
保有耐力算定	各条件における試験体 3 体の最大荷重平均値×単位面積あたりの各接合部数	$R_1$ （目透かし部漆喰の想定引張応力度）×単位面積当たりの目透かし断面積 ※ $R_2$ （小幅板底面と漆喰の付着引張応力）は目透かし部分と比較して微小で、かつばらつきが大きいことから今回は算入しない。
作用している荷重の想定	吊り天井下地と木摺り漆喰の単位面積あたりの質量	漆喰層の面密度
想定地震力方向	鉛直（全接合部）、水平（A 吊木受け～D 野縁）	鉛直（面外方向と同義）

### 7.2.2 吊り天井下部・漆喰部における評価方法

第5章・実験5-1の各条件における試験体3体の最大荷重平均値を水平・鉛直方向でそれぞれ  $P_{Mh}$  ・  $P_{Mv}$  としたうえで、地震時に生じる水平・鉛直方向の荷重（以下、地震時想定水平荷重  $P_{Eh}$ 、地震時想定鉛直荷重  $P_{Ev}$ ）が各接合部に直接作用した際にどれほどの余裕があるかを評価した。概念的には地震時想定荷重に対する試験時最大荷重の比を余裕度  $M_h$  ・  $M_v$  として、接合部ごと、水平・鉛直方向ごとにそれぞれ式(7-1) (7-2)で評価した。 $P_{Eh}$ 、 $P_{Ev}$ は各接合部の推定固定荷重  $P_j$ を基にしたもので、それぞれ式(7-3)、(7-4)で算定した。

ここでの想定水平震度  $kh$ 、想定鉛直震度  $kv$  は、平成25年国土交通省告示第771号（以下、告示）の計算ルート[7-1]および解説資料「水平震度法」[7-2]の条件を踏まえた。まず  $P_{Eh}$  では地震地域係数  $Z=1.0$  とし、天井設置階は第3章・表3-1で調査した実物件の階数の平均2.14階を切り上げた3階建3階部と想定して安全側の検討とした。したがって水平震度  $kh$  は告示の計算式  $2.2rZ$  を適用し、 $2.2 \cdot 0.83 \cdot 1.0 \div 1.83$  とした。続いて  $P_{Ev}$  については、告示では柱スパンが15mを超える部位に限り、鉛直振動の影響を  $kv=1$  以上で評価することになっている。今回は、左官天井の面重量の大きさを勘案して耐荷重特性の基礎的検討を安全側で実施することとし、 $kv=1.00$  として評価を行うこととした。また常時固定荷重として  $P_j$  を加算した。

$$M_h = P_{Mh} / P_{Eh} \quad (7-1)$$

$$M_v = P_{Mv} / P_{Ev} \quad (7-2)$$

$$P_{Eh} = P_j \cdot kh \quad (7-3)$$

$$P_{Ev} = P_j \cdot kv + P_j \quad (7-4)$$

ここに、 $M_h$  : 水平方向余裕度

$M_v$  : 鉛直方向余裕度

$P_{Mh}$  : 水平方向接合部試験時の最大荷重平均(N)

$P_{Mv}$  : 鉛直方向接合部試験時の最大荷重平均(N)

$P_{Eh}$  : 地震時想定水平荷重 (N)

$P_{Ev}$  : 地震時想定鉛直荷重 (N)

$P_j$  : 推定固定荷重 (N)

$kh$  : 想定水平震度（ここでは1.83）

$kv$  : 想定鉛直震度（ここでは1.00）

表 7-2 に建築物 N を例とした吊り天井下地各接合部の推定固定荷重  $P_j$  の推定を示す。 $P_j$  は第 5 章・表 5-5 にて先行して算出した数値であり、本節にて用いる。 $P_j$  は天井部材の下層部から積算で算出しているため、表 7-2 では部材の上下が逆転していることに注意されたい。なお、目透かし部漆喰の  $P_j$  は吊り天井下地の如く接合部あたりの荷重が明確に区分できる部位ではないため、荷重ではなく応力度の表記としており、余裕度の算定も応力度を基に行った。また漆喰部分の耐力算定は安全側の検討をするため、目透かし断面積が実試験体の中でもっと小さい AMS-4 における木摺り下地仕様（小幅板幅 37.2×目透かし幅 5.5mm）によって想定した。(E)小幅板は目透かし幅が狭まると単位面積当たりの部材数・接合部が増えて有利側で作用してしまうため、全試験体の平均である 9mm で据え置いた。

表 7-2 建築物 N を例とした吊り天井下地各接合部の推定固定荷重  $P_j$  の推定

部材	間隔(mm) (現地調査より)	単位部材数 (本/m <sup>2</sup> )	単位面荷重(N/m <sup>2</sup> )		単位接合部数 (箇所/m <sup>2</sup> )	接合部 推定固定荷重 (N/箇所) $P_j$
			部材ごと	累積		
(F)漆喰	AMS-4 仕様（小幅板 幅 37.2×目透かし幅 5.5mm）	目透かし数 23.4	378	378	目透かし 断面積 <sup>注4)</sup> 128700mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	目透かし部漆喰 常時負担 応力度 <sup>注5)</sup> 0.003N/mm <sup>2</sup>
(E)小幅板	幅 36×厚 12 目透かし幅平均 9	22.2	37.7	416	60.9	7
(D)野縁	360～365 <sup>注1)</sup>	2.74	21.8	437	2.34	187
(C)野縁受け	572～1169 <sup>注1) 注2)</sup>	0.86	11.7	450	0.83	540
(B)吊木 <sup>注3)</sup>	313～1170 <sup>注1) 注2)</sup> (野縁方向) 554～1026 <sup>注1)</sup> (野縁受け方向)	0.83	20.4	473	0.72	568
(A)吊木受け	313～1169 <sup>注2)</sup> (躯体への留付ピッチ：1300)	0.86	37.0	-		

注1) 間隔の最大値を用いた（天井の面密度が均一であると仮定した場合、間隔が広いほうが接合部 1 カ所あたりの負担荷重は大きくなる）。

注2) この 3 部材の間隔は吊木を介して接続されているためほぼ同じとなる。

注3) 吊り長さは現地調査を踏まえて 2000mm と仮定した。

注4) 目透かし 5.5mm×1000mm×目透かし本数 23.4 本/m<sup>2</sup>

注5) 漆喰の面荷重 378N/m<sup>2</sup> を目透かし部の漆喰のみが負担したと仮定し、小数点第 4 位切り上げとした。

### 7.2.3 水平・鉛直方向における余裕度の評価結果と考察

表 7-3 に天井部位ごとの各荷重・余裕度、図 7-1 に天井部位ごとの余裕度を示す。第 5 章で論じた試験体記号や破壊性状を踏まえながら考察を行う。吊り天井下地の範囲内において、余裕度は最小で A-B-X の 2.42 倍、最大で C-D-Z の 25.1 倍であった。加力方向でみると A-B、B-C、C-D 各試験体全てで  $M_h$  よりも  $P_{Mv}$ 、ならびに  $M_v$  が最も大きくなっていることから、固定荷重（天井質量）の作用方向に耐えうる合理的な構成となっているといえる。

C-D は単位面積当たりの接合部数が多いことも相まって  $P_{Eh} \cdot P_{Ev}$  が小さく、かつ接合部にボルトが用いられていることにより  $M_h \cdot M_v$  が大きい傾向を示している。また木材の割裂等は認められず、C-D-Z-2,3 ではボルト破断が発生したことからボルト自体の引張耐力に接合部強度が支配された格好であり脆性的な破壊形態となったが、実験 5-1 の中で最大の  $M_s$  を記録した。ただし、経年によって木材のクリープや寸法変化、痩せなどによりボルトの締結度（トルク管理はなされていないと推察されるのでこのように呼称する）が変化し、荷重負担に不均衡が生じたり、部材面剛性が低下したりする可能性がある。また、当該接合部における  $P_{Eh}$  は仕口（渡り腰）の嵌合による負担が意図されていると考えられる故、ボルトの緩みや塑性伸びによって仕口の嵌合度が低下すると、地震時には意図しないせん断応力がボルトに生じることが想定される。

接合部に釘が使われている A-B、B-C、D-E において釘の破断は加力方向問わず確認されておらず、また  $P_{max}$  到達後の耐力低下が比較的穏やかであるため、脆性的な破壊ないし脱落は発生しにくいと考えられる。なお、吊木上下端接合部の X 方向は釘の引抜け方向である故に  $M_h$  が低い傾向を示しており、特に裏釘返しのない A-B-X は引抜きに脆弱であると考えられ、本試験の中で最低値を記録した。接合部全体を通して、仕口の種類や荷重方向によって余裕度にばらつきが大きくなったが、天井部材でみれば余裕度の小さい部分から損傷が起こりうる可能性が高いため、予防保全的に補強を行う場合は余裕度が低い仕口を優先し、吊り下地全体の耐力を底上げする方法がよいと考えられる。

木摺り漆喰の付着部分に当たる E-F の余裕度は、平均値だけを見れば各天井部位の中でも比較的大きい結果となった。理論上は漆喰層よりも吊り下地の方が先行破壊を起こす部位があることを示唆したが、先行研究における木摺り漆喰の破壊性状でそのような報告は確認されておらず、漆喰層の剥落による破損形態が事例のほとんどを占めていることは先述したとおりであり、標準偏差の大きさがそれを物語っているともいえる。今回の結果は純粋な鉛直荷重に対する抵抗力の程度と考えるのが妥当であるが、別の見方をすれば、木摺り漆喰工法自体は顕著に脆弱なものではなく、剥離・剥落を引き起こす水準にまで漆喰部分の耐力を低下させる要因が別で存在することを示唆しているとも捉えられる。それは構造体や下地の変形などの外力要因のものだけでなく、漆喰の目透かしへの食い込み不良、付着不良等の施工要因、雨漏りや下地の腐朽、ひび割れなどの経年要因に挙げられるようなミクロな領域に及ぶと考えられ、それによって生じた脆弱部分を早期に発見することも剥落防止に繋がる手段の一つといえる。解決策の一考察として第 6 章では非破壊検査手法を検討しており、実試験体において漆喰層の脆弱部とされる部分を判定することが出来ている。その実証として振動実験による破壊メカニズムの把握を行っており、脆弱部と剥落部の関係性について第 8 章にて触れている。

表 7-3 天井部位ごとの各荷重・余裕度（平均値）

部材	接合部 推定固定荷重 (N/箇所) $P_j$	地震時想定荷重 (N/箇所)		接合部試験最大荷重 (N/箇所)		地震時想定余裕度 (倍)	
		水平方向 $P_{Eh}$	鉛直方向 $P_{Ev}$	水平方向 $P_{Mh}$	鉛直方向 $P_{Mv}$	水平方向 $M_h$	鉛直方向 $M_v$
(A)吊木受け	568	1040	1136	X 方向 2520	11300	X 方向 2.42	9.95
(B)吊木				Y 方向 4900		Y 方向 4.71	
(C)野縁受け	540	989	1080	X 方向 3430	7630	X 方向 3.47	7.06
(D)野縁				Y 方向 5230		Y 方向 5.29	
(E)小幅板	187	343	374	X 方向 5570	9380	X 方向 16.3	25.1
(F)漆喰				Y 方向 5360		Y 方向 15.7	
(G)目透かし部	7	-	14	-	178	-	12.7
(H)目透かし部	漆喰	-	漆喰	-	漆喰	-	19.8
(I)常時負担	応力度	-	地震時負担	-	最大応力度	-	
(J)0.003N/mm <sup>2</sup>			0.006N/mm <sup>2</sup>		(実験 5-2-2)		
(K)0.119N/mm <sup>2</sup>							

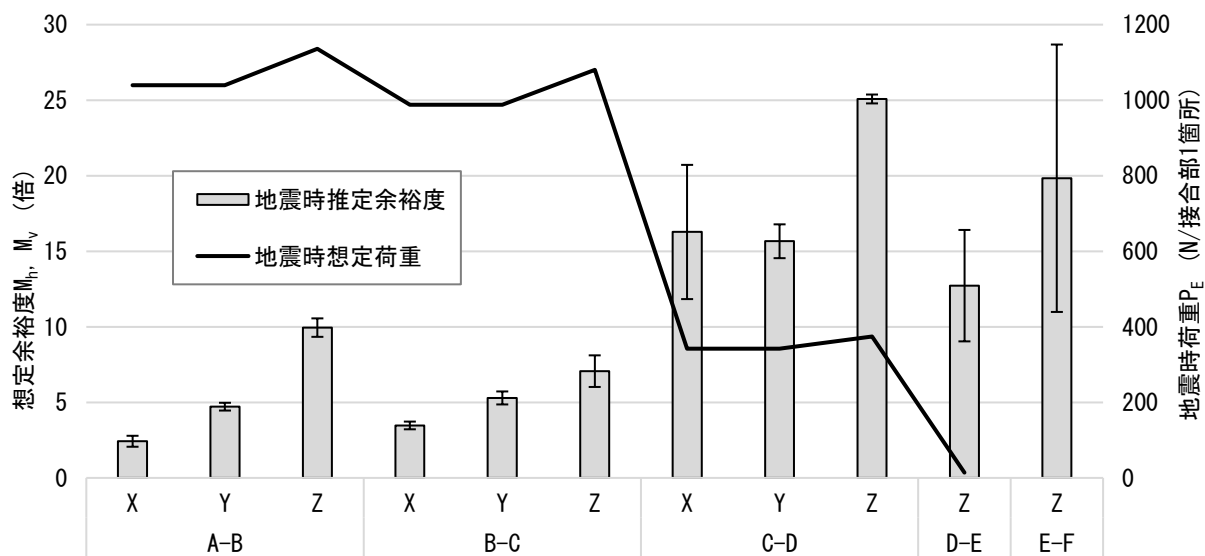


図 7-1 天井部位ごとの各余裕度（平均値、標準偏差 1σ 表記）



#### 7.2.4 天井の許容耐力の考え方に則った場合の地震時想定荷重との関係

図7-2に告示による許容耐力と地震時想定荷重の比較を示す。告示では、天井部材の構造耐力上の安全性についての余裕をみて、天井の許容耐力を損傷耐力（降伏耐力） $P_d$ の $2/3$ 以下に設定するように定めている[7-2]。その考え方に則ったうえで、前項の余裕度算定で最小となったA-B-Xを安全側の検討例として許容耐力を試算し、地震時想定荷重と比較した。

A-B-X-1～3の荷重変位曲線（第5章・図5-5a）より、3体それぞれの比例限界と認識できる1.5～1.8kNを損傷耐力 $P_d$ と定めると、 $2/3P_d$ は1.0～1.2kNとなる。その場合、前項で求めた(A)吊木受け～(B)吊木の接合部の水平方向地震時想定荷重 $P_{Eh}=1.04\text{kN}$ は $2/3P_d$ の範囲に概ね収まる。その結果を踏まえると、今回想定した $P_{Eh}$ 、 $P_{Ev}$ の範囲内では接合部の脱落等の終局的な事象が発生する可能性は低いと判断でき、限定的な条件、尺度にはなるが、現行基準における許容耐力の範囲内と解釈できる結果となった。今後は、天井部材全体による観点で検討を行う必要がある。

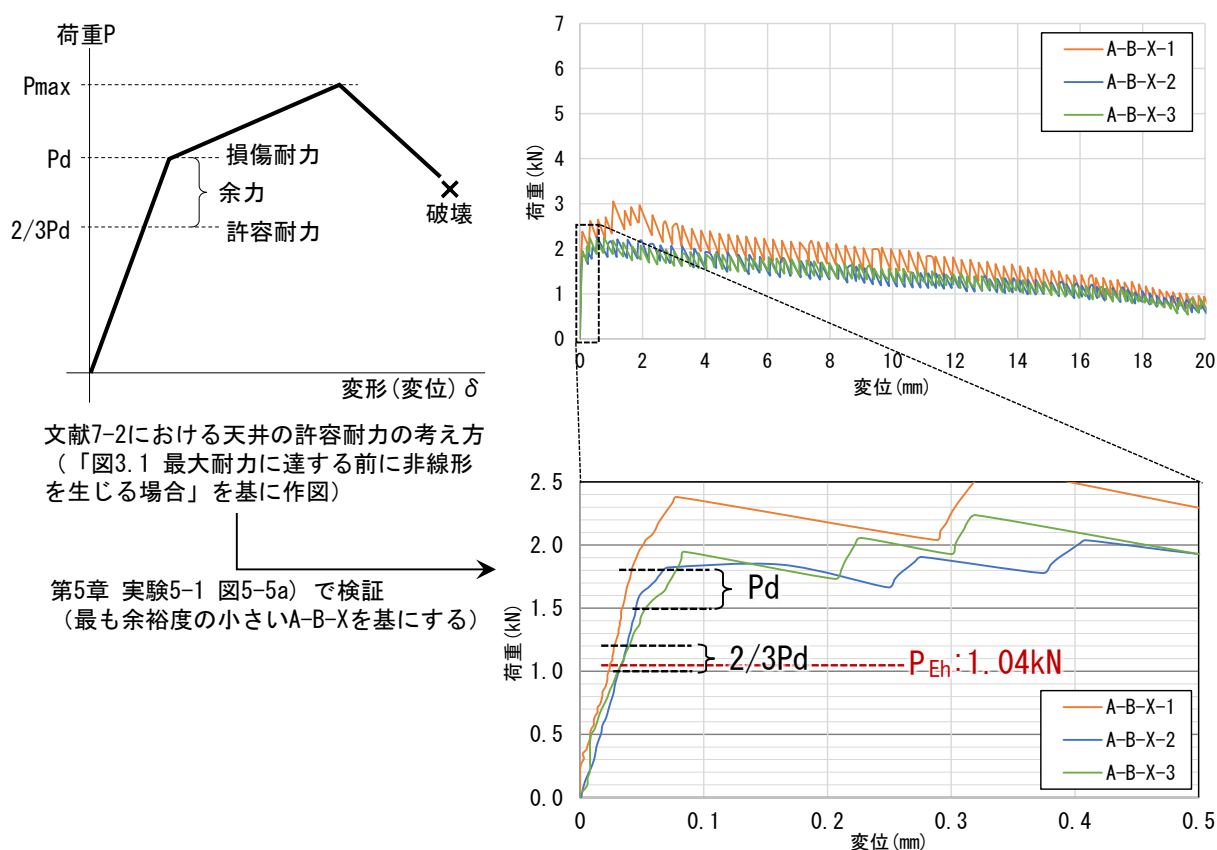


図7-2 告示による許容耐力と地震時想定荷重の比較

### 7.2.5 本検討を踏まえた今後の展開

本節の検証で用いた水平震度法に関連する告示では、地震時の水平動に対応するために天井下地への触れ留めの設置や、壁面とのクリアランスを確保するように記されている。すなわち、天井下地材が木材から鋼製材に切り替わって以降は天井部材自体に地震力を負担させるような仕様に段階的に変化しており、裏をかえせば壁体（躯体）と天井部材とで構造的に縁が切れていることによる両者の挙動の差異によって、非構造部材故にほかの部材よりも相対的に耐力への配慮が低い天井部材への予期せぬ外力の作用が破損の要因となっていることが多いといえる。これに対する解決案の一つとして、告示第3第3項仕様ルート（隙間なし、斜め部材なし）があり、これは壁体（躯体）と天井下地の接続を緊密にして天井に作用した地震時の荷重が躯体に流れるようにすると共に、層間変位時も躯体と同調させることで天井面に過度な外力が作用しないようにするものである。

以上を踏まえて JASS11 木工事を概観すると、その初版[前掲 3-135]より木製天井下地は壁面との取合い部を接続することが示されており、この仕様は現行の鋼製下地と明らかに異なる部分である。JASS11 に経験的な仕様が盛り込まれた背景を持つならば、天井下地と壁面の接続は早い段階から実施されていた可能性がある。これは左官仕上天井に付随する蛇腹とその下地に端緒を見出すことができ、乾式材で構成された現行の内装材よりも壁と天井に連続的な意匠を施す関係上、その下地も構造的な連続性が高かったと推察される。また、このことは先述の告示第3第3項仕様ルートとの類似性を有することへの仮説を導出でき、既存天井部材の特性を生かした活用案策定の一助となる可能性がある。そのため天井一般部をはじめ、端部、折り上げ部における面内・面外荷重の抵抗性、層間変位の挙動確認は不可欠であり、損傷の許容度を含めた検討が必要である。

### 7.3 木摺り漆喰部材の剥落抵抗性における統計学的手法を用いた分析（分析 7-2）

#### 7.3.1 分析方法

##### (1) 実験 4-2 シリーズの結果を用いた分析（数量化 1 類）

第4章・実験 4-2 シリーズの木摺り漆喰試験体を用いた引張試験にて、木摺り下地の仕様（小幅板断面形状。目透かし幅は 9mm で固定）、漆喰の材齢、食い込み深さ、破壊モード等をパラメータにして諸物性を評価した。ここでは各パラメータが耐荷重性に及ぼす影響の程度を明らかにするため、統計学的手法を用いた各パラメータの寄与率算定、および回帰式による漆喰層剥離時の荷重推定（以下、推定最大荷重）を試みた。この場合、回帰式における目的変数は推定最大荷重となるため量的データであるが、説明変数は付着の「あり」「なし」や、食い込み深さ「D」「S」といった質的データであるため、一般的な重回帰分析は適用できない。そのため、今回は質的データを量的データへ置き換えて分析を行う考え方である数量化 1 類を用いた[7-3]。

図 7-3 に数量化 1 類の分析の流れ、図 7-4 に各実験を基にした回帰式の考え方を示す。まず説明変数である質的データ（カテゴリデータ）をダミー変数（Yes=1、No=0）にて量的データに置換したうえで、重回帰分析を行い定数項、回帰係数を得た。目的変数への貢献度を示す数値（以下、カテゴリスコア）を算出し、回帰式を導いた。加えて、各項目のカテゴリスコアにおける最大値と最小値の差（以下、レンジ）を求め、全レンジ総和に対する各項目のレンジの比率から、推定最大荷重への寄与率を評価した。また、導いた回帰式をもとにサンプルスコア（以下、推定値）を求め、最大荷重（以下、実測値）と比較し、分析精度を評価した。

なお、今回は実験データを基に分析を行うため、説明変数に破壊モードを入れている。既存部材の強度推定を考えた場合、破壊モードを説明変数に含めることは破壊試験が前提となるため推奨されないと考えられるが、本分析では破壊モードの推定最大荷重への影響度を評価したり、損傷状態の天井が有していた保有耐力を写真などから試算したりする可能性を見据えて斯様な方法を取った。

(2)実験 5-2-2 における結果を用いた分析（拡張型数量化 1 類）

第5章・実験 5-2-2 では、実試験体 AMS-1 を用いた漆喰の引張試験を実施した。基本的な試験内容は実験 4-2 シリーズと同様であるが、現地採取材である故に下げ葎部分や塗り重ね界面での破壊モードが生じており、分析にあたっては前項と破壊モードの条件を揃え、検討要素を木摺り下地・漆喰の界面に絞るために、「破断」「破断+抜け」「抜け」の3要素のデータを抽出して行うこととした。

目透かし幅は平均こそ 9.4mm で実験 4-2 シリーズと大差はないが実測は 6~14mm とばらつきがあり、引張試験時は目透かし幅実測値をパラメータに取り入れた。実際の天井を分析する場合に斯様な状況が生じうる可能性を鑑みて、当分析では目透かし幅の量的データのまま説明変数に取り入れることとしたが、その場合は数量化 1 類では適用不可となるため、拡張型数量化 1 類を用いた[7-4]。数量化 1 類との差異は、説明変数に質的・量的の両データが混在する場合、量的データを偏差データ（各データと平均値の差分）に変換した値にすることで分析が可能になる点である。ただし、説明変数に用いる量的データは実測値そのままのほか、分数・対数・平方根での変換値で目的変数との単回帰分析を行って、相関が強い変換値をあらかじめ確認することが推奨されている[7-5]。実験 5-2-2 における目透かし幅（説明変数）と最大荷重（目的変数）の相関係数 R は、実測値：0.449、分数変換：-0.423、対数変換：0.439、平方根変換：0.445 であり、実測値が最も高い相関を示したため、ここでは実測値の偏差データを用いることとした。

量的データの回帰係数（アイテムスコア）は重回帰分析によって得られた係数をそのまま適用できるほか、カテゴリデータの変数変換・分析方法、定数項の算出法は数量化 1 類（図 7-3）と同様であるため、分析の流れは前項に譲る。

第7章 実験結果を基にした木摺り漆喰天井の保有耐力に関する解析的検討

No	説明変数（カテゴリデータ）											目的変数	
	項目	テーパ角			食い込み		材齢			破壊モード			最大荷重
1	カテゴリ	45°			D		S10			破断			26.8
⋮		⋮			⋮		⋮			⋮			⋮
103		90°			S		A28			抜け			14.0
⋮		⋮			⋮		⋮			⋮			⋮

①ダミー変数変換

No	説明変数（カテゴリデータ）											目的変数	
	項目	テーパ角			食い込み		材齢			破壊モード			最大荷重
	カテゴリ	45°	60°	90°	D	S	S10	S28	A28	破断	破断+ 抜け	抜け	
	ダミー変数	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	
1		1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	26.8
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
103		0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	14.0
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

②各項目から任意のカテゴリを1つ削除

No	説明変数（カテゴリデータ）											目的変数	
	項目	テーパ角			食い込み		材齢			破壊モード			最大荷重
	カテゴリ	45°	60°		D		S10	S28		破断	破断+ 抜け		
	ダミー変数	$x_1$	$x_2$		$x_4$		$x_6$	$x_7$		$x_9$	$x_{10}$		
1		1	0		1		1	0		1	0		26.8
⋮		⋮	⋮		⋮		⋮	⋮		⋮	⋮		⋮
103		0	0		0		0	0		0	0		14.0
⋮		⋮	⋮		⋮		⋮	⋮		⋮	⋮		⋮

③重回帰分析実行、  
削除カテゴリ復活

説明変数（カテゴリデータ）													備考
項目		テーパ角			食い込み		材齢			破壊モード			
カテゴリ		45°	60°	90°	D	S	S10	S28	A28	破断	破断+ 抜け	抜け	
③回帰係数		1.18	7.65	0	3.91	0	-8.90	3.41	0	13.8	11.3	0	復活カテゴリの係数は0とする
④データ数		36	36	36	54	54	36	36	36	78	8	22	実験データより抽出
④項目別加重平均		2.94			1.96		-1.83			10.8			-
⑤カテゴリスコア		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	回帰係数から加重平均を差し引いたものがカテゴリスコアとなる
		-1.77	4.71	-2.94	1.96	-1.96	-7.07	5.24	1.83	3.00	0.52	-10.8	
⑥カテゴリ平均		27.9	32.0	20.4	28.8	24.7	20.7	30.6	29.0	29.5	28.4	16.6	実験データ実測値より算出
⑥相関の確認		0.851(OK)			1.00(OK)		0.992(OK)			0.996(OK)			スコアと実測値の単相関係数を算出
⑦レンジ		7.65			3.91		12.3			13.8			目的変数への影響度
⑧寄与率(%)		20.3			10.4		32.7			36.7			全レンジに対する各レンジの比率

- ①質的データの説明変数をダミー変数（Yes=1, No=0）を用いて量的データ化する。
- ②一時的に各項目から任意のカテゴリ1つを削除する。
- （例：テーパ角から90°を削除しても、45° = 0、60° = 0であれば90°と判断できる）
- ③重回帰分析を実行し、各カテゴリの回帰係数を算出。削除したカテゴリを復活させ、係数に0をおく。
- 定数項 $b_1$ は実測値全データの平均を用いる。
- ④各カテゴリのデータ個数を踏まえ、③で求めた回帰係数との加重平均を算出する。
- ⑤各カテゴリの③で求めた回帰係数から、そのカテゴリが帰属する項目の④で求めた加重平均を差し引き、カテゴリスコア（ $a_1 \sim a_{11}$ ）を求める。カテゴリスコアは目的変数に対する貢献度を示す。
- ⑥各項目のカテゴリスコアとカテゴリ別実測値平均の相関を評価し、両者に矛盾が無いことを確認する。
- ⑦同一項目内のカテゴリスコアにおける最大値から最小値を差し引き、レンジを求める。
- ⑧全レンジ合計に対する各項目レンジの比によって、寄与率を求める。

図 7-3 数量化1類の分析の流れ（実験 4-2-1 の結果を用いた例）

● 実験4-2-1

$$y = \underbrace{b_1}_{\text{定数項}} + \underbrace{a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3}_{\text{テーパ角}} + \underbrace{a_4x_4 + a_5x_5}_{\text{食い込み深さ}} + \underbrace{a_6x_6 + a_7x_7 + a_8x_8}_{\text{破壊モード}} + \underbrace{a_9x_9 + a_{10}x_{10} + a_{11}x_{11}}_{\text{材齢}}$$

ここに、  
 $y$ ：目的変数（推定最大荷重）  
 $b_1$ ：定数項（実測値平均）  
 $a_1 \sim a_{11}$ ：カテゴリースコア  
 $x_1 \sim x_{11}$ ：ダミー変数  
 (Yes=1, No=0)

● 実験4-2-2

$$y = \underbrace{b_2}_{\text{定数項}} + \underbrace{a_{12}x_{12} + a_{13}x_{13}}_{\text{引張付着抑制}} + \underbrace{a_{14}x_{14} + a_{15}x_{15}}_{\text{テーパ角}} + \underbrace{a_{16}x_{16} + a_{17}x_{17}}_{\text{食い込み深さ}} + \underbrace{a_{18}x_{18} + a_{19}x_{19} + a_{20}x_{20}}_{\text{破壊モード}}$$

ここに、  
 $y$ ：目的変数（推定最大荷重）  
 $b_2$ ：定数項（実測値平均）  
 $a_{12} \sim a_{20}$ ：カテゴリースコア  
 $x_{12} \sim x_{20}$ ：ダミー変数  
 (Yes=1, No=0)

● 実験5-2-2

$$y = \underbrace{b_3}_{\text{定数項}} + \underbrace{a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22}}_{\text{引張付着}} + \underbrace{a_{23}x_{23} + a_{24}x_{24} + a_{25}x_{25}}_{\text{破壊モード}} + \underbrace{a_{26}x_{26}}_{\text{目透かし幅}}$$

ここに、  
 $y$ ：目的変数（推定最大荷重）  
 $b_3$ ：定数項（実測値平均）  
 $a_{21} \sim a_{25}$ ：カテゴリースコア  
 $x_{21} \sim x_{25}$ ：ダミー変数  
 (Yes=1, No=0)  
 $a_{26}$ ：アイテムスコア  
 $x_{26}$ ：目透かし幅偏差

図 7-4 各実験を基にした回帰式の考え方

### 7.3.2 分析結果

表 7-4 に各分析値とカテゴリスコアの算出結果、図 7-5 に各種パラメータ・実験結果を基にしたカテゴリ（アイテム）スコア、図 7-6 に導出したカテゴリ（アイテム）スコアより求めた推定最大荷重への寄与率を示す。表 7-4 右端の相関係数より、各カテゴリスコアとカテゴリ平均（実測値平均）との間には強い相関を有することが確認でき、矛盾のない回帰式が得られたため、それらを踏まえて、以下の考察を行う。

所定の項目の推定値は、ダミー変数 1 に該当するカテゴリスコアによって導出できる。すなわち、該当するカテゴリスコアの絶対値・正負によって、それが帰属するカテゴリの耐荷重性への影響度の大きさ、良悪を計り知ることができる。その視点でみると、実験 4-2-1、4-2-2 の分析結果は第 4 章試験結果と概ね整合性がとれており、テーパー角、食い込み深さ、材齢のカテゴリスコアは妥当な水準と判断できる。実験 4-2-2、5-2-2 においては引張付着の要素が 30~50%程度の影響を及ぼしていることがわかり、応力度でみると小さいものであるが、付着しうる面積が大きいために作用していれば耐力に寄与するものと解釈できる。ただし表 7-4 からみまわるとおり、実験 5-2-2 において引張付着が作用していたのは全体の 2 割程度（41 体中 8 体）であるため、天井面全体で見えた場合は相当に偏りがあるものと推察される。故に、先述しているように漆喰部分の保有耐力の算定は目透かしの断面積で実施するのが安全側の判断であり、引張付着の作用部分、および剥離が進んで脆弱になっている部分の判定は打撃試験（第 6 章）などを行って総合的に評価することがよいと考える。

今回は破壊モードの 3 カテゴリ（破断、抜け、破断+抜け）を説明変数に含めて分析を行った。その結果、図 7-6 より、3 実験共に破壊モードの推定最大荷重への寄与率が比較的高い結果となったことから、耐力診断時に無視できない要素であることがわかった。これは、損傷を起こした天井の被害調査時にも適用でき、損傷部分の破壊モードを確認することで、「当該の天井がどのような施工をされて損傷を起こしたか、今後起こしうるか」という部分を評価できる。一方で予防保全的な考えをもって健全度評価・保有耐力を行う場合は、回帰式に破壊モードが含まれているが故に既存部材の破壊試験に伴う可能性があり不都合が生ずる場合がある。そのため、漆喰の食い込み部分の状態評価（第 6 章）と発生しうる破壊モードの関連付けを行い、強度推定は推定される破壊モード別に設けた回帰式によって実施する、といった複数の分析が必要になると考えられる。今回の回帰式で説明変数とした各カテゴリにおいて、最大荷重への影響度が高い要素を重点的に補強することが出来れば、木摺り漆喰部材の効率的な耐力向上を図れることが期待できる。

なお、破断型の破壊モードはスサの架橋効果等によって安全側の破壊形態であることは第 4 章でも触れており、実験 4-2-1 および 2 のカテゴリスコアはそれが顕現した結果となった一方で、実験 5-2-2 では破断側のカテゴリスコアが負の値を示した。これは、抜け型を含むカテゴリ平均が高いことによって相対的に破断型のカテゴリスコアが低下したことが要因と考えられる。実験 5-2-2 は試験対象が実試験体であるため、全データがテーパー断面を有しているのも元来抜け型が生じにくい下地条件であるが、目透かし幅が大きい場合は漆喰の開き（目透かしへの供給）が不足することによって、下地と漆喰の嵌合による抵抗が漆喰強度を下回る可能性が考えられ、“破壊荷重が大きい抜け型”が生じたことが推察される。

続いて図 7-7 に、算定した 3 回帰式による実測値と推定最大荷重の関係を示す。両値の一致度が高い

ほど散布図の対角線に近い位置にプロットされる。現状での決定係数は 0.30～0.44 であり、プロットの位置も対角線に対し広範囲に分布している。したがって、今回の結果から得られた回帰式の予測精度は現状で低い水準に留まっており、当該工法の個体差や、ばらつきの大きさが顕在化したと解釈でき改善の余地はあるが、各パラメータから木摺り漆喰部材の保有耐力を推定できる可能性は示された。

別の見方として、散布図の対角線を分水嶺に上側を安全側判定（推定値＜実測値）、下側を危険側判定（実測値＜推定値）とした場合、一部のプロットは安全側領域へ広がっていると解釈ができ、ばらつきの大きい材料の強度を推定する場合は、「精度の高さ」よりも「安全側への判定」の方が高い優先度を持たせる必要がある、という考え方もできる。今後は、各領域のプロットに帰属する実験結果から、説明変数として顕在化していない可能性のある要因を検証してゆく必要がある。

表 7-4 各分析値とカテゴリスコアの算出結果

分析元データ					分析結果				相関確認
実験 データ	項目	カテゴリ	データ 個数	カテゴリ 平均(N)	定数項	カテゴリ スコア		レンジ (寄与率)	相関係数 (判断)
4-2-1	テーパー 角	45°	36	27.9	$b_1$ 26.8	$a_1$	-1.77	7.65 (20.3%)	0.851 (OK)
		60°	36	32.0		$a_2$	4.71		
		90°	36	20.4		$a_3$	-2.94		
	漆喰食い 込み深さ	D	54	28.8		$a_4$	1.96	3.91 (10.4%)	1.00 (OK)
		S	54	24.7		$a_5$	-1.96		
	材齢	N10	36	20.7		$a_6$	-7.07	12.3 (32.7%)	0.992 (OK)
		N28	36	30.6		$a_7$	5.24		
		A28	36	29.0		$a_8$	1.83		
	破壊 モード	破断	78	29.5		$a_9$	3.00	13.8 (36.7%)	0.996 (OK)
		破断＋抜け	8	28.4		$a_{10}$	0.52		
		抜け	22	16.6		$a_{11}$	-10.8		
4-2-2	引張付着 (R <sub>2</sub> )抑制	素地	24	57.1	$b_2$ 47.7	$a_{12}$	7.60	15.2 (27.3%)	1.00 (OK)
		付着抑制	24	38.3		$a_{13}$	-7.60		
	テーパー 角	60°	24	54.3		$a_{14}$	3.85	7.69 (13.8%)	1.00 (OK)
		90°	24	41.1		$a_{15}$	-3.85		
	漆喰食い 込み深さ	D	24	55.2		$a_{16}$	7.10	14.2 (25.5%)	1.00 (OK)
		S	24	40.2		$a_{17}$	-7.10		
	破壊 モード	破断	35	53.2		$a_{18}$	3.88	18.7 (33.5%)	0.987 (OK)
		破断＋抜け	4	50.9		$a_{19}$	-0.627		
		抜け	9	24.9		$a_{20}$	-14.8		
5-2-2	引張付着 (R <sub>2</sub> )	あり	8	57.8	$b_3$ 48.4	$a_{21}$	12.3	15.2 (55.1%)	1.00 (OK)
		なし	33	35.7		$a_{22}$	-2.98		
	破壊 モード	破断	31	36.8		$a_{23}$	-1.40	6.48 (23.4%)	0.873 (OK)
		破断＋抜け	6	63.8		$a_{24}$	5.08		
		抜け	4	65.2		$a_{25}$	3.23		
	目透かし幅	偏差	41	-		$a_{26}$	5.97 <sup>※)</sup>	5.97 (21.5%)	-

※) 量的データの回帰係数なのでアイテムスコアであるが便宜上当欄に記載した。



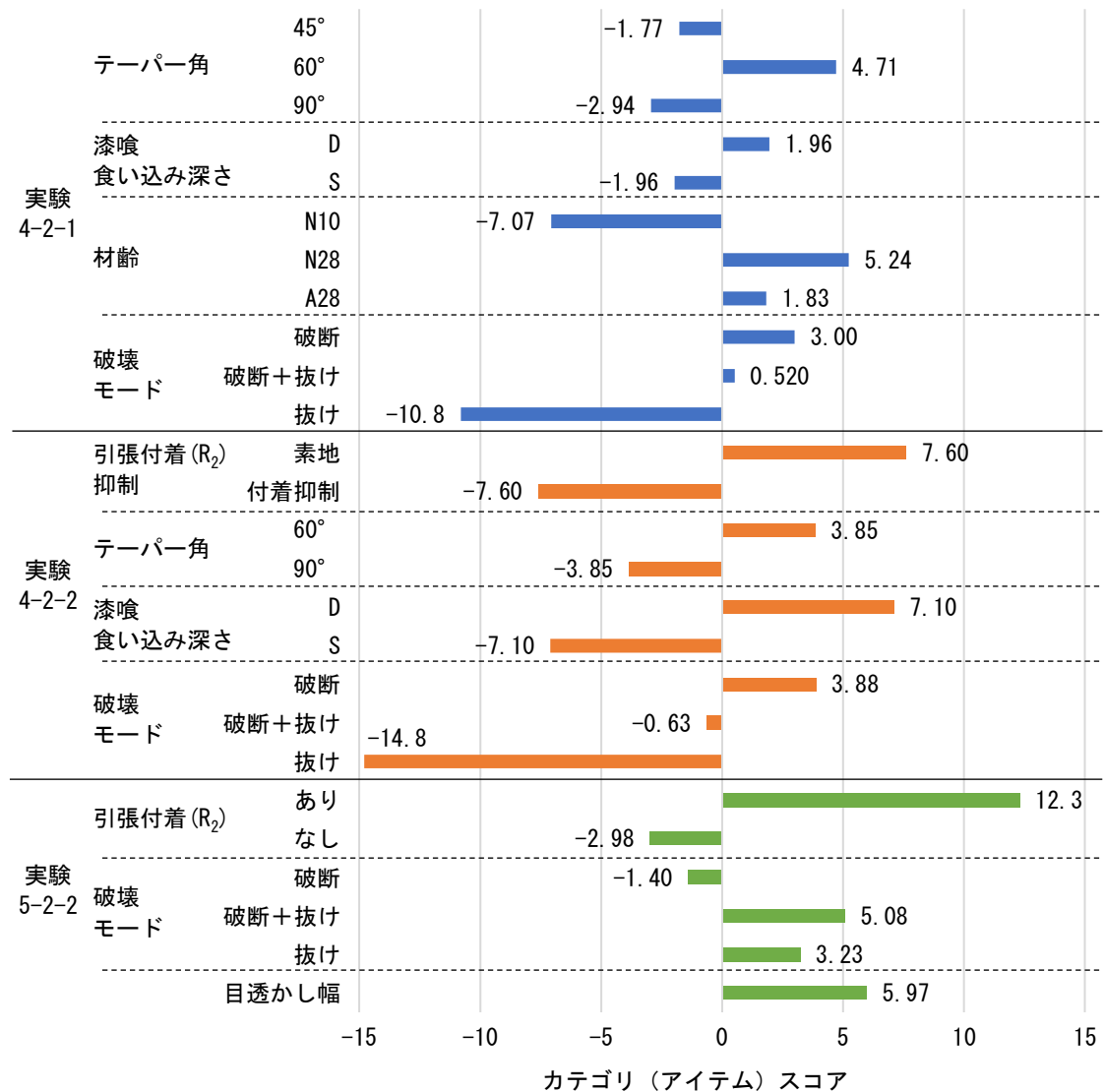


図 7-5 各種パラメータ・実験結果を基にしたカテゴリ（アイテム）スコア

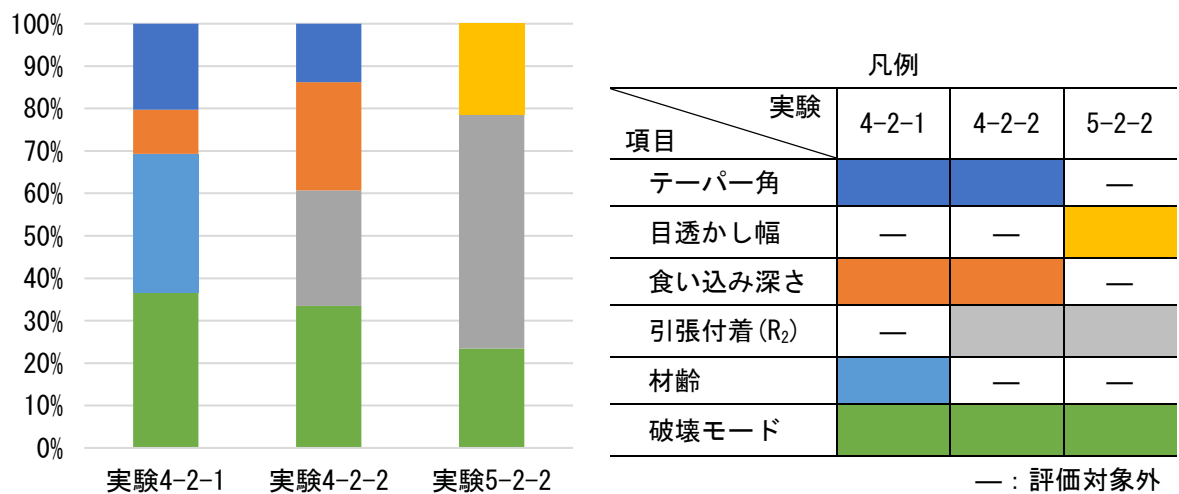


図 7-6 導出したカテゴリ（アイテム）スコアより求めた推定最大荷重への寄与率

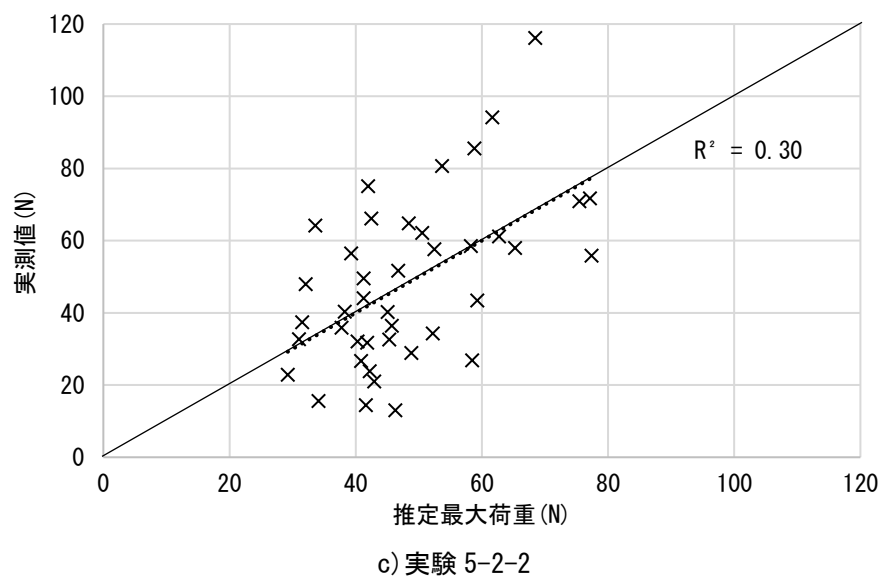
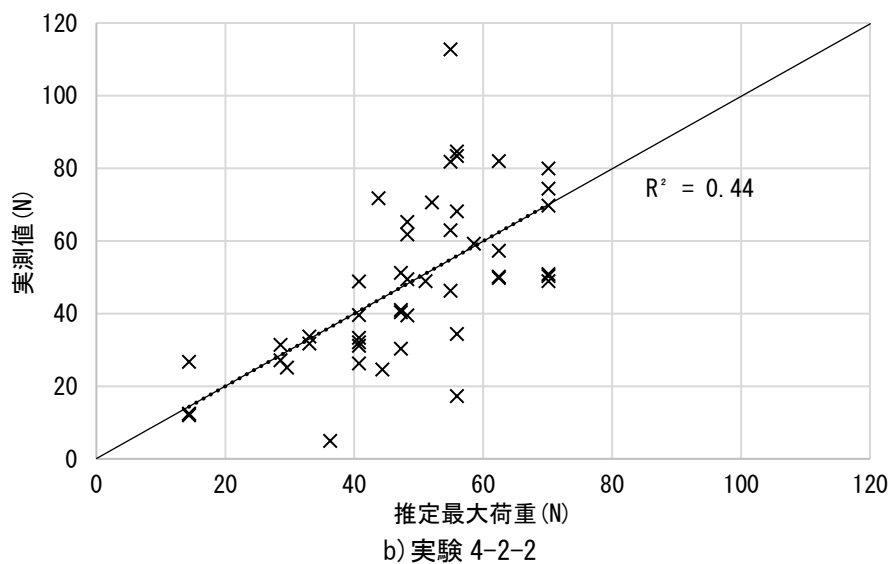
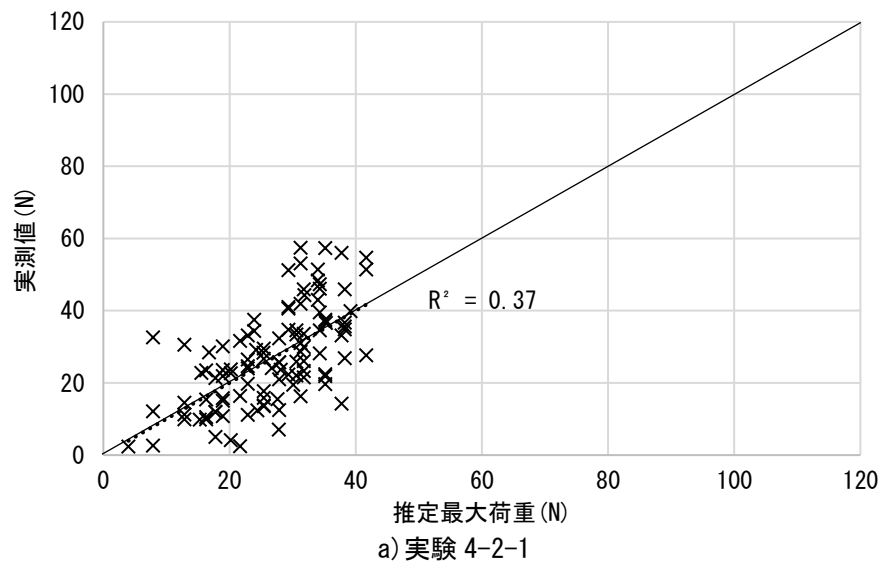


図 7-7 算定した3つの回帰式による実測値と推定最大荷重の関係

## 第7章のまとめ

建築物 N の天井仕様は、当時の建築技術書と比較しても大きな乖離はなく堅実な納まりであったため、特定の建物を対象とした個別解でありつつも、木摺り漆喰天井部材の代表例として扱って差し障りのない仕様と解釈できる。故に、本研究の要素別の実験結果を基にして、当該工法天井を部材単位でみた場合、一般にどれほどの耐力を持っているかを把握しておくことは、今後の歴史的建築物修復の検討を行ううえで有意義なものとなる。

本章では、第4章の新規作製の試験体、第5章の模擬試験体・実試験体で実施した天井各部材の強度試験結果を踏まえ、現状で知見が不足していた木製吊り天井下地ならびに木摺り漆喰天井の保有耐力推定を2つの方法で試みたものである。分析7-1は、木製吊り天井下地の接合部試験結果を中心に用いて、接合部に作用する地震時想定荷重に対する接合部強度（保有耐力）の比を余裕度として評価し、木製下地の潜在的な耐力を把握した。分析7-2は、木摺り下地と漆喰の荷重伝達について、漆喰引張試験で得られた各パラメータと最大荷重データを基にした統計学的分析（数量化1類理論）によって回帰式を得ると共に、漆喰が剥離するまでの強度に及ぼす各パラメータの重み付けを行った。これら一連の検証で得られた知見を以下に示す。

- 1) 各接合部の余裕度は、最小で A-B-X（吊木受け～吊木接合部の野縁方向）の 2.42 倍、最大で C-D-Z（野縁受け～野縁接合部の鉛直方向）の 25.1 倍であった。各接合部の試験体全てで水平方向よりも鉛直方向の余裕度が最も大きくなっていることから、固定荷重（天井質量）の作用方向に耐えうる合理的な構成となっているといえる。また、A-B-X（最小余裕度）の試験結果を告示の基準にのっとり損傷耐力  $P_d$  と許容耐力  $2/3P_d$  の考え方に当てはめたところ、水平方向地震時想定荷重  $P_{Eh}$  は  $2/3P_d$  の範囲に概ね収まったため、今回想定した  $P_{Eh}$ 、 $P_{Ev}$  の範囲内では接合部の脱落等の終局的な事象が発生する可能性は低いと判断でき、限定的な条件・尺度にはなるが、現行基準における許容耐力の範囲内と解釈できる結果となった。
- 2) 釘が用いられた接合部は、引き抜け方向の外力に対する抵抗に弱く、一般論から逸脱しない結果となった。特に A-B-X は釘裏返しが無いため、引き抜きに対して特に脆弱である。またボルトによる接合部分は、ボルト軸に対するせん断荷重をホゾ（渡り腮）によって受ける構造となっており、3 軸共に余裕度はほかの接合部と比較して高い傾向を示した。一方で、ボルトの場合は経年による木材の痩せなどにより締結度が低下するため、ホゾ部分の嵌合程度も変化すると考えられ、ボルトに意図しないせん断応力が作用する可能性があるため、接合部耐力はボルト強度に支配されると考えられる。

- 3) 木摺りと漆喰の界面に当たる鉛直方向の余裕度は、平均値で判断すると各天井部位の中でも比較的大きい結果となった。これは計算上、漆喰層よりも吊り天井下地のほうが先行して破壊される部位が存在することを示唆しているが、先行研究においてそのような破壊性状は報告されていない。故に今回の結果は純粋な鉛直荷重に対する余裕度と判断することが妥当であり、剥離・剥落を誘発される要因が別で存在すると考えられる。例として漆喰の施工不良、雨漏り等による外的要因や、疲労の蓄積によるひび割れなどが挙げられ、第6章で論じた非破壊試験手法等と組み合わせで診断することが必要といえる。
- 4) 小幅板断面形状、漆喰食い込み深さ、目透かし幅、破壊モード等のパラメータを説明変数に、漆喰剥離時の最大荷重を目的変数として回帰式を求め、各パラメータの最大荷重への影響度（寄与率）と、最大荷重の推定を試みた。本分析における説明変数は基本的に質的データであるため、数量化1 類理論に則って実施した。その結果、回帰式の決定係数は0.3~0.4程度にとどまり、ばらつきの大きい当該工法の特徴が顕在化した形となったものの、各パラメータからの強度推定ができる可能性を示した。
- 5) 各パラメータの最大荷重への影響度において、引張付着は27~55%程度の影響を及ぼしていることがわかった。応力度でみると小さいものであるが、付着しうる面積が広いために作用していれば強度に寄与するものと解釈できる。ただし実験 5-2-2 において引張付着が作用していたのは全体の2割程度であり、非常に偏りがあるものと推察される。故に、保有耐力の算定は目透かしの断面積で実施するのが安全側の判断であり、引張付着の作用部分、および剥離が進んで脆弱になっている部分の判定は打撃試験（第6章）などで行って総合的に評価することがよいと考える。
- 6) 破壊モードの最大荷重への影響度を評価するため、今回算出した回帰式の説明変数の一部に破壊モードを含めた。その結果、最大荷重に影響する各パラメータ中 23~37%程度を占めており、耐力評価上無視できないことがわかった。本研究における各破壊モードは外観を基に判断しているため、損傷を起こした天井の被害調査時にも適用する場合は損傷部分の破壊モードを確認することで、「当該の天井がどのような破壊をしたか、今後起こしうるか」という部分を評価できる。一方で予防保全的な考えをもって健全度評価・保有耐力を行う際は、回帰式に破壊モードが含まれているが故に既存部材の破壊試験が伴う可能性があり不都合が生ずる場合がある。そのため、漆喰食い込み部分の状態評価（第6章）と発生しうる破壊モードの関連付けを行い、強度推定は推定される破壊モード別に設けた回帰式によって実施する、などの複数の分析が必要になると考えられる。

## 第7章の参考文献

- [7-1] 特定天井及び特定天井の構造体力上安全な構造方法を定める件（平成25年国土交通省告示第771号）
- [7-2] 国土技術政策総合研究所：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説，国土技術政策総合研究所資料，第751号，2013
- [7-3] 統計分析研究所：多変量解析の手法別解説-数量化1類，  
[https://istat.co.jp/ta\\_commentary/method1](https://istat.co.jp/ta_commentary/method1), (最終閲覧日:2023.4.9)
- [7-4] 統計分析研究所：多変量解析の手法別解説-拡張型数量化1類，  
[https://istat.co.jp/ta\\_commentary/advanced1](https://istat.co.jp/ta_commentary/advanced1), (最終閲覧日:2023.4.9)
- [7-5] 野本篤史，酒井久和，梶谷義雄：複数の地震災害記録の統計分析による道路盛土復旧予測モデルの構築，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 76, No. 4(地震工学論文集第39巻), pp. I\_409-I\_419, 2020





## 第8章 木摺り漆喰天井部材における 外力抵抗条件ごとの剥離・剥落状況の実験的検証

8.1 第8章概説 .....	209
8.2 振動試験準備の概要 .....	209
8.2.1 振動装置の概要 .....	209
8.2.2 評価対象範囲 .....	209
8.2.3 試験体仕様 .....	210
8.2.4 試験体作製概要 .....	214
(1)下地の組み立て .....	214
(2)漆喰の施工 .....	214
(3)振動試験の準備 .....	214
8.3 振動試験の概要 .....	219
8.3.1 加振前後における模擬振動試験体の画像解析 .....	219
8.3.2 加振条件 .....	219
8.3.3 試験体の記録条件 .....	221
8.4 画像解析・振動試験結果・考察 .....	222
8.4.1 画像解析結果 .....	222
8.4.2 振動試験の結果 .....	223
(1)模擬振動試験体 .....	223
(1.1)基本条件 .....	223
(1.2)付着抑制条件 .....	227
(1.3)食込抑制条件 .....	232
(1.4)漆喰強度抑制条件 .....	236
(2)実試験体 .....	241
(2.1)AMS-2 .....	241
(2.2)AMS-4 .....	246
(2.3)AMS-4 における剥落形態と非破壊試験による脆弱部判定結果との比較 .....	255
(3)本試験の剥落性状を踏まえた今後の実験について .....	256
8.5 第8章のまとめ .....	257



## 8.1 第 8 章概説

本章までに、木摺り漆喰天井の力学的特性に関して新規材と経年材による検証（第 4・5 章）、非破壊試験による施工状態・劣化状態の評価（第 6 章）、特定天井の告示における水平震度法や統計解析による保有耐力評価（第 7 章）を行ってきた。第 8 章では、それらを踏まえて天井試験体に所定の振動を与え、ここまでの検討結果との関連性の確認や、耐震性評価および木摺り漆喰天井の破損時の状況（漆喰食い込み部の損傷、剥落のメカニズム）を把握することを目的とする。

## 8.2 振動試験準備の概要

### 8.2.1 振動装置の概要

写真 8-1 に 3 次元振動装置を示す。本試験は工学院大学に設置されている装置を使用した。3 次元振動台は一辺 1500mm の正方形ステージを持ち、最大出力は 980gal（3 軸同時出力可）、最大変位は原点  $\pm 150\text{mm}$ （3 軸）、最大積載量は 500kg である。振動架台は鋼材製の一辺約 1200mm の立方体形状で、接合部は全て F10T 高力ボルトで締結しており、十分な剛体であることを前提として試験実施できるように設計した。

### 8.2.2 評価対象範囲

吊り天井下地接合部試験（吊木受け～木摺り下地）の結果および木摺り漆喰引張試験結果に基づいた保有耐力および余裕度評価結果、当該工法における地震時の破損事例（第 2 章で詳説）を踏まえて、漆喰層の剥落に焦点を絞った検証とした。その理由として、第 7 章における余裕度評価結果では一部の接合部が漆喰層のそれを下回るが、終局的な破壊までの変形許容量は接合部のほうが大きく、漆喰層はそれに追従できずに先行して剥落する可能性が高いことに加えて、各天井部位において質量が最も大きい漆喰層は作用する地震荷重が大きいからである。



a) 振動装置全景



b) 振動架台設置状態

写真 8-1 3 次元振動装置

### 8.2.3 試験体仕様

表 8-1 に振動試験体の概要を示す。振動試験は実試験体の仕様をベースとした試験体（以下、模擬振動試験体）と実試験体そのもので実施することとし、漆喰の引張試験と同様に新規材・経年材での破壊挙動の再現性を確認した。模擬振動試験体は第 6 章・実験 6-1 において、実試験体において耐力評価上最も安全側の条件とされた AMS-4 の木摺り下地仕様をベースとし、当該仕様を模擬したものを 1 種類、各要素を弱体化させた試験体を 3 種類、各条件 1 基ずつとした。実試験体の加振は模擬振動試験体の試験結果を踏まえて実施することとし、石膏ボードが補強材として後補された AMS-2 を予備試験体、ボード補強無し・模擬振動試験体のモデルである AMS-4 を主対象とした。

表 8-2 に模擬振動試験体の使用材料、表 8-3 に模擬振動試験体の漆喰調合を示す。調合は第 4 章・実験 4-1 で定めたものを標準とし、塗り重ね回数を増やすことで塗り厚が大きくなる（面重量が大きくなる）ようにして安全側の検討を行うこととした。また試験体 4 体のうち 1 体はスサ分布の下振れを考慮したスサ減調合を設けており、調合の考え方は実験 4-1 を踏襲した。各調合の練り水量も実験 4-1 と同様に、あらかじめ多めの水を用意しておき、職人の塩梅で練り具合を調整した後に残水量から逆算した。

試験体は実際の天井を想定した施工・荷重条件とするため、実験 4-2 シリーズと同様に仮組みした単管足場へ塗下地を吊り下げて上向き作業とし、下塗り～上塗りまで全層施工することとした。模擬振動試験体においては設定した試験要因による影響を明瞭化するため、実試験体に施工されていた目透かし引掛け方式の下げ苧、および漆喰の層間に伏せ込まれていた寒冷紗（棕櫚皮）を省略した。当該副資材の挙動は AMS-4 にて確認することとし、模擬振動試験体との有無で比較した。下地の組み立て、漆喰施工・養生、振動試験までの全て作業工程を風通しのよい室内にて実施した。

図 8-1 に振動試験体の据え付け概略図、図 8-2 に模擬振動試験体の下地部分の詳細を示す。評価対象範囲は木摺り下地～漆喰であるが、天井面の水平構面を再現するため、下地は野縁受けから下部を再現することとした。天井仕上面寸法は振動架台内部に設置可能な最大サイズである木摺り方向 910 mm、野縁方向 1070 mm を上限とした。野縁、野縁受けのピッチや断面寸法、接合部の仕様は試験体寸法が許す限りで第 5 章・模擬試験体仕様（表 5-4～6）を踏襲した。

表 8-1 振動試験体の概要

条件・名称	漆喰		木摺り下地				備考
	配合	塗り厚 (mm)	底面	断面寸法 (mm)	テーパ 角 (°)	目透し幅 (mm)	
基本	標準	約 22	素地	底面 w37 ×t12	77	6	AMS-4 の実測平均目透かし幅を 切り上げた数値を採用（実試験体 の中で目透かし幅が最も小さい安 全側仕様と見做した）。
付着抑制			フッ素樹脂 テープ				経年変化に伴う木摺り下地と漆 喰間の付着減失を想定。
食込抑制			素地			4	AMS-4、目透かし幅平均の-1σ
漆喰強度 抑制	スサ 減					6	漆喰分布に下振れが生じた場合 の天井破壊挙動を確認。
AMS-2	現地 仕様	約 23	素地相当	底面 w35 ×t11(平均)	69	11	予備試験体（石膏ボードによる 後補材あり）
AMS-4		約 22		底面 w37 ×t12(平均)	77	5.5 (平均)	新規作製材 4 体のオリジナルと して比較し、下げ葎・寒冷紗の 効果を確認する。

表 8-2 模擬振動試験体の使用材料

材料		記号	内容
漆喰	貝灰	SL	有明産赤貝を原料にした左官用貝灰
	石灰	L	俵灰（自然風化灰）
	糊	SW	海藻糊（粉末つものまた）
	砂（骨材）	S	鬼怒川産砂 細目
	麻スサ	F	-
	上水道水	W	練り水
下地	スギ（無節材）w37×t12 テーパー角 77°	-	小幅板
	N32 丸釘	-	野縁～小幅板接合部（2 本/箇所）
	マツ（無節材）45 角	-	野縁
	M6 ボルト・ナット+25 角座金 (2.3t)	-	野縁～野縁受けの接合部
	マツ（無節材）60 角	-	野縁受け

表 8-3 模擬振動試験体の漆喰調合（貝灰を 10 とした場合の質量比、[]内はスサ減<sup>(※1)</sup>調合の数値）

	SL 貝灰 (kg)	L 石灰 (kg)	SW 糊 (kg)	S 砂 (kg)	F スサ (kg)	F/P <sup>(※2)</sup> (%)	F 水量 (kg)	W/L <sup>(※3)</sup> (%)	塗り厚 目安 (mm)
下塗り	10	10	1.2	4.9	0.98[0.72]	3.78[2.78]	22.4[21.4]	112[107]	3
大斑直し			1.1	39	0.91[0.67]	1.51[1.11]	22.6[23.0]	113[115]	5
鹿子摺り			0.98	9.7		2.96[2.17]	23.9[25.3]	119[127]	2
子斑直し				39	0.49[0.36]	1.52[1.11]	24.9[31.7]	125[159]	3
鹿子摺り		4.3	0.65	7.0		2.22[1.64]	14.3[13.7]	100[96.2]	2
中塗り				28		1.14[0.84]	14.9[17.4]	104[122]	4
宵縛り			0.49	7.0		2.24[1.65]	13.3[15.5]	91.1[109]	2
上塗り				0.0		3.30[2.42]	14.6[12.9]	102[90.4]	1.5

※1 スサ減調合は、基本調合・下塗りの F/P を 1 ポイント減じたものであり、スサの絶対量でみた場合は基本調合比 26.6%減である。なお、斑直しの F/P は基本調合でも 1.51%であり、1 ポイント減すると顕著な差が生ずる可能性があるため、スサ減調合・下塗りにおける F/P 減少量 26.6%を適用する。

例：基本調合・下塗り F/P=3.75%，スサ減調合・下塗り F/P=2.75% →スサ絶対量減少率=1/3.75=26.6%

基本・斑直し F/P=1.51%、スサ減調合・斑直し F/P=1.51%×(100-26.6%)=1.11%

※2 F/P：粉体とスサの質量比(F/SL+L+SW+S)

※3 W/P：結合剤と水の質量比(W/SL+L)

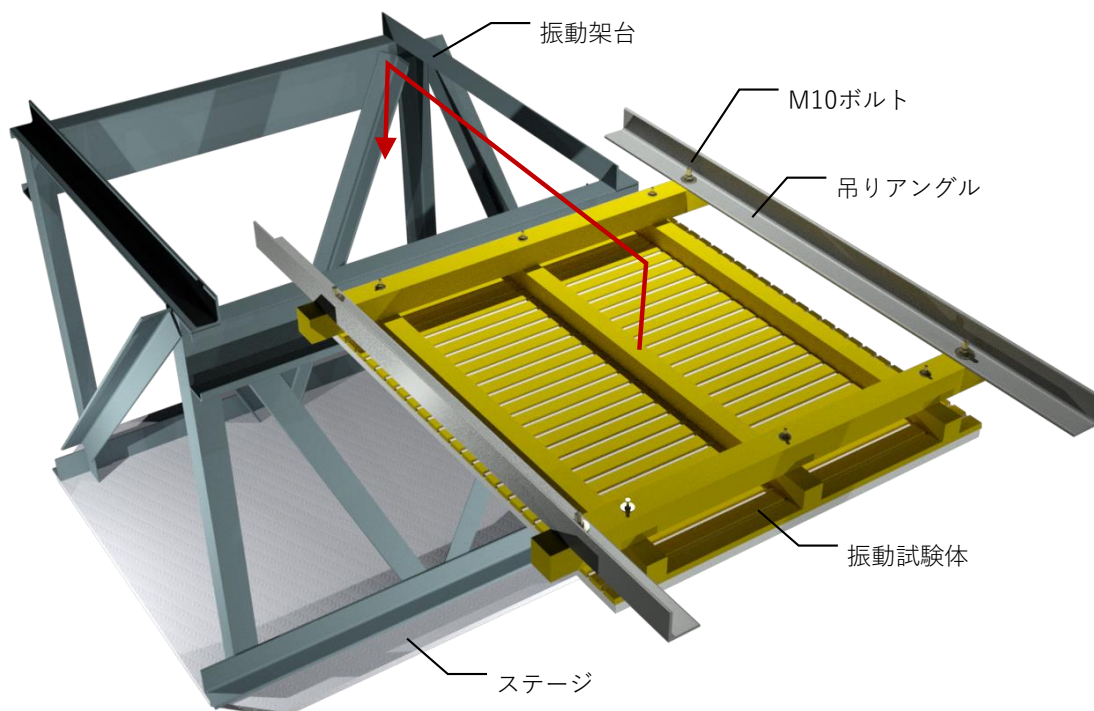
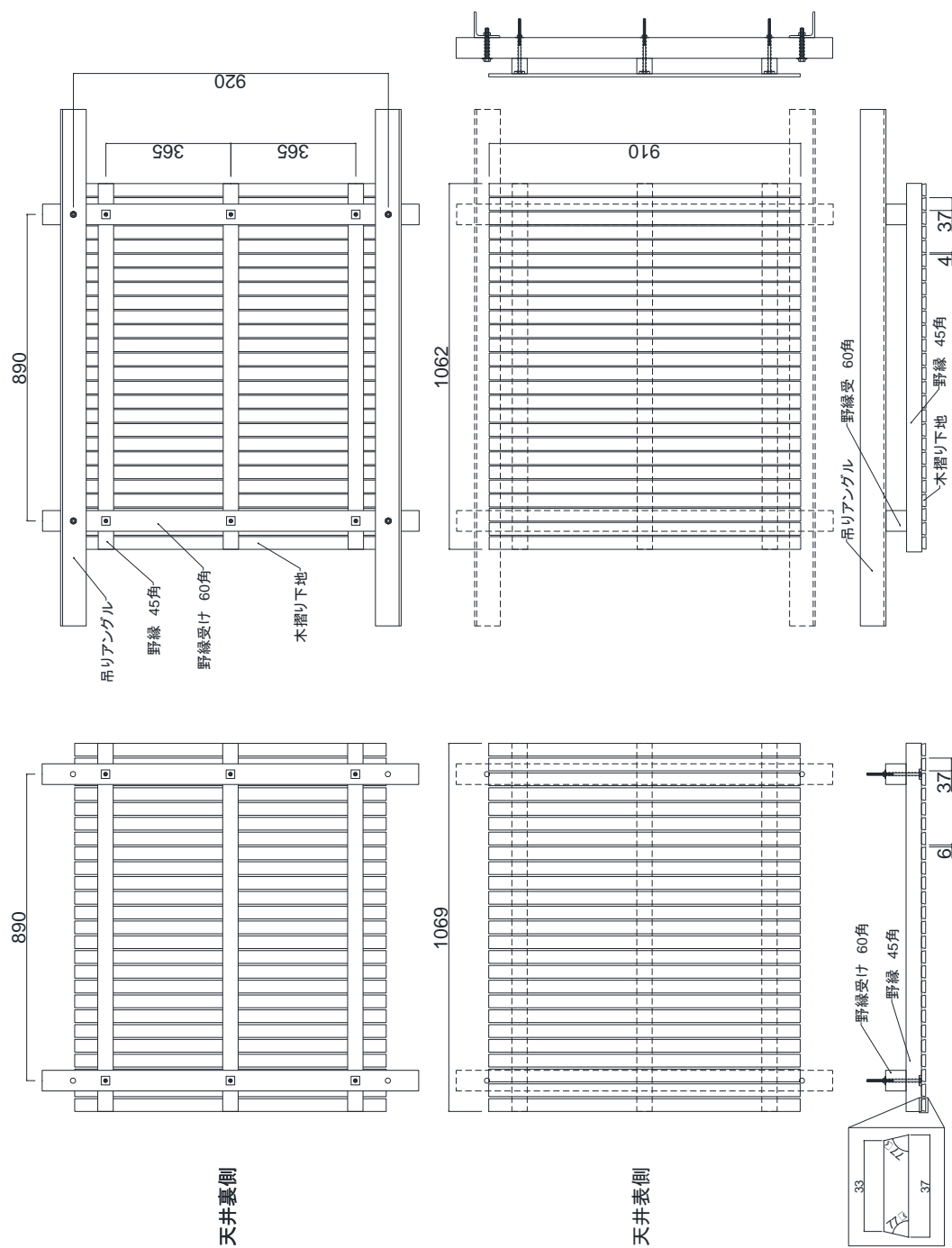


図 8-1 振動試験体の据え付け概略図



目透かし6mm(下地のみ) 目透かし4mm (吊りアングル装着状態)  
図 8-2 模擬振動試験体の下地部分の詳細

#### 8.2.4 試験体作製概要

##### (1) 下地の組み立て

写真 8-2 に木摺り下地組み立ての様子を示す。まず野縁受けと野縁を井形に仮組し、足場への吊り下げに問題が無いか単管足場へ仮設置して据わりを確認する。野縁受けを単管へ引っかけて支持する形態であるため、木摺り下地と野縁受けの間に単管径（ $\phi 48.6$ ）+ $\alpha$ のクリアランスが必要となるが、野縁は 45 角なので干渉する。そのため一時的に野縁受け仮材を野縁に対して 30mm 程度嵩上げて装着し、足場から降ろした後に本来の野縁受けへ交換することとした。足場への設置状態の確認後、一度地上へ卸して野縁底面（木摺り下地を設ける方）を上方へ向け、小幅板を所定の目透かし幅で釘打ちした。小幅板は野縁長さ方向に対して中心部分をまず 1 本固定し、それを基準に両翼へ向かって目透かし幅と同じ厚みのスペーサーを挟みながら打ち進めていった。付着抑制条件ではあらかじめフッ素樹脂テープを貼った小幅板を用いた。組み上がった下地を足場へぐらつき無く固定し、下地条件・施工条件・塗り厚などを明記したカンパンを 1 体ごとに設置し、試験の意図が明確に職人へ伝わるようにした。

##### (2) 漆喰の施工

写真 8-3 に漆喰施工の様子を示す。塗り総数は 8 回とし、水引き状態を見ながら 2 層/日（午前・午後でそれぞれ 1 層）で施工を進め、各作業日の間はそれぞれ 5 日空け、下塗り～上塗りまでの実働日数は 4 日間、工期は約 2 週間となった。施工完了以降の養生期間は 7 週間設け、その間の試験体の移動は無く、施工環境のまま養生し、その間は剥落のリスクを考慮して落下防止のネットを設けた。

##### (3) 振動試験の準備

写真 8-4 に振動試験の準備状況（模擬振動試験体）を示す。養生期間終了後、ハンドフォークによって試験体 4 体全てを地上に下ろし、野縁受け仮材を本仕様の野縁受けに交換した後、過度な振動に留意しながら振動装置施設へ搬入した。試験時まで漆喰仕上面を下に向けて保管をするが、プラスチック段ボールと合板をあてがって仕上面を保護した。試験体への外力伝達経路を実際の天井と近いものにするため、吊木より上部に位置する材は横向きの L6-75×75 アングルで置換し、吊木の接合部となる位置で野縁受けと直交方向に締結し、アングルを振動架台の上部フレームに担がせる形態を採った。

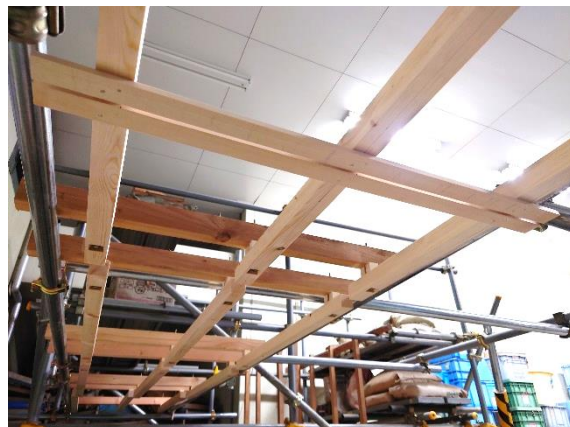
振動架台はあらかじめステージに据え付けておき、試験体を地上に置いた状態で吊りアングルを野縁受けと M10 ボルト・ナットで締結し、クレーンで架台まで運搬し上部フレームと試験体との四周のクリアランスが均等になる位置で下ろし、アングルと架台を M10 ボルト・ナットで締結した。

写真 8-5 に振動試験の準備状況（実試験体）を示す。振動架台への設置方法は新規試験体と可能な限り条件を揃えるため、既存の野縁に対して専用の金物を用いて野縁受けを新設することとした。金物・野縁受けの装着に際し、AMS-2 の中央部には既設の野縁受けが付帯していたためそれを撤去・保管し、AMS-4 に付帯する野縁の継手は、当該部分をまたぐ形でコの字金物を装着した。野縁受けへの吊りアングル設置以降の作業は模擬振動試験体と同様の手順で行った。





a) 野縁受け・野縁の仮組み



b) 足場への野縁受け・野縁の仮設置



c) 組みあがった下地部分（野縁受けは仮材、こののち外周に側枠を設置）



d) 木摺り下地のテーパーと嵩上げされた状態の野縁受け



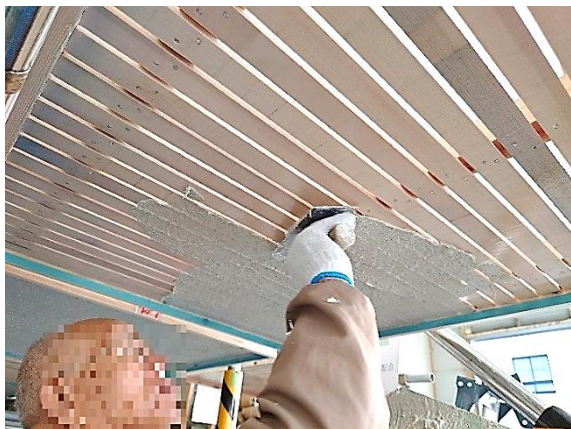
e) フッ素樹脂テープを貼り付けた木摺り下地



f) 足場への下地の本設置状態

写真 8-2 木摺り下地組み立ての様子





a) 下塗りの施工



b) 下塗り施工後の目透かしに沿った漆喰の垂れ  
(不具合ではない)



c) 漆喰食い込み状態 (AMS-4 と同水準の食い込み状態と判断した)



d) 下塗り水引き後の大斑直しの施工 (下塗りの不陸を埋めるように施工)



e) 鹿子摺の施工 (不陸調整)



f) 上塗りの施工 (平滑度確認中)

写真 8-3 漆喰施工の様子





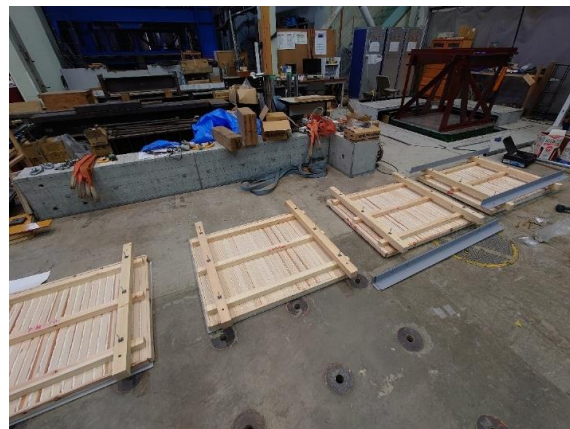
a) 試験体の養生状態（落下防止ネット設置）



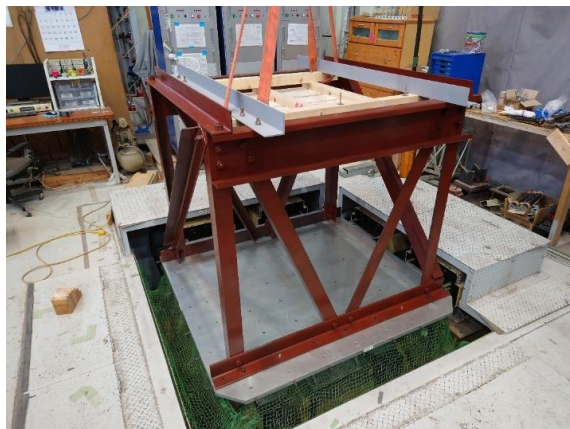
b) ハンドフォークを用いて足場から取り外し、野縁受け仮材撤去状態



c) 野縁受け本材に交換後



d) 振動装置施設へ搬入後、吊りアングルの取付状況



e) 振動架台上部フレームへ試験体をクレーンで降ろした状態



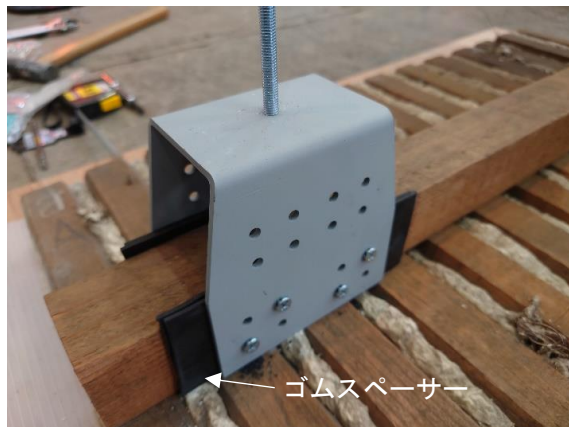
f) 試験体設置後の状態

写真 8-4 振動試験の準備状況（模擬振動試験体）





a) 既存野縁受けの取り外し (AMS-2) (既存ボルト頭が野縁裏側にあり撤去不可のため存置)



b) 新設野縁受け取付金物設置状況 (野縁寸法にばらつきがあるため、ゴムスペーサーを用いて金物との遊びを埋めた)



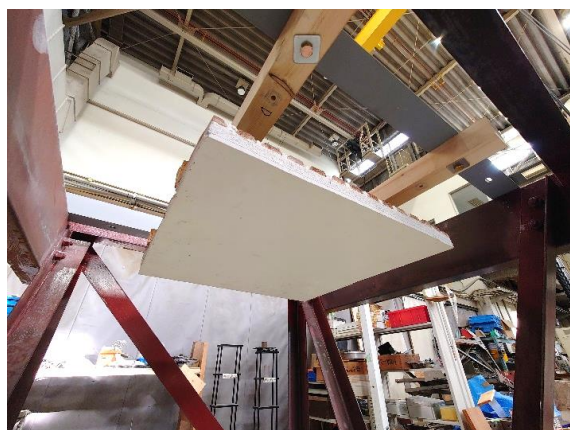
c) 野縁～野縁受け接合部は4箇所/1体



d) 野縁受けとの接合状態 (AMS-2)



e) 野縁受けとの接合状態 (AMS-4) (継手材が付帯するため、金物はそれを跨ぐように取り付け、継手材が無い3カ所にも相当材を新設)



f) 試験体の吊り下げ状態

写真 8-5 振動試験の準備状況 (実試験体)

### 8.3 振動試験の概要

#### 8.3.1 加振前後における模擬振動試験体の画像解析

表 8-4 に加振前後における画像解析の概要を示す。第 6 章・実験 6-1 で実施した画像解析を加振前の模擬振動試験体で行い、解析結果と破壊性状の関連性を確認した。また、剥落後の試験体でも表 8-4 に示すような考え方による解析を行い、パラメータによる破壊性状への影響を評価した。

#### 8.3.2 加振条件

表 8-5 に 1 体あたりの加振条件、表 8-6 に加振する試験体の順番を示す。振動試験体における 3 軸の定義は 5.3.1 と同様（野縁方向：X、野縁受け方向：Y、鉛直上方向：Z）とした。入力波は sin 波を基本としたが、以下の事由により今回の加振方向は鉛直方向(Z 軸)に特化し、条件を絞った検証とした。

- 1) 使用する振動架台の関係で試験体サイズが約 1m 角に制限され、水平方向の加振による吊り天井下地の相関変位や面内外力、それに誘発される面外変形の影響は限定的なものになる可能性がある。
- 2) 第 4 章・第 5 章で実施した漆喰の諸物性により、最大引張応力度は最大せん断応力度の約 18%にとどまる。仕上材の面重量が現行工法よりも大きいことも相まって、主な破壊形態は引張破壊、すなわち面外方向の外力（天井部材の場合は鉛直方向）によるもののほうが先行して生じやすい可能性がある。
- 3) 7.2.5 で述べたように、木製天井下地の壁との取り付け部は現行工法のそれよりも構造的な連続性が高い可能性があり、その仮説を検証するには静的載荷による試験を先に実施する必要があるため、天井一般部における剥落時の挙動を検証することを目的としている今回の振動試験ではパラメータを絞って実施するほうが合理的である。

最大加速度は振動台への入力波として管理し、応答加速度は試験体各所に設けた加速度計にて記録した。入力加速度は 300gal から始めて損傷程度を確認しながら、回数に応じて段階的に装置出力最大の 980gal まで大きくした。入力周波数は建築物 N の現地で測定した天井（木摺り下地上部）の共振周波数 9.5Hz を基準とし、9.5Hz・980gal の加振で顕著な損傷が認められない場合は、300gal で 2～10Hz の sweep 波を与えて小幅板天端の応答加速度から試験体自体の共振周波数を策定したうえで、その周波数にて再度加振（表 8-5 の順序 7）することとした。

なお、石膏ボード後補の無い試験体（模擬振動試験体・AMS-4）において、表 8-5 の順序 7 までで剥離・剥落の発生が確認できない場合は、野縁と野縁受けの接合金物（M6 ボルト・ナット：第 5 章・図 5-2 参照。以下、ナット）の経年状態（木材の痩せやワッシャー部分のめり込みクリープ）を再現するべく、5mm 程度緩めることで下地の剛性を落とした。その状態で再度、300gal から順に加振して木摺り漆喰部分の上下動を増幅させ、剥離・剥落が発生するまで繰り返した。

表 8-4 加振前後における画像解析の概要

指標	内容	評価タイミング
目透かし開口率 GR	試験体仕上面積に対する目透かし開口面積 (6.2.3(1))	加振前
引掛り率 AR	目透かしから面内方向に広がった漆喰引掛り量 (6.2.3(2))	
平均引掛り幅 AAW	物理量で表した漆喰引掛り量 (6.2.3(3))	
開花率 KR	目透かし面積に対する漆喰食い込み面積 (6.2.3(4))	
漆喰食い込み部 残存率	漆喰層剥落部分の目透かし部に残存していた漆喰食い込み 部の残存率	加振（剥落）後
漆喰付着部残存率	漆喰層剥落部分の小幅板表面に残存していた漆喰量	

表 8-5 1 体あたりの加振条件

順序	入力加速度(gal)	周波数(Hz)	種類	野縁～野縁受け 接合ボルト	加振 時間(s)	加振 方向
1	300	9.5 (現地天井 固有周期)	sin	締結	120	Z 軸
2	600					
3	980					
4	300	sweep				
5	300		6-10			
6	600	試験体 固有周期	sin	ナット 緩め (経年状態の再 現、応答加速度 の増幅)		
7	980					
8	300					
9	600					
10	980					
⋮						
剥落する まで実施						

表 8-6 加振する試験体の順番

試験体加振順番	試験体（条件）	備考
1	基本	-
2	付着抑制	-
3	食込抑制	-
4	漆喰強度抑制	-
5	AMS-2	実試験体実施の予備試験
6	AMS-4	-



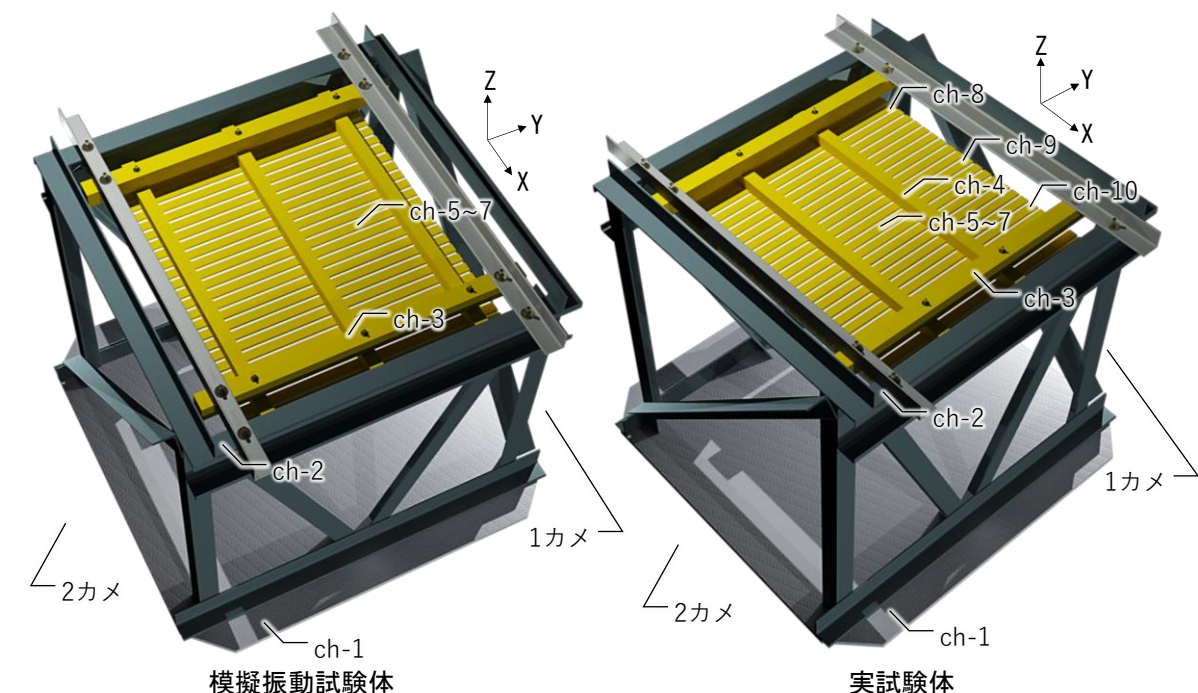
### 8.3.3 試験体の記録条件

表 8-7 に試験体記録方法と箇所を示す。加速度計は容量  $2000\text{m/s}^2$  ( $200000\text{gal}$ ) のものを用い、サンプリング間隔は  $10\text{ms}$  とした。漆喰層への入力加速度は小幅板天端での応答加速度とみなした。また実試験体は採取箇所の影響により野縁が 2 本で割付けも偏っており、かつ小幅板端部は応答加速度が大きくなりやすい特異点であることを踏まえ、木摺り下地の持ち出し量が大い方の小幅板端部天端の 3 カ所に加速度計を増設した。測定方向は基本的に加振方向と同じ Z 軸とするが、ナット緩め条件の場合は水平方向の揺れを誘発する可能性があるため、小幅板天端のみ 3 軸方向を測定した。

試験体挙動の記録は映像を主とし、振動台外側の東西方向 2 箇所から定点カメラをローアングルから仕上面の状態がわかるように設置した。その他、筆者ら実験担当者による画像記録も適宜実施した。

表 8-7 試験体記録方法と箇所

装置	ch	記録装置設置場所		測定方向	設置した試験体	
					模擬振動試験体	実試験体
加速度計	1	ステージ天端		Z	○	○
	2	振動架台上部フレーム天端			○	○
	3	野縁受けスパン中央部天端			○	○
	4	野縁スパン中央部天端			-	○
	5	野縁受け・野縁に囲まれた 1 区画の重心の小幅板天端		Z	○	○
	6			X(野縁方向)	○	○
	7			Y(野縁受け方向)	○	○
	8	木摺り下地の持ち出し量が大い方の小幅板端部の天端	-X 側	Z	-	○
	9	中央部	-		○	
	10	+X 側	-		○	
ビデオカメラ	1	振動装置外の木摺り	+Y 側	漆喰仕上面(ローアングル)	○	○
	2	下地木口面両側	-Y 側		○	○



## 8.4 画像解析・振動試験結果・考察

### 8.4.1 画像解析結果

図8-3に模擬振動試験体における画像解析結果を示す。a)～d)において、基本条件試験体はそのオリジナルであるAMS-4と類似するものとなり、再現性が確認できた。AMS-4のほうがGRが低くなっているのは、模擬振動試験体はAMS-4の目透かし幅の端数を丸めた仕様になっていることや、実試験体特有の目透かし幅のばらつきを拾っている可能性がある。AR、AAWには大きな差がないことから、AMS-4の下塗漆喰は模擬振動試験体よりも軟練りであった可能性がある。

e), f)は最終加振（剥落）後の試験体を解析したものであり、試験体によっては複数回の加振に分けて剥落したもの（後述）もあることを留意されたい。それを前提に e)では4試験体共に95%以上の食い込み部残存率であり、テーパ断面の木摺り下地において漆喰引掛りが形成され、抜け型の発生しにくさが示された。また f)も付着抑制条件は想定とおりの結果となった。基本条件と残り2条件の間で付着部残存率に差異があるが、目透かし幅と漆喰強度が木摺り表面との付着に及ぼす影響については検証が必要である。

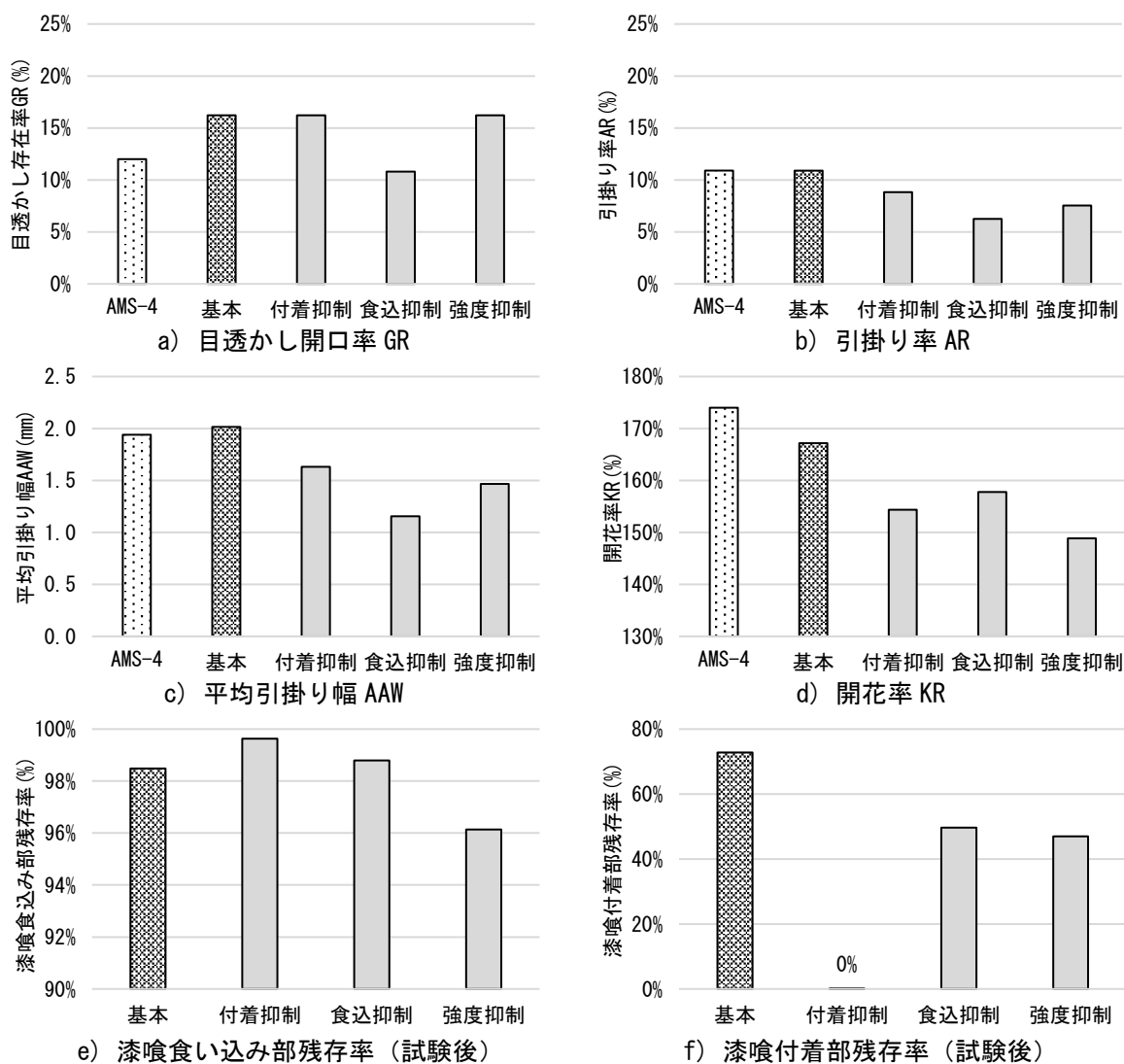


図8-3 模擬振動試験体における画像解析結果

## 8.4.2 振動試験の結果

### (1) 模擬振動試験体

#### (1.1) 基本条件

表 8-8 に振動試験結果一覧、図 8-4 に共振周波数確認時の応答加速度履歴、写真 8-6 に試験体の破壊性状、図 8-5 に剥落が発生した加振時の応答加速度履歴を示す。ナット締結状態で建築物 N の天井の共振周波数 9.5Hz・980gal まで入力したところ、小幅板天端の Z 軸応答加速度 (ch-5) は最大で 1600gal 程度となったが損傷は確認されなかった。試験体自体の共振振動数を測定したところ、最も増幅が大きかったのは 9.7Hz (図 8-4) であり、建築物 N 天井部で測定された共振周波数と近く、再現性が確認された。裏を返せば、試験計画策定時のナット緩めの前段階の「試験体を共振させる」手法の効果が薄くなったことを意味している。以降の試験でも同様の事象が想定されたが、当初の試験計画に沿って試験体共振周波数での加振 (順序 6,7) を行ってから、ナット緩めに移行する方針とした。

漆喰の浮きが木口面で確認されたのは 9.7Hz・980gal・ナット緩め 1 回目 (順序 10) であり、その段階で試験体の木摺り下地側から粉塵の発生が認められた。木摺り下地と漆喰界面の引張付着が滅失して漆喰が浮いたことで下地との間に空隙が発生し、振動によって漆喰層が暴れることで発生したものと考えられる。この現象は、漆喰が剥落まで至らなくとも前兆現象として起こりうるものと考えられ、定性的な観点ではあるが、地震荷重の履歴を持つ天井部材における剥落の可能性を判断する材料になりうると考えられる。実際の建物で確認する場合は、居室側から粉塵の発生は認識できないと考えられるため、“粉塵発生痕跡”を探ることになる。つまり天井裏側から木摺り下地の状態を確認し、“埃とは異なる不自然な粉が下地上面に付着している”などがひとつの確認ポイントとなる。

振動試験体は粉塵が発生して以降、同様条件の 2 回の加振で漆喰の浮きが進展し、9.7Hz・980gal・ナット緩め 3 回目 (順序 13) において出隅部 4 カ所から剥落が発生した。以降は、先の剥落によって生じた出隅部が片持ち支持になることによって、剥落を誘発させながら内側へ進展する破壊形態であった。剥落時の小幅板天端の応答加速度 (ch-5) は 10000~30000gal (約 10~30G) 程度であり、純粋な鉛直方向の加振では相当な加速度に耐えることがわかった。これは静的・動的試験の違いはあれど、7.2.3 の木摺り漆喰部分の余裕度として求めた「平均 19.8 倍」に調和的と解釈できる。

漆喰食い込み部残存率は 98.5%、界面剥離もみられないことから破壊モードはほとんどが破断型であるとみられ、テーパ断面の木摺り下地の効果を確認した。また、実試験体における引張付着の作用率が 2 割であったことと、本試験の剥落部分における下塗漆喰のこびりつきが小幅板表面の 73%にみられたことを勘案すると、当試験体では引張付着が広範囲で作用していた推察され、若材齢であり寸法変化や疲労の蓄積が少ないことが要因と考えられる。

なお、今回の試験体では接合部の締結度を落とすことで木摺り下地の応答加速度が相当に増幅された。これは経年状態を再現したものになるので、実際の歴史的建築物でも起こりうる現象となる。故に天井部材の健全性評価を行う際には木摺り漆喰の部分だけでなく、吊り下地接合部の締結状態も同時に確認する必要があり、場合によっては接合部を補強することで漆喰への影響を抑制できる可能性を示唆している。

表 8-8 振動試験結果一覧（基本条件）

順序	設定条件			最大応答加速度 (gal)							所見	漆喰層剥落率 (%)		
	加速度 (gal)	周波数 (Hz)	野縁～野縁受け接合部	ch-1 ステージ	ch-2 架台上部	ch-3 野縁受け中央	小幅度天端			ch-7 Y				
							ch-5 Z	ch-6 X						
1	300	9.5	野縁～野縁受け接合部	314.64	314.84	362.44	377.6	-	-	-	損傷は確認されず	0		
2	600			656.64	638.94	746.98	759.92	-	-	-				
3	980			1067.04	1051.01	1392.3	1595.36	-	-	-				
4	300	2-6		351.12	342.62	388.96	472	-	-	損傷は確認されず (共振ピーク:5.1Hz)				
5				337.44	333.36	442	556.96	-	-	損傷は確認されず (共振ピーク:9.7Hz)				
6	600	6-10		638.4	708.39	733.72	821.28	-	-	損傷は確認されず				
7	980			1053.36	1208.43	1396.72	1477.36	-	-					
8	300			328.32	328.73	375.7	415.36	-	-					
9	600	9.7			811.68	898.22	6351.54	3308.72	-	-			木摺り漆喰界面の一部浮き *測定エラー	
10	980				*	*	*	*	-	-				
11	600				697.68	680.61	985.66	1024.24	160.14	434.15	損傷の進展は確認されず (11以降は別日に実施したため、確認として600galスタートとした)			
12	980			1358.88	1453.82	11646.7	6749.6	2383.26	1471.54	木摺り漆喰界面の浮きの一部進展				
13				2115.84	2500.2	31214	33479	8633.43	4570	出隅部からの剥落を繰り返し、内側に進展していった				

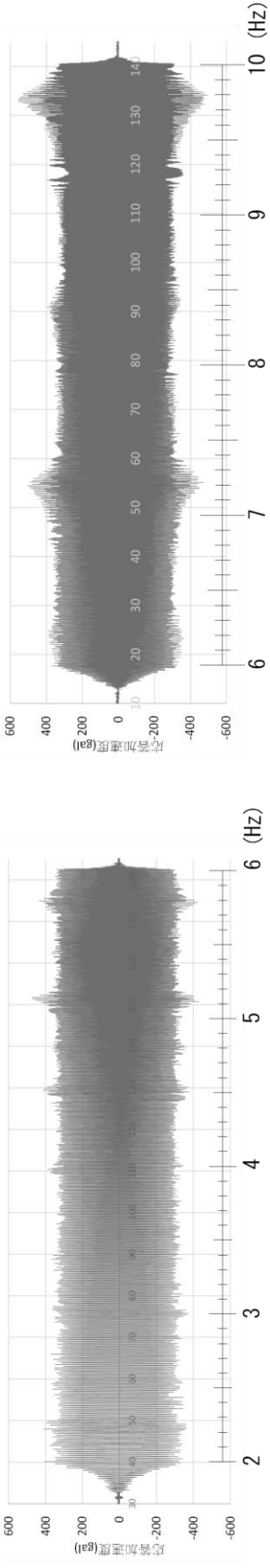


図 8-4 共振周波数確認時の応答加速度履歴（基本条件）





c) 出隅4箇所から剥落、内側へ進展  
(順序13: ナット緩め, 980gal, 9.7Hz, 3回目)



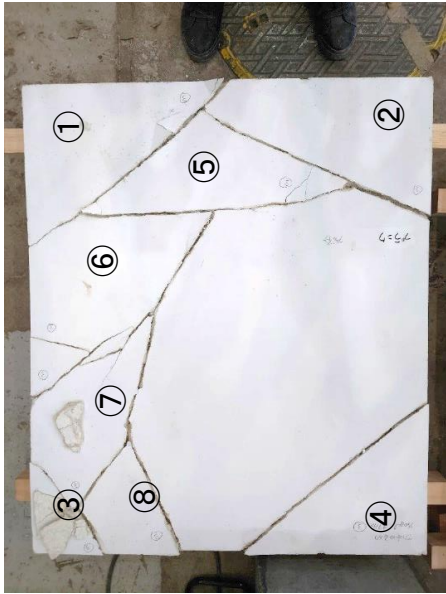
b) 木摺り漆喰界面浮きの進展  
(順序12: ナット緩め, 980gal, 9.7Hz, 2回目)



a) 木摺り漆喰界面浮き  
(順序10: ナット緩め, 980gal, 9.7Hz, 1回目)



f) 最終加振後の漆喰引掛り状態



e) 剥落破片復元状態 (数字は剥落の順番)



d) 最終加振後の剥落状態  
漆喰引掛りの一部に脱落を認める

写真8-6 試験体の破壊性状 (基本条件) (順序13: ナット緩め, 980gal, 9.7Hz, 3回目)

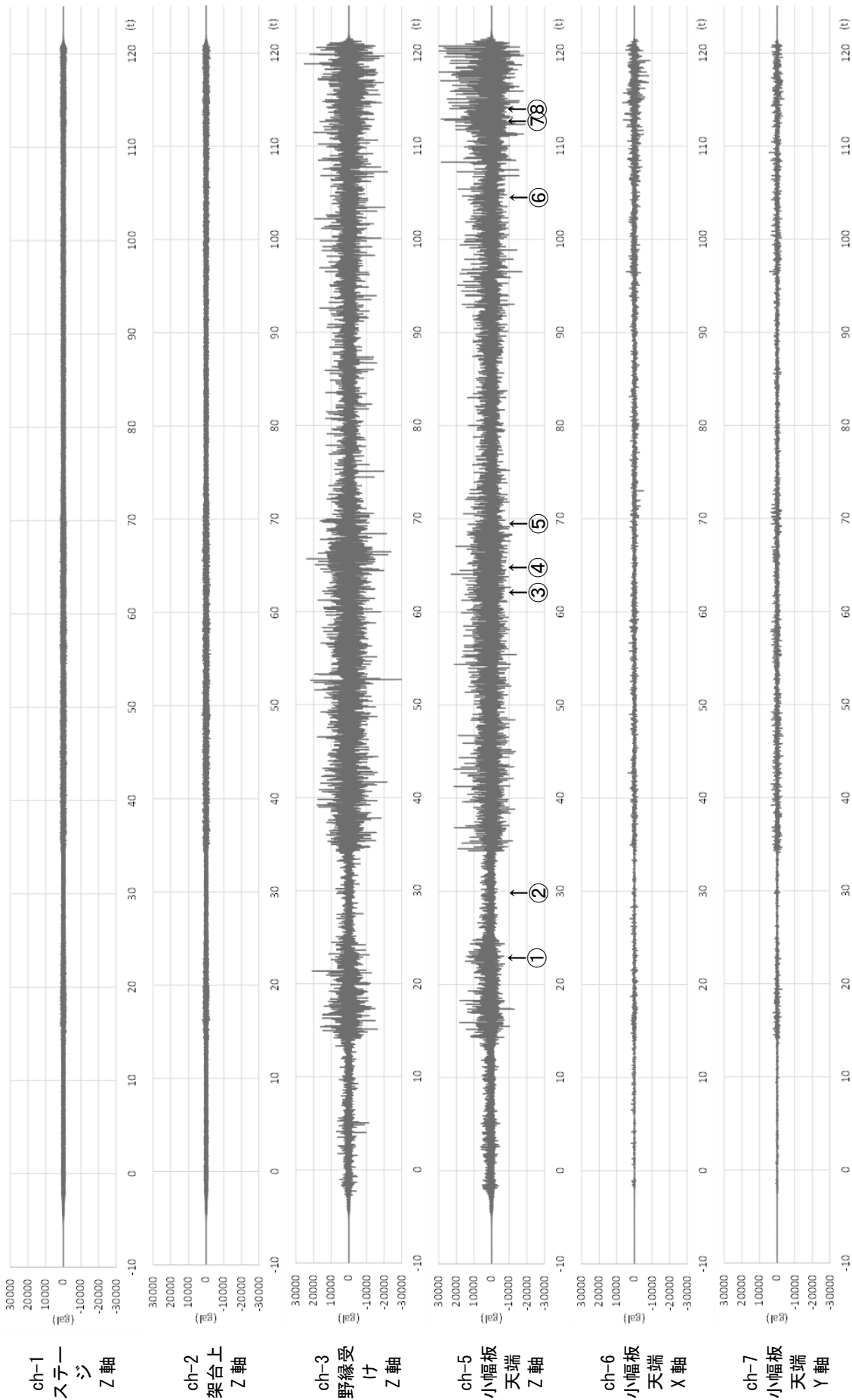


図 8-5 剥落が発生した加振時の応答加速度履歴（基本条件）（順序 13：ナット緩め，9.7Hz，3 回目）

### (1.2) 付着抑制条件

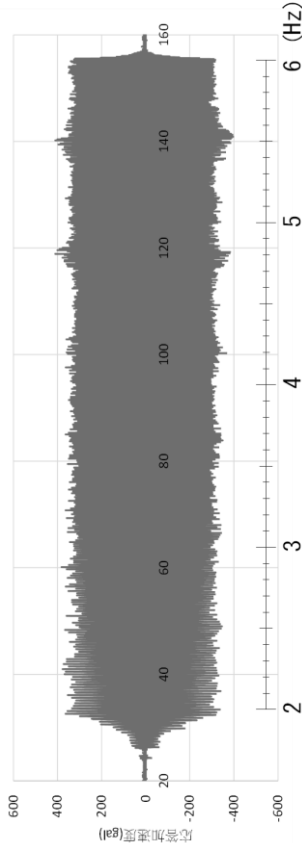
表 8-9 に振動試験結果一覧、図 8-6 に共振周波数確認時の応答加速度履歴、写真 8-7 に試験体の破壊性状、図 8-7 に剥落が発生した加振時の応答加速度履歴を示す。まず剥落部分の小幅板表面には下塗漆喰のこびりつきはなく、試験の設定条件は達成されたことを前提にして論ずる。

ナット締結状態で建築物 N 天井の共振周波数 9.5Hz・980gal まで入力したところ、小幅板天端の Z 軸応答加速度 (ch-5) は最大で 1500gal 程度となったが損傷は確認されなかった。試験体自体の共振振動数を測定したところ最も増幅が大きかったのは 9.5Hz (図 8-6) であり、基本条件と同様に建築物 N の天井との再現性が確認された。

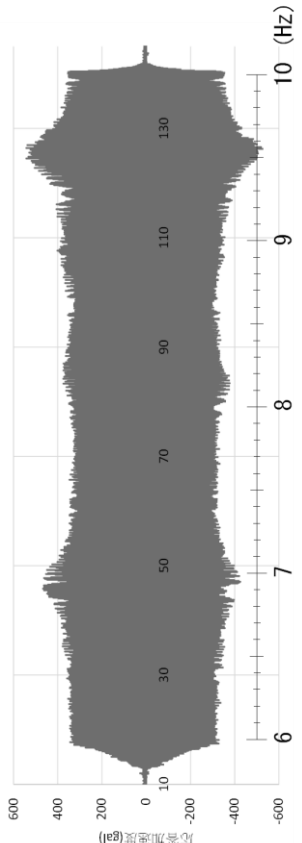
破片①の剥落 120s 前から漆喰浮きと粉塵発生が認められ、粉塵の発生は引張付着の有無とは関連がみられないことがわかった。粉塵は浮いた漆喰層が振動によって小幅板を叩くことで発生すると考えられ、浮き発生の初期段階に多く舞う傾向があった。以降の剥落は食い込み部漆喰が完全に破断した後も漆喰層の剛性でしばらく片持ち状態で耐える状態を経て、曲げ破壊によって落下した。出隅部の連鎖的な剥落はみられず、落下片 1 枚のサイズが基本条件のものよりも大きく、引張付着が作用していないことによって応力の分散が起きにくく、大面積で落下しやすい危険側の現象がみられた。その意味では、引張付着の作用は仮に剥落が発生したとしても、破片が細くなることで被害低減を図れる可能性が示唆される。剥落時の小幅板天端の Z 軸応答加速度 (ch-5) は 1500gal 程度で推移、最大 18500gal 程度であり、最初の剥落が発生したタイミングは 9.5Hz・980gal・ナット緩め 1 回目 (順序 13) であり、基本条件よりも大加速度の負荷に対して脆弱な傾向が認められ、第 4・5 章の漆喰引張試験の結果と調和的である。漆喰食い込み部残存率は 99.6%あり、界面剥離もみられないことから破壊モードはほとんどが破断型であることは基本条件と同様である。

表 8-9 振動試験結果一覧（付着抑制条件）

順 序	設定条件			最大応答加速度 (gal)							所見	漆喰層 剥落率 (%)
	加速度 (gal)	周波数 (Hz)	野縁～野縁 受け接合部	ch-1 ステー ジ	ch-2 架台 上部	ch-3 野縁受け 中央	ch-5 Z	小幅板天端		ch-7 Y		
1	300	9.5	締結	310.08	314.84	570.18	726.88	-	-	-	損傷は確認されず	0
2	600			638.4	638.94	976.82	1104.48	-	-	-		
3	980			1048.8	1046.38	1476.28	1600.08	-	-	-		
4	300	2-6		346.56	328.73	380.12	410.64	-	-	-	損傷は確認されず (共振ピーク：5.5Hz)	
5	600	6-10		332.88	342.62	464.1	542.8	-	-	-	損傷は確認されず (共振ピーク：9.5Hz)	
6				633.84	629.68	848.64	910.96	-	-	-		
7			1048.8	1051.01	1454.18	1543.44	-	-	-	損傷は確認されず		
8	980	9.5	ナット微小 緩め	1053.36	1041.75	1427.66	1496.24	-	-	-	損傷は確認されず	
9	300	2-6	ナット 緩め	328.32	324.1	362.44	410.64	-	-	-	損傷は確認されず (共振ピーク：5.2Hz)	
10	300			346.56	333.36	371.28	401.2	-	-	-	損傷は確認されず (共振ピーク：8.6Hz)	
11				332.88	342.62	406.64	490.88	-	-	-	損傷は確認されず	
12	600			652.08	638.94	817.7	877.92	-	-	-	損傷は確認されず	
13	980	9.5		2010.96	2486.31	19664.6	16751.3	-	-	-	出隅部 1 箇所剥落し、未崩落部でも木摺り と漆喰界面が一部浮く	
14				2042.88	2194.62	30586.4	18502.4	-	-	-	出隅からの剥落が内側へ進展した 破片が 大きい状態で剥落する	



a) 2-6Hz (順序 4, ch-5)



b) 6-10Hz (順序 5, ch-5)

図 8-6 共振周波数確認時の応答加速度履歴（付着抑制条件）





a) 木摺り漆喰界面浮き  
(順序 13 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 1 回目)



b) 出隅部の剥落  
(順序 13 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 1 回目)



c) 曲げ剛性による垂れ下がり状態  
(順序 14 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 2 回目)



d) 最終加振後の剥落状態  
漆喰充填度の低い端部を除き、漆喰引掛り部の脱落は認められない



e) 剥落破片復元状態  
付着が作用しない場合、面の抵抗が少なくなり、破片サイズが大きくなると考えられる



f) 最終加振後の漆喰引掛り状態

写真 8-7 試験体の破壊性状 (付着抑制条件) (順序 13, 14 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 1, 2 回目)

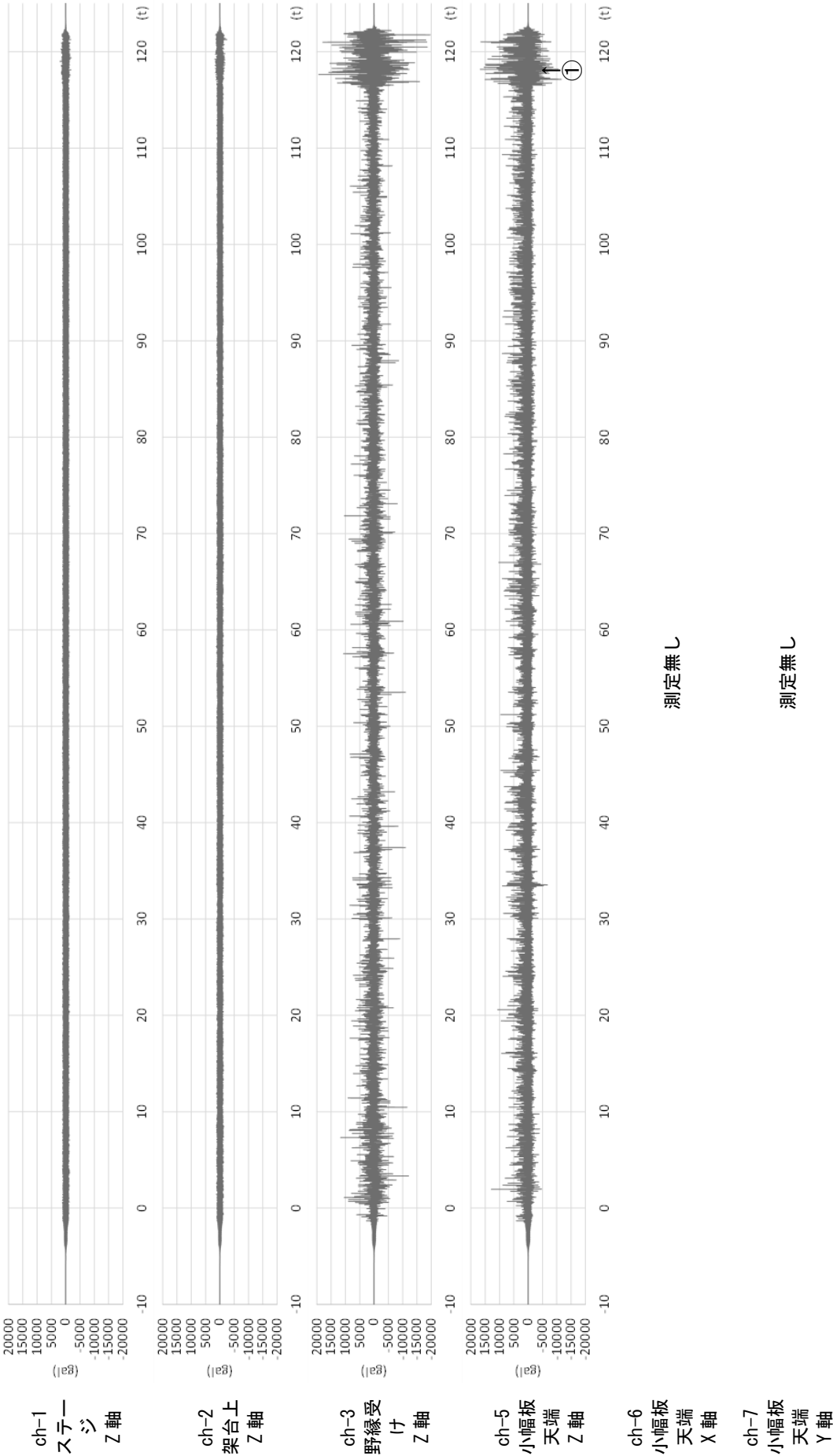
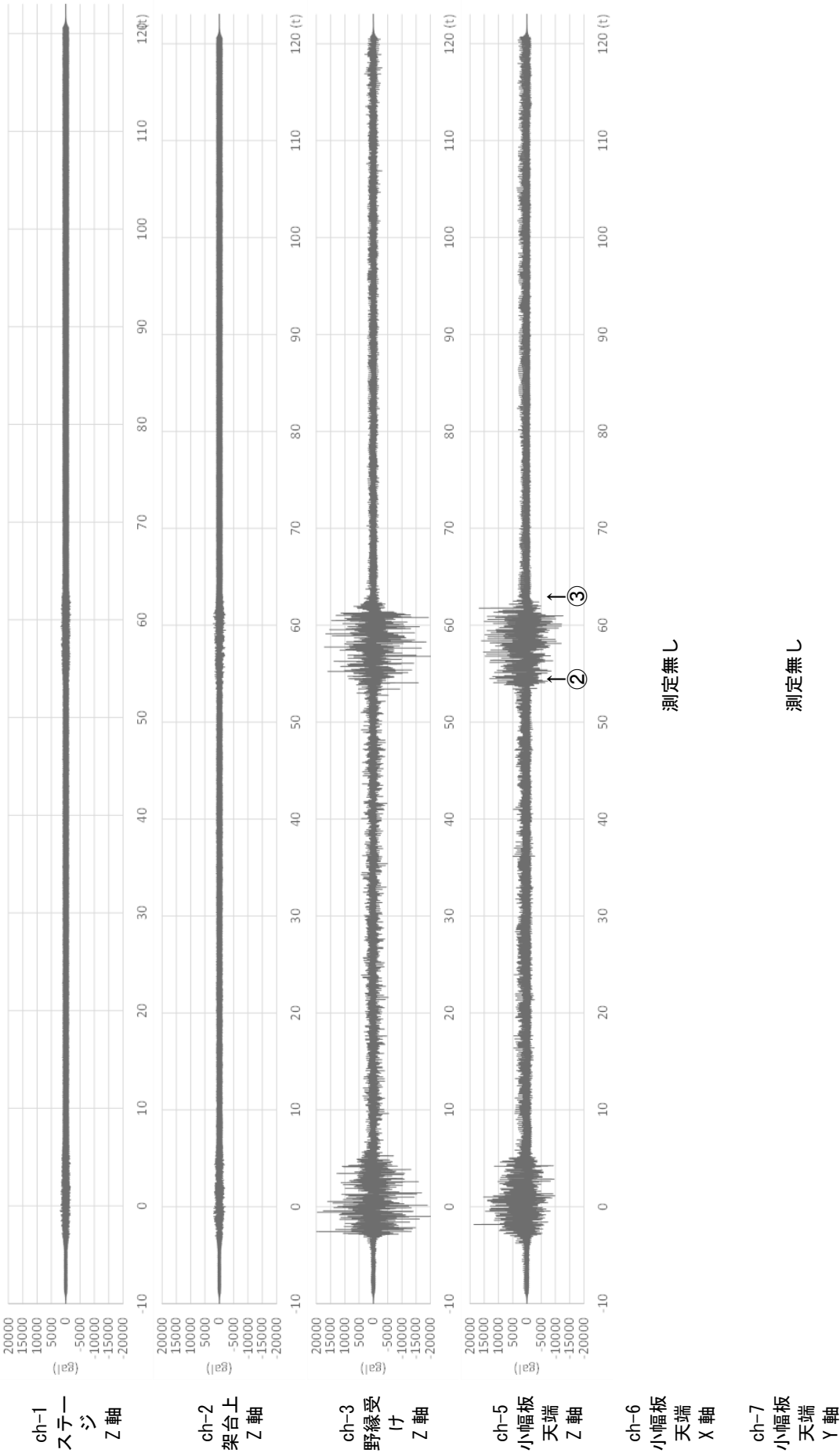


図 8-7 a) 剥落が発生した加振時の応答加速度履歴（付着抑制条件）（順序 13：ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 1 回目, ①剥落時）



### (1.3) 食込抑制条件

表 8-10 に振動試験結果一覧、図 8-8 に共振周波数確認時の応答加速度履歴、写真 8-8 に試験体の破壊性状、図 8-9 に剥落が発生した加振時の応答加速度履歴を示す。ナット締結状態で建築物 N 天井の共振周波数 9.5Hz・980gal まで入力したところ、小幅板天端の Z 軸応答加速度 (ch-5) は最大で 1500gal 程度となったが損傷は確認されなかった。試験体自体の共振振動数を測定したところ最も増幅が大きかったのは 9.5Hz (図 8-8) であり、基本条件と同様に建築物 N の天井との再現性が確認された。

漆喰の剥落は出隅部から連鎖的に進展する形態で、基本条件と同様の傾向がみられたものの、一部で界面剥離が認められた。5.4.3(2)においては目透かし幅約 9mm を分水嶺に、それより幅が広い場合は界面剥離、狭い場合は破断型が発生しやすい傾向を述べたが、当試験体ではそれに反する結果となった。原因は現時点で不明であるが、発生個所はごく一部であるため、漆喰の塗り重ね界面の付着不足などの施工要因によるものと考えることができる。剥落時の小幅板天端の応答加速度 (ch-5) は 15000gal 程度で推移、最大 20000gal であり、最初に剥落を起こしたタイミングは 9.5Hz・980gal・ナット緩め 1 回目 (順序 10) なので、基本条件よりも大加速度の負荷に対して脆弱な傾向が認められ、目透かし幅の狭さによる影響が顕在化したといえる。漆喰食い込み部残存率は 98.8%あり、界面剥離以外の部位の破壊モードはほとんどが破断型であることは基本条件と同様である。下塗漆喰の付着部残存率が基本条件より低い原因は小幅板の個体差によるものが考えられるが、現段階では推測の域をでない。



表 8-10 振動試験結果一覧（食込抑制条件）

加振 順序	設定条件			最大応答加速度 (gal)							所見	漆喰層 剥落率 (%)
	加速度 (gal)	周波数 (Hz)	野縁～野縁 受け接合部	ch-1 ステージ	ch-2 架台 上部	ch-3 野縁受け 中央	小幅度天端					
							ch-5 Z	ch-6 X	ch-7 Y			
1	300	9.5	締結	323.76	324.1	508.3	594.72	-	-	損傷は確認されず	0	
2	600			633.84	634.31	919.36	967.6	-	-			
3	980			1030.56	1041.75	1405.56	1496.24	-	-			
4	300	2-6		351.12	333.36	411.06	453.12	-	-	損傷は確認されず (共振ピーク : 5.5Hz)		
5		6-10		332.88	347.25	521.56	613.6	-	-		損傷は確認されず (共振ピーク : 9.5Hz)	
6	600	9.5		629.28	629.68	853.06	915.68	-	-	損傷は確認されず		
7	980			1044.24	1037.12	1463.02	1576.48	-	-			
8	300		ナット 緩め	323.76	333.36	424.32	448.4	37.68	45.7			
9	600	652.08		652.83	954.72	1274.4	84.78	150.81				
10	980	1960.8		2250.18	34577.7	19616.3	5628.45	4633.98	出隅部 4箇所等剥落	41		

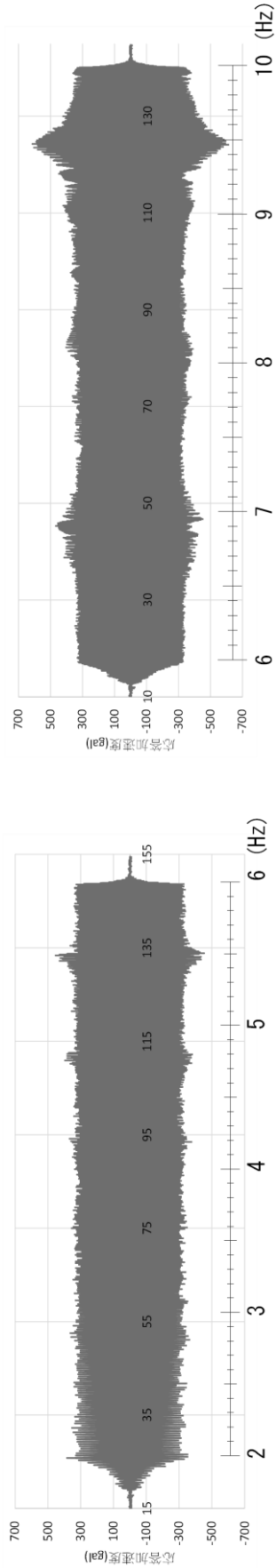


図 8-8 共振周波数確認時の応答加速度履歴（食込抑制条件）  
a) 2-6Hz（順序 4, ch-5）  
b) 6-10Hz（順序 5, ch-5）



a) 出隅部 4 箇所から剥落  
(順序 10: ナット緩め, 980gal, 9.5Hz)



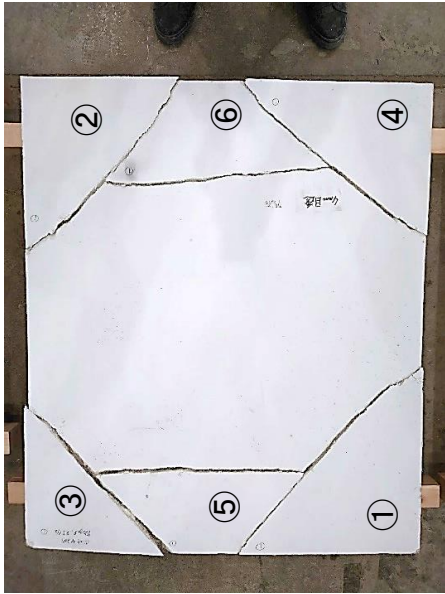
b) 層間剥離 (下塗り～斑直し)  
(順序 10: ナット緩め, 980gal, 9.5Hz)



c) 層間剥離片 (下塗り～斑直し)  
(順序 10: ナット緩め, 980gal, 9.5Hz)



d) 最終加振後の剥落状態  
漆喰充填度の低い端部を除き、漆喰引掛り部の脱落は認められない

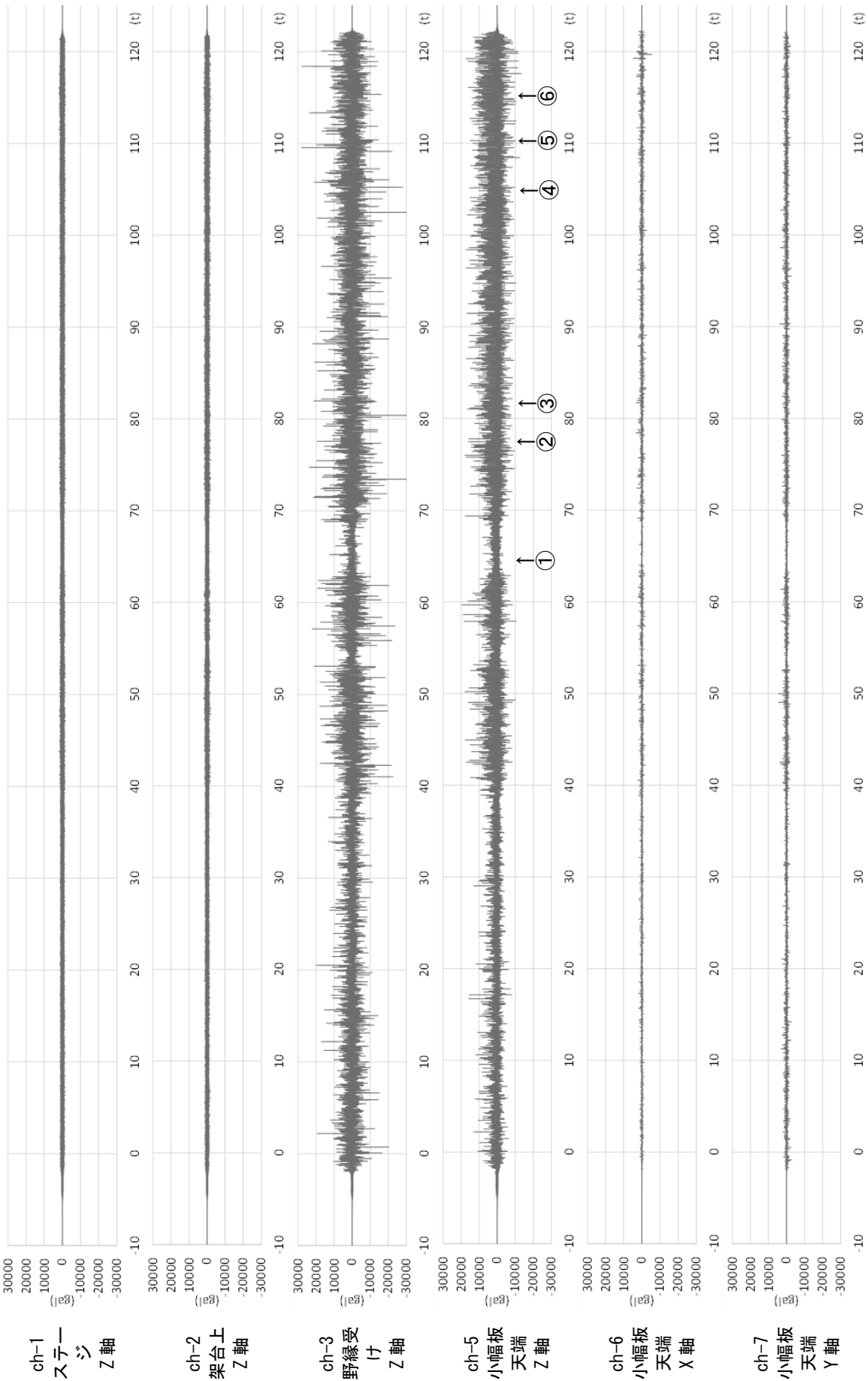


e) 剥落破片復元状態  
出隅部の連鎖的な剥落が認められた



f) 最終加振後の漆喰引掛り状態

写真 8-8 試験体の破壊性状 (食込抑制条件) (順序 10: ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 1 回目)



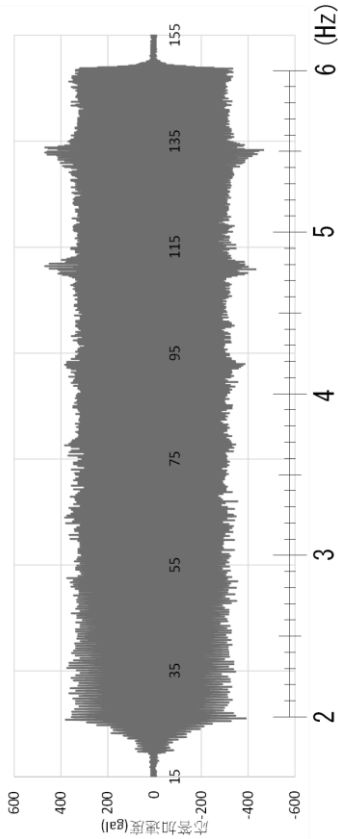
#### (1.4) 漆喰強度抑制条件

表 8-11 に振動試験結果一覧、図 8-10 に共振周波数確認時の応答加速度履歴、写真 8-9 に試験体の破壊性状、図 8-11 に剥落が発生した加振時の応答加速度履歴を示す。ナット締結状態で建築物 N 天井の共振周波数 9.5Hz・980gal まで入力したところ、小幅板天端の Z 軸応答加速度（ch-5）は最大で 1500gal 程度となったが損傷は確認されなかった。試験体自体の共振振動数を測定したところ最も増幅が大きかったのは 9.5Hz（図 8-10）であり、基本条件と同様に建築物 N の天井との再現性が確認された。

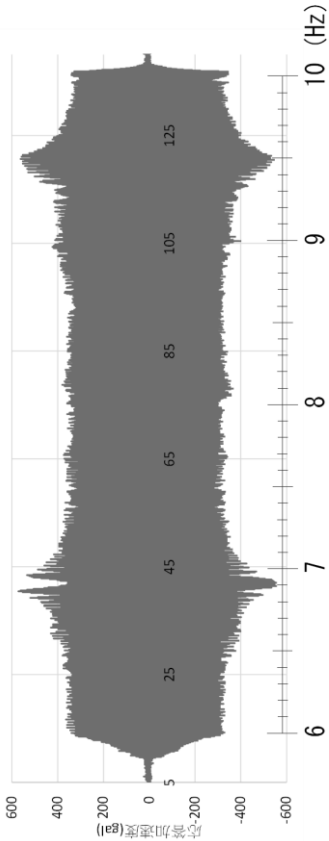
漆喰の剥落は 9.5Hz・980gal・ナット緩め 1 回目（順序 10）で発生し、その際の小幅板天端の応答加速度（ch-5）は 15000gal 程度で推移、最大 25000gal であり、当該加振で天井面の 54%が剥落した。前項の食込抑制条件では、同じ加振条件で 41%の剥落であったことを勘案すると、天井耐力を決めうる要因としては目透かし幅よりも漆喰強度のほうが支配的と考えられる。剥落形態は出隅部から内側へ連鎖的に進展するもので基本条件と同様であるが、落下片が細かいことに加えて脆性的に割れていく傾向がみられ、繊維の少なさが顕在化した格好となった。落下片が細かいことに限定して考えると安全側の破壊形態と解釈もできるが、漆喰強度・剛性を落とすアプローチでは大震動に対する許容度が低くなるため、最適解でないと考える。

表 8-11 振動試験結果一覧（漆喰強度抑制条件）

加振 順序	設定条件			最大応答加速度(gal)							所見	漆喰層 剥落率 (%)
	加速度 (gal)	周波数 (Hz)	野縁～野縁 受け接合部	ch-1 ステージ	ch-2 架台 上部	ch-3 野縁受け 中央	小幅度天端					
							ch-5 Z	ch-6 X	ch-7 Y			
1	300	9.5	締結  ナット 緩め	323.76	333.36	428.74	495.6	61.23	50.27	損傷は確認されず	0	
2	600			629.28	643.57	760.24	840.16	80.07	77.69			
3	980			1026	1037.12	1348.1	1472.64	155.43	150.81			
4	300	2-6		355.68	351.88	406.64	467.28	61.23	50.27	損傷は確認されず（共振ピーク：5.5Hz）		
5				337.44	351.88	468.52	571.12	80.07	59.41			損傷は確認されず（共振ピーク：9.5Hz）
6	600	9.5		624.72	648.2	760.24	849.6	89.49	77.69	損傷は確認されず		
7	980			1026	1037.12	1326	1510.4	155.43	150.81			
8	300			383.04	379.66	910.52	1010.08	122.46	155.38			
9	600	980		1098.96	1185.28	15938.5	9185.12	1323.51	1339.01	出隅部等剥落 一部を残して剥落進展		
10	2047.44			2407.6	32774.3	19639.9	3961.11	2856.25				
11	1942.56			2514.09	32120.1	24808.3	5863.95	4113				



a) 2-6Hz（順序 4, ch-5）



b) 6-10Hz（順序 5, ch-5）

図 8-10 共振周波数確認時の応答加速度履歴（漆喰強度抑制制）





a) ②の剥落時  
(順序 10 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 1 回目)



b) 出隅部等の剥落後  
(順序 10 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 1 回目)



c) ⑫の漆喰引掛り部の脱落  
(順序 10 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 1 回目)



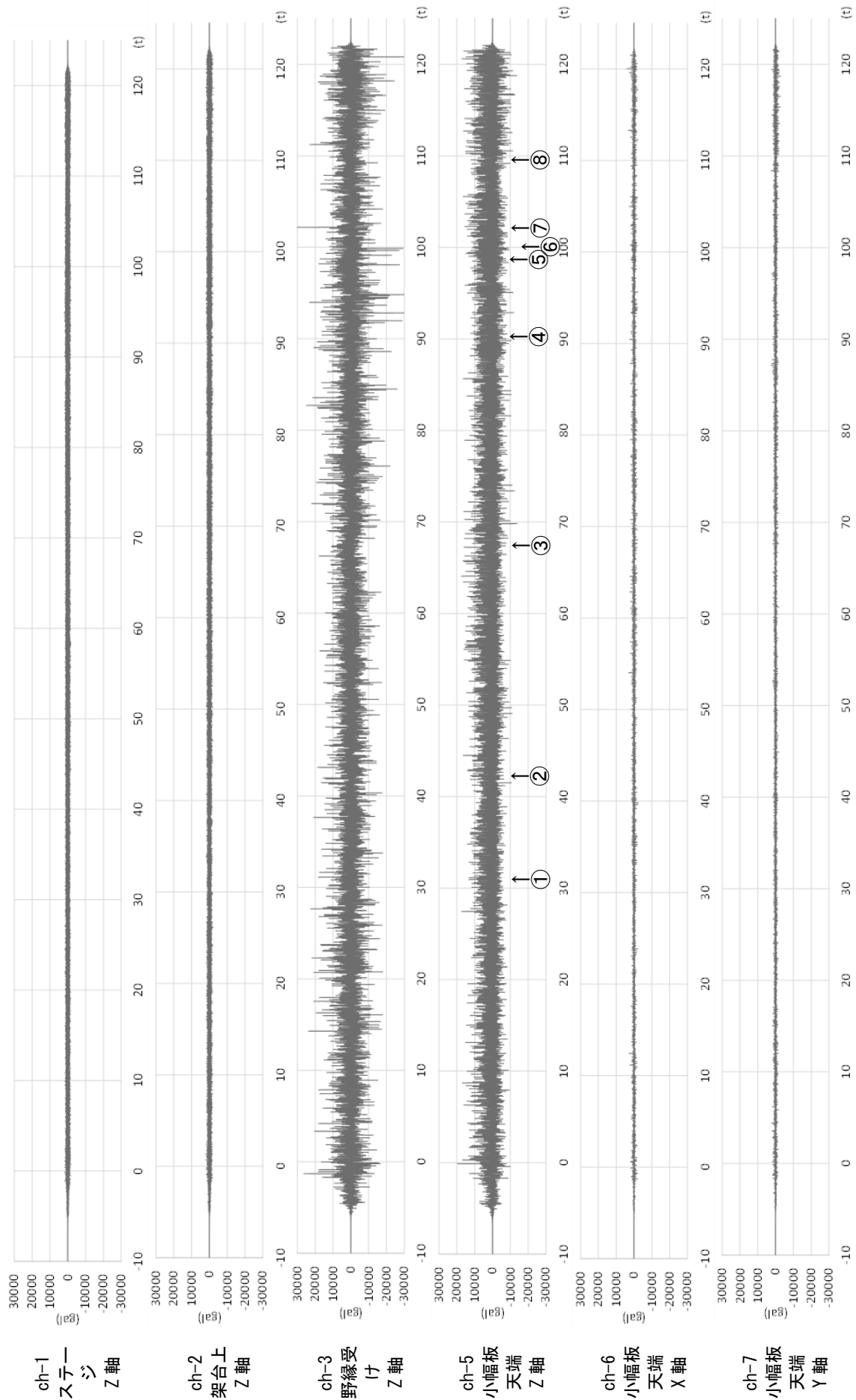
d) 最終加振後の剥落状態  
漆喰引掛りの一部に脱落を認める



e) 剥落破片復元状態  
破片が細かく、スサ量の少なさが影響したと  
考えられる  
写真 8-9 試験体の破壊性状 (漆喰強度抑制条件)



f) 最終加振後の漆喰引掛り状態



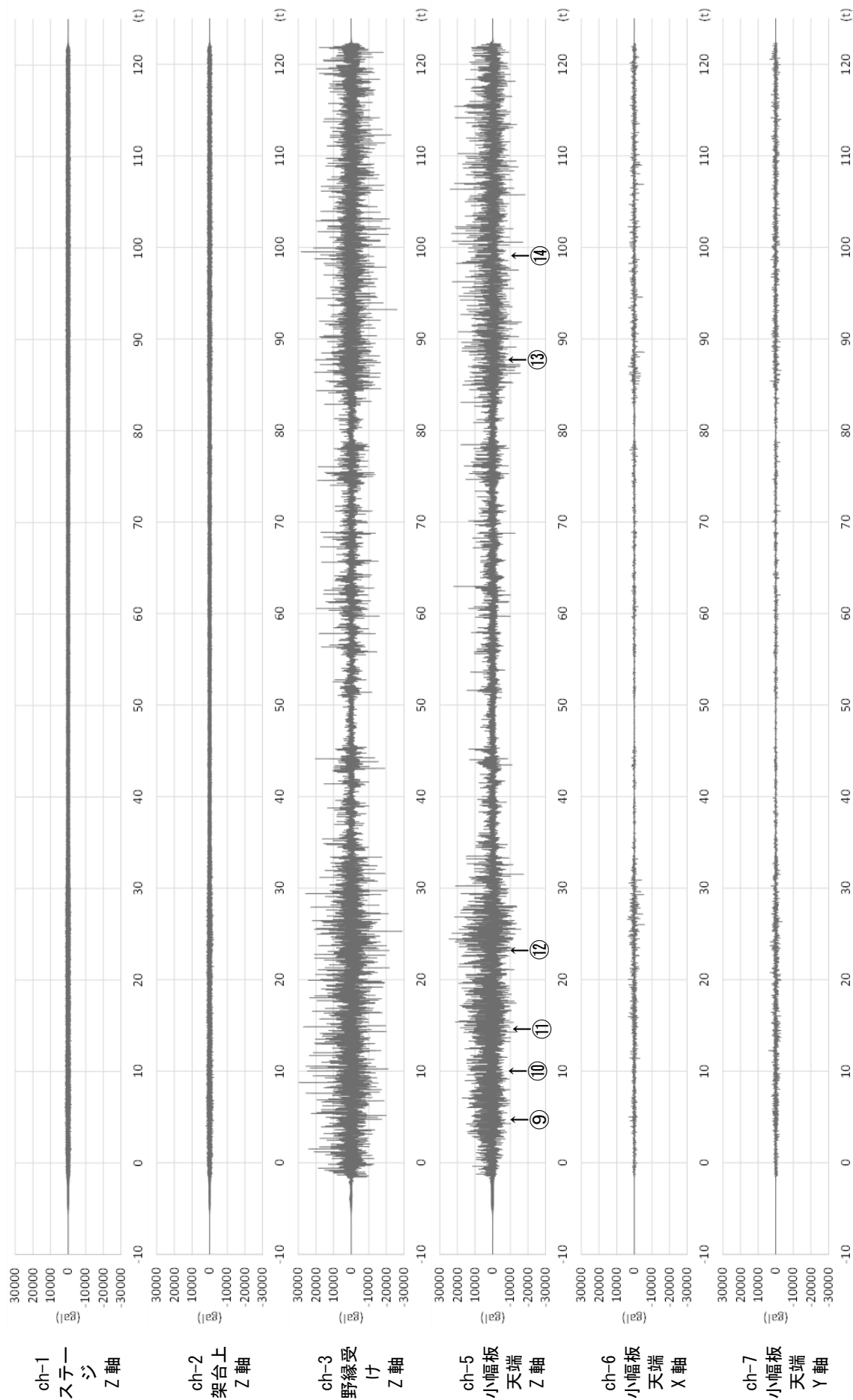


図 8-11 b) 剥落が発生した加振時の応答加速度履歴（漆喰強度抑制条件）（順序 11：ナット緩め, 980gal, 9.5Hz, 2 回目, ⑨～⑭）



## (2) 実試験体

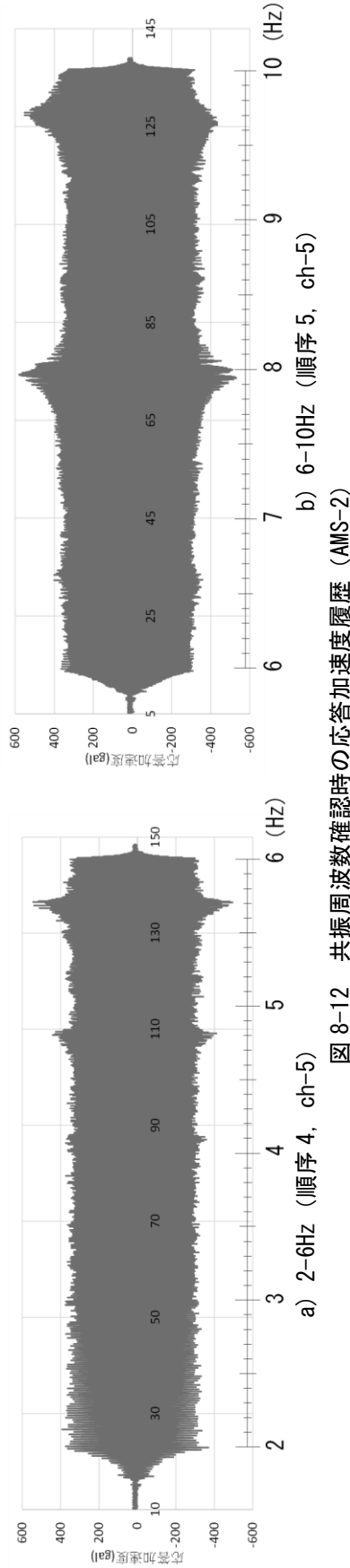
### (2.1) AMS-2

表 8-12 に振動試験結果一覧 (AMS-2)、図 8-12 に共振周波数確認時の応答加速度履歴、写真 8-10 に振動試験状況 (AMS-2)、図 8-13 に木摺りと漆喰の界面に浮きが確認された加振時の応答加速度履歴 (AMS-2) を示す。当試験体は漆喰の上層に剥落防止の石膏ボードが後補されており、AMS-4 の予備試験 (新設野縁受け取付金物の状態確認) および石膏ボード補強の効果を確認するために参考として行った。

ナット締結状態で建築物 N 天井の共振周波数 9.5Hz・980gal まで入力したところ、小幅板天端の Z 軸応答加速度は両端支持部 (ch-5) で最大 1500gal 程度、片持ち部 (ch-10) で最大 1900gal となり、持ち出し部分のほうが増幅傾向にあったが、全ての部位で損傷は確認されなかった。試験体自体の共振振動数を測定したところ最も増幅が大きかったのは 8Hz (図 8-12) で、模擬試験体との形状・締結方法の差異による影響が表れたと推察される。ナット緩め条件下においても 8Hz にて加振を行ったが、980gal を入力しても小幅板天端の応答加速度が増幅しなかったため、9.7Hz (次位の共振周波数) に切り替えて再度加振したところ、前加振時を上回る増幅が認められた。最大応答加速度は小幅板天端の両端支持部で 9000gal 程度、片持ち部で最大 23500gal を記録したが、漆喰層の若干の浮きを記録した程度で剥落は認められず、石膏ボードの補強効果が認められた。また新設した野縁受け取付金物も試験上問題なく機能することが確認できたため、後補材を有さず原型に近い AMS-4 の試験へ移行した。

表 8-12 振動試験結果一覧 (AMS-2)

順 序	設定条件			最大応答加速度 (gal)										所見	漆喰層 剥落率 (%)	
	加速度 (gal)	周波数 (Hz)	野縁～ 野縁受 接合部	ch-1 ステー ージ	ch-2 架台 上部	ch-3 野縁 受け (新設)	ch-4 野縁	小幅度(野縁受け・野縁重 心)			小幅度(持ち出し端部)					
								ch-5 Z	ch-6 X	ch-7 Y	ch-8 Z (-X 側)	ch-9 Z (中央)	ch-10 Z (+X 側)			
1	300	9.5		325.62	299.49	424.32	465.12	476.72	94.2	54.84	421.33	472.26	547.78	損傷は確認されず	0	
2	600			651.24	592.95	857.48	1026	986.48	174.27	82.26	893.59	986.19	1149.44			
3	980			1069.32	976.86	1423.24	1623.36	1585.92	277.89	159.95	1486.23	1652.91	1912.74			
4	300	2-6	締結	349.74	315.57	481.78	528.96	542.8	113.04	54.84	467.63	555.6	619.62	損傷は確認されず (共振ピーク : 5.7Hz)		
5	300	6-10		333.66	315.57	525.98	583.68	580.56	136.59	82.26	523.19	592.64	691.46	損傷は確認されず (共振ピーク : 8Hz、次位 9.7Hz)		
6	600			643.2	588.93	760.24	711.36	736.32	127.17	105.11	773.21	726.91	740.85			
7	980	8	ナット緩め	1037.16	948.72	1197.82	1185.6	1184.72	207.24	155.38	1259.36	1213.06	1279.65	損傷は確認されず		
8	300			329.64	301.5	353.6	346.56	349.28	65.94	77.69	361.14	356.51	359.2			
9	600			643.2	590.94	782.34	711.36	712.72	169.56	169.09	995.45	777.84	929.43			
10	980	9.7		1009.02	936.66	2568.02	1796.64	1675.6	301.44	347.32	3764.19	2194.62	3699.76	木摺り漆喰界面の一部浮き		
11	980			1199.97	1091.43	11810.2	8043.84	8958.56	1549.59	1677.19	23446.3	10653.6	20375.6			





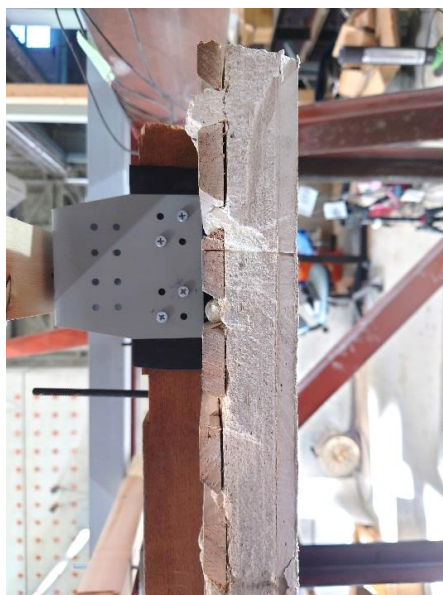
a) 試験前の仕上面状態



b) 試験前の断面 1



c) 試験前の断面 2



d) 木摺り漆喰界面浮き  
(順序 11: ナット緩め, 980gal, 9.7Hz)



e) 仕上面状態  
(順序 11: ナット緩め, 980gal, 9.7Hz)

写真 8-10 振動試験状況 (AMS-2)

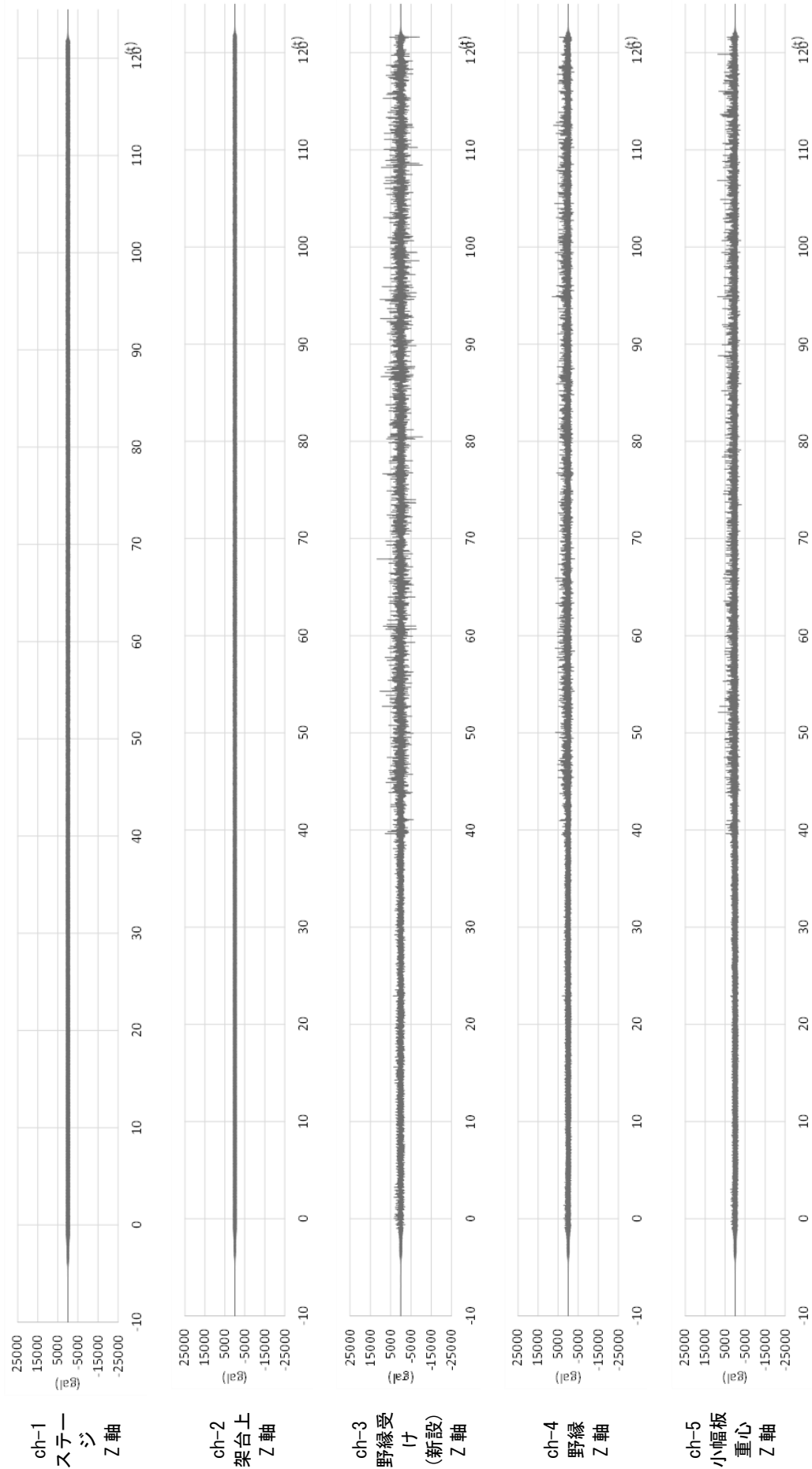


図 8-13a) 木摺りと漆喰の界面に浮きを確認された加振時の応答加速度履歴 (AMS-2) (順序 11 : ナット緩め, 980gal, 9.7Hz, 1 回目) ch-1~5

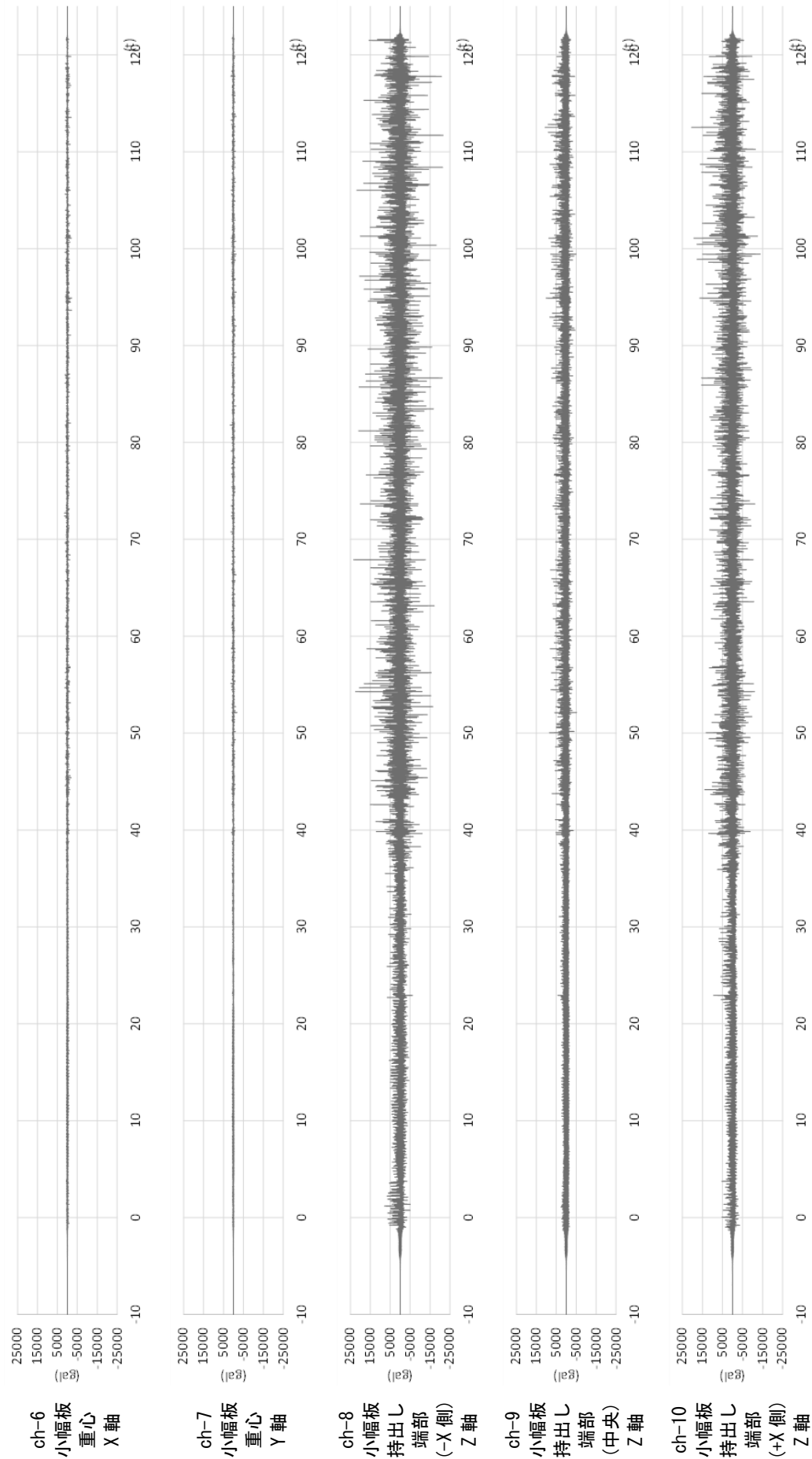


図 8-13 b) 木摺りと漆喰の界面に浮きが確認された加振時の応答加速度履歴 (AMS-2) (順序 11 : ナット緩め, 980gal, 9.7Hz, 1 回目) ch-6~10

## (2. 2) AMS-4

### (2. 2. 1) 剥落の形態

表 8-13 に振動試験結果一覧、図 8-14 に共振周波数確認時の応答加速度履歴、写真 8-11 に試験体の破壊性状、図 8-15 に剥落が発生した加振時の応答加速度履歴を示す。ナット締結状態で建築物 N 天井の共振周波数 9.5Hz・980gal まで入力したところ、小幅板天端の Z 軸応答加速度は両端支持部 (ch-5) で 1300gal 程度、片持ち部 (ch-10) で 1400gal 程度であり支持条件による顕著な差はなく、損傷も確認されなかった。試験体自体の共振振動数を測定したところ最も増幅が大きかったのは 8.8Hz (図 8-14) で模擬試験体および建築物 N 天井よりもピークが低くなっており、新設野縁受け取付金物の影響と考えられたため、以降の入力周波数は建築物 N 天井の共振周波数も加味しつつ 9Hz とした。

漆喰の剥落が最初に生じたのは 9Hz・980gal・ナット緩め 1 回目 (順序 10) であり、上塗層の面積比 30%が外縁部から内側へ進展する形態で剥落した。上塗り剥落部の下層 (中塗り・宵縛りなど) は表面が比較的平滑に仕上がっていたため、後に塗られた上塗漆喰と肌別れしやすい状態になっていたと考えられる。この時点の小幅板天端の Z 軸応答加速度は両端支持部 (ch-5) で 8600gal 程度と同条件時の AMS-2 と近い値となったが、片持ち部 (ch-8) は 47000gal 程度と非常に増幅されていた。漆喰全層の剥落は 9Hz・980gal・ナット緩め 3 回目 (順序 12) にて発生した。模擬試験体のように端部から内部へ進展する傾向はみられず、木摺り下地が持ち出しとなっている片翼部分が大きな破片 2 つとなって脆性的に曲げ破壊して剥落した。剥落部の小幅板には漆喰のこびりつきが少なく、同時に引張付着の作用面積の少なさを示唆しており、破片の大きさからも模擬試験体の付着抑制条件との共通項を見出すことができる。漆喰が脆性的に剥落した要因は材齢による炭酸化の影響が考えられ、第 4 章・実験 4-1 において炭酸化が進んだ漆喰は、強度は増すが脆性的な傾向を示したことと調和的である。

### (2. 2. 2) 下げ苧の効果

漆喰層の剥落領域には下げ苧が 7 ヶ所存在していたが、剥落時にその全ての繊維が破断もしくは脱落しており、剥落の抑制・遅延に寄与していた傾向は確認できなかった。下げ苧の固定部は木摺り下地であるものの、繊維部分は面内方向へ展開されているため、面外方向の外力には寄与しにくいことに加えて、下塗りや斑直しに近い位置で伏せ込まれていたため、それ以降に塗られる漆喰層に支持力は作用しにくいことが考えられる。漆喰全層剥落のタイミングが模擬試験体の基本条件 (下げ苧無し) と同じであったことを考えると、あくまで面内方向のひび割れ防止等の補強材としての効果にとどまるという解釈が妥当といえる。

### (2.2.3) 寒冷紗の効果

漆喰層剥落片の木摺り下地との接触面には、棕櫚皮の寒冷紗の露出が一部で確認されたうえ、当該部に対応する位置の木摺り下地には漆喰がこびりついていた。これは漆喰の引張付着よりも寒冷紗界面の付着強度のほうが脆弱な部位となる可能性を示唆しており、第 5 章・実験 5-2 の界面剥離型と同様に、寒冷紗が漆喰塗り重ね界面の付着に悪影響を及ぼすことを示唆する結果となった。ただし、寒冷紗の露出は特定の小幅板に沿って帯状に生じていることから、漆喰の引張付着強度は小幅板の表面状態に左右される可能性がある。また寒冷紗の厚さ方向の伏せ込み位置（施工時に伏せ込むタイミング）によっても、それより上塗り側（後に塗られた材料）の固定荷重ひいては剥落を起こす際の外力が変動するため、さらなる検討が必要となる。

なお、今回の実試験体では剥落時に脆性的な傾向を示したことから、寒冷紗に剥落を遅延させるような効果は確認できなかった。下げ葺と同様に、面内方向のひび割れ防止等の補強材としての効果にとどまると考えられる。

### (2.2.4) 継手の影響

剥落部の小幅板には野縁部分に 5 か所の継手が認められた（写真 8-11 b）の j)）。第 3 章・表 3-3 で示した技術書において、小幅板の継手は基本的に 5・6 本おきに 1 本の割合で乱継ぎが求められているが、AMS-4 は採取箇所の影響はあるにしろ小幅板 21 本に対して継手 5 本は多い傾向にある。それに伴い、木摺り下地の面剛性の低下や、野縁（継手）を境界に振動モードに差異が生じていたことが漆喰の損傷形態にも影響を及ぼしていると考えられ、小幅板片持ち部天端の Z 軸応答加速度の大きな増幅（最大 60000gal 前後）や、漆喰残存部の野縁に沿ったひび割れからもその関連性が伺える。今回の試験は小幅板が持ち出しになっている特異点を有する条件下ではあるものの、継手が漆喰の挙動に影響を及ぼす可能性を示唆するものとして今後も検証を行うこととする。

表 8-13 振動試験結果一覧 (AMS-4)

順 序	設定条件			最大応答加速度 (gal)										所見	漆喰層 剥落率 (%)
	加速度 (gal)	周波数 (Hz)	野縁～ 野縁受 接合部	ch-1 スデ ージ	ch-2 架台 上部	ch-3 野縁 受 (新設)	ch-4 野縁	小幅度板(野縁受け・野縁重心)			小幅度板(持ち出し端部)				
								ch-5 Z	ch-6 X	ch-7 Y	ch-8 Z (-X側)	ch-9 Z (中央)	ch-10 Z (+X側)		
1	300	9.5		323.61	303.51	397.8	392.16	415.36	56.52	50.27	412.07	449.11	444.51	損傷は確認されず	0
2	600			645.21	590.94	800.02	807.12	826	94.2	73.12	884.33	856.55	884.53		
3	980			1043.19	954.75	1321.58	1285.92	1312.16	155.43	164.52	1393.63	1305.66	1441.29		
4	300	2-6	367.83	333.66	477.36	483.36	481.44	56.52	36.56	509.3	523.19	520.84	損傷は確認されず (共振ビーク : 5.3Hz)		
5		6-10	331.65	309.54	503.88	501.6	490.88	70.65	68.55	569.49	560.23	529.82	損傷は確認されず (共振ビーク : 7.1Hz、次位 8.8Hz)		
6	600	9	締結	633.15	588.93	839.8	807.12	816.56	122.46	77.69	1013.97	870.44	920.45	損傷は確認されず	
7	980			1049.22	962.79	1374.62	1290.48	1288.56	169.56	132.53	1532.53	1370.48	1351.49		
8	300			323.61	303.51	402.22	396.72	405.92	89.49	86.83	472.26	416.7	516.35		
9	600	9	ナット 緩め	675.36	619.08	1361.36	1281.36	1132.8	146.01	178.23	3134.51	1847.37	2797.27	上塗層一部剥落	
10	980			1646.19	1511.52	15346.2	11897	8599.84	3348.81	2540.92	47096.4	21612.8	39170.8		
11				1577.85	1384.89	14307.5	10930.3	8614	3589.02	2253.01	36197.3	23298.2	43548.5		剥落進展は確認されず
12	980	9		2110.5	1875.33	30100.2	22403.3	22382.2	4827.75	4492.31	56694.3	29775.5	63762.5	木摺り下地片持ち部分の漆喰全層剥落、漆喰残存部表面、野縁に沿ってひび割れを確認	

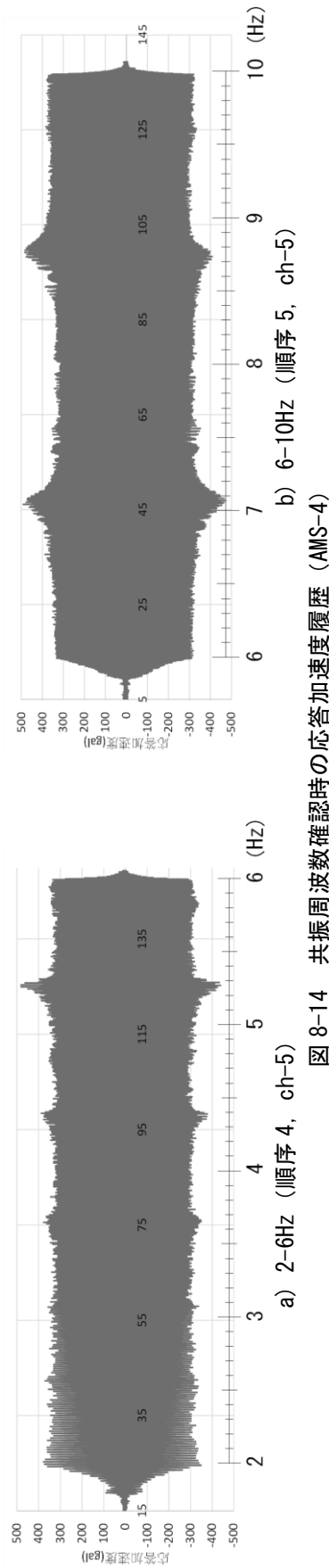
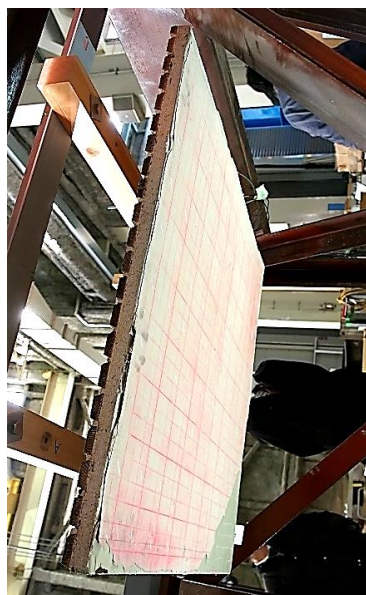


図 8-14 共振周波数確認時の応答加速度履歴 (AMS-4)





a) 試験前 (2 カメ)  
表面塗装一部剥離、赤色の線は打撃試験時の墨出し跡 (チョークライン)



b) 漆喰上塗層の一部剥落状態 (2 カメ)  
(順序 10: ナット緩め, 980gal, 9Hz, 1 回目)  
肌別れ表面 (中塗層) が平滑な仕上がりとなっている影響により上塗りとの付着が脆弱になっていた可能性あり



c) 漆喰全層の剥落状態 (2 カメ)  
(順序 12: ナット緩め, 980gal, 9Hz, 3 回目)  
野縁より外側、木摺り下地片持ち部分が剥落した。小幅度 3~4 枚おきに継手を認める



d) 試験前 (1 カメ)  
矢印は 6.3.6(2.1) で記載した塗膜が剥離しかかっていた部分で、振動試験前に予め除去した



e) 漆喰上塗層の一部剥落状態 (1 カメ)  
(順序 10: ナット緩め, 980gal, 9Hz, 1 回目)



f) 漆喰全層の剥落状態 (1 カメ)  
(順序 12: ナット緩め, 980gal, 9Hz, 3 回目)

写真 8-11 a) 試験体の破壊性状 (AMS-4)

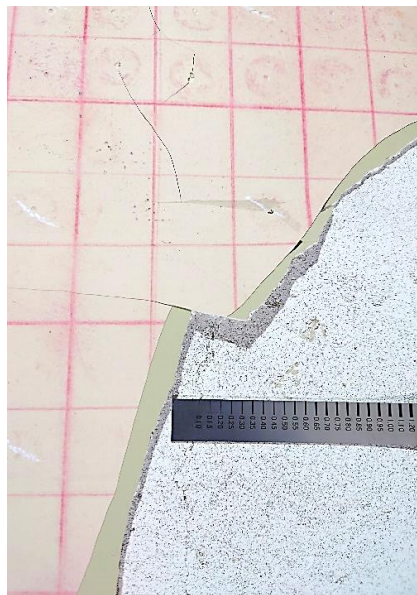




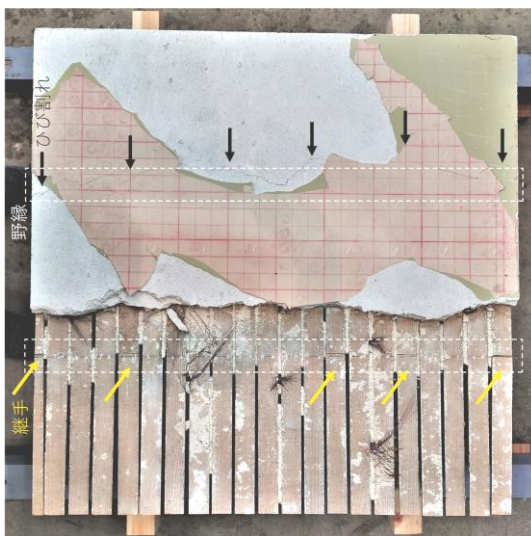
g) 剥落片の木摺り下地界面側  
目透かし部の漆喰は破断型の痕跡が多く、テーパ一断面の木摺り下地による脱着抑制を確認



h) 剥落部の木摺り下地  
矢印部に野縁が走り、目透かし部に残存する漆喰が少ないのは剥落後の加振で脱落した模様



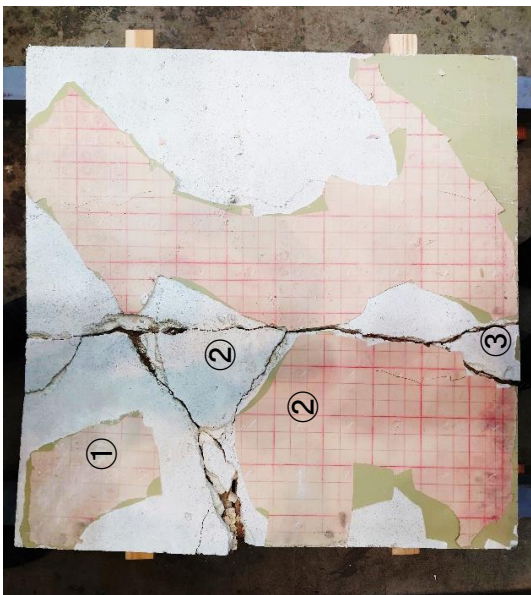
i) 漆喰残存部のひび割れ(幅 0.1~0.2mm)  
漆喰残存側の野縁直下付近、野縁方向にひび割れを確認。木摺り片持ち部の暴れが要因と推定



j) 最終加振後の剥落状態  
小幅板の継手を5か所、漆喰残存部の野縁に沿ったひび割れを認める



k) 剥落最終状態(剥落片裏面側)  
目透かし部漆喰脱落は一部にとどまる



l) 剥落片復元状態

写真 8-11 b) 試験体の破壊性状 (AMS-4)

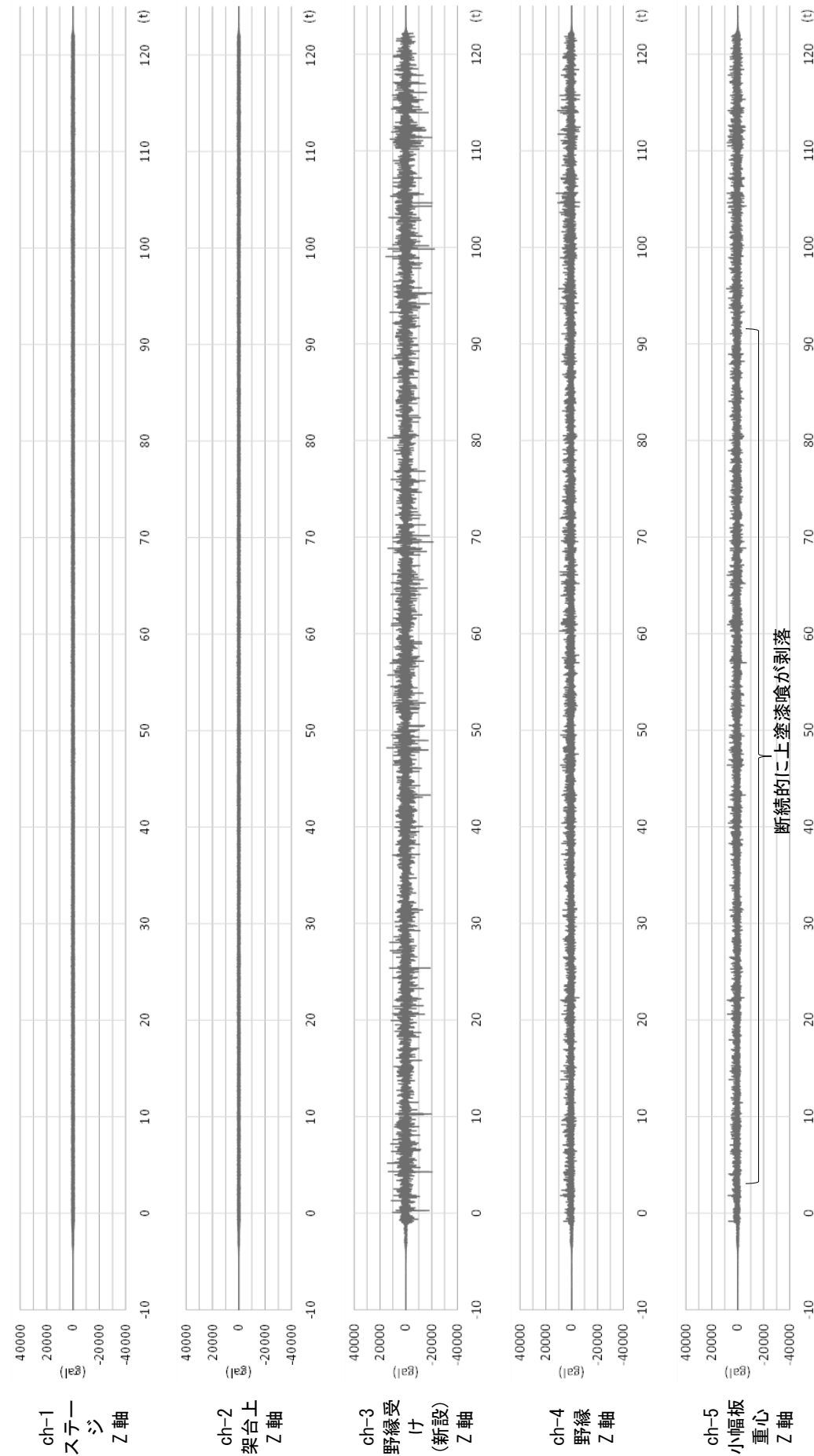


図 8-15 a) 剥落が発生した加振時の応答加速度履歴 (AMS-4) (順序 10 : ナット緩め, 980gal, 9Hz, 1 回目) ch1~5

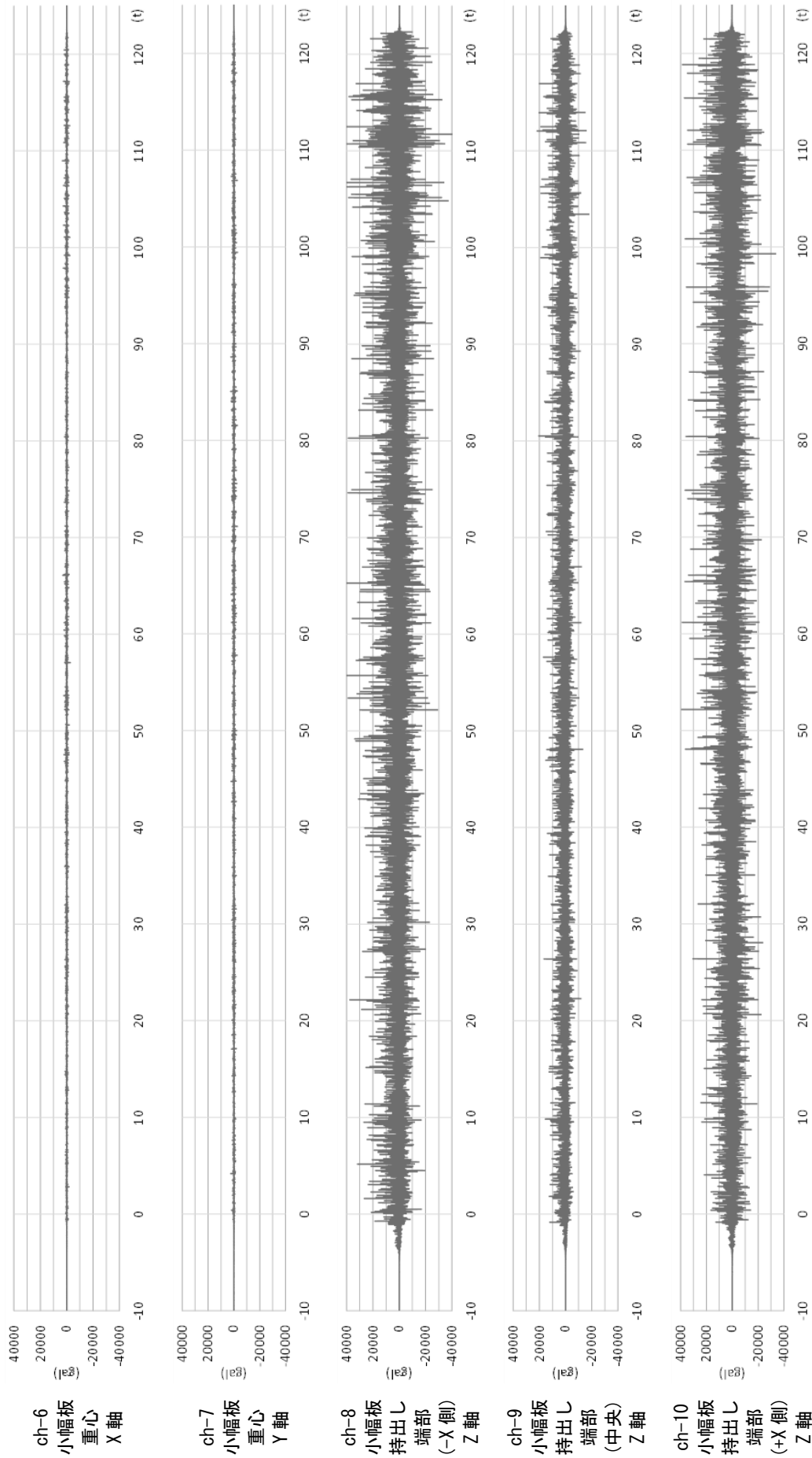


図 8-15 b) 剥落が発生した加振時の応答加速度履歴 (AMS-4) (順序 10 : ナット緩め, 980gal, 9Hz, 1 回目) ch6~10

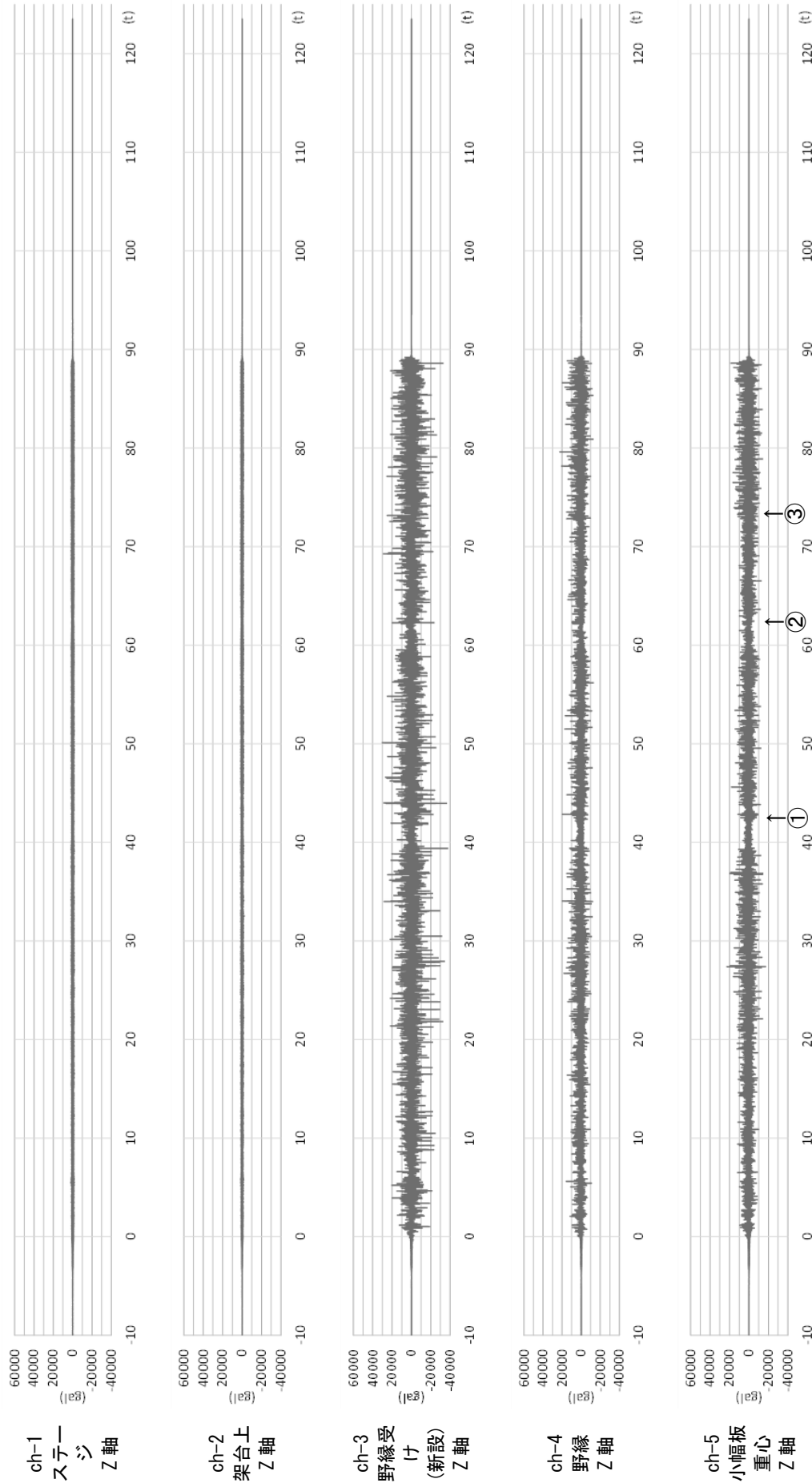


図 8-15 c) 剥落が発生した加振時の応答加速度履歴 (AMS-4) (順序 12 : ナット緩め, 980gal, 9Hz, 3 回目) ch1~5

※90 秒付近でリミッターによって停止した



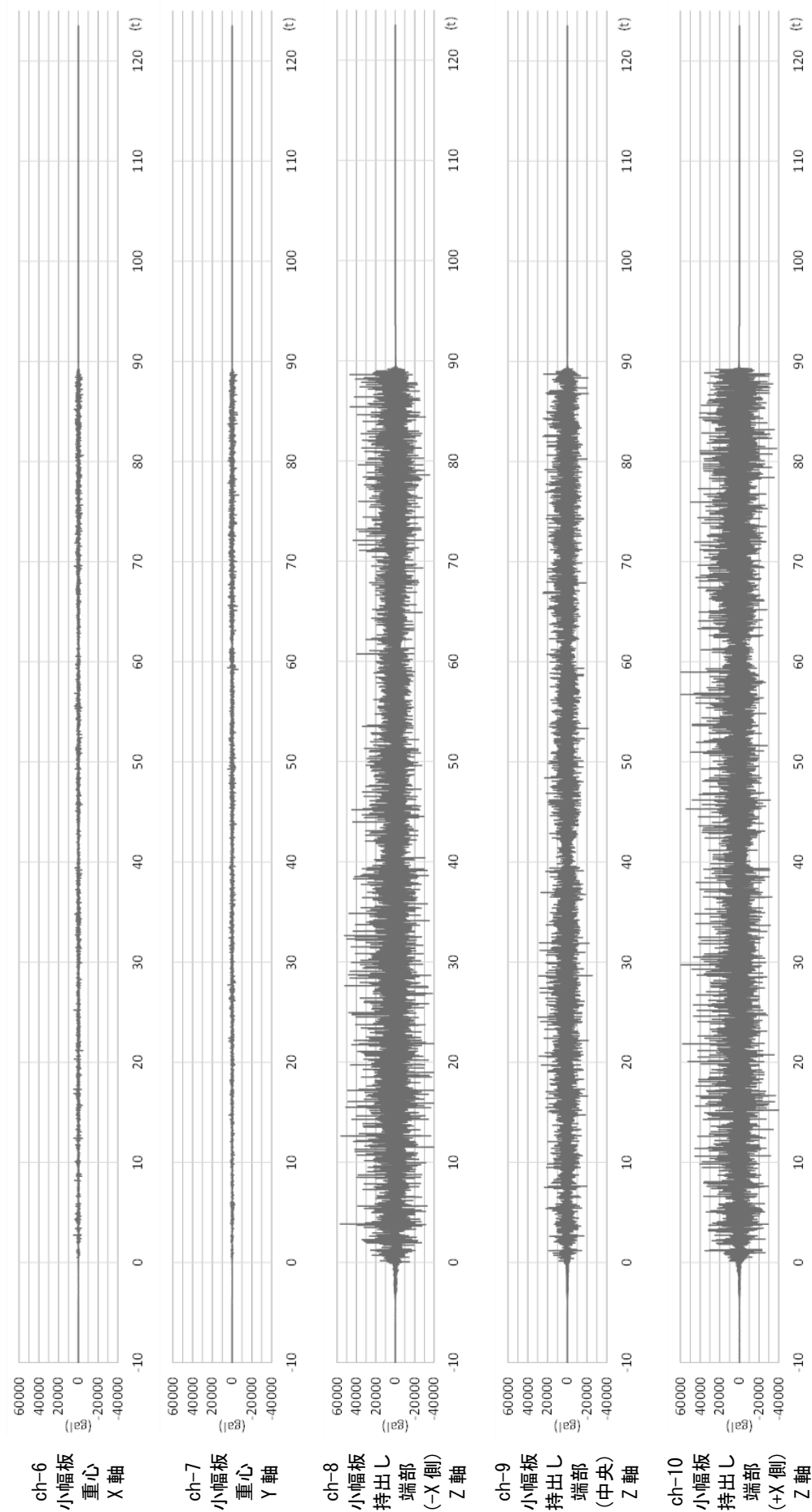
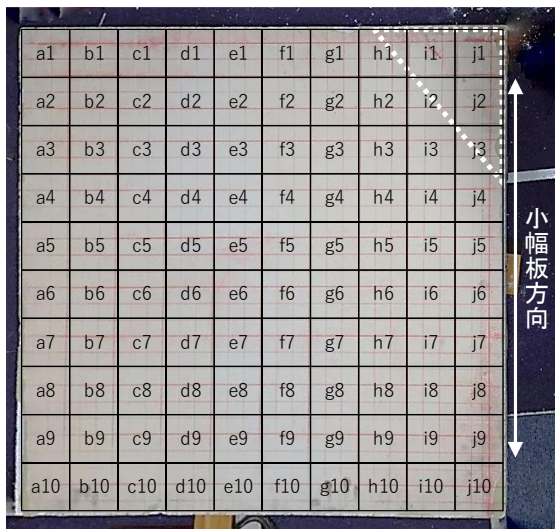


図 8-15 d) 剥落が発生した加振時の応答加速度履歴 (AMS-4) (順序 12 : ナット緩め, 980gal, 9Hz, 3 回目) ch6~10

※90 秒付近でリミッターによって停止した

(2.3) AMS-4 における剥落形態と非破壊試験による脆弱部判定結果との比較

図 8-16 に AMS-4 の打撃試験による脆弱部判定結果（図 6-37 再掲）、写真 8-12 に AMS-4 の剥落後の状態を示す。両者を比較すると、脆弱部判定の多い 5 列目以降の領域と剥落領域が一致していた。剥落の要因として小幅板持ち出し部分の特異点による影響は考慮すべきであることは先述したが、小幅板の継手による漆喰層への悪影響や、引張付着の作用面積の少なさを打撃試験によって認識できている可能性がある。まだ検証すべき部分は多くあるが、漆喰層の脆弱部ならびに剥落の可能性がある部分の判定に本研究における非破壊試験手法を適用できる可能性を示すことができた。



a) AMS-4 の打撃点マス割※)

Aクラス (脆弱部判定)					Bクラス (健全部判定)				
a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1	h1	i1	j1
a2	b2	c2	d2	e2	f2	g2	h2	i2	j2
a3	b3	c3	d3	e3	f3	g3	h3	i3	j3
a4	b4	c4	d4	e4	f4	g4	h4	i4	j4
a5	b5	c5	d5	e5	f5	g5	h5	i5	j5
a6	b6	c6	d6	e6	f6	g6	h6	i6	j6
a7	b7	c7	d7	e7	f7	g7	h7	i7	j7
a8	b8	c8	d8	e8	f8	g8	h8	i8	j8
a9	b9	c9	d9	e9	f9	g9	h9	i9	j9
a10	b10	c10	d10	e10	f10	g10	h10	i10	j10

b) マスごとの両クラスマッピング図

図 8-16 AMS-4 の打撃試験による脆弱部判定結果（図 6-37 再掲）



写真 8-12 AMS-4 の剥落後の状態※)

※) 試験体右上の三角形点線内は塗膜の捲れあがり部分

### (3) 本試験の剥落性状を踏まえた今後の実験について

本研究の振動試験体サイズは振動台への設置や取り回しを勘案して約 1m 角で実施しており、実際の天井部材と比較すると小さいものとなる。面内外の変形や経年的な劣化（雨漏りなど）の要因を考慮しない条件下における振動試験の結果、木摺り下地上端の応答加速度が 10000gal を超える振動を複数回与えた段階で剥落が生じており、数値上でみると相当な加速度に耐えうることがわかった。

実際の建物で考えた場合、天井下地で応答加速度 10000gal を超える地震力の場合は構造躯体にも相当なダメージが入る可能性が高く、現在までの報告にあるような”構造体には顕著な影響は無く天井の漆喰が剥落した”という状態に留まらないと推察される。つまり今回の振動試験で得られた耐力の高さは、スケール効果はさることながら、本試験で考慮していない条件に、耐力を低下させるような剥落要因が包含されていることを示唆しており、部材（躯体）変形や経年変化といったほかの劣化要因へスクリーニングすることができたといえる。これは静的試験（第4, 5章）の結果を分析した第7章においても言及しており、動的試験においても再現性が確認できた結果となった。これらに加えて、壁との取り合い部や化粧梁などの天井面の凹凸、先述の継手などの影響を判断するには、今回以上に試験体のサイズを拡大する必要があると考えられる。



## 8.5 第8章のまとめ

本章では、木摺り漆喰天井の力学的特性実験、非破壊試験、保有耐力算定等の結果を踏まえて、木摺り漆喰天井の部材試験体に対する振動試験を、試験体は実試験体を基にした模擬試験体と、そのオリジナルの実試験体に対して実施した。模擬試験体は実試験体4体の中で不利側の条件を持つAMS-4の仕様を安全側の観点からオリジナルとして採用し、小幅板と漆喰界面の引張付着、目透かし幅、漆喰調合等の各パラメータと破壊形態の関係、および現在までの検討結果との関連性の確認を行ったうえで、実試験体の振動試験を実施して再現性を確認した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 模擬試験体を施工したのち振動試験に先立って、第6章で実施した画像解析（目透かし開口率 GR、引掛り率 AR、平均引掛り幅 AAW、開花率 KR）にて施工状態をオリジナルの AMS-4 と比較した。その結果、模擬試験体の値は AMS-4 と概ね近い結果となり再現性が確認できたが、目透かし開口率 GR は AMS-4 のほうが若干小さいながらも、開花率 KR は模擬試験体を上回る数値となった。つまり AMS-4 のほうが目透かし幅が狭いながらも漆喰が面内方向に広がっていたことを示しており、模擬試験体に用いた漆喰よりも軟練りであった可能性がある。
- 2) 振動試験では、試験体損傷状況を確認しながら振動台最大出力の 980gal を上限に段階的に引き上げ、原則的に破壊現象が確認できるまで Z 軸方向の sin 波の加振を、120s/回で繰り返した。野縁受け・野縁ボルト接合部は「締結状態：健全状態」で試験を開始し、入力 980gal でも損傷しない場合は「ナット緩め：木材の痩せ等で緩んだ経年状態」でガタを大きくし、木摺り下地の剛性を落として振動が増幅されるか試すこととした。漆喰部へ作用する加速度は木摺り下地小幅板天端で測定する Z 軸方向の応答加速度と見なした。入力周波数は事前に測定した現地建物（AMS-4 を採取した建築物 N）天井木摺り下地天端の共振周波数 9.5Hz を適用した後、試験体自体の共振周波数を sweep 波で策定して与えることとしたが、それも 9.5Hz に近い値となり図らずも再現性を確認できた。

全ての試験体において「締結状態」の 980gal 入力では小幅板天端の最大応答加速度は 1500gal 前後まで増幅されたが、損傷は発生しなかった。次段階の「ナット緩め」では木摺り下地上端の応答加速度が 10000～30000gal を記録し、接合部の緩みによって揺れが相当に増幅され、剥落が発生することを確認した。この結果より、木摺り漆喰吊り天井の健全度評価や修復時には、吊り下地接合部の締結度も対象とする必要があることを示唆した。また、剥落発生の前段階には木摺り下地の上側（実際の建物におけるフトコロ）に粉塵が発生することがわかり、これは実建物の天井調査において定量的な観点にはなるが、粉塵の痕跡（埃とは異なる不自然な粉がふいている、など）を確認することが、剥落が起り得る部分を推測するための重要な視点になるといえる。

以降に、試験体ごとの実験状況をまとめる。

### 2-1) AMS-4 のオリジナル仕様に準拠した「基本条件」

9.7Hz・980gal・1 回目で漆喰の浮きが確認され、小幅板と漆喰の引張付着が外れ、漆喰が暴れることによる粉塵の発生が認められた。粉塵の発生～剥落までにはタイムラグがあったため、粉塵の発生は剥落の前兆現象として重要であるといえる。定性的な基準にはなるものの、地震後の

天井調査などで”木摺り下地に不自然な粉塵が付着しているか”などが評価ポイントと位置づけられる可能性がある。

続いて 9.7Hz・980gal・3 回目の加振で漆喰面出隅部 4 箇所から剥落した。以降は、先の剥落によって生じた出隅部が片持ち支持になることによって、剥落を誘発させながら内側へ進展する破壊形態であり、最終的な漆喰剥落率は全体の 49%であった。剥落時の小幅板天端の応答加速度は 10000～30000gal (約 10～30G) 程度であり、純粋な鉛直方向の加振では相当な加速度に耐えることがわかった。これは 7.2.3 の木摺り漆喰部分の余裕度として求めた「19.8 倍」に調和的である。

## 2-2) 基本条件の小幅板にフッ素樹脂テープを貼り漆喰の引張付着を阻害した「付着抑制条件」

9.5Hz・980gal・1 回目の初期段階で粉塵の発生ならびに面積率 10%が剥落し、2 回目の加振で 37%まで剥落が進展した。漆喰食い込み部が完全に破断した後も漆喰層の剛性でしばらく片持ち状態で耐える状態があり、曲げ破壊によって落下した。出隅部の連鎖的な剥落はみられず、落下片 1 枚のサイズが基本条件のものよりも大きく、引張付着が作用していないことによる影響がみられた。その意味では、引張付着の作用は仮に剥落が発生したとしても、破片が細くなることで被害低減を図れる可能性が示唆された。剥落時の小幅板天端の Z 軸応答加速度は 15000gal 程度で推移、最大 18500gal 程度であり、最初の剥落が発生したタイミングは基本条件より早かったため、大加速度の負荷に対して脆弱な傾向が認められ、第 4・5 章の漆喰引張試験の結果を裏付けた。

## 2-3) 基本条件の目透かし幅を狭くした (6→4mm)「食込抑制条件」

9.5Hz・980gal・1 回目で 41%が剥落した。出隅部から内側へ連鎖的に剥落する破壊形態は基本条件と同様の傾向を示したが、一部で界面剥離が認められた。破壊モードと目透かし幅の関係は第 5 章で論じており、約 9mm を分水嶺にそれより幅が広い場合は界面剥離、狭い場合は破断型が発生しやすい傾向となっていたが、当試験体ではそれに反する結果となった。発生部位はごく一部であるため、施工要因によるものと解釈した。剥落時の小幅板天端の Z 軸応答加速度は 15000gal 程度で推移、最大 20000gal 程度であり、付着抑制条件と同様に最初の剥落を起こしたタイミングは基本条件より早く、目透かし幅の狭さによる悪影響が顕在化したといえる。

## 2-4) 基本条件の漆喰調合のスサ量を減らした「漆喰強度抑制条件」

9.5Hz・980gal・1 回目で 54%が剥落した。1 加振での剥落量は 4 試験体の中で最も多く、天井耐力を決めうる要因としては目透かし幅よりも漆喰強度のほうが支配的と考えられる。剥落時の小幅板天端の Z 軸応答加速度は 15000gal 程度で推移、最大 25000gal 程度であり、出隅から内側へ進展する剥落形態から基本条件と類似していたが、片持ち支持の状況下で自身の剛性で耐えるような様子はなく、落下片が細かく、脆性的に落ちていく傾向がみられ、繊維の少なさによる悪影響が顕在化した。

- 3) 実試験体はその採取状態によって付帯する下地材がまちまちであるため、野縁受け以上の部材は一度取り外し、専用の金物を用いて野縁受けを新設して模擬試験体と同じ据え付け方法で試験を行えるようにした。なお、実試験体は野縁が2本（模擬試験体は3本）であり、小幅板端部の持ち出し長さが大きく応答加速度がより増幅される可能性があったため、小幅板端部天端にも加速度計を設けた。石膏ボードによる漆喰表面の補強がなされている AMS-2 にて AMS-4 実施前の予備試験、ならびに補強効果の確認を行った後、最も原型を留めている AMS-4 の試験へ移行した。両試験体も「締結状態」での損傷は確認されなかったため、「ナット緩め」で挙動を検証した。その際の結果をまとめる。

### 3-1) AMS-2

9.7Hz・980gal の加振における最大応答加速度は小幅板天端の両端支持部で 9000gal 程度、片持ち部で最大 23500gal を記録したが、漆喰層の若干の浮きを記録した程度で剥落は認められず、石膏ボード補強の効果が認められた。また新設の野縁受け取付金物も試験上問題なく機能することがわかったため AMS-4 に移行した。

### 3-2) AMS-4

#### 3-2-1) 剥落形態

9.0Hz・980gal・1 回目で上塗漆喰の 30%が外縁部から内側へ進展する形態で剥落した。上塗り剥落部の下層が比較的平滑に仕上がっており、肌別れしやすい状態になっていたことが考えられる。漆喰全層の剥落は 9.0Hz・980gal・3 回目で発生し、野縁の直下がひび割れ、木摺り下地の持ち出し部位の直下が落下したが、以降、内側へ進展する形態は認められなかった。剥落時の小幅板天端の両端支持部で 22000gal 程度、持ち出し先端部で最大 63000gal を記録した。また模擬試験体で確認できた曲げ剛性で耐える様子は認められず脆性的な破壊を起こしており、その点は第4章・実験 4-1 の促進炭酸化させた角柱試験体と同様の傾向が確認できた。加えて剥落部の木摺り下地には漆喰のこびりつきが少ないことから、試験を実施した時点において引張付着が作用していた面積は少ない水準であったと考えられ、落下片が大きいことから付着抑制条件と類似する結果を示した。

#### 3-2-2) 下げ苧の効果

剥落部分に7ヶ所あった下げ苧は、その繊維全てが破断、もしくは抜け落ちており、剥落の抑制・遅延に寄与していた傾向は確認できなかった。下げ苧の繊維は漆喰層の面内方向に展開されていること、下げ苧を有さない模擬試験体「基本条件」と剥落のタイミングが同じであったことを勘案すると、面外方向の外力への寄与は限定的と考えられる。

#### 3-2-3) 寒冷紗の効果

漆喰剥落片の一部に、棕櫚皮の寒冷紗の界面で漆喰が肌別れを起こした痕跡を確認した。この部分に対応する位置の木摺り下地には漆喰がこびりついており、漆喰・木摺りの引張付着強度との競合によって生ずるものと考えられるため、相互の関係についてさらなる検討が必要となる。

また、漆喰の剥落は脆性的な傾向を示したことから、剥落を遅延・抑制させる効果は下げ葎同様に限定的なものと考えられる。

### 3-2-4) 小幅板の継手

剥落によって露出した 21 本の小幅板のうち 5 本が野縁直下で継手を有しており、試験体採取場所の問題もあるが現行の基準と比較すると多い傾向にある。継手によって木摺り下地の剛性低下や振動モードの差異が生じるため、今回の損傷形態にも影響を及ぼしている可能性があり、小幅板片持ち部天端の Z 軸応答加速度の大きな増幅（最大 60000gal 前後）や、漆喰残存部の野縁に沿ったひび割れからもその関連性が伺える。

### 3-2-5) 非破壊試験による脆弱部判定結果との比較

第 6 章で AMS-4 の漆喰面の打撃試験を行い、HLD を基に算出した評価値の分布から脆弱部の判定を行っている。本試験体においては木摺り下地の持ち出し等の特異点が存在していることは考慮すべきあるが、今回の剥落形態と照合すると、脆弱部と判定された領域と剥落した領域が概ね一致していることがわかった。また、剥落領域のなかでも小幅板表面に漆喰がこびりついていた部分（付着が作用していた部分）は、健全部判定となっている傾向があり、打撃試験の評価値が木摺り下地と漆喰の付着と関連している可能性が改めて示唆された。

## 第9章

### 本研究の結論と今後の展望

第9章 本研究の結論と今後の展望

9.1 本研究の結論 .....263

    9.1.1 本研究の背景と目的の導出.....263

    9.1.2 研究目的との対応 .....266

9.2 木摺り漆喰天井とその関連工法の健全度評価手法の拡充に向けた展望 .....275

    9.2.1 本研究での成果と今後の研究課題の整理.....275

    9.2.2 今後の研究課題の詳細 .....279

### 9.1 本研究の結論

#### 9.1.1 本研究の背景と目的の導出

東日本大震災では、多くの建築物で天井部材をはじめとする非構造部材の損傷が多く報告され、構造部材および非構造部材を包括した建築物の耐震性能を再考する段階へ移行したといえる。

特に吊り天井はその納まりによっては構造部材と仕上材の挙動に乖離が生じ損傷を起こしやすく、高所からの重量物の落下事象が付帯することがあるため、空間の用途・規模によっては直接的に人命に影響するような被害を起こす可能性がある。そのため、平成25年国土交通省告示第771号をはじめ、天井材等の非構造部材の落下における安全対応策の指針の制定などによって、新規建築物だけでなく既存建築物にも対策すべき範囲が拡大し、天井部材の軽量化、フェイルセーフ化等の改修工法が提案・施工されている。

一方で、耐震化改修・検討対象となっている既存天井は昭和30年代以降に導入された乾式仕上材と鋼製下地による、いわゆる在来天井やシステム天井に留まっており、それ以前に一般に普及していた木製吊り天井下地や左官仕上天井はほとんど手付かずといってもよい状態にある。これらの天井は幕末期に導入された西洋技術と従前に普及していた本邦工法の組み合わせによって経験的に確立した経緯があり、現在の体系化された施工法とは異なる納まりになっていることが往々にしてある。施工年代を考えると今日では歴史的建築物として扱われる程度の築年数が経過しており、文化性や安全性の観点から修繕が求められることが多いが、建物ごと・部材ごとの個体差が大きく、画一的な耐力評価および改修が困難であることが指摘されている。文化財に指定されている建造物は2020年時点で15000棟を超え、その数は増加の一途をたどる。文化財指定された建築物は意匠性・技術性・社会性などといった各側面の保全が求められる共に、用途によっては建築物としての継続利用を図るために必要な使用安全性の確保を両立・取捨選択する必要がある。

天井部材であれば改修後の用途、災害時の想定規模に応じて、その建築物に紐づけられた「価値のありか」に応じて部材損傷の許容度、修復の可否を区分する必要性が問われている。天井部材は一度損傷が生じるとその空間における使用継続性（人的安全性、補修の問題、心理的影響）に大きな影響を及ぼすため、構造躯体に影響がなくとも被災建築物が使用中止・解体される事例があり、材料・意匠を保持しつつ「使いながら保存」を目的とする歴史的建築物においては重要な懸案事項である。文化財の登録数および保護措置が必要な建築物の増加は、適用されている工法や、施工状態、経年状態の多様化を意味するが、それに対応しうる文化財保護の観点に立脚した劣化状態の統一的な評価方法、補修・修復方法の検討は、十分になされているわけではなく、より一層の知見の蓄積が必要といえる。

左官仕上げの天井は固定荷重が乾式仕上げのそれよりも大きくなりやすく、例えば日本建築学会の荷重指針において漆喰塗りは $5.9 \sim 26.6 \text{ N/m}^2/\text{mm}$ とあり、一般的な塗り厚目安の15mmで $88.5 \sim 399 \text{ N/m}^2$ （12.5mm厚石膏ボードで $73.8 \sim 111 \text{ N/m}^2$ ）となる。塗り厚は塗り下地の種類や職人の技能レベルにも影響を受けやすく、平滑で上等な仕上げを狙うほど塗り重ね回数が多くなるので厚塗りになりやすい。また格調高く、かつ大勢の人を集めるような建築・空間の天井はそれに見合う外観や天井高で設計され、意匠の自由度が高い左官材が自ずと選択されることが多い。つまり人が多く集まることを念頭に置く空間の天井は高く重厚に作製されることが多い故に、損傷した際の人的被害のリスクが一般の居室よりも大きくなる傾向がある。実例として、東日本大震災では経年した公共建築物の大空間におい

て、ラスモルタルなどで仕上げられた天井（約 755 N/m<sup>2</sup>）の崩落事故が発生、天井材の下敷きになるなどして死傷者が出ている。そのような被害状況を鑑みて、JASS15 左官工事最新版（2019 年）では前版（2007 年）まで記載されていた天井左官仕上仕様に関する内容が削除されており、新規建築物における天井左官仕上げは推奨しないことを明確に示している。このことから、左官天井が常用されていた時代の部材が多く残る歴史的建築物の修復時などではより一層の留意が求められるであろう。

以上の背景を概観すると、天井左官仕上材は損傷時の懸念の大きさが顕在化しつつあるが、そこで多く用いられていた工法のうちの一つが本研究で扱う木摺り漆喰工法である。これは幅 40mm 程度の小幅板を 10mm 程度の目透かし状に並べた「木摺り下地」に漆喰を塗り込めるもので、幕末期以降に伝来し、本邦古来の左官技術と組み合わせられる形で壁・天井に普及したものである。当該工法で施工された建築物は今日でも全国に数多く残存している一方で、ひび割れ・浮きなどの不具合が発生しているものがある。また地震等の外力によって、美観性が顕著に損なわれたり、安全性・耐久性・使用性の低下が生じたりする懸念があることは、現在までの剥落事象からも明らかである。

木摺り漆喰工法の壁や天井への普及に伴い、耐震的要素がある壁部材の研究は昭和初期から行われて一定量の知見が蓄積されている一方で、非構造部材として扱われてきた天井は長らく研究対象となっておらず知見は非常に少ない。そのため木摺り漆喰天井を対象にした検討例は、東日本大震災以降の天井被害が顕在化した以降のものがほとんどであるが、それでも本研究のほか、力学的特性や設計手法に関する検討がわずかに行われている程度であり、工法の変遷や、既存部材の健全度評価手法、保有耐力診断手法などは提案されていない。先述したように、今後新設される木摺り漆喰天井部材は歴史的建築物の修理工事等を除きほとんど無いことを勘案すれば、既存の天井部材の力学的特性ならびに健全度を評価し、維持保全に繋げてゆくことが可能となれば、補強の要不要だけでなく、適切な補強箇所・補強量の策定、不用意な部材撤去なども減らすことができ、歴史的建築物の保存活用にも寄与すると考えられる。



本論文の主題にもある「健全度」という語は、取り扱う分野によって対象や解釈が異なるため、横断的な定義づけを行うことはできない。本研究における健全度の意味合いは、「木摺り漆喰吊り天井の材料や構工法、保有耐力を含めた力学的挙動」と位置づけた。その上で、以下の目的によって調査・実験的研究を行い、木摺り漆喰天井に関する歴史的側面や力学的特性、既存部材の健全度評価手法、損傷メカニズムまでの広範な要素に関する検討を行った。

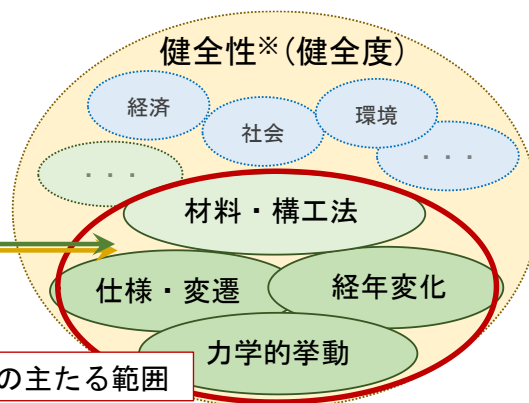
- 1) 木摺り漆喰工法ならびにそれを支持する木製吊り天井下地における構成部材の納まり・寸法などの仕様に関する年代の変遷を明らかにする。
- 2) 年代の変遷や実建物の天井仕様を反映させた試験体仕様で実験を行い、漆喰自体の力学的特性や木摺り漆喰部材、木製吊り天井における構成部材の各接合部を実情に即した形で明らかにする。
- 3) 既存木摺り漆喰天井部材を対象にした非破壊（画像解析・打撃試験）での健全度診断手法の検討と、診断結果と実物性との関連度を評価することで有用性を明らかにする。
- 4) 木製吊り天井下地および木摺り漆喰天井部材の力学的特性評価結果を踏まえて、当該工法の実際の保有耐力や余裕度（想定荷重に対する耐力の比）の予測を試みる。
- 5) 木摺り漆喰天井部材にいくつかのパラメータを設けたうえで振動試験を行い、動的な外力が作用した場合の損傷・剥落の挙動とパラメータの関係を明らかにする。
- 6) 実験室レベルで新規作製した試験体と実建物からの採取した経年材の力学的特性を比較して再現性を確認し、経年材採取等による歴史的建築物の負担を減らせるかどうか検討する。

#### 本研究の主題：

「木摺り漆喰吊り天井の力学的挙動と  
持続可能な利活用に向けた  
健全度評価手法の提案」

広義な意味合いを持つ「健全性・健全度」  
本研究では建築材料的アプローチを図る

本研究の主たる範囲



※これは概念的な図であるため、研究主題とは異なる定性的な表現とした  
本研究の主たる範囲と健全度の位置づけのイメージ（第1章・図1-2）

### 9.1.2 研究目的との対応

以降に各研究目的と各章で得られた知見・成果との対応を総括して示す。

**目的1 木摺り漆喰工法ならびにそれを支持する木製吊り天井下地における構成部材の納まり・寸法などの仕様に関する年代的変遷を明らかにする。（第3章）**

第3章では、木摺り漆喰天井およびその吊り下地部材の工法的変遷について、当該工法が普及していた時代に建設された実物件の修理記録や同時期の技術書等を基に、当該工法の本邦への導入・普及・体系化の過程を部材寸法、納まりの観点から調査・分析を行った。

#### 1-1) 木摺り下地の仕様変遷について

明治期～昭和期の建築技術書22件、実物件関連資料104件を調査し、JASS15初版（1957年）仕様への繋がりを分析した。小幅板の板幅平均は技術書が38.8mm、実物件が41.1mmで、厚さ平均は技術書が9.01mm、実物件が10.6mmとなっており、実物件のほうが大きい断面を用いていることがわかった。漆喰を塗ると下地が鉛直方向にたわむため、技術書仕様よりも剛性の高いものを用いていた可能性がある。一方で後年になると板厚が徐々に薄くなる傾向にあり、板が厚くなると漆喰が下地裏面側で開きにくくなることを考慮した結果や、戦時体制等による材料調達の困難度といった社会的要因も一因として考えられる。そのほか一部の仕様記録では、小幅板の断面形状（台形）を指定する記述もみられた。これは本邦への当該工法導入以前、木摺り漆喰工法の発生時期に試行錯誤の過程で用いられていた記録がある断面形状で、目透かし形状が扇形になるため漆喰が脱落しにくくなることを意図したものであり、それを意識していた可能性がある。

目透かし幅平均は技術書が8.89mm、実物件が9.07mmとなりほぼ同等の傾向を示した。一方で導入初期と考えられる仕様は寸法のバラつきが大きく、目透かしの意味について咀嚼しきれていない試行錯誤の跡が垣間みえた。板厚と同様に後年になると徐々に幅が狭い仕様へ推移しており、「目透かしに食い込んだ漆喰の垂れ」などといった経験的要因もフィードバックされていると推察する。

#### 1-2) 木製吊り下地の仕様変遷について

明治期～昭和期の建築技術書9件を調査した結果、明治初期の文献では木摺り下地を上階の床根太などに直接留め付ける仕様が記されていた。明治5年（1872年）竣工の富岡製糸場西置繭所はそのような天井納まりとなっており、当時の仕様を残したものとして貴重な例である。以降の時代に刊行された技術書からは、吊木、野縁受けなどの下地部材が徐々に分化している様子が垣間みえ、1905年の段階で1960年のJASS11初版に繋がる基本的な仕様が定まっていたことがわかった。

ただし、野縁受けの扱いはその有無や使用目的が文献によって異なっていたが、野縁受けを設けて吊木下端を当該材で受けたほうが、野縁の断面分だけ吊木の下方向の余長を長く取れるので構造的に有利となるし、野縁直交方向の面剛性が小幅板に支配されなくなるので、天井面の仕上がりは良好なものになると考えられる。

下地部材の分化は、それだけ施工工程の煩雑化を招くことにもつながるが、音響的側面や後年の仕上面の不具合を考慮した結果であると解釈できる。つまり、吊り元（小屋梁や上階床梁）と塗り下地との縁をなるべく切ることで、下層階への振動伝播を抑制して騒音や仕上材のひび割れを防ぐ

意図があったと考えられる。

左官工事・木工事共に、地場特有の方法によって施工されてきた経緯があり、洋風建築技術由来の天井工法も当時の技能者の中で経験則的な要因を多分に含みながら発展していったことが推察され、JASS11・15もその成果物を体系化した側面がある。その意味で、当該工法の導入期から発展期、標準仕様書による体系化までの系譜を明らかにし、歴史的建築物の竣工年代から凡その天井構成を推測できる情報を整理することが出来た。

**目的2** 年代的変遷や実建物の天井仕様を反映させた試験体仕様で実験を行い、漆喰自体の力学的特性や木摺り漆喰部材、木製吊り天井における構成部材の各接合部を実情に即した形で明らかにする。  
(第4・5章)

第4章では、木摺り漆喰天井部材の基礎的な力学的特性を評価するべく、調合、材齢のパラメータにて、漆喰単体の試験体を作製しての曲げ・せん断・圧縮の強度試験、ならびに木摺り漆喰天井を想定した要素試験体による下地と漆喰の応力伝達に関する実験的検討を行った。また第5章では、筆者らが実施した某実建物の木摺り漆喰天井に関する耐震診断データの一部を取りまとめる形で、現地天井調査記録を基にした模擬試験体、ならびに現地採取した木摺り漆喰天井部材を用いた強度試験を行い、木製吊り天井下地の基礎的な力学的特性の把握、経年部材と第4章での新規作製試験体における再現性などを確認した。

### 2-1) 漆喰調合の時代的変遷について

力学的特性を評価するために基となる漆喰調合を決定するため、第3章で対象とした各文献によって漆喰調合比の年代的な変遷を把握した。その結果、明治期～昭和期にかけて漆喰調合がほとんど変化していないことがわかった。江戸時代初期から国内で広がりを見せた白亜総塗籠式の城郭建築などによって、日本の左官技法は国際水準以上に発展していたため、木摺り漆喰工法の導入時期にあたる明治期の段階で、我が国の漆喰調合に関する技法は成熟しており、下地が木摺りであっても左官仕上げの工程は我が国の在来工法が適用されたことに起因するものと考えられる。

以上の結果より、年代別の調合による影響がほとんど無いと考えられたため、調合情報が最も詳細に記載されていた文献の内容を代表調合として採用することとした。

### 2-2) 漆喰材料の力学的特性について

木摺り下地と漆喰の応力伝達を担う下塗り（富調合）と、面剛性に寄与する斑直し・中塗り（貧調合）、およびそれに対するスサ量の下振れを考慮したスサ減調合の合計4調合にて角柱状の試験体を作製し、養生環境は標準・炭酸化促進、試験方法は曲げ・せん断・圧縮として力学的特性を評価した。

曲げ・圧縮がほぼ同等の強度を示したのに対し、せん断強度はその40%程度に留まっており、試験体内部の繊維方向に由来するものと考えられる。これは異方性を有することを示唆しており、実際の漆喰部材でも鰻の走らせた方向にスサが影響を受け、結果的に強度にも影響を及ぼす可能性が

ある。

標準養生環境下において、材齢と最大強度は概ね相関しており一般的な知見と一致するものとなった。促進炭酸化環境 10 週の最大強度は、標準環境の試験体よりも高く材齢との相関関係の範疇を逸脱するものでは無いものの、促進 26 週では 6~8%程度低下する現象がみられた。

富調合と貧調合を比較すると、貧調合はバインダー量の低下によって曲げ・せん断強度が特に悪影響を受け、圧縮強度ではプラスに寄与しており、固い仕上がりを狙った調合の特性が表れているといえる。スサ量が少なくなると最大強度は低下する傾向は一般的な知見と一致しており、これは材齢による強度増進よりも支配的なものとなっていた。各調合の弾性係数に影響を及ぼす因子は砂が最もウエイトが高く、固く仕上げる・面剛性を出すことを意図している貧調合の合理性が確認できた。

### 2-3) 木摺り漆喰部材としての力学的挙動について

木摺り下地と漆喰間の応力伝達に関する検証は、新規作製試験体（第4章・要素試験体）と経年試験体（第5章・実試験体）の両方で行っており、木摺り下地から漆喰を引きはがす際の最大強度、破壊モードから力学的特性を評価すると共に、実験室レベルの試験体と経年した実際の天井部材の間でどれほどの再現性があるか判断するものである。

要素試験体は目透かし幅を 1 水準に固定し、材齢、目透かし部の漆喰食い込み深さ、小幅板断面形状、破壊モードをパラメータに設け評価した。小幅板断面および目透かし幅の寸法は第3章で得られた結果を基に決定した。材齢と最大強度の関係は概ね相関しており一般的な知見と一致している。また材齢が進むほど最大強度のバラつきが減少しており、安定した強度を発現していることがわかった。小幅板断面形状は台形であるほうが漆喰食い込み部の脱落抑制に効果があることは本試験をもっても実証ができ、漆喰食い込み深さにも影響を受けにくく、破壊モードも漆喰食い込み部の引張破壊「破断型」が多く発生することが示された。「破断型」のほうがスサの架橋効果を始めた漆喰材料の持つ靱性的特性が作用するため安全側の破壊モードであると考えられ、実際に最大強度もほかの破壊モードよりも高い傾向を示している。

実試験体は目透かし幅にばらつきがあることを利用して、目透かし幅と最大強度の関係をみた結果、両者は相関関係にあることがわかり、漆喰食い込み部分において断面積と強度の関係を示す一般論が適用できることがわかった。また破壊モードは、目透かし幅 9mm を分水嶺に変動していることがわかり、それ以下であれば「破断型」、以上であると漆喰塗り重ねの肌別れ「界面剥離」を起こす割合が高まっていた。その意味での目透かし幅 9mm は、第3章で示した実物件の目透かし平均 8.89mm との共通点を見出すことができ、経験則によって策定された目透かし幅に定量的な一考察を加えるができたといえる。

要素試験体・実試験体の結果を踏まえて、木摺り下地と漆喰間における各抵抗要素を「目透かし部漆喰の引張応力度」「小幅板と漆喰の付着引張応力度」に分けて分析した。これを求めることで、目透かし幅や小幅板の幅などからその天井の保有耐力を算出することが可能となる。分析の結果、「目透かし部漆喰の引張応力度」は両者共に約  $0.12\text{N/mm}^2$ 、「小幅板と漆喰の付着引張応力度」は  $0.01\text{N/mm}^2$  となり、新規材・経年材で再現性があることがわかった。また「小幅板と漆喰の付着引張応力度」は「目透かし部漆喰の引張応力度」の 1 割以下であり、かつばらつきが非常に大きかつ

た。以上より、応力度の小ささやばらつきの大きさから不確定性が高いため、木摺り漆喰天井の木摺り漆喰天井の保有耐力評価等を行う際には引張付着応力度は作用しないものとして解釈したほうが安全側の判定ができると考える。

### 2-4) 木製吊り天井下地の各接合部の力学的特性について

建築物 N の現地における吊り下地仕様調査結果の中で最も安全側の仕様（最も小さい断面）にて天井吊り下地の模擬試験体を作製し、各部材の接合部の強度試験（面内・面外方向）を行った。接合部の破壊性状について、蟻掛け仕口と釘が用いられた部位（吊木の上下端）では男木の支圧変形と釘の引抜けが主体で、一部に女木の割裂があるが、釘の折損は各接合部・加力方向問わず認められない。また最大荷重後の耐力低下は比較的緩やかであったため、脆性的な破壊は生じにくいと考えられる。渡り腮仕口とボルトが用いられた部位（野縁・野縁受け）では、水平加力時にホゾ部や座金のめり込みやボルトの曲がり为主で、ボルト耐力に支配された格好で最大荷重を迎えており、破壊形態も脆性的であった。

以上より、年代別の天井下地、漆喰調合の変遷を踏まえた試験条件・試験体、ならびに実際の採取部材による力学的特性の評価によって、実験室レベルの試験体と実試験体において再現性があることを確認すると共に、今まで明らかとなっていなかった木製吊り天井下地の基礎力学的特性についても一考察を与えることが出来た。

**目的3 既存木摺り漆喰天井部材を対象にした非破壊（画像解析・打撃試験）での健全度診断手法の検討と、診断結果と実物性との関連度を評価することで有用性を明らかにする。（第6章）**

第6章では、木摺り漆喰天井部材の施工状態・健全度に関して、既存部材になるべくダメージを与えない微破壊・非破壊による診断方法として、天井裏からの撮影画像を用いた各種解析、天井仕上面からのエコーチップ式硬さ試験機による打撃試験、およびその測定値の統計学的アプローチによる脆弱箇所推定の可能性について検証した。画像解析は実試験体（某実建物から採取した天井材）の木摺り下地側直上からの撮影画像を用いて漆喰の引掛り状態を評価するもので、施工状態の評価と換言できる。打撃試験は漆喰表面の反発度測定値やその評価値から漆喰の物性や木摺り下地との付着状態を推測するもので、経年状態の評価といえる。

### 3-1) 木摺り下地側からの画像解析（施工状況判定）について

目透かしへ食い込んだ漆喰が上側へはみ出し、面内方向へ広がった量を定量化することが、漆喰層の支持力を推し量るうえで重要となる。そこで小幅板上部に乗っている漆喰を「引掛り率 AR」、漆喰引掛り量の平均的な幅を「平均引掛り幅 AAW」として評価した。その結果、全試験体において10%以上であることがわかり、目透かし幅よりも漆喰がはみ出して木摺り下地と嵌合していることがわかった。これは本実験で用いた実試験体の小幅板がテーパ断面であることから妥当な結果であるといえる。

木摺り下地を水平投影した際の、目透かし開口面積に対する漆喰食い込み面積を「開花率 KR」

として評価した。先述の AR と AAW は、漆喰の引掛りを絶対量で示した指標であるのに対し、KR は目透かし幅と漆喰の広がり方の関係を見るものである。算定の結果、目透かし幅と広がり方には目立った相関が認められず、目透かし幅に関わらず引掛け量のばらつきが大きく、職人の鍔圧、送り方、鍔に乗っていた漆喰の量などの施工要因に影響を受けることを示唆している。

### 3-2) 漆喰表面からの打撃試験（経年状態判定）について

木摺り下地に対する漆喰の「浮き」を経年によって生じる脆弱状態の一つと仮定したうえで、その状態を意図的に作り出した試験体を作製し、浮きの有無をパラメータに打撃試験を行い測定値によって浮き状態を判定できるか試みた。打撃試験には小型で打撃力が小さく材料への破壊を伴う影響が少ないエコーチップ式反発度試験機を用い、同一箇所を複数回打撃する「連打法」を用いた。連打法の測定値は打点のわずかな圧密によって打撃回数に応じて反発度測定が変動することが知られており、「打点の圧密」に打撃エネルギーが割かれるか否かによって、漆喰の浮きの有無を判定できると仮説を立てた。

漆喰塗り厚 10～15mm の試験体においては 1 打目と 10 打目の測定値の比率によって浮き部分が推測できる可能性を示せたが、塗り厚が 20mm を超えると漆喰自体の剛性が高まるため、浮きがあっても圧密にエネルギーが割かれてしまうことがわかった。

漆喰塗り厚 20mm を超える場合は、測定値を 2 クラスに分類することで浮きの有無を判定することを試みた。測定点の位置と紐づけた各測定値をクラスタリングし、それを面的分布に再度割り振って脆弱部の推定を行った結果、塗り厚 20,25mm の試験体においても付着の有無とクラスタリングとの相関が認められた。以上より、漆喰塗り厚によって判定方法を変えることにはなるが、現実的な漆喰塗り厚の範囲においては打撃試験によって脆弱状態を判定できる可能性を示した。

以上の結果より、天井部材両側からの非破壊試験（画像解析・打撃試験）を行う事で、施工状態や健全度を判定できる可能性を示し、実物性との高い関連性も示すことが出来た。最後に実試験体（漆喰塗り厚 21mm）に対して同様の方法で打撃試験およびクラスタリングによって健全部・脆弱部の面的分布を求め、第 8 章で実施した振動試験の結果と照合することとした。

### 目的4 木製吊り天井下地および木摺り漆喰天井部材の力学的特性評価結果を踏まえて、当該工法の実際の保有耐力や余裕度（想定荷重に対する耐力の比）の予測を試みる。（第7章）

第7章では、第4・5章で実施した天井各部材の強度試験結果を踏まえ、現状で知見が不足していた木製吊り天井下地ならびに木摺り漆喰天井の保有耐力推定を2つの視点で試みた。1つめは、木摺り漆喰吊り天井部材の各接合部の強度試験結果を踏まえ、各接合部に作用する地震時想定荷重に対する保有耐力の比を余裕度として評価し、当該天井部材の潜在的な耐力を把握した。2つめに、木摺り下地と漆喰の応力伝達について、各パラメータ（目透かし幅、テーパ角など）と試験結果を変数にした統計学的分析（数量化1類理論）によって回帰式を得ると共に、強度へ影響を及ぼす各パラメータの重み付けを行った。

#### 4-1) 想定地震荷重に対する天井部材の保有耐力の比（余裕度）について

実試験体で実測した質量を基に、各部材の単位面荷重と各接合部に作用する荷重を推定し、接合部試験の結果と照合した結果、各接合部に作用する推定荷重は弾性範囲にとどまっていたため、接合部が脱落するなどの終局的な事象は発生する可能性は低いといえる。想定地震荷重に対する余裕度は、最小でA-B-X（吊木受け～吊木、X軸載荷）の2.42倍、最大でC-D-Z（野縁受け～野縁、Z軸載荷）の25.1倍であった。

木摺りと漆喰の剥離を起こすまでの強度は、保有耐力に換算すると、各天井接合部の中でも比較的大きい傾向を示した。すなわち数値上は漆喰層よりも吊り天井下地のほうが先行して破壊される部位が存在することを示唆しているが、先行研究においてはそのような破壊性状は報告されていない。故に今回の結果は純粋な鉛直荷重に対する余裕度と判断することが妥当であり、剥離・剥落を誘発される要因が別で存在すると考えられる。

#### 4-2) 保有耐力算出のための回帰式算定について

小幅板断面形状、漆喰食い込み深さ、目透かし幅、破壊モード等のパラメータを説明変数に、漆喰剥離時の最大荷重を目的変数として、数量化1類理論を用いて回帰式を導出した。その結果、回帰式の決定係数は0.3～0.4程度にとどまり、ばらつきの大きい当該工法の特徴が顕在化したものの、各パラメータからの強度推定ができる可能性を示した。別の見方をすれば、ばらつきの大きい材料の強度を推定する場合は、「精度の高さ」よりも「安全側への判定」のほうが高い優先度を持たせる必要がある、という考え方もできる。今後は、説明変数として顕在化していない可能性のある要因を検証してゆく必要がある。

#### 4-3) 各パラメータの強度へ及ぼす重み付けについて

回帰式の説明変数に付帯する係数によって、各パラメータの最大荷重への影響度（寄与率）を求めた。特徴的なのは引張付着の要素で、最大荷重に対して27～55%程度の影響を及ぼしていることがわかった。応力度でみると小さいものであるが、付着しうる面積が広い（小幅板の面積となる）ために作用していれば強度に寄与するものと解釈できる。ただし実試験体の引張試験において、引張付着が作用していたのは全体の2割程度であり、非常に偏りがあるものと推察される。故に、保有耐力の算定は目透かしの断面積で実施するのが適切であり、引張付着の作用は保有耐力算定時に

おける余力として扱うのが妥当といえる。実際の引張付着の作用部分、および剥離が進んで脆弱になっている部分の判定は打撃試験などを行って総合的に評価し、最大荷重への影響度が高い要素を重点的に補強することが出来れば、効率的に木摺り漆喰部材の耐力向上を図れる可能性も示せた。

以上より、各接合部試験、木摺りと漆喰の引張試験の結果から、想定地震荷重に対する余裕度を算定し、当該天井工法が有している潜在的な耐力を明らかにすることが出来た。また、天井部材の主たる破損形態となりうる漆喰の剥落に対し、木摺り漆喰部材の各パラメータを用いた耐力推定用の回帰式を導出し、また最大荷重に影響を及ぼすパラメータの寄与率を示すことができ、既存部材の効率的な耐力向上に向けた補強部分の判断方法として適用できる可能性を示した。

**目的5 木摺り漆喰天井部材にいくつかのパラメータを設けたうえで振動試験を行い、動的な外力が作用した場合の損傷・剥落の挙動とパラメータの関係を明らかにする。(第8章)**

第8章では、木摺り漆喰天井の力学的特性実験、非破壊試験、保有耐力算定等の結果を踏まえて、木摺り漆喰天井の部材試験体に対する振動試験を、試験体は実試験体を基にした模擬試験体と、そのオリジナルの実試験体に対して実施した。模擬試験体は実試験体4体の中で最も不利側の条件を持つものをオリジナルとして採用した。模擬試験体はオリジナル仕様を踏襲した「基本仕様」1体のほか、小幅板と漆喰界面の引張付着、目透かし幅、漆喰調合等の各パラメータを弱体化させた3条件・3体を用意し、破壊形態の関係、および現在までの検討結果との関連性の確認を行ったうえで、実試験体の振動試験も実施して再現性を確認した。本試験における加振方向はZ軸に限定した。振動台の最大出力は980galであるが、今回は漆喰を剥落させることを目的とするため、振動試験体の接合部の締結度を適宜弱めて加速度を増幅させた。加速度計は試験体各所に設置し、漆喰層へ作用した加速度は小幅板天端の応答加速度と見做した。

### 5-1) 実試験体のオリジナル仕様に準拠した「基本条件」

剥落時の小幅板天端の応答加速度は10000～30000gal(約10～30G)を記録しており、純粋な鉛直方向の加振では相当な加速度に耐えることがわかった。これは7.2.3の木摺り漆喰部分の余裕度として求めた「平均19.8倍」に調和的と解釈できる。剥落前には小幅板と漆喰の引張付着が外れ、漆喰が暴れることによる粉塵の発生が認められた。粉塵の発生～剥落までにはタイムラグがあったため、粉塵の痕跡は剥落の可能性を読み取る指標として重要な確認ポイントとなる可能性がある。剥落は漆喰面出隅(片持ち支持部分)が起点となっており、以降は、先の剥落によって生じた出隅部が剥落を誘発させながら内側へ進展する破壊形態であり、最終的な漆喰剥落面積率は全体の49%であった。

### 5-2) 基本条件の小幅板にフッ素樹脂テープを貼り漆喰の引張付着を阻害した「付着抑制」

剥落時の小幅板天端の応答加速度は15000gal程度で推移、最大18500gal程度であり、最初の剥落が発生したタイミングは基本条件より早かったため、大きな加速度の負荷に対して脆弱な傾向が認められ、第4・5章の漆喰引張試験の結果を裏付けた。漆喰食い込み部が完全に破断した後も漆喰



層の剛性でしばらく片持ち状態で耐える状態があり、最終的に曲げ破壊によって落下した。出隅部の連鎖的な剥落はみられず、落下片1枚のサイズが基本条件よりも大きく、引張付着が作用していないことによる悪影響がみられた。その意味では、引張付着の作用は仮に剥落が発生したとしても、破片が細くなることで被害低減を図れる可能性が示唆された。

### 5-3) 基本条件の目透かし幅を狭くした(6→4mm)「漆喰食い込み抑制」

剥落時の小幅板天端のZ軸応答加速度は15000gal程度で推移、最大20000gal程度であり、付着抑制と同様に最初の剥落を起こしたタイミングは基本条件より早く、目透かし幅の狭さによる悪影響が顕在化したといえる。出隅部から内側へ連鎖的に剥落する破壊形態は基本条件と同様の傾向を示したが、一部で界面剥離が認められた。発生部位はごく一部であるため、施工要因によるものと解釈した。

### 5-4) 基本条件の漆喰調合のスサ量を減らした「漆喰強度抑制条件」

剥落時の小幅板天端のZ軸応答加速度は15000gal程度で推移、最大25000gal程度であり、出隅から内側へ進展する剥落形態をとり基本条件と類似するが、片持ち支持の状況下で自身の剛性で耐えるような様子なく、落下片が細かく、かつ脆性的に落ちていく傾向がみられ、繊維の少なさによる悪影響が顕在化した。また1加振での剥落量は4試験体の中で最も多く、天井耐力を決めうる要因としては目透かし幅よりも漆喰強度のほうが支配的と考えられる。

### 5-5) オリジナルの実試験体の破壊形態

剥落時の小幅板天端の両端支持部で22000gal程度、片持ち部で最大63000galを記録した。脆性的な破壊を起こす傾向が認められ、その点は第4章・実験4-1の促進炭酸化させた漆喰試験体と同様の傾向が確認できた。加えて剥落部の木摺り下地には漆喰のこびりつきが少ないことから、引張付着の作用面積が少ないと考えられ、落下片が大きいことから模擬試験体「付着抑制」と類似する結果を示した。

実試験体には下げ苅が設けられており剥落領域には7ヶ所あったが、そのその繊維全てが破断、若しくは抜け落ちており、剥落の抑制・遅延に寄与していた傾向は確認できなかった。また小幅板には野縁直下に継ぎ手が多く認められ、木摺り下地の剛性低下や野縁を境界にした振動モードの差異が生じるため、今回の損傷形態にも影響を及ぼしている可能性がある。小幅板片持ち部天端のZ軸応答加速度の大きな増幅(最大60000gal前後)に加えて、漆喰残存部には野縁に沿ったひび割れ生じていたことからその関連性が伺えた。

### 5-6) 実試験体における非破壊試験による脆弱部判定結果と実際の剥落形態の関係

第6章で当該実試験体の漆喰面の打撃試験を行い、評価値分布から脆弱部判定を行っている。今回の剥落形態と照合すると、脆弱部判定領域と剥落領域が概ね一致していることがわかった。木摺り下地の持ち出し等の特異点は考慮すべきながらも、小幅板の継手による漆喰層への悪影響や、引張付着の作用面積の少なさを認識できる可能性を示した。

以上より、実試験体をオリジナル仕様とした模擬試験体の振動試験によって、各弱体化要素と剥落

形態の関係性を明らかにすることが出来た。また、非破壊試験によって求めた脆弱化判定部分と剥落箇所が概ね一致していたことから、本研究における非破壊試験手法の適用可能性を期待できるものを示した。

目的 6 実験室レベルで新規作製した試験体と実建物からの採取した経年材の力学的特性を比較して再現性を確認し、経年材採取等による歴史的建築物の負担を減らせるかどうか検討する。(第4・5・8章)

第4・5章では、木摺り漆喰の引張試験を要素試験体と実試験体に対して同条件で実施した結果、「目透かし部漆喰の引張応力度」は両者共に約  $0.12\text{N/mm}^2$ 、「小幅板と漆喰の付着引張応力度」は  $0.01\text{N/mm}^2$  となり、新規材・経年材で再現性を確認できた。

第8章では、実試験体仕様を模擬した新規作製試験体と、そのオリジナルである実試験体そのものに対して同条件で振動試験を行った。その結果、剥落を起こした加振条件や応答加速度は両者で類似していた。また実試験体は木摺り下地と漆喰の付着が減少していたものとみられるが、その条件を意図的に再現した新規作製試験体とは剥落時の挙動（破片が大きい）も類似していた。

以上より、経年した実部材と実験室レベルの新規作製試験体の間には一定の再現性があると考えられ、実部材の仕様を精査しそれを模擬した試験体によって強度試験を行うことで、歴史的建築物の既存部材に影響を与えることなく力学的特性を評価できる可能性を示した。

## 9.2 木摺り漆喰天井とその関連工法の健全度評価手法の拡充に向けた展望

### 9.2.1 本研究での成果と今後の研究課題の整理

本研究は、木摺り漆喰天井を持続的に活用する上での基礎的な物性と健全度評価手法に関して一定量の知見を得ることができたが、もともと学術的資料に乏しい領域であったことはこれまで述べてきたとおりで、加えて手作業や伝習的な性格が強い当該工法は不確定要素が多いものであるため、本研究においては実験条件の単純化、理想化した基礎的な検証を中心とした。故に現段階では、第2章・図2-4の特性要因図にある条件で実験パラメータの関係上対象外とした部分や、本研究をとりまとめる過程で新たに顕在化した課題などが多くあるため、当該工法の研究に関する示唆の意味合いも兼ねて、本研究の到達点と今後検証すべき課題（展望）について本節で記述する。

表9-1に木摺り漆喰天井の剥落に関わる各要因における本研究での成果と今後の研究課題を示す。これは第2章・図2-4と表2-3で示した各要因に合わせ、本研究で明確になった事項（前項の記述内容の要約）と今後の課題を整理・可視化したものである。次項の(1)～(9)は表9-1の「本研究での取り扱い」欄と紐づくかたちで詳述しており、(10)以降は各要因の関連事項や今後行うべき検証・実験内容について述べてゆく。

表9-2に、本研究で得られた知見による健全度評価手法の例を示す。第3～8章の調査・実験結果を経て、現段階で試験的に利活用可能と考えられる木摺り漆喰吊り天井の健全度評価に関する項目をまとめる。個々の力学的特性における定性的な耐力値（保有耐力、余裕度、剥落時の応答加速度など）は、本研究における試験条件に劣化要因が含まれていないため、雨漏り等の劣化因子が作用した履歴、空間用途などのスクリーニングが必要であるが、施工仕様、施工状態、劣化因子が作用した状態（下地との付着状態など）の評価は現時点でも適用できる部分があると考えられる。将来的に研究対象範囲を拡大させ、木摺り漆喰天井の健全度評価における適用範囲も発展することを目指す。



図 9-1 木摺り漆喰天井の剥落に関わる各要因における本研究での成果と今後の研究課題

時 系 列  ▼	大骨	中骨	小骨（孫骨）	本研究での 取り扱い	内容（凡例： <table><tr><td>本研究の成果</td><td>本研究の成果あり（今後の課題含む）</td><td>今後の研究課題</td></tr></table> ）	本研究の成果	本研究の成果あり（今後の課題含む）	今後の研究課題
	本研究の成果	本研究の成果あり（今後の課題含む）	今後の研究課題					
	材料 選択	結合材	種類、焼成・消化状態、粒度、不純物	第 4 章 今後の課題・9.2.2 (1) （理想的な条件を想定）	明治初期～昭和中期の技術書において本漆喰の調合に大きな乖離が無かったことがわかり、木摺り漆喰工法導入期には漆喰の調合が既に成熟していたと判断した。そのため本研究の使用材料は全て一般的な市場品や基準となる調合を用いて、材料影響を小さくして理想的な条件下におけるものとして試験を実施した。左官材料の歴史的観点で言えば、地域による材料、気候、職人の差異、西洋由来の調合の適用による影響が生じていると考えられるが千差万別であるため、評価対象の物件ごとに対応してゆく必要があると考えられる。			
		繊維	種類、強度、長さ、アルカリ抵抗性					
		糊	種類、製法、有無・量					
		砂	種類、粒度、含水状態、有無・量					
		小幅板	樹種、アク、吸水変形、経年変化					
	設計 ・ 施工	木摺り下地と漆喰の 機械的嵌合不良	目透かしへの漆喰食い込みが甘い	第 4,5,7 章	小幅板厚さを基準に漆喰食い込み深さを 2 水準設け、破壊モードが最大耐力への影響を評価できた。			
			漆喰の練り上がり	今後の課題・9.2.2(2)	今回は安全側条件としたため考慮しなかった「開き」ならびに、その部分に作用するせん断応力を考慮する。 漆喰の練り水の量とフロー値の関係、それによる漆喰の開き方を評価する。			
		漆喰層の質量が大きい	塗り厚が大きい	第 7,8 章	上等な仕上りを意図した仕様（8 層塗り、厚さ 20mm 以上）によって固定荷重の観点から不利側の検討を行った。			
		界面の付着不足	下地・漆喰界面の付着不足	第 4～6 章	実建物における天井部材の剥落状況を基に、下地と漆喰界面の付着に今回は着目し、付着の有無によって耐力が異なることを明確にしたほか、漆喰表面からの反発度試験によって付着状態を判別できる可能性を示した。			
			塗り重ね界面の付着不足	第 5 章 今後の課題・9.2.2(3)	塗り重ねが多い上等な仕様ほど、界面剥離しうる部分が増えるともいえる。実試験体は塗り厚が大きく、一部で塗り重ね界面での剥離が発生した。健全度評価の適用範囲を広げるためにも塗り重ね界面の付着力も評価を行う必要がある。			
		木摺り下地の割付不良	目透かし幅	第 3～8 章	文献調査によって木摺り下地寸法の変遷を明らかにした。その寸法を基にした要素試験によって力学的特性の一般解を示すと共に、実試験体による個別解にはなるが目透かし幅と耐力との間に一定量の相関があることを明らかにした。			
			小幅板の幅	第 3 章	文献調査によって木摺り下地寸法の変遷を明らかにした。板幅と単位面積あたりの目透かしの数は反比例の関係にあるため、面全体の耐力に影響を及ぼすと考えられる。漆喰引掛り部分の引張応力ならびに下地界面の付着応力が今回明らかとなったため、計算によって耐力算定が可能と考えられる。			
			継手位置	第 8 章 今後の課題・9.2.2(4)	振動試験の結果によって、継手の位置、量が天井の振動特性ならびに漆喰の剥落性状に影響を及ぼすことを示唆したため、継手をパラメータにした試験を行う必要がある。			
			持ち出し量		振動試験の結果によって、持ち出し量によって応答加速度や下地の変形が増幅されることがわかった。この結果は試験体都合によるものであるが、片側自由端の下地が存在する場合は同様な傾向を示す可能性がある。			
		吊り下地の割付不良	野縁下端の不陸、接合部ピッチ	第 5,7 章 今後の課題・9.2.2(5)	接合部のピッチ、接合物の耐力から、接合部 1 か所あたりの想定負担荷重と実際の耐力の関係を明らかとした。			
		漆喰の強度不足	繊維量・結合材量	第 4, 8 章	施工誤差・不具合によるスサ量が下振れした場合の強度への影響を定量化した。			
			練水の量	今後の課題・9.2.2(2)	練り上がりとも関連するが、水と結合材比による強度への影響や収縮量との関係を評価する必要がある。			
		使用 環境	木摺り下地の腐朽・暴れ	雨漏り、漏水、多湿環境（水回り、地下室など）、温度変化、乾湿変化	今後の課題・9.2.2(6) （理想的な条件を想定）	本研究の使用材料は全て一般的な市場品を用いて、材料・環境影響を小さくして理想的な条件下におけるものとして試験を実施した。常時の多湿や振動が作用する部位は居室の使用状況によって想定しやすいものの、漏水や雨漏りはありふれた事象でありながらも偶発的でもあるので、定期的な天井裏の調査を含めたメンテナンスが必要と考えられる。またそのような履歴をもった部材の挙動、劣化メカニズムなども知見が少ないため、今後検討してゆく必要がある。		
漆喰の含水率上昇による緩み								
部材のムーブメント								
振動の継続的な作用	音響系用途、上階の振動、立地の振動							
外力	漆喰層への面外方向への荷重	天井部材の共振・応答加速度の増幅	第 4,5,8 章	漆喰剥離時の耐力の静的評価として漆喰層の引張試験を行い、調合、小幅板断面、食い込み深さなどの各パラメータと耐力との関係を明らかとした。振動（動的）試験では共振させて剥落を起こさせ、その際の応答加速度ならびに剥落メカニズムを示した。				
		吊り下地接合部の緩みによる共振・応答加速度の増幅	第 8 章	下地接合部を意図的に緩ませることによって応答加速度が増幅し、漆喰が剥落を起こすことを確認したため、既存建築物の健全性評価の場合は接合部の緩みなども対象とすべきことを示した。				
	支持力の一部喪失による 周辺漆喰部の負荷増	下地・漆喰界面の剥離		動的（振動）試験にて、試験体の小口・出隅から剥落が始まり、それによって発生した出隅へ剥落が進展する様子が確認され、剥落メカニズムの仮説を実証できた。				
		貫通ひび割れ						
		目透かし部漆喰の破断						
	木摺り下地の面外変形	吊り元・吊り下地のクリープ	今後の課題・9.2.2(7)	本研究ではクリープは考慮しない条件とした。天井部材の固定荷重を作用させた状態で、木材の痩せ等も考慮に入れて長期的に追跡する必要がある。				
		地震荷重の作用	第 8 章 今後の課題・9.2.2(7)	振動試験において大きな加速度を与えた際にわずかに発生すると考えられるが、試験体寸法を勘案して無視できるレベルと判断した。変形を考慮しない場合は相当な加速度でも剥落しないことが判明し、実情の剥落事例との乖離を部材の変形などのほかの劣化要因へスクリーニングすることができたので、今後は変形を考慮した条件（大板曲げなど）で試験を行う。水平構面を構成する構造形式（木造なのか、RC なのか、など）によっては、適用範囲が変動すると考えられる。				
	木摺り下地の面内変形	構造体の水平構面の変形	今後の課題・9.2.2(8)	振動試験において大きな加速度を与えた際にわずかに発生すると考えられるが、試験体寸法を勘案して無視できるレベルと判断した。構造形式によって躯体の変形量に差異があり、特に近代洋風住宅などは木造が多いことを勘案すると今後検討してゆく必要がある。また、壁部材では面内せん断の検証が古くから行われているため、知見を応用できる可能性がある。				
	壁との取り合い部	天井部材に作用する面内圧縮力	今後の課題・9.2.2(9)	構造形式によって躯体の変形量に差異があり、特に近代洋風住宅などは木造が多いことを勘案すると今後検討してゆく必要がある。また、蛇腹の存在や JASS11 などの意匠上、仕様上の観点でいえば、現行の天井と比較すると壁・天井取り合い部の下地の連続性が高いと考えられる。天井の耐震性における影響の良悪は現段階で判断できないため、実験的検討が必要である。				
		壁・天井取り合い部のモーメント						

表 9-2 本研究で得られた知見による健全度評価手法の例

タイミングの例	対象部位	必要なもの・こと	確認・分析すること	わかること	本研究での該当章
最初期	木摺り漆喰	・ 木摺り下地の年代別資料	・ 竣工年代	・ 木摺り下地寸法を目安 ➤天井保有耐力推定、破壊モード推定の基となる目透かし幅	第 3～5 章
最初期	木製吊り下地	・ 木製吊り下地の年代別資料	・ 竣工年代	・ 木製吊り下地の納まり目安 ➤吊り下地の構成部材数 ➤接合部の種類 ➤天井保有耐力推定のための納まり	第 3, 5 章
予防保全的調査または地震後調査	木製吊り下地	・ 天井フトコロ部へのアクセス	・ 下地各部材の寸法 ・ 接合部の仕口・金物の種類・納まり ・ 木材・金物の腐朽・締結状態	・ 吊り下地の施工状態 ➤天井保有耐力推定のための納まり ➤地震荷重の増幅が起きる可能性	第 5, 8 章
予防保全的調査または地震後調査	木摺り漆喰	・ 漆喰仕上面へのアクセス ・ エコーチップ試験機	・ 任意の場所における 15 打程度の HLD 値履歴	・ 木摺り下地と漆喰の付着状態 ・ 剥落の起点になりうる場所	第 6 章
予防保全的調査または地震後調査	木摺り漆喰	・ 天井フトコロ部（木摺り下地の上側）へのアクセス、目視および写真	・ 木摺り下地目透かし部における漆喰の引掛りの状態（面積比など） ・ 木摺り下地の寸法（板幅、目透かし幅）	・ 木摺り下地の施工状態 ➤漆喰の施工状態（漆喰の目透かしへの充填状態、引掛り幅）、それによる破壊モードの推定	第 6 章
予防保全的調査または地震後調査	木摺り漆喰	・ 天井フトコロ部（木摺り下地の上側）へのアクセス、目視または写真	・ 木摺り下地上面の粉塵の状態（漆喰剥落の前兆現象なる粉塵発生履歴）	・ 漆喰の剥落が起こり得る可能性	第 8 章
剥落発生後	木摺り漆喰	・ 損傷状態がわかる写真 ・ 破壊モードの例を示した資料	・ 破壊モードとその面積比	・ 木摺り漆喰の施工状況 ➤破断型が多い：漆喰の引掛りは十分 ➤抜け型が多い：木痩せが顕著か、漆喰の引掛りが不完全 ➤界面剥離が多い:漆喰の引掛りは十分なるも塗り重ね界面の強度が不足	第 4, 5 章

### 9.2.2 今後の研究課題の詳細

#### (1) 仕上材や下地材の種類について（第3,4章）

木摺り漆喰が導入された時点で日本の左官技術は国際的にみても非常に高い水準にあり、西洋由来の木摺り下地を用いても仕上材はほとんどの場合で従前の漆喰調合が用いられたことは第4章で述べた通りである。一方で仕上材にも西洋由来（欧米式漆喰として文献2-12でも記載があり、生石灰クリームなど）の調合や、ドロマイトプラスターなどが適用された可能性も否定できない。また小幅板に用いられた樹種も明治後期の文献では既に杉材が指定されており、これが西洋由来なのか、従前技術の踏襲なのか、材料のコストや供給的な要因なのかは定かではないため、実物件ごとに調査ならびに力学的特性の検討が必要となる可能性がある。

#### (2) 要素試験体のパラメータにおける漆喰の「開き」の導入、施工・水量との関係（第4章）

本研究の要素試験体では、小幅板の断面形状による影響に重きを置き、かつ安全側の条件に立脚するため、漆喰の食い込み深さ上限を小幅板上面と同面にした。すなわち矩形断面の木摺り下地においては漆喰の「開き」が起き得ないため、引掛りが無い状態の極めて安全側の条件となっており、漆喰引掛り部におけるせん断要素 ( $R_s$ ) も今回は作用しないものとみなした。実物件の木摺り下地はそのほとんどが矩形断面であることが文献調査で判明しているため、より実情に即した条件とするには漆喰引掛りの「開き」をパラメータに取り入れ、実験的検討を行ってゆく必要がある。また、「開き」の形成度合いは漆喰の練り水量や鋺圧、漆喰の供給量など複合的な要因によって変動すると考えられるため、水量とフローの関係なども改めて評価する必要がある。

#### (3) 漆喰の塗り重ね界面の付着強度の検証（第4,5章）

本研究では木摺り漆喰工法の剥落事例を鑑みて、木摺り下地と漆喰の界面の付着強度（目透かし部分、小幅板表面）を主軸に検討を行った。一方で第5章の実試験体の引張試験では5～30%で塗り重ね界面の剥離が発生しており、調合の差異や施工時の吸水状態、塗り面の平滑度などによって付着強度が変動することを示唆している。また、左官仕上げの経年時の補修で多くみられる方法として「途中の層から塗りなおす」というものがあり、後年に補修箇所が再剥離する例があることを鑑みると、界面の付着強度も検討対象としてゆく必要がある。

#### (4) 木摺り漆喰天井部材における下げ苧、寒冷紗、継ぎ手の影響（第8章）

下げ苧や寒冷紗は繊維の大部分を面内方向へ広げるため、ひび割れ抑制や面剛性の補強には寄与している可能性があるが、振動試験における実試験体の剥落性状を踏まえると、剥落抑制への効果、すなわち面外方向への外力の抵抗性は限定的であったと考えられる。下げ苧は片側が木摺り下地に機械的に締結されているが、漆喰層と共に脱落したり破断したりしていた。寒冷紗も、漆喰の塗り重ね界面の付着を阻害して剥落を誘発させる懸念がある。そのため、漆喰との定着度をはじめとする面外荷重への抵抗性評価する必要がある。また木摺り下地の継手も狭い範囲に集中していると、下地の剛性や振動モードが変化することで剥落性状に影響を与えている可能性が示唆されたため、面積あたりの箇所数や位置関係についても評価してゆく必要がある。

### (5) 木製吊り天井下地の実物件仕様に関する課題（第3章）

本研究における木製吊り天井下地の仕様調査では、技術書による調査が主体となっており、木摺り下地仕様のように実物件レベルでの検討が十分に出来ておらず、技術書との乖離の有無が評価できていない。統一的な仕様が定まっていないと言及されているだけに、実物件の天井下地の納まりの情報をより多く集積してゆくことが重要である。

### (6) 木摺り漆喰部材における標準的な経年状況下における挙動の検証（第5章）

本研究で新規に作製した漆喰試験体は一般的な市場品と養生環境下に置き、材料・環境影響を小さくして理想的な条件下におけるものとして試験を実施した。それらの新規試験体と実試験体の漆喰部分の強度を比較した結果、大きな乖離が無いことがわかり、歴史的建築物等の経年した材料を破壊することなく、当初材を模擬した新規材によって耐力評価ができる可能性を示唆したものであるが、実試験体の材齢や使用材料、施工環境、使用環境の条件が新規材と明らかに違う中で、大きな乖離が生じない部分にかえって疑問点が残る。そのため、第2章で論じたような脆弱化要因が耐力へ及ぼす影響を定量化する必要があるだけでなく、経年部材でも「健全部」と判断されるような標準的な経年状況下における挙動も検証する必要がある。

### (7) 木摺り漆喰天井部材の面外変形に関する検討（第4, 5, 8章）

振動試験では、面外変形を考慮しない条件下で木摺り下地上端の応答加速度が10000galを超えて損傷が生じる結果となり、相当な加速度まで耐えることがわかった。これは実際に剥落事例があることの裏返しで、今回の試験で考慮していない条件に、耐力を低下させるような剥落要因が含まれていることを示唆しており、部材の変形などの他の劣化要因へスクリーニングすることができたといえる。

木摺り漆喰天井は仕上材の固定荷重が大きい傾向にあるため、構造躯体や水平構面を構成する構造形式によっては、吊り下地や吊り元（小屋梁など）のクリープや、地震動によって鉛直方向の揺れが励起された際、天井部材の面外変形が大きくなりやすい懸念がある。その場合、「漆喰層の剛性」と「目透かし部分の漆喰引張強度（目透かし幅）」のバランスによって、漆喰ひび割れが先行するか、剥落が発生するか、若しくはその組み合わせ、などの破壊モードに影響を及ぼすと考えられる。また面外変形の程度は吊り元の構造形式だけでなく、吊り下地の接合方法、接合部のピッチなどに影響を受けると考えられるので、吊り下地を含めた面外変形の検証を今後行う必要がある。

### (8) 木摺り漆喰天井部材の面内せん断変形に関する検討（第4, 5, 8章）

本研究の要素試験体ならびに振動試験体は、躯体の水平構面の変形は想定対象としていない。木造など躯体の変形量が大きくなりやすい構造形式の場合は、水平構面の変形に影響を受けて天井部材も面内せん断変形を起こす可能性がある。木摺り漆喰部材の面内せん断に関する研究は壁部材の方で多く実施されており、その知見が応用できる部分もあるが、重力の作用方向の関係で異なる挙動をする可能性もあるため、別途実験を行う必要がある。



**(9) 木製吊り天井下地の接合部におけるモーメントの考慮、壁体との取り合い（第5章）**

本研究の接合部試験は、各接合部に対して一軸載荷しており、層間変位などは想定対象としていない。古い納まりの吊り天井ならば振れ止めが入っていることも少ないとみられ、躯体の層間変位が作用し吊り下地の接合部が回転する可能性が高いと考えられる。

また壁体との取り合い部が現行の天井よりも強固に接続されているのであれば、あえて躯体と連動・変位させることも天井損傷の被害を減らす一つの案として考えられる。ただし、蛇腹仕上げ部分は変形角によるひび割れなどが生ずる可能性があるため、接合部および天井・壁取り合い部のモーメントに対する挙動も今後の評価対象となりうる。

**(10) 画像解析の簡便化、打撃試験手法の精度向上（第6章）**

本研究の画像解析は細かいセルに区分して面積を算出する手順を経ており、非常に手間がかかるため、小幅板・漆喰部分を自動で認識するような判定方法の開発を行う必要がある。

打撃試験の測定値による評価は現段階で相対評価であり、測定点（データ数）が多く、かつ測定値の分布がばらついている方が判断しやすいことになる。そのため、測定点の絶対値と浮き状態が紐づけられれば、健全度評価の簡便さは飛躍的に向上する。ただし漆喰の物性（材料強度、各層の締まり具合）も建物ごとに差異がある可能性があり、それによって測定値自体も変動するため、漆喰強度との紐づけも必要になってくると考えられる。紐づけには、コンクリート用反発度試験法と同様に、多量のデータに裏付けられた統計的手法による回帰を行う必要があるため、今後もデータの蓄積を行う。

また、今回の打撃試験では小幅板と目透かしの見分けがつかない状態（仕上面からは判断できない）を想定して両者を区別せずに検証し、付着が滅失している部分を判定できることを示した。その意味で現場でのオペレーションを想定した試験条件としたが、学術的視点としてはHLD値によって目透かしと小幅板部分が判別可能か否かを検証する価値があるといえる。それによって小幅板部分を選択的に打撃することで付着判定の精度向上を図ったり、目透かし部漆喰の損傷を仕上面側から判定できたりする可能性も見込まれる。

**(11) 天井保有耐力推定の回帰式の高精度化・安全側判定（第7章）**

今回求めた回帰式には破壊モードが含まれており、地震被害を受けた天井部材の調査や画像解析時には活用できる一方、予防保全的意味合いを持った健全度診断時には、破壊試験に伴う保有耐力診断となるため材料保護の観点からは望ましくない。そのため、漆喰食い込み部分の状態評価（第6章）と発生しうる破壊モードの関連付けを行い、強度推定は推定される破壊モード別に設けた回帰式によって実施する、などといった複数の分析が必要になると考えられる。本研究で求めた回帰式の決定係数は0.4前後であり精度は要改善といえるが、物性にばらつきのある材料を対象とした場合、高精度化よりも安全側判定のほうが優先度が高いという考え方もできるため、耐力推定のあり方におけるさらなる検討が必要となる。

### (12) スケール効果を考慮した実験実施（第4, 5, 8章）

本研究第4, 5章における木摺り漆喰の引張試験（要素試験体・実試験体）は、試験体1ピースあたりに生ずる破壊モードを単純化して各要素の力学的特性を明確にする目的から40mm角、第8章の振動試験体も振動台の兼ね合いもあり約1m角で行っており、実際の天井部材と比較すると小さいサイズである。今回の試験によって明確にできた部分もあるが、試験条件として想定できていない要因だけでなく、スケール効果も作用していると考えられるため、次段階の試験としてはより実大に近いサイズでの検証を進めることも必要といえる。これは先述の面内外の変形や壁との取り合い部を考慮に入れた大板試験体による曲げ試験や、吊り下地部材や壁部材も含めた静的・動的両面での評価を行う上でも必要である。また、本研究によって各破壊モードにおける力学的特性が概ね把握できたため、試験体の大型化によって起こり得る“破壊モードの混在”にも、発生した面積比などによって対応できる可能性があり、それらは実際の剥落被害の検証においても活用できることが期待される。

### (13) 実際の振動被害例と実験による剥落メカニズムとの整合性の確認（第2, 8章）

振動試験によって木摺り下地の寸法や付着状態、漆喰の強度を変化させ、剥落の起点やその形態、伝播状態を把握した。今後は、本実験の結果と実際の振動被害での剥落形態を比較し、整合性を評価してゆく必要がある。先述しているように、木摺り漆喰天井における地震被害の報告例は少ない。これは天井材による被害が特に顕在化したのが東日本大震災であったため、それまでは非構造部材であることも相まって調査対象になっておらず、被害が可視化されていなかったことが要因と考えられる。今後は天井材も被害調査の対象になっていくと思われるが、現行天井だけでなく歴史的建築物の天井も包含させる必要がある。また、第4,5章の試験によって、漆喰部分の破壊モードごとの損傷形態や耐力も概ね明らかとなったため、災害調査時の撮影画像を用いた解析などで実際の剥落例、下地の仕様、施工状態などが推定できる可能性がある。

### (14) 木摺り漆喰天井における漆喰剥落のリスク評価（全体）

第7章においては、木摺り漆喰部材の主に施工要因（初期的因子）に関するパラメータごとの寄与率を算出した。これは、木摺り漆喰部材の諸寸法や施工状態、劣化状態が及ぼす部材耐力への影響を定量化できることに加えて、各パラメータの特性値を基にした剥落リスクも評価できる可能性を示している。ただし、第2章で整理した漆喰剥落に対する特性要因図のとおり、影響すると考えられる因子は非常に多いのが現状であるため、影響度の大きい因子に絞った形態での効率的なリスク算定を可能にするべく、各因子の重み付けから進める必要がある。

### (13) 木摺り漆喰の壁部材への展開（全体）

本研究は木摺り漆喰天井を対象とした非破壊・破壊試験の検証結果を報告しており、木摺り漆喰工法が適用された部材において、壁部材と比較して知見が不足していた天井部材の研究領域に一考察を与えたものである。一方で、漆喰の脆弱部分を判定する非破壊試験方法などのように、壁部材でも策定されていない手法を提案することが出来たため、将来的には本研究で得られた知見を壁部材の健全度評価でも展開可能である。

**(14) 左官工法全体への展開（全体）**

本研究で扱った木摺り漆喰工法は、広義でいえば湿式工法に該当する。小舞壁を筆頭とした土壁やモルタル塗りなどでも、ひび割れや層間剥離などの共通する課題を抱えている現状を踏まえると、本研究の知見は木摺り漆喰工法以外の左官工法・伝統工法にも展開できる可能性がある。



## 本研究に関わる発表論文リスト

【審査付論文】

- 1) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治, 吉田さくら: 木摺り漆喰天井における下地仕様の変遷と実施工状態を踏まえた力学特性の評価及び耐荷重特性の分析, 日本建築学会構造系論文集, 88 巻 805 号, p.364-373, 2023.3
- 2) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治, 津村泰範: 文化財建造物の木摺り漆喰天井における浸透性樹脂を用いた補修工法の実施工検討, 日本建築学会技術報告集, 23 巻 55 号, p.789-794, 2017.10
- 3) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰仕上げ天井における補修工法の開発, 日本建築学会技術報告集, 23 巻 54 号, p.403-408, 2017.6
- 4) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 歴史的建造物における既存左官天井の非破壊による健全度評価の基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, 82 巻 736 号 p.791-799, 2017.6
- 5) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 材料物性と下地仕様の観点からみた木摺り漆喰天井部材における基本性能と健全度評価に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, 82 巻 731 号, pp.33-40, 2017.1

【口頭発表】

(国外発表)

- 1) Aoba Sakai, Kentaro Oka, Masaki Tamura: Relationship between plaster density and mechanical properties by unit water content of plaster mixture, 21th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-20), Tokyo, 2022.11.25
- 2) Kentaro Oka and Masaki Tamura, Specification transition and strength experiment of wood lath and plaster techniques in Japan, 76th RILEM Annual Week 2022 and International Conference on Regeneration and Conservation of Structures, Kyoto, 2022.9
- 3) Kentaro Oka and Masaki Tamura, History and development of wood lath and plaster techniques in Japan, The 20th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-21), Tokyo, 2021.11
- 4) Sakura, Yoshida, Kentaro Oka and Masaki Tamura, Evaluation of Plaster Layer of Wood-sliding Plaster Ceiling in Non-destructive Testing, 20th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-20), Tokyo, 2021.11
- 5) Misako Hanza, Masaki Tamura, Kentaro Oka, and Osamu Goto, Deterioration Evaluation of the Stucco Lath Ceilings in the Historic Building in Japan, 17th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-17), Danang, 2018.11,
- 6) Kentaro Oka, Masaki Tamura, Hiroaki Maruyama, Junichi Yokoshima and Osamu Goto, Experimental Study on Conservation and Preservation for historical Architecture using Plaster Finishing Material, The Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4), Nevada, 2016.8

(国内発表)

- 7) 吉田さくら, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その13 木摺り漆喰部材における表面反発度分布と漆喰付着状態の関係性, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.165-168, 2023.10
- 8) 吉田さくら, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その 17 エコーチップ連打法とクラスター分析による木摺り漆喰部材の付着状態評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 2023.9
- 9) 岡健太郎, 吉田さくら, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その 16 木摺り漆喰部材の付着状態とエコーチップ連打法による測定値との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 2023.9
- 10) 吉田さくら, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その7 木摺り漆喰天井へのエコーチップ硬さ試験の特性, 2022年度日本建築学会関東支部研究報告, pp.141-144, 2023.3
- 11) 坂井青葉, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その12 単位水量による漆喰密度と力学特性の関係, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.179-182, 2022.10
- 12) 岡健太郎, 吉田さくら, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その11 木摺り漆喰天井の仕様変遷とエコーチップ連打法による諸物性把握, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.175-178, 2022.10
- 13) 吉田さくら, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その10 画像解析による木摺り漆喰天井の施工状態の評価, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.171-174, 2022.10
- 14) 坂井青葉, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その15 遺産的建築物における木摺り漆喰天井の漆喰練り上げ性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.879-880, 2022.9
- 15) 岡健太郎, 吉田さくら, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その14 エコーチップ硬さ試験機による木摺り漆喰部材の面的物性把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.877-878, 2022.9
- 16) 吉田さくら, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その13-2 歴史的建築物の木摺り漆喰天井への画像解析による保有耐力評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.875-876, 2022.9
- 17) 坂井青葉, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その6 遺産的建築物における木摺り漆喰天井の漆喰練り上げ性状, 2021年度日本建築学会関東支部研究報告, pp.97-100, 2022.3

- 18) 吉田さくら, 岡健太郎, 田村雅紀: 歴史的建築物の木摺り漆喰天井への非破壊試験による保有耐力評価, 2021年度日本建築学会関東支部研究報告, pp.101-104, 2022.3
- 19) 坂井青葉, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その9 遺産的建築物における木摺り漆喰天井の漆喰練り上げ性状, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.133-136, 2021.10
- 20) 岡健太郎, 坂井青葉, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その8 木摺り漆喰天井における下地断面形状毎の部材強度特性, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.129-132, 2021.10
- 21) 岡健太郎, 坂井青葉, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その7 異形断面を有する木摺り漆喰天井の仕様調査と物性評価方法, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.125-128, 2021.10
- 22) 田村雅紀, 坂井青葉, 岡健太郎, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その 13-1 木摺り漆喰天井における下地断面形状ごとの漆喰面内せん断特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.693-694, 2021.9
- 23) 坂井青葉, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その 12 木摺り漆喰天井における下地断面形状ごとの漆喰付着特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.691-692, 2021.9
- 24) 岡健太郎, 坂井青葉, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その11 特殊用途向け文化財建築の木摺り漆喰天井仕様調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.689-690, 2021.9
- 25) 坂井青葉, 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その5 木摺り漆喰天井における下地断面形状毎の漆喰付着特性, 2020年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.53-56, 2021.3
- 26) 半座三紗子, 田村雅紀, 岡健太郎, 後藤治: 遺産的建造物における剥離したラス漆喰天井実部材を用いた劣化状態の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.367-368, 2018.9
- 27) 小林将希, 田村雅紀, 岡健太郎, 後藤治: 木摺り漆喰天井における木摺り下地面への補修樹脂充填度の可視化, 2017年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.121-124, 2018.3
- 28) 半座三紗子, 田村雅紀, 岡健太郎, 後藤治: 遺産的建造物におけるラス漆喰天井の劣化状態の評価・検証実験, 2017年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.129-132, 2018.3
- 29) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その4 既存木摺り漆喰天井の補修工法による岩手銀行旧本店本館への試験施工, 2016年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.53-56, 2017.3



- 30) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その6 岩手銀行旧本店における既存木摺漆喰天井の補修工事報告, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.165-168, 2016.10
- 31) 岡健太郎, 田村雅紀, 澤野堅太郎, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジーその9 既存木摺漆喰天井における補修効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.933-934, 2016.8
- 32) 澤野堅太郎, 田村雅紀, 岡健太郎, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その8 既存木摺漆喰天井の補修施工法の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.931-932, 2016.8
- 33) 田村雅紀, 岡健太郎, 澤野堅太郎, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その7 既存木摺漆喰天井の非破壊による健全度評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.929-930, 2016.8
- 34) 後藤治, 田村雅紀, 岡健太郎, 澤野堅太郎: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その6 建物の保全における病理・臨床・治療の概念, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.927-928, 2016.8
- 35) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジー その3 遺産的建築物の木摺漆喰天井における崩落機構及び補修工法の検討, 2015年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.133-136, 2016.3
- 36) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その3 木摺漆喰天井板における崩落メカニズム及び補修効果の検証, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.211-214, 2015.11
- 37) 澤野堅太郎, 田村雅紀, 岡健太郎, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その2 既存木摺漆喰天井の補修に関する施工法, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.207-210, 2015.11
- 38) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 漆喰系材料の観点から考察した遺産的建築物の維持保全に関する実験的検討 その1 木摺漆喰工法を用いた天井板の非破壊・破壊試験による性能評価, 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.203-206, 2015.11
- 39) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCM における維持保全と保存的活用ストラテジーその5 破壊試験による木摺漆喰工法の性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.799-800, 2015.9
- 40) 田村雅紀, 岡健太郎, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジーその4 遺産的建築物における要素部材の非破壊検査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.797-798, 2015.9

本研究に関わる発表論文リスト

- 41) 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治: 建築物のLCMにおける維持保全と保存約活用ストラテジー その2 遺産的建造物の要素部材による健全度の検証, 2014年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.157-160, 2015.3
- 42) 鈴木志野, 田村雅紀, 岡健太郎: 建築物のLCMにおける維持保全と保存活用ストラテジー その3 コンクリート系建築物漆喰仕上げによる機能冗長性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.1361-1362, 2014.9
- 43) 岡健太郎, 田村雅紀, 鈴木志野: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジーその2 平常時における建築的価値の維持・創出, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.1359-1360, 2014.9
- 44) 田村雅紀, 岡健太郎, 鈴木志野: 建築物のLCMにおける維持保全と保存的活用ストラテジーその1 災害時を含む既存建造物の品質保証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.1357-1358, 2014.9
- 45) 岡健太郎, 田村雅紀: 建築物のLCMにおける維持保全と保存活用ストラテジー, 2014年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.253-256, 2014.3

## 技術展開資料

## 技術展開資料

<b>1.木製天井吊り下地の接合部試験に関わる試験体詳細図面</b>	<b>293</b>
1.1 吊木受け～吊木(X,Y,Z 軸)	296
1.2 吊木～野縁受け(X,Y,Z 軸)	298
1.3 野縁受け～野縁～木摺り下地(Z 軸)	300
1.4 野縁受け～野縁(X, Y 軸)	301
1.5 接合部試験体設置用治具	302
1.6 接合部試験体設置用治具のアムスラー試験機据え付け状態	303
<b>2.木摺り漆喰天井部材の振動試験における剥落時の状況</b>	<b>303</b>
2.1 キャプチャ画像の見方	306
2.2 模擬試験体 基本条件（加振順序 13：ナット緩め, 980gal, 9.7Hz の 3 回目）	307
2.3 模擬試験体 付着抑制条件	311
2.3.1 加振順序 13：ナット緩め, 980gal, 9.5Hz の 1 回目,①	311
2.3.2 加振順序 14：ナット緩め, 980gal, 9.5Hz の 2 回目,②③	312
2.4 模擬試験体 食い込み抑制条件（加振順序 10：ナット緩め,980gal,9.5Hz の 1 回目）	313
2.5 模擬試験体 漆喰強度抑制抑制条件	316
2.5.1 加振順序 10：ナット緩め,980gal,9.5Hz の 1 回目,①～⑧	316
2.5.2 加振順序 11：ナット緩め,980gal,9.5Hz の 2 回目,⑨～⑭	320
2.6 実試験体 AMS-4	322
2.6.1 加振順序 10：ナット緩め,980gal,9Hz,1 回目, 上塗り層の剥離	322
2.6.2 加振順序 12：ナット緩め,980gal,9Hz,3 回目, ①～③	323
<b>3.木摺り漆喰天井のアクリル樹脂による補修工法の開発とその実証化記録</b>	<b>323</b>
3.1 補修工法の基本的考え方	326
3.2 本研究における補修工法の方針	326
3.3 木摺り漆喰天井における特殊アクリル樹脂を用いた補修工法案の検討	327
3.3.1 本補修工法で使用する樹脂	327
3.3.2 補修工法の概要	328
3.4 本補修工法の実証化試験施工の対象となった歴史的建築物	329
3.4.1 対象建築物の概要	329
3.4.2 岩手銀行の復原工事の概要	332
3.4.3 岩手銀行の天井補修に関する事前調査	333
3.5 木摺り漆喰天井部材における補修工法の開発	338
3.5.1 本補修工法における静的付着強さ試験（実験 1）	339
3.5.2 実試験体に対する補修の試験施工について（実験 2）	343

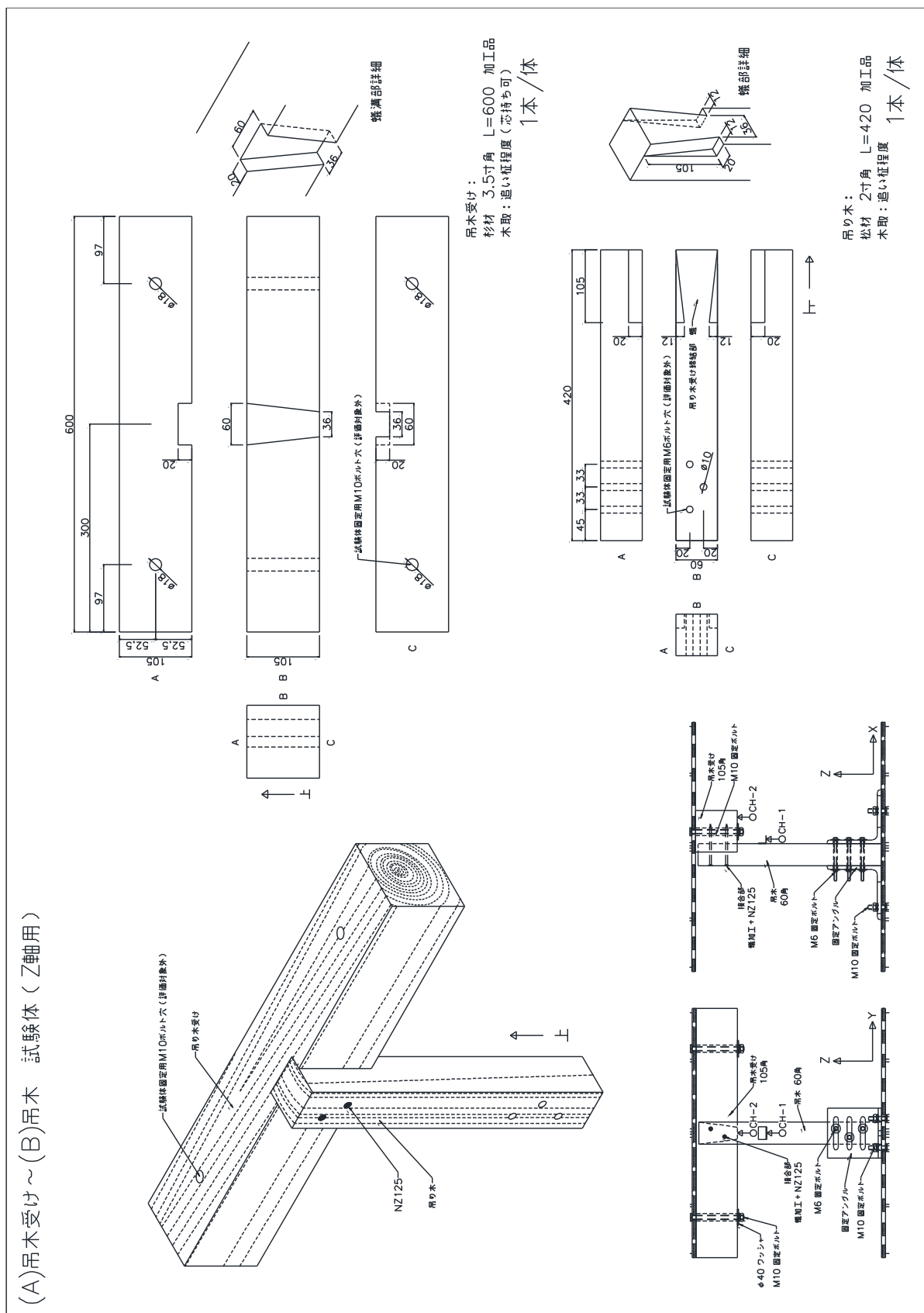
3.5.3 岩手銀行旧営業室の天井部材を模した試験体の作製 -----	353
3.5.4 実大試験体への補修工法の試験施工 -----	368
3.5.5 補修を施した実大試験体の振動実験 -----	377
3.6 岩手銀行旧営業室天井への補修工法の実証化記録 -----	388
3.6.1 岩手銀行に実施した補修工法の概要 -----	388
3.6.2 岩手銀行旧営業室における実施工の流れ -----	391
3.6.3 実施工を踏まえて浮上した問題点・課題 -----	398



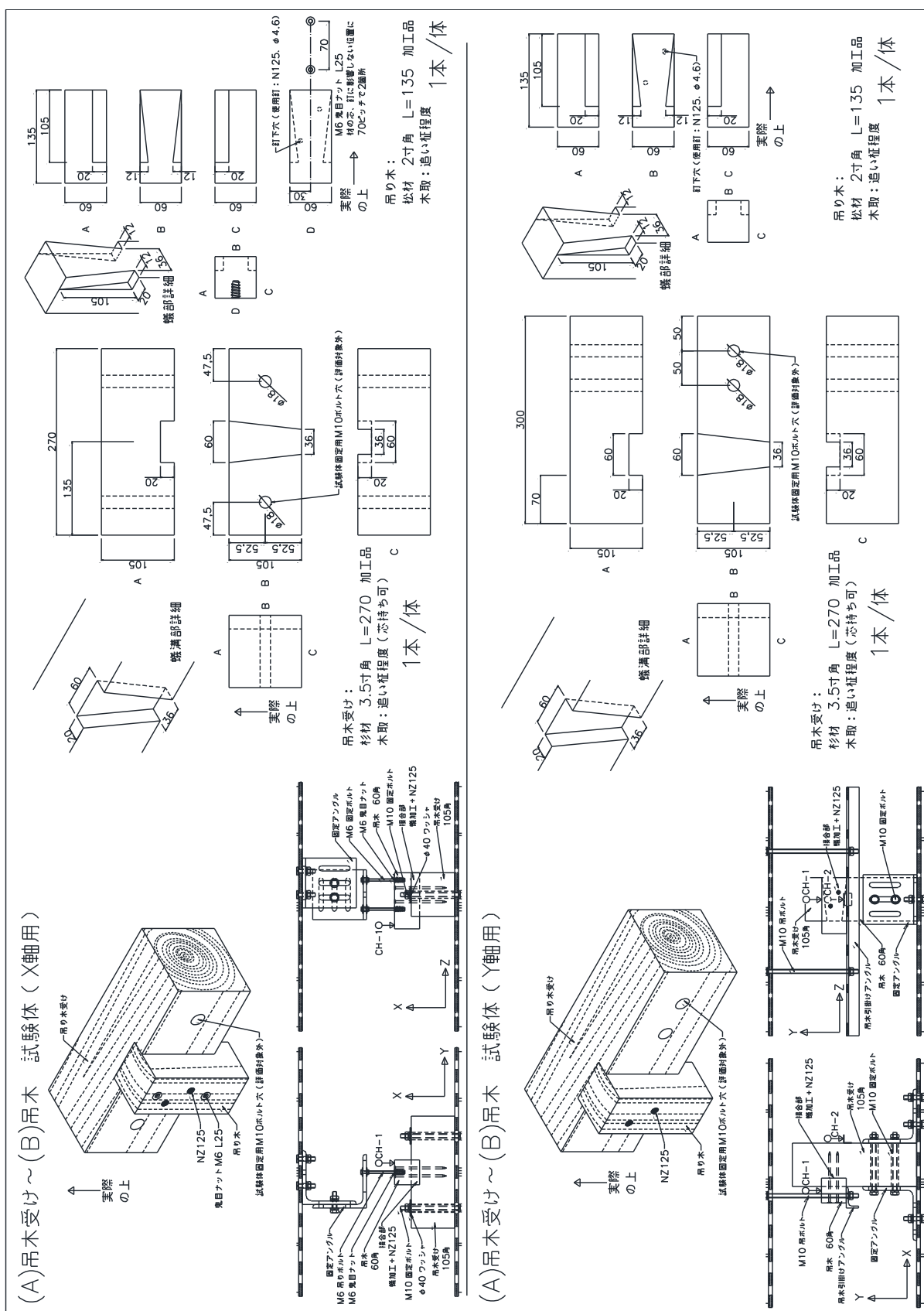
# 1. 木製天井吊り下地の接合部試験 に関わる試験体詳細図面

### 1 木製天井吊り下地の接合部試験に関わる試験体詳細図面

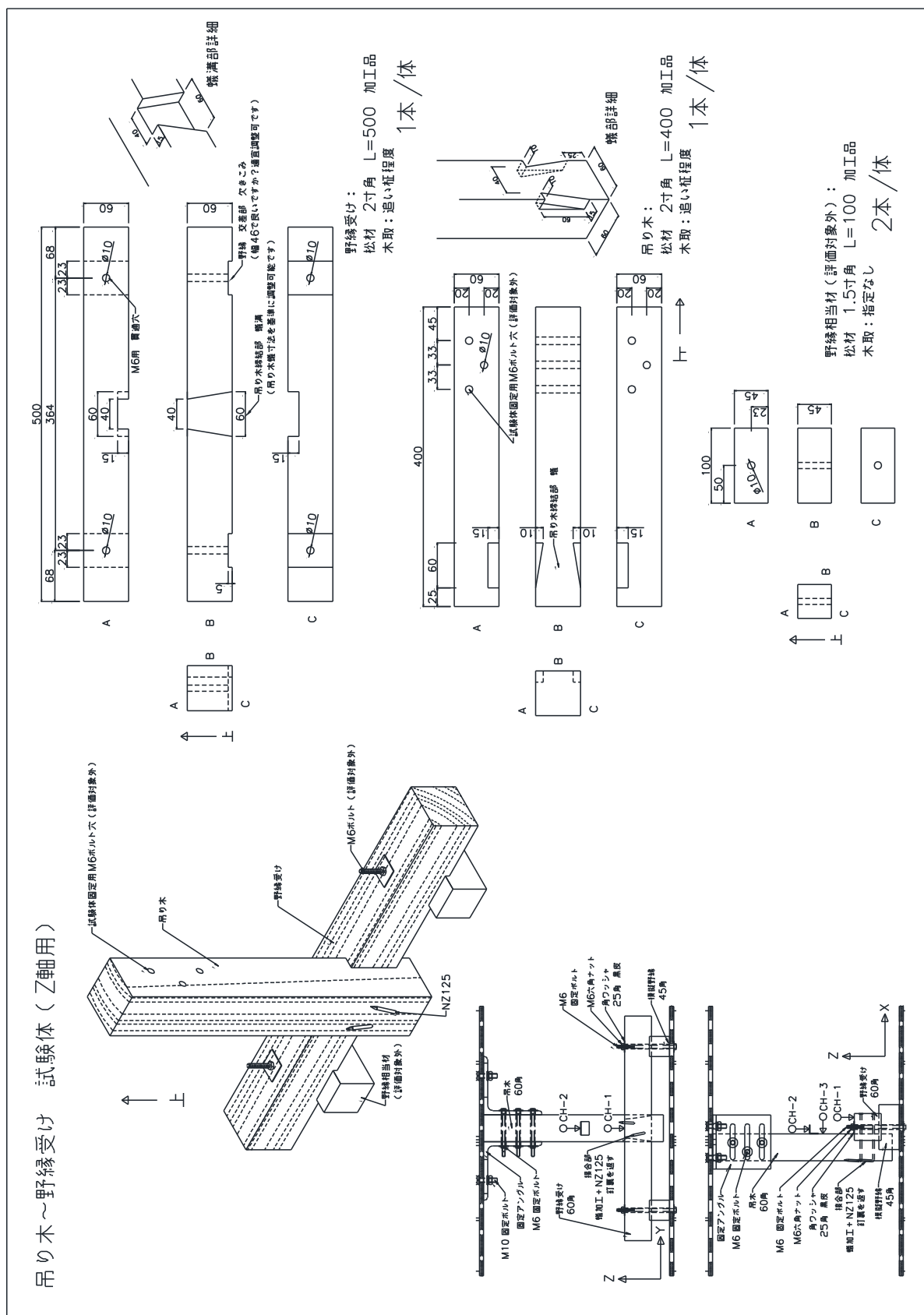
### 1.1 吊木受け～吊木(X, Y, Z 軸)



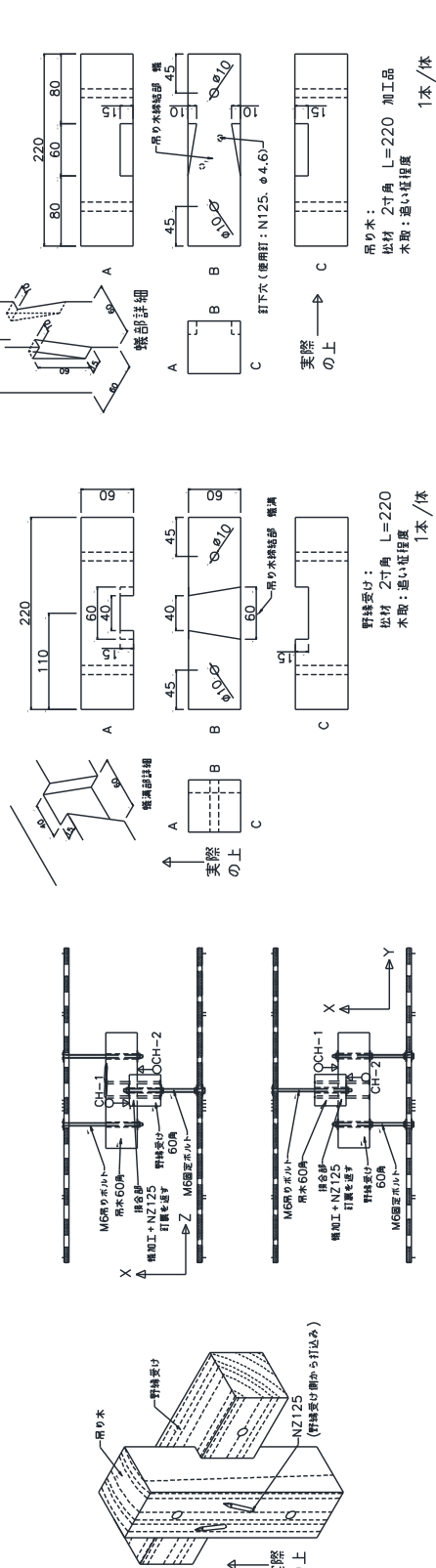




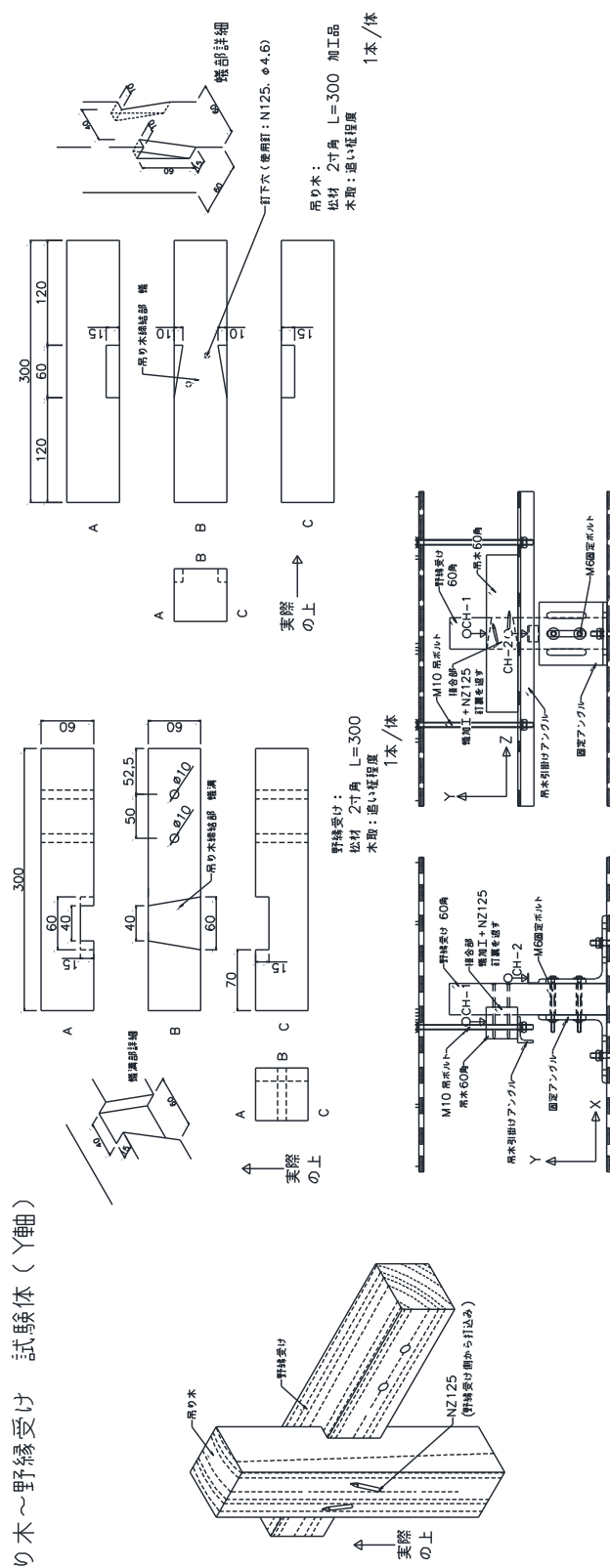
### 1.2 吊木～野縁受け (X, Y, Z 軸)



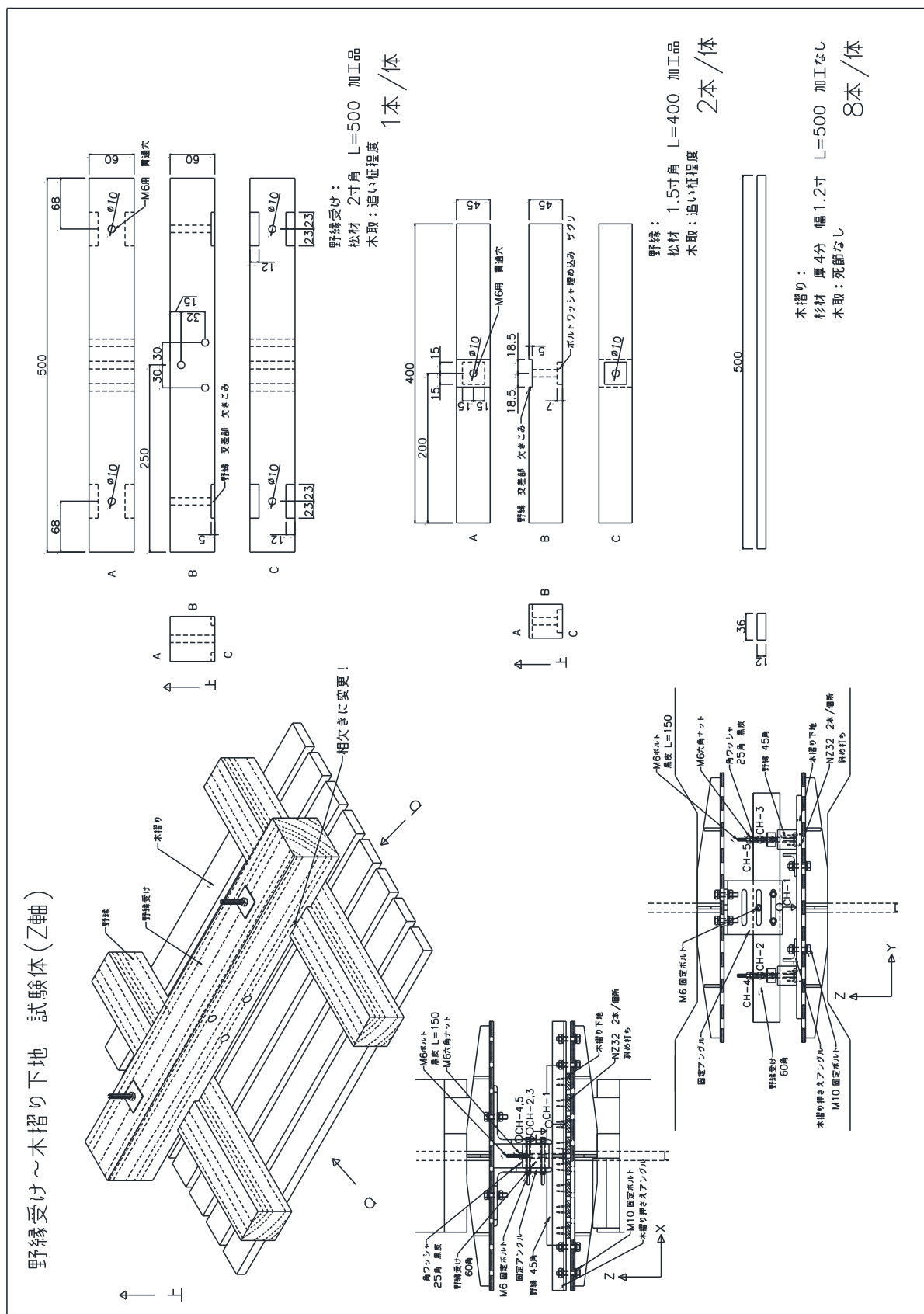
吊り木～野縁受け 試験体（X軸）



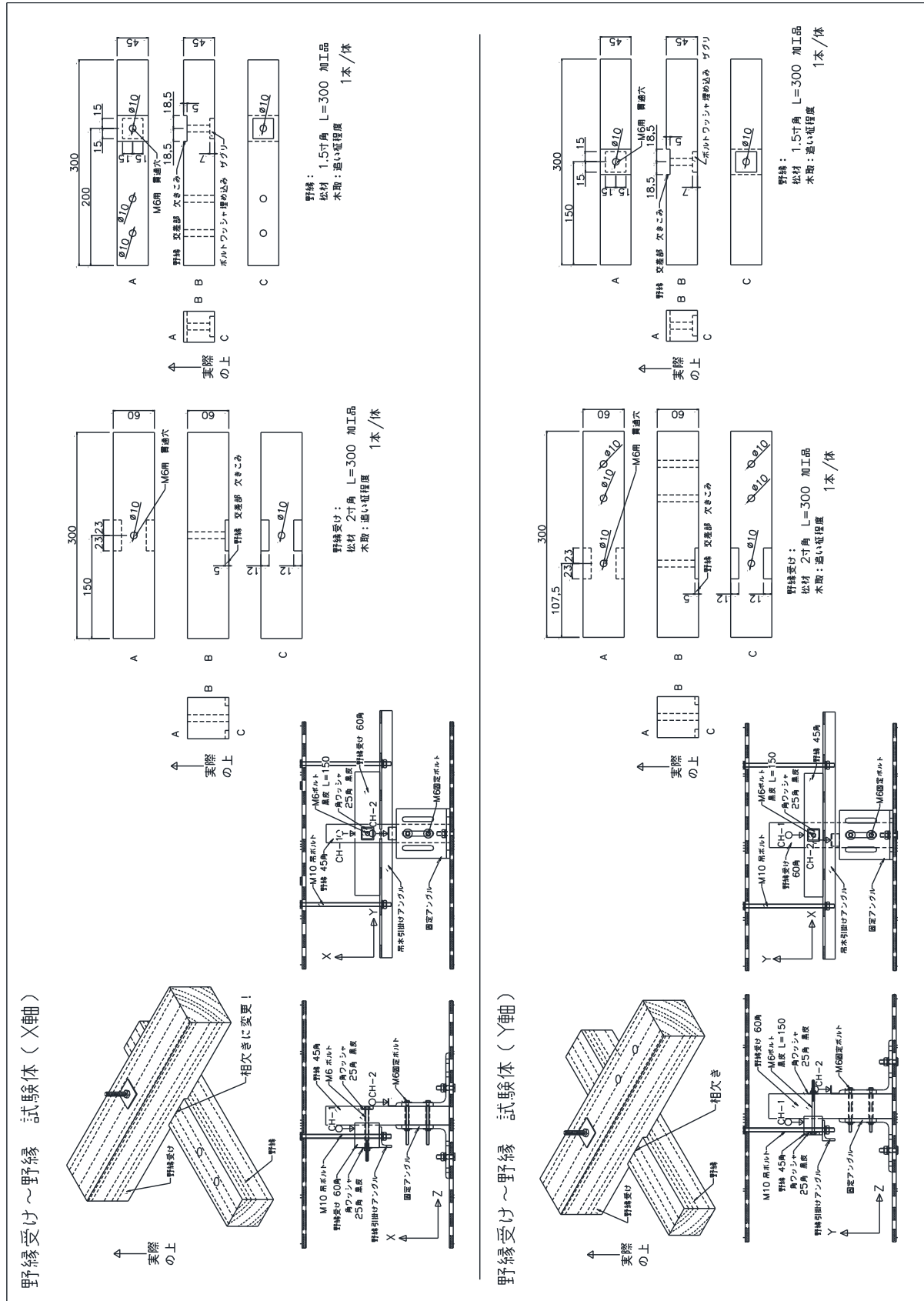
吊り木～野縁受け 試験体 (Y軸)

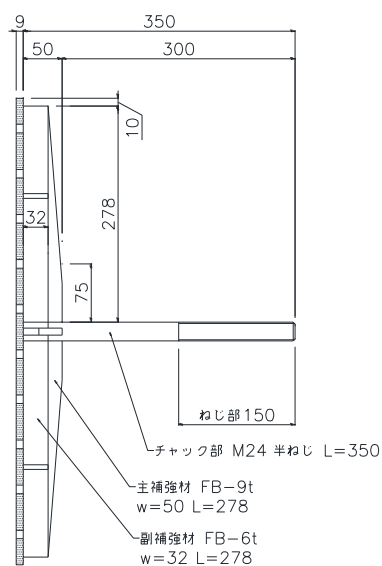


### 1.3 野縁受け～野縁～木摺り下地(Z軸)

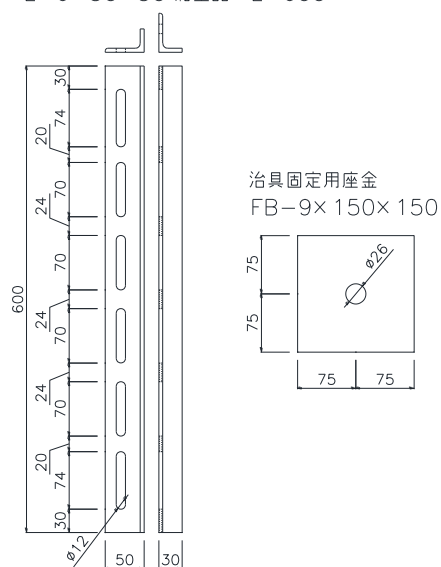


1.4 野縁受け～野縁(X, Y軸)

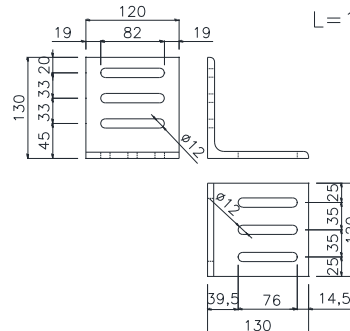




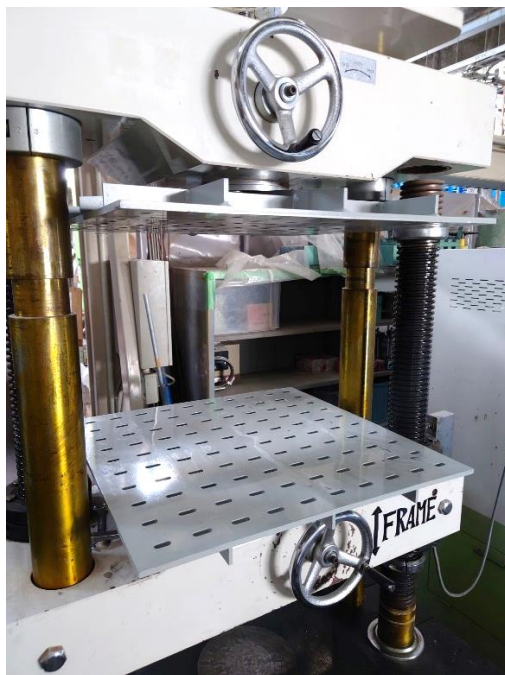
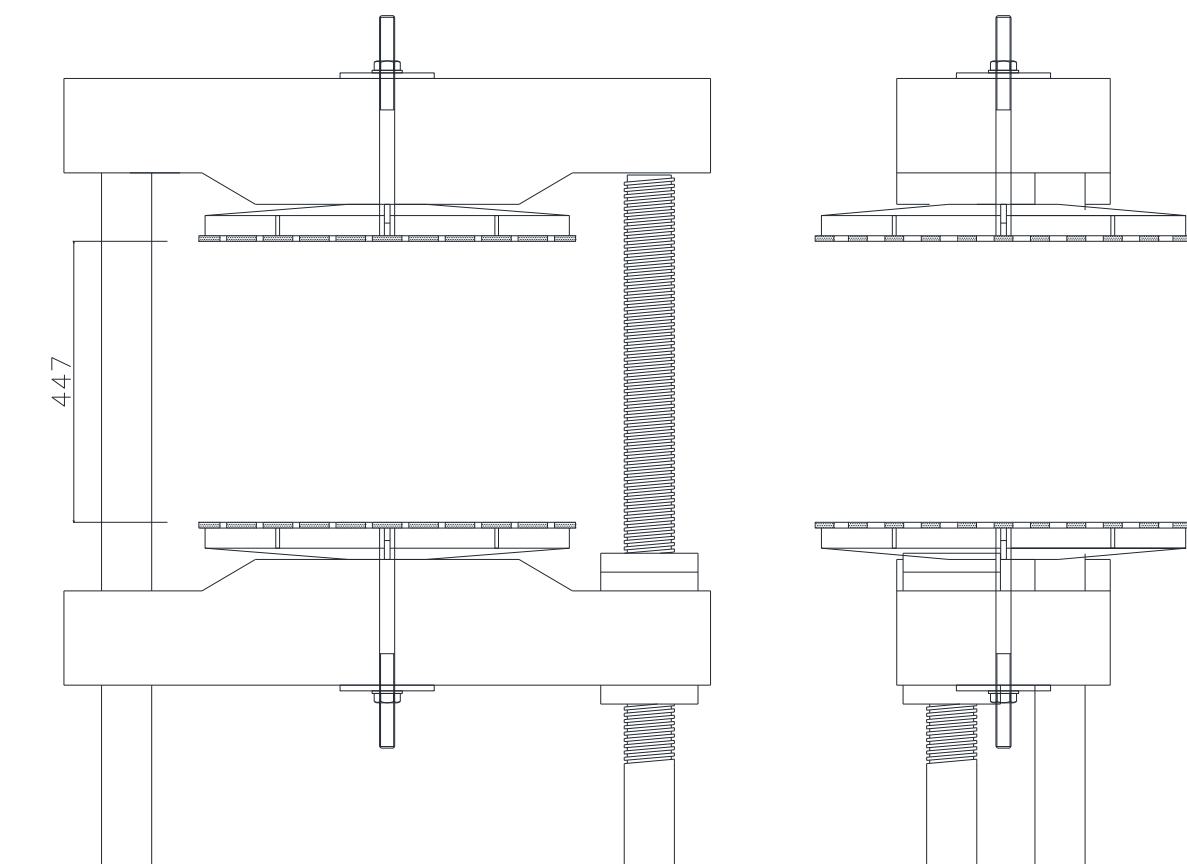
L-6×50×50 加工品 L=600



120 L=120



1.6 接合部試験体設置用治具のアムスラー試験機据え付け状態



治具据え付け状態





## 2. 木摺り漆喰天井部材の 振動試験における剥落時の状況

## 2. 木摺り漆喰天井部材の振動試験における剥落時の状況

### 2.1 キャプチャ画像の見方

木摺り漆喰天井部材の振動試験時（第 8 章で報告）に 2 方向からの映像記録を行った。本節では、各試験体の漆喰剥落時のキャプチャ画像を示す。キャプチャ画像は、図 2-1 の例に示す様に上から小幅度天端の応答加速度履歴（第 8 章で示した波形と共通）、1 カメ（振動台西側）・2 カメ（振動台東側）の各方向からの映像、右下に所定の入力加速度に達した時点からの経過時間を示している。また第 8 章では各試験体の剥落破片を時系列に①、②…と附番しているが、ここでもそれを踏襲して示す。

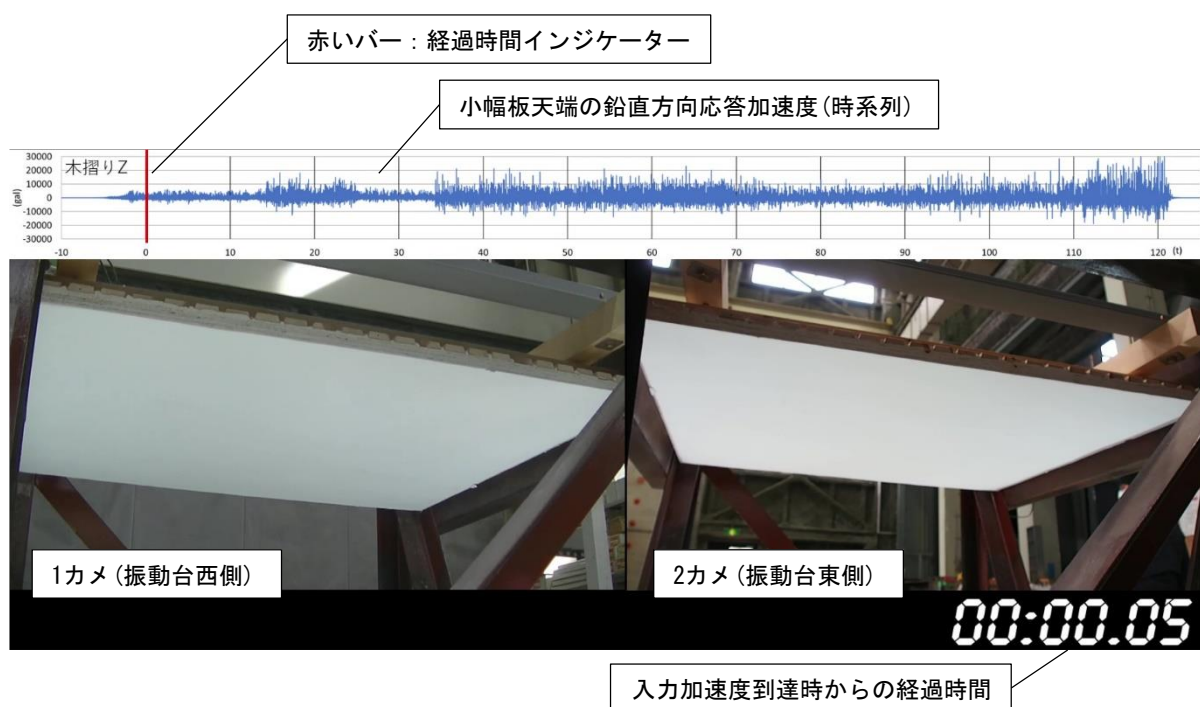
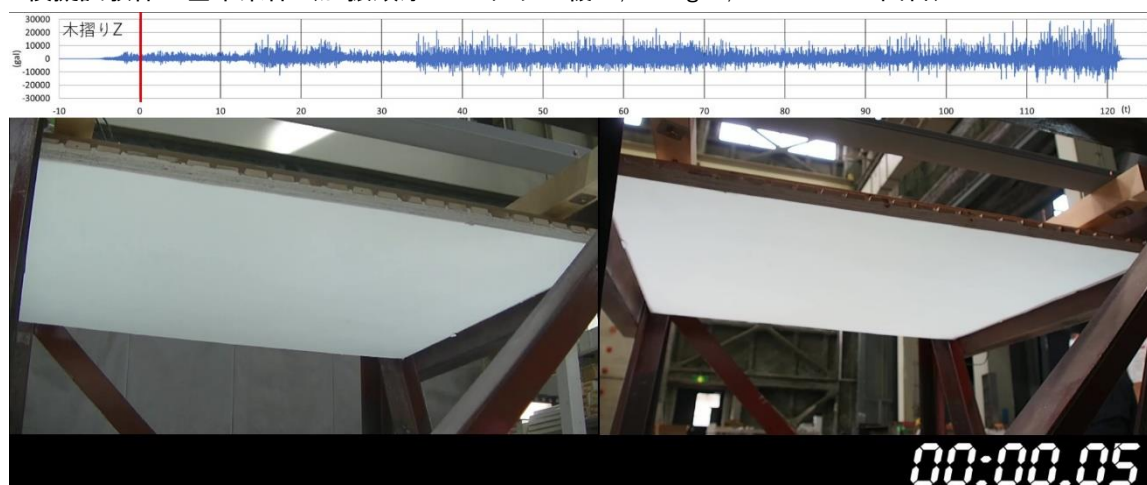
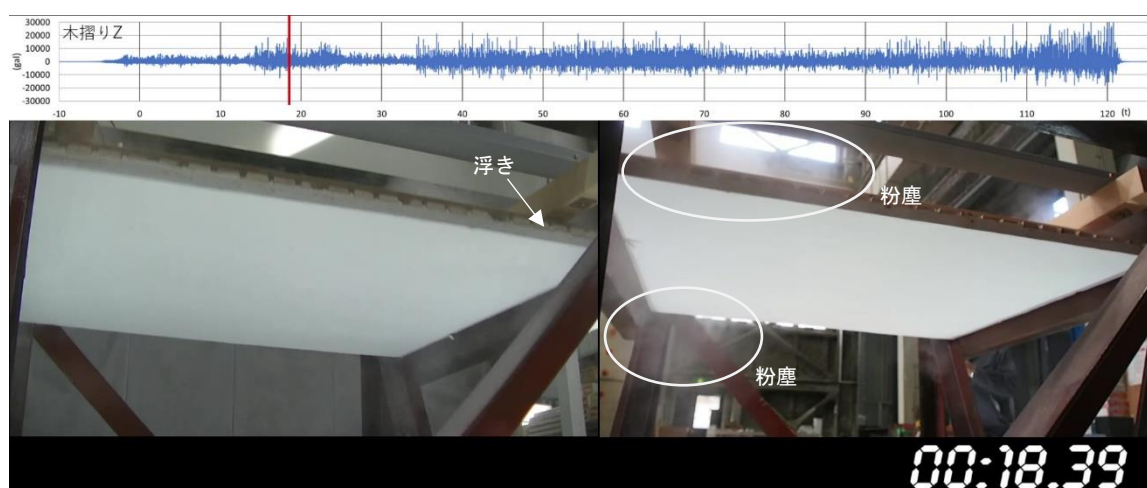


図 2-1 キャプチャ画像の見方の例

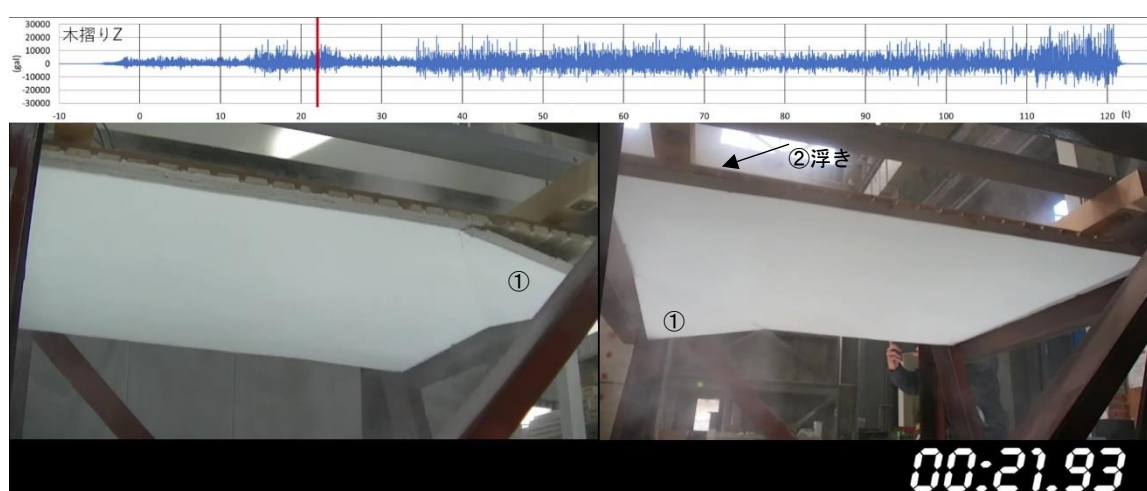
## 2.2 模擬試験体 基本条件（加振順序 13：ナット緩め，980gal，9.7Hz の3回目）



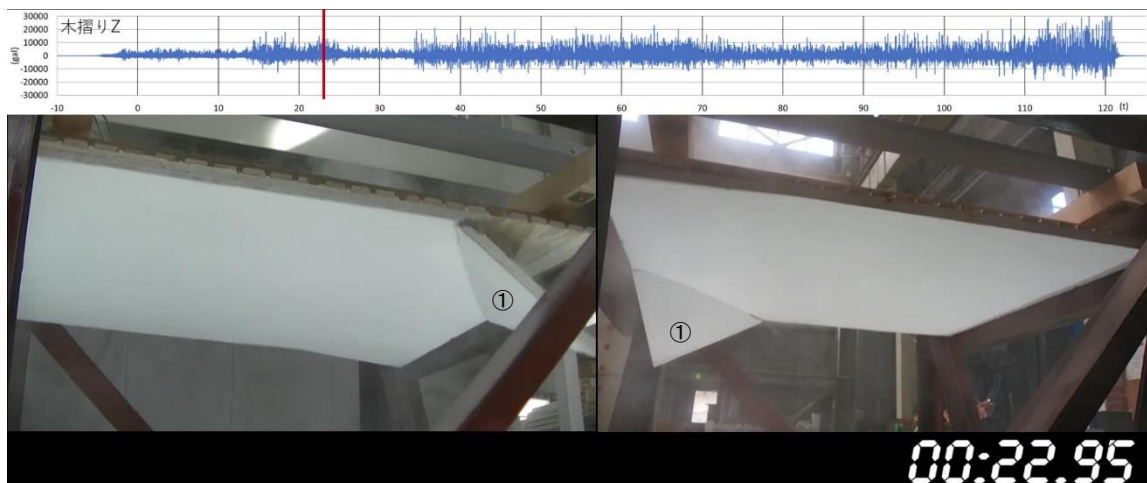
1) 試験前



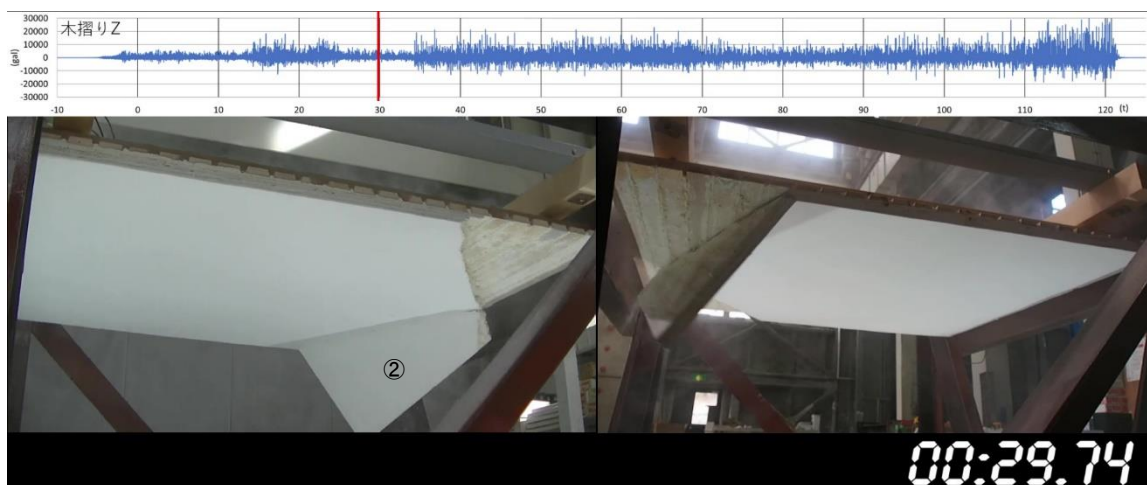
2) ①の粉塵と浮き発生



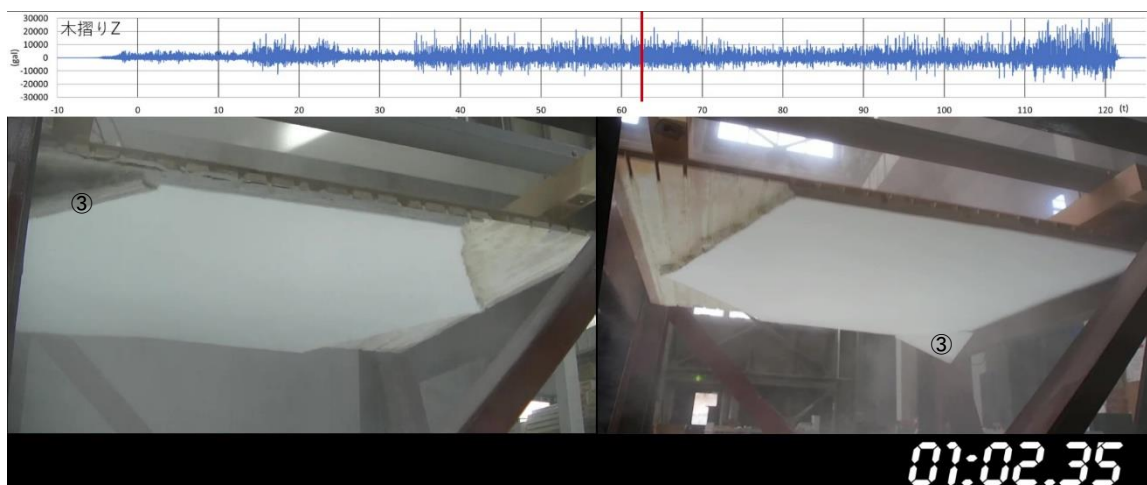
3) ①の剥離進展と②の浮き



4) ①の落下

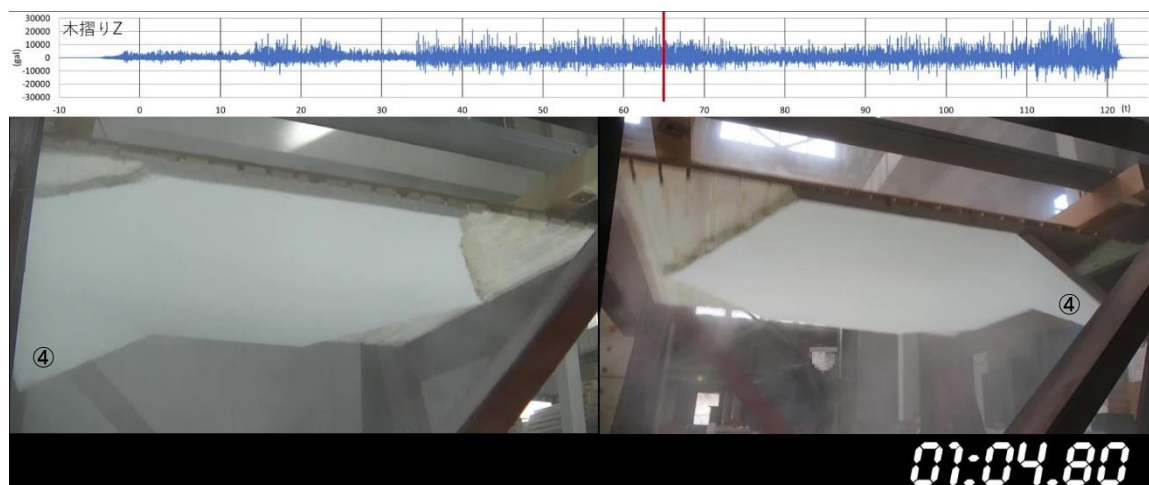


5) ②の落下

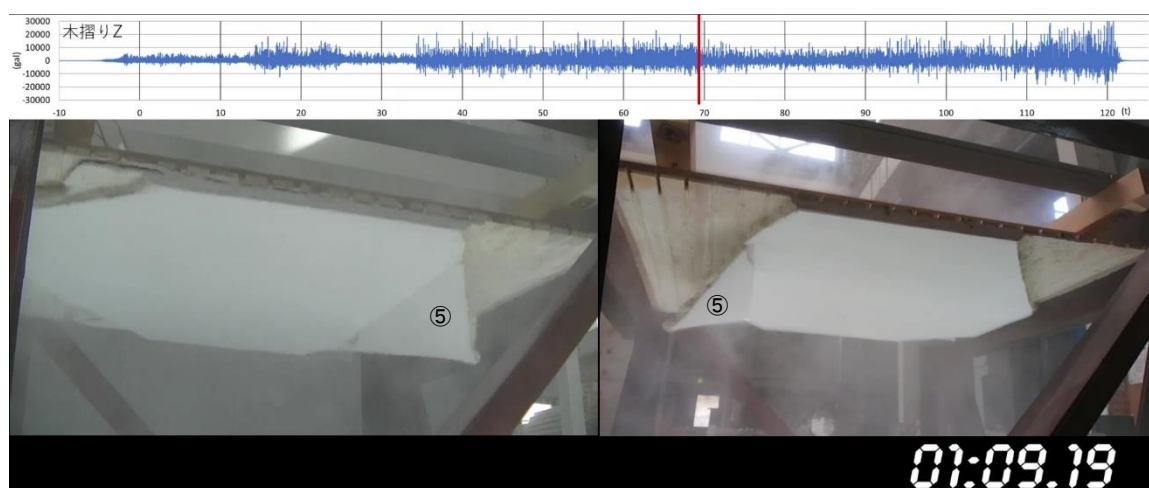


6) ③の落下

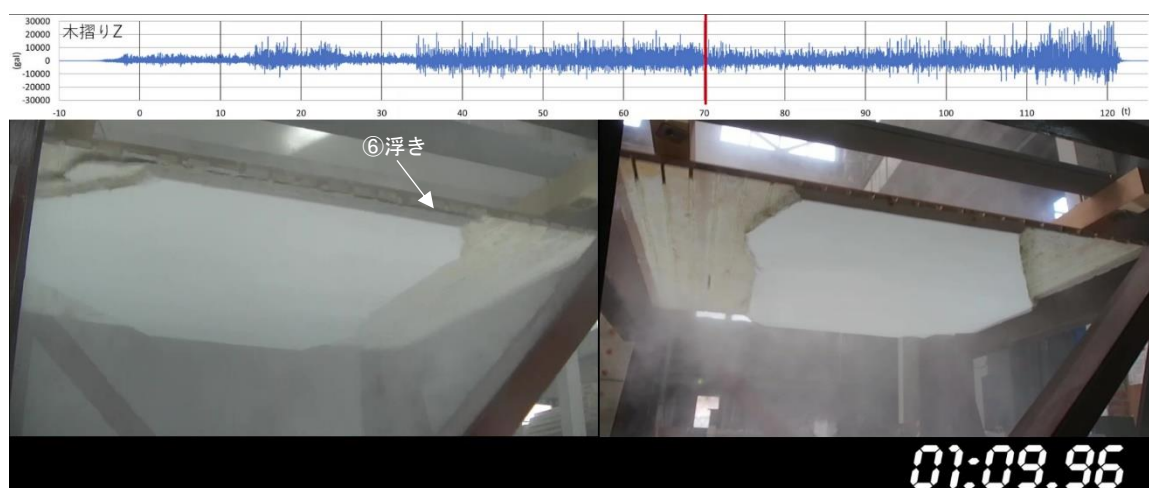




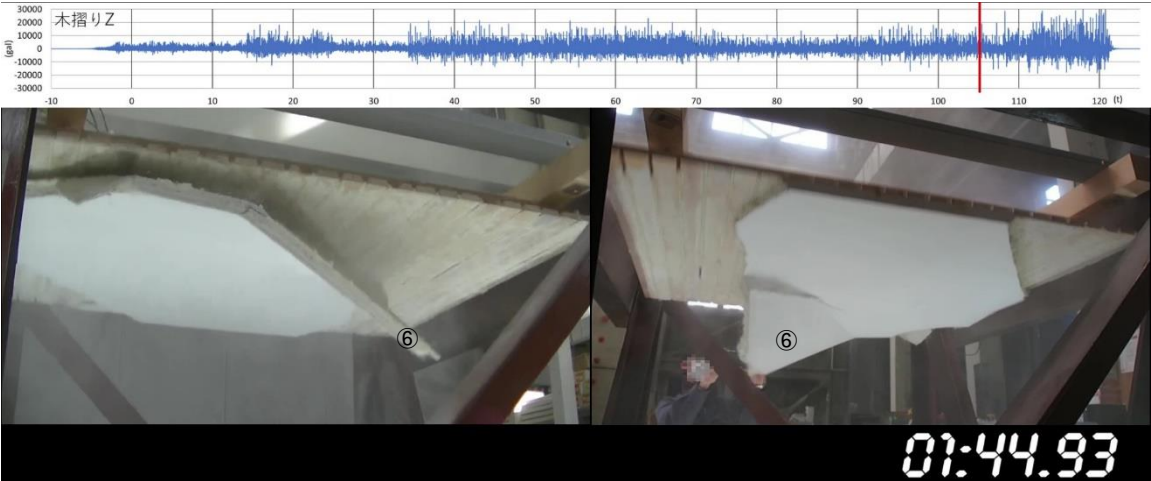
7) ④の落下



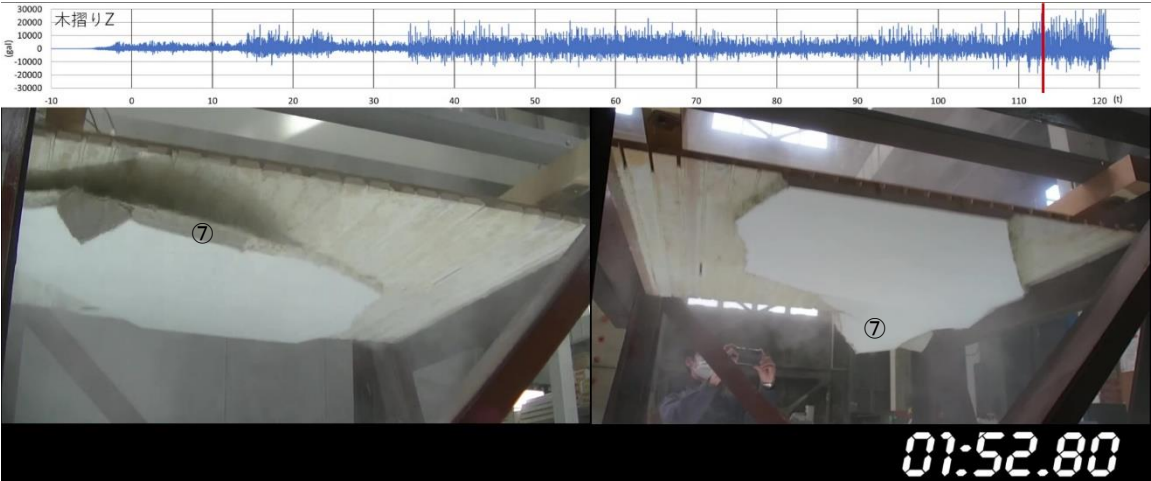
8) ⑤の落下



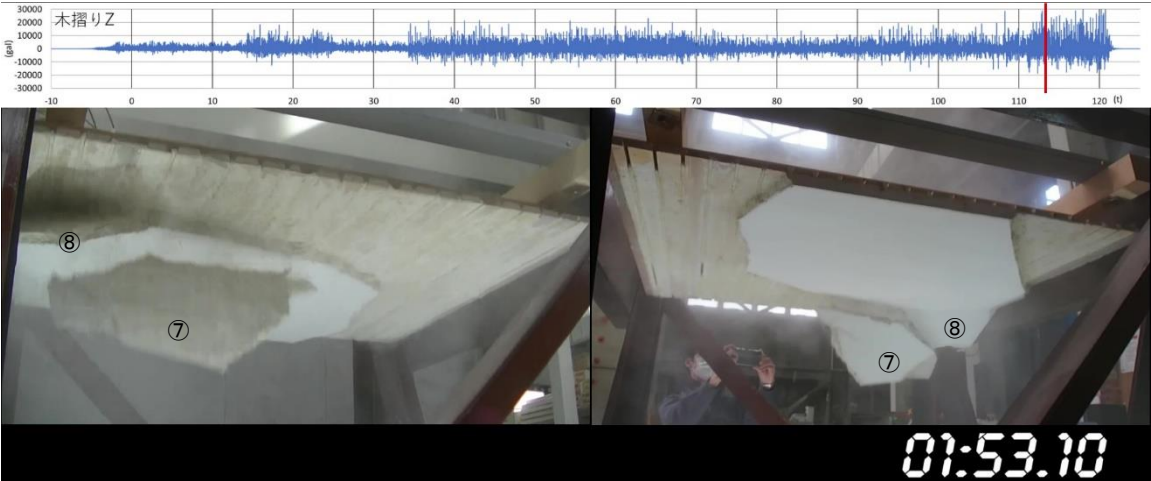
9) ⑥の浮き



10) ⑥の落下



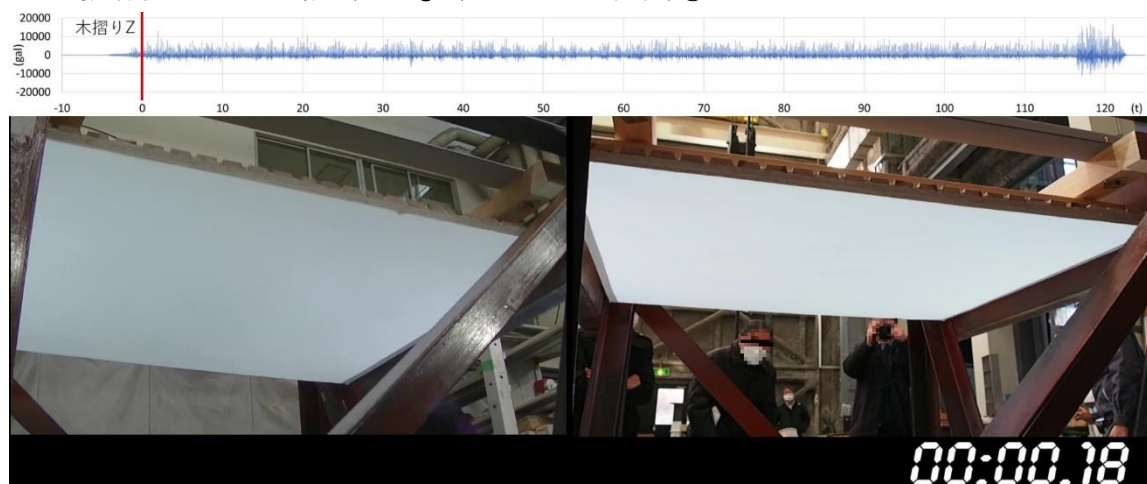
11) ⑦の落下



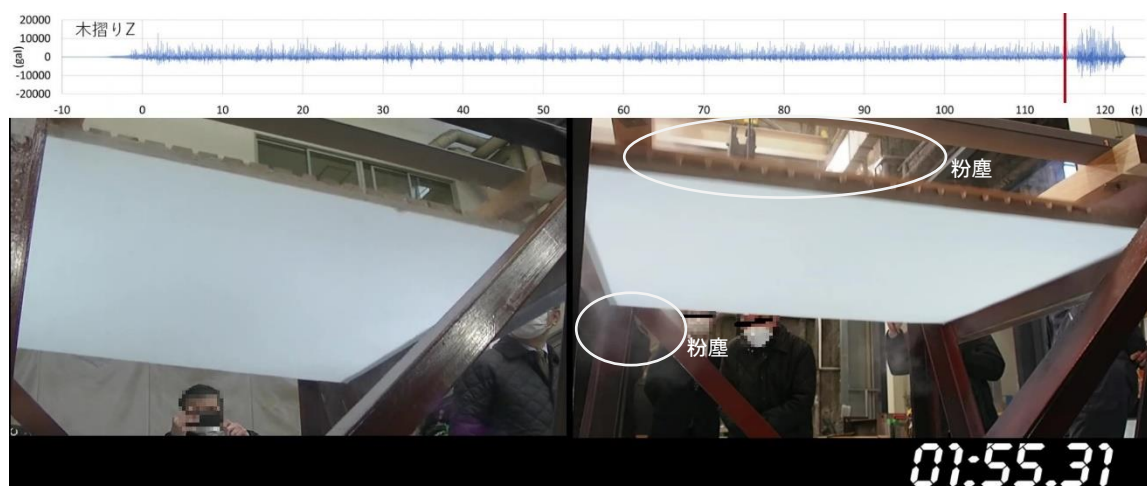
12) ⑦, ⑧の落下

## 2.3 模擬試験体 付着抑制条件

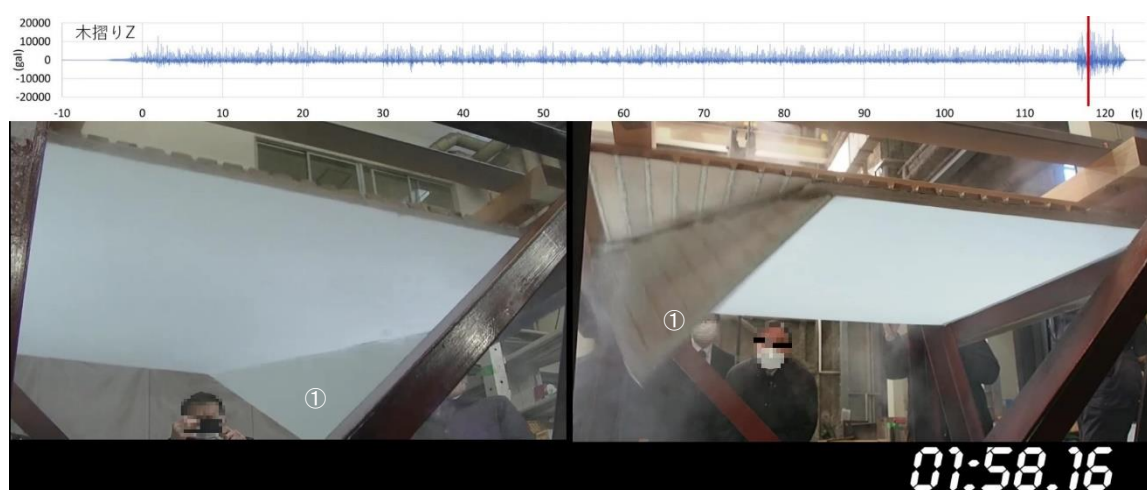
### 2.3.1 加振順序 13：ナット緩め，980gal，9.5Hz の1回目，①



1) 試験前



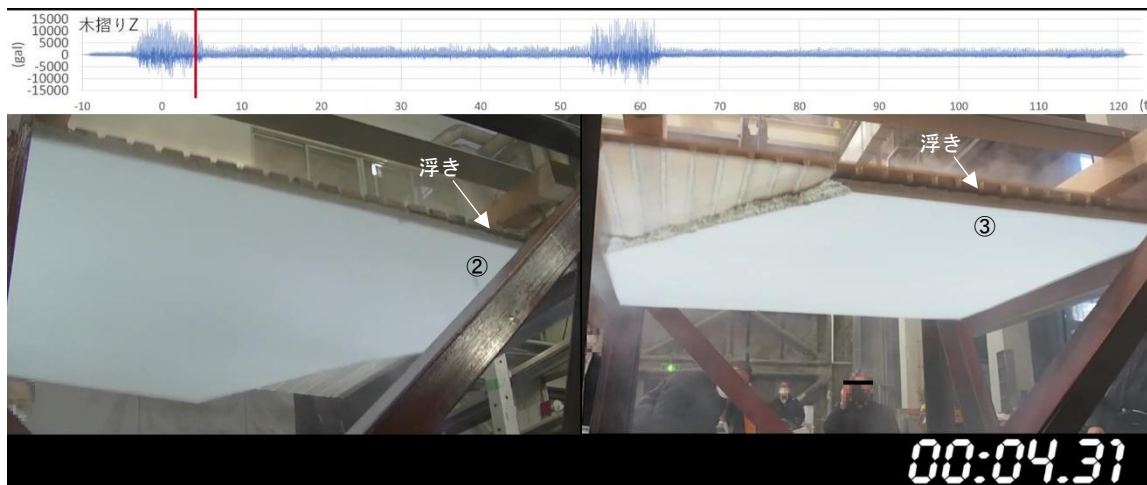
2) ①の粉塵発生



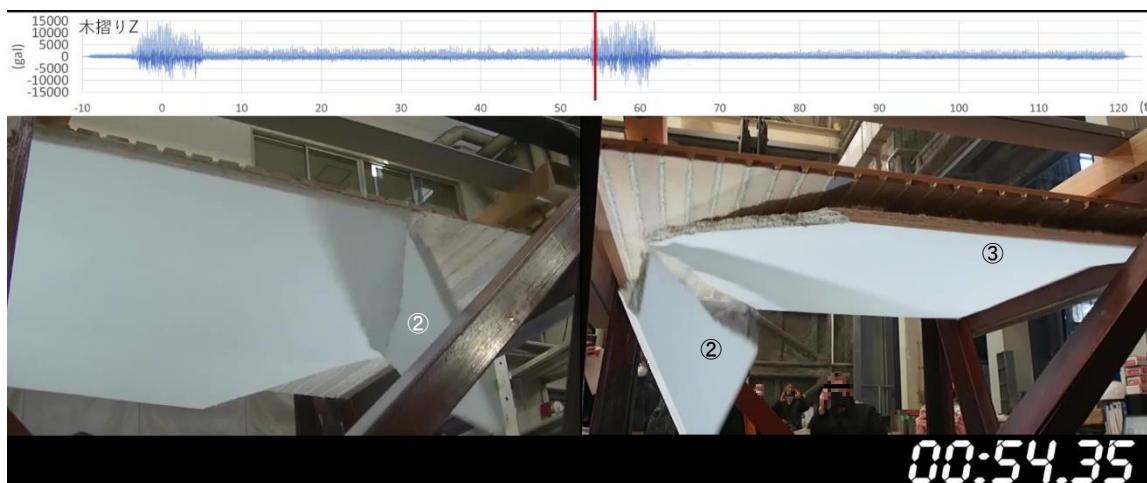
3) ①の落下



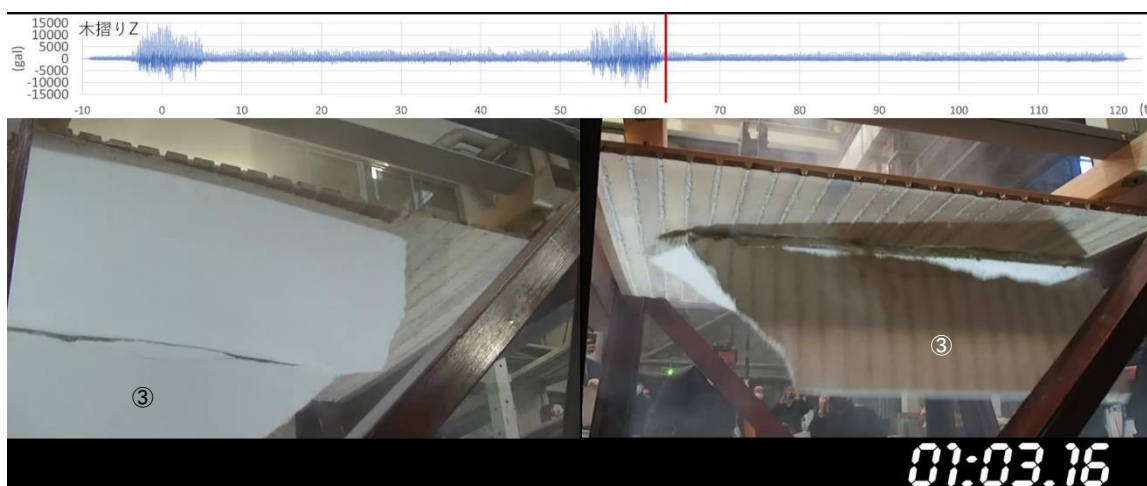
2.3.2 加振順序 14：ナット緩め，980gal，9.5Hz の2回目，②③



1) ②、③の浮き



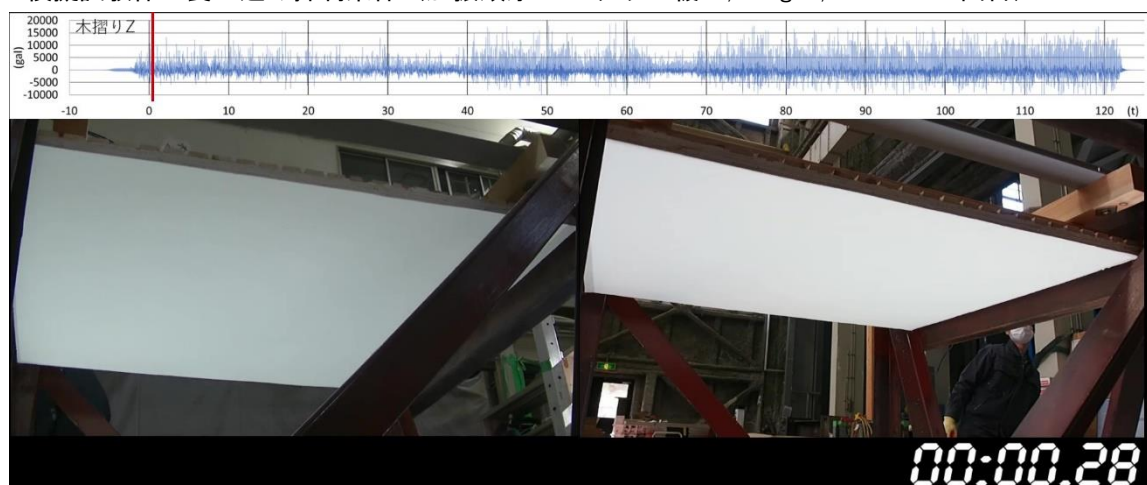
2) ②の落下、③の剥離進展



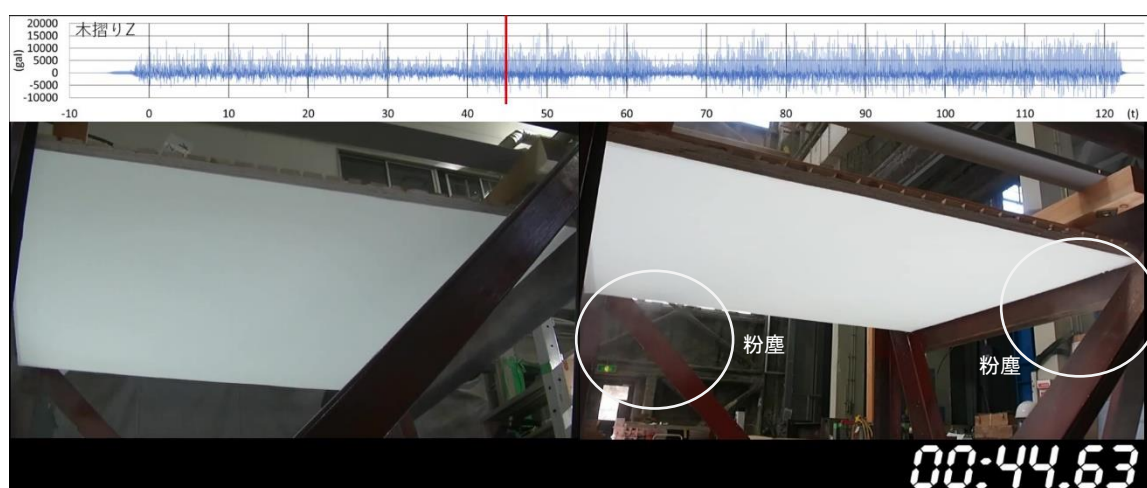
3) ③の落下



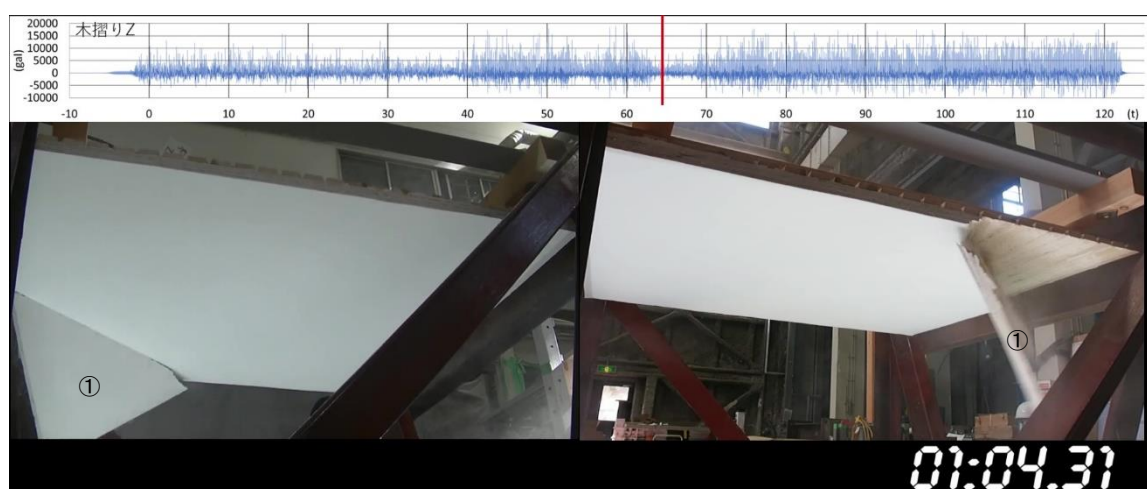
2.4 模擬試験体 食い込み抑制条件（加振順序 10：ナット緩め, 980gal, 9.5Hz の1回目）



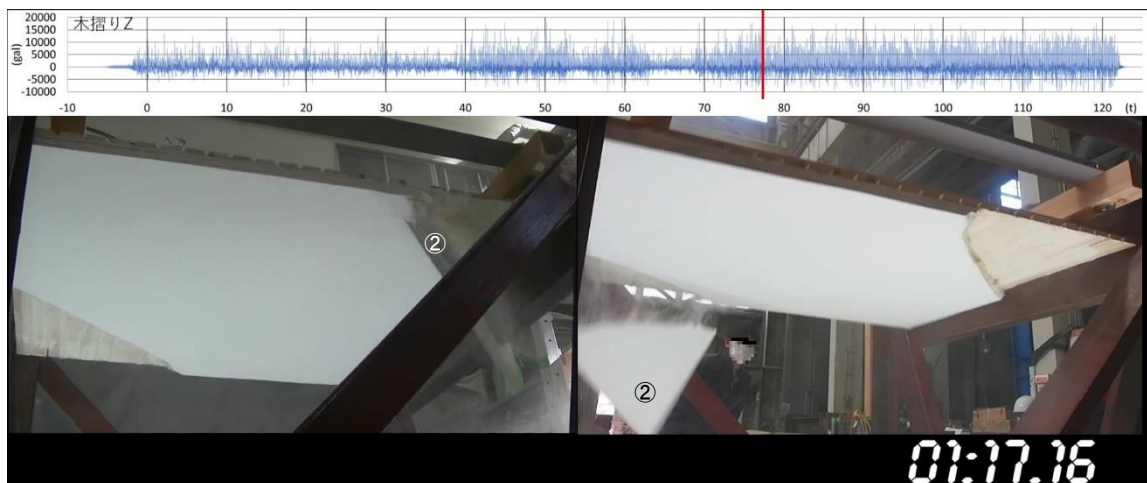
1) 試験前



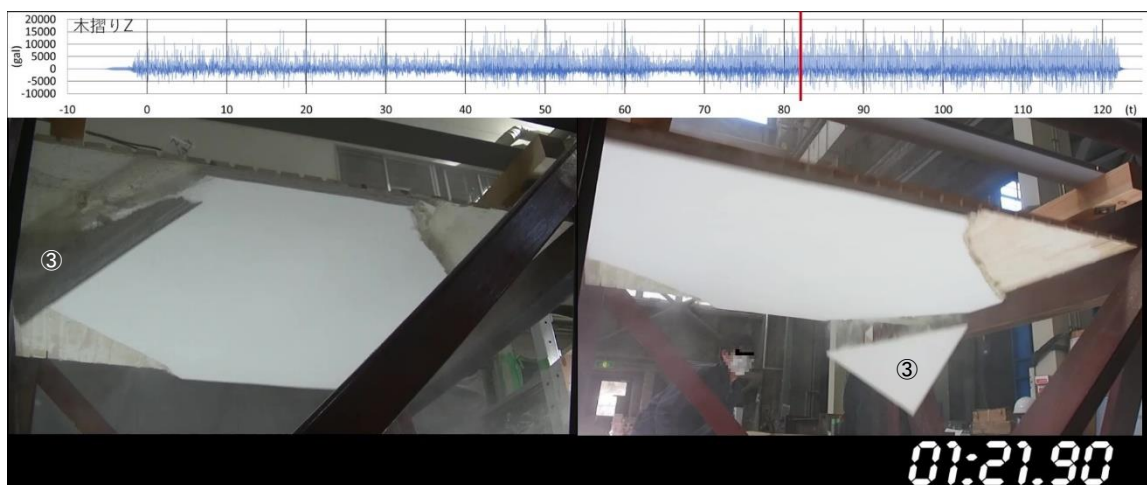
2) 粉塵発生



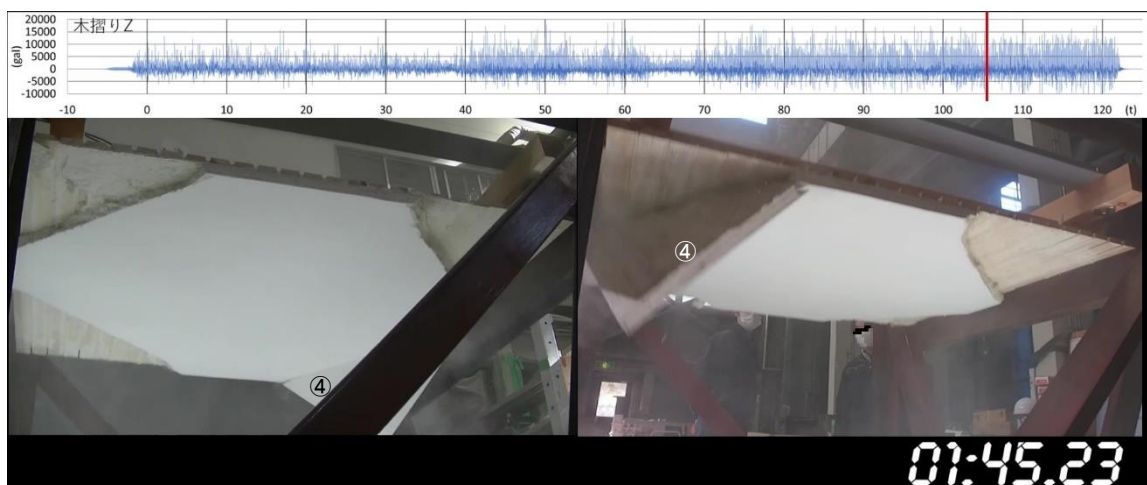
3) ①の落下



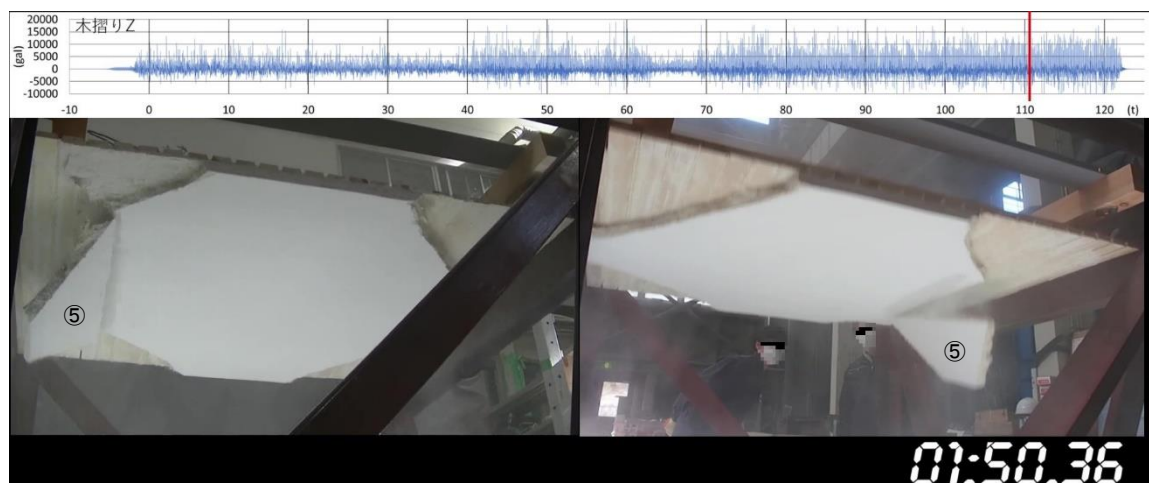
4) ②の落下



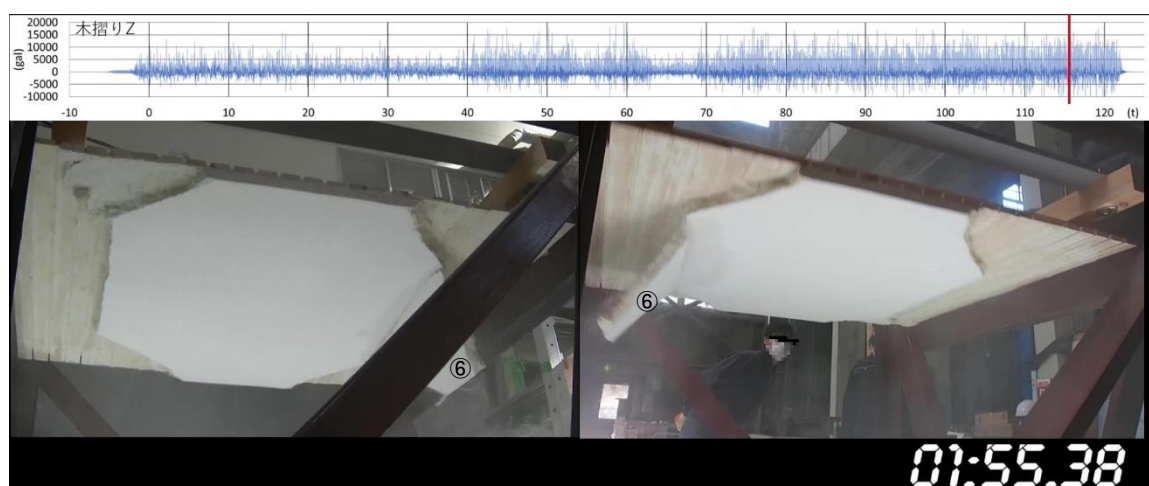
5) ③の落下



6) ④の落下



7) ⑤の落下

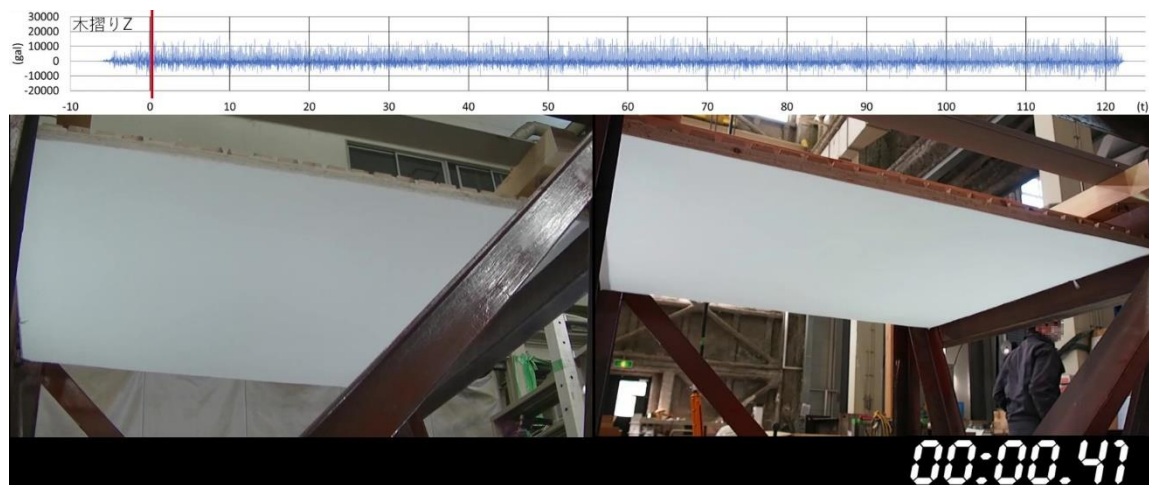


8) ⑥の落下

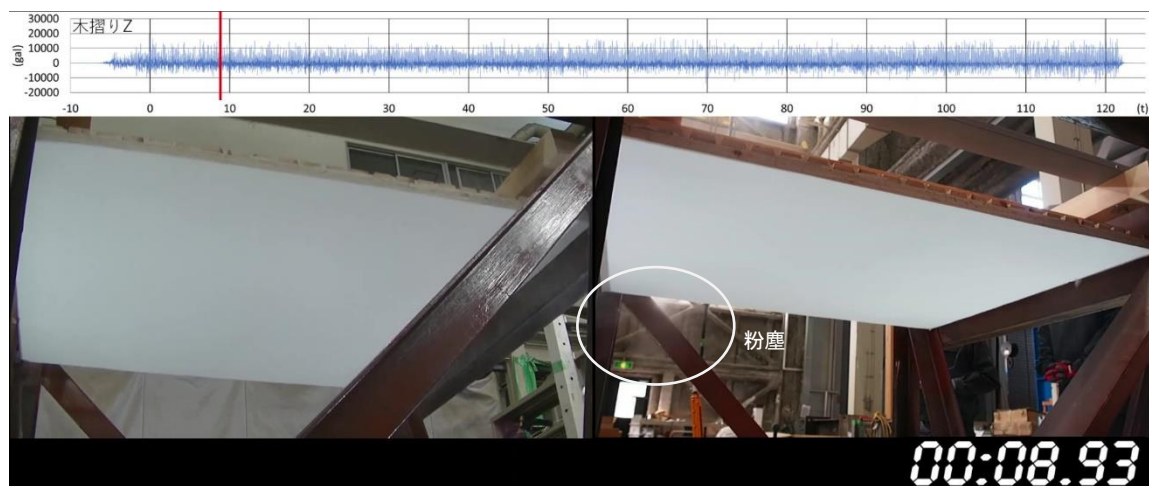


## 2.5 模擬試験体 漆喰強度抑制抑制条件

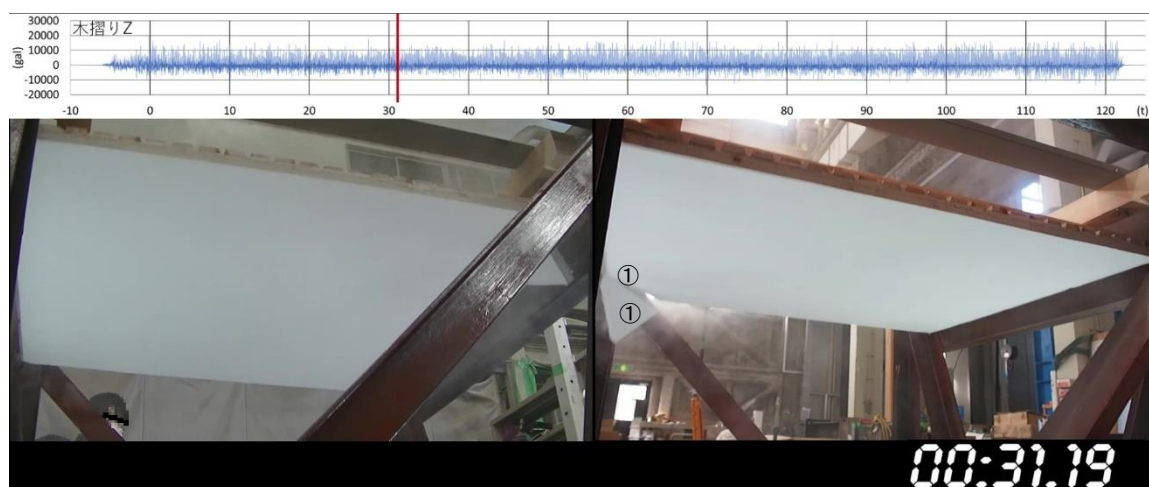
### 2.5.1 加振順序 10 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz の 1 回目, ①~⑧



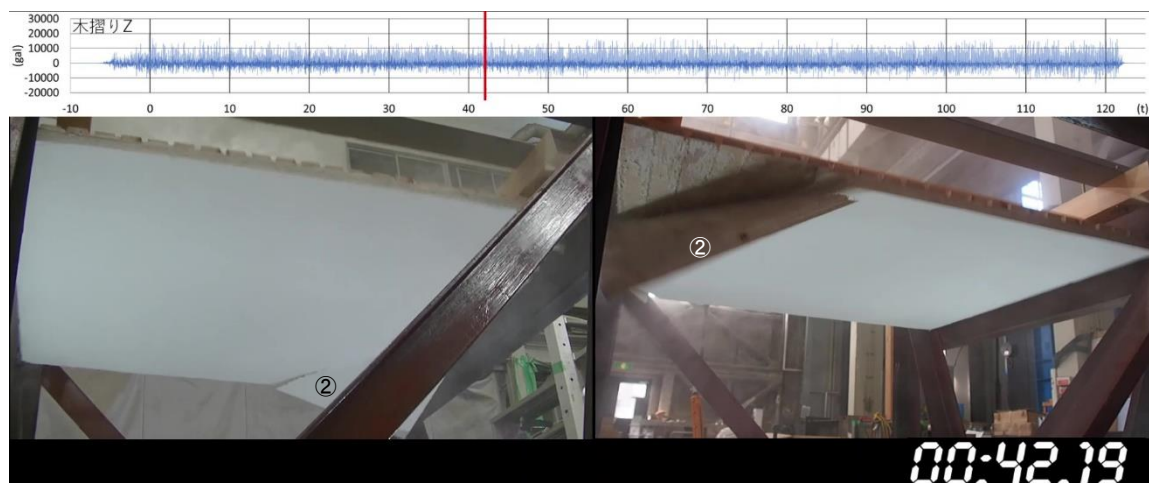
1) 試験前



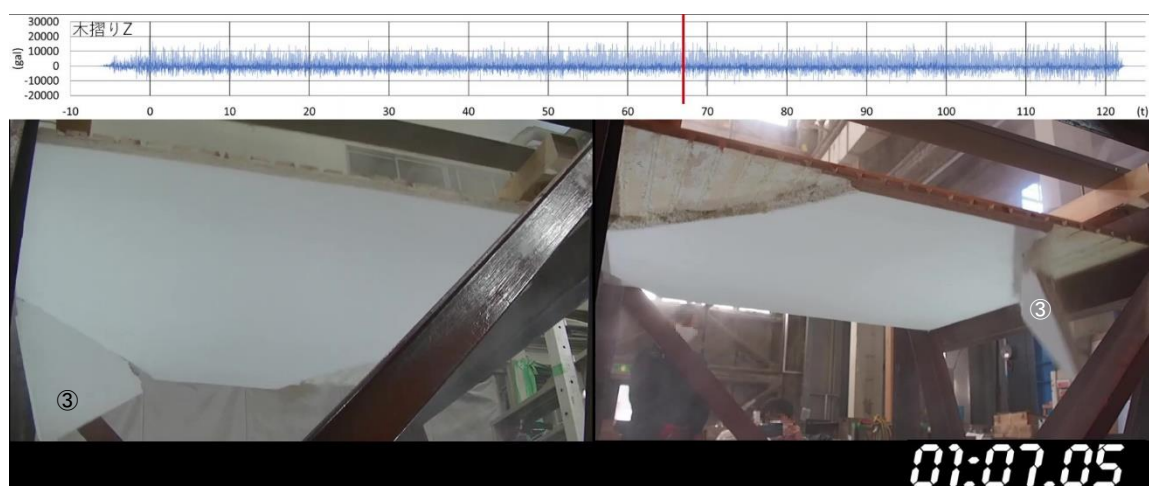
2) 粉塵発生



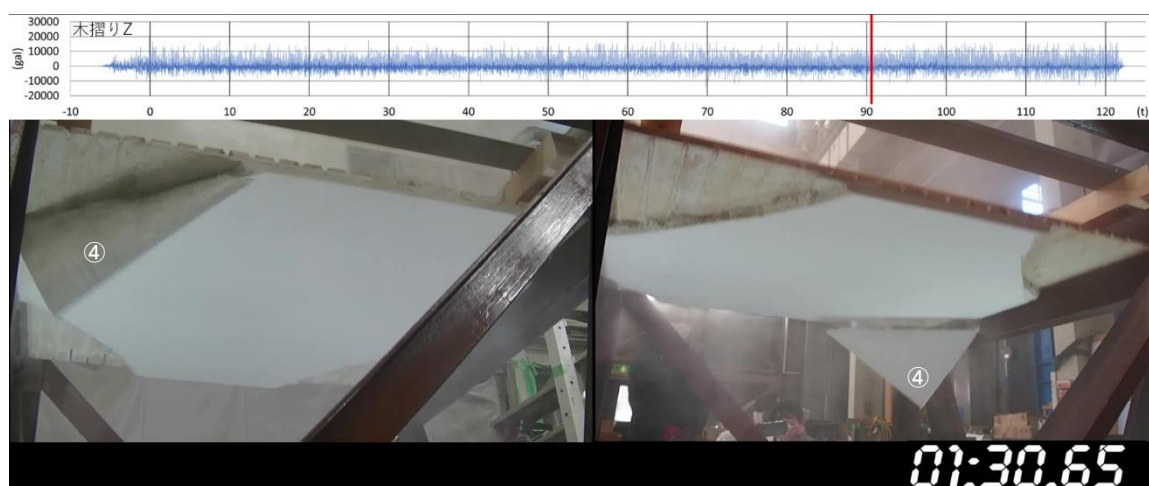
3) ①の落下



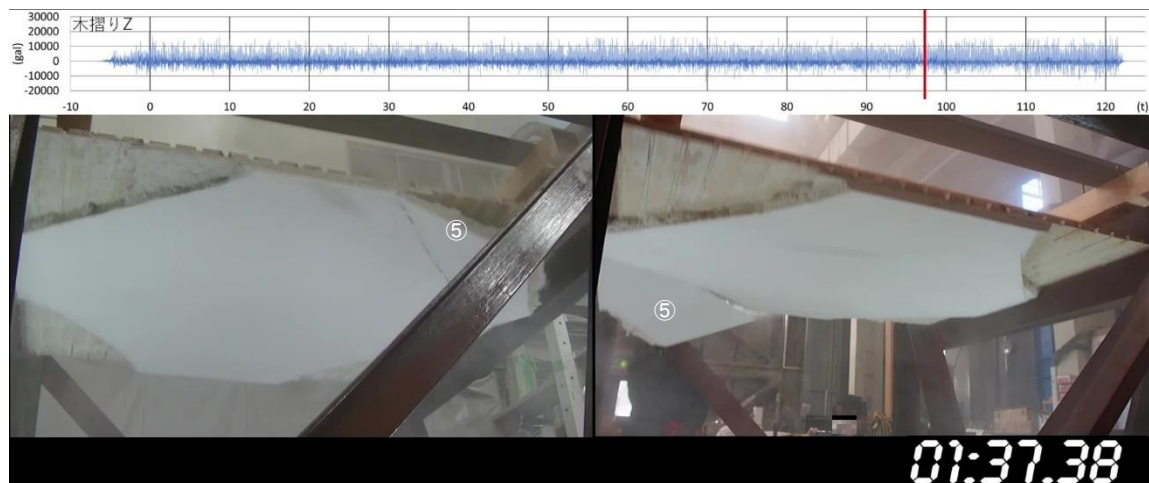
4) ②の落下



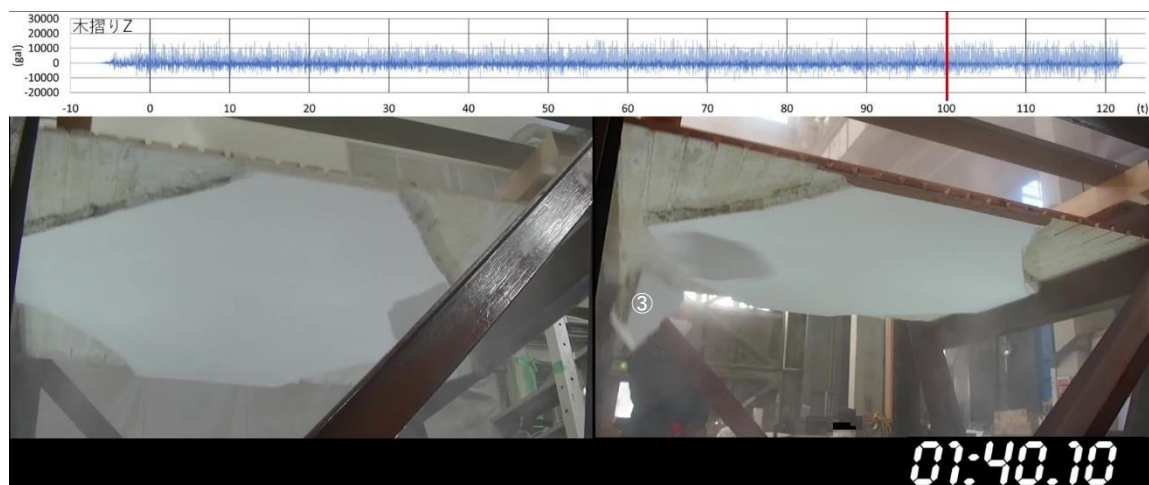
5) ③の落下



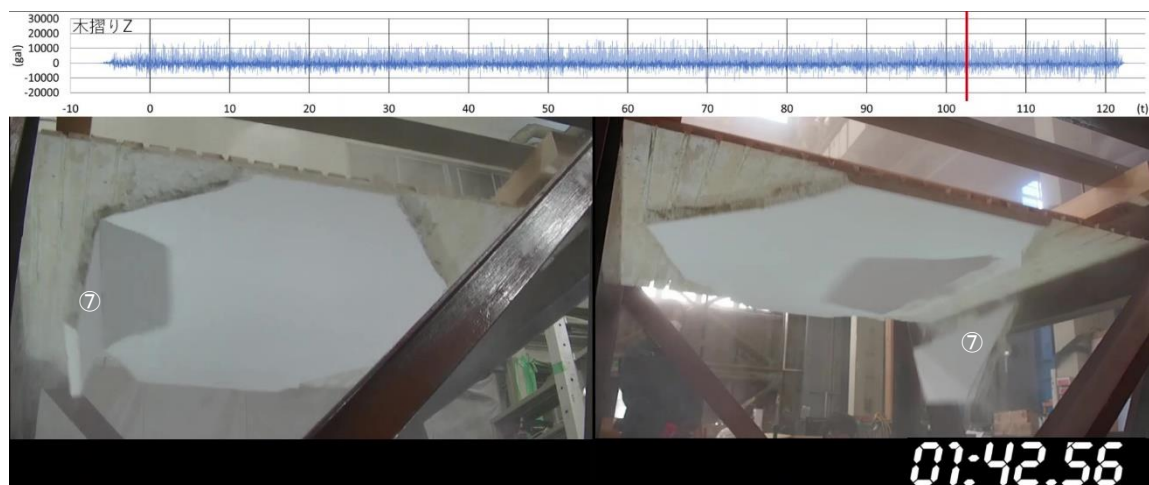
6) ④の落下



7) ⑤の落下

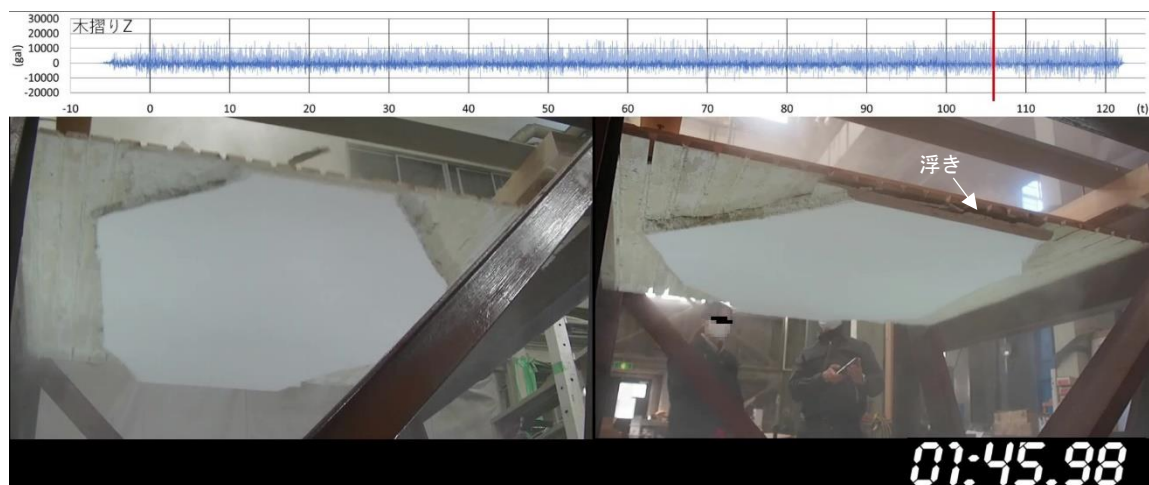


8) ⑥の落下

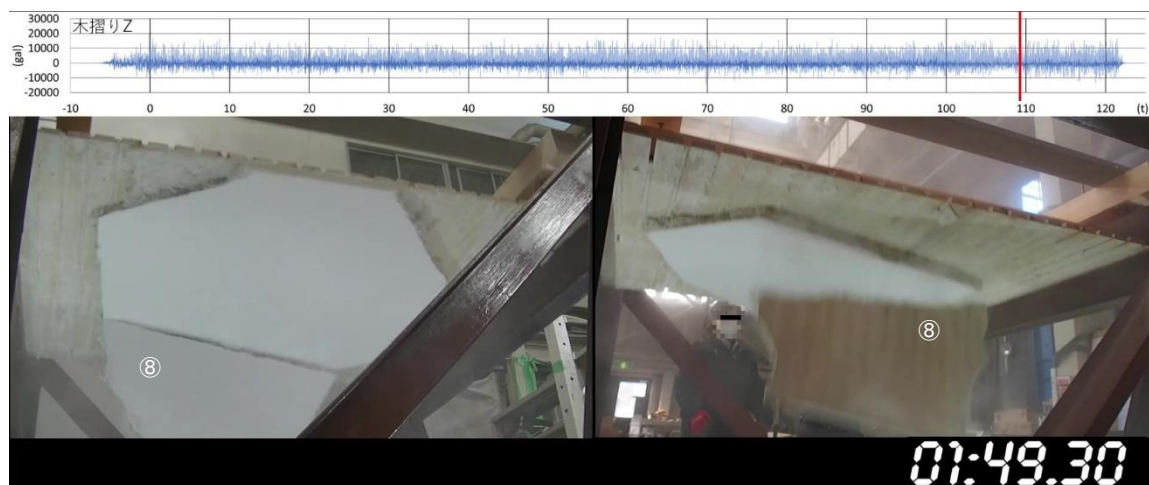


9) ⑦の落下



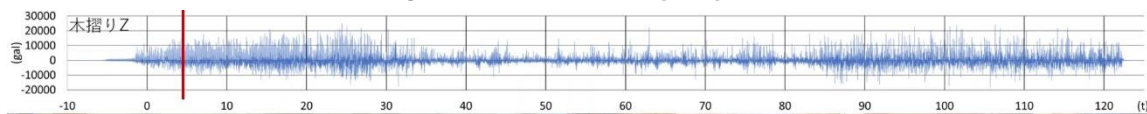


10) ⑧の浮き

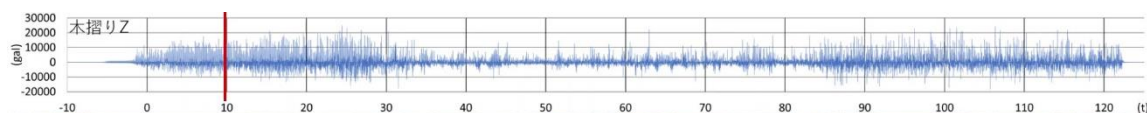


11) ⑧の落下

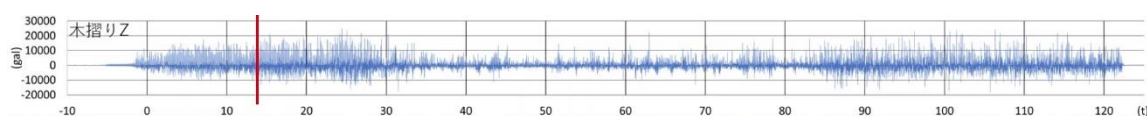
2.5.2 加振順序 11 : ナット緩め, 980gal, 9.5Hz の 2 回目, ⑨~⑭



1) ⑨の落下

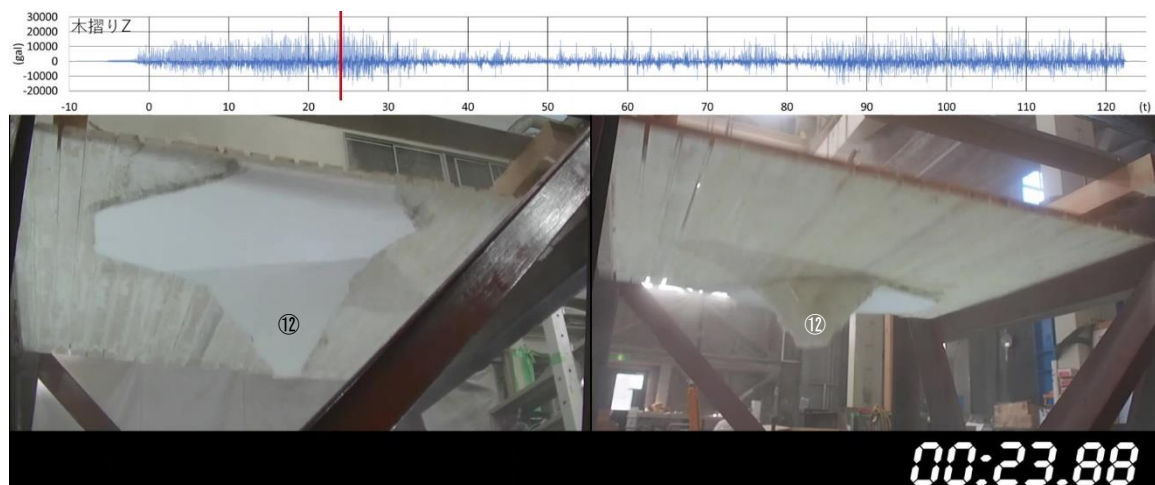


2) ⑩の落下

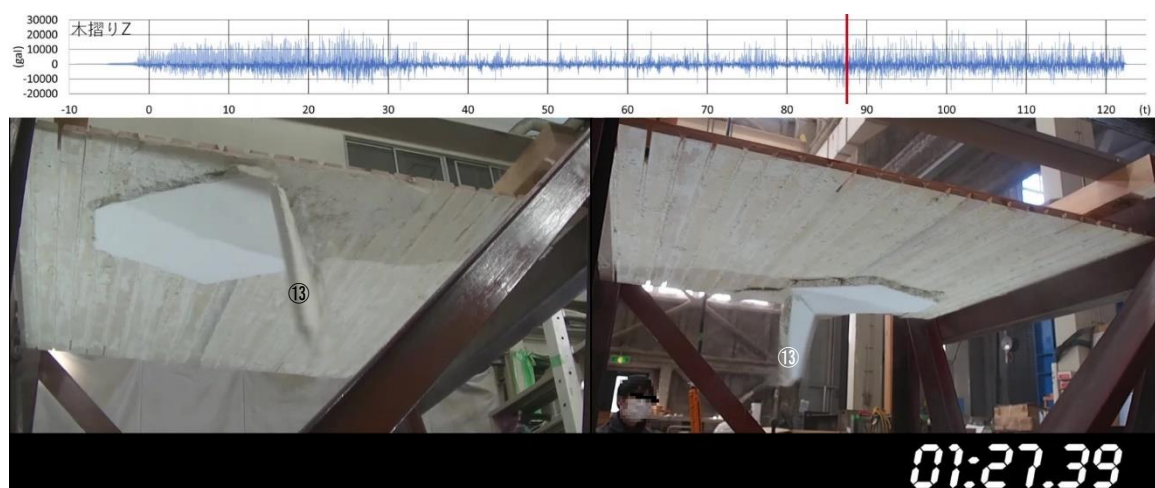


3) ⑪の落下

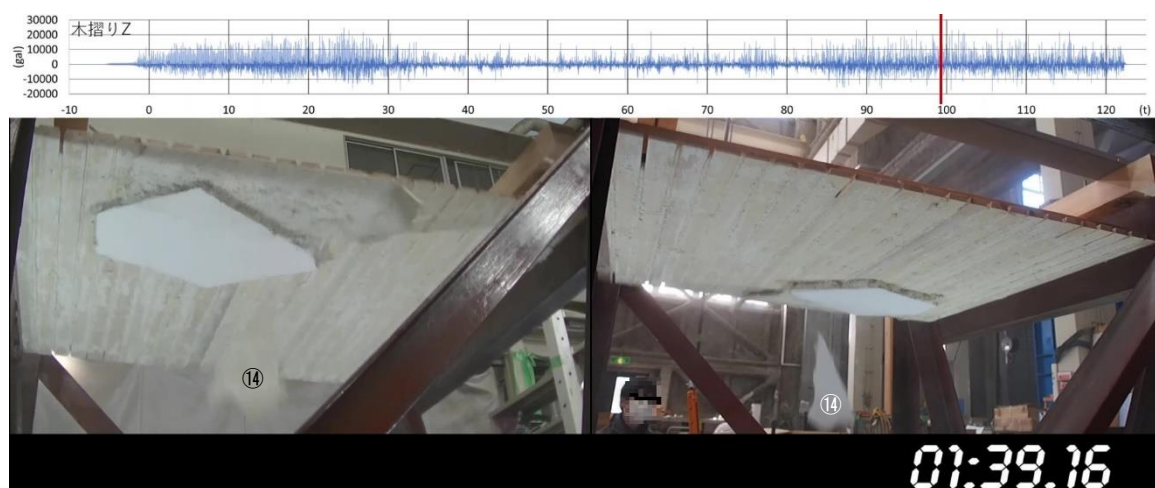




4) ⑫の落下



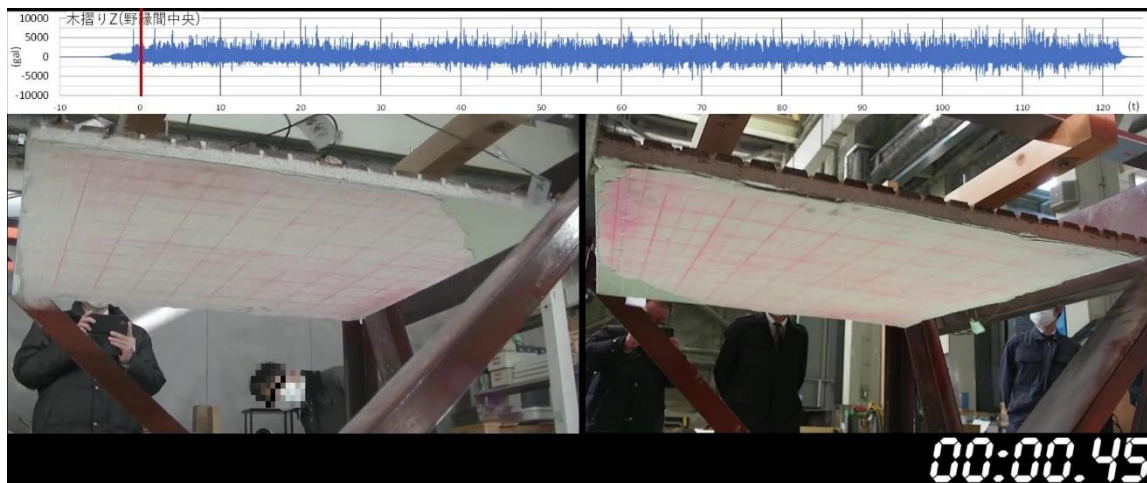
5) ⑬の落下



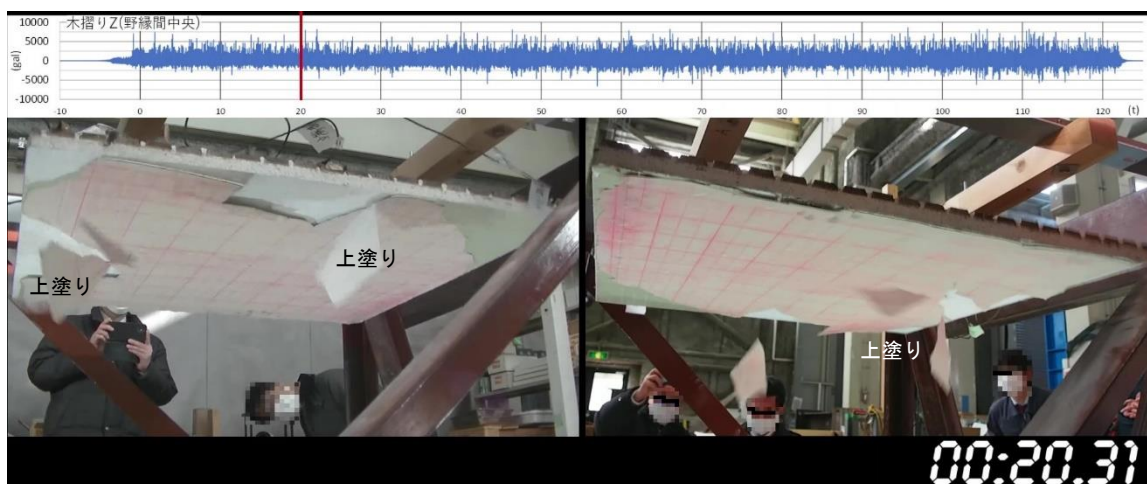
6) ⑭の落下

## 2.6 実試験体 AMS-4

### 2.6.1 加振順序 10 : ナット緩め, 980gal, 9Hz, 1 回目, 上塗り層の剥離



1) 試験前



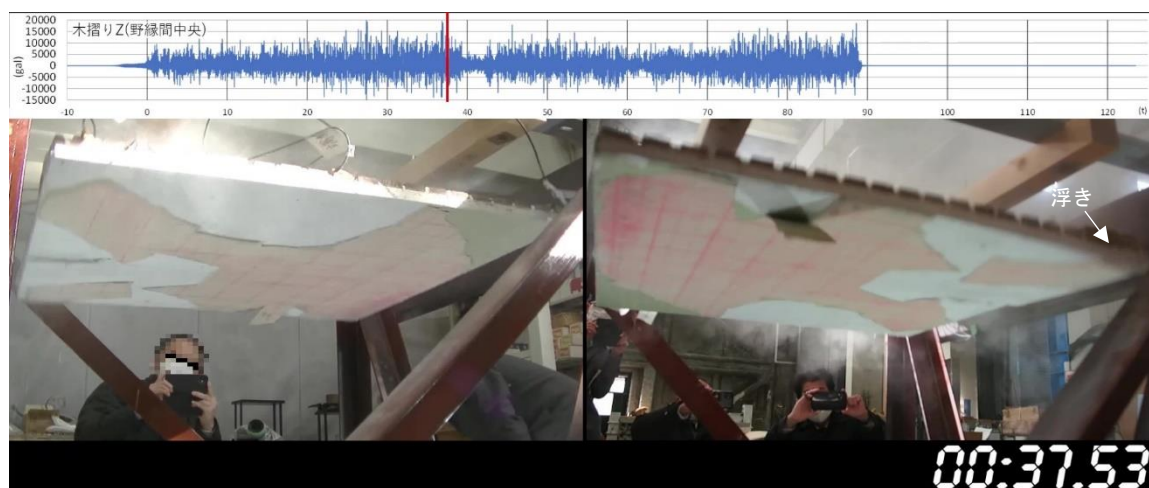
2) 上塗り層の剥離



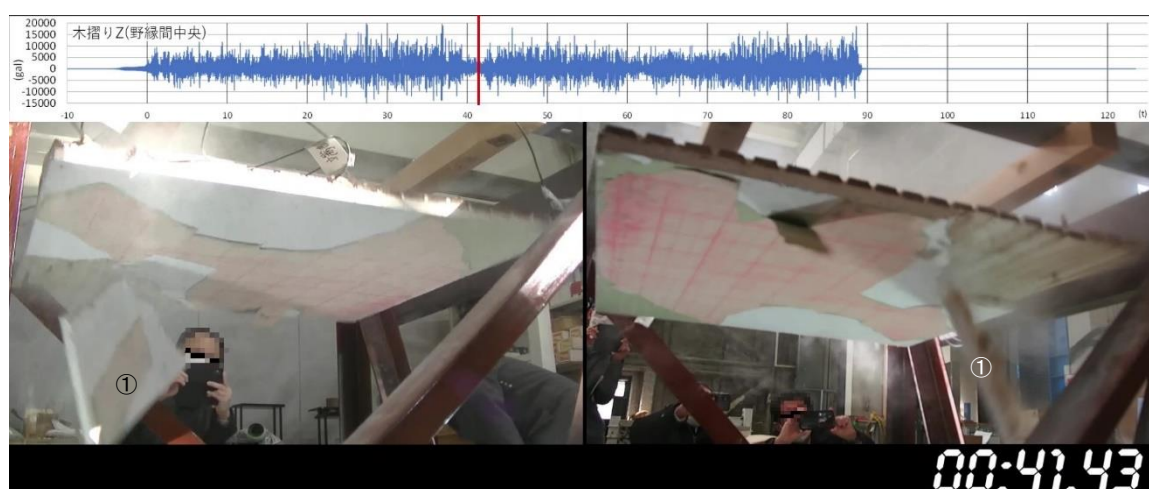
2.6.2 加振順序 12：ナット緩め, 980gal, 9Hz, 3 回目, ①～③



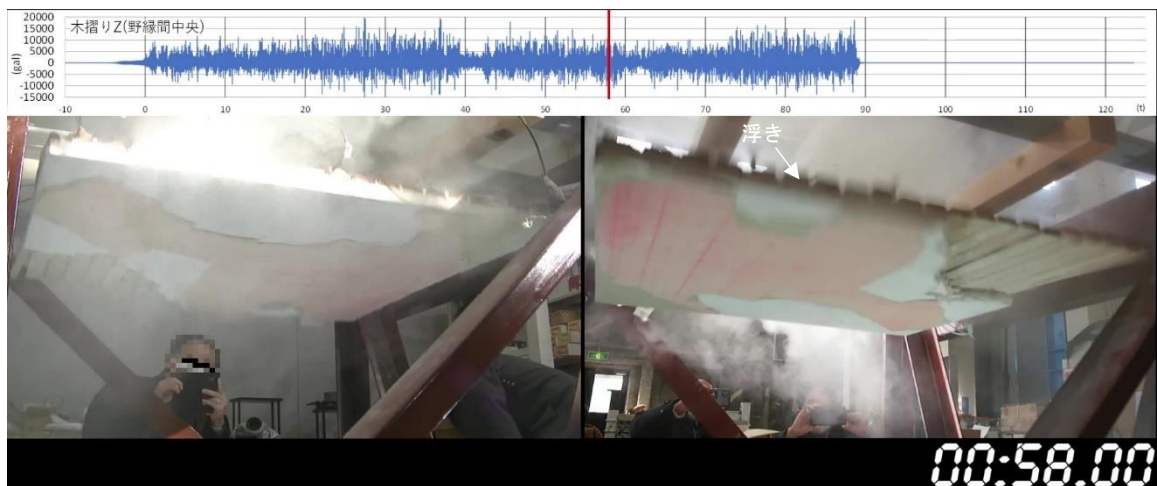
1) 粉塵の発生



2) ①の浮き



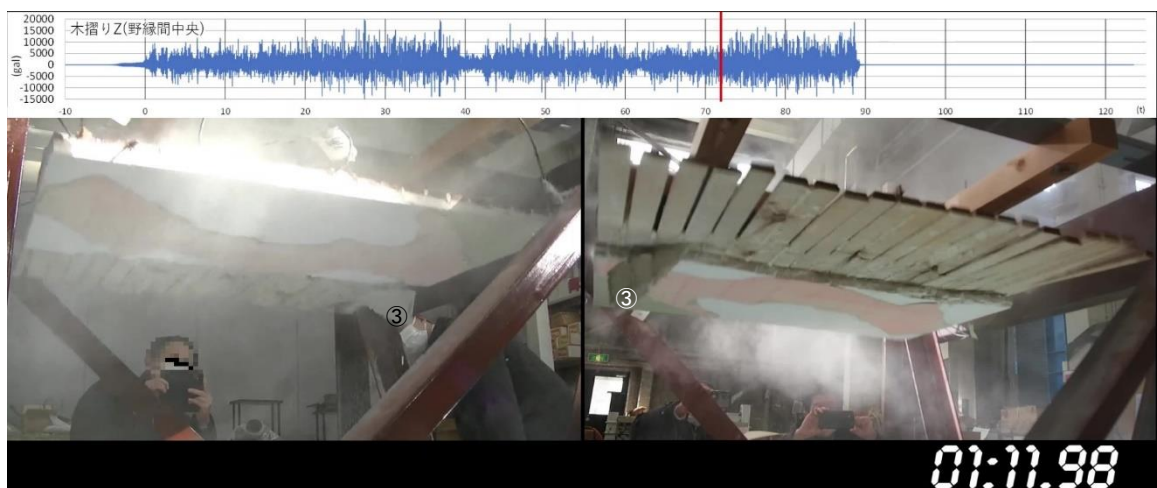
3) ①の落下



4) ②の浮き



5) ②の落下と小幅板継手部分の暴れ



6) ③の落下

### 3. 木摺り漆喰天井のアクリル樹脂による 補修工法の開発とその実証化記録

### 3 木摺り漆喰天井のアクリル樹脂による補修工法の開発とその実証化記録の概要

ここでは、木摺り漆喰天井の維持保全手法の一考察として、特殊アクリル樹脂を用いた部材補修工法の開発的検討、および実際の歴史的建築物（岩手銀行旧本店本館）の木摺り漆喰天井への試験施工を含めた一連の実証化記録を整理するものとする。なお、当補修工法の取り組みは本論で展開した研究以前に実施したもので筆者が既に[本論前掲 2-17, 18]にて報告済みであるが、木摺り漆喰天井の既存部材の外観を維持した状態の補修事例として貴重であると考えられるため、本研究で得られた知見を織り交ぜながら記録を示してゆく。

#### 3.1 補修工法の基本的考え方

木摺り漆喰工法の破損事例は漆喰層の剥落によるものが多く、その要因は経年変化や雨漏り等の外的要因が主に想定されるが、非常に差異が大きいことが推察される。加えて、歴史的建築物の部材保護の観点からいえば、改修工事時の漆喰天井の撤去や塗り替えは必ずしも望ましい事とはいえ、当時の技術・意匠・材料を保存する意味でも、既存部材の存置をなるべく姿を変えぬまま達成することもまた求められる。そのため、天井部材の劣化要因を解明し、それを抑制すると共に、外的要因に対する抵抗性をあらかじめ底上げしておくアプローチも必要であると考ええる。

漆喰の剥落性状について、実建物の剥落事例や振動試験の結果を踏まえると、出隅、すなわち拘束条件が片持ちになっている部位から連鎖的に剥落が進む傾向がみられる。振動試験体は四周が拘束されていないため、実際の天井部材と比較すると特異点が多い条件下での剥落であることは十分に認識しておく必要がある。ただ、通常の天井部材においても貫通ひび割れなどが漆喰層に発生してれば、当該部分は両端支持の範疇から外れた状態と解釈することもできる。すなわち、漆喰層の剥落の起点となりうる箇所の一つをひび割れ部と仮定し、当該部分を何等かの方法で補修して拘束力を向上させることで、剥落が生じる可能性を下げるのが可能であると考えられる。

#### 3.2 本研究における補修工法の方針

既存天井材を活用した保存事例（本論第2章・表 2-1）は、その部材の歴史性を鑑みて一切手を加えず、剥落を前提として設計がなされるか、剥落を防止するために仕上面の表面から面的に被覆して縫い付けるかに二分され、既存部材のオリジナルの外観を維持しつつ、当該天井を有する空間用途の選択性を高くし、かつ剥落を抑制する保存方法は困難なものである。それを可能な限り実現するため、補修工法の方針は以下のとおりとした。

- 1) 既存材料を保存活用した補修・補強であること。
- 2) 竣工当時の仕上面や、現代の技法では再現不可能な部材等、当該建造物の保存価値において、重要なウエイトを占める意匠部分の外観に変更を伴わないこと。
- 3) 天井高による施工の難しさや、居室側の空間用途選択に影響の無きよう、基本的な補修・補強が天井裏側からの作業で完結できること。
- 4) 木摺り漆喰工法の損傷メカニズムを踏まえ、片持ち支持となり剥落の起点となりうる貫通ひび割れ部分や、木摺り下地と漆喰の界面部分を補強することで、天井全体の耐力の底上げを図ること。



### 3.3 木摺り漆喰天井における特殊アクリル樹脂を用いた補修工法案の検討

#### 3.3.1 本補修工法で使用する樹脂

写真 3-1 に本補修工法で使用する浸透性アクリル樹脂「ジャスト I」を示す。この樹脂は、コンクリート構造物の補修材や防錆剤として用いられる低粘度のアクリル樹脂（以下、樹脂）を応用したものであり、粘性をはじめ、浸透性や硬化時間など、施工状況に合わせた補修性能の調整が比較的容易であり、建造物ごとに異なる劣化の程度や、使用材料と施工方法に起因するばらつきが大きい左官部材に対して適用性が高いと判断した。

この樹脂は熱硬化性樹脂を主剤としており、12～16wt%の硬化剤を混合することでアクリルモノマーおよびメタクリルモノマーからなる組成物(83～88wt%)の硬化体が形成される。また、流動調整用添加剤や硬化剤の種類、添加量を変えることで、硬化速度・粘度等の性状を比較的自由度高く制御することができる。なお、JIS A 6024 のエポキシ樹脂注入工法で主に用いられる低粘度形のエポキシ樹脂は100～1000mPa・S の粘度を有するポリマーであるが、本工法で用いるアクリル樹脂は常温における粘度が 80～100mPa・S の低粘度で、多孔質な材料に対して高い浸透性を有しており、硬化時間は 30 分～7 日程度まで制御できる。また、この樹脂は補修部位材料と混和して使用することも可能であり、本工法の一部では既調合漆喰と樹脂を同量混合したものを使用して、左官部材の物性に類似させて用いている。



写真 3-1 本補修工法で使用する浸透性アクリル樹脂「ジャスト I」

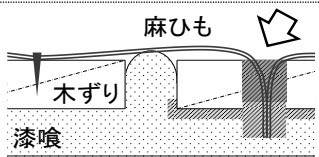
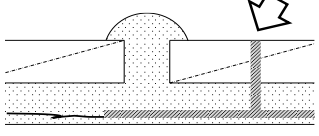
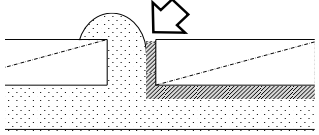
## 3.3.2 補修工法の概要

表 3-1 に木摺り漆喰天井における特殊アクリル樹脂を用いた補修工法の例を示す。基本的な考え方としては、低粘度のアクリル樹脂を木摺り下地側から漆喰へ向けて注入し、下地と漆喰、および漆喰同士を一体化させるもので、浸透性の樹脂を用いることで漆喰を面的に補強することができる。天井材への樹脂注入の方法は表 3-1 の 3 種を検討しており、同一の部材であっても既存部材の健全度や施工状況に応じて混在させて施工することが可能であり、既存部材の保存性を高めたまま補修を行うことが可能である。したがって漆喰を塗り直す更新が回避でき、材料保存への配慮やコスト削減が図られる可能性が高い。また、木摺り漆喰を部分的に施工する高度な技術への要求が軽減され、下地側からの補修によって、漆喰天井の仕上面の外観を損なうような影響を生じさせる可能性が低い。ただし、浸透性樹脂を用いる本補修工法を選択するうえでは以下の注意が必要である。

- 1) 漆喰の劣化や施工レベルによってひび割れや空隙が多く発生していた場合、高浸透故に樹脂が漏れ出す可能性があるため、材料の状態を事前に評価して樹脂の粘度を調整する必要がある。
- 2) 金物による補強と異なり、既存材料に樹脂を浸透・一体化させるため、補強材を撤去できるような可逆性はない。故に対象建物の「守るべき価値」や、修復工事の工程、修復工事後の建物用途、要求される安全性などを総合的に判断してから選択する必要がある。

本工法は実工事における再現性および拡張性の高い補修工法を目指しているが、現段階においては補修工法①が、②および③の要素を含み、適用範囲が広く、補修効果の高い工法と考えられる。したがって、本論文では補修工法①を中心とした実験結果を報告する。

表 3-1 木摺り漆喰天井における特殊アクリル樹脂を用いた補修工法の例

下地	補修断面図	用途
木 摺 り	①穿孔注入 	木摺りに約 $\phi 10\text{mm}$ の穴を開け、樹脂を注入する方法。木摺りと漆喰の界面に大面積で樹脂を注入できる上、充填材によるアンカーの効果が期待できるので、補修効果は最も高いと考えられる。穿孔・注入箇所を漆喰ひび割れや漆喰浮き部分に沿わせるように配置し、脆弱部を縫い付けるように施工する。加えて、下地と支持部材を麻紐で締結することで、冗長性を付加させることが可能。
	②塗り重ね界面注入 	複数の層に塗り重ねて施工する漆喰部材の特性上、塗り重ね界面で剥離する可能性もあるので、その部分へ約 $\phi 5\text{mm}$ で穿孔し、局所的に樹脂を注入して補修を行う方法。木摺りと漆喰の付着が比較的健全であった場合に用いる。
	③目透かし注入 	目透かしに沿って樹脂を流し込む方法。穿孔作業が必要なく、作業者の負担と天井部材への加工度が軽減できる利点がある。一方で、下地や漆喰の空隙、引掛り形状によって樹脂の浸透に差異が生じやすい方法でもと考えられるため、今後も検証が必要である。



### 3.4 本補修工法の実証化試験施工の対象となった歴史的建築物

#### 3.4.1 対象建築物の概要

表 3-2 に本補修工法の実証化試験施工の対象となった歴史的建築物の概要を示す。岩手銀行旧本店本館（以下、岩手銀行）は、辰野金吾・葛西萬司の共同設計で、1911（明治 44）年に竣工した。両氏の代表作である東京駅（旧中央停車場、1914（大正 3）年竣工）と建設時期が同じであり、これら 2 棟は外観の意匠に共通の特徴を有している。1994 年に国の重要文化財に指定された後は、2012 年に営業を終了するまで銀行建築として使用された。岩手銀行の修復工事は、銀行としての営業が終了した 2012 年から、一部の構造補強、外壁のひび割れ補修、内外装の一部復原を中心に 4 ヶ年かけて実施された。

表 3-3 に実試験体の採取箇所の天井跡および建物内部の天井部材の例を示す。建物内部の天井部材は、昭和初期の増床工事の際に施工された一部以外は竣工当時の部材が残存していると考えられるが、水性塗料で何度か上塗りされた跡があり、竣工時の漆喰仕上面が視認できない部分もあった。

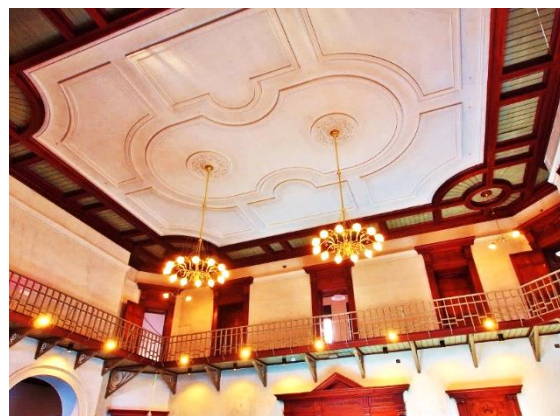
岩手銀行の営業室には天井高 9m の漆喰天井があり、最下部から視認できる程度のひび割れが漆喰表面に走っており、補修が必要な状態となっていた。ただし意匠的に重要な部分であることに加えて、高所作業による補修作業にも課題が多いことから、天井裏からのアプローチによる補修・補強が模索され、本補修工法による実証化・試験施工が計画された。修復工事にあたり撤去された天井部材の一部が補修工法検討用の実試験体として採取されており、その詳細を表 3-4 に示す。

表 3-2 本補修工法の実証化試験施工の対象となった歴史的建築物の概要

所在地	岩手県盛岡市中ノ橋 1-2-20
設計	辰野金吾 葛西萬司
竣工	1911(明治 44)年
名称の変遷	1911-1930 盛岡銀行本店、1936-1960 岩手殖産銀行本店、1960-1983 岩手銀行本店、1983-2012 岩手銀行中ノ橋支店
構造および形式	壁 体:煉瓦造(イギリス積み)、2 階建(塔屋 3 階) 小屋組:木造ブラットラス、銅板葺
重文指定	1994(平成 6)年 12 月 27 日(文部省告示第 151 号)
評価対象箇所	修復工事にあたり、後設されていた居室や内壁の撤去に併せて切断したもの 1)西側客溜まり漆喰天井(岩手銀行の創建時に施工) 2)東側客溜まり漆喰天井(昭和 10 年代の増床工事時に施工)
備考	2012 年に銀行用途廃止後、2016 年まで耐震・修復工事を実施、以降は資料館・イベントスペースとして活用



建物外観

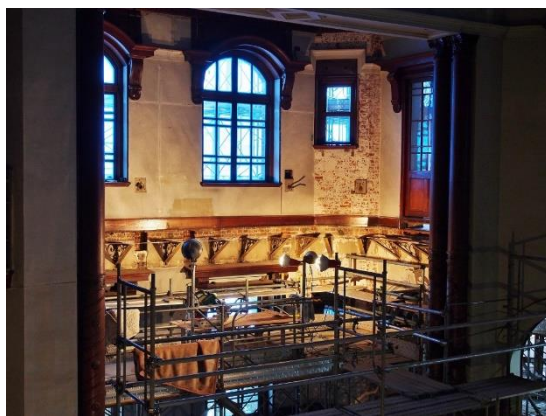


復原後の旧営業室

表 3-3 実試験体の採取箇所の天井跡および建物内部の天井部材の例



旧西側客溜まり（アーチ裏側）：後年に壁が増設されていたため、今回の工事で撤去。その際にやむを得ず撤去した竣工当時の天井の一部を実試験体として採取した。



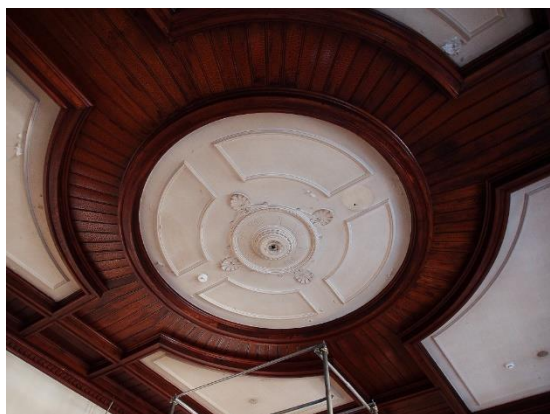
旧東側客溜まり：竣工時吹き抜けの空間であったが、後年の増床と共に天井も施工された。今回の工事で撤去した天井の一部を実試験体として採取した。



旧営業室天井：竣工時はシャンデリアであったが、後年に蛍光灯へ変更されており、羽目板部分にも照明が追加されていた。工事に際して、シャンデリアが復原された。



旧支店長室天井：木部は全体的に創建時の姿を保つものの、漆喰仕上面にはアイボリー系の塗料が塗られており、刷毛の跡が認められるほか、一部は塗装が剥離している。



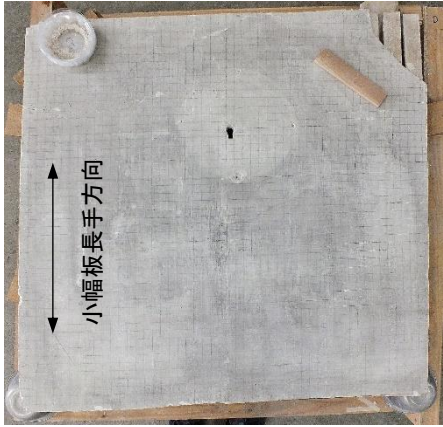
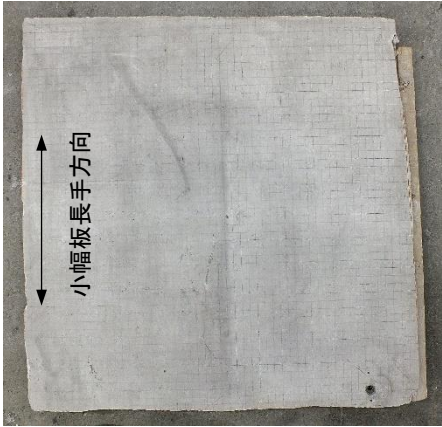




旧総会室天井中心部分：天井中央のシーリングメダリオンにも塗料が上塗りされており、凹凸が曖昧になっている部分がある。



旧事務室天井：ほかの天井と同様に、アイボリー系の塗料が上塗りされており、竣工当時の色合いとは異なると思われる。



表 3-4 岩手銀行現地から採取された補修工法検討用の実試験体

名称	実試験体 1	実試験体 2
記号	M44	S10
施工年代	明治 44 年(竣工時)	昭和 10 年代(増床時)
採取箇所	西側客溜まり	東側客溜まり
天井仕上面		
木摺り下地側		
断面		

### 3.4.2 岩手銀行の復原工事の概要

今回の補修施工は、岩手銀行の耐震・修復工事と同時並行で実施することとなった。建物内部の天井部材は、昭和初期の増床工事の際に施工された一部以外は竣工当時の部材が残存していると考えられるが、水性塗料で何度か上塗りされた跡があり、竣工時の漆喰仕上面が視認できない部分もある。一方で、本研究で施工を実施した旧営業室の漆喰天井は、照明器具の交換や追加が行われた以外は、漆喰の仕上面に補修や改装が実施された記録は無いことから、施工当時の部材が使用・保存されてきたと判断される。

岩手銀行の修復工事は、銀行としての営業が終了した 2012 年から、一部の構造補強、外壁のひび割れ補修、内外装の一部復原を中心に 4 ヶ年かけて実施された。工事終了後の活用計画では、竣工当時の姿に復原した資料館だけでなく、多目的ホールやシアター等の用途で利用するため、その際の居住性、使用性、安全性を特に高めることも必要となった。補修を実施した旧営業室は岩手銀行の中で最も広い空間（面積 180m<sup>2</sup>、天井高 9m）であり、音楽会などが実施され、不特定多数の利用者が集うイベントスペースとして活用される予定であったため、現存する意匠を残すことを前提に、同時に安全性の向上も図るため、当初材料の可逆性が失われることは許容したうえで、竣工当時には用いられていない新規技術を用いた修復方法が検討され、本工法による補修が試行されることとなった。

### 3.4.3 岩手銀行の天井補修に関する事前調査

#### (1) 岩手銀行旧営業室天井裏の状況

図 3-1 に旧営業室天井・小屋裏の見下げ図、表 3-5 に旧営業室小屋裏の状況写真を示す。表 3-5 における写真の撮影位置 A～F は、図 3-1 内に示した。

旧営業室の天井部材は、煉瓦壁体に載せられたスパン 20m の木造プラットトラス下弦材（以下、下弦材）に吊木受け、吊木、野縁を介して吊り下げられている。旧営業室の天井裏（以下、小屋裏）の空間へは幅 1m 程の階段が設けられており、銀行時代は物置として利用されていた。そのため簡易的な床板が小屋裏を全周する形で張られており、小屋裏へのアクセスや内部の行き来に困難な点は無く、天井補修に際しての準備や調査も円滑に行われた。大半の床板は下弦材へ荷重が流れるように施工されていたが、照明器具取付用と思われる一部の床板は吊木受けへ直接載せられているものがあり撓みやすく、下地および漆喰層へ変位を与える懸念があった。

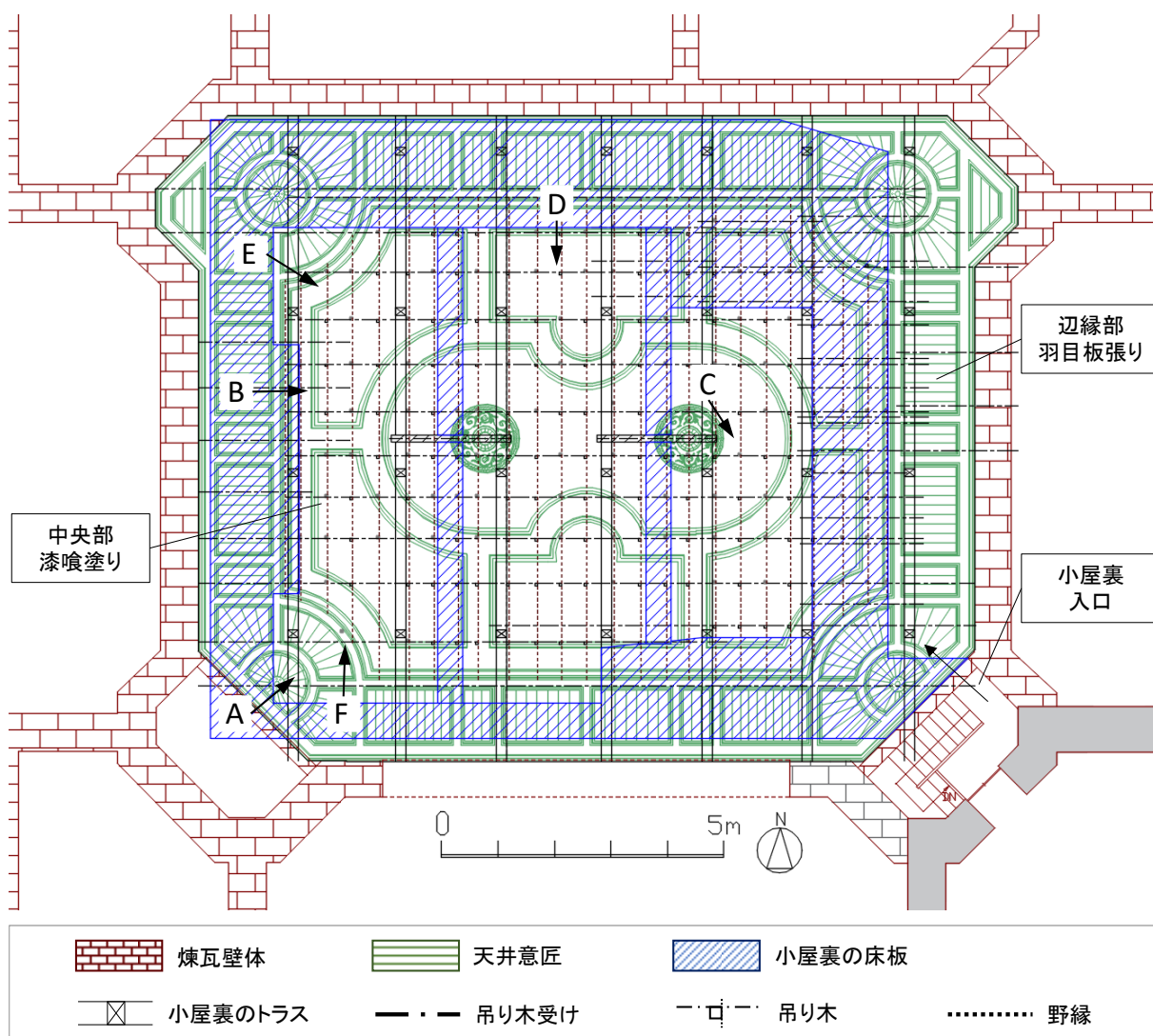
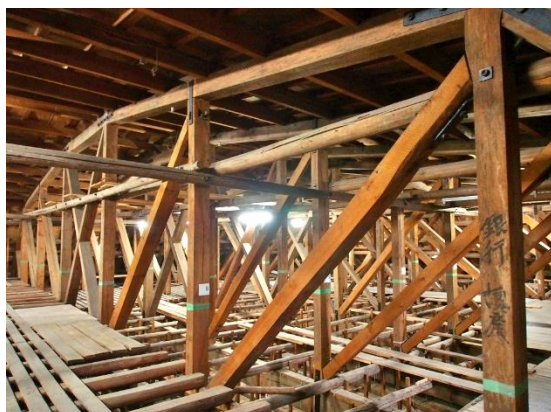


図 3-1 旧営業室天井・小屋裏の見下げ図

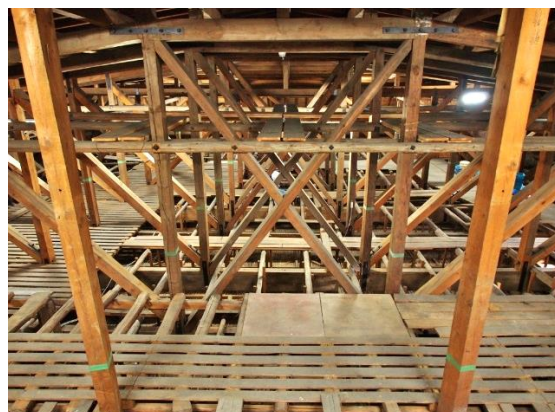


表 3-5 旧営業室小屋裏の状況写真と位置



A: スパン 20m の木造ブラットラス 1

現在まではほとんど改造はされておらず、竣工当時の姿を留めている。右の束材にはかつての行員の落書きのようなものがある。



B: スパン 20m の木造ブラットラス 2

小屋裏全体に木造足場板が敷かれており、楽に立って歩けるほどの空間であるが、床板の荷重が天井部材に直接かかる部分もある。



C: 天井部材の基本的な構造 1

天井部材は、トラス下弦材、吊木受け、吊木、野縁を介して吊られている。この時代の左官天井によくみられる傾向を示す。



D: 天井部材の基本的な構造 2

既存の床板から下地面までの高さ、即ちフトコロは 800mm あるため、下地への接近が必要な本補修工法の支障となる。



E: 天井裏から判断できる意匠部分 1

モールドの下地が木摺りに貼り付けられている部分には漆喰の引掛りが無いため、矢印のように黒い筋が走っているのが確認できる。



F: 天井裏から判断できる意匠部分 2

旧営業室天井の羽目板は、天井裏から直接視認できる。一部では下の空間が見える部分もあるため、落下物等に注意を要する。

注) これらの写真は明るさを補正しており、実際の現場は一部に照明はあるものの、暗い箇所が多い。

(2) ひび割れ箇所の把握（図 3-2・工程①）

図 3-2 に事前調査～補修施工の基本的な流れ、表 3-6 に事前調査の手順、写真 3-2 に事前調査の様子、図 3-3 に旧営業室天井に発生していたひび割れ位置を示す。本補修工法は、樹脂注入箇所の増減によって、天井面全体の平面的な補修から、ひび割れや脆弱な部分に沿った局所的な補修を行うことが可能である。いずれの場合も、下地側から鉛直下向き方向に樹脂を注入するため、ひび割れの直上に樹脂が達すると、幅の広いひび割れの場合はそこから浸出を起こす可能性がある。それを抑制するために、樹脂注入箇所の正確な位置決めを行うため、仕上面からひび割れの位置を確認し、下地側にマーキングする必要がある。

下地側でのひび割れ位置の確認に際しては、表 3-5 の E および F のような、仕上側および下地側で視認可能で、かつ、仕上側から見たひび割れ位置との位置関係が互いに同じものを基準点とし、そこからの相対位置でひび割れを座標化して記録した。基準点はひび割れの発生個所に応じて適宜設け、床面から天井面に向けてレーザー墨出し器を照射し、それを基に高所作業員がひび割れの相対位置を実測して読み上げ、床面にいる記録員が天井の見下げ図に転記した。ひび割れは主にモールドの入隅に沿って発生していたが、吊木受けに直接載せられた床板に沿うようなひび割れもあったため、補修施工の際には当該部分に不必要な荷重を与えぬように留意することとなった。

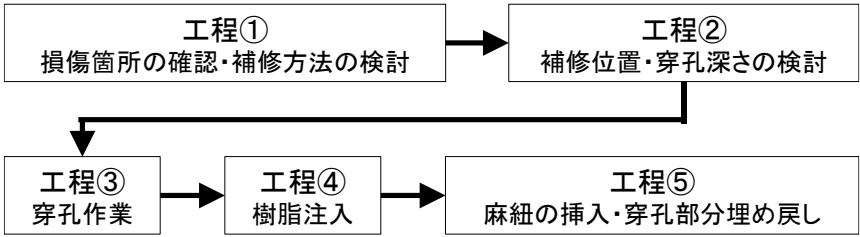
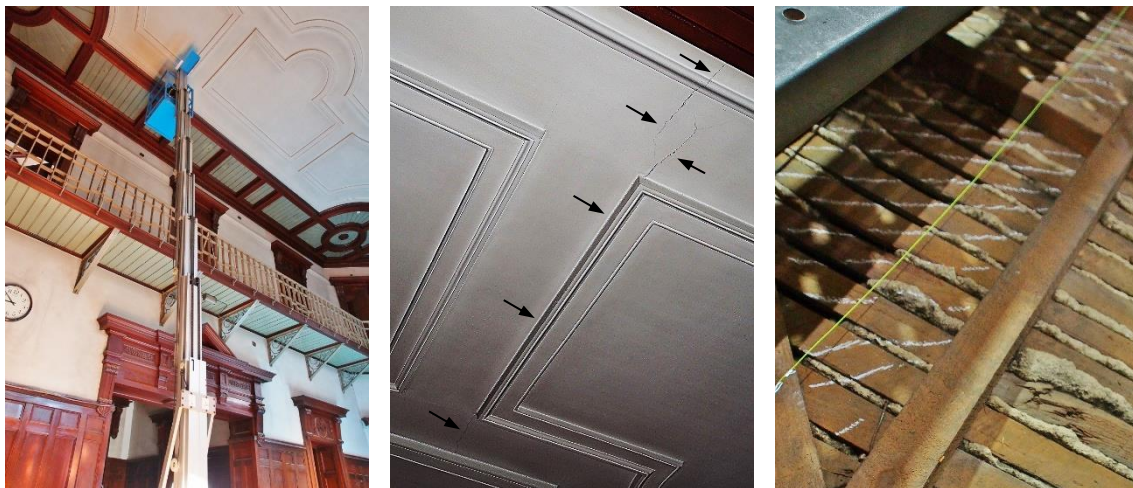


図 3-2 事前調査～補修施工の基本的な流れ

表 3-6 事前調査の手順

内容	仕上面側	天井裏側
健全度評価	漆喰仕上面のひび割れ、中塗り・上塗り界面の剥離、漆喰の浮きなどを評価する。目視、非破壊試験、貫入試験など。	目視、触診、打撃試験によって、小幅板の浮きや痩せ、漆喰の劣化度、引掛り部分の状態、雨漏り部分の腐朽等の健全度を評価する。加えて、小幅板の幅や厚さなど、対象部材の仕様を可能な限り把握する。
補修方法の検討	劣化の程度によって、補修方法と範囲を検討する。損傷箇所が明確であれば、局所的な補修も考慮する。	
損傷箇所のマーキング	壁やモールド、照明取付穴等（天井裏から位置が推測できるもの）の位置を基準に、視認できる損傷箇所の座標を把握する。	把握した損傷箇所を天井裏からわかるようにマーキングする。 （ひび割れに沿って水系を張る、下地にマーク(除去可能なものを用いる)を付ける等）





a) ひび割れ位置の実測

b) モールド入隅のひび割れ  
写真 3-2 事前調査の様子

c) 下地へのマーキング

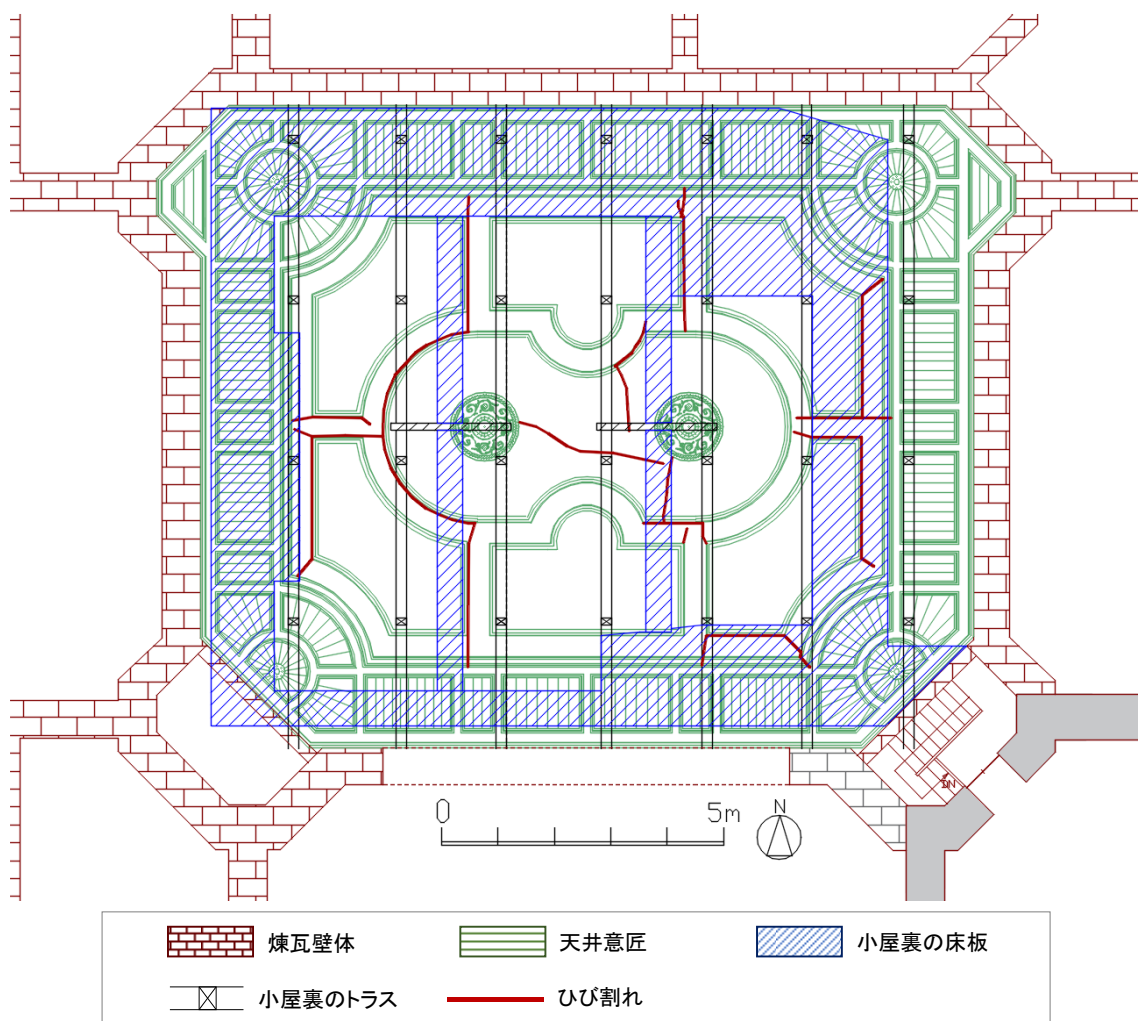


図 3-3 旧営業室天井に発生していたひび割れ位置



### (3) 施工環境の確認

本補修工法は穿孔作業や樹脂注入が主となるため、作業は下地面に近い位置で実施することが望ましい。一方で、今回施工した岩手銀行は、表 3-5 の D に示すように、旧営業室天井裏のフトコロが 800mm あり、現状の床板からは作業の難しい部分があったため、簡易的な吊り足場を設けて作業性を向上させることとなった。また、吊り足場の安定性や施工性を確認するため、現地天井裏を再現した実大試験体を事前に作製して検証することとなった。

### 3.5 木摺り漆喰天井部材における補修工法の開発

表 3-7 に補修工法に関する実験の項目と内容を示す。岩手銀行での補修実証化に向けて、小型の試験体を用いた静的な強度試験、実試験体を用いた補修効果を振動実験で基礎的な検討を実施した後、現地での施工に向けた準備に入った。各実験に関する詳細を以降に示してゆく。

表 3-7 補修工法に関する実験の項目と内容

実験	試験体	要因	試験内容
1	小型模擬試験体	漆喰の調合 補修の有無、 漆喰層の塗り厚	小幅板と漆喰の接触面の基礎的な補修効果を静的に検証
2	M44 S10	補修の有無、 加振方向、加速度	実試験体を用いて、補修施工の工程確認や作業性に関する検証を行った後、3次元振動台を用いて、加速度・加振方向ごとに既存部材への影響を補修・無補修で比較
3	実大試験体	-	岩手銀行現地での施工を見据えて、現地施工環境を再現した実大試験体にて施工デモンストレーションを実施し、深いフトコロ環境下における施工性を確認
4		補修の有無、 加振方向、加速度	施工デモンストレーションを実施した実大試験体に対して振動実験を実施、補修効果を確認する

## 3.5.1 本補修工法における静的付着強さ試験（実験1）

## (1) 木摺り漆喰部材の小型模擬試験体の概要

表 3-8 に実験 1 の使用材料、部材、機材、表 3-9 に小型試験体の概要を示す。補修工法の基礎的検討に際し、木摺り漆喰天井部材を模した小型の試験体（以下、小型試験体）を実験室環境で作製した。本補修工法の基本的考え方は、小幅板と漆喰界面の付着力向上を主眼に置いているため、小型試験体の目透かしは省略した状態で付着強さを評価する。また同様の小型試験体に対して表 3-1 の補修工法①の方法によっても補修効果を確認する。

小型試験体の作製および保管は気温 20℃・湿度 60%を目指した試験室にて行う。今回は漆喰のスサ含有率、砂含有率、水消石灰比を実験要因として、養生期間 24 日の若材齢にて強度試験を実施し、安全側に立脚した相対的な比較を行う。小幅板は小型試験体 1 基あたり 4 枚（幅 40×高さ 12×長さ 200mm）使用し、受け材（天井材の野縁に相当）2 本（幅 30×高さ 40×長さ約 200mm）へ隙間なく並べ、小幅板の幅方向に釘を 1 ヶ所あたり 2 本ずつ用いて留め付けた。最後に、漆喰の塗り厚に合わせて、下地の外周へ側板を取り付ける。施工向きは上向き施工として実際の天井の施工環境を模擬した。また、左官部材特有のコテ圧等の人為的な影響を生じにくくするため、小型試験体の作製は同一の作業者が実施し、塗り施工時と同様の向きのまま養生を行う。

表 3-8 実験 1 の使用材料、部材、機材

実験	材料	記号	内容
1	水	W	上水道水
	消石灰	C	JIS A 6902 左官用消石灰
	細骨材	S	大井川産陸砂（粒度 2.0mm 以下 絶乾密度=2.68g/cm <sup>3</sup> 、吸水率=1.32%、F.M.=2.83）
	スサ	F	アクリル抜きスサ（15mm 切） 密度=0.5g/cm <sup>3</sup>
	つものまた糊	-	本実験では使用せず
	アクリル樹脂	-	主剤：硬化剤=100：4（質量比）で混合
	充填材	-	アクリル樹脂に同質量の既調合漆喰を混合

表 3-9 小型試験体の概要（実験 1）

項目	内容
形状・寸法	木摺り下地を模擬 仕上面寸法：約 200×200mm
小幅板	杉荒材（厚さ 12×幅 40×長さ 200mm） 4 枚/1 基
受け材（野縁）	杉角材（幅 30×高さ 40×長さ 200mm） 2 本/1 基
釘	鉄釘（20mm） 小幅板の幅方向に 2 本ずつ 16 本/1 基
目透かし	なし（小幅板と漆喰界面の付着強さを評価）
せき板	漆喰塗り厚に合わせて下地の側面に取り付け
漆喰の調合	水消石灰比 W/C（質量比）：75%、85%、90% スサ含有率 F/V（体積比）：2、4% 砂含有率 S/V（体積比）：0、20、40%
漆喰塗り厚	約 10、20、30mm
作業方向	上向き（天井施工時の環境を模擬するため、漆喰仕上面が下向きになるように型枠を吊り下げる）
養生環境	気温 20℃、湿度 60%、養生期間 24 日 （実建物の天井施工時と同様、仕上面は下向き）

## (2) 無補修の小型試験体における調合要因の比較

写真 3-3 にフィラーアタッチメントの取付状況、写真 3-4 に付着強さ試験に用いた試験機を示す。小型試験体の養生終了後、架台から取り外して仕上面を上に向けて置き、JIS A 6909 を参考に  $40 \times 40 \text{mm}$  のフィラーアタッチメントの中央が、それぞれの小幅板の長手方向の軸に位置するように漆喰の仕上面へ装着する。つまり、1 枚の小幅板の上部にアタッチメント 1 つを配置する。次に、アタッチメントの外周に沿って漆喰層に切欠きを入れた後、試験機を取り付けて上向きの荷重を加える。漆喰層が下地から剥離したところで除荷し、最大荷重を記録する。なお、養生中に漆喰が剥落する試験体が一部確認され、付着強さが極めて小さいことも予想されたため、切欠きの際には漆喰層が揺れ動かないように木材で下方向に押さえつけて行い、付着強さ試験の試験機は測定範囲が  $0.01 \text{N} \sim 50 \text{N}$  のデジタルフォースゲージ（写真 3-4 参照）を用いる。

## (3) 補修を実施した小型試験体の付着強さ

写真 3-5 に補修した試験体の下地側の状態、写真 3-6 に補修試験体の強さ試験に用いた試験機を示す。今回の補修効果の確認は、左官天井における剥離・剥落抵抗性への安全側に立脚した補修効果の検証を行うため、表 3-1 の補修工法①に準じた方法を採用する。養生終了後、架台から小型試験体を取り外して仕上面を下に向け、小幅板の中心部分へ 1 枚あたり 1 箇所の樹脂注入穴（ $\phi 10 \text{mm}$ ）を穿孔する。穿孔深さは、小幅板の厚み+漆喰塗り厚 $\times 0.5$  とする。注入後の養生期間は、JIS A 1612 を踏まえ、かつ今回使用する樹脂で制御できる最長硬化時間の 2 倍の 14 日とする。養生終了後、無補修試験体と同様の方法で試験を行うが、補修試験体では最大荷重  $10 \text{kN}$  の試験機を用いて、下地と漆喰の付着強さを測定する。



写真 3-3 フィラーアタッチメントの取付状況



写真 3-4 付着強さ試験に用いた試験機



写真 3-5 補修した試験体の下地側の状態



写真 3-6 補修試験体の強さ試験に用いた試験機

#### (4) 木摺り漆喰天井部材における補修工法の性能評価結果

##### (4.1) 無補修の小型試験体における調合ごとの比較

図 3-4 に実験要因ごとの無補修試験体の付着強さ試験結果を示す。実験の結果、各試験体の最大荷重の全平均は 3.83N であり、単位面積あたりの抵抗力 ( $0.0024\text{N/mm}^2$ ) で評価すると、外壁タイルの付着強さ基準  $0.4\text{N/mm}^2$  と比較して約 0.6% の値となっていた。本論第 4, 5 章において改めて確認できているとおり、漆喰調合による強度と木摺り下地の仕様とに関する結果では、スサ含有率が増加すると漆喰の曲げ、せん断強度共に増加し、目透かし幅と付着強さに相関関係が認められたが、目透かしを省略した下地においては、小幅板と漆喰の接触面における付着強さに、調合との相関関係は確認されなかった。加えて、養生中に漆喰が剥落する試験体もあったため、安全側に立脚した場合、小幅板と漆喰の接触面における付着強さは剥落の抵抗要素として期待できないことが改めて確認できた。以上のことから、目透かし部分の引掛りを考慮しない場合、小幅板と漆喰の接触面における付着強さは調合による影響は小さく、脆弱的な破壊を示す部分であるといえる。

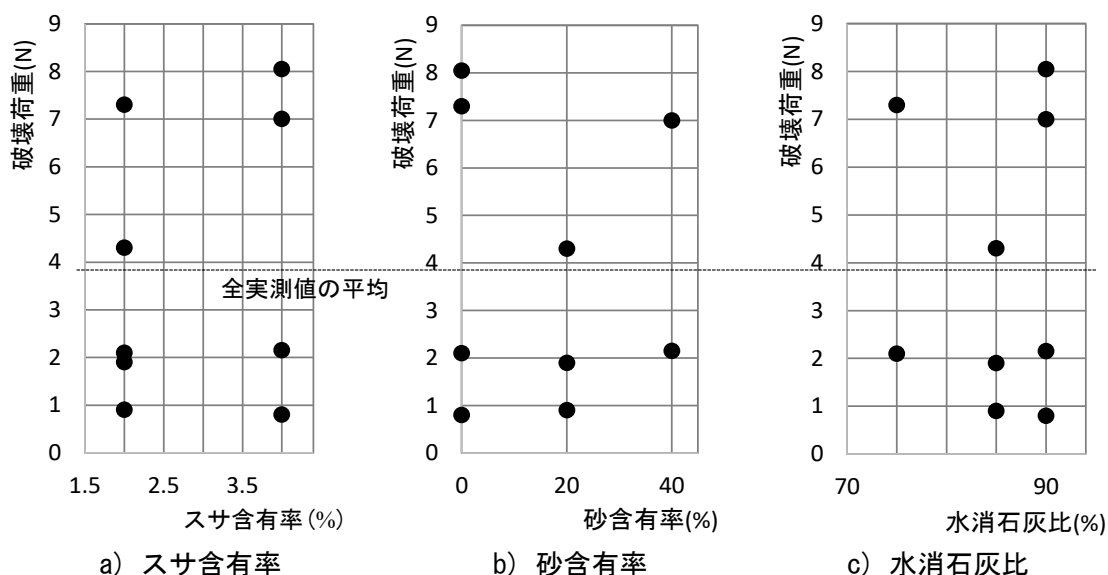


図 3-4 実験要因ごとの無補修の小型試験体の付着強さ試験結果

#### (4.2) 補修を実施した小型試験体の付着強さ

図 3-5 に補修を実施した試験体の付着強さを示す。前述の実験における木摺りと漆喰の界面において、付着強さと調合との因果関係が認められなかったため、ここでは前節における最大荷重の平均値 (3.83N) を用いて比較を行った。実験の結果、最大荷重は無補修の試験体と比較すると少なくとも 66.5 倍の付着強さの向上が認められた。漆喰と木摺りの界面で剥離することはなく、漆喰層における破断モードは図 3-5 c) に示す 3 つに分類できた。各破断モードで最大荷重にばらつきはあるものの、無補修の試験体と相対的に比較した場合、漆喰の荷重を負担する箇所として期待ができなかった木摺りと漆喰の界面に、剥落への抵抗性を付与できることがわかった。

また、施工前の部材評価によって、樹脂の仕上面への浸出の懸念が低いと判断された場合は、漆喰層塗り厚の半分程度まで穿孔し、内部に樹脂の硬化体 (充填材が十分に硬化したもの) を形成させることで、木摺りと漆喰を固着させるだけでなく、漆喰層の塗り重ね界面における剥離抵抗性も付加できると考えられる。図 3-5 b) に示すように、充填材破断を起こした漆喰塗り厚 20mm の試験体の付着強さは  $0.44\text{N/mm}^2$  であり、外壁タイルの付着強さ基準 ( $0.4\text{N/mm}^2$ ) を概ね満足する性能を付加できた。

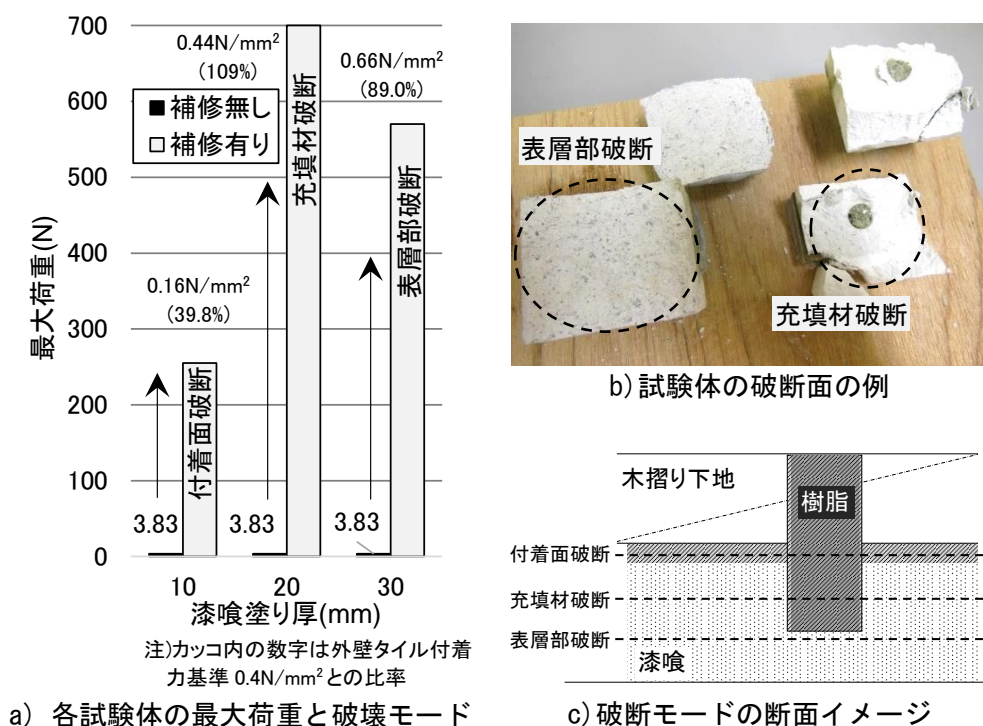


図 3-5 補修を実施した小型試験体の付着強さ

## 3.5.2 実試験体に対する補修の試験施工について（実験 2）

## (1) 施工性の検証

表 3-10 に補修工法に関する実験の使用材料および部材、図 3-6 に実試験体の下地側平面図と試験補修の位置、表 3-11 に実試験体における試験補修の流れ、写真 3-7 に試験補修における各工程の様子を示す。

補修対象の部材は建造物ごとに仕様の差異が大きい傾向のある左官部材であるため、施工前の健全度評価や仕様の調査が必要である。今回の実試験体に対する試験施工でも、最初に仕上面の劣化状態の確認を行ってから、試験体の仕上面を下に向け、試験体の大きさに切断した 20mm 厚のスタイロフォームの上に置いて補修施工を行った。補修工法①の場合、図 3-6 のように、樹脂は小幅板に沿って広がり、小幅板と漆喰の接触面が平面的に接着されると考えられるが、床に置いて作業を行う場合、木摺り下地の自重が樹脂の浸透に影響を及ぼす可能性があるため、樹脂の注入時には注入部分直下のスタイロフォームを抜去し、小幅板と漆喰の界面が圧着されないようにした。また、下地側からの補修作業は仕上面の意匠が変更されないという利点があるものの、作業中における仕上面の状況把握が難しいという側面があるので、実際の建物で施工を行う場合は、仕上面の状況把握を行う手段を策定しておくことが必要となる。今回の実験でも施工後に仕上面を確認したが、施工の影響によるひび割れの増加や樹脂の浸出は認められなかった。

表 3-10 補修工法に関する実験の使用材料、部材、機材

実験	材料	記号	内容
2	実試験体 1	M44	西側客溜まりから採取(明治 44 年施工)
	実試験体 2	S10	東側客溜まりから採取(昭和 10 年代施工)
	アクリル樹脂	-	主剤:硬化剤=100:4(質量比)で混合
	充填材	-	アクリル樹脂に同質量の既調合漆喰を混合
	麻紐	-	6 本撚り 引張強度:240N 以上
	3 次元振動台	-	実試験体を振動させ、剥落性状や補修効果を確認
	加振治具	-	実試験体を吊り下げ、振動台からの揺れを伝達
	3 次元振動台	-	実試験体を振動させ、剥落性状や補修効果を確認
	加振治具	-	実試験体を吊り下げ、振動台からの揺れを伝達



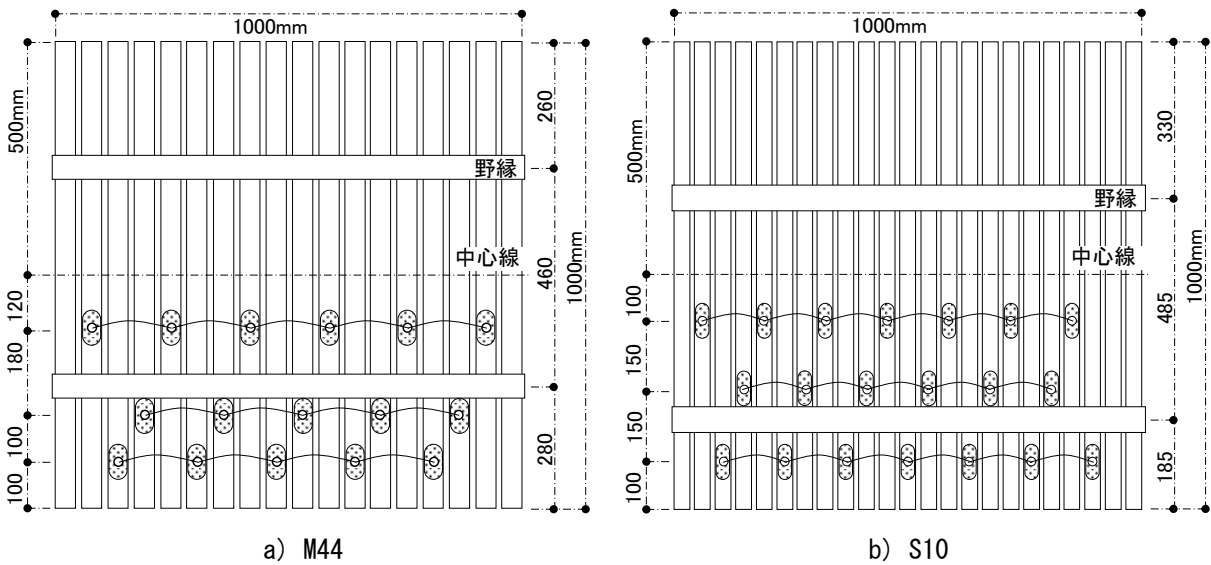


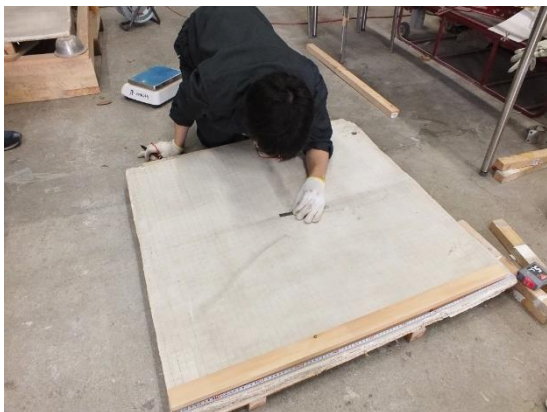
図 3-6 実試験体の下地側平面図と試験補修の位置<sup>注)</sup>

注) 図中の表記の意味

○	穿孔位置 (拡大して図示)
—	麻縄の配置位置
●	樹脂の浸透イメージ

表 3-11 実試験体における試験補修の流れ

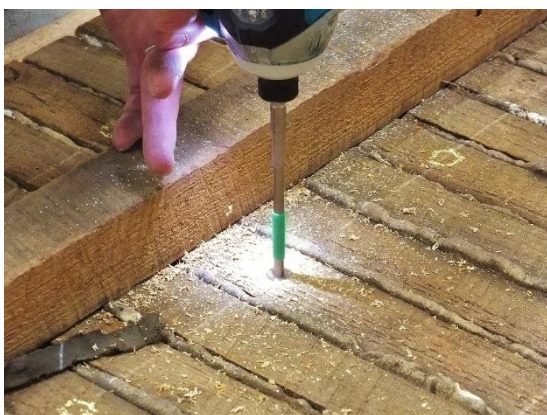
工事仕様		試験施工の流れ
Ⅰ 施工前 の確認	劣化状態 の評価	試験体の仕上面を上に向けて床に置き、小幅板の痩せ、浮き等の健全度を 確認する。目視、非破壊試験、貫入試験など。加えて、小幅板や漆喰の厚さ 等、対象部材の仕様を可能な限り把握する。今回の試験施工では、既存天井 を切断した実試験体を用いたので、切断面の観察による小幅板の厚さや、漆喰 の塗り厚も確認する。
	寸法等の 仕様の 確認	参考値として、実試験体 2 体のそれぞれの質量と小幅板 1 枚ごとの幅、目 透かし幅も測定した。 各試験体の全体質量は、複数の電子秤の上に試験体を載せ、各はかりが表 示した質量を合計して算出する。木摺り下地部分の質量は、測定した寸法情報 を基に体積を求め、下地に使用されている杉材の密度 ( $0.38\text{g/cm}^3$ ) を乗じて算 出し、その値を全体質量から差し引いた結果を漆喰部分の質量とした。 木摺り下地や漆喰層の寸法などはノギスを用いて小数第 2 位まで測定する。 小幅板の幅、厚さ、目透かし幅は測定部分が試験体ごとに 20 か所程度あるた め、1 箇所につき 2 回ずつ測り、平均値を採用する。また、試験体ごとに各条件 の部材寸法の平均値と変動係数を求める。
Ⅱ 穿孔 の 検討	位置	下地側を上に向けて床に置き、樹脂の注入に必要な穴の位置をあらかじめ 木摺り下地にチョーク等でマーキングする。今回は、補修の有無を実験要因に しているため、各実試験体の半分を補修領域とする。また、2 つの試験体で野 縁の位置が異なるため、小幅板方向の間隔は試験体ごとに決定することとし、1 枚の小幅板に 2 つ以上の穴を設けないような配置とする。(右図参照)
	深さ	確認した部材の厚さを基に、穿孔深さの目標を検討する。今回は、木摺り+ 漆喰塗り厚 $\times 0.5$ とする。
Ⅲ 穿孔 作業	穿孔	小幅板のめくり上がりや漆喰層の貫通に注意しながら、所定の深さまで穿孔 を行う。今回は穴の底部を平坦にするため、フォスナービットを用いる。ドリルは 漆喰層に達すると、穿孔速度が急激に早くなるため、ドリルビットに部材厚さの 目安をマークしておき、こまめに穴内部の状況を確認する。また、樹脂の浸透に 影響が出るため、穴内外に残存する削りカスをブロワーや掃除機で除去する。
Ⅳ 補修 処理	1 次注入	1 回目の樹脂を注入する。注入量は、穿孔した穴の体積と同量とする。
	2 次注入 以降	浸透状態は穴内部の樹脂の光沢を目視で確認し、底部の露出をもって浸 透終了とする。終了次第 2 次注入を行うが、1 次注入から 60 分経過後まで には浸透状態に関わらず全ての穴へ 2 次注入を行う。その際も穴体積と同量の 樹脂を準備するが、穴から溢れ出る場合はその時点で注入を中断する。樹脂 の浸透が早い場合や、小幅板が揺れ動くような空隙がある部分は、樹脂の浸 出に留意しながら 3 次注入も同様に行う。
	麻紐の 挿入	樹脂注入後、速やかに麻紐を差し込む。麻紐は長さ約 10cm にあらかじめ 切断した物を用意し、野縁と平行方向の隣接する穴へ縄の両端を挿入する。 縄は、穴の埋戻しまで揺れ動くことの無いように、粘着テープ等で仮留めす る。
	充填材の 注入	対象部位の樹脂注入終了から 60 分以上経過した後、樹脂と既調合漆喰を 同質量ずつ混合した充填材を用いて、麻紐を固定しつつ穴を埋戻す。再度 60 分以上置き、充填剤の硬化を触診により確認してから、仮留めを除去する。



a) I :劣化状態の評価



b) II : 穿孔位置・深さの検討



c) III : 穿孔作業



d) IV : 樹脂注入、麻紐差込



e) IV : 充填材による穴埋め



f) IV : 麻紐の仮止め、固定

写真 3-7 試験補修における各工程の様子<sup>注)</sup>

注) 各写真のローマ数字は、表 3-11「工事仕様」の附番を示している。

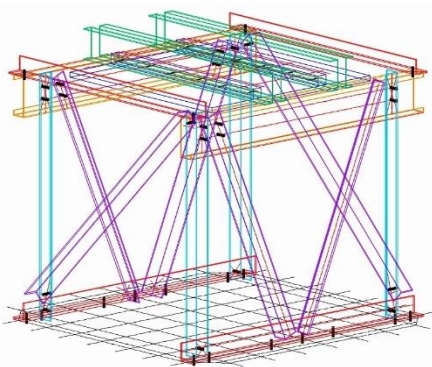


## (2) 実試験体に対する振動実験（実験 2）

### (2.1) 振動台の準備

動的な外力による補修効果を確認するため、3次元振動台による振動実験を実施した。

写真 3-8 a)～d)に加振治具の準備の様子を示す。写真 3-8 a)に示すように、加振治具の内部に実試験体が収まることを基本条件に加振フレームを設計した。また写真 3-8 b)に示すように、天井を吊り下げる治具を含めて全て鋼材で作製し、試験対象の部材以外が十分に剛体であると仮定したうえで、入力波が部材に対して直接作用するようにした。写真 3-8 c)d)に示すように、加振時および天井材剥落時には破片および粉塵が相当に発生することが予想されたため、振動台設備および剥落破片の保護を目的とした緩衝材を振動台ステージに敷き、その上から養生シートでステージ辺縁部のクリアランス全面を覆った。



a) 加振治具の 3D 設計図面注)共通部材毎に色分け



b) 設計図を基に鋼材で作製した加振治具



c) 振動台ステージ上の緩衝材



d) 設備保護のための養生シート

写真 3-8 加振治具の準備の様子

## (2.2) 実試験体の加振治具への装着

写真 3-9 に実試験体の取り付け準備の状況を示す。実験を行うにあたり、写真 3-9 a)に示すように、実試験体の野縁へ、小幅板の軸方向と平行にφ8mm のボルト穴を設け、それを挟み込むように溝形鋼材を背中合わせに圧接した。ボルト穴は、小幅板と野縁を締結している既存の釘を可能な限り避けて設け、溝形鋼材は漆喰の引掛り部分に干渉せぬように、小幅板上面より約 10mm 浮かせて装着した。溝形鋼材は工学院大学の材料実験室で取付を行い、ハンドリフトを用いて構造実験室に搬入した。

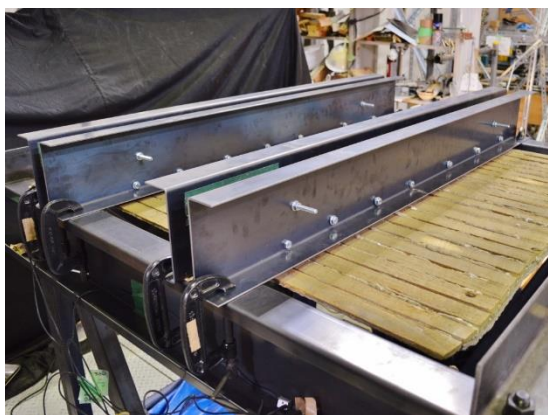
写真 3-9 b)c)に示すように、実試験体の装着位置は加振治具の上面の高さ 1200mm の部分であるので、溝形鋼材に 2×4 材を咬み合わせて仮設の持ち手を作り、試験体の質量と劣化状況に応じて 4～6 人で神輿の如く持ち上げる。溝形鋼材は実試験体の野縁および加振治具の横幅よりも長いものであり、両端に突出させた鋼材の部分を加振治具に垂下せしめた。写真 3-9 d)に示すように、実試験体は部材ごとに野縁の間隔、向きが異なるので、溝形鋼材と加振治具の締結は C 型クランプを用いて圧着し、フレキシブルに固定できるように図った。



a) 溝形鋼材の圧着による野縁の固定



b) 加振治具上面への運搬の様子



c) 加振治具への垂下の様子



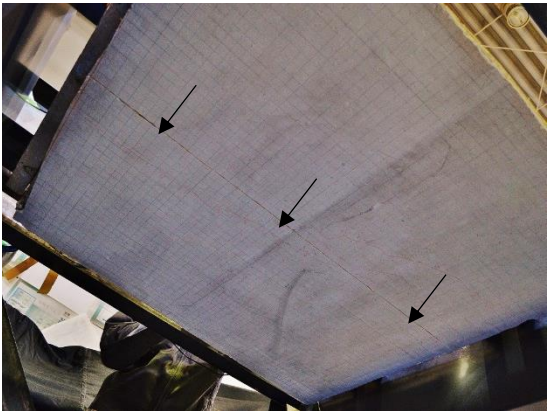
d) C型クランプでの固定

写真 3-9 実試験体の取り付け準備の状況



(2.3) 実試験体に対する加振前の準備

写真 3-10 に実試験体への切欠き作業の様子、図 3-7 に各試験体の加振機材を含めた平面図を示す。  
実試験体の垂下後、図 3-7 に示す中心線に沿って漆喰層のみに切り欠きをいれ、補修の有無による影響を確認するための縁切りを行った。また、垂下した試験体に作用する正確な加速度を測定するため、実試験体および加振治具に加速度計を合計 8 基設置した。試験体に 6 基、加振治具に 1 基、ステージに 1 基設置し、データロガーに接続して記録する。なお、漆喰層剥落時の加速度計の損傷を考慮し、仕上面側には装着していない。



a) 切欠き作業  
b) 試験体に入れられた切欠き（矢印部分）  
写真 3-10 実試験体への切欠き作業の様子

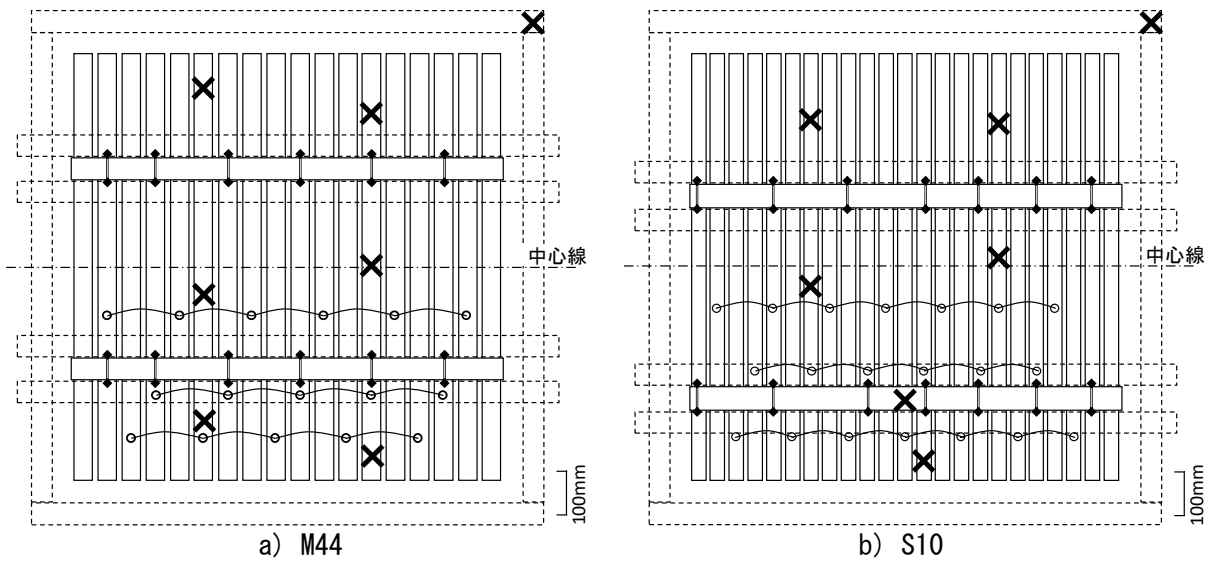


図 3-7 各試験体の加振機材を含めた平面図<sup>注)</sup>

注) 図中の表記の意味	
○	穿孔位置(拡大して図示)
—	麻縄の配置位置
×	加速度計の設置箇所
□□□□	加振治具
◆◆	溝形鋼材と野縁の締結ボルト

#### (2.4) 実試験体の加振・評価

表 3-12 に実試験体への振動実験の入力波の種類と順番を示す。入力波、加振方向、周期、時間は天井板の損傷状況や加振目的によってその都度決定したが、一度振動させるごとに仕上面の状態確認や写真撮影を行い、顕著な損傷が認められない場合は、直前よりも入力加速度が大きくなるように設定した。なお、最後に加振した M44 は全て 900gal 以上の加速度を入力したが、これは先に試験した S10 が 900gal 以上でも顕著な損傷が認められなかったことを踏まえ、1 回目から大加速度を与えても大きな影響は与えないと判断したためである。

表 3-12 実試験体への振動実験の入力波の種類と順番

部材	順番	入力波 (gal)	周期 (Hz)	時間 (s)	加振方向	
S10	1-1	300	2.5	120	Z 軸	
	1-2	600				
	1-3	890		60		
	1-4	980	5	120	X 軸 <sup>注)</sup>	
	1-5					
	1-6		2.5	600	Z 軸	
	1-7					
M44	2-1	980	2.5	180	Z 軸	
	2-2			300		
	2-3					

注) X 軸は野縁と平行方向



## (3) 本補修工法の振動実験による性能評価（実験2）

表 3-13 に実試験体の加振段階ごとの状態を、写真 3-11 に S10、写真 3-12 に M44 の最終加振後の無補修・補修側の各断面を示す。本検討における振動実験では、最終的に両天井板とも 980gal で加振を行ったが、仕上面のひび割れ進展は目視では認められず、剥落も発生しなかった。特に M44 は S10 と比較して漆喰層が薄く自重が軽いことに加え、施工状況が良好である故、木摺りと漆喰界面の顕著な剥離は認められず、無補修側、補修側共に十分な付着が保たれたままであった。

一方で S10 は、無補修側よりも補修側の剥離幅が小さく、本補修工法による効果が認識される結果となった。また、今回は考慮していない木摺り下地の変形が発生した場合、下地の変形に追従できない漆喰層が剥落する可能性があるため、検討の余地がある。しかしながら、本試験では剥落こそしなかったものの、漆喰の引掛りが目透かしから引き抜けることにより、鉛直方向の支持力を低下したとみられる箇所があり、そのような部分は周辺の漆喰層が曲げやせん断応力を負担しているので不安定な状態といえる。その意味で、剥離剥落の危険性がある箇所の補修、発生の抑制は必要といえるので、文化財保護の視点を踏まえた予防保全の観点からも、本研究で開発した木摺り漆喰天井部材における樹脂注入による補修工法は一定の有用性を持つと考えられる。

表 3-13 実構造部材の加振段階ごとの状態

部材	順番	入力波 (gal)	加振後の部材の状況
S10	1-1	300	仕上面のひび割れ進展は無く、剥落も発生せず。 木摺り下地と漆喰の界面剥離が若干進行する。
	1-2	600	
	1-3	890	仕上面のひび割れ進展は無く、剥落も発生せず。 木摺り下地と漆喰の界面剥離がさらに進行し、漆喰層の浮きが目視で認識できる箇所が増える。補修の有無による剥離程度に差異が生じ始める。
	1-4	980	仕上面のひび割れ進展は無く、剥落は発生せず。 無補修側において、小幅板がそり上がって漆喰と剥離している箇所が認められる。その部分における漆喰の引掛りは、目透かしから抜ける形態となる。
	1-5		
	1-6		
	1-7		
M44	2-1	980	仕上面のひび割れ進展は無く、剥落は発生せず。 木摺り下地と漆喰の界面に剥離は認められず、補修側、無補修側の顕著な差異は確認されなかった。S10 よりも漆喰層が薄く、自重が軽いことに加えて、目透かし部分の引掛りによる支持力が大きかったためと考えられる。
	2-2		
	2-3		



a) 無補修側



b) 補修側

写真 3-11 S10 の最終加振後の各断面



a) 無補修側



b) 補修側

写真 3-12 M44 の最終加振後の各断面

### 3.5.3 岩手銀行旧営業室の天井部材を模した試験体の作製

#### (1) 試験体作製の目的

文化財建造物で、施工環境が良好とはいえない小屋裏での作業を伴う以上、作業員の負傷や機材の落下による漆喰部材の損傷は防止する必要がある。そこで、現場での足場の架設および施工を前に、補修の施工性の評価および作業内容の確認を実施することとした。今回は、岩手銀行小屋裏の天井支持部材の事前調査情報を基に、現地建物の小屋裏の天井部材の一部を実物大で再現した試験体（以下、実大試験体）を実験室に作製し、足場形状の検討と共に、施工性の確認と、作業員の習熟度の向上を図る。この際に、木摺り下地の目透かし幅や、漆喰の調合等を実験要因として、それによる部材の物性の違いや補修効果を確認することとした。また、補修対象の部材と類似する条件とするため、木摺り漆喰天井の施工経験を有する左官工事業者の協力のもと、過去に行われていた工法に則って施工を行った。

#### (2) 岩手銀行旧営業室の天井部材における再現範囲の検討

写真 3-13 に岩手銀行旧営業室天井の支持部材、図 3-8 に旧営業室における実大試験体で再現した範囲、図 3-9 に再現部分の実測により作製した 3D モデルを示す。実大試験体は、岩手銀行小屋裏の天井支持部材の寸法を基に再現する。再現する部位は吊木受け、吊木、野縁、木摺り漆喰部材で、現地建物と同じく木材と漆喰で作製する。

岩手銀行小屋裏の桁行方向のトラス間隔が約 1800mm（約 1 間）であり、吊木受けは 700mm 前後の間隔で配置されている。今回は、小屋裏の桁行方向のトラス 1 スパン分と、小屋裏梁間方向の吊木受け 2.5 スパン分を再現範囲とし、結果的に作製する天井部材は約 1800mm 四方のサイズとなった。

#### (3) 再現部分を支持する単管足場の基本計画

岩手銀行では、写真 3-13 に示すように吊木受けの両端はトラス下弦材（以下、下弦材）に支持されている。また、深さ 800mm のフトコロを再現すべく、吊木受けを持ち上げた形で支持するための足場を架設することとなった。一方で、下弦材の断面寸法は高さ 320×幅 180mm の杉無垢材であり費用面で問題があったため、実大試験体では吊木受けの荷重は下弦材に見立てた単管に負担せしめることを条件に、単管足場を設計した。

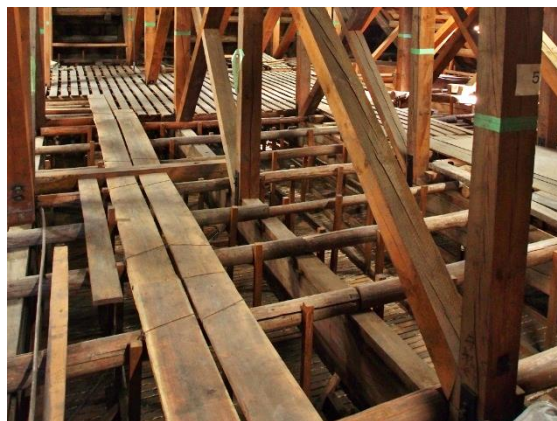
#### (4) 実大試験体の形状の決定

実大試験体における吊木受け、吊木、木摺り漆喰部材を含めた総称を「天井部分」と表現し、それらを支持して、木部周辺への観察やアクセスを支援する単管足場を、「単管部分」と記述する。

図 3-10 に実大試験体の 3D モデルによる計画図、表 3-14 に単管部分で使用した資材を示す。単管部分は天井部分を包み込む形態となるように計画した。また、天井部分を上側から観察し、フトコロに接近するための梯子を単管部分の片側に、上部両側には鋼製の作業床を設置した。梯子が無い側の作業床には、吊木受けの上部に現地小屋裏の床板を模擬した木製足場板も設けたうえで、それを用いて移動することを前提としている。また、左官工事を実施する際の施工性を考慮し、木摺り下地を地上から約 1700mm の高さに設置するため、吊木受けは地上から約 2500mm（1700+800）に位置することとなった。したがって、作業床高さが 2m を超える試算となったため、労働安全衛生規則に準拠し、実験担当者の安全性を考慮した。



a) 天井支持部材の基本的な形態



b) 吊木受け上の既存床板

写真 3-13 岩手銀行旧営業室天井の支持部材

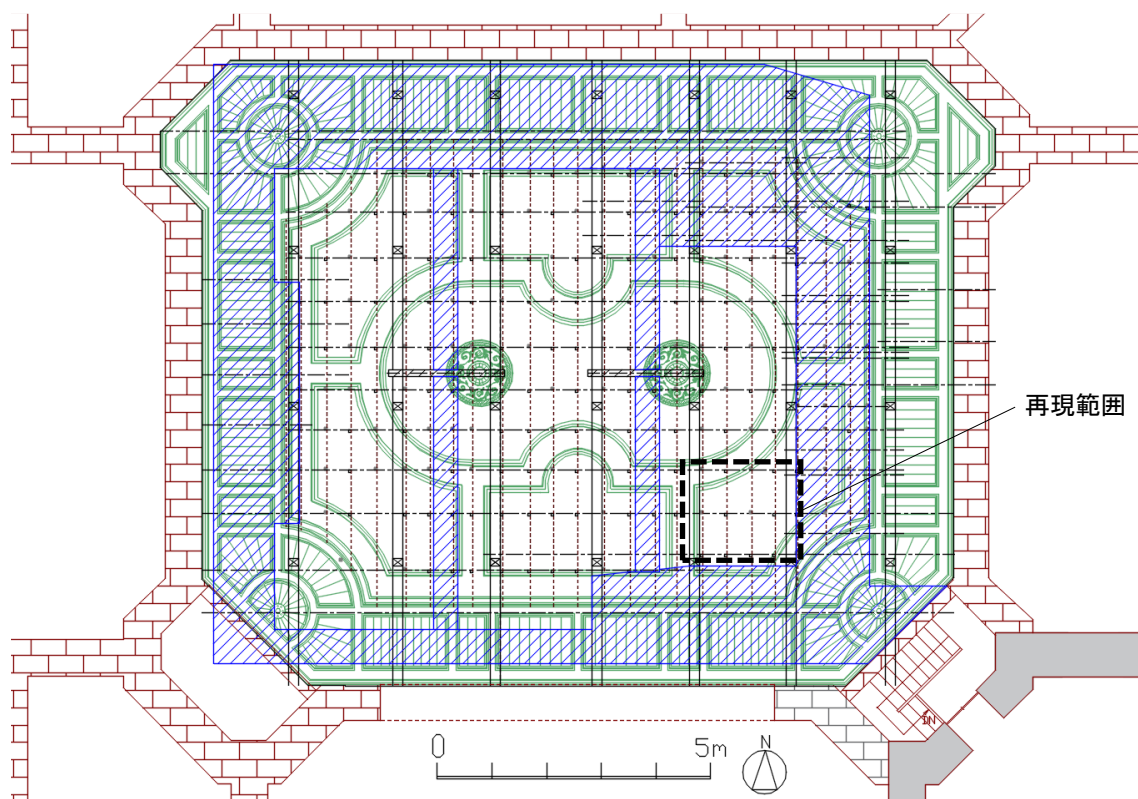


図 3-8 旧営業室における実大試験体で再現した範囲



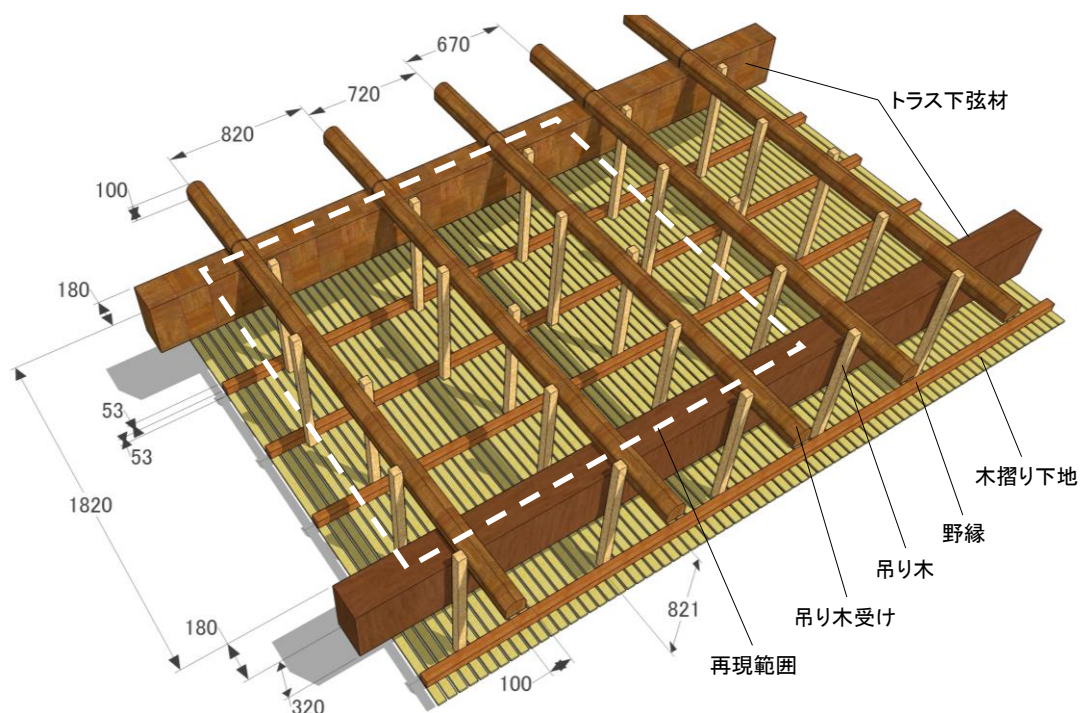


図 3-9 再現範囲の実測により作製した 3D モデル

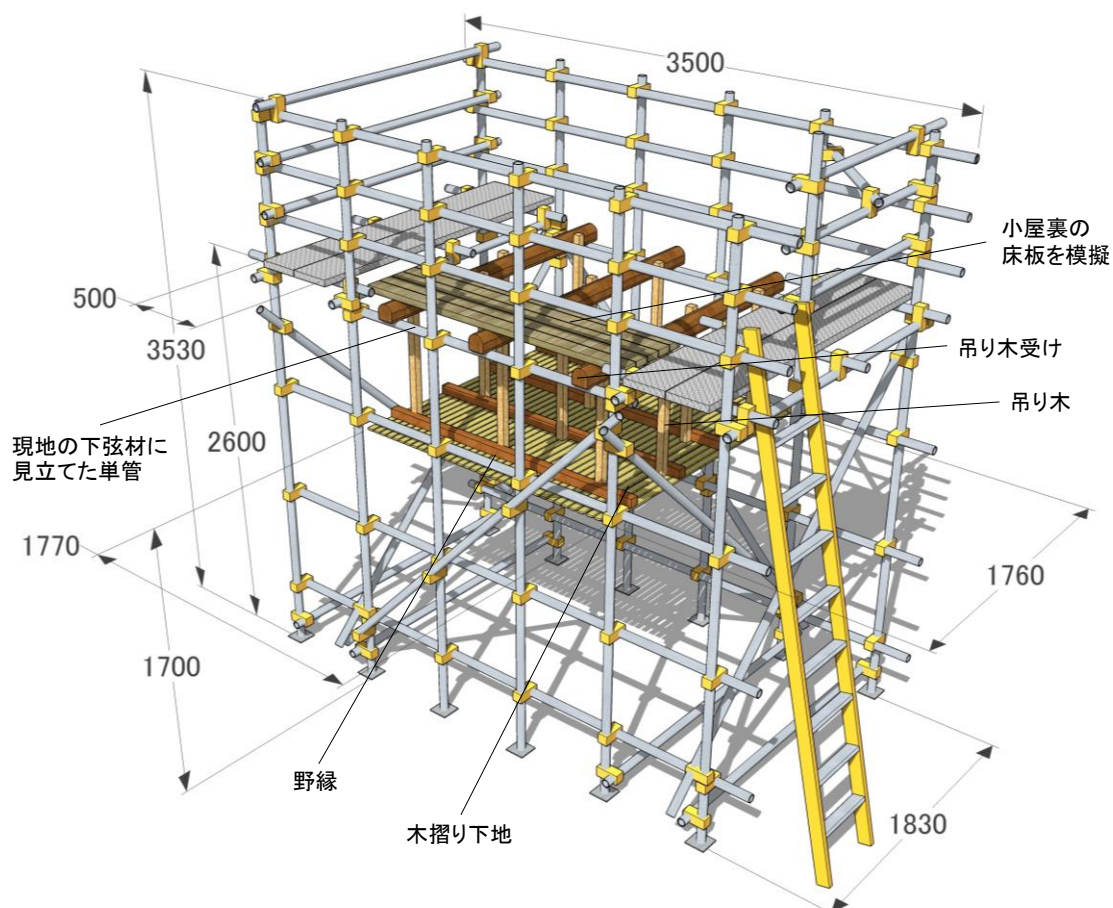


図 3-10 実大試験体の 3D モデルによる計画図

表 3-14 単管部分で使用した資材

使用資材		単品質量(kg)	個数	合計質量(kg)
単管 φ48.6	長さ 3500mm (ピン付)	9.56	26	248.43
	長さ 3000mm (ピン無)	8.19	6	49.14
	長さ 2000mm (ピン付)	5.46	11	60.06
	長さ 1500mm (ピン無)	4.10	3	12.29
	長さ 1000mm (ピン無)	2.73	8	21.84
クランプ	直交	0.72	130	93.60
	自在	0.71	16	11.36
安全装備	クランプカバー	0.03	100	3.00
	単管キャップ	0.02	50	1.00
鋼製足場板 (厚 40×幅 250×長さ 2000mm)		6.70	4	26.80
単管固定ベース		0.70	12	8.40
脚立		9.00	1	9.00
合計		-	-	544.92

#### (5) 木摺り漆喰天井部分における仕様の検討

実大試験体における実験は、岩手銀行漆喰天井の実施工を見据えたデモンストレーションの場であると同時に、木摺り漆喰工法そのものの特性と、その補修効果の評価を行うことも目的としている。ついで、木摺り漆喰天井部分も何らかの実験要因を与えたうえで部位ごとに仕様を変化させ、それに伴う物性・補修効果の差異を評価する。評価は振動実験を中心に実施するため、それを見据えた設計を木摺り下地に盛り込んだ。

表 3-15 に実大試験体における木摺り漆喰天井部分の使用材料、図 3-11 に実大試験体における木摺り漆喰天井部分の下地の図面、表 3-16 に実大試験体における実験要因を示す。今回は、岩手銀行の実施工を考慮した試験体であるため、作製する天井板が比較的大面積である一方で、後に実施する振動実験では、振動台および加振フレームに乗せられる天井部材のサイズは最大で 1000mm 四方であるため、天井部材を切断して振動実験に供することとなった。実大試験体では、後々の切断時の漆喰層への損傷を軽減するため、予定している漆喰の塗り厚（約 12mm）と同等の高さを持つ角材を、作製する天井部材の下地面に田の字状に目地としてあらかじめ設置する。それに伴い、天井面の領域が 4 分割されることを利用して、目透かし幅と漆喰調合を各領域で異なる条件に設定する。

作製する天井部材の仕様は実試験体を参考にし、目透かし幅は S10 の 6mm と M44 の 12mm を適用する。また、スサ含有率と砂含有率も実試験体 2 体の漆喰調合が概ね同じであったため、それぞれ 5.6%、10%とした。また意図的に脆弱な物性となるようにスサ含有率を半量にした領域も設けて、合計 4 種類の実験要因を基に評価を行う。なお尺トンボは、本研究の範囲内では装着による顕著な効果が認められなかったことを踏まえて、実大試験体では省略することとし、木摺り下地と漆喰の引掛りおよび界面の付着力のみを天井部材の支持力と考えたうえで、安全側に立脚した検討を行う。

表 3-15 実大試験体における木摺り漆喰天井部分の使用材料

部位	材料	記号	内容
漆喰	水	W	上水道水
	消石灰	C	JIS A 6902 左官用消石灰に準拠した消石灰
	骨材	S	大井川産陸砂(粒度 2.0mm 以下、絶乾密度:2.68g/cm <sup>3</sup> 、吸水率:1.32%、F.M.:2.83)
	スサ (下・中塗)	F1	アク抜き藁スサ(15mm 切) 密度 <sup>注1)</sup> =0.5g/cm <sup>3</sup> 注1) 液体置換法による見かけ密度
	スサ(上塗)	F2	白雪スサ(短切) 密度 <sup>注1)</sup> =0.5g/cm <sup>3</sup>
天井 支持 部材 ・ 木摺 下地	糊	T	粉角又(海藻を煮出し、出汁を乾燥させたもの)
	丸太	-	杉丸太(吊木受けとして使用) 直径約 100mm、長さ 2000mm
	角材		杉角材(吊木として使用) 幅 45×高さ 45×長さ 1800mm
	角材		杉角材(野縁として使用) 幅 60×高さ 60×長さ 1800mm
	平材		杉荒材(小幅板として使用) 厚さ 12×幅 42×長さ 1800mm
	釘		鉄釘(長さ 25mm)
	角材		杉角材(目地として使用) 幅 15×高さ 15×1800mm
下地	平材		杉荒材(堰板として使用) 厚さ 10×幅 40×長さ 1800mm

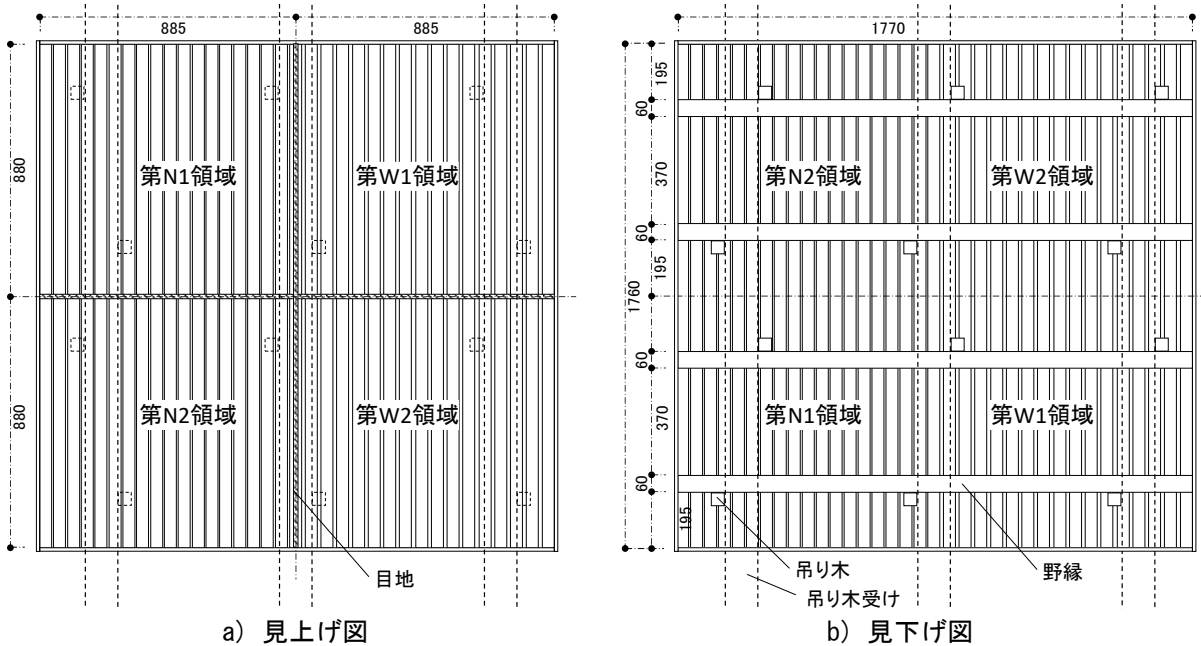


図 3-11 実大試験体における木摺り漆喰天井部分の下地の図面

表 3-16 実大試験体における実験要因

実験要因	領域				解説図		
	N1	N2	W1	W2		目透かし 6mm	目透かし 12mm
小幅板厚さ(mm)	12				W/F 5.6%	N1 6mm,5.6%	W1 12mm,5.6%
目透かし幅(mm)	6		12				
水消石灰比 W/C (%) (質量比)	85						
スサ含有率 F/V (%) (質量比)	5.6	2.8	5.6	2.8	W/F 2.8%	N2 6mm,2.8%	W2 12mm,2.8%
砂含有率 S/V (%) (質量比)	10						
角又含有率 T/C (%) (質量比)	3						
尺トンボ	無し						



## (5) 実大試験体の施工

### (5.1) 単管部分の組み立て

写真 3-14 に単管部分の建造の様子を示す。天井部分に先立ち、単管部分の組み立てを行った。あらかじめ作製した 3D モデルを基に、建造現場の地面の傾きを考慮して修正を行いつつ組み上げた。特に、単管部分上部両脇の作業床の水盛りや、手摺りの高さの確認を重点的に行うと共に、作業員と接触の懸念がある部位のクランプにはカバーを取り付け、実験を実施するうえでの安全性を確保した。



a) 資材の搬入



b) 建地の位置決めと水盛り<sup>注)</sup>



c) 組み立て後 1



d) 組み立て後 2



e) 杉丸太の設置前

写真 3-14 単管部分の建造の様子

#### (5.2) 天井部分の組み立て

写真 3-15 に天井部分の組み立ての様子を示す。今回の実験では目透かし幅を実験要因としており、精度の高い作業が求められるため、木摺り下地はあらかじめ地上にて下向き作業にて作製する。小幅板の固定は、野縁となる角材をあらかじめ敷いた上で行うので、この状態では漆喰を塗りける面（以下、下地面）は上を向いている。目透かしは、条件に応じた幅と同様の厚みを持つ木材を、目透かしとなる部分に挟んだうえで、幅を確保する。また、下地の条件を統一するため、長さ 1800mm の平材をそのまま用いて継手を設けないこととし、初めに約 1800mm 四方の木摺り下地パネル（以下、下地パネル）を作り、振動実験時に 4 分割するための目地として、田の字状に角材を打ち付ける。

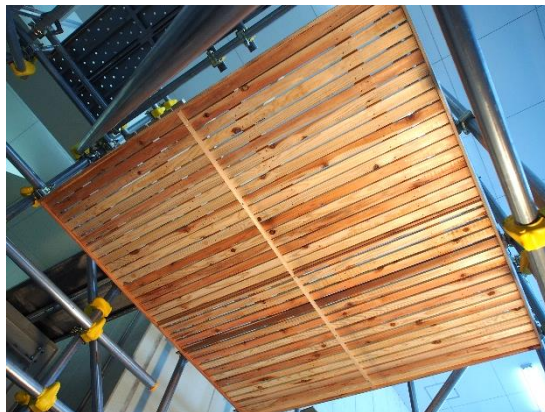
続いて、単管部分には、下弦材として扱う部分の単管に、吊木受けとなる杉丸太（以下、吊木受け）を実測した寸法とおりの間隔で渡す。岩手銀行では吊木受けは下弦材に釘打ちされていたが、実大試験体では吊木受けと単管を番線で固定した。ここで、一度単管部分の中央 2 本の建地を取り外し、木摺り下地パネルを内部に運び込む空間を作る。そのうえで、吊木受けの上端から下へ 800mm の部分に野縁の下端（木摺り下地の上面）が位置するように仮の単管を取り付け、仕上面を下に向けた下地パネルを単管部分内部に挿入し、仮の単管の上に載せる。この時点で、下地面が地上から 1700mm、野縁の下端が吊木受け上端から 800mm の位置となるように各部材の位置を調整し、計画した位置に天井材が固定されるようにする。

最後に、位置決めがなされた下地パネルの野縁と吊木受けを吊木で接続し、木摺り下地の荷重が吊木、吊木受けを通して下弦材部分にかかるようにする。全ての取り付けを終えたところで、木摺りパネルを支持していた仮の単管を取り外し、ぐらつきや歪み等を含めた、吊木受けとの接続状況を確認する。





a) 下地パネルを単管部分へ挿入



b) 所定の高さに固定された下地パネル



c) 吊木設置前



d) 吊木設置後



e) 組立後（漆喰施工前）



f) 天井部分の俯瞰



g) 岩手銀行の天井支持部材（参考）

写真 3-15 天井部分の組み立ての様子

## (5.2) 実大試験体への左官工事

### (5.2.1) 塗り重ね回数、塗り厚の決定

実大試験体は、岩手銀行の実施工に向けた検討に加えて、現在は施工例が少ない木摺り漆喰工法の施工の様子を記録し、その部材を補修せしめる目的を兼ねている。また、設定した実験要因以外の条件を揃えるため、数種類の下地に対して数種類の漆喰を統一的に塗り込める技法が必要となる。そこで実大試験体では、木摺り漆喰天井の施工経験を有する左官工事業者（廣瀬左官工業所：廣瀬賢三氏）に依頼したうえで、過去に行われていた工法に則って施工を行うこととした。

今回の施工では、木摺り漆喰工法で一般的な、下塗り、斑直し、中塗り、上塗りの4層塗りとし、岩手銀行の創建時に施工された天井の塗り厚を参考に、合計約12mmの塗り厚となるようにした。

### (5.2.2) 左官工事の施工手順

図3-12に、実大試験体での左官工事の施工手順、表3-17に左官工事における各工程の詳細を示す。先述のとおり、作業は主に4段階にわかれているが、各層ごとに適当な乾燥時間を設ける必要があることから、4層を2日間に分けて施工を行った。

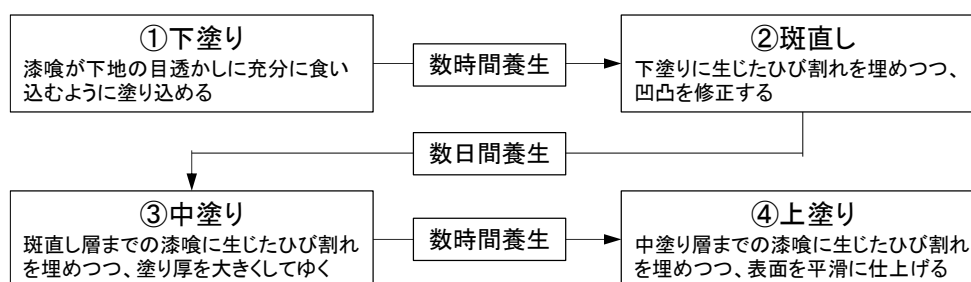


図3-12 実大試験体での左官工事の施工手順



表 3-17 左官工事における各工程の詳細

日時	作業の説明	作業の様子	
2015 年 12 月 11 日  9:00	①下塗り： 木摺り下地との付着を決定する重要な層であるので、目透かしに充分に漆喰を食い込ませ、引掛け（廣瀬氏は「返り」と表現）を形成させる。この際、目透かしに対して直行方向に塗るほうが、経験的によいときく。		
		小幅板に対して直行方向に鋺を走らせる	漆喰を塗付けた部分に引掛けが形成されている様子
12 月 11 日  14:30	②斑直し： 下塗り後暫く経つと、目透かし部分の漆喰が沈下してくる。その際に生じる凹凸を修正し、平坦な仕舞いにする工程。垂れ下がった部分を基準に塗り厚を決めるため、鋺は目透かしと平行方向に走らせるとよい。		
		目透かしに沿って漆喰が沈下している	漆喰の表面が滑らかになった斑直し後の様子
12 月 16 日  9:00	③中塗り： 斑直し施工から数日後、目透かしに沿った乾燥収縮ひび割れの部分に漆喰を塗り込み、塗り重ねる。この際、ひび割れと直行方向に鋺を走らせ、ひび割れの進展を防ぐ向きにスサが配置されるように塗ってゆく。		
		目透かしと平行に漆喰表面に乾燥収縮ひび割れが発生	中塗り前、漆喰の付着を良くするために水を噴霧する
12 月 16 日  14:30	④上塗り： 中塗りと同様に、目透かしと直行方向に鋺を走らせる。 人目に付く部分であるので、特に平滑性に留意しながら施工を行い、漆喰を塗り終えた後も、光沢が出過ぎない程度に鋺当てを数回行う。		
		白雪スサを混ぜた白色度の高い漆喰を用いる	光を当てながら、凹凸、光沢を確認して鋺当てを行う

## (6) 実大試験体による岩手銀行補修施工の事前検討

### (6.1) 吊り足場形状の条件検討

小屋裏には吊木、吊木受け等の支持材が多く配置されていることに加えて、天井部材への影響を考慮する必要があることを踏まえて、以下の条件を優先度別に考慮し、足場形状の検討を行った。

#### 条件（上ほど優先度が高い）

- 1) 部材保護性：木摺り漆喰天井部分の変形、剥落、陥没を防ぐため、吊り足場の荷重は全てトラス下弦材へ流すこと。
- 2) 施工性：常に施工者がどこかに掴まりながら作業を行わなければならないような施工環境は避けること。
- 3) 安定性：施工者や施工機材の基本的な動作による荷重移動があっても、安定性を欠くほどに吊り足場が揺れないこと。
- 4) 保管性：必要な機材類を足場板の上に置くことができ、かつそれらが安定すること。
- 5) 適用性：既存部材との干渉の関係で、吊り足場の直下に補修箇所が位置する場合でも、その部位へ接近・施工が可能であること。
- 6) 軽量・移動性：足場の大きさ、質量（分解した場合を含む）が、作業員が1人でも十分に現場へ搬入でき、所定の設置場所まで持ち運ぶことができ、かつ、安全性を支障を及ぼさない程度に部材数が少なく、軽量であること。
- 7) 架け替えの容易性：吊り足場の架設に無関係な既存の天井部材へ不必要な干渉・衝突をしない程度に架け替えが容易であること。

## (6.2) 吊り材の検討

表 3-18 に足場材と吊り材の組み合わせによる足場形状の検討を示す。多くの天井支持部材が存在する小屋裏の中では、吊り足場を架け替える際の取り回しの容易さを考えると、一つの部材サイズが大きいとそれだけ施工性や落ちたり、既存部材との衝突が起きたりするため好ましくはない。そのため、足場材を吊るす手段として最初に考えられたのは足場吊りチェーンであり、持ち運びやすさ、架け替えのしやすさ、軽さでは最も理想的であったが、スペースが狭く、1箇所吊り足場に使用できるチェーンの本数が少なく安定性に欠けていたため、安定性・安全性を優先した結果、単管パイプを用いる方法が最善と判断された。

表 3-18 足場材と吊り材の組み合わせによる足場形状の検討

足場材			吊り材		条件							評価・説明
鋼製床板	梯子	2×4材	チェーン	単管	部材保護性	施工性	安定性	保管性	適用性	軽量・移動性	架替え容易性	
●			●		○	△	×	△	×	○	○	床面が広く、持ち運びや掛替えは容易なるも、安定性に欠ける。
	●		●		○	×	×	×	○	○	○	持ち運びや掛替えは容易で、足場の直下でも施工が可能だが、安定性に欠ける上、踏み外しやすく、機材類をほとんど置くことができない。
		●	●		○	×	×	×	○	○	○	持ち運びや掛替えは容易なるも、幅の狭い床材を複数使うため、安定性がすこぶる悪い。
●		●	●		○	△	×	△	△	○	○	施工部位に応じて適切な足場板を選択できるが、安定性の問題を克服できない。
●				●	○	○	◎	○	×	△	△	非常に安定しており、機材類も十分に置くことができるが、床面直下の補修箇所を施工できない。
	●			●	○	×	△	×	○	△	△	安定しており、足場の直下でも施工が可能だが、踏み外しやすく、機材類をほとんど置くことができない。
		●		●	○	△	△	△	◎	△	△	細い床材を複数使うためずれやすいが、複数本を束ねて単管に固定すれば安定性は向上し、足場直下の補修箇所でも概ね対応可能。
●		●	●		○	○	○	○	○	△	△	施工部位に応じて適切な足場板を選択でき、安定性を確保しつつ足場直下の補修箇所も概ね対応可能であり、拡張性が高い。



## (6.3) 作業床の検討

表 3-17 に、足場材と吊り材の組み合わせによる足場形状の検討を示す。労働安全衛生規則第 574 条（つり足場）の中では、作業床の幅 40cm 以上で隙間が無いことが求められている。本施工での吊り足場は 800mm のフトコロ部分に設けるので、作業床の位置は天井部材から 100mm 程度であり、外観上の影響による心理的な安心感は大きい。一方で、今回施工を行う岩手銀行は国の重要文化財であることはもちろんのこと、天井部材の下層には天井高 9m の旧営業室が存在することを考慮する必要がある。さらに、旧営業室内でも改修工事に関わる多数の技能者がいるため、機材の落下、足の踏み外しなどによる漆喰層の剥落、天井部材の陥没は厳しく戒めなければならない。そのため、安定感があり、軽量で、作業床として実用性のある足場材を検討する必要がある。一方で小屋裏内では天井支持部材の影響により、吊り足場を設置できる場所は限定される。そのため、足場を設置した際に作業床が補修箇所直上の位置になってしまう場合も考えられるため、施工の不可に関わる部位では、作業床に生じる隙間は、意図的に設けた隙間も含めて、十分注意しつつ許容することとした。

これらの条件から、通常の鋼製足場板を用いる方法、梯子を横向きにして用いる方法、複数の 2×4 材を組み合わせる施工場所に応じて隙間を空ける方法が検討されたが、安全性の観点から、鋼製足場板を中心に、施工部位の状況に応じて足場材を 2×4 材へ置換する方法が最善と判断された。

## (6.4) 吊り足場の基本形状の策定

表 3-19 に適用した単管吊り足場 1 基あたりの使用資材と質量、図 3-13 に単管吊り足場の採用案、写真 3-16 に実大試験体を用いた吊り足場の運用試験を示す。図 3-13 a) に示すような、鋼製床板と単管の吊り材を用いた足場を基本形状（以下、基本足場）として数基用意し、施工個所の各部材の配置に合わせて形状を変えて架け替える方針となった。また、補修箇所がトラス下弦材と平行している場合は、図 3-13 b) に示すように、基本足場を並列して設置し、各足場の鋼製床板と直交方向（下弦材と平行方向）に 2×4 材を載せ、広範囲での施工を実施できるようにした。なお、単管同士の締結には通常の直交クランプ（設置場所によって適宜自由クランプに変更）を使用し、足場材の固定ではゴムバンドを用いて、安定性を確保しつつも補修箇所に応じて足場材の位置を数センチ単位で移動可能な仕様とした。

表 3-19 採用した単管吊り足場 1 基あたりの使用資材と質量

使用材料		数量	質量 (kg)
単管	φ48.6×2000mm	2 本	8.2 （単品：4.1）
	φ48.6×1500mm	4 本	12.4 (3.1)
	φ48.6×500mm	2 本	2.2 (1.1)
足場板	鋼製足場板（厚 40×幅 250×長さ 2000mm）	1 枚	7.2
	拡張用 2×4 材（厚 38×幅 89×長さ 1820mm）	2 枚	6.0 (3.0)
直交クランプ		8 個	5.92 (0.74)
合計		-	41.92

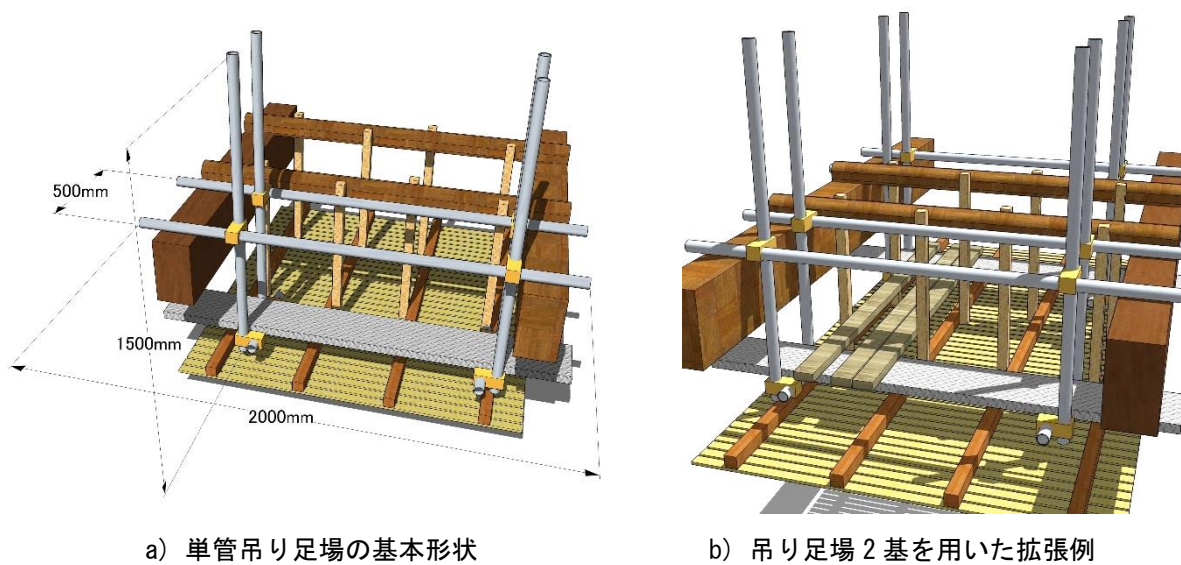


図 3-13 単管吊り足場の採用案



写真 3-16 実大試験体を用いた吊り足場の運用試験

(6.5) 岩手銀行での足場の運用例(参考)

写真 3-17 に岩手銀行での採用した足場の運用例を示す。なお、岩手銀行での実施工記録は 3.6 項で記述する。吊り足場は、実大試験体での運用試験時と概ね変わらない方法で使用することができ、現場での足場業者の技能や、習熟度の向上も相まって、拡張性の高い運用を行うことができた。例えば、足場の架設の際、写真 3-17b)のように、U 字型に組んだ単管と長い単管をあらかじめ用意しておき、トラス下弦材に渡した 2 本の単管の間に U 字型単管を差し込む方法や、写真 3-17 c) d)のように、並列に架設した足場同士を単管で接続して手すりを追加するなど、施工個所の状況に合わせて足場の形態を変化させた。

また、今回適用した吊り足場の資材は規格化されたものを用いており、準備が容易であることが利点である。今回使用した足場の資材も現場近くのホームセンターで手配することとし、補修に必要な資材・機材の輸送負担の削減につなげることができた。



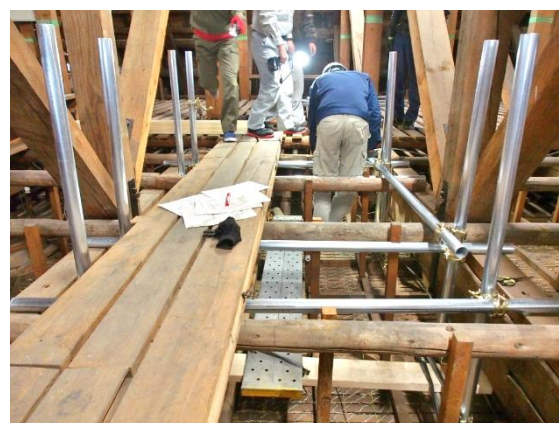
a) 既存の床板の下に潜り込ませて設置  
(この場合、施工は伏せた体勢で行う)



b) 足場の架設の様子 (U 字型に組んだ単管をフトコロに差し込んで締結)



c) 複数の足場を使って拡張した例 (ここでは鋼製足場板を拡張用として用いている)



d) 拡張した足場を既存の床板の下に潜り込ませて拡張した例

写真 3-17 岩手銀行での足場の運用例



### 3.5.4 実大試験体への補修工法の試験施工

#### (1) 岩手銀行の実施工を見据えた施工性の確認

写真 3-18 に実大試験体を用いた吊り足場の運用試験の様子を示す。岩手銀行での実施工を前にして、作製した実大試験体を用いて施工性の確認を行った。

下弦材に見立てた単管に吊り足場を引掛けたうえで、補修に必要な機材を用いて、数か所の小幅板に穿孔したり、樹脂を注入の動作をしたり、施工現場で実際に行う予定の動作を一通り実施し、足場形状の改善や施工性の問題の有無を評価した。ここでは、作業床として鋼製床板以外に 2×4 材を用いて拡張性を持たせる案が出され、2×4 材に実際に乗って試験施工を実施し、施工性に問題ないことを確認した。



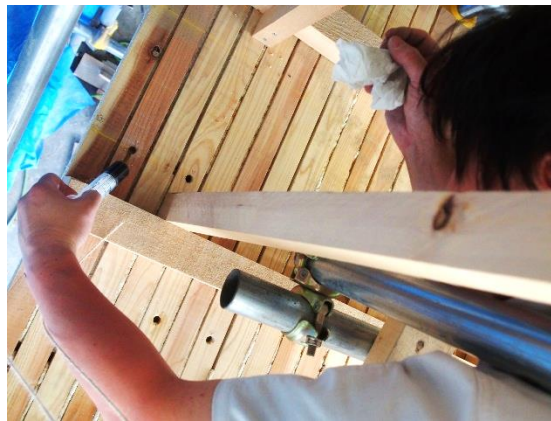
a) 施工時の体勢



b) 架設した吊り足場上での穿孔作業



c) 穿孔部の清掃



d) 穿孔部への樹脂注入

写真 3-18 実大試験体を用いた吊り足場の運用試験の様子

## (2) 実大試験体の漆喰層の劣化と剥落

### (2.1) 漆喰層のひずみ

写真 3-19 に実大試験体における漆喰層の劣化とその調査の様子を示す。本研究で開発した木摺り漆喰天井に対する補修工法は、ひび割れや剥落を起こす懸念のある部材にアクリル樹脂を注入して、木摺り下地と漆喰層の付着力を向上させるものである。すなわち、劣化した部材に対する補修工法の効果を評価する必要があるため、実大試験体で施工した漆喰部材も、尺トンボを省略したり、目透かし幅を狭くしたり、スサ含有率を減らしたりして、4 領域で部材の持つ剥落への抵抗性を意図的に変更し、脆弱な物性を示すように調整を行った部分もある。

それに伴い、漆喰の施工から 3 か月程度経過した時点で、4 領域で漆喰層にそれぞれ変化が生じ始め、目透かし幅が狭い N1、N2 領域では顕著に漆喰層が反り返り、引掛りが抜けた部分が一部に認められるようになった。特に今回は、漆喰の硬化と共に、下地に取り付けていた堰板と目地を除去したため、漆喰層の辺縁部が片持ちになっていたことも、変形等の劣化を速めた要因と考えられる。



a) 剥離幅の測定 1



b) 剥離幅の測定 2



c) 目透かし幅の違いによる剥離幅の差異



d) 引掛り量の違いによる剥離幅の差異

写真 3-19 実大試験体における漆喰層の劣化とその調査の様子



## (2.2) 漆喰層の一部剥落

劣化の進んだ状態で補修を実施し、効果を評価する計画であったため、漆喰層の変形に対して必要最低限の処置に留めていたところ、一部の漆喰層が剥落した。写真 3-20 に実大試験体における漆喰層の一部剥落の様子を示す。剥落箇所は、最も脆弱な仕様と考えられる N2 部分で、下地からの剥離が生じていた辺縁部から内側に向かって 40cm 程進展した部分で漆喰層が折れて落下していた。漆喰の引掛りはほとんどが目透かしから抜けており、落下した漆喰層側に多く残存していたが、それも落下時の衝撃で折れている部分が多く認められた。この結果より、最も脆弱となるように調整した部分のみが剥落し、目透かし幅やスサ含有率による木摺り漆喰部材の強度への影響が図らずも実証された。一方で、以降の実験計画への影響を防ぐため、垂れ下がった部分の漆喰層（剥落箇所を除く）に対して、麻縄を下部から引掛けて上部に引っ張り上げる応急処置を施し、現状維持を図った。また、落下した破片は全て回収して保管した。



a) 剥落および落下の位置関係



b) 辺縁部から約 40cm が落下した剥落箇所



c) 落下の衝撃で一部破損した剥落片

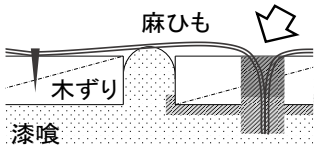
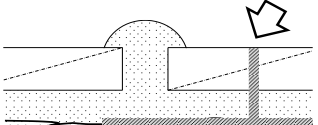
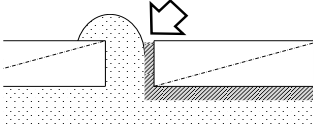
写真 3-20 実大試験体における漆喰層の一部剥落の様子

## (3) 実大試験体の補修方法の検討

補修手段の開発・検討および補修効果の基礎的な評価は、3.5.3 にて小型試験体と実試験体を用いて実施した。ここでは、実大試験体の木摺り漆喰天井部材に対して補修を施し、後の振動実験で補修の効果を確認する。加えて、補修部分の漆喰層が剥落するまで強制的に加振を行い、剥落性状や部材内部での樹脂の広がり方を評価し、補修工法の信頼性向上に向けた検討を行う。

表 3-20 に本研究における既存左官天井部材の補修手段の例（表 3-1 再掲）を示す。ここでは 3.5.3 で主に検討した①穿孔注入に加えて、③目透かし注入の 2 方式を検討する。穿孔注入は対象部材の劣化や引掛りの状況に比較的左右されることなく適用でき、かつ信頼性が高いと筆者らが考えている工法であるものの、小幅板の穿孔が工程に含まれるため、既存部材や施工性に影響が出ることが懸案事項となっている。一方で、目透かし注入は小幅板への加工が無いので、既存部材の現状維持が可能な限り図れることに加えて、工程数や施工者の負担軽減等の利点が多い。故に今回は、実大試験体の天井部材の各領域に、2 方法を組み合わせた形で補修を行い、補修効果や信頼性を確認する。

表 3-20 本研究における既存左官天井部材の補修手段の例（表 3-1 再掲）

下地	補修断面図	用途
木 摺 り	①穿孔注入 	木摺りに約 $\phi 10\text{mm}$ の穴を開け、樹脂を注入する方法。木摺りと漆喰の界面に大面積で樹脂を注入できる上、充填材によるアンカーの効果が期待できるので、補修効果は最も高いと考えられる。加えて、下地と支持部材を麻紐で締結することで、冗長性を付加させることが可能。
	②塗り重ね界面注入 	複数の層に塗り重ねて施工する漆喰部材の特性上、塗り重ね界面で剥離する可能性もあるので、その部分へ約 $\phi 5\text{mm}$ で穿孔し、局所的に樹脂を注入して補修を行う方法。木摺りと漆喰の付着が比較的健全であった場合に用いる。
	③目透かし注入 	目透かしに沿って樹脂を流し込む方法。穿孔作業が必要なく、作業者の負担と天井部材への加工度が軽減できる利点がある。一方で、下地や漆喰の空隙、引掛り形状によって樹脂の浸透に差異が生じやすい方法でもありと考えられるため、今後も検証が必要である。



#### (4) 補修箇所の検討

図 3-14 に実大試験体の補修方法と補修領域の見下げ図および剥離幅の測定結果、表 3-21 に各補修領域の方法と目的、写真 3-21 に実大試験体に対する補修施工の様子を示す。補修を行う範囲は漆喰層の変形が特に大きかった N1、N2 領域のみとした。まず、補修直前の状態評価として、N1、N2 の各領域の木摺り下地の断面が露出面 N1-1～N2-2 の 4 面において、漆喰層の剥離幅の測定を行った。まず、N1 および N2 領域に存在する小幅板 1 枚ずつに 1～18 のナンバリングを施したうえで、小幅板の下面と漆喰層の上面（元々付着していた界面部分）の幅を 2 回ずつ測定し、その平均値をその小幅板部分の剥離幅とした。測定にはノギスを主に使用したが、ノギスが入らない目地の部分では指矩やメジャーで代用した。

測定の結果、N2 領域の一部は先述のとおり剥落のため測定できない箇所があったが、剥落の終局点（漆喰層が折れた部分）では漆喰層が下方向にめくれている箇所があり、最大で約 15mm の剥離を起こしていた。また、剥落を起こしていない N1 領域では最大で約 25mm の剥離幅が認められ、スサ含有率が大きい漆喰のほうが漆喰の変形が大きい傾向があった。これは、本論第 4 章における漆喰とスサ含有率との強度実験結果や第 8 章での振動試験結果を勘案すると、スサ含有率の増加に伴って変形への許容量も上昇していることが要因と考えられる。つまり、N2 領域では N1 程度の変形を起こす前に剥落する可能性があるため、剥離幅を測定できる部分、すなわち落下していない部分では、N1 領域よりも変形量は自ずと小さくなると考えることができよう。

補修方法は原則として、実試験体での試験施工（3.5.2）を踏襲する。実大試験体では、「穿孔注入のみ」、「目透かし注入のみ」、「穿孔注入+目透かし注入」、「補修無し」の 4 種類で施工し、補修の有無や組み合わせによって N1-A～N2-D の 8 領域を設けて、補修効果の差異を検証する。また、補修方法が異なる境界部分では漆喰層に切り欠きを入れて、ほかの領域に影響が及ばないようにする。加えて、地震によって剥落した一部の漆喰を当該補修工法と同様の方法を用いて、木摺り下地に貼り合わせて再使用する試みも行うこととした。その際は、先に小幅板へ貫通穴を穿孔しておき、そこへ剥落片を上方向に押し付けながら樹脂注入を行う方法を採用。したがって、樹脂が硬化するまで漆喰層を所定の位置に固定しておくため、漆喰の仕上面へ向けて地上から支保工を建てて、下から漆喰層を下地へ押し付ける方法を採用した。また、N1-2 断面など、漆喰層の変形が顕著な部分では、同様の方法で支保工を建てて下から押し付けることで、漆喰層の形状の矯正も含めて、安全性と外観の向上を図る補修を行うこととした。

補修に際して、樹脂の注入量や順番は以下のとおりに実施した。

- 1) 漆喰層が変形して下地から垂れている部位においては、あらかじめ漆喰層を下地に対して圧着させておく。そのうえで、樹脂注入は付着側（変形の始点）から剥離側（垂れている方）の順番で行うこととし、剥離している方向に向かって下地と漆喰の付着範囲を広げる。
- 2) 漆喰が剥落している部分では、先に小幅板へ貫通穴を穿孔してから落下片を下地へ圧着し、穿孔部や目透かしへ樹脂を注入する。
- 3) 穿孔注入を行う補修部分においては、実試験体および岩手銀行の施工時と同様に、穿孔深さは小幅板厚+漆喰塗り厚 $\times 0.5$ とする。実大試験体では小幅板厚、漆喰の塗り厚共に約 12mm であるので、穿孔深さは約 18mm とする。
- 4) 穿孔注入を行う部分における 1 回当たりの樹脂注入量は、穿孔部分の穴体積と同量とし、2 次注入まで行う。今回は、全ての穿孔部分の深さを先にノギスで測定し、その平均値を用いて注入量を決めた。注入時、所定の注入量に達する前に樹脂が溢れた場合はその限りでない。
- 5) 目透かし注入を行う部位において 1 回当たりの樹脂注入量は、小幅板の幅を半径とした半円の面積 $\times$ 剥離幅と同量とし、2 次注入まで行う。注入時、所定の注入量に達する前に浸透が認められなかったり、樹脂が小幅板の上に広がったりした場合はその限りでない。

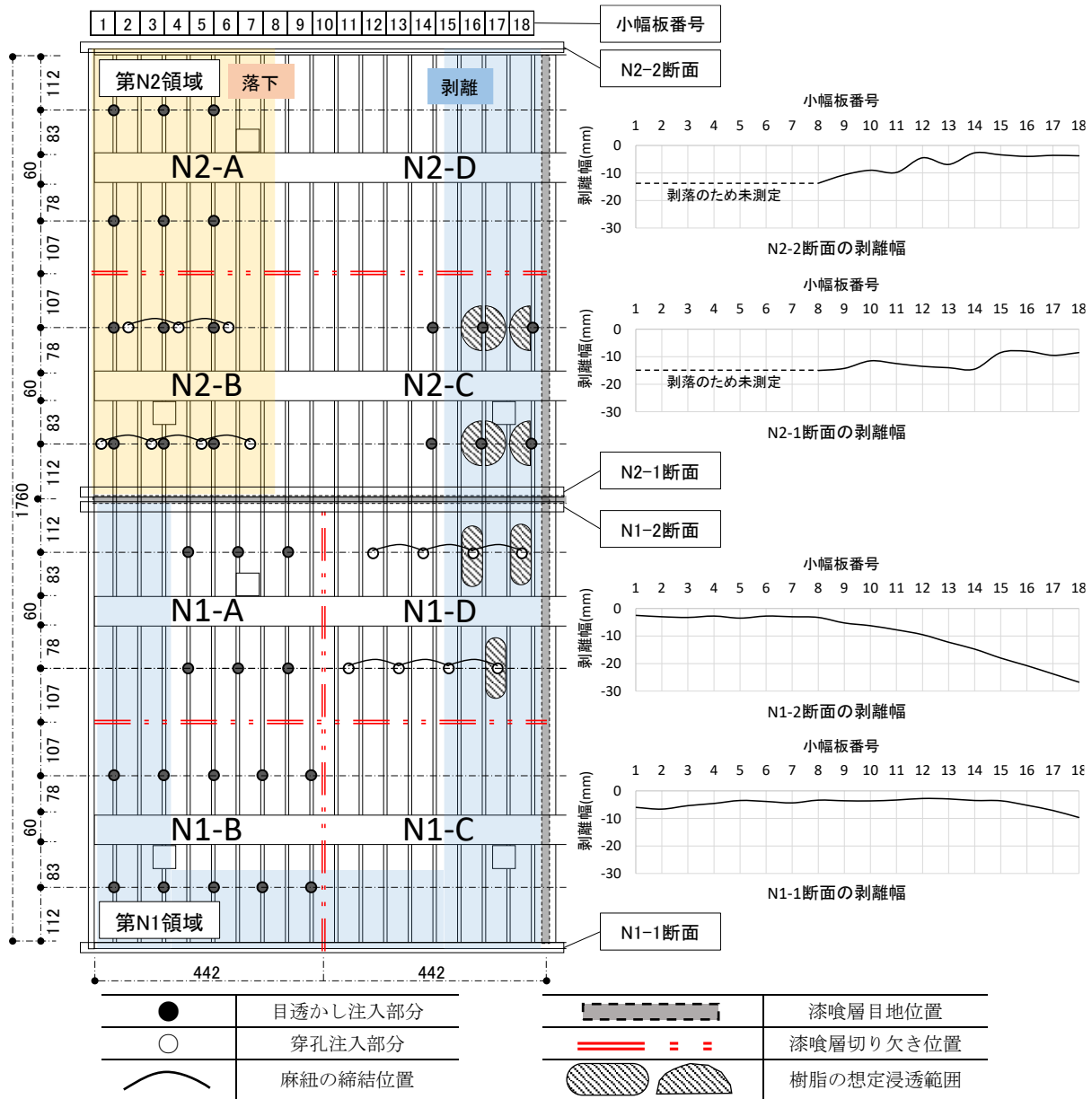


図 3-14 実大試験体の補修方法と補修領域の見下げ図および剥離幅の測定結果

表 3-21 各補修領域の方法と目的

補修領域	補修方法	補修内容・評価目的
N1-A	目透かし注入 6 か所	目透かし注入を付着部分のみに実施。剥離部分の範囲が進展しようとする際、補修部分を行うことによって剥離の進展が抑制できるかを評価する。
N1-B	目透かし注入 10 か所	目透かし注入を領域全体にわたって実施し、N1-A との比較とした。漆喰層の変形・剥離部分では漆喰層を圧着して樹脂注入を行った。形状の矯正を含む補修であるが、漆喰の残留応力によるひび割れや再剥離等の発生も重要な視点となる。
N1-C	補修無し	N1 の各領域における補修効果を確認するため、無補修の領域とした。剥落した際にほかの領域へ影響を与えないように、十分に切欠きを入れた。
N1-D	穿孔注入 8 か所	穿孔注入を領域全体にわたって実施し、最も基本的な補修方法といえる。漆喰層の変形・剥離部分では漆喰層を圧着して樹脂注入を行った。形状の矯正を含む補修であるが、漆喰の残留応力によるひび割れや再剥離等の発生も重要な視点となる。
N2-A	目透かし注入 6 か所	一度剥落した漆喰層を貼り合わせた部分である。あらかじめ落下片を下地に圧着させたうえで、目透かしに樹脂を注入した。なお、圧着させる際に既存の漆喰引掛りが下地と干渉したため、損傷した漆喰引掛りは荷重の負担に寄与しない部分とみなして除去した。剥落片は隣接する N2-B 領域と連続しているため、N2-B の作業と同時並行で実施し、樹脂注入の終了後に漆喰層の切欠きを行った。
N2-B	穿孔注入 7 か所 + 目透かし注入 6 か所	一度剥落した漆喰層を貼り合わせた部分であり、2 種類の注入方法を組み合わせて、樹脂注入量が最も多くなるように施工した領域である。N2-A 領域と同様に、圧着させる際に既存の漆喰引掛りが下地と干渉したため、損傷した漆喰引掛りは荷重の負担に寄与しない部分とみなして除去した。剥落片は隣接する N2-A 領域と連続しているため、N2-a の作業と同時並行で実施し、樹脂注入の終了後に漆喰層の切欠きを行った。
N2-C	目透かし注入 6 か所	剥離部分のみに樹脂注入を行った領域である。剥落のトリガーとなりやすい剥離部分を補修すれば、以降の剥離の進展および剥落は抑制できるという仮説を実証する目的がある。樹脂注入は、剥離した漆喰層を圧着して行った。形状の矯正を含む補修であるが、漆喰の残留応力によるひび割れや再剥離等の発生も重要な視点となる。なお、隣接する N2-B は元々剥落していた部分であるので、境界部の漆喰層への切欠きは入っていない。
N2-D	補修無し	N2 の各領域における補修効果を確認するため、無補修の領域とした。剥落した際にほかの領域へ影響を与えないように、十分に切欠きを入れた。なお、隣接する N2-A は元々剥落していた部分であるので、境界部の漆喰層への切欠きは入っていない。



a) 漆喰浮き状態・補修箇所の確認



b) 支保工の架設



c) 漆喰層の切欠き



d) 目透かし部への樹脂注入



e) 穿孔作業



f) 穿孔部への樹脂注入



g) パテによる穴埋め

写真 3-21 実大試験体に対する補修施工の様子

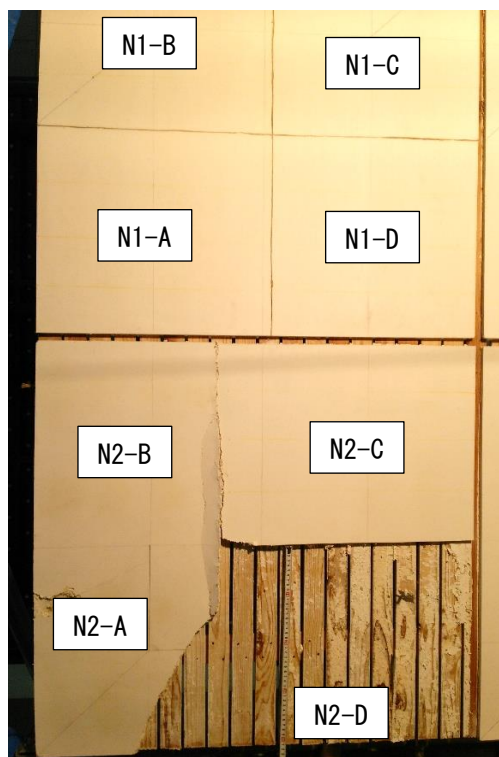


### 3.5.5 補修を施した実大試験体の振動実験

#### (1) 再びの剥落

写真 3-22 に 2 度目の剥落の状態を示す。実大試験体に補修を施し、約 2 週間ほどで支保工を除去し、数か月間そのままの状態経過観察を行ったところ、その間に N2-D 領域が剥落した。この部分は図 3-14 や表 3-21 に示したとおり、ほかの補修部分との比較のために樹脂注入を行っていない。そのため、漆喰層が一部剥離して垂れており、何らかの要因でめくれあがって剥落したと推測される。剥落した時期に剥落原因となるような地震は発生しておらず、原因は現段階でも不明である。

補修領域の境界に設けた切欠きによって、隣接する N2-C 領域は剥落の影響を受けておらず、剥落片は切欠きに沿って直線的に破断している部分があった。補修部分を含め、最も脆弱と推測される部分が損傷したのは前回の剥落時と同様の傾向であり、短絡的ではあるが、補修の効果およびスサ含有率による漆喰強度の関係が再度確認できた。なおその際、剥落片を貼り合わせた N2-B および N2-C 領域に異常は認められていない。剥落片は全て回収し保管したが、貼り合わせ等の補修は行わないこととし、現状のまま振動実験に供することとなった。



a) 剥落箇所の位置関係



b) 剥落した部分の下地の詳細



c) 漆喰層が剥離している N2-C との境界部分

写真 3-22 2 度目の剥落の状態

## (2) 実大試験体の振動実験の準備

### (2.1) 実大試験体の天井部分の切断、搬出

表 3-22 に実大試験体の切断と搬出の手順を示す。振動実験の対象としたのは補修を実施した N1 および N2 領域である。振動実験に際し、加振治具に設置できうる最大の試験体サイズに合わせて、実大試験体の天井部分をあらかじめ設けた目地に合わせて切断し、分離させる。以後、切断した試験体の総称は切断試験体と記述し、個々の物性に応じた切断した試験体は N1 試験体ないし N2 試験体と称する。

以降の実験の流れは 3.5.2 の振動実験を概ね踏襲したものである。そのため、振動実験そのものの詳細な説明は 3.5.2 に譲ることとし、ここでは切断試験体に関する事柄を中心に略述してゆく。

### (2.2) 溝形鋼材の野縁への取り付け

写真 3-23 に振動実験の準備の様子を示す。今回の振動実験で用いる加振治具へ切断試験体を垂下するための溝形鋼材は 3.5.2 で示した実試験体の実験で用いたものを利用する。溝形鋼材は前回の振動実験で既にビス穴を開けているため、前回とは鋼材の上下を逆にして新たなボルト穴を開けて用いた。小幅板を固定している釘に干渉せぬように注意しながら、小幅板と平行方向に野縁へボルト穴を開け、その位置に合わせて溝形鋼材にも穴を開けた。溝形鋼材の取り付けは振動台のある構造実験棟で行い、切断試験体の野縁へボルトで締結、圧着せしめた。

### (2.3) 加振治具の準備、切断試験体の据え付け

写真 3-23 に振動実験の準備の様子、図 3-15 に各切断試験体の加振機材を含めた見下げ図を示す。加振治具も前回の実験時のものを利用する 3.5.2 と同様に、加振治具を振動台のステージに装着し、治具の直下に緩衝材を敷いてから、周辺を養生シートで覆った。溝形鋼材を取り付けた切断試験体に仮設の持ち手を装着し、加振治具へ垂下せしめた。

加速度計も前回の振動実験と同様に各切断試験体の小幅板に 3 基、野縁に 2 基、加振治具本体に 1 基の合計 6 基装着し、データロガーに接続して記録する。なお、今回も漆喰層剥落時の加速度計の損傷を考慮し、仕上面側には装着していない。



表 3-22 実大試験体の切断と搬出の手順

作業	作業の様子	
<p><b>仮設吊木の取り付け：</b> 振動実験の対象としたのは補修を実施した N1 および N2 領域である。天井部分の 4 領域は野縁が連続しているため、搬出のために野縁ごと切断する必要があるが、各領域の吊木が 3 本であり切断時にバランスが悪いため、1 領域の四隅に吊木が位置するように、仮設の吊木を設置した。</p>	 <p>1 領域当たり 4 本となる位置に吊木を取り付ける</p>	 <p>補修施工時の吊り足場を活用して作業を行う</p>
<p><b>野縁と木摺り下地の切断：</b> 切断時の揺れを防ぐため、吊木に対して単管をあてがい、振れ止めを設置する。そのうえで、あらかじめ設けた目地に沿って、まず野縁をフトコロ側から切断し、次に下から木摺り下地を切断する。過度な振動に留意しながら、天井部分を加振治具に設置できるサイズに分離させてゆく。</p>	 <p>最初に野縁をフトコロ側から切断する</p>	 <p>部材の損傷に注意しながら、目地に沿って切断</p>
<p><b>搬出用ハンドリフトによる支持と吊木の取り外し：</b> 天井部材の高さに合わせたハンドリフトを切断した試験体の下部に配置させ、油圧を加えて仕上面に圧着させる。安定を確認してから、野縁に繋がる吊木のビスを取り外して、切断した試験体の荷重がハンドリフトの方へかかることを確認する。</p>	 <p>切断した試験体の直下にハンドリフトを配置</p>	 <p>吊木を取り外し、試験体を下降させる</p>
<p><b>天井部材の取外し、搬出：</b> ハンドリフトの油圧を抜き、切断した試験体が移動できる高さまで下降させる。試験体の周囲に干渉物が無いことを確認してから、単管部分の外へ試験体を搬出し、実験室の所定の場所まで移動させる。移動の際には過度な振動や試験体の落下に注意し、損傷を加えないようにする。</p>	 <p>干渉物に注意しながら単管部分の外へ移動</p>	 <p>試験体の損傷に注意しながら所定の場所へ降ろす</p>



a) 溝形鋼材の野縁への取り付け



b) ボルト締結完了

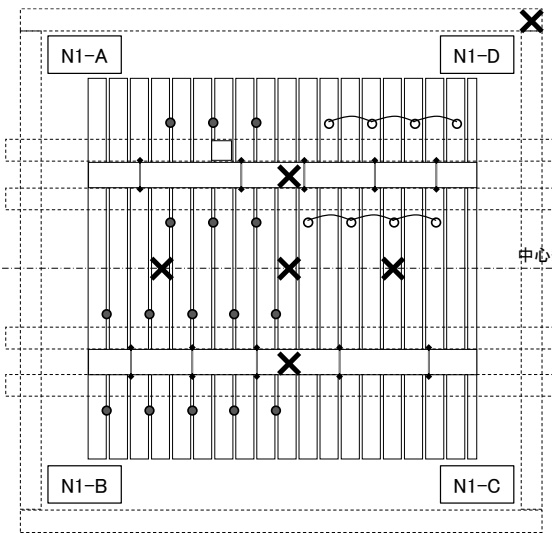


c) 加振治具への吊り下げ

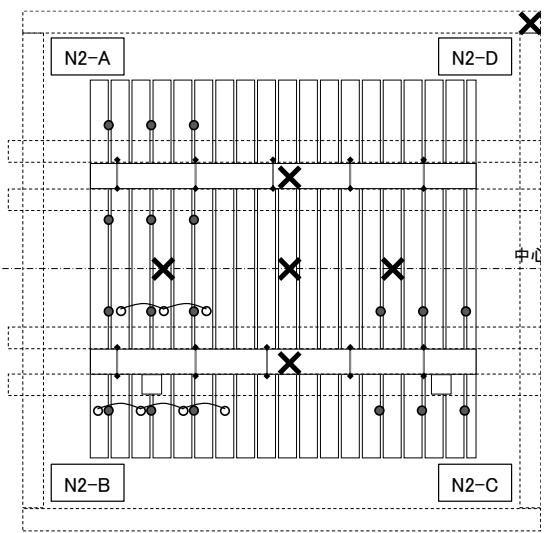


d) 試験体位置の確認、加振準備

写真 3-23 振動実験の準備の様子



a) N1



b) N2

図 3-15 各切断試験体の加振機材を含めた見下げ図<sup>注)</sup>

注) 図中の表記の意味

○	穿孔注入(拡大して図示)	×	加速度計の設置箇所
〰	麻縄の配置位置	┌───┐	加振治具
●	目透かし注入(拡大して図示)	◆──◆	溝形鋼材と野縁の締結ボルト

## (2.4) 振動実験での入力波の検討

表 3-23 に切断試験体への振動実験の入力波の種類と順番を示す。実験では、3.5.4(2)で示したとおり実験前から一部の漆喰層が剥落していた N2 試験体を先に加振することとした。各試験体とも前半の入力波は前回の振動実験を踏襲し、最小入力波を 300gal とし、損傷状況を確認しながら段階的に加速度を上昇させていった。

なお、今回の振動実験では、補修効果の確認のほか、木摺り下地と漆喰の界面における樹脂の浸透程度を評価することも目的に含まれている。そのため、はじめに Z 軸方向 SIN 波で振動台最大出力の 980gal まで段階的に加振して漆喰層が剥落しなかった場合、周波数が連続的に変化する SWEEP 波を入力し、切断試験体を搭載した加振フレームの固有周期を確認する作業を経て、試験体を共振させることで漆喰層を強制的に剥落させる方法を採用した。

結論から述べれば、両試験体とも Z 軸 SIN 波 980gal の入力波でも顕著な損傷が認められなかったため、最終的に SWEEP 波を入力して剥落させることができた。

表 3-23 切断試験体への振動実験の入力波の種類と順番

加振 No.	試験体	加速度 (gal)	周波数 (Hz)	入力波 の種類	時間 (s)	加振方向
1	N2	300	2.5	SIN	120	Z 軸
2		600				
3		900				
4		980	5			
5		700	7.5			
6		800				
7		980	5		300	
8	N1	300	2.5	SWEEP	120	
9		600				
10		900				
11		900	5			
12		700	2-7.5			
13		800				
14		700	4-10			
15		980	5			
16	N2	700	2-10	SWEEP	120	



### (3) N2 試験体の振動実験の結果

#### (3.1) 加振前～980gal・5Hz・300s (No. 7) までの試験体の状態

写真 3-24 に加振前の N2 試験体の状態を示す。N2-D 領域は既に剥落しているため、補修部位における補修方法とその組み合わせの比較に特化して評価を行った。写真 3-24 b) に示すように、N2-D に隣接する N2-C 領域は約 10mm の剥離を起こしている。この部分は N2-C 領域の中でも補修を施していない N2-B 側 (写真向かって右側) であり、元々剥離を起こしていた漆喰層を圧着して樹脂注入した部位 (写真向かって左側) は再剥離や仕上面のひび割れは確認されていない。このことから、仮に漆喰の変形量が樹脂注入前と変化していない場合、樹脂注入がなされていない反対側の漆喰層が引きはがされていることも考えられるため、漆喰層の形状の矯正を伴う補修の場合、その周辺への影響も考慮に入れる必要があるといえる。



a) 見上げ

b) 剥落した N2-D と隣接する N2-C の断面

写真 3-24 加振前の N2 試験体の状態

(3.2) 700gal・2-10Hz・120s の SWEEP 波 (No. 16) を入力時の状態

写真 3-25 に剥落後の N2 試験体の状態を示す。N2 試験体は 900gal・5Hz・300s の入力波 (No.7) までは試験体の断面から漆喰の粉塵が少量落ちる程度であり、顕著な損傷は認められなかった。そこで、3.5.5(2.4)に示したとおり、SWEEP 波を入力して試験体の固有周期を策定し、共振を起して漆喰層を強制的に剥落させる方法を採用した。

その結果、700gal・2-10Hz・120s を加振中の段階で N2-C 領域が大きく揺すられて剥落した。剥落は N2-B 側 (樹脂を注入していない方) から試験体辺縁部に向かって剥離が進展し、樹脂注入を行った部位も共に落下した。剥落した木摺り下地には漆喰の引掛りがほとんど残存しておらず、引掛りの脱落によって剥落したことがわかる。また、目透かし注入を行った部位の小幅板は樹脂による変色が認められるが、その部分における顕著な漆喰の残存は認められず、小幅板と漆喰の界面の付着力が向上していたとは考えにくい結果となった。

落下片は、目透かしから脱落した漆喰引掛りが多く残存しており、原型を留めていることから、引掛りに対して外力が働かず、そのまま抜け落ちたことが考えられる。漆喰引掛りの一部にも樹脂による変色が認められるが、その形状のまま硬化しており、目透かし部分との付着を裏付ける形跡は確認できない。

一方で写真 3-25 a)の左側、すなわち N2-A、N2-B は以前剥落した漆喰層を貼りつけた部分であるが、今回の加振では顕著な損傷は認められていない。また、貼り付け時に下地と干渉する一部の漆喰引掛りを除去しているので、漆喰の引掛りが全く無い部分が存在していることを勘案すると、小幅板の見付部分と漆喰層の接触面においては樹脂による十分な付着力を有していることを示しており、この範囲では樹脂による効果が認められた。



a) 剥落後の見上げ (N2-C 領域が剥落)

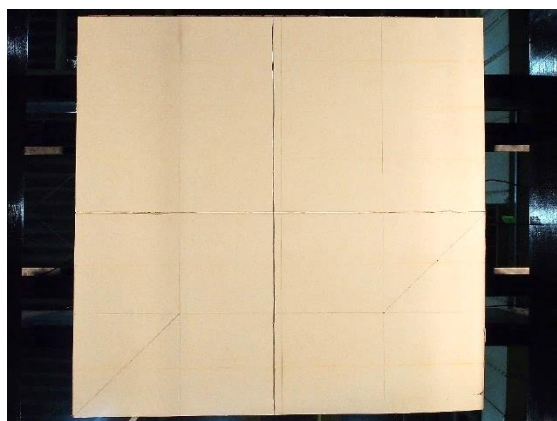
b) N2-C 領域の剥落片

写真 3-25 剥落後の N2 試験体の状態

#### (4) N1 試験体の振動実験の結果

##### (4.1) 加振前の状態

写真 3-26 に加振前の N1 試験体の状態を示す。加振前から N1-C 領域は剥離が進んだ状態であることに加えて、樹脂注入を行っていない領域であるので、N1 試験体の中では最も脆弱な部位であると筆者らは推測していた。また、反対側の N1-A および N1-D 領域のほとんどに補修を施しているため、加振前の段階では N1-2 断面に顕著な剥離は認められていない。加えて樹脂注入箇所の一部では漆喰層変形に対する矯正を兼ねた補修を行ったが、その影響とみられる仕上面へのひび割れはなく、外観上の故障は認められていない。



a) 加振前の見上げ



b) 加振前の N1-C 領域の剥離(無補修部分)



c) 加振前の N1-1 断面(一部無補修)



d) 加振前の N1-2 断面(全面補修)

写真 3-26 加振前の N1 試験体の状態



(4.2) 300gal・2.5Hz・120s (No. 8) から 700gal・4-10Hz・120s (No. 14) までの試験体の状態

写真 3-27 に 700gal・4-10Hz・120s (No.14) までの試験体の状態を示す。加振を開始し、段階的に加速度を大きくしていったが、900gal・5Hz・120s の入力波 (No.11) までは顕著な損傷は認められなかった。そのため、先に加振した N2 試験体と同様に、SWEEP 波を入力して、共振によって強制的に剥落させる方法を採用した。その結果、800gal・2-7.5Hz・120s (No.13) の加振後において、N1-C 部分の剥離幅が大きくなり始めた。一部では漆喰引掛りの漆喰層からの破断も認められ、漆喰層の剥離が内側方向へ進展しつつあることが認められた。

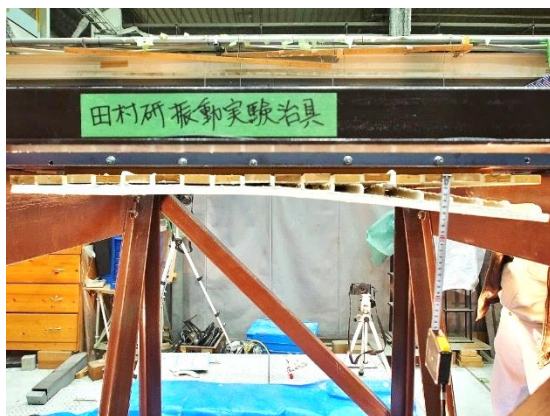
次に、700gal・4-10Hz・120s (No.14) を加振したところで、N2-C 領域の剥離はさらに進展し、N1-1 断面の中央部を始点に漆喰層が屈曲しだした。また、剥離の範囲は N2-C 領域の反対側の N1-D 領域まで進展した。



a) N1-C 領域の剥離幅の拡大



b) N1-1 断面の剥離の進展



c) 中央部から屈曲しだした N1-1 断面



d) 剥離が N1-D 領域へ拡大

写真 3-27 700gal・4-10Hz・120s (No. 14) までの試験体の状態

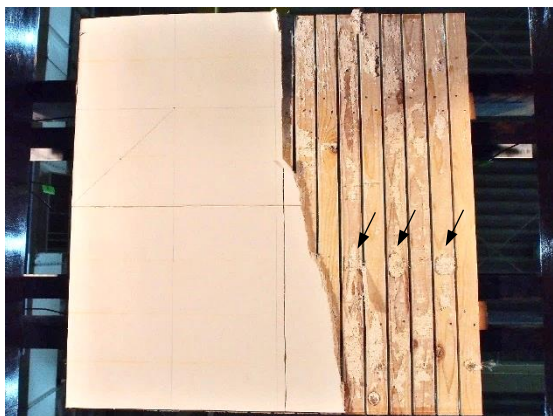


#### (4.3) 980gal・5Hz・120s (No. 15) を入力した際の状態

写真 3-28 に剥落後の N1 試験体の状況を示す。先述の SWEEP 波の入力の結果、試験体の固有周期が約 5Hz と判明し、振動台の最大出力である 980gal を 120 秒間入力した。5Hz の波を入力したのは 2 回目であるが、先の SWEEP 波によって剥離が進展しており、加振開始後すぐに漆喰層の剥離部分が上下に激しく揺すられ、大きく剥落して落下した。剥落は元々剥離していた N1-C 領域から補修を施している N1-D 領域まで波及し、補修部分も含めて損傷を受けた。

N1-C 領域ではあらかじめ設けた切欠きに沿って漆喰層が破断したが、N1-D 領域では一部で切欠きの無い部分から破断していた。この部分には穿孔注入を行った補修穴が位置しており、剥落面積の抑制に効果を示した。N1-D 領域の剥落した部分において、写真 3-28 a)における矢印の部分にも穿孔注入を施しており、樹脂が浸透・硬化したとみられる漆喰が小幅板に残存していた。

この注入位置に相当する部位を剥落片で確認すると、写真 3-28 b)に示すように、穿孔した形跡は認められたが、樹脂の浸透を裏付ける漆喰の変色や硬化部分は確認されなかった。つまり、N1-C 領域の剥落に引きずられる形で、漆喰層内部における樹脂の浸透・未浸透の界面で漆喰が破断して剥落したと考えることができる。



a) 剥落後の見上げ (N1-C・D 領域が剥落)

b) N1-C・D 領域の剥落片

写真 3-28 剥落後の N1 試験体の状況

#### (4.4) 天井部材における樹脂の浸透とその効果、補修工法の適用について

剥落を起こした樹脂注入部分では、注入部分に対して半径 20mm 程度の浸透にとどまっており、樹脂の浸透が想定以下であったことがわかった。このことより、漆喰層と小幅板の界面の空隙を埋め、接着することを本補修工法の主眼としている以上、漆喰層の剥離幅が顕著に大きい場合には、樹脂が浸透せずに硬化、もしくは漆喰と小幅板に全量浸透してしまい、界面を埋めるほどの樹脂が供給されなくなることが考えられる。これらの改善策としては、漆喰と小幅板の界面に樹脂を充填できる程度にまで樹脂を増やすことが考えられるが、樹脂の漏出が懸念事項となってくるので、樹脂の粘度を高めて界面の空隙内に留まらせることが必要と考えられる。

また、両試験体における剥落性状の共通点として、無補修の漆喰層の剥落に引きずられる形で補修部分が剥落したことが挙げられる。つまり、顕著な剥離がもともと生じている漆喰層を補修した部位や、無補修の部位をトリガーとする剥離・剥落の進展を抑制する効果は限定的といえる。一方では、剥落片の漆喰引掛りを除去したうえで貼り付けて再使用した漆喰層に損傷が認められなかったことや、写真 3-28 a)のに示す N1-D 領域の如く、補修部位の手前で漆喰層が破断する結果も勘案すると、樹脂による付着力の向上、剥落抑制の効果は認められる。以上より、補修を実施した部位であっても、既存部材の物性や劣化程度に大きな影響を受けることは明確である一方で、剥離・剥落のトリガーとなる部位を中心とした補修を実施すれば、部材全体の付着力を底上げできると考えられる。それには、予防保全的な考えのもと、既存部材の健全度評価によって脆弱な部位を的確に判断し、何らかの修繕が必要と思われる場所には適切な処置を施すことが肝要であり、それが建造物における構造部材・非構造部材を含めた広義的な安全性につながると結論付ける。

### 3.6 岩手銀行旧営業室天井への補修工法の実証化記録

#### 3.6.1 岩手銀行に実施した補修工法の概要

図 3-15 に補修施工の基本的な流れ、図 3-16 に今回施工した補修部分の概念図、表 3-24 に岩手銀行の補修施工で使用した材料・機材を示す。本補修工法は木摺り漆喰天井部材の小幅板に、下地側（天井裏）から漆喰層の半分程度まで約  $\phi 10\text{mm}$  で穿孔し、浸透性のアクリル樹脂を注入し、小幅板と漆喰の界面に浸透させ、両者を固着・一体化させるものである。施工作業のほとんどは天井裏から実施することができる上、仕上面側に補修の痕跡は残らないため、仕上げの外観を損なうような影響を生じさせる可能性が低く、既存部材の保存性を高めたまま補修を行うことが可能である。穴を埋める際には、既調合漆喰と樹脂を同量混合した充填材（以下、パテ）を用いて、小幅板と漆喰を繋ぎ止める、あと施工アンカーに似た機能を付加するので、小幅板と漆喰の接触面における平面的な固着と、パテによる点的な拘束力が相まって、剥落への抵抗性を向上させると考えられる。また、補修穴および天井の支持材を互いに麻紐で締結することで、左官天井の剥落限界に対する冗長性を持たせることが可能となっており、岩手銀行では、下弦材に麻紐を締結する方法を採用した。

なお本工法は、左官材料の塗り直しを伴う工事と比較して、仕上材の硬化、乾燥時間を確保する必要が無いことに加えて、天井部材の劣化状況によっては、仕上側の空間（居室側）を部分的に使用したまま施工を行うことが可能であるため、改修時における建造物の運用上の制約が少ない点も特徴である。

一方で、補修中は施行者が仕上面の状況を確認しにくい点もあるので、仕上面側に目視観測の人員を配置し、常に補修施工者と連絡を取り合い、仕上面に異常が発生した際には速やかに作業を中断できるように留意しながら工事を実施した。

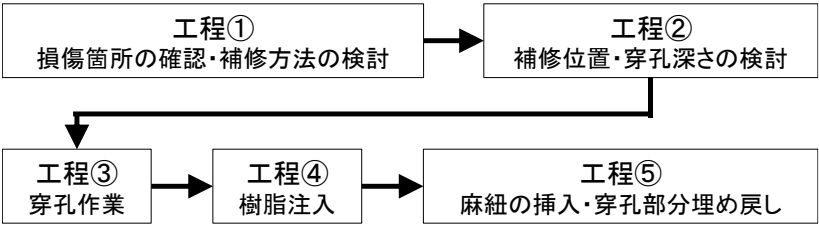
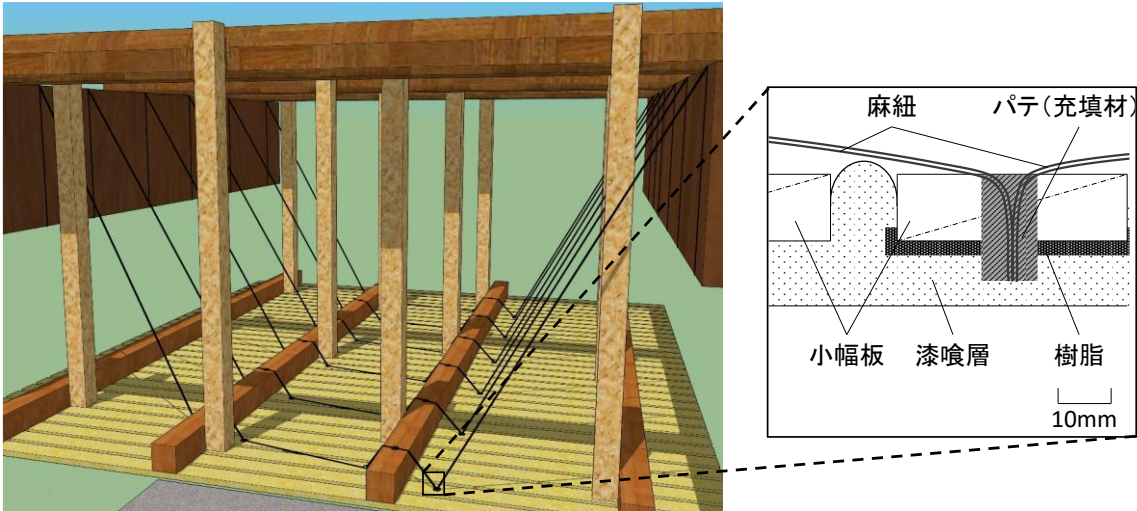
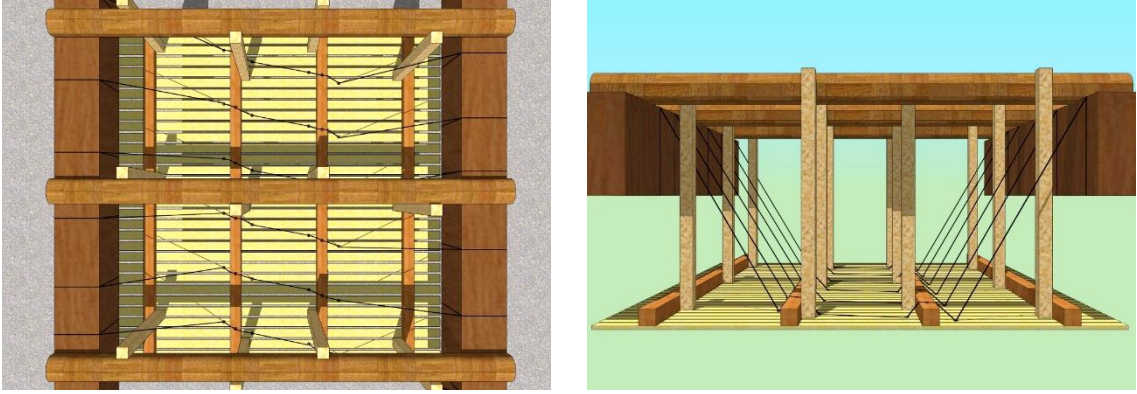


図 3-15 事前調査～補修施工の基本的な流れ



a) 補修部分の断面



b) 見下げ図

c) フトコロ側から見た図

図 3-16 岩手銀行における補修部分の概念図

表 3-24 岩手銀行の補修施工で使用した材料・機材

工程	材料・機材	数量	用途・内容
①	レーザー墨出し器	1 台	仕上面のひび割れ位置の測定
	レーザーポインター	2 本	
	水糸	2 巻	下地へのひび割れ位置のマーキング
②	チョーク	5 本	穿孔予定位置のマーキング (除去可能なものを使用)
	φ8mm カラーシール	2 セット	
③	電動ドリル	1 台	電源に限りがある場合を考慮して、充電式が好ましい
	φ10mm フォスナービット	5 本	
	電動回転ヤスリ	1 台	穿孔部内壁を研磨し、バリの除去、凹凸の調整を行う
	フレキシブルシャフト	1 本	
	球型研磨ビット	2 本	
	手持ち集塵機	1 個	穿孔部内外の木くず、漆喰カスを除去
	ブロアーブラシ	1 個	
④	アクリル樹脂	注入分	主剤：硬化剤＝100:4（質量比）
	ノギス	1 本	穿孔部深さの測定
	接着剤用注射器 (先端外径 4mm)	工区分 (13 本)	最大容量が 30~50ml 程度のものを使用（1 区ごとに使い捨て）
	シリコンゴムチューブ (内径 4mm)	2m	20cm 程に切断し、注射器に繋ぎ、穿孔部に挿入して樹脂を注入
⑤	麻紐（6 本撚り）	2 巻	補修部位ごとに適当な長さに切断
	ステープラー	2 個	麻紐の仮止めに使用
	パテ（充填材）	注入分	アクリル樹脂：既調合漆喰＝1:1（質量比）の混合物
	薬さじ	2 本	パテの穿孔部への流込みに使用
③④	トランシーバー	1 組	下地・仕上面間の通信に使用
④ ⑤	電子ばかり	1 台	計量範囲が 1~500g のもの
	養生シート等	-	施工現場の汚損防止
	ウエス	-	
	使い捨てカップ	-	樹脂・パテの移動に使用
全て	照明類 (懐中電灯、ヘッドライト、スタンドライト等)	-	施工場所の暗い部分、電源に限りがある場合を考慮して、充電式が好ましい



### 3.6.2 岩手銀行旧営業室における実施工の流れ

#### (1) 穿孔位置の検討と部材へのマーキング（図 3-2・工程②）

図 3-17 に旧営業室天井・小屋裏の見下げ図を踏まえた補修の詳細、表 3-25 に岩手銀行天井部材補修の実施工の手順、表 3-26 に天井補修における各工区の工程表を示す。今回は天井が大面積であること、ひび割れ部分を補修することで、崩落を発生させる要因に抑制が可能であること、費用と工期を短縮する必要があること、照明工事を途中に挟んだ 2 週間程の工期で施工を行うため、全面積 180m<sup>2</sup>のうち、ひび割れに沿った局所的な範囲 21m<sup>2</sup>に補修を行う方法とした。樹脂の仕上面への浸出や穿孔時のダメージを抑制するため、ひび割れの直上は避け、原則として、ひび割れの位置に最も近い野縁の辺縁部とした。これには、野縁部分およびその辺縁は目透かしの上部が野縁によって塞がれており、塗られた漆喰が上部にはみ出すことがなく、引掛りが脱落しやすい脆弱な部分の付着力を改善させる目的もある。穿孔位置は合計 153 箇所を選定し、チョークやカラーシール等の除去できるものを用いてマーキングした。

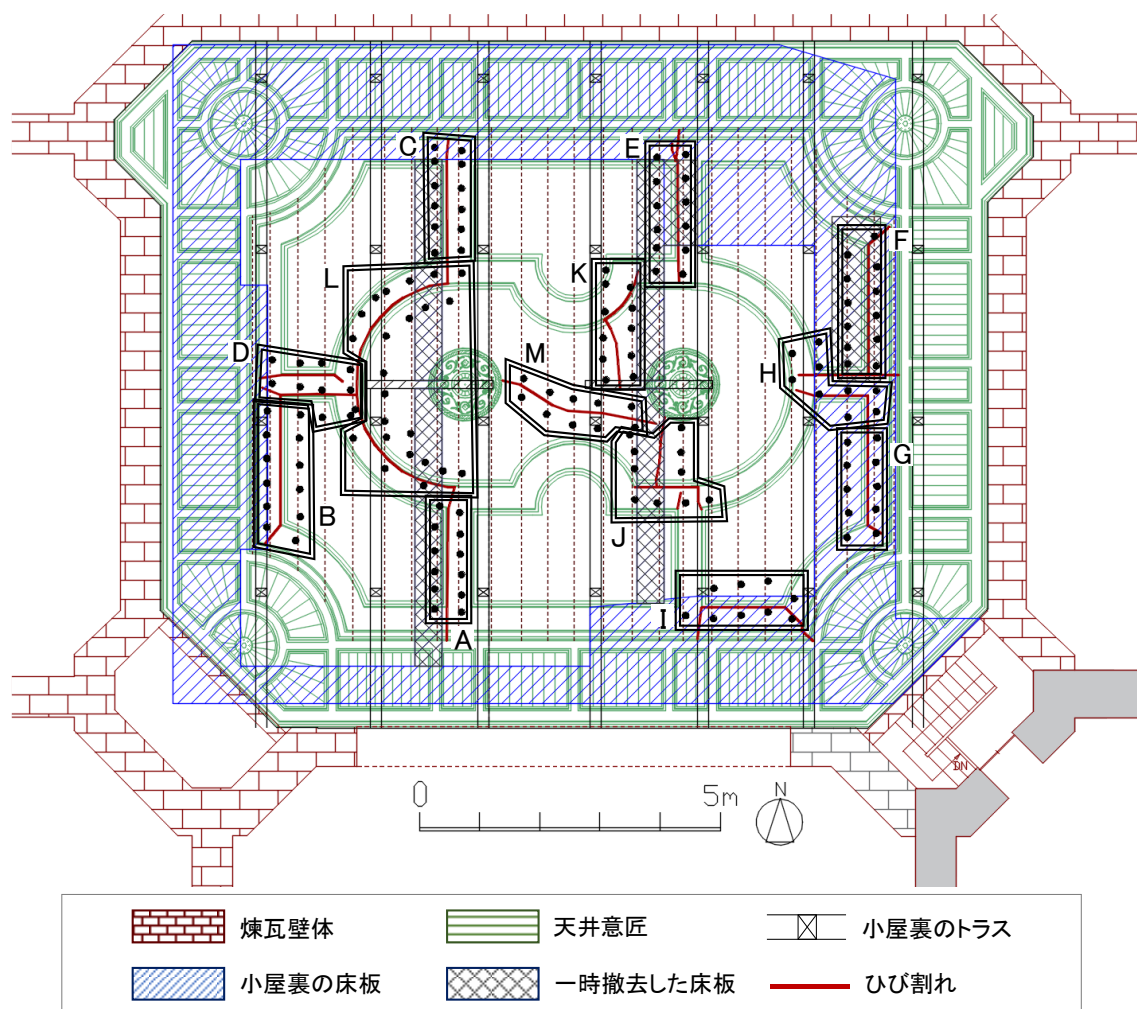


図 3-17 旧営業室天井・小屋裏の見下げ図を踏まえた補修の詳細

表 3-25 岩手銀行天井部材補修の実施工の手順

内容		仕上面側	天井裏側	工程
穿孔作業	穿孔位置の検討	選択した補修方法で樹脂注入用の穴が必要な場合、その位置をあらかじめ下地にチョーク等でプロットする。穿孔・樹脂注入の際に、ひび割れの拡大や樹脂の滲出が懸念されるため、穿孔位置はひび割れの直上を避ける。		②
	穿孔深さの検討	確認した部材の厚さを基に、穿孔深さを検討する。例えば、補修方法①の穿孔深さの基準は、小幅板厚+漆喰塗り厚×0.5 とする。同じ建造物、同じ空間の天井でも下地や漆喰の厚さに差異がある可能性があるため、穿孔部位ごとに深さの検討が必要な場合もある。		
	穿孔状況の評価	穿孔位置の直下にて、仕上面の状況を確認する。ひび割れの発生・拡大等の異常があった場合は速やかに作業を中断できるように天井裏側との連絡手段を確保する。	小幅板のめくり上がりや漆喰層の貫通に注意しながら、所定の深さまで穿孔を行う。この際、仕上面側に配置した状況確認班と常に連絡を取り合い、異常が認められた場合は速やかに作業を中断する。また樹脂の浸透に影響が出るため、穴内外に残存する削りカスをブロワーや掃除機で除去する。	③
補修処理	1 次注入	ひび割れなどから樹脂が滲出する懸念がある場合は、天井裏と連絡を取り合いながら、仕上面の状況を確認する。	1 回目の樹脂を注入する。注入量は、穿孔した穴の体積と同量とする。穿孔時と同様に、仕上面側に配置した状況確認班と常に連絡を取り合い、異常が認められた場合は速やかに作業を中断する。	④
	2 次注入以降	1 次注入と同様に、天井裏と連絡を取り合いながら、仕上面の状況を確認する。	浸透状態は穴内部の樹脂の光沢を目視で確認し、底部の露出をもって浸透終了とみなす。終了した穴から 2 次注入を行うが、1 次注入から 60 分経過後までには浸透状態に関わらず全ての穴へ 2 次注入を行う。その際も穴体積と同量の樹脂を準備するが、穴から溢れ出る場合はその時点で注入を中断する。樹脂の浸透が早い場合や小幅板の浮きが目立つ場合は、3 次注入も同様の方法、注入量で実施する。	
	麻紐の挿入	注入終了後も樹脂は浸透を続けているため、終了後 10 分程度は仕上面の確認を続行する。	樹脂注入後、速やかに麻紐を差し込む。この際、麻紐はひび割れを跨ぐ配置とし、樹脂が硬化するまで粘着テープやステーブラーを用いて仮止めを行う。	⑤
	充填剤注入		樹脂と漆喰を同質量ずつ混合した充填材で麻紐を固定しつつ穴を埋戻す。	
	麻紐の締結		充填剤の硬化後、挿入した麻紐を、天井の支持材(小屋組や梁)に締結する。	



2016年2月												
工区	2		3	4	5	6	7	8	9~21			
	足	穿										
A	足	穿	締									
B			足	穿	樹	パ	解					
C						足	穿	樹	パ	解		
D			足	穿	樹	パ	解					
E								足	樹	パ	解	
F								足	樹	パ	解	
G												
H												
I												
J								足	穿	樹	パ	解
K								足	穿	樹	パ	解
L1								足	穿	樹	パ	解
L2								足	穿	樹	パ	解
M								足	穿	樹	パ	解

工 程

記号と色

足

穿

樹

パ

解

締

穿孔と樹脂注入は、仕上面側からの高所作業車による観測が必要なため、照明器具との干渉が懸念される工区(L,K,M,J)の一部は、樹脂注入までの工程を先行して実施した

2016年2月												
工区	22	23		24	25	26~28	2016年3月					
		足	穿				1	2				
A												
B												
C							足	穿	樹	パ	解	締
D												
E							足	穿	樹	パ	解	締
F		足	穿	樹	パ							
G	足	穿	樹	パ	解	締						
H	足	穿	樹	パ	解	締						
I	足	穿	樹	パ	解	締						
J							足	穿	樹	パ	解	締
K							足	穿	樹	パ	解	締
L1							足	穿	樹	パ	解	締
L2							足	穿	樹	パ	解	締
M							足	穿	樹	パ	解	締

表 3-26 天井補修における各工区の工程表

## (2) 仮設吊り足場の架設

本補修工法は穿孔作業や樹脂注入が主となるため、作業は下地面に近い位置で実施することが望ましい。一方で、今回施工した岩手銀行は、旧営業室天井裏のフトコロが 800mm あり、現状の床板からは作業の難しい部分があったため、簡易的な単管吊り足場を設けて作業性を向上させることとした。

図 3-18 に吊り足場の概念図、写真 3-29 に施工現場における足場板上での施工の様子と体勢を示す。先述のとおり、現場での設置の前に実大試験体を作製したうえで足場形状の検討を行い、門型の足場を基本形状として数基用意し、施工個所の各部材の配置に合わせて形状を変えて架け替える方針となった。一方で、既存の床板が多く設置されており、可能であれば一時的に撤去したうえで施工を行うが、大断面を持つ根太や、部材が強固に締結されている場合は撤去が困難なため、その際の施工は吊り足場の上に伏せる体勢を強いられるため、良好な施工環境とはいえない難い部分もある。

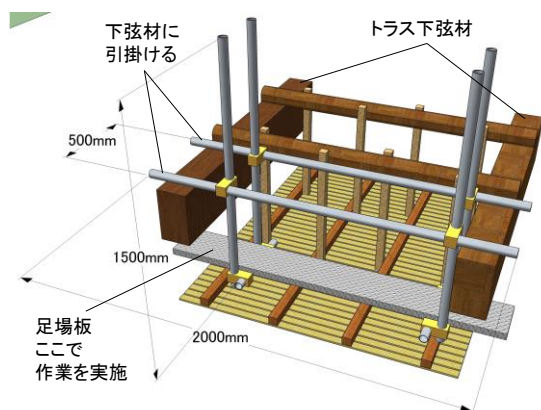


図 3-18 吊り足場の概念図



a) 施工作業の補助員



b) 伏せた体勢



c) しゃがんだ体勢

写真 3-29 施工現場における足場板上での施工の様子と体勢

### (3) 施工領域の工区分割 (図 3-2・工程②)

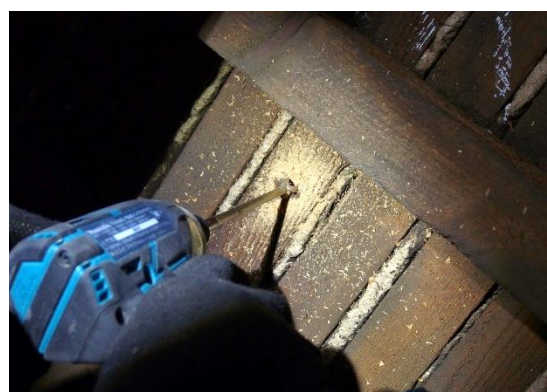
図 3-17 に旧営業室天井・小屋裏の見下げ図を踏まえた補修の詳細を示す。ひび割れは床板の直下にも位置しており、原状復帰が容易と思われる部分の床板のみを一度撤去し、それ以外の箇所は床板の下に潜り込んで施工を行うため、補修箇所によって施工の難易度が変化した。そのため、補修領域を A-M の 13 工区に分割したうえで、床板が番線で固定してあるため容易に撤去・組立てができ、かつ作業が行いやすいと予想された西半分の工区 (A,B,C,D,L) から先に施工を開始することとし、作業の習熟度を考慮した技能者の負担低減を図った。

### (4) 下地側からによる小幅度への穿孔作業 (図 3-2・工程③)

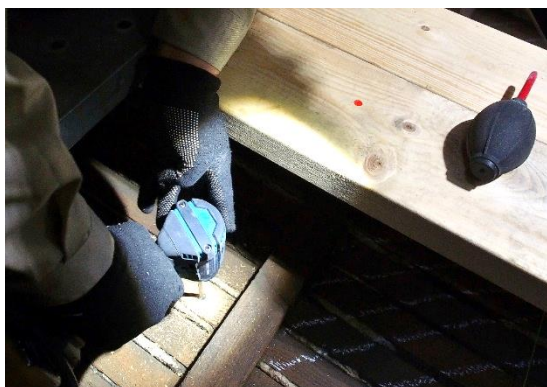
写真 3-30 に穿孔作業の様子を示す。小幅度のめくり上がりや漆喰層の貫通に注意しながら、小幅度に所定の深さまで穿孔を行った。穿孔中の穴深さを認識するため、こまめにドリルビットを引き抜いて穴内部の様子を確認した。その際、樹脂の浸透に影響が出るため、穴内外に残存する削りカスをブロワーや掃除機で除去する。また、穿孔を繰り返すとドリルビットが過熱するため、予備のビットを数本用意しておき、定期的に付け替えて冷却しながら作業を行った。



a) 穿孔箇所のマーキング (カラーシール)



b) フォスナービットでの穿孔



c) ブロワーで削りカスを除去



d) 穿孔終了後の樹脂注入穴

写真 3-30 施工現場における足場板上での施工の様子と体勢



## (5) 小幅板への樹脂注入および麻紐挿入 (図 3-2・工程④)

表 3-27 に工区別のひび割れ長さ、穿孔数と樹脂注入量、写真 3-31 に樹脂注入の様子を示す。樹脂の配合率は主剤 100 に対して硬化剤 4 (質量比) とし、約 60 分で硬化するように調整した。穿孔が終了した部分から順次樹脂の注入を行うが、注入は注射器で行い、1 回の注入量は穴体積と同量とし、浸透状態は目視で確認する。穴底部の漆喰が露出したら浸透終了とし、同様の量・方法で 2 次、3 次注入を行うが、樹脂の浸透が遅く穴から溢れる場合は注入を中止する。樹脂の注入後、速やかに麻紐の挿入を行う。挿入方向はひび割れを跨ぐような配置とし、樹脂が硬化するまでは粘着テープやステーブラー等で仮止めを行った。

また、穿孔作業および注入作業を通して、漆喰仕上面のひび割れの増加や、樹脂の浸出等の可能性を考慮して、何らかの異常が認められた際には速やかに作業を中断できるよう、工程③④を実施する間は施工箇所直下の仕上面側に、高所作業員を配置し、トランシーバーで連絡を取り合いながら互いの状況確認を行った。なお全工区において、ひび割れの増加や樹脂の浸出等の仕上面から視認できる異常は確認されていない。

## (6) 穿孔部分の埋め戻し・麻紐の締結 (図 3-2・工程⑤)

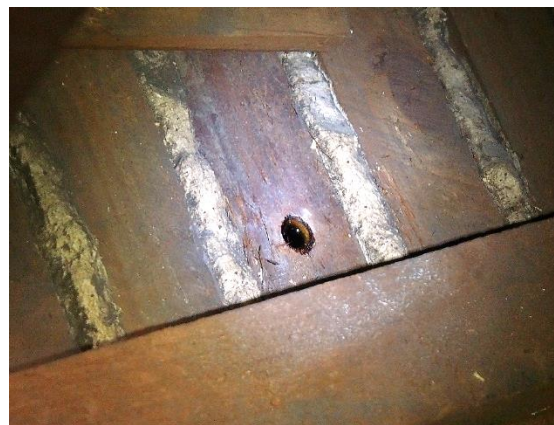
写真 3-32 にパテ充填と麻紐締結の様子を示す。最後の樹脂注入から 60 分以上経過した後、既調合漆喰と樹脂を同質量ずつ混合したパテを、薬さじを用いて穿孔部分の埋め戻しを行う。その際、一度に多量のパテを充填すると、穴内部に気泡が残る可能性があるため、穴の壁面を伝わせるように埋め戻した。また、挿入した麻紐に弛みがある場合は、野縁や小幅板等の木部の上で麻紐を捻って突っ張った状態にしたうえで、その部分にパテを被せて固着させた。最後に、ひび割れを跨ぐように配置された麻紐の端部を、天井部材を支持する最も基盤の部分に締結する。今回は、下弦材に麻紐を結び付けた。

表 3-27 工区別のひび割れ長さ、穿孔数と樹脂注入量

工区	ひび割れ長さ(mm)	穿孔数(箇所)	1 次注入(ml)	2 次注入(ml)	3 次注入(ml)
A	2550	12	32	31	80
B	2325	12	46	25	75
C	2250	12	41	30	77
D	3075	11	41	40	58
E	2850	12	28	23	80
F	2325	12	34	27	60
G	1800	10	28	20	42
H	2625	9	22	19	33
I	2775	9	39	27	48
J	2625	10	26	21	53
K	2175	11	39	25	73
L	5175	23	104	62	135
M	2925	10	30	23	37
合計	35475	153	510	373	851

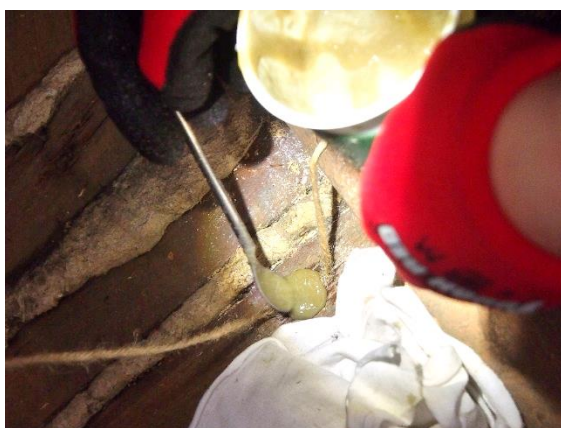


a) 注射器での樹脂注入



b) 1次注入終了後

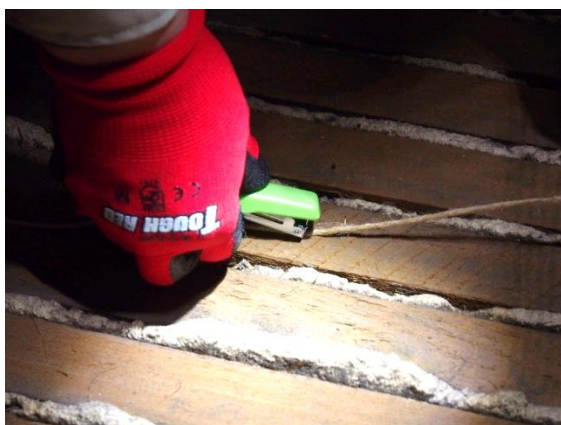
写真 3-31 樹脂注入の様子



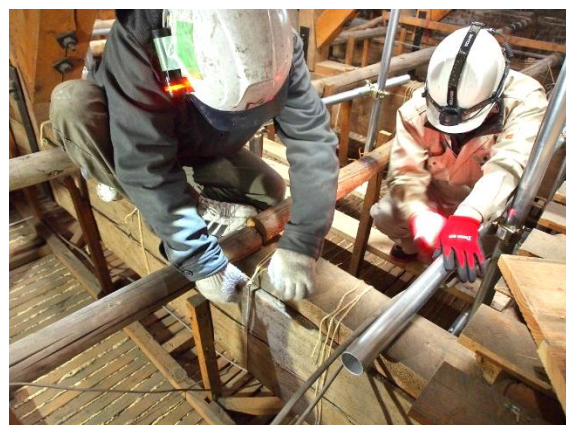
a) パテによる埋め戻し



b) パテ充填後（野縁上の麻紐も固着）



c) 麻紐のステーブラーによる仮止め



d) 麻紐の下弦材への締結

写真 3-32 パテ充填と麻紐締結の様子

### 3.6.3 実施工を踏まえて浮上した問題点・課題

本工法は仕上面の仕様を変更せずに部材の補修が実施できる利点がある一方で、本工法の要となる天井下地面への接近方法に課題が残されていると考えられ、フトコロの深さが 800mm であるので仮設の足場を設置する必要があった上、既存の吊木等の位置が不規則であるので、吊り足場の形状をその都度変更する仕様としたが、その際の足場の配置の検討や、安定性の確保に注意する必要があった。

また、既存の床板が多く設置されており、可能であれば一時的に撤去したうえで施工を行うが、大断面を持つ根太や、部材が強固に締結されている場合は撤去が困難なため、その際の施工は吊り足場の上に伏せる体勢を強いられるため、良好な施工環境とはいえない。これは施工場所が小屋裏の場合だけでなく、階上の床側から階下の天井を補修する場合も同様の問題が考えられるため、補修対象部材の下地側の状況から施工環境を想定したうえで、補修計画を策定する必要があるといえる。

一方で、穿孔・樹脂注入の工程では、仕上面側で高所作業車による安全確認が必要なため、仕上面側で実施されるほかの作業との兼ね合いに配慮が求められた。特に今回の施工は照明器具の設置工事と同時並行で実施したため、旧営業室天井にシャンデリアが取り付けられた後では、高所作業車と干渉する可能性があったため、穿孔・樹脂注入の工程を全工区に渡って先行して実施した。

このように、施工上で発生した不具合に対しては現地建物の仕様や改修工事の状況に応じて施工の工程や方法を柔軟に変更できることに加えて、天井部材の劣化状況によっては、補修施工時の建造物における運用上の制約を最低限に抑えることができる部分も本工法の利点といえ、樹脂の粘性・硬化時間・強度、機材の運搬性を含めて、補修工法の技術面・運用面共に比較的自由度の高い手法となっていることが確認できた。







## 謝辞

本論文は、筆者が工学院大学建築学部建築学科田村研究室に学部 3 年次のセミナー生として所属した 2013 年以降、約 10 年間に渡り取り組んだ、木摺り漆喰天井の歴史、工法、力学的特性に関する一連の研究成果をとりまとめたものです。

工学院大学建築学部建築学科生産分野 田村雅紀教授には、卒業論文、修士論文、そして博士論文に至るまで、終始あたたかい励ましをいただきながら、多大なるご指導・ご鞭撻を賜りました。筆者が大学 1 年の時、コンクリートに関する疑問を訊きに赴いたことが田村先生との最初の関わりでした。建築学に関してまだぼんやりとしたイメージしか持っていなかった筆者の拙い質問にも楽しそうに答えてくださり、建築学の裾野の広さや、その根底にあると言っても過言ではない建築材料の世界の面白さを実感するきっかけをいただきました。研究室に所属した以降も、田村教授の持ち前のパワフルさで筆者を含めた学生達を牽引し、時に楽しく、時に厳しく、高い目標を掲げてさらに厳しくなる時もありましたが、建築材料や研究に対する熱意、知識、発想の必要性、実験データのまとめ方や視野を広く検討する姿勢、論文における表現手法などを教えていただきました。また、大学院修士課程修了後も常に気をかけていただきつつ、人生の先輩として、学術的な話だけでなくキャリアや人間関係などの数多き悩みに対しても親身になって寄り添ってくださり、筆者が今後社会で生き、多くの方々と関わってゆく中での考え方や心構えを多く示していただきました。ここに記して心より感謝申し上げます。

本論文の審査にあたり副査をお引き受けいただいた、工学院大学建築学部建築学科生産分野 遠藤和義教授、工学院大学建築学部建築学科構造分野 河合直人教授、工学院大学総合研究所 後藤治教授、工学院大学建築学部建築学科生産分野 鈴木澄江教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科 清家剛教授には、貴重なお時間を割いてご精読いただき、数多くのご指導及びご助言を賜りましたこと、深く御礼申し上げます。

遠藤和義教授には生産分野の観点から、不確実性要素の多い歴史的建築物の保存活用に対して、リスクマネジメントや安全な破損形態などを含めて考察することへのご示唆をいただき、本論文をより深い展開とする上での的確なご助言をいただきました。

河合直人教授には木造建築及び構造的な観点から、木摺り漆喰天井の木造吊り下地を含めた耐震性を評価する上での妥当性や、本研究を踏まえた今後の検証事項などの心強いご指導をいただきました。

後藤治教授には総合研究所教授としてのお立場、および歴史的建築物の保存活用を数多くご担当なされてきた観点から、木摺り漆喰吊り天井の力学的特性や健全度評価等の有用性を俯瞰いただき、本研究をより実用的に昇華させるための貴重なご指導をいただきました。

鈴木澄江教授には建築材料の観点から、経年した天井部材と新規作製した試験体における力学的特性の再現性や各パラメータの影響に関する鋭いご指摘や、経年部材の健全度評価全体における本研究の位置付けなど、今後の展開を見据えたご助言を多くいただきました。

清家剛教授には、非構造部材の耐震性における数多くの調査研究をなされてきた観点から、不確実性要素が多いながらも知見は少なかった木摺り漆喰天井の健全度評価について、研究構成や位置付け、実際の健全度評価に生かすための指針など数多くのご助言、ひいては本論文が今後、木摺り漆喰（左官仕上げ）天井の研究を行ううえでの道標としての側面も持たせられるようなご示唆をいただきました。

本研究で扱った実試験体の採取をはじめとする各種資料のご提供やヒアリング、調査の遂行にあたっては、実建物の関係者各位のご助力無くしては成し得ることができませんでした。

本論文第 5 章以降で取り扱った実建物については、対象建物の管理者、関係者の皆様には実験・研究打合せ、記載内容のご確認などといった数多くの議論のお時間を頂戴し、大変貴重なご意見とご指摘を賜りましたこと、心より御礼申し上げます。

また岩手銀行の天井改修にあたっては、保存修理委員長でもあった工学院大学総合研究所 後藤治教授（当時、工学院大学建築学部建築デザイン学科歴史分野 教授）をはじめ、長岡造形大学 津村泰範准教授（当時、株式会社文化財保存計画協会 主任研究員）、株式会社樹 丸山紘明氏、株式会社岩手銀行の関係者各位には、筆者の大学在学時からお力添えをいただき、今回の論文執筆においても資料提供や温かいお声がけをいただきました。

本研究は、力学的特性等の検証が不足していた木摺り漆喰吊り天井に対し、材料だけでなく、構造や歴史などの各分野からのアプローチを行うことを目指しました。その過程で様々な方からお知恵やご支援を頂きながら、多岐に渡る研究を実施することができました。

工学院大学建築学部建築学科構造分野 山下哲郎教授および同研究室の大学院生皆様には、下地接合部の許容耐力計算や天井試験体の振動実験、ならびに試験装置の操作方法などにおいて、大学在学中から今日に至るまで多大なるご助言、ご助力をいただきました。

株式会社あじま左官工芸の関係者各位には、伝統的な仕上工法を用いた天井試験体を安定した水準で施工いただいただけでなく、漆喰調合や練り混ぜの技術・技能、左官工法の現状など、数多くの貴重なご助言をいただくことが出来ました。

はち工房 八文字雅昭氏には、木製吊り下地の試験体作製にあたり、実験条件に関連する筆者の細かい要望にご対応いただくとともに、木材加工や施工に関して多大なるご支援をいただきました。

鈴木建塗工業株式会社 鈴木光博士には、長年に渡る左官職人のご経験や、左官構法の変遷をテーマに博士論文をご執筆された観点から、木摺り下地の変遷調査で悩む筆者に対して、多くのご示唆や温かいご助言を賜りました。

東北大学大学院工学研究科 松本直之助教（当時、東京大学大学院 博士課程）には、近代木造建築の壁工法と耐震性能について研究されていた観点から、筆者の大学在学中から木摺り漆喰工法の力学的特性や損傷事例について多くの議論を交わし、また貴重なご意見をいただきました。

惜しみないご助力を頂いた皆様に、深く感謝申し上げます。

筆者の現在の勤務先であります、職業能力開発総合大学校 基盤ものづくり系 山崎尚志准教授をはじめとする多くの皆様には、今回の学位取得の機会や、研究を取りまとめるための貴重なお時間を頂戴しただけでなく、研究や執筆で思い悩む筆者を終始気に向け、温かいお言葉をかけていただきました。厚く感謝申し上げます。

また、筆者の大学院修士課程修了後に入社した株式会社ノザワ 技術本部開発部 細田吉大氏をはじめとする皆様には、社会人のあり方のみならず建設業の基本を教えていただきながら、大学などとの関係を続ける機会も与えていただきました。研究職の道を諦めきれずに退職する運びとなった際も、激励のお言葉と共に送り出していただき、現在も関係を継続できているのは、ひとえに皆様のあたた

かいお人柄によるものと思います。同社勤務時代の経験やご縁は、本研究の遂行には不可欠でした。本当にありがとうございました。

実験やデータ分析、学会発表、論文投稿などにあたり、田村研究室の大学院生であった吉田さくらさんをはじめ、多くの大学院・学部学生の皆さんからご助力を頂戴しました。

一般財団法人建築保全センター・工学院大学客員研究員 清水候二博士には、実験遂行や結果分析、歴史的建築物における構工法や修繕のあり方など、広範囲に渡るご助力、ご助言を賜りました。

一級建築士事務所 かねまき・こくぼ空間工房・工学院大学非常勤講師 金巻とも子博士には、論文執筆や発表など学位取得における相談に乗っていただき、終始温かいご支援を頂戴しました。

工学院大学 阿部道彦名誉教授（当時、工学院大学建築学部建築学科 教授）には、筆者が工学院大学に建築学部一期生として入学、修士課程を修了、そして学位取得に至るまで、終始温かいお言葉やご指導を賜りました。

常日頃の研究活動におきましても、田村研究室のみならず大学内、学会など様々なおいて、筆者の在学中から今日に至るまで、多くの先生、研究員、先輩、同期、後輩の皆様からのご助力ならびに示唆に富む意見交換をさせていただきました。改めて感謝申し上げます。

また、様々な分野で忙しく活躍しながらも、何かあれば駆けつけてくれたり、文章の書き方で相談に乗ってくれたり、議論を重ねたりと、多くの学びや刺激を与えてくれ、大変な時期も共にいてくれた友人の皆さんには非常にお世話になりました。ありがとうございました。

最後に、仕事を辞めて大学へ戻る、研究職になる、教員になる、博士を取るなど、新しい働き方や立場としてチャレンジしていきたいと伝えた時も、温かい言葉によって長きにわたり支え続けてくれた家族に感謝を伝えたいと思います。ありがとうございました。

本論文により、筆者がこれまで実施した木摺り漆喰天井に関連する成果を一度纏めたかたちとなりましたが、もとより非才の致すところ、その過程で様々なご指摘をいただき、本研究をより発展させるための様々な課題が出てまいりました。研究や執筆に悩んでいた時分、多くの先生方から「博士取得はゴールではなくスタートだ」とお声がけいただき、今まさにそれを痛感しております。歴史的建築物の保存と安全性の確保に関する研究は、今後も筆者のライフワークとして進めていき、それを皆様のご指導、ご支援の恩返しとさせていただけばと考えております。今後とも、何卒よろしくお願い申し上げます。

令和5年12月4日

岡 健太郎

