

## 論文要旨

### コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する研究

金子 樹

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象としては、中性化や塩害、アルカリシリカ反応、凍害、化学的侵食などがある。このうち、塩害とは JIS A 0203「コンクリート用語」では、コンクリート中の塩化物イオンによって鋼材が腐食し、コンクリートにひび割れ、剥離、剥落などの損傷を生じさせる現象と定義される。塩害において劣化因子となる塩化物イオンは、あらかじめコンクリートの材料が有している初期塩分と構造物の供用中に外部からコンクリート中に浸透する外来塩分がある。前者により生じる内在型の塩害は、1986 年に導入された塩分総量規制により、除塩していない海砂の使用が禁止されたことやコンクリート材料に由来する塩化物イオン量が一般に  $0.30\text{kg/m}^3$  以下とされたことから、近年ではあまり見られない現象である。

一方、外来塩分とは海岸地域における海からの潮風による飛来塩分や寒冷地域などで道路に散布される凍結防止剤に由来する塩化物イオンである。これらの塩化物イオンによる外来型の塩害では、コンクリートの表面に付着した塩化物イオンがコンクリート中に浸透・拡散し、鉄筋位置まで到達することで上記と同様に鉄筋の腐食が生じる。そのため、建設時には健全であったコンクリートに生じる経年劣化のひとつであり、近年でも劣化が懸念される地域では対策が必要とされている。また、このような地域では、二酸化炭素の浸透・拡散に起因し劣化の過程が類似する中性化と比べても、外来型の塩害による劣化は著しく激しい。

このような劣化に対して、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性とは、日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS 5 と略記）では、広義の概念で「劣化作用の環境下において建築物および部材が要求性能を維持存続できる能力」と捉えられており、計画供用期間の級として短期（およそ 30 年）から超長期（およそ 200 年）までの 4 段階を規定し、この期間中において構造安全性、耐火性、使用性などの性能を確保し続ける必要があるとしている。

そして、JASS 5 や日本建築学会の調査設計指針において、外来型の塩害が懸念される場合の設計手法として、コンクリートに必要とされる塩化物イオンの浸透抵抗性について実環境を想定して定めることが望ましいとしている。しかし、自然環境において塩化物イオンの浸透抵抗性を評価するには長期間の屋外暴露試験が必要なこと、短期間に試験室で塩化物イオンの浸透促進試験を行うには標準化

された JIS などの試験方法がないこと、また、経年による塩化物イオンの浸透・拡散性状を評価するにあたり不明な点が多いことなど、技術的な資料の整備が十分でないのが現状である。

このような背景のもと、本研究は、実験および既往の研究によるデータのとりまとめから、外来型の塩害を想定したコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状および塩化物イオンの浸透促進試験における諸条件の影響および試験方法やその評価方法について一連の検討による成果をまとめたものであり、本論文は第 1 章から第 8 章で構成されている。

第 1 章「序論」では、研究の背景として近年では懸念される塩害はコンクリートの外部から塩化物イオンが浸透・拡散する外来型であること、また、このような塩害に対して評価を行うための技術的な資料が不足していることを述べ、本研究の目的および構成と概要を示し、関連する用語を定義した。

第 2 章「塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する既往の研究」では、関連する学会である日本建築学会の JASS 5 および土木学会のコンクリート標準示方書について、塩害を受けるコンクリートに対するこれまでの仕様書・示方書の改定の経緯、現行版での取扱いを整理し、また、既往の研究から塩化物イオンの浸透・拡散性状についてとりまとめを行った。

これより、各関連学会ではいずれも Fick の 2 次方程式の解析解である拡散方程式（以下、拡散方程式と略記）を用いて塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する耐久性の評価を行い、評価においては拡散方程式の特性値である表面塩化物イオン量および拡散係数を年数の経過にかかわらず一定としていることを明らかにした。

また、耐久性の評価について、その精度向上のためには拡散方程式の特性値の経時変化や浸透促進試験と実環境との関係が明確でないこと、その要因として各種の試験方法や条件が試験結果に影響をおよぼすものの統一されて用いられる促進試験法がないことが課題であることを明らかにした。さらに、この塩化物イオンの浸透促進試験について、土木学会規準および国外における規定や既往の研究で用いられた試験方法に関するとりまとめを行い、これらの試験方法における課題の抽出を行った。

第 3 章「コンクリート中に浸透した塩化物イオンの拡散性状」では、コンクリート中に存在する塩化物イオンのコンクリート中における拡散性状に関して検討を行うため、あらかじめ浸透促進試験でコンクリート中に外部から塩化物イオンを浸透させた水セメント比 0.55 の普通コンクリートを用いて、乾湿シリーズ、乾燥シリーズ、湿潤シリーズおよび中性化シリーズの計 4 シリーズ、10 パターンの環境条件について実験を行った。実験では、環境温度（50℃、20℃）や浸漬水の NaCl 濃度（3%の塩水、水道水）、乾燥中の浸透面の処理（開放、封かん）、コンクリートの中性化の影響を実験水準とした。

また、いずれの環境条件も 7 日を 1 サイクルとして乾湿シリーズの乾燥・湿潤状態を切り替えるタイミングで試験体の質量変化を測定し、5、10 および 20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

その結果、コンクリート中における塩化物イオンの拡散性状は、コンクリートに出入りする水がおよぼす影響が大きいことを明らかにした。また、コンクリート中への水の浸透がない場合において、コンクリートの乾燥による水分の蒸発では塩化物イオンはコンクリートの内部に残留し、塩化物イオンの濃度差により拡散するが、その程度は水の移動に伴う拡散よりも小さいことを明らかにした。

第 4 章「乾湿繰返しによるコンクリートの吸水性状と塩化物イオンの浸透・拡散性状」では、第 3 章で明らかにしたように、コンクリート中の水の移動が塩化物イオンの浸透・拡散に大きく影響することから、いずれも 1 サイクルを 7 日としてサイクル中の乾燥・湿潤日数を変化させた 4 パターンの乾湿繰返し条件により、コンクリートにおける吸水性状と塩化物イオン量の関係について実験を行った。実験は、水セメント比 0.5 および 0.6 の普通コンクリートを用いて、サイクルパターン以外の促進条件は環境温度 50℃、浸漬水の NaCl 濃度 3%で共通とし、乾燥・湿潤状態の切替え時における試験体の質量変化および促進 10、20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

実験結果から、コンクリート中に浸透する水の量とコンクリート中に蓄積する塩化物イオン量には相関関係があり、浸漬水の NaCl 濃度を 3%とした場合にはコンクリートに浸透した水が含む塩化物イオンの約 65%がコンクリート中に蓄積されることを明らかにした。また、拡散方程式における特性値は経時により変化する傾向を示し、このような経時変化を考慮することで、より実状に近い耐久性の評価を行うことが可能であることを明らかにした。

第 5 章「仕上塗材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果」では、一般に鉄筋コンクリート造建築物では外装仕上げにより建物の美観および耐久性能の確保を図ることから、仕上塗材を対象とした塩化物イオンの浸透抑制効果について実験を行った。仕上塗材は紫外線などの影響による経年劣化を生じることから、建物の供用中には改修が行われその性能が維持される。そのため、本章ではこのような改修を想定した仕上塗材を対象とし、水セメント比 0.55 の普通コンクリートに対して、4 種類の仕上材とこれらの仕上材を中性化抑制効果が小さいとされるリンシに重ね塗りした計 7 条件について、環境温度 50℃、浸漬水に NaCl 濃度 3%とした乾燥 3 日、湿潤 4 日の乾湿繰返しによる浸透促進試験を行い、乾燥・湿潤状態の切替え時における試験体の質量変化および促進 10、20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

その結果、仕上材を施したコンクリートであっても塩化物イオンの浸透・拡散性状は仕上材なしの

場合と同様に拡散方程式による評価ができ、仕上材の種類による塩化物イオンの浸透抑制効果は中性化の抑制効果とおおよそ類似するが、仕上材の表面の形状も影響すると考えられることを明らかにした。しかし、仕上材の施工にあたり、リシン下地がある場合には仕上材の表面が砂壁状となることからコンクリート中に浸透する塩化物イオン量は仕上材単体よりも大きくなることを明らかにした。

第 6 章「促進および屋外暴露環境における塩化物イオンの浸透・拡散性状」では、日本建築学会およびコンクリート工学会を中心にコンクリートの品質や塩化物イオン量の測定方法などの条件から選定された、促進試験 18 報および屋外暴露試験 7 報の既往の研究結果から、促進および暴露試験において拡散方程式から算出される特性値である拡散係数および表面塩化物イオン量に関する検討を行った。

その結果、促進試験の方法は乾湿繰返しまたは塩水浸漬に二分され、乾湿繰返しでは試験期間にかかわらず、いずれの特性値も一定であることを示した。その他の試験方法では、拡散係数は塩水浸漬による促進試験および屋外暴露試験において、また、表面塩化物イオン量は屋外暴露試験において試験期間の経過に伴い変化し、やがて一定の値に収束することを明らかにし、一定の値となる期間は屋外暴露では拡散係数では約 4 年、表面塩化物イオンでは約 4.5 年であった。また、これらの特性値はコンクリートの水セメント比 0.4~0.6 の範囲では水セメント比による違いは明瞭ではなく各試験方法において同様な値を示すこと、同一水セメント比における拡散係数は促進試験においては屋外暴露試験の約 10 倍程度大きい範囲に分布することを明らかにした。

第 7 章「塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験における試験条件」では、第 6 章で示したように促進試験では乾湿繰返しよりも塩水浸漬の方が屋外暴露試験をより模擬した試験結果を得ることができることの検討結果に基づき、第 2 章で整理した塩水浸漬による促進試験における課題である、浸漬水の塩水濃度、試験期間および評価のための測定範囲について、これまで検討に用いてきた実験および既往の文献のデータから検討を行った。

その結果、浸漬水の塩水濃度が高いほど表面塩化物イオン量は大きくなるが、拡散係数には影響しないこと、促進試験期間を 182 日とした場合の耐久性の評価は 365 日よりむしろ安全側となる結果を得ることを明らかにした。また、塩化物イオン量の測定範囲は、コンクリートの表層部を含め、浸透面から 40~50mm 程度とすることで精度よく評価できることを明らかにした。

第 8 章「結論」では、第 2 章から第 7 章における研究の成果を要約し、総括と結論を述べた。