

水和物の物理化学的性質を考慮したセメント系硬化体の 塩化物イオン移動性状評価

佐々木 謙 二*

Evaluation of chloride transport in cementitious materials based on physical and chemical properties of hydrates

by Kenji SASAKI

コンクリート構造物の性能照査型設計・維持管理
体系への移行が進み、長期性能予測手法の高精度化
が求められている。耐久性を定量的に評価し、要求
性能を満たす範囲内において自由な材料や工法の選
択を可能とすることは、コンクリート構造物への信
頼性の向上やコンクリート分野における研究開発の
促進につながるものと期待される。また産業副産物
の有効利用や環境保全の観点から、混合セメントや
混和材など多種多様なコンクリート材料の利用が進
められている。このように材料の多様性を有し、耐
久性という長期性能を評価しなければならないコン
クリート構造物においては、各現象のメカニズムを
解明し、モデル化を行って、劣化シミュレーション
により劣化予測を行うことが必要となってきた。
コンクリートに関わる各現象を支配しているのは、
コンクリートを形成している水和物が主たるもの
であると考えられる。そのため水和物と各現象の
関係を解明することは、コンクリート内で生じて
いる現象の本質を理解することであり、劣化予測手
法の高精度化に資するものと考えられる。

そこで本研究では、コンクリート構造物の主要劣
化現象である塩害を対象に、水和物の物理化学的性
質を考慮したセメント系硬化体の塩化物イオン移動

性状評価手法の構築を目的に検討を行った。セメン
ト系硬化体中における塩化物イオンの移動現象は、
おおよそ拡散と固定化に大別されることから、本研
究においては拡散、固定化それぞれの現象を、水和
物の物理化学的性質を考慮することにより、材料・
配合に関わらず一律に評価できる手法の構築を目
指し、実験的に検討を行った。

第1章は、序論であり、本研究の背景を述べ、本
研究の目的および構成を示した。

第2章は、既往の研究と問題点であり、本研究に
関係する既往の研究を整理し、問題点の抽出を行い、
本研究の着眼点について示した。

第3章では、混和材および炭酸화가セメント系硬
化体の空隙径分布に及ぼす影響について検討を行っ
た。その結果、混和材の種類・置換率によらず、炭
酸化の影響により空隙径分布のピーク径が粗大化す
る傾向が確認された。特に、混和材を用いた場合
には、普通セメントのみの場合に比べ炭酸化後の粗
大化が著しい傾向が見られた。また、物質移動との
関連が深いとされている毛細管空隙量を用いて炭
酸化前後の空隙量の変化を検討した結果、普通セ
メントのみの場合には炭酸化により毛細管空隙量が
減少し、混和材を用いた場合には炭酸化により毛細管空

*新潟大学大学院自然科学研究科

現在 長崎大学工学部構造工学科

[新潟大学博士(工学) 平成21年3月23日授与]

隙量が増加する傾向が見られた。

第4章では、混和材および炭酸化がセメント系硬化体の塩化物イオン拡散性状に及ぼす影響について検討を行った。定常状態における塩化物イオン実効拡散係数を測定した結果、初期養生直後の拡散係数は、普通セメントのみの場合に比べ混和材を用いた供試体の方が小さくなった。そして、混和材置換率が大きくなるに従い拡散係数が小さくなる傾向が見られた。一方、炭酸化後の拡散係数は、普通セメントのみの場合に比べ混和材を用いた供試体の方が大きくなった。これは、初期養生直後とは逆の傾向であり、さらには混和材置換率が大きくなるに従い拡散係数も大きくなる傾向が見られた。結合材の種類ごとに毛細管空隙量と塩化物イオン拡散係数との関係を検討した結果、混和材置換率や炭酸化の有無によりそれぞれ異なる関係を示した。このことより、空隙量のみから塩化物イオン拡散係数を推定することはできず、屈曲度や収斂度なども拡散係数に大きな影響を及ぼしていると考えられたため、塩化物イオン拡散係数の測定結果より屈曲度や収斂度を逆算することを試みた。その結果、混和材の使用、炭酸化の作用により、屈曲度、収斂度が大きく変化し、それらの影響により拡散係数が大きく異なることが明らかとなった。

第5章では、水和物の物理的性質を考慮したセメント系硬化体の塩化物イオン拡散性状評価について検討を行った。そのための基礎的な検討として、主要水和物であるC-S-Hの化学組成(Ca/Si比)がC-S-Hの物理的性質に及ぼす影響を定量的に評価した。その検討結果を踏まえ、塩化物イオン拡散係数を空隙率、屈曲度、収斂度より推定するために、空隙率を水和物量と密度により、屈曲度を結合材体積と比表面積により、収斂度をC-S-HのCa/Si比により評価し、拡散係数を推定した結果、計算値は実験値と概ね一致した。推定精度を向上させるためには、水和生成物量を正確に把握し、各水和生成物の物性を明らかにする必要がある。また、混和材を用いた

場合の水和モデル並びに炭酸化モデルを構築することにより、結合材の種類、品質、置換率、材齢、異なる環境履歴によらず塩化物イオン拡散係数を予測する手法の構築が可能であると考えられる。

第6章では、混和材がセメント系硬化体の塩化物イオン固定性状に及ぼす影響について検討を行った。混和材の種類・置換率、水結合材比、材齢、混和材の品質により、自由塩化物イオンと固定塩化物イオンとの平衡関係が異なることを明らかにした。これは、両者の平衡関係が塩化物イオンを固定する水和生成物、特にモノサルフェート、C-S-Hの生成量と密接な関係があるためと考えられた。また、固定塩化物イオンを固相塩化物イオンと吸着塩化物イオンとに分離した場合、吸着塩化物イオンの占める割合が大きいことを示し、C-S-H生成量がモノサルフェート生成量に比べて著しく大きいことによると考えられた。

第7章では、水和物の化学的性質を考慮したセメント系硬化体の塩化物イオン固定性状評価について検討を行った。そのための基礎的な検討として、Ca/Si比がC-S-Hの化学的性質に及ぼす影響を定量的に評価した。即ち、Ca/Si比が1.5より大きい範囲においてはCa/Si比の増加により吸着塩化物イオン量は減少し、Ca/Si比が1.5より小さい範囲においてはCa/Si比の低下により吸着塩化物イオン量は減少することが明らかとなった。このことは、C-S-Hの比表面積と表面電位のバランスによるものと考えられた。さらに、C-S-HのCa/Si比を考慮した固定塩化物イオン量推定式を提案し、既往の推定式に比べて、精度良く評価できることを示した。

第8章は、結論であり、本研究で得られた成果をまとめた。

終わりに、本研究を進めるにあたり、熱心に御指導して下さいました佐伯竜彦准教授に心より謝意を表します。また、多くの有益な御教示を賜った大川秀雄教授、泉宮尊司教授、加藤大介教授に心より謝意を表します。