

熱力学システムを用いた長期暴露を含む塩化物浸透解析

東京大学大学院 学生会員 ○竹上浩史
 (株)コムスエンジニアリング 正会員 土屋智史
 東京大学大学院 正会員 石田哲也

1. 序論

鉄筋の腐食は構造物の性能低下を招くため、寿命予測やメンテナンス管理の観点から RC 構造物内部の塩化物浸透現象を把握することが重要であり、任意の環境条件・構造形状・使用材料特性等に応じて、精度よく評価することが望まれている。本研究では、筆者らが物理化学法則に基づいて構築し、要素レベルでの検証実験を経て提案しているモルタル/コンクリートの材料挙動を予測するモデル¹⁾を用いて、塩化物浸透解析の検証を行うことを主な目的とする。ここで、環境条件として、特解とみなすことができると考えられる海中環境下を選定し、長期間暴露されたコンクリート供試体の解析条件についてもあわせて検討する。

2. 解析手法とモデル化の概要

本研究で採用する解析手法は、各現象を厳密に取り扱った支配方程式を用いて実現象を予測する点に特徴があり、初期環境条件を与えるのみで、材料特性の挙動が予測される。塩化物に関しては、コンクリート中の塩化物を自由・吸着・固相塩化物の3種に厳密に分類し、移動・平衡則をモデル化している²⁾。現在も鋭意研究開発を進めている段階にあるが、普通セメント使用時においては、任意の水粉体比に適用可能なモデルがおおむね構築されつつある。

水セメント比の違いにより、細孔組織の空隙構造と連結特性が変化するため、セメント硬化体中の塩化物移動性状は大きく変化する。本手法は、非線形に変化する幾何学的な空隙構造と空隙の屈曲度合い、および塩化物平衡と移動抵抗性の非線形性を考慮した解析を行うことで、任意の配合条件に適用可能とするものである^{1),2)}。

3. 要素レベルでの検証試験

まず初めに、塩化物浸透期間を170日としたモルタル供試体を用いた要素実験を行い、本解析手法の妥当性を検証する。配合は、普通ポルトランドセメントを用い、W/C35%および55%、細骨材率50%とした。打設後1日で脱型し、28日間水中養生後、3%NaCl水溶液に所定期間一面浸漬させた。温度は、常温一定とした。図1の実験および解析結果より、精度よく実験結果を追跡できていることが認められる。

4. 実構造物レベルでの検証試験

次に、実構造物に対するモデルの一般性と有用性を確認することを念頭に置き、既往の実験結果を対象として比較・検討を行う。本モデルに対しては、実環境下における長期挙動に関し、これまで検証が十分でなかった。

本解析手法は材料の均一性を仮定し、粗骨材の影響を特に考慮しないものであるが、実際には、材料分離や密度差の影響等により、コンクリートの均一性を保つことが難しい。これまでの検討により、水セメント比50%および60%のコンクリート供試体においては、粗骨材の存在による塩化物浸透の障害効果と不均一性や遷移体形成効果はほぼ相殺し、見掛け上、粗骨材体積を除いたモルタル分の挙動のみを考慮すればよいことが示されている^{3),4)}。ここでも、対象実験の水セメント比であれば、粗骨材の影響や材料分離等は無視できるものとして、塩化物浸透現象を解析する。解析対象として、海洋環境下において行われたコンクリートの10年間の暴露試験⁵⁾のうち海洋中に浸漬した供試体(W/C50%)、および3%NaCl水溶液に500日間浸漬した供試体(W/C45%, 55%)⁶⁾を選択した。供試体の

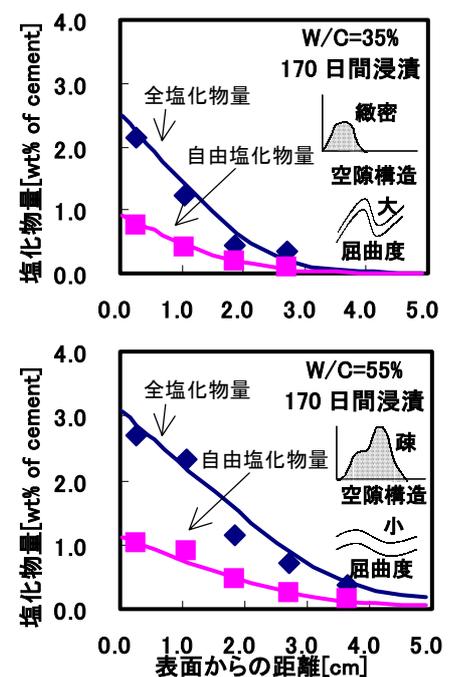


図1 実験と解析値の比較

キーワード：塩化物イオン、コンクリート供試体、海中養生、長期浸透解析

連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科 TEL 03-5841-6146

形状、大きさに違いはあるものの、いずれも一面からの浸透試験である。各々の配合および養生条件を表1に示す。

解析条件として、a)海中浸漬後は水和反応が進まないと仮定し、養生終了時点での空隙構造等が保持されるとする、b)長期に渡り水和反応が進み、空隙構造の変化を考慮する、の2種類を選定した。空隙形成・水和反応解析モデルは参考文献¹⁾の通りである。条件a)では、浸透方向に対して、一様な材料特性を定義していることになる。なお、海水中への水酸化カルシウムの溶出等による空隙構造の変化は考慮していない。解析結果を実験結果に合わせて図2に示す。

表1 コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 [kg/m ³]			
			W	C	S	G
①	50	48	166	332	847	935
②	45	39	185	411	663	1030
③	55	42	185	335	739	1017

① :14日間湿布養生→材齢50日まで気中乾燥⁵⁾
 ②,③:28日間封緘養生→材齢42日まで恒温恒湿室養生⁶⁾

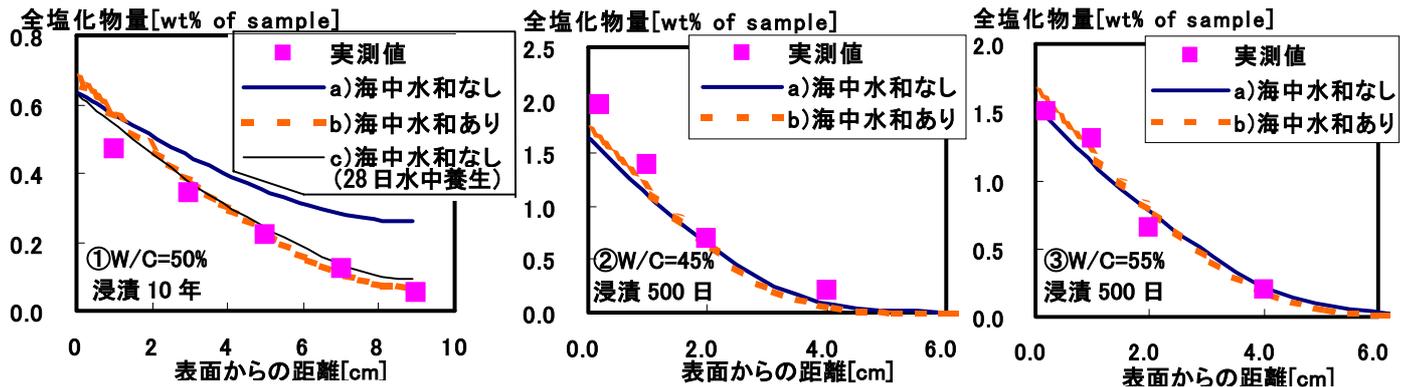


図2 実験値と解析値の比較

図2より、長期間浸漬された供試体に対して、忠実に環境条件を再現した解析条件b)においては、精度よく実験結果を追跡できることが分かる。また、簡略化した解析条件a)との差は、シリーズ②、③ではほとんどみられなかったが、シリーズ①で大きく差が生じた。この原因として、①は湿布養生期間が14日間と短く、海水中に暴露する時点で、水和が十分に進行していないためと考えられる。そこで、新たな条件c)おおよそその水和反応が終了する期間(水和度約90%、28日間)水中養生をし、その後空隙構造などが保持されるとする、を設定した。その結果、図2にある通り、解析条件b)とc)の差は小さくなることが認められた。より実現に近いと想定されるb)で、わずかながら表面部に塩化物が多く、内部で少なくなる結果となっているのは、水和進行による組織の緻密化の影響である。

5. まとめと今後の可能性

海中環境下の塩化物浸透現象を精度よく求められることを示した。水和反応がほぼ終了した後の品質の変化は、工学的にはほぼ無視できることを示すと同時に、今回検討した水セメント比においては、コンクリートにおける材料不均一性について、見掛け上特に配慮する必要のないことも再確認できた。現在、高炉スラグ混入系に対する研究を継続しており²⁾、乾湿繰り返し環境下を含む任意の条件下に適用可能なモデルの拡張を行っている。今後もモデルの検証と実構造物への適用を継続する予定である。

参考文献

- 1) 石田哲也：微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム，東京大学博士論文，1999。
- 2) 竹上浩史，石田哲也，前川宏一：高炉スラグ微粉末を混入したセメント硬化体中の塩化物移動・平衡則の一般化，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，2002。（投稿中）
- 3) 丸屋剛：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析手法の構築，東京大学博士論文，1995。
- 4) 竹田博彦：コンクリート中における塩化物イオンの固定と移動，東京大学修士論文，2000。
- 5) 竹田宣典，十河茂幸，迫田恵三，出光隆：種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究，土木学会論文集，No.599/V-40，pp.91-104，1998.8
- 6) 枘田佳寛ら：コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，1988。