

論文 空隙壁面の電気的性状を考慮した拡散モデルによるモルタルの塩分浸透解析

高橋 佑弥^{*1}・Yogarajah Elakneswaran^{*2}・林 政典^{*3}・石田 哲也^{*4}

要旨: 混和材を用いた場合を含む, 多様な水和物性状をもつセメント硬化体へ塩分浸透モデルを適用する為に, 空隙壁面の電気的性状を考慮した塩化物イオン拡散モデルを構築し, 既往の熱力学連成解析システムの塩化物イオン浸透モデルに実装した。壁面電位と吸着塩分量, 自由塩分量に応じた, 塩分移動可能閾空隙半径を定式化した後, モデルの検証のために, モルタルの塩水浸せき試験の再現解析を実施した。異なる混和材が用いられたモルタルの塩化物イオン浸透状況へのモデルの適用性を検討するとともに, それらを複合的に用いた三成分系モルタルについても, より現実的な分布形状を再現することを示した。

キーワード: 塩化物イオン, 拡散, 電気二重層, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 三成分系セメント

1. はじめに

近年, 震災復興等をはじめとして, 迅速かつ大規模なインフラ整備の要求が高まっている。その際, 良質な材料の供給不足や厳しい施工・供用環境など高度な技術が求められる条件下で高耐久なコンクリート構造物を建設することが要請されている。そのような技術的課題の解決に対する方策の一つとして, 高炉スラグ微粉末(以下, BSF とする)や, フライアッシュ(以下, FA とする)等, 混和材の使用が考えられる。塩害に着目すると, 混和材を用いた塩分浸透抵抗性の高いコンクリートについて, 材齢が経過しても塩分分布の変化しない結果が報告される¹⁾など, その特徴的な塩分遮蔽性能が注目されつつある²⁾。高耐久なコンクリートの達成において, 混和材を用いることで向上する塩分浸透抵抗性を適切に評価することが肝要であると考えられるが, これら塩分浸透性状を規定するメカニズム, 特に混和材を用いた場合に支配的となり得る数 nm オーダーの非常に小さな空隙中の塩分浸透性状については, 未だ議論の途上にあるといえる。

以上のような背景の中, 著者らは東京大学コンクリート研究室で開発されてきた熱力学連成解析システム DuCOM³⁾に実装されている塩化物イオン移動モデルの高度化に取り組んできた。既報⁴⁾では, 普通ポルトランドセメント(以下, OPC とする)の水和硬化体を対象に, 塩分移動に関する閾空隙半径 r_{thre} を考慮することで, 極微小空隙中の塩分浸透現象をモデル化し, 低水結合材比(以下, W/B とする)のセメント硬化体中の塩分浸透挙動をこれまでよりも精度よく再現することに成功している。

本研究では, 空隙壁面の電気的性状に着目して, 既存の塩化物イオン拡散モデルをさらに高度化し, 種々のキ

ャラクターを有するセメント硬化体の塩分浸透挙動を微視的機構に立脚して予測することを試みた。

2. 塩化物イオン拡散モデルの修正

2.1 既往モデルの概要

はじめに, 既往の熱力学連成解析システム³⁾に実装されている塩化物イオン拡散モデルについて述べる。本研究で用いる熱力学連成解析では, 塩化物イオンの拡散・移流, 液相と固相のイオン平衡が考慮されており, 塩化物イオンに関する質量保存則は以下式(1)で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \cdot S \cdot C_{cl}) + \text{div} J_{cl} - Q_{cl} = 0 \quad (1)$$

ここで, ϕ : 空隙率, S : 飽和度, C_{cl} : 空隙水中の塩化物イオン濃度[mol/l], J_{cl} : 塩化物イオンの流束[mol/m²/s], Q_{cl} : 単位時間当りの自由塩化物イオン増減分[mol/m³/s]である。このうち J_{cl} は以下式(2)で表される。

$$J_{cl} = -(W_{cl} \cdot \delta \cdot D_{cl}) \nabla C_{cl} + W_{cl} \cdot \mathbf{u} \cdot C_{cl} \quad (2)$$

ここで, W_{cl} : 塩分移動が可能な空隙水量[m³/m³], δ : 収斂度パラメータ, D_{cl} : 塩化物イオンの自己拡散係数[m²/s], \mathbf{u} : 空隙中の液状水流速ベクトル[m/s]である。 W_{cl} は, 気液界面存在半径 r_c [m]と塩分移動が可能な閾空隙半径 r_{thre} [m]の大小関係より, 以下式(3)で表される。

$$\begin{cases} W_{cl} = W - W_{thre} & (r_c > r_{thre}) \\ W_{cl} = 0 & (r_c < r_{thre}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで, W : 全液状水量[m³/m³], W_{thre} : 閾空隙半径以下の空隙とインクボトル空隙中の液状水量[m³/m³]であり, それぞれの水量は, 図-1 のように空隙分布中で表現さ

*1 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 (財)日本学術振興会特別研究員 PD 博士(工学) (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 特任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 工学部 社会基盤学科

*4 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

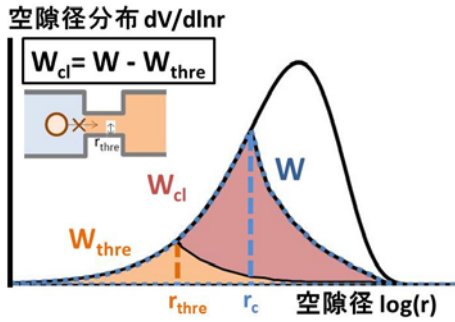


図-1 塩分移動に寄与する液状水量

れる。 r_{thre} の値は、既報⁴⁾において OPC を用いた実験結果に対する感度解析より一定値の 10nm を設定しているが、実際には空隙壁面を構成する水和物の性状によって r_{thre} は異なるものと考えている。例えば水和物のカルシウム-シリカ比 (以下、Ca/Si) が異なる場合には、表面電位が変化し、塩分移動が空隙壁面から与えられる影響の度合いが変化することで r_{thre} の値が変化し得る。

また、収敏度パラメータ δ は、以下の式(4)で表される。

$$\begin{aligned} \delta &= m \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \quad (m = 6.38, \text{ If } \delta \geq 1.0, \delta = 1.0) \\ \delta_1 &= 0.495 \tanh \left\{ 4.0 \left(\log(r_{cp}^{peak}) + 6.2 \right) \right\} + 0.505 \quad (4) \\ \delta_2 &= 1.0 - 0.627C_b + 0.107C_b^2 \end{aligned}$$

ここで、 δ_1 : 空隙の寸法変化と連結性に因る低減パラメータ、 δ_2 : 自由塩分と空隙壁面の電氣的相互作用に因る低減パラメータであり、 r_{cp}^{peak} : 毛細管空隙分布のピーク空隙径[m]、 C_b : 固定塩分量[% by mass of binder]である。

2.2 空隙壁面性状を考慮した塩化物イオン拡散モデル

(1)空隙壁面近傍の塩分移動に関する検討

空隙壁面の電氣的性状がイオンの移動に与える影響についての既往の検討を見ると、後藤ら⁵⁾は、セメント硬化体空隙壁面で形成される電気二重層内で電荷の正負によりイオンの移動性状が異なる事を提案している。例えば空隙壁面が正に帯電している場合には、電気二重層内には陽イオンは侵入できず、陰イオンのみが侵入できるとしている。また第二著者ら⁶⁾は、壁面の電位等の電氣的性状に立脚した塩分浸透モデルを提案しており、表面電位が負の場合には、デバイ長さの 5 倍程度の範囲で、塩化物イオンの移動に影響を与える可能性があるとしている。またモデル化の際には、自由塩分が水分子を連行し、移動単位として直径 3nm 程度のクラスター状で存在していることや、イオンの吸着層厚さを考慮することを基本としている。また、中村ら⁷⁾も、同様に表面電位に応じた塩分浸透に関して論じており、空隙壁面が負に帯電した場合には、電気二重層の範囲で塩化物イオンの浸透が制限されることが考えられるとしている。

以上を踏まえると、空隙壁面近傍の塩分移動について、空隙壁面の吸着層厚さ、電気二重層の影響、塩分の移動単位半径を考慮することが必要である。本研究ではこれ

らを考慮することで、壁面の電氣的性状に応じた塩分移動閾空隙半径 r_{thre} を算出し、様々な壁面性状を持つセメント硬化体について統一的に取り扱い可能な塩化物イオン拡散モデルの構築を試みた。

(2)壁面の電気性状を考慮した拡散モデル

以下、本研究で行ったモデル化について述べる。

まず、空隙壁面に吸着された塩分の層の厚さ T_{ad} [nm] について、以下式(5)のように定式化した。

$$T_{ad} = V_{cl} \cdot N_{cl} / (S_{cp} + S_{gl}) \cdot 1.0E + 9 \quad (5)$$

ここで、 V_{cl} : 吸着塩分粒子一つに占有される体積[m³]、 N_{cl} : 吸着塩分粒子数、 S_{cp} 、 S_{gl} : それぞれ毛細管空隙、ゲル空隙中の湿潤表面積[m²]である。 V_{cl} は本研究では (0.18E-9)³[m³]とし、 S_{cp} 、 S_{gl} は水分保持・移動モデルにより算定される値を用いた。吸着塩分粒子数 N_{cl} については、固定塩分量 C_b より以下の式(6)により求めた。

$$N_{cl} = \left[(C_b \cdot M_b / 1.0E + 2) \cdot (1.0E + 3) / M_{cl} \cdot N_A \right] \cdot R_{ad} \quad (6)$$

ここで、 M_b : 結合材量[kg/m³]、 M_{cl} : 塩化物イオンのモル質量(=35.45[g/mol])、 N_A : アボガドロ数(=6.02E+23)、 R_{ad} : 全固定塩分量中の吸着塩分量の割合である。 R_{ad} の値は第四著者らの既往の研究⁸⁾より、OPC の系、BFS を使用した系、FA を使用した系について、それぞれ 0.36、0.18、0.23 とすることとした。

続いて空隙壁面の表面電位について検討を行う。Fujita ら⁹⁾は、異なる Ca/Si を有する C-S-H に対して、 ζ 電位の計測を行っている (図-2)。本研究では、 ζ 電位と表面電位はほぼ同値であると考え、Fujita らの測定結果⁹⁾より、Ca/Si と表面電位 Ψ の関係を以下の式(7)により規定した。

$$\Psi_{0(Cl=0)} = 39.5 \cdot (C/S)^2 - 46.5 \cdot (C/S) - 5.18 \quad (7)$$

ここで、 $\Psi_{0(Cl=0)}$: 塩分量 0 の場合の表面電位[mV]、 C/S : Ca/Si である。 C/S の値は、既往の研究より、OPC の系¹⁰⁾、BFS を使用した系¹⁰⁾、FA を使用した系¹¹⁾について、それぞれ 1.8、1.55、1.5 とした。ここで設定した Ca/Si の範囲では式(7)で計算される $\Psi_{0(Cl=0)}$ はいずれも正の値を取る。また、第二著者ら¹²⁾の研究により、液相中塩化物イオン濃度と ζ 電位の低下について、図-3 に示す実験結果が示されている。実験¹²⁾では、塩分濃度 C_{cl} が 0 の時に ζ

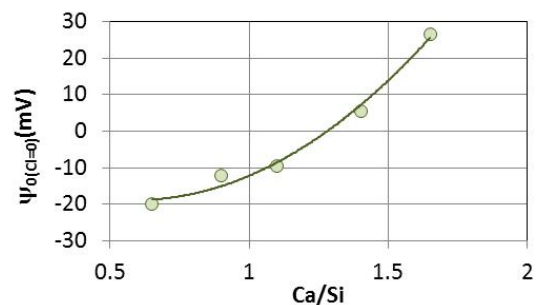


図-2 $\Psi_{0(Cl=0)}$ -Ca/Si 関係⁹⁾

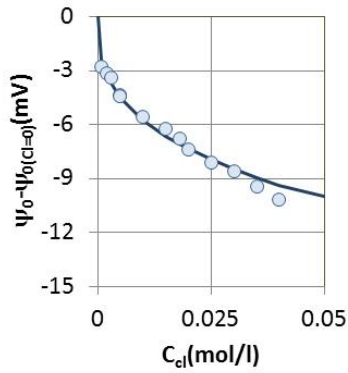


図-3 $(\Psi_0 - \Psi_{0(Cl=0)}) - C_{Cl}$ 関係¹²⁾

電位が0となるように Ca^{2+} 濃度を調整した系で測定が行われており、 C_{Cl} の増加により電位の変化が捉えられていると考える。本研究では、図-3 に示す結果より以下式(8)を設定した。

$$\Psi_0 = \Psi_{0(Cl=0)} - 29.37 \cdot C_{Cl}^{0.3544} \quad (8)$$

ここで、 Ψ_0 : 表面電位[mV]である。以上のように式(7)、式(8)によって Ca/Si と塩分量に応じた表面電位が定式化された。

次に、電気二重層の影響範囲について定式化する。過去の研究⁶⁾により、表面電位が負の場合にデバイ長さの5.0倍程度が塩化物イオンの移動に影響を与えることが提案されている。本研究でもこれに従い、電気二重層の影響を受ける範囲の厚さ T_{de} [nm] について、以下式(9)に示すように定式化することとした。

$$T_{de} = 5.0 \cdot L_{de} = 5.0 \cdot 1/3.288\sqrt{I} \quad (9)$$

ここで、 L_{de} : デバイ長さ[nm]、 I : イオン強度[mol/l]である。ここで、 I はセメント水和の状態や陽イオンの吸着量等により様々に変わる多種のイオン含有量によって変化する。しかし、0.50mol/l ほどの高い塩分濃度範囲では塩分濃度がイオン強度に対して支配的になることと、低濃度では表面電位が正であるため電気二重層が塩化物イオン移動に影響を与えないことから、現時点では I とし液相中塩分濃度 C_{Cl} [mol/l] を用いることとしている。今後、他のイオンの含有量を精緻に考慮することで、 L_{de} の計算精度を向上させる必要があると考えている。

以上より、壁面性状を考慮した塩化物イオンに関する閾空隙径を以下の式(10)、図-4のようにモデル化した。

$$\begin{cases} r_{thre} = T_{ad} + r_{cl} & (\Psi_0 \geq 0) \\ r_{thre} = T_{ad} + T_{de} + r_{cl} & (\Psi_0 < 0) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 r_{cl} : 自由塩分の移動単位半径(=1.5[nm])である。塩分量が小さく表面電位が正の場合には吸着層厚さ T_{ad} と塩分移動単位半径 r_{cl} により閾空隙半径 r_{thre} が決定され、

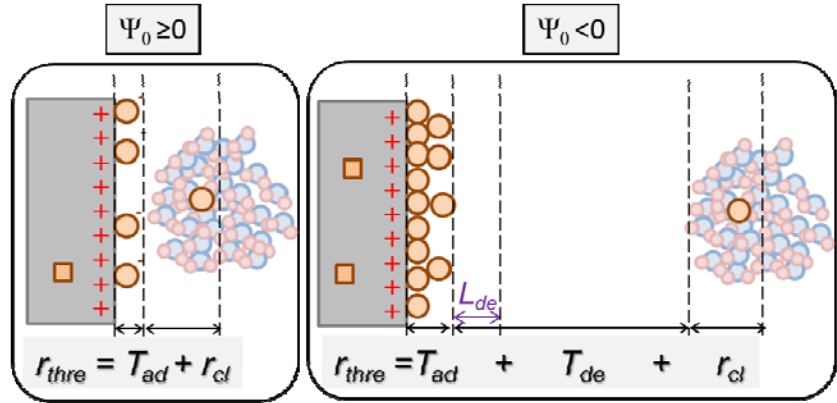


図-4 塩分移動可能閾空隙径 r_{thre} の定式化

塩分量が増えて表面電位が負となると T_{ad} と r_{cl} に、電気二重層の影響範囲 T_{de} も加わるとした。以上のような定式化により、セメント種類および塩分量に応じた壁面性状の変化を考慮した塩化物イオン拡散計算が可能になると考えた。

ここで、上記 r_{thre} の定式化と同時に、塩化物イオン流束式(式(2))を以下のように修正することとした。

$$J_{cl} = -(W_{cl} \cdot \delta_1 \cdot D_{cl}) \nabla C_{cl} + W_{cl} \cdot \mathbf{u} \cdot C_{cl} \quad (11)$$

これまで δ_2 によって経験的に考慮していた空隙壁面と自由塩分の電氣的相互作用による拡散量低減は、前述の壁面性状に応じた閾空隙半径モデルにより考慮可能と考え、収斂度パラメータを δ_1 のみとしたのである。

以後、式(10)および式(11)をそれぞれ閾空隙半径算定式および修正塩化物イオン流束式として用いることとする。

3. モルタルの塩水浸せき試験による検証

3.1 実験概要

構築したモデルについてモルタル供試体の塩水浸せき試験結果を用いて検証した。

複数の配合で、鋼製型枠を用いて $4 \times 4 \times 16$ cm の角柱モルタル供試体を作製した。試験に用いた材料の特性値を表-1に、供試体の配合および測定材齢を表-2に示す。表-2中 SP/B は高性能 AE 減水剤の添加量(結合材質量%)を示している。結合材種類は OPC100%(以下、N シリーズとする)、OPC60%+BFS40%(以下、BB シリーズ)、OPC85%+FA15%(以下、FB シリーズ)、OPC51%+BFS34%+FA15%(以下、NBF シリーズ)の4種類とした。N、BB シリーズは W/B を 20%、30%、40%、50%の4水準とし、材料として表-1中 OPC-1 および砕砂-1を用いた。FB、NBF シリーズは W/B を 40%と 55%の2水準とし、材料として OPC-2 および砕砂-2を用いた。単位体積中のセメントペースト体積をほぼ一定に保つために、細骨材の質量を一定とした。供試体は打込み後、1日脱型後に28日間水中養生を行った。養生終了後、浸せ

表-1 材料物性値

OPC-1	密度 3.15[g/cm ³], 比表面積 3400[cm ² /g]	OPC-2	密度 3.13[g/cm ³], 比表面積 3320[cm ² /g]
BFS	密度 2.88[g/cm ³], 比表面積 4430[cm ² /g]	FA	密度 2.23[g/cm ³], 比表面積 3940[cm ² /g]
砕砂-1	絶乾密度 2.60[g/cm ³], 吸水率 1.28%	砕砂-2	絶乾密度 2.53[g/cm ³], 吸水率 2.29%

表-2 試験体配合

	W/B(%)	単位体積重量(kg/m ³)					SP/B(%)	測定浸せき期間		
		W	C	BFS	FA	S		3ヶ月	1年	2年
N20	20	233	1165	-	-	1000	3.5	○	○	○
N30	30	293	976	-	-	1000	3.0	○	○	○
N40	40	336	840	-	-	1000	0.0	○	○	○
N50	50	369	737	-	-	1000	0.0	○	○	○
BB20	20	227	682	455	-	1000	3.0		○	
BB30	30	287	574	383	-	1000	0.0		○	
BB40	40	330	495	330	-	1000	0.0		○	
BB50	50	363	436	290	-	1000	0.0		○	
FB40	40	321	683	-	120	1000	0.0	○		
FB55	55	367	567	-	100	1000	0.0	○		
NBF40	40	317	404	269	119	1000	0.0	○		
NBF55	55	363	337	224	99	1000	0.0	○		

き面以外の5面に対してエポキシ被覆を行った。試験体の塩水浸せき試験時は、3%NaCl水溶液中に垂直に設置し、下面から塩分を垂直上向きに浸透させた。浸せき水の水位は供試体の浸せき面から7cmで一定とした。浸せき後、所定の浸せき期間で塩化物イオン分布を測定した。測定の際には、ディスクグラインダーを用いて供試体を1~3mmピッチで研削して粉体を順次採取した後に、電位差滴定装置を用いて全塩分量を測定した。

3.2 実験結果の再現解析結果

(1)N シリーズ

各材齢にて測定されたモルタル供試体の塩化物イオン分布を、既往モデルおよび修正モデルによる解析結果と共に、それぞれ図-4、図-5に示す。

実験結果を見ると、細かい間隔で塩分量を測定することにより、W/Bによる塩化物イオン分布の違いを明確に捉えることが出来ている。低W/B程、塩化物イオンの浸透深さが顕著に小さくなり、また材齢を経るに従い浸透深さの差も大きくなる。低W/Bセメント硬化体の極めて高い遮塩性能が観察された。更に、塩化物イオン分布の形状が、常に下に凸の形状ではなく、表面付近で上に凸の形状を取りうる事が示されている。但し、緻密な空隙構造を持つと考えられる極低W/Bの試験体でも、混和材を用いた既往測定¹⁾で見られるような塩分浸透の停滞は確認されていない。塩分浸透の停滞の要因は未だ明確ではないが、緻密な空隙構造のみだけではなく、混和材に特有の他の要因が停滞に寄与しているものと思われる。

実験結果を解析結果と比較する。W/B40%および50%に着目すると、既往モデルでは、2年材齢において塩分浸透深さで差が生じると共に、グラフの形状も異なっているが、修正モデルを用いた解析では、浸透深さと上に凸のグラフ形状の両者を再現していることがわかる。ここにモデル修正の有意性が示されている。W/B30%および20%に着目すると、既往モデル、修正モデル共に、3ヶ月浸せき期間では、概ね実験結果を再現しているものの、その後の浸せき期間では、塩分浸透深さを過大評価する結果となった。本研究では、 R_{ad} やC/Sの経時的な変化は考慮していないが、実際には例えばC/Sについて水和と共に変化することが知られている。それら経時的な水和物性状変化と低W/Cセメント硬化体の空隙構造形成モデルおよび液状水移動モデルについての再検証を含めて、更なる検討が必要であると考えている。

(2)BB・FB・NBF シリーズ

混和材を用いたモルタル供試体の塩化物イオン分布を既往モデルおよび修正モデルによる解析結果と共に、それぞれ図-6、図-7に示す。

BFSを用いたBBシリーズ(図-6, 7(i))について、実験結果を見ると、高いW/Bである50%でも塩分浸透深さは極めて小さく、BFSを混和することで、高い塩分浸透抵抗性を持っていることが改めて確認された。解析結果を見ると、既往モデルでは、W/B20%から40%で塩化物イオン分布に変化が見られておらず、実験にあるようなW/Bによる塩化物イオン浸透状況の違いを表現出来て

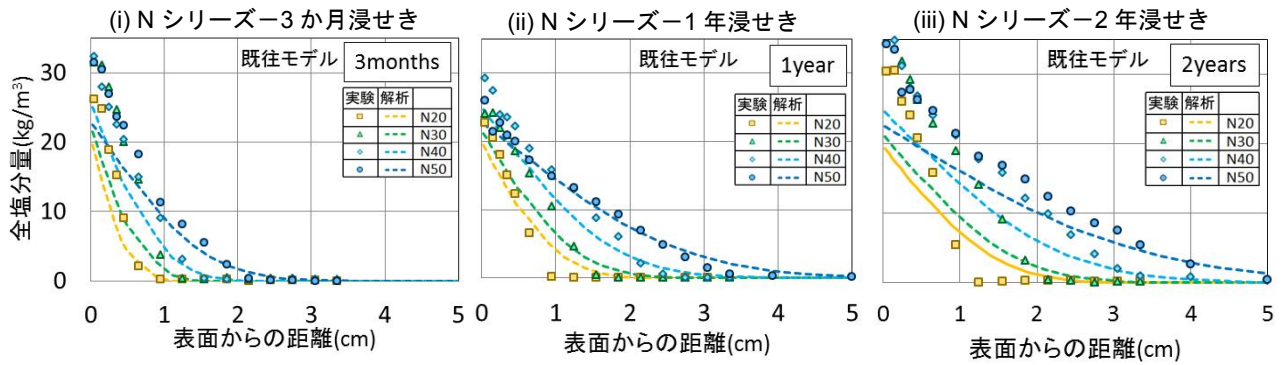


図-4 実験結果と既往モデルによる解析結果の比較 (N シリーズ)

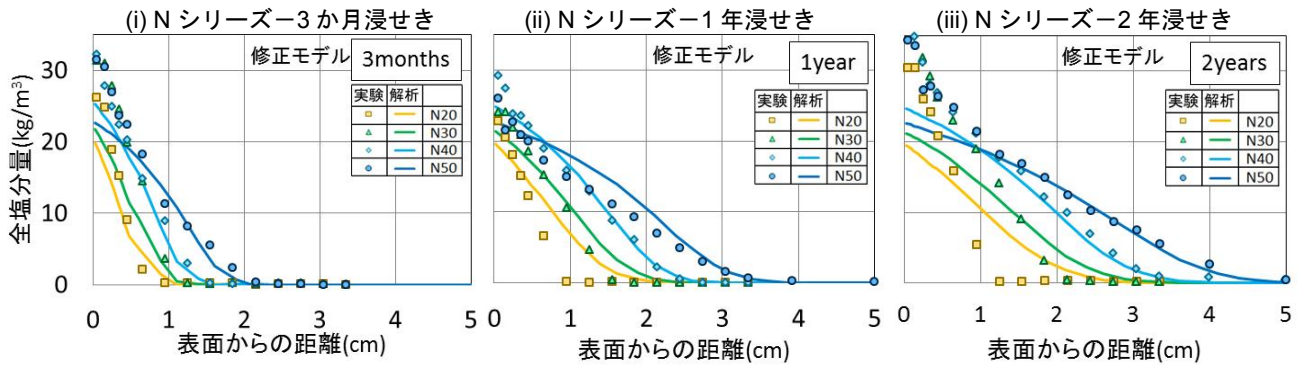


図-5 実験結果と修正モデルによる解析結果の比較 (N シリーズ)

いない。修正モデルでは塩分量に応じた閾空隙径を考慮することにより、若干ではあるが、W/B による挙動の違いを再現することができるようになっている。しかし、既往モデル、修正モデル共に塩分浸透深さは過大評価となっており、N シリーズ低 W/B と同様、長期的な水和物性状の変化を含めて更に検討が必要であると考えている。

FB シリーズ(図-6, 7(ii))については、塩分浸透深さに着目すると修正モデルは既往モデルに比べて塩分浸透深さを適切に再現していると思われる。既往モデルでは N シリーズと FB シリーズでほぼ同一の解析結果であったが、修正モデルでは水和物性状の違いを考慮に入れることで、FA が混和された水和物で得られる塩分浸透抵抗性の違いを考慮することが可能となった。

最後に BFS と FA を両方混和した三成分系モルタルである NBF シリーズの塩化物イオン分布について検討する。ここで、三成分系の R_{ad} や C/S については、既往の検討に乏しいことから、本研究では BFS を用いた系と FA を用いた系の平均値を暫定的に用いることとした。実験結果(図-6, 7(iii))について、N シリーズ(図-4, 5(i))と比較すると、三成分系セメントは比較的高い塩分浸透抵抗性を示していることがわかる。解析結果と比較すると、既往モデルでは、塩分分布が急激に立ち上がる形状を再現出来ていないが、修正モデルではそのような形状を表現できていることがわかる。本研究では、三成分系セメントの水和物のパラメータとして暫定的な値を用いたため、浸透塩分量について定量的な比較は控えるが、

今後、三成分系セメントの詳細な性状について検討することで定量的妥当性を高めることが可能であると考えている。

混和材を用いた試験体については、今後複数材齢での塩化物イオン分布の測定を通して、更にモデルの妥当性の検証を行う必要があると考えている。

(3)算出される塩分移動閾空隙半径について

本研究で行った実験の再現解析において、式(10)により算定される塩分移動閾空隙半径 r_{thre} を概観すると、 r_{thre} の値の範囲は、N シリーズ、BB シリーズ、FB シリーズでそれぞれ、約 1.5~2.5nm、約 1.5~4.5nm、約 1.5nm~6.0nm であった。これらの値は既往の研究^{5),6)}によるイオン移動境界空隙径の値と概ね相違ない値であり、10nm を設定していた既往モデルに比べて、微視的な諸現象を的確に捉えられているのではないかと考えている。

4. 結論

本研究では、既往の解析システムの塩化物イオン移動モデルを多様な水和物性状を持つセメント硬化体へと適用すべく、空隙壁面の電気的性状が塩化物イオン移動に及ぼす影響を定式化した。塩分の吸着層厚さ、水和生成物の Ca/Si や液相中塩分量に応じた壁面電位、電気二重層の影響範囲を定式化し、水和物の性状に応じた塩分移動可能閾空隙径を算出することで、異なる壁面の電気的性状を持つセメント硬化体中の塩化物イオン拡散を取扱い可能な修正塩分移動モデルを提案した。

修正したモデルを用いて塩水浸せき試験の検証解析を

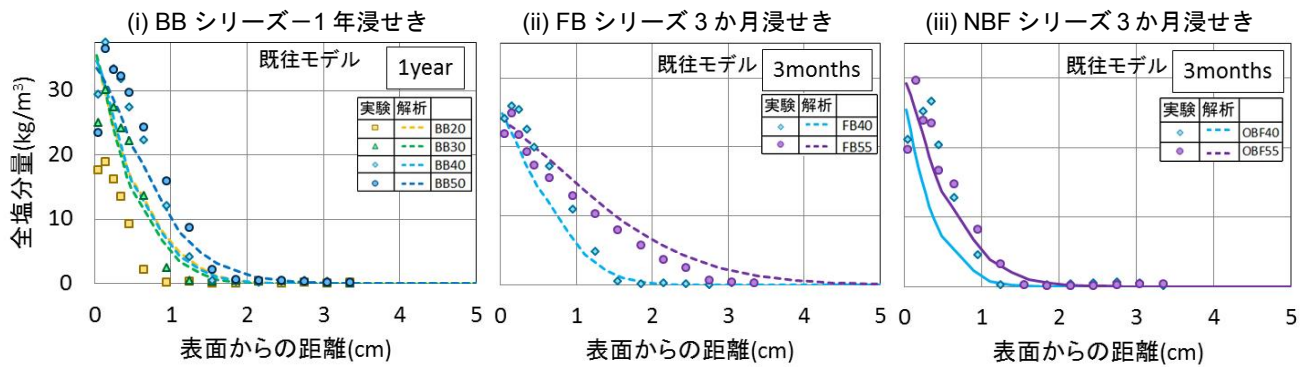


図-6 実験結果と既往モデルによる解析結果の比較(BB・FB・NBF シリーズ)

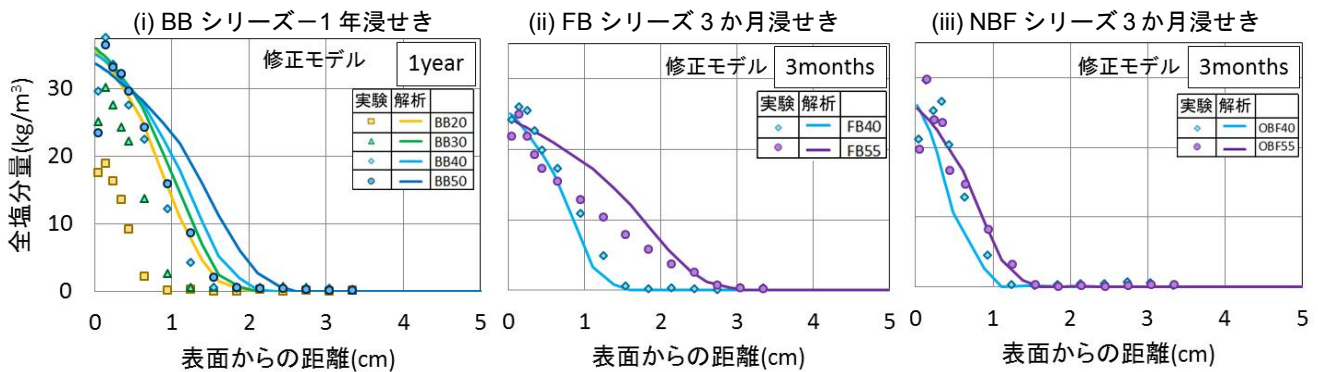


図-7 実験結果と修正モデルによる解析結果の比較(BB・FB・NBF シリーズ)

行った。OPCを用いたモルタルについて修正モデルは既往モデルよりも塩分浸透深さ、および塩化物イオン分布の立ち上がり形状を良好に再現した。混和材使用条件下については、水和物性状の違いによる塩分浸透挙動の変化を考慮可能となったが、定量的再現性には課題があり、今後、複数材齢での塩化物イオン分布の測定を行い、修正モデルの妥当性の検証を重ねること、および緻密な空隙構造を持つセメント硬化体中の水分移動挙動と合わせた総合的な検証を行うことが必要であると考えている。

参考文献

- 1) 大城良信ら：海洋環境下における石炭灰を使用したRC 構造物の施工報告，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.789-794，2002
- 2) (社)土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会)No.2，コンクリート技術シリーズ 89，pp.243-251，2010.5
- 3) Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: MULTI-SCALE MODELLING OF STRUCTURAL CONCRETE, Taylor and Francis, 2008
- 4) 高橋佑弥ら：微小空隙中の塩化物イオン・液状水移動に着目したセメント硬化体の遮塩性能評価モデル，土木学会論文集 E2，Vol.70，No.1，pp.118-133，2014
- 5) 後藤誠史，茂啓二郎，高木達雄，大門正機：セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散，セメント技

術年報，Vol.36，pp.49-52，1982

- 6) Y. Elakneswaran, et al.: Ion-cement hydrate interactions govern multi-ionic transport model for cementitious materials, Cement and Concrete Research, 40, pp.1756-1765, 2010
- 7) 中村兆治ら：コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ/ナノチップを用いた光学的実験による検討，コンクリート工学年次論文集，第 35 巻，第 1 号，pp.841-846，2013
- 8) 石田哲也，宮原茂禎，丸屋剛：ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性，土木学会論文集，Vol.63，No.1，pp.14-26，2007.1
- 9) T. Fujita, D. Sugiyama, S.W. Swanton, M.J. Myatt :Observation and characterization of colloids derived from leached cement hydrates, Journal of Contaminant Hydrology, 61, pp.3-16, 2003
- 10) 佐川孝広，石田哲也，Yao Luam，名和豊春：高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性，土木学会論文集 E，Vol.66，No.3，pp.311-324，2010.9
- 11) 小早川真，大森啓至，佐藤道生，土田茂：ダムコンクリートにおけるフライアッシュのポゾラン反応率の考察，コンクリート工学年次論文集，第 15 巻第 1 号，pp.45-56，2004.1
- 12) Y. Elakneswaran, et al.: Electrokinetic potential of hydrated cement in relation to adsorption of chlorides, Cement and Concrete Research, 39, pp.340-344, 2009