

論文 液状水移動に伴うモルタル中の塩化物イオンの浸透特性

金氏 裕也*1・黒田 保*2・吉野 公*3・谷口 修人*4

要旨：供試体の水セメント比や乾燥程度の変化がモルタル内部の液状水移動に伴う塩化物イオン浸透に与える影響を実験的に把握するとともに、供試体中の塩化物イオン濃度の変動を解析的に把握するために基礎的な塩化物イオン浸透解析を行った。塩水浸漬試験の結果、不飽和状態のモルタルでは、液状水（塩水）の移動距離と塩化物イオンの浸透距離に差があることを確認した。また、液状水移動に伴う塩化物イオン浸透解析の支配方程式として移流方程式を用いた結果、モルタル中の液状水移動特性のみから浸漬日数に応じた塩化物イオンの最大浸透距離を概ね推定できることを確認した。

キーワード：液状水移動, 塩化物イオン浸透, 相対水分率, 移流方程式

1. はじめに

塩害によるコンクリート構造物の簡易的な劣化予測手法として、Fick の拡散方程式による濃度拡散モデル¹⁾が用いられる。しかし、濃度拡散はコンクリートが飽和状態である場合に生じる現象であり、実環境下においてほぼ不飽和状態であるコンクリート内の塩化物イオンの浸透を濃度拡散のみで評価することは必ずしも適当とは言えない。また、塩化物イオンの拡散性状を表す拡散係数は飽和状態での濃度拡散に加え、主に不飽和状態で生じる液状水移動に伴う塩化物イオン浸透による濃度変化等を考慮したみかけの拡散係数であるため、供試体の乾燥程度によって拡散性状が大きく変化すると考えられる。したがって、セメントの種類と水セメント比の関係のみで表される現行の拡散係数の予測式では拡散性状を精度よく捉えることができないと考えられる。

実環境下における塩化物イオンの浸透の駆動力は濃度拡散のみではなく、乾湿繰り返しに伴う吸水現象の影響も駆動力の一つである。小池ら²⁾が提案したコンクリートの吸水現象に着目した塩化物イオンの浸透モデルは、移流・拡散モデルを適用しており、数値解析により塩化物イオンの浸透を精度よく表している。解析パラメータについては、液状水の移動速度（移流現象を表現する係数）、毛管浸透の影響を包含した水蒸気拡散係数（拡散現象を表現する係数）を塩水浸透試験から決定している。しかし、水蒸気拡散係数は供試体の初期の乾燥程度に応じて変化するため、絶乾状態の供試体から得られた測定結果により構築された塩化物イオンの浸透モデルでは実際の浸透現象を正確に捉えることが難しいと考えられる。

以上のことを踏まえて、著者らは、乾湿繰り返しが生じる干満帯の構造物を想定し、液状水移動に伴う塩化物イオンの浸透は濃度拡散と比較して支配的であると考

各種乾燥程度のコンクリートが塩水浸漬を受ける場合の塩化物イオンの浸透特性を実験的に検討した。また、液状水の移動に対して簡易的な物理モデルを構築し解析的に各種検討し、最終的に液状水移動に着目したコンクリート中への塩化物イオンの浸透予測を行うことを本研究の目標としている。

本稿では、モルタル中の液状水移動（塩水移動）の影響に着目し、水セメント比や供試体乾燥程度（以下、乾燥度と表記）が液状水移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透特性に与える影響を実験的に把握し、液状水移動による移流現象を考慮した塩化物イオンの浸透モデルについて検討した。本検討での乾燥度は「飽和状態」、「絶乾状態」に加え、飽和状態と乾燥状態の割合が 1:1 である「半飽和状態」を設定し、モルタル内部への液状水移動と拡散現象による塩化物イオンの浸透特性を把握する。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体配合は、水セメント比がモルタル中の液状水移動および塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を確認するために表-1に示すものとした。配合のケースは、普通ポルトランドセメントを使用して、水セメント比を 0.45、0.65 と変化させた OPC45、OPC65 とした。また、モルタルの配合は、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 、スランプ $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ の基準を満足するコンクリートの配合をモルタルに換算した値を設定した。

また、供試体形状は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ とし、打設後の型枠養生を 1 日、脱型後は 27 日間の水中養生を実施した。さらに、水中養生終了後に、供試体表面の濡れをふき取り、図-1に示すように浸透面以外の面をエポキシ樹脂とアルミテープにより被覆を行い、各種乾燥度になるよ

*1 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 修(工) (正会員)

*2 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

*3 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 工博 (正会員)

*4 鳥取大学 工学部土木工学科

表－1 各種試験に用いた供試体の配合

呼称	W/C (%)	Air (%)	単位量 (Kg/m ³)			
			W	C	S	G
OPC45	45	7.4	271	602	1232	0
OPC65	65	7.3	268	412	1403	0

うに調整した。

本研究での乾燥度は「飽和状態」、「絶乾状態」、「半飽和状態」の3ケースとした。ここで、「飽和状態」は供試体被覆直後の状態とし、「絶乾状態」は被覆後の供試体を105℃の乾燥炉で乾燥して前日との質量差が0.1%以内となった状態と定義した。また、半飽和状態は、まず飽和状態の供試体質量と絶乾状態の供試体質量の差分である水分量を測定し、水分量が半分となるために必要な乾燥期間を設定した。次に設定した乾燥期間、試験用供試体を乾燥させ、乾燥後の供試体を「半飽和状態」の供試体と定義する。

2.2 モルタルの相対水分率の測定方法

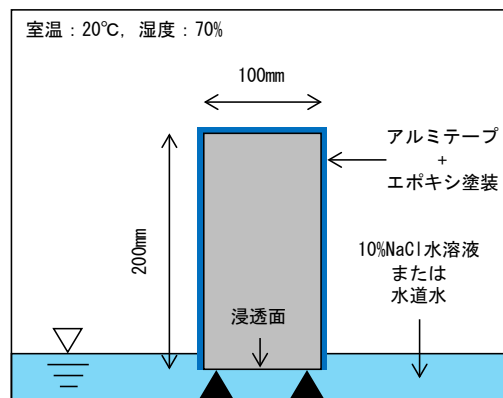
モルタル中の液状水移動の確認を行うため、液状水に供試体を浸漬させ（図－1参照）、所定の浸漬日数（1, 3, 7日）経過後に供試体深さ毎の含水率を測定した。モルタル中の含水率の測定では水分計（ケツト科学研究所、コンクリート・モルタル水分計 HI-800）を用い、ハンマードリルにより供試体に2点削孔し、含水率を測定した。測定深さ間隔は10mmであり、またハンマードリルの規格上、最大削孔深さが100mmであるため浸透面とその反対面から削孔し、測定を行った。また、水分計の機能上、NaCl水溶液を浸漬させた供試体の含水率を測定することができないため含水率測定では水道水に浸漬した。

測定結果の表示方法として、各供試体の飽和状態の含水率を水分率100%とし、液状水移動に伴う水分量の変化量との相対量である相対水分率を定義する。

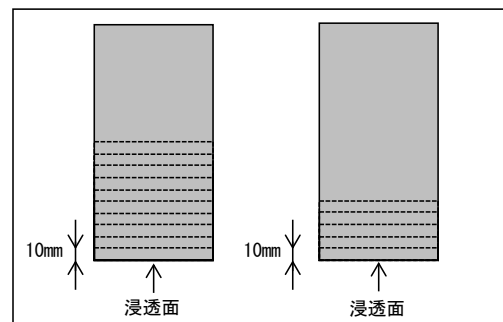
2.3 塩化物イオン浸透試験方法

液状水移動に伴う塩化物イオンの浸透を確認する試験として、塩化物イオン浸透試験を行った。本試験は図－1に示すように浸透面を濃度10%のNaCl水溶液に10mm程度浸漬した。

浸漬開始後は、所定の浸漬日数（1, 7, 28日）経過後に、図－2に示すように供試体厚さを10mmずつに切断した試験片をJIS A 1154に準じて塩化物イオン含有量試験を行った。また、浸透面から10mm位置の試験片の測定結果は、浸透面に接するため、塩化物イオン量が過大に測定されることから棄却する。測定深さは「絶乾状態」、「半飽和状態」においては浸透面から100mmとし、「飽和状態」は塩化物イオンの浸透は微量であると想定されるため浸透面から50mmとした。



図－1 浸漬試験概要図



(b) 絶乾状態

図－2 供試体切断位置

3. 試験結果および考察

3.1 モルタル中の液状水移動特性

絶乾状態、半飽和状態のモルタルの相対水分率の経時変化（1, 3, 7日浸漬）をそれぞれ図－3、図－4に示す。また、図－4には浸漬前の供試体の初期水分率（Initial state）を示しており、浸透面から各浸漬期間における相対水分率分布と初期水分率分布が一致するまでの距離を液状水移動距離とする。グラフの横軸は供試体長さを表し、0mm位置が浸透面である。絶乾状態と半飽和状態の場合の測定結果は、共通して浸透面付近の相対水分率が低くなる傾向がある。これは、ハンマードリルで供試体を削孔する際に、浸透面付近が乾燥することが原因であると考えられる。よって、乾燥の影響が大きくみられる浸透面とその反対面から10mm位置の測定結果は棄却した。液状水移動として、浸透面から順次相対水分率が100%、すなわち飽和状態になりながら液状水が移動すると想定していたが、絶乾状態では相対水分率が長さ方向に対して全体的に減少した状態で液状水が移動した。同様の現象が半飽和状態の供試体の初期相対水分率でも確

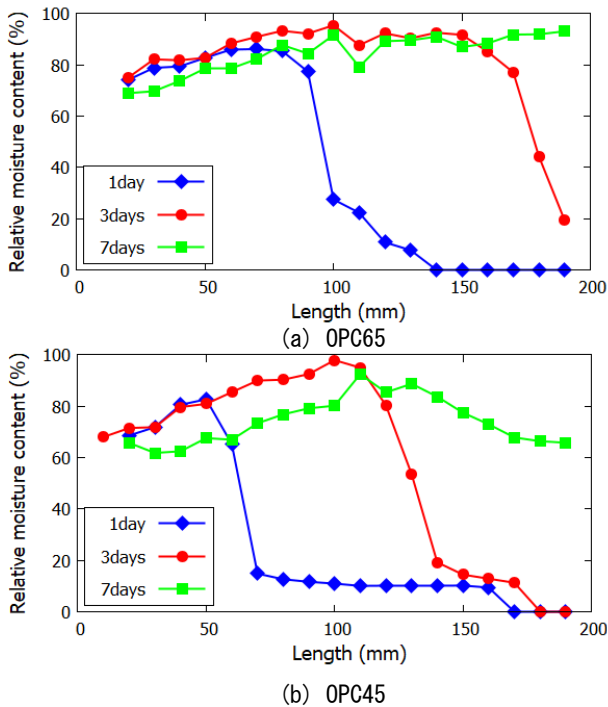


図-3 絶乾状態のモルタルの相対水分率

認められ、当初、初期含水状態として浸透面から離れるにつれて、相対水分率が上昇すると想定していたが、長さ方向に対して全体的に減少した相対水分率が測定された。これは、供試体削孔時の乾燥に加えて、供試体被覆部の接着不良により液状水が蒸発した可能性がある。また、半飽和状態において相対水分率が 100%を超える（最大で 105%程度）箇所があったが、これは測定時の誤差が原因であると考えられるため、相対水分率が 100%を超える場合は相対水分率 100%を上限とし、飽和状態とみなす。

絶乾状態の相対水分率の経時変化の傾向として、水セメント比が小さくなるにつれて同一浸漬期間における液状水の移動距離が短くなる。これは、水セメント比が小さくなるにつれ、供試体中の空隙構造がより緻密になるため、液状水が通りにくくなったことが要因であると考えられる。また、相対水分率が急激に変化していることから、液状水は浸透フロントを形成し、供試体中を移動することが考えられる。

半飽和状態の相対水分率の経時変化の傾向として、絶乾状態と同様に水セメント比が小さくなるにつれて同一浸漬期間における液状水の移動距離が短くなる。また、絶乾状態と比較して半飽和状態は勾配を有しながら液状水は移動している。これは、供試体の初期水分率が大きく影響していると考えられる。供試体空隙中に液状水（以下、内在水と表記する）が存在している場合、空隙は不連続となるため、液状水移動を生じさせるためには空隙中の気体を排出する必要がある。したがって、半飽和状

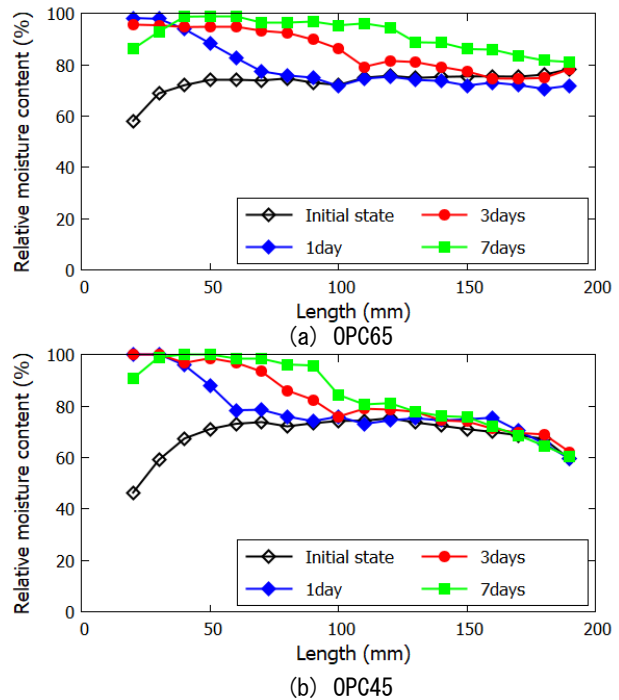


図-4 半飽和状態のモルタルの相対水分率

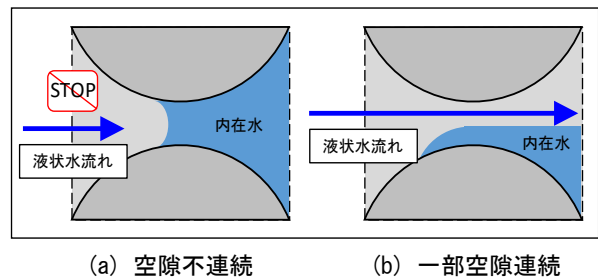


図-5 空隙中の液状水流れの概要図

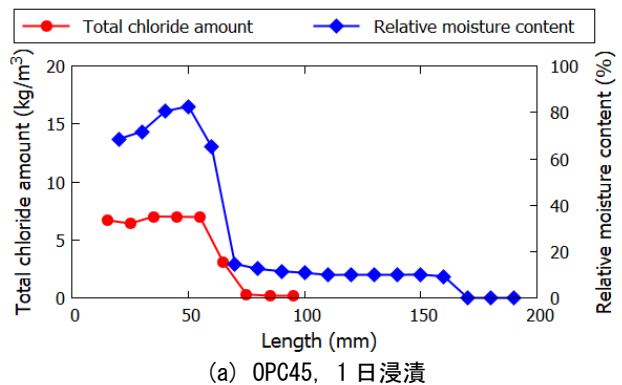


図-6 絶乾状態のモルタル中の塩化物イオン濃度

態のような部分的に空隙が完全に内在水で満たされている場合は、図-5 (a) のように液状水が浸入できない部分が生じるため、相対水分率は 100%とならず、勾配を有しながら液状水は移動すると考えられる。また、図-5 (b) のように空隙の一部でも連続性が保てる場合、空隙中の気体の排出機能が低下するため、液状水は移動するが移動速度は低下すると考えられる。本試験結果からは気体排出機能の低下に伴う液状水移動速度の低下の影響は確認できなかったため、今後の検討課題である。

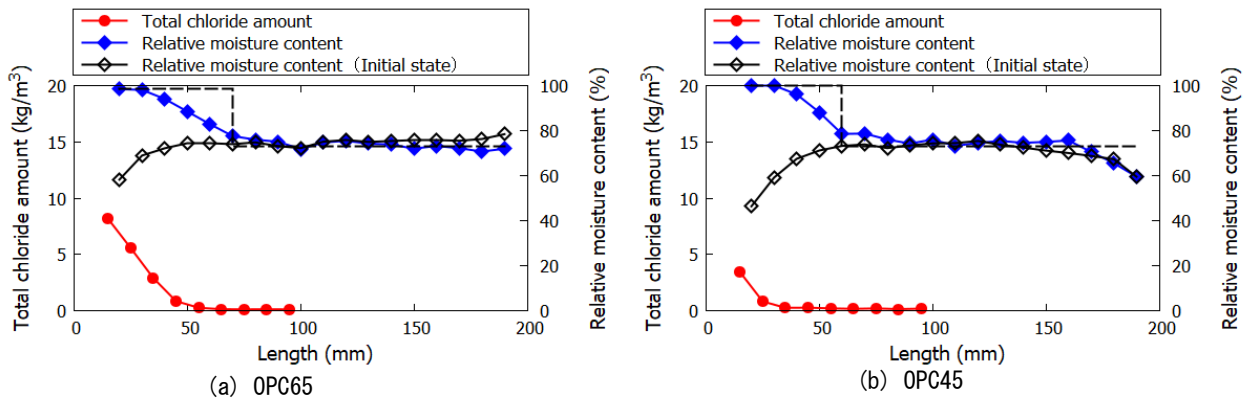


図-7 半飽和状態のモルタル中の塩化物イオン濃度 (1日浸漬)

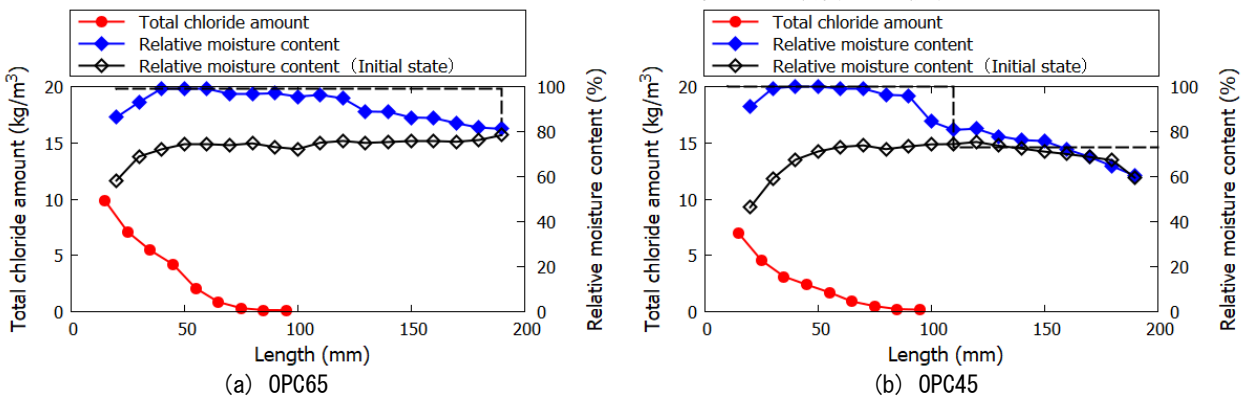


図-8 半飽和状態のモルタル中の塩化物イオン濃度 (7日浸漬)

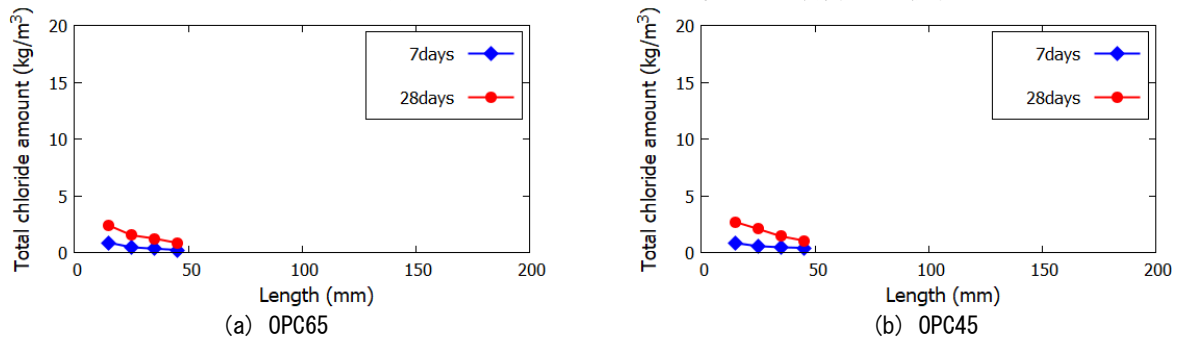


図-9 飽和状態のモルタル中の塩化物イオン濃度

3.2 モルタル中の塩化物イオン浸透特性

絶乾状態のモルタルの相対水分率と塩化物イオン濃度の比較を図-6に示す。OPC65 の測定結果については、塩化物イオン浸透試験の測定上限である 100mm 位置以降まで NaCl 水溶液が移動し、塩化物イオン濃度曲線の変曲点が測定できなかったため OPC45 のみ表示している。図-6より絶乾状態では液状水の移動範囲と塩化物イオン浸透範囲が概ね一致しており、塩化物イオンの浸透は液状水浸透特性に支配的であると考えられる。

NaCl 水溶液を 1, 7 日浸漬した場合の半飽和状態のモルタルの相対水分率と塩化物イオン濃度の比較をそれぞれ図-7, 図-8に示す。また、液状水が移動した区間を浸透面から相対水分率の分布曲線の勾配変化点(以下、浸透フロントと表記する)までとし、図中には破線で表している。いずれの場合においても、浸透フロント手前で塩化物イオン濃度がほぼ 0kg/m^3 となることを確認した。これは、図-5 (b) のような空隙中を NaCl 水溶液

が移動する際に、内在水と NaCl 水溶液が混合し、塩化物イオン濃度が低下したためであると推定される。したがって、浸透面から離れるにつれて徐々に塩化物イオン濃度が低下することにより、浸透フロント手前で塩化物イオン濃度がほぼ 0kg/m^3 となったと考えられる。

図-6, 図-7 (b) を比較すると、半飽和状態のモルタル中の塩化物イオンの浸透距離は絶乾状態の場合と比較して、1/3 程度になっている。これは、供試体の乾燥程度の影響が大きく影響していることを示唆している。

図-9に NaCl 水溶液を 7, 28 日浸漬した場合の飽和状態のモルタルの塩化物イオン濃度を示す。OPC65 と OPC45 の塩化物イオン濃度の大きさ、経時変化の違いはほとんどなく、半飽和状態の測定結果と比較して塩化物イオン濃度は 1/5~1/10 程度である。このことから、塩化物イオンの浸透特性に及ぼす支配的因は液状水移動であることが確認できる。

4. 液状水移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデル

4.1 支配方程式

3.2 節の実験結果より、塩化物イオンの浸透特性に及ぼす支配的要因は液状水移動（移流）であることが確認された。液状水移動に伴う塩化物イオンの浸透を移流方程式として表し、その差分解析結果と塩化物イオン浸透試験結果との比較より本浸透モデルの適用性の検討をした。また、半飽和状態では勾配を有しながら液状水移動する傾向があり、その影響を解析に考慮するために移流方程式の係数である液状水移動速度を指数関数で近似した。本検討では、半飽和状態の供試体の塩化物イオンの浸透を対象とした。

$$\left\{ \frac{d}{dt} + \alpha(x,t) \frac{d}{dx} \right\} C(x,t) = 0 \quad (1)$$

$$\alpha(x,t) = \alpha_0 \cdot \exp\{-\beta(x-x_0) - \mu t\} \quad (2)$$

$$C(0,t) = C_0 \quad (3)$$

$$C(x,0) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $C(x,t)$ ：モルタル中の塩化物イオン量 [kg/m³],
 x ：浸透方向距離 [m], t ：時刻 [day], $\alpha(x,t)$ ：液状水移動速度 [m/day], α_0, β, μ ：実験係数, x_0 ：解析開始位置 [m], C_0 ：表面塩化物イオン濃度 [kg/m³] である。また、ここでの表面は浸透面から 10mm 位置を示す。

4.2 解析パラメータの設定

移流方程式を用いた差分解析に必要な液状水移動速度は以下のように設定した。

液状水移動速度は、半飽和状態、絶乾状態の供試体各断面での相対水分率の比より、半飽和状態における供試体中の液状水移動速度 $\alpha(x,t)$ を設定した。相対水分率 $\omega(x,t)$ は供試体中の液状水量の比率を表しているため、 $\omega(x,t)$ が供試体長さ方向の任意位置で減少することは、液状水が通過しにくいことを表すと考えられる。液状水の通過しやすさは、供試体中の液状水移動速度に大きく影響するため、 $\alpha(x,t)$ を式(5)のように定めた。

$$\alpha(x,t) = \frac{\Delta\omega(x,t)}{\Delta\omega_{dry}(x,0)} \cdot V_{dry} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta\omega(x,t)$ ：各時刻、供試体各断面における相対水分率と初期相対水分率との差分量、 $\Delta\omega_{dry}(x,0)$ ：絶乾状態の供試体各断面における相対水分率と初期相対水分率(0%)との差分量、 V_{dry} ：絶乾状態の供試体中の液状水移動速度である。絶乾状態の供試体中の液状水移動速度 V_{dry}

は、供試体各断面における相対水分率の変動より液状水の移動距離を推定し、浸漬日数との関係から液状水移動速度を算出した。

液状水移動速度 $\alpha(x,t)$ の各時刻における分布曲線を図-10に示す。液状水移動速度 $\alpha(x,t)$ の分布曲線は指数関数的に減少しているため、式(2)に示す指数関数で近似し、強い相関をなすように、係数 α_0, β, μ を設定した。差分解析に用いる各種解析パラメータを表-2に示す。

4.3 浸透解析結果と実測値との比較

半飽和状態の供試体の液状水移動に伴う塩化物イオン浸透解析結果と塩化物イオン浸透試験結果の比較を図-11, 図-12に示す。塩化物イオン浸透解析の支配方程式として移流方程式を用いているため、塩化物イオン濃度の供試体長さ方向の分布は矩形波状となっているが、塩化物イオン浸透試験結果では浸透方向に対して指数関数的に減衰している。今回の解析で、移流方程式に乗じる係数を指数関数で表したため、解析結果である塩化物

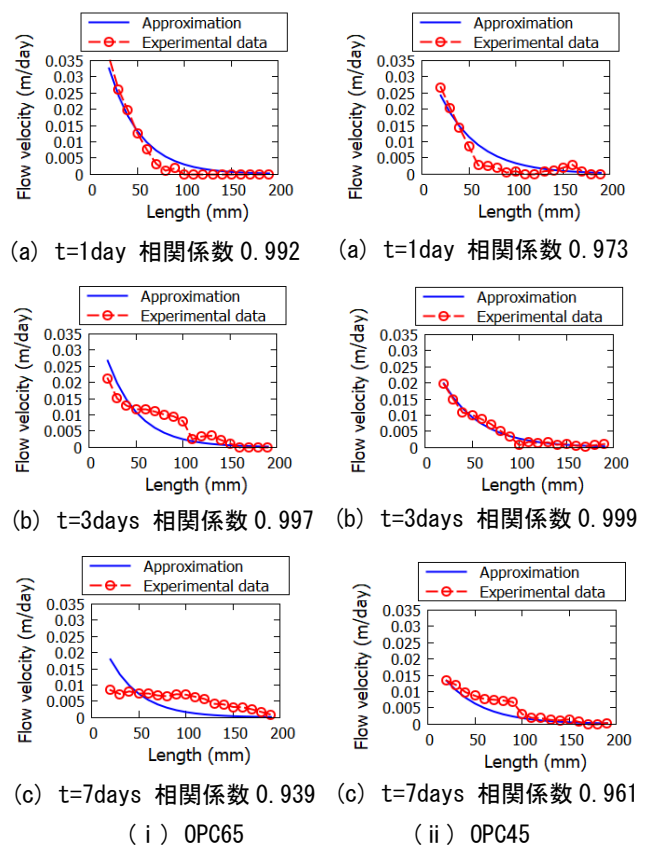


図-10 液状水移動速度

表-2 解析パラメータ

呼称	C_0 [kg/m ³]		V_{dry} [m/day]		α_0 [m/day]	β	μ	相関係数		
	t=1 [day]	t=7 [day]	t=1 [day]	t=3 [day]				t=1 [day]	t=3 [day]	t=7 [day]
OPC45	3.450	6.955	0.050	0.037	0.027	25	0.1	0.973	0.999	0.961
OPC65	8.170	9.850	0.090	0.057	0.036	30	0.1	0.992	0.997	0.939

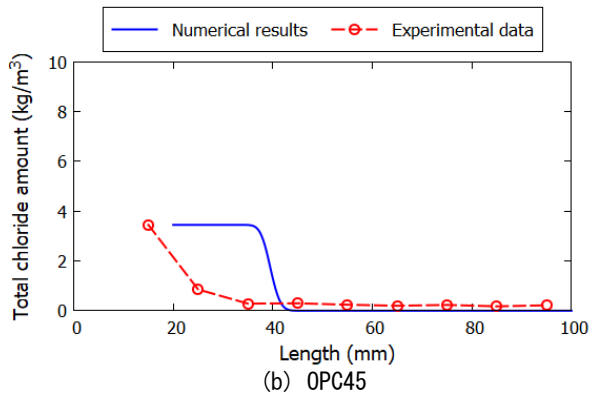
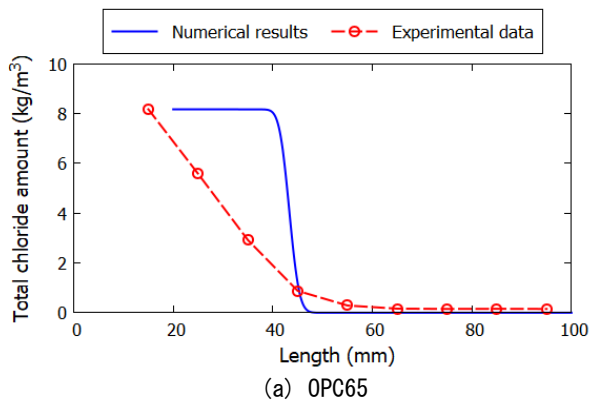


図-1.1 解析結果と試験結果の比較 (1日浸漬)

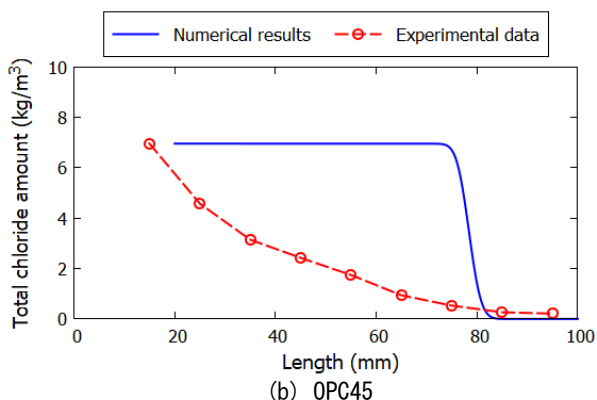
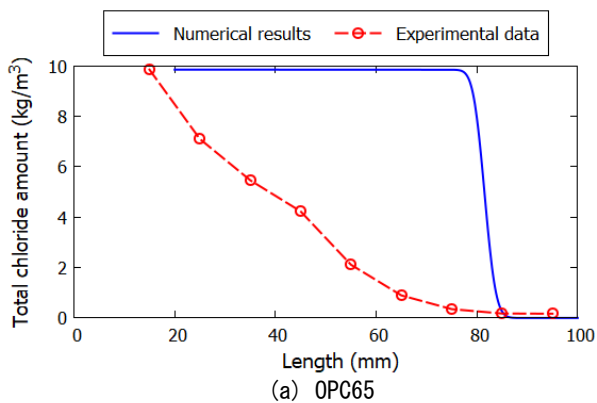


図-1.2 解析結果と試験結果の比較 (7日浸漬)

イオン濃度が浸透方向に対して指数関数的に減衰すると想定したが、移流方程式の解析解である階段関数内の変数が指数関数で表される傾向が確認された。

本浸透モデルでは、供試体長さ方向の塩化物イオン濃

度の変化を再現することはできていないが、塩化物イオンの浸透距離は水セメント比、浸漬日数が変化した場合でも概ね評価できている。塩化物イオン濃度の変化を再現するためには、3.2節で述べた空隙中の内在水の影響を踏まえた液状水移動に関する支配方程式を新たに構築する必要があると考えられる。また、本浸透モデルでは、供試体表面の塩化物イオン濃度は浸透解の倍率であるため、塩化物イオンの浸透距離には寄与しない。したがって、モルタル中の液状水移動特性から、浸漬日数に応じた最大浸透距離を概ね推定できることを確認した。

5. まとめ

本稿では、液状水移動がモルタル中の塩化物イオン浸透に与える影響に着目し、供試体の水セメント比や乾燥度が液状水移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透特性を実験的に把握し、液状水移動による移流現象を考慮した塩化物イオンの浸透モデルについて検討した。

- (1) モルタル中の液状水移動特性として、半飽和状態の場合、供試体長さ方向に対して勾配を有しながら液状水が移動することを確認した。これは、半飽和状態のような部分的に空隙が内在水で満たされている場合は、液状水が浸入できない部分が生じるためであると考えられる。また、空隙の一部でも連続性を保てる場合、液状水は移動するが移動速度は低下する。
- (2) モルタル中の塩化物イオン浸透特性として、液状水の浸透フロント手前で塩化物イオン濃度がほぼ 0kg/m^3 となることを確認した。これは、空隙中を NaCl 水溶液が移動する際に、内在水と NaCl 水溶液が混合し、塩化物イオン濃度が低下したためであると考えられる。
- (3) 液状水移動に伴う塩化物イオン浸透解析の支配方程式として移流方程式を用いた結果、供試体長さ方向の塩化物イオン濃度の変化を再現することはできていないが、塩化物イオンの浸透距離は水セメント比、浸漬日数が変化した場合でも概ね評価できた。また、供試体表面の塩化物イオン濃度は塩化物イオンの浸透距離には寄与しないため、モルタル中の液状水移動特性のみから浸漬日数に応じた最大浸透距離を概ね推定できることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会ほか：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]，公益社団法人土木学会，pp.148-157，2012
- 2) 小池賢太郎，山口明伸，武若耕司，福重耕平：水分移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデルに関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.843-848，2016