

論文 初期飽和度を変化させたモルタル供試体を用いた塩化物イオン浸透に関する実験的検討

池田 伊輝*1・町田 直輝*2・直町 聡子*1・加藤 佳孝*3

概要:本研究は、初期飽和度を変化させたモルタル供試体に塩化ナトリウム水溶液を吸水させることで、塩化物イオン浸透に初期飽和度が与える影響について実験的に検討した。初期飽和度が高くなるほど水分の浸透距離が大きくなるが塩化物イオンの浸透は小さくなる傾向が確認された。初期飽和度 50, 75%では、移流現象以外の要因により塩化物イオンが浸透した可能性を示した。また、乾湿繰り返し試験では乾燥時にも水分の移動に伴って塩化物イオンの浸透が生じることや、初期飽和度 50%との比較から、塩化物イオンの浸透量、浸透距離が異なる結果が得られた。

キーワード: 塩化物イオン, 水分移動, 移流, 初期飽和度, 乾湿繰り返し

1. はじめに

2013年に制定されたコンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁾では、水掛りに関する項目が新しく追加され、水分が関係する劣化やその要因などが述べられている。この様に、コンクリート構造物へ供給される水分がコンクリート構造物の劣化に及ぼす影響について注目されており、コンクリート中の水分状態に関して多くの検討^{例え}ば^{2),3)}がなされている。

塩害に関しても水分移動に関連した塩化物イオンの浸透が検討^{例え}ば^{4),5)}されているが、その多くは供試体全体の質量の増減から水分の増分を測定しているものがほとんどであり、吸水面からの深さごとの要素に注目し検討した研究は少ない。その中でも小池ら^{6),7),8)}は、絶乾状態から塩化ナトリウム水溶液を吸水させ、吸水面からの深さごとの飽和度と全塩化物イオン量を測定することで、コンクリート中の水分移動と塩化物イオン浸透の関係性を報告している。このような既往の検討のほとんどは絶乾状態を対象としており、飽和度が水分移動に伴う塩化物イオンの浸透に与える影響の検討は必ずしも多くない。本研究では、初期飽和度を変化させたモルタル供試体を用いて、初期飽和度が水分移動と塩化物イオンの浸透性に与える影響を把握することを目的とした。

2. 塩水吸水試験

2.1 供試体概要

使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(記号:C, 密度 3.15g/cm³, 比表面積 3440cm²/g)である。細骨材には山梨県富士川産・川砂(記号:S, 密度 2.61g/cm³,

F.M.: 2.62)を用いた。モルタルの配合を表-1に示す。供試体は4×4×16cmの角柱供試体を作製した。打設後1日で脱型し、水和反応を十分に進行させるために、91日間水中養生(温度 20°C)した。

表-1 配合表

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	S
50	2.5	284	568	1419

2.2 塩水吸水試験方法

図-1に示すように、吸水面以外の5面にエポキシ樹脂を塗布した後、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に吸水面を5mm程度漬けることで塩水吸水試験をした。なお、5面にエポキシ樹脂を塗布しているため、塩水吸水時に水分が浸透しにくいことが懸念されるが、著者らの既往の研究⁹⁾から、本実験の試験期間である3日間では影響がないことを確認している。塩水吸水試験開始後は、所定の日数(6時間, 1, 3日)で供試体を取り出し、高さ13cmまで1cmずつに乾式の切断機を用いて切断し、得られた供試体片の飽和度と全塩化物イオン量を測定した。本実験では、絶乾状態(0%)の供試体とは別に初期飽和度を25%, 50%, 75%に調節したものも使用した。初期飽和度はエポキシ樹脂を塗布する前に、吸水面とその対面をアルミテープでシールし、105°C乾燥炉に静置し、側面からのみ乾燥させることで調節した。供試体内の飽和度を一様にするには非常に難しいが、本研究では、高さ方向への水分移動および塩化物イオンの浸透性状の

*1 東京理科大学 理工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部 土木工学科

*3 東京理科大学 理工学部 土木工学科 准教授 博(工) (正会員)

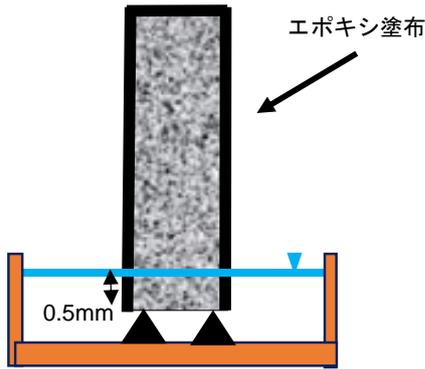


図-1 吸水試験の様子

把握を重要視している。この方法を用いたことで、同一高さの断面内には飽和度のばらつきが多少生じている可能性はあるが（内部の飽和度が高く表面が低い）、供試体の高さ方向にほぼ様な水分状態を表現することができると考えた。なお、105℃で乾燥させているため、空隙構造等が変化している可能性も考えられるが、本研究では全ての供試体で同様な処理を施していることから、その影響については考慮していない。供試体片の飽和度は塩水吸水試験直後に乾式の切断機で切断し、すぐに質量を測定した。その後、飽水处理（蒸留水に3日間浸せき）した状態を飽水状態（飽和度 100%）、絶乾処理（105℃乾燥炉に3日間静置）した状態を絶乾状態（飽和度 0%）とし、飽和度 R_i を式(1)から算出した。なお、飽水状態、絶乾状態ともに質量変化が無くなることを確認した。

$$R_i (\%) = \frac{W_i - W_{i(dry)}}{W_{i(sat)} - W_{i(dry)}} \times 100 \quad (1)$$

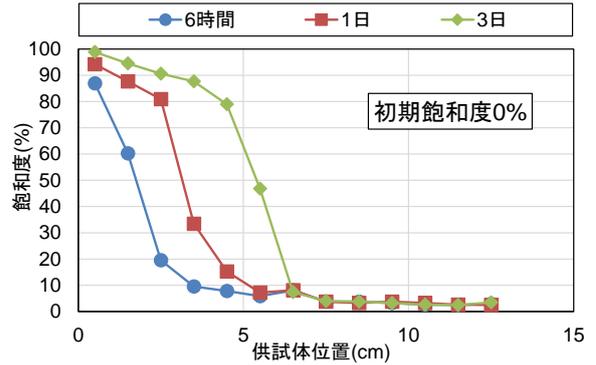
ここに、 R_i ：供試体の飽和度(%), $W_{i(sat)}$ ：供試体の飽水状態の質量(g), $W_{i(dry)}$ ：供試体の絶乾状態の質量(g), W_i ：供試体の吸水試験後の質量(g)

2.3 全塩化物イオン濃度測定

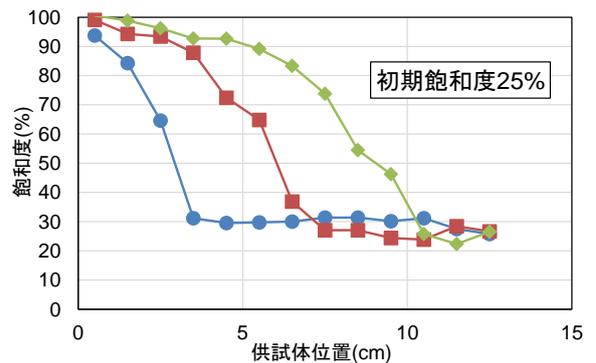
塩化物イオンの測定は JIS A1 1154 に準拠し、塩化物イオン定量方法は塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法を用いた。

2.4 飽和度からの塩化物イオン濃度の推定

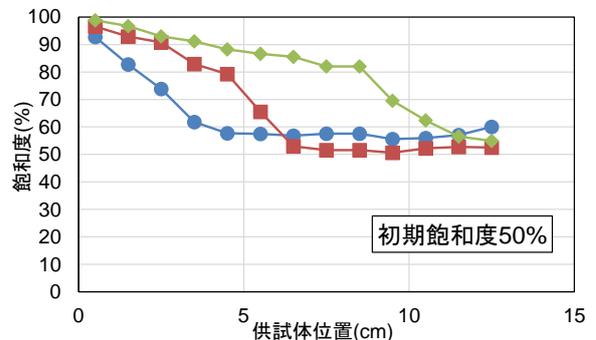
供試体内部の質量増分が、全て液状水の移動に伴うものであり、かつ濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液が移流現象で移動したと仮定し、各供試体片の飽和度分布から塩化物イオンが供試体内部に浸透した濃度を式(2)で推定した。なお、空隙率は、水を溶媒とした質量差法の結果を用いて式(3)より算出した。



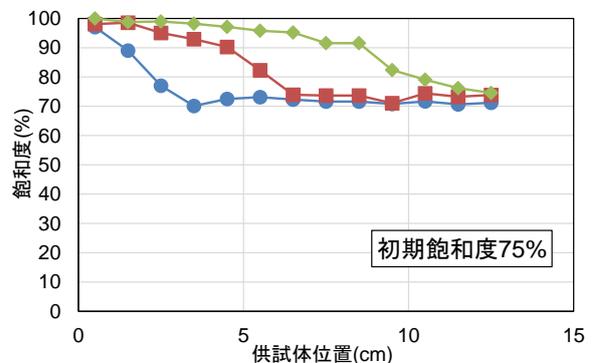
(a) 初期飽和度 0%



(b) 初期飽和度 25%



(c) 初期飽和度 50%



(d) 初期飽和度 75%

図-2 塩水吸水試験の飽和度分布

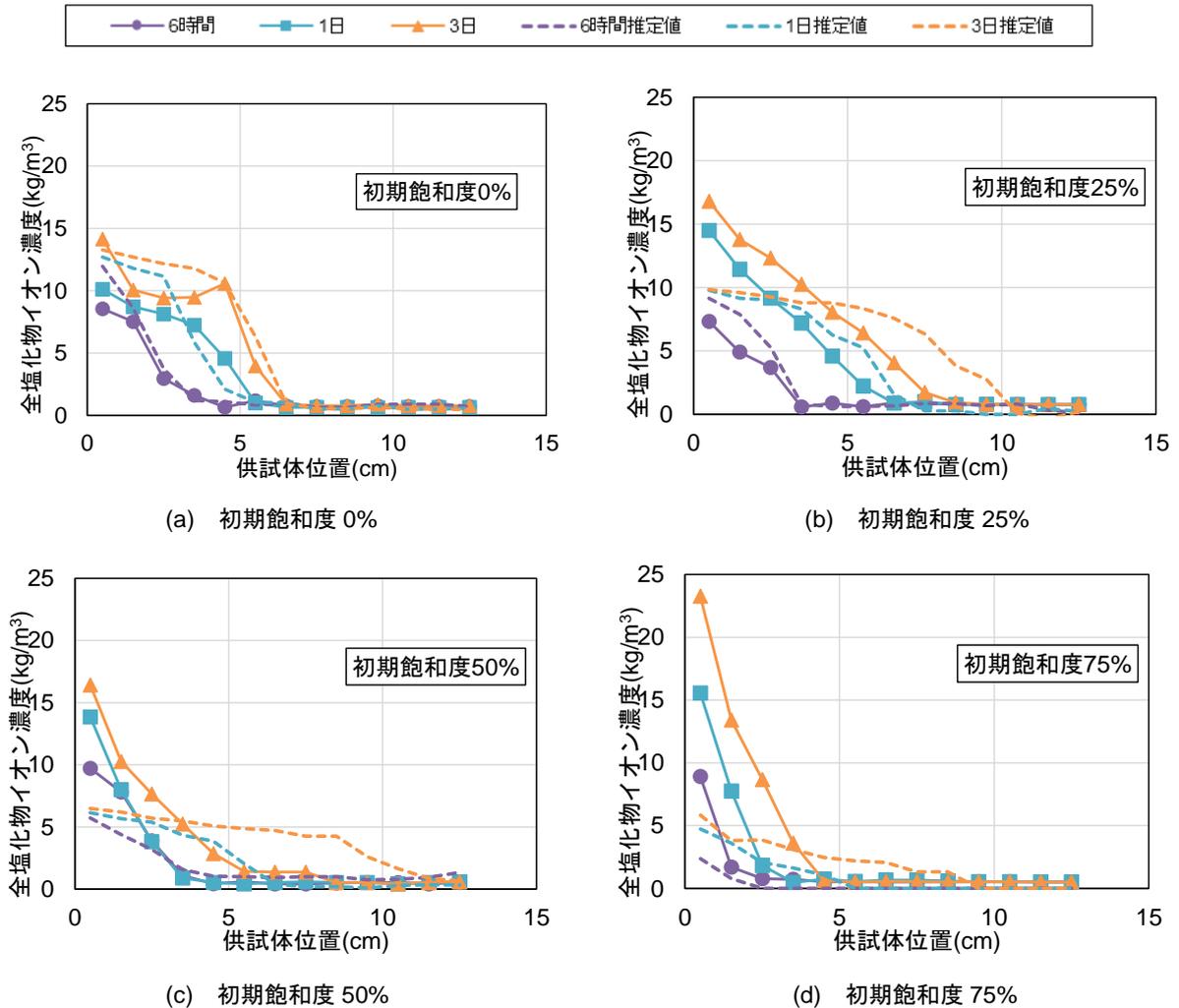


図-3 塩水吸水試験の全塩化物イオン濃度分布および塩化物イオン濃度推定値

$$C_{est} = \frac{R_i - R_{i(in)}}{100} \times \varepsilon \times C_i \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{(W_{i(sat)} - W_{i(dry)}) / \rho_w}{(W_{i(sat)} - W_{i(w)}) / \rho_w} \quad (3)$$

ここに、 C_{est} ：推定塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_i ：塩化ナトリウム水溶液中の Cl 濃度(kg/m³、=60.6)、 $R_{i(in)}$ ：供試体の初期飽和度(%)、 ε ：空隙率(-)、 $W_{i(w)}$ ：供試体の表乾時における水中重量(g)、 ρ_w ：水の密度(g/cm³、=1.00)

2.4 試験結果

(1)飽和度分布

図-2 に初期飽和度 0, 25, 50, 75%と変化させた供試体を、所定の時間まで塩水吸水させた後の飽和度分布を示す。

まず、初期飽和度 0%の場合は、吸水 6 時間で吸水面から 3cm 程度、吸水 1 日で吸水面から 5cm 程度、吸水 3 日で 6~7cm 程度まで飽和度が変化していることから、

同様の位置まで水分が浸透していると考えられる。

初期飽和度 25%の場合は、吸水 6 時間で吸水面から 3~4cm 程度、吸水 1 日で吸水面から 6~7cm 程度、吸水 3 日で 10cm 程度まで飽和度が変化していることが分かる。

初期飽和度 50%の場合は、吸水 6 時間で吸水面から 4cm 程度、吸水 1 日で吸水面から 6cm 程度、吸水 3 日で 10~11cm 程度まで飽和度が変化している。

初期飽和度 75%の場合は、吸水 6 時間で吸水面から 3cm 程度、吸水 1 日で吸水面から 6cm 程度、吸水 3 日で 12cm 程度まで飽和度が変化している。

吸水 6 時間では、初期飽和度 0, 25, 50, 75%のいずれの場合も同程度までの水分浸透となるが、吸水 1 日, 3 日では初期飽和度の増加に伴い水分の浸透距離も大きくなる結果が得られた。これは、初期飽和度が高いほど細孔表面が水で満たされるため、液水の表面エネルギーがより小さくなり、細孔表面がより濡れやすくなったと考えられる¹⁰⁾¹¹⁾。

(2)全塩化物イオン濃度

図-3 に初期飽和度 0, 25, 50, 75%と変化させた場合

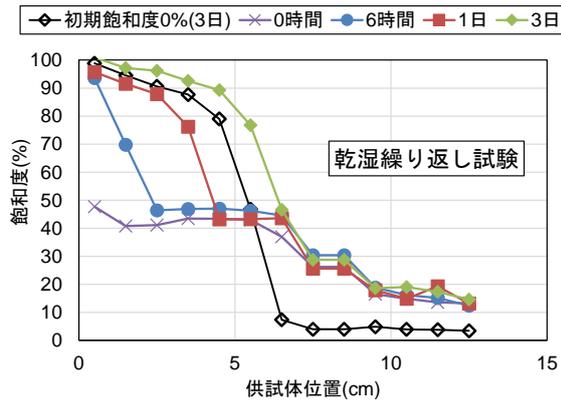


図-4 乾湿繰り返し試験の飽和度分布

の浸せき溶液の全塩化物イオン濃度と、飽和度分布から式(2)を用いて推定した結果を示す。比較用に、全塩化物イオン測定結果も併せて示す。

初期飽和度 0%の場合、塩化物イオンの推定値と実測値を比較すると、吸水時間 6 時間では推定値と実測値がほぼ一致しており、塩化物イオンは移流により移動していると考えられる。しかし、吸水時間 1 日、3 日では、推定値の方が大きくなる結果が得られた。本実験では、水分浸透に伴い、塩化物イオンが浸透することを前提としているが、この仮定に基づいて推定値 > 実測値の状況を考察すると、水分の移動と塩化物イオンの移動は必ずしも同時に生じていないことが予想される。すなわち、水分の移動は液状水だけではなく、水蒸気の移動も含まれていると考えられる¹²⁾。

初期飽和度 25, 50, 75%の場合、初期飽和度が高いほど全塩化物イオン濃度の実測値が推定値よりも大きくなる結果が得られた。これは、吸水面近傍では直接塩化ナトリウム水溶液と供試体が触れているため、濃度勾配を駆動力とした拡散現象で供試体内部に塩化物イオンが浸透したことや、正の電荷に帯電している細孔表面に陰イオンである塩化物イオンが外部から引き寄せられることでコンクリート外部環境の塩化物イオン濃度よりもコンクリート内部が塩化物イオン濃度の高い状態となる疑似吸着¹³⁾によって、コンクリート表層部に塩化物イオンが多く浸透したことなどが考えられるが、詳細については今後検討する必要がある。

3. 乾湿繰り返し試験 (1 サイクル)

3.1 供試体概要

2.1 塩水吸水試験と同様の供試体を用いた。

3.2 乾湿繰り返し試験方法

初期飽和度 0%から 2.2 の塩水吸水試験を 3 日間行った後に、初期飽和度 50%の測定結果と比較検討するために、

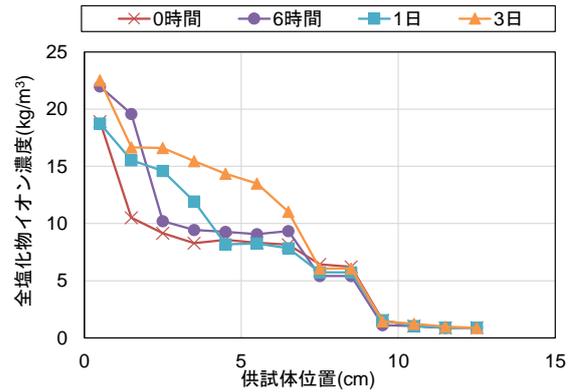


図-5 乾湿繰り返し試験の全塩化物イオン濃度の分布

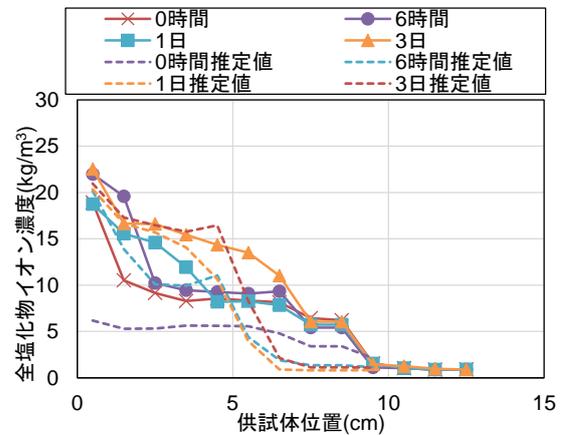


図-6 塩化物イオン濃度分布の推定①

供試体の飽和度がおおよそ初期飽和度 50%と同程度になるように、60°C 環境下で乾燥させた。質量変化から供試体の平均的な飽和度を求めた結果、乾燥期間は 1 週間となった。なお、エポキシ樹脂を 5 面に塗布しているため、1 面乾燥となっている。1 週間の乾燥後、濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に 5mm 程度漬けることで再度吸水試験をした。所定の日数 (0, 6 時間, 1, 3 日) で供試体を取り出し、2.と同様に飽和度と塩化物イオン濃度を測定した。

3.3 試験結果

(1) 乾燥中の水分の移動

図-4 に乾湿繰り返し試験の飽和度分布を示す。初期飽和度 0% (3 日) と 0 時間を比較すると、乾燥期間中に表面から水分が逸散していることと、6cm 以深では飽和度が上昇していることが分かる。このことから、供試体の表層部では乾燥環境の影響によって水分の逸散が生じ表層部で飽和度が一樣になるように水分が移動したと考えられる。また、供試体深部では乾燥の影響は少なく、供試体内部の飽和度が一樣になるように水分が移動したと考えられる。

(2)全塩化物イオン濃度

図-5 に乾湿繰り返し試験での全塩化物イオン濃度分布を示し、図-6 に初期飽和度 0% (3 日) の供試体を 1 週間乾燥させた供試体が、乾燥中に塩化物イオンが移動しないと仮定し、乾燥後 (再塩水吸水試験の直前) から増加した飽和度から、式(2)を用いて算出した塩化物イオン濃度推定値を示す。吸水面から 6cm 以深の塩化物イオンの推定値と実測値を比較すると、実測値 > 推定値となり、乾燥中も塩化物イオンが供試体の深部へと移動していることが分かる。前述したように 6cm 以深では飽和度も上昇していることから水分と塩化物イオンが伴い移動したことが考えられるが、現状では、詳細な移動のメカニズムの解明には至らず、今後詳細に検討する必要がある。

ここでは、初期飽和度 0% での塩水吸水試験を 3 日間行った後に、1 週間乾燥した後の塩化物イオン濃度分布を用いて、乾湿繰り返し後の塩化物イオンの移動を検討した。図-7 に乾湿繰り返し試験の 0 時間から増加した飽和度より式(2)から算出した塩化物イオン濃度推定値を示す。吸水面付近を除き、塩化物イオンの推定値と実測値が一致していることから、飽和度の増加に等しい塩化物イオンの浸透が確認できる。このことより、乾湿繰り返し返し 1 サイクルでは、水分の移動と塩化物イオンの浸透がほぼ等しくなる結果が得られ、移流により塩化物イオンが移動していると考えられる。

(3)乾湿繰り返しによる影響

乾燥後の供試体表面付近の飽和度が、想定通り 50% 程度であったことから、初期飽和度 50% の試験結果と比較した。比較を図-8 に示す。なお、(b)全塩化物イオン濃度の比較には乾湿繰り返し 0 時間と塩水吸水時間 6 時間、1 日、3 日の全塩化物イオン濃度の差を取ることで塩化物イオンの増加量のみを記載した。全ての測定時間で、乾湿繰り返し後の飽和度が初期飽和度 50% と比較して低い結果となった。また、全塩化物イオン濃度は表層部を除き、乾湿繰り返し後が多く浸透しており、乾湿繰り返し試験をすることで塩化物イオンがより多く浸透することが分かった。

4. まとめ

初期飽和度が水分の移動と塩化物イオンの浸透に与える影響を実験的に検討した結果、次の知見を得た。

- 1) モルタル試験体の初期飽和度が高いほど、水分はより深い位置まで浸透した。
- 2) 初期飽和度 0% では、吸水時間 6 時間まで移流により塩化物イオンが移動していると考えられ、吸水時間 1 日、3 日では、塩化物イオン濃度の推定値が測定値を上回っているため、水蒸気の移動に

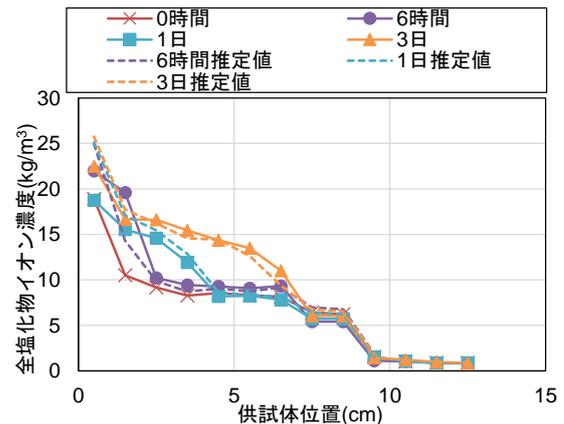
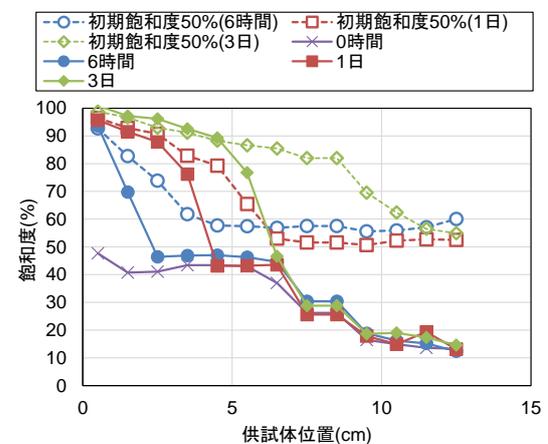
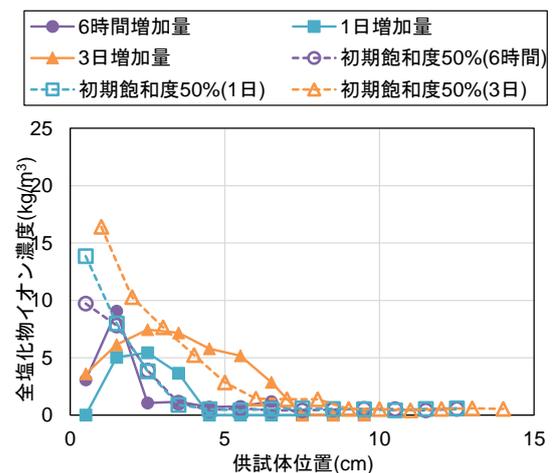


図-7 塩化物イオン濃度分布の推定②



(a) 飽和度分布



(b) 全塩化物イオン濃度

図-8 乾湿繰り返しと初期飽和度 50% の比較

より水分が移動していることが考えられる。

- 3) 初期飽和度 25, 50, 75% では、移流以外の要因である濃度拡散や疑似吸着により塩化物イオンが浸透していると考えられるが、詳細については今後検討が必要である。

- 4) 乾燥過程では、水分は表層部、供試体内部へと移動しており、それに伴って塩化物イオンも移動していると考えられる。
- 5) 乾湿繰り返し試験（1 サイクル）と初期飽和度を調整した塩水吸水試験では、乾湿繰り返し試験の全塩化物イオン濃度が高くなる結果が得られた。浸透距離もより深部まで浸透していた。このことより、塩化物イオンの浸透は乾湿繰り返しをすることで異なる可能性がある
- 6) 小池賢太郎，田中拓磨，山口明伸，武若耕司：モルタルの含水状態と水分移動が塩分浸透特性に与える影響，土木学会第 67 回年次学術講演会，pp259-260，2012.9
- 7) 小池賢太郎，山口明伸，武若耕司：モルタル中の水分移動が塩分浸透に及ぼす影響，コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術に関するシンポジウム，2012
- 8) 小池賢太郎，山口明伸，武若耕司，福重耕平：移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン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.36，No.1，2014
- 9) 千葉俊也，加藤佳孝，池田伊輝：初期飽和度を考慮したモルタル供試体の液状水挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp529-534，2015
- 10) 中村兆治，酒井雄也，岸利治：コンクリート中の液水挙動に与える物理的ならびに化学的性質の影響に関する検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.444-451，2012
- 11) 多田眞作：水分移動と乾燥収縮機構，コンクリート工学，2005
- 12) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集，Vol.13，No.420，1990.8
- 13) 丸屋剛，Somnuk TANGTERMISIRIKUL，松岡康訓：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化，土木学会論文集，Vol.38，No.585，pp79-95，1998.2

謝辞

本研究の一部は、SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の「港湾構造物のライフサイクルマネジメントの高度化のための点検診断および性能評価に関する技術開発」の一環として実施したものである。この場を借りて深く感謝致します。

参考文献

- 1) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」，2013
- 2) 柳博文，福原輝幸，松岡茂：不飽和コンクリート中の水蒸気移動特性と水蒸気拡散係数，コンクリート工学論文集，Vol.12，No.3，pp61-67，2001.9
- 3) 丸山一平，五十嵐豪，岸直哉：セメント硬化体中の水分移動に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.668，pp.1737-1744，2011
- 4) 丸屋剛，武田均：高温乾燥環境下における塩化物イオンの移動，土木学会第 52 回年次学術講演会，pp240-241，1997.9
- 5) 金子樹，阿部道彦：乾湿繰り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・拡散に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.702，pp1073-1079