論文 水分移動に伴う塩化物イオンの浸透性に関する実験的検討

池田 伊輝*1・加藤 佳孝*2・直町 聡子*1・江口 康平*3

要旨: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試験, 干満部を想定した乾湿繰り返し試験を行い、水分移動と塩化物イオン浸透の関係について実験的に検討 した。吸水試験より、表面付近を除いて移流により塩化物イオンが浸透していると考えられた。乾湿繰 り返し試験では、異なる乾湿繰返し条件の結果について、吸水あるいは乾燥の総和期間が等しくなる場 合を比較すると、乾湿繰返しの条件に応じて飽和度分布や全塩化物イオン濃度が変化する結果となった が、吸水時の塩化物イオンの浸透は移流が支配的であると考えられる。

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1¹)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がな されている 2)。

海水が直接接している海洋環境は,飛沫部,干満部, 海中部などに区分することができるが、飛沫部や干満部 では、乾湿が繰り返されることで塩化物イオンが供給さ れやすくなり,海中部よりも全塩化物イオン濃度が大き くなることが報告されている 3. このような水分移動に 伴う塩化物イオンの浸透の検討の多くは45,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。その中でも小池らのは、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濃度を測定することで、 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吸 水試験であり、乾湿繰り返し環境下を想定した試験を行 っている検討は少ない。

本研究では、初期飽和度を変化させたモルタル供試体 を用いた吸水試験、および海洋環境下である干満部を想 定した試験条件での乾湿繰り返し試験を行い、水分移動 とそれに伴う塩化物イオンの浸透性を実験的に把握する ことを目的とした。

2. 塩水吸水試験

*1	東京理科大学	理工学研究	昭科 土木工学	学専攻		(学生会員)
*2	東京理科大学	理工学部	土木工学科	教授	博(工)	(正会員)
*3	東京理科大学	理工学部	土木工学科	助教	博 (工)	(正会員)

表一1 配合表

	8/0	単位量 (kg/m³)			
VV/C (%)	3/0	W	С	S	
40	2.6	235	586	1524	
50	2.5	284	568	1419	
60	2.4	329	549	1316	

表--2 塩水吸水試験水準

	0%	25%	50%	75%	100%
W/C40	0		0		0
W/C50	0	0	0	0	0
W/C60	0		0		0

2.1 供試体概要

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), 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℃)した。

2.2 塩水吸水試験方法

吸水面以外からの塩水の移動を防ぐため、吸水面以外 の5面にエポキシ樹脂を塗布した後,濃度3%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。試験概要を図-1 に示す。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、乾式の切断機を用いて高さ13cmまで1cm毎 に切断し,得られた供試体片の飽和度と全塩化物イオン



濃度を測定した。本実験では、絶乾状態(0%)の供試体 とは別に、初期飽和度 25, 50, 75% とした供試体につい ても検討した.なお、いずれの供試体も経時的に質量を 測定することで、目標初期飽和度の±5%以内となるよう に調整した。また、濃度拡散のみの影響を把握するため 飽水状態(100%)とした供試体も検討した。供試体の初 期飽和度の実験水準を表-2 に示す。また、各水準で試 験体数を2とし、平均したものを実測値とした。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℃環境に静置し、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 一様にすることは困難であるが、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把握を目 的としているため,上記の試験方法を実施した。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一様な水分状 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、その影響についは考慮していない。 塩水吸水試験直後に乾式の切断機で飽和度測定の供試体 片と全塩化物イオン濃度測定の供試体片に切断し、供試 体片の飽和度は試験後,直ちに質量を測定した。その後, 飽和度測定の供試体片に対して、飽水処理(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 Ri 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。

$$R_{i}(\%) = \frac{W_{i} - W_{i(dry)}}{W_{i(sat)} - W_{i(dry)}} \times 100$$
(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), Wi: 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 A 1154 に準拠し,電位差滴 定法により全塩化物イオン濃度を測定した。分析は,吸 水面より 1cm 間隔で高さ 13cm まで行った。分析試料の 調整は乾式の切断機で厚さ 10mm に切断後,エポキシ樹 脂付着部分を除去,150µm のふるいを全量通過するまで 微粉砕した。

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 3%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。

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

$$\varepsilon = \frac{\left(W_{i(sat)} - W_{i(dry)}\right) / \rho_{w}}{\left(W_{i(sat)} - W_{i(w)}\right) / \rho_{w}}$$
(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(=18.2, kg/m³)、 $R_{i(in)}$:供 試体の初期飽和度(%)、 ε :空隙率(-)、 $W_{i(w)}$:供試体の表 乾時における水中質量(g)、 ρ_w :水の密度(=1.00、g/cm³)。 2.5 試験結果

(1)初期飽和度による影響

図-2にW/C50%の初期飽和度0,25,50,75%の飽和 度分布を示す。移動距離に着目すると,吸水6時間では, 初期飽和度によらず水分の移動距離が2~3cm 程度とな ったが,吸水1日3日では初期飽和度25%を除き,初期 飽和度の増加に伴い水分の移動距離が増加する傾向が得 られた。これは,初期飽和度の増加に伴い,細孔表面が 水で満たされている状態となるため,細孔の表面エネル ギーがより小さくなり,細孔表面がより濡れやすくなっ たこと^っで,供試体内部まで水分が移動したと考えられ る。

図-3 に塩化物イオン濃度の測定結果と,飽和度分布 から式(2)を用いて推定した結果を併せて示す。初期飽和 度 0,25%の場合は,吸水面付近を除けば推定値と実測 値がほぼ一致し,供試体内部では,塩化物イオンは移流 により浸透していると考えられる。吸水時間1日,3日 と経過すると,吸水面付近で実測値が増加する傾向が得 られた。本実験では,水分移動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実



図-2 W/C50%飽和度分布

測値>推定値の状況を考察すると、塩化物イオンの浸透 が移流以外の要因によっても生じていることが予想され る。初期飽和度 50, 75%の場合でも、実測値>推定値の 結果となった。吸水面付近では実測値が増加し、初期飽 和度0,25%の吸水時間1日,3日と同様な傾向が得られ た。また、水分の移動位置よりも塩化物イオンの浸透位 置が短く、浸透距離に違いが見られた。ここで、吸水面 付近の全塩化物イオン濃度の増加を検討するため、初期 飽和度 100%の結果を活用して濃度拡散による塩化物イ オンの浸透程度を求める。一例として、初期飽和度 50% の飽和度分布に応じて初期飽和度 100%で得られた全塩 化物イオンの浸透量を換算した分を濃度拡散による移動 分とし、図-3の結果に足し合わせた推定値を図-4に 示す。なお、厳密には、モルタル中の細孔溶液中には移 流に伴い塩化物イオンが存在しているため、初期飽和度 100%の場合に比べて、濃度拡散による浸透量は小さくな ると考えられるが、ここでは、その影響を無視している ため、得られた推定値は、濃度拡散による影響の最大を 意味している。吸水面付近では,実測値>推定値となり, 移流と濃度拡散以外の要因により、吸水面付近の全塩化 物イオン濃度が増加していると考えられる。この現象は,



図-4 濃度拡散を考慮した全塩化物イオン濃度の推定

いずれの初期飽和度の場合にも見られ、その要因として は、固定化や疑似吸着⁴⁾などの影響が考えられるが、詳 細については検討が必要である。

(2) 水セメント比による影響

図-5にW/Cが異なる場合の飽和度分布の測定結果を 示す。初期飽和度 0,50%ともに、吸水時間の経過に伴 い水分の移動距離が増加し、その移動距離はW/Cの増加 に伴い増加している結果となった。図-6にW/Cが異な る場合の全塩化物イオン濃度の測定結果(図中の実線)



と,飽和度分布から式(2)を用いて推定した結果(図中の 点線)を併せて示す。初期飽和度0,50%ともに,吸水 時間の経過に伴い全塩化物イオン濃度が増加している結 果となった。図-5の飽和度分布と同様に,W/Cが大き いほど,塩化物イオンは浸透し易くなることを確認した。

初期飽和度 0%吸水 3 日の推定値と実測値を比較する と、W/C40%および 50%では、表層部を除き概ね推定値 と実測値が一致しており、水分移動に伴い塩化物イオン が浸透していると考えられる。しかし、W/C60%では実 測値>推定値が顕著であった。その理由は分からないが, 他の場合に比べてモルタルの空隙構造が粗であることか ら,濃度拡散の影響や(1)初期飽和度による影響で検討し た移流と濃度拡散以外の要因も増加すると考えられる。 ここで、全塩化物イオン濃度が供試体深部と比べ増加し ている最深部を浸透距離とすると,吸水3日の初期飽和 度 0%と初期飽和度 50%では、初期飽和度の増加に伴い 塩化物イオンの浸透距離が短くなっていることがわかる。 これは、全ての結果で確認することができ、W/Cによら ず、モルタル内部の初期飽和度(水分量)は、吸水に伴 う塩化物イオンの浸透を抑制する方向に影響することが 確認された。



3. 乾湿繰り返し試験

3.1 供試体概要

2.1 塩水吸水試験の水セメント比 50% と同様の供試体 を用いた。

3.2 乾湿繰り返し試験方法

初期飽和度は 0%に調整したものを使用した。飽和度 分布と全塩化物イオン濃度は, 2.2 塩水吸水試験と 2.3 全塩化物イオン濃度測定と同様の方法で測定した。乾湿 繰り返し試験条件を表-3 に示す。Case.1, 2 は,吸水サ イクルを1日に統一した。Case.2 については,乾燥の影 響を把握するため,40℃乾燥にて 3 日乾燥させ,Case.3 では,海洋環境である干満部を模擬したサイクルとし, Case.1 の吸水,乾燥時間の割合を同一にしてサイクル数 を増やした条件とした。合計吸水時間で比較をするため, Case.1, 2 の 1, 3, 5, 10 サイクルと Case.3 の 4, 12, 20, 40 サイクルが対応している。また,本試験では,各サイ クルで乾燥後と吸水後の供試体を用いて測定している。 表記として,20 サイクル目では,乾燥後(吸水前)を19.5 サイクル,吸水後を20 サイクルとしている。

(1) 飽和度分布および全塩化物イオン濃度の実験結果 図-7,8,9にCase.1,2,3の飽和度分布,および全





塩化物イオン濃度の測定結果と飽和度分布から式(2)を 用いて推定した結果を併せて示す。ここで、乾燥の影響 が大きいと考えられる吸水面から3層目までは、各サイ クルで実測した供試体片の飽和度分布の差から、累積吸 水量を算出し、累積吸水量から全塩化物イオン濃度推定 値を求めた。また、供試体の個体差により、Case.2 で 20 サイクルの供試体に深部まで水分が移動しなかったため, 20 サイクルではなく、19.5 サイクルの結果を記載する。 飽和度は、Case.1>Case.2>Case.3の結果となった。Case.1 と Case.2 を比較すると, 乾燥の影響が大きい Case.2 の方 が液状水の移動が抑制されることがわかる。Case.1 と Case.3 を比較すると、吸水と乾燥のサイクルを短くする ことでCase.3の方が飽和度の上昇が抑制される結果とな った。塩化物イオン浸透量は、Case.2>Case.1>Case.3と なり、浸透距離(全塩化物イオン濃度が供試体深部と比 ベ増加している最深部)は、Case.1>Case.2>Case.3とな

った。Case.1 と Case.3 を比較すると、同じ吸水時間でも、 乾湿サイクルが増加することで、吸水面付近の全塩化物 イオン濃度が増加する傾向が得られたが、供試体内部ま で浸透しない結果となった。サイクル数の増加と乾燥の 影響が大きいほど、吸水面付近の全塩化物イオン濃度は 大きくなった。また、塩化物イオン浸透量が Case.1 < Case.2、浸透距離は Case.1 > Case.2 と異なるのは、表層

表-3 乾湿繰り返し条件

サイクル条件				
Case.1	1日吸水1日乾燥	浸せき	1日	
	(20 サイクル)	乾燥 20℃	1日	
Case.2	1日吸水3日乾燥	浸せき	1日	
	(20 サイクル)	炉乾燥 40℃	3日	
Case.3	6時間吸水6時間	浸せき	6 時間	
	(40 サイクル)	乾燥 20℃	6 時間	



部で乾燥程度・範囲に違いが生じたため、同時間の吸水 でも水分の浸透量・距離が変化し、それに伴う塩化物イ オンの浸透量・浸透距離が異なったためと考えられる。 干満部を想定した Case.3 では、Case.1、2 と比べ、吸水 面付近で全塩化物イオン濃度が増加する傾向が得られた が、供試体内部へは浸透しない結果となった。

(2) 推定値との比較

図-7,8,9の吸水面付近の全塩化物イオン濃度に着 目すると、いずれのサイクル条件も、1 層目を除けば、 実測値と推定値が同程度となっており、塩化物イオンは 移流により供試体内部に浸透していると考えられる。ま た、乾湿のサイクルの増加に伴い、1層目よりも2、3層 目の推定値が大きく算出された。1 層目の推定値が、小 さい要因として、乾燥サイクルによる影響があると考え られる。図-10に、吸水前と吸水後の例として、各サイ クルの飽和度分布を示す。いずれの場合も、1 層目の飽 和度の増減量が2,3層目と比べ少ないことが読み取れる。 3 層目までの推定値は、累積吸水量から算出しているた め、1層目では実測値>推定値になったと考えられる。1 層目の飽和度の増減量が内部に比べ小さい現象は、乾燥 吸水サイクルを通して、1 層目を必ず通過して水分が移 動すると考えられ、1層目の飽和度の増減量が見かけ上、 減少したことが原因と考えられる。累積吸水量からの全 塩化物イオン濃度の算出では、1 層目で解離が見られた が,移流により浸透している可能性が高いと考えられる。

4. まとめ

初期飽和度および乾湿繰り返し環境が水分の移動と塩 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。

- 初期飽和度 0,25%では、移流により塩化物イオンが浸透していると考えられる。
- 初期飽和度 0, 25, 50, 75%の増加に伴い,塩化 物イオンの浸透距離は短くなる結果が得られた。
- 水セメント比の増加に伴い、塩化物イオンの浸透
 距離と浸透量が増加する傾向となり、移流による
 塩化物イオンの移動は、空隙構造が影響を与える。
- 4) 本研究が対象とした干満帯を想定した乾湿くり

返し試験では,吸水面付近で全塩化物イオン濃度 が増加する傾向が得られたが,供試体内部へは浸 透しない結果となった。

5) 累積吸水量から,全塩化物イオン濃度の推定が実 測値と同程度となり,乾湿くり返しの塩化物イオ ンの移動は移流により浸透する可能性を示した。

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 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

- 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
- 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, pp.61-67, 2001.9
- 3) 李俌暻,金圭庸,濱幸雄,崔亨吉:海洋環境に暴露した 高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオン浸透 抵抗性,コンクリート工学論文集, Vol.38, No.1, pp.765-770, 2016
- 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, pp.79-95, 1998.2
- 金子樹,阿部道彦:乾湿繰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, pp.1073-1079,2014
- 6) 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, pp.904-909, 2014
- Wittmann F.H. : Surface Tension Shrinkage and Strength of Hardened Cement Paste, Materials and Structures, 1(6), pp.547-552, 1968