

論文 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

小池 賢太郎*1・山口 明伸*2・武若 耕司*3・福重 耕平*4

要旨: 本検討では、飽水状態および絶乾状態の二種類の含水状態のモルタル供試体を準備して、塩水を用いた吸水試験により、モルタル中の水分移動が塩化物イオンの浸透特性に及ぼす影響を把握すると共に、水分移動を考慮した塩化物イオン浸透モデルとして移流拡散モデルを採用してその適用性を検討した。その結果、絶乾状態から吸水を開始した場合、水分移動に伴って塩化物イオンが浸透することを確認した。また、塩化物イオン浸透モデルによる解析結果では、水分移動に伴って塩化物イオンが浸透するだけではなく、吸水面付近や気液界面付近では、水分移動や濃度拡散以外にも塩化物イオンの吸着や固定化、水蒸気拡散の影響が確認された。

キーワード: 塩分浸透, 水分移動, 移流, 拡散

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物における性能照査型の維持管理体系において、塩化物イオンの浸透特性を把握することは、塩害劣化過程における潜伏期の長さを適切に評価・推定するためにも極めて重要である。一般的に、コンクリートへの塩化物イオン浸透特性は、コンクリート内部での塩化物イオンの移動を、濃度勾配を機動力とする拡散現象として捉え、Fick の拡散方程式を利用して、セメントの種類や配合を主要因とする見かけの拡散係数と、環境条件が主要因となる表面塩化物イオンをそれぞれ設定することによって評価されている¹⁾。この拡散モデルによる評価手法は、簡便で適用性も広く優れた方法であるが、見かけの拡散係数には、濃度拡散だけでなく、水分移動に伴う塩化物イオンの移動や細孔空隙中での吸着固定化などの影響が包含されているため、それを用いた浸透予測も、適用可能範囲を外れると精度が大きく低下することが問題となっている。例えば、構造物の塩分浸透状況は、立地環境や気象条件、管理方法によって異なることはもちろん、同一構造物であっても、部位あるいは部材単位ごとに異なることは既に多くのデータが示す通りであるが、この最も大きな原因は、場所ごとに付着する塩化物イオン量が異なることだけでなく、付着した塩化物イオンの内部への浸透特性、すなわち拡散モデルにおけるコンクリートの見かけの拡散係数が環境に応じて異なることも大きな要因である。このような問題に対して、コンクリートの乾湿繰り返しによる毛管水の移動に伴う塩化物イオンの浸透、あるいはセメント水和生成物などに対する塩化物イオンの固定や吸着

などについても、塩化物イオンの浸透予測において考慮すべき要因として扱った研究事例も多く報告されている。しかし、毛管水の移動に伴う塩化物イオンの浸透に関して、具体的に水分移動と塩化物イオンの浸透との関連性を検討した事例^{2), 3), 4)}は未だ少なく、不明瞭な点が多い現状にある。

そこで著者らは、コンクリート中の水分移動と塩化物イオンの浸透特性を関連付けた評価手法を構築することを目的とした各種の実験的検討を行っている。本検討では、飽水状態および絶乾状態の二種類の含水状態のモルタル供試体を準備して、塩水を用いた吸水試験により、モルタル中の水分移動が塩化物イオンの浸透特性に及ぼす影響を把握すると共に、水分移動モデルおよび水分移動を考慮した塩化物イオン浸透モデルの適用性を検討した。

2. 実験概要

本実験では、普通ポルトランドセメント(以下、OPC)を使用して表-1に示す配合で作製した4×4×12 cmの角柱供試体を用いた。配合決定に際しては、各水セメント比で、目標フロー値が150±10 mmとなるようペースト容積比を調整した。また、脱型後は水中養生を28日間施し、所定の初期含水状態に調整した後、吸水試験を実施した。なお、初期含水状態としては、飽水状態および絶乾状態の二種類とし、吸水試験開始後に水分移動が殆ど見られない状態、水分移動が非常に強い状態をそれぞれ模擬した。また吸水試験の際には、図-1に示すように、吸水面を濃度10%の塩化ナトリウム水溶液で完全

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 物質生産科学専攻 修士(工学) (学生会員)

*2 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科教授 工学博士 (正会員)

*4 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科 (非会員)

に浸すため、供試体を吸水面から約1cm程度浸せきさせ、反対面は気中位置となるよう設置した。さらに、同図中に示したように、吸水面の反対となる面（以下、背面）を封鎖する場合の「背面封鎖」と、開放する場合の「背面開放」の2ケースについて検討を行った。なお、供試体側面は水分の出入りが無いようにあらかじめエポキシ樹脂で塗装している。吸水開始後は、所定の吸水日数（1, 3, 28, 91日）経過後に、初期含水状態からの質量変化率の測定と、図-2のように供試体を厚さ1cmずつに切断し、それぞれの試験片の飽和度を算出し供試体内部の飽和度分布とした。ただし、OPC60は試験途中のため、吸水28日までの結果となっている。なお飽和度は、吸水試験終了直後の含水率を飽水時の含水率で割ることで求めるものとし、吸水試験終了直後の含水率は吸水試験終了直後の試験片質量と絶乾状態の試験片質量との差から算出し、飽水時の含水率は飽水時の試験片質量と絶乾状態の試験片質量との差から算出した。また、試験片の絶乾処理には105℃の炉乾燥器を用いた。さらに、供試体内部への塩化物イオン浸透状況を、各試験片に含まれる全塩化物イオン量により評価した。

表-1 供試体配合

呼称	W/C (%)	ペースト容積比	S/C	単体量 (kg/m ³)		
				W	C	S
OPC40	40	0.470	2.1	262	656	1399
OPC50	50	0.430	2.9	263	527	1505
OPC60	60	0.400	3.6	262	436	1584

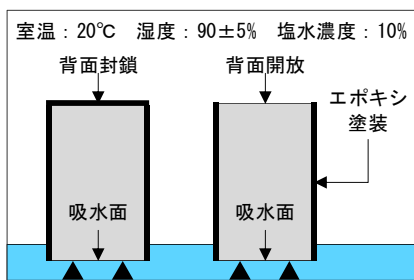


図-1 吸水試験概要図

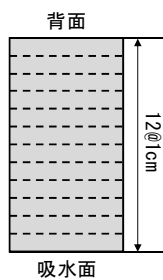


図-2 供試体切断位置

3. 解析理論

3.1 水分移動モデルの検討

これまで、コンクリート中の水分移動に関して、秋田ら⁵⁾、下村ら⁶⁾の研究に挙げられるように、水分移動を水の拡散現象として捉えて、式(1)に示す非線形拡散モデルが用いられてきた。

$$\frac{dSr}{dt} = D(Sr) \cdot \frac{d^2 Sr}{dx^2} \quad (1)$$

ここで、Sr：飽和度(%), D(Sr)：飽和度依存の水分拡

散係数(cm²/year), t：時刻(year), x：距離(cm)である。

しかし、上記の非線形拡散モデルで用いられている、水分拡散係数は、コンクリート中の液相水分（液状水）の移動と気相水分（水蒸気）の拡散の二相の水分移動を合わせたものとなっている。そこで本検討では、液状水の移動と水蒸気拡散を区別した移流拡散方程式による水分移動モデルを用いた。コンクリート中の液状水の移動を移流流束、水蒸気の拡散を拡散流束とした場合、基礎方程式は式(2)に示す通りである。

$$\frac{dSr}{dt} + v_w \cdot \frac{dSr}{dx} = D_w \cdot \frac{d^2 Sr}{dx^2} \quad (2)$$

ここで、Sr：コンクリート中の飽和度(%), v_w：液状水の移動速度(cm/year), D_w：水蒸気拡散係数(cm²/year), t：時刻(year), x：距離(cm)である。

3.2 水分移動を考慮した

塩化物イオン浸透モデルの検討

コンクリート中の水分移動に伴う塩化物イオン浸透モデルに関して、式(3)に示すように、塩化物イオンの浸透を、液状水の移流と濃度勾配による拡散のそれぞれの流束分に分けている。

$$\frac{dC}{dt} + v_w \cdot \frac{dC}{dx} = D_c \cdot \frac{d^2 C}{dx^2} \quad (3)$$

ここで、C：コンクリート中の塩化物イオン濃度(%), v_w：液状水の移動速度(cm/year), D_c：塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/year), t：時刻(year), x：距離(cm)である。なお、本検討では、水蒸気拡散に伴う塩化物イオンの浸透は認められないものと仮定して、水蒸気拡散による流束分は考慮していない。

4. 試験結果および解析値との比較

4.1 飽水状態から吸水を開始した場合（試験結果のみ）

モルタルの初期含水状態を飽水状態として吸水を開始した場合の飽和度分布の経時変化を、背面条件、水セメント比ごとに図-3に示す。水セメント比や背面条件、吸水期間に拘わらず、供試体内部の飽和度は80%程度で安定しており、初期状態からの大きな変化は認められないことから、含水状態はほぼ定常状態にあることが確認できた。

また、塩化物イオンの浸透状況として、OPC50における全塩化物イオン量分布の経時変化を背面条件ごとに図-4に示す。背面条件や吸水日数に拘わらず、飽水状態におけるモルタルへの塩化物イオンの浸透は、濃度拡散による浸透とみなせる分布を示すことが確認された。ここで、全塩化物イオン量分布から算出した、塩化物イオンの見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量を

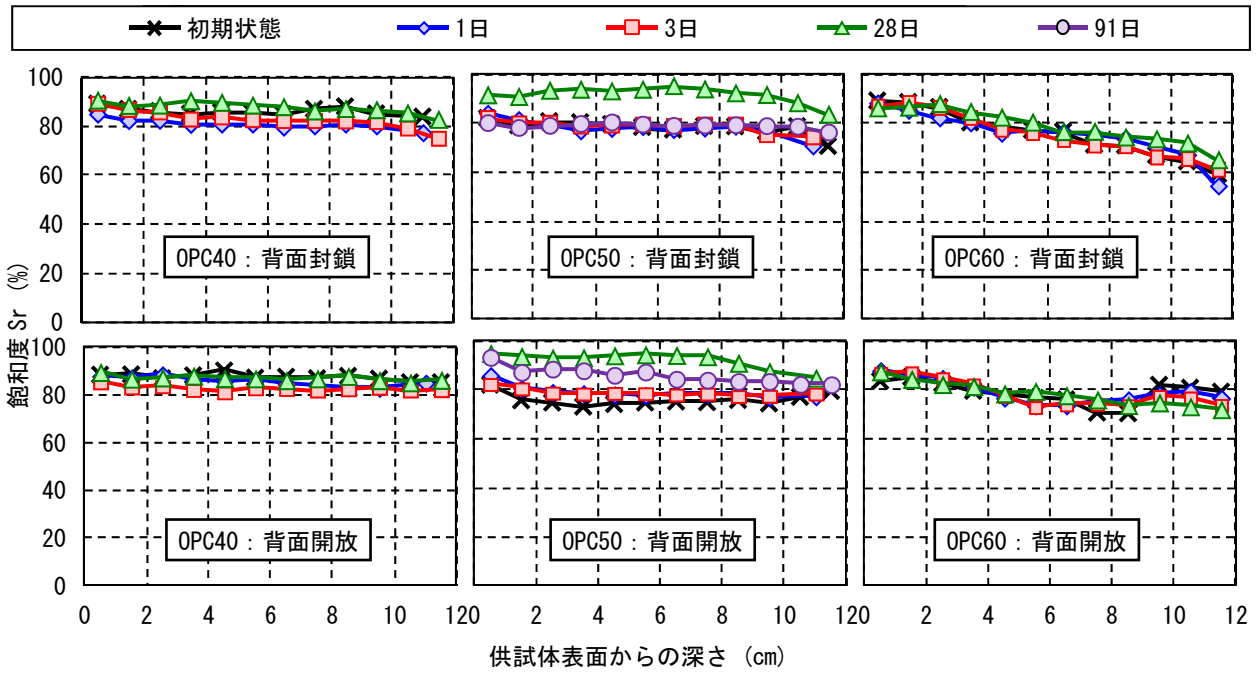


図-3 飽和度分布 (飽水状態から吸水を開始した場合)

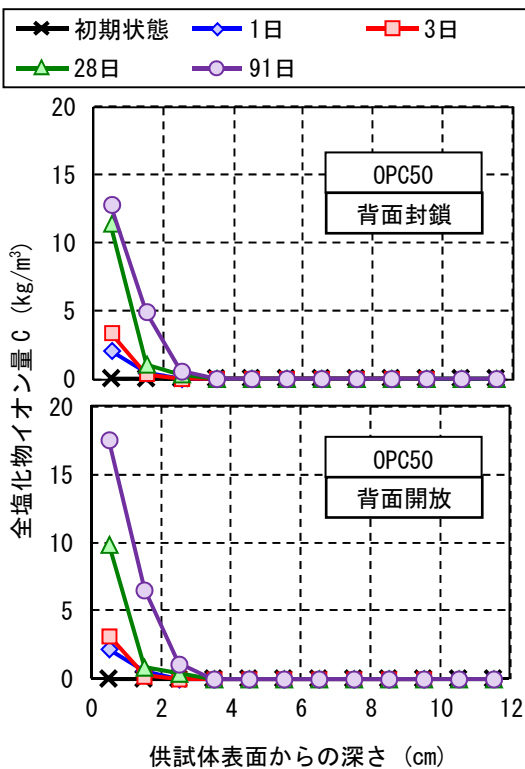


図-4 全塩化物イオン量分布

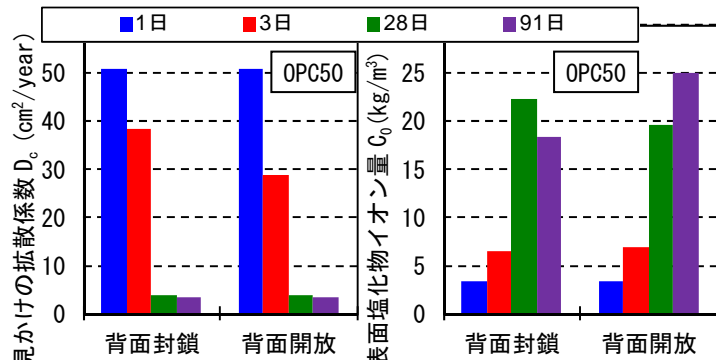


図-5 見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量

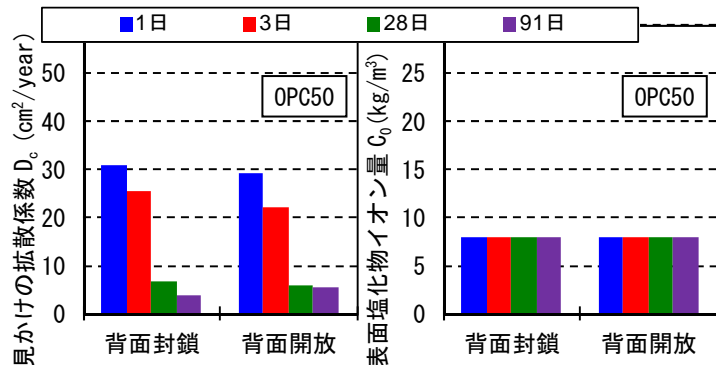


図-6 見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量

(表面塩化物イオン量固定により算出)

図-5に示す。吸水初期においては、見かけの拡散係数は非常に大きな値を示しているが、吸水日数の経過に伴って拡散係数が減少していることが確認された。また、表面塩化物イオン量は吸水日数に伴って増加していることが確認された。なお、本試験では吸水面は終始塩水に浸しているため、図-6に示すように、表面塩化物イオン量を、10%NaCl 水溶液がモルタル中へ飽和度 80%として含まれた場合の塩化物イオン量 7.89kg/m³ に固定し

て、見かけの拡散係数を算出し、次節 4.2 における解析パラメータとした。

4.2 絶乾状態から吸水を開始した場合

4.2.1 解析における各種パラメータ設定条件

水分移動解析および塩化物イオン浸透解析で用いた各種パラメータ設定条件を、表-2に示す。各種パラメータに関して、まず、初期飽和度は試験により得られた、初期状態における飽和度分布の平均値を供試体内部

表－2 各種パラメータ設定条件

		OPC40		OPC50		OPC60	
		背面封鎖	背面開放	背面封鎖	背面開放	背面封鎖	背面開放
飽和度 S_r (%)	初期飽和度	3		8		11	
	境界条件	80					
液状水の移動速度 v_w (cm/year)	吸水面	0	60	0	60	0	60
	背面	0	60	0	60	0	60
	1日	985.5	839.5	1460	1825	1825	1460
	3日	462.3	389.3	608.3	730.0	827.3	754.3
水蒸気拡散係数 D_w (cm ² /year)	28日	78.2	71.7	112.1	117.3	143.4	156.4
	91日	28.1	28.1	50.1	48.1		
表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m ³)				7.89			
見かけの拡散係数 D_e (cm ² /year)	1日			30.90	29.38		
	3日			25.37	21.97		
	28日			6.82	6.04		
	91日			3.71	5.29		

に一樣に与えた。また、吸水面の境界条件、表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数は4.1の結果を基に決定した。次に、背面の境界条件および水蒸気拡散係数は既往の吸湿試験の結果^{3), 5)}を基に設定した。そして、液状水の移動速度に関しては、本検討では実測で液状水の移動速度を測定していなかったため、後述する飽和度分布から液状水の移動深さを読み取り、吸水時間で割ることで水分移動速度とした。ただし、液状水の移動深さを読み取る際に、飽和度分布には水蒸気拡散の影響も含まれているため、液状水と水蒸気の気液界面の飽和度となる深さを液状水の移動深さとした。気液界面における飽和度の検討として、絶乾状態から吸水を開始した場合の吸水1日目目の結果を用いて、飽和度を0, 30, 40, 50, 60%と変化させた場合の水分移動解析の結果との比較を行った。その結果、図-7に示すように、飽和度40%とした場合に実測値とほぼ一致する結果となり、本検討では気液界面を飽和度40%と仮定して、液状水の移動速度を算出した。なお、水セメント比ごとの気液界面位置の経時変化は図-8に示す通りである。

4.2.2 試験結果および解析結果との比較

まず、モルタルの初期含水状態を絶乾状態として吸水を開始した場合の飽和度分布の経時変化を実測値と解析値と併せて、背面条件、水セメント比ごとに図-9に示す。なお、解析値のプロットは、実測値の測定位置と合わせるため各測定区間での平均値とした。絶乾状態から試験を開始した場合は、背面封鎖、背面開放ともに試験日数に伴って供試体内部に向かう水分移動が生じている状況が確認された。また、背面条件の影響として、背面開放の場合では背面からの吸湿と考えられる飽和度の増加が確認される他、吸水面付近の表層部では背面封鎖とほぼ同じ状況となっているが、深部では背面開放での水分移動が速くなっている状況が確認された。これ

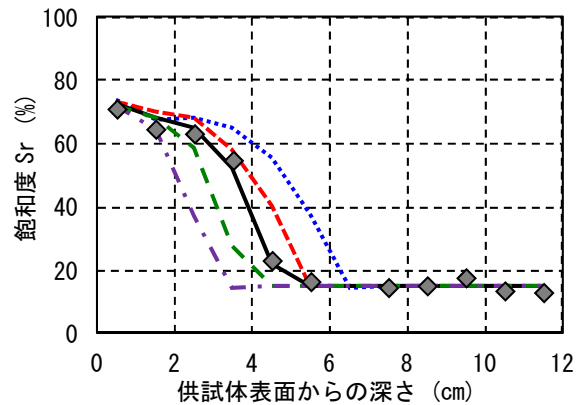
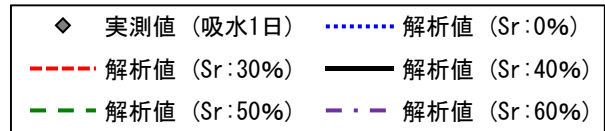


図-7 気液界面となる飽和度の検討

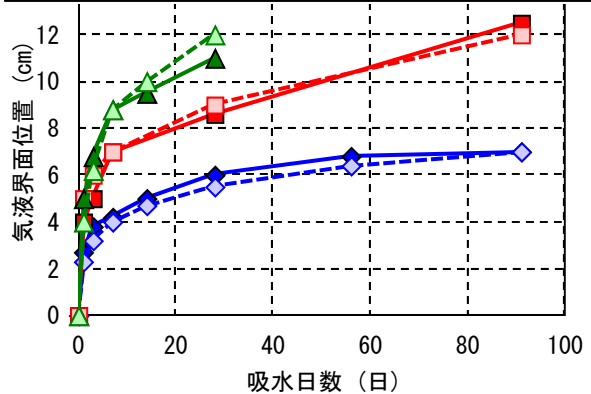


図-8 気液界面位置の経時変化

は、背面封鎖により内部に拘束された空気の影響で水分移動が抑制されたことが原因と考えられる。さらに、水

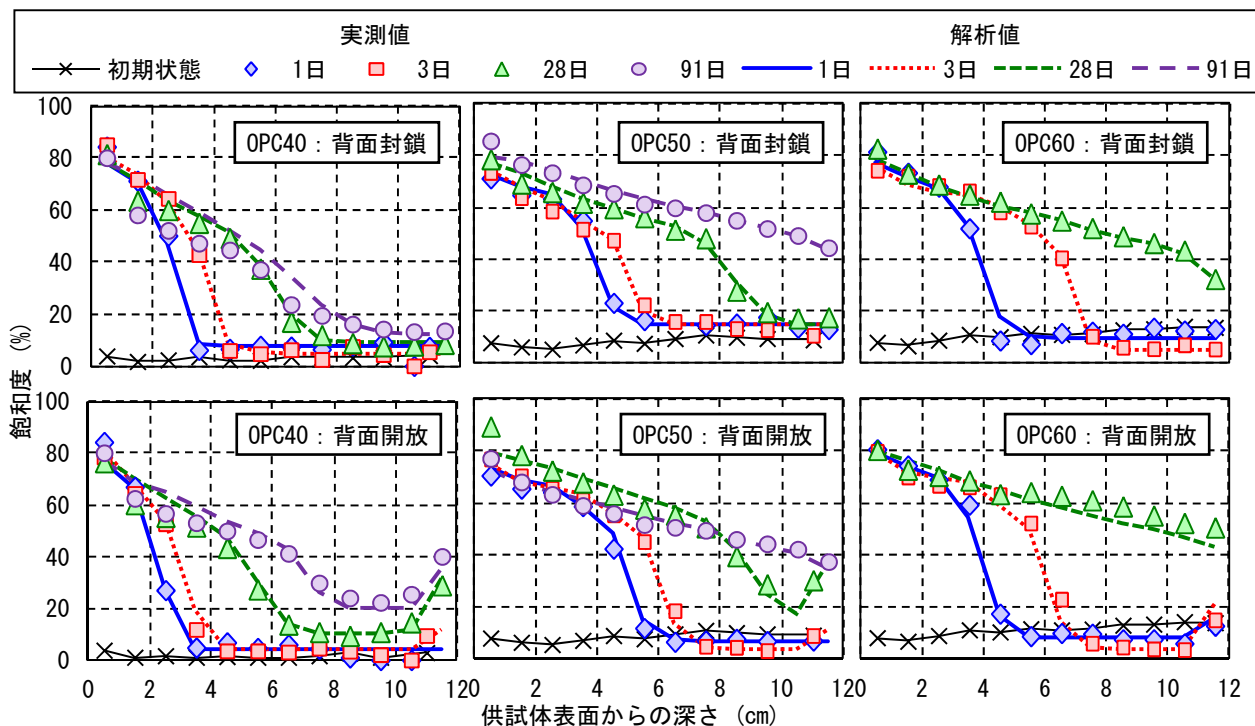


図-9 飽和度分布（絶乾状態から吸水を開始した場合）

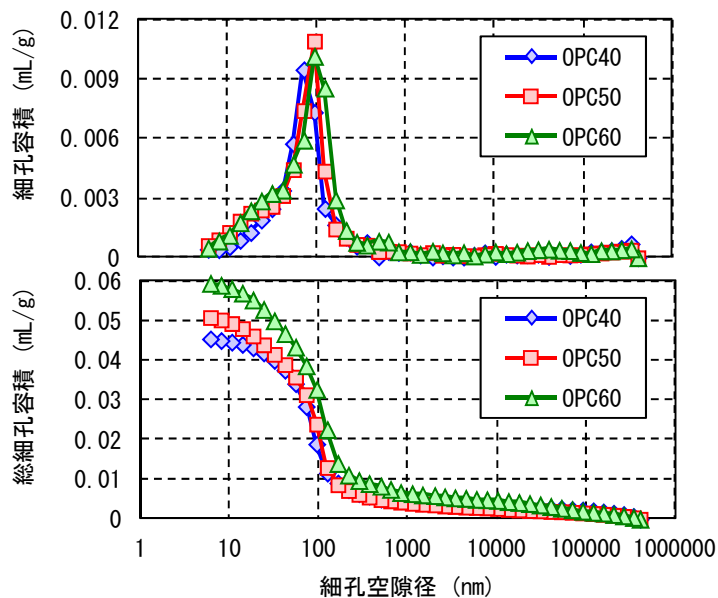


図-10 細孔径分布

セメント比の増加に伴っても水分移動は著しく増加し、OPC60では吸水28日で供試体の最端部に到達していることが確認され、水セメント比による細孔構造の違いが影響していることが原因と考えられる。そこで、水銀圧入式ポロシメーターを用いて、水セメント比ごとの細孔分布の測定を実施し、結果を図-10に示す。水セメント比の増加とともに細孔分布のピークが粗大径側にシフトしており、特に、水分移動や塩化物イオンの浸透といった物質移動への影響が大きいとされる50nm~2000nmの細孔径の細孔容積は⁷⁾、図-11に示すように、水セメント比の増加に伴って著しく増加していることが確認できた。また、水分移動解析では実測値との結果の一

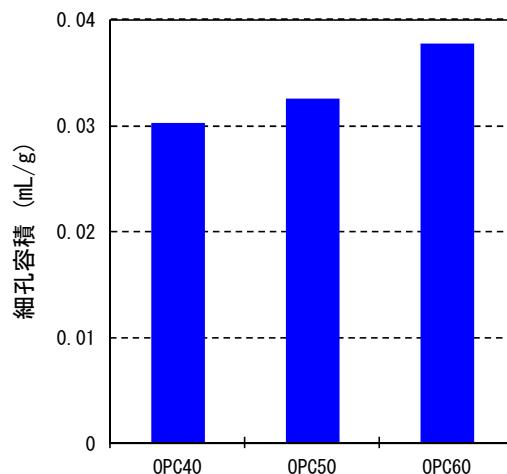


図-11

細孔空隙径50nm~2000nmにおける細孔容積

致は良好であり、背面条件の影響も反映されており、液状水の移動速度が実験値からのものであったものの、水分移動の移流拡散モデルの適用可能性が示唆された。

次に、モルタルの初期含水状態を絶乾状態として吸水を開始した場合の全塩化物イオン量分布として、OPC50の全塩化物イオン量分布の経時変化を実測値と解析値と併せて図-12に示す。絶乾状態から吸水した場合は、水飽和度分布から含水が確認できる位置まで塩化物イオンの浸透が急激に進行しており、水分移動に伴った浸透が生じていることが確認された。また、解析値と比較すると、全体的な傾向は概ね捉えられているものの、吸水面付近に着目すると、解析値では全塩化物イオン量分

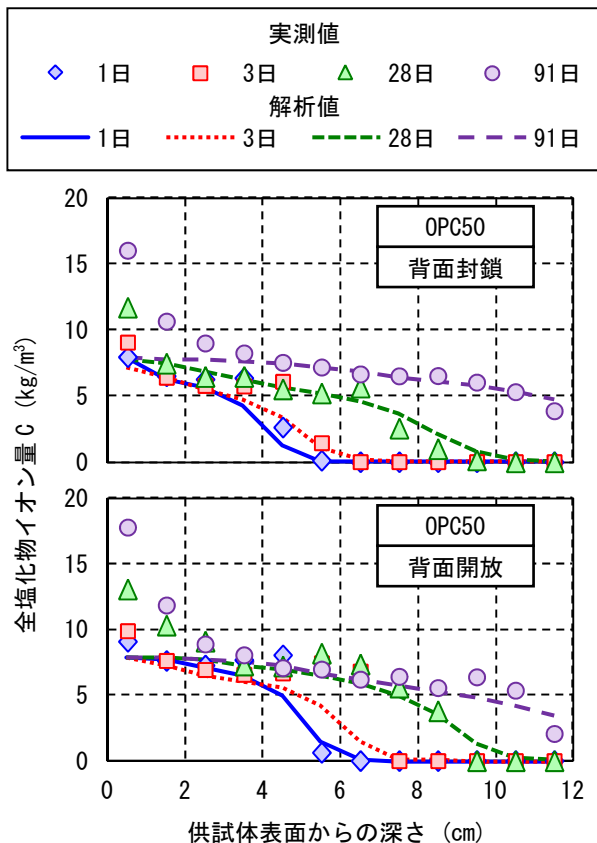


図-12 全塩化物イオン量分布
(絶乾状態から吸水)

布は、飽和度分布と同様な直線的な分布を示したのに対し、実測値では濃度拡散的な曲線が得られた。これは、吸水に伴う水分移動や濃度拡散のほか、塩化物イオンの吸着、固定化などが影響していることが考えられる。また、吸水1日の深さ5cm付近や吸水3日の深さ6cm付近の飽和度が急激に変化するような点でも、実測値と解析値とのズレが目立った。特に実測値では塩化物イオン濃度が増加する傾向があり、水蒸気拡散の影響により、塩化物イオンは濃縮することが示唆された。

5. 結論

本検討の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 飽水状態の様な、水分移動の影響がほとんど見られない場合、塩化物イオンは濃度拡散によって浸透していることが確認された。
- (2) 絶乾状態から吸水を行った場合、水分移動は顕著に表れ、吸水日数の経過とともにモルタル内部へ向かう水分移動が確認された。
- (3) その際、背面条件の影響は、モルタルの供試体深部において水分の移動状況に違いがみられ、背面封鎖の場合、内部に拘束された空気の影響で水分移動が抑制された。
- (4) 水セメント比が水分移動に及ぼす影響として、水セメント比の増加とともに、水分移動はより強くなり、

その原因は水セメント比により細孔構造が変化し、特に50nm~2000nmにおける細孔容積量が影響していると考えられる。

- (5) また、水分移動が生じている際の塩化物イオンの浸透は、水飽和度分布から含水が確認できる位置まで塩化物イオンの浸透が急激に進行しており、水分移動に伴った浸透が生じていることが確認された。
- (6) 解析モデルでの検討に関して、水分移動モデルは比較的精度よく実験値を再現されており、液状水の移動速度が実験値からのものであったものの、背面条件の影響も反映されており、水分移動の移流拡散モデルの適用可能性が示唆された。
- (7) 一方、水分移動を考慮した塩化物イオン浸透モデルは、全体的な傾向は概ね捉えられているものの、吸水面付近や、飽和度が急激に変化する気液界面付近に着目すると、実測値と解析値とのズレが目立った。これは吸水に伴う水分移動や濃度拡散のほか、塩化物イオンの吸着、固定化などの影響や、気液界面での水蒸気拡散の影響により、塩化物イオンは濃縮することが示唆された。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会ほか：2007年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】，社団法人土木学会，pp.110-114，2008.3
- 2) 小池 賢太郎，中田 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回年次学術講演会講演概要集，V-130，pp.259-260，2012.9
- 3) 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，コンクリート技術シリーズ99，社団法人土木学会，pp333-338，2012.10
- 4) Kentaro KOIKE, Toshinobu YAMAGUCHI, Koji TAKEWAKA：Effects of moisture condition and internal water movement on penetration property of chloride ion in concrete：SCMT3，e272，2013.8
- 5) 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，NO.420，V-13，pp.61-69，1990.8
- 6) 下村匠，小沢一雅，前川宏一：細孔容積分布関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.435-440，1993
- 7) 羽原俊祐：硬化コンクリートの組織及び空隙構造と物性の関係に関する研究，慶応大学学位論文，1992