

コンクリート中の水分移動が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響
に関する基礎的研究

[Fundamental Study on Effect of Water Movement
on Chloride Ion Penetration in Concrete]

2016 年 3 月

鹿児島大学大学院 理工学研究科 物質生産科学専攻

小池 賢太郎

Koike, Kentaro

目次

第1章 序論	5
1.1 本論文の背景と目的.....	7
1.2 本論文の構成	8
参考文献	9
第2章 既往の研究	11
2.1 概説	13
2.2 コンクリート中の空隙構造と水.....	13
2.2.1 コンクリート中の空隙構造.....	13
2.2.2 コンクリート中の水.....	14
2.3 コンクリート中における水分移動現象.....	16
2.3.1 飽和状態と不飽和状態.....	16
2.3.2 コンクリート中の水分移動現象の分類.....	16
2.3.3 既往の水分移動モデル.....	17
2.4 コンクリート構造物に対する塩害劣化.....	25
2.4.1 塩害について.....	25
2.4.2 塩化物イオンの浸透予測手法と問題点.....	27
2.4.3 コンクリート中の塩化物イオン浸透に水分移動の影響.....	29
参考文献	34
第3章 吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討	37
3.1 概要	39
3.2 試験概要	39
3.2.1 供試体配合.....	39
3.2.2 試験項目および試験方法.....	40
3.3 試験結果および考察.....	45
3.3.1 塩化物イオン浸透試験.....	45
3.3.2 水銀圧入試験.....	69
3.4 本章のまとめ	75
参考文献	77

第4章 吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透モデルの検討	79
4.1 概要	81
4.2 吸水現象による水分移動モデルの検討	81
4.2.1 水分移動モデル	81
4.2.2 解析パラメーターの決定	81
4.3 吸水現象に伴う塩化物イオンの浸透モデル	93
4.3.1 吸水現象に伴う塩化物イオン浸透モデル	94
4.3.2 解析パラメーターの決定	94
4.4 数値解析によるモデルの適用性の検証	100
4.4.1 解析条件	100
4.4.2 解析結果	103
4.5 本章のまとめ	112
参考文献	114
第5章 乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討	115
5.1 概要	117
5.2 試験概要	117
5.2.1 供試体配合	117
5.2.2 乾湿繰返し試験の試験方法	118
5.3 試験結果および考察	124
5.4 本章のまとめ	137
参考文献	139
第6章 乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透モデルの検討	141
6.1 概要	143
6.2 乾湿繰返しを考慮した塩化物イオン浸透モデルの検討	143
6.2.1 乾燥過程における水分移動および塩化物イオン浸透のモデル化	143
6.2.2 吸水過程における水分移動および塩化物イオン浸透のモデル化	144
6.2.3 解析パラメーターの決定	145
6.3 数値解析によるモデルの適用性の検証	147
6.3.1 解析条件	147
6.3.2 解析結果	150
6.4 本章のまとめ	159
参考文献	160

第7章 乾湿繰り返し履歴を考慮した塩化物イオン浸透予測手法の提案	161
7.1 概要	163
7.2 適用範囲	163
7.3 乾湿繰り返し履歴を考慮した塩化物イオン浸透シミュレーション	164
7.3.1 シミュレーションの結果.....	164
参考文献	167
第8章 結論	169
謝辞	175

第1章

序論

1.1 本論文の背景と目的

我が国において、鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化が社会問題化してから久しく、これまでに塩害劣化を抑制するために、塩害に強い混合セメントの開発やエポキシ樹脂被覆鉄筋、電気化学的防食など様々な防食技術が発展していった。しかしながら、これらの対策を以てしても、未だに塩害劣化を完全に無くすることができていないのが現状である。そのため、現在の鉄筋コンクリート構造物の塩害に対する耐久性設計体系では、構造物の要求性能が塩化物イオンの侵入に伴う鉄筋腐食によって損なわれないことを十分に照査することを定めている。つまり、供用期間内において、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が鉄筋腐食発生限界量以下であること、もしくは鉄筋に腐食が生じても構造物が要求性能を保持できることを照査する必要がある¹⁾。また、予防保全型の維持管理体系においては、予定供用期間中におけるコンクリート中の塩化物イオンの浸透状況及び鉄筋の状態をできる限り正確に把握し、コンクリート中の鉄筋が発錆しない潜伏期の状態、もしくはコンクリート表面に変状が現れない進展期の状態にとどめる維持管理計画とする必要がある²⁾。つまり、鉄筋腐食の劣化因子の一つである塩化物イオンの浸透特性を把握することは、鉄筋コンクリート構造物の塩害の劣化進行過程における潜伏期の長さを適切に推定するうえで極めて重要である。

一般的に、コンクリート中への塩化物イオンの浸透は、コンクリート中での塩化物イオンの移動を、濃度勾配を駆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、境界条件として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³⁾。この拡散モデルによる評価手法は、非常に簡便で優れた方法であるが、ここでの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含まれているため、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考えられる。例えば、構造物の塩化物イオンの浸透状況は、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、同一構造物の同一材料であっても、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により示されている。この最も大きな原因は、場所ごとにコンクリート表面に付着する塩化物イオン量が異なることだけではなく、付着した塩化物イオンのコンクリート中への浸透特性、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にある。そのため、近年では、コンクリート中への塩化物イオンの浸透特性に影響を及ぼす要因として、乾湿繰返しによるコンクリート空隙中の水分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、濃度拡散から分離して取扱った研究事例も数多く報告されている^{3), 4)}。しかし、コンクリート空隙中の水分移動に伴う塩化物イオンの移動に関しては、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は少なく、未だ不明瞭な点が多い。

そこで本研究では、コンクリートが吸水を受ける場合や乾湿繰返し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、そのメカニズムを明らかにするとともに、水分移動を考慮した塩化物イオン浸透予測手法の構築およびその適用範囲を提案した。

第1章 序論

1.2 本論文の構成

本論文は、以下に示すように8章からなる。

第1章は、本論文の背景および目的を明確にし、論文の構成を示した。

第2章は、塩害におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透媒介である水に着目して、コンクリート中における水分移動現象の分類について述べ、これまでに多くの研究者らにより検討されてきた水分移動モデルについて整理した。また、鉄筋コンクリート構造物に対する塩害の劣化機構や、塩害の耐久性照査で用いられる塩化物イオンの濃度拡散モデルについて述べるとともに、塩化物イオン浸透における水分移動問題について取り上げ、現行の濃度拡散モデルの課題点を抽出した。

第3章は、未だ十分に検討されていない、コンクリート中における水分移動が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を把握するために、疑似飽和状態および絶乾状態のモルタルを使用して、吸水現象における水分移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透を水セメント比やセメント種類の影響に着目して実験的に検討した。

第4章では、第3章の「吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討」から得られた結論を基に、吸水現象を受けるコンクリートへの水分移動モデルおよびそれに伴う塩化物イオンの浸透モデルの構築を行った。

第5章は、異なる乾燥条件での乾湿繰り返し試験を実施して、乾湿繰り返し履歴における水分移動特性および塩化物イオン浸透特性を実験的に検討した。

第6章では、第5章の「乾湿繰り返し履歴を受けるコンクリートの塩化物イオン浸透特性に関する実験的検討」から得られた結論を基に、乾湿繰り返し履歴を受けるコンクリートへの水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデルの構築を行った。

第7章は、第4章および第6章をとおして構築した「水分移動を考慮した塩化物イオン浸透モデル」について、数値シミュレーションをおこない、乾湿繰り返しなどの水分移動がある環境でも、現行の拡散モデルで対応できる範囲と水分移動を考慮した本モデルを適用すべき範囲を明確にした。

第8章は、各章で得られた結果を取りまとめて結論とした。

参考文献

- 1) 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編] , pp. 119-122, 2008.
- 2) 土木学会: 2013 年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編] , pp. 109-183, 2013.
- 3) 丸屋剛: 毛管水の移動にともなう塩化物イオンの移動, 土木学会第 51 回年次学術講演会概要集, Vol. 51, No. 5/V-274, pp. 548-549, 1996.
- 4) Islam, Md. Shafiqul.: Stagnation of liquid water/chloride ion penetration in concrete and application of the knowledge to durability design and LCC, Doctoral thesis at University of Tokyo, 2011.

第2章

既往の研究

2.1 概説

コンクリート中への塩化物イオンの浸透において、コンクリート中の水の存在は浸透媒介となる極めて重要な物質である。本章では、まずコンクリート中の水について分類し、さらにコンクリート中における水分移動現象について、これまでに多くの研究者らにより検討されてきた水分移動モデルと併せて整理した。

一方で、コンクリート中への塩化物イオンの浸透に関して、現在、塩害の耐久性照査で用いられる塩化物イオンの濃度拡散モデルについて述べるとともに、既往の塩化物イオンの浸透に関する研究事例を取り上げ、現行の濃度拡散モデルの課題点を抽出した。

2.2 コンクリート中の空隙構造と水

コンクリート中には、nm オーダーから最大 mm オーダーまでの大きささまざまな空隙が存在し、通常、空隙中は水で満たされている。この空隙中の水は、温度や湿度等の環境条件の変化によって容易に蒸発・吸着を生じ、空隙中の水分量の変化に伴って、コンクリートの収縮といった体積変化を引き起こすだけでなく、塩化物イオンや二酸化炭素といった劣化因子のコンクリート中への移動性状に大きな影響を及ぼすことが判明している。

本節では、コンクリート中の空隙構造と水の関係性について整理し、本論文で取り扱う空隙の種類および水の種類について明確にした。

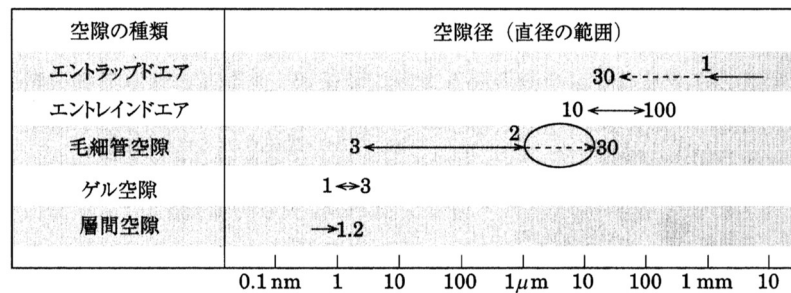
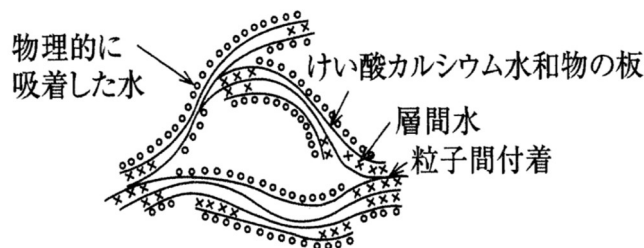
2.2.1 コンクリート中の空隙構造

コンクリートはセメントペースト（セメント+水）と砂利や砂などの骨材からなる二相複合材料であり、セメントと水の水和反応の過程やセメントペーストと骨材の界面で空隙を形成する。コンクリート中の空隙構造は空隙形成過程から、図 2.2-1 のように分類することができる。

まず、大きく分けて練り混ぜ時に混入した空気による気泡、水が占めていた部分の水泡に分類される。ここで、練り混ぜ時に混入した空気による気泡は、エントラップドエアとエントレインドエアに分類され、エントラップドエアは練り混ぜ時に意図せず巻き込まれた気泡で、空隙径は 1mm 以上と極めて大きく、コンクリートの強度や耐久性の面で有害となる。一方、エントレインドエアは 50~200 μ m 程度の独立した球形の空隙で、AE 剤によって意図的に連行した気泡であり、耐凍害性やワーカビリティを確保する上で必要となる。

次に、水の占めていた部分の空隙は、ゲル空隙と毛細管空隙に分類される。ここで、ゲル空隙とは、図 2.2-2 に示ように、水和反応の過程で水和生成物のゲル（主に、C-S-H ゲル）により充填されなかった空隙であり、1~3nm 程度の極めて小さな空隙である。これは、強度や耐久性上の悪影響はほとんどないが、乾燥収縮に対して影響を及ぼす可能性があるとされている。また、毛細管空隙とはフレッシュセメントペースト内で水が占めていた空間の残存、およびセメントペーストと骨材の界面に形成された空間から成り、空隙径は 3nm~30 μ m 程度とされており、コンクリートの各種耐久性において最も重要となる空隙である。

大分類	小分類 (英語名)	粒 径 (ピーク値)	形 状 存在位置
練 混 ぜ 時 に 混 入 し た 空 気 による 気 泡	エントラップドエア (entrapped air)	1 mm 以上 (2 mm)	ゆがんだ楕円形 骨材間に存在
	エントレインドエア (entrained air)	10 ~ 100 μm (200 μm)	球状 セメントペースト (CP) 中に存在
水 が 占 め て い た 部 分 (自 由 水 空 間) の 空 隙	毛細管空隙 (capillary pore)	3 nm ~ 30 μm (20 ~ 200 nm)	長短軸比の大きい間隙・亀裂状 CP 中や CP と骨材間などに存在
	ゲル空隙 (gel pore)	1 ~ 3 nm (2 nm)	ゲル間に存在
	層間空隙 (intracrystallite pore)	1.2 nm 以下	ゲル内に存在


図 2.2-1 セメント硬化体中の空隙¹⁾

図 2.2-2 ゲル空隙の構造¹⁾

2.2.2 コンクリート中の水

コンクリート中の水は2.2.1項で説明した各種空隙中に存在し、それぞれ、エントラップドエアやエントレインドエア内に存在する水を「間隙水」、ゲル空隙中の水を「ゲル水」、毛細管空隙中の水を「毛細管水」と分類することができる²⁾。これらは、物理化学的吸着や毛細管凝縮作用によって存在している水であるが、各々の空隙中に存在している水の量や性質は、配合や養生方法、温度、湿度といった様々な条件によって変化する。

一方、コンクリートの空隙中の水とは別に、C-S-H ゲルや水酸化カルシウム、エトリンガイト、モノサルフェートなどのセメント水和生成物はセメントの水和反応によって化学的に結合した水を保有している。Powers ら³⁾は、コンクリート中に存在する水について図2.2-3に示すように分類した。まず、コンクリートの空隙中の水であるゲル水や毛細管水を蒸発性水分と定義し、化学結合水は非蒸発性水分と定義した。ここで、ゲル水と毛細管水を

合わせた蒸発性水分は、コンクリート中の総空隙量とし、Powers はゲル水と非蒸発性水分は水和物が保有していると定義した。特に、毛細管水は、セメント硬化体固体表面の吸着力の影響を受けず、主に自由水として存在し、脱水と吸水が容易な水分である。一方、ゲル水は、セメント硬化体の主要水和物である C-S-H が保有している水分であり、毛細管水とは異なり、セメント硬化体固体表面の影響を大きく受ける。そのため、ゲル空隙中の水の性質は、毛細管空隙中の水とは大きく異なることが報告されている^{3), 4)}。また、蒸発性水分は、D-dry (-79℃の氷の平衡水蒸気圧下での乾燥) や炉乾燥器による $105 \pm 5^\circ\text{C}$ の加熱によって蒸発した水分であることが定義されている。非蒸発性水分は、セメント硬化体を D-dry や $105 \pm 5^\circ\text{C}$ によって乾燥後、試料を 1000°C 近くの温度によって強熱し、強熱前後の減量として一般的に定義されている。しかし、C-S-H が保有しているゲル水は化学結合水と比べて不安定であり、湿度変化や 110°C 以下の温度で容易に蒸発することが明らかになっている。

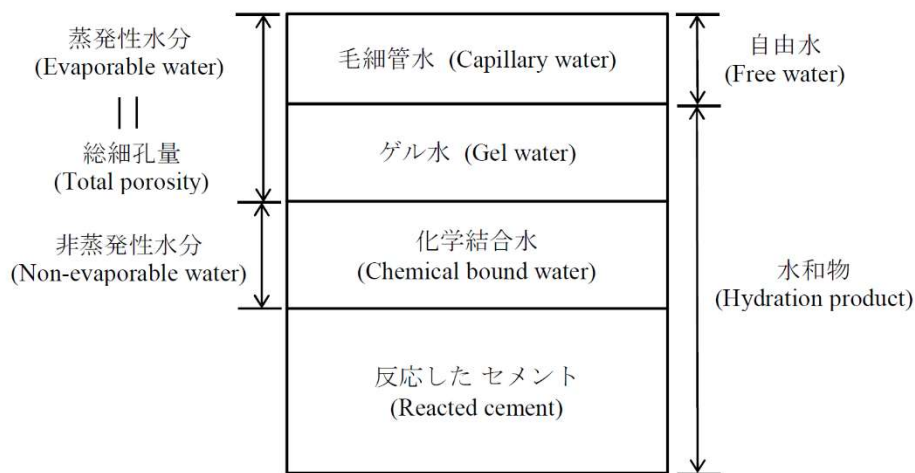


図 2.2-3 コンクリート中の水の分類³⁾

なお、本論文では、塩化物イオンの浸透に影響を及ぼす毛細管空隙やゲル空隙に存在する水、すなわち蒸発性水分を対象とするため、化学結合水である非蒸発性水分は取り扱わないものとする。また、コンクリート中の蒸発性水分は、水の状態として液相水分と気相水分の二相が存在することが明らかになっている⁵⁾。

そこで、本論文では、蒸発性水分を「水分」、蒸発性水分のうち液相水分を「液状水」、蒸発性水分のうち気相水分を「水蒸気」と呼称し取り扱う。(図 2.2-4)

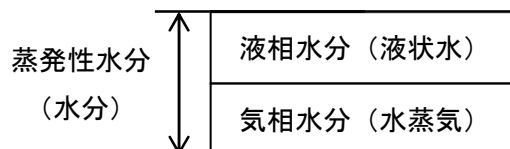


図 2.2-4 蒸発性水分の状態分類

2.3 コンクリート中における水分移動現象

2.3.1 飽和状態と不飽和状態

一般的にコンクリートの保水状態を大きく分ける言葉として、コンクリート中の空隙が液状水で満たされている状態の飽和状態（図 2.3-1）、コンクリート中の空隙が液状水と空気（乾き空気と水蒸気を含んだ湿り空気の混合気体）が共存している状態の不飽和状態が用いられる（図 2.3-2）。ただ、実環境においては、コンクリート中の空隙に取り込まれた封入空気のために、空隙すべてが液状水で満たされた完全な飽和状態になることは珍しく、ほとんどの場合、限りなくそれに近い疑似飽和状態となることが明らかになっている。

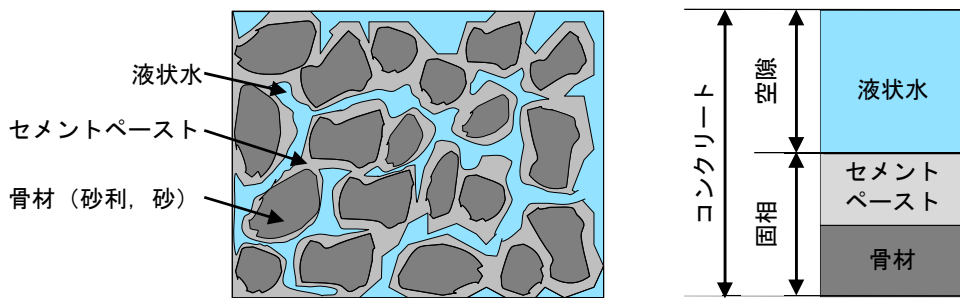


図 2.3-1 飽和状態のコンクリートの組成模式図

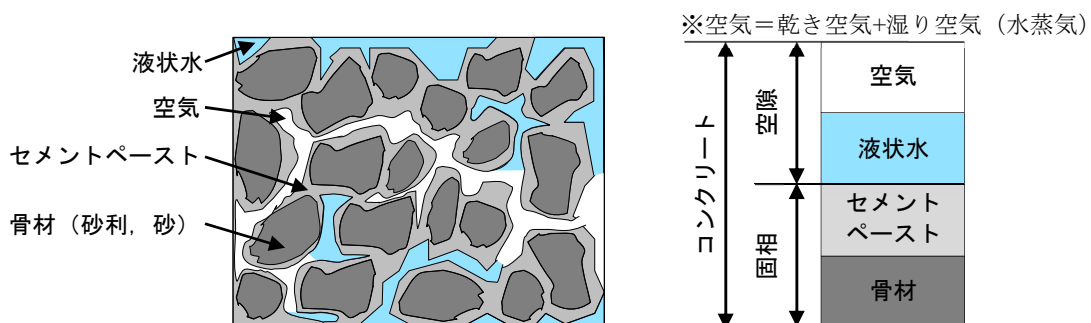


図 2.3-2 不飽和状態のコンクリートの組成模式図

2.3.2 コンクリート中の水分移動現象の分類

コンクリート中の水分は、温度や湿度等の外部環境の変化やコンクリート中の保水状態などにより移動する。このコンクリート中の水分移動は、移動の駆動力により、移動形態は大きく異なる。一般的に水分移動現象は以下のように分類することができる。

（1）透水現象

透水現象とは、圧力水頭や位置水頭などの水頭差により生じる水理学的な流れであり、一般的には飽和状態もしくは疑似飽和のコンクリートを考える。コンクリート中の透水現象は、Darcy 則により式 2.3-1 で示すことが可能であり、一般的なコンクリートの透水係数 k は $1 \sim 100 \times 10^{-11} \text{cm/sec}$ と極めて小さく、透水性舗装コンクリートでは $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 以上で設計される⁶⁾。

$$v = ki$$

式 2.3-1

ここで、 v ：流速 (cm/sec)， k ：透水係数 (cm/sec)， i ：動水勾配である。

(2) 吸水現象

乾燥状態つまり不飽和状態にあるコンクリートが、降雨や海洋環境下における波浪の影響により液状水に接した場合に、液状水がコンクリート中へ移動する現象であり、空隙の毛细管現象に伴う間隙水圧と間隙空気圧との差であるサクションが駆動力となる。コンクリートが吸水を受けると、表面近傍では瞬間的に飽和状態となるので、吸水現象においてコンクリートは部分飽和状態となる。

ただし、コンクリート全体が飽和状態や疑似飽和状態の場合は、サクションは0となるため、吸水現象は起こらない。このように、透水現象と吸水現象の現象としての違いはサクションの有無によるものだが、水頭差に起因した流れであることから、Darcy 則を適用して吸水現象を表すことがあり、その場合、透水係数はコンクリート中の水分量に依存した不飽和透水係数が用いられる。

(3) 乾燥現象

コンクリートが大気中に接する環境において、コンクリートが受ける水分移動のひとつであり、コンクリート中の湿度が大気よりも高い場合に、コンクリート中の水分が大気との湿度と平衡状態に向かう現象である。一般的に、乾燥現象におけるコンクリートは不飽和状態となる。また、水分は水蒸気の形態で大気中に逸散するが、コンクリート中では、液状水の形態でも移動すると考えられている⁷⁾。

(4) 吸湿現象

吸湿現象も大気中のコンクリートが受ける水分移動のひとつであり、乾燥現象とは逆に、コンクリートの湿度が大気よりも低い場合に、コンクリート中の水分が大気との湿度と平衡状態に向かう現象となる。吸湿現象においても、コンクリート中は不飽和状態にある。なお、次項にて詳細を述べるが、コンクリートのような多孔質かつインクボトルが介在する材料において、乾燥現象と吸湿現象は非可逆性の性質を示すことが報告されている⁸⁾。

2.3.3 既往の水分移動モデル

コンクリート中の各種水分移動過程は、それぞれで駆動メカニズムが大きく異なることや、飽和コンクリートと不飽和コンクリートの関係の特異性から、これらを一意の式で表現することは極めて困難である⁹⁾。そのため、これまで多くの研究者らにより、各水分移動過程に対応した水分移動の巨視的モデルおよび微視的モデルの検討が試みられてきた。

本項では、吸水現象、乾燥現象および吸湿現象でそれぞれ適用可能な水分移動モデルについてまとめた。

(1) 乾燥現象に適用される水分移動モデル

● Pickett の線形拡散型モデル

Pickett ら¹⁰⁾の線形拡散モデルは、乾燥現象における水分移動の巨視的モデルの先駆けである。乾燥現象におけるコンクリート中の水分移動現象を巨視的に見た場合、含水量の高い領域から低い領域に向かって水分が移動し平衡状態に向うことであり、これは、水分量の勾配を駆動力として水分の質量流束が生じる拡散現象と捉えることができる。Pickett らは拡散型の支配方程式(式 2.3-2)により乾燥収縮ひずみを評価し、コンクリート供試体の乾燥収縮応力解析を行った。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) \quad \text{式 2.3-2}$$

ここで、 S : 乾燥収縮ひずみ(含水量へ変換が可能)、 D : 拡散係数 (cm^2/day)、 t : 乾燥材齢 (day) である

この Pickett らが示した支配方程式では、乾燥収縮ひずみ S を変数としているが、これは含水量と乾燥収縮ひずみの関係を線形と仮定したものであるため、乾燥収縮ひずみ S を含水量へ変換することで、水分移動の支配方程式として取り扱うことができる。また、線形拡散型モデルの特徴として、拡散係数 D は物質固有の定数として扱っている点がある。

しかし、乾燥現象の線形拡散型モデルの課題点として、拡散係数 D を定数として扱うことで、図 2.3-3 に示すように、乾燥初期の高含水時では乾燥量を過小に評価し、乾燥後期の低含水時には過大に評価する傾向が阪田ら¹¹⁾により実験的に確認されている。これにより、水分の拡散係数が一定ではなく、高含水時には拡散係数が大きく、低含水時には小さいということになり、拡散係数の含水量への依存性が示唆された。

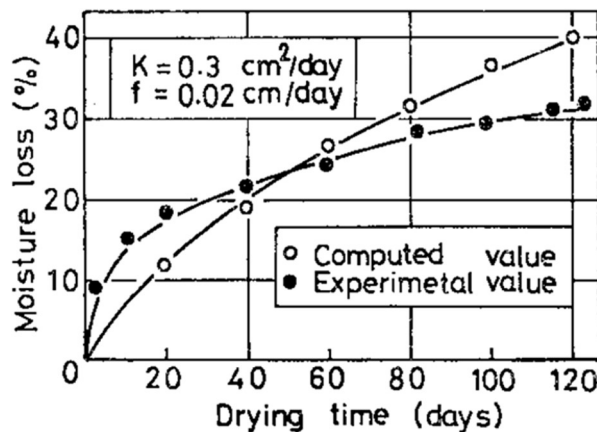


図 2.3-3 線形拡散による計算例¹¹⁾

● Bazant の非線形拡散型モデル

Bazant ら¹²⁾は、拡散係数の含水量への依存性に対して、拡散係数を相対湿度の関数として定義した式 2.3-3、および非線形拡散型モデル（式 2.3-4）を提案した。

$$C(H) = C_1 \left(\alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + ((1 - H)/(1 - H_c))^n} \right) \quad \text{式 2.3-3}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div} (C \cdot \text{grad} H) + \frac{\partial^2 H_s}{\partial t} + K \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{式 2.3-4}$$

ここで、 H ：空隙中の相対湿度、 H_c ：拡散係数比 $C/C_1=0.5$ の時の相対湿度、 $C(H)$ ：拡散係数、 C_1 ：相対湿度 100%における拡散係数、 α_0 および n ：定数、 H_s ：水和反応により消費される相対湿度、 K ：熱拡散係数、 T ：絶対温度である。

式 2.3-4 は単なる水分移動モデルとしてではなく、熱・水分同時移動モデルとして、水和反応による水分の消費（右辺第二項）と熱伝導の影響（右辺第三項）が考慮されており、水分移動のメカニズムの考察に基づき関数形が導出されている。そして、Bazant らは乾燥現象の実験結果と解析結果の結果よりパラメーター α_0 および n を決定し、図 2.3-4 に示す、相対湿度と拡散係数の関係を導き出した。

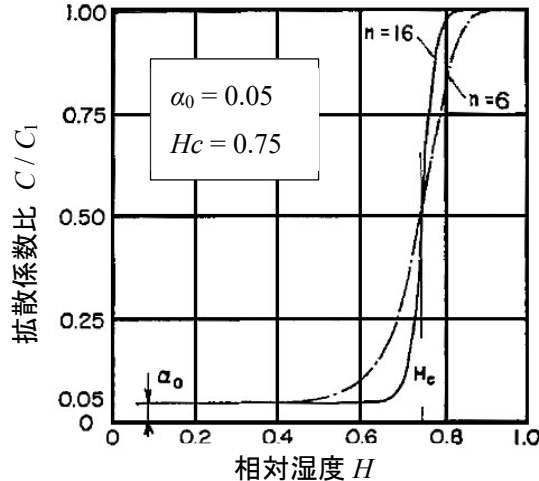


図 2.3-4 Bazant らにより導出された乾燥現象の相対湿度と拡散係数の関係¹²⁾

この Bazant らの示した水分移動モデルは、後年も多くの研究者に引用され^{11), 13), 14), 15), 16)}、その中でも阪田ら¹¹⁾は、固体中の拡散に関する理論である Boltzmann 変換を応用して、大きさの異なるコンクリート供試体の乾燥試験の結果から、含水率と拡散係数の関係を以下の近似式（式 2.3-5）で表している。

$$K(C) = K_0 + \frac{K_S - K_0}{1 + \{(100 - C)/(100 - C_c)\}^n} + \frac{K_S - K_0}{1 + \{100/(100 - C_c)\}^n} \cdot \frac{C - 100}{100} \quad \text{式 2.3-5}$$

ここで, K_S : 飽和状態での拡散係数, K_0 : 絶乾状態での拡散係数, C_c : 変曲点での含水率, n : 定数である.

図 2.3-5 内に示す, 阪田らにより導出された含水率と拡散係数の関係は, 含水率が高い範囲においては拡散係数が急激な勾配を描き, 含水率が 70~80%程度以下ではほぼ一定値になる傾向を呈している. この傾向は, Bazant らが示した関係 (図 2.3-4) とほぼ同じであったものの, 実測によって得られたことは極めて重要である. また, Boltzmann 変換を用いて実験的に含水率と拡散係数の関係を導出する研究は, その後, 秋田ら¹⁷⁾によっても試みられ, 相対含水率と拡散係数の関係は, 阪田らと同様の傾向が得られている (図 2.3-6).

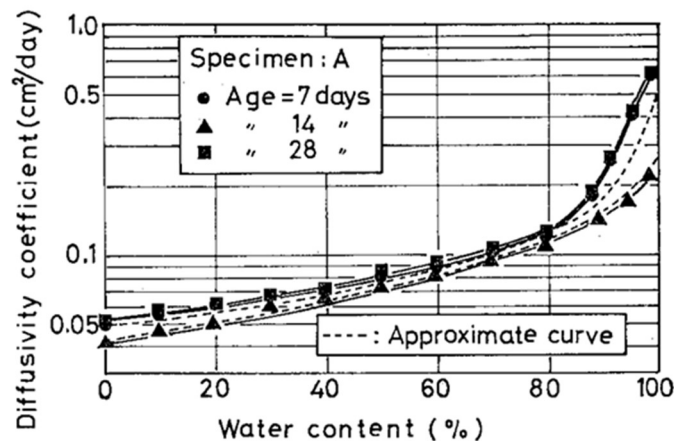


図 2.3-5 阪田らにより導出された乾燥現象における含水率と拡散係数の関係¹¹⁾

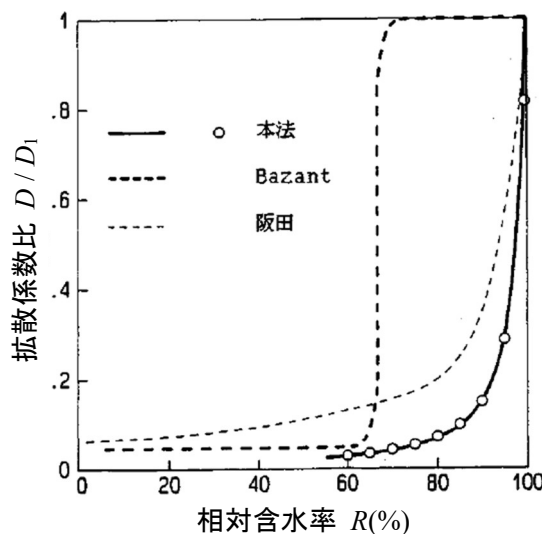


図 2.3-6 秋田らにより導出された乾燥現象における相対含水率と拡散係数の関係¹⁷⁾

(2) 吸湿現象に適用される水分移動モデルおよび乾湿繰返し水分移動モデルへの拡張

(1) で示した水分移動モデルは、乾燥収縮ひずみの数値解析という研究の背景上、その多くが乾燥現象を対象として提案されたものである。しかし、2.2.1項で述べたように、乾燥現象も吸湿現象もコンクリート中の含水量が大気湿度と平衡状態に向かう現象であることから、数値計算上は、境界条件として与える相対湿度の変更のみで、吸湿現象も拡散モデルで取り扱うことができる。ただし、解析条件として乾燥現象で得られた含水率と拡散係数の関係を用いると、一般的に吸湿現象は適合性が悪いことが指摘されており、別途、吸湿現象における含水率と拡散係数の関係が必要となる。

秋田ら¹⁷⁾は、乾燥現象と同様に吸湿現象にも Boltzmann 変換を適用し、吸湿現象における含水率と拡散係数の関係を求めており、図 2.3-7 に示すように、乾燥現象とは著しく異なる傾向を確認している。つまり、乾燥現象と吸湿現象が、非可逆性の現象であることを意味する。

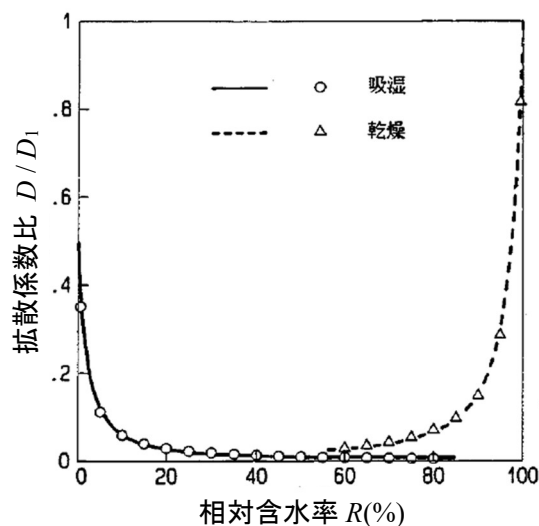


図 2.3-7 秋田らにより導出された吸湿現象における相対含水率と拡散係数の関係¹⁷⁾

石田ら⁸⁾は、乾湿での非可逆性について、セメント硬化体特有の空隙構造に着目し、インクボトル効果の影響を挙げている。セメント硬化体組織中の細孔構造は円形断面をもつ円筒形状、あるいは一方向に広がりを持つ V 字型の様に単純な形態で単独に存在するものばかりではなく、各々の細孔空隙が相互に連結することにより、インクボトル空隙と呼ばれる幾何学的形状を有している。このインクボトル空隙の介在による乾湿履歴は、図 2.3-8 に示すように、湿潤過程では小さい空隙から大きい空隙へ順々に凝縮水で満たされるのに対して、乾燥現象では小さい空隙から大きい空隙の順で凝縮水が蒸発するように、乾湿で水分移動の経路が異なるためである。

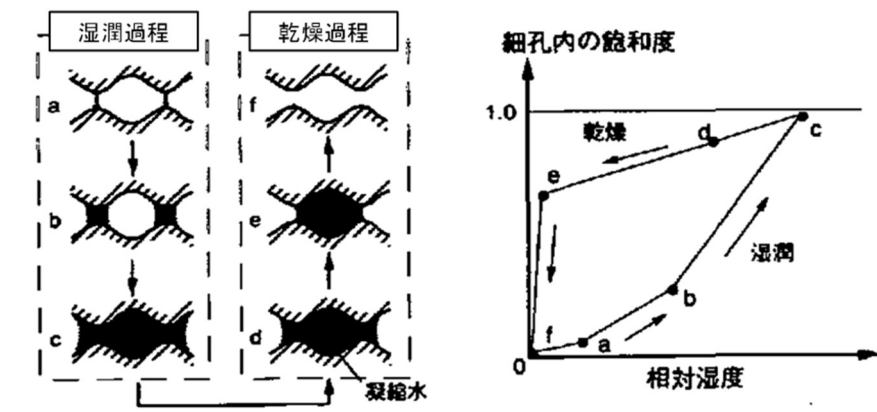


図 2.3-8 インクボトル効果による乾湿履歴の模式図⁸⁾

また、橋田ら¹⁸⁾は、乾湿の非可逆性の原因として、コンクリートの空隙湿度と含水率の関係である吸脱着等温線の履歴性(図 2.3-9)に着目し、吸脱着等温線の履歴性の定式化、および Bazant が提案した非線形拡散モデルを基に、任意の乾燥・吸湿の繰返し履歴に適用可能な水分移動解モデル(式 2.3-6)を提案した。なお、拡散係数は、式 2.3-7 に示す吸脱着等温線の傾きの逆数 k と、透湿率 c の積で評価される。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(D \cdot \text{grad} H) + \frac{\partial^2 H_s}{\partial t} \quad \text{式 2.3-6}$$

$$D = k \cdot c \quad \text{式 2.3-7}$$

ここで、 H : 空隙中の相対湿度、 D : 拡散係数、 H_s : 水和反応により消費される相対湿度、 $1/k$: 湿気容量(吸脱着等温線の傾き)、 c : 透湿率である。

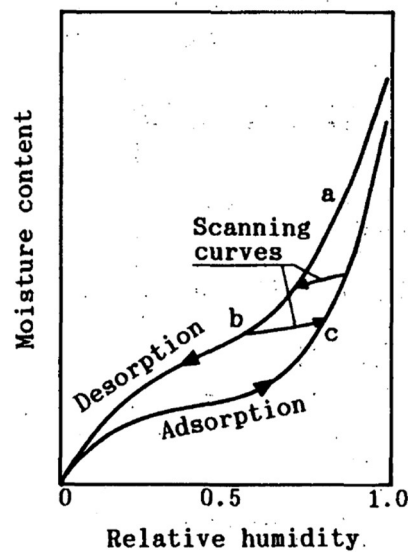
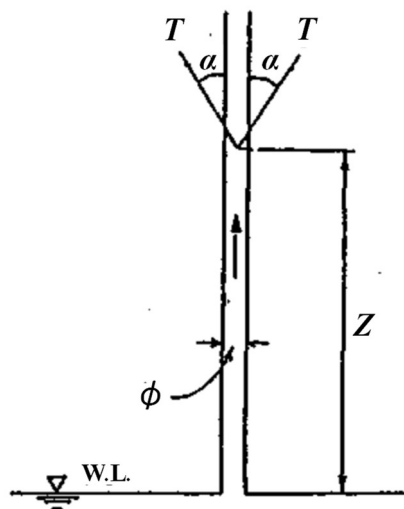


図 2.3-9 吸脱着等温線の履歴性¹⁸⁾

(3) 吸水に適用される水分移動モデル

(1) および(2)では、乾燥・吸湿現象に適用される水分移動モデルに関して示した。しかし、実環境下におけるコンクリート中の水分移動を考えた場合、湿度コントロールされた屋内の構造物を除き、乾燥・吸湿現象のみで水分移動を語ることは現実的ではない。屋外の構造物では、降雨や波浪の影響も加わり、吸水現象を避けることはできない。そのため、実構造物中の水分状態の評価には、乾燥・吸湿現象のみならず吸水現象も考慮することが重要となってくる。しかし、2.3.3項の冒頭で述べたように、乾燥・吸湿・吸水現象のすべてに適用できる一意の水分移動モデルは未だ確立されていない状況にある。その理由のひとつとして、吸水現象において現れる部分飽和状態の理論的な取り扱いの難しさにある。乾燥現象および吸湿現象の場合は、コンクリート空隙中に気相と液相が共存した不飽和状態にある。そのため、不飽和状態におけるコンクリート中の水分移動は、界面化学における毛細管凝縮理論や吸着理論の援用により、その振舞いを概ね説明できる。一方、飽和状態は、不飽和状態の延長として単純に相対湿度を100%にした状態のことではなく、不飽和状態の理論が適用できない特異点にあたる。そのため、吸湿現象に適用可能な水分移動モデルを用いて、境界条件に相対湿度100%を与えたとしても、吸水現象を予測することはできない。

しかし、吸水現象単体として扱った研究例は比較的多く存在する。近藤¹⁹⁾や越川ら²⁰⁾は、吸水現象の水分移動モデルとして、図2.3-10に示す毛細管現象による鉛直毛細管流れに着目し、鉛直毛管流れを多孔質体の流れに変換した、式2.3-8を提案している。また、式2.3-8内の毛管浸透係数 K_c は、コンクリートの毛管浸透性を表す物性値であり、一般的に水密性を表す物性値として用いられる透水係数や拡散係数に対応する。

図 2.3-10 鉛直毛細管モデル²⁰⁾

$$Z_e - \frac{\varepsilon}{K_c} \cdot Z \frac{dZ}{dt} - Z = 0 \quad \text{式 2.3-8}$$

ここで、 Z : 浸透高さ、 Z_e : 最終浸透高さ、 ε : 空隙率、 K_c : 毛管浸透係数 (cm/s) である。

また、秋田ら¹⁷⁾は、乾燥現象・吸湿現象に用いたのと同じ方法により、Boltzman 変換を適用して実験値から吸水現象における含水率と拡散係数の関係を求め、拡散型モデルによる吸水現象の解析を試みており、実験値との比較的良好な一致を確認している。そして、図 2.3-11 に示す吸水現象における含水率と拡散係数の関係は、乾燥・吸湿現象で得られた図 2.3-7 とは大きく異なる曲線の不連続性が確認されている。また、この曲線の不連続点である相対含水率 80%を境界に、高含水領域では毛細管流れ、中・低含水領域では吸湿現象における水蒸気拡散がそれぞれ卓越していることを示唆した。そのため、秋田らの示した水分移動の非線形拡散型モデルで用いられる拡散係数は、毛細管流れと水蒸気拡散の両方の要素が含まれていることに注意しなければならない。

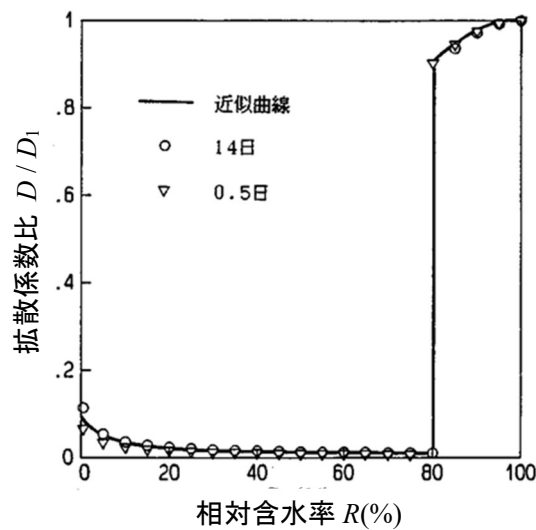


図 2.3-11 秋田らにより導出された吸水現象における相対含水率と飽和度の関係¹⁷⁾

2.4 コンクリート構造物に対する塩害劣化

2.4.1 塩害について

塩害とは、鉄筋コンクリート構造物がコンクリート中の塩分の存在により鉄筋が腐食を開始し、さらに水や酸素の供給に伴って腐食が促される現象である。その被害は鉄筋のみならず、かぶりコンクリートにひび割れを発生させるまでに至ることも多い。塩害の要因であり、劣化を促進する塩化物イオンは、細骨材に除塩されていない海砂を使用した場合や練混ぜ水として海水を使用した場合などのコンクリート製造時に材料から供給されるケースと、海洋環境下における海水や寒冷地帯で大量に散布される塩化カルシウム系の融雪剤など、外部から供給・浸透されるケースがある。

塩害によるコンクリート構造物の劣化進行には段階があり、表 2.4-1 に示すように、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の四段階で定義している²⁾。これを基に、塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化進行過程を、図 2.4-1 および図 2.4-2 を用いて説明する。

健全状態にあるコンクリートは、通常、コンクリートの細孔溶液中に、飽和水酸化カルシウム溶液と、これに若干の水酸化ナトリウムと水酸化カリウムを含むため、その pH は約 12.5 程度と非常に強いアルカリ性を示している。このような強アルカリ性環境下では、鉄筋はその表面に不動態被膜と呼ばれる水和酸化物($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)からなる薄い酸化被膜を形成し、不動態化しているため、鉄筋は腐食作用から保護されている。したがって、適切な施工が行われたひび割れのない密実な鉄筋コンクリート構造物では、鉄筋腐食はほとんど問題とならない。しかし、塩化物イオンのコンクリート中へ侵入し、鉄筋位置まで到達すると、不動態被膜はたちまち破壊され、鉄筋は活性体となり極めて腐食しやすい状態となる。そして、活性体にある鉄筋が水と酸素の供給により腐食が開始される。この塩化物イオンの浸透から鉄筋の腐食が開始するまでの期間が潜伏期であり、塩化物イオンの浸透特性が潜伏期の期間を決定する主要因となる。潜伏期終了後は、鉄筋の腐食に伴い鉄筋表面に赤錆($\text{Fe}(\text{OH})_3$)や黒錆(Fe_3O_4)等の腐食生成物が形成される。これらの腐食生成物は鉄より大きな体積を占めるため、腐食生成物の蓄積による膨張圧でかぶりコンクリートに腐食性のひび割れが発生する。ここまでの期間を進展期とし、鉄筋の腐食速度が支配的になる。加速期に入ると、かぶりコンクリートに発生したひび割れから塩化物イオンや水、酸素などの劣化因子が容易に侵入し、腐食速度が増大し鉄筋の腐食が促進される。この時から、鉄筋コンクリート構造物としての部材性能は徐々に低下し始める。劣化期では、この状態がさらに進行して、腐食生成物の蓄積により、かぶりコンクリートが剥離・剥落を起こし、部材性能の低下は顕著なものとなる。

表 2.4-1 塩害における各劣化過程の定義²¹⁾

劣化過程	定 義	期間を決定する主要因
潜伏期	鋼材の腐食が開始するまでの期間	塩化物イオンの拡散，初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間	

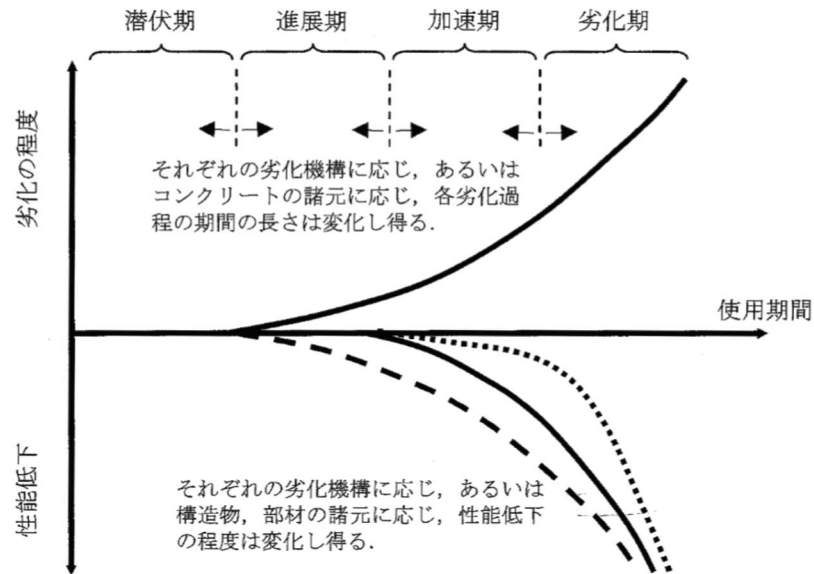


図 2.4-1 塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化進行と性能低下の概念図²¹⁾

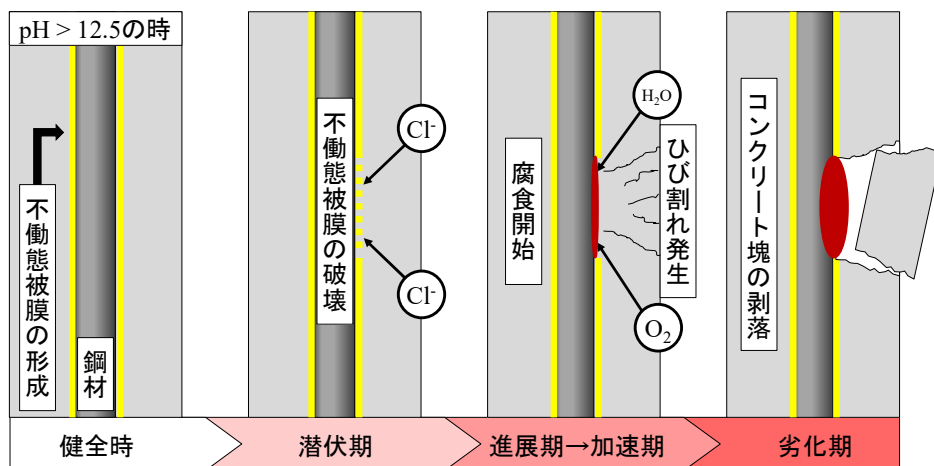


図 2.4-2 塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化進行のイメージ

2.4.2 塩化物イオンの浸透予測手法と問題点

(1) 濃度拡散モデルによる塩化物イオンの浸透予測

コンクリート中へ塩化物イオンの浸透特性を把握することは、鉄筋コンクリート構造物の塩害に対する耐久性設計および維持管理の両方から見ても、潜伏期を推定する重要な要因となる。現在、最も一般的なコンクリート中への塩化物イオンの浸透予測手法として、濃度拡散モデルがある²¹⁾。

これは、コンクリート中への塩化物イオンの浸透過程を、巨視的には拡散現象と見なせることを利用して、式 2.4-1 に示す Fick の第2法則である拡散方程式、およびその解である式 2.4-2 を用いて塩化物イオンの浸透予測を行う方法である。なお、式 2.4-2 は式 2.4-1 を表面塩化物イオン量および拡散係数を一定として解いた場合の解である。

ここで、式 2.4-2 の塩化物イオン量とは、コンクリート中の液相における塩化物イオン量のことでなく、コンクリートの単位体積当たりの全塩化物量を示す。つまり、コンクリートの細孔空隙中への塩化物イオンの浸透を表わしたものではないため、式 2.4-2 における塩化物イオンの拡散係数は「見かけの拡散係数」として扱っている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad \text{式 2.4-1}$$

ここで、 C : 液相の塩化物イオン量 (kg/m^3)、 D_c : 塩化物イオンの拡散係数 (cm^2/year)、 t : 時刻 (year)、 x : コンクリート表面からの距離 (cm) である。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right] + C_i \quad \text{式 2.4-2}$$

ここで、 $C(x, t)$: 深さ x (cm) , 時刻 t (year) における塩化物イオン量 (kg/m^3)、 C_0 : 表面塩化物イオン量 (kg/m^3)、 D_{ap} : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm^2/year)、 C_i : 初期含有塩化物イオン量 (kg/m^3)、 erf : 誤差関数、 γ_{cl} : 予測の精度に関する安全係数である。

また、見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量は、武若ら²²⁾や前田ら²³⁾により、これまでに我が国で調査・報告された実構造物あるいは自然暴露供試体の塩化物イオン量調査の結果が取りまとめられ、セメント種類や水セメント比、暴露環境に応じた近似式が導かれている。これらの近似式は、コンクリート標準示方書でも採用されており、示方書の改訂に伴い随時更新されており、以下に、2013 年改訂のコンクリート標準示方書〔維持管理編〕に記載されている最新版を示す²¹⁾。(見かけの拡散係数は式 2.4-3～式 2.4-6、表面塩化物イオン量は表 2.4-2 および式 2.4-7 にてそれぞれ示している。)

(a) 普通ポルトランドセメントの場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.8 \quad \text{式 2.4-3}$$

(b) 低熱ポルトランドセメントの場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.5(W/C) - 1.8 \quad \text{式 2.4-4}$$

(c) 高炉セメント B 種相当の場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.2(W/C) - 2.4 \quad \text{式 2.4-5}$$

(d) フライアッシュセメント B 種相当の場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.9 \quad \text{式 2.4-6}$$

ここで, D_{ap} : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), W/C : 水セメント比
($0.30 \leq W/C \leq 0.55$)である.

表 2.4-2 表面塩化物イオン量 $C_0^{21)}$

		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北, 北陸, 沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

$$C_0 = -0.016C_{ab}^2 + C_{ab} + 1.7 \quad (C_{ab} \leq 30.0) \quad \text{式 2.4-7}$$

ここで, C_0 : 表面における塩化物イオン量 (kg/m^3), C_{ab} : 飛来塩分量 ($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$)である.

(2) 濃度拡散モデルの適用上の問題点

ここで、濃度拡散型モデルの適用上の問題点をいくつか挙げる。例えば、現在の耐久性設計および維持管理における耐久性照査では、見かけの拡散係数と表面における塩化物イオン量が供用期間中は一定という仮定の下、塩化物イオンの浸透予測が行われることが一般的となっている。しかし、実際には図 2.4-3 に示すように、見かけの拡散係数と表面における塩化物イオン量は、共に経時的に変化することが、武若ら^{24), 25), 26)}をはじめ多くの研究者らにより指摘されている。この要因として、セメントの水和反応や高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材における潜在水硬性やポゾラン反応によるコンクリートの緻密化、さらに乾湿繰り返しによるコンクリート表面部分での塩化物イオンの濃縮などがあげられているものの、明確な因果関係は未だ明らかになっていない。

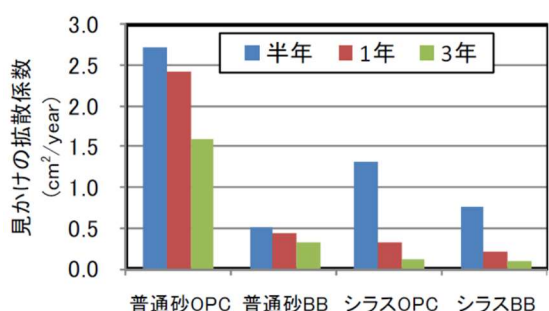


図-4 見かけの拡散係数(干満帯 W/C50%)

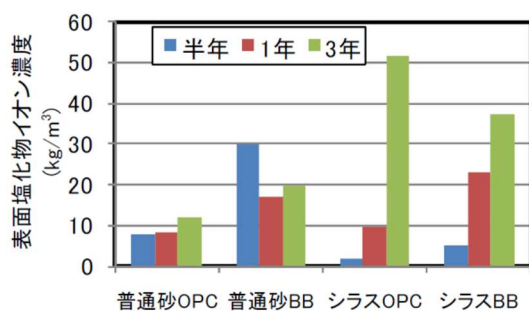


図-5 表面塩化物イオン濃度(干満帯 W/C50%)

図 2.4-3 見かけの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の時間依存性²⁶⁾

また、実環境下における塩化物イオンの浸透を考えた場合、コンクリート中への塩化物イオンの浸透メカニズムは濃度拡散だけではなく、乾湿繰り返しに伴う水分移動の影響や塩化物イオンの吸着・固定化なども考えられる。現行の濃度拡散モデルでは、これら濃度拡散や水分移動、塩化物イオンの吸着・固定化の影響をまとめて、塩化物イオンのコンクリート中への巨視的拡散現象として取り扱っている。つまり、材料条件や環境条件によっては、拡散現象と異なる現象を見かけの拡散現象として扱うことの齟齬から、塩化物イオンの浸透予測を過大にも過少にも評価する恐れがある。事実、環境条件に起因した水分移動の影響により、Fick の濃度拡散モデルが適用できない事例がいくつか報告されており、次にてその事例について取りまとめた。

2.4.3 コンクリート中の塩化物イオン浸透に水分移動の影響

(1) 毛管水の移動に伴う塩化物イオンの浸透現象について

丸屋ら^{27), 28)}は、コンクリート中の塩化物イオンの浸透要因として、毛管水中の濃度拡散に加えて毛管水の移流の影響を指摘している。特に、高温乾燥環境下では、コンクリートは内部まで乾燥するため、吸水による移流の影響は顕著となり、塩化物イオンの浸透特性は濃度拡散とは大きく異なり、現行の濃度拡散モデルでは対応が難しくなる(図 2.4-4)。

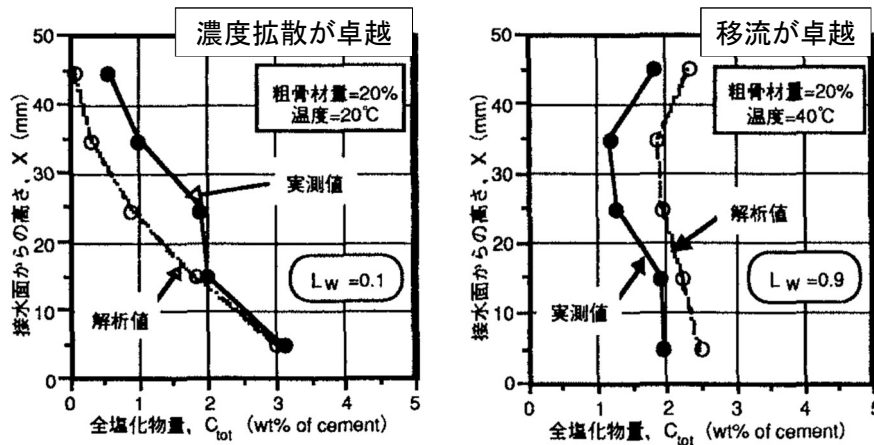


図 2.4-4 乾燥環境の違いが塩化物イオンの浸透に及ぼす影響²⁷⁾

そこで、丸屋らは、毛管水の移流を考慮した塩化物イオン浸透モデルとして、式 2.4-8 を提案している。式 2.4-8 では塩化物イオンの流束を濃度勾配による拡散流束と毛管水の移流流束に分けられており、毛管水の移流による流束は、コンクリート中の相対湿度勾配と細孔空隙中の塩化物イオン濃度に比例するものとしている。また、移流の影響を表す係数である L_w は、その値が 0 のときは毛管水の移動がなく、毛管水の移流による塩化物イオンの浸透はない。また、 L_w が 1 のときは水分の移動はすべて毛管水の移動であり、毛管水の移流による塩化物イオンの浸透は激しくなる。

$$F_c = \left(-D_c \cdot \frac{\partial C_{pfree}}{\partial x} \right) + \left(-L_w \cdot D_H \cdot \frac{\partial RH_c}{\partial x} \cdot C_{pfree} \right) \quad \text{式 2.4-8}$$

ここで、 F_c : 塩化物イオンの流束 ($\text{mol}/\text{cm}^2/\text{day}$)、 D_c : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm^2/day)、 C_{pfree} : 空隙中の自由塩化物イオン濃度 (mol/cm^3)、 D_H : 水分の見かけの拡散係数 (cm^2/day)、 RH_c : コンクリート中の相対湿度 (%), L_w : 移流の影響を示す係数 ($0 \leq L_w \leq 1$)である。

(2) コンクリート中への塩化物イオンの浸透停滞現象について

理論上、濃度拡散モデルでは、塩化物イオンは濃度勾配がある限りコンクリート中へ浸透し、平衡状態へと向かうことになる。しかし、岸ら^{29), 30), 31), 32)}は塩害環境下における護岸コンクリートの塩分調査を行い、構造物中の塩化物イオンの浸透が長期間にわたり停滞していることを報告し、拡散型モデルとの理論的な矛盾点を指摘している。

岸らにより報告された護岸コンクリートの飛沫帯位置(図 2.4-5)での塩分調査の結果を図 2.4-6、図 2.4-7 に示す。また、同図中の B0, F1, F2 はコンクリートの配合を示しており、B0 は W/C56%の普通コンクリート、これをベースにセメントの内割り置換で $60\text{kg}/\text{m}^3$ フライアッシュを混合した F1、細骨材の一部との外割り置換として $80\text{kg}/\text{m}^3$ のフライアッシュを混合した F2 となっている。

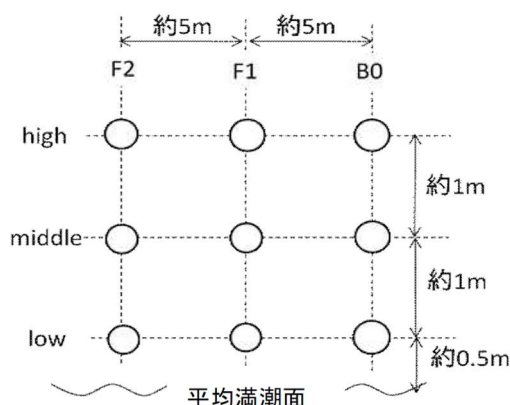


図 2.4-5 コア採取位置³¹⁾

図 2.4-6 に示すように、塩化物イオンの浸透状況は、塩分調査が行われた材齢 1.5, 3.5, 8.75 年ではほとんど変化は見られず、塩化物イオンの浸透がほぼ停滞していることが確認できる。また、岸らは拡散係数の経時的変化を調べるために、差分法により各調査材齢間の拡散係数を算出している（図 2.4-7）。見かけの拡散係数の算出結果から、拡散係数は実質的に暴露 1.5～3.5 年までしか値を持っておらず、以降は 0 に近い著しく小さな値を示しており、見かけの拡散係数の観点からも塩化物イオンの浸透停滞を確認している。

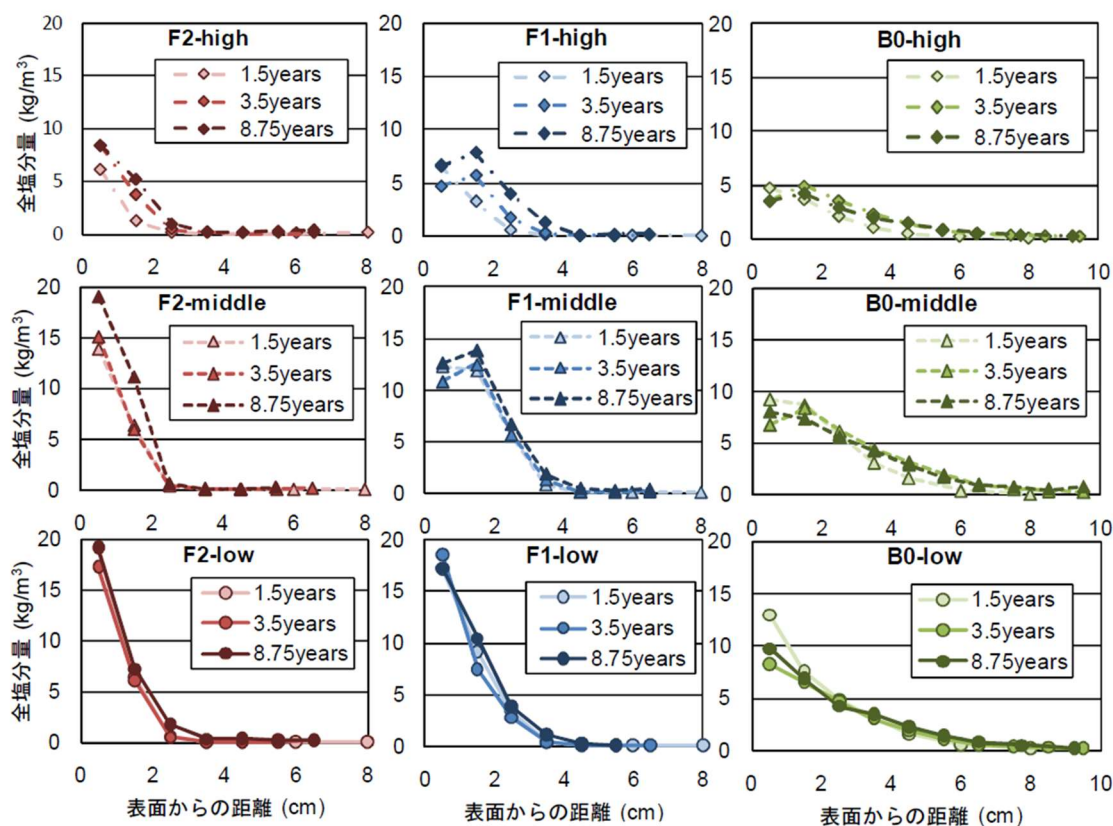


図 2.4-6 護岸コンクリートから採取したコアの全塩化物イオン量分布³¹⁾

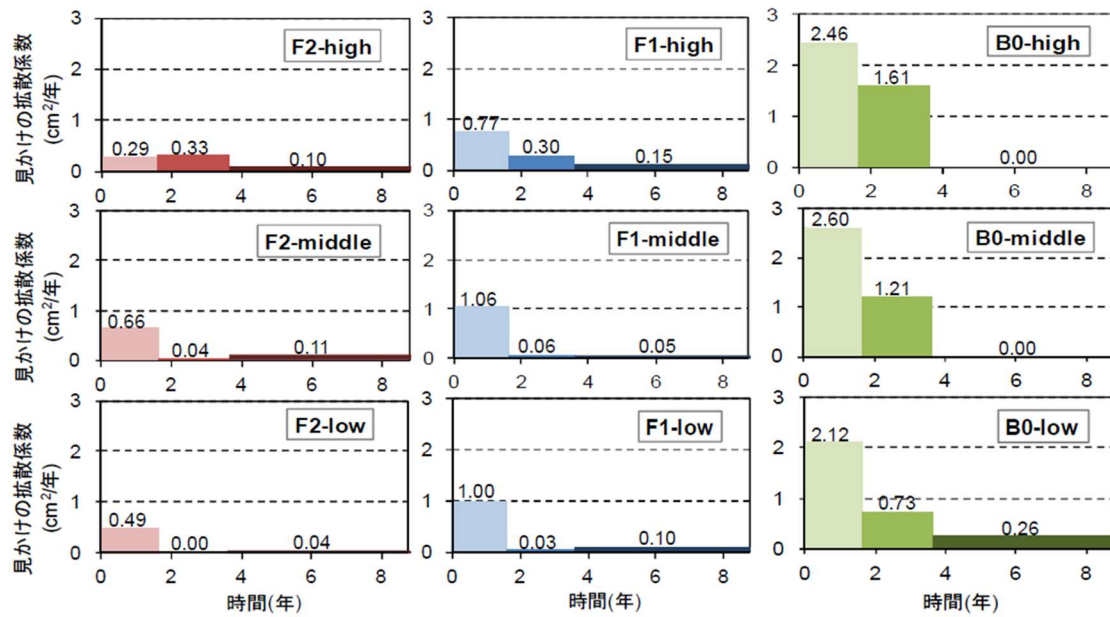


図 2.4-7 差分法を用いた計算による調査材齢間の見かけの拡散係数³¹⁾

そして、塩化物イオンの浸透停滞現象の要因として、岸らは塩化物イオンの拡散場となる液状水の浸透状況に強く依存している可能性を示唆し、護岸コンクリートコアを用いた吸水試験により、図 2.4-8 に示すように、塩化物イオンの浸透位置と液状水の移動位置との間に相関性があることを確認した。

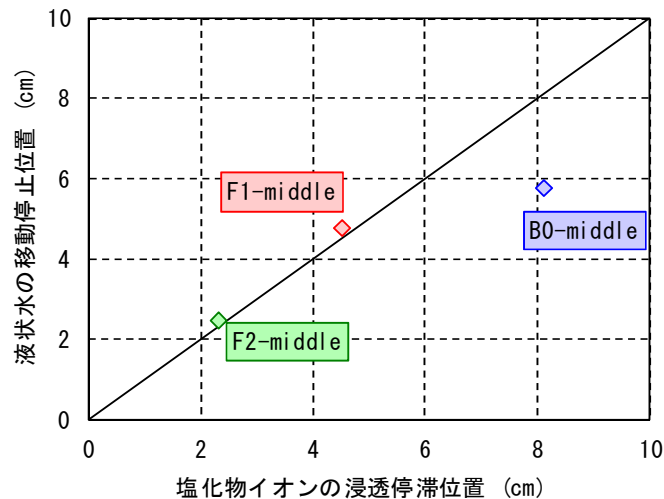


図 2.4-8 塩化物イオンの浸透停滞位置と液状水の移動停止位置との相関性²⁹⁾

では、液状水の移動が停止する現象を考えてみる。液状水が移動する水分移動形態として、既に説明したように透水、吸水、乾燥、吸湿がある。透水過程は、Darcy 則より動水勾配が駆動力とした水理的な流れであるため、わずかでも動水勾配が存在する限り液状水の移動は停止することはない。また乾燥・吸湿現象、そして取り扱いが特殊な吸水現象でも、含水量の勾配を駆動力とした拡散現象であるため、コンクリート中の水分状態が一様かつ大気中の湿度と平衡状態にならない限り、液状水の移動は停止することはない。これらの条件が、常に環境が不規則に変化する実環境下において満たされるとは考えにくい。

しかし、コンクリート中の水分移動の停止現象は、これまでに多数報告されている。

辻らは、放射性廃棄物地下施設において用いられる、難透水性のコンクリートの性能評価として、加圧透水試験を実施しており、約4年間の0.25MPa加圧注水にもかかわらず、表面から5cm程度で液状水の移動が停止していることを確認している^{33), 34), 35), 36)}。

また、鈴木ら^{37), 38), 39)}は、コンクリートに水分センサーを埋設した供試体を用いて、水分浸透深さの経時変化を調査し、水分移動が経時的に停滞していく状況を確認しており、水セメント比やセメント種類、養生方法が水分移動特性におよぼす影響を確認している。(図2.4-9)

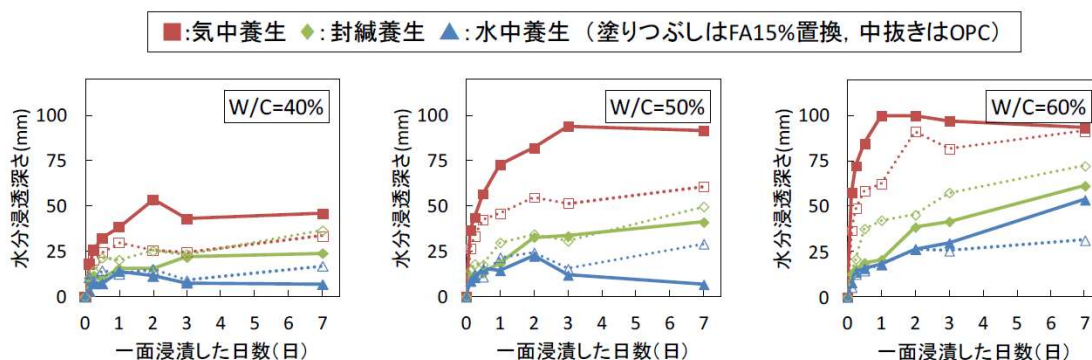


図 2.4-9 水分浸透深さの経時変化³⁹⁾

また岡崎ら⁴⁰⁾は、分子動力学シミュレーションから、コンクリート中の微小空隙中における液状水の挙動特性について、空隙境界面での摩擦の影響および、微小空隙中での透水現象を再現して、液状水の流動に必要な始動動水勾配と流動を停止させる停止動水勾配の存在を示唆している。

参考文献

- 1) 魚本健人: コンクリート構造物のマテリアルデザイン, pp.62-65, オーム社, 2007
- 2) 須田裕哉: C-S-H の組成と物理的性質の関係に基づいたセメント硬化体の性能評価に関する研究, 新潟大学, 博士課程学位論文, 2013.
- 3) Brouwers, H. J. H.: The work of Powers and Brouwnyard revisited: Part 1, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.1697-1716, 2008.
- 4) Hewlett, P.: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Fourth Edition, Butterworth-Heinemann, 1997.
- 5) 香川雄治, 下村匠: コンクリート細孔組織中における液状水移動と水蒸気移動の分離評価, 土木学会第 60 回年次学術講演会, V-269, pp.537-538, 2005.
- 6) 日本道路協会: 透水性舗装ガイドブック 2007, pp.26-33, 2007.
- 7) 佐藤邦明, 伊藤洋, 坂口雄彦: 地下空間におけるコンクリート壁内の水分移動に関する基礎研究, 土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集, Vol.45, No.3/III-389, pp.814-815, 1990.
- 8) 石田哲也, Chaube, R.P., 前川宏一, 岸利治: 任意の乾湿繰り返しを受けるコンクリートの含水状態予測モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.199-209, 1997.
- 9) 吉田秀典, 松本康寿: コンクリートの乾燥収縮挙動に関する簡易モデルの提案, 計算数理工学論文集, Vol.7, No.2/No.22-080317, 2008.
- 10) Pickett, G.: Shrinkage Stress in Concrete, *Journal of ACI*, Vol.17, No.3, pp.165-195, 1946.
- 11) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, No.316, pp.145-152, 1981.
- 12) Bazant, Z.P. and Najjar, L.J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Materials and Structures*, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972.
- 13) 三橋博三, Wittmann, F.H., Roelfstra, P.: 高温下のコンクリートの水分拡散に関する理論的研究, セメント技術年報, Vol.41, pp.495-498, 1987.
- 14) 藤原忠司, 佐藤嘉一郎, 小西俊之: 乾湿に伴うコンクリート内部での水分移動について, セメント技術年報, Vol.42, pp.427-430, 1988.
- 15) 橋田 浩, 田中享二, 小池迪夫: 打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態, 日本建築学会構造系論文報告集, No.412, pp.1-8, 1990.
- 16) 滝口克己, 堀田久人, 森田修平: 若材齢時より乾燥を受けるモルタルの含水量分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.434, pp.13-20, 1992.
- 17) 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, pp.61-69, 1990.
- 18) 橋田 浩, 田中享二, 小池迪夫: 不透湿な仕上げ層を施工した後のコンクリートの含水状態, 日本建築学会構造系論文報告集, No.419, pp.21-29, 1991.
- 19) 近藤連一編: 多孔材料－性質と利用－, 技報堂, 1973.

- 20) 越川茂雄, 萩原能男: コンクリートの毛管浸透試験方法に関する研究, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.183-191, 1991.
- 21) 土木学会: 2013 年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, pp.109-183, 2013.
- 22) 武若耕司: 海洋環境下のコンクリートの含有塩分量に関する既往調査結果の整理と分析, 土木学会第 43 回年次学術講演会概要集, Vol.43, No.5/PSV-18, pp.36-37, 1988.
- 23) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸: 塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.109-120, 2004.
- 24) 武若耕司, 松本進: 海洋環境下におけるコンクリート中の塩分浸透量推定に関する数値解析結果, 土木学会第 42 回年次学術講演会概要集, Vol.42, No.5/V-222, pp.482-483, 1987.
- 25) Takewaka, K. and Matsumoto, S.: Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments, ACI SP109-17, pp.381-400, 1988.
- 26) 壽祐太朗, 山口明伸, 武若耕司, 中島正志: コンクリートの見かけの塩化物イオン拡散係数と表面塩化物イオン濃度の関係に関する一考察, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集, V-218, pp.435-436, 2011.
- 27) 丸屋剛: 毛管水の移動にともなう塩化物イオンの移動, 土木学会第 51 回年次学術講演会概要集, Vol.51, No.5/V-274, pp.548-549, 1996.
- 28) 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 51 回年次学術講演会概要集, Vol.51, No.5/V-120, pp.240-241, 1997.
- 29) 岸利治, 高橋佑弥, Islam, M.S., 酒井雄也: コンクリート中への塩分浸透停滞現象の確認と液状水浸透挙動との相関に関する研究, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)成果報告書(その 2)およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ No.99, pp.361-368, 土木学会, 2012.
- 30) 大城良信, 仲本文範, 山田義智, 大城武: 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.24, No.1, pp.789-794, 2002.
- 31) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治: 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.803-808, 2010.
- 32) 高橋佑弥, 岸利治: フライアッシュコンクリートの塩分浸透抑制現象と液状水浸潤限界の関与, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, Vol.65, No.5/V-177, pp.353-354, 2010.
- 33) 藤原愛, 三浦律彦, 小西一寛, 辻幸和: 中空円筒形 RC 構造物の水密性評価 (その 1) —加圧注水実験による平均透水性評価—, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, Vol.59, CS1-030, pp.59-60, 2004.
- 34) 三浦律彦, 藤原愛, 小西一寛, 辻幸和: 中空円筒形 RC 構造物の水密性評価 (その 2) —採取コアの透水試験による複合透水性評価—, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, Vol.59, CS1-031, pp.61-62, 2004.

第2章 既往の研究

- 35) 藤原愛, 小西一寛, 三浦律彦, 辻幸和: 長期加圧注水実験による中空円筒形R C構造物の水密性評価, 土木学会論文集 E, Vol.67, No.788, pp.27-41, 2005.
- 36) 辻幸和, 小西一寛, 藤原愛: コンクリート構造物の難透水性評価, pp.14-16, 技報堂出版, 2004.
- 37) 鈴木浩明, 玉井譲, 上田洋: コンクリート表層における水分浸透深さの時間依存性及び水セメント比と養生の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.751-756, 2013.
- 38) 鈴木浩明, 上田洋: コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.676-681, 2014.
- 39) 鈴木浩明, 上田洋: フライアッシュコンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.631-636, 2015.
- 40) 岡崎慎一郎, 浅本晋吾, 岸利治: 分子シミュレーションによる微小空隙中の液状水挙動の検証, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.3, pp.311-321, 2009.

第3章

吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物 イオン浸透特性の実験的検討

3.1 概要

コンクリート中への塩化物イオンの浸透予測である、Fick の拡散方程式を用いた濃度拡散モデルは、モデルとしての簡便さや優れた適用性から多くの塩害に対する耐久性照査に用いられてきた。一方で、実環境における塩化物イオンの浸透の駆動力は濃度拡散だけではなく、乾湿繰り返しに伴う水分移動の影響や塩化物イオンの吸着・固定化、さらには中性化に伴う塩化物イオンの濃縮など様々であり、現状では、これらをまとめて巨視的な拡散現象として扱っている。なかでも、水分移動の影響は、第2章の既往の研究でも示したように、浸透予測を過大にも過少にも評価する恐れがあることが指摘されており、環境条件や材料条件によっては水分移動の影響を十分考慮する必要性が求められている。

そこで本章では、未だ十分に検討されていない、コンクリート中における水分移動が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を把握するために、疑似飽和状態および絶乾状態のモルタルを使用して、吸水現象における水分移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透を水セメント比やセメント種類の影響に着目して検討した。

3.2 試験概要

3.2.1 供試体配合

本章では、水セメント比やセメント種類がコンクリート中の水分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、供試体配合は表 3.2-1 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 0.4, 0.5, 0.6 と変化させた OPC40, OPC50, OPC60。水セメント比を 0.5 に固定して、結合材割合を $C : BFS : Gyp = 50 : 49 : 1$ とした BB50（高炉セメント B 種相当）と、結合材割合を $C : F = 80 : 20$ とした FB50（フライアッシュセメント B 種相当）の計 5 ケースとした。また、いずれの配合においても、目標フロー値が $150 \pm 10 \text{ mm}$ となるようにペースト容積比を調整している。

表 3.2-1 塩化物イオン浸透試験に使用した供試体の配合

呼称	W/B	ペースト 容積比	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	BFS	F	Gyp	S
OPC40	0.4	0.470	262	656	—	—	—	1399
OPC50	0.5	0.415	254	508	—	—	—	1544
BB50		0.420	256	256	251	—	5.11	1518
FB50		0.425	252	404	—	101	—	1518
OPC60	0.6	0.385	252	420	—	—	—	1624

ここで、 W ：水（密度：1.0g/cm³）、 B ：結合材、 C ：普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）、 BFS ：高炉スラグ微粉末（密度：2.89g/cm³）、 F ：フライアッシュ（密度：2.25g/cm³）、 Gyp ：無水石膏（密度：2.96g/cm³）、 S ：富士川産川砂（密度：2.64g/cm³）である。

3.2.2 試験項目および試験方法

本章では、吸水現象におけるモルタル中の水分移動および塩化物イオンの浸透を確認するための塩化物イオン浸透試験、および各種配合のモルタルの材料特性を確認するための水銀圧入試験をそれぞれ実施した。以下に、各試験の試験概要を示す。

3.2.2.1 塩化物イオン浸透試験

塩化物イオン浸透試験では、吸水現象におけるモルタルの水分移動および塩分浸透を確認することを目的とした。以下に、供試体作製手順、試験方法、測定項目を示す。

(1) 供試体作製手順

供試体作製手順を以下の手順を以下に示す。

① 打設

4×4×16cmの角柱三連型枠を用いてモルタルを打設する。

② 養生

モルタル打設後、1日間の湿気箱養生を行った後に脱型し、27日間の水中養生。

③ 整形

水中養生終了後、供試体両端を2cmずつ切り落とし4×4×12cmの角柱供試体に整形。

④ エポキシ樹脂塗装&アルミテープ被覆

まず、整形後の供試体の表面を1日間乾燥させる（室温20℃、湿度60%）。その後、試験時に4×4cmの浸透面以外からの水分の出入りを防ぐために、エポキシ樹脂による表面塗装を合計4回行い、最後にアルミテープによるシールを施す。その際、浸透面以外を完全に封鎖する「背面封鎖」と、浸透面とその反対面である背面以外を封鎖する「背面開放」の2ケースを採用した。（図3.2-1）

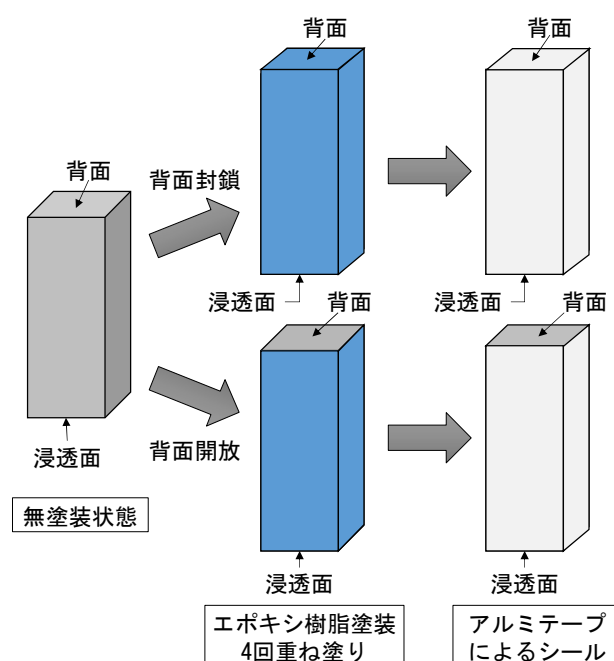


図 3.2-1 供試体シール方法

(2) 試験方法

塩化物イオン浸透試験の際には、図 3.2-2 に示すように浸透面を濃度 10%の NaCl 水溶液（以下、塩水と表記する）に 1cm 程度浸し、背面は気中位置となるよう設置した。また、試験を開始する際の初期含水状態は疑似飽和状態と絶乾状態の 2 ケースとした。ここで、疑似飽和状態とは、供試体内部に乾燥領域が残った不飽和状態であるものの、それ以上含水が進まない限りなく飽和に近い状態を意味する。そのため、初期含水状態の調整に際して、疑似飽和状態は、シール後の供試体を真水に浸せきして前日との質量差が 0.1%以内となった状態、絶乾状態は、シール後の供試体を 105℃の炉乾燥器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めた。

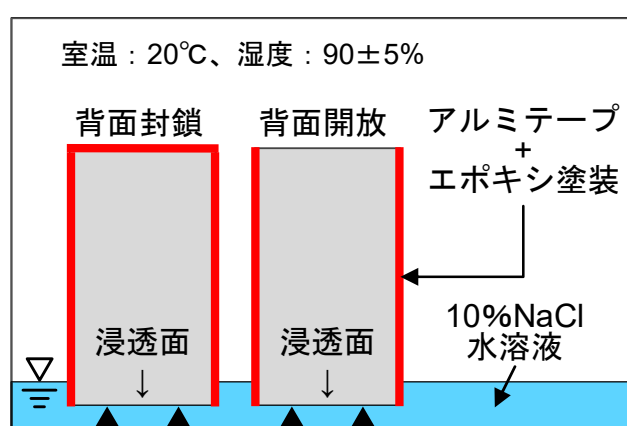


図 3.2-2 塩化物イオン浸透試験概要図

(3) 測定項目

試験開始後は、所定の試験日数（初期状態、1、3、7、14、28、56、91、182、365 日）経過後に、供試体飽和度の経時変化、飽和度分布および全塩化物イオン量分布を測定した。

以下に、各測定項目の概要を示す。

● 供試体飽和度の経時変化

ここで、供試体飽和度とは後に説明する飽和度分布とは異なり、供試体をカットせずに、供試体一本そのままの質量を測定した、供試体一本全域の飽和度のことである。すなわち、飽和度分布から見れば供試体飽和度は飽和度分布の平均値と同義である。

以下に測定手順を示す。

- ① 供試体を各試験日数にて取り出し、吸水面に付着した水分をふき取り、目量 0.01g、測定精度 $\pm 0.02g$ の電子天びんで供試体の質量を測定する。
- ② 測定後の供試体は塩化物イオン浸透試験を速やかに再開する。
- ③ 測定した質量は式 3.2-1～式 3.2-3 に従ってまず含水率を算出し、それを飽和状態における含水率で除することで飽和度に換算し、供試体飽和度の経時変化として評価する。ここで、飽和状態における含水率は、供試体を真空脱気処理により空隙中の空気を真水と置換させ、前日との質量差が 0.1%となった時点の飽和質量から求める。

また、供試体質量の経時変化を測定する供試体は、測定データの連続性を保持するため、事前に本測定項目用の供試体を選出し、飽和度分布および全塩化物イオン量分布の測定には用いないものとする。そのため、供試体の絶乾質量および飽和質量については試験開始までに把握しておかなければならない。

$$\frac{W_t - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 = \theta_t \quad \text{式 3.2-1}$$

$$\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 = \theta_{sat} \quad \text{式 3.2-2}$$

$$\frac{\theta_t}{\theta_{sat}} \times 100 = Sr \quad \text{式 3.2-3}$$

ここで、 W_t ：試験 t 日目の供試体質量 (g)、 W_{dry} ：供試体の絶乾質量 (g)、 W_{sat} ：供試体の飽和質量 (g)、 θ_t ：試験 t 日の含水率 (%)、 θ_{sat} ：飽和状態における含水率 (%)、 Sr ：飽和度 (%) である。

● 飽和度分布

飽和度分布の測定手順を以下に示す。

- ① 供試体を各試験日数にて取り出し、高速切断機を用いて図 3.2-3 に示すように、供試体を浸透面から厚さ 1cm 間隔で切断する。
- ② 切断した試験片の質量を速やかに測定する。
- ③ 質量の測定後に、試験片を 105℃の炉乾燥器に入れ絶乾となるまで乾燥させて、試験片の絶乾質量を測定する。
- ④ 次に、炉乾燥後の試験片を真空脱気処理により飽和状態にして飽和質量を測定する。ただし、塩化物イオンの溶脱を防ぐために、試験片を半分に分割して、半分は飽和質量の測定に、もう半分は全塩化物イオン量分布の測定に用いる。

このとき、半分に分割した試験片の絶乾質量の測定も忘れてはいけない。

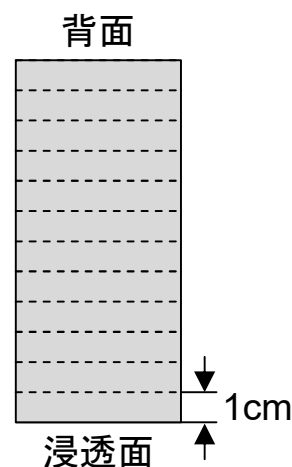


図 3.2-3
供試体切断位置

- ⑤ ②～④にて測定した質量から、式 3.2-1～式 3.2-3 に従って試験片ごとの飽和度を算出し、供試体内部の飽和度分布を評価する。

● 全塩化物イオン量分布

全塩化物イオン量分布の測定手順を以下に示す。

- ① 飽和度分布の測定手順④で半分に分割された試験片を粒径 150 μm となるまで、サイクロミルにより粉砕する。
- ② 粉砕された試験片の粉末試料から、JCI-SC4 に準拠して試験片ごとの全塩化物イオン量を測定し、供試体内部の全塩化物イオン量分布を評価する。

3.2.2.2 水銀圧入試験

水銀圧入試験では、本章で取り扱う各種配合のモルタルの空隙構造を把握することを目的とした。以下に、試料作製手順、試験方法について説明する。

(1) 試料作製手順

試料作製手順を以下に示す。

- ① 塩化物イオン浸透試験の供試体作製手順③にて整形した 4×4×12cm の供試体から 1cm 角程度のサイコロ状の試料を切り出す。
- ② 切り出した試料を蓋つきのビーカーに入れてアセトンを加えて 24 時間静置し、試料中の水分をアセトンで置換する。
- ③ 24 時間経過後、アセトン捨て、105℃の炉乾燥器にてアセトンの臭いがなくなるまで乾燥する。
- ④ 乾燥後の試料は試料の吸湿を防止するため、そのまま炉乾燥器内にて保管し、適宜、水銀圧入試験に用いる。

(2) 試験方法

水銀圧入試験には(株)島津製作所のオートポア IV 9500 を使用した。測定条件は、加圧過程→減圧過程→再加圧過程とし、各ステップにおいて空隙径分布の測定を行った。

一般的にコンクリートはインクボトル空隙を含んだ多孔質材料であることから、水銀圧入試験による空隙径分布は図 3.2-4 に示すように、①加圧過程→②減圧過程の過程で両者の空隙径分布が一致しないことが報告されている。これは、インクボトル空隙の介在により①加圧過程により圧入した水銀が②減圧過程において水銀が抜けずに残った状態を表しており、その過程は模式的に図 3.2-5 で示される。また、野島らは¹⁾、インクボトル空隙は図 3.2-6 に示すように袋小路状であり連続性を持たないことから、劣化因子の移動性への影響は小さいことを指摘し、③再加圧過程で描かれるインクボトル空隙以外の連続性のある空隙において拡散係数との強い相関性を示している。本試験においても、水セメント比やセメント種類が、インクボトル空隙および連続空隙に及ぼす影響、そして水分移動や塩化物イオンの浸透との関連性に着目して評価した。

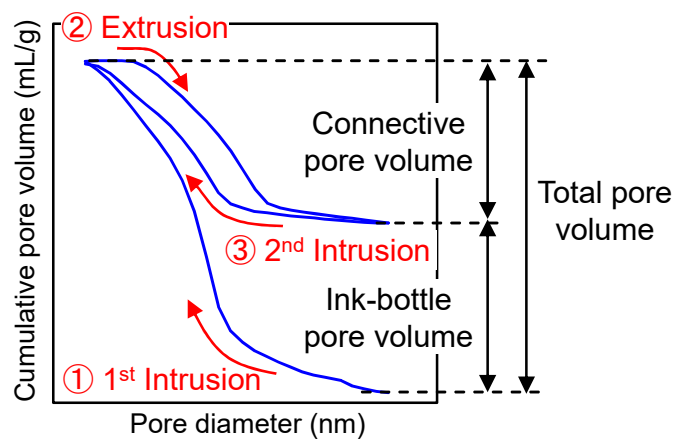


図 3.2-4 コンクリートの水銀圧入試験による細孔空隙の履歴性

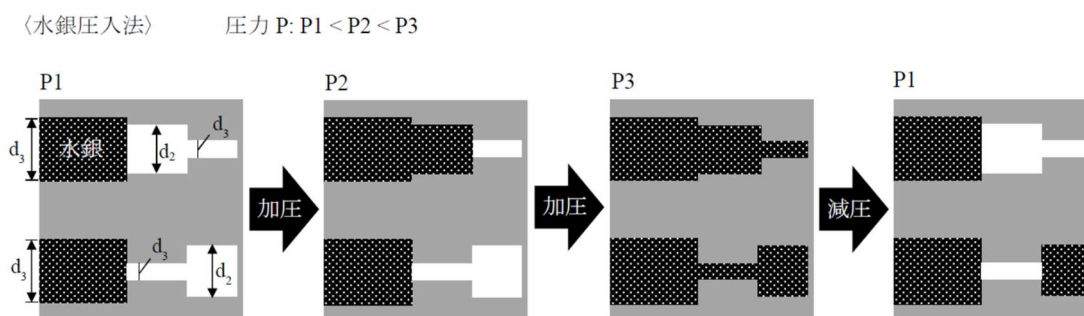


図 3.2-5 水銀圧入試験の加圧過程，減圧過程における水銀の動き

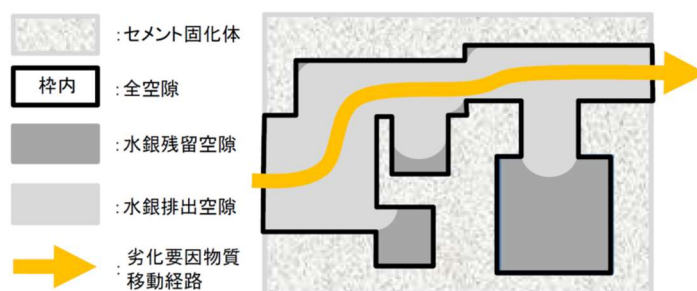


図 3.2-6 劣化因子の移動経路と各空隙関係

3.3 試験結果および考察

3.3.1 塩化物イオン浸透試験

3.3.1.1 疑似飽和状態から塩化物イオン浸透試験を開始した場合

(1) 供試体飽和度の経時変化

疑似飽和状態から塩化物イオン浸透試験を開始した場合の、供試体飽和度の経時変化を、水セメント比の影響とセメント種類の影響に分けて図 3.3-1 に示す。いずれのケースにおいても、試験開始から試験 365 日まで、供試体は飽和度 90%前後で安定しており、疑似飽和状態にあることが確認された。

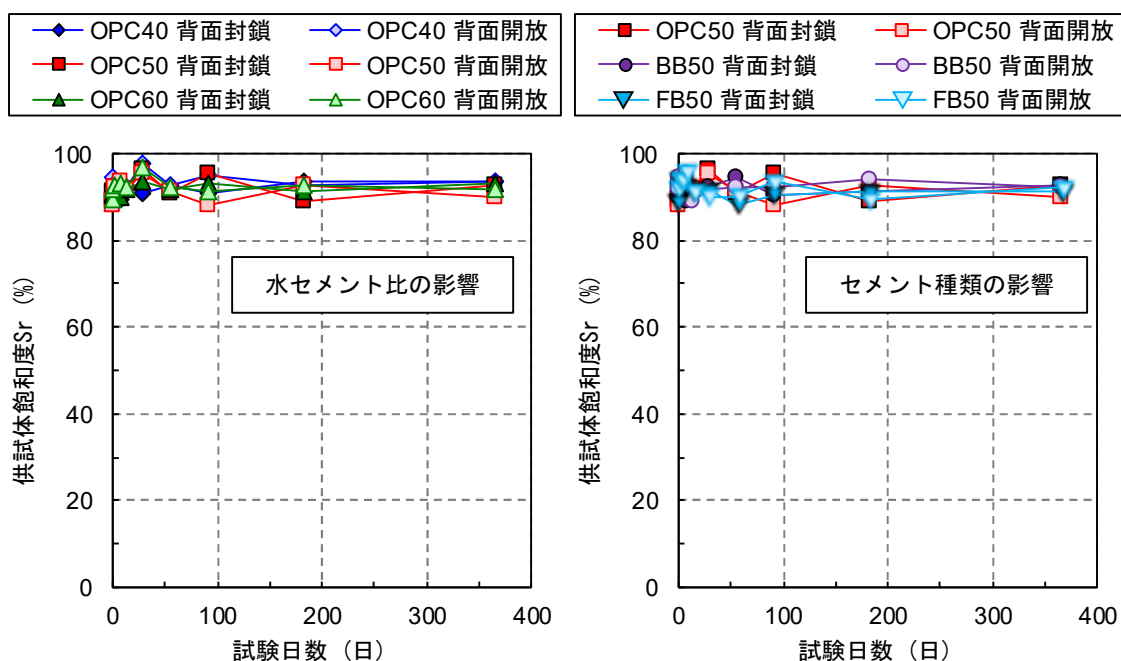


図 3.3-1 供試体飽和度の経時変化

(2) 飽和度分布

次に供試体内部の飽和度分布を、背面条件ごとに図 3.3-2 および図 3.3-3 に示す。まず、背面封鎖に着目すると、配合条件にかかわらず、初期含水状態は飽和度 90%前後で均一に分布しており、また、全試験期間を通じて飽和度分布に変化が確認されないことから、供試体は疑似飽和状態にあると考えられる。一方で、背面開放では、背面部からの乾燥による飽和度分布の低下が想定されたが、検討結果では背面封鎖と同様に疑似飽和状態であることが確認された。これは、背面側の大気中の湿度が 90%前後と非常に高湿度環境となっているため、背面部からの乾燥の影響が極めて小さく背面条件の有意な差として現れなかったと考えられる。

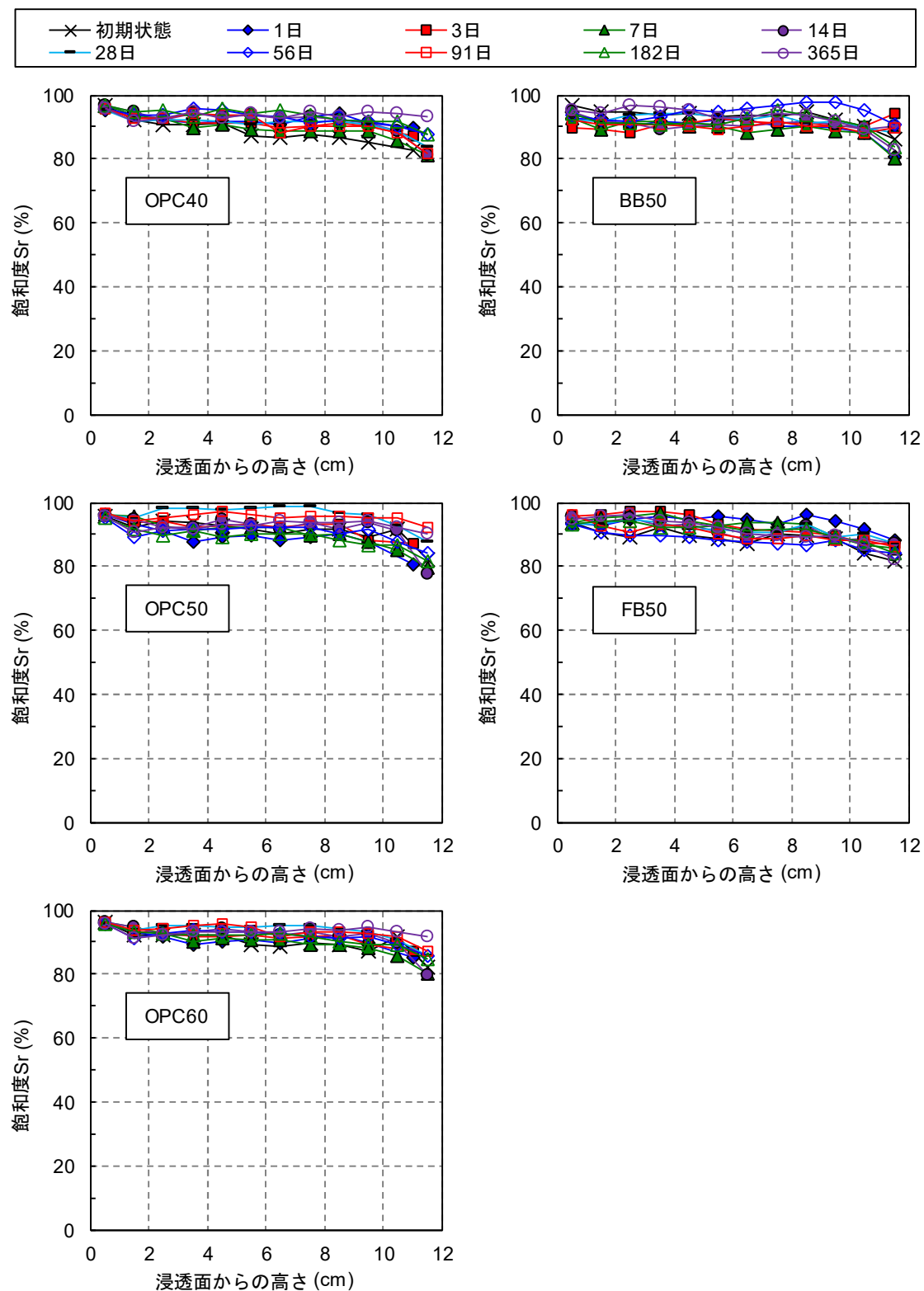


図 3.3-2 飽和度分布の経時変化（背面封鎖）

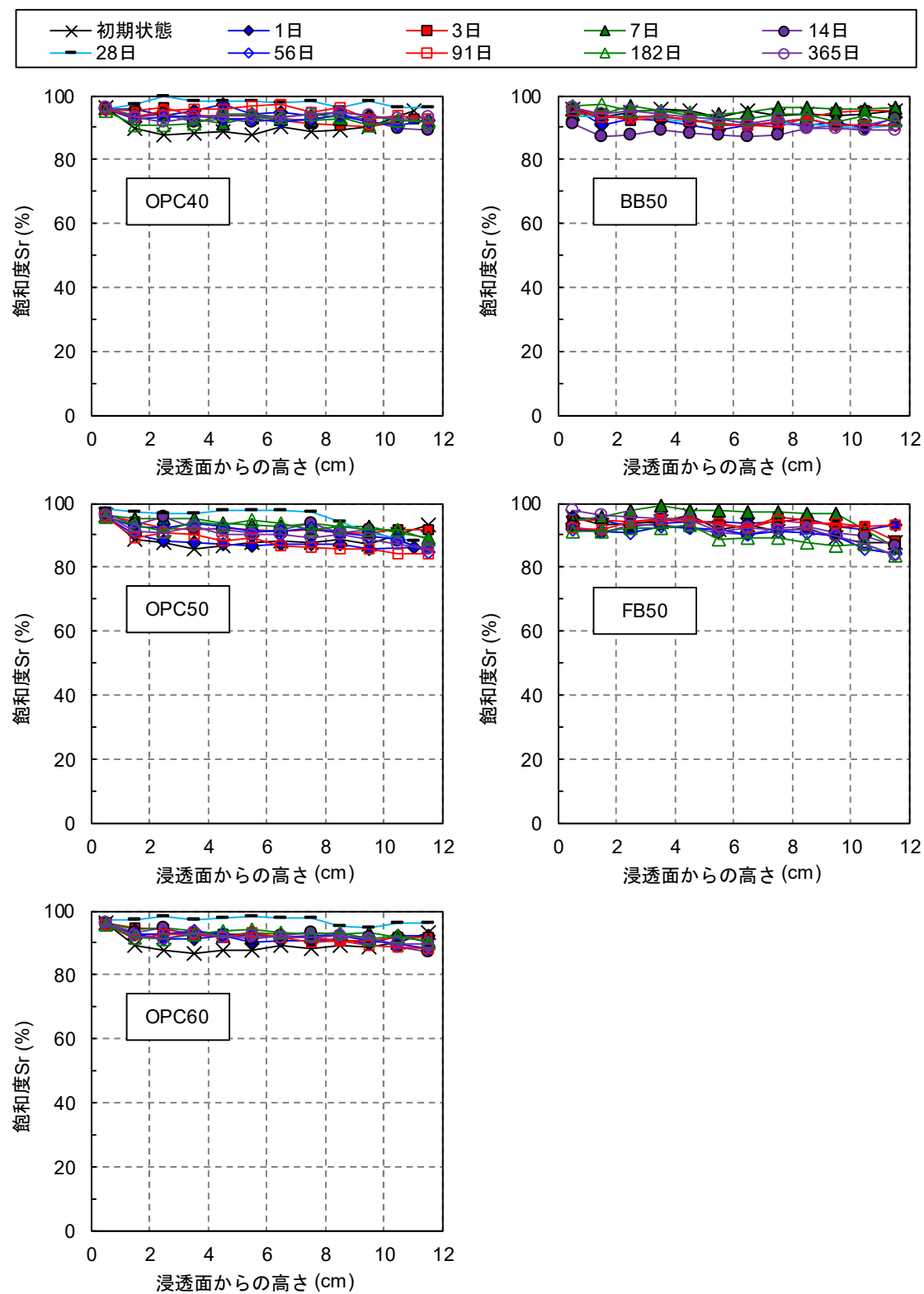


図 3.3-3 飽和度分布の経時変化（背面開放）

(3) 全塩化物イオン量分布

塩化物イオンの浸透状況として、図 3.3-4 および図 3.3-5 に全塩化物イオン量分布を示す。いずれのケースにおいても、Fick の濃度拡散モデルに合致した塩化物イオンの浸透分布を示しており、疑似飽和状態では、塩化物イオンの浸透は濃度拡散現象が支配的になることが確認された。また、水セメント比の影響として OPC40、OPC50、OPC60 に着目すると、背面条件にかかわらず、水セメント比の増加に伴って塩化物イオンがより内部へ浸透しており、一般的に知られている水セメント比と塩化物イオン浸透抵抗性との関係と一致した。セメント種類の影響である OPC50、BB50、FB50 についても同様に、普通ポルトランドセメントよりも高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用したものは塩化物イオンの浸透を抑制しており、混和材の使用による塩化物イオン浸透抵抗性の向上が確認された。

次に、Fick の濃度拡散モデルにフィッティングし、見かけの拡散係数と表面塩化物イオン量を算出した。まず、見かけの拡散係数の結果を図 3.3-6 に示す。いずれケースにおいても、見かけの拡散係数は試験開始直後から急激に低下し、時間の経過に伴って一定値に収束する時間依存性を示している。このように、見かけの拡散係数が経時的に減少する傾向について、一般的には、セメントの水和反応や混和材などのポゾラン反応や潜在水硬性などによるコンクリートの空隙構造の緻密化が要因として挙げられている。一方で、岸ら²⁾は見かけの拡散係数は経時的な減少について、塩水に暴露された期間の影響を指摘しており、養生が十分に進んだコンクリートでも、塩水に暴露されることで見かけの拡散係数が経時的に減少していることを確認している。そして本試験では、試験 1 日から試験 365 日にかけて見かけの拡散係数は、 $1/125 \sim 1/25$ 程度まで減少しており、供試体の空隙構造の緻密化のみで語るには極端に減少していることから、塩化物イオンの供給期間の影響も十分に考えられた。

次に、表面塩化物イオン量を図 3.3-7 に示す。また、同図中には式 3.3-1 を用いて塩水濃度を表面塩化物イオン量への換算値を併せて示す。いずれのケースにおいても、表面塩化物イオン量は試験開始直後から増加し、時間の経過とともに一定値に収束する傾向を示している。また、推定塩化物イオン量と比較すると、いずれの配合においても、試験 14 日～56 日程度で、表面塩化物イオン量の実測値が推定値よりも高くなることが確認された。これは、塩化物イオンの固定化や疑似吸着^{3), 4)}と呼ばれる正に帯電した空隙壁面への吸着現象が考えられ、これらの影響により供試体の表層における塩化物イオン量が塩水濃度よりも高くなったと考えられる。

$$\frac{\theta_{sat}}{100} \times \frac{C_{NaCl}}{100} \times \gamma_{sp} \times \frac{35.45}{58.44} = C_{0ini} \quad \text{式 3.3-1}$$

ここで、 θ_{sat} ：飽和状態に供試体含水率 (%), γ_{sp} ：供試体の絶乾単位体積質量 (kg/m^3), C_{NaCl} ：NaCl 水溶液供試体の質量パーセント濃度 (%), C_{0ini} ：推定表面塩化物イオン量 (kg/m^3)である。

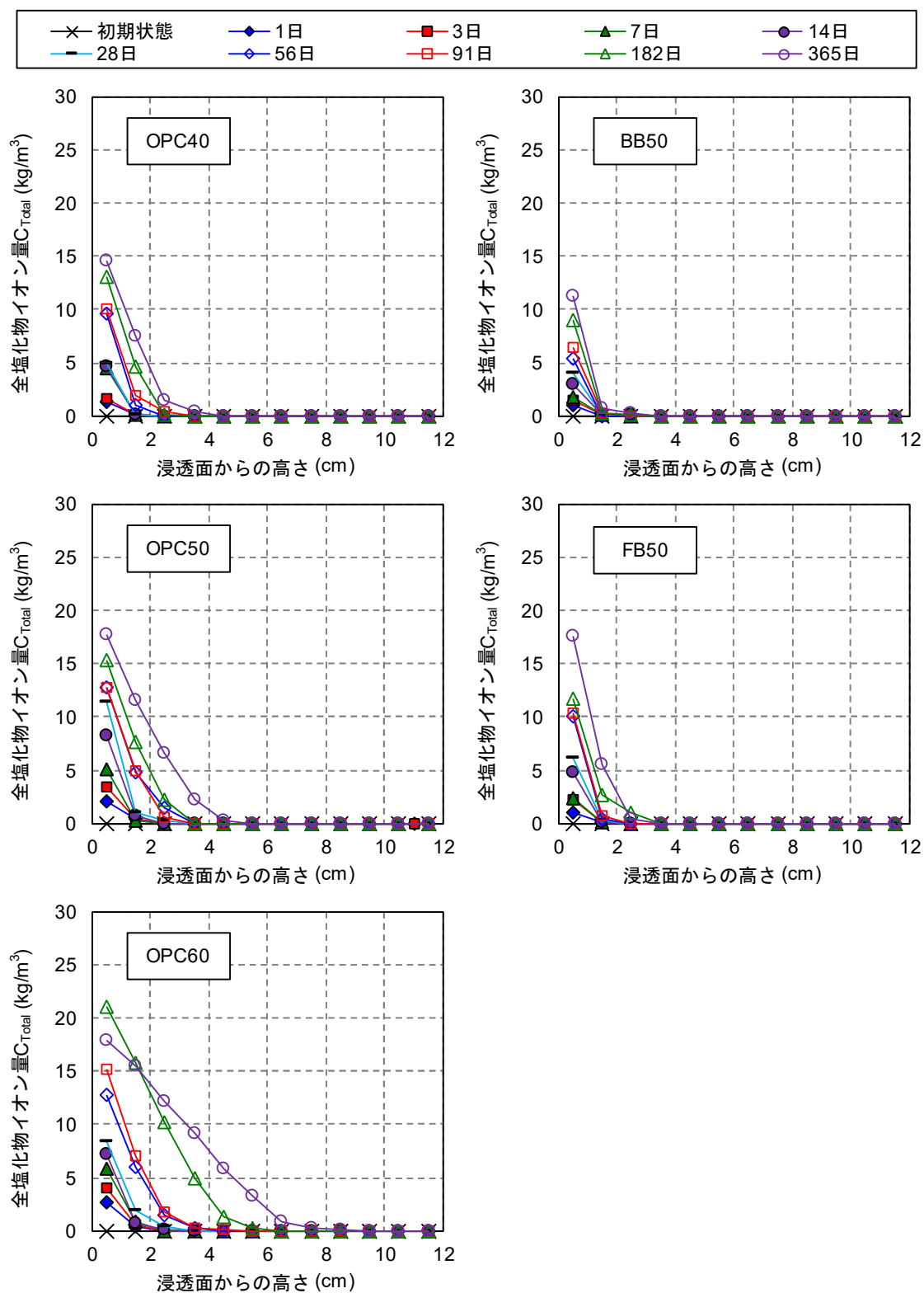


図 3.3-4 全塩化物イオン量分布の経時変化（背面封鎖）

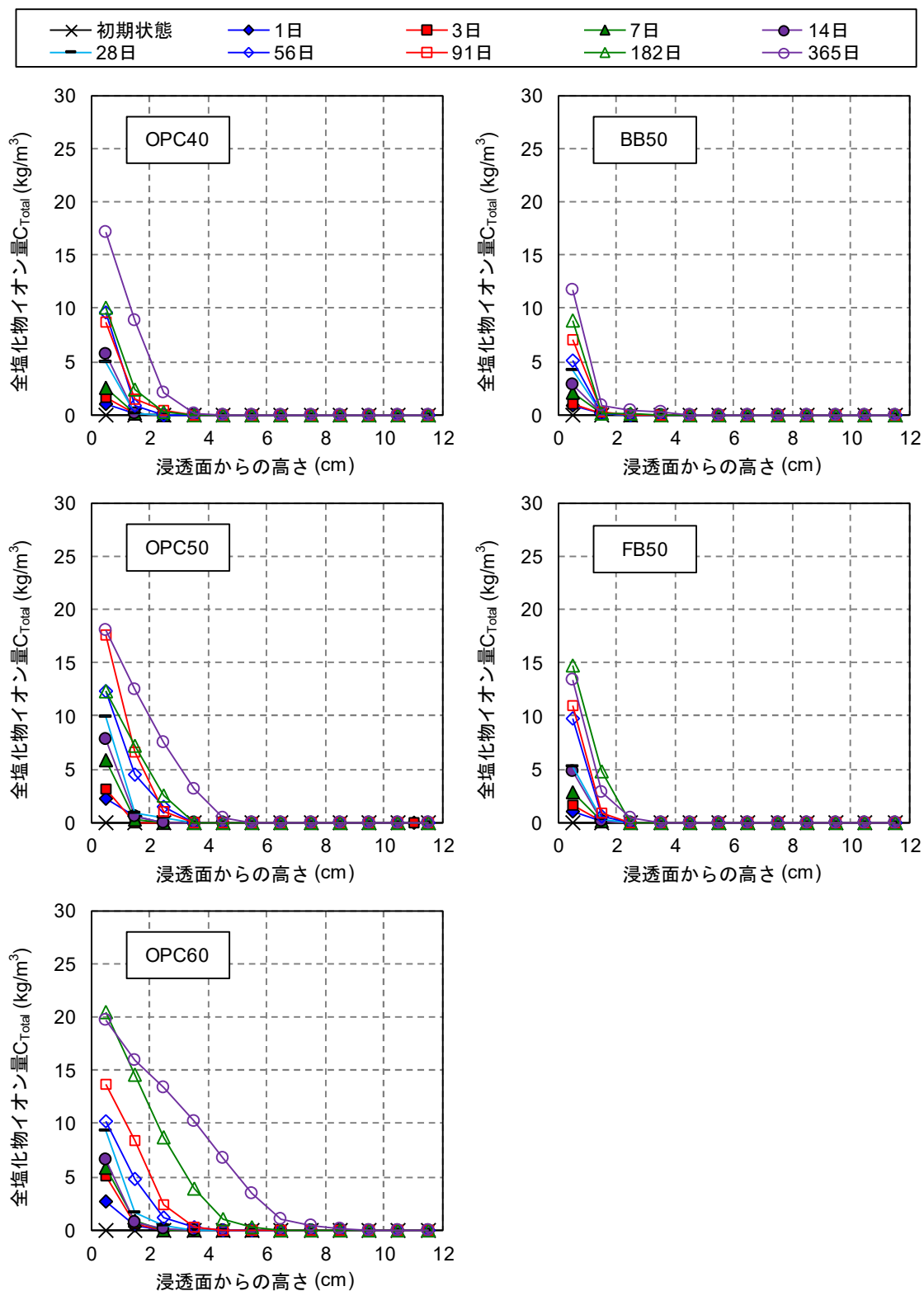


図 3.3-5 全塩化物イオン量分布の経時変化（背面開放）

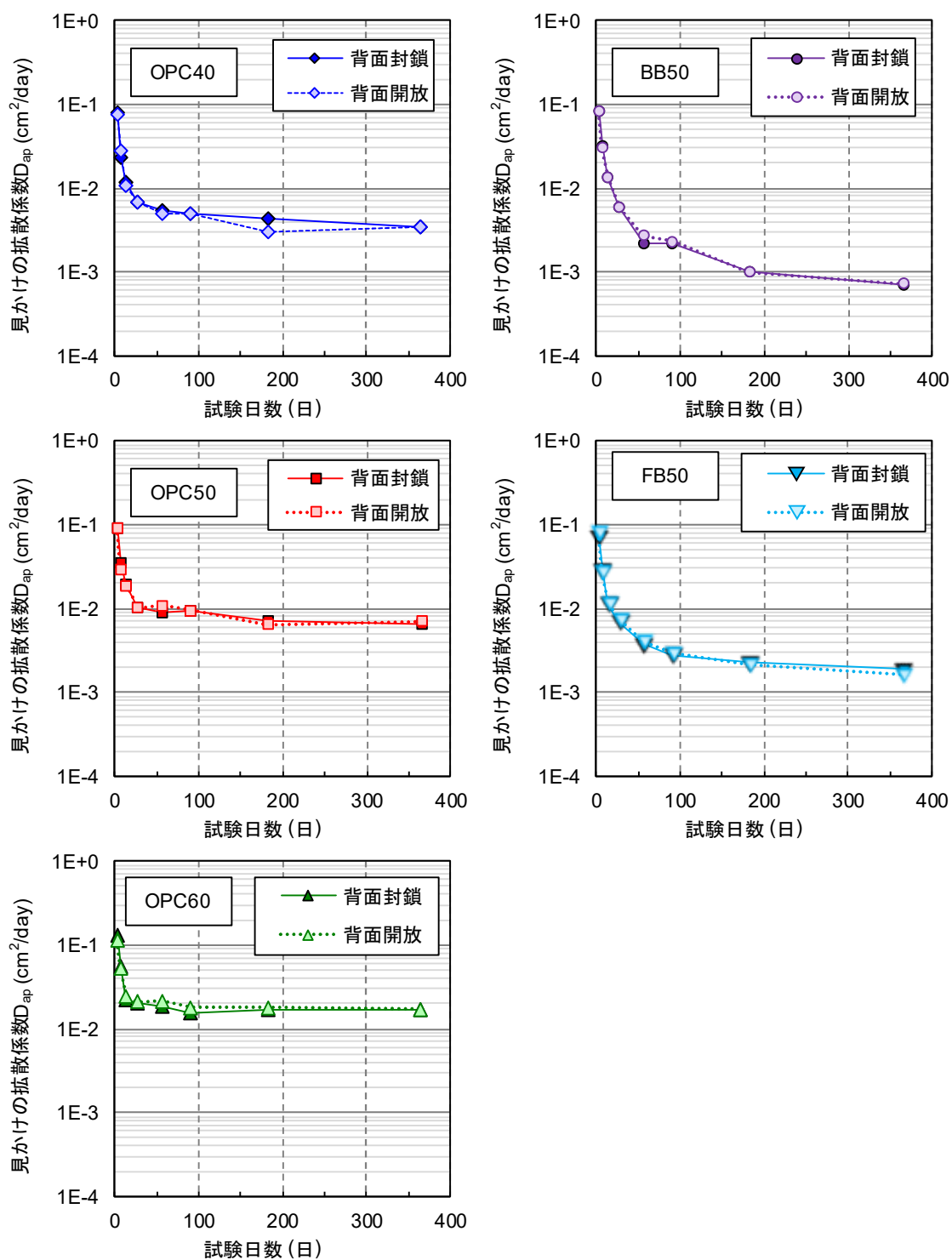


図 3.3-6 見かけの拡散係数の経時変化

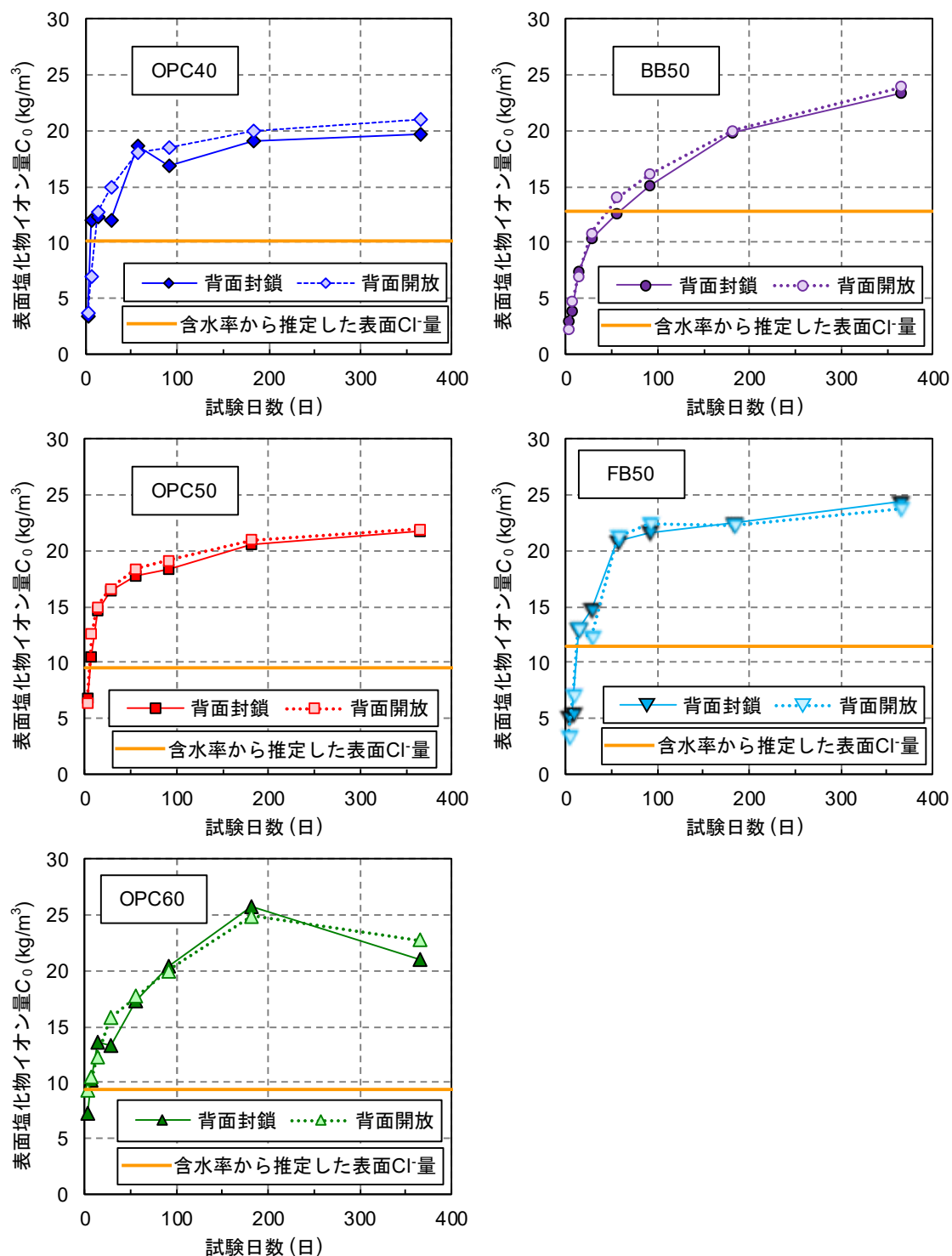


図 3.3-7 表面塩化物イオン量の経時変化

3.3.1.2 絶乾状態から塩化物イオン浸透試験を開始した場合

(1) 供試体飽和度の経時変化

次に、絶乾状態から塩化物イオン浸透試験を開始した場合の、供試体飽和度の経時変化を、水セメント比の影響とセメント種類の影響に分けて図 3.3-8 に示す。いずれの配合においても、試験期間中の供試体飽和度の経時変化は、疑似飽和状態から試験を開始した場合と比較して、明らかに異なる傾向を示しており、供試体中へ吸水現象が進行していることが確認された。また、背面条件の違いに着目すると、いずれの配合においても、背面開放の方で飽和度が大きくなる傾向が確認された。この要因として、背面封鎖は背面が封鎖されているため、供試体の空隙中に取り残された空気が水分移動を阻害したことや、その一方で、背面開放では、背面部からの吸湿による水分移動が生じたことが考えられる。

また、水セメント比の影響に着目すると、水セメント比の増加に伴って、吸水に伴う飽和度の増加率が高くなる傾向が確認できる。これは、水セメント比の増加により、コンクリート中の粗大空隙が増加しことが考えられる。さらに、OPC40、OPC50、OPC60 は、いずれも試験開始から 91 日頃には、飽和度の増加は概ね収束しており、吸水による水分移動が停止していることが考えられる。一方、セメント種類の影響について、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用した BB50 や FB50 は、普通ポルトランドセメントを使用した OPC50 に比べて、吸水による飽和度増加を抑制していることが確認できた。また、BB50 や FB50 では 365 日が経過しても質量増加の収束は確認できず、水分移動が未だ継続していることが考えられる。

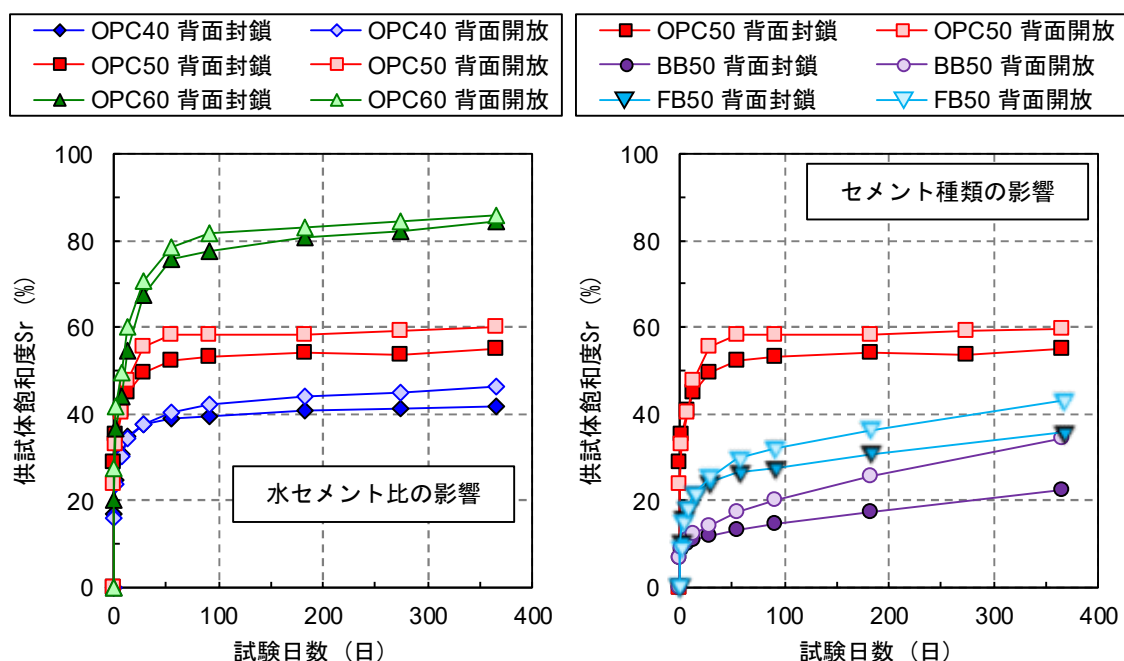


図 3.3-8 供試体飽和度の経時変化

(2) 飽和度分布

次に供試体内部の飽和度分布の経時変化を背面条件で分けて図 3.3-9 および図 3.3-10 に示す。当初、吸水現象による水分移動として、浸透面から順次飽和度 100%になりながら、内部へ水分が移動することが想定されたが、検討結果では、いずれのケースにおいても直線型に勾配をなして水分が移動しており、直線部の先端からは急速に飽和度が低下する傾向が確認された。これは、供試体空隙中に拘束された空気の影響、つまり間隙空気圧により、水分移動が抑制されたためと考えられる。さらに秋田ら⁹⁾は、吸水現象における水分移動の特徴として、高含水領域では直線的な分布を示す液状水の移動、中・低含水領域では液状水の先端を境界（気液界面）に拡散型の分布を示す水蒸気拡散が支配的であることを指摘している。そこで、直線型の分布を液状水の移動、拡散型の分布を水蒸気拡散と仮定し、改めて飽和度分布の経時変化を確認する。

まず、背面封鎖の水セメント比の影響に着目すると、水セメント比の増加に伴って液状水の移動が顕著になっていることが推察できる。また、OPC40 では、液状水の移動としては、試験 28 日の高さ 5.5cm 付近で止まり、より内部では水蒸気拡散としての水分移動が卓越していることが考えられる。一方、OPC50 では試験 91 日目、OPC60 では試験 28 日目で供試体端部まで液状水が移動していることが想定され、特に、OPC60 は試験 91 日目でさらに飽和度が上昇し、均一な飽和度分布となることが確認された。

次に、背面封鎖のセメント種類の影響に着目すると、BB50 や FB50 は同一の水セメント比にもかかわらず、OPC50 に比べて明らかに水分移動を抑制していることが確認できた。特に BB50 では、試験 365 日目において、水蒸気拡散としては供試体の最深部に到達しているものの、直線的な分布で示される液状水の移動は 2～3cm 程度までしか確認されなかった。また、FB50 でも OPC40 と同等もしくはそれ以上の水分移動を抑制していることが確認できた。

また、背面開放でも、背面封鎖と同様な水分移動特性を示しているが、背面部が開放され空隙中に空気を取り残されにくいため、全体的に、背面開放の方が水分移動は早い傾向にあることが確認された。そのため、背面封鎖では飽和度分布の勾配を有して水分移動が停止した OPC50 であるが、背面開放では OPC60 に近い均一な飽和度分布に向かっていることが確認された。また、背面開放のいずれのケースにおいても、試験開始直後から背面部で飽和度の増加が確認できる。これは、供試体飽和度の経時変化でも述べたように、背面部は湿度 90%の高湿度環境下に曝されているため、そこからの吸湿による水分移動が考えられる。

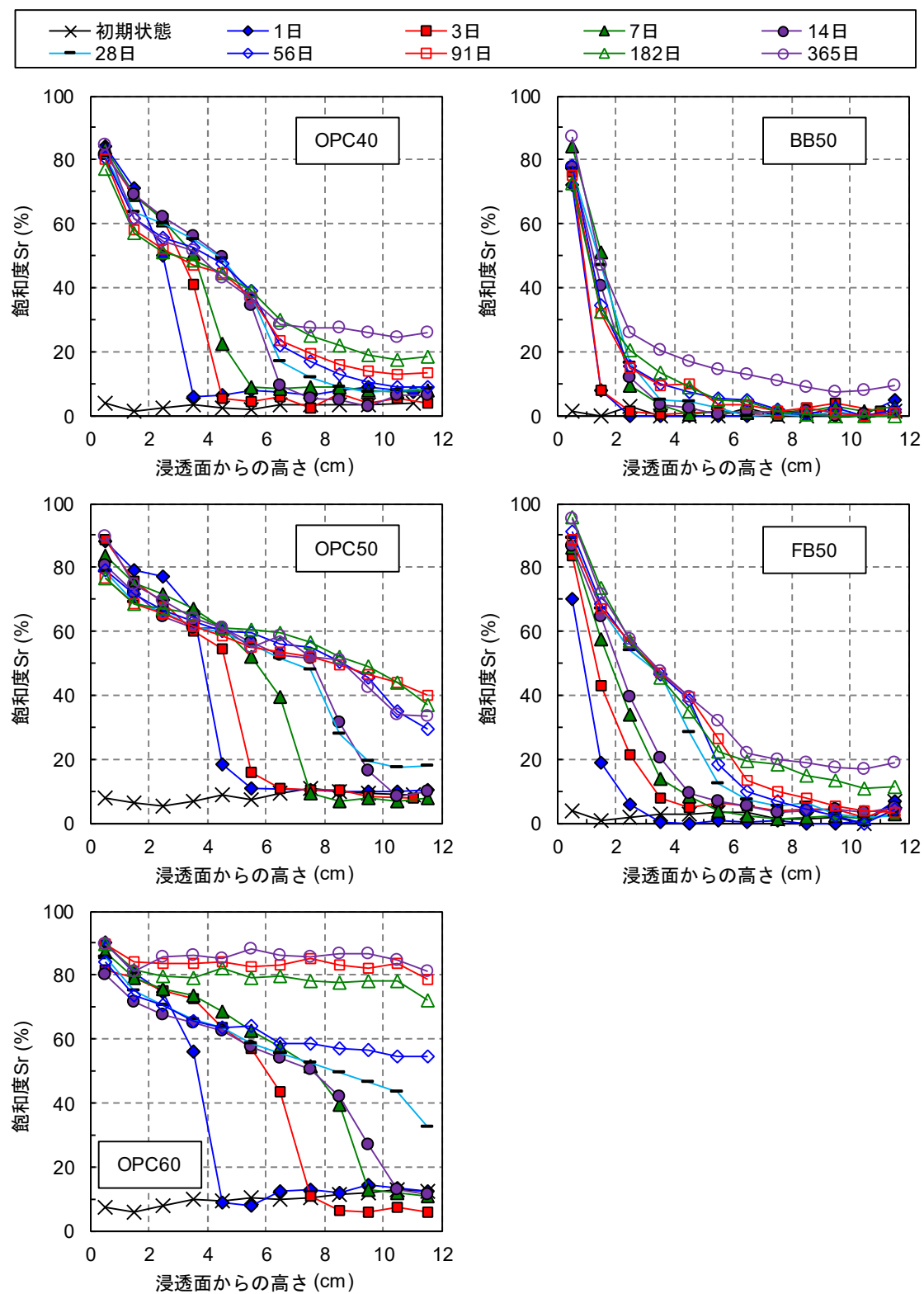


図 3.3-9 飽和度分布の経時変化（背面封鎖）

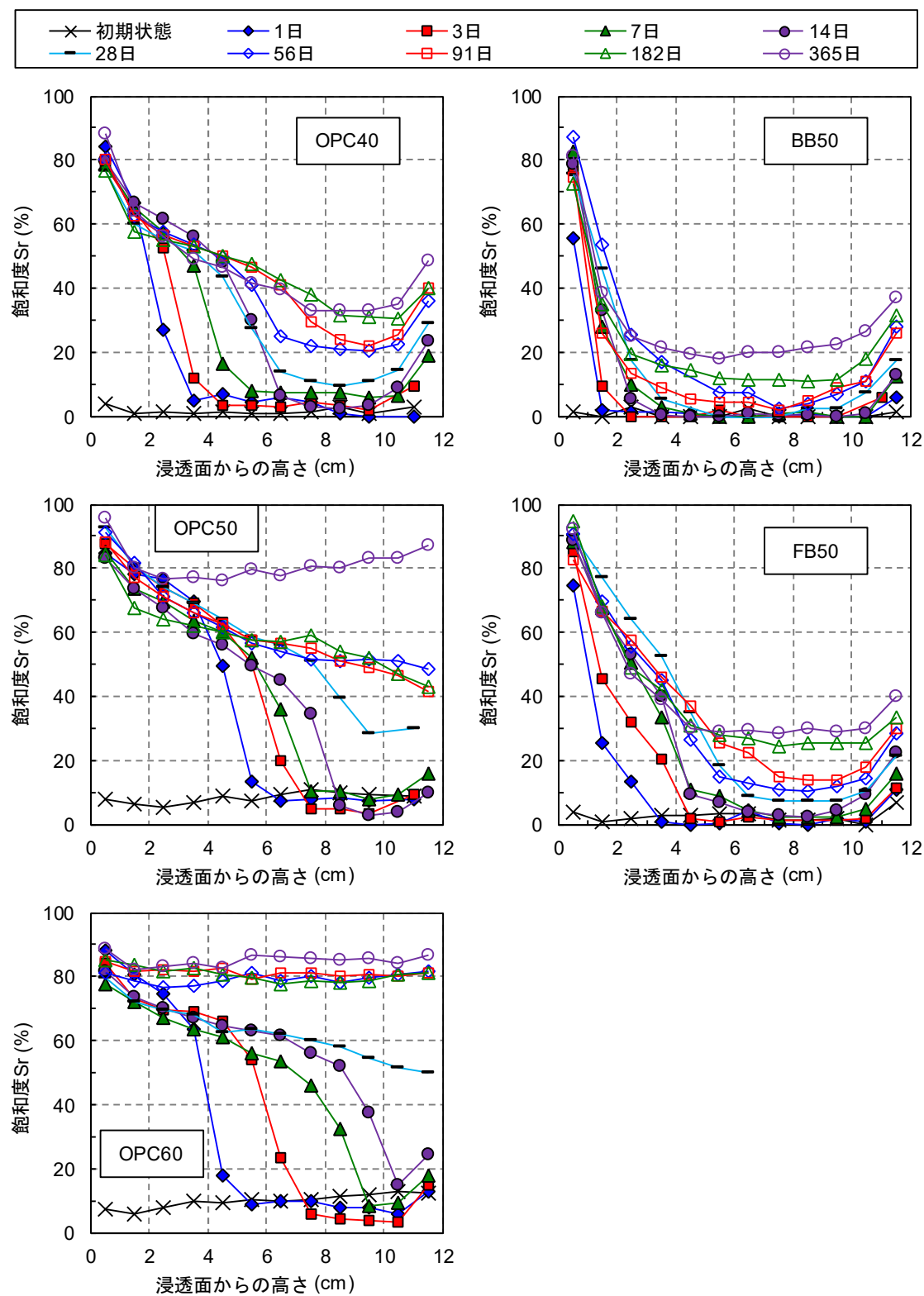


図 3.3-10 飽和度分布の経時変化（背面開放）

(3) 全塩化物イオン量

全塩化物イオン量分布の経時変化を背面条件に分けて図 3.3-11 および図 3.3-12 に示す。いずれのケースにおいても、吸水現象による水分移動を生じる際の塩化物イオンの浸透状況は、疑似飽和状態から試験を行った際に得られた、拡散モデルに従った分布(図 3.3-4, 図 3.3-5)とは全く異なる傾向を示していることが確認できた。その大きな特徴は、試験開始後から急速に塩化物イオンが供試体内部に浸透している点にあり、その傾向は図 3.3-9 および図 3.3-10 で示した飽和度分布と概ね一致しており、水分移動に伴って塩化物イオンが浸透している。そのため、飽和度分布と同様に水セメント比の増加に伴って、塩化物イオンの浸透は顕著となり、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を使用することで、塩化物イオンの浸透を大幅に抑制していることが確認できた。

しかし、飽和度分布と全塩化物イオン量分布をより詳細に比較すると、以下の4つの相違点を確認することができた。

飽和度分布と全塩化物イオン量分布の相違点

- ① 浸透面近傍における飽和度は、試験期間中一定の値を示すのに対して、全塩化物イオン量では時間の経過に伴って全塩化物イオン量が増加する。
- ② 試験 365 日目の OPC40 や BB50, FB50 に着目すると、水分の最大移動高さと塩化物イオンの最大浸透高さが一致しておらず、水分が存在するにもかかわらず塩化物イオンが浸透していない。
- ③ OPC40 や FB50 で、供試体内部の塩化物イオン量が急激に増加しピークが出現する。
- ④ 背面開放の OPC50 や OPC60 に着目すると、液状水が背面部に到達したと推定された試験 28 日以降では、背面部での塩化物イオン量が増加する。

そこで、これら飽和度分布と全塩化物イオン量分布との相違点の要因を分析するために、飽和度分布を基に、吸水した水分がすべて液状水かつ 10%の塩水と仮定して算出した推定塩化物イオン量分布と全塩化物イオン量分布で比較を行った。なお、推定塩化物イオン量分布は、式 3.3-2 に従って、各試験片の飽和度を求める過程で得られる含水率を全塩化物イオン量に換算することで得た。

$$\frac{\theta(x,t)}{100} \times \frac{C_{NaCl}}{100} \times \frac{35.45}{58.44} \times \gamma_{sp} = C_{est}(x,t) \quad \text{式 3.3-2}$$

ここで、 $\theta(x,t)$: 試験 t 日の x 位置における試験片の含水率 (%), γ_{sp} : 供試体の絶乾単位体積質量 (kg/m^3), C_{NaCl} : NaCl 水溶液供試体の質量パーセント濃度(%), $C_{est}(x,t)$: 推定塩化物イオン量 (kg/m^3)である。

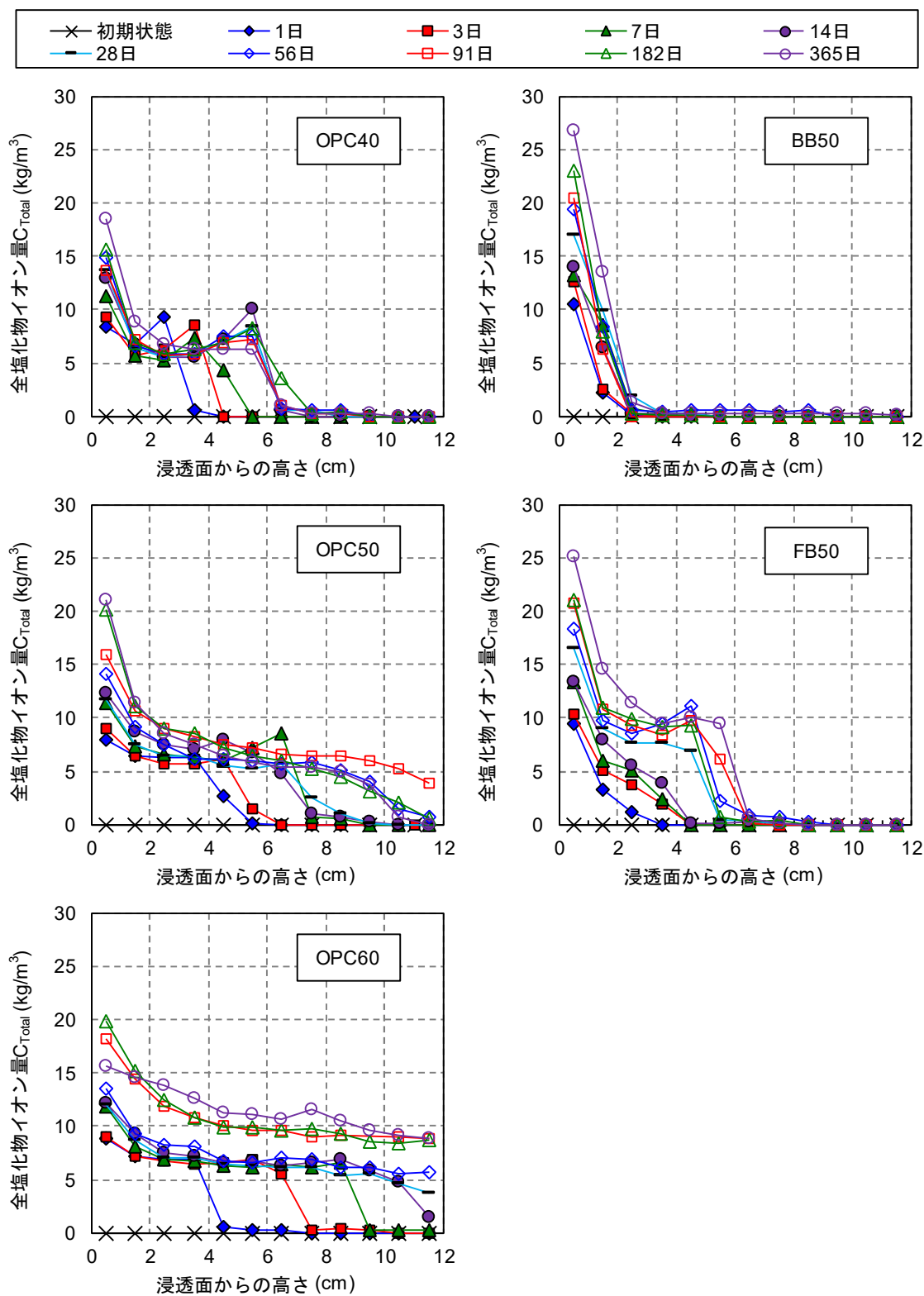


図 3.3-11 全塩化物イオン量分布の経時変化（背面封鎖）

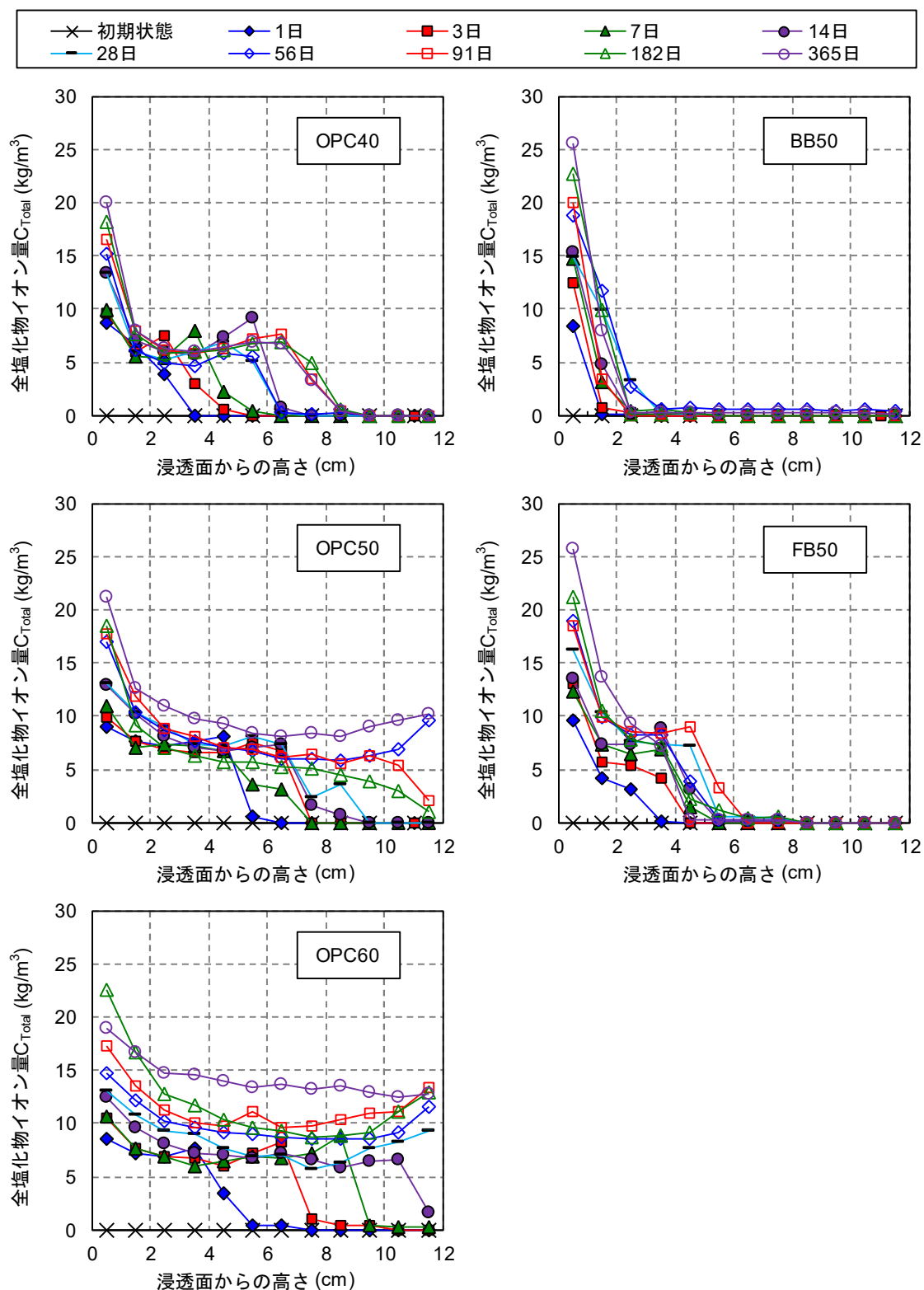


図 3.3-12 全塩化物イオン量分布の経時変化（背面開放）

各配合の実測塩化物イオン量と推定塩化物イオン量との比較を図 3.3-13～図 3.3-17 に示す。

まず、各配合の実線や破線で示されている推定塩化物イオン量の直線部分、つまり 3.3.1.2 (2) で仮定した液状水移動の影響に着目する。いずれの配合においても、浸透面近傍の塩化物イオン量の経時的な増加部分を除き、ほとんどの試験日数において、直線部分での実測塩化物イオン量と推定塩化物イオン量は概ね一致していることが確認できる。これはつまり、飽和度分布において直線的分布で示される液状水の移動では、10%の塩水として空隙中をそのままの濃度で移動していることにはかならない。

これを踏まえて、飽和度分布と全塩化物イオン量分布の相違点①について検証すると、いずれのケースにおいても、試験 7 日以降では塩水濃度以上の塩化物イオンが浸透面から浸透していることになる。これは 3.3.1.1 で既に述べたように、塩化物イオンの固定化や疑似吸着の影響により、浸透面近傍での全塩化物イオン量が増加したことが要因と考えられる。

次に、飽和度分布と全塩化物イオン量分布の相違点②について検証するため、OPC40 (図 3.3-13)、BB50 (図 3.3-16)、FB50 (図 3.3-17) の結果に着目する。いずれのケースにおいても、水蒸気拡散と仮定した拡散型の分布領域では、推定値に対して実測では塩化物イオンが浸透していないことが確認できる。塩化物イオンは水蒸気拡散では浸透しないことを踏まえると、この領域では水蒸気拡散が卓越していることが考えられ、拡散型の分布領域では水蒸気拡散が生じている、という仮定に対する証明の裏付けにもなっている。

そして、OPC40 (図 3.3-13) や FB50 (図 3.3-17) に着目して、飽和度分布と全塩化物イオン量分布の相違点③について検証する。実測塩化物イオン量と推定塩化物イオン量を比較すると、供試体内部における塩化物イオン量のピークは、推定塩化物イオン量分布の直線的分布(液状水の移動)と拡散的分布(水蒸気拡散)の境界部分で確認することができる。つまり、液状水の先端から進む水蒸気拡散の影響により、水分は水蒸気として移動するものの、塩化物イオンは移動せず取り残され、さらに浸透面側からの液状水の移動に伴う塩化物イオンの浸透も加わり、塩化物イオン量が濃縮すると考えられる。ただし、このピーク部分の塩化物イオン量を経時的に見ると、徐々にピーク値は小さくなり、試験 365 日ではピークの直前の位置の濃度と同程度になっていることが確認できる。これは、吸水により供試体内部が飽和状態に近づくことで、浸透面から内部方向への液状水の移動に伴った塩化物イオンの浸透の影響は弱くなり、高濃度な塩化物イオン量のピーク位置から低濃度の浸透面側へ逆拡散することが示唆された。

また、飽和度分布と全塩化物イオン量分布の相違点④についても、水蒸気拡散の影響に起因した塩化物イオンの濃縮現象として以下のように説明できる。

背面開放の OPC50 (図 3.3-14 の右側)、OPC60 (図 3.3-15 の右側) は液状水が背面まで到達したケースであり、ここで背面部から水分の乾燥があると仮定した場合、以下の①、②の過程を繰り返すことで塩化物イオンが濃縮すると考えられる。

- ① 背面部の水分が水蒸気拡散により乾燥する。その際、塩化物イオンは供試体背面部に残される。
- ② 乾燥した背面部の水分を補うために、供試体内部から背面部側への液状水の移動が生じ、塩化物イオンも共に移動する。このとき、大気中から背面部への吸湿も生じる。

ただし、実際の現象ではこれらが連続的に同時に作用するため、飽和度分布の観点から水分の動きを捉えることは困難である。しかし、全塩化物イオン量分布を見れば、水蒸気拡散の影響により背面部で塩化物イオンの濃縮が起きていることは明白であり、写真 3.3-1 に示すように背面部から塩の析出が確認された。

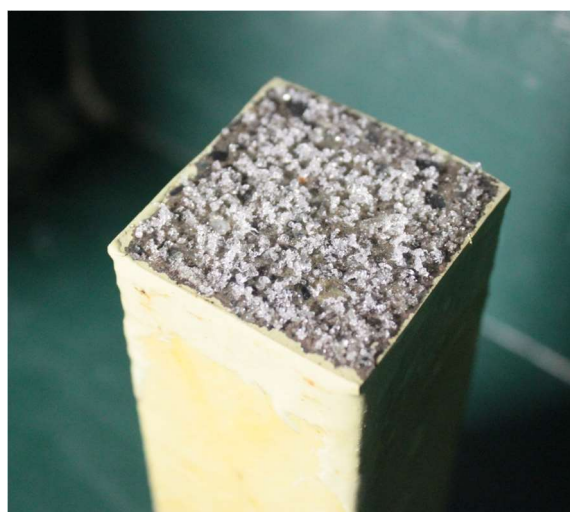


写真 3.3-1 背面部からの塩析出状況

次に、塩化物イオンは液状水中のみで浸透することを利用して、試験日数ごとの塩化物イオンの浸透した最大高さと同位置での飽和度を図 3.3-9、図 3.3-10、図 3.3-12 および図 3.3-11 から読み取り、液状水が移動できる限界の飽和度を検討した。ただし、水分移動および塩化物イオンの浸透が背面部にまで達したデータは評価から除外した。図 3.3-18 に塩化物イオンが浸透した最大高さでの飽和度を示す。試験日数や水セメント比、セメント種類で多少のばらつきはあるものの、塩化物イオンが浸透した最大高さでの飽和度は全体平均で約 40%であった。つまり、吸水による水分移動において、飽和度 40~100%までは液状水の移動、40%以下では水蒸気拡散が起こることを意味する。

さらに、液状水の移動の限界飽和度を 40%として、飽和度 40%位置を図 3.3-2、図 3.3-3 から読み取り、液状水の移動高さの経時変化として図 3.3-19 を示す。いずれのケースにおいても、試験開始直後から液状水の浸透高さは急速に増加し、時間の経過とともに液状水の浸透深さが一定値に収束しており、液状水の移動が停滞している状況が確認できる。また、水セメント比の影響に着目すると、水セメント比の増加に伴って液状水の移動深さが増加している。一方、セメント種類の影響については、同水セメント比の OPC50 比べて BB50 や FB50 などの混和材を使用したケースでは、液状水の移動深さを顕著に抑制していることが確認できた。さらに、背面条件の影響では、背面が開放されている方が液状水の移動高さは大きくなる傾向があり、これは背面封鎖に比べて供試体空隙中の空気が抜けやすい、つまり開放条件による間隙空気圧の違いが影響していると考えられる。

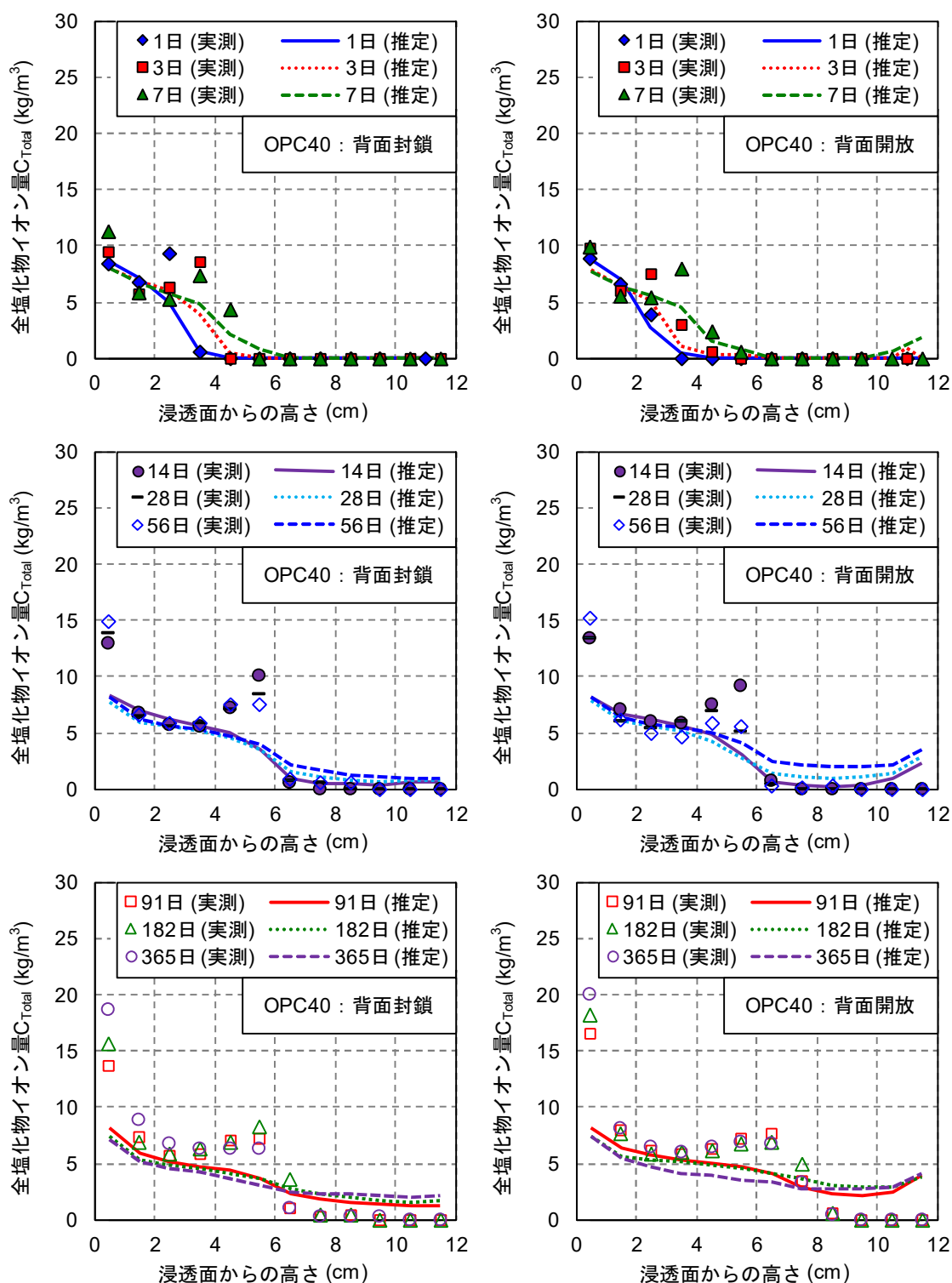


図 3.3-13 実測塩化物イオン量と推定塩化物イオン量との比較 (OPC40)

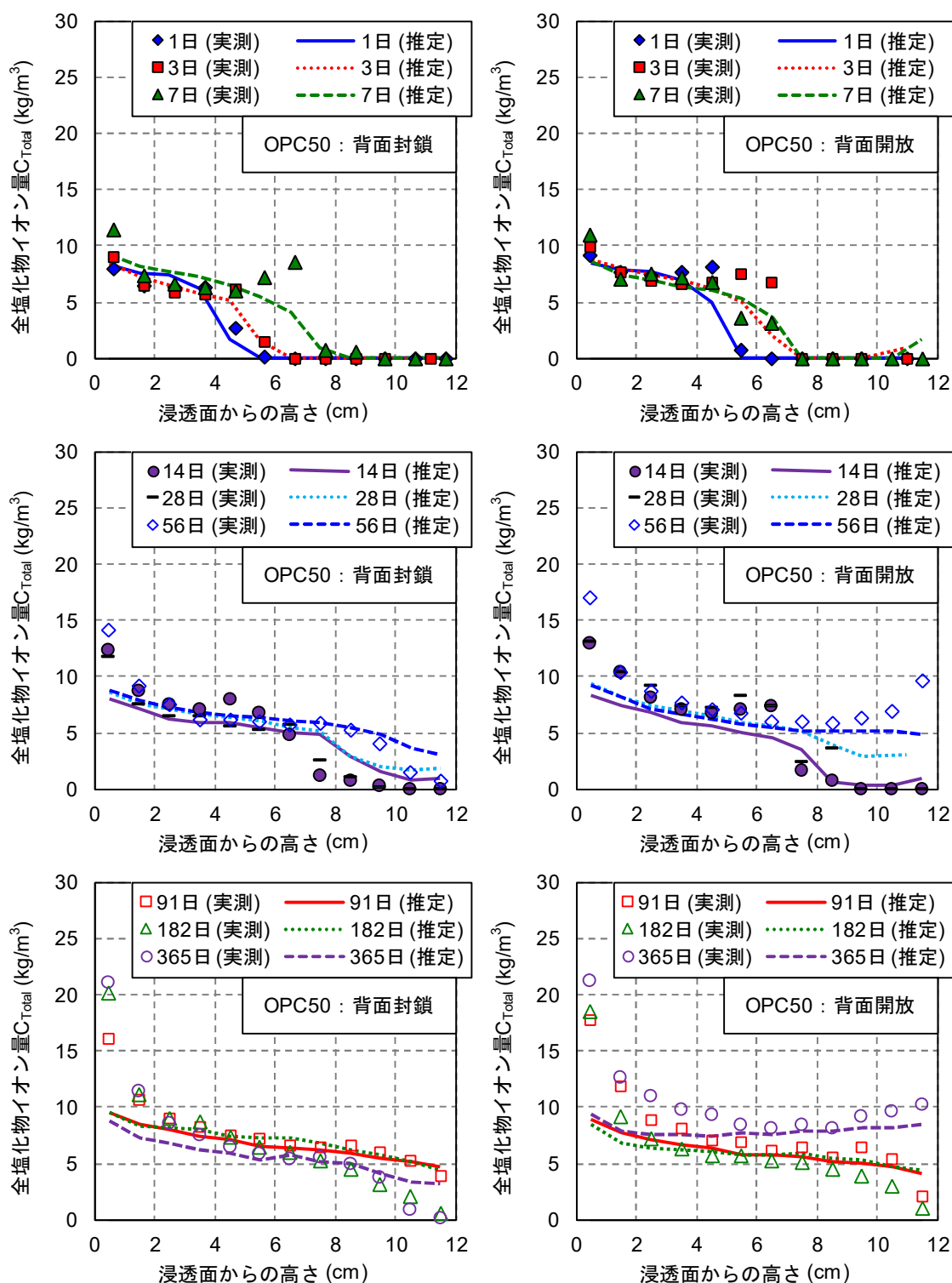


図 3.3-14 実測塩化物イオン量と推定塩化物イオン量との比較 (OPC50)

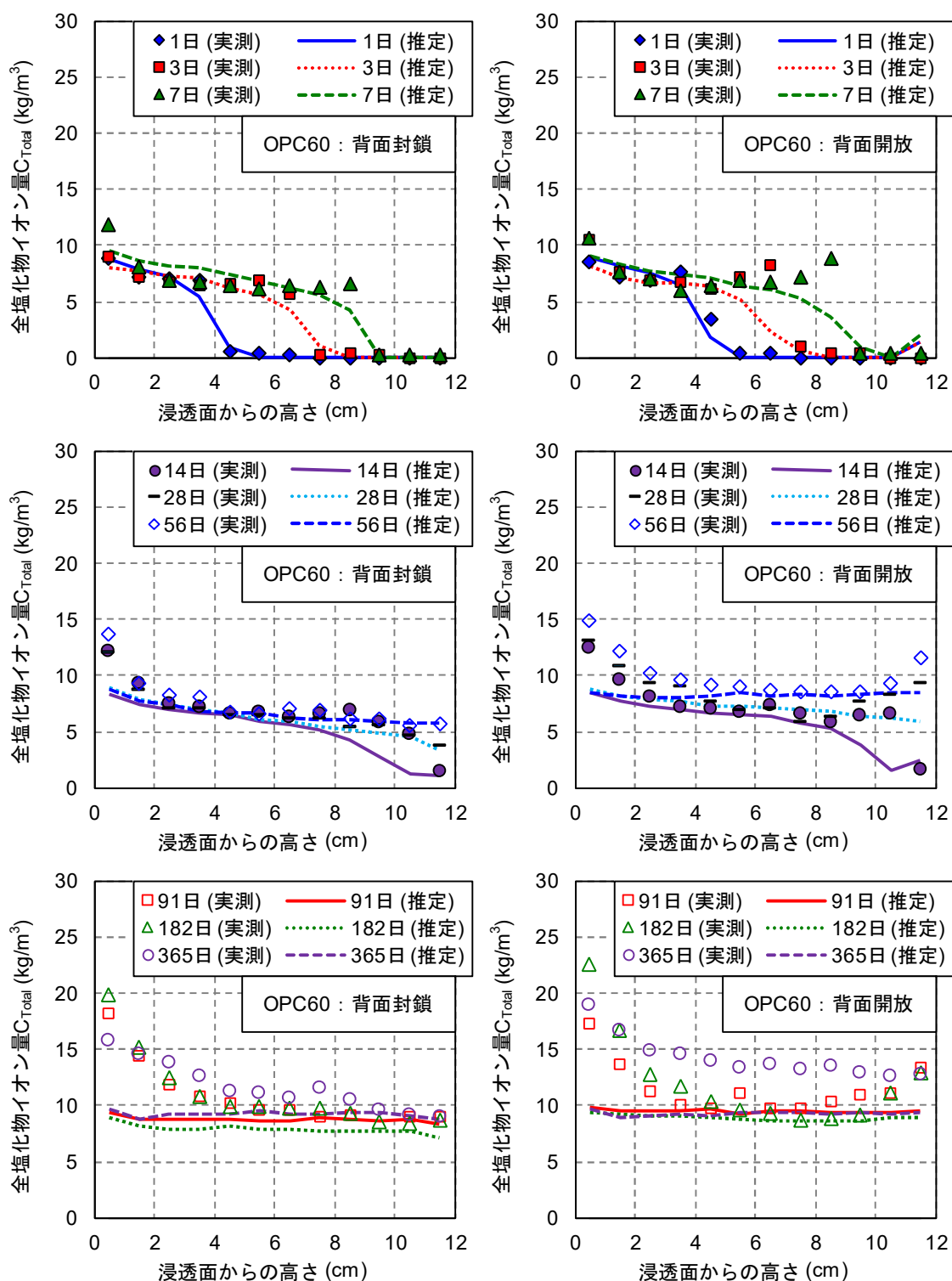


図 3.3-15 実測塩化物イオン量と推定塩化物イオン量との比較 (OPC60)

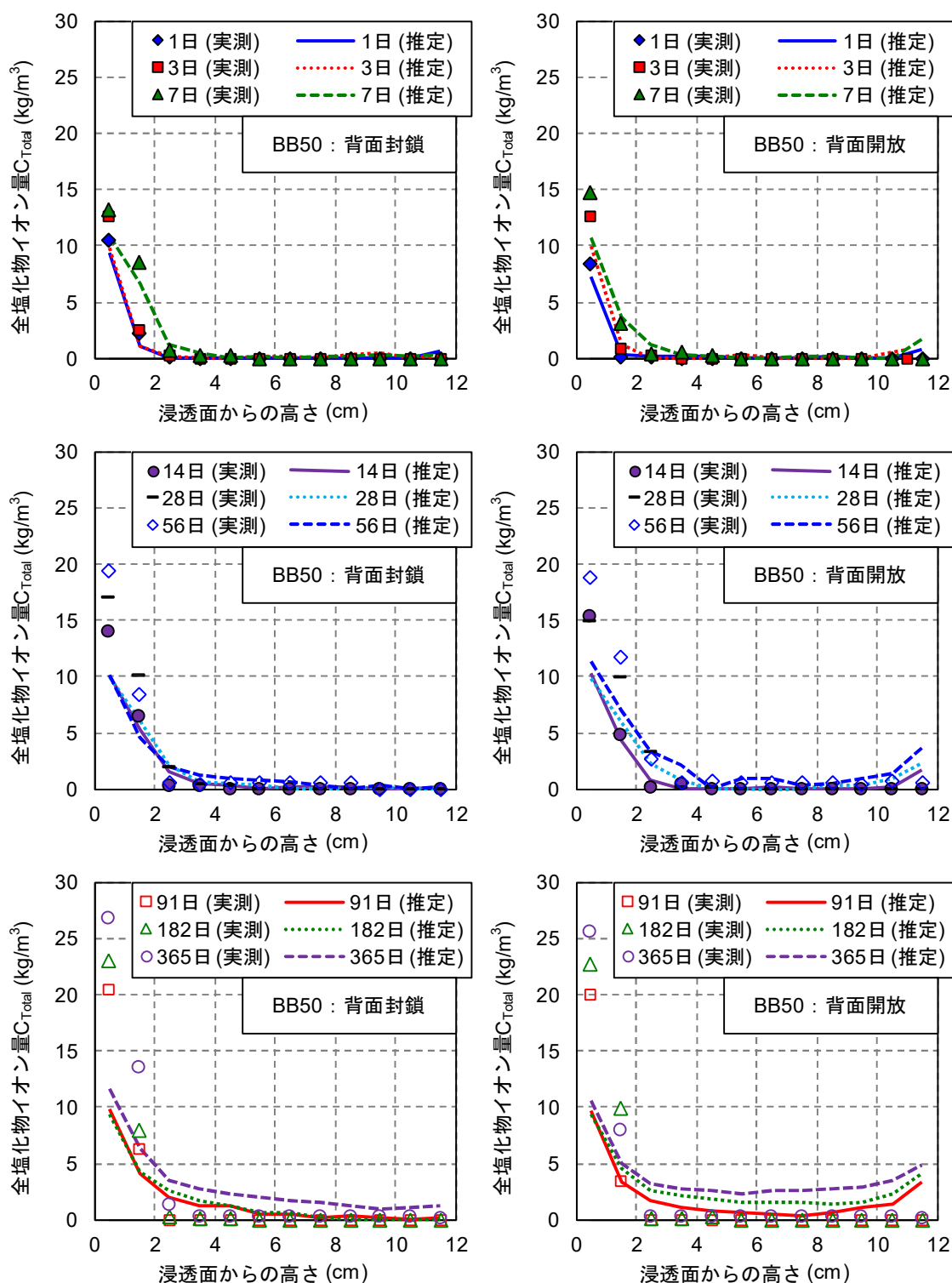


図 3.3-16 実測塩化物イオン量と推定塩化物イオン量との比較 (BB50)

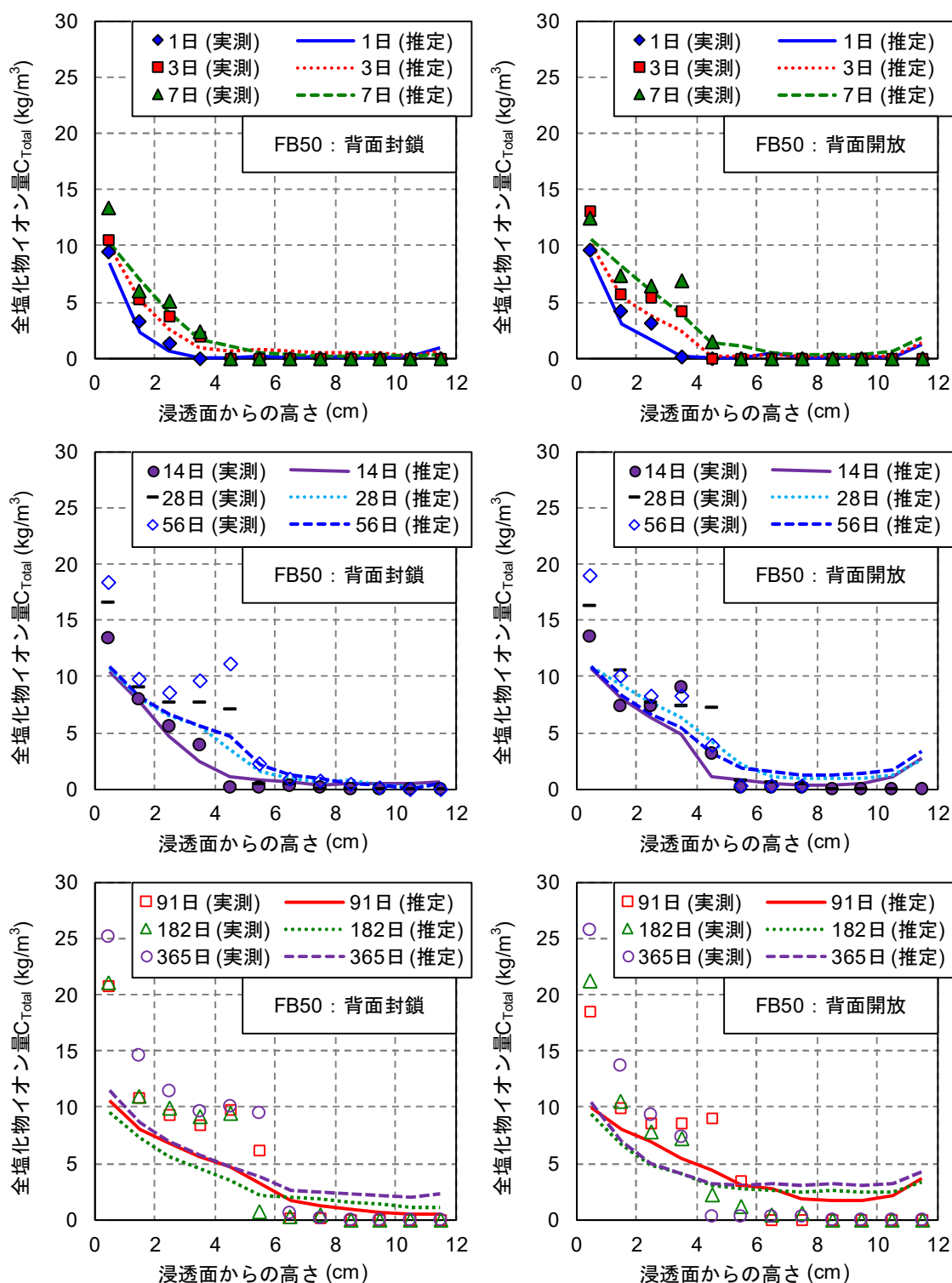


図 3.3-17 実測塩化物イオン量と推定塩化物イオン量との比較 (FB50)

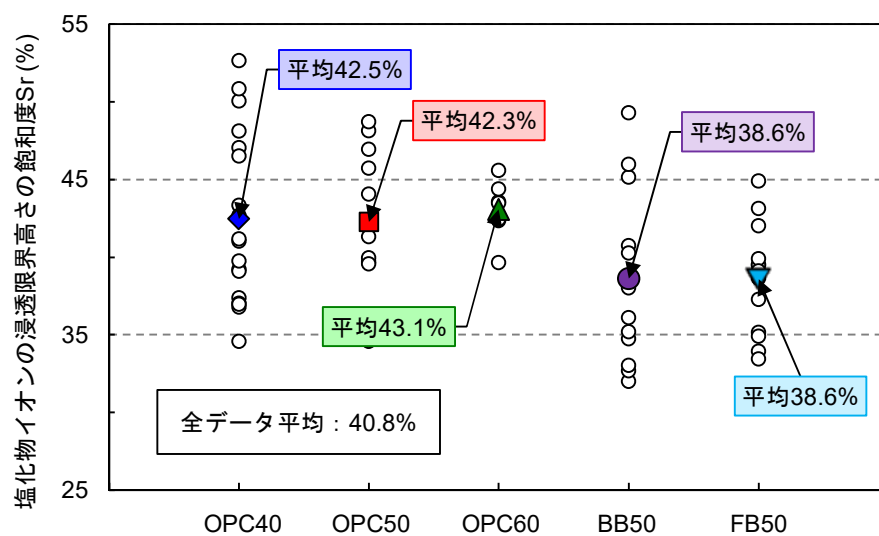


図 3.3-18 塩化物イオンの浸透限界高さの飽和度

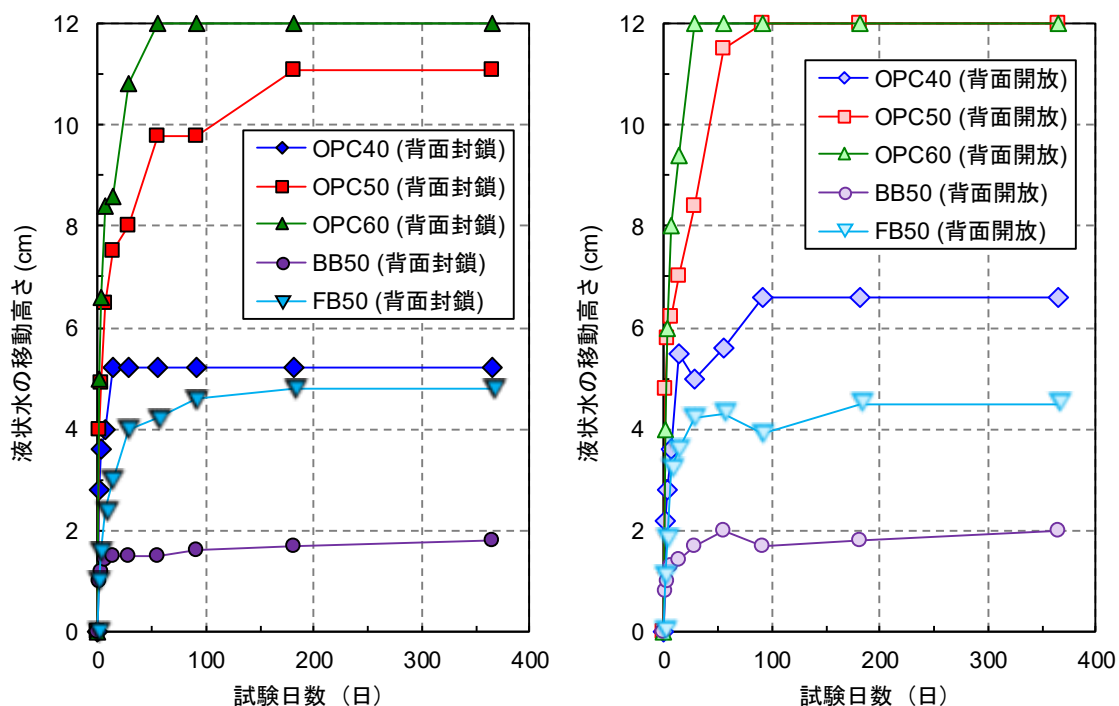


図 3.3-19 液状水の移動高さの経時変化

3.3.2 水銀圧入試験

水銀圧入試験により得られた、塩化物イオン浸透試験開始直前の各配合の空隙構造を図 3.3-20 および図 3.3-21 に示す。また、図 3.3-20 では、実線で連続空隙およびインクボトル空隙を含んだ全空隙の空隙径分布を、破線では再加圧過程で得られた連続空隙の空隙径分布をそれぞれ示している。まず、水セメント比の影響に着目すると、OPC40, OPC50, OPC60 のいずれも空隙のピーク径は 100nm にあり、水セメント比の増加に伴って 50nm 以下の空隙量が増加する傾向が確認された。一方、セメント種類の影響では、空隙のピーク径は BB50 で 200nm, FB50 で 110nm となり、OPC シリーズと比べると粗大側に位置するものの、100nm 以下の空隙量は OPC50 よりも少ない傾向にある。

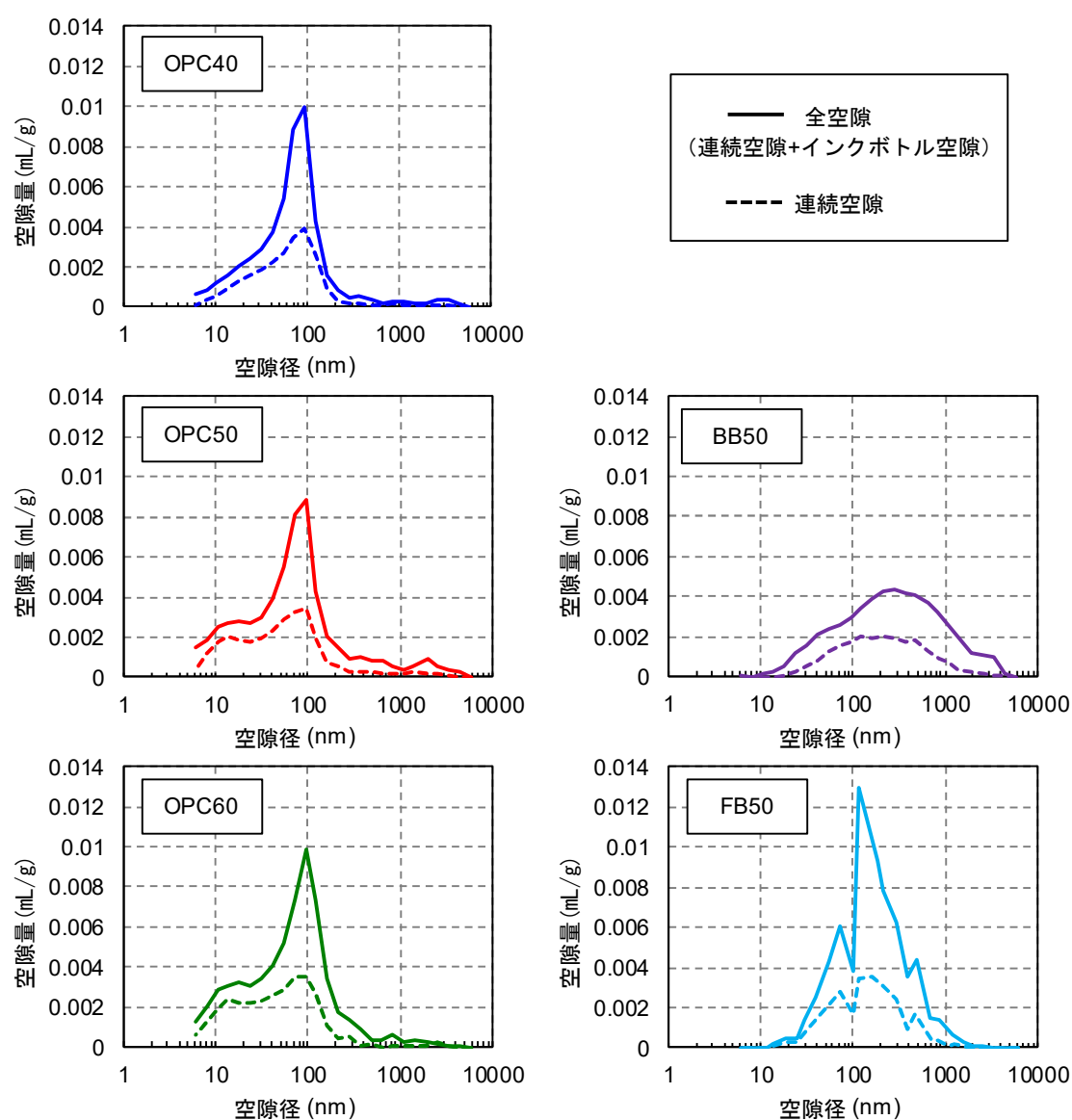


図 3.3-20 各種配合の空隙構造（空隙径分布）

次に図 3.3-21 の各配合の総空隙量を比較すると、総空隙量は $BB50 < OPC40 < OPC50 < OPC60 < FB50$ の順で多く、塩化物イオン浸透試験にて優れた水分移動抑制効果および塩化物イオン浸透抵抗性を示した $FB50$ が最も空隙量が多くなり、水分や塩化物イオンなどの各種物質移動に対する抵抗性の傾向と一致していない。そこで、各配合の空隙量の内訳を、試験方法で示した図 3.2-4 に従って、総空隙量を連続空隙量とインクボトル空隙量に分けて図 3.3-22 に示した。その結果、連続空隙量は $BB50 < OPC40 < FB50 < OPC50 < OPC60$ の順で多くなり、塩化物イオン浸透試験にける各傾向とも概ね一致していることが確認された。

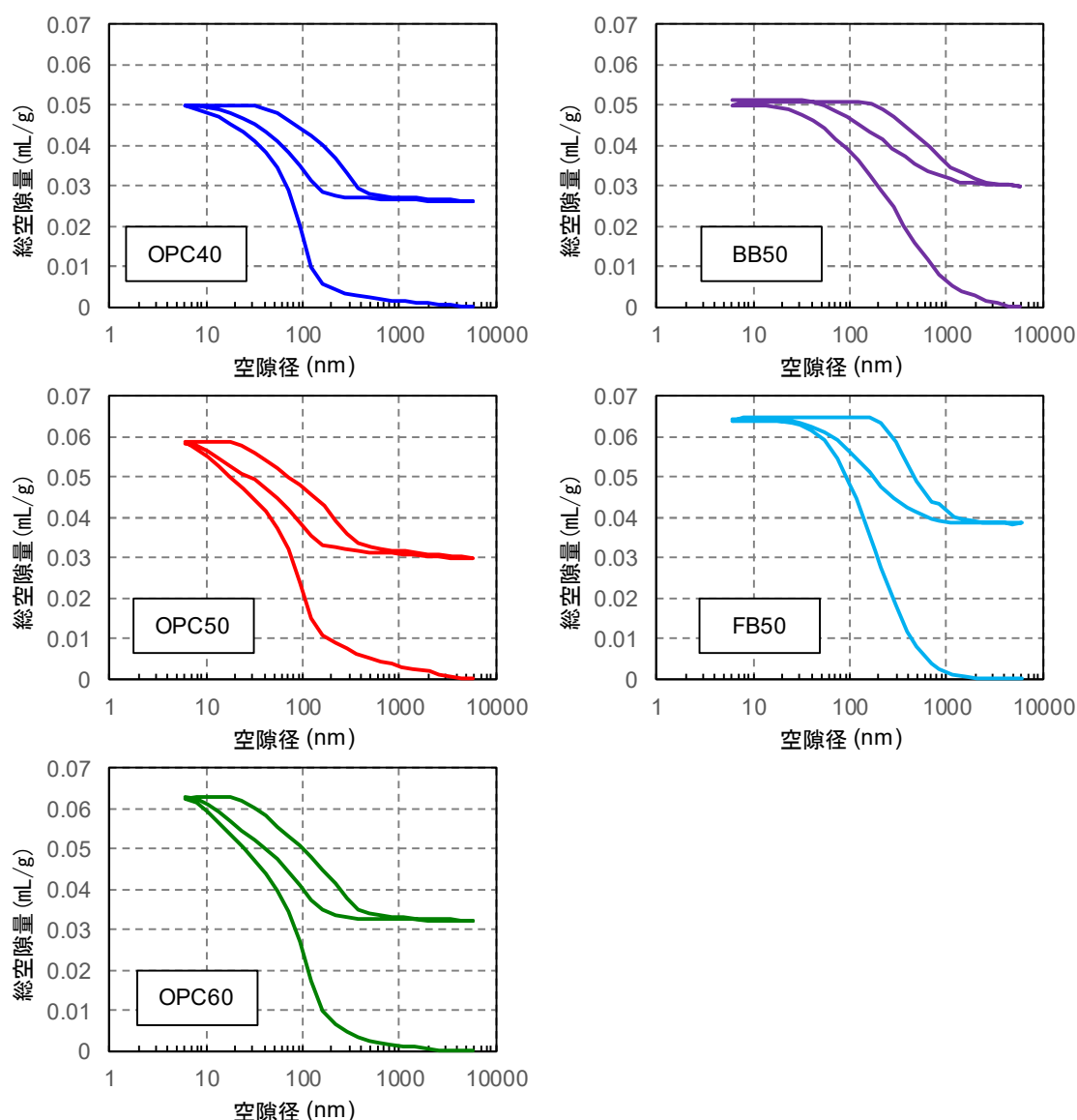


図 3.3-21 各種配合の空隙構造（総空隙量）

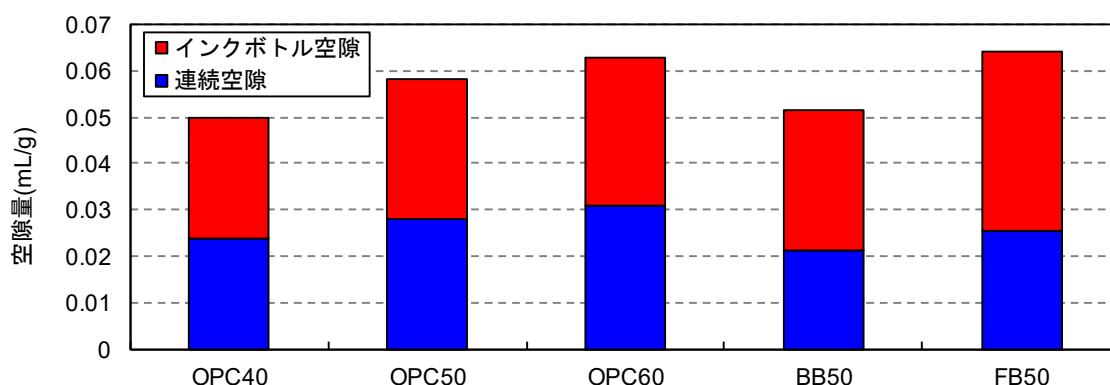


図 3.3-22 各配合の空隙量の内訳

ここで、疑似飽和状態から塩化物イオン浸透試験を実施した際に得られた見かけの拡散係数と連続空隙量との関係調べる。図 3.3-23、各試験日数の見かけの拡散係数と連続空隙量との相関関係を示す。また、同図中には式 3.3-3 を基本形とした各試験日数での近似線を併せて示している。なお、各試験日数の近似式の実験定数 a 、 b は表 3.3-1 に示とおりである。見かけの拡散係数と連続空隙量との間には相関関係が示されており、連続空隙量の増加に伴って見かけの拡散係数が増加している傾向が示された。ただし、OPC40 と FB50 では OPC40 の方が連続空隙量は少ないにもかかわらず、FB50 の方が見かけの拡散係数が小さいことから、連続空隙量の影響のみならず、空隙の屈曲度⁶⁾などの空隙構造の複雑さも影響していると考えられる。

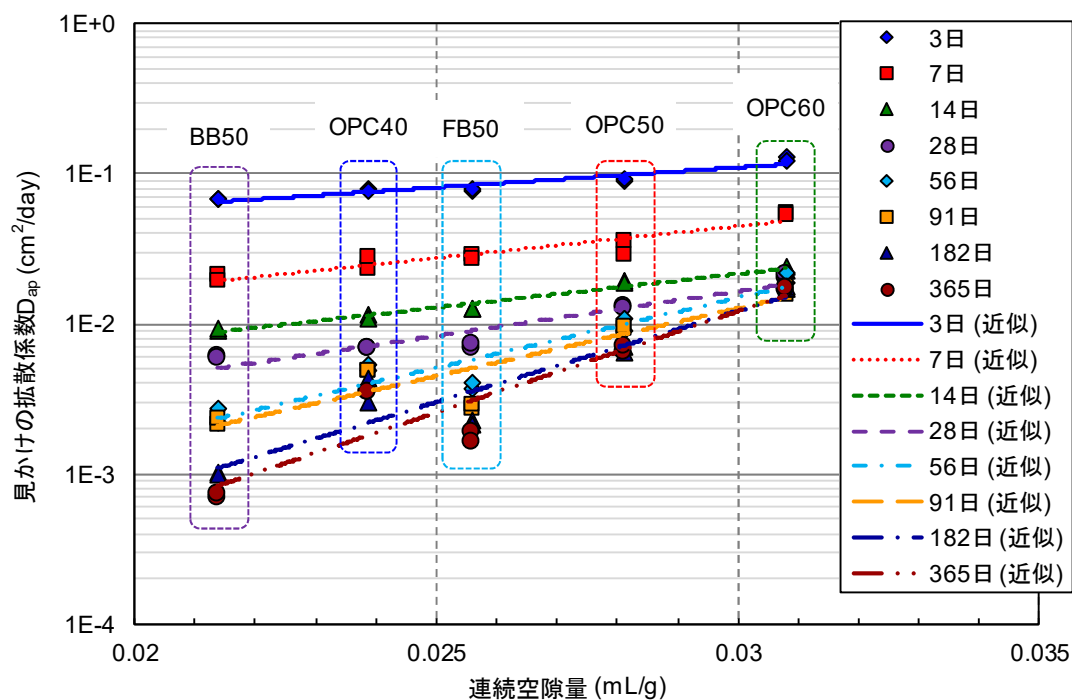


図 3.3-23 見かけの拡散係数と連続空隙量との関係

連続空隙量と見かけの拡散係数の関係式

$$D_{ap} = a \exp(b \cdot V_{cp}) \quad \text{式 3.3-3}$$

ここで、 D_{ap} ：見かけの拡散係数 (cm²/year), V_{cp} ：連続空隙量 (mL/g), t ：時刻 (day), a , b ：実験定数である。

表 3.3-1 実験定数

	α	β
3 日	6.3867	61.31
7 日	0.8734	97.59
14 日	0.3539	103.31
28 日	0.1208	127.34
56 日	0.0086	215.02
91 日	0.0089	208.41
182 日	0.0010	279.60
365 日	0.0004	310.47

次に、絶乾状態から塩化物イオン浸透試験において、塩化物イオンの浸透に強く影響した、液状水の移動と連続空隙量との関係性を調べる。図 3.3-19 で示した液状水の移動高さの経時変化を連続空隙量で整理したものを図 3.2-1 に示す。また、同図中には式 3.3-4 を基本形とした各試験日数での近似線を併せて示している。なお、各試験日数の近似式の実験定数 α , β は表 3.3-1 に示すとおりである。背面封鎖、背面開放ともに各試験日数で連続空隙量の増加に伴って液状水の移動高さが増加する傾向が示された。しかし、見かけの拡散係数と同様に、OPC40 と FB50 では OPC40 の方が連続空隙量は少ないにもかかわらず、FB50 の方が液状水の移動高さが小さいことから、連続空隙量だけの評価では十分ではなく、空隙の屈曲度の影響を考慮した評価の必要性が示唆された。

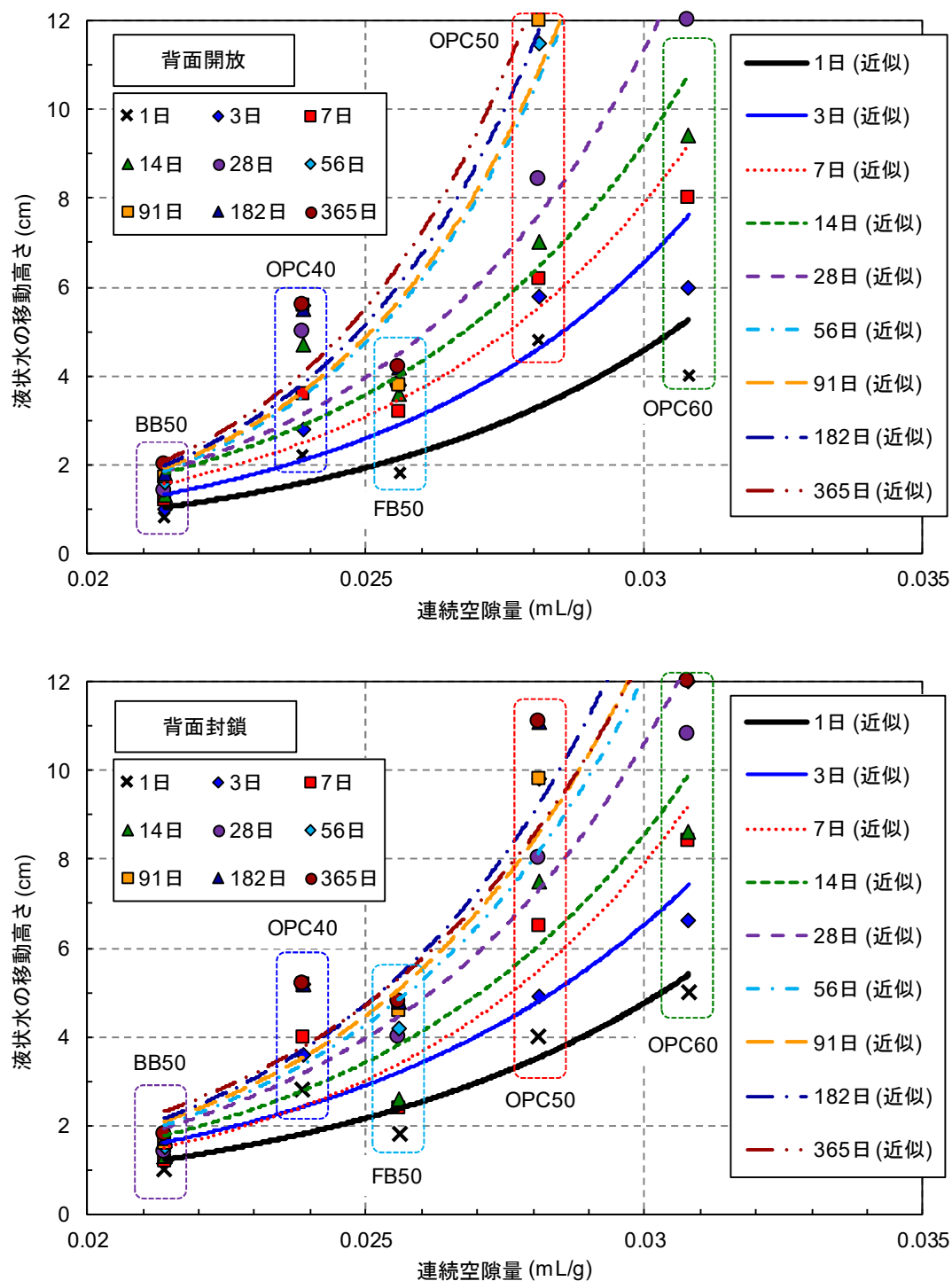


図 3.3-24 液状水の移動位置と連続空隙量との関係

連続空隙量と液状水の移動位置との関係式

$$X_{cap} = \alpha \exp(\beta \cdot V_{cp}) \quad \text{式 3.3-4}$$

ここで, X_{cap} : 液状水の移動位置 (cm), V_{cp} : 連続空隙量 (mL/g), t : 時刻 (day), $X_{cap}(V_{cp}, t)$: 任意の連続空隙量 V_{cp} , 試験日数 t 日での液状水の移動位置 (cmr), $\alpha(t)$, $\beta(t)$: 実験パラメータである.

表 3.3-2 実験定数

	背面封鎖		背面開放	
	α	β	α	β
1 日	0.042	157.7	0.0253	173.3
3 日	0.0507	162.0	0.0247	186.2
7 日	0.0243	193.0	0.0274	188.9
14 日	0.0351	183.3	0.0306	190.4
28 日	0.028	197.4	0.0204	210.8
56 日	0.023	208.9	0.0070	260.9
91 日	0.0095	248.1	0.0076	258.4
182 日	0.0211	216.4	0.0067	265.8
365 日	0.0141	234.2	0.0064	270.5

3.4 本章のまとめ

本章では、未だ十分に検討されていない、コンクリート中における水分移動が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を把握するために、疑似飽和状態および絶乾状態のモルタルを使用して、吸水現象における水分移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透を水セメント比やセメント種類の影響に着目して検討し、以下の結論が得られた。

● 疑似飽和状態からの塩化物イオン浸透試験

疑似飽和状態で塩化物イオン浸透試験を実施した結果、塩化物イオンの浸透は Fick の濃度拡散モデルに従うことが確認された。

また、背面条件の影響に関しては、水分移動および塩化物イオン浸透の両者ともに明確な違いを確認することができなかった。これは、背面側の大気中の湿度が 90%前後と非常に高湿度環境となっているため、背面部からの乾燥の影響が極めて小さく背面条件の有意な差として現れなかったと考えられた。

● 絶乾状態化からの塩化物イオン浸透試験

① 水分移動特性

絶乾状態から吸水による水分移動を受けると、試験開始から僅か短時間で急速に水分がモルタル内部に移動することが確認された。その時の飽和度分布の特徴として、浸透面から直線型の分布を示す液状水の移動と、拡散型の分布を示す水蒸気拡散が確認された。また、全塩化物イオン量分布の結果を基に、液状水の移動と水蒸気拡散の境界である気液界面は、概ね飽和度 40%に存在し、飽和度 40～100%までは液状水の移動、40%以下では水蒸気拡散となることが確認された。

また、水分移動特性は水セメント比やセメント種類の影響を強く受け、水セメント比の増加に伴って水分移動が顕著となることが確認された。セメント種類の影響として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混入することで、同一水セメント比である普通ポルトランドセメントを使用した OPC50 よりも遥かに水分移動を抑制することが確認された。水分移動抵抗性の高かった OPC40, BB50, FB50 では試験 365 日経過後も液状水は供試体背面部に到達せず途中で液状水の移動が停止し、水蒸気拡散の方が卓越した。一方、OPC50 や OPC60 では、試験 28 日目で液状水が供試体背面部まで到達し、特に OPC60 はその後も水分移動が進み試験 365 日時点で均一な分布を示した。

背面条件については、背面封鎖よりも背面開放の方が水分移動は速い傾向にあり、これは、背面封鎖の場合は背面が封鎖されているため、供試体の空隙中に取り残された空気が水分移動を阻害することや、その一方で、背面開放では、背面部からの吸湿による水分移動が生じることに起因する。

② 塩化物イオン浸透特性

吸水を受ける場合の塩化物イオンの浸透特性は、疑似飽和状態から試験を行った際に得られた、拡散モデルに従った全塩化物イオン量分布とは明らかに異なる傾向を示し、その傾向は飽和度分布と概ね一致しており、水分移動に伴って塩化物イオンが浸透していることが確認された。そのため、飽和度分布と同様に水セメント比の増加に伴って、塩化物イオンの浸透は顕著となり、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を使用することで、塩化物イオンの浸透を大幅に抑制していることが確認できた。

吸水による液状水の移動の過程では、液状水は 10%の塩水濃度を保ったまま空隙中を移動していることが確認された。また水蒸気拡散では、塩化物イオンは移動しないことも実験的に確認することができた。

いずれの配合において、浸透面付近の全塩化物イオン量が増加する傾向を示しており、塩化物イオンの固定化や疑似吸着の影響により、浸透面近傍での全塩化物イオン量が増加したことが要因と考えられた。

また、OPC40 や FB50 などでは、供試体内部で全塩化物イオン量分布のピークが現れる現象が確認され、これは気液界面から水蒸気拡散が進むことで、液状水に存在する塩化物イオンは取り残され濃縮することが原因として考えられた。

さらに、背面条件の影響として、背面開放の OPC50 と OPC60 では、背面部で塩化物イオン量が増加することを確認し、背面部からの水蒸気拡散による乾燥と供試体内部からの液状水の移動の影響で濃縮したと考えられた。

● 水銀圧入試験

空隙構造に関して、水セメント比の影響に着目すると、OPC40、OPC50、OPC60 のいずれも空隙径のピークは 100nm にあり、水セメント比の増加に伴って 50nm 以下の空隙が増加する傾向が確認された。一方、セメント種類の影響では、空隙径のピークは BB50 で 200nm、FB50 で 110nm となり、OPC シリーズと比べると粗大側だが、100nm 以下の空隙分布は OPC のどのシリーズよりも少ない傾向にある。また、見かけの拡散係数や液状水の移動高さは各試験日数で連続空隙量との間に概ね相関性が示された一方で、空隙構造の複雑さである屈曲度の影響も考慮する必要性が示唆された。

参考文献

- 1) 野島省吾, 大即信明, 斎藤豪, 橋本勝文, 篠田佳男: セメント系材料中の拡散現象に関する水銀圧入法を用いた空隙構造評価, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V-427, pp.853-854, 2010.
- 2) 岸利治, 高橋佑弥, Islam, M.S., 酒井雄也: コンクリート中への塩分浸透停滞現象の確認と液状水浸透挙動との相関に関する研究, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)成果報告書(その 2)およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ No.99, pp.361-368, 土木学会, 2012.
- 3) Nagataki, S., Otsuki, N. and Wee, T.: Condensation and binding of intruded chloride ion in hardened cement matrix materials, 土木学会論文集, No.414/V-12, pp.205-215, 1990.
- 4) 丸屋剛, Tangtermsirikul, S., 松岡康訓: コンクリート表層部における塩化物イオンに関するモデル化, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.79-95, 1998.
- 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, pp.61-69, 1990.
- 6) 杉山隆文, 清水俊吾, Ritthichauy, W., 辻幸和: 電気泳動法を用いたモルタル硬化体の空隙構造の定量化とその考察, 土木学会論文集, No.767, pp.227-238, 2004.

第4章

吸水現象を受けるコンクリートへの 塩化物イオン浸透モデルの検討

4.1 概要

本章では第3章の「吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討」から得られた結果を基に、吸水現象を受けるコンクリートへの水分移動モデルおよびそれに伴う塩化物イオンの浸透モデルを構築することを目的としている。ここでは、まず、塩化物イオンの浸透に大きな影響を及ぼした、吸水による水分移動をモデル化する。次に、水分移動モデルを基に吸水を受けるコンクリート中塩化物イオンの浸透モデルについて構築し、第3章での実験結果との比較から、各モデルの妥当性を検討した。

4.2 吸水現象による水分移動モデルの検討

4.2.1 水分移動モデル

第3章の絶乾状態の供試体を用いた試験の結果から、コンクリート・モルタル中の水分移動は液状水の移動と水蒸気拡散の2相の移動が存在し、それぞれ移流（液状水の移動）と拡散（水蒸気拡散）によって表現されることが示唆された。

そこで、水分移動モデルとして、式 4.2-1 に示す移流拡散方程式を示し、数値解析に必要な液状水の移動速度および水蒸気拡散係数の各種解析パラメーターは以下のように決定した。

$$\frac{\partial Sr}{\partial t} = D_{v-wet} \cdot \frac{\partial^2 Sr}{\partial x^2} - v_{cap} \cdot \frac{\partial Sr}{\partial x} \quad \text{式 4.2-1}$$

ここで、 Sr ：コンクリート中の飽和度(%), v_{cap} ：液状水の移動速度(cm/day), D_{v-wet} ：水蒸気拡散係数(cm²/day), t ：時刻(day), x ：距離(cm)である。

4.2.2 解析パラメーターの決定

4.2.2.1 液状水の移動速度

まず、移流項における液状水の移動速度について検討する。第3章の絶乾状態の供試体を用いた試験の結果から、液状水の移動高さは試験開始直後から急速に増加し、時間の経過に伴って一定値に収束する時間依存性が示された。一方で、水銀圧入試験の結果から、液状水の移動高さは連続空隙量との相関性を有するとともに、空隙構造の複雑さを表す屈曲度との関連性も示唆された。

そこで、液状水の移動高さについて時刻と空隙構造を説明変数として定式化する。まず、液状水の移動高さの時間依存性については、式 4.2-2 を基本形として配合および背面条件ごとで近似式を求め、表 4.2-1 に示す実験係数 α , β が得られた。ここで、 α は液状水の移動限界高さ、 β は液状水の移動限界高さに至るまでの速度をそれぞれ決定する実験係数である。図 4.2-4 は液状水の移動高さの経時変化の実測値と近似式との比較を示す。液状水の移動高さの変化が大きい、試験初期で若干の誤差が確認されるものの、液状水の移動高さの経時的変化の傾向を十分に表現できている。

$$X_{cap} = \alpha[1 - \exp(-\beta \cdot t)] \quad \text{式 4.2-2}$$

ここで、 X_{cap} ：液状水の移動高さ (cm)、 t ：時刻(day)、 α ：液状水の移動限界高さを決定する実験係数、 β ：液状水の移動限界高さに至るまでの速度を決定する実験係数である。

表 4.2-1 液状水の移動高さに関する実験係数

	背面封鎖		背面開放	
	α	β	α	β
OPC40	5.2	0.3	6.6	0.2
OPC50	11.2	0.07	12	0.06
OPC60	12	0.15	12	0.16
BB50	1.8	0.46	2	0.44
FB50	4.8	0.08	4.2	0.12

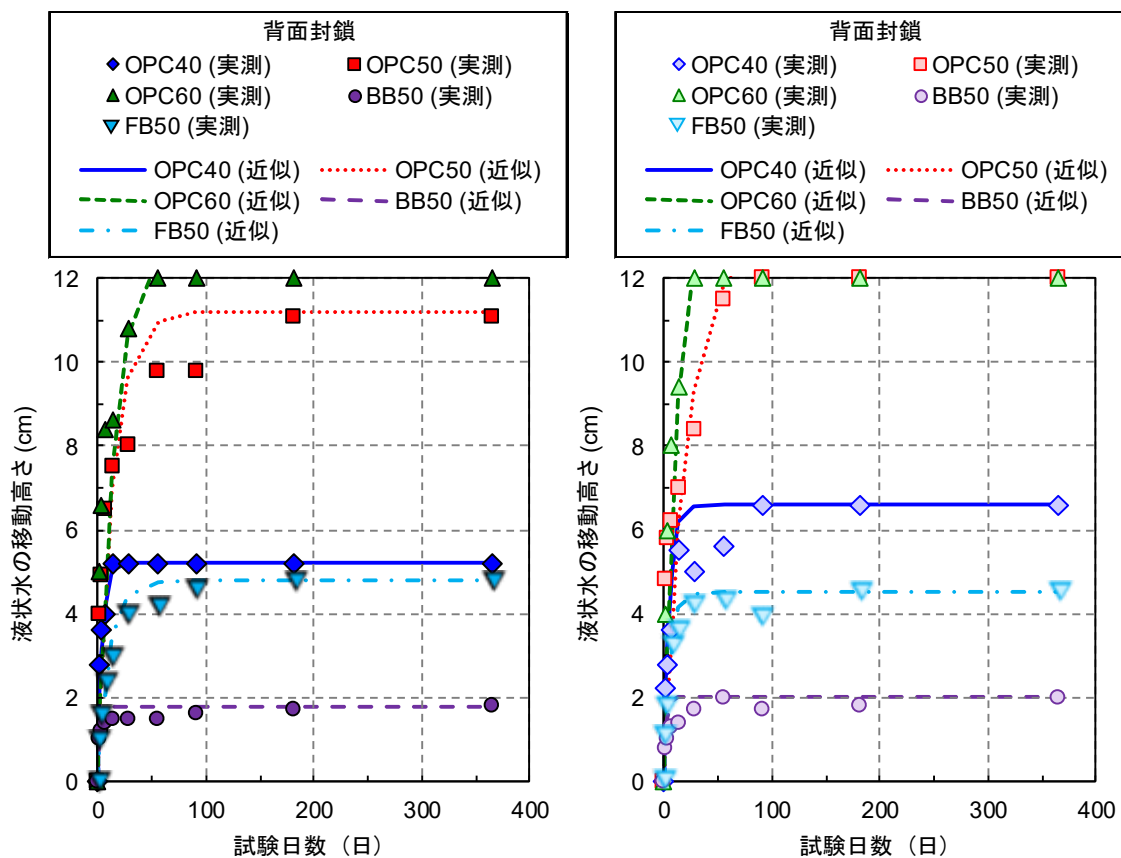


図 4.2-1 液状水の移動高さの実測値と近似値との比較

次に、液状水の移動高さと空隙構造を関連付けるために、式 4.2-2 を基に、液状水の移動高さに関する実験係数 α 、 β と連続空隙量との相関性を図 4.2-4 に示す。概ね、実験定数 α 、 β とともに連続空隙量との相関性が示されているが、OPC40 と FB50 では傾向が逆転していることが確認できる。この原因について、第3章の水銀圧入試験の結果では、空隙構造の複雑さである屈曲度が影響していることを示唆した。

ここで屈曲度とは、図 4.2-3 に示すように、コンクリートやモルタルの空隙構造を円筒の集合体と仮定した場合の、円筒の屈曲性を評価する指標である。例えば、同程度の空隙量を仮定した場合、屈曲のない空隙であれば、物質の移動経路長さ L_e は供試体長さ L と同じになる。しかし、円筒が屈曲を有している場合は、物質の移動経路長さは $L_e > L$ となり、屈曲のない空隙に比べて物質移動抵抗性は向上し、このとき屈曲度は式 4.2-3 により与えられる¹⁾。そして、杉山ら¹⁾の研究を参考に、連続空隙量と屈曲度から構成される空隙構造係数（式 4.2-4）を定義した。

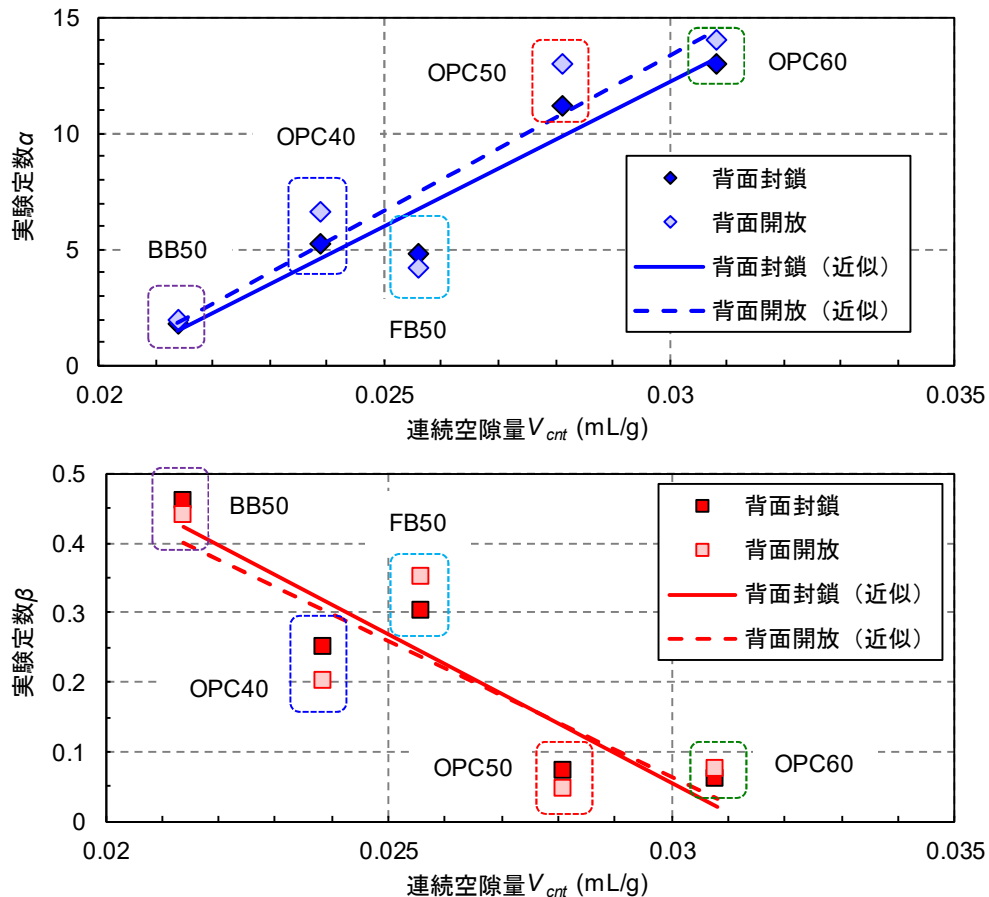


図 4.2-2 実験係数 α 、 β と連続空隙量の関係

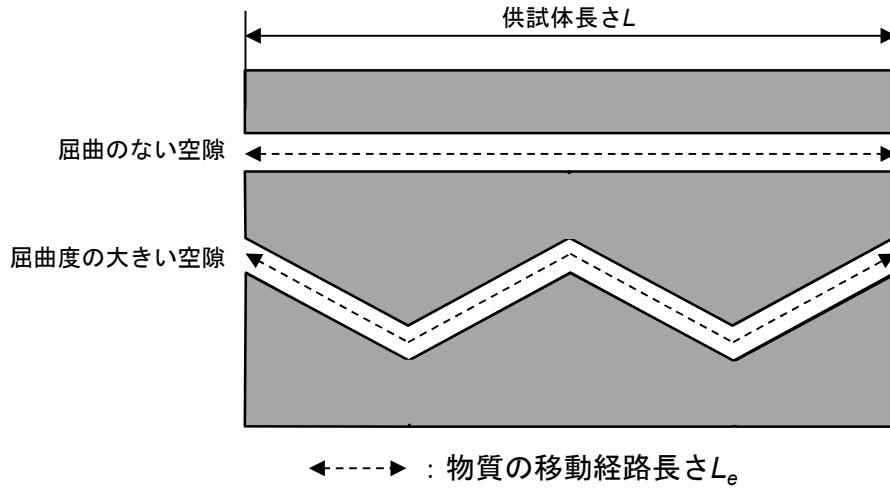


図 4.2-3 空隙構造における屈曲度の概念図

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad \text{式 4.2-3}$$

ここで、 τ ：屈曲度， L ：供試体長さ (cm)， L_e ：屈曲した円筒の長さ ($>L$) (cm)である

$$\omega = \frac{V_{cnt}}{\tau^2} \quad \text{式 4.2-4}$$

ここで、 ω ：空隙構造係数， V_{cnt} ：連続空隙量 (mL/g)， τ ：屈曲度である

この式 4.2-4 を基に、実験係数 α 、 β と空隙構造係数の関係を図 4.2-4 に示す。ただし、空隙の屈曲度に関しては本検討では評価していないため、既往の研究^{1), 2)}を参考に表 4.2-2 と定めた。その結果、実験係数 α 、 β とともに空隙構造係数とは良好な相関関係を示していることが確認され、これらを直線近似により式 4.2-5～式 4.2-7 として定式化した。なお、実験係数 α は背面封鎖と背面開放で別々の近似式として定式化した。背面封鎖と背面開放の違いが水分の移動高さへ及ぼす要因としては、第3章でも述べたように、空隙に取り込まれた空気起因した間隙空気圧の影響が考えられる。したがって、本来は実験係数の定式化においては、間隙空気圧の影響を考慮すべきであるが、本検討では間隙空気圧の影響に関して十分に把握できていないため、簡易的に背面封鎖と背面開放に分けて定式化を行った。一方、実験係数 β は背面条件によらず同一の近似式で示された。

そして最後に、上述の実験係数 α 、 β に加えて、式 4.2-1 で示した液状水の移動高さの経時変化の式を時刻 t で微分することで、液状水の移動速度式である式 4.2-8 が得られた。

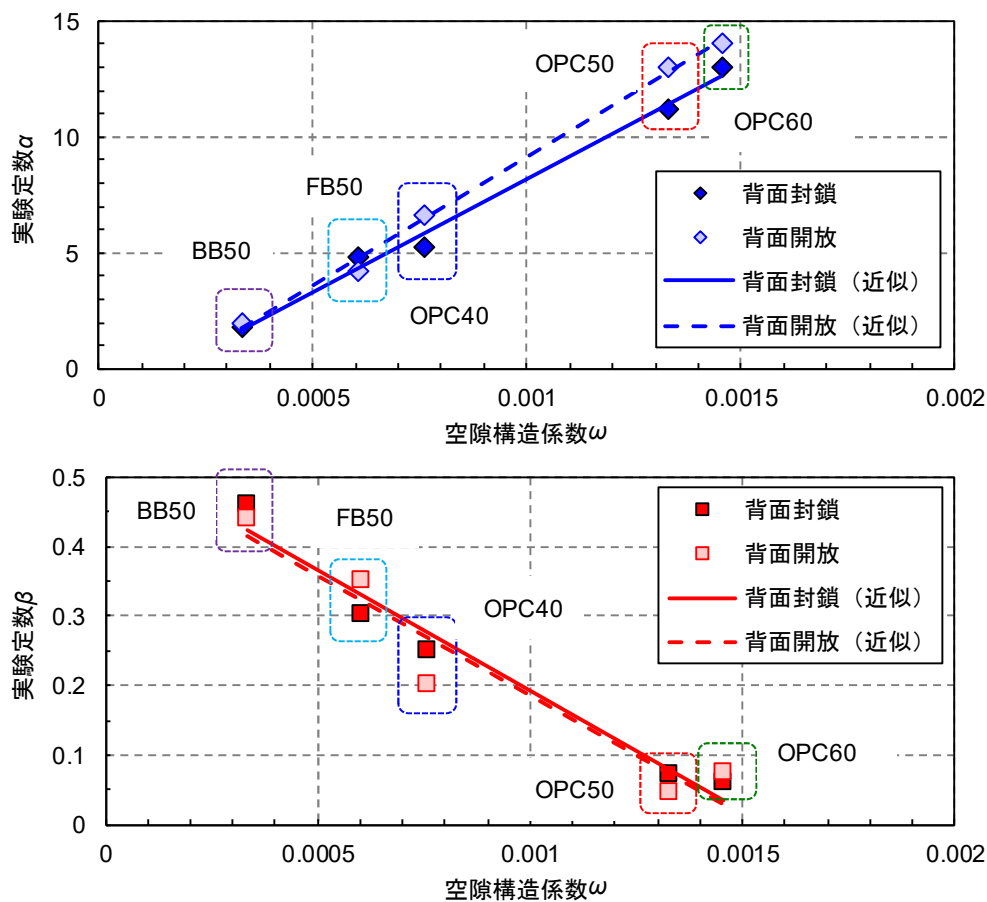


図 4.2-4 実験係数 α , β と空隙構造係数の関係

表 4.2-2 各種配合の空隙屈曲度

	OPC40	OPC50	OPC60	BB50	FB50
τ	4.6	4.6	4.6	8.0	6.5

$$\text{背面封鎖: } \alpha = 9.77 \times 10^3 \cdot \omega - 1.57 \quad \text{式 4.2-5}$$

$$\text{背面開放: } \alpha = 11.09 \times 10^3 \cdot \omega - 1.99 \quad \text{式 4.2-6}$$

$$\text{背面封鎖\&背面開放: } \beta = -3.43 \times 10^2 \cdot \omega + 0.53 \quad \text{式 4.2-7}$$

$$\text{液状水の移動速度: } v_{cap} = \alpha \beta \cdot \exp(-\beta \cdot t) \quad \text{式 4.2-8}$$

ここで, α , β : 実験係数, ω : 空隙構造係数, t : 時刻 (day), v_{cap} : 液状水の移動速度 (cm/day) である.

4.2.2.2 水蒸気拡散係数

次に、水蒸気拡散係数について検討する。これまで多くの研究で明らかなように、コンクリート中の水蒸気拡散係数は一定ではなく、コンクリート中の含水状態や吸湿過程・乾燥過程などで大きく異なり、水蒸気拡散係数の様々な算出方法が示されてきた。なかでも、橋田ら³⁾は、図 4.2-5 に示す水蒸気吸着等温線から、水蒸気吸着等温線の傾きと透湿率を用いた水蒸気拡散係数の算出方法を示しており（式 4.2-9、式 4.2-10）、本手法は水分移動の湿度環境の乾湿繰り返し履歴に適用できるなどの高い汎用性を有している。

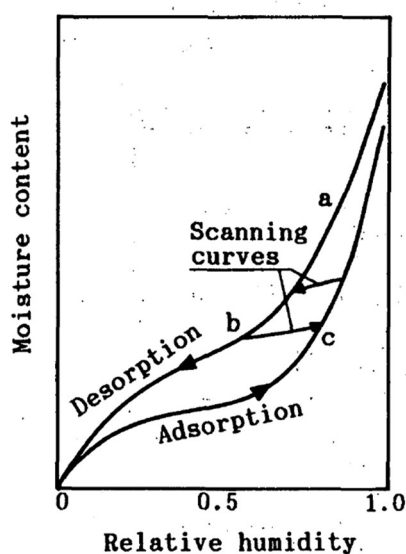


図 4.2-5 水蒸気吸脱着等温線³⁾

$$D_v = c \cdot \lambda \quad \text{式 4.2-9}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\partial W}{\partial H} \quad \text{式 4.2-10}$$

ここで、 H ：空隙中の相対湿度， W ：空隙中の水分量 (g/g)， D_v ：水蒸気拡散係数， $1/\lambda$ ：湿気容量（吸脱着等温線の傾き）， c ：透湿率 (g/(cm・day・RH))である。

そこで、本検討でも、同様の手法で水蒸気拡散係数を定式化するために、第3章の検討に用いた配合に対して、水蒸気吸脱着試験を実施した。

以下に、試料作製手順、試験方法について説明する。

(3) 試料作製手順

試料作製手順を以下に示す。

- ⑤ 第3章の塩化物イオン浸透試験の供試体作製手順③にて整形した 4×4×12cm の供試体から 1cm 角程度のサイコロ状の試料を切り出す。
- ⑥ 切り出した試料を蓋つきのビーカーに入れてアセトンを加えて 24 時間静置し、試料中の水分をアセトンで置換する。
- ⑦ 24 時間経過後、アセトンを捨て、105℃の炉乾燥器にてアセトンの臭いがなくなるまで乾燥する。
- ⑧ 乾燥後の試料は試料の吸湿を防止するため、そのまま炉乾燥器内にて保管し、適宜、水蒸気吸脱着試験に用いる。

(2) 試験手順

まず、本試験では試料が 105℃の炉乾燥により絶乾状態としたものを RH=0%，真空脱気処理により飽和状態としたものを RH=100%と定義する。そして試験は、絶乾状態および飽和状態の試料を用いて、異なる濃度の水酸化ナトリウム水溶液により調湿した 20℃環境下のデシケーター内にて、試料を質量が恒量になるまで静置し水蒸気吸脱着量を得た。なお、恒量と判断する基準は、試料の質量差が前日の 0.1%となった時とした。調湿に用いた水酸化ナトリウム水溶液の濃度と湿度の関係を表 4.2-3 に示す。湿度を調整したデシケーター内には、試料とともに温湿度センサー（(株) T&D おんどとり TR-72wf：精度 RH±5%）を入れ、湿度の管理を行った。試料質量測定時の湿度は、センサーの測定値と表 4.2-3 に示す理論相対湿度とほぼ同程度となっていることを確認した。

表 4.2-3 水酸化ナトリウム水溶液の濃度と相対湿度の関係

相対湿度 RH	水 1000g に対する NaOH の無水物のモル数
10%	23.05 mol
18%	16.67 mol
30%	13.63 mol
65%	7.83 mol
75%	5.71 mol
85%	3.84 mol

(3) 試験結果

水蒸気吸脱着試験により得られた各ケースの水蒸気吸脱着等温線を図 4.2-6 に示す。また、同図中には、Brunauer⁴⁾らの BSB モデル (式 4.2-11) を用いた、各配合の水蒸気吸脱着等温線の近似線を併せて示しており、表 4.2-4 には BSB モデルによる近似パラメーターを示した。いずれのケースにおいても、吸湿過程 (吸着曲線) と乾燥過程 (脱着曲線) の経路が一致しないヒステリシス現象が確認され、相対湿度 0~60%程度まで、水分の吸着量は少なく、相対湿度 60%以上で水分の吸着量が飛躍的に増加している傾向が確認された。また、BSB モデルによる近似曲線も各配合の水蒸気吸脱着曲線を精度よく近似していることが確認された。

$$W = \frac{ksW_m H}{(1 - kH)[1 + (s - 1)kH]} \quad \text{式 4.2-11}$$

ここで、 W : 水分吸着量 (g/g), W_m : 単分子層吸着量 (g/g), H : 相対湿度, k , s : 実験係数である。

表 4.2-4 BSB モデルの近似パラメーター

	吸湿過程			乾燥過程		
	W_m	k	s	W_m	k	s
OPC40	0.0061	0.91	15.15	0.011	0.84	15.25
OPC50	0.0079	0.89	15.24	0.015	0.79	15.22
OPC60	0.0105	0.86	15.12	0.015	0.81	15.32
BB50	0.0088	0.90	12.92	0.025	0.71	13.03
FB50	0.0054	0.95	119.32	0.011	0.89	119.46

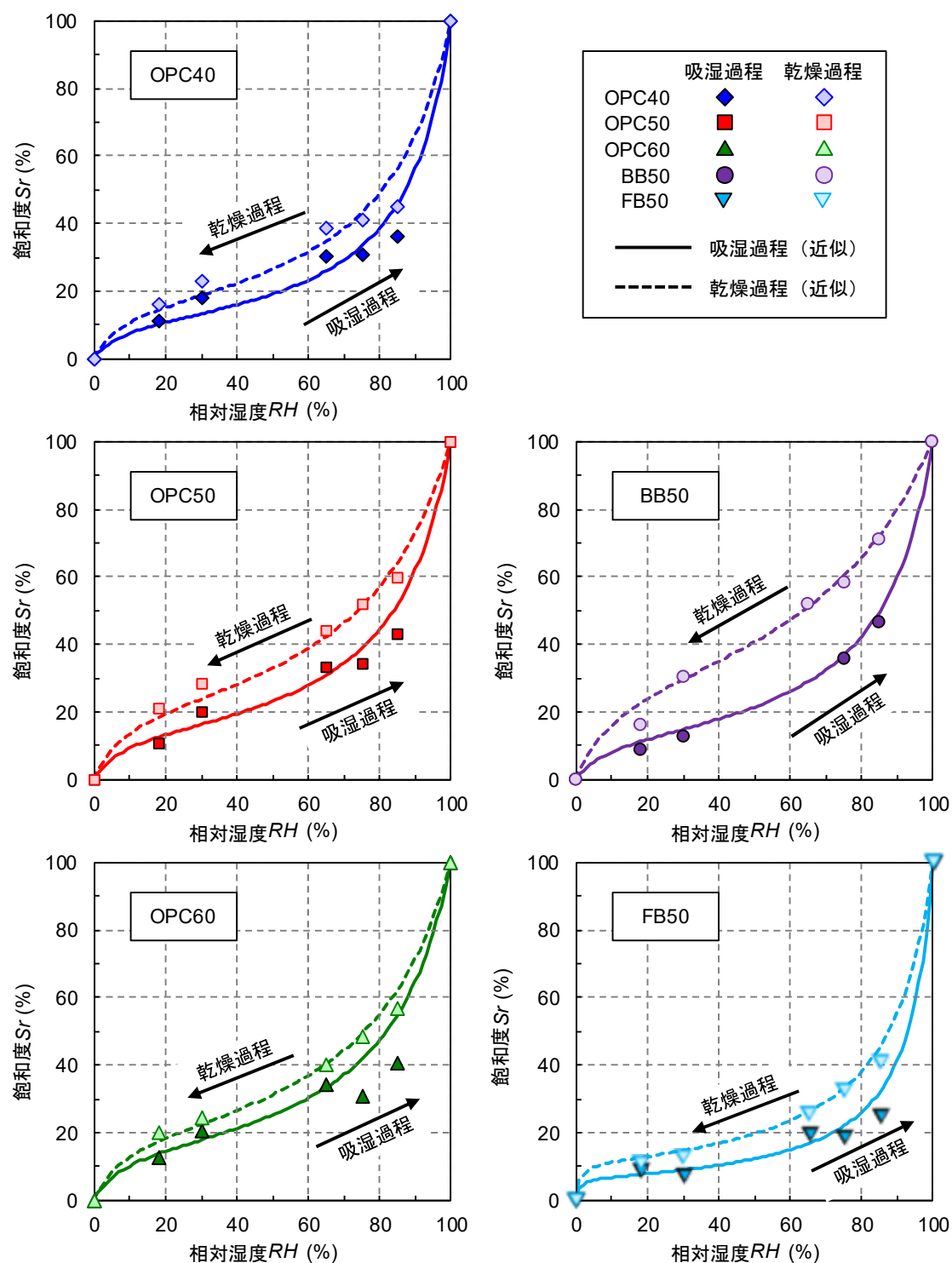


図 4.2-6 各配合の水蒸気吸脱着等温線

次に、水蒸気吸脱着等温線と空隙構造の関連性を検討する。

まず、単分子層吸着量を表す W_m と連続空隙および空隙屈曲度を考慮した空隙構造係数との相関性を図 4.2-7、式 4.2-12 および式 4.2-13 に示す。吸湿過程、乾燥過程ともに、空隙構造係数の低下に伴って単分子層吸着量が減少する傾向が確認でき、つまり空隙構造が緻密になるほど空隙表面積は減少し、単分子層吸着量も減少すると考えられる。ただし、BB50 に着目するとその限りではなく、傾向から大きく外れていることが確認された。そのため、分子層吸着量に及ぼす影響として、空隙構造以外にも、材料に起因した空隙表面の電氣的性質つまり電気二重層の影響も考えられた。

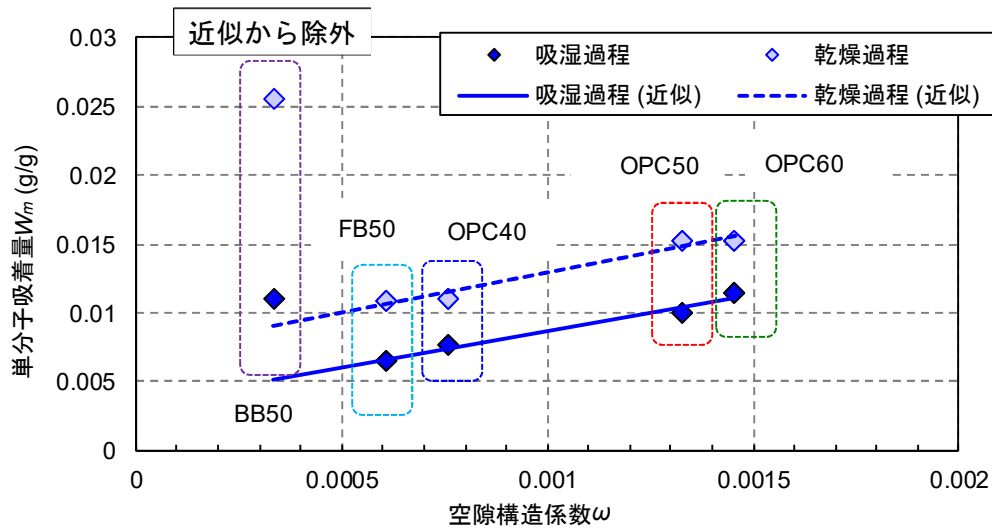


図 4.2-7 単分子吸着量 W_m と空隙構造係数 ω との関係

$$\text{吸湿過程} : W_m = 5.32\omega + 0.0034 \quad \text{式 4.2-12}$$

$$\text{乾燥過程} : W_m = 5.81\omega + 0.0071 \quad \text{式 4.2-13}$$

ここで、 W_m : 単分子層吸着量 (g/g), ω : 空隙構造係数である。

また、実験係数 k についても単分子層吸着量と同様に、空隙構造係数との相関性を検討した。図 4.2-8、式 4.2-14 および式 4.2-15 に示すように、実験係数 k と空隙構造係数との間には概ね相関性が認められる一方で、BB50 に関しては傾向から外れており、単分子層吸着量と同じく、空隙表面からの電氣的性質の影響が考えられた。

そして、実験係数 s については、表 4.2-4 から吸湿過程や乾燥過程にかかわらず、セメント種類によりその値が定まっているため、セメント種類ごとに実験係数 s の平均をとり、セメント種類により与えられる特性値 s として表 4.2-5 に示した。

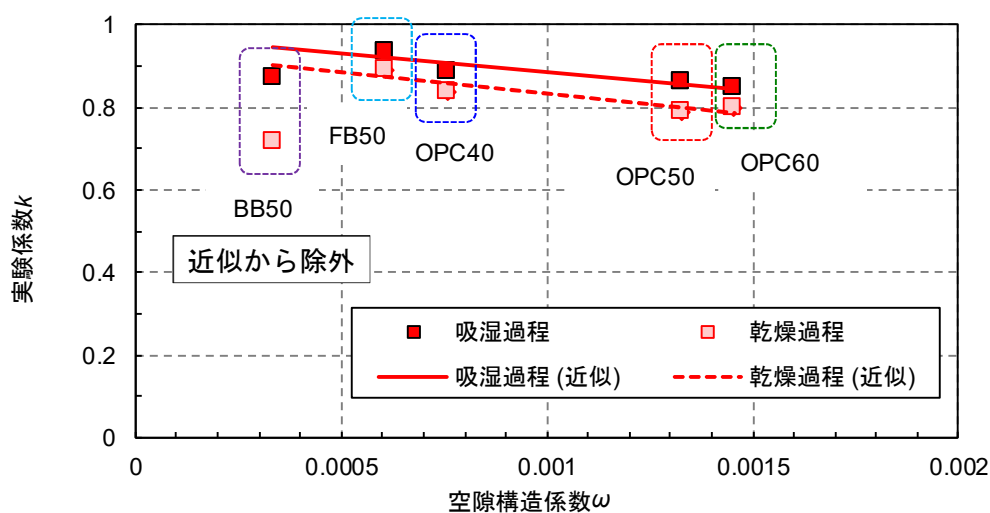


図 4.2-8 実験係数 k と空隙構造係数 ω との関係

$$\text{吸湿過程} : k = -88.34\omega + 0.97 \quad \text{式 4.2-14}$$

$$\text{乾燥過程} : k = -102.22\omega + 0.94 \quad \text{式 4.2-15}$$

ここで、 k ：実験係数， ω ：空隙構造係数である。

表 4.2-5 セメント種類の特性値 s

普通ポルトランドセメント	高炉セメント B 種	フライアッシュセメント B 種
15.22	12.98	119.39

ここまで、実験的に得られた水蒸気吸脱着等温線を BSB モデル式に近似し、さらに近似パラメーターを空隙構造やセメント種類の影響で関連付けることができた。

次に、BSB モデル式を用いて水蒸気拡散係数を導出する。まず、式 4.3-7 でも示したように、水蒸気拡散係数の算出には蒸気吸脱着等温線の傾きが必要となる。水蒸気拡散係数の傾きは、BSB モデル式を相対湿度 H に関して微分することで式 4.2-16 が得られる。

$$\frac{\partial W}{\partial H} = \frac{ksW_m + Wk[1 + (s-1)kH] - Wk(1-kH)(s-1)}{(1-kH)[1 + (s-1)kH]} \quad \text{式 4.2-16}$$

ここで、 W ：水分吸着量 (g/g)、 W_m ：単分子層吸着量 (g/g)、 H ：相対湿度、 k 、 s ：実験係数である。

そして、以上の式 4.2-9～式 4.2-16 を用いた、各配合の水蒸気拡散係数の算出結果を図 4.2-9 に示す。なお、本検討では、透湿率 c は検討していないため、既往の文献⁵⁾を参考に $6.02 \times 10^{-3} \text{ g/(cm} \cdot \text{day} \cdot \text{RH)}$ と定めた。吸湿過程・乾燥過程ともに飽和度に応じて水蒸気拡散係数が変化していることが確認できる。また、水蒸気拡散係数のピーク値は配合により異なるが、少なくとも飽和度 40%以下で確認され、第3章で述べたように飽和度 40%以下では水蒸気拡散が卓越する傾向とも一致している。

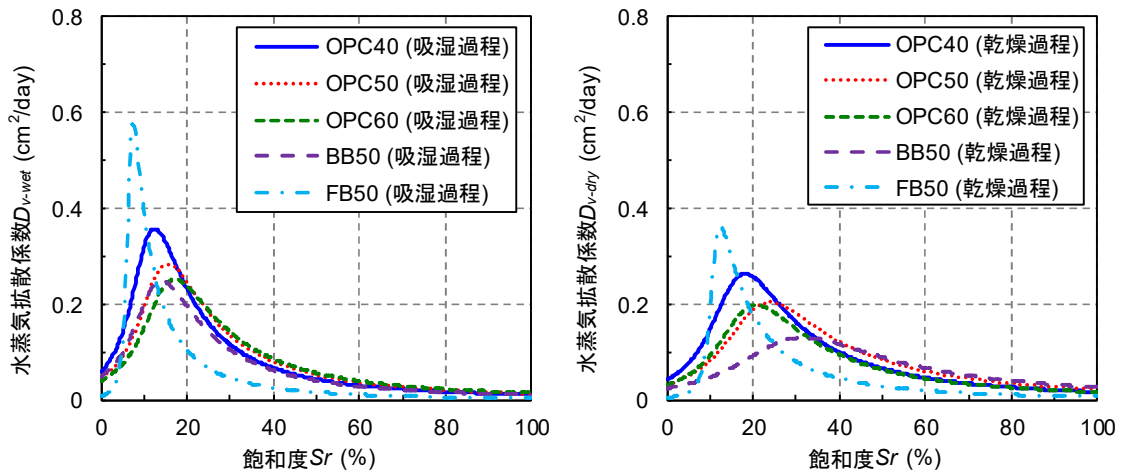


図 4.2-9 吸湿・乾燥過程における飽和度と水蒸気拡散係数の関係

以上のことから、水分移動解析に必要な各種解析パラメーターを決定することができた。

次節では、この水分移動モデルを基に、吸水現象に伴う塩化物イオン浸透モデルについて検討する。

4.3 吸水現象に伴う塩化物イオンの浸透モデル

まず、第3章の実験の結果から、吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物イオンの浸透特性として、以下の6つの特徴が示された。

① 塩化物イオンの浸透駆動力

吸水現象を受ける場合の塩化物イオンの浸透は、濃度拡散のみならず、液状水の移動に伴う移流現象が確認された。

② 塩化物イオンの移流現象

吸水現象による液状水の移動の過程では、液状水は環境の塩水濃度を保ったまま空隙中を移動していることが確認された。

③ 水蒸気拡散の影響

液状水の移動は飽和度 40%～100%までが卓越しており、それ以下では水蒸気拡散が他卓越し、この水蒸気拡散の領域では、塩化物イオンは移動しないことが確認された。

④ 塩化物イオンの濃縮現象－疑似吸着現象－

試験日数の経過とともに、浸透面近傍の全塩化物イオン量が増加する傾向が確認された。これは、疑似吸着の影響により、正に帯電した空隙壁面の正電荷に、浸せき溶液である塩水中の塩化物イオンが引き寄せられたことで、浸透面付近での全塩化物イオン量が増加し、そこから濃度拡散したと考えられた。

⑤ 塩化物イオンの濃縮現象－液状水の移動と水蒸気拡散の境界部－

OPC40 や FB50 などでは、供試体内部の飽和度 40%の高さで全塩化物イオン量分布のピークが現れる現象が確認され、これは飽和度 40%を境界として液状水の先端から水蒸気拡散が進むことで、水蒸気拡散で移動することのできない塩化物イオンは取り残され、さらに浸透面からの液状水の移動に伴う塩化物イオンの浸透の影響も加わり、塩化物イオンが濃縮したと考えられた。

⑥ 塩化物イオンの濃縮現象－背面条件の影響－

背面条件の影響として、背面開放の OPC50 と OPC60 では、開放部で塩化物イオン量が増加することを確認し、背面部からの水蒸気拡散による乾燥と供試体内部からの液状水の移動の影響で濃縮したと考えられた。

4.3.1 吸水現象に伴う塩化物イオン浸透モデル

吸水に伴う塩化物イオンの浸透モデルの支配方程式は式 4.3-1 および式 4.3-2 に示す移流拡散方程式とした。特に移流項は、水分移動量（飽和度）と塩化物イオン量に比例関係が確認されていたことから、既往の研究を参考に⁹⁾水分移動モデルにおける移流流束に換算係数を掛けることで定義した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ap} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_{cap} \cdot \frac{\partial Sr}{\partial x} \cdot C' \quad \text{式 4.3-1}$$

$$C' = \frac{1}{100} \times \frac{\theta_{sat}}{100} \times \frac{C_{NaCl}}{100} \times \frac{35.5}{58.5} \times \gamma_{SP} \quad \text{式 4.3-2}$$

ここで、 C ：コンクリート中の塩化物イオン濃度（%）， v_{cap} ：液状水の移動速度（cm/day）， D_{ap} ：塩化物イオンの見かけの拡散係数（cm²/day）， t ：時刻（day）， x ：距離（cm）， C' ：飽和度から塩化物イオン量への換算係数（kg/m³%）， θ_{sat} ：飽和状態における含水率（%）， C_{NaCl} ：塩水濃度（%）， γ_{SP} ：コンクリート・モルタルの絶乾状態における単位体積質量（kg/m³）である。

4.3.2 解析パラメーターの決定

4.3.2.1 見かけの拡散係数

まず、見かけの拡散係数について検討する。第3章の疑似飽和状態の供試体を用いた試験の結果から、見かけの拡散係数は試験開始直後から急速に減少し、時間の経過に伴って一定値に収束する時間依存性が示された。一方で、水銀圧入試験の結果から、見かけの拡散係数は連続空隙量との相関性も併せて確認された。

そこで、見かけの拡散係数を時刻と空隙構造を説明変数として定式化する。まず、見かけの拡散係数の時間依存性について、式 4.3-3 および式 4.2-2 を基本形として配合ごとで近似式を求め、表 4.3-6 に示す実験係数 a 、 b 、 c が得られた。なお、開放条件の影響は確認されなかったため、背面開放と背面封鎖の結果を併せた近似式となっている。図 4.3-1 に見かけの拡散係数の経時変化の実測値と近似式との比較を示す。見かけの拡散係数の試験開始直後からの急激な低下や時間の経過に伴って値が一定値に収束する傾向がよく表現されていることが確認できた。

$$\text{Log}_{10} D_{ap} = a \exp(-bt) - c \quad \text{式 4.3-3}$$

ここで、 D_{ap} ：見かけの拡散係数（cm²/day）， t ：時刻(day)， a 、 b 、 c ：実験係数である。

表 4.3-6 見かけの拡散係数に関する実験定数

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
OPC40	1.622	0.096	2.37
OPC50	1.284	0.089	2.08
OPC60	1.370	0.158	1.75
BB50	1.745	0.030	2.99
FB50	1.642	0.048	2.63

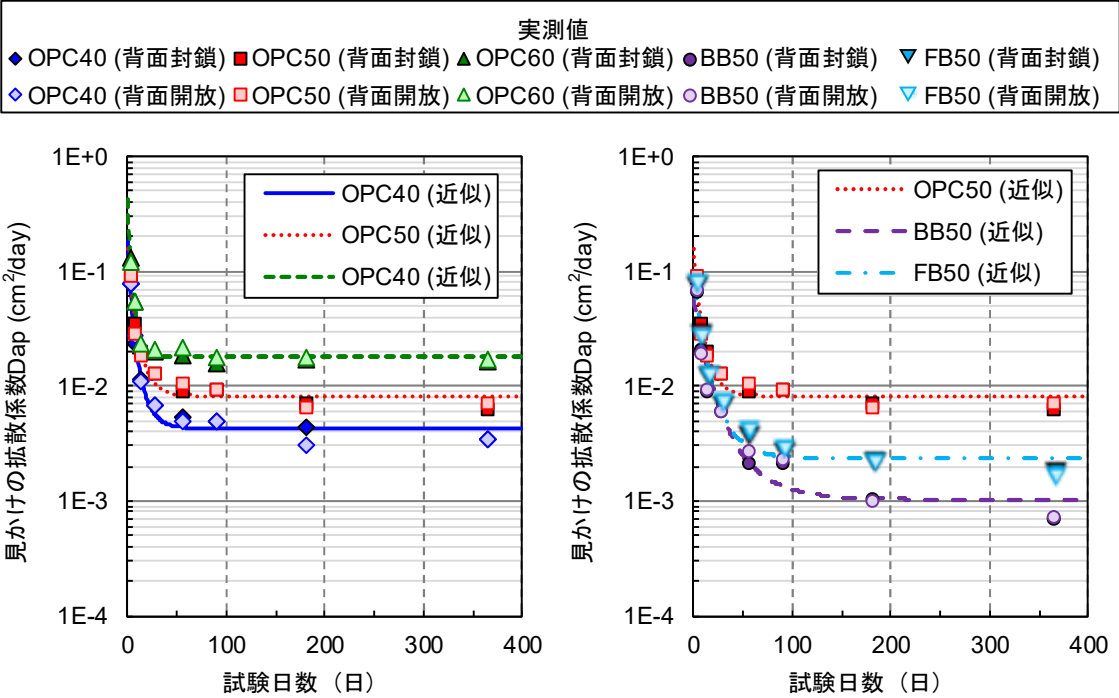


図 4.3-1 見かけの拡散係数の実測値と近似値との比較

次に、見かけの拡散係数と空隙構造を関連付けるために、見かけの拡散係数に関する実験係数 a , b , c と空隙構造係数との相関性を図 4.3-2 に示す。いずれの実験係数においても、空隙構造係数との直線的な相関性が示されており、各実験係数は式 4.3-4～式 4.3-6 により定式化した。

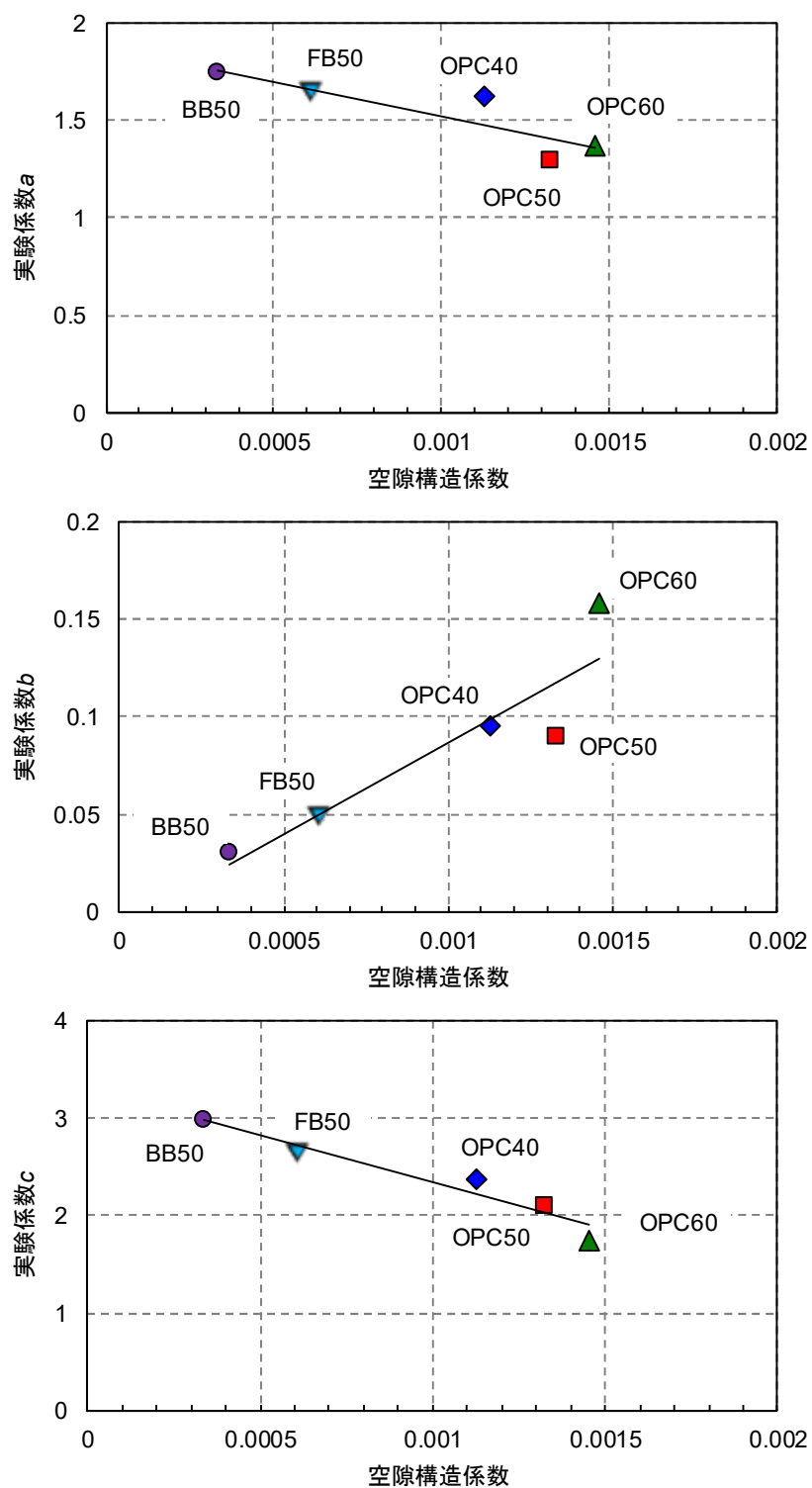


図 4.3-2 実験係数 a , b , c と空隙構造係数との関係

$$a = -3.6 \times 10^2 \cdot \omega + 1.9 \quad \text{式 4.3-4}$$

$$b = 93.81 \cdot \omega + 0.0068 \quad \text{式 4.3-5}$$

$$c = -9.6 \times 10^2 \cdot \omega + 3.3 \quad \text{式 4.3-6}$$

ここで, a , b , c : 実験係数, ω : 空隙構造係数である.

4.3.2.2 表面塩化物イオン量

次に, 表面塩化物イオン量について検討する. 表面塩化物イオン量が経時的に増加し一定値に収束する傾向は, の絶乾状態から試験を実施した際の結果でも述べた通りであり, その原因は, 塩化物イオンの固定化や疑似吸着が挙げられている. これらの影響をモデル化するためには, 可溶性塩化物イオン量や自由塩化物イオン量の結果を基に, 塩化物イオンの固定化反応の流束や疑似吸着の流束を決定する必要があるが, 本検討では可溶性塩化物イオン量や自由塩化物イオン量の計測を行っていない. そのため, 塩化物イオンの固定化や疑似吸着の影響は, 表面塩化物イオン量の時間依存式として式 4.3-7 および式 4.3-8 で定式化した. 図 4.3-3 に見かけの拡散係数の実測値と近似値との比較, および各配合の実験係数 F , G も併せて示している. 近似値は表面塩化物イオン量の試験開始直後からの増加及び時間の経過に伴って収束する傾向を再現できている.

そこで, 実験係数 F , G と空隙構造係数との関係を図 4.3-4 に示す. 実験係数 F , G ともに, 空隙構造係数との間に直線的な相関性を有しており, これを式 4.3-9 および式 4.3-10 として定式化した. ただし, 本来, 塩化物イオンの固定化や疑似吸着は空隙構造のみで決定すべきではなく, 固定化では使用材料の化学成分や, 疑似吸着では水蒸気拡散係数でも述べた電氣的性質が要因となる. そのため, より汎用的な表面塩化物イオンの決定手法の構築のためにも, これらの影響を十分に把握することが今後の課題である.

$$C_0 = C_{0ini} + F[1 - \exp(-Gt)] \quad \text{式 4.3-7}$$

$$C_{0ini} = \frac{\theta_{sat}}{100} \times \frac{C_{NaCl}}{100} \times \frac{35.5}{58.5} \times \gamma_{SP} \quad \text{式 4.3-8}$$

ここで, C_0 : 表面塩化物イオン量 (kg/m^3), C_{0ini} : 塩水濃度の表面塩化物イオン量への換算値 (kg/m^3), F , G : 実験係数, t : 時刻 (day), θ_{sat} : 飽和状態における含水率 (%), C_{NaCl} : 塩水濃度 (%), γ_{SP} : 供試体の絶乾単位体積質量 (kg/m^3)である.

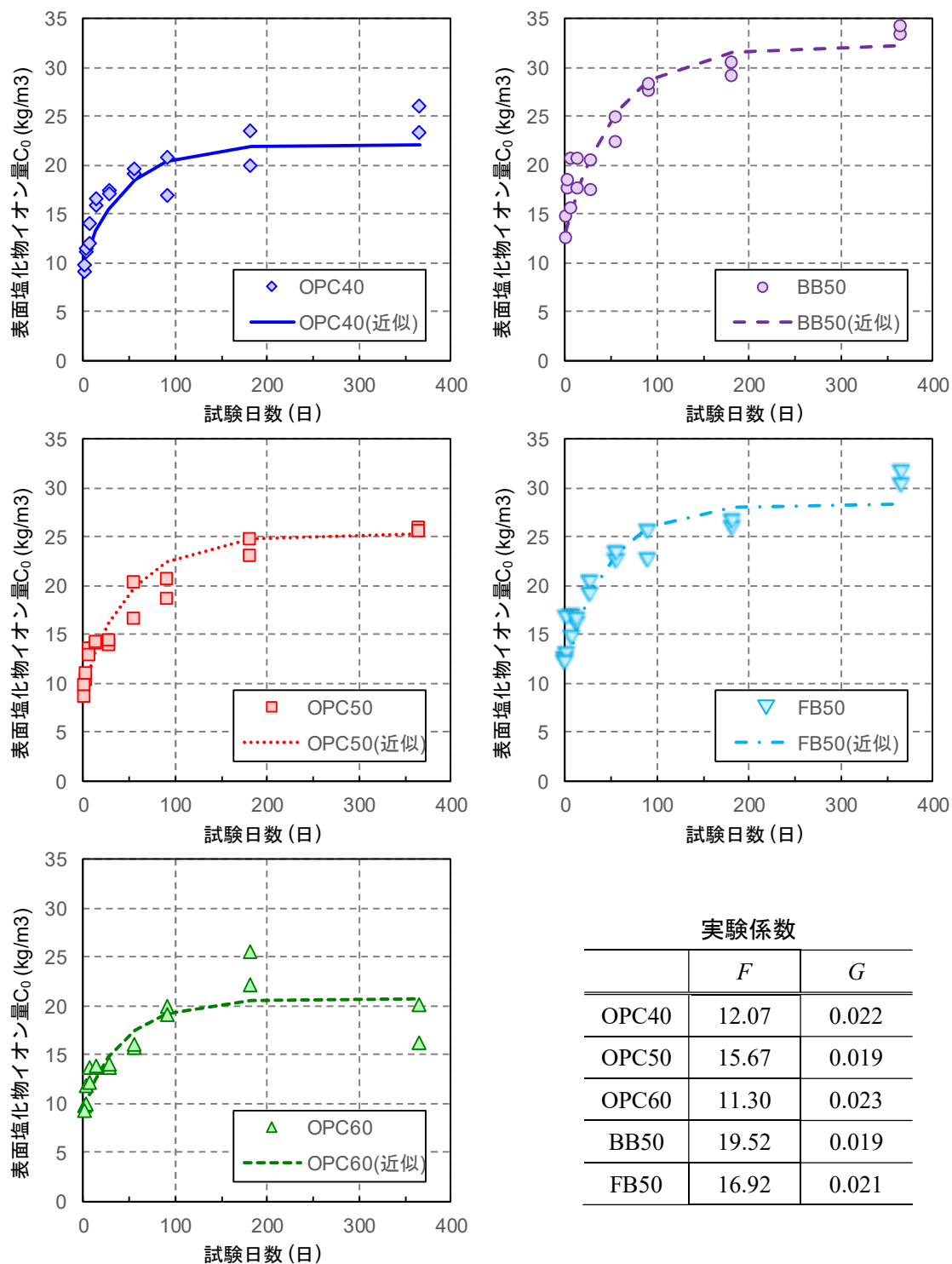


図 4.3-3 表面塩化物イオン量の実測値と近似値との比較

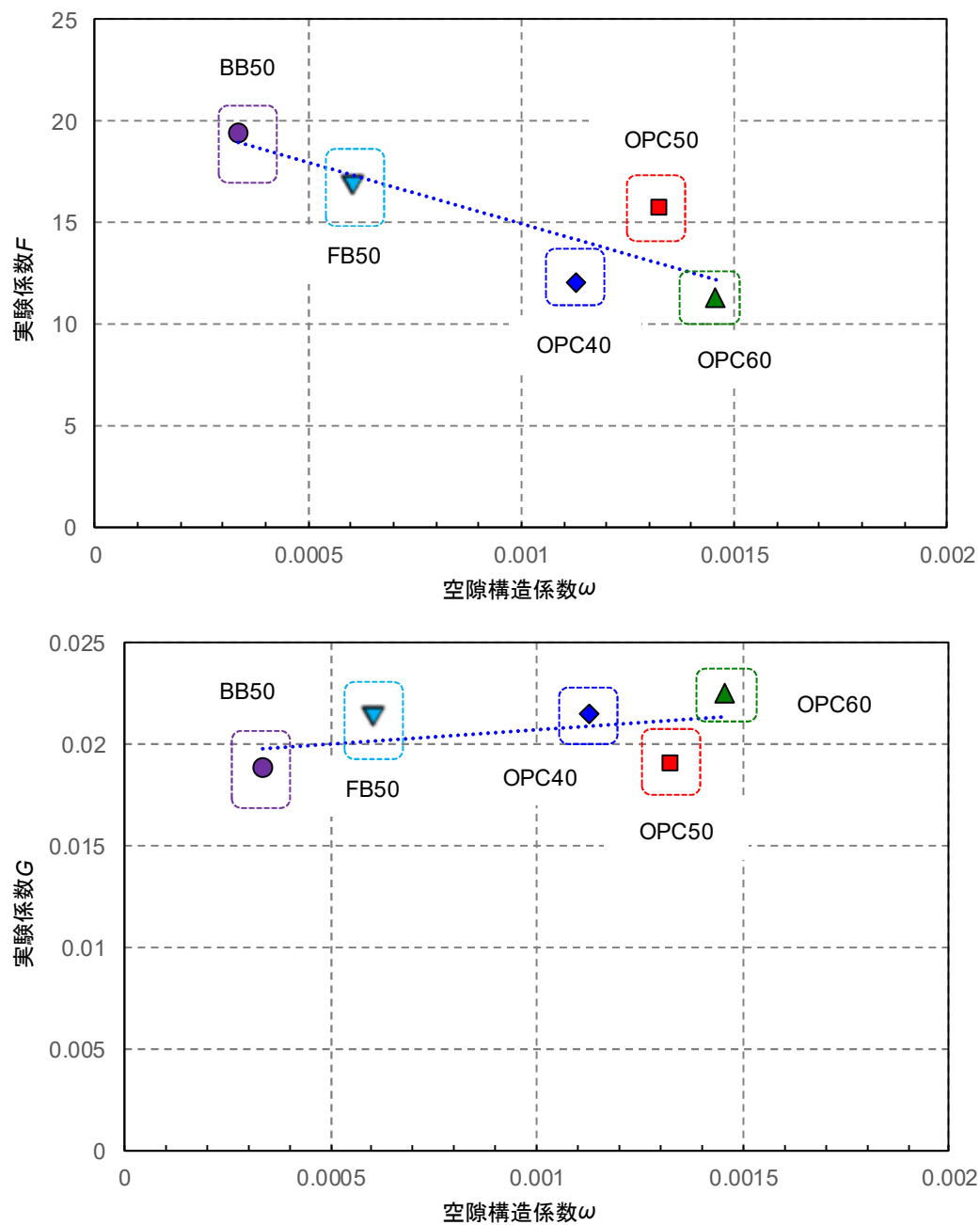


図 4.3-4 実験係数 F , G と空隙構造係数の関係

$$F = -6.0 \times 10^3 \cdot \omega + 21.0 \quad \text{式 4.3-9}$$

$$G = 1.4 \cdot \omega + 0.020 \quad \text{式 4.3-10}$$

ここで、 F , G : 実験係数, ω : 空隙構造係数である。

4.4 数値解析によるモデルの適用性の検証

ここまで、水分移動モデルおよび吸水に伴う塩化物イオンの浸透モデルを提案し、数値解析に必要な各種パラメーターの定式化を行い、空隙構造の影響として関連付けることができた。本節では、水分移動モデルおよび塩化物イオンの浸透モデルの妥当性を検証するために、第3章の絶乾状態からの塩化物イオン浸透試験について数値解析を実施した。

4.4.1 解析条件

数値解析には、表 4.4-7 に示す材料物性値と表 4.4-8 に示す環境条件を解析の入力値として与えて、液状水の移動速度、水蒸気拡散係数、見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量は 4.2.2 項と 4.3.2 項で定式化した式 4.4-1～式 4.4-20 にから与えた。なお、水分移動解析において、背面部に与える飽和度 $Sr_{H=90\%}$ とは、式 4.2-11 の吸湿曲線に相対湿度 90% を与えたときに得られる飽和度を意味する。

表 4.4-7 材料物性値

	OPC40	OPC50	OPC60	BB50	FB50
連続空隙量 V_{cnt} (mL/g)	0.0238	0.0281	0.030	0.0213	0.0256
空隙屈曲度 τ	15.22			8	6.5
セメント種類の特性値 s	4.6			12.98	119.39

表 4.4-8 環境条件

		OPC40	OPC50	OPC60	BB50	FB50
初期 条件	水分移動解析	初期飽和度分布：0 %				
	塩分浸透解析	初期塩分分布：0kg/m ³				
境界 条件	水分移動解析	浸透面： $Sr=100\%$ 背面：背面封鎖の場合 $Sr=0\%$ ，背面開放の場合 $Sr_{H=90\%}$				
	塩分浸透解析	浸透面： $C_{NaCl}=10\%$ 背面：0kg/m ³				

● 液状水の移動速度

$$\text{液状水の移動速度： } v_{cap} = \alpha\beta \cdot \exp(-\beta \cdot t) \quad \text{式 4.4-1}$$

$$\text{背面封鎖： } \alpha = 9.77 \times 10^3 \cdot \omega - 1.57 \quad \text{式 4.4-2}$$

$$\text{背面開放： } \alpha = 11.09 \times 10^3 \cdot \omega - 1.99 \quad \text{式 4.4-3}$$

$$\text{背面封鎖\&背面開放： } \beta = -3.43 \times 10^2 \cdot \omega + 0.53 \quad \text{式 4.4-4}$$

ここで、 α , β : 実験係数, ω : 空隙構造係数, t : 時刻 (day), v_{cap} : 液状水の移動速度 (cm/day) である。

● 水蒸気拡散係数

$$D_v = c \cdot \lambda \quad \text{式 4.4-5}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\partial W}{\partial H} \quad \text{式 4.4-6}$$

ここで、 H : 空隙中の相対湿度, W : 空隙中の水分量 (g/g), D_v : 水蒸気拡散係数, $1/\lambda$: 湿気容量 (吸脱着等温線の傾き), c : 透湿率 (g/(cm · day · RH)) である。

$$W = \frac{ksW_m H}{(1 - kH)[1 + (s - 1)kH]} \quad \text{式 4.4-7}$$

ここで、 W : 水分吸着量 (g/g), W_m : 単分子層吸着量 (g/g), H : 相対湿度, k , s : 実験係数である。

$$\frac{\partial W}{\partial H} = \frac{ksW_m + Wk[1 + (s - 1)kH] - Wk(1 - kH)(s - 1)}{(1 - kH)[1 + (s - 1)kH]} \quad \text{式 4.4-8}$$

ここで、 W : 水分吸着量 (g/g), W_m : 単分子層吸着量 (g/g), H : 相対湿度, k , s : 実験係数である。

$$\text{吸湿過程： } W_m = 5.32\omega + 0.0034 \quad \text{式 4.4-9}$$

$$\text{乾燥過程： } W_m = 5.81\omega + 0.0071 \quad \text{式 4.4-10}$$

ここで、 W_m : 単分子層吸着量 (g/g), ω : 空隙構造係数である。

$$\text{吸湿過程： } k = -88.34\omega + 0.97 \quad \text{式 4.4-11}$$

$$\text{乾燥過程： } k = -102.22\omega + 0.94 \quad \text{式 4.4-12}$$

ここで、 k ：実験係数、 ω ：空隙構造係数である。

● 見かけの拡散係数

$$\text{Log}_{10} D_{ap} = a \exp(-bt) - c \quad \text{式 4.4-13}$$

ここで、 D_{ap} ：見かけの拡散係数 (cm²/day), t ：時刻(day), a , b , c ：実験係数である。

$$a = -3.6 \times 10^2 \cdot \omega + 1.9 \quad \text{式 4.4-14}$$

$$b = 93.81 \cdot \omega + 0.0068 \quad \text{式 4.4-15}$$

$$c = -9.6 \times 10^2 \cdot \omega + 3.3 \quad \text{式 4.4-16}$$

ここで、 a , b , c ：実験係数、 ω ：空隙構造係数である。

● 表面塩化物イオン量

$$C_0 = C_{0ini} + F[1 - \exp(-Gt)] \quad \text{式 4.4-17}$$

$$C_{0ini} = \frac{\theta_{sat}}{100} \times \frac{C_{NaCl}}{100} \times \frac{35.5}{58.5} \times \gamma_{SP} \quad \text{式 4.4-18}$$

ここで、 C_0 ：表面塩化物イオン量(kg/m³), C_{0ini} ：塩水濃度の表面塩化物イオン量への換算値 (kg/m³), F , G ：実験係数, t ：時刻(day), θ_{sat} ：飽和状態における含水率, C_{NaCl} ：塩水濃度 (%), γ_{SP} ：供試体の絶乾単位体積質量 (kg/m³)である。

$$F = -6.0 \times 10^3 \cdot \omega + 21.0 \quad \text{式 4.4-19}$$

$$G = 1.4 \cdot \omega + 0.020 \quad \text{式 4.4-20}$$

ここで、 F , G ：実験係数、 ω ：空隙構造係数である。

4.4.2 解析結果

(1) 水分移動解析結果

水分移動解析の結果を開放条件ごとに図 4.4-1 および図 4.4-2 にそれぞれ示す。背面条件にかかわらず、いずれの配合においても、吸水現象による液状水の移動（移流）と水蒸気拡散（拡散）の影響が再現されていることが確認できる。また、OPC40 や BB50, FB50 で確認された液状水の移動の停止現象や、OPC50 や OPC60 の背面開放では背面部からの吸湿現象も再現できており、それぞれ実測値ともよく一致している。

しかし、水分の移動位置の観点から試験 1～7 日の初期段階に着目すると、水分の移動位置は実測値と解析値で誤差が大きくなる傾向が示されている。これは、試験初期は特に液状水の移動速度が大きい時期であるため、式 4.2-8 として与えた液状水の移動速度のモデル精度の影響が、液状水の移動位置の誤差として強く表れたと考えられる。

さらに、飽和度の観点では、いずれのケースにおいても、解析値では浸透面から順次飽和度 100% になりながら内部に移動する傾向を示しており、実測値の浸透面からある一定の勾配を有して水分が移動する傾向と比べて、飽和度を過大に評価していることが確認できる。これは、第3章でも述べたように、実現象では吸水に際して全ての空隙を介して水分が移動するのではなく、空隙中に空気を取り残されるために、それが間隙空気圧として作用して水分移動を抑制することが示唆されている。

そこで、間隙空気圧の影響について、水分移動解析の際に、吸水に伴う供試体内部の飽和度上昇の上限値である飽和限界線を設けることでその再現を試みた。ここで、飽和限界線の概念について説明する。図 4.4-3 に示すように、飽和度 40%～100% までの液状水の移動が主体的な領域では、飽和度分布は試験日数に関わらず一定勾配の直線が示されており、飽和度がこの直線を超えない傾向が実験結果より示されている。そこで、この直線を飽和限界線と定義して、飽和限界線の式は浸透面の飽和度 100% から飽和度 40% 位置までの傾きから式 4.4-21、式 4.4-22 として与えた。

飽和限界線を導入して、再度水分移動解析結果を行った結果を図 4.4-4 に示す。いずれの配合においても、飽和限界線として間隙空気圧の影響を考慮することで、水分移動解析結果は、より実測値に近い分布を示していることが確認された。ただし、この飽和限界線は飽和度分布から経験式として与えたものに過ぎず、この直線を理論的に与えるためには、間隙空気圧や空隙構造の影響に着目して検討する必要がある。

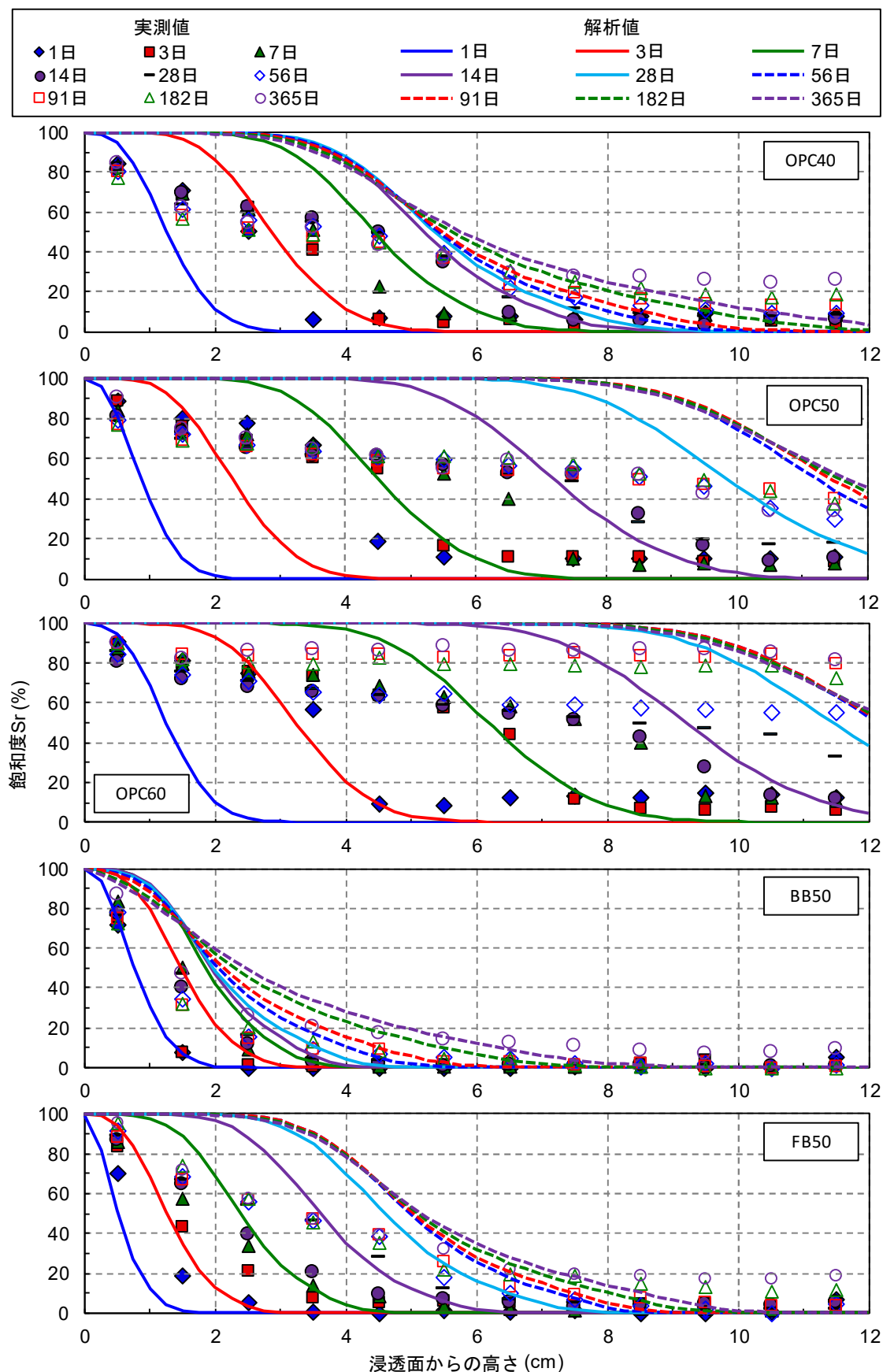


図 4.4-1 水分移動解析結果（背面封鎖）-間隙空気圧の影響なし-

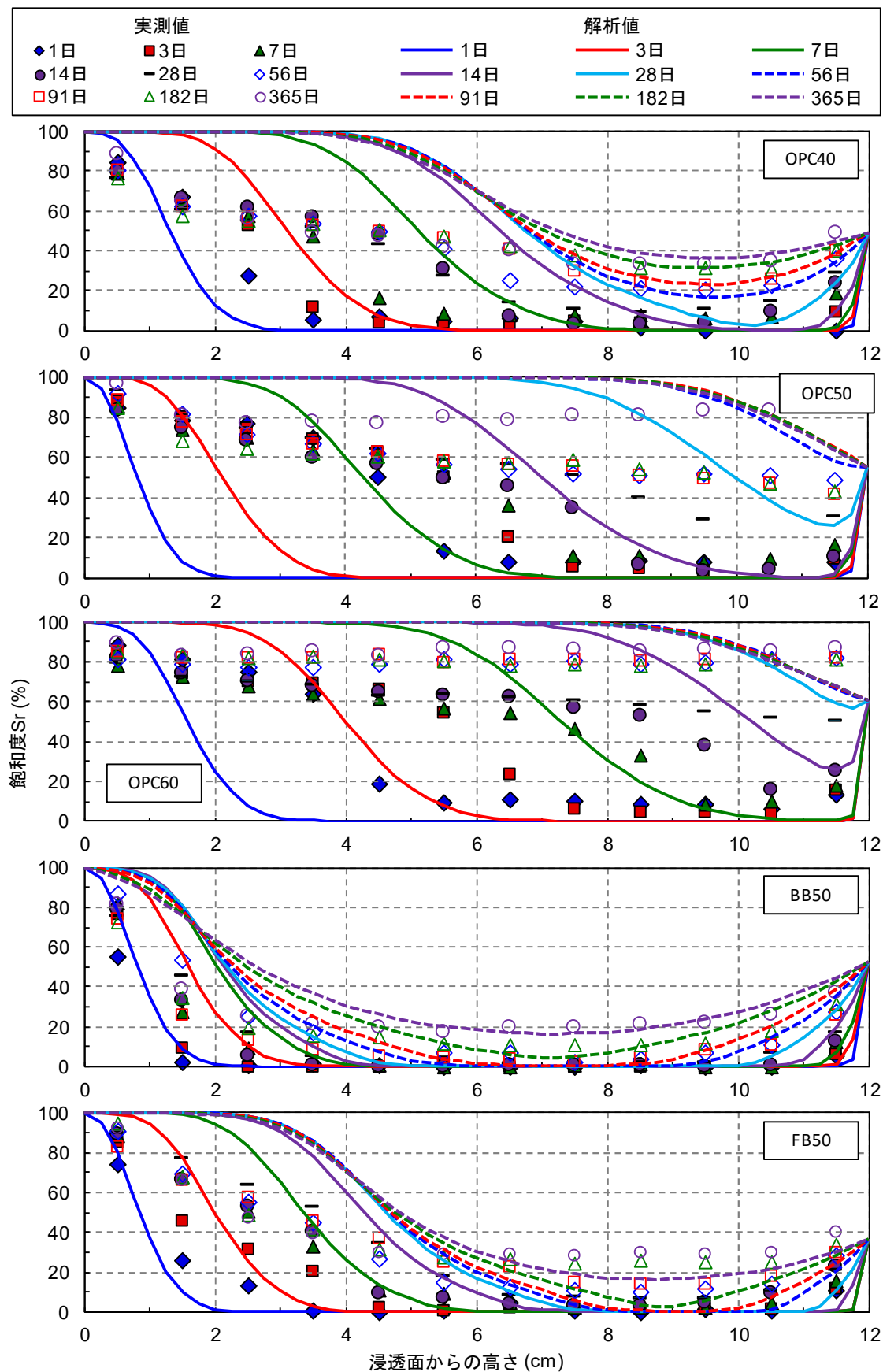


図 4.4-2 水分移動解析結果（背面開放）-間隙空気圧の影響なし-

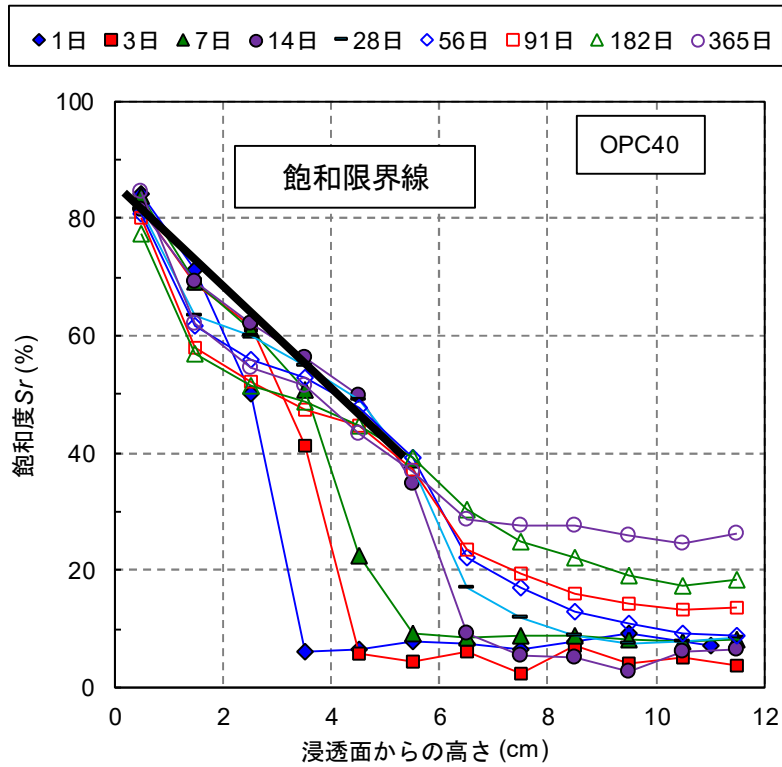


図 4.4-3 飽和限界線の概念

$$\text{飽和限界線: } Sr_{Lim} = -\frac{60}{X_{cap(t=365days)}}x + 100 \quad \text{式 4.4-21}$$

$$X_{cap(t=365days)} = \alpha[1 - \exp(-365\beta)] \quad \text{式 4.4-22}$$

$$\text{飽和限界線の適用範囲: } 0 \leq x \leq X_{cap(t=365days)}$$

ここで、 Sr_{Lim} : 飽和限界飽和度 (%), x : 浸透面からの高さ (cm), $X_{cap(t=365days)}$: 試験 365 日目の液状水の移動高さ (cm), α , β : 実験係数である。

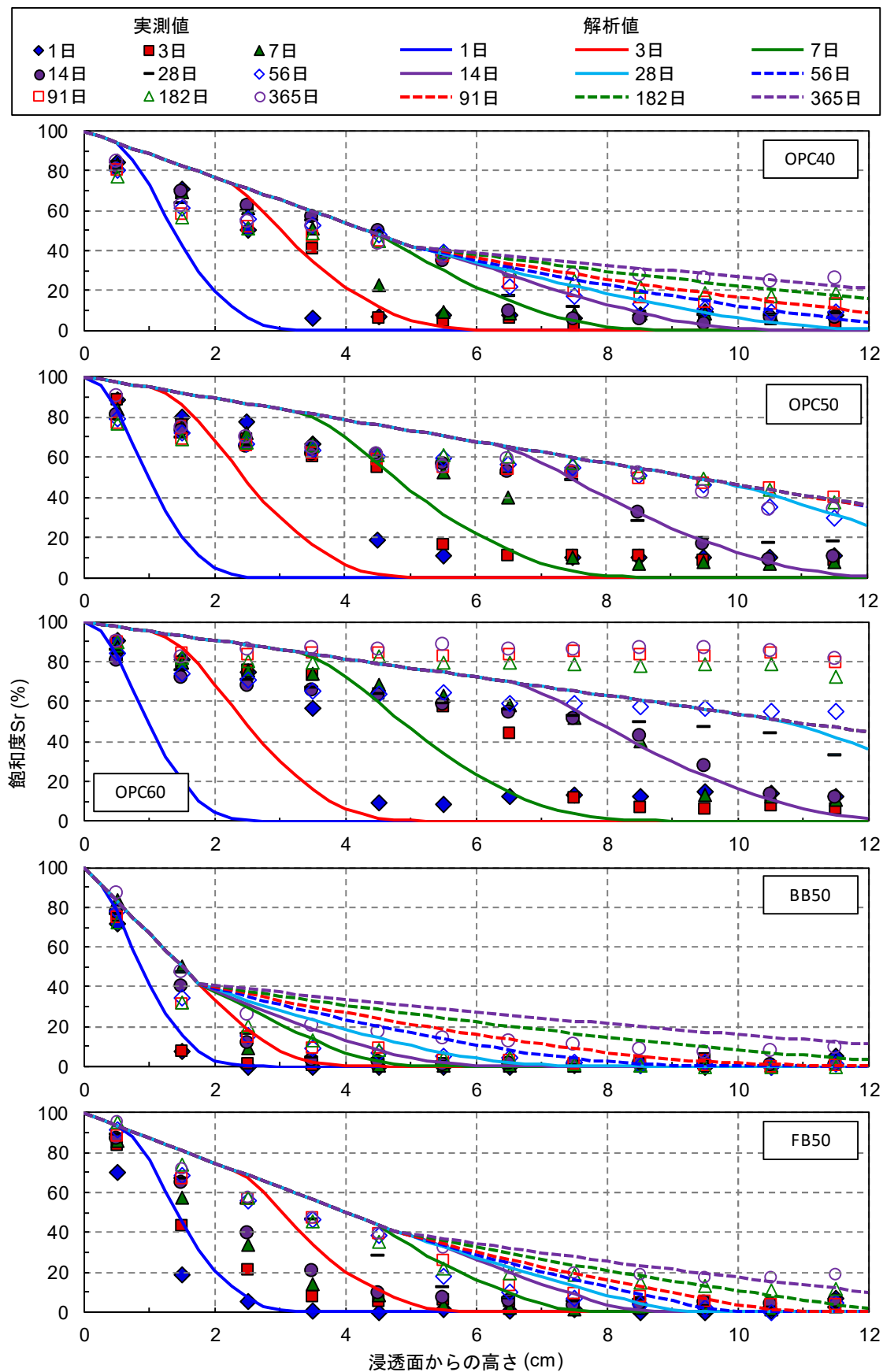


図 4.4-4 水分移動解析結果（背面封鎖）-間隙空気圧の影響あり-

(2) 塩化物イオン浸透解析結果

次に、間隙空気圧の影響を考慮しない場合の塩化物イオン浸透解析の結果を開放条件ごとに図 4.4-5 および図 4.4-6 にそれぞれ示す。液状水の移動速度のモデル式の精度の関係上、塩化物イオンの浸透位置での実測値との多少の誤差は認められるが、いずれのケースにおいても、水分移動に伴った塩化物イオンの浸透特性が再現されている。また、表面塩化物イオン濃度を経時的に変化させたことで、浸透面近傍での塩化物イオン量の経時的な増加現象にも対応できており、実測値とよく一致しており、塩化物イオンの移流拡散モデルが吸水に伴う塩化物イオン浸透モデルとしての適用性が示された。しかし、水分移動モデルと同様に、間隙空気圧の影響を考慮しない場合は、水分移動量を過大に評価するため、塩化物イオン量も実測値に比べて過大に評価する傾向が示されている。

そこで、間隙空気圧の影響として、飽和限界線を導入して塩化物イオン浸透解析を行った結果を図 4.4-7 に示す。いずれの配合においても、間隙空気圧を考慮することで水分移動解析の精度が向上し、それに伴って塩化物イオンの浸透解析結果も実測値に近い分布を示していることが確認された。このことから、水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデル共に間隙空気圧を考慮することで、モデルの高精度化が可能であることが示唆された。

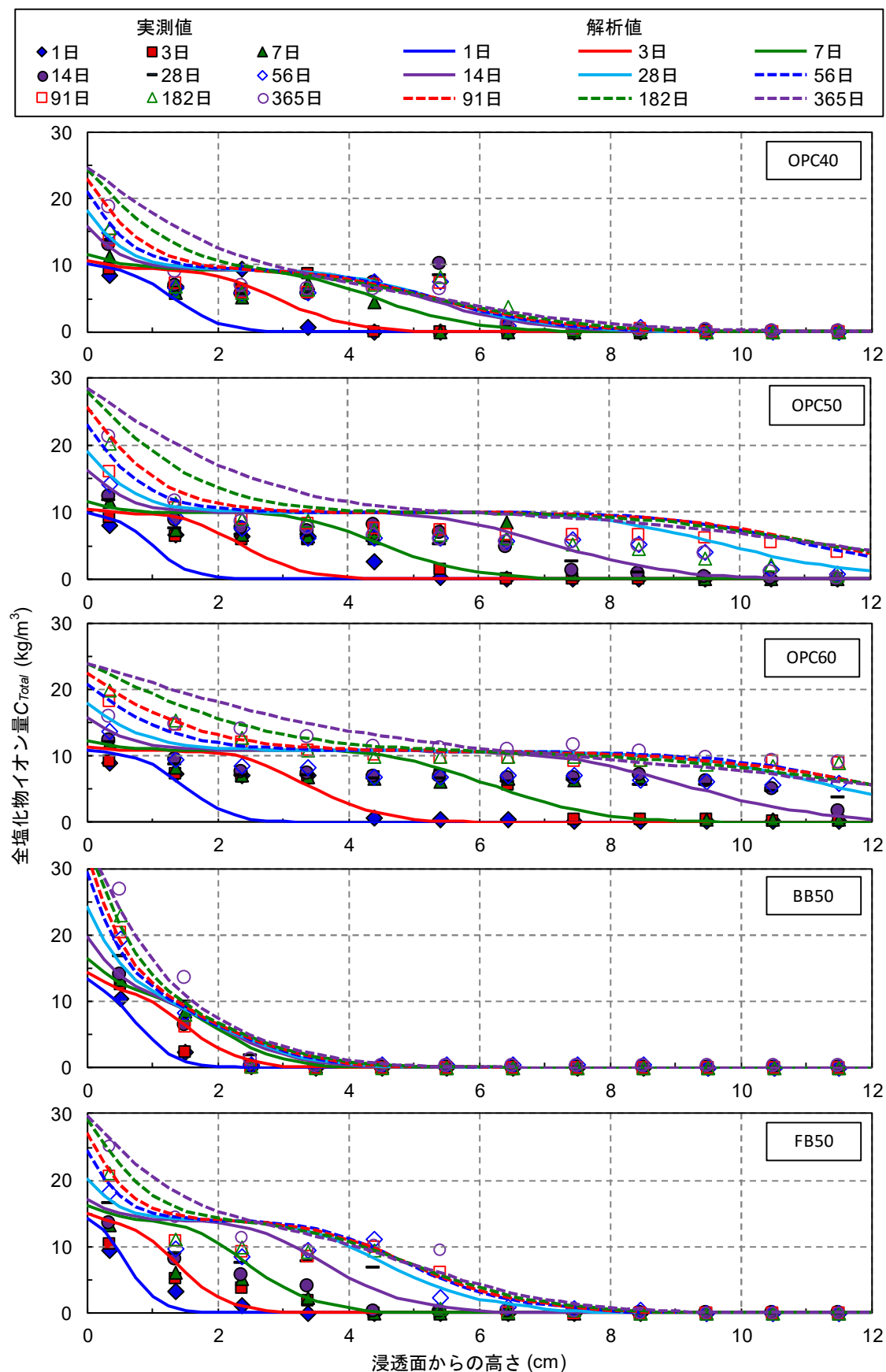


図 4.4-5 塩化物イオン浸透解析結果（背面封鎖）-間隙空気圧の影響なし-

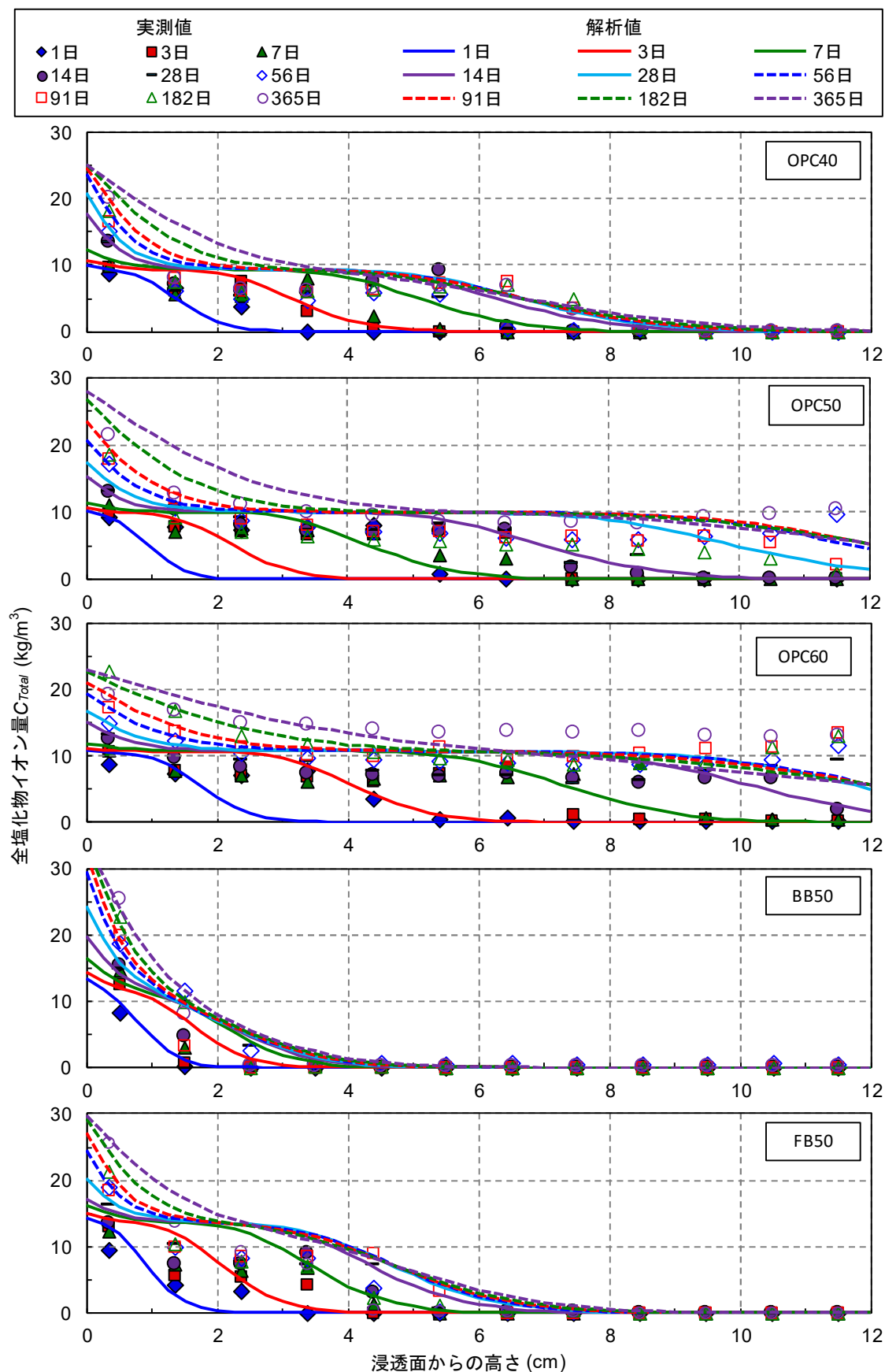


図 4.4-6 塩化物イオン浸透解析結果（背面開放）-間隙空気圧の影響なし-

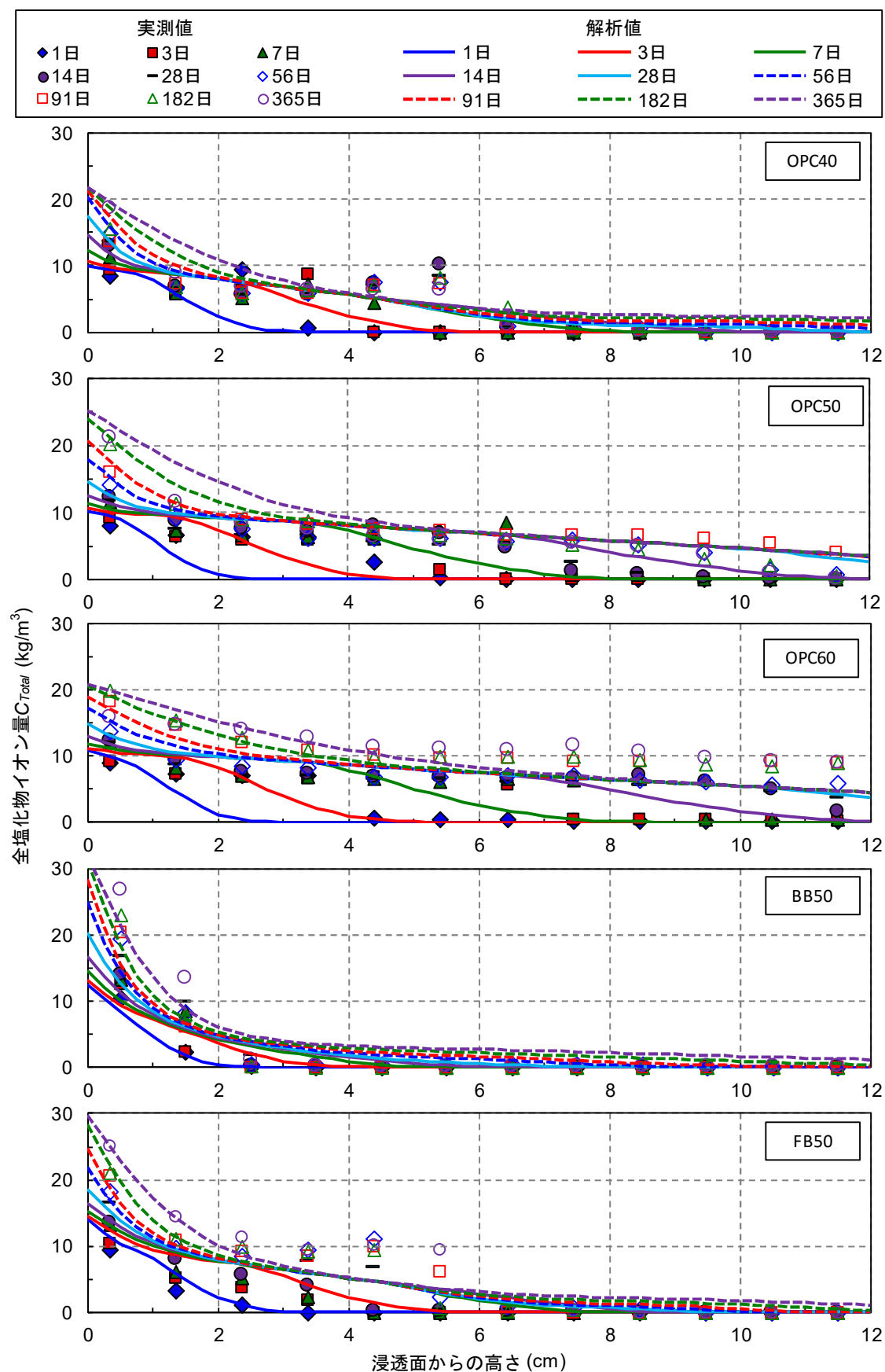


図 4.4-7 塩化物イオン浸透解析結果（背面封鎖）-間隙空気圧の影響あり-

4.5 本章のまとめ

本章では第3章の「吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討」から得られた結果を基に、吸水現象による水分移動モデル、および吸水現象に伴う塩化物イオン浸透モデルを検討し、それぞれ移流拡散方程式をベースとした解析モデルの提案をした。

以下に、数値解析に必要となる各種解析パラメーターの検討で得られた知見を示す。

- 液状水の移動速度や見かけの拡散係数は、連続空隙量と空隙屈曲度を要因とした空隙構造係数と高い相関性を有している。
- 吸湿過程および乾燥過程における水蒸気拡散係数は、BSBモデルにより近似的に表現された水蒸気吸脱着曲線を用いることで算出が可能であり、吸湿・乾燥過程ともに飽和度40%以下にて水蒸気拡散係数のピークを持つことを確認し、飽和度40%以下で水蒸気拡散の影響が顕著となる実験の傾向とも一致していた。しかし、BSBモデルに用いる近似パラメーターの決定に際しては、連続空隙量と空隙屈曲度などの空隙構造に関する情報だけでは不十分であり、材料に起因した空隙表面の電気的性質つまり電気二重層の影響も考慮する必要性が示唆された。
- 表面塩化物イオン量の決定において、本検討では塩化物イオンの固定化や疑似吸着の影響を、時間依存性および空隙構造係数により定式化した。しかし、より汎用的な決定手法とするためには、空隙構造係数のみならず、塩化物イオンの固定化反応の流束や疑似吸着の流束を考慮する必要がある。

また、吸水現象による水分移動モデルおよび吸水現象に伴う塩化物イオン浸透モデルの妥当性を検証した結果、以下の知見が得られた。

(1) 吸水現象による水分移動モデル

- 水分移動解析の結果、吸水現象による液状水の移動（移流）と水蒸気拡散（拡散）の影響が再現することができた。また、液状水の移動の停止現象や、背面条件では背面部からの吸湿現象も再現できており、実測値ともよく一致していた。
- しかし、試験1～7日の初期段階では、水分の移動位置は実測値と解析値で誤差が大きくなる傾向があり、液状水の移動速度のモデル精度の影響が考えられた。さらに、飽和度の観点では、いずれのケースにおいても、解析値では浸透面からの飽和度の増加を過大に評価していることを確認した。これは、本モデルに間隙空気圧の影響を考慮していないことが起因していると考えられた。

- 間隙空気圧の影響として、飽和限界線を導入することで、浸透面からの飽和度上昇の過大評価を抑制し、より実測値に近い分布を示すことが確認された。ただし、この飽和限界線は飽和度分布から経験式として与えたものに過ぎず、理論的に与えるためには、間隙空気圧や空隙構造の影響に着目して検討する必要がある。

(4) 吸水現象による塩化物イオン浸透モデル

- 塩化物イオン浸透解析の結果、水分移動に伴った塩化物イオンの浸透特性が再現されており、特に、浸透面近傍での塩化物イオン量の経時的な増加現象は、実測値とよく一致しており、塩化物イオンの移流拡散モデルが吸水に伴う塩化物イオン浸透モデルとしての適用性が示された。
- また、水分移動モデルと同様に、間隙空気圧の影響として、飽和限界線を導入することで水分移動解析の精度が向上し、それに伴って塩化物イオンの浸透解析結果も実測値に近い分布を示すことが確認された。このことより、水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデル共に間隙空気圧を考慮することで、モデルの高精度化が可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 杉山隆文, 清水俊吾, Ritthichauy, W., 辻幸和: 電気泳動法を用いたモルタル硬化体の空隙構造の定量化とその考察, 土木学会論文集, No.767, pp.227-238, 2004.
- 2) 佐々木謙二, 横澤良太, 佐伯竜彦: セメント系硬化体の塩化物イオン拡散性状に及ぼす炭酸化の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1035-1040, 2007.
- 3) 橋田 浩, 田中享二, 小池迪夫: 不透湿な仕上げ層を施工した後のコンクリートの含水状態, 日本建築学会構造系論文報告集, No.419, pp.21-29, 1991.
- 4) Brunauer, S., Skalny, J., Bodor, E. E.: Adsorption on Nonporous Solids, Journal of Colloid Interface Science, Vol.30, pp.546-552, 1969.
- 5) 建築環境・省エネルギー機構: 住宅の平成25年省エネルギー基準の解説, 2015.
- 6) 丸屋剛: 毛管水の移動にともなう塩化物イオンの移動, 土木学会第51回年次学術講演会概要集, Vol.51, No.5/V-274, pp.548-549, 1996.

第5章

乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの 塩化物イオン浸透特性の実験的検討

5.1 概要

第3章では、吸水現象に着目して、コンクリートが極度の乾燥状態から水分移動を受けた際の水分そのものの動き、およびそれに伴う塩化物イオンの浸透特性を把握した。しかし、実構造物では、海中部などを除き恒久的に海水に晒されることはほとんどない。むしろ、干満帯や飛沫帯のように、乾燥と海水の供給がある、乾湿繰返し履歴を受ける環境の方が圧倒的に多い。現行の塩化物イオンの浸透評価に用いられる拡散モデルでは、湿潤から乾燥、および乾燥から湿潤への水分移動は考慮されておらず、これら水分移動の影響は見かけの拡散係数に包含されてしまっている。そのため、鉄筋コンクリート構造物の設計や維持管理計画における塩害耐久性照査では、材料物性値である見かけの拡散係数は同一材料であっても環境条件によって変えなければならない。そのため、佐伯らは¹⁾乾湿繰返しによる見かけの拡散係数への影響として含水率依存型の見かけの拡散係数の換算式を提案している。

一方で、環境条件によっては水分移動の影響の方が強く、塩化物イオンの浸透としての拡散モデルが崩れ、見かけの拡散係数だけでは対処できない状況も想定される。実際、岸ら²⁾は塩化物イオンの浸透が長期にわたり停滞していることを実構造物の調査から明らかにしている。これは、塩化物イオンの浸透の駆動力を濃度勾配と説明している拡散モデルから外れていることを意味し、岸らは水分移動の影響として示唆している。しかし、乾湿繰返し履歴における水分移動および塩化物イオンの浸透特性に関して、検討事例は少なく十分とは言えない。例えば、乾燥環境の湿度がコンクリート中の乾燥に及ぼす影響や乾燥による塩化物イオンのコンクリート中への残留、乾湿繰返し履歴による蓄積量は明確にされていない。そこで本章では、異なる乾燥条件での乾湿繰返し試験を実施して、乾湿繰返し履歴における水分移動特性および塩化物イオン浸透特性を検討した。

5.2 試験概要

5.2.1 供試体配合

本章では、供試体配合はセメント種類の影響に着目して表 5.2-1 示すものとした。水セメント比を 0.5 に固定して、普通ポルトランドセメントを使用した OPC50 と、結合材割合を $C:BFS:Gyp=50:49:1$ とした BB50 (高炉セメント B 種相当)、結合材割合を $C:F=80:20$ とした FB50 (フライアッシュセメント B 種相当) の計 3 ケースとした。また、いずれの配合において、目標フロー値が $150\pm 10\text{mm}$ となるようにペースト容積比を調整している。

表 5.2-1 乾湿繰返し試験に使用した供試体の配合

呼称	W/B	ペースト 容積比	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	BFS	F	Gyp	S
OPC50	0.5	0.415	254	508	—	—	—	1544
BB50		0.420	256	256	251	—	5.11	1518
FB50		0.425	252	404	—	101	—	1518

ここで、 W ：水 (密度：1.0g/cm³)， C ：普通ポルトランドセメント (密度：3.16g/cm³)， BFS ：高炉スラグ微粉末 (密度：2.89g/cm³)， F ：フライアッシュ (密度：2.25g/cm³)， Gyp ：無水石膏 (密度：2.96g/cm³)， S ：富士川産川砂 (密度：2.64g/cm³)である。

5.2.2 乾湿繰返し試験の試験方法

本章では、異なる乾燥条件での乾湿繰返し履歴によるモルタル中の水分移動および塩化物イオンの浸透を確認するために乾湿繰返し試験を実施した。

以下に、乾湿繰返し試験の概要を示す。

(1) 供試体作製手順

供試体作製手順は、第3章の塩化物イオン浸透試験の供試体と同様の作製手順とした。ただし、本章では、塩化物イオンの浸透面での乾燥から湿潤、湿潤から乾燥による水分移動および塩化物イオンの浸透を把握するため、背面条件は背面封鎖のみとした。

(2) 試験方法

乾湿繰返し試験は、図 5.2-1 に示すように、乾燥過程として7日間の乾燥試験、湿潤過程には吸水過程として7日間の塩化物イオン浸透試験をそれぞれ実施して合計14日間で1サイクルとした繰返し試験である。

なお、乾湿繰返し試験は乾燥試験から開始するものとして、初期の含水状態は疑似飽和状態とした。疑似飽和状態の判定は、供試体シール後の供試体を真水に浸せきして前日との質量差が0.1%以内となった状態とした。また、比較用として塩化物イオン浸透試験のみを実施するケースも、併せて最初の乾燥試験と同時時期に開始した。

以下に、乾燥試験および塩化物イオン浸透試験の試験方法を示す。

● 乾燥試験

乾燥試験は図 5.2-1 に示したように、調湿を行った温度 20℃の乾燥試験用の密閉容器内に供試体を横向きに静置した。その際、乾燥面に付着した水滴はふき取るものとした。また、乾燥湿度は表 5.2-1 に示す RH=30%、RH=60%、RH=75%の3ケースとし、調湿剤には無機塩の飽和水溶液を使用した (表 5.2-2)。また、湿度は温湿度センサー ((株) T&D おんどとり TR-72wf：精度 RH±5%) を乾燥試験用の密閉容器に入れて管理した。

第5章

乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討

乾湿繰返し試験乾燥試験中の乾燥試験用の密閉容器内の湿度管理状況を図 5.2-2～図 5.2-4 に、各サイクルの乾燥試験時の乾燥湿度の平均値を表 5.2-3 に示す。湿度管理状況については、図中のオレンジ色のバーで囲っている部分が乾燥試験を実施した期間となる。乾燥試験を開始した直後は、湿潤状態の供試体の影響により瞬間的に湿度が増加するが、時間の経過とともに目標の乾燥湿度に向かって調湿されていくことが確認できた。ただし、初期の1～3サイクルでは、供試体本数の多さから十分に調湿されず目標湿度よりも10～20%ほど高いものの、表 5.2-3 に示すように、乾燥試験中の平均湿度は、目標乾燥湿度の3ケース間で乾燥湿度の違いが得られたため、継続して試験を続行した。

● 塩化物イオン浸透試験

塩化物イオン浸透試験は第3章で示した説明した方法に従うものとした。

(3) 測定項目

試験開始後は、所定のサイクル数(1, 2, 3, 5, 10, 20 サイクル)の乾燥試験終了時と塩化物イオン浸透試験終了時のそれぞれで、供試体飽和度の経時変化、飽和度分布を測定、全塩化物イオン量分布は乾燥試験終了時でのみ測定した。

なお、各測定項目の測定方法は、第3章の塩化物イオン浸透試験で説明した方法に従うものとした。

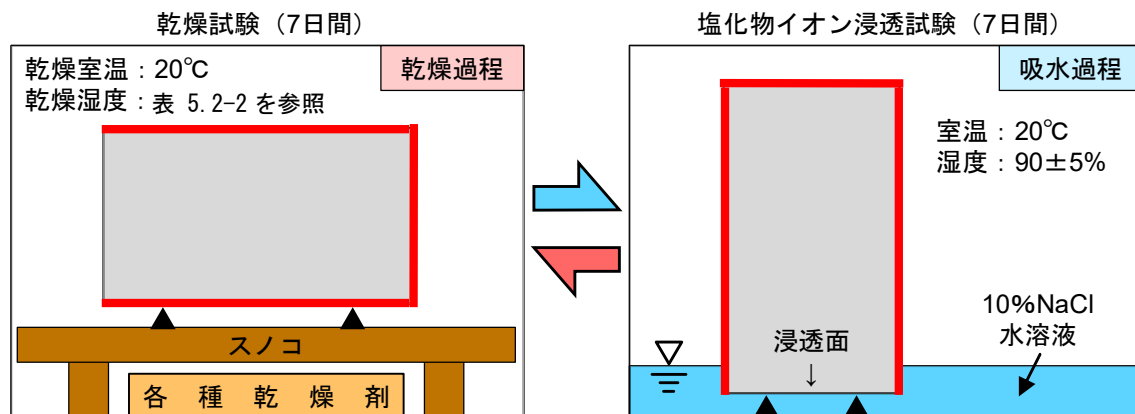


図 5.2-1 乾湿繰返し試験の概要図

表 5.2-1 試験の環境条件

乾燥過程	乾燥温度：20℃ 乾燥湿度：RH=30% RH=60% RH=75%
吸水過程	第3章に準拠

表 5.2-2 調湿剤に使用した飽和塩水溶液の種類

呼称	乾燥湿度	無機塩名
RH30	30%	酢酸カリウム
RH60	60%	硝酸マグネシウム六水和物
RH75	75%	塩化ナトリウム

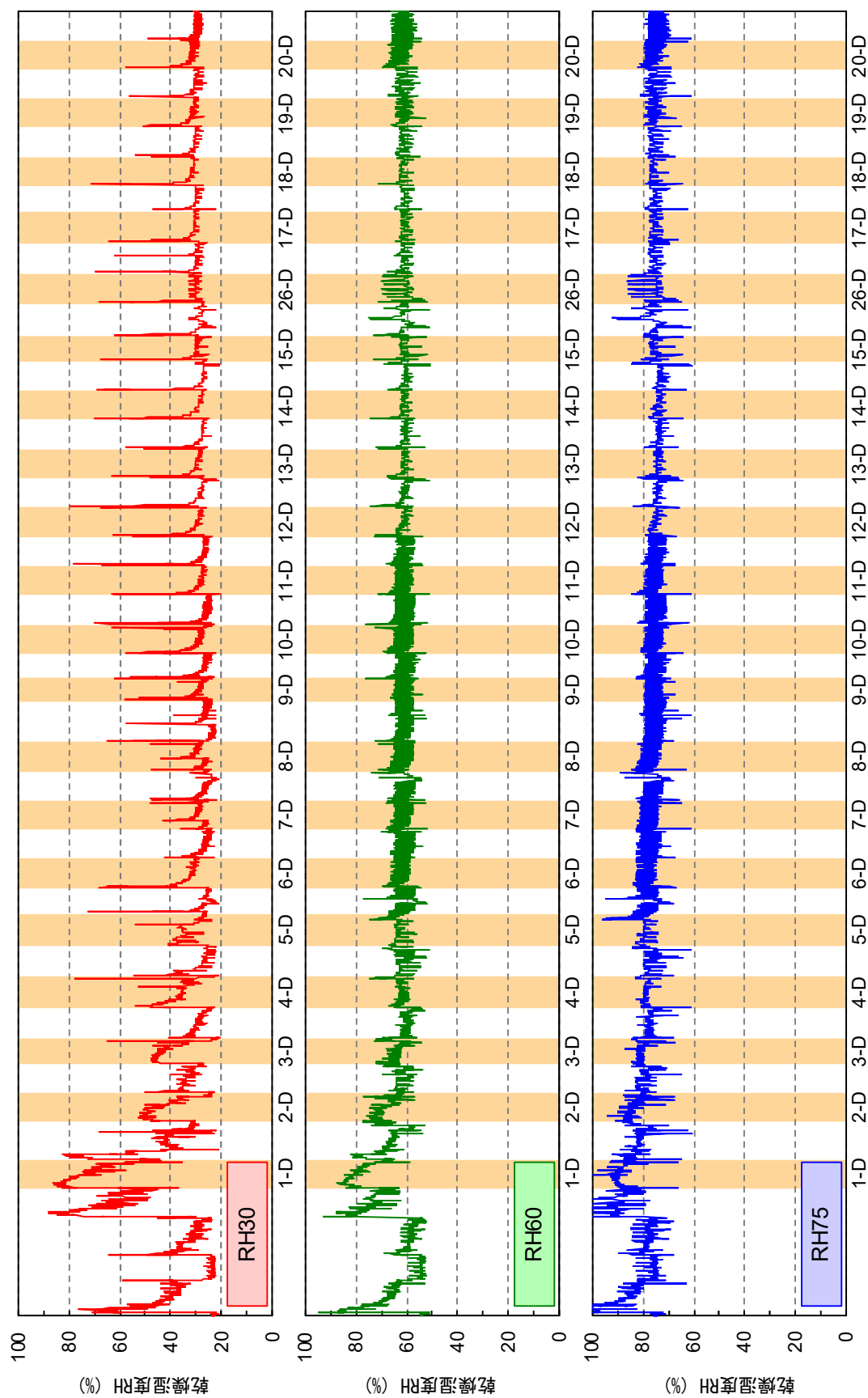


図 5.2-2 乾湿繰返し試験中の乾燥試験用の密閉容器内の湿度管理状況 (OPC50)

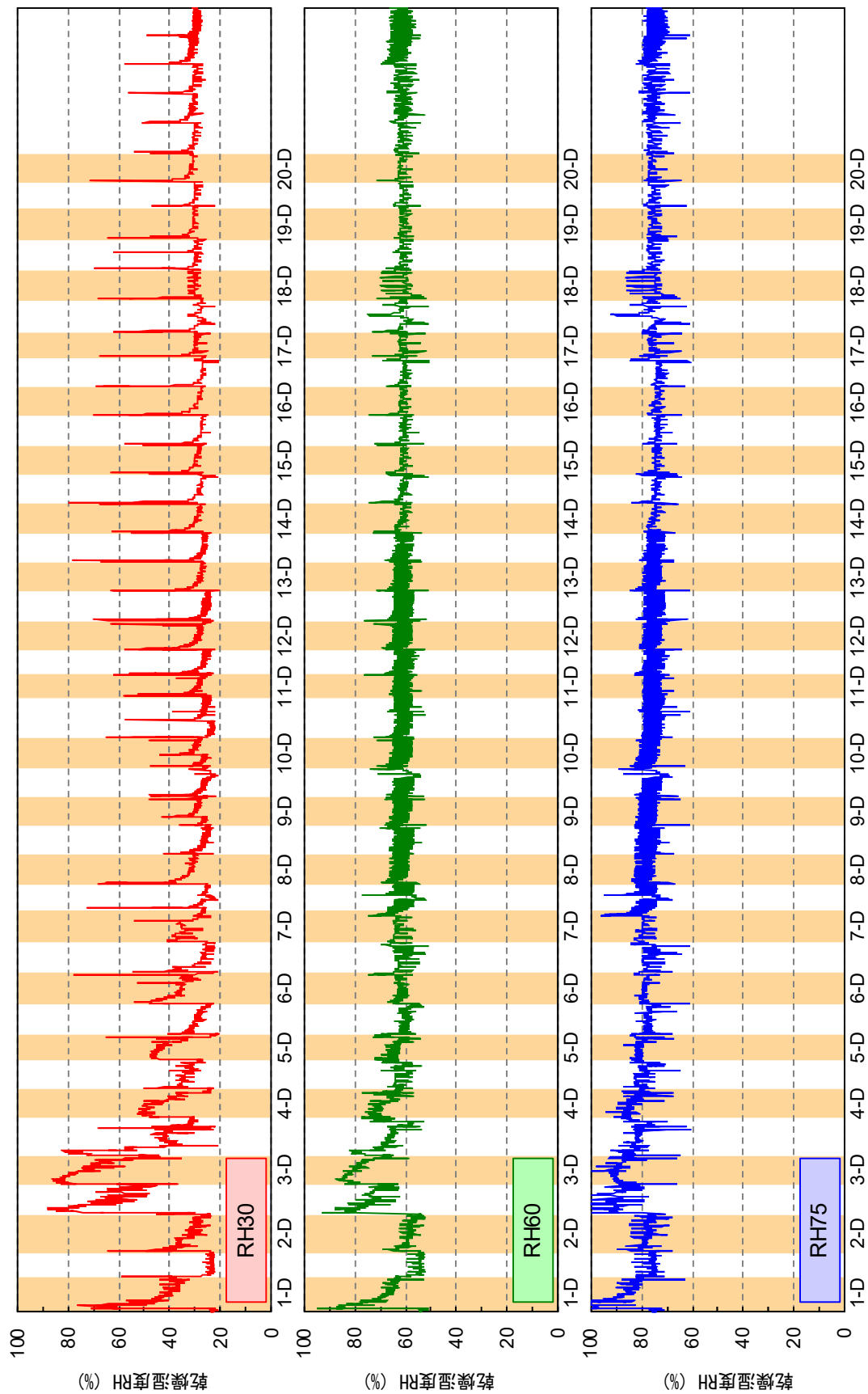


図 5.2-3 乾湿繰返し試験中の乾燥試験用の密閉容器内の湿度管理状況 (BB50)

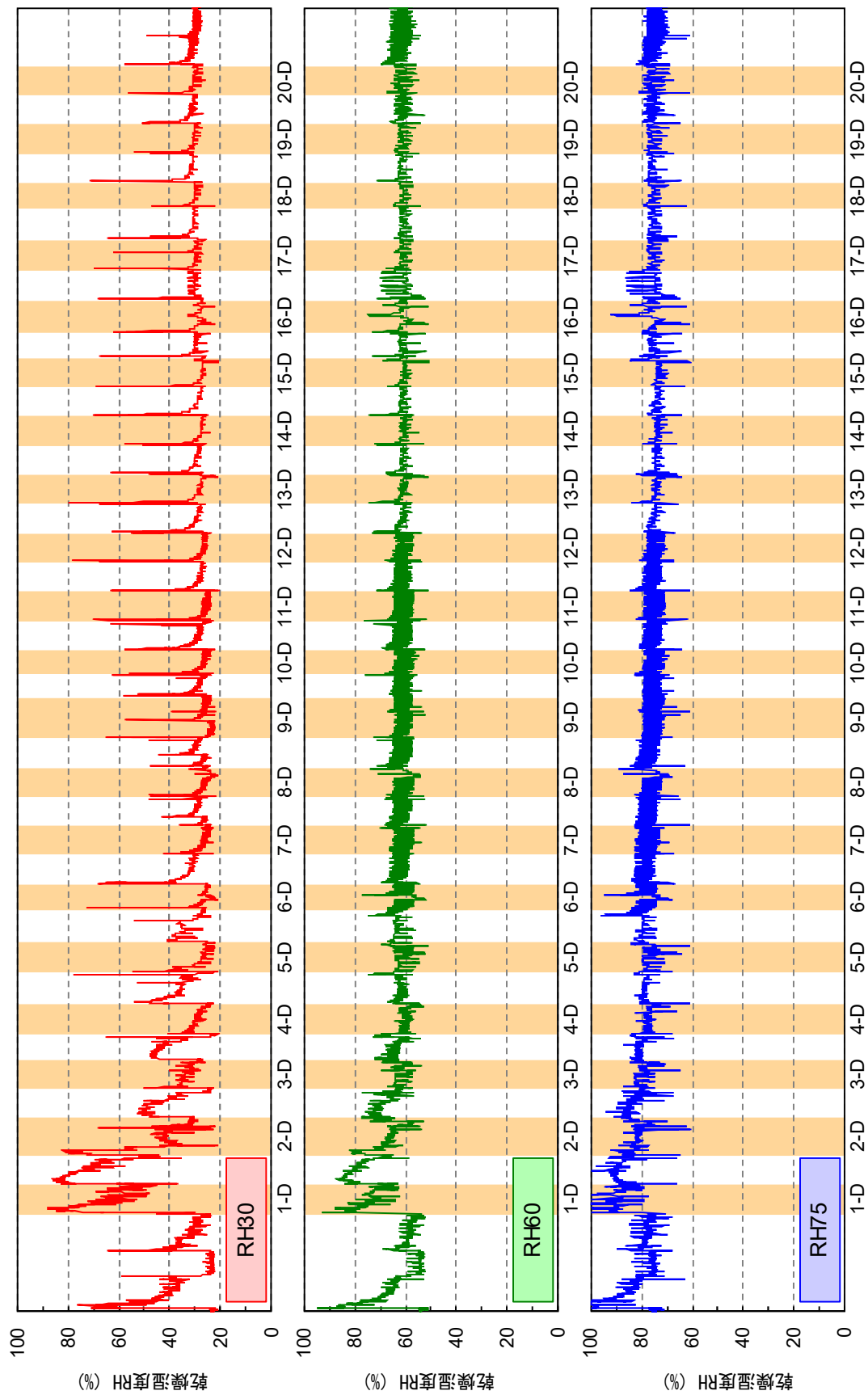


図 5.2-4 乾湿繰返し試験中の乾燥試験用の密閉容器内の湿度管理状況 (FB50)

第5章

乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討

表 5.2-3 乾燥試験における各サイクルの平均乾燥湿度

	OPC50			BB50			FB50			
	RH30	RH60	RH75	RH30	RH60	RH75	RH30	RH60	RH75	
サイクル数	1-D	70.78	78.32	88.31	43.85	69.14	87.29	63.44	73.03	88.52
	2-D	41.68	68.99	83.34	32.38	58.65	78.12	42.92	67.54	81.68
	3-D	40.36	64.88	80.63	70.78	78.32	88.31	32.92	62.24	79.16
	4-D	37.03	63.04	78.99	41.68	68.99	83.34	29.28	59.59	76.67
	5-D	32.58	63.66	80.01	40.36	64.88	80.63	27.69	61.52	76.75
	6-D	33.32	62.13	78.21	37.03	63.04	78.99	26.93	60.16	77.18
	7-D	28.66	62.04	77.27	32.58	63.66	80.01	26.87	61.06	76.83
	8-D	29.55	62.21	77.45	33.32	62.13	78.21	26.60	60.59	75.94
	9-D	29.57	62.23	76.32	28.66	62.04	77.27	25.91	61.33	75.84
	10-D	30.33	62.27	76.25	29.55	62.21	77.45	27.95	61.36	75.90
	11-D	29.46	62.23	76.47	29.57	62.23	76.32	26.55	61.27	75.26
	12-D	30.55	61.62	75.42	30.33	62.27	76.25	27.91	61.68	75.60
	13-D	30.36	61.19	74.42	29.46	62.23	76.47	29.08	60.99	74.18
	14-D	30.08	61.32	73.99	30.55	61.62	75.42	28.68	60.93	73.89
	15-D	30.67	61.59	75.55	30.36	61.19	74.42	28.18	60.83	73.56
	16-D	31.17	61.42	75.79	30.08	61.32	73.99	28.71	61.30	75.71
	17-D	31.49	60.96	75.28	30.67	61.59	75.55	30.22	61.19	75.58
	18-D	33.06	62.03	75.92	31.17	61.42	75.79	30.22	61.05	75.29
	19-D	32.03	61.75	76.07	31.49	60.96	75.28	30.63	61.36	75.49
	20-D	32.23	63.15	76.17	33.06	62.03	75.92	30.53	61.76	75.43
Ave.	34.25	63.35	77.59	34.85	63.50	78.25	31.06	62.04	76.72	

5.3 試験結果および考察

まず、試験結果にて、しばしば用いる特殊な表記法について説明する。本試験では各サイクルの乾燥過程（乾燥試験）と吸水過程（塩化物イオン浸透試験）で検討しており、区別のために各サイクル数に「-D」を添えたものを乾燥過程のデータ、「-W」を添えたものを吸水過程のデータとして表記する。例えば、10 サイクル目の乾燥過程は「10-D」、吸水過程は「10-W」と表記される。

（1）供試体飽和度の経時変化

供試体飽和度の経時変化を図 5.3-1 に示す。各サイクルにおいて、いずれの配合も、乾燥湿度が低いほど乾燥過程における飽和度の低下が大きいことが確認できる。また、供試体飽和度の推移の傾向として OPC50 と FB50 はサイクルの経過とともに供試体飽和度が徐々に低下する傾向が確認され、OPC50 と FB50 は乾湿繰返し履歴を受けながらも全体的には乾燥に向かっていることが示された。一方、BB50 の供試体飽和度の推移は概ね横ばいであることから、乾燥過程と吸水過程が釣合っていることになる。また、図 5.3-2 に示す、水分の乾燥量と吸水量の経時変化では、いずれのケースにおいても、水分の乾燥量および吸水量はサイクルの経過とともに減少する傾向が確認された。これは、サイクル経過で供試体空隙中の塩化物イオン濃度が増加し、ラウールの法則に従った水蒸気圧降下により、水分が乾燥しにくくなったと考えられる。

そこで、各サイクルの乾燥過程における水分の乾燥量と各サイクルの乾燥湿度の平均値（表 5.2-3）との関係を図 5.3-3 に示す。サイクルごとで水分の乾燥量と乾燥湿度には概ね相関性があり、サイクル経過とともに乾燥湿度に対して水分の乾燥量が円弧を描くように減少する傾向が確認された。

さらに、図 5.3-4 に示す水分の乾燥量と吸水量との相関関係では、いずれも直線関係を示している。しかし、近似線の傾きに注目すると、 $OPC50 > FB50 > BB50$ の順で大きくなっており、BB50 の傾きがほぼ 1 であることを考えれば、OPC50 と FB50 は乾燥寄りであり、すでに述べたように乾湿繰返し履歴を受けながらも乾燥に向かっていることが改めて示された。

第5章

乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討

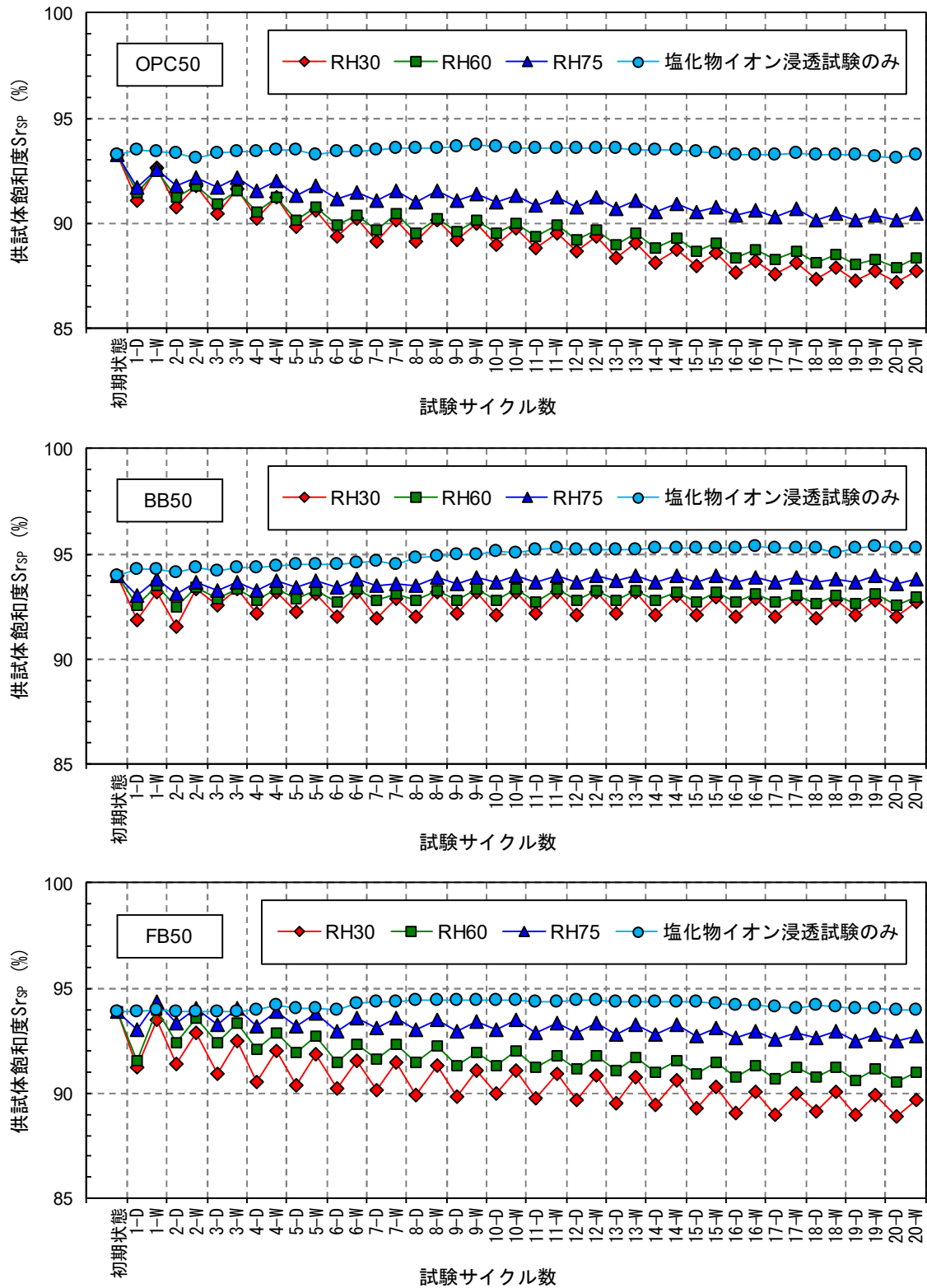


図 5.3-1 各配合の供試体飽和度の経時変化

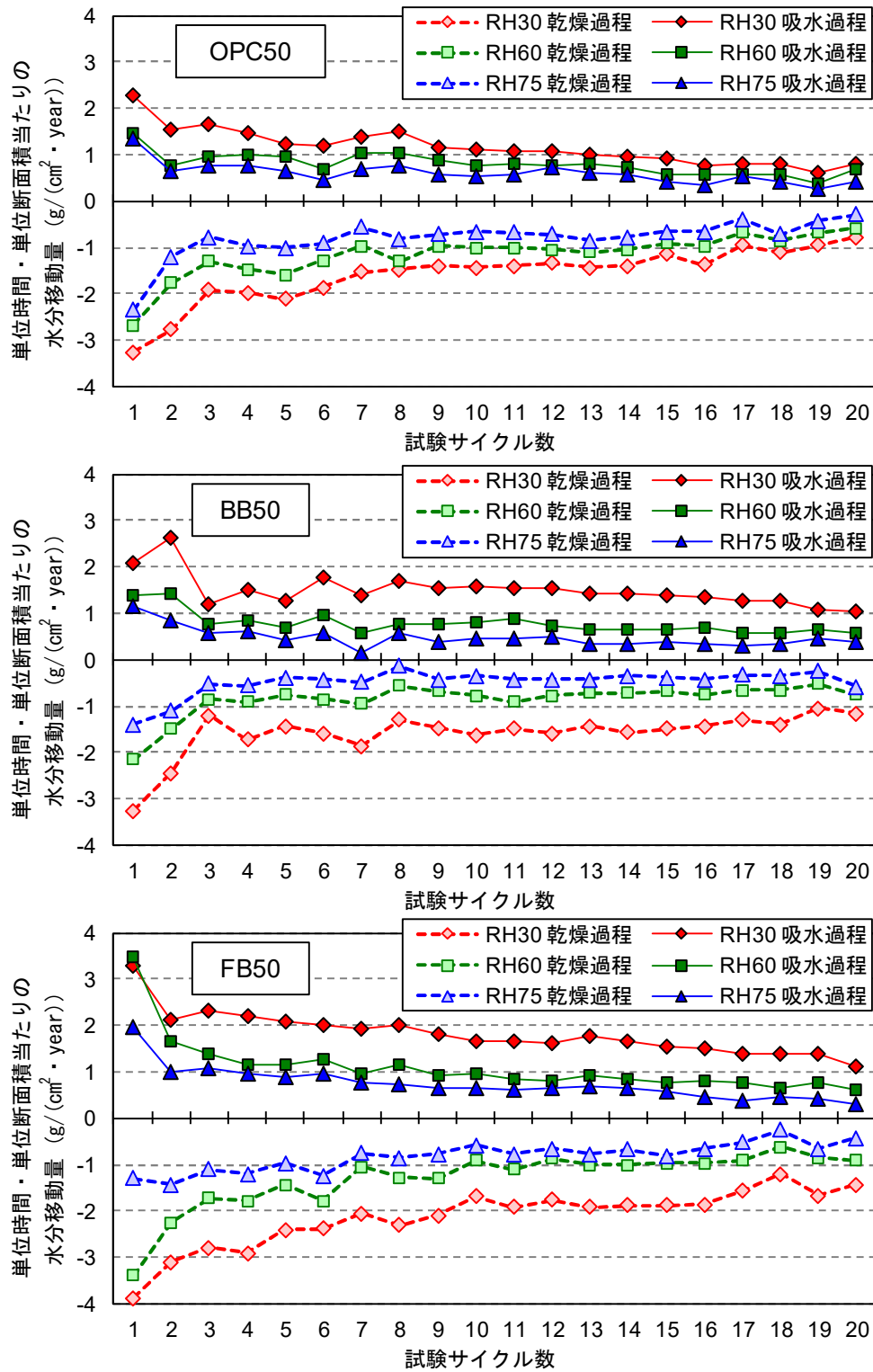


図 5.3-2 各配合の水分移動量の経時変化

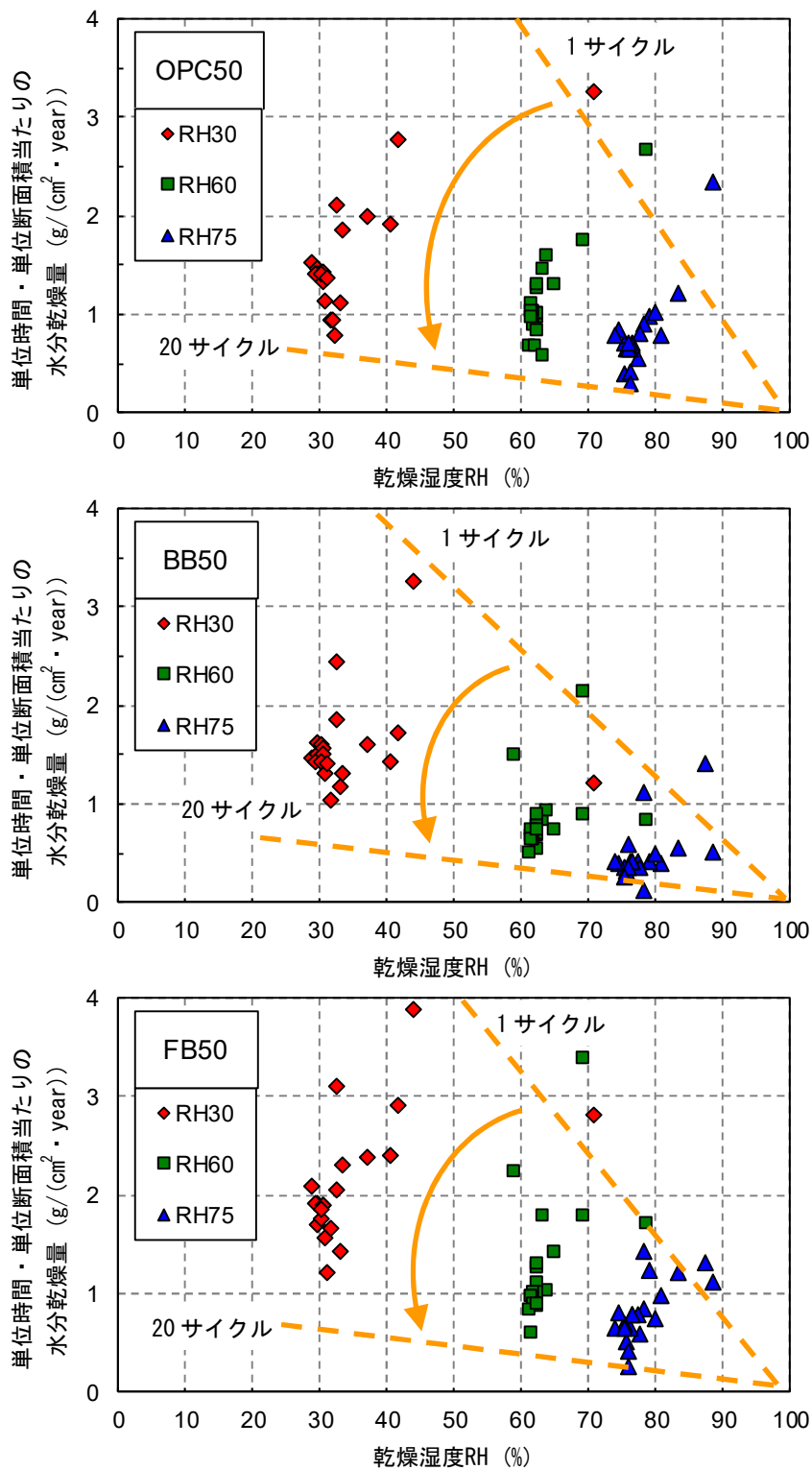


図 5.3-3 水分乾燥量と乾燥湿度の関係

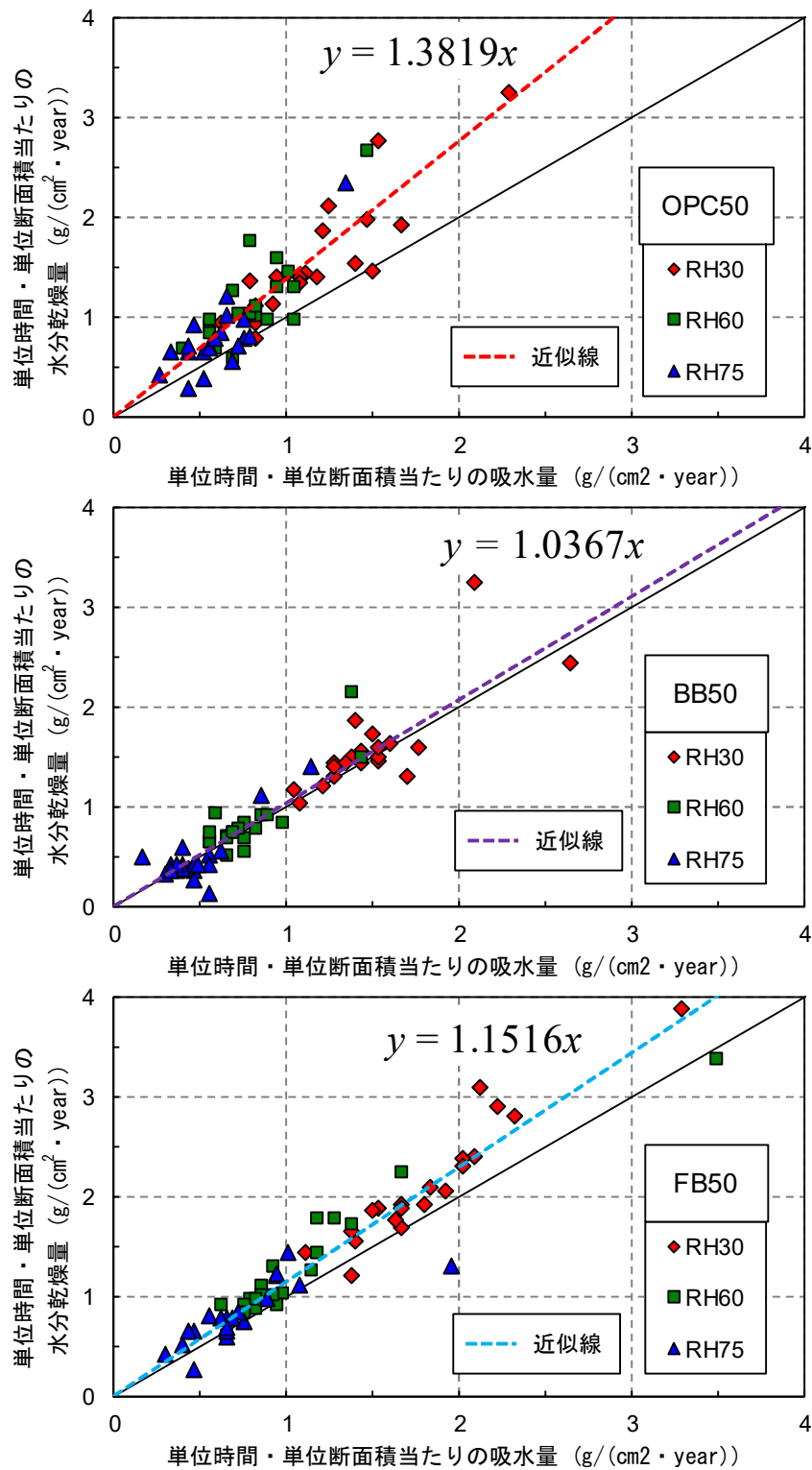


図 5.3-4 各配合の水分乾燥量と吸水量の関係

(2) 飽和度分布

図 5.3-5～図 5.3-7 に各配合の飽和度分布の経時変化を示す。図は凡例が極めて多いことや浸透面での水分移動の影響を明瞭にするため、1～3 サイクルと 5 サイクル以降で図を分け、縦軸の表記範囲を飽和度 70～100%とした。

OPC50 の結果から検討すると、いずれの乾燥湿度において、乾燥過程を受けることで乾燥過程終了後の飽和度分布は浸透面から供試体内部にかけて飽和度が低下しており、乾燥が進行していることが確認できた。そして、浸透面での飽和度の低下は乾燥湿度が低いほど顕著で、これは、乾燥湿度が低くなるほど、浸透面での飽和度との水分量の勾配が大きくなるためである。また、乾燥が認められた位置は 1～3 サイクルの初期サイクルでは、乾燥湿度により若干異なるが、およそ 1～2cm 程度であった。一方、5 サイクル以降では、より内部まで乾燥が進行し、乾燥条件によらず 3～4cm 程度まで飽和度の低下が確認された。

次に、吸水過程終了時における飽和度分布に着目する。1～3 サイクルの初期サイクルでは、乾燥湿度によらず、乾燥過程から吸水過程に移行したことで、乾燥した領域へ液状水が移動しているが、このとき初期状態の飽和度分布には戻らず、浸透面での飽和度が初期状態よりも低い傾向にある。さらに、5 サイクル以降になるとこの傾向は顕著に現れ、乾燥湿度ごとに、各サイクルの乾燥過程終了時の飽和度分布と比較すると、吸水による水分移動は浸透面からの 1 点目のみで、1cm 以降では水分移動は認められない。これは、供試体空隙中の空気の拘束が考えられ、つまり、乾燥過程では浸透面付近の空隙中の液状水が乾燥し逸散することで空気が残る。そして、吸水過程に移行した際に、残った空気は抜けることなく空隙中に取り込まれることで、吸水過程での水分移動を阻害したと考えられる。

つまり本試験では、乾燥過程で受けた乾燥した水分を吸水過程では補えておらず、サイクルが経過するごとに供試体内部への乾燥が進行していることになる。

また、BB50 や FB50 でも同様な傾向が確認され、BB50 は乾燥過程、吸水過程で OPC50 とほぼ同様な水分移動特性を示した。一方、FB50 は他の配合に比べて乾燥による水分移動が顕著で、乾燥湿度の高い RH75 でも、20 サイクル目には浸透面からの乾燥は 6cm 程度まで及ぶことが確認された。それでも、吸水過程による水分移動は他の配合と同様に浸透面からの 1 点目までで、1cm 以降では水分移動は認められなかった。

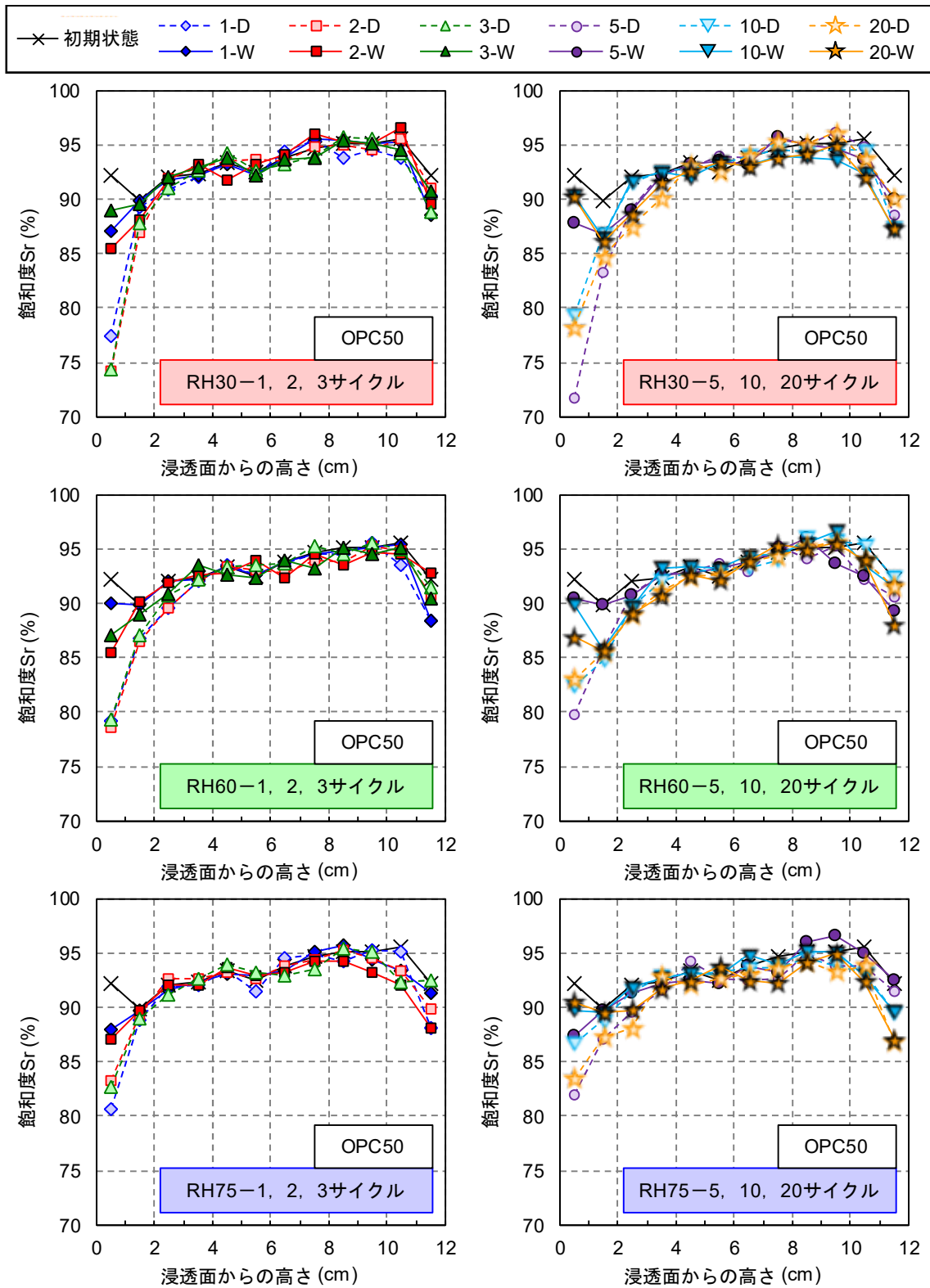


図 5.3-5 飽和度分布の経時変化 (OPC50)

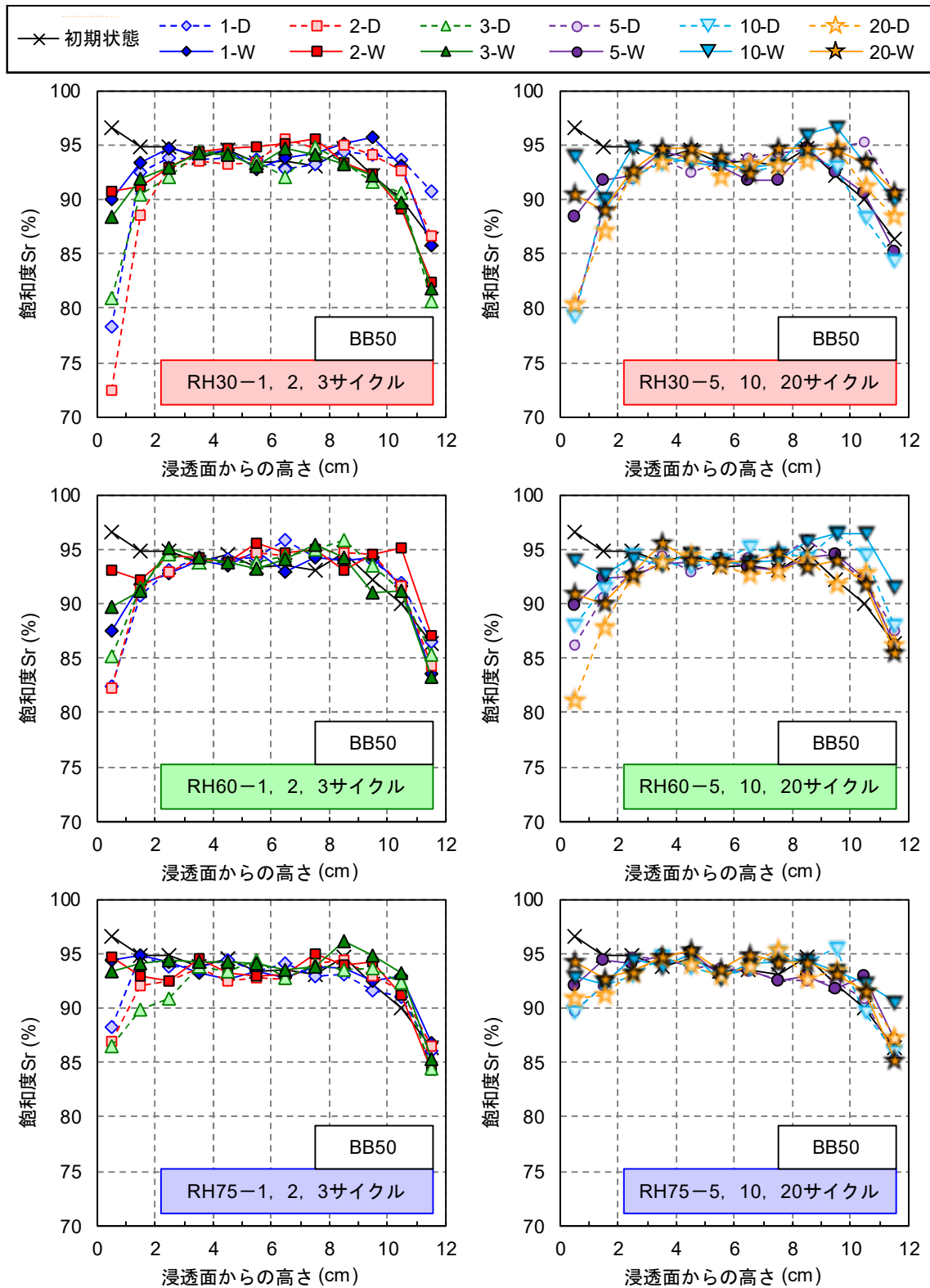


図 5.3-6 飽和度分布の経時変化 (BB50)

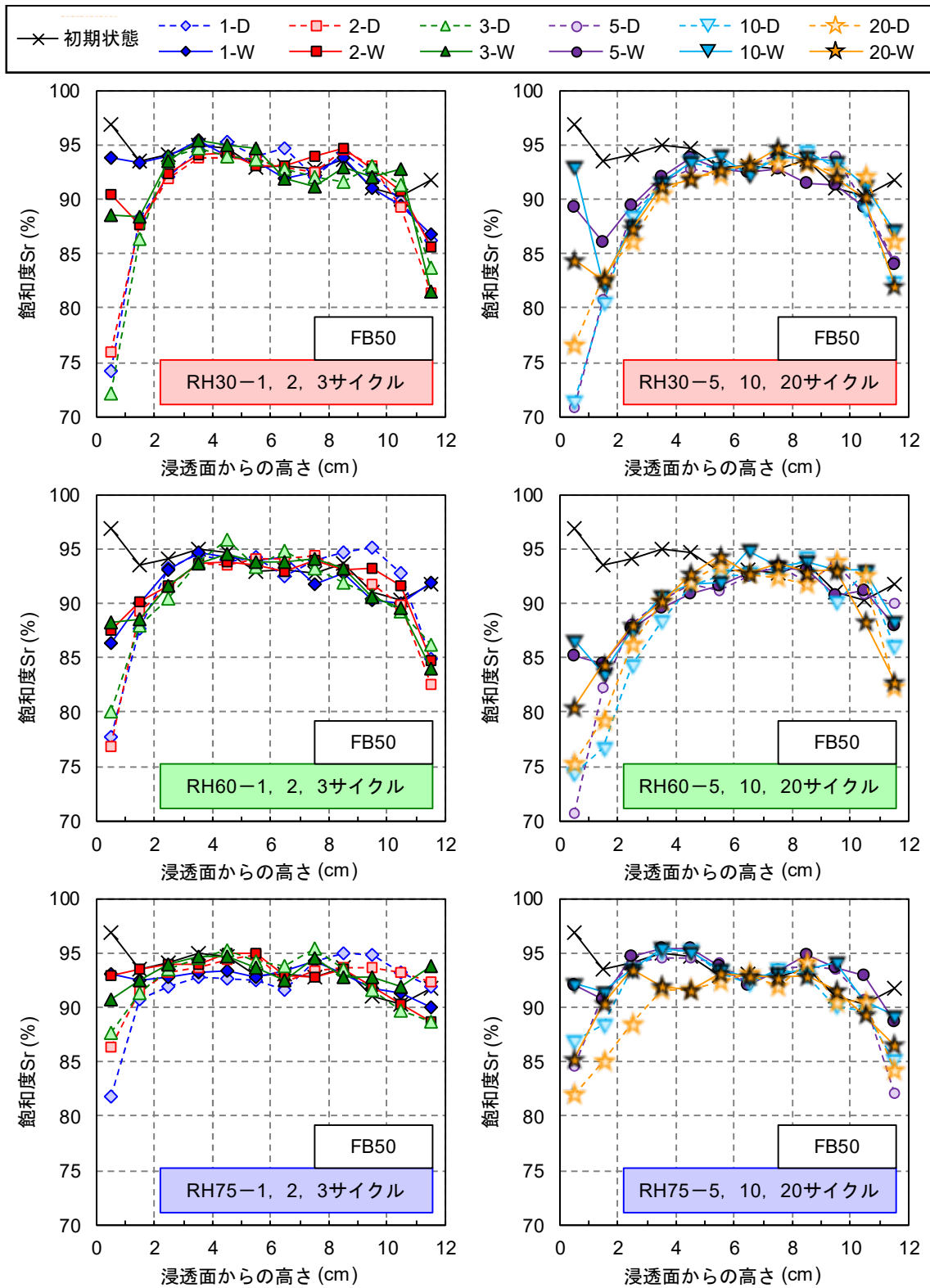


図 5.3-7 飽和度分布の経時変化 (FB50)

(3) 全塩化物イオン量分布

図 5.3-8 に 1~20 サイクルの吸水過程終了時の全塩化物イオン量分布と、塩化物イオン浸透試験のみを実施した場合の結果を併せて示す。まず、乾湿繰返し試験を実施したケース同士で比較すると、配合によらず、いずれのサイクルにおいても、乾燥過程の乾燥湿度が低いほど、塩化物イオン量が多くなることが確認できた。これは、飽和度分布でも示されたように、乾燥過程時に乾燥湿度が低くなるほど浸透面での飽和度は低下し、吸水過程に転じた際の吸水による水分移動量、とりわけ液状水の移動量は多くなり、同時に液状水の移動に伴う塩化物イオンの浸透もそれだけ多くなるからである。

セメント種類の影響について、20 サイクル終了時の塩化物イオンの浸透位置に着目すると、乾燥湿度によらず、OPC50 では 3.5cm, BB50 では 1.5cm, FB50 では 2.5cm とそれぞれで明確な差が確認された。

ここで、飽和度分布と比較すると、飽和度分布では、乾燥過程から吸水過程に移行した際、乾燥により取り残された空気の影響で、吸水としての水分移動は、浸透面から 1cm 程度でしか起こらないことが確認された。しかし、実際には上述のように、OPC50 では 3.5cm, BB50 では 1.5cm, FB50 では 2.5cm と吸水による水分移動が確認された位置よりも内部で塩化物イオンの浸透が確認された。つまり、吸水空隙中に取り込まれた空気により空隙が分断され 1cm 程度で液状水の移動は止まるが、それ以外の液状水で満たされた連続している空隙を介して、塩化物イオンは内部へ拡散浸透することが考えられる。

次に、塩化物イオン浸透試験のみを実施した場合と比較すると、いずれの配合において、乾燥湿度 30%の全塩化物イオン量分布で概ね一致しており、乾燥湿度 60%や 75%では、塩化物イオン浸透試験のみの結果よりも塩化物イオンの浸透が少ないことが確認された。ただし、本試験では乾湿繰返し試験を乾燥過程 7 日間（乾燥試験）と吸水過程 7 日（塩化物イオン浸透試験）を併せた 14 日間を 1 サイクルとしており、一方で、塩化物イオン浸透試験のみを実施した方は、浸せき 14 日間を 1 サイクルとしたため、塩水に接触した期間で言えば、塩化物イオン浸透試験のみを実施した方は乾湿繰返し試験の 2 倍の期間となってしまう。そのため、塩水に接触した期間で改めて整理する必要がある。

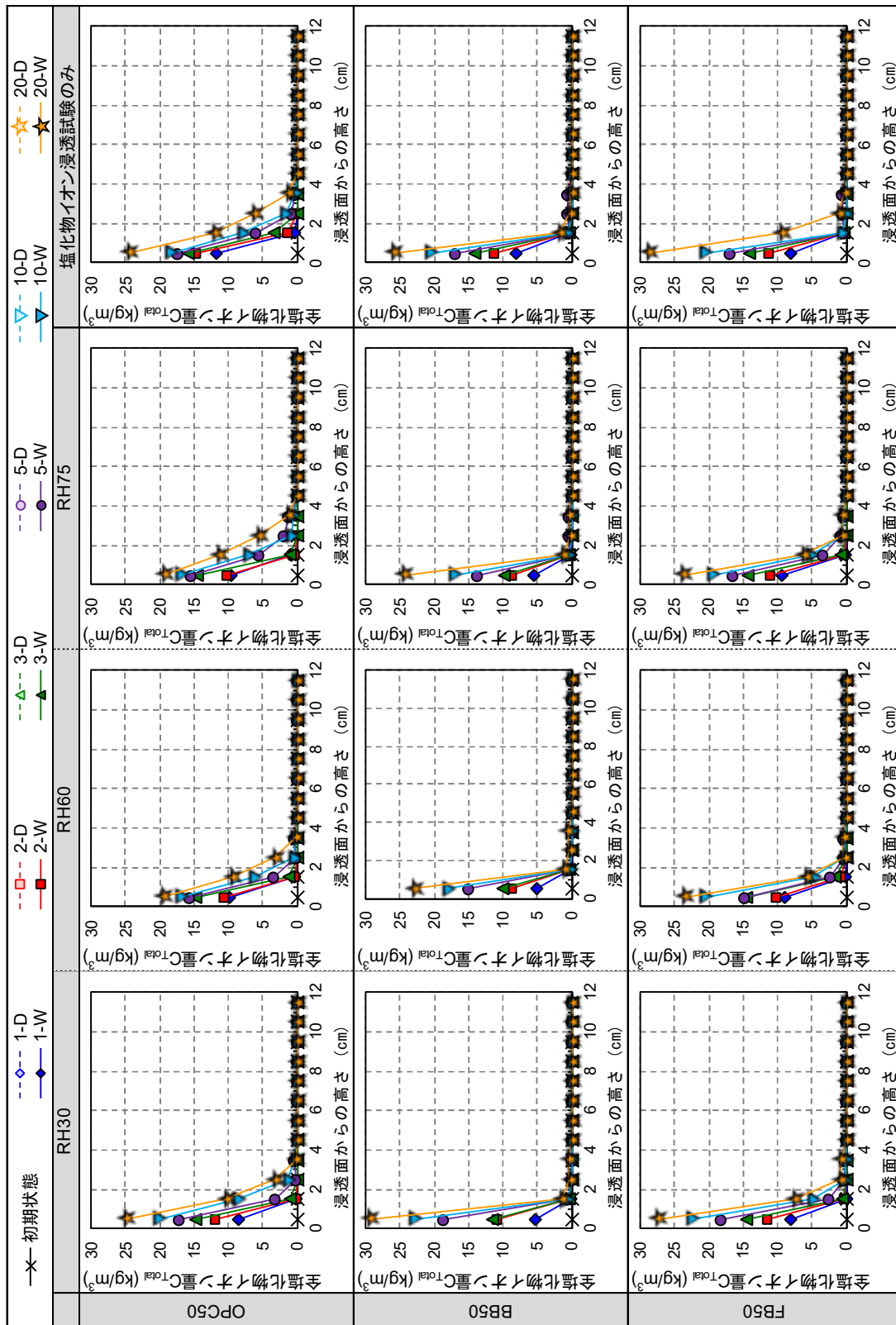


図 5.3-8 全塩化物イオン量分布の経時変化

第5章

乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討

また、供試体飽和度布の経時変化を検討した際、乾燥過程において、サイクル経過とともに乾燥湿度に対して水分の乾燥量が減少する傾向が確認された。これは、サイクル経過で供試体空隙中の塩化物イオン濃度が増加し、水蒸気圧降下により水分が乾燥しにくくなったと仮定した。そこで、供試体中の全塩化物イオン量と水分の乾燥量との関係を検討した。このとき、水分は浸透面からのみから乾燥するため、比較には浸透面から1点目の塩化物イオン量の値を用いた。図 5.3-9 に乾燥湿度ごとで分類した水分乾燥量と浸透面での全塩化物イオン量の関係を示す。いずれの配合において、各乾燥湿度環境下では、水分乾燥量と全塩化物イオン量の間には直線的な相関関係があることが示されており、供試体中の水分乾燥量は塩化物イオン量と乾燥湿度に依存するものと考えられる。

そこで、各配合にて、水分乾燥量を目的変数、浸透面での全塩化物イオン量と乾燥湿度を説明変数とした重回帰分析を行った。以下に重回帰分析の結果と得られた回帰式を表 5.3-1 および式 5.3-1～式 5.3-3 にそれぞれ示す。

表 5.3-1 重回帰分析による回帰統計結果

	OPC50	BB50	FB50
重相関係数 R	0.955	0.955	0.910
重決定係数 R ²	0.912	0.912	0.829
補正係数 R ²	0.902	0.902	0.809
標準誤差	0.234	0.234	0.417
観測数	21	21	21

$$\text{OPC50} \quad 4.8 - 0.12 \cdot C_1 - 0.028 \cdot RH_{dry} = q_{dry} \quad \text{式 5.3-1}$$

$$\text{BB50} \quad 4.1 - 0.070 \cdot C_1 - 0.033 \cdot RH_{dry} = q_{dry} \quad \text{式 5.3-2}$$

$$\text{FB50} \quad 5.3 - 0.097 \cdot C_1 - 0.034 \cdot RH_{dry} = q_{dry} \quad \text{式 5.3-3}$$

ここで、 q_{dry} ：乾燥過程における水分乾燥量 ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{year})$)、 C_1 ：浸透面から1点目の全塩化物イオン量 (kg/m^3)、 RH_{dry} ：乾燥過程における乾燥湿度 (%)である。

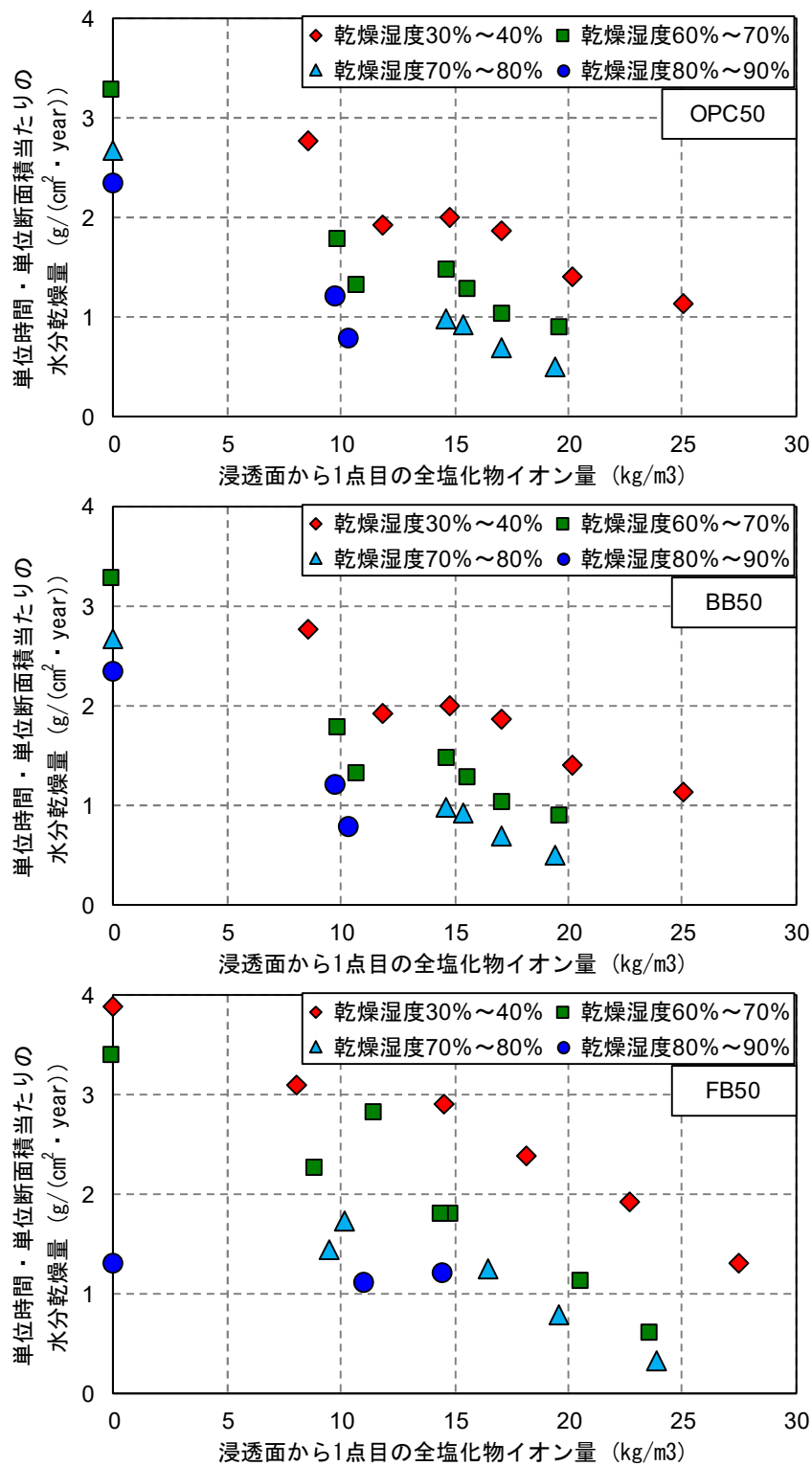


図 5.3-9 乾燥湿度ごとに分類した水分乾燥量と塩化物イオン濃度との関係

5.4 本章のまとめ

本章では、乾湿繰返し履歴を受けるコンクリート中への水分移動特性、塩化物イオン浸透特性、およびセメント種類がこれらに及ぼす影響を明確にするため、疑似飽和状態のモルタルを使用して異なる乾燥湿度による乾湿繰返し試験を実施した。その結果、以下の結論が得られた。

① 水分移動特性

いずれの乾燥湿度において、乾燥過程を受けることで乾燥過程終了後の飽和度分布は浸透面から供試体内部にかけての飽和度が低下しており、乾燥が進行していることが確認できた。そして、浸透面での飽和度の低下は乾燥湿度が低いほど顕著で、これは、乾燥湿度が低くなるほど、浸透面での飽和度との水分量の勾配が大きくなるためである。また、乾燥が認められた位置は1～3サイクルの初期サイクルでは、乾燥湿度により若干異なるが、おおよそ1～2cm程度であった。一方、5サイクル以降では、より内部へ乾燥が進行し乾燥条件によらず3～4cm程度となることが確認された。また、乾燥湿度にかかわらず、サイクル数の経過に伴って乾燥過程における水分乾燥量が減少する傾向が確認された。これは、サイクル経過で供試体空隙中の塩化物イオン濃度が増加し、水蒸気圧降下により、水分が乾燥しにくくなったと考えられた。そこで、乾燥湿度環境ごとで水分乾燥量と塩化物イオン濃度の相関関係を検討した結果、乾燥湿度ごとで両者には直線的な相関が示された。また、重回帰分析の結果、セメント種類の影響として検討した OPC50、BB50、FB50 のそれぞれで、塩化物イオン濃度と乾燥湿度に依存した水分乾燥量の回帰式が得られた。

一方、吸水過程では、乾燥過程から吸水過程に移行することで、液状水の移動により、乾燥により低下した浸透面の飽和度が再度上昇することが確認された。しかし、飽和度分布は初期状態にまでは戻らず、むしろ吸水による液状水の移動は浸透面からの1点目で停止しており、1cm以降では水分の移動は認められなかった。これは、供試体空隙中の空気の拘束が考えられ、乾燥過程では浸透面付近の空隙中の液状水が乾燥し逸散することで空気が残り、吸水過程に移行した際に、残った空気は抜けることなく空隙中に取り込まれることで、吸水過程での液状水の移動を阻害したと考えられる。

つまり本試験では、乾燥過程で受けた乾燥した水分を吸水過程は補えておらず、サイクルが経過するごとに供試体内部への乾燥が進行していることが確認された。

② 塩化物イオン浸透特性

いずれのサイクルにおいて、乾燥過程の乾燥湿度が低いほど、塩化物イオン量が多くなることが確認できた。これは、飽和度分布でも示されたように、乾燥過程時に乾燥湿度が低くなるほど浸透面での飽和度は低下し、吸水過程に転じた際の吸水による水分移動量、とりわけ液状水の移動量は多くなり、同時に液状水の移動に伴う塩化物イオンの浸透も多くなることが考えられた。

また、セメント種類の影響について、20 サイクル終了時の塩化物イオンの浸透位置に着目すると、乾燥湿度によらず、OPC50 では 3.5cm で、BB50 では 1.5cm、FB50 では 2.5cm とそれぞれで明確な差が確認された。しかし、乾燥過程から吸水過程へ移行した際の液状水の移動は浸透面から 1cm 程度までしか移動しないことを考慮すると液状水の移動位置以上に塩化物イオンが浸透したことになる。これは、吸水による液状水の移動としては、空隙中に取り込まれた空気により空隙が分断され 1cm 程度で液状水の移動は止まるが、それ以外の液状水で満たされた連続している空隙を介して、塩化物イオンは内部へ拡散浸透することが考えられる。つまり、乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートの塩化物イオン浸透特性としては、浸透面から 1cm 程度までは液状水の水分移動に伴った塩化物イオンの浸透が、それより内部では濃度拡散が起きていることが考えられた。

第5章

乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討

参考文献

- 1) 佐伯竜彦, 嶋毅, 長瀧重義: 等価拡散係数を用いたコンクリートの塩分浸透予測手法の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.859-864, 1998.
- 2) 岸利治, 高橋佑弥, Islam, M.S., 酒井雄也: コンクリート中への塩分浸透停滞現象の確認と液状水浸透挙動との相関に関する研究, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)成果報告書(その2)およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ No.99, pp.361-368, 土木学会, 2012.

第6章

乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの 塩化物イオン浸透モデルの検討

6.1 概要

本章では第5章の「乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートの塩化物イオン浸透特性に関する実験的検討」から得られた結果を基に、乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデルの構築を目的とした。

6.2 乾湿繰返しを考慮した塩化物イオン浸透モデルの検討

乾湿繰返しを考慮した塩化物イオンの浸透モデルとして、乾燥過程と吸水過程のそれぞれで水分移動モデルおよび塩化物イオンの浸透モデルを規定することにした。

6.2.1 乾燥過程における水分移動および塩化物イオン浸透のモデル化

本節では、乾燥過程での水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデルの検討をする。

●乾燥過程における水分移動モデル

まず、乾燥過程における水分移動は、コンクリート中の湿度（≒飽和度）が外部環境よりも高い場合に、コンクリート中の水分が大気との湿度と平衡状態に向かうことであり、一般的に拡散現象として取扱われている。秋田らは¹⁾乾燥過程における水分移動モデルとして、式6.2-1に示す、非線形拡散モデルを提案しており、これまでも数多くの研究で適用されている。本検討でも、適用性の広さから秋田モデルを採用した。

$$\frac{\partial Sr}{\partial t} = D_{v-dry} \cdot \frac{\partial^2 Sr}{\partial x^2} \quad \text{式 6.2-1}$$

ここで、 Sr ：コンクリート中の飽和度（%）、 D_{v-dry} ：乾燥過程における水蒸気拡散係数（ cm^2/day ）、 t ：時刻（day）、 x ：距離（cm）である。

●乾燥過程における塩化物イオン浸透モデル

乾燥過程における塩化物イオンの浸透として、コンクリート表面から内部への濃度拡散と、乾燥によるコンクリート内部から表面側への液状水の移動に伴う表面部への塩化物イオンの移動が想定される。実際に、乾燥によるコンクリート乾燥面への塩化物イオンの移動は、第3章の絶乾状態からの試験において OPC50、OPC60 の背面の開放部にて確認されている他、香川ら²⁾も乾燥による塩化物イオンの濃縮現象を実験的に把握している。ただし、いずれも14日以上の上の長期間の乾燥を受けた場合での塩化物イオンの移動であり、第5章の乾湿繰返し試験のような7日間の乾燥における塩化物イオンの表面側への移動は、乾燥過程終了時の塩化物イオンの浸透状況を把握していることもあり、明確にはなっていない。さらに、実環境の干満帯や飛沫帯においては、気温や日照の影響が加味されるものの、乾燥期間はさらに短くなる。

そのため、本検討では、7日間の乾燥では塩化物イオンの表面側への移動は顕著に現れないものと仮定して、乾燥過程における塩化物イオンの浸透モデルは、式 6.2-2 に示す濃度拡散のみを考慮した Fick の拡散モデルとした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ap} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{式 6.2-2}$$

ここで、 C ：コンクリート中の塩化物イオン量(kg/m^3)、 D_{ap} ：見かけの拡散係数(cm^2/day)、 t ：時刻(day)、 x ：距離(cm)である。

6.2.2 吸水過程における水分移動および塩化物イオン浸透のモデル化

次に、吸水過程における水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデルを検討する。

• 吸水過程における水分移動モデル

第5章の実験的検討の結果より、乾燥が生じた表層では吸水による液状水の移動が考えられたことから、吸水過程における水分移動は、第4章で検討した水分の移流拡散モデル(式 6.2-3)とした。

$$\frac{\partial Sr}{\partial t} = D_{v-wet} \cdot \frac{\partial^2 Sr}{\partial x^2} - v_{cap} \cdot \frac{\partial Sr}{\partial x} \quad \text{式 6.2-3}$$

ここで、 Sr ：コンクリート中の飽和度(%)、 v_{cap} ：液状水の移動速度(cm/day)、 D_{v-wet} ：吸湿過程における水蒸気拡散係数(cm^2/day)、 t ：時刻(day)、 x ：距離(cm)である。

• 吸水過程における塩化物イオン浸透モデル

また、吸水過程における塩化物イオンの浸透モデルも同様に、乾燥が生じた表層部では液状水の移動に伴った塩化物イオンの浸透が考えられたため、第4章で検討した塩化物イオンの移流拡散モデル（式 6.2-4、式 6.2-5）とした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ap} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_{cap} \cdot \frac{\partial Sr}{\partial x} \cdot C' \quad \text{式 6.2-4}$$

$$C' = \frac{1}{100} \times \frac{\theta_{sat}}{100} \times \frac{C_{NaCl}}{100} \times \frac{35.5}{58.5} \times \gamma_{SP} \quad \text{式 6.2-5}$$

ここで、 C ：コンクリート中の塩化物イオン濃度（%）， v_{cap} ：液状水の移動速度（cm/day）， D_{ap} ：塩化物イオンの見かけの拡散係数（cm²/day）， t ：時刻（year）， x ：距離（cm）， C' ：飽和度から塩化物イオン量への換算係数（kg/m³%）， θ_{sat} ：飽和状態における含水率（%）， C_{NaCl} ：塩水濃度（%）， γ_{SP} ：コンクリート・モルタルの絶乾状態における単位体積質量（kg/m³）である。

6.2.3 解析パラメーターの決定

各種解析パラメーターのうち、水蒸気拡散係数については、実験でも確認されたコンクリート中の塩化物イオン量増加に伴う水分の蒸発性の低下は考慮せず、第4章で検討および定式化したものを使用する。また、液状水の移動速度および見かけの拡散係数も同様に第4章で検討したものを使用する。そこで本節では、表面塩化物イオン量について検討する。

6.2.3.1 表面塩化物イオン量

次に乾燥過程および吸水過程における表面塩化物イオン量について検討する。

乾燥過程において、表面塩化物イオン量は、塩水からの恒常的な塩化物イオンの供給がなくなるため、コンクリート内部への拡散により減少するものと考えられる。しかしその一方で、乾燥による塩化物イオンの表面濃縮により増加するものと考えられる。本検討では、乾燥期間が7日間と短く、乾燥による塩化物イオンの表面濃縮はないものと仮定しているため、表面塩化物イオン量は、吸水過程では第4章で検討した式 6.2-6 および式 6.2-7 に従って増加し、乾燥過程では直前の吸水過程終了時の表面塩化物イオン量から自由拡散して、吸水過程に移行することで表面塩化物イオン量が再び上昇するものとした。

図 6.2-1 に乾湿繰返しにおける表面塩化物イオン量の経時変化のイメージを示す。

$$C_0 = C_{0ini} + F[1 - \exp(-Gt)] \quad \text{式 6.2-6}$$

$$C_{0ini} = \frac{\theta_{sat}}{100} \times \frac{C_{NaCl}}{100} \times \frac{35.5}{58.5} \times \gamma_{SP} \quad \text{式 6.2-7}$$

ここで、 C_0 ：表面塩化物イオン量(kg/m³)、 C_{0ini} ：塩水濃度の表面塩化物イオン量への換算値(kg/m³)、 F 、 G ：実験係数、 θ_{sat} ：飽和状態における含水率、 C_{NaCl} ：塩水の質量パーセント濃度(%)、 γ_{SP} ：供試体の絶乾単位体積質量(kg/m³)である。

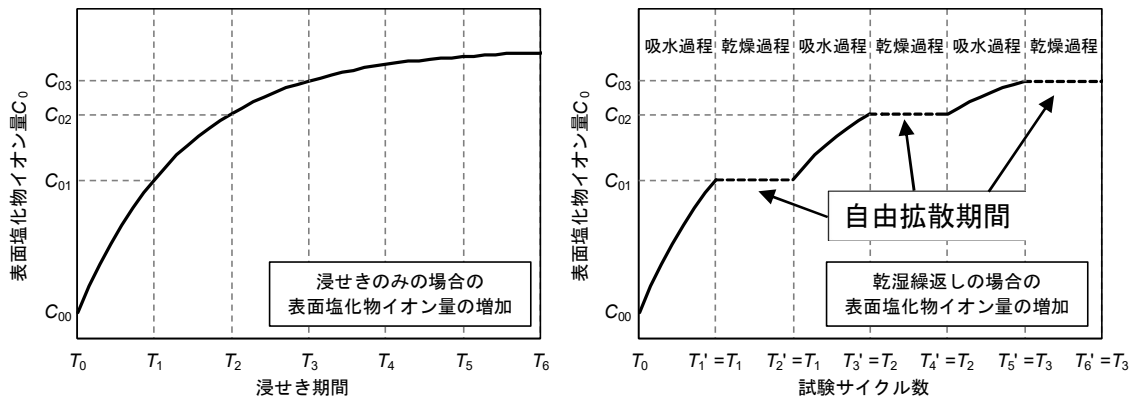


図 6.2-1 乾湿繰返しにおける表面塩化物イオン量の経時変化のイメージ図

6.3 数値解析によるモデルの適用性の検証

本節では、本章にて提案した、乾湿繰返しにおける水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデルの妥当性を検証するために、第5章の乾湿繰返し試験の数値解析を実施した。

6.3.1 解析条件

数値解析には、表 6.3-1 に示す材料物性値と表 6.3-2 に示す環境条件を解析の入力値として与えた。また、液状水の移動速度、水蒸気拡散係数、見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量は第4章で定式化したを使用した。

表 6.3-1 材料物性値

	OPC50	BB50	FB50
連続空隙量 V_{cnt} (mL/g)	0.0281	0.0213	0.0256
空隙屈曲度 τ	15.22	8	6.5
セメント種類の特性値 s	4.6	12.98	119.39

表 6.3-2 環境条件

		OPC50	BB50	FB50
初期 条件	水分移動解析	初期飽和度分布：100 %		
	塩分浸透解析	初期塩化物イオン量分布：0kg/m ³		
境界 条件	水分移動解析	乾燥過程 浸透面： $Sr_H=30\%$, $Sr_H=60\%$, $Sr_H=75\%$ 背面： $Sr=100\%$ 吸水過程 浸透面： $Sr=100\%$ 背面： $Sr=100\%$		
	塩分浸透解析	乾燥過程 浸透面： $C_{NaCl}=0\%$ 背面：0kg/m ³ 吸水過程 浸透面： $C_{NaCl}=10\%$ 背面：0kg/m ³		

● 液状水の移動速度

$$\text{液状水の移動速度： } v_{cap} = \alpha\beta \cdot \exp(-\beta \cdot t) \quad \text{式 6.3-1}$$

$$\text{背面封鎖： } \alpha = 9.77 \times 10^3 \cdot \omega - 1.57 \quad \text{式 6.3-2}$$

$$\text{背面開放： } \alpha = 11.09 \times 10^3 \cdot \omega - 1.99 \quad \text{式 6.3-3}$$

$$\text{背面封鎖\&背面開放： } \beta = -3.43 \times 10^2 \cdot \omega + 0.53 \quad \text{式 6.3-4}$$

ここで, α , β : 実験係数, ω : 空隙構造係数, v_{cap} : 液状水の移動速度 (cm/day), t : 時刻 (day)である.

● 水蒸気拡散係数

$$D_v = c \cdot \lambda \quad \text{式 6.3-5}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\partial W}{\partial H} \quad \text{式 6.3-6}$$

ここで, H : 空隙中の相対湿度, W : 空隙中の水分量 (g/g), D_v : 水蒸気拡散係数, $1/\lambda$: 湿気容量 (吸脱着等温線の傾き), c : 透湿率 (g/(cm・day・RH))である.

$$W = \frac{ksW_m H}{(1 - kH)[1 + (s - 1)kH]} \quad \text{式 6.3-7}$$

ここで, W : 水分吸着量 (g/g), W_m : 単分子層吸着量 (g/g), H : 相対湿度, k , s : 実験係数である.

$$\frac{\partial W}{\partial H} = \frac{ksW_m + Wk[1 + (s - 1)kH] - Wk(1 - kH)(s - 1)}{(1 - kH)[1 + (s - 1)kH]} \quad \text{式 6.3-8}$$

ここで, W : 水分吸着量 (g/g), W_m : 単分子層吸着量 (g/g), H : 相対湿度, k , s : 実験係数である.

$$\text{吸湿過程： } W_m = 5.32\omega + 0.0034 \quad \text{式 6.3-9}$$

$$\text{乾燥過程： } W_m = 5.81\omega + 0.0071 \quad \text{式 6.3-10}$$

ここで, W_m : 単分子層吸着量 (g/g), ω : 空隙構造係数である.

$$\text{吸湿過程： } k = -88.34\omega + 0.97 \quad \text{式 6.3-11}$$

$$\text{乾燥過程： } k = -102.22\omega + 0.94 \quad \text{式 6.3-12}$$

ここで、 k ：実験係数、 ω ：空隙構造係数である。

● 見かけの拡散係数

$$\text{Log}_{10} D_{ap} = a \exp(-bt) - c \quad \text{式 6.3-13}$$

ここで、 D_{ap} ：見かけの拡散係数 (cm²/day), t ：時刻(day), a, b, c ：実験係数である。

$$a = -3.6 \times 10^2 \cdot \omega + 1.9 \quad \text{式 6.3-14}$$

$$b = 93.81 \cdot \omega + 0.0068 \quad \text{式 6.3-15}$$

$$c = -9.6 \times 10^2 \cdot \omega + 3.3 \quad \text{式 6.3-16}$$

ここで、 a, b, c ：実験係数、 ω ：空隙構造係数である。

● 表面塩化物イオン量

$$C_0 = C_{0ini} + F[1 - \exp(-Gt)] \quad \text{式 6.3-17}$$

$$C_{0ini} = \frac{\theta_{sat}}{100} \times \frac{C_{NaCl}}{100} \times \frac{35.5}{58.5} \times \gamma_{SP} \quad \text{式 6.3-18}$$

ここで、 C_0 ：表面塩化物イオン量(kg/m³), C_{0ini} ：塩水濃度の表面塩化物イオン量への換算値 (kg/m³), F, G ：実験係数, t ：時刻 (day), θ_{sat} ：飽和状態における含水率, C_{NaCl} ：塩水濃度 (%), γ_{SP} ：供試体の絶乾単位体積質量 (kg/m³)である。

$$F = -6.0 \times 10^3 \cdot \omega + 21.0 \quad \text{式 6.3-19}$$

$$G = 1.4 \cdot \omega + 0.020 \quad \text{式 6.3-20}$$

ここで、 F, G ：実験係数、 ω ：空隙構造係数である。

6.3.2 解析結果

(1) 水分移動解析結果

水分移動解析の結果を配合ごとに図 6.3-1～図 6.3-3 にそれぞれ示す。いずれの配合、乾燥湿度においても、乾湿繰返し履歴による表層部での水分の出入りが数値解析により再現されている。ただし、乾燥過程後の表層部の乾燥領域は、吸水過程に移行することで完全に飽和した状態となっており、つまり乾燥領域に存在した空気が消失していることになる。しかし、第 5 章の実験結果でも明らかなように、実際には間隙空気圧の影響により、吸水による水分移動が抑制されるため、吸水過程において供試体内部は完全な飽和状態には至らないことが示されている。また、全サイクルを通じて、乾湿繰返しによる飽和度分布の変化は乾燥過程、吸水過程のそれぞれで同一の経路を辿っているが、これはサイクル数にかかわらず乾燥量と吸水量が変化していないことになり、第 5 章の実験結果で確認された、塩化物イオンの浸透に伴う水分の蒸発性が低下する傾向とは一致していない。以上のことから、現状の本モデルは、乾湿繰返しによる水分移動を過大に評価しているため、間隙空気圧や水分の蒸発性の低下を考慮したモデルへの改善が今後の課題となる。

(2) 塩化物イオン浸透解析結果

次に、塩化物イオン浸透解析の結果を配合ごとに図 6.3-4～図 6.3-6 にそれぞれ示す。数値解析により、いずれのケースにおいても、乾湿繰返し履歴による、浸透面近傍での液状水の移動に伴った塩化物イオンの急速な浸透が示されており、既往の Fick の拡散モデルとは異なる塩化物イオンの浸透分布を示していることが確認された。特に、乾燥湿度が低い場合では、液状水の移動に伴う塩化物イオンの浸透は顕著に現れ、一方で、乾燥湿度が高く場合は、液状水の移動の影響は小さくなり、Fick の拡散モデルに近い分布に遷移していく傾向が確認できる。また、実測値との比較として、液状水の移動の影響が顕著であった浸透面から 1cm までの全塩化物イオン量に着目すると、図 6.3-7 に示すように、浸透面から 1cm までの全塩化物イオン量は実測値と解析値で高い相関性を示しており、浸透面近傍での液状水の移動に伴う塩化物イオンの浸透を十分に評価できていることが確認された。ただし、浸透面から 1cm 以降の内部での総塩化物イオン量を比較すると、図 6.3-8 に示すように、解析値では過大に評価している傾向が確認できる。これは、水分移動解析でも述べたように、間隙空気圧の影響を考慮していないため、浸透面から 1cm 以降まで液状水の移動に伴う塩化物イオンの浸透の影響が及んでいることが原因と考えられる。そのため、第 4 章で用いた飽和限界線などの間隙空気圧の影響を考慮することで、モデルの高精度化が期待できる。

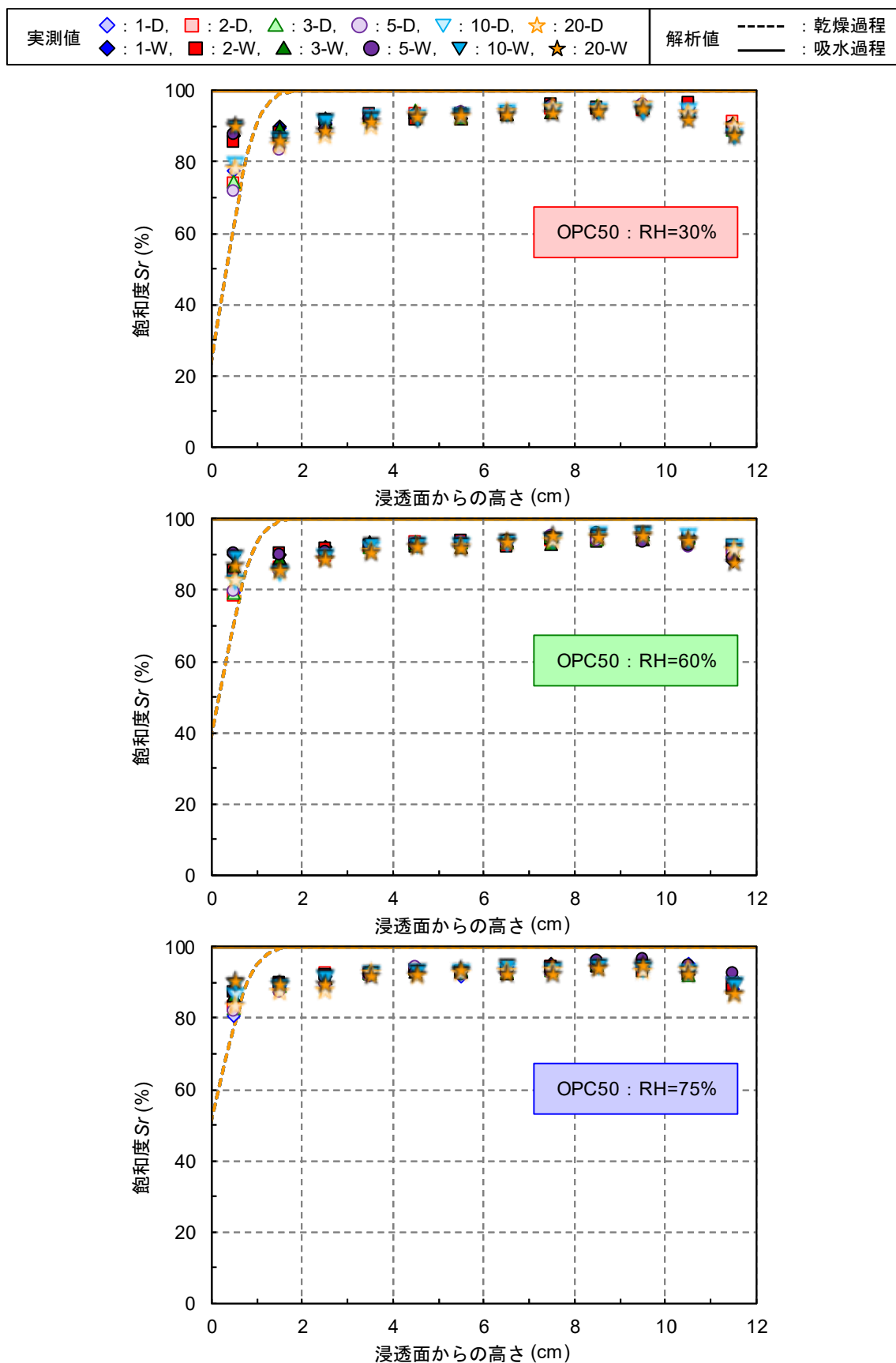


図 6.3-1 乾湿繰返し試験の水分移動解析結果 (OPC50)

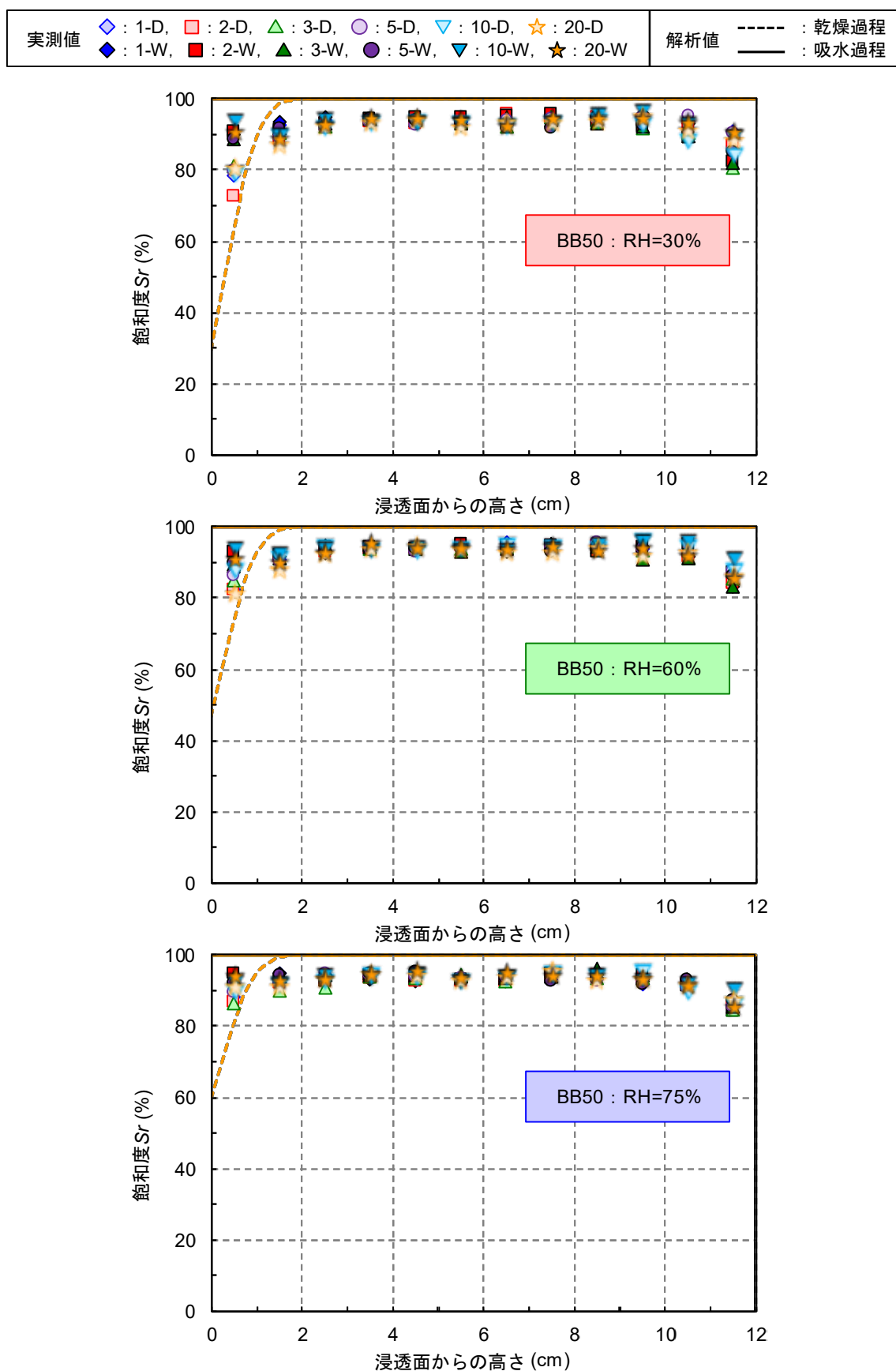


図 6.3-2 乾湿繰返し試験の水分移動解析結果 (BB50)

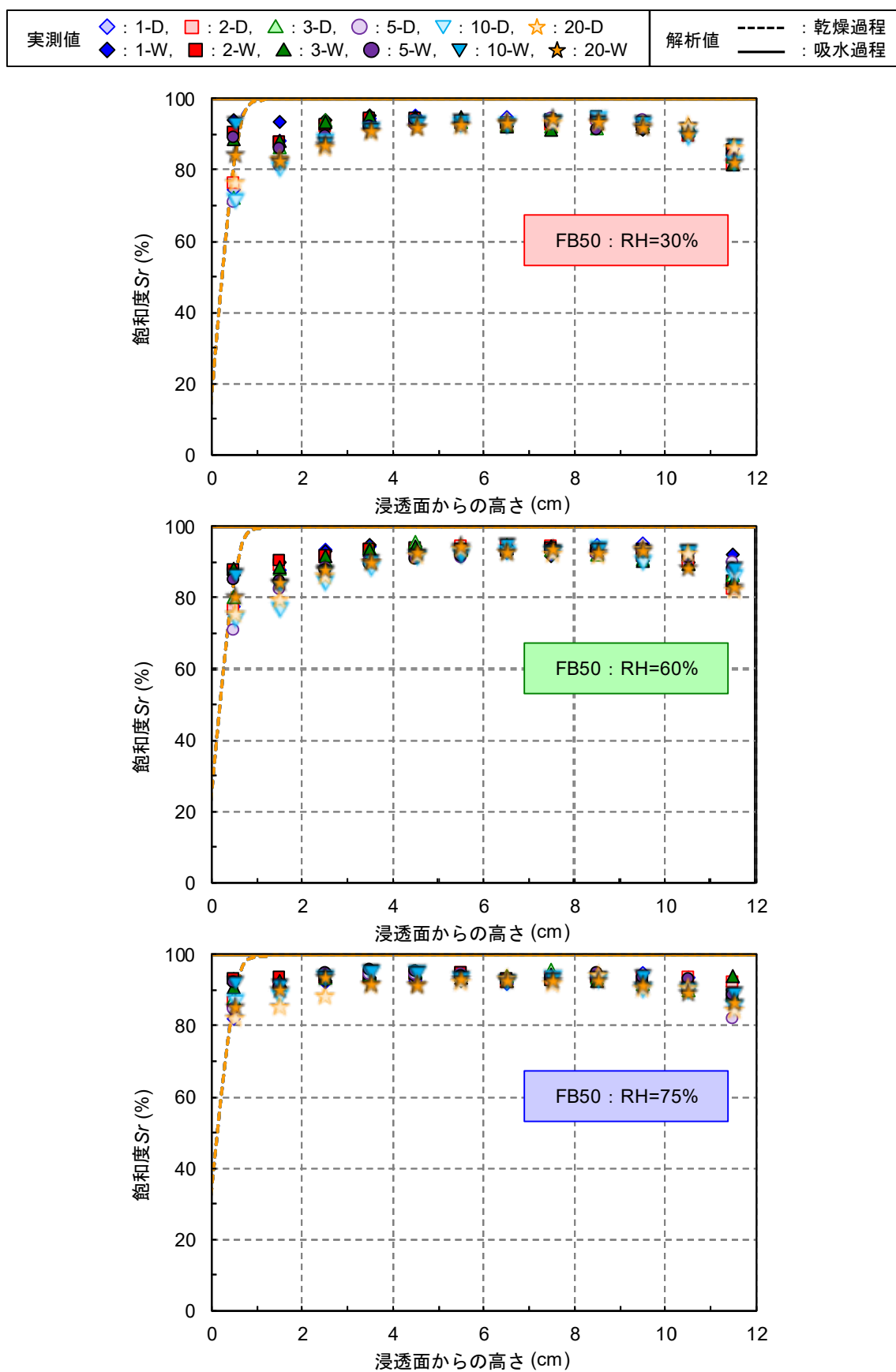


図 6.3-3 乾湿繰返し試験の水分移動解析結果 (FB50)

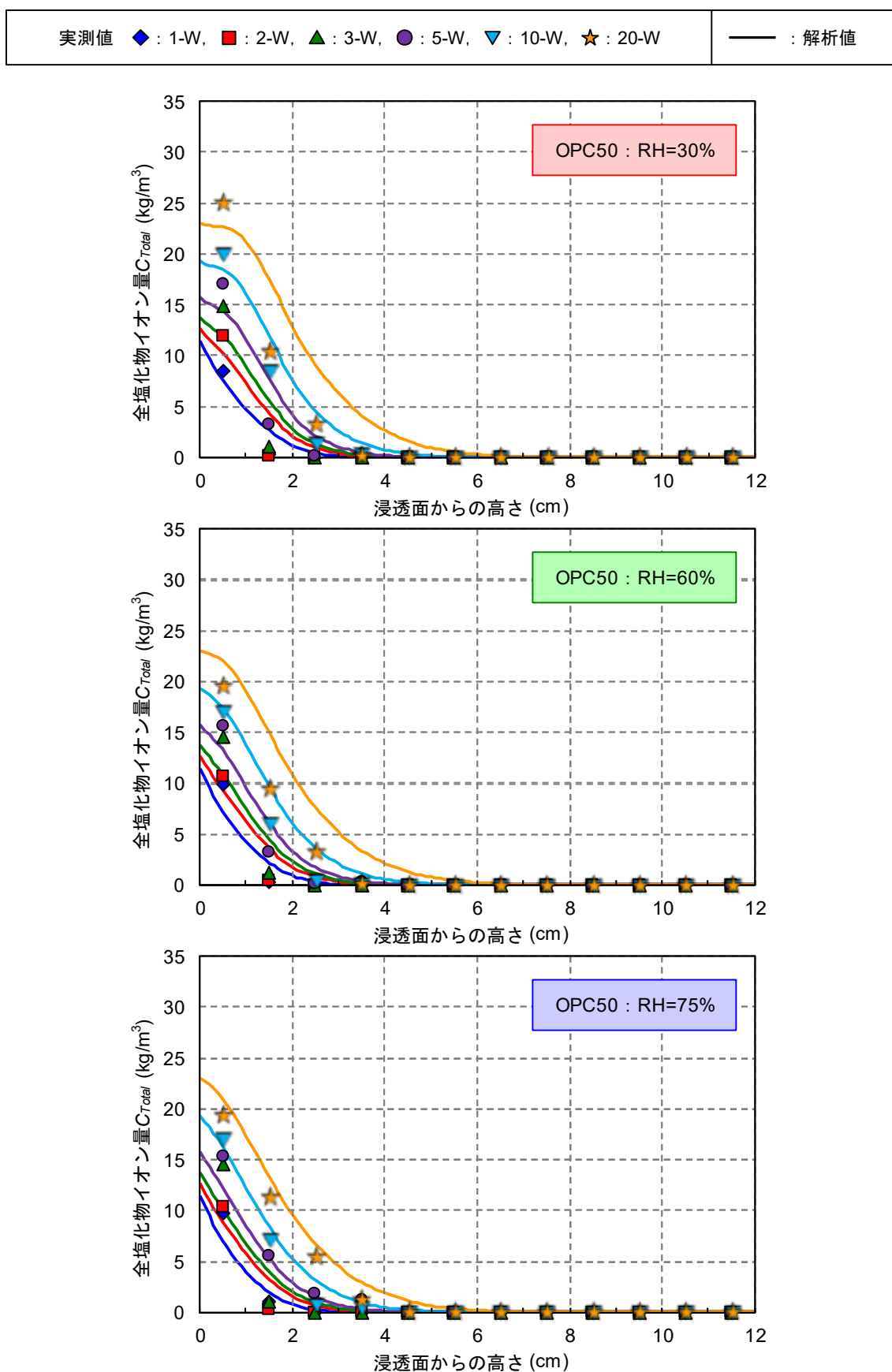


図 6.3-4 乾湿繰返し試験の塩化物イオン浸透解析結果 (OPC50)

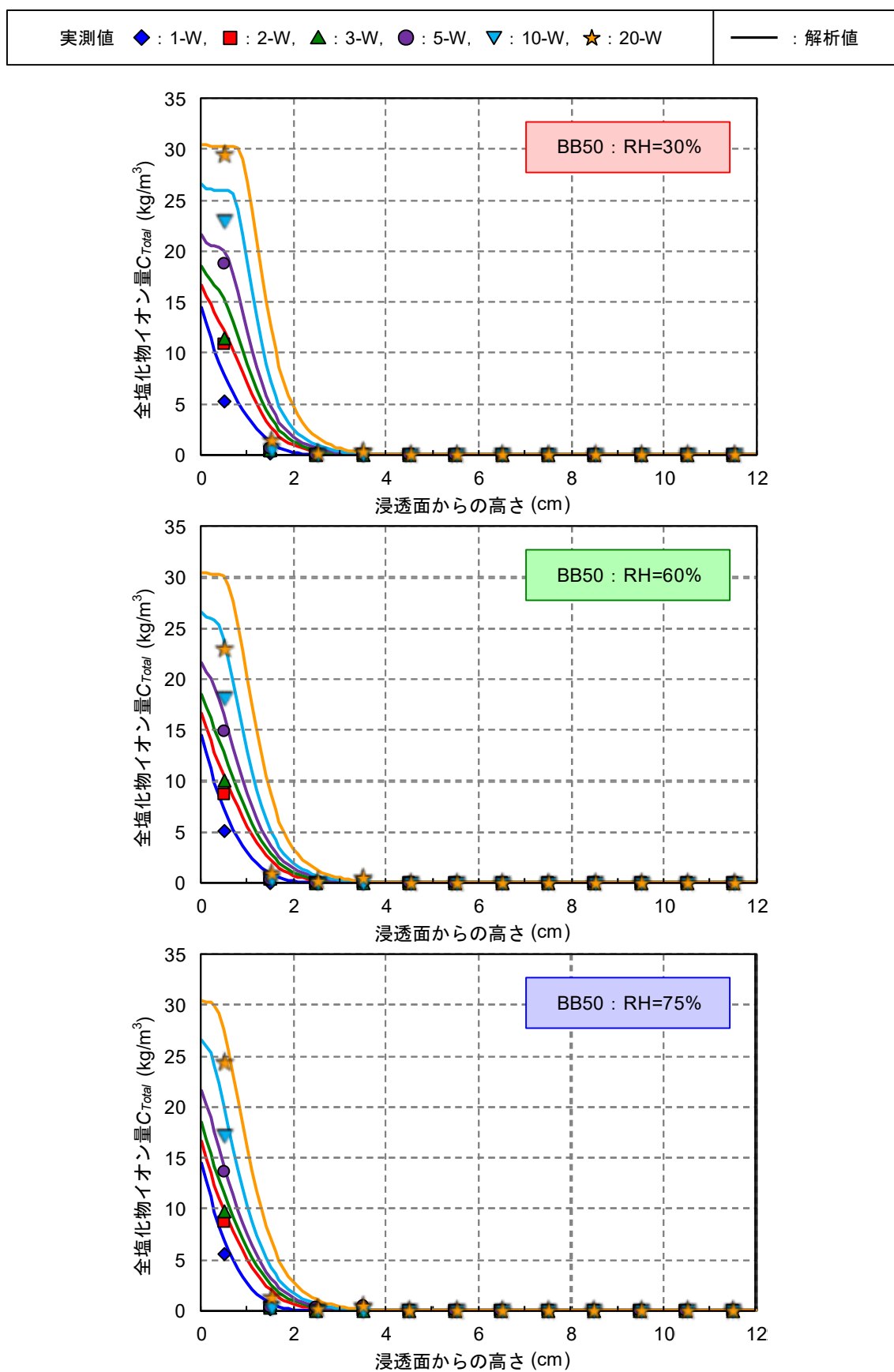


図 6.3-5 乾湿繰返し試験の塩化物イオン浸透解析結果 (BB50)

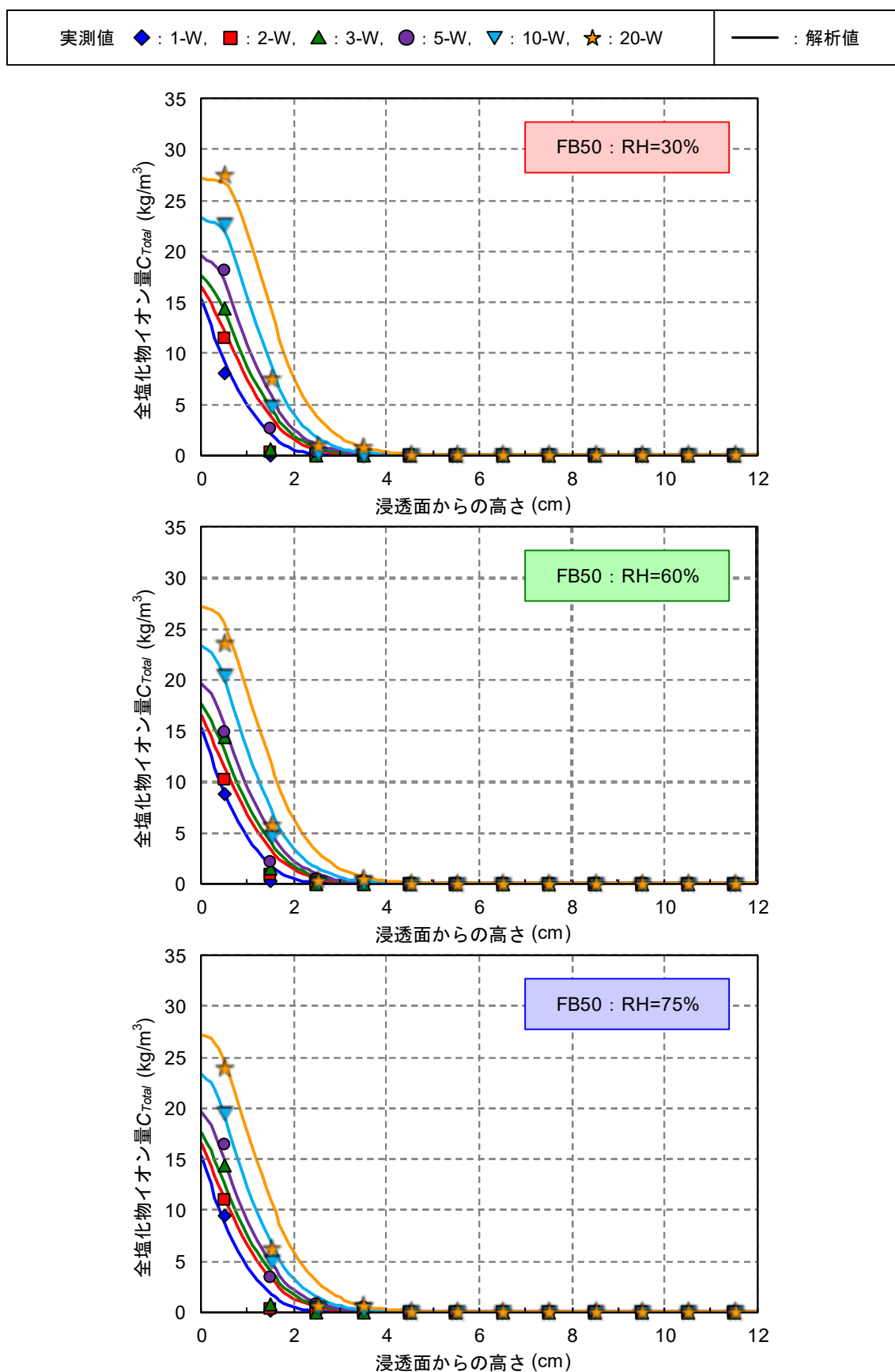


図 6.3-6 乾湿繰返し試験の塩化物イオン浸透解析結果 (FB50)

◆ : 1サイクル, ■ : 2サイクル, ▲ : 3サイクル, ● : 5サイクル, ▼ : 10サイクル, ★ : 20サイクル
 マーカ色 (赤) : RH=30%, マーカ色 (緑) : RH=60%, マーカ色 (青) : RH=75%

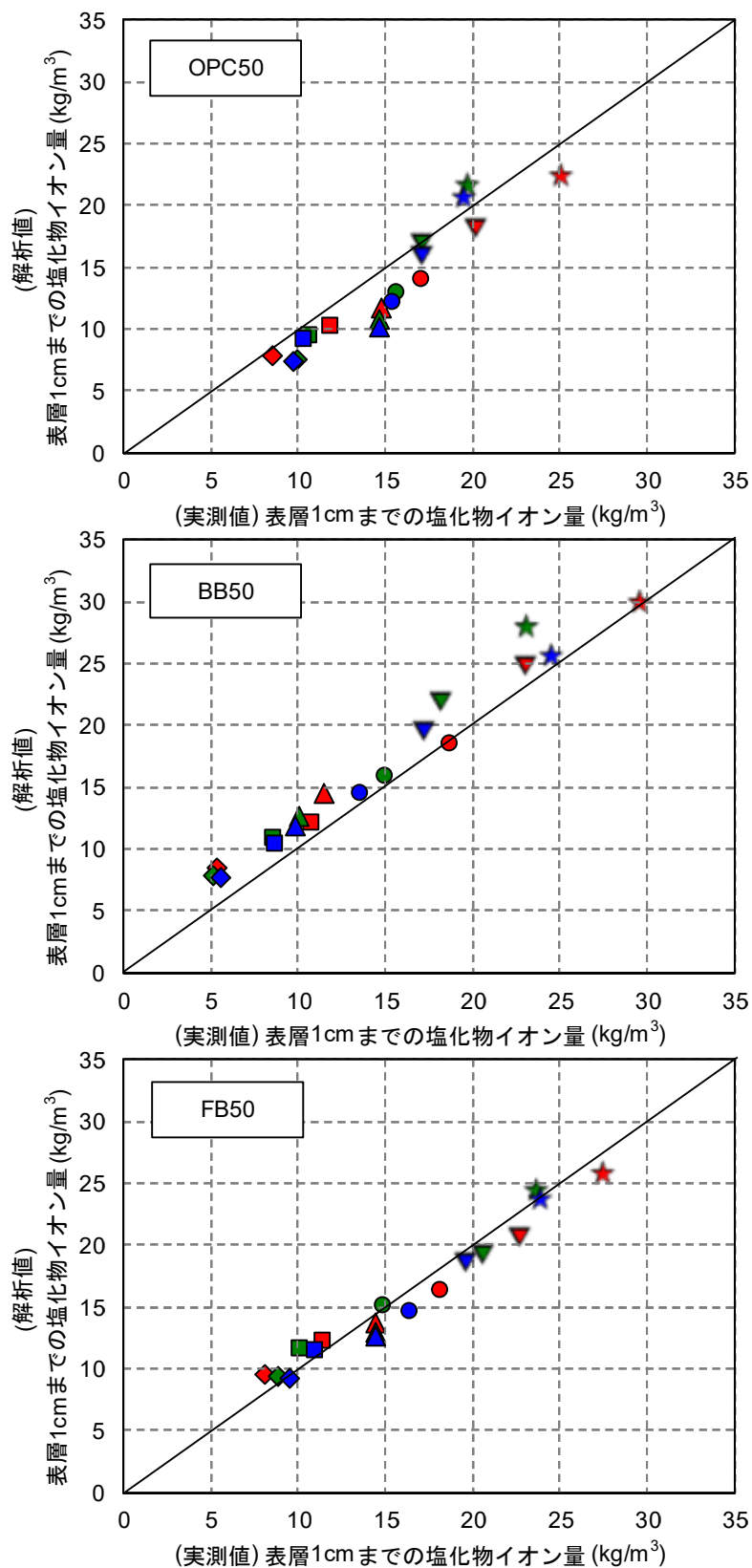


図 6.3-7 浸透面から 1cm までの塩化物イオン量の比較

◆ : 1サイクル, ■ : 2サイクル, ▲ : 3サイクル, ● : 5サイクル, ▼ : 10サイクル, ★ : 20サイクル
 マーカ色 (赤) : RH=30%, マーカ色 (緑) : RH=60%, マーカ色 (青) : RH=75%

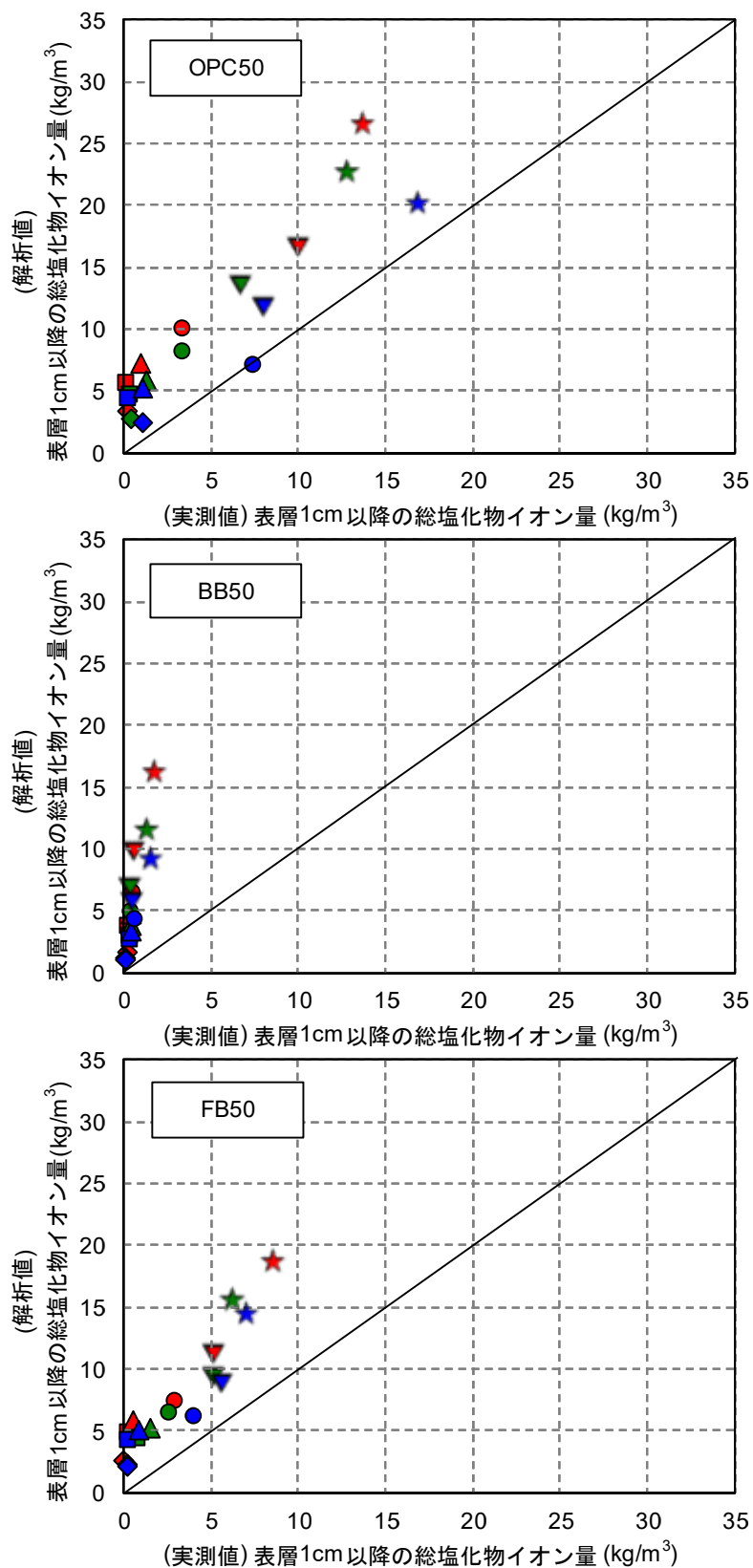


図 6.3-8 浸透面から1cm以降の総塩化物イオン量の比較

6.4 本章のまとめ

本章では第5章の「乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートの塩化物イオン浸透特性に関する実験的検討」から得られた結果を基に、乾燥過程と吸水過程のそれぞれで水分移動モデルおよび塩化物イオンの浸透モデルを規定した、乾湿繰返し履歴を考慮した塩化物イオン浸透モデルを構築した（表 6.4-1）。

表 6.4-1 乾湿繰返し履歴を考慮した塩化物イオンの浸透モデル

	乾燥過程	吸水過程
水分移動モデル	秋田モデル	移流拡散モデル
塩化物イオン浸透モデル	Fick の拡散モデル	移流拡散モデル

以下に、数値解析と実験結果との比較による本モデルの妥当性の検証結果をまとめる。

● 水分移動解析結果

乾湿繰返し履歴における、乾燥過程の乾燥面からの飽和度の低下および吸水過程の浸透面からの飽和度の増加の傾向を概ね再現できることが確認できた。ただし、間隙空気圧や塩化物イオンの浸透に伴う水分の蒸発性の低下を考慮していないため、乾湿繰返しによる水分移動を実測値よりも過大に評価する傾向も確認された。

● 塩化物イオン浸透解析結果

数値解析結果から、乾湿繰返し履歴による浸透面近傍での水分移動に伴った塩化物イオンの急速な浸透の傾向が示されており、乾燥湿度が低い場合は水分移動に伴った塩化物イオンの浸透が顕著に現れ、一方で乾燥湿度が高い場合は、水分移動の影響は小さくなり、Fick の拡散モデルに近い分布を示すことが確認された。

また、実測値との比較では、水分移動の影響が含まれた浸透面から 1cm までの全塩化物イオン量は、実測値と解析値で高い相関性を示しており、浸透面近傍での水分移動に伴う塩化物イオンの浸透を十分に評価できていることが確認された。ただし、浸透面から 1cm 以降の総塩化物イオン量は実測値よりも過大に評価する傾向があり、これは、水分移動解析でも述べた、乾湿繰返しによる水分移動を過大に評価していることに起因しているものと考えられた。

参考文献

- 1) 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, pp.61-69, 1990.
- 2) 香川雄治, 下村匠: コンクリート細孔組織中における液状水移動と水蒸気移動の分離評価, 土木学会第60回年次学術講演会, V-269, pp.537-538, 2005.

第7章

乾湿繰り返し履歴を考慮した塩化物イオン 浸透予測手法の提案

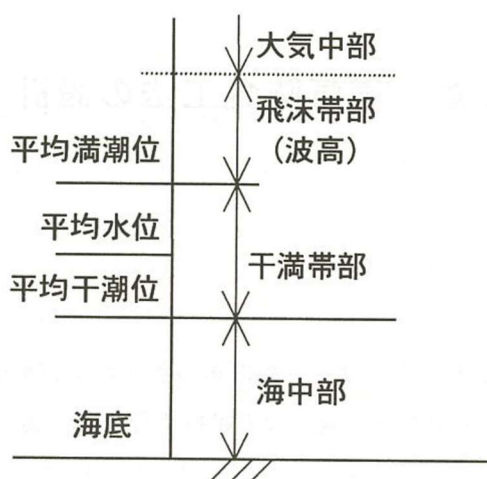
7.1 概要

ここまで「吸水に伴う塩化物イオン浸透モデル」、これを包含した「乾湿繰り返し履歴を考慮した塩化物イオン浸透モデル」について各種実験の結果を基に構築を行った。本章ではこの「乾湿繰り返し履歴を考慮した塩化物イオン浸透モデル」を用いて、海洋環境下にある構造物への塩化物イオンの浸透評価手法の提案を行う。

7.2 適用範囲

海洋環境下は、一般的に図 7.2-1 に示す海中部、干満帯、飛沫帯および海上大気中の4つに分類され、それぞれの環境で乾湿の状況は複雑で、湿度や温度なども大きく異なるため、構造物ごとあるいは構造物の部位ごとに塩化物イオンの浸透機構が異なる。

例えば、海中部では、構造物は常時海水に晒され、コンクリートは飽和状態となるため、塩化物イオンは濃度拡散による浸透が卓越する。一方、干満帯においては、潮汐により1日に2回の乾湿を受けることになり、表層部では吸水に伴った塩化物イオンの浸透が、内部では飽和状態、もしくはそれに近い状態であるため、濃度拡散による浸透がそれぞれ支配的となる。また、飛沫帯も、干満帯と同様な乾湿繰り返し履歴を受ける環境であるが、干満帯に比べて乾燥期間が長いため、吸水に伴う塩化物イオンの浸透の影響はより顕著となることが考えられる。海上大気中では、これまでの3環境と異なり、海水が直接接触することで塩化物イオンが浸透するのではなく、海水中の塩化物イオンが、風波の影響で発生した海塩粒子として風に運ばれて構造物に付着することで、濃度拡散により浸透する。



解説図 2.1.1 海洋環境の区分の定義

図 7.2-1 海洋環境の区分と定義

以上のことを踏まえて、乾湿繰返し履歴を考慮した塩化物イオンの浸透モデルは表 7.2-1 に示す干満帯や飛沫帯が適用対象となる。

表 7.2-1 乾湿繰返し履歴を考慮した塩化物イオン浸透モデルの適用範囲

	浸透予測に適したモデル	乾湿繰返しの間隔
海中部	Fick の拡散モデル	湿潤=∞日，乾燥=0 日
干満帯	乾湿繰返し履歴を考慮した 塩化物イオン浸透モデル	湿潤=0.5 日，乾燥=0.5 日
飛沫帯		湿潤=0.5 日，乾燥=0.5～100 日

7.3 乾湿繰返し履歴を考慮した塩化物イオン浸透シミュレーション

本節では、7.2 節で提案した、乾湿繰返し履歴を考慮した塩化物イオン浸透モデルの適用範囲である干満帯および飛沫帯での塩化物イオン浸透のシミュレーションを行った。また、比較として Fick の拡散モデルによる海中部のシミュレーションも併せて行った。

以下にシミュレーションの条件を述べる。

本研究で構築したモデルでは、シミュレーションを行うために必要な材料物性値は連続空隙量、空隙屈曲度、およびセメント種類のみであり、ここでは水セメント比 50%の普通コンクリートを想定して、材料物性値は本研究で用いた OPC50 と同じ 表 7.3-1 とした。また、初期条件および境界条件は表 7.3-2 に示すとおりで、乾燥湿度は干満帯では 95%，飛沫帯では 60%とし、塩水濃度は海水と同じ 3.5%とした。さらに、干満帯と飛沫帯の乾湿繰返し履歴のサイクル条件は表 7.3-3 とした。

7.3.1 シミュレーションの結果

図 7.3-1 に海中部、干満帯、飛沫帯での塩化物イオンの浸透シミュレーションの結果を示す。コンクリート表層 1cm までの塩化物イオンの浸透状況は海中部、干満帯、飛沫帯の 3 環境で大きく異なり、干満帯および飛沫帯では液状水の移動による塩化物イオンの一様な浸透状況が確認できる。特に、飛沫帯では液状水の移動の影響が顕著であることから、暴露 3 年では、海中部や干満帯に比べて表層 1cm 以降での塩化物イオン量は高い傾向にある。

表 7.3-1 材料物性値

	OPC50
連続空隙量 V_{cnt} (mL/g)	0.0281
空隙屈曲度 ω	15.22
セメント種類の特性値 s	4.6

表 7.3-2 初期条件および境界条件

初期 条件	水分移動解析	初期飽和度分布：100 %
	塩分浸透解析	初期塩分分布：0kg/m ³
境界 条件	水分移動解析	乾燥過程 浸透面：干満帯 $Sr_H=95\%$ 飛沫帯 $Sr_H=60\%$ 背面： $Sr=100\%$ 吸水過程 浸透面： $Sr=100\%$ 背面： $Sr=100\%$
	塩分浸透解析	乾燥過程 浸透面： $C_{NaCl}=0\%$ 背面：0kg/m ³ 吸水過程 浸透面： $C_{NaCl}=3.5\%$ 背面：0kg/m ³
暴露期間		1 年, 2 年, 3 年

表 7.3-3 乾湿繰り返し履歴の設定条件

	乾湿繰り返しの間隔
海中部	湿潤=∞日, 乾燥=0 日
干満帯	湿潤=0.5 日, 乾燥=0.5 日
飛沫帯	湿潤=0.5 日, 乾燥=3 日

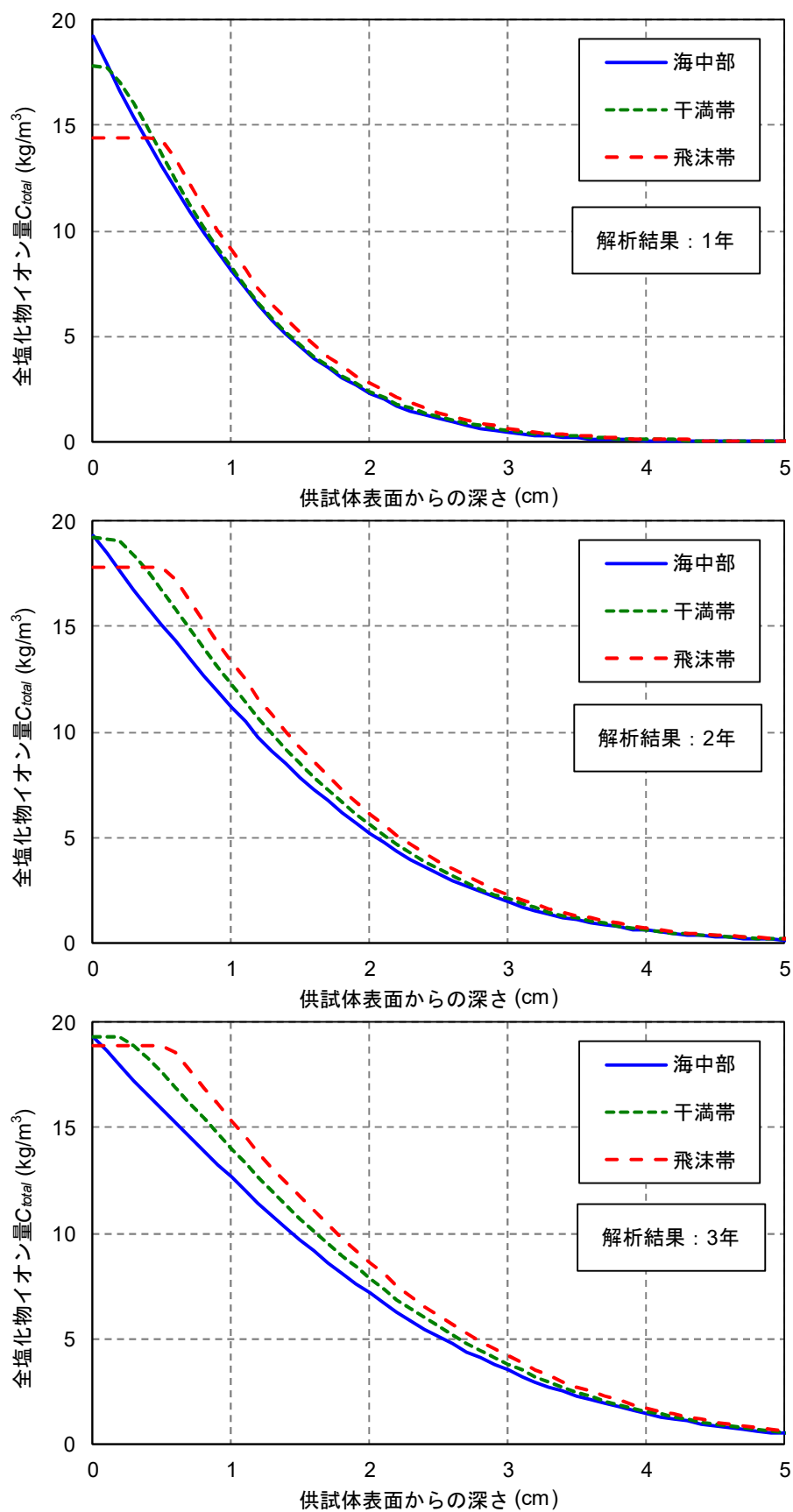


図 7.3-1 各海洋区分における塩化物イオンの浸透シミュレーションの結果

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法 設計施工指針(案), pp.62-63, 2001.

第8章

結論

現在、コンクリート中への塩化物イオンの浸透予測手法として用いられる Fick の拡散方程式による濃度拡散モデルは、モデルとしての簡便さや優れた適用性から多くの塩害に対する耐久性照査に用いられてきた。一方で、実環境における塩化物イオンの浸透の駆動力は濃度拡散だけではなく、乾湿繰り返しに伴う水分移動の影響や塩化物イオンの吸着・固定化、さらには中性化に伴う塩化物イオンの濃縮など、様々であり、現状ではこれらをまとめて巨視的な拡散現象として扱っている。しかし、実構造物のほとんどが、干満帯や飛沫帯のように、乾燥と海水の供給がある、乾湿繰り返し履歴を受ける環境に曝されていることから、水分移動を濃度拡散に包含したままにするのは必ずしも好ましくはない。現行の鉄筋コンクリート構造物の設計や維持管理計画における塩害耐久性照査では、見かけの拡散係数は同一材料であっても環境条件によって変えて水分移動やその他塩分浸透の要因を考慮している。しかし近年では、水分移動の影響により、遮塩性の優れたコンクリートでは塩化物イオンの拡散場となる液状水の移動が抑制され、塩化物イオンの浸透が停滞する、濃度拡散では説明できない現象も報告されている。このように、現行の塩化物イオンの濃度拡散モデルでは、水分移動の影響は予測の精度を大きく狂わせる可能性をはらんでいる。にもかかわらず、空隙中の液状水の移動に伴う塩化物イオンの移動特性に関して、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は殆どなく、未だ不明瞭な点が多い。

そこで本研究では、コンクリートが吸水を受ける場合や乾湿履歴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、そのメカニズムを明らかにするとともに、水分移動を考慮した塩化物イオン浸透予測手法の構築およびその適用範囲を示すことを目的とした。

本章では、各章での検討内容と得られた結果について総括した。

第1章は、まず現在の鉄筋コンクリート構造物の塩害耐久性に対する設計指針および維持管理体系について述べ、現行の塩化物イオンの浸透評価手法の有用性と問題点を挙げた。そして、水分移動が塩化物イオンの浸透評価に及ぼす影響について述べることで、本論文の背景および目的とした。

第2章は、塩害におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透媒介である水に着目して、コンクリート中における水分移動現象の分類について述べ、これまでに多くの研究者らにより検討されてきた水分移動モデルについて整理した。また、鉄筋コンクリート構造物に対する塩害の劣化機構や、塩害の耐久性照査で用いられる塩化物イオンの濃度拡散モデルについて述べるとともに、塩化物イオン浸透における水分移動問題について取り上げ、現行の濃度拡散モデルの課題点を抽出した。

第3章は、未だ十分に検討されていない、コンクリート中における水分移動が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を把握するために、疑似飽和状態および絶乾状態のモルタルを使用して、吸水現象における水分移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透を水セメント比やセメント種類の影響に着目して実験的に検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- ・モルタル中の水分状態が疑似飽和状態の場合、吸水現象は確認されず、塩化物イオンの浸透は Fick の濃度拡散モデルに従った。
- ・絶乾状態から吸水を受けると、短時間で急速に水分がモルタル内部に移動することが確認された。その時の飽和度分布の特徴として、浸透面から直線型の分布を示す液状水の移動と、拡散型の分布を示す水蒸気拡散が存在する。
- ・さらに、この時の塩化物イオンの浸透状況は Fick の濃度拡散モデルに従わず、液状水の移動に伴う浸透と濃度拡散による浸透と移流拡散現象に従っている。
- ・吸水による水分移動特性は、水セメント比やセメント種類の影響を強く受け、特に低水セメント比や高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材を使用することで、水分移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透を著しく抑制する。
- ・また、水セメント比やセメント種類の影響はすべて空隙構造に帰着され、水分移動深さや塩化物イオンの浸透深さ、そして見かけの拡散係数は空隙構造と良好な相関を示した。

第 4 章では、第 3 章の「吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討」から得られた結論を基に、吸水現象を受けるコンクリートへの水分移動モデルおよびそれに伴う塩化物イオンの浸透モデルの構築を行った。

数値解析の結果、今回構築した水分移動モデルは、空隙内部に拘束された空気の影響を十分に評価できなかったものの、液状水の移動と水蒸気拡散による水分移動の大まかな傾向は捉えられており、高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材を使用したケースで確認された、液状水の移動停止も再現できた。

第 5 章は、異なる乾燥条件での乾湿繰り返し試験を実施して、乾湿繰り返し履歴における水分移動特性および塩化物イオン浸透特性を実験的に検討した。

その結果、以下の結論が得られた。

- ・乾湿繰り返し履歴において、乾燥過程時の乾燥湿度が低いほど供試体表面での飽和度の低下が顕著となったが、乾燥が認められた深さは乾燥湿度によらず 3～4cm 程度となる。
- ・また、サイクル数の経過に伴って乾燥過程における水分乾燥量が減少する傾向が確認された。これは、サイクル経過で供試体空隙中の塩化物イオン濃度が増加し、水蒸気圧降下により、水分が乾燥しにくくなったからである。そして、供試体表層の塩化物イオン濃度と乾燥量との間に良好な相関関係が示された。
- ・一方、吸水過程では、乾燥過程から吸水過程に移行することで、乾燥した領域への水分移動が確認された。しかし、飽和度分布は初期状態の飽和状態にまでは戻らず、むしろ吸水による液状水の移動は浸透面からの 1 点目で停止しており、1cm 以降では水分の移動は認められなかった。これは、供試体空隙中の空気の拘束が考えられ、乾燥よりの空隙中の液状水が逸散することで空気が残り、吸水過程に移行した際に、残った空気は抜けることなく空隙中に取り込まれることで、吸水過程での液状水の移動を阻害したと考えられた。

第8章 結論

- ・ただし、塩化物イオンの阻害は確認されず、拘束空気により分断された空隙以外の液状水で満たされた連続している空隙を介して、塩化物イオンは内部へ拡散浸透したことが考えられた。

第6章では、第5章の「乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートの塩化物イオン浸透特性に関する実験的検討」から得られた結論を基に、乾湿繰返し履歴を受けるコンクリートへの水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデルの構築を行った。まず、乾燥過程における水分移動は、既往の秋田モデルを適用した。一方、吸水過程では、供試体表層 1cm までを第5章で検討した吸水現象における水分移動モデルおよび塩化物イオンの浸透モデルを適用し、以深ではこれまでの拡散モデルとした。数値解析の結果、乾湿繰返し履歴による供試体表層部での塩化物イオン量の増加現象を評価できた。

第7章は、第5章および第6章をとおして構築した「水分移動を考慮した塩化物イオン浸透モデル」について、数値シミュレーションをおこない、現行の拡散モデルで対応できる範囲と水分移動を考慮した本モデルを適用すべき範囲を明確にした。

第8章は、各章で得られた結果を取りまとめて結論とした。

最後に、コンクリート中の塩化物イオンの浸透は濃度拡散のみならず、水分移動や固定化・吸着など様々な要因を包含した複雑な現象であり、未だ不明瞭な点も多い。しかし、これら塩化物イオンの浸透要因を明確にすることは、塩化物イオンの浸透予測の高精度化のみならず、塩害を抑制する新材料・新工法にも繋がるため極めて重要である。そういった中で、本研究の成果が、今後の鉄筋コンクリート構造物の設計および維持管理の一助となれば幸いである。

謝辞

本論文は、(主査) 山口明伸教授、(副査) 武若耕司教授、(副査) 北村良介名誉教授、(副査) 木村至伸准教授、(副査) 酒匂一成准教授のご指導の下、鹿児島大学大学院理工学研究科物質生産工学専攻建設システム工学講座コンクリート研究室において取りまとめたものです。

鹿児島大学 山口明伸教授には、本論文の主査として、ミーティングやゼミ、国内外の学会など様々な学びの機会を与えて頂き、平素から熱意をもってご指導して下さいましたことを、ここに厚く御礼いたします。山口先生には、一つの考え方に凝り固まりがちな私に対して、常に厳しさと優しさを以て、解決の糸口を提示して、進むべき道に導いて頂きました。また、予備審査から公聴会までの3ヶ月間は解析や論文執筆等で学生部屋に籠ることが多く、あまりに部屋から出ないことから、ご迷惑とご心配をおかけすることも多々ありました。それでも、博士後期課程として学位論文の執筆に至ることができたのはひとえに山口先生のおかげです。

来年度からは、鹿児島大学に就職し、これまでの教員と学生の関係から、上司と部下の関係となりますが、いち早く山口先生と並び立ち、社会の発展に貢献できるような研究者となるべく日夜精進してまいります。今後ともよろしくお願い致します。

鹿児島大学 武若耕司教授には、主指導教員および本論文における副査として、学位論文として終着点や本研究の今後の展望などで多くのアドバイスを頂きました。そして、コンクリート研究室での6年間の活動において、研究室内外問わず多くの人と出会い、たくさんことを学びました。そのなかで、いつも先生は熱心に指導して下さり、不義があれば心の底から叱って頂き、改めて自分の甘さを自覚することができました。また、コンクリートに対する情熱は人一倍であり、幅広くも深くも知識があり、それでもなお、日々研究や勉強を欠かさず、探究心や勉学に対する姿勢には頭が上がりません。今後は、研究者・教員として、ご指導、ご鞭撻の程何卒よろしくお願い致します。

鹿児島大学 北村良介名誉教授には、本論文の副査として、地盤工学の視点から様々なアドバイスをいただきました。また、研究の終着点に苦しんだ時には、課程博士号を取ることを意味を説いていただき、特に予備審査から公聴会までの3ヶ月間を頑張る原動力となりました。本研究について、北村先生とはまだまだ議論したいことが沢山ありますので、今度も議論の機会を設け、本研究テーマの研鑽に努めたいと思います。今後ともよろしくお願い致します。

鹿児島大学 木村至伸准教授には、本論文における副査として、主に解析分野に関して、構造分野からの視点でご指導をして頂き、本研究の円滑な遂行にあたり、大変貢献して頂きました。特に工学と理学の違いに関して、「我々が行っているのは工学で理学ではない」は印象的であり、今後の私の研究生活では、この言葉を常に念頭に置きたいと思います。来年度からも、何卒よろしくお願い致します。

鹿児島大学 酒匂一成准教授には、本論文における副査として、北村先生と同じく地盤工学の視点から、本研究の遂行における様々なアドバイスを頂きました。特に、水分移動のメカニズムに関する指摘は、本研究の将来発展において重要な位置づけであり、まだまだ多くの課題が残されていることを痛感しました。今後は、地盤工学の視点からの意見を請いに、酒匂先生を多々お尋ねすることもあるかと思えます。何卒よろしくお願い致します。

鹿児島大学 審良善和准教授には、本研究のアドバイザーとして、解析手法に関する指摘や本研究を実務でどう生かすか等、研究に関するアドバイスを頂きました。また、コンクリート研究室の先輩として、就職や私生活の悩みについても親身に相談に乗って頂きました。特に、就職の相談に際しては、産学官の各研究所での実務経験を生かして、研究所見学の機会を設けて頂くなど、大変ご尽力して頂き感謝の念が尽きません。来年度からは、研究者・教員としても、また、ご近所同士としても何卒よろしくお願い致します。

鹿児島大学工学部 前村政博技術専門職員には、本研究の実施にあたり、実験材料や器具を準備して頂きありがとうございました。また、谷山暴露試験場に行く際には、道中の車内で他愛もない世間話をしながら、退屈な時間を過ごすことなく、調査に取り組むことができました。今後ともよろしくお願い致します。

博士前期課程2年生 福重康平君、南国殖産株式会社 按貴彰君には、チーム塩害シミュレーションとして苦楽を共にしてきました。最後の2年間はデスクワークばかりで、実験の方は任せっきりになってしまったことは、本当に申し訳ありません。ですが、モルタルバー1500本を打設し、試験開始後は毎週のように供試体のカットと粉碎のサイクルを最後までやり切れたのは、福重君と按君の2人の力があったからこそ思っております。ありがとうございました。

株式会社 安藤・間組 坂本守氏には、氏が社会人ドクターで在籍していた時に、大変お世話になりました。学部4年次に坂本さんから学んだことは、その後の博士前期課程から博士後期課程の現在に至るまでの研究姿勢に大きな影響を与えたことは勿論、博士後期課程への進学を決意したきっかけの一つとなりました。今後とも、学会等でお会いした際には、何卒よろしくお願い致します。

住友大阪セメント 株式会社 山本誠氏には、社会人ドクターとして、鹿児島大学に来られていた3年間、度々食事に誘っていただき、研究や就職に関してだけではなく、学生の時の経験談を楽しく聞かせて頂きました。また、博士後期課程終了後も共同研究などで大学に来た際には、数多くの励ましの言葉を頂いたこと、ここに感謝の意を表します。

本研究室の研究員 DHRUVA.N.K 氏には、国際会議の論文投稿や発表練習では夜遅くまで練習に付き合ってくださいました。日常会話では、自分のつたない英語力にもかかわらず、意味を汲み取り会話を成立させる氏には頭が上がりません。氏は来年度の前期で修了となりますが、残りの半年間もよろしくお願いします。

東京理科大学 江口康平助教には、私が学部4次から博士後期課程1年次までの4年間、研究室の先輩ドクターとして大変お世話になりました。そして、江口さんの博士後期課程終了後も、学会等でお会いした際には声を掛けて頂き、研究や就職に関して相談に乗って頂きましたこと、誠にありがとうございます。まだまだ、教員としても社会人としても未熟な私ですが何卒よろしくお願い致します。

株式会社 安藤・間組 福留祐一氏とは、LECCA2 LITE の講習会や338委員会成果報告会など、共に東京へ出向く機会が多くありました。また、発表練習の際には細かいメモを取っていただき、発表の改善に大いに役立てることができました。

東京建設 株式会社 湯地輝氏には、氏の在学中は後輩指導の下手な自分に、厳しいながらも的確なアドバイスを頂きました。今後も、何かと助言を請うこととなりますが、何卒よろしくお願いします。

また、大窪彰子氏、久徳貢大氏、白谷侑一朗氏、中村慎氏には、同期として本研究室に配属された学部4年から博士前期課程までの3年間、大変お世話になりました。時にはお互いの実験を手伝ったり、時にはみんなで食事や飲みに行ったり、時にはみんな仲良く先生に怒られたりと苦楽を共にしてきました。私もようやく社会人として出発していきますが、これからは鹿児島大学の教員として、コンクリ研に遊びに来てくれることを楽しみに待っています。

延岡市役所 中田拓磨氏、および宮崎県庁 牧田隆広氏には、自分が博士前期課程1年の時に自分の下で研究を行って貰いました。当時は、後輩を持つ経験が少なかったこともあり、あまりの指導下手から、不満の溜まる先輩だったかもしれません。ですが、そんな自分を見限らずに最後までやり通してくれたことに、自分は感謝の気持ちで一杯です。

本研究室の博士後期課程 3 年生 杉野貴洋氏、博士後期課程 2 年生 中野智章氏には博士論文の執筆にあたり、コンサルの人間として現場視点からの貴重なアドバイスをいただきました。今後も本研究を継続し、更なる高みへ昇華して、いつしか現場で重宝される研究を目指したいと思います。

本研究室の博士後期課程 1 年生 福永隆之氏には参考文献の紹介やセメント化学に関する豊富な知識を基に数々のアドバイスをいただきました。また、お互い年齢が近いことから、学部生とのジェネレーションギャップについて語り合うこともありました。来年度から教員となりドクター部屋から教員部屋へ移ってしまいますが、気兼ねなく遊びに来ていただければと思います。

本研究室の博士前期課程 2 年生 大園理貴君、坂井公輔君、佐藤健志君、畠中優成君、畑野貴洋君、松永凌馬君、村田純孝君には、この 3 年間、供試体打設やエポキシ塗装処理の度によく手伝ってもらいました。また、データ整理で部屋に籠っているときも、息抜きにとコンビニや食事に誘ってくれるなど、気遣ってくれたこと誠にありがとうございました。社会人になってからも研究室に遊びに来てください。

本研究室の博士前期課程 1 年生 小斉平慶君、ブイ・キャン・ハオ君の両名には、私の最後の年ということで、これまで私が請負っていた様々な事務仕事を、一挙に引継ぎ大変な思いをさせたことかと思えます。来年度からは、あなた方が研究室のリーダーです。研究はもちろん、二人の理想とする研究室作りを目指してください。

また、学部 4 年のみなさんは、卒業後、社会に出る人や大学院へ進む人様々ですが、この 1 年間、コンクリ研で学んだことや努力したことは自分自身の大きな糧となっているはずです。目標をもってそれぞれの道で活躍してください。

最後に、父・喜嗣、母・美根子、長姉・悠子、次姉・美沙子には、地元横浜の地を離れて鹿児島大学に進学したこと、さらには博士前期課程・博士後期課程への進学と、わがままの限りを尽くした私を、いつも暖かく見守って頂き、“無理はするな”と気にかけて頂きました。9 年間に渡る大学生活もようやく終わりを迎えることができ、これからは一社会人として、親孝行・姉孝行していきたいと思えます。本当にありがとうございました。

平成 28 年 3 月 小池 賢太郎