

博士論文

コンクリート中への塩分浸透の停滞現象と
その支配機構に関する包括的研究

Comprehensive study on stagnation phenomenon and
its dominant mechanism of salt penetration into concrete

鎌田 知久

した。最後に、移流と拡散双方の浸透機構に着目し、塩分浸透の停滞機構を包括的に論じたうえで、塩分浸透停滞現象を考慮した塩分浸透簡易算定手法の枠組みを構築することを第三の目的とした。

本論文は全 5 章から構成され、第 1 章では、上記した本論文の背景及び目的について論じ、塩分浸透に関する既存の知見を整理した。

第 2 章では、コンクリート内部の含水状態と空隙構造を意図的に変化させたコンクリート供試体を対象に、室内塩水浸せき試験、塩分分析、空隙構造分析、水分保有率測定を実施し、含水状態と空隙構造が塩分浸透挙動に与える影響について検討した。空隙構造が緻密に形成され、且つ含水状態が高い場合には塩分浸透が大幅に抑制され、特に混和材を用いた供試体では、浅部において早期に浸透が停滞することを確認した。乾燥を施した供試体では乾燥温度が高い程塩分が深部へと浸透していたが、105℃乾燥を施した供試体では、空隙構造が粗に変状し、内部が絶乾状態にあるにも拘わらず、塩分浸透が深部で停滞するという特徴的な結果が得られた。さらに、乾燥後に水分を再供給した供試体では、内部に水分を保有しているにも拘わらず塩分浸透抵抗性が低下していた。以上より、コンクリート内部の含水状態や空隙構造は塩分浸透深さには影響を与える要因ではあるが、塩分浸透低停滞現象を引き起こす直接的な要因ではないことが示唆された。

第 3 章では、移流の停滞現象の支配機構を解明することを試みた。まずマイクロテクノロジーの分野で用いられるガラス製流路を用いた液状水浸透試験を実施した。結果として、直線流路やインクボトル形状の流路では、気泡の有無に拘わらず毛管張力により液状水が最深部まで浸透した。一方で、直線流路の壁面にインクボトル形状の分岐流路を有するものでは、初期条件として気泡が流路の交差部に存在する様に液状水を配置したところ、液状水の浸潤が大幅に抑制され浸透が停滞する現象が確認された。試験中の流路内を確認したところ、流路の交差部に存在する気泡が浸透を大幅に抑制しているのが観察された。次に、気泡による抑制がセメント硬化体においても生じているかを検証するため、セメントペーストを対象に溶存空気量が異なる浸せき水（脱気水と水道水）を用いて塩水浸せき試験を実施した。結果として、脱気水と水道水では 7 日目以降の吸水量に明確な差異が認められた。さらに、粘弾性測定装置を用いて脱気水と水道水のレオロジー特性を測定したところ、両者に差異は認められなかったことから、溶存空気量の変化により液状水のレオロジー特性は変化しないことを確認した。このことから、セメント硬化体においても液状水の浸透を抑制する主要因が気泡であることが証明された。さらに、レオロジー測定の結果から、微小空間中の液状水は一般に考えられているニュートン流体ではなく、降伏値を有するビンガム流体的な挙動を示すことを確認した。

以上より、移流の停滞機構を以下のように考察した。

「主経路との交差部に存在する気泡により液状水の浸透が大幅に抑制され、最低限流れるために必要な力が降伏値を下回ることによって停滞する」

第4章では、まず塩分浸透停滞現象の支配機構について、第3章までの検討と既往の知見を踏まえて論じた。移流の停滞については、前章までの検討から気泡による抑制と液状水のビンガム流体的な挙動により停滞する可能性があることを示した。拡散については、既往の知見から微小空隙中では空隙壁面との電気的相互作用により塩化物イオンの浸透が大きく抑制され、停滞する可能性があることを示した。以上の機構により移流と拡散双方が停滞することで塩分浸透停滞現象は生じるものと思われ、混和材を適切な置換率で使用し、適切な養生を施すことで、塩分の浸透を浅部で停滞させることが可能であると考えられる。最後に、塩分浸透停滞現象を表現可能な塩分浸透簡易算定手法について検討を行い、移流と拡散双方の停滞現象を考慮可能な算定手法の枠組みを構築した。既往の文献で報告されている分析結果を対象に解析を実施した結果、構築した簡易算定手法を用いることで、塩分浸透の停滞現象を良好に表現できることを確認した。しかし、本手法は停滞現象を考慮するため従来手法と比較して危険側な評価になるため慎重な議論が必要とされるが、品質の良いコンクリートに対しては適切な評価を下すことが可能であり、経済性に富んだ耐久設計が期待できると思われる。

第5章では、本論文で得られた成果をまとめた。

目次

第1章.....	7
1.1 研究背景.....	7
1.2 研究目的.....	8
1.3 既往研究.....	9
1.3.1 見掛けの拡散係数の経時変化.....	9
1.3.2 塩分浸透停滞現象.....	11
1.3.3 停滞現象に寄与する諸要因.....	13
1.4 本論文の構成.....	15
第1章の参考文献.....	16
第2章.....	18
2.1 概説.....	18
2.2 コンクリート供試体を用いた室内塩水浸せき試験.....	19
2.2.1 供試体概要.....	19
2.2.2 試験前処理条件.....	20
2.2.3 室内塩水浸せき試験.....	22
2.2.4 全塩化物イオン量滴定試験.....	22
2.2.5 水セメント比、養生及び材料の差異が塩分浸透挙動に与える影響.....	23
2.2.6 乾燥及び水分の再供給が塩分浸透挙動に与える影響.....	28
2.3 空隙構造が塩分浸透挙動に与える影響.....	39
2.3.1 検討目的.....	39
2.3.2 試料概要.....	39
2.3.3 分析概要.....	39
2.3.4 累積空隙量及び空隙率.....	40
2.3.5 閾細孔径.....	54
2.3.6 インクボトル空隙及び連続空隙量.....	61
2.3.7 空隙構造と塩分浸透挙動の関係.....	66
2.4 初期含水状態が塩分浸透挙動に与える影響.....	67
2.4.1 検討目的.....	67
2.4.2 検討概要.....	67
2.4.3 各処理後（塩水浸せき試験直前）の水分保有率.....	67

2.4.4	初期含水状態と塩分浸透挙動の関係	75
2.5	まとめ	76
	第2章の参考文献	77
第3章	79
3.1	概説	79
3.2	液状水浸透に関する既往の知見	80
3.2.1	微小空間中への液状水浸透機構	80
3.2.2	液状水浸透に対する抵抗機構	81
3.3	ガラス製マイクロ流路を用いた液状水浸透挙動の観察実験	84
3.3.1	実験背景/目的	84
3.3.2	ガラス製マイクロ流路の作製	84
3.3.3	実験概要	85
3.3.4	流路形状が液状水浸透挙動に与える影響(シリーズ A)	87
3.3.5	流路内に存在する液状水が液状水浸透挙動に与える影響(シリーズ B)	88
3.3.6	流路内に存在する気泡が液状水浸透挙動に与える影響(シリーズ C)	91
3.3.7	絶乾状態の流路における気泡の生成	92
3.4	セメント硬化体への液状水浸透に対する気泡の影響	94
3.4.1	実験目的	94
3.4.2	供試体概要	94
3.4.3	実験概要	95
3.4.4	溶存空気量の差異が液状水浸透挙動に与える影響	95
3.5	溶存空気量の差異が液状水のレオロジー特性に与える影響	97
3.5.1	実験目的	97
3.5.2	実験概要	97
3.5.3	せん断応力-せん断速度関係	98
3.6	気液界面に固定された水分子層の影響	99
3.7	まとめ	100
	第3章の参考文献	101
第4章	102
4.1	概説	102
4.2	塩分浸透に影響を与える諸要因	103
4.2.1	水紛体比	103
4.2.2	養生条件	103
4.2.3	使用材料	104
4.2.4	環境条件	104

4.3 移流による塩分浸透の停滞機構	105
4.3.1 空隙内に存在する気泡と微小空隙における液状水のビンガム流体的挙動.....	105
4.4 拡散による塩分浸透の停滞機構	106
4.4.1 空隙壁面との電氣的相互作用	106
4.5 コンクリート中への塩分浸透の停滞及びその条件	108
4.6 塩分浸透停滞現象を考慮した塩分浸透算定手法の構築.....	109
4.6.1 概説	109
4.6.2 塩分浸透に関する既存モデル	110
4.6.3 移流と拡散双方の停滞を表現する塩分浸透簡易算定手法に関する検討	113
4.7 まとめ	120
第4章の参考文献.....	121
第5章.....	123
謝辞.....	127
付録Ⅰ 乾燥過程及び吸水・吸湿過程中のコンクリート供試体の重量変化.....	128
付録Ⅱ 塩水浸せき試験中のコンクリート供試体の重量変化	129

第1章

序論

1.1 研究背景

我が国では、1964年に開催された東京オリンピックを契機として、道路や鉄道をはじめ様々な社会基盤施設の整備が推進された。それから高度経済成長期が終了するまでは建設ラッシュが続き、その間に莫大な社会資本ストックが蓄積された。当時は急激な建設需要の増加に伴い良質な骨材が不足したことで、コンクリートの材料に海砂が使用されることがあった。その結果、塩害による構造物の著しい劣化が目立ち早期劣化が問題となったが、1986年に旧建設省により「コンクリート中の塩分総量規制」がJIS規格（JIS A 5308）に定められてからは、塩害による構造物の劣化が減少し、内在塩分に対する懸念は払拭された¹⁾。そのため近年では、塩害を引き起こす塩分の供給源は、主に構造物の外部から供給される外来塩分となっている。沿岸部では、海水そのものや海からの飛来塩分が、内陸部では、降雪地域において使用される凍結防止剤に含まれる塩分がこの外来塩分に該当する。このような外来塩分に起因する塩害への対策としては、表面被覆工法やエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用、電気防食工法、かぶりを十分に設定するなどが挙げられるが、そのほとんどが物理的な対策であることが分かる。しかし、近年になって火力発電所や製鉄所から出る産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末をコンクリート用混和材として使用することで、コンクリートの塩分浸透抵抗性が大幅に向上することが分かってきた²⁾³⁾。このような材料特性は、現行のコンクリート標準示方書⁴⁾にも反映されており、使用材料により拡散係数を変動させることでその特性が表現されている。しかしながら、この拡散係数は示方書の中で一定と仮定されているが、実環境では空隙構造の緻密化や塩分の固定化、吸着等の影響により経時的に変化することが明らかになっている⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。さらに、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用した場合、塩分の浸透が早期に停滞して、以降は浸透が進行しないという極めて特徴的な現象の存在が報告されている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。また、本現象は、移流に起因する液状水の浸透が

停滞することで生じる可能性があることが示されている¹²⁾。このため、このような塩分の浸透が停滞する現象を示方書に組み込むためには、本現象を本質の理解する必要があり、そのためには従来の拡散主体の議論から移流を主体にした議論に転換する必要があると思われる。

一方、塩分浸透に関しては、混和材を用いた場合における塩分の固定化や吸着特性に焦点を当てた研究が多く、塩分の浸透が停滞する現象やその機構の解明に着目した研究事例は少ない。そのため、本現象については未だ不明瞭な点が多い。塩分浸透が停滞する現象に関する現在までの理解では、微小空隙中においては塩化物イオンの拡散が空隙壁面との電気的相互作用により抑制される可能性があることが示されている¹³⁾。さらに、極微小空間中においては液状水がバルク空間とは相当に異なる挙動を示すことで、移流に起因する液状水の浸透が停滞する可能性があることが確認されている¹⁴⁾。また、移流に起因する塩分浸透挙動及び停滞現象はコンクリート内部の含水状態と密接に関係していることが確認されている¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。この様に、塩分浸透停滞現象、特に移流の浸透停滞に関しては、断片的には理解が進んでいるものの、停滞現象を本質的に支配する要因や機構は解明されていないことが分かる。

このため、実環境で生じている塩分浸透停滞現象を示方書に確実に反映するためには、まずは移流と拡散双方の停滞機構を明確にする必要がある。拡散に関しては上記した電気的相互作用が支配的であると思われる。そのため、移流の停滞現象を解明することができれば塩分浸透停滞現象を理解できると考えられる。したがって、移流の停滞現象を支配する要因を明らかにし、その機構を解明することが求められている。

1.2 研究目的

以上の背景の下、本論文では、まず含水状態及び空隙構造が塩分浸透挙動及び塩分浸透停滞現象に与える影響を明らかにすることを第一の目的とした。このために、種々の材料を使用したコンクリート供試体の含水状態や空隙構造を意図的に変化させ、室内塩水浸せき試験、塩分分析、空隙構造分析、水分保有率測定を実施することで、空隙構造及び含水状態が塩分浸透挙動及び停滞現象に与える影響について検討した。その後、上記の検討により得られた結果を踏まえて、移流に起因する塩分浸透の停滞に寄与する支配機構を解明することを第二の目的とした。このために、マイクロテクノロジーの分野で用いられるガラス製流路を用いた液状水浸透試験、溶存空気量を変化させた塩水浸せき試験、そしてレオメーターを用いた液状水のレオロジー測定を実施した。最後に、以上の検討から解明した移流の停滞現象の支配要因とその機構と既往の知見を踏まえて、移流と拡散双方の浸透停滞機構を包括的に論じた上で、塩分浸透停滞現象を考慮することが可能な塩分浸透簡易算定手法の枠組みを構築することを第三の目的とした。

1.3 既往研究

1.3.1 見掛けの拡散係数の経時変化

実環境において塩化物イオンの拡散係数が経時的に変化する事例が数多く報告されている。まず武若ら⁵⁾は、塩化物イオン拡散係数がセメント種類や材齢によって影響を受けることを予想し、セメント種類と材齢を考慮した拡散係数の算出式を提案した。その結果、**図 1.1**に示す様に、拡散係数はセメント種類により変化し、材齢の経過に伴い低下することを表現した。

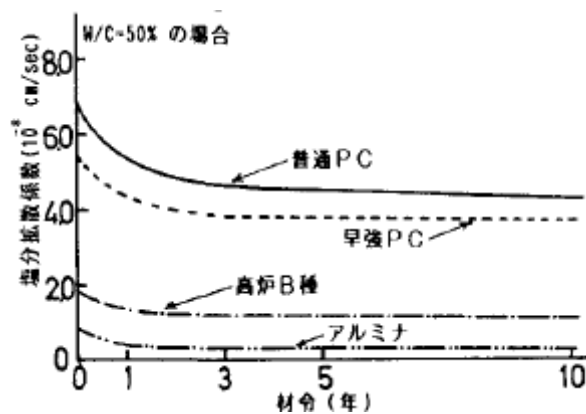
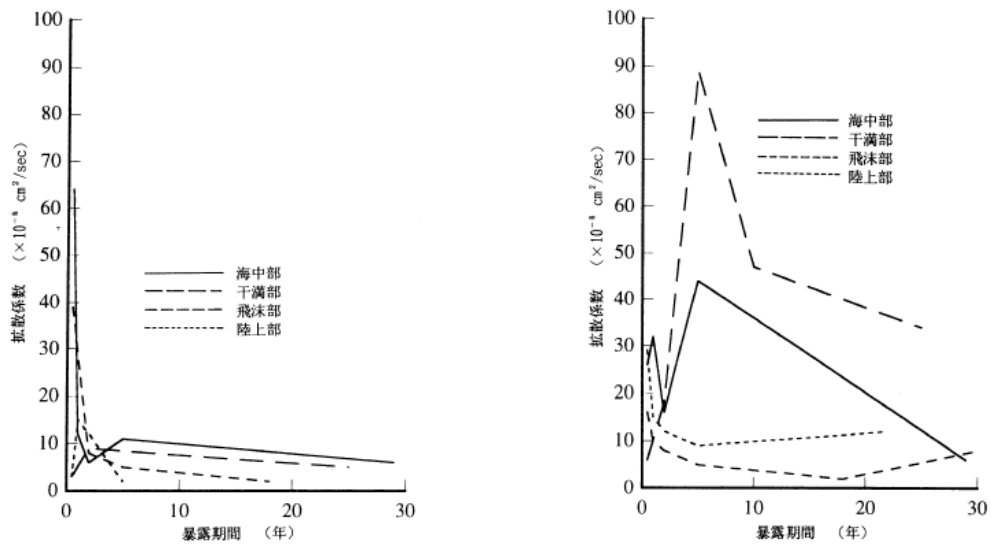


図 1.1 セメント種類と材齢を考慮した拡散係数の経時変化⁵⁾

次に濱田ら⁷⁾は、暴露初期の段階においては、コンクリート中の外部表面領域の塩分含有量が主に増加し、暴露期間の経過に伴いコンクリートの内部領域の塩分含有量が徐々に増加していく傾向にあることを示している。そして、上記を踏まえて、塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数を**図 1.2**に示す様に求めている。この様な傾向に対して、濱田らは、コンクリート表層からの距離が 30~50mm の領域を境にして塩化物イオンの侵入メカニズムが変化すると考察している。文献内では拡散係数の減少について触れていないが、**図 1.2**を見ると、拡散係数が経時的に減少していることを確認することができる。

最後に、細川ら⁸⁾は、種々のセメント種類を使用したコンクリート供試体を対象に、塩水浸せき試験と海洋暴露試験を実施し、暴露期間 91 日~5 年の塩分濃度分布を EPMA 面分析より求め、その結果を回帰分析することで**図 1.3**に示す見かけの拡散係数を算定している。図を見ると、拡散係数が経時的に減少していることを確認できるが、細川らは、この様な現象について、水和度の経時的な変化に起因するものと考察している。

以上より、塩化物イオンの拡散係数が経時的に変化することが多くの研究者により示されており、特に拡散係数の減少は、拡散係数を一定と仮定している示方書とは相当に異なる挙動を示していることが分かる。しかしながら、この様な現象を引き起こす支配機構は未だ定まっていない。



(a) 外部表面領域 (b) 内部領域

図 1.2 塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化⁷⁾

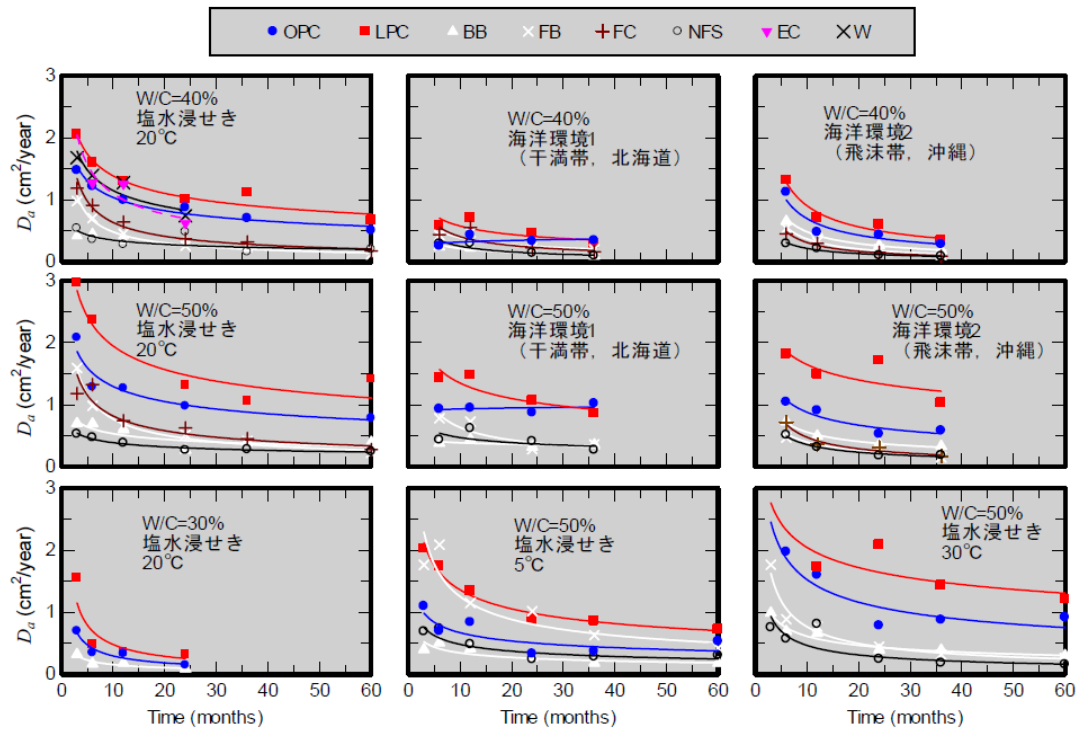


図 1.3 算定された見かけの拡散係数の経時変化⁸⁾

1.3.2 塩分浸透停滞現象

高橋ら⁹⁾により、フライアッシュを使用したコンクリートの遮塩性能を適切に評価することを目的に、塩害環境下に置かれた護岸構造物を対象に、塩分浸透状況調査が行われた。本構造物は過去に1.5年、3.5年経過時に調査が行われており、高橋らは8.75年経過時に調査を行った。図1.4は、実際に高橋らが測定した全塩化物イオン量分布である。図中の、B0、F1、F2は調査対象の構造物に使用されたコンクリートの配合を示しており、B0は普通ポルトランドセメント(245kg/m³)を使用した基本となるベース配合、F1はフライアッシュをセメントの内割り置換で60kg/m³混合した配合、F2はフライアッシュを外割置換として80kg/m³混合した配合である。また、high、middle、lowは海面からの高さを位置を示しており、いずれも平均満潮面より高く、飛沫帯に位置している。図を見ると、いずれの配合においても調査時の材齢に依らず、塩分の浸透深さが一致していることを確認できることから、塩分の浸透が停滞している様に見受けられる。さらに、フライアッシュの置換率が高い程、塩分浸透抵抗性が向上していることを確認できる。

このような塩分の浸透が停滞する現象に関して、高橋らは、不飽和かつ緻密なコンクリート中で内部RHが高く保たれる場合には液状水の浸透がある深さで停滞し、それに伴い塩分浸透も早々に停滞するのではないかという仮説を立てている。

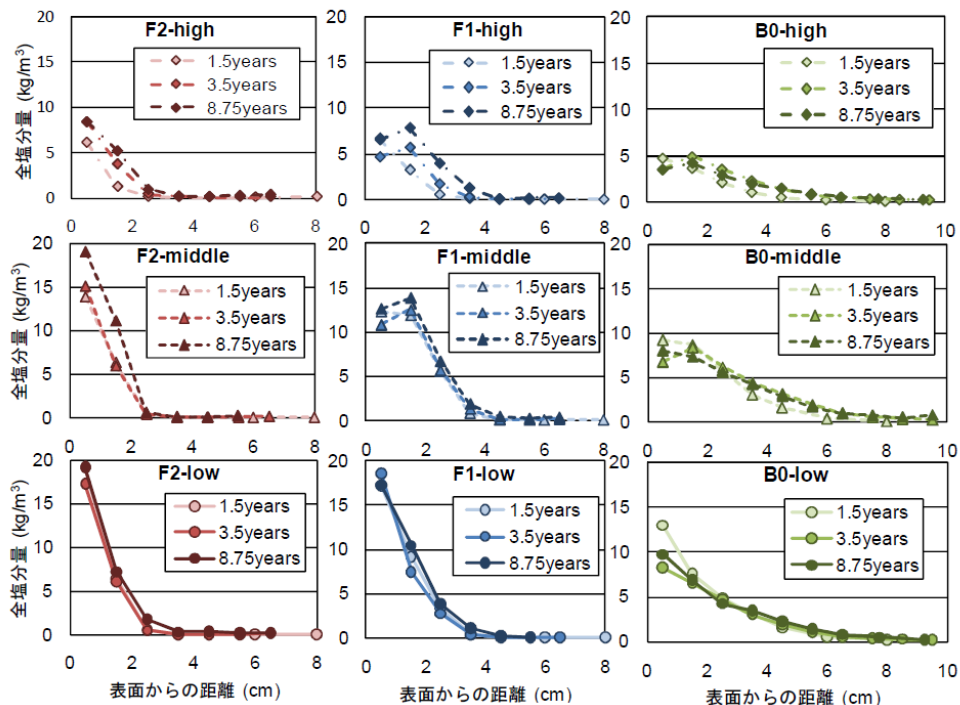


図 1.4 塩分浸透停滞現象の実例⁹⁾

次に、佐々木ら¹⁰⁾により、高炉スラグコンクリート及びフライアッシュコンクリートが隣接して打設された護岸構造物から材齢11年経過時に上記と同様の調査が行われた。佐々木らにより実施された採取コアの塩分分析結果を図1.5に示す。図中の最上段及び2段目はプレキャスト、3段目及び4段目は現場施工されたコンクリートである。4段目は干満帯に位置している。図を見ると、調査材齢は一つしかないが、塩分供給量が異なるにも拘わらず、塩分浸透深さが一致していることを確認できることから、塩分浸透が停滞している可能性が示唆されている。

さらに、著者らは、佐々木らが採取したコアに対して室内塩水浸せき試験を継続して行っており、図1.6に示す様に浸せき期間1ヶ月と36ヶ月の塩分浸透深さが一致しており、塩分浸透が早期に停滞していることを確認している¹¹⁾。

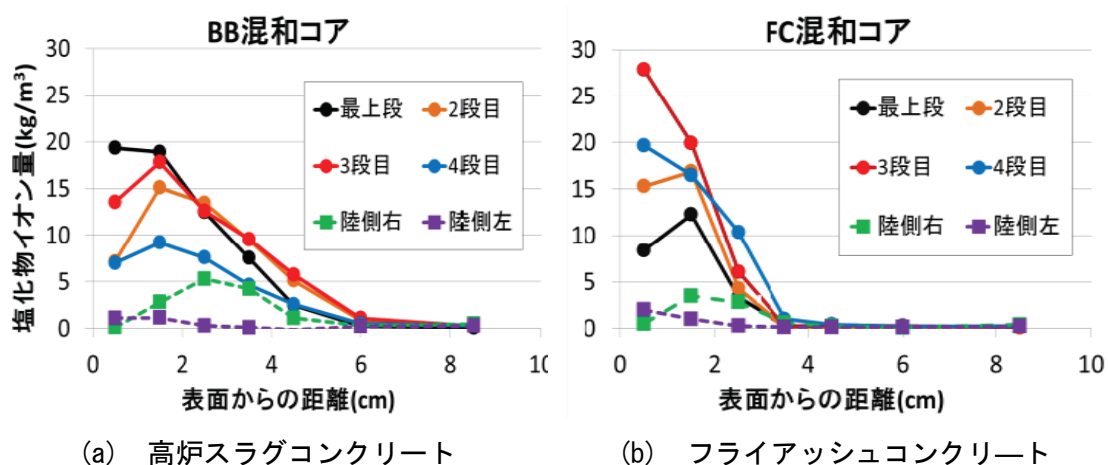


図 1.5 塩分浸透停滞現象の実例¹⁰⁾

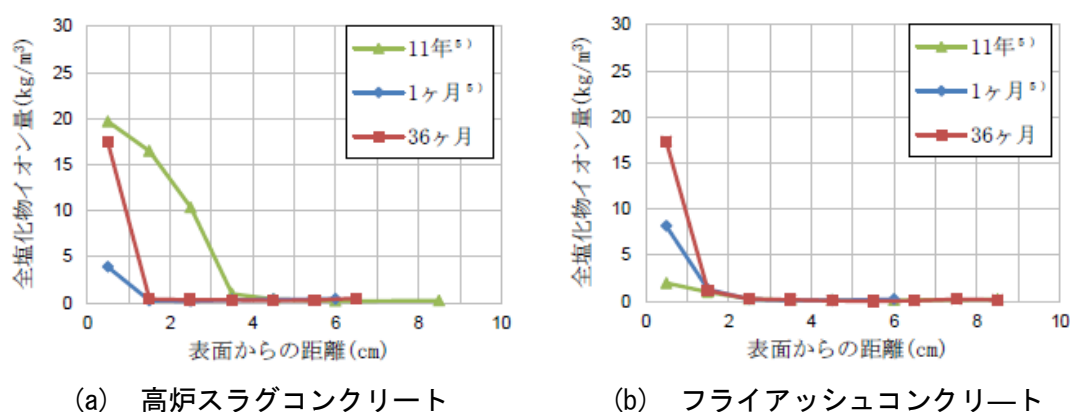


図 1.6 塩分浸透停滞現象の実例¹¹⁾

1.3.3 停滞現象に寄与する諸要因

[1] 液状水浸透限界

高橋ら¹²⁾により 1.3.2 節で示した採取コアを用いて吸水試験が行われた結果、早期において吸水が停滞しているような結果が得られている。さらに、試験後に供試体を割裂し、液状水の浸透位置の観察された結果、表 1.1 に示す様に液状水の浸透深さと塩分浸透深さが概ね一致することを確認している。このため、塩分浸透停滞現象は、液状水の浸透限界に伴い生じている可能性が示唆されている。

表 1.1 塩分と液状水の浸透深さの比較¹²⁾

配合	塩分浸透深さ (cm)	液状水浸透深さ(cm)	
		鉛直開	水平閉
B0	8-10	5.8	2.9
F1	4-5	4.8	3.9
F2	2-3	2.5	1.6

[2] 空隙壁面との電氣的相互作用

中村ら¹³⁾により、ガラス製マイクロ/ナノ複合チップ及び蛍光試薬を用いて、拡散によるナノ空間への塩化物イオン浸入挙動が検討された結果、デバイ長さ程度の極微小な空間への塩化物イオンの浸透が大幅に抑制されることが確認された。詳細は第4章に記すが、本現象が拡散による塩化物イオンの浸透停滞に大きく寄与していると考えられる。

[3] 極微小空間における液状水の特異な挙動

岡崎ら¹⁴⁾により、微小空隙中において液状水が受ける摩擦現象について検討するため、分子動力学シミュレーションが行われた。その結果、液状水の流動を左右する始動動水勾配と停止動水勾配の存在が示された。詳細は第3章に記すが、上記の様な現象は極めて微小な空隙（一桁ナノスケール）での現象であると推察されるため、移流による液状水の浸透が停滞する機構の支配要因は別に存在すると考えられる。

[4] コンクリート内部の含水状態

志村ら¹⁶⁾により、塩分浸透停滞現象の支配要因を確認するため、コンクリート供試体を対象に室内塩水浸せき試験、空隙構造分析、水分量測定試験が実施された。それらの結果を図 1.7 から図 1.9 に示す。結果として、封緘養生を施した供試体 (Sealed) では塩分の浸透が停滞していることが確認された。一方で、図 1.8 に示す様に、水中養生を施した後に 40°C 乾燥を施した供試体 (Water-Dry) の空隙構造は、封緘養生を施した供試体 (Water) よりも密であったにも拘わらず、図 1.7 (b) に示した Water-Dry は急激な移流により塩分が深部まで浸透していることが確認された。この結果について、志村らは塩水浸せき試験前のコンクリート内部の含水状態に着目したところ、図 1.9 から Water-Dry は Sealed と比較して水分

量が顕著に低くなっていることを確認している。このことから、コンクリート中の含水状態が塩分浸透停滞現象に対して大きな影響を与えることを示している。

さらに、小池ら¹⁷⁾は、疑似飽和状態及び絶乾状態のモルタル供試体に対して塩水浸せき試験を実施した結果、疑似飽和状態の供試体に関しては、塩化物イオンが拡散により浸透することを、絶乾状態の供試体に関しては吸水現象による水分移動に伴う急激な塩化物イオンの浸透を確認している。

以上より、塩分浸透挙動及び停滞現象に対してコンクリート内部の含水状態は極めて重要な役割を果たしていると思われる。

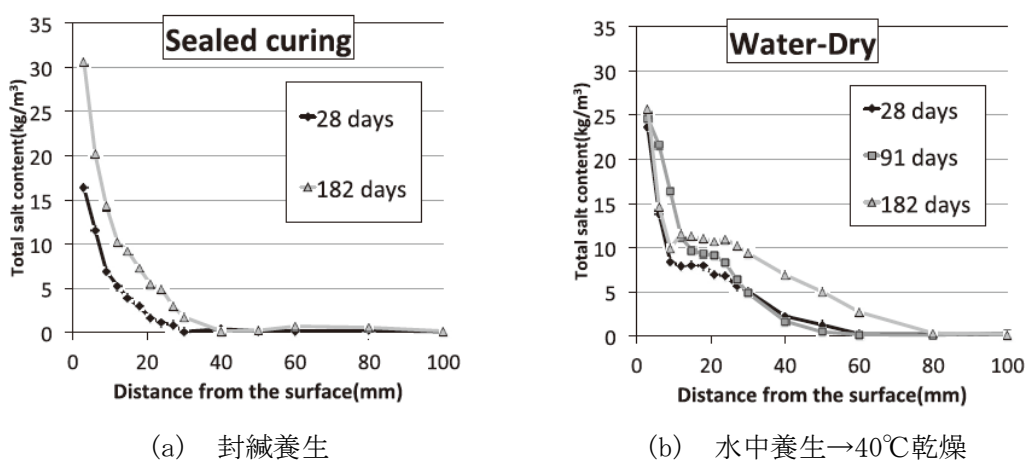


図 1.7 乾燥による塩分浸透挙動の変化¹⁵⁾

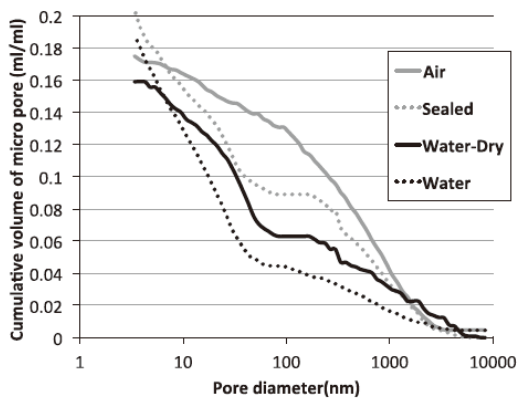


図 1.8 乾燥による空隙構造の変化¹⁵⁾

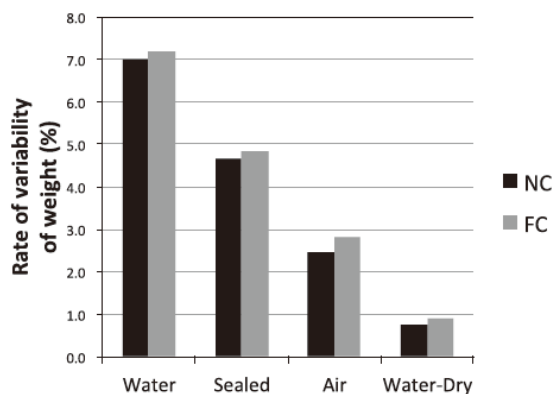


図 1.9 浸せき試験前の内部含水状態¹⁵⁾

1.4 本論文の構成

本論文の構成を図 1.10 に示す。

第 1 章は本章であり，本研究の背景，目的及び既往の研究について述べた。

第 2 章では，含水状態と空隙構造を意図的に変化させたコンクリート供試体の，室内塩水浸せき試験及び塩分分析，空隙構造分析，水分保有率測定を実施することで，コンクリート内部の含水状態及び空隙構造が塩分浸透挙動，延いては停滞現象に与える影響について検討する。

第 3 章では，第 2 章の検討結果を踏まえて，マイクロテクノロジー分野で用いられるガラス製マイクロ流路を用いた液状水浸透試験，溶存空気量を変化させた浸せき水を用いた塩水浸せき試験，レオメーターを用いた液状水のレオロジー測定を実施することで，移流の停滞に寄与する支配要因及びその機構について検討する。

第 4 章では，塩分浸透停滞現象を引き起こす支配要因及びその機構について，移流と拡散双方の停滞に着目し，既往の知見及び本論文で得られた結果を基に考察する。そして，移流と拡散双方の停滞現象を表現することのできる塩分浸透算定手法を構築する。

第 5 章は，結論であり，本研究で得られた結果をまとめる。

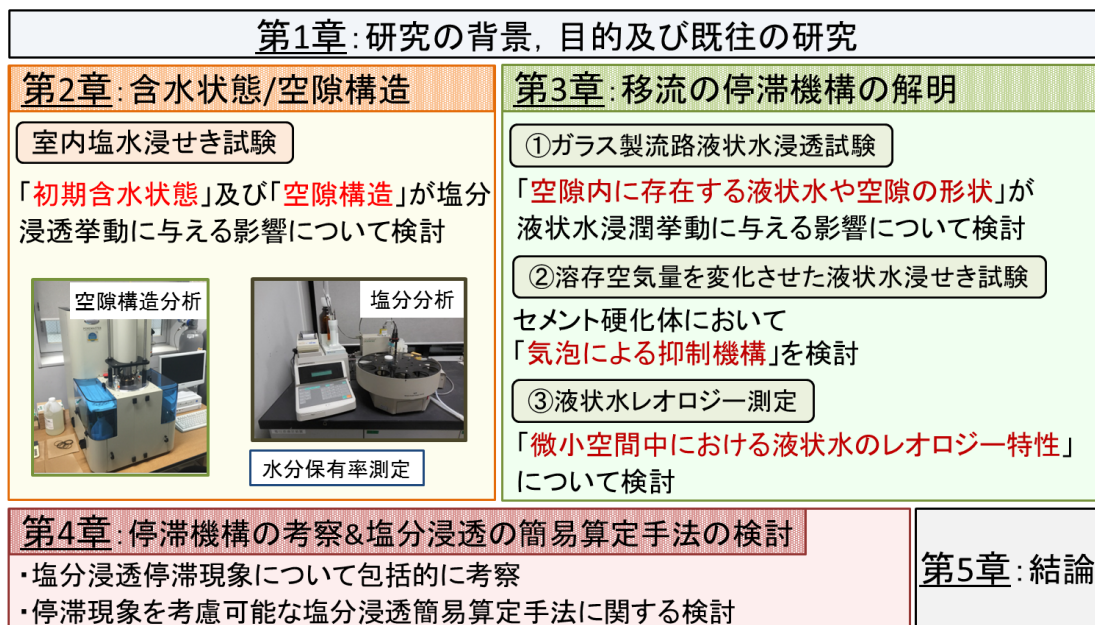


図 1.10 本論文の構成

第 1 章の参考文献

- 1) 国土交通省：コンクリート中の塩分総量規制及びアルカリ骨材反応抑制対策に関する懇談会 塩分規制に関する報告書，2002
- 2) 鈴木健太，杉山隆文，川北昌宏，志村和紀：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.849-854，2008
- 3) 梅村靖弘，原田宏：混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン透過性に及ぼす炭酸化の影響，海洋開発論文集，Vol.14，pp.541-546，1998
- 4) (社)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2012
- 5) 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回年次学術講演会講演概要集，第V部，pp482-483，1987
- 6) K. Takewaka and S. Matsumoto：Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments，ACI SP109-17，pp381-400，1988
- 7) 濱田秀則，R. N. Swamy：種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸入過程および侵入量に関する一考察，コンクリート工学論文集，Vol.7，No.1，pp.11 - 22，1996
- 8) 細川佳史，高橋晴香，山田一夫：各種セメント系材料を用いた相組成・空隙構造が異なるコンクリートの各種環境下における塩化物イオン拡散係数，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1027-1032，2009
- 9) 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
- 10) 佐々木章，竹内直也，岸利治，蔵重勲：混和材を使用したコンクリート護岸から採取したコアを用いた塩分浸透停滞に関する研究，土木学会第67回年次学術講演会講演概要集，第V部，pp.171-172，2012
- 11) 鎌田知久，岸利治：実構造物コアを用いた室内塩水浸せき試験による各種混和材の塩分浸透抵抗性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.787-792，2015
- 12) 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透境界の関与，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集，第V部，pp.353-354，2010
- 13) 中村兆治，酒井雄也，岸利治：コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ／ナノ複合チップを用いた光学的実験による検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.841-846，2013
- 14) 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，pp311-321，2009
- 15) 佐伯竜彦，二木央：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動，コンクリート工学年次論

文報告集, Vol.18, No.1, pp.963-968, 1996

- 16) 志村雅仁, 岸利治, 鎌田知久: コンクリートへの塩分浸透に支配的な影響を与える停滞限様に関する実験的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.478-483, 2015
- 17) 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司, 福重耕平: 水分移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデルに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.843-848, 2016

第 2 章

種々の材料を用いたコンクリートの初期含水状態 及び空隙構造が塩分浸透挙動に与える影響

2.1 概説

近年、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材を使用したコンクリート中への塩分浸透が塩分供給後初期には急速に進行するものの、早期の段階で停滞して、それ以降は時間の経過に依らず浸透が進行しないという極めて特異な事例が存在することが報告されている¹⁾²⁾。一方で、従来の耐久性照査では実務的な利便性の観点からコンクリート中への塩分浸透は Fick の拡散則に従い、濃度勾配を駆動力とする拡散現象のみによるものとして取り扱われることが多く、現状の手法ではこのような停滞現象を評価することはできない。また、実際の塩分浸透現象は拡散と毛管張力を駆動力とする移流の 2 つの機構に分類されることが知られている。この塩分浸透が停滞する現象に関しては、拡散と移流の各々に停滞する機構が存在し、拡散は電気的相互作用、移流は塩分を含んだ液状水の浸透停止によるものと考えられている³⁾⁴⁾。特に移流に関しては、一桁ナノオーダーのような極微小な空隙においては、空隙壁面から受ける影響が卓越し、液状水が固体のように振舞い、理論的には浸透が停滞すると予想されるが、実際には液状水の主な移動経路である連続空隙の大部分は、数十から数百ナノオーダーの空隙で構成されており、このサイズにおいて壁面から受ける影響が支配的になるとは考え難い。したがって、このサイズの空隙内には移流の浸透に対して制動をかける物理的な影響因子が存在するものと推察される。

著者らはこれまでに、移流による塩分の浸透性状が塩分供給前のコンクリート内部の含水状態や空隙構造に大きく左右されることを明らかにしており、特に空隙内に存在する液状水が浸透停滞に関与しているの見当を付けている⁵⁾。そこで本章では、塩分供給前の空隙内に存在する液状水と空隙構造に着目し、これらが塩分浸透挙動、延いては浸透停滞に与え

る影響について、含水状態を意図的に変化させたコンクリート供試体を用いて室内塩水浸せき試験を行い、検討を実施した。

2.2 コンクリート供試体を用いた室内塩水浸せき試験

2.2.1 供試体概要

室内塩水浸せき試験に用いたコンクリート供試体の配合表を表 2.1 に、使用材料の物性値を表 2.2 に示す。本実験では JIS A 1132 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠し、サミット缶を使用して、φ100×200mm のコンクリート円柱供試体を作製した。

ベース供試体として、普通ポルトランドセメント (N) を使用した、水セメント比を 40%、50%、60% の 3 水準の供試体を作製した。加えて、混和材を用いることで塩分浸透抵抗性の向上や塩分浸透停滞が期待されるため、フライアッシュを普通ポルトランドセメントに対して B 種相当になるように 20% 内割添加した供試体 (FA) と高炉スラグ微粉末を普通ポルトランドセメントに対して B 種相当になるように 50% 内割置換した供試体 (BB)、さらに高炉スラグ微粉末を 40%、フライアッシュを 10% 内割置換した三成分系の供試体 (NBF) を作製した。これら混和材を使用した供試体はすべて水セメント比を 50% の 1 水準に設定した。

表 2.1 コンクリート供試体配合表

名称	W/C (%)	置換率 (%)	s/a (%)	W	C	FA	BB	S	G
N40	40		43.5	175	438			731	964
N50	50		45.5	175	350			797	970
N60	60		47	175	292			846	969
FA50	50	20	43	175	280	70		743	1000
BB50	50	50	45	175	175		175	785	974
NBF50	50	40 (BB) -10 (FA)	45	175	175	35	140	780	968

表 2.2 使用材料の物性値

セメント	普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm ³)
混和材	フライアッシュ (ブレン値: 3400cm ² /g), 高炉スラグ微粉末 (ブレン値: 4250cm ² /g)
細骨材	富士川産川砂 (密度: 2.62g/cm ³ , 吸水率 2.1%)
粗骨材	奥多摩産硬質砂岩 (密度: 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.79%, 最大寸法 20mm)

供試体の養生条件を表 2.3 に示す。養生方法は気中養生と封緘養生の 2 水準に設定し、供試体を打設した後、サミット缶上部の開放面にラップを被せて封緘状態とした。その後、気中養生はコンクリート標準示方書[施工編：施工標準]⁶⁾に記載されている「表 8.2.1 湿潤養生期間の標準」に準拠し、普通ポルトランドセメントのみを使用した供試体 (N) は打設 5 日後に、高炉スラグ微粉末を混和した供試体 (BB) は打設 7 日後に脱型し、その後は 20°C RH60%の室内に暴露して計 91 日間養生を実施した。ただし、フライアッシュを混和した供試体に関しては、初期の反応を促進するため打設 14 日後に、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混和した三成分系の供試体は打設 10 日後に脱型し、その後は先の供試体と同様に 20°C RH60%の室内で計 91 日間養生を実施した。封緘養生は、供試体を 91 日間型枠 (サミット管) 内に存置し養生を実施した。

表 2.3 供試体養生条件

養生方法	養生期間	脱型時期
気中養生 (20°C RH60%)	91 日	N : 打設 5 日後(示方書相当)
		FA : 打設 14 日後
		BB : 打設 7 日後(示方書相当)
		NBF : 打設 10 日後
封緘養生 (20°C)		N, FA, BB, NBF : 養生終了後

2.2.2 試験前処理条件

養生が終了した供試体に対して、図 2.1 に示す流れで塩水浸せき試験前の処理を施した。まず、91 日間の養生終了後に水冷式カッターを用いて供試体の上下端の 25mm を切断除去した後、同じく水冷式カッターを用いて、供試体高さが 150mm の四分円柱状になるように供試体を 4 分割した。

次に、コンクリート内部の含水状態や空隙構造を意図的に変化させるべく、供試体を切断後、図 2.2 に示す乾燥過程と吸水・吸湿過程を供試体に施した。乾燥過程について、40°C 乾燥過程 (40D) では、40°C RH10%の恒温恒湿槽内で 56 日間供試体を乾燥させ供試体内に存

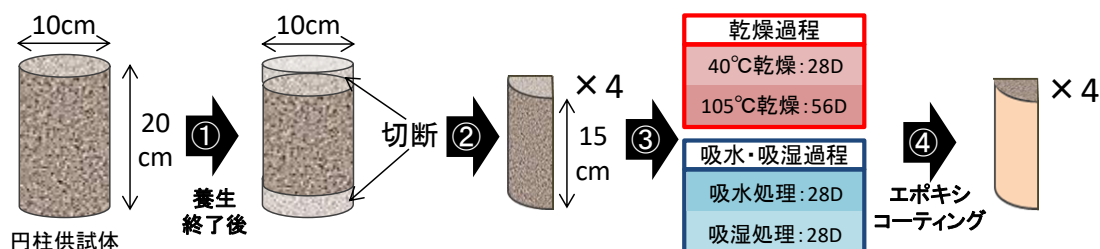


図 2.1 塩水浸せき試験前の供試体処理フロー

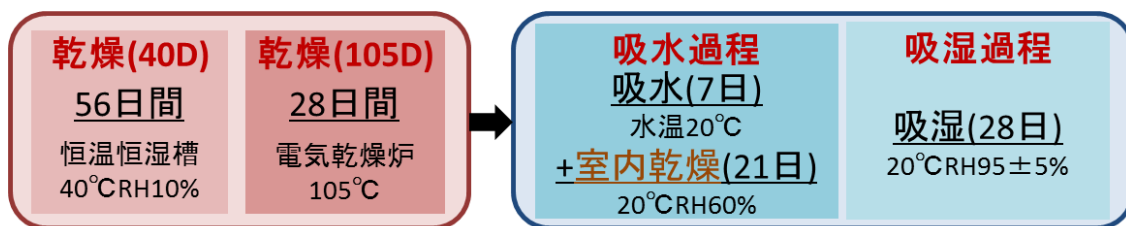


図 2.2 乾燥及び吸水・吸湿過程の条件

在する水分を排除した。105°C乾燥過程（105D）では、供試体内部が絶乾に近い状態になるように 105°Cの電気乾燥炉内で 28 日間乾燥を施した。乾燥過程終了後は、再度水分を供試体に供給するため、吸水過程または吸湿過程を供試体に施した。吸水過程（液状水として水分を供給する過程）では、供試体を 20°Cの水中に 7 日間浸せきさせた後、水中から供試体を取り出し、20°C RH60%の室内で 21 日間を乾燥させた。ここで、空隙内が液状水で飽和している場合、塩分の浸透機構は拡散のみになるため、吸水過程では室内乾燥を実施した。吸湿過程（蒸気として水分を供給する過程）では、28 日間 20°C RH95±5%の環境に調整したコンテナ内で空気中の蒸気を吸わせる方法で供試体に水分を供給した。また、比較用として、養生後処理を施さないシリーズ、40°Cまたは 105°C乾燥のみを施すシリーズも条件として設定した。ここで、各処理の略称を表 2.4 に示す。

各処理が終了した後は、図 2.1 に示すように浸せき面以外からの塩水の浸透を防ぐため、浸せき面を除くその他の面はエポキシ樹脂を用いてコーティングした。エポキシ樹脂は 3 層コーティングし、各層ごとに 24 時間程度の十分な乾燥期間を設けた。

以上のような処理を施し、本実験では室内塩水浸せき試験に用いる供試体を作製した。尚、配合や使用材料、養生方法に加えて乾燥及び吸水・吸湿過程を組み合わせると供試体のシリーズ数は計 108 種類となる。各シリーズの名称は、供試体の名称（表 2.1）と養生方法 A（気中）、S（封緘）と各処理過程の略称（表 2.4）を組み合わせ、例えば、「N50」に「封緘養生」を施し、「105°C乾燥後に吸水過程」を実施した場合、「N50S-105°C吸水」とした

表 2.4 各処理過程の略称

処理過程	養生のみ	乾湿繰返し	40°C乾燥のみ	40°C乾燥 ↓ 乾湿繰返し	105°C乾燥のみ	40°C乾燥 ↓ 吸水過程	40°C乾燥 ↓ 吸湿過程	105°C乾燥 ↓ 吸水過程	105°C乾燥 ↓ 吸湿過程
略称	養生のみ	乾湿	40°C	40°C乾湿	105°C	40°C吸水	40°C吸湿	105°C吸水	105°C吸湿

※気中養生は「A」、封緘養生は「S」

2.2.3 室内塩水浸せき試験

2.2.1 供試体概要, 2.2.2 試験前処理条件で作製した供試体に対して, 図 2.3, 図 2.4 に示すように室内塩水浸せき試験を実施した. 塩水の濃度は 10% に設定し, 供試体は重力の影響を排除し, さらに浸せき面が供試体内部から析出する気泡により覆われないようにするため水平に設置した.

その後, 28 日, 91 日, 182 日の浸せき期間が経過した時点で供試体を塩水槽から取り出し, 塩分分析に供する試料を採取した. 通常, 試料の採取はコンクリートカッター等を用いて行われるが, 本試験では, より細かい間隔で試料を採取することが可能であり, 尚且つ採取に費やす時間を大幅に削減することができるディスクグラインダーを用いた手法を採用した. 本手法では, 初めに側面に塗布されてあるエポキシ樹脂をグラインダーを用いて排除した後, 供試体表面から任意の間隔ごとにグラインダーで削り出した粉体試料を採取する. ここで, 試料採取間隔は, 供試体表面から 30mm までは 5mm 間隔, 30mm から 60mm は 10mm 間隔, そして 60mm から 100mm は 20mm 間隔に設定し, 供試体 1 本から計 11 試料 (各 2g 程度) を採取した. 尚, 浸せき期間中は供試体が塩水を吸水した量を把握するため, 任意の間隔で重量測定を実施した.

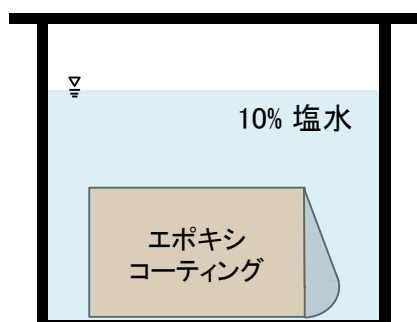


図 2.3 室内塩水浸せき試験の概略図



図 2.4 室内塩水浸せき試験状況

2.2.4 全塩化物イオン量滴定試験

採取した試料に含まれる全塩化物イオン量は, JIS-SC5 「硬化コンクリート中に含まれる全塩分量の簡易分析方法」を改良した手法を用いて測定した. 測定には京都電子工業株式会社製の電位差滴定装置 AT-500N (図 2.5) を使用した. 尚, 供試体 1 本につき, ブランク溶液を 2 つ用意し, より高い塩化物イオン量を示した方をブランク値として設定した.

以上の試験により, 供試体内の塩分浸透分布を作成し, 塩分浸透性状を評価した.



図 2.5 電位差滴定装置

2.2.5 水セメント比，養生及び材料の差異が塩分浸透挙動に与える影響

(1) 養生のみ

まず，養生のみを施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.6 及び図 2.7 に示す．これらの図は，縦軸が全塩分量 (kg/m^3)，横軸が供試体表面 (mm) からの距離を示しており，図中には浸せき期間 28 日，91 日，182 日の結果を載せている．

分析結果を見ると，気中養生 (図 2.6) に関しては，「N40A-養生のみ」と「N50A-養生のみ」の塩分浸透が停滞していることを確認できるが，他の供試体では早期において急激な移流により塩分が深部まで浸透していることが分かる．特に混和材シリーズでは上記の傾向が顕著に表れており，本実験で設定した型枠存置期間が初期の反応を担保する期間としては不十分である様に見受けられる．ここで混和材シリーズは，反応が十分に進行する以前に養生中に供試体表層の水分が逸散したため，表層部に空隙構造が粗，且つ乾燥した領域が形成されたものと推察される．この際，図 2.8 (a) に示すように供試体を水平方向に設置すると，乾燥領域を辿って急激な移流により塩分が内部へと浸透するものと考えられる．したがって，以上の現象により，本結果の塩分浸透分布は図 2.6 (d)，(e)，(f) の様な形状になったと推察される．実際にこのような局所的な乾燥領域の影響が表れているものと思われる事例がいくつか報告されている．志村ら⁵⁾は，図 2.9 (a) に示す急激な移流は水中養生後に 40°C 乾燥を施したことで供試体表層部に乾燥領域が形成されたことが原因であると推察している．池田⁷⁾らは，水中養生後に飽和度が 50% になるまで 105°C 乾燥を施し，結果として図 2.9 (b) に示す急激な移流が発生することを確認している．本現象について，池田らは具体的な考察はしていないが，おそらく乾燥を施したことで供試体表層部に乾燥領域が形成されたことが原因であると思われる．さらに，杉本ら⁸⁾により，気中養生を 450 日間施したフライアッシュコンクリートを対象に塩水浸せき試験が行われ，図 2.9 (c) に示すように急激な移流が発生することが確認されている．本現象についても具体的な考察はされていないが，これは本検討で確認した現象と極めて類似していることから，養生期間中に供試体表層部に乾燥領域が形成されたこと，表層部の空隙構造が粗に形成されたことに起因していると考えられる．以上より，コンクリートは乾燥を経験することで表層部と内部の含水状態が大きく変化し，それにより浸せき方向によっては上記のように急激な移流が生じるものと思われる．しかし，実環境では大気に曝される表層のみが本検討の供試体で生じていると

考えられる乾燥領域に対応するため、図 2.8 (b) に示すように室内試験の供試体と比較して得られる浸透挙動が大きく乖離していると思われる。よって、室内試験において上記のような浸透挙動が確認された場合には、細心の注意を払って現象の原因・本質を見極める必要がある。多くの研究者がこのような現象に対して誤った解釈をしている可能性がある。本考察はそのような誤った解釈に対して警鐘を鳴らすものである。

次に、封緘養生を施した供試体（図 2.7）については、「N60S-養生のみ」と「NBF50S-養生のみ」以外のシリーズで塩分の浸透が停滞していることを確認できる。特に混和材を用いたシリーズでは表層に近い位置で塩分の浸透が停滞し、極めて高い塩分浸透抵抗性を示した。「NBF50S-養生のみ」は浸透深さが逆転していたため、評価対象外とした。これは、供試体の個体差に起因していると考えられる。混和材シリーズでは、同水セメント比に設定した「N50S-養生のみ」と比較して塩分浸透深さが浅いことから、封緘養生を施し反応を十分に促進することで、普通セメントのみを使用した場合よりも塩分浸透抵抗性が向上することが分かる。水セメント比に着目すると、気中養生、封緘養生共に水セメント比が低い程塩分浸透抵抗性が向上していた。

以上より、養生のみを施したシリーズでは、水セメント比が低い程、また混和材を用いて適切な養生を施すことで塩分浸透抵抗性が向上し、浅部において早期に塩分浸透が停滞することを確認した。

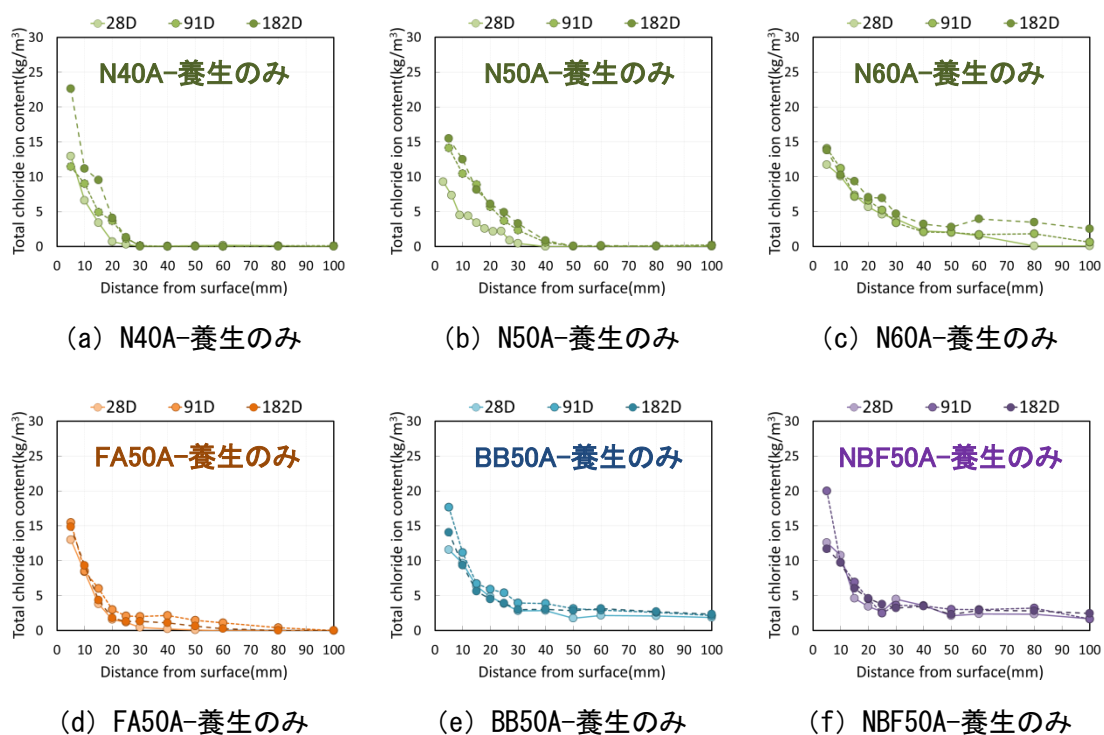


図 2.6 塩分浸透分布-養生のみ（気中養生）

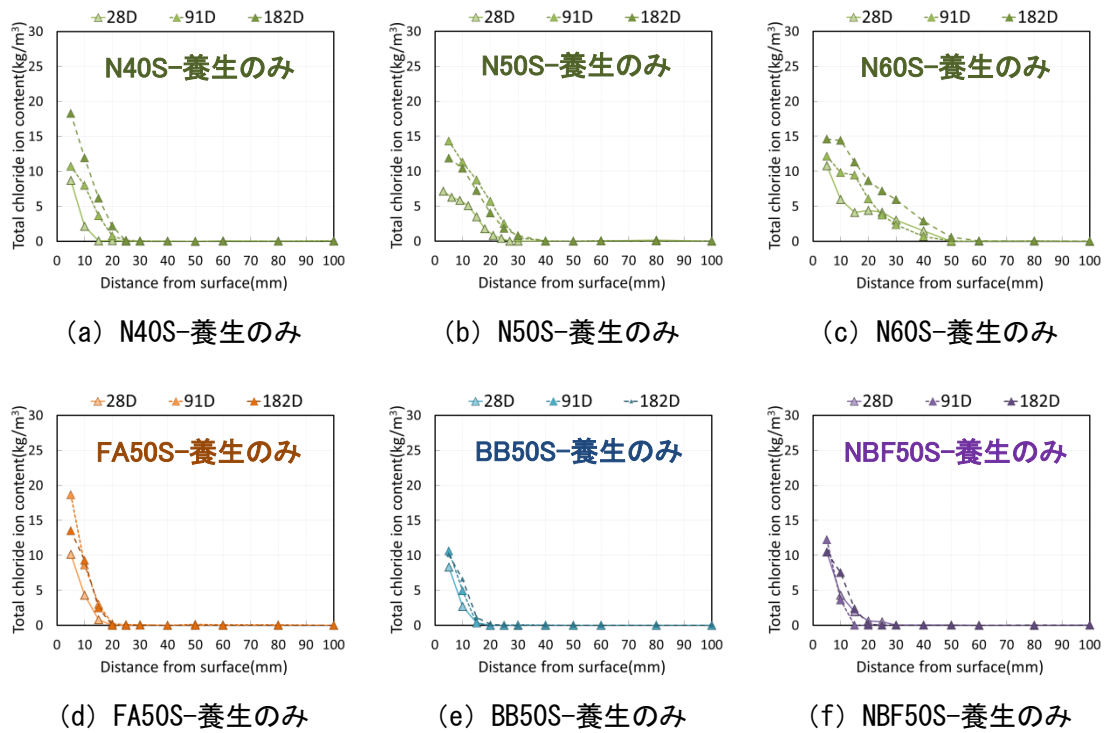


図 2.7 塩分浸透分布-養生のみ（封緘養生）

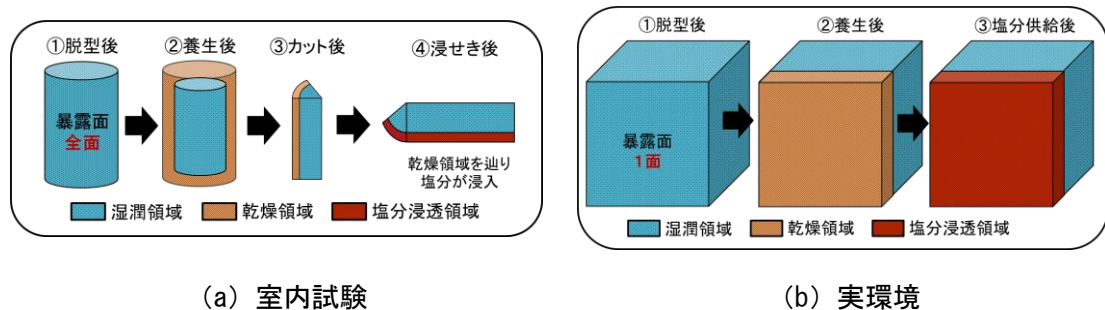


図 2.8 局所的乾燥領域の影響

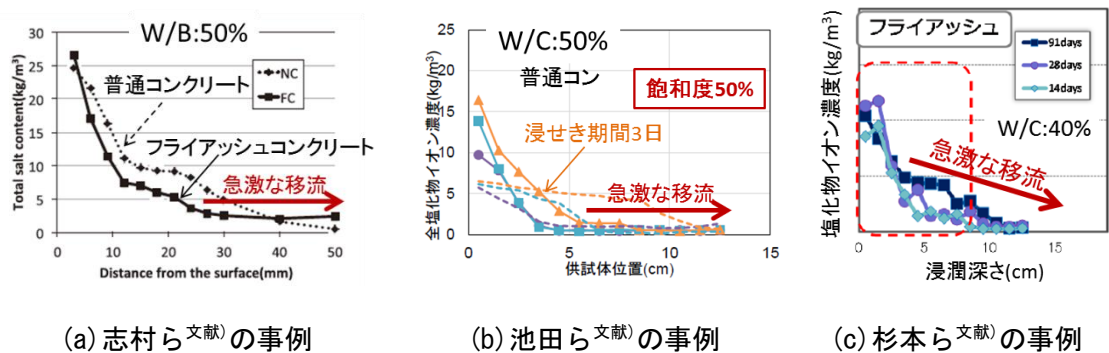


図 2.9 局所的乾燥領域の影響

(2) 乾湿 (乾湿繰返し)

次に乾湿繰返し試験を実施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.10 及び図 2.11 に示す。まず、気中養生を施した供試体については、「養生のみ」のシリーズ (図 2.6, 2.7) と概ね同様の傾向を示しており、水セメント比が低いほど塩分浸透抵抗性が向上していることを確認できる。しかしながら、例えば、「N50A」の塩分浸透深さが 50mm (養生のみ) から 40mm (乾湿) に変化している様に、常時浸せきしている供試体よりも全体的に塩分浸透距離が浅くなっており、乾湿を繰り返す方が僅かではあるが浸透が抑制されていることが分かる。気中養生を施した供試体では、塩水浸せき期間中に未反応分のセメントや反応速度の遅いフライアッシュや高炉スラグ微粉末が反応による空隙構造の緻密化に起因しているものと考えられ、これにより乾湿繰返しを実施した供試体ではサイクル数の増加に伴い浸透が抑制されたものと推察される。

封緘養生を施したシリーズに関しては、普通セメントのみを使用した供試体では、「養生のみ」のシリーズと比較しても浸透深さが概ね一致していることを確認できる。一方、混和材シリーズは、気中養生とは逆に常時浸せき状態よりも乾湿繰返しの方がより塩分が内部まで浸透していることが分かる。例えば、「FA50S」は常時浸せきの浸透深さが 20mm (養生のみ) なのに対して乾湿繰返しでは 25mm (乾湿) まで浸透している。一般に、乾燥時の炭酸化により塩化物イオンが濃縮することが知られており、特に混和材を使用した場合、炭酸化の進行に伴い固定塩化物の解離や細孔容積の増加によって塩化物イオンが表層ではなく内部に濃縮されることが知られている⁹⁾¹⁰⁾。さらに、乾湿繰返しにおいて、1 サイクル中の乾燥期間が長くなる程内部への塩分浸透量が増加することが明らかにされている¹¹⁾。したがって、本検討の混和材シリーズにおいても、上記した機構により塩分の濃縮現象もしくは乾湿繰返しの乾燥の影響を受けたことで常時浸せき状態よりも塩分が内部へと浸透したのではないかと考えられる。ここで、供試体内への塩分浸透量に着目すると、「養生のみ」と比較して乾湿繰返し試験を実施することで供試体内部の塩分浸透の絶対量が増加していることを確認できるが、これも上記の機構によるものと推察される。

以上の分析結果より、乾湿繰返しを実施したシリーズでは、養生のみを施したシリーズと同様に水セメント比が低い程、また混和材を用いて適切な養生を施すことで塩分浸透抵抗性が向上し、塩分浸透が停滞することを確認した。ただし、乾燥期間中に気中養生は再水和等の反応により、封緘養生は塩分の濃縮や乾燥の影響により乾湿繰返しを施したコンクリートは、常時浸せき状態のものとは異なる塩分浸透挙動を示すことを確認した。

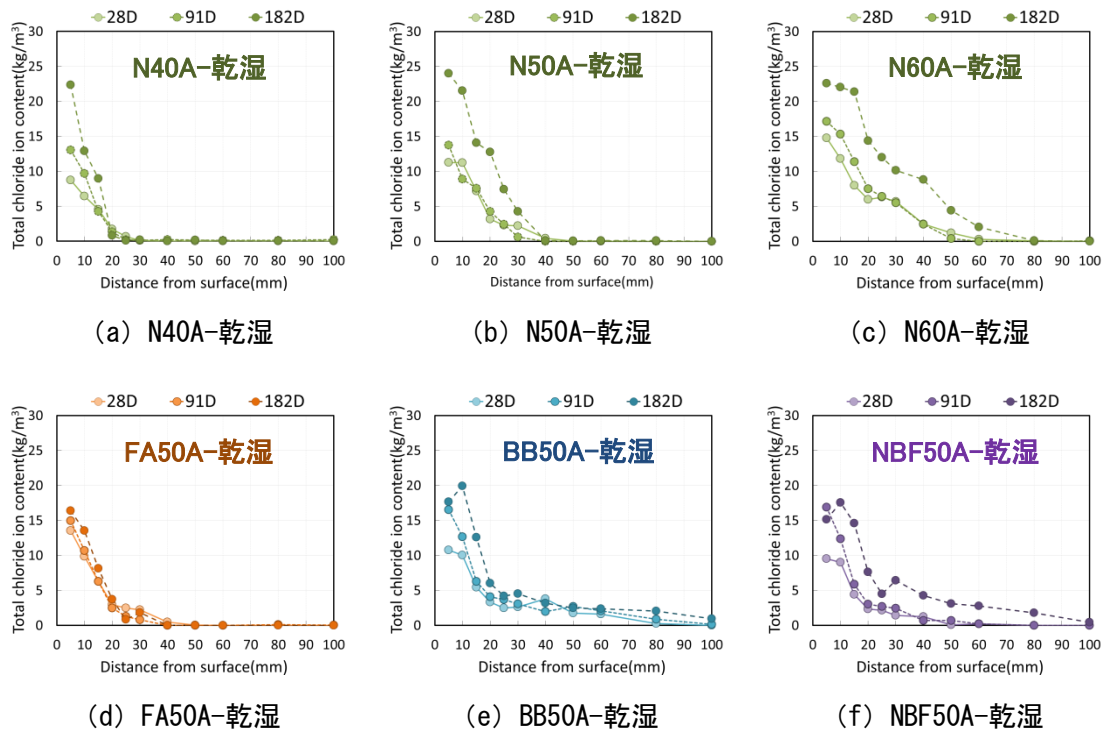


图 2.10 塩分浸透分布-乾湿 (氣中養生)

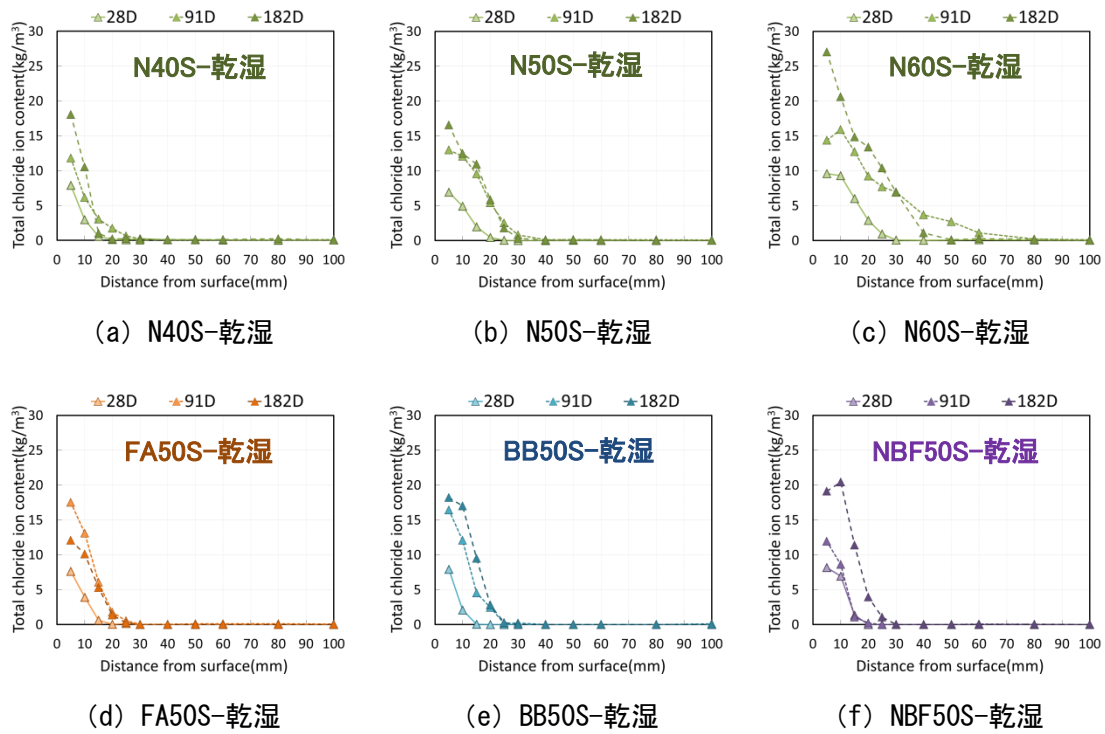


图 2.11 塩分浸透分布-乾湿 (封緘養生)

2.2.6 乾燥及び水分の再供給が塩分浸透挙動に与える影響

(1) 40°C (40°C乾燥)

40°C乾燥を施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.12 及び図 2.13 に示す。まず、気中養生を施した供試体については、40°C乾燥を経験したことで「養生のみ」(図 2.6)と比較して全体的に塩分がより深部まで浸透しているが、「N40A-40°C」は 40mm, 「N50A-40°C」は 60mm, 「FA50A-40°C」は 80mm において塩分の浸透が停滞していることを確認できる。一方で「BB50A-40°C」及び「NBF50A-40°C」に関しては前節同様に急激な移流により塩分が深部(100mm:最深部)まで浸透していることが分かる。次に封緘養生を施した供試体に関しては、気中養生と同様に「養生のみ」(図 2.7)と比較して塩分がより深部まで浸透しているが、「N40S-40°C」は 40mm, 「N60S-40°C」は 60mm, 「FA50S-40°C」は 40mm の深さで塩分の浸透が停滞していることを確認できる。ただし、「NBF50S-40°C」に関しては浸透深さが逆転していたため評価対象外とした。これは供試体の個体差に起因しているものと思われる。

以上の分析結果より、40°C乾燥を施した場合、塩分浸透抵抗性が低下し、乾燥を経験していないシリーズと比較して塩分がより深部まで浸透することを確認した。ただし、塩分の浸透が停滞している結果も認められたため、40°C乾燥を施した場合においても、塩分浸透の停滞現象を引き起こす要因は存在するものと考えられる。

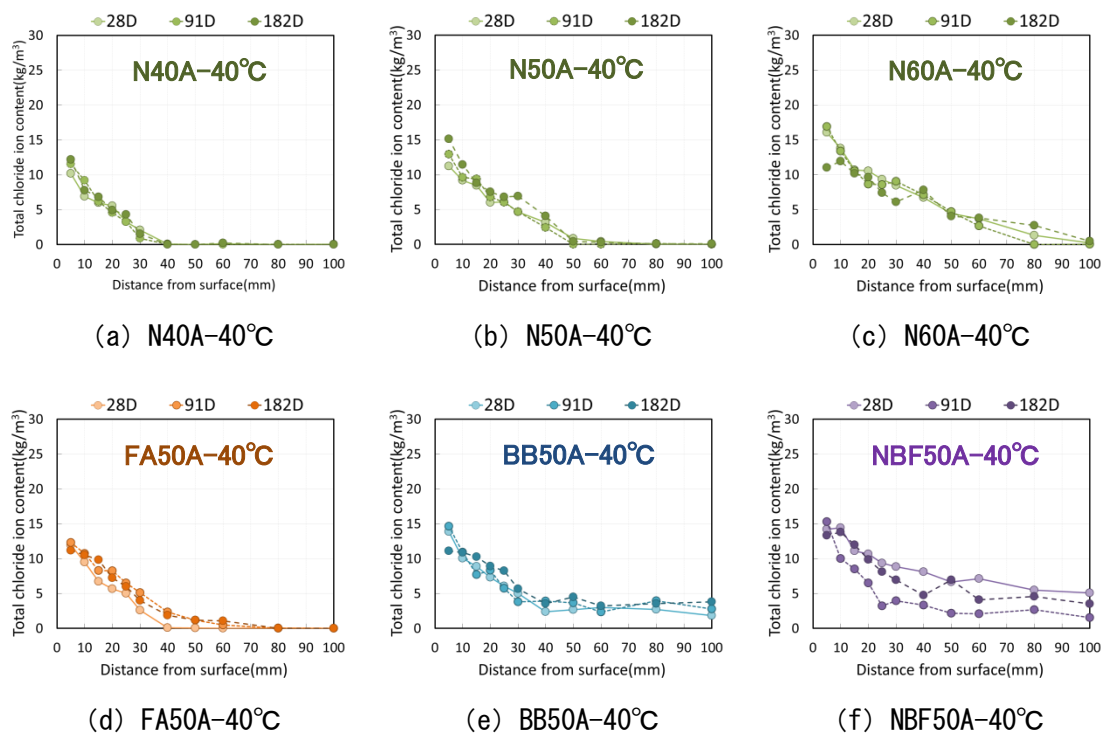


図 2.12 塩分浸透分布-40°C (気中養生)

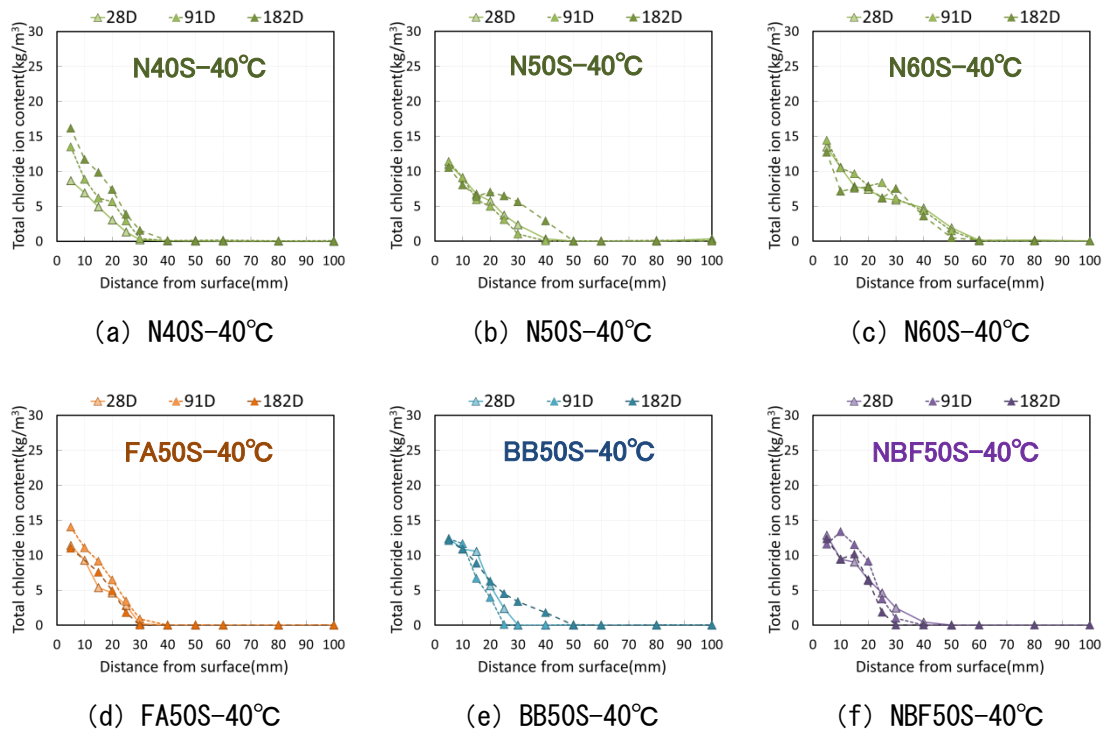


図 2.13 塩分浸透分布-40°C (封緘養生)

(2) 40°C乾湿 (40°C乾燥から乾湿繰返し)

40°C乾燥を施した後に乾湿繰返しによる塩水浸せき試験を実施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.14 及び図 2.15 に示す. 分析結果を見ると, 気中養生, 封緘養生共に塩分浸透深さが「40°C」シリーズと概ね一致していることが分かる. しかし, 水セメント比が高くなるほど, また混和材を用いた供試体において, 供試体内への塩分浸透量が増加している. 特に表層付近の塩分量の増加が目立っているが, これは 2.2.5(2)で考察したように乾湿繰返しを施したことで塩分の濃縮現象や乾燥による影響が表れたものと思われる.

以上の分析結果より, 40°C乾燥後に乾湿繰返しを施した場合, 塩分浸透深さに関しては, 「40°C」シリーズと概ね一致していたことから, 浸透(深さ)方向の塩分浸透挙動に関しては乾湿繰返しによる影響を受けないことを確認した. ただし, 乾湿繰返しを施すことで供試体内部への塩分浸透量が塩分の濃縮現象や乾湿繰返し中の乾燥の影響により増加する傾向を示すことを確認した.

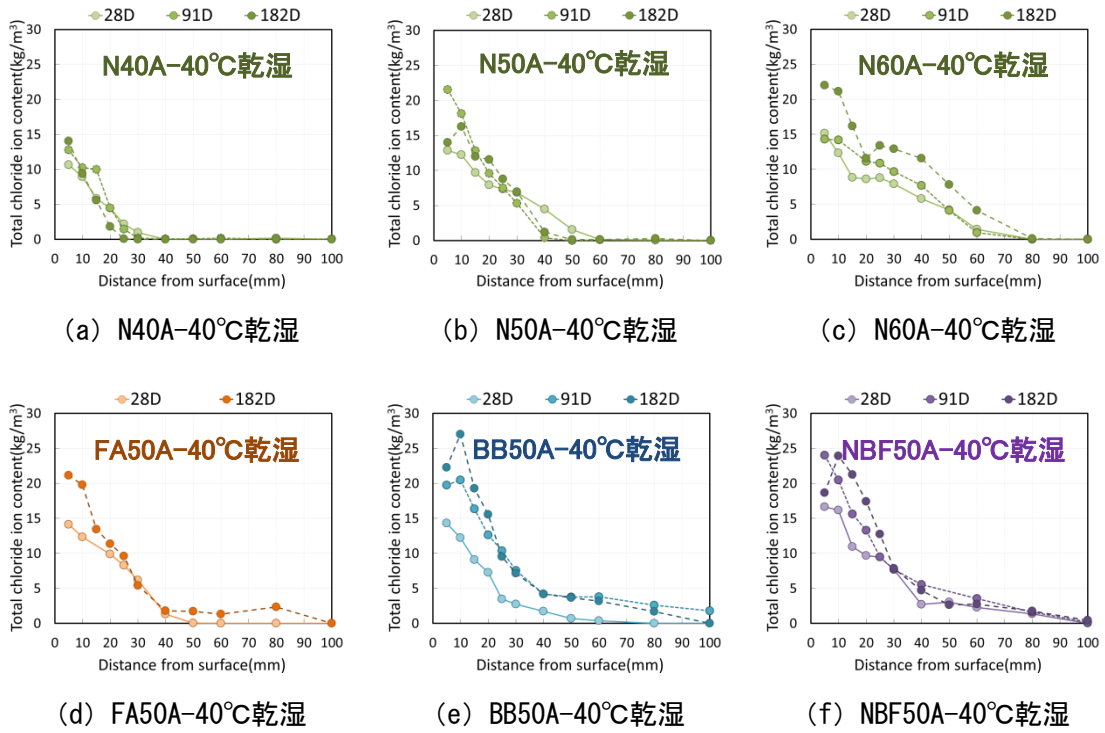


图 2.14 塩分浸透分布-40°C乾湿 (氣中養生)

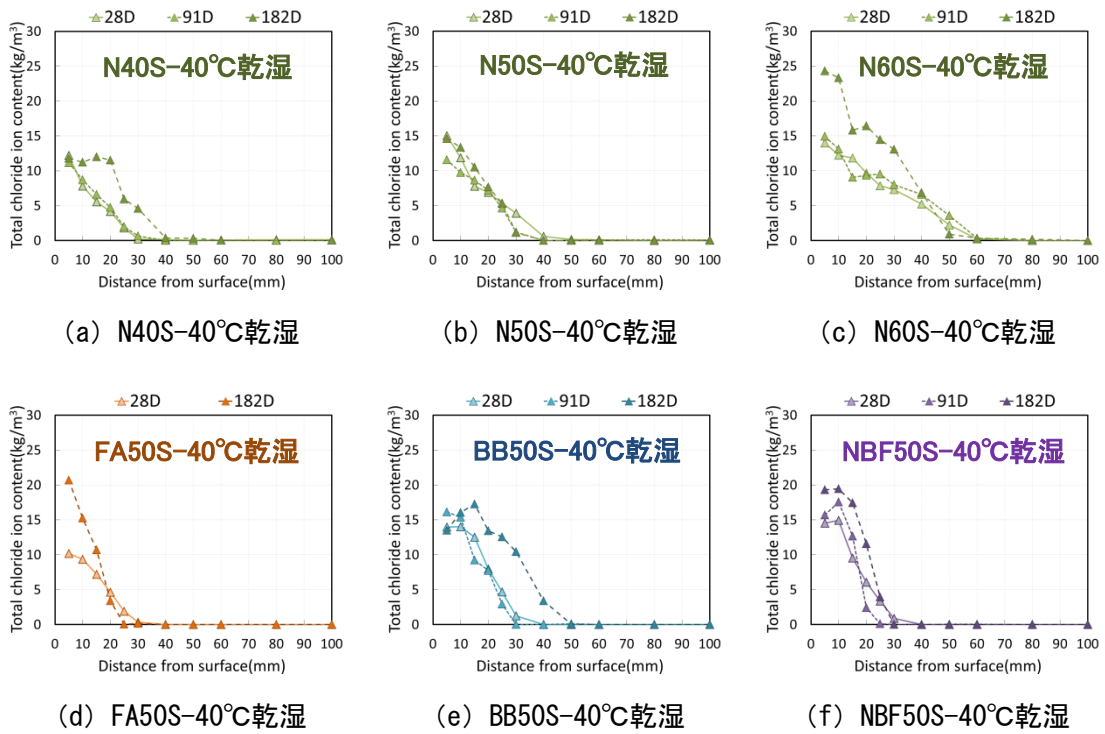


图 2.15 塩分浸透分布-40°C乾湿 (封緘養生)

(3) 40℃吸水（40℃乾燥から吸水過程）

40℃乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.16 及び図 2.17 に示す。まず、気中養生を施した供試体の分析結果を見ると、「N40A-40℃吸水」を除くその他の供試体では、「40℃」シリーズ（図 2.12, 2.13）と比較して塩分がより深部まで浸透していることが分かる。特に「N60A-40℃吸水」及び「FA50A-40℃吸水」では、より顕著に塩分が内部へと浸透していることを確認できる。コンクリート内部が不飽和湿潤状態にある場合、塩分の浸透は大幅に抑制されるものと考えていた。しかし、本結果はそのような傾向とは相反しており、逆に塩分浸透抵抗性を低下させる要因となっている。ここで、同じ不飽和湿潤状態の条件であっても、養生後に空隙内に残存している水分と乾燥過程後に外部から供給した水分では空隙内における水分の存在位置や状態が異なっている可能性が高い。したがって、空隙内の水分が塩分浸透挙動に与える影響を明確にするためには、空隙内における水分の存在位置や状態を理解する必要があるものと思われる。ただし、40℃乾燥や吸水過程を経験したことで空隙構造が大きく変化している可能性が考えられるが、本現象と空隙構造との関係については 2.3 節で考察する。

次に封緘養生の供試体シリーズに関しては、おそらく個体差によるものと思われるが、塩分の浸透深さが逆転している結果がいくつか見られるため詳細な評価はできないが、「N40S-40℃吸水」及び「N50S-40℃吸水」以外の供試体において「40℃」シリーズよりも塩分がより深くまで浸透していることを確認できる。例えば、「BB50S」では 50mm（40℃）から 100mm（40℃吸水）に、「NBF50S」では 40mm（40℃）から 100mm（40℃吸水）に塩分浸透深さが伸びている。したがって、封緘養生のシリーズに関しても、40℃乾燥後に水分を再供給したことで塩分浸透が抑制されるのではなく、逆に促進されており塩分浸透抵抗性が低下していることが分かる。

以上より、40℃乾燥後に吸水過程を施した場合、40℃乾燥のみを施した「40℃」シリーズと比較して塩分がより深部まで浸透することを確認した。これは、養生後に空隙内に残存している水分と乾燥後に意図的に外部から供給した水分では、空隙内における水分の存在位置や状態が異なることに起因しているのではないかと思われる。このことから、塩分浸透抵抗性は、水分の存在位置や状態に強く依存していることが示唆された。

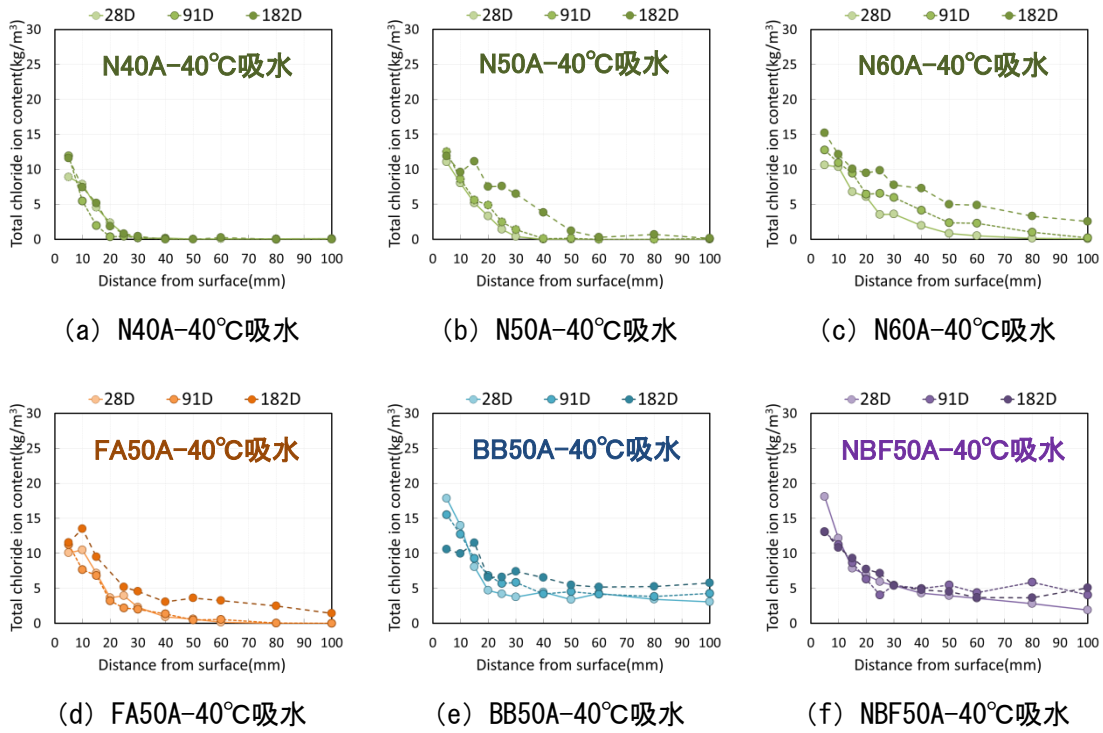


图 2.16 盐分浸透分布-40°C吸水 (氣中養生)

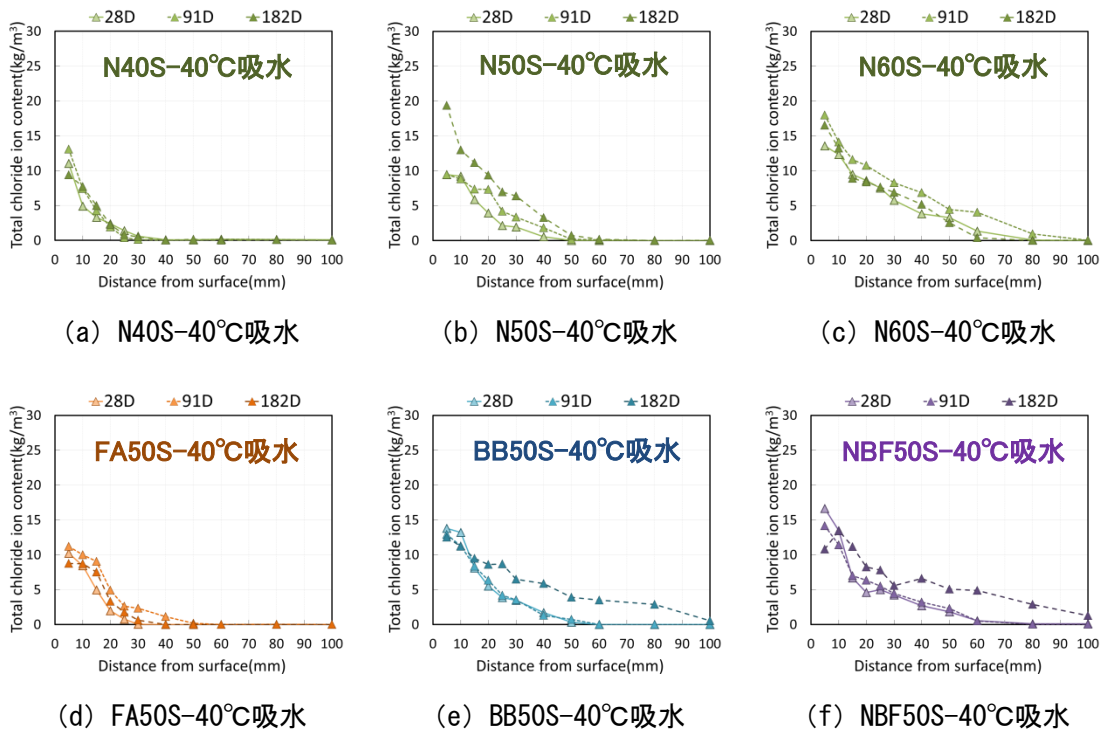


图 2.17 盐分浸透分布-40°C吸水 (封緘養生)

(4) 40°C吸湿 (40°C乾燥→吸湿過程)

40°C乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.18 及び図 2.19 に示す。気中養生，封緘養生双方の分析結果を見ると，「40°C吸水」の結果と同様に「40°C」シリーズと比較して塩分がより深部まで浸透していることを確認できる。例えば，「BB50S」では 50mm (40°C) から 80mm (40°C吸湿)，「NBF50S」では 40mm (40°C) から 80mm (40°C吸湿) まで塩分浸透深さが伸びている。このことから，蒸気として水分を供給した吸湿過程を施した場合においても，塩分浸透が抑制されるのではなく，逆に促進する様な現象が生じているものと考えられる。

以上より，40°C乾燥後に吸湿過程を施した場合においても，外部から供給した水分が塩分浸透を抑制する挙動は認められず，逆に促進する様な現象が生じていたことから，「40°C吸水」の結果の考察と同様に，養生後に残存している水分と外部から意図的に供給した水分では，存在位置や状態が異なるのではないかと考えられる。ただし，乾燥過程と吸湿過程を経験したことで，空隙構造等のコンクリート内の状態が物理的に変化している可能性があることも十分に考えられるため，本結果のみでは一概には判断できない。よって，本現象については，2.3 節，2.4 節において空隙構造や含水状態に着目してより詳細な検討を行う。

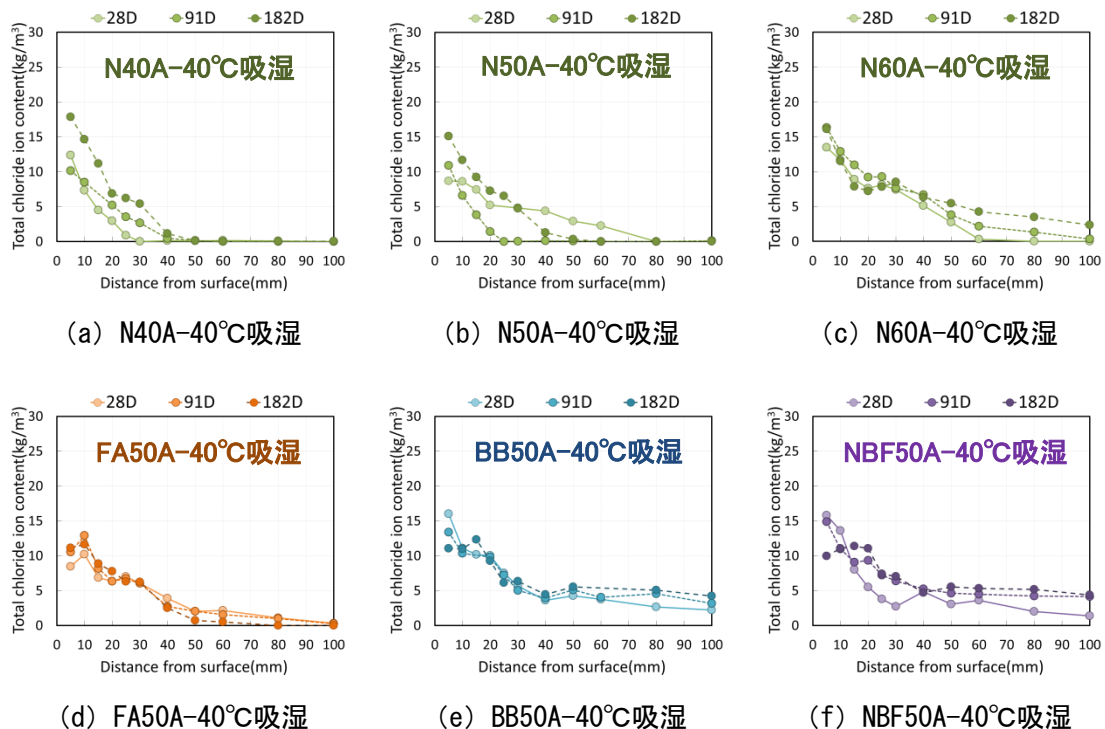


図 2.18 塩分浸透分布-40°C吸湿 (気中養生)

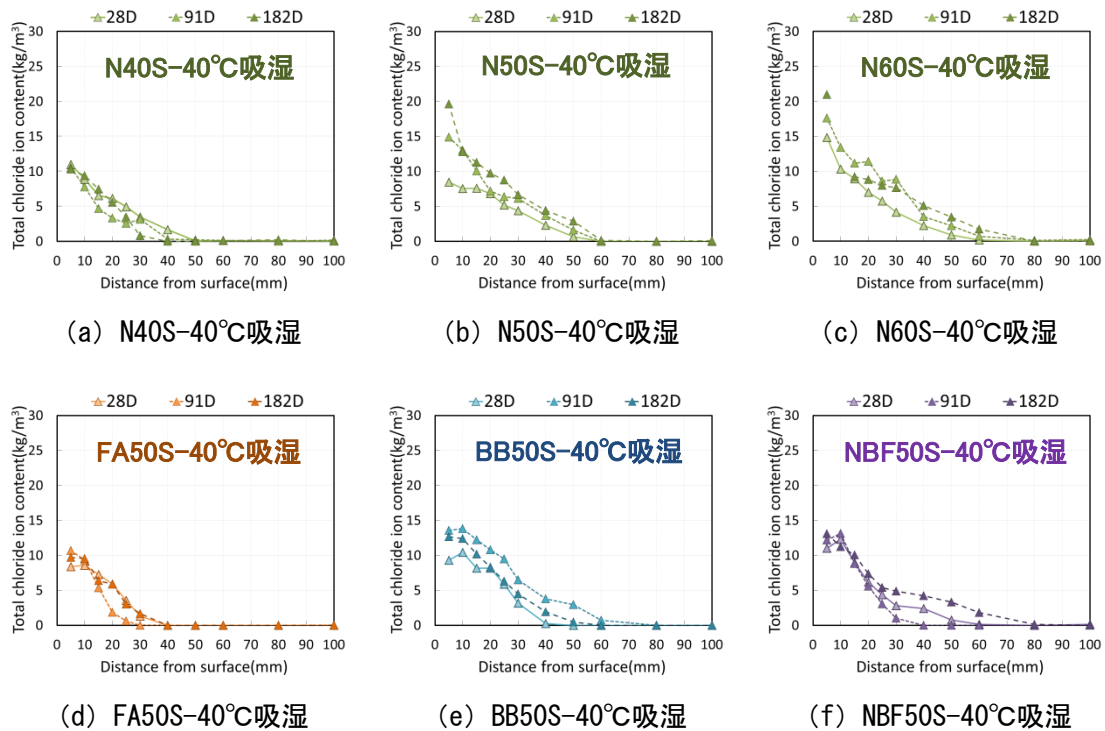


図 2.19 塩分浸透分布-40°C吸湿 (封緘養生)

(5) 105°C (105°C乾燥)

105°C乾燥を施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.20 及び図 2.21 に示す。気中養生、封緘養生双方の分析結果を見ると、「養生のみ」(図 2.6, 2.7) 及び「40°C」(図 2.12, 2.13) と比較して塩分がより深部まで浸透しており、乾燥温度が高くなるにつれて塩分浸透抵抗性が低下していることが分かる。例えば、「FA50S」では 20mm(養生のみ)、40mm(40°C)、50mm(105°C) というように塩分浸透深さが伸びている。一方で、塩分浸透分布の経時変化に着目すると、「N50S-105°C」では 80mm、「FA50S-105°C」は 50mm、「BB50S-105°C」は 50mm、「NBF50S-105°C」は 50mm において塩分浸透が停滞していることを確認できる。ただし、「N50A-105°C」、「N40S-105°C」及び「N60S-105°C」に関しては、91D から 182D の浸透深さが変化していないことから塩分浸透が停滞しているようにも見受けられるが、塩分の浸透深さが浸せき材齢間で前後していたため評価対象外とした。これは、105°C乾燥を経験したことで、供試体内に微細なひび割れが生じたことにより供試体間に個体差が生じたことに起因しているものと思われる。

以上より、塩分浸透深さはコンクリート内部の含水状態や空隙構造に左右されるものと考えられるが、105°C乾燥を経験し、コンクリート内部が極めて乾燥している状態にある場合にも塩分の浸透が停滞し得ることが明らかになった。

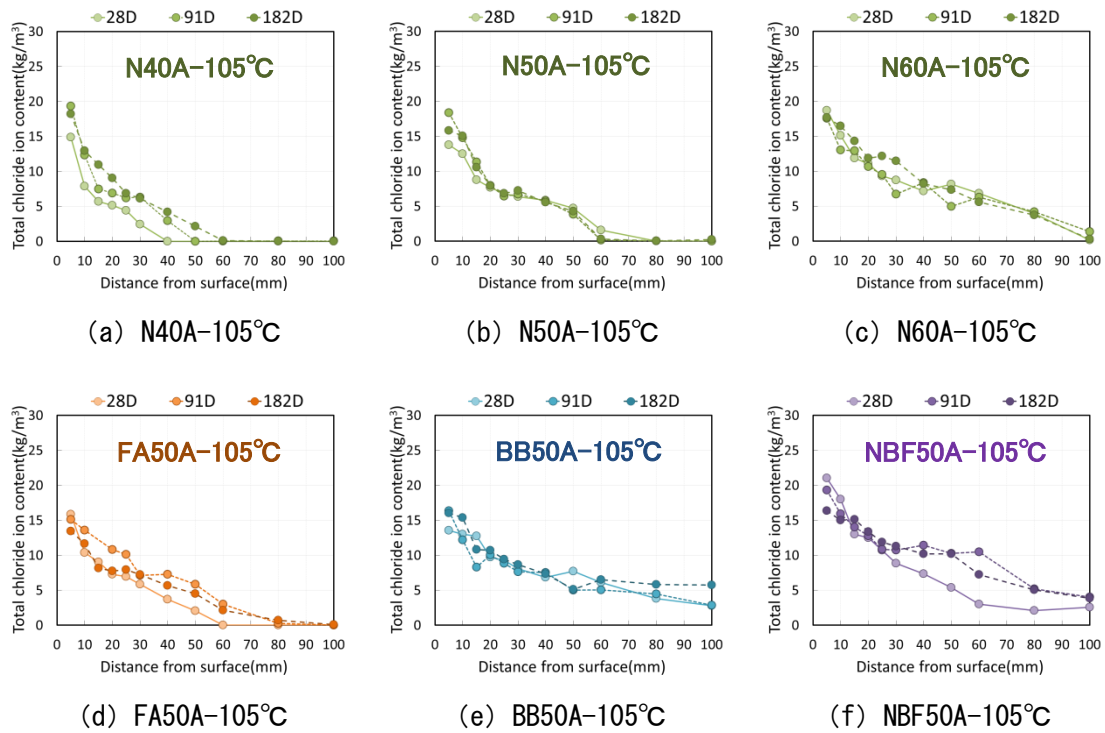


图 2.20 塩分浸透分布-105°C (氣中養生)

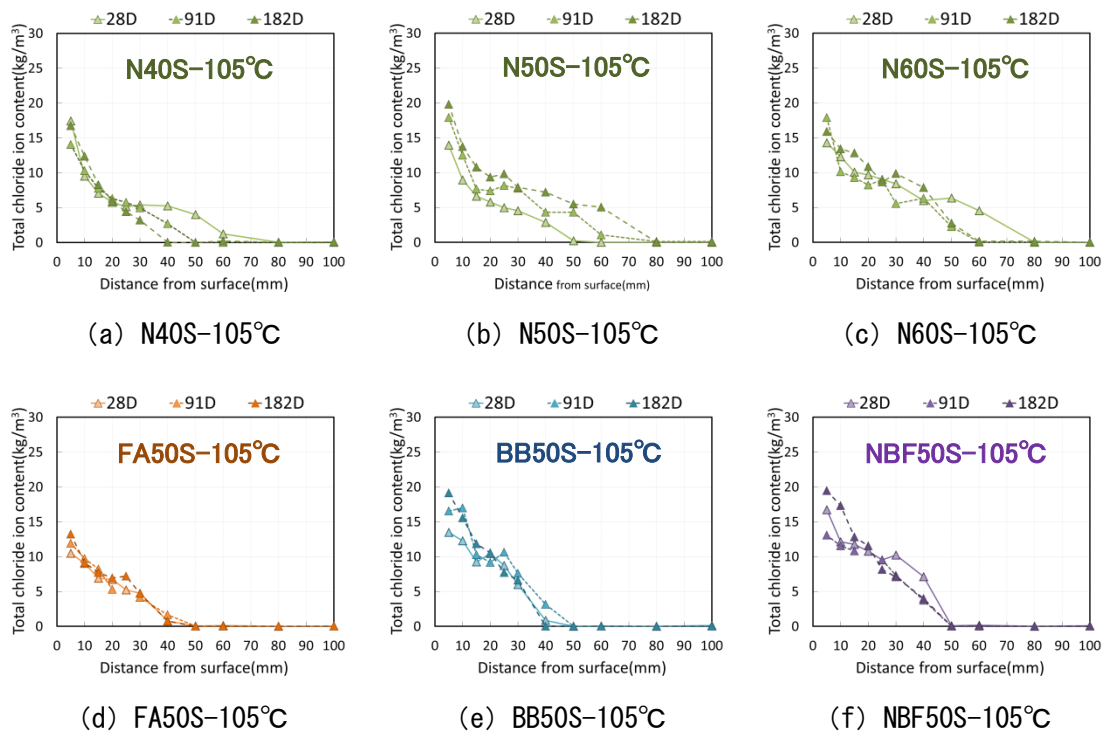


图 2.21 塩分浸透分布-105°C (封緘養生)

(6) 105°C吸水 (105°C乾燥→吸水過程)

105°C乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.22 及び図 2.23 に示す。まず、気中養生の分析結果を見ると、「105°C」シリーズの結果 (図 2.20) と比較して、吸水過程を経験することで供試体内部への塩分浸透量が減少しているが、塩分の浸透深さは変化していないことが分かる。例えば、「N50A-105°C吸水」に着目すると、「N50A-105°C」と比較して供試体内部への浸透量が約半分程度に抑制されている。一方で、封緘養生の分析結果を見ると、こちらもよく似た傾向を示してように見える。しかし、「105°C」シリーズでは塩分の浸透が停滞していた「BB50S」と「NBF50S」については、吸水過程を経験したことで、供試体内部への塩分浸透量は減少しているものの、浸透が継続していることを確認でき、「40°C吸水」で確認した現象と同様の傾向を示していることが分かる。したがって、本結果もまた、養生後に残存している水分と外部から意図的に供給した水分では存在位置や状態が異なることを強く示唆する結果であるといえる。

以上より、105°C乾燥後に吸水過程を施した場合、105°C乾燥のみを施した供試体と比較して、供試体内部への塩分浸透量は減少するものの、浸透深さ自体は大きく変化しておらず、一部の供試体においては逆に塩分浸透深さが伸びているような結果が見受けられた。このことから、少なくとも外部から供給した水分では、塩分浸透を抑制する要因にはなり得ないものと思われる。

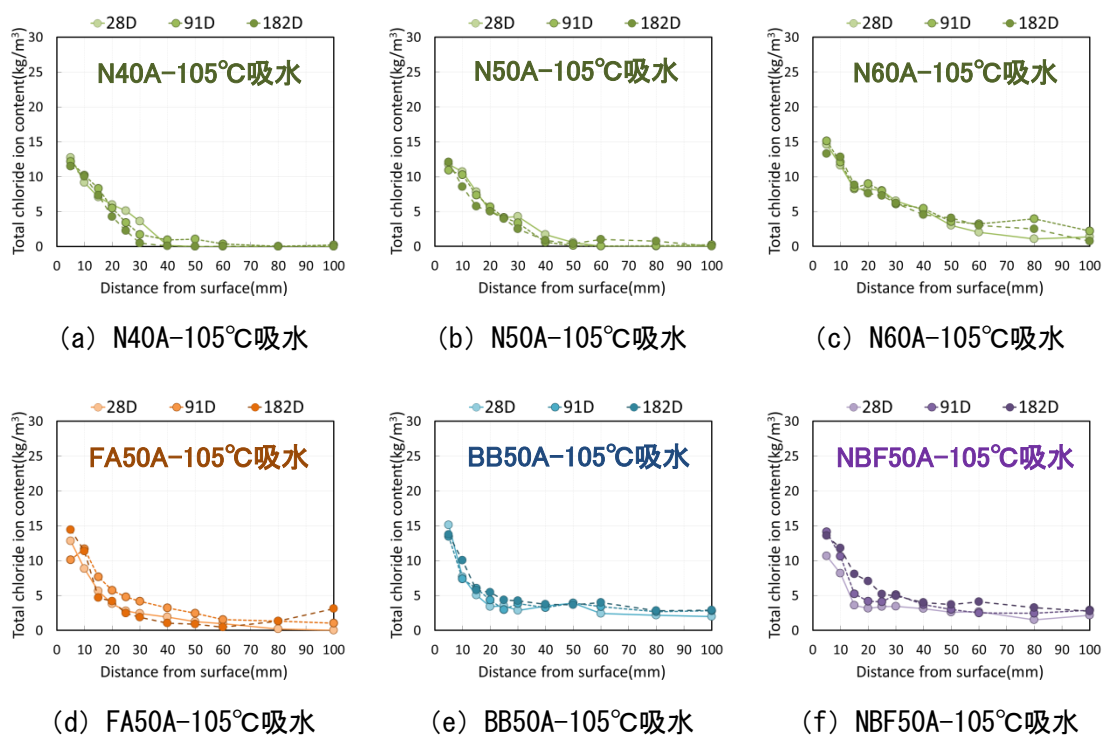


図 2.22 塩分浸透分布-105°C吸水 (気中養生)

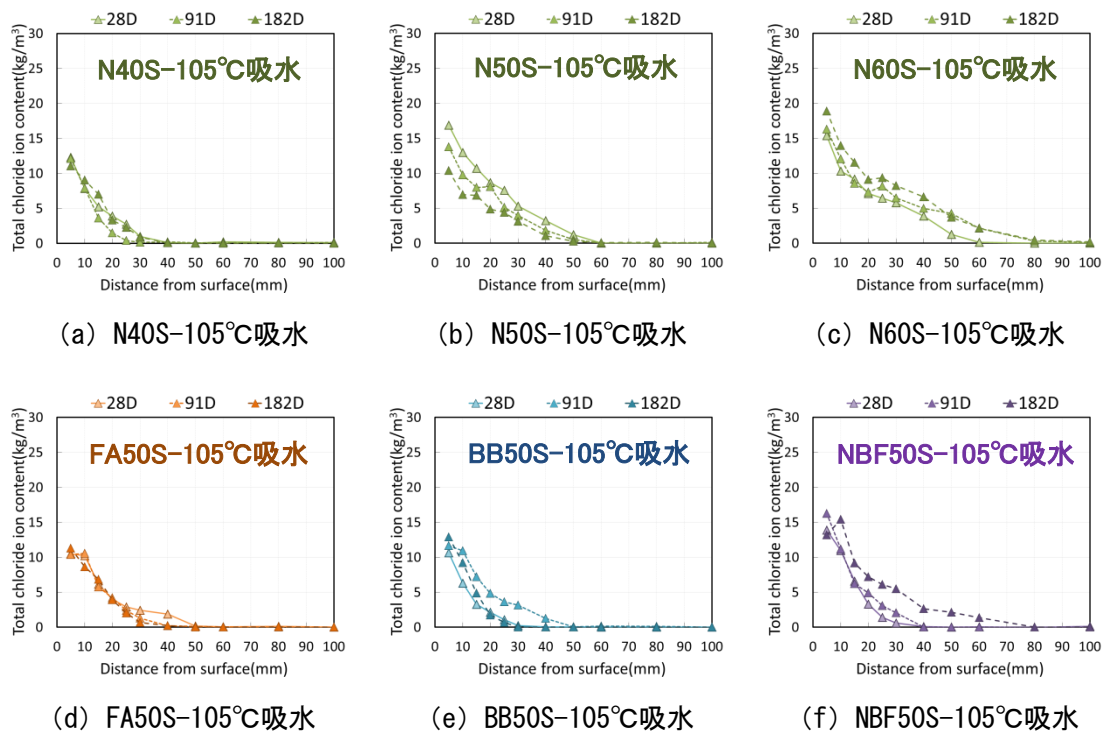


図 2.23 塩分浸透分布-105°C吸水（封緘養生）

(7) 105°C吸湿（105°C乾燥→吸湿過程）

105°C乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズの塩分浸透分布を図 2.24 及び図 2.25 に示す。まず、気中養生を施した供試体の分析結果を見ると、「105°C」シリーズの結果（図 2.20）と比較して、塩分浸透深さや供試体内部への塩分浸透量が概ね同程度であることが分かる。よって、蒸気として供給された水分は塩分浸透の抑制に対しては寄与していないことが分かる。ただし、浸せき期間が長くなることで再供給した水分の影響が表れる可能性は十分に考えられる。次に封緘養生を施した供試体の分析結果では、「105°C」シリーズの結果（図 2.21）と比較して、塩分がより深部まで浸透していることを確認できる。例えば、「N50S-105°C」の浸透深さが 80mm であったのに対して「N50S-105°C吸湿」では 100mm まで浸透している。よって、封緘養生を施した供試体に関しては、蒸気として供給された水分が塩分浸透抵抗性を低下させる要因として作用しているものと考えられる。これは、空隙内における水分の存在位置や状態が塩分浸透挙動に対して重要な役割を果たしていることを示唆する結果であるといえる。

以上より、105°C乾燥後に吸湿過程を施した場合、特に封緘養生を施した供試体において、塩分浸透抵抗性が低下するような結果が得られたことから、蒸気として供給した水分が塩分浸透抵抗性を低下させる要因になったものと思われる。

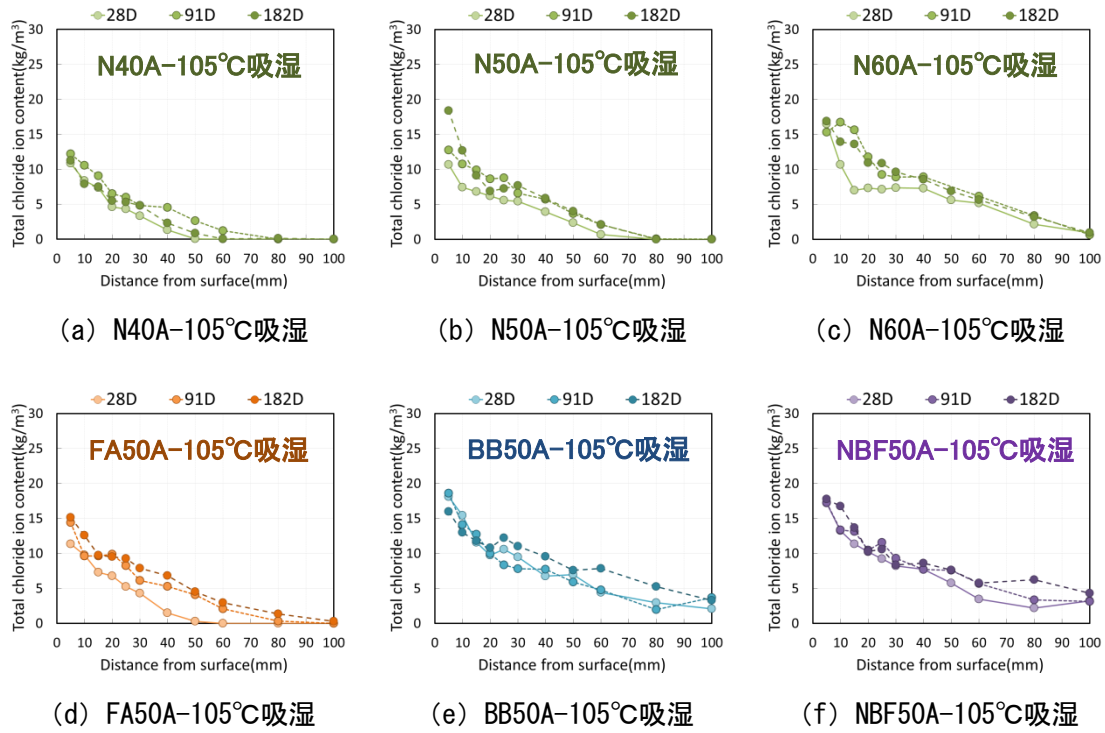


图 2.24 盐分浸透分布-105°C吸湿 (气中養生)

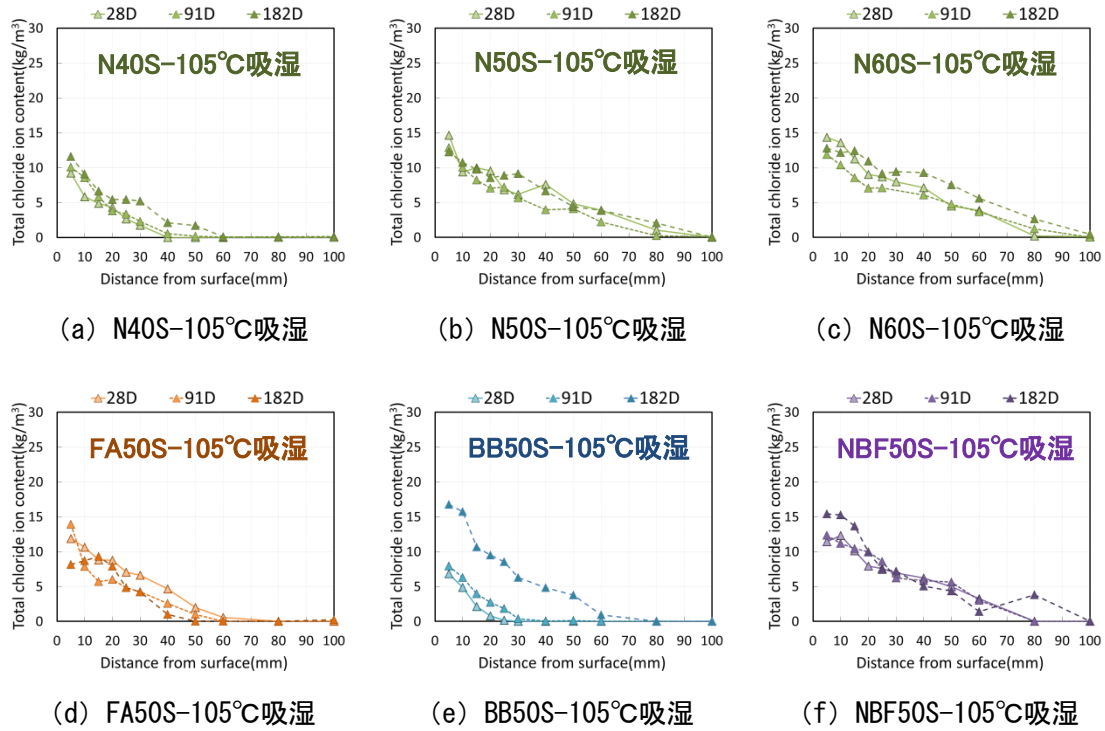


图 2.25 盐分浸透分布-105°C吸湿 (封緘養生)

2.3 空隙構造が塩分浸透挙動に与える影響

2.3.1 検討目的

移流に起因する塩分の浸透は、コンクリート中の空隙を移動経路としている。そのため、塩分の浸透、延いてはその停滞現象を理解するうえで空隙構造は極めて重要な要因となる。また、乾燥や水分の再供給により空隙構造は劇的に変化すると考えられ、このような変化は液状水の浸透挙動に強く影響を与える。

以上を踏まえて、本検討では、種々の処理を施した供試体の空隙構造を水銀圧入法により測定し、得られた結果を 2.2.5 節及び 2.2.6 節から得られた塩分浸透分布と比較することで、塩分浸透挙動と空隙構造の関係を解明することを目的とした。

2.3.2 試料概要

本検討で用いた試料は、室内塩水浸せき試験に供する直前の供試体から採取した。そのため、試料のシリーズ数は、室内塩水浸せき試験と同じ計 108 種類である。試料シリーズの詳細は 2.2.1 節及び 2.2.2 節を参照されたい。

ここで、分析に用いる試料は、粗骨材や寸法の大きな細骨材が混入しないように注意して、供試体の中心部(表面から約 5cm の箇所)から、1 辺が約 5mm 程度の立方体になるように、ハンマーを用いて粉砕加工し、各供試体から約 2g 程度採取した。その後、採取した試料は、アセトンに 24 時間以上浸せきさせた後、D-dry 法により 24 時間真空乾燥させた。

2.3.3 分析概要

本分析では、Quantachrome Instruments 製の水銀圧入式ポロシメーター (Poremaster GT, 図 2.26) を用いて水銀圧入法により空隙構造を測定した。空隙径の算出には、式(2.1)で表される Washburn の式が用いられ、本分析では、水銀の接触角 θ は 130° 、表面張力 γ は 485mN/m に設定した。

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \quad (2.1)$$

ここで、 ΔP : 設定圧力、 γ : 表面張力、 θ : 接触角、 r : 管半径である。N40, N50, N60 のシリーズは、圧入と排出を 1 サイクル行い、累積空隙量のみを測定し、FA50, BB50, NBF50 のシリーズは、圧入と排出を 2 回繰り返すことで連続空隙量とインクボトル空隙量を同時に測定した。尚、10nm 以下の空隙に水銀を圧入した場合、空隙が変化する可能性があることが吉田ら¹⁰⁾により指摘されているため、測定対象の最小空隙径を 10nm に設定した。また、測定結果から物質移動の指標の一つである閾細孔径を酒井ら¹³⁾が提案した手法を参考にして算出した。



図 2.26 水銀圧入式ポロシメーター(Poremaster GT)

2.3.4 累積空隙量及び空隙率

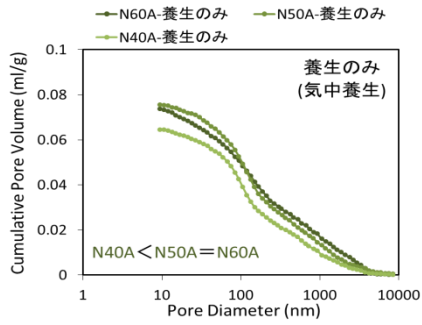
(1.1) 累積空隙量及び空隙率「養生のみ」

養生のみを施した供試体シリーズの累積空隙量分布を図 2.27 及び図 2.29 に示す。これらの図は、縦軸が累積空隙量 (ml/g)、横軸が空隙径 (nm) を示している。また、空隙率を図 2.28 及び図 2.30 に示す。

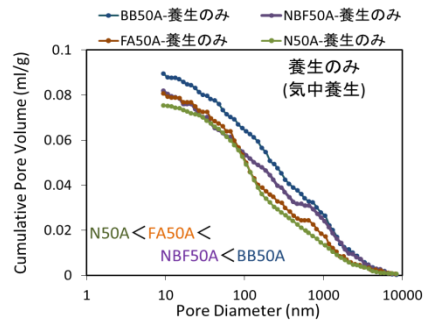
まず、普通セメントシリーズの結果に着目すると、気中養生、封緘養生共に水セメント比が低い程空隙構造は緻密に形成される傾向を示していることを確認できる。次に、混和材シリーズの結果を見ると、気中養生を施した供試体では「BB50A」の空隙率が突出していることが分かる。これは供試体の型枠存置期間に依存しているものと考えられる。フライアッシュを用いた供試体は型枠存置期間を 14 日に、三成分系の供試体は 10 日に設定したのに対して、高炉スラグ微粉末を用いた供試体は示方書相当の 7 日に設定しており、この期間の差異が空隙構造の形成に強く影響を及ぼしているものと思われる。続いて、封緘養生を施した供試体に関しては、気中養生よりも空隙構造が緻密に形成されていることを確認できる。特に、「BB50S」は養生方法による差異が顕著に表れており、潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末を用いた供試体では、適切な養生を施すことで空隙構造は密に形成されることが分かる。一方で、フライアッシュを用いた供試体では、普通セメントよりも空隙構造が粗に形成されていた。

(1.2) 累積空隙量及び空隙率「養生のみ」-塩分浸透挙動との関係-

ここで、本結果と塩分浸透挙動(図 2.6 及び図 2.7)の関係について考察する。まず、空隙率が低い程塩分浸透抵抗性が高くなっているようにも見受けられるが、同程度の空隙率を有している「N50A : 50mm (塩分浸透深さ, 以下略)」と「NBF50A : 100mm」や「N50S : 40mm」と「NBF50S : 30mm」では塩分浸透抵抗性に統一性がみられない。さらに、比較的高い空隙率を有している「FA50S : 20mm」に関しても「BB50S : 20mm」と同程度の塩分浸透抵抗性を示している。以上より、同程度の空隙量であっても塩分浸透挙動は大きく変化することから、空隙の屈曲度や壁面の化学組成が塩分浸透挙動により強く影響を与えているものと思われる。

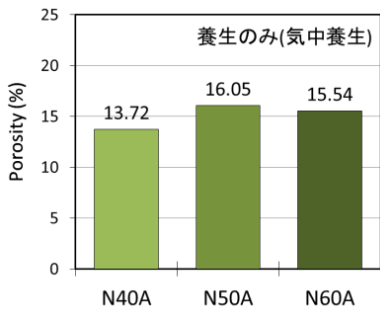


(a) 普通セメントシリーズ

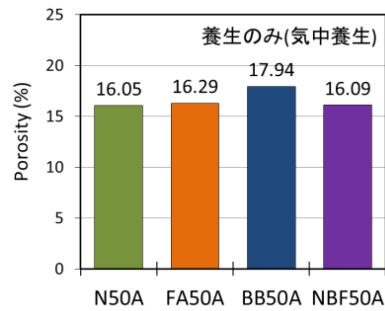


(b) 混和材シリーズ

図 2.27 累積空隙量分布-養生のみ (気中養生)

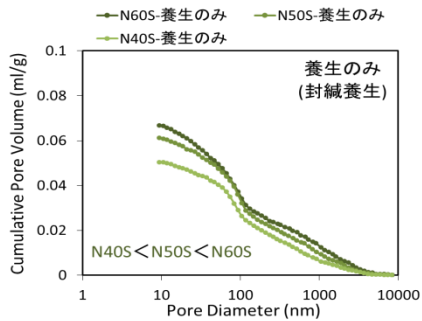


(a) 普通セメントシリーズ

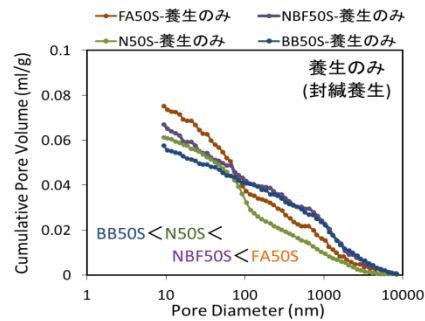


(b) 混和材シリーズ

図 2.28 空隙率-養生のみ (気中養生)

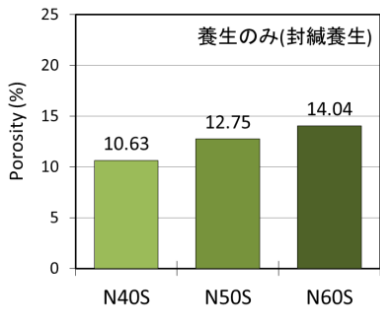


(a) 普通セメントシリーズ

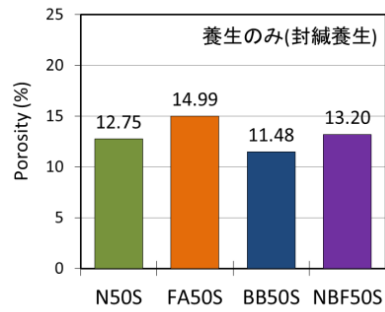


(b) 混和材シリーズ

図 2.29 累積空隙量分布-養生のみ (封緘養生)



(a) 普通セメントシリーズ



(b) 混和材シリーズ

図 2.30 空隙率-養生のみ (封緘養生)

(2.1) 累積空隙量及び空隙率「40°C (40°C乾燥)」

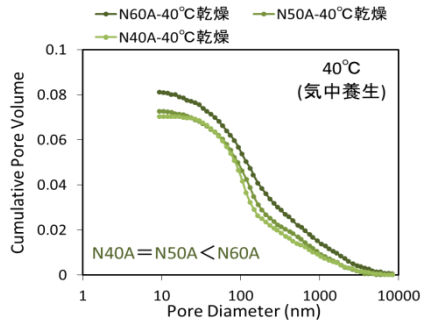
40°C乾燥を施した供試体シリーズの累積空隙量分布を図 2.31 及び図 2.33 に、空隙率を図 2.32 及び図 2.34 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 40°C乾燥を経験したことで供試体内の空隙量が増加していることを確認できる。例えば「FA50A」の空隙率が 16.29% (養生のみ) から 18.77% (40°C) に、「FA50S」は 14.99% (養生のみ) から 17.15% (40°C) に変化している。このような乾燥による空隙構造の粗大化については、C-S-H の構造変化、すなわち乾燥による C-S-H の収縮に起因することが青野ら¹⁴⁾により報告されている。本検討では、乾燥を約 2 か月間施したため、上記の機構による空隙構造の粗大化が顕著に表れたものと思われる。一方で、「N50A」と「BB50A」は乾燥を経験しているにも拘わらず空隙構造が緻密化していることを確認できる。一般に、水和反応の他に水和物が炭酸化することで空隙構造が緻密化することが知られているが、本検討の乾燥条件下では試料を採取したコンクリート内部まで炭酸化が影響を及ぼしているとは考え難い。乾燥期間を約 2 か月設けたため、期間中に反応が進行したことが要因の一つとして考えられるが、具体的な原因は明らかではない。

(2.2) 累積空隙量及び空隙率「40°C」-塩分浸透挙動との関係-

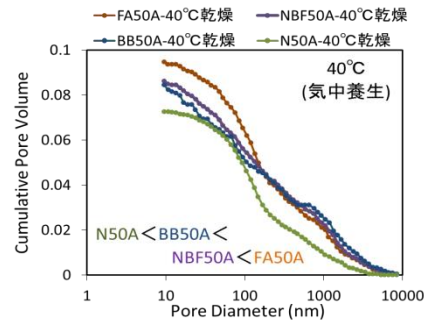
本結果と塩分浸透挙動 (図 2.12 及び図 2.13) の関係について考察する。まず、塩分分析の結果からは、40°C乾燥を経験したことで全体的に塩分浸透抵抗性が低下していることを確認した。空隙構造の分析結果と照らし合わせると、これは乾燥による空隙構造の粗大化に起因しているものと思われる。例えば、「FA50S」は空隙率が 14.99% (養生のみ) から 17.15% (40°C) に変化したことで、塩分浸透深さが 20mm (養生のみ) から 40mm (40°C) に増加している。しかしながら、一部の供試体では、空隙率の変化と塩分浸透挙動が対応しておらず、例えば、「N40A-40°C : 40mm」及び「N60S-40°C : 60mm」では、同程度の空隙率を有しているにも拘わらず塩分浸透距離が異なる深さを示していることを確認できる。さらに、「FA50S-40°C」に関しては、比較的高い空隙率 (17.15%) を示しているが、塩分の浸透が浅部 (40mm) において停滞していた。

コンクリート表層部が乾燥の影響を最も強く受ける領域であるが、本検討では、供試体の中心部から試料を採取したため、塩分浸透に影響を与えている領域の空隙構造の変化を十分に捉えられていない可能性が考えられる。ただし、空隙率が明らかに粗に変化している「FA50S-40°C」において、塩分の浸透が比較的浅部において停滞していたことを踏まえると、空隙率、すなわちコンクリート内部の空隙量は塩分の浸透深さに影響を与える要因ではあるものの、停滞現象を引き起こす支配要因ではないのではないかと推察される。

乾燥による空隙構造の変化は、空隙量だけではなく、物質移動抵抗性に大きく関与している閾細孔径や連続空隙量にも表れる。さらに、乾燥により供試体内部の含水状態が変化しているものと思われ、これらの要因が塩分浸透挙動や停滞現象に影響を与えている可能性は十分に考えられる。そのため、上記の要因については以降で検討することとする。

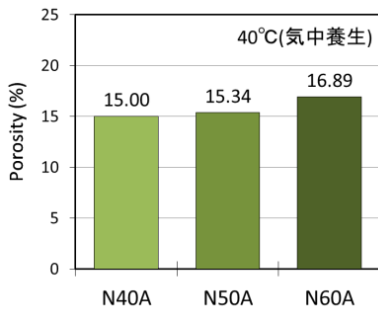


(a) 普通セメントシリーズ

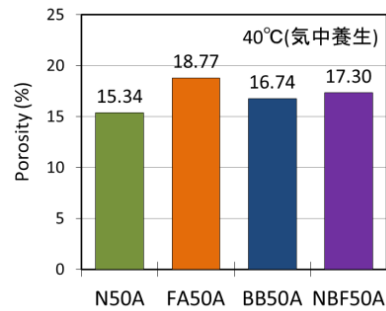


(b) 混和材シリーズ

図 2.31 累積空隙量分布-40°C (気中養生)

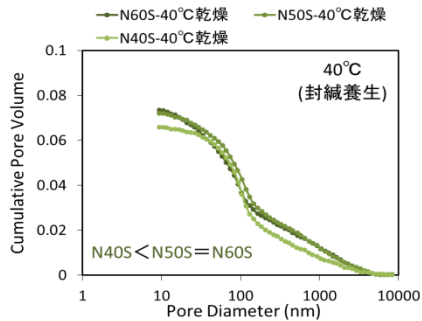


(a) 普通セメントシリーズ

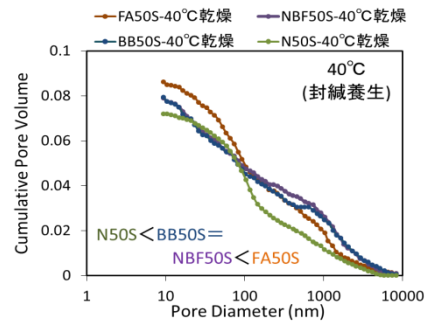


(b) 混和材シリーズ

図 2.32 空隙率-40°C (気中養生)

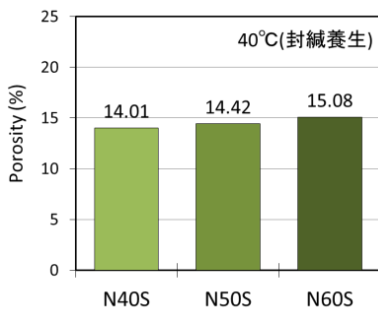


(a) 普通セメントシリーズ

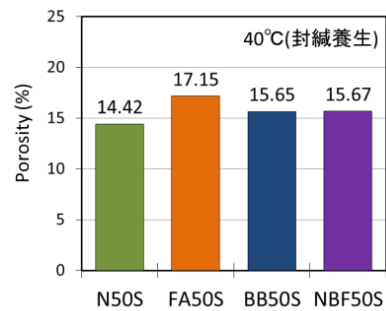


(b) 混和材シリーズ

図 2.33 累積空隙量分布-40°C (封緘養生)



(a) 普通セメントシリーズ



(b) 混和材シリーズ

図 2.34 空隙率-40°C (封緘養生)

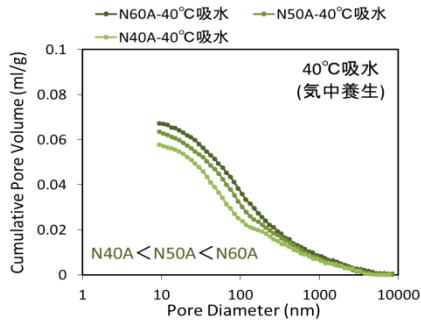
(3.1) 累積空隙量及び空隙率「40℃吸水（40℃乾燥→吸水過程）」

40℃乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズの累積空隙量分布を図 2.35 及び図 2.37 に、空隙率を図 2.36 及び図 2.38 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 40℃乾燥後に吸水過程を経験したことで空隙構造が緻密化し、空隙率が大幅に低下していることが分かる。例えば、「FA50A」では、養生のみの空隙率が 16.29%であったのに対して、40℃乾燥を経験したことで 18.77% (40℃) に変化していたが、吸水過程を経験することで 16.02% (40℃吸水) まで低下している。同様に「FA50S」では、14.99% (養生のみ) →17.15% (40℃) →14.48% (40℃吸水) という様に変化している。これは液状水として水分を再供給したことで、乾燥により逸散した吸着水等が再度供給されたことに加えて、未水和分のセメント等が再度反応したことにより 40℃乾燥以前よりも空隙率が減少したものと推察され、乾燥後に水分を再供給することで空隙構造が緻密化するという既往研究¹⁵⁾と結果と整合している。特に気中養生を施した供試体では、40℃乾燥後よりも水セメント比の違いが明確に表れており、吸水後に水和反応が進行したことを強く示唆している。

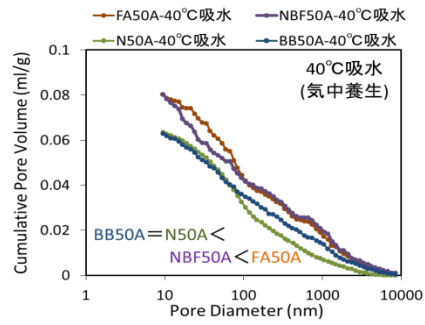
(3.2) 累積空隙量及び空隙率「40℃吸水」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動 (図 2.16 及び図 2.17) の関係について考察する。一般に、空隙率の減少など空隙構造が緻密化した場合、物質移動抵抗性が向上し、それにより塩分浸透抵抗性は向上するものと考えられる。しかしながら、例えば「FA50S」の結果に着目すると、空隙率は(3.1)で確認したように吸水過程を経験したことで「養生のみ」よりも減少しているが、塩分浸透距離は 20mm (養生のみ)、40mm (40℃)、50mm (40℃吸水) となっていることを確認でき、空隙率が減少しているにも拘わらず塩分浸透抵抗性が低下していることが分かる。また、このような挙動はその他の供試体においても確認することができる。

以上を踏まえると、吸水過程を施したことで空隙率が減少し、物質移動抵抗性は向上したものであるが、それ以上に抵抗性を低下させる負の要因が存在した可能性が高いと考えられる。特に吸水過程では、液状水として水分を供給したため、乾燥後に追加供給した液状水が空隙内において塩分の浸透を促進するような働きをしたのではないかと考えられる。ここで、概ね同等の空隙率で尚且つ不飽和湿潤条件にある封緘養生のみを施した供試体においては、塩分浸透が大幅に抑制されていたことを思い出すと、同等量の水分がコンクリート内に存在している場合においても、水分の供給方法により塩分浸透抵抗性が大きく変化するものと思われる。これは、封緘養生後と吸水過程により意図的に供給した水分では、空隙内での存在位置等が異なるために、塩分浸透挙動に対する作用に差異が生じたものと推察される。したがって、空隙内の水分が塩分浸透に与える影響を理解するためには、空隙内における水分の存在位置や状態等を明らかにする必要がある。

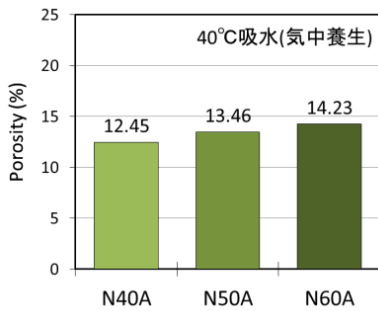


(a) 普通セメントシリーズ

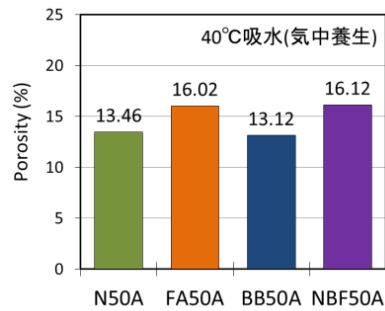


(b) 混和材シリーズ

図 2.35 累積空隙量分布-40°C吸水 (気中養生)

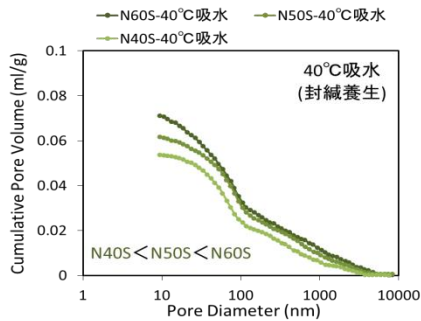


(a) 普通セメントシリーズ

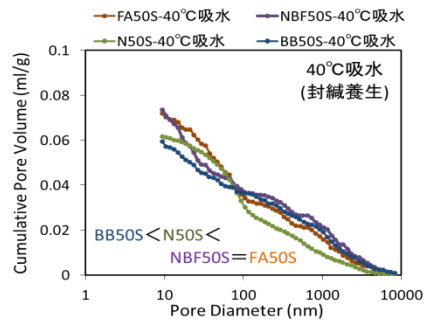


(b) 混和材シリーズ

図 2.36 空隙率-40°C吸水 (気中養生)

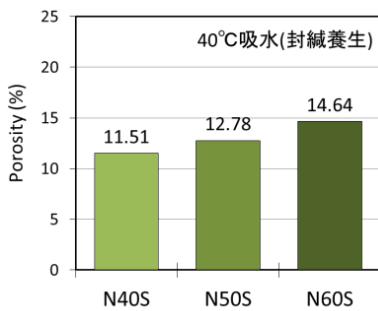


(a) 普通セメントシリーズ

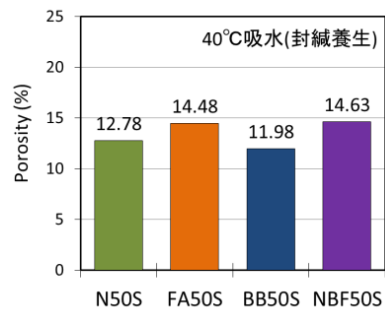


(b) 混和材シリーズ

図 2.37 累積空隙量分布-40°C吸水 (封緘養生)



(a) 普通セメントシリーズ



(b) 混和材シリーズ

図 2.38 空隙率-40°C吸水 (封緘養生)

(4.1) 累積空隙量及び空隙率「40℃吸湿（40℃乾燥→吸湿過程）」

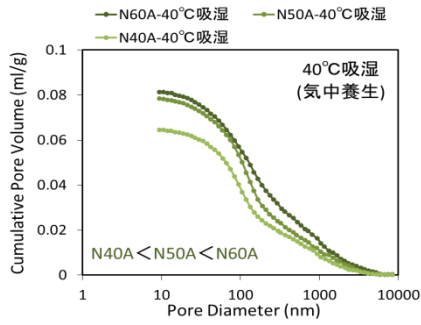
40℃乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズの累積空隙量分布を図 2.39 及び図 2.41 に、空隙率を図 2.40 及び図 2.42 に示す。結果を見ると、まず気中養生を施した供試体については、「40℃」シリーズの供試体と比較して空隙率は大きく変化していないことが分かる。

一方で封緘養生を施した供試体は、例えば、「FA50S」の空隙率が 14.99%（養生のみ）→17.15%（40℃）→16.81%（40℃吸湿）という様に変化しており、若干ではあるが空隙率の減少を確認できる。これは、吸湿過程を施した場合、蒸気として供給された水分は熱力学的には径が小さな空隙から凝縮していくのだが、封緘養生を施した供試体は気中養生を施した供試体よりも微小な空隙が多く存在したため、凝縮した水分の影響をより強く受けたのではないかと推察される。

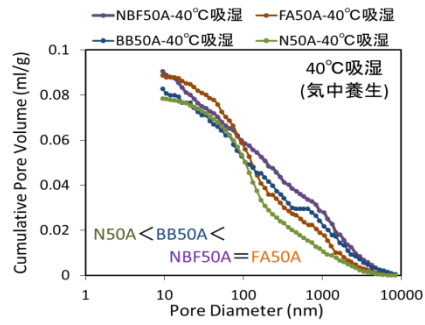
(4.2) 累積空隙量及び空隙率「40℃吸湿」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.18 及び図 2.19）の関係について考察する。まず、塩分分析の結果を再度確認すると、全体的に吸湿過程をしたことで、乾燥後と比較して塩分浸透距離が深くなっていることを確認できる。例えば、「N40A」では 40mm（40℃）→50mm（40℃吸湿）、「N40S」では 40mm（40℃）→50mm（40℃吸湿）という様に変化している。上記では、40℃乾燥後と比較して空隙率は同等もしくは若干減少していることを確認したが、塩分浸透距離は逆に増加している。これは、吸水過程を施した供試体の結果が同様の傾向を示していることが分かる。したがって、吸水過程と比較して絶対的な水分の供給量は異なるものの、外部から供給した水分が塩分浸透抵抗性を低下させる働きをしていることが示唆された。吸湿過程では、蒸気として水分を供給したため、極微小な空隙にのみ水分が液状水として凝縮し、比較的大きな空隙では、壁面に水分が吸着する。そのため、抵抗性を低下させる要因としては、微小空隙に存在する液状水もしくは水分の壁面吸着による表面エネルギーの変化が考えられる。

以上より、本結果の考察からも、一度乾燥を経験したコンクリートに対して、意図的に外部から水分を供給した場合、塩分浸透抵抗性が低下することを明らかにした。これは、水分の存在位置や状態が塩分浸透挙動を理解するための重要な要因であることを示唆しているものと思われる。

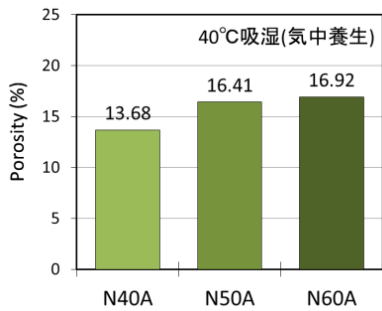


(a) 普通セメントシリーズ

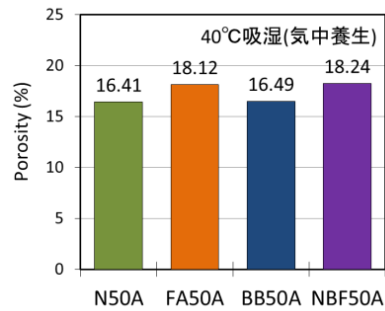


(b) 混和材シリーズ

図 2.39 累積空隙量分布-40°C吸湿 (気中養生)

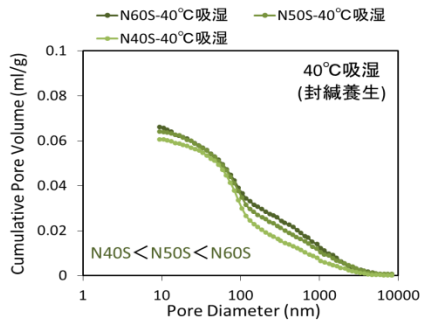


(a) 普通セメントシリーズ

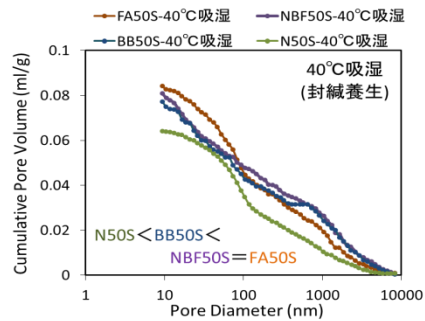


(b) 混和材シリーズ

図 2.40 空隙率-40°C吸湿 (気中養生)

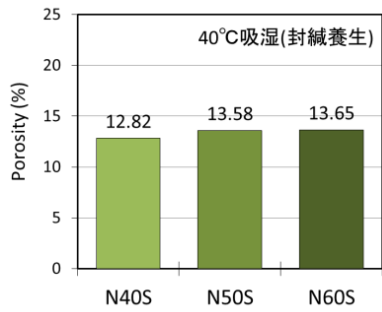


(a) 普通セメントシリーズ

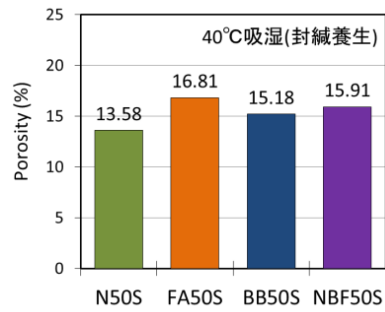


(b) 混和材シリーズ

図 2.41 累積空隙量分布-40°C吸湿 (封緘養生)



(a) 普通セメントシリーズ



(b) 混和材シリーズ

図 2.42 空隙率-40°C吸湿 (封緘養生)

(5.1) 累積空隙量及び空隙率「105℃ (105℃乾燥)」

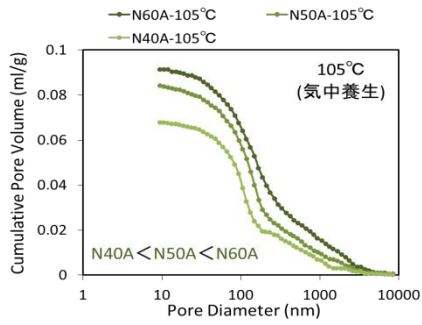
105℃乾燥を施した供試体シリーズの累積空隙量分布を図 2.43 及び図 2.45 に、空隙率を図 2.44 及び図 2.46 に示す。まず、気中養生を施した供試体の結果を見ると、例えば、「N50A」の空隙率は 15.34% (40℃) から 17.40% (105℃) という様に変化しており、40℃乾燥と比較して全体的に空隙率が増加していることを確認できる。これは、「40℃」シリーズで考察した様に、乾燥を経験したことによる C-S-H のナノ構造変化に起因して空隙が粗大化し空隙率が増加したものと推察される。また、乾燥温度が高くなることにより、上記の影響が「40℃」シリーズよりも強く表れたものと思われる。

次に、封緘養生を施した供試体の結果を見ると、養生のみを施した供試体と比較して、「N40S」、「N60S」及び「NBF50S」の空隙率は増加しているものの、その他の供試体では減少していることが分かる。本研究では、以降で考察する連続空隙量を測定するために繰返し水銀圧入法を実施した。この際、10nm 以下の空隙は水銀が圧入されることで構造が変化もしくは破壊されることが吉田ら¹⁰⁾により報告されているため、本検討で測定する最小空隙径は 10nm に設定した。このため、105℃乾燥を施したことで乾燥により空隙が収縮し、10nm 付近の測定対象外の空隙量が増加したため、本測定条件では空隙率が減少した様に見えたのではないかと推察される。しかしながら、上記はあくまでも仮説であるため、105℃乾燥が空隙構造に与える影響については以降の閾細孔径及び連続空隙量の検討の際に具体的に考察する。

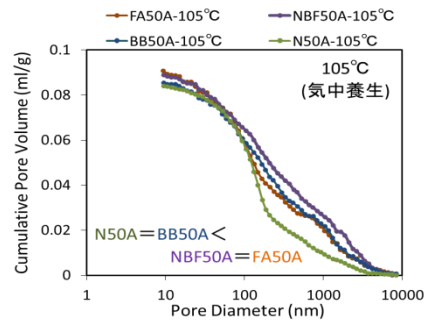
(5.2) 累積空隙量及び空隙率「105℃」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動 (図 2.20 及び図 2.21) の関係について考察する。まず、塩分浸透深さに着目すると、気中養生、封緘養生共に 105℃乾燥を施したことで養生のみ及び 40℃乾燥を施した供試体と比較して塩分浸透距離及び内部への塩分浸透量が増加していることを確認でき、乾燥温度が高いほど塩分浸透抵抗性が低下していることが分かる。特に、普通セメントを使用した供試体は 105℃乾燥の影響を顕著に受けており、例えば「N40A」は 40mm (40℃) から 60mm (105℃)、「N40S」は 40mm (40℃) から 80mm (105℃) という様に塩分浸透距離が増加している。一方で、封緘養生を施した混和材シリーズに着目すると、「FA50S」、「BB50S」及び「NBF50S」の塩分浸透が 50mm で停滞していることを確認できる。これらの供試体の空隙率を見ると、それぞれが全く異なる値を示していることが分かる。このことから、空隙率と塩分浸透深さには必ずしも相関性はなく、コンクリート内部の空隙量は塩分浸透挙動を支配するほどの要因ではないことが分かる。さらに、封緘養生のみを施した供試体と比較して塩分浸透深さに差異はあるものの、105℃乾燥を施した供試体において塩分浸透の停滞が確認されたことから、コンクリート内部の空隙量は塩分浸透停滞現象を引き起こす支配的な要因ではないことが分かる。

以上より、本結果からは塩分浸透挙動延いては塩分浸透停滞現象の支配要因は少なくともコンクリート内部の空隙量ではないものと推察される。

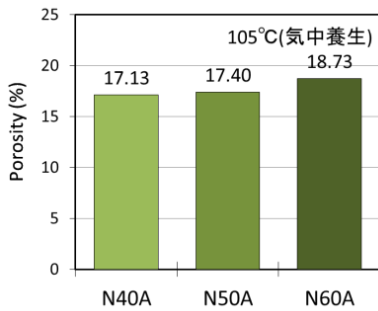


(a) 普通セメントシリーズ

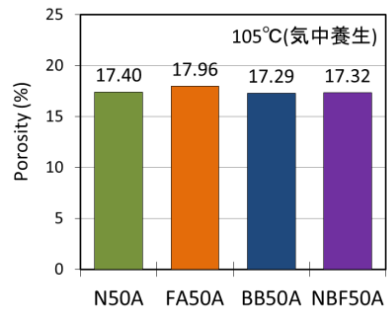


(b) 混和材シリーズ

図 2.43 累積空隙量分布-105°C (気中養生)

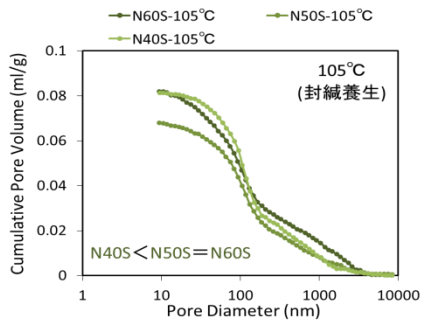


(a) 普通セメントシリーズ

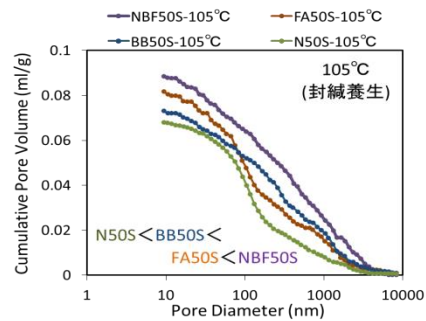


(b) 混和材シリーズ

図 2.44 空隙率-105°C (気中養生)

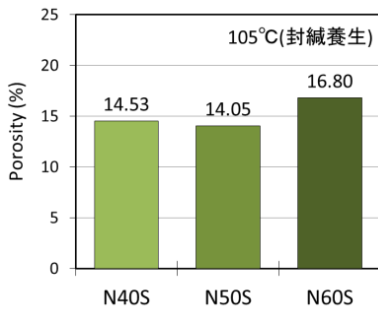


(a) 普通セメントシリーズ

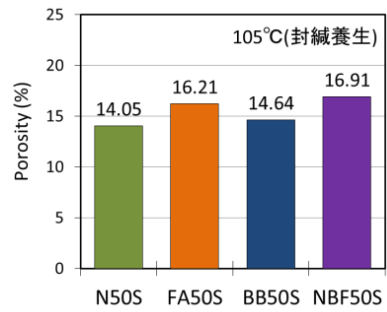


(b) 混和材シリーズ

図 2.45 累積空隙量分布-105°C (封緘養生)



(a) 普通セメントシリーズ



(b) 混和材シリーズ

図 2.46 空隙率-105°C (封緘養生)

(6.1) 累積空隙量及び空隙率「105℃吸水（105℃乾燥）」

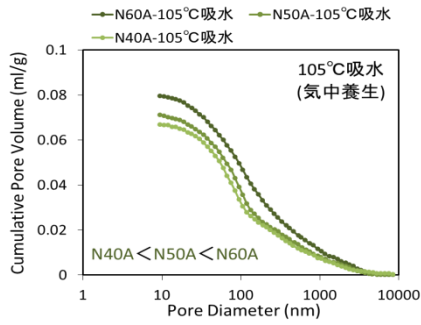
105℃乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズの累積空隙量分布を図 2.47 及び図 2.49 に、空隙率を図 2.48 及び図 2.50 に示す。気中養生、封緘養生双方の結果を見ると、105℃乾燥後に吸水過程を施したことで空隙率の大幅な減少を確認できる。気中養生に関しては、特に混和材シリーズの空隙率が顕著に減少しており、例えば「FA50A」では 16.29%（養生のみ）→17.96%（105℃）→16.10%（105℃吸水）という様に空隙率が変化しており、最終的に「105℃吸水」の空隙率が「養生のみ」よりも減少している場合もあることが分かる。これは、気中養生を施した供試体は未反応分のセメントや混和材が多く残存していたために、乾燥後に液状水として水分を供給したことで反応が再度進行し、空隙構造が緻密化したことで空隙率が大幅に減少したものと考えられる。

一方で、封緘養生を施した供試体に関しては、特に、「BB50S」では 11.48%（養生のみ）→14.64%（105℃）→12.35%（105℃吸水）という様に空隙率が変化しており、乾燥後に液状水として水分を再供給することで空隙率が大幅に減少していることが分かる。これは、反応の進行が比較的遅い高炉スラグ微粉末を使用した供試体では、未反応分もしくは反応が十分に進行していない高炉スラグが多く残存していたためだと推察される。

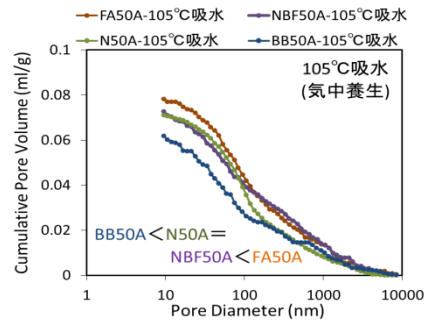
(6.2) 累積空隙量及び空隙率「105℃吸水」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.22 及び図 2.23）の関係について考察する。まず、気中養生を施した供試体については、空隙率が大幅に減少しているにも拘わらず、養生のみ及び 105℃乾燥の供試体と比較して塩分がより深部まで浸透していることを確認できる。例えば、「N40A」では 30mm（養生のみ）→60mm（105℃）→80mm（105℃吸水）の様に塩分浸透深さが変化している。吸水過程を経験し、空隙率が減少していたにも拘わらず塩分浸透抵抗性が低下していることから、空隙率の低下により物質移動抵抗性の向上よりも塩分浸透抵抗性を低下させる負の要因が存在したものと考えられ、外部から供給した液状水が塩分浸透を促進させる何らかの働きをしたのではないかと推察される。

次に封緘養生を施した供試体については、「NBF50S」の塩分浸透深さが 50mm（105℃）から 80mm（105℃吸水）という様に変化しているが、逆に、「N40S」及び「N50S」は塩分浸透距離が浅くなっており浸透が抑制されている様に見受けられる。また、これら以外の供試体は空隙率が減少しているにも拘わらず塩分浸透深さは変化していない。以上のように、封緘養生を施した供試体では、空隙率の変化と塩分浸透挙動に相関性が見られず、空隙率の観点からでは塩分浸透挙動を適切に説明することができない。ただし、空隙率が同程度であっても、105℃乾燥後に吸水過程を施した供試体は、「養生のみ」シリーズの供試体と水和物の状態や水分の状態、存在位置が異なっているものと考えられる。そのため、以降の検討ではこれらを念頭に置き考察することを試みる。

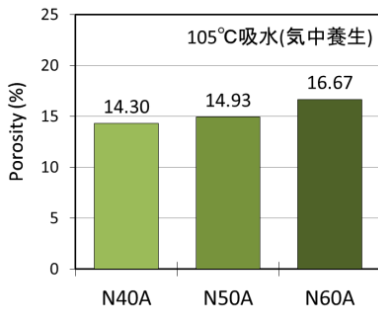


(a) 普通セメントシリーズ

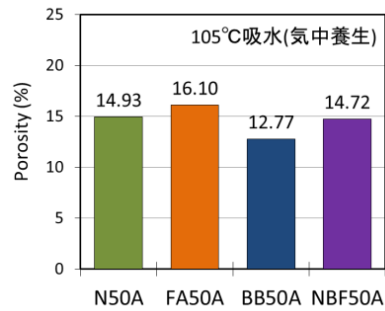


(b) 混和材シリーズ

図 2.47 累積空隙量分布-105°C吸水（気中養生）

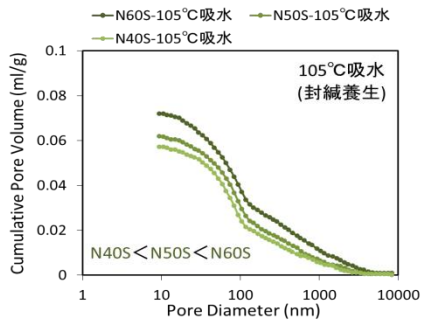


(a) 普通セメントシリーズ

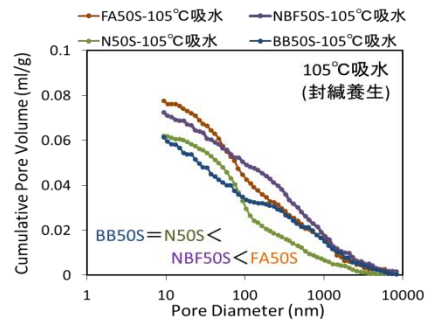


(b) 混和材シリーズ

図 2.48 空隙率-105°C吸水（気中養生）

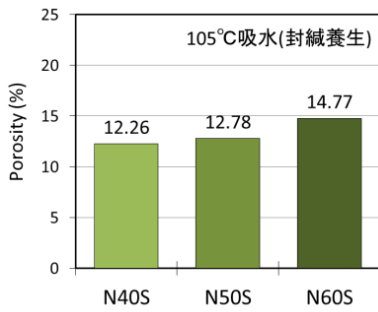


(a) 普通セメントシリーズ

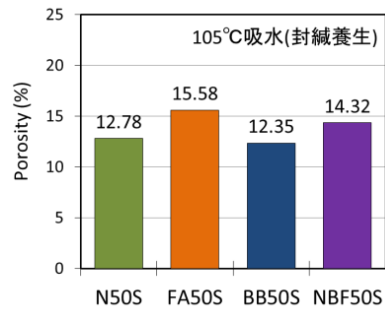


(b) 混和材シリーズ

図 2.49 累積空隙量分布-105°C吸水（封緘養生）



(a) 普通セメントシリーズ



(b) 混和材シリーズ

図 2.50 空隙率-105°C吸水（封緘養生）

(7.1) 累積空隙量及び空隙率「105℃吸湿（105℃乾燥）」

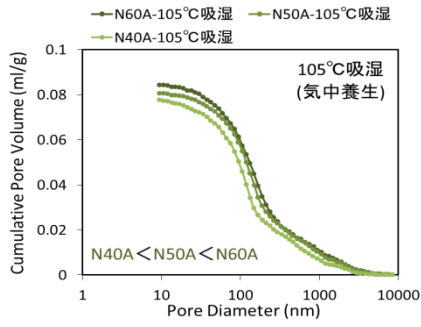
105℃乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズの累積空隙量分布を図 2.51 及び図 2.53 に、空隙率を図 2.52 及び図 2.54 に示す。まず、気中養生を施した供試体の結果を見ると、例えば「N50A」の空隙率が 17.40%（105℃）から 16.84%（105℃吸湿）に変化している様に全体的に空隙率が減少していることを確認できる。これは、105℃乾燥により逸散した吸着水等が再度供給されたことが要因であると推察される。

次に封緘養生を施した供試体の結果を見ると、「N40S」、「N60S」及び「NBF50S」では気中養生と同様に空隙率が減少していることを確認できるが、「N50A」、「FA50S」及び「BB50S」では、例えば、「N50A」の空隙率が 14.05%（105℃）から 14.85%（105℃吸湿）に変化して様に、空隙率が増加していることを確認できる。これは、105℃乾燥後に収縮していた空隙に水分が供給されたことで閉じていた空隙が再度開いたことに起因しているものと推察される。しかしながら、上記の結果では空隙率の増加と減少双方が確認されたことから、これらを明確に説明するためには、乾燥や水分の再供給による水和物の変化に着目して考察する必要があると考えられる。

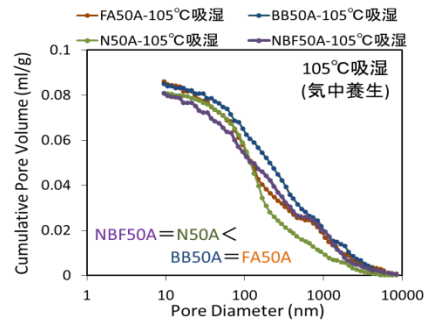
(7.2) 累積空隙量及び空隙率「105℃吸湿」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.24 及び図 2.25）の関係について考察する。105℃乾燥後と吸湿過程後の気中養生、封緘養生双方の塩分浸透深さを再度確認すると、例えば、「N50S」の塩分浸透深さが 80mm（105℃）から 100mm（105℃吸湿）に変化している様に空隙率の増加により塩分がより深部まで浸透していることが分かる。これは、空隙率が増加することで物質移動抵抗性が低下したことに起因しているものと思われる。しかしながら、例えば、「N40S」の塩分浸透深さが 30mm（養生のみ）から 60mm（105℃吸湿）に変化しているように、空隙率が減少している供試体においても塩分浸透深さが増加する傾向が見られる。これは、空隙率の低下による物質移動抵抗性の向上の他に吸湿過程を施したことで塩分浸透抵抗性を低下させる何らかの要因が作用したものと考えられる。

以上より、105℃乾燥後に吸湿過程を施した供試体に関しても、空隙率が減少しているにも拘わらず塩分浸透抵抗性が低下している現象が確認されたことから、空隙率の低下による物質移動抵抗性の向上の他に塩分浸透抵抗性を低下させる負の要因が存在するものと考えられる。

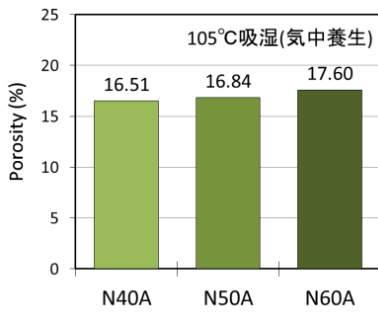


(a) 普通セメントシリーズ

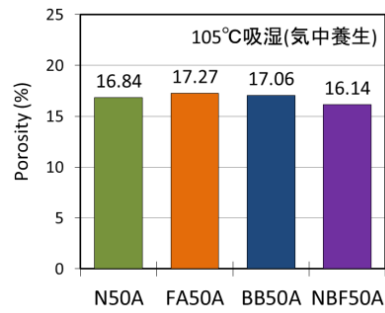


(b) 混和材シリーズ

図 2.51 累積空隙量分布-105°C吸湿 (気中養生)

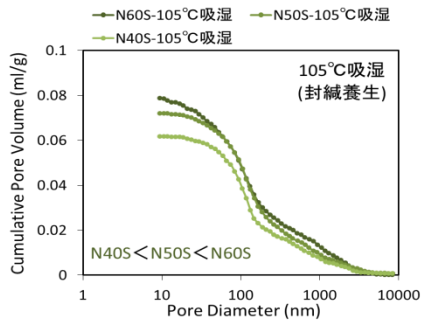


(a) 普通セメントシリーズ

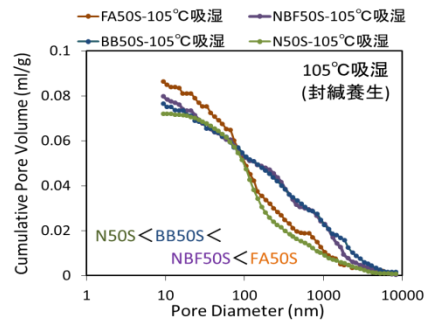


(b) 混和材シリーズ

図 2.52 空隙率-105°C吸湿 (気中養生)

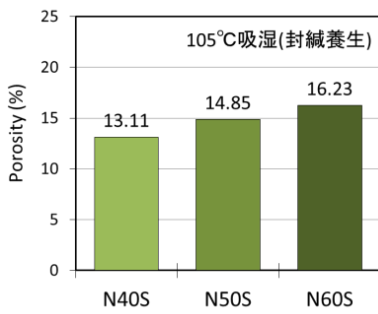


(a) 普通セメントシリーズ

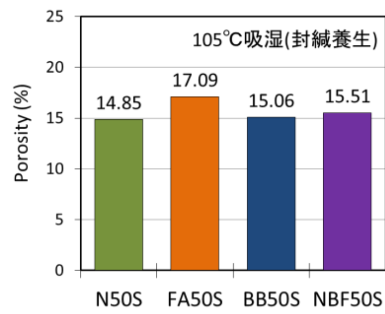


(b) 混和材シリーズ

図 2.53 累積空隙量分布-105°C吸湿 (封緘養生)



(a) 普通セメントシリーズ



(b) 混和材シリーズ

図 2.54 空隙率-105°C吸湿 (封緘養生)

2.3.5 閾細孔径

(1.1) 閾細孔径「養生のみ」

次に、養生のみを施した供試体シリーズの閾細孔径を図 2.55 及び図 2.56 に示す。まず普通セメントシリーズに着目すると、水セメント比が低い程、また、気中養生よりも封緘養生を施した供試体の方が閾細孔径が小さくなっていることを確認できる。混和材シリーズを見ると気中養生を施した供試体では、高炉スラグ微粉末を使用した供試体の閾細孔径が大きくなっていることが分かる。これは、型枠存置期間と対応しており養生の差異が表れているものと考えられる。一方で、封緘養生を施したシリーズでは、閾細孔径が概ね一致していることを確認できる。このことから、特に混和材を用いたコンクリートでは、本来の性能を発揮させるためには、養生条件が極めて重要であることが分かる。

(1.2) 閾細孔径「養生のみ」-塩分浸透挙動との関係-

ここで、本結果と塩分浸透挙動（図 2.6 及び図 2.7）の関係について考察する。結果として、気中養生と封緘養生共に閾細孔径と塩分浸透深さがよく対応している様に見受けられるが、「N50A : 149nm」と「FA50A : 149nm」、「N40A : 95nm」と「N60S : 94nm」は閾細孔径が概ね一致しているが異なる塩分浸透深さを示していることが分かる。前者は、図 2.8 で示した現象が生じており、後者は閾細孔径以外の要因が関与しているものと推察される。以上より、閾細孔径が小さい程、塩分浸透抵抗性が向上することが分かる。

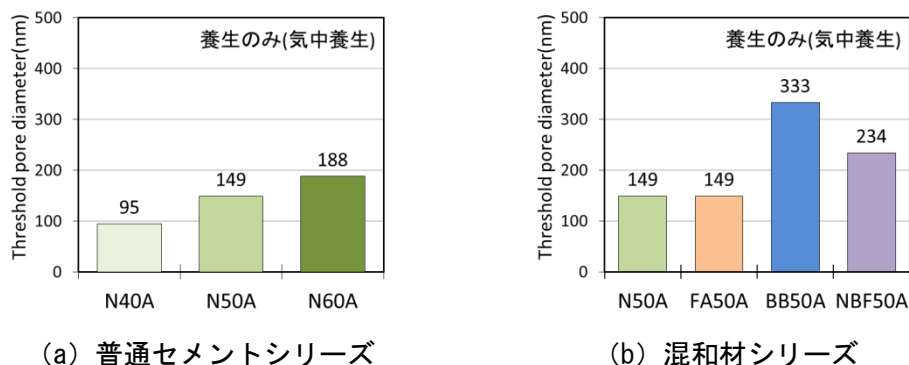


図 2.55 閾細孔径-養生のみ（気中養生）

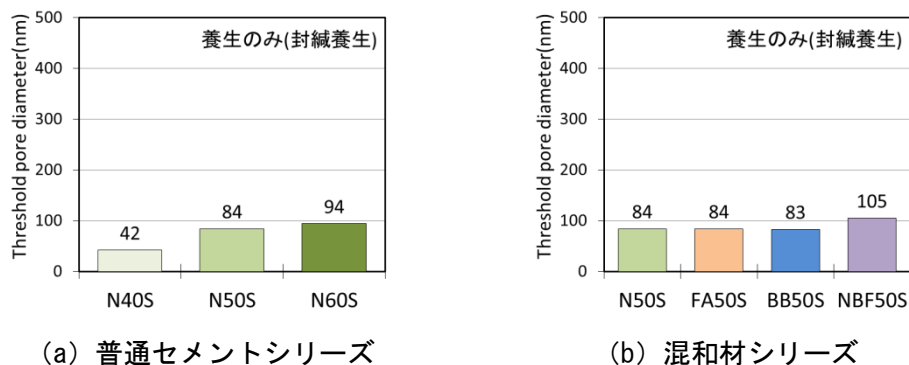


図 2.56 閾細孔径-養生のみ（封緘養生）

(2.1) 閾細孔径「40℃」

40℃乾燥を施した供試体シリーズの閾細孔径を図 2.57 及び図 2.58 に示す。まず、気中養生を施した供試体の結果を見ると、普通セメントを用いたシリーズでは、40℃乾燥後も閾細孔径は概ね同等の値を示しており、目立った変化は見受けられなかった。混和材を用いたシリーズでは、「FA50A」の閾細孔径が大きく、「BB50A」及び「NBF50A」は小さくなっていることを確認できる。これは、高炉スラグ微粉末を使用した供試体では乾燥による空隙構造の変化よりも、乾燥期間中の反応進行による空隙構造の緻密化が上回ったものと推察される。一方、封緘養生を施した供試体では、全体的に乾燥の影響を顕著に受けており閾細孔径が大きくなっているが、これは水和物の構造変化に起因するものと考えられる。

(2.2) 閾細孔径「40℃」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.12 及び図 2.13）の関係について考察する。塩分分析の結果を再度確認すると、気中養生、封緘養生共に閾細孔径が小さい程、塩分浸透距離が浅くなっていた。しかしながら、「N40S」、「N50S」及び「N60S」に関しては、概ね同等の閾細孔径を有しているにも拘らず塩分浸透深さが大きく変化していたことから、塩分浸透挙動に強く影響を与える閾細孔径以外要因の存在が示唆された。特に、混和材を用いて封緘養生を施した供試体では、同等の閾細孔径を有する供試体と比較して高い塩分浸透抵抗性を示していることから、閾細孔径以外の要因が強く影響を与えているものと考えられる。

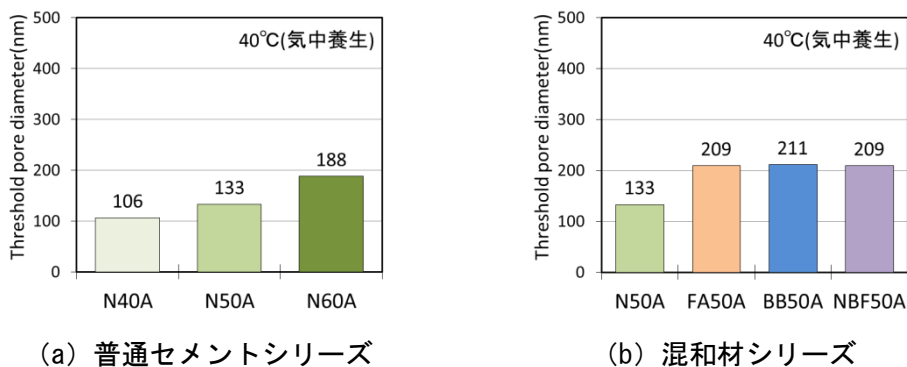


図 2.57 閾細孔径-40℃（気中養生）

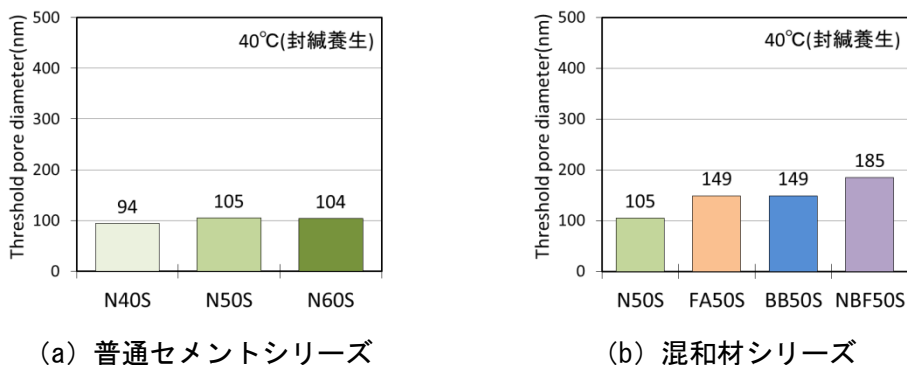


図 2.58 閾細孔径-40℃（封緘養生）

(3.1) 閾細孔径「40℃吸水」

40℃乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズの閾細孔径を図 2.59 及び図 2.60 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 40℃乾燥後に吸水過程を施したことで閾細孔径が大幅に小さい値を示しており、「養生のみ」と比較して小径化していることを確認できる。これは、液状水として水分を供給したことで未反応分のセメントや混和材が反応したことが主要因であると考えられる。さらに、40℃乾燥と吸水過程を合わせると3ヶ月程度の処理期間を要するため、その間の反応も影響したものと推察される。

(3.2) 閾細孔径「40℃吸水」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.16 及び図 2.17）の関係について考察する。吸水過程を施したことにより閾細孔径は大幅に小径化していたが、塩分分析の結果に着目すると、「BB50S-養生のみ：83nm（閾細孔径）」の塩分浸透深さが25mmであるのに対して、概ね同程度の閾細孔径を有する「BB50A-40℃吸水：87nm」の塩分浸透深さが100mmまで到達していることから、閾細孔径以外に塩分浸透挙動に対して支配的に影響を与える要因が存在するものと思われる。これは、40℃乾燥と吸水過程を施したことで、水分の存在位置や状態が変化したことで、塩分の浸透挙動が変化したものと推察される。

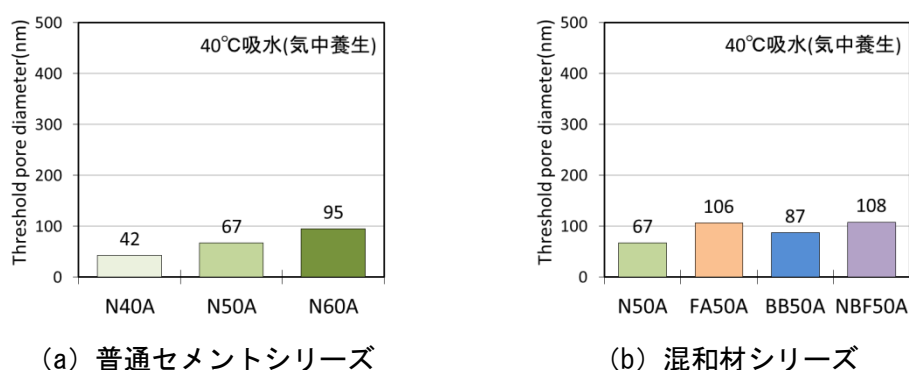


図 2.59 閾細孔径-40℃吸水（気中養生）

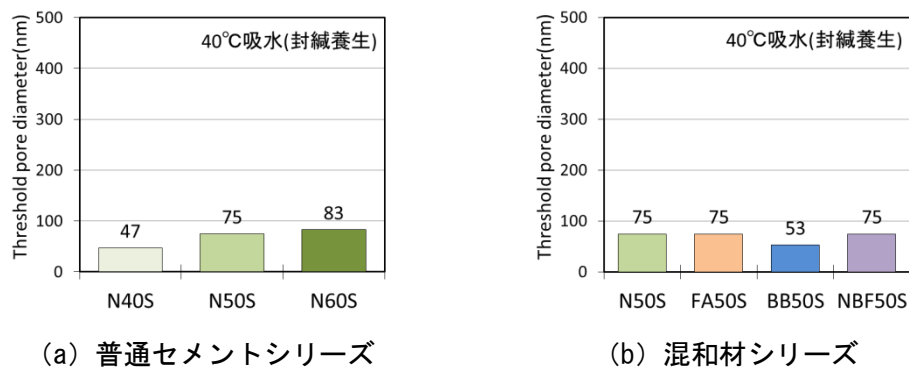


図 2.60 閾細孔径-40℃吸水（封緘養生）

(4.1) 閾細孔径「40℃吸湿」

40℃乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズの閾細孔径を図 2.61 及び図 2.62 に示す。まず、気中養生を施した供試体の結果を見ると、閾細孔径が小さくなっているものもあれば、大きくなっているものもあり、閾細孔径の変化に統一性が見られないことが分かる。一方、封緘養生を施した供試体では、全体的に閾細孔径が小径化していることを確認できる。吸湿過程では、蒸気として水分を供給したため、熱力学的に水分は微小な空隙から凝縮していくが、封緘養生を施した供試体は気中養生よりも微小な空隙が多く存在したため、凝縮した水分の影響をより強く受けたものと考えられる。

(4.2) 閾細孔径「40℃吸湿」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.18 及び図 2.19）の関係について考察する。塩分分析の結果から、気中養生、封緘養生共に吸湿過程を経験したことで「40℃」シリーズと比較して塩分がより深部まで浸透していることが確認された。特に、封緘養生を施した供試体に関しては、吸水過程を施したことで閾細孔径が小径化していたにも拘わらず、塩分浸透抵抗性が低下していた。例えば「N40S」は塩分浸透深さが 40mm（40℃）から 50mm（40℃吸湿）に変化している。以上より、閾細孔径以外に塩分浸透挙動を支配する要因が存在する可能性が高いと考えられる。

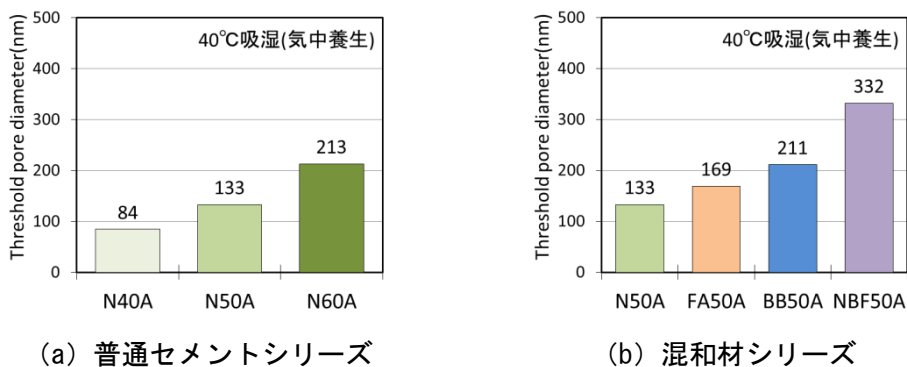


図 2.61 閾細孔径-40℃吸湿（気中養生）

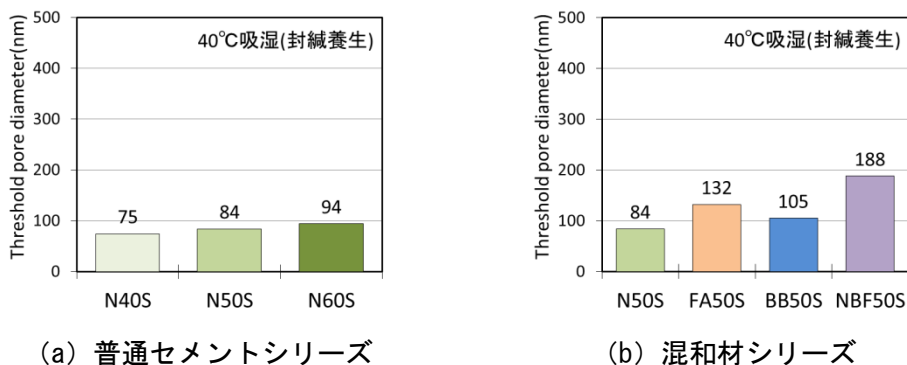


図 2.62 閾細孔径-40℃吸湿（封緘養生）

(5.1) 閾細孔径「105℃」

105℃乾燥を施した供試体シリーズの閾細孔径を図 2.63 及び図 2.64 に示す。まず、気中養生を施した供試体の結果を見ると、全体的に 105℃乾燥を経験したことで閾細孔径が大幅に粗大化していることを確認できる。封緘養生を施した供試体に関しても、気中養生程顕著ではないが閾細孔径が粗大化していることが分かる。これは、過度な乾燥による C-S-H のナノ構造変化に起因するものと推察される。

(5.2) 閾細孔径「105℃」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.20 及び図 2.21）の関係について考察する。105℃乾燥後の供試体は、「養生のみ」シリーズと比較して、閾細孔径は粗大化しているにも拘わらず、塩分が深部において停滞していることが分かる。また、「N50S」と「FA50S」は概ね同等の閾細孔径を有しているが、「N50S」の浸透が継続しているのに対して「FA50S」は停滞していた。以上を踏まえると、塩分浸透停滞現象が閾細孔径に依存しているとは考えにくく、閾細孔径は塩分浸透停滞現象を引き起こす支配要因ではないものと思われる。さらに、「N50S」に着目すると、40℃乾燥後と 105℃乾燥後では閾細孔径が変化していないにも拘わらず、塩分浸透深さは 50mm (40℃) から 80mm (105℃) に伸びており、閾細孔径と塩分浸透挙動が対応していないことが分かる。

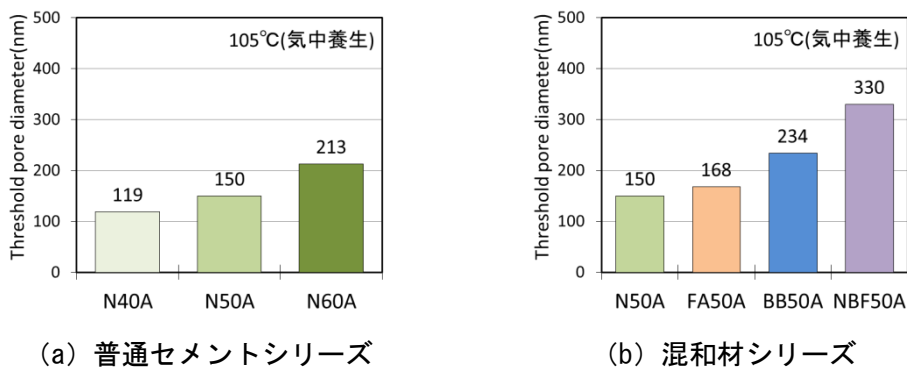


図 2.63 閾細孔径-105℃（気中養生）

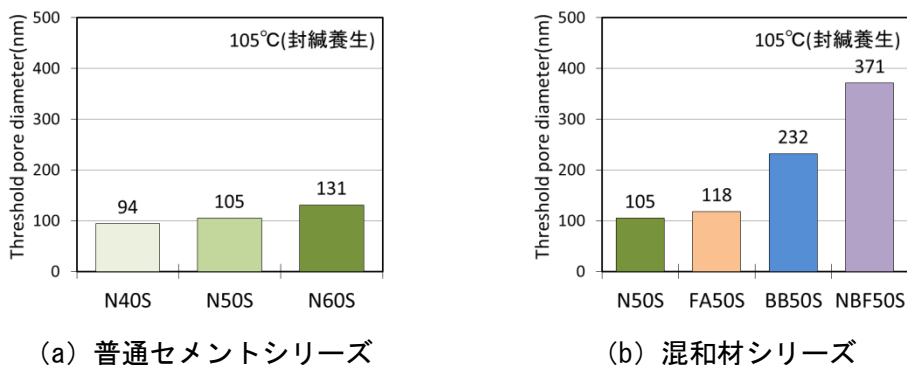


図 2.64 閾細孔径-105℃（封緘養生）

(6.1) 閾細孔径「105°C吸水」

105°C乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズの閾細孔径を図 2.65 及び図 2.66 に示す。結果を見ると、例えば、「BB50A」では 234nm から 48nm に変化しているように、気中養生、封緘養生共に 105°C乾燥後に吸水過程を経験したことで閾細孔径が大幅に小径化していることを確認できる。これは、吸着水等が再供給されたこと、さらに未水和分のセメントや混和材が反応したことに起因しているものと思われる。特に、高炉スラグ微粉末を使用した供試体では、上記の影響が顕著に表れており、吸水過程を施すことで「養生のみ」と比較して閾細孔径が大幅に小径化していた。反応が比較的遅い高炉スラグでは、より多く未反応の部分が残存していたものと思われる。

(6.2) 閾細孔径「105°C吸水」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.22 及び図 2.23）の関係について考察する。まず、気中養生を施した供試体に関しては、吸水過程を経験したことで閾細孔径が大幅に小径化した。塩分はより深部まで浸透していた。また、封緘養生を施した供試体に関しては、「105°C」シリーズと比較して閾細孔径は小径化しているものの、塩分の浸透深さは「N40S」と「N50S」を除いて大きく変化していない。以上を踏まえると、閾細孔径の他に塩分浸透挙動を支配する要因が存在するものと思われる。

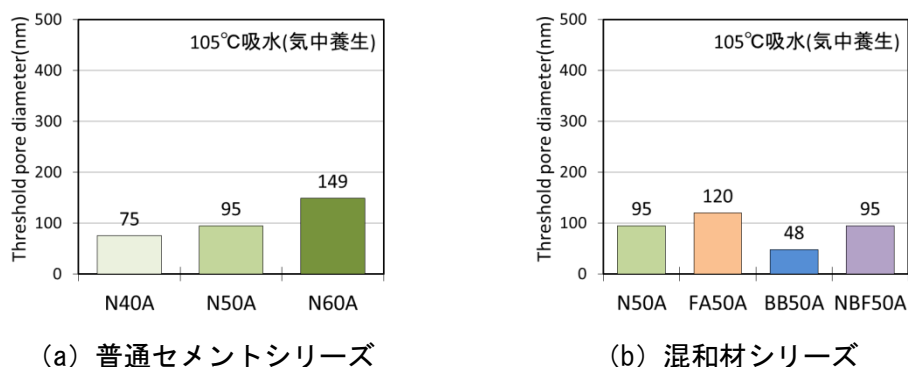


図 2.65 閾細孔径-105°C吸水（気中養生）

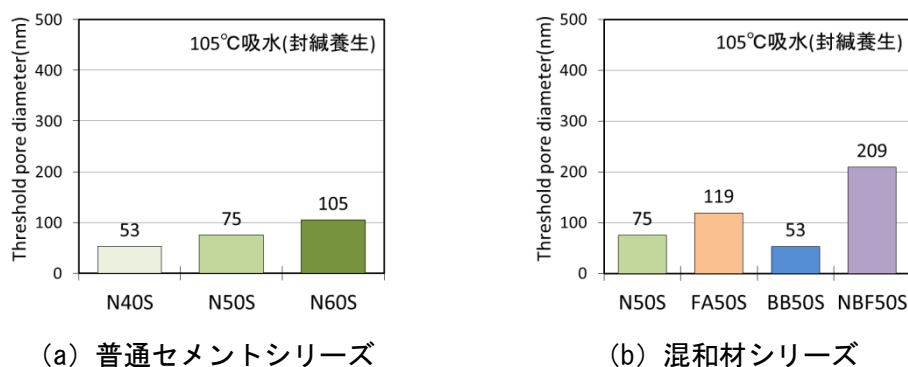


図 2.66 閾細孔径-105°C吸水（封緘養生）

(7.1) 閾細孔径「105℃吸湿」

105℃乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズの閾細孔径を図 2.67 及び図 2.68 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に閾細孔径の変化に統一性が見られないことが分かる。大体の傾向としては、105℃乾燥後に吸湿過程を施しても閾細孔径は変化していない結果が多く見受けられるが、「BB50A」と「BB50S」に関しては粗大化、「NBF50A」と「NBF50S」に関しては小径化していることを確認できる。上記の挙動については、本検討で解明するには至っておらず、空隙内に凝縮した水分の影響や反応の進行度、さらに空隙壁面の表面エネルギーの変化を使用材料ごとに着目して検討する必要があるものと考えられる。

(7.2) 閾細孔径「105℃吸湿」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.24 及び図 2.25）の関係について考察する。塩分分析の結果と閾細孔径を比較した結果、気中養生と封緘養生共に塩分浸透深さの変化に閾細孔径が対応していないことを確認した。例えば、「N40A」は105℃乾燥後と吸湿過程後の閾細孔径は119nmから変化していないものの、塩分浸透距離は60mm（105℃）から80mm（105℃吸湿）に変化している。これは、蒸気として供給された水分が空隙壁面に吸着し、壁面の表面エネルギーが変化したことで、塩分の浸透、特に移流による液状水の浸透挙動が大きく変化したことに起因しているのではないかと考えられる。

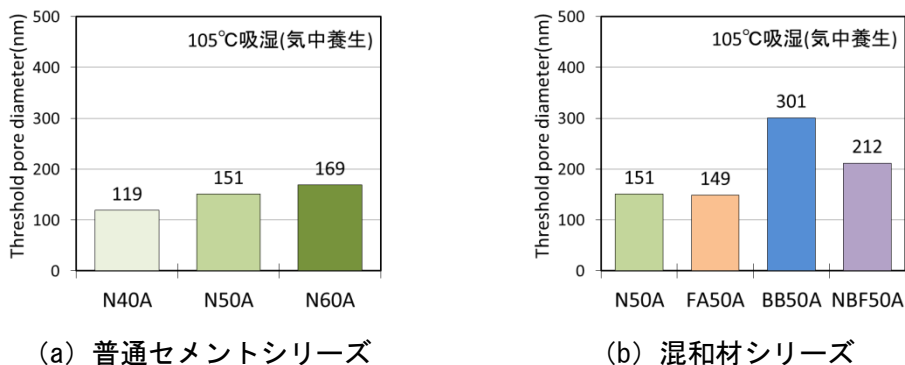


図 2.67 閾細孔径-105℃吸湿（気中養生）

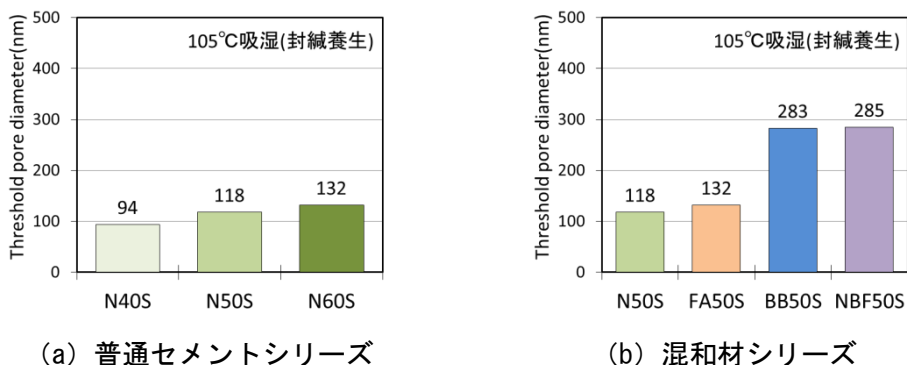


図 2.68 閾細孔径-105℃吸湿（封緘養生）

2.3.6 インクボトル空隙及び連続空隙量

(1.1) インクボトル空隙及び連続空隙量「養生のみ」

次に、養生のみを施した供試体シリーズのインクボトル空隙量及び連続空隙量を図 2.69 に示す。本検討は混和材シリーズのみを対象に実施した。結果を見ると、封緘養生を施すことで連続空隙量が大幅に減少していることを確認できる。また、水粉体比と養生方法が同じであれば形成される連続空隙は同等量となることが分かる。

(1.2) インクボトル空隙及び連続空隙量「養生のみ」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.6 及び図 2.7）の関係について考察する。「養生のみ」シリーズの塩分浸透深さに着目すると、気中養生よりも封緘養生の方が塩分浸透距離が浅いことが分かる。これは、気中養生よりも封緘養生の方が連続空隙量が少いことに起因するものと考えられる。このことから、連続空隙量が少ない程、塩分浸透抵抗性が向上するものと思われる。ただし、気中養生は図 2.8 に示した養生中の乾燥による供試体壁面の乾燥領域の影響を強く受けていることを考慮に入れる必要がある。

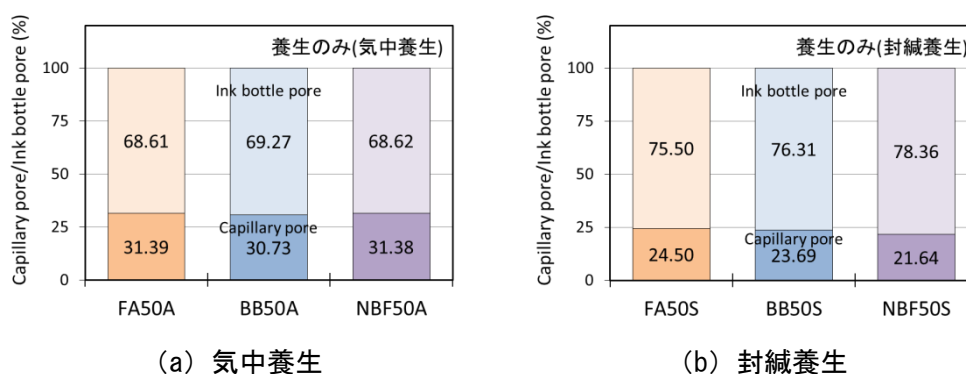


図 2.69 インクボトル空隙及び連続空隙量-養生のみ

(2.1) インクボトル空隙及び連続空隙量「40°C」

40°C乾燥を施した供試体シリーズのインクボトル空隙量及び連続空隙量を図 2.70 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 40°C乾燥を経験したことで連続空隙量が増加していることを確認できる。特に、封緘養生を施した供試体では乾燥による影響が顕著に表れている。これは、乾燥による水和物の構造変化に起因するものと推察される。

(2.2) インクボトル空隙及び連続空隙量「40°C」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.12 及び図 2.13）の関係について考察する。40°C乾燥を経験したことで連続空隙量は増加していたが、それに伴い塩分浸透距離も長くなっていることを確認できる。このことから、連続空隙量は塩分浸透挙動、特に浸透深さに影響を与える要因であるものと思われる。

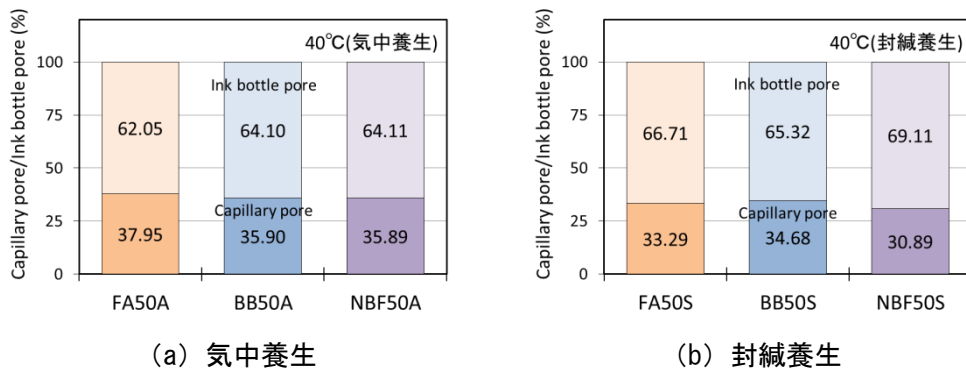


図 2.70 インクボトル空隙及び連続空隙量-40°C

(3.1) インクボトル空隙及び連続空隙量「40°C吸水」

40°C乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズのインクボトル空隙量及び連続空隙量を図 2.71 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 40°C乾燥後に吸水過程を経験したことで連続空隙量が大幅に減少していることを確認できる。特に気中養生を施した供試体では、吸水過程を経験することで「養生のみ」の供試体よりも連続空隙量が減少している。これは、気中養生を施した供試体は、未反応分のセメントや混和材が多く残存していたため、供給された水分と残存分が反応したことで空隙構造が緻密化し、連続空隙量が大幅に減少したものと考えられる。

(3.2) インクボトル空隙及び連続空隙量「40°C吸水」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.16 及び図 2.17）の関係について考察する。まず、気中養生を施した供試体の結果に着目すると、連続空隙量が大幅に減少しているにも拘わらず、塩分はより深部まで浸透していた。これは、図 2.8 に示した供試体側面表層部に形成された粗大空隙領域を辿って塩分が深部まで浸透したことが原因であると考えられ、供試体中心部における連続空隙量の減少は気中養生の供試体に対しては影響が小さいものと推察される。

次に、封緘養生の供試体に関しては、40°C乾燥後と比較して連続空隙量が減少しているものの、塩分はより深部まで浸透していた。例えば、「FA50S」では連続空隙量が 33.29% (40°C) から 23.40% (40°C吸水) に減少しているが、塩分浸透距離は 40mm (40°C) から 50mm (40°C吸水) まで伸びており、連続空隙量と塩分浸透深さの関係は負の相関を示している。一般に連続空隙量が減少すれば、それに伴い物質移動抵抗性も向上することが想定されるが、本検討で得られた結果は真逆の結果を示している。実際には、連続空隙量の減少により物質移動抵抗性は向上しているのではないかと考えられるが、それ以上に塩分浸透抵抗性を低下させる要因が存在したと思われる。

以上を踏まえると、乾燥後に再度液状水として水分を供給することで連続空隙量は減少するものの、連続空隙量以上に塩分浸透挙動に影響を与える要因が存在することが示唆された。

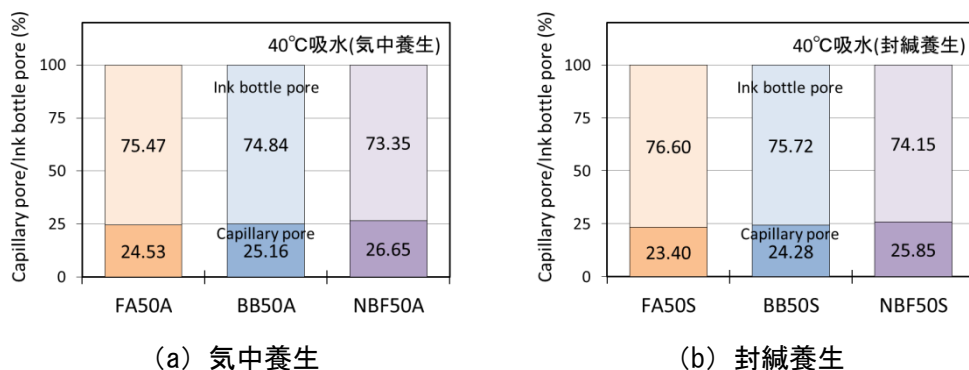


図 2.71 インクボトル空隙及び連続空隙量-40°C吸水

(4.1) インクボトル空隙及び連続空隙量「40°C吸湿」

40°C乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズのインクボトル空隙量及び連続空隙量を図 2.72 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 40°C乾燥後に吸湿過程を施しても連続空隙量が変化していないことが分かる。吸湿過程では、蒸気として水分を供給したため、熱力学的に水分は微小な空隙から凝縮する。このため、40°C乾燥を経験したことにより粗大化した空隙が元に戻るために必要な水分量が十分に供給されなかったことで、連続空隙が 40°C乾燥後と同等量を示したものと推察される。

(4.2) インクボトル空隙及び連続空隙量「40°C吸湿」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.18 及び図 2.19）の関係について考察する。気中養生、封緘養生共に 40°C乾燥後に吸湿過程を経験したことで、「40°C」シリーズと比較して塩分がより深部まで浸透していた。しかし、連続空隙量は「40°C」シリーズと「40°C吸湿」シリーズで概ね同程度であることから、連続空隙量が塩分浸透深さの変化に対応していないことが分かる。このことから、「40°C吸湿」シリーズの供試体は連続空隙量以外の要因が作用し、塩分浸透挙動が変化したものと考えられる。

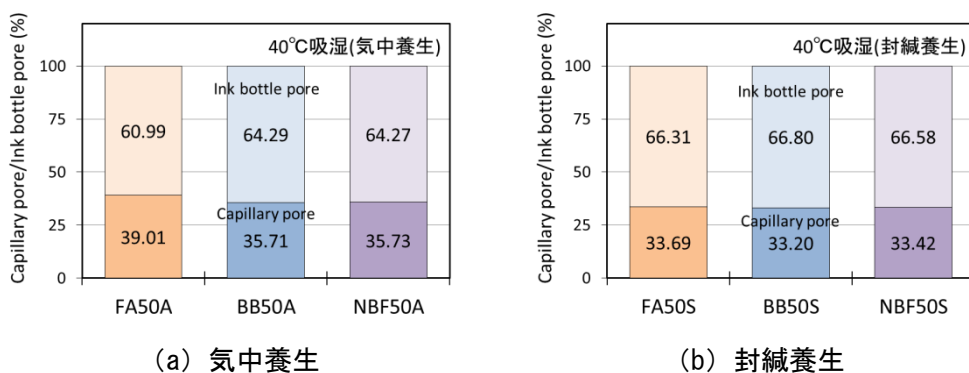


図 2.72 インクボトル空隙及び連続空隙量-40°C吸湿

(5.1) インクボトル空隙及び連続空隙量「105℃」

105℃乾燥を施した供試体シリーズのインクボトル空隙量及び連続空隙量を図 2.73 に示す。結果を見ると、まずフライアッシュを用いた「FA50A」及び「FA50S」に関しては、105℃乾燥を経験したことで「40℃」シリーズと比較して連続空隙量が減少していることを見て取れる。一方で、高炉スラグ微粉末を使用した供試体では、「40℃」シリーズと比較して連続空隙量が増加していることが分かる。乾燥を経験することで水和物の構造変化に起因して空隙が粗大化するが、同時に乾燥により空隙は収縮する。そのため、乾燥により微小な空隙が収縮することで連続した空隙が分断され、それに伴い連続空隙量が減少したのではないかと考えられる。しかし、上記はあくまでも推察であるため、本現象を明確に説明するためには乾燥による水和物の変化や空隙の収縮機構に関するより深い理解が必要である。

(5.2) インクボトル空隙及び連続空隙量「105℃」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.20 及び図 2.21）の関係について考察する。塩分浸透深さに着目すると、封緘養生を施した供試体に関しては、すべて 50mm で塩分の浸透が停滞している。一方で、連続空隙量は、「40℃吸湿」シリーズと概ね同等の値を示しているが、塩分浸透停滞現象の支配要因が連続空隙量であると仮定すると、同等の連続空隙量を示している「40℃吸湿」においても塩分の浸透が停滞するはずである。しかし、結果として浸透は停滞しておらず、上記の過程は成立しない。したがって、連続空隙量は塩分浸透停滞現象を支配する要因ではないものと思われる。

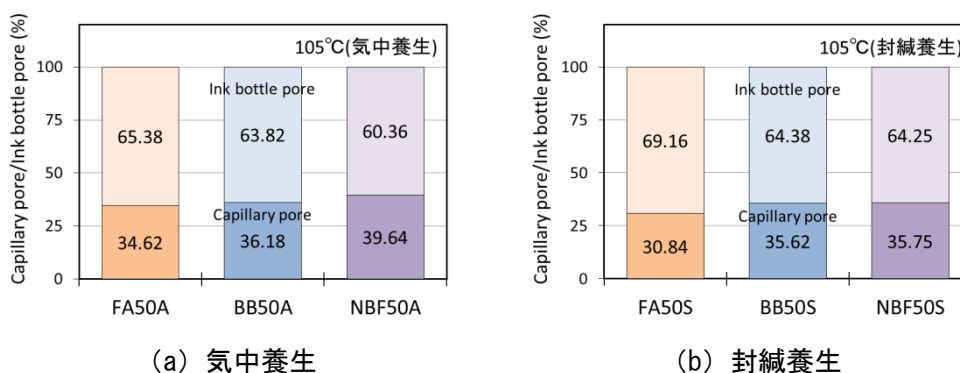


図 2.73 インクボトル空隙及び連続空隙量-105℃

(6.1) インクボトル空隙及び連続空隙量「105℃吸水」

105℃乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズのインクボトル空隙量及び連続空隙量を図 2.74 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 105℃乾燥後に吸水過程を施したことで「養生のみ」シリーズの供試体と比較して連続空隙量が減少していることを確認できる。これは、乾燥により抜けた吸着水等の再供給や未反応分のセメントや混和材が再度反応したこと起因しているものと思われる。

(6.2) インクボトル空隙及び連続空隙量「105℃吸水」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.22 及び図 2.23）の関係について考察する。まず，気中養生に関しては，連続空隙量は大幅に減少しているものの，塩分浸透深さは大きく変化していないことが分かる。封緘養生を施した供試体に関しても，気中養生の供試体と同様に，連続空隙量が「養生のみ」と同等まで減少しているにも拘わらず，塩分浸透距離は「105℃」シリーズと概ね同等の深さを示している。例えば，「BB50S」では連続空隙量が 25.29%であり「養生のみ」の 23.69%と同程度であるが，塩分浸透深さは「養生のみ」が 20mm であるのに対して「105℃吸水」では 50mm まで浸透している。

以上より，105℃乾燥後に吸水過程を経験することで物質の主な移動経路となる連続空隙量は減少するものの，塩分浸透抵抗性自体は低下していたことを踏まえると，連続空隙量以外に塩分浸透挙動に強く影響を与えている要因が存在することは明らかである。

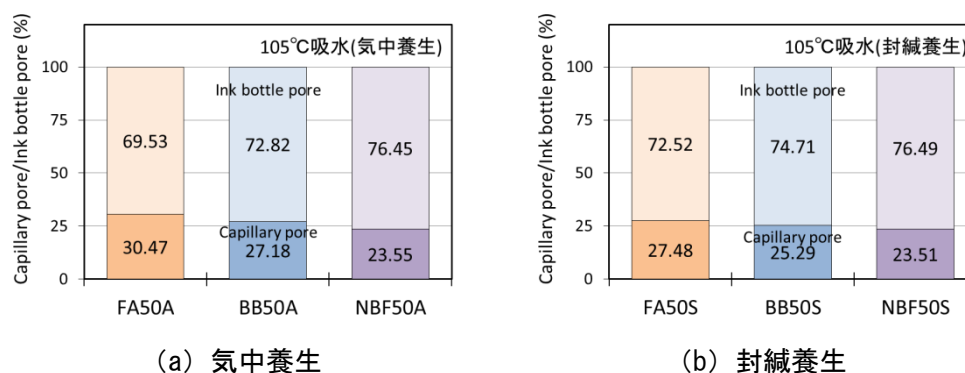


図 2.74 インクボトル空隙及び連続空隙量-105℃吸水

(7.1) インクボトル空隙及び連続空隙量「105℃吸湿」

105℃乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズのインクボトル空隙量及び連続空隙量を図 2.75 に示す。まず，気中養生の結果を見ると，吸湿過程を経験しても連続空隙量は大きく変化してらず，「105℃」シリーズと概ね同等であることが分かる。これは，吸湿過程では熱力学的に微小な空隙から水分が凝縮していくが，この凝縮した水分だけでは乾燥により一度開いた空隙を再度閉塞されるには不十分であったことが原因であると推察される。一方で，封緘養生を施した供試体では，吸湿過程を経験することで，特に高炉スラグ微粉末を使用した供試体において連続空隙量が減少していることを確認できる。これは，微小な空隙壁面に存在する未反応分が凝縮した水分と反応したことで，空隙が緻密化し，閉塞したことに起因しているのではないかと考えられる。

(7.2) インクボトル空隙及び連続空隙量「105℃吸湿」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.24 及び図 2.25）の関係について考察する。気中養生の供試体に関しては，105℃乾燥後と比較して連続空隙量は大きく変化しておらず，塩分浸透深さ

に着目しても目立った差異は見受けられない。一方で、封緘養生の供試体に関しては、例えば、「BB50S」の塩分浸透深さが 50mm (105°C) から 80mm (105°C吸湿) まで伸びている様に連続空隙量が減少しているにもかかわらず、塩分浸透抵抗性が大幅に低下していることが分かる。連続空隙量が減少することで物質同抵抗性は低下するものと思われるが、それ以上に塩分浸透抵抗性を低下させる負の要因が存在したのではないかと推察される。これは、吸湿過程では、蒸気として水分を供給したことで、空隙壁面に水分が吸着し、壁面の表面エネルギーが変化したことに起因するのではないかと考えられる。

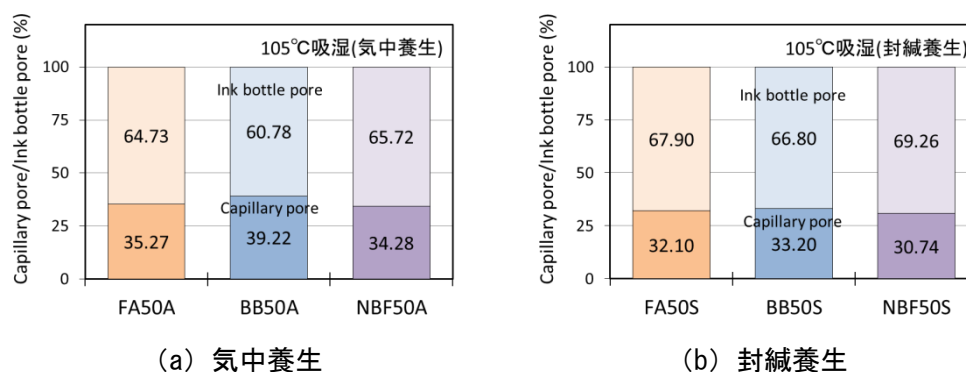


図 2.75 インクボトル空隙及び連続空隙量-105°C吸湿

2.3.7 空隙構造と塩分浸透挙動の関係

本節では、「累積空隙量及び空隙率」、「閾細孔径」、「インクボトル空隙量及び連続空隙量」に着目し、これらがコンクリート中への塩分浸透挙動及び塩分浸透停滞現象に与える影響について検討を実施した。各種前処理を施した供試体の塩分浸透挙動と上記した種々の要因との関係を考察した結果、後処理を行わない養生のみを施した供試体に関しては、水粉体比や養生条件による空隙構造の変化が塩分浸透挙動に影響を与えていることを確認したが、乾燥や水分の再供給など、種々の処理を施した供試体に関しては、同等の空隙構造を有する供試体において異なる塩分浸透挙動を示す場合が多々確認された。特に、乾燥後に水分を再供給した供試体に関しては、空隙構造が大幅に緻密化していたにも拘わらず、塩分浸透抵抗性が低下していたことから、空隙構造の緻密化により物質移動抵抗性は向上しているものと思われるが、それ以上に塩分浸透抵抗性を低下させる負の要因が存在したのではないかと考えられる。

以上、本検討の結果を踏まえると、コンクリートの空隙構造は塩分浸透挙動に影響を与えている一種の要因であると考えられるが、浸透挙動や停滞現象に対して支配的な影響を与える要因ではないことを明らかにした。

2.4 初期含水状態が塩分浸透挙動に与える影響

2.4.1 検討目的

前節では空隙構造と塩分浸透挙動の関係について検討した。その結果、空隙構造は塩分浸透挙動、延いては塩分浸透が停滞する機構の支配要因ではないことを明らかにした。空隙構造以外に停滞現象に大きく関与していると考えられる要因としては、コンクリート内部の含水状態が挙げられる。これまでの研究では、塩分浸透停滞現象はコンクリート内部が不飽和湿潤状態にある場合に生じ得る可能性があることが報告されているが⁵⁾、含水状態に着目した研究では、飽水状態や絶乾状態を対象に検討を実施しているものが多く、コンクリート内部の水分がどのような機構で停滞現象に寄与しているかは解明されていない。

そこで本検討では、複数の乾燥条件及び水分の供給方法により、コンクリート内部の含水状態を意図的に変化させ、種々の初期含水状態が塩分浸透挙動及び停滞現象に与える影響を解明することを目的とした。

2.4.2 検討概要

初期含水状態は、2.2.2節で示した乾燥や水分再供給処理を施した供試体において、室内塩水浸せき試験直前に重量を測定し、式(2.2)に示す対封緘相対水分保有率を用いて評価した。尚、供試体の重量は、1/100g単位で測定可能な電子天秤(METTLER TOLEDO製)を用いて測定した。

$$w = \frac{W - W_d}{100 - W_d} \times 100 \quad (2.2)$$

ここで、 w : 対封緘相対水分保有率、 W : 各処理後の重量変化率、 W_d : 絶乾時の重量変化率である。尚、絶乾時の重量変化率は、105°C乾燥後の重量変化率と同義であり、本検討では、封緘養生後の水分保有率を100%、105°C乾燥後を0%に設定した。

本検討では、上記により算出された水分保有率と2.2.5節及び2.2.6節から得られた各供試体の塩分浸透分布と比較することで、初期含水状態が塩分浸透挙動に与える影響を検討した。

2.4.3 各処理後（塩水浸せき試験直前）の水分保有率

(1.1) 水分保有率「養生のみ」

養生のみを施した供試体シリーズの水分保有率を図2.76及び図2.77に示す。まず、気中養生を施した供試体の結果を見ると、水粉体比が低い程、また混和材を使用することで水分保有率が低くなる傾向にあることを確認できる。これは、水セメント比が高い程反応に必要な余剰水が多く存在したことと、混和材を用いた供試体では、反応が比較的遅いため

に水分の消費速度が遅くなり、その分養生期間中に供試体表層から水分が多く逸散したことが原因であると考えられる。

(1.2) 水分保有率「養生のみ」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.6 及び図 2.7）の関係について考察する。まず、気中養生を施した供試体の結果を見ると、水分保有率が高い程塩分浸透距離が浅くなっていることを確認できる。次に封緘養生を施した供試体は、水分保有率が高く、それに伴い塩分浸透抵抗性も高いことが分かる。供試体ごとの塩分浸透深さの差異については、水セメント比や使用材料により形成される空隙構造の差異に依存しているものと考えられる。

以上より、養生のみを施した場合、コンクリート内部の含水状態は塩分浸透抵抗性に影響を与えており、初期含水率が高いほど抵抗性が向上するものと考えられる。

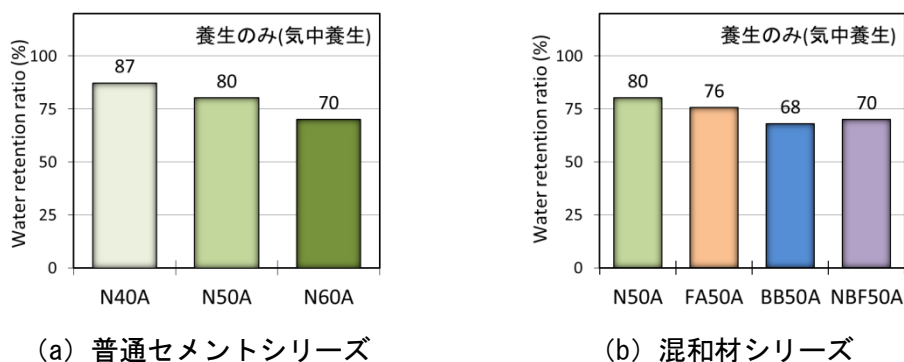


図 2.76 水分保有率-養生のみ（気中養生）

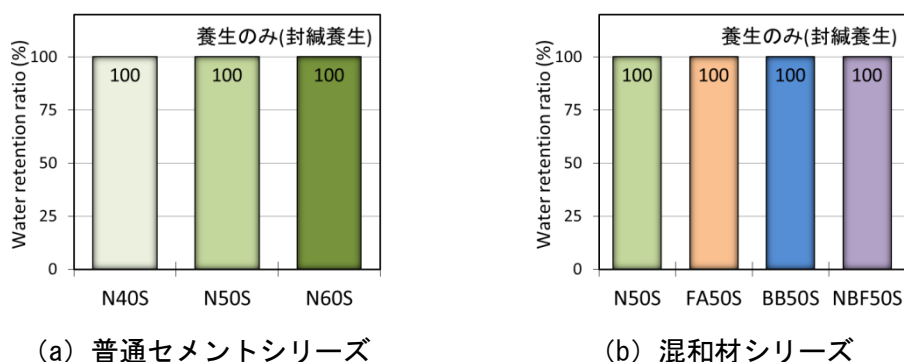


図 2.77 水分保有率-養生のみ（封緘養生）

(2.1) 水分保有率「40℃」

40℃乾燥を施した供試体シリーズの水分保有率を図 2.78 及び図 2.79 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 40℃乾燥を経験したことで「養生のみ」と比較して水分保有率が大幅に低下していることを確認できる。また、乾燥後はすべての供試体が概ね同程度の水分保有率に変化していることが分かる。

(2.2) 水分保有率「40℃」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.12 及び図 2.13）の関係について考察する。気中養生，封緘養生共に塩分浸透距離が深くなっており，塩分浸透挙動と水分保有率の低下がよく対応していることが分かる。気中養生を施した混和材シリーズに関しては，塩分分析の結果から，急激な移流により塩分が最深部まで到達していることが確認されたが，これは 40℃乾燥の影響よりも図 2.8 で示した要因が支配的に作用した結果であると考えられる。

一方で，封緘養生を施した供試体に関しては，普通セメントシリーズに着目すると，水セメント比によらず封緘養生後に対する水分保有率は同程度であるが，塩分浸透深さは「N40S」：40mm，「N50S」：50mm，「N60S」：60mm という様に異なる深さを示していた。さらに，これらの供試体は，図 2.34 (a)，図 2.58 (a)に示しているように空隙率や閾細孔径も概ね同程度である。これは，水セメント比が低い程，コンクリート中に未反応分のセメントが多く存在したため，塩水浸せき試験中にこれらの未反応セメントが塩水と反応したことで空隙構造が緻密化し，塩分の浸透が抑制されたのではないかと考えられる。混和材シリーズに関しては，水分保有率の低下に伴い塩分浸透距離が伸びていることが確認できる。

以上より，水分保有率が低下したことで塩分浸透抵抗性も同様に低下したことから，塩分浸透挙動はコンクリート内部の含水状態の影響を受けているものと考えられる。

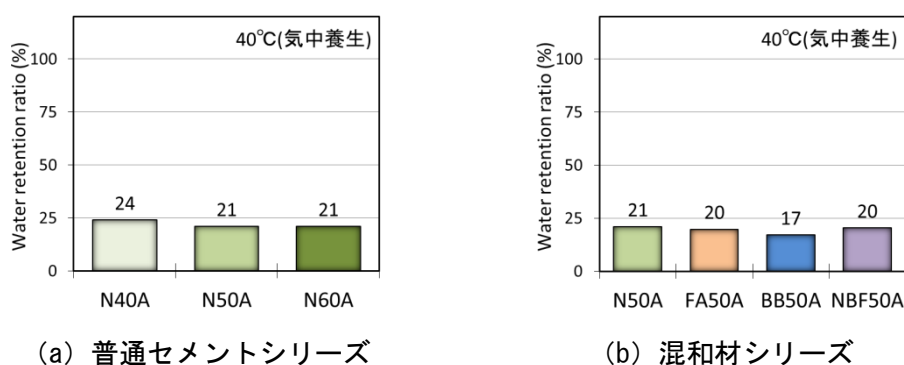


図 2.78 水分保有率-40℃（気中養生）

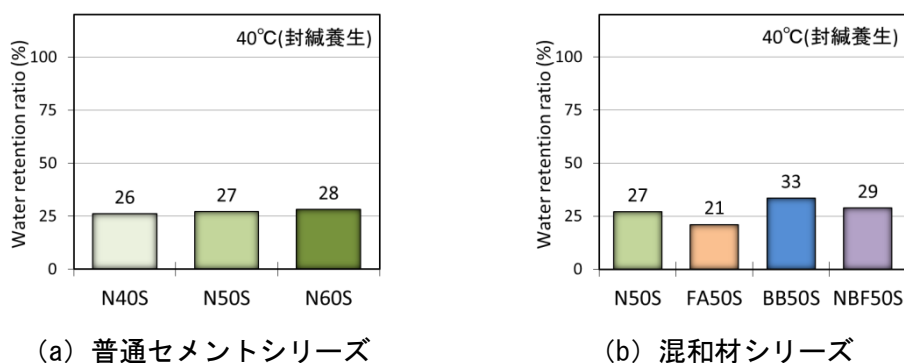


図 2.79 水分保有率-40℃（封緘養生）

(3.1) 水分保有率「40℃吸水」

40℃乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズの水分保有率を図 2.80 及び図 2.81 に示す。結果を見ると、封緘養生、気中養生共に 40℃乾燥後に吸水過程を経験したことで水分保有率が大幅に回復している。特に普通セメントシリーズに着目すると、水セメント比が高い程、水分保有率が増加していることが分かる。ここで、図 2.36(a)、図 2.38(a)、図 2.59(a)、図 2.60(a)に示した様に、40℃乾燥後に吸水過程を経験したことで空隙構造が大幅に緻密化しており、水セメント比が低い程、その傾向は顕著であった。このため、吸水過程では液状水の再供給後に 21 日間の室内乾燥期間を設けたが、この際、水セメント比が低い程、未反応分が多く残存していたため、供給水との再反応により空隙構造が密に形成されたことで浸透した液状水が抜け難くなり、水分保有率に差異が生じたものと推察される。

(3.2) 水分保有率「40℃吸水」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動（図 2.16 及び図 2.17）の関係について考察する。塩分分析の結果と比較すると、水分保有率が高い程、塩分浸透抵抗性は向上している様に見受けられるが、混和材シリーズ、特に「BB50S」及び「NBF50S」においては、塩分が最深部まで浸透しており、水分保有率が回復しているにも拘わらず塩分浸透抵抗性が低下していた。このことから、水分保有率の高ければ塩分浸透抵抗性が向上するという訳ではないことが分かる。

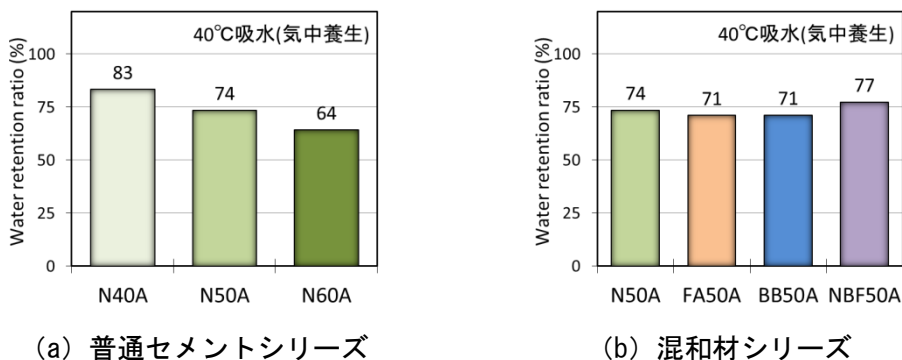


図 2.80 水分保有率-40℃吸水（気中養生）

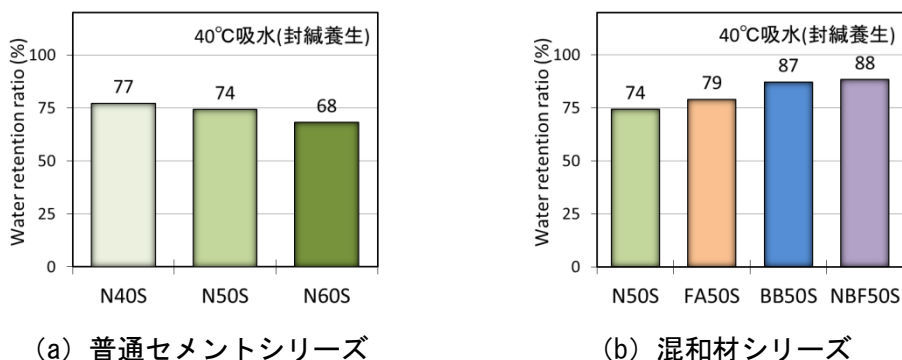


図 2.81 水分保有率-40℃吸水（封緘養生）

(4.1) 水分保有率「40℃吸湿」

40℃乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズの水分保有率を図 2.82 及び図 2.83 に示す。結果を見ると、40℃乾燥後に吸湿過程を経験したことで、気中養生、封緘養生共に水分保有率が増加していることを確認できる。吸湿過程では、蒸気として水分を供給したが、この様な場合、熱力学的に水分は微小な空隙から凝縮していく。水分が凝縮する空隙径は Kelvin 式及び修正 BET 理論より導出された以下の式(2.3)より求められる¹⁶⁾。

$$r_c = -\frac{2C\gamma V_m}{RT \ln h} \quad (2.3)$$

ここで、 r_c : 液滴半径、 C : 定数(2.15)、 γ : 表面張力、 V_m : モル体積、 R : 気体定数、 T : 絶対温度、 h : 相対湿度である。したがって、上式を用いると本検討で実施した吸湿過程 (20℃ RH95%) では、約 86nm 以下の空隙において水分が液状水として凝縮する。このことから、吸湿過程施したことで増加した水分、特に凝縮した水分は、約 86nm 以下の空隙に存在するものと考えられる。また、増加した水分量の中には、壁面に吸着した水分も含まれている。

(4.2) 水分保有率「40℃吸湿」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動 (図 2.18 及び図 2.19) の関係について考察する。吸湿過程を施したことで水分保有率は増加したが、塩分浸透深さに着目すると、「40℃」シリーズと比較して全体的に塩分がより深部まで浸透しており、水分が再供給されたことで塩分浸透抵抗性が低下していることが分かる。このため、吸湿過程により供給された水分が塩分浸透を促進する要因となったと考えるのが妥当であるが、液状水として凝縮した水分だけでなく、空隙壁面に吸着した水分も本要因の一つとして考えられる。

以上より、空隙内に水分が存在するだけで塩分浸透、特に移流による浸透は一概には抑制されず、空隙内に存在する水分は、存在する位置や状態により塩分浸透を促進する可能性があることが分かる。

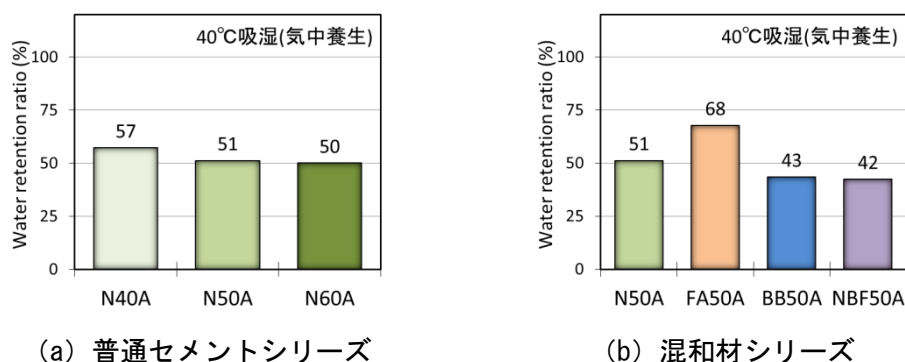


図 2.82 水分保有率-40℃吸湿 (気中養生)

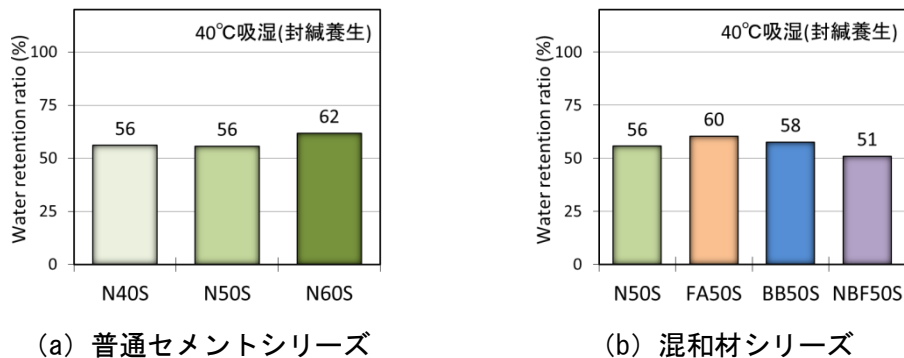


図 2.83 水分保有率-40°C吸湿 (封緘養生)

(5.1) 水分保有率「105°C」

105°C乾燥を施した供試体シリーズの水分保有率を図 2.84 に示す。本検討では 105°C乾燥後の水分保有率を 0% : 「絶乾状態」と定義した。

(5.2) 水分保有率「105°C」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動 (図 2.20 及び図 2.21) の関係について考察する。「40°C」シリーズと比較して、塩分がより深部まで浸透していることを確認できるが、これは、105°C乾燥を経験したことでコンクリート内部が極めて乾燥した状態になったことが原因であると考えられる。よって、コンクリートの含水状態が塩分浸透挙動に対して影響を与えているものと考えられる。空隙内に存在する水分が塩分浸透、すなわち移流に対する抑制の主要因であると仮定すると、コンクリートが絶乾状態にある場合、抑制の主要因が存在しないため、浸透の抑制はおろか、停滞現象は生じないものと考えられる。しかし、実際には塩分分析の結果を見てわかるように、「105°C」シリーズにおいても塩分の浸透が停滞する現象が確認された。このことから、コンクリートの含水状態は塩分浸透挙動に影響を与えて要因の一つであるものの、塩分浸透停滞現象を引き起こす主要因ではないものと推察される。したがって、塩分浸透停滞現象の支配要因は含水状態以外に存在するものと思われる。

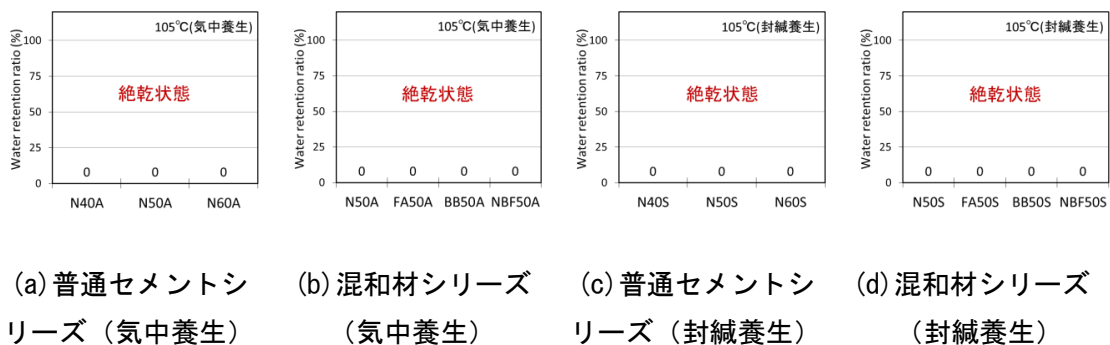


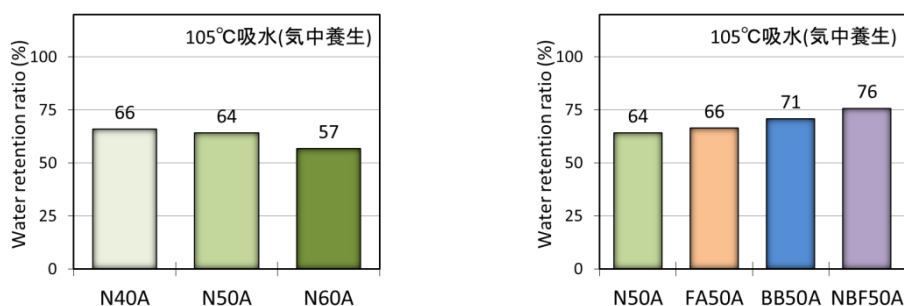
図 2.84 水分保有率-105°C

(6.1) 水分保有率「105°C吸水」

105°C乾燥後に吸水過程を施した供試体シリーズの水分保有率を図 2.85 及び図 2.86 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 105°C乾燥後に吸水過程を施したことで水分保有率が大幅に増加していることを確認できる。水粉体比により水分保有率に差異が生じているが、これは、水分の再供給により未反応分のセメントや混和材が反応したことで空隙構造が緻密化したことが原因であると考えられる。したがって、空隙の緻密化の差異により、水分供給後の乾燥期間中における水分逸散量に差異が生じたのではないかとと思われる。

(6.2) 水分保有率「105°C吸水」-塩分浸透挙動との関係-

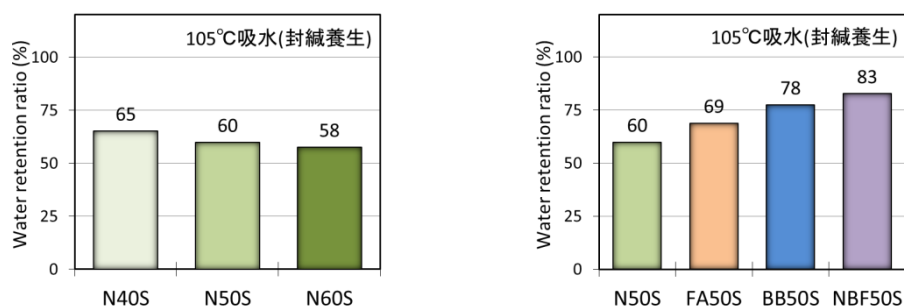
本結果と塩分浸透挙動（図 2.22 及び図 2.23）の関係について考察する。吸水過程を経験したことで水分保有率は増加していたが、塩分浸透深さに着目すると、「105°C」シリーズと比較して浸透が抑制されている様な挙動は認められなかった。水分が空隙内に存在しているにも拘わらず、これらが浸透抑制に寄与していないということは、水分が浸透を抑制する位置または状態として存在していないものと考えられる。すなわち、一度絶乾状態にした後に供給された水分と、養生後に自然に空隙内に存在する水分では根本的に存在する位置や状態が異なるのではないかと考えられる。したがって、塩分浸透挙動、延いては停滞現象を理解する上で、空隙内における水分の存在位置は極めて重要な要因であると思われる。



(a) 普通セメントシリーズ

(b) 混和材シリーズ

図 2.85 水分保有率-105°C吸水（気中養生）



(a) 普通セメントシリーズ

(b) 混和材シリーズ

図 2.86 水分保有率-105°C吸水（封緘養生）

(7.1) 水分保有率「105°C吸湿」

105°C乾燥後に吸湿過程を施した供試体シリーズの水分保有率を図 2.87 及び図 2.88 に示す。結果を見ると、気中養生、封緘養生共に 105°C乾燥後に吸湿過程を経験したことで水分保有率が僅かではあるが増加していることを確認できる。水分が凝縮する空隙径は(4.1)で示した径と同じであり、105°C乾燥後に吸湿過程を施した供試体では約 86nm 以下の空隙にのみ凝縮した水分が液状水として存在していると思われる。

(7.2) 水分保有率「105°C吸湿」-塩分浸透挙動との関係-

本結果と塩分浸透挙動(図 2.24 及び図 2.25)の関係について考察する。吸湿過程を施したことで水分保有率は増加したものの、「105°C」シリーズと比較して塩分はより深部まで浸透していた。また、「105°C」シリーズで停滞していた供試体の塩分浸透が「105°C吸湿」シリーズでは継続していることが確認された。このことから、塩分浸透挙動に関与していると考えられる水分は、約 86nm 以下の空隙に存在する凝縮水と空隙壁面の吸着水に分類されるが、本条件ではこれらの水分が塩分浸透挙動に対して負の要因になったと考えられる。

以上より、微小空隙中及び空隙壁面にのみ水分が存在する場合、これらが負の要因となり、塩分浸透が促進する様な挙動を示すことを確認した。このため、空隙内に存在する水分は、存在する位置や状態により塩分浸透を促進する可能性があることが示唆された。

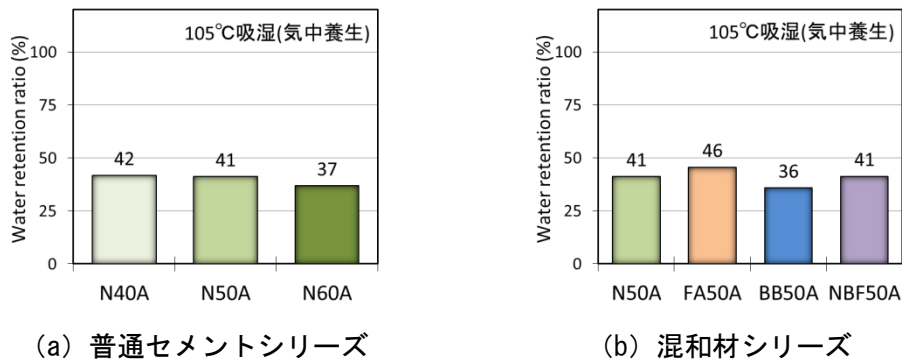


図 2.87 水分保有率-105°C吸湿 (気中養生)

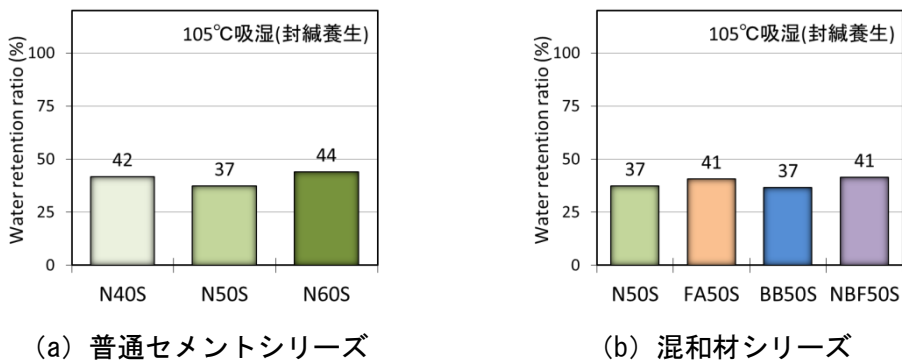


図 2.88 水分保有率-105°C吸湿 (封緘養生)

2.4.4 初期含水状態と塩分浸透挙動の関係

コンクリート内部の初期含水状態が塩分浸透挙動及び塩分浸透停滞現象に与える影響について検討を実施した。本検討では、封緘養生後の水分保有率を 100%に、105℃乾燥後を 0%（絶乾状態）に設定し、各種処理を施した供試体の塩水浸せき試験直前の水分保有率を重量変化から算出した。この水分保有率と 2.2 節で確認した塩分浸透分布を比較することで初期含水状態が塩分浸透挙動及び停滞現象に与える影響を確認した。

その結果、養生のみを施した供試体では、水分保有率が高い程、塩分浸透抵抗性が向上することを確認した。一方で、一度乾燥を経験した供試体では、乾燥度が強くなるにつれて塩分浸透距離が深くなり塩分浸透抵抗性が低下することを確認した。このため、コンクリート内部の含水状態が塩分浸透挙動、特に塩分浸透距離の深浅を決める要因であることが示された。しかしながら、105℃乾燥後に塩水浸せき試験に供した供試体では、供試体内部が絶乾状態にあるにも拘わらず、塩分の浸透が深部で停滞する現象が確認された。このことから、コンクリート内部の含水状態は塩分浸透距離の深浅を決める一要因ではあるものの、塩分浸透停滞現象を引き起こす支配的な要因ではないことが明らかになった。さらに、乾燥後に吸水過程、吸湿過程を施した供試体では、ある程度の水分保有率を有しているにも拘わらず、水分を供給する以前、すなわち乾燥後よりも塩分浸透抵抗性が低下する様な挙動が確認された。乾燥後に意図的に供給した水分と養生後に自然に存在する水分では、空隙内における存在位置や状態が異なるものと思われる。このため、一概に水分保有率が高いだけでは塩分の浸透は抑制されず、空隙内における水分の存在位置や状態が塩分浸透挙動に対して極めて重要な要因であることが明らかになった。

以上より、コンクリート内部の含水状態が塩分浸透挙動に対して影響を与える一つの要因ではあるものの、塩分浸透停滞現象を引き起こす支配的な要因ではないことを明らかにした。

2.5 まとめ

本章では、コンクリートの含水状態と空隙構造が塩分浸透挙動及び塩分浸透停滞現象に与える影響について検討した。まず、コンクリート供試体を作製後、供試体内部の含水状態や空隙構造を意図的に変化させるため、乾燥や水分の再供給など種々の処理を施した。その後、室内塩水浸せき試験を実施し、浸せき後 28 日、91 日、182 日が経過した供試体から塩分分析を実施して塩分浸透性状を評価した。その結果、水セメント比が低い程、また封緘養生を施すことで塩分浸透抵抗性が向上することを確認した。特に、混和材を使用した供試体では封緘養生を施すことで極めて高い塩分浸透抵抗性を示し、早期において塩分の浸透が浅部で停滞した。40℃乾燥、105℃乾燥を施した供試体においては、乾燥温度が高い程、塩分が深部まで浸透したが、105℃乾燥を経験した供試体では、塩分浸透が深部において停滞していることを確認した。これは極めて特徴的な結果であり、本結果から乾燥を経験したコンクリートにおいても塩分浸透停滞現象が生じる可能性があることが示唆された。乾燥後に水分を再供給した供試体では、水分の供給方法に依らず乾燥のみを施した供試体よりも塩分が深部まで浸透していることが確認された。

次に、供試体の空隙構造及び水分保有率（含水状態）を測定し、これらの結果と上記した塩分浸透性状を比較した。その結果、養生のみを施した供試体では、空隙構造が緻密で水分保有率が高い程、塩分浸透抵抗性が向上することを確認した。特に浅部において塩分浸透が停滞した供試体は極めて空隙構造が密であり、水分保有率も高い値を示していた。このため、コンクリートの空隙構造及び含水状態は塩分浸透挙動に影響を与えているものと考えられる。しかし、コンクリートの空隙構造が粗であり、且つ絶乾状態にある 105℃乾燥を施した供試体において塩分浸透停滞現象が生じたことから、空隙構造や含水状態が塩分浸透停滞現象の支配要因ではないことが明示され、停滞現象を引き起こす支配要因が他に尋ねることが示唆された。さらに、乾燥後に水分を再供給した供試体では、乾燥のみを施した供試体と比較して、塩分がより深部まで浸透していたが、本供試体の空隙構造は緻密に形成されており、尚且つ水分保有率も高い値を示していた。このため、空隙構造が密で水分保有率が高いだけでは一概に塩分の浸透は抑制されず、空隙内における水分の存在位置や状態が塩分浸透挙動に対して極めて重要な要因であることが示唆された。

第2章の参考文献

- 1) 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
- 2) 佐々木章, 竹内直也, 岸利治, 蔵重勲: 混和材を使用したコンクリート護岸から採取したコアを用いた塩分浸透停滞に関する研究, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, 第V部, pp.171-172, 2012
- 3) 中村兆治, 酒井雄也, 岸利治: コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験による検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.842-846, 2013
- 4) 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, pp.353-354, 2010
- 5) 志村雅仁, 岸利治, 鎌田知久: コンクリートへの塩分浸透に支配的な影響を与える停滞限様に関する実験的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.478-483, 2015
- 6) (社)土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], pp.122, 2012
- 7) 池田伊輝, 町田直輝, 直町聡子, 加藤佳孝: 初期飽和度を変化させたモルタル供試体を用いた塩化物イオン浸透に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.837-842, 2016
- 8) 杉本淳, 土井佐記, 岡崎慎一郎, 氏家勲: コンクリート中の液状水浸潤が果たす塩化物イオン拡散への影響, 平成23年度土木学会四国支部第17回技術研究発表会概要集, pp.257-258, 2011
- 9) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.2, pp.69-82, 1990
- 10) 川端雄一郎, 松下博通, 藤田数正, 祝井健志: 混和材を混入したモルタルの塩分浸透と中性化の複合劣化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.841-846, 2005
- 11) 金子樹, 阿部道彦: 乾湿繰返しによるコンクリートの吸水性状と塩化物イオンの浸透・拡散に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.702, pp.1073-1079, 2014
- 12) 吉田亮, 岸利治: 水銀の漸次繰返し圧入による空隙の連続性抽出と有効圧力範囲に関する研究, 生産研究, 60巻, 5号, pp.126-129, 2008
- 13) 酒井雄也, 岸利治: 閾細孔半径に基づくコンクリート中の物質移動の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.688-693, 2014
- 14) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄: 乾燥および乾湿繰返しにより硬化セメントペ

- ーストの微細構造変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.993-998, 2007
- 15) 伊代田岳史, 魚本健人: 乾燥による水和停止後の水分再供給による水和進行と細孔径分布の形成, 生産研究, 53 巻, 5 号, pp.46-49, 2001
 - 16) KOICHI MAEKAWA, RAJESH CHAUBE and TOSHIHARU KISHI : MODELLING OF CONCRETE PERFORMANCE, HYDRATION, MICROSTRUCTURE FORMATION AND MASS TRANSPORT, E & FN Spon, 199

第3章

移流の停滞に寄与する支配要因及びその機構の解明

3.1 概説

毛細管への液体の浸透や吸収を考える場合、Lucas-Washburn の式が古くから用いられており、コンクリート中への液状水の浸透現象に関しても本式を用いて評価されることが多い。しかし、Lucas-Washburn の式では、浸透に対する抵抗力は Hagen-Poiseuille の式で表現される粘性摩擦力のみとされており、液状水は浸透時間の平方根に比例して浸透するため、時間の経過と共に確実に液状水が内部へと浸透することを表現している本式では、コンクリートの空隙内で生じている液状水の浸透停滞現象を表現することはできない。このため、ナノメートルからミリメートルまでの径が存在し、インクボトル空隙など複雑な構造を有するコンクリートの空隙内においては、Lucas-Washburn の式では加味されていない粘性摩擦力とは別の抵抗力が存在するものと思われる。

前章では、内部の含水状態や空隙構造を意図的に変化させたコンクリート供試体を用いて室内塩水浸せき試験を実施し、コンクリート内部の含水状態や空隙構造が塩分浸透挙動に及ぼす影響を概括的に確認した。結果として、空隙構造や含水状態は塩分浸透深さには影響を与えているものの、塩分浸透停滞現象の支配要因ではないことが明らかになった。さらに、塩水浸せき前に空隙内に存在する液状水は、浸透に対して極めて有益に働く場合もあるが、意図的に外部から供給した場合、その存在自体が浸透を促進する可能性があることが確認された。これにより、空隙内における水分の存在位置や状態が塩分浸透挙動に対して重要な要因であることが示唆された。

そこで本章では、前章で得られた成果を踏まえて、移流による塩分浸透の停滞を支配する要因を明らかにし、その機構を解明することを目的に、マイクロテクノロジー分野で用いられるガラス製流路を用いた液状水の浸透試験、溶存空気量を変化させた液状水の浸潤試験、さらに微小空間中における液状水のレオロジー測定を実施した。

3.2 液状水浸透に関する既往の知見

3.2.1 微小空間中への液状水浸透機構

(1) 液状水浸透理論

毛細管等の微小空間中への液状水の浸透は、毛細管現象と呼ばれる物理現象により生じ、浸透の駆動力である毛管張力は、以下式(3.1)に示す Lucas-Washburn の式¹⁾で表される。

$$\Delta P = \frac{2\gamma\cos\theta}{r} \quad (3.1)$$

ここで、 ΔP : 毛管張力、 γ : 表面張力、 θ : 接触角、 r : 管半径である。また、一般に管径が 2mm 以下の場合、重力の影響を無視できることが知られている²⁾。従って、コンクリートの場合、液状水の浸透経路である連続空隙はナノからミクロンサイズで構成されているため、重力の影響は無視され液状水浸透の駆動力は毛管張力に支配されていると思われる。

(2) Film Flow 及び Corner Flow による液状水浸透

親水性流路へ液体が浸透する場合、Film Flow 及び Corner Flow と呼ばれる液体の浸透現象が存在することが確認されている³⁾。これは、流路内に形成される液体のメニスカスに対して、**図 3.1** に示すように極薄膜厚の流れが先行する現象である。

マイクロスケール以上の流路では、これらの流れが断面積に対して占める割合は極めて小さくなり、その影響は無視できる。しかしながら、その割合は断面積の低下に伴い増加し、ナノスケールの流路にもなると、これらの流れの影響が顕在化する。そのため、同じくナノスケールの流路を有するコンクリートに関しても、Film Flow 及び Corner Flow による流れが存在していると考えられるため、微小空隙中の液状水の浸透挙動を理解するうえで本現象は極めて重要な要因であると思われる。

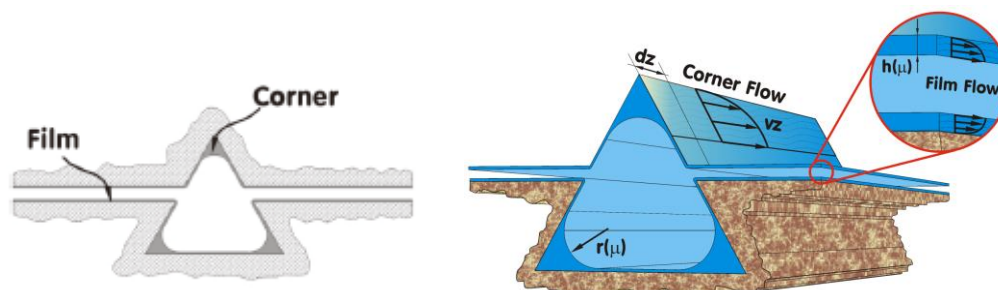


図 3.1 Film Flow 及び Corner Flow の概念図³⁾

3.2.2 液状水浸透に対する抵抗機構

(1) 液体の粘性に起因する粘性摩擦力

液状水の浸透に対して働く最も代表的な抵抗力は粘性摩擦力であり、以下式(3.2)に示す Hagen-Poiseuille の式で表される。

$$\Delta P = \frac{8\mu LV}{r^2} \quad (3.2)$$

ここで、 ΔP : 圧力損失, μ : 粘性係数, L : 液状水浸透距離, V : 管内平均速度である。従って、式(3.1)を式(3.2)に代入することで、 L : 液状水浸透距離が式(3.3)で表される。

$$L = \sqrt{\frac{r\gamma \cos\theta}{2\mu}} \cdot \sqrt{t} \quad (3.3)$$

ここで、 θ : 接触角, t : 浸透時間である。この式は Lucas-Washburn の式と呼ばれ、時間 t 及び管半径 r の平方根に比例していることが分かる。そのため、コンクリートにおいては空隙構造の緻密さで液状水の浸透距離が変化する。

しかしながら、時間の経過に伴い液状水が浸透する式(3.3)では、液状水の浸透が停滞する現象を表現することはできない。よって、粘性摩擦力とは別に液状水の浸透に対してより支配的に働く抵抗要因が存在するものと思われる。

(2) 液状水に対する空隙壁面摩擦による抵抗

岡崎らは⁴⁾、分子動力学法に基づく数値実験に着目し、微小空隙中、特にナノスケールの空隙に存在する液状水が壁面から受ける摩擦の影響について検討を行った。図 3.2 親水性の壁面に挟まれた空間(10Å)に存在する水分子に外力を作用させた際のシミュレーションの検討結果を示している。左図(a)は、水分子に対する外力を漸増させた場合における水分子の平均分子移動距離を示した図であり、 $f=2\sim 3\times 10^{-13}\text{N}$ の間に水分子が動き出すために最低限必要な外力である始動動水勾配が存在することを示している。一方で、右図(b)は、同様の条件で外力を漸減させた場合における水分子の平均分子移動距離を示した図であり、 $f=1\sim 2\times 10^{-13}\text{N}$ 水分子の移動が停止する停止動水勾配が存在することを示している。

これらの結果は、空隙構造が緻密なコンクリートでは、液状水浸透の駆動力が小さい場合に、浸透が停滞する可能性があることを示している

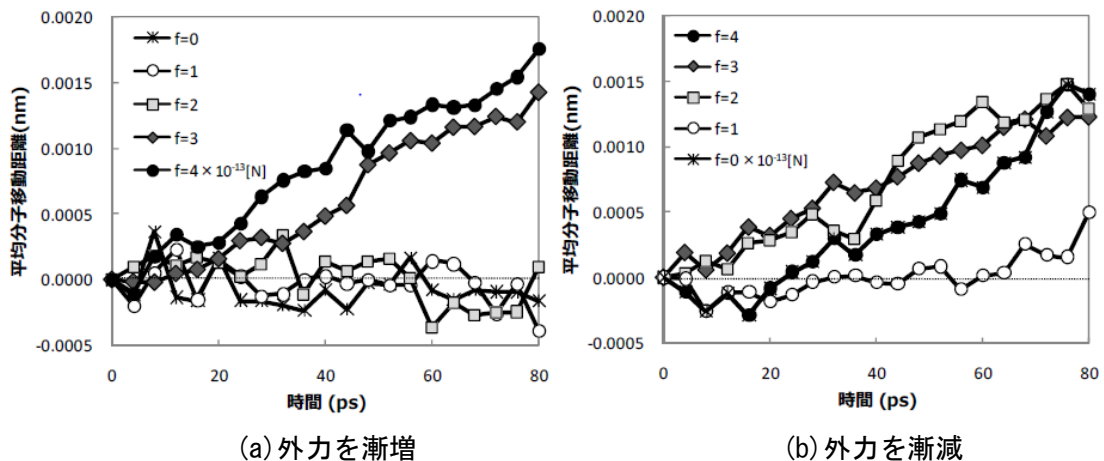


図 3.2 始動動水勾配及び停止動水勾配を示すシミュレーション結果⁴⁾

(3) 狭小空間に存在する液体に対する閉じ込め効果

狭小空間における液体の挙動に関する研究は多くの分野でなされている．ここでは，特にトライボロジー(摩擦学)の知見⁵⁾を参考にコンクリートで起きている現象の理解を試みる．

液体はより狭い空間に閉じ込められる程，動きが緩慢になる．ここで，空間内の液体の膜厚が小さくなるにつれて，液体分子の運動が低下する現象は以下の三領域に分類される．

- ①バルク液体：液体の膜厚が十分に厚い場合，粘度はバルク液体の特性に近くなる．
- ②増加する粘度：液体の膜厚が分子直径の 4 から 10 倍(液体種類により変化)に低下することで，急速に粘度が増加し，固体に似た相に遷移し始める．
- ③固体様：膜厚が分子直径の 2 から 4 倍(液体種類により変化)より小さくなることで，液体は固体に似た相を形成し，せん断により降伏応力を越えるまでは弾性的に変形する．

本知見より，コンクリートにおいても極微小な空隙に存在する液状水は固体に似た挙動を示すものと考えられる．また，このような場合，せん断に対して降伏値を持つことからコンクリート中に存在する液状水もニュートン流体ではなく，非ニュートン流体の一種であるビンガム流体のような挙動を示すものと考えられる．これは本頁(2)で記した始動動水勾配の概念と概ね一致している．よって，このような現象が液状水の浸透停滞に何らかの状況で寄与している可能性は十分に考えられる．

(4) 気液圧力差の消失によるピン止め効果

液状水が管路内を浸透する際に，管路の形状が急に変化した場合，液状水の接触角がその形状に応じた角度に到達するまで浸透が前進しないピン止め効果²⁾と呼ばれる現象が生じることが知られている．ここで，図 3.3 に示すように，管路内における液状水の接触角が 90° 未満の場合は，気液の圧力差に依存し液状水は浸透する．一方で，管路の形状が変化した場合，特に急激に管路径が拡大した際に，液状水の接触角は 0° となり，それに伴い気液の圧力差が 0 となり液状水の浸透が停滞する．しかしながら，ピン止め効果による液状水浸透

の停滞は一時的であることが知られており、実際には Film Flow や Corner Flow により液状水の浸透は継続する⁶⁾。従って、ピン止め効果による液状水浸透の一時的な停滞は、コンクリート空隙中で長期に亘って生じる液状水の浸透停滞には直接的に関与していないと思われるが、その他の要因が同時に作用することで浸透停滞に貢献している可能性は十分に考えられる。

(5) 液状水の浸透に伴う気泡の生成

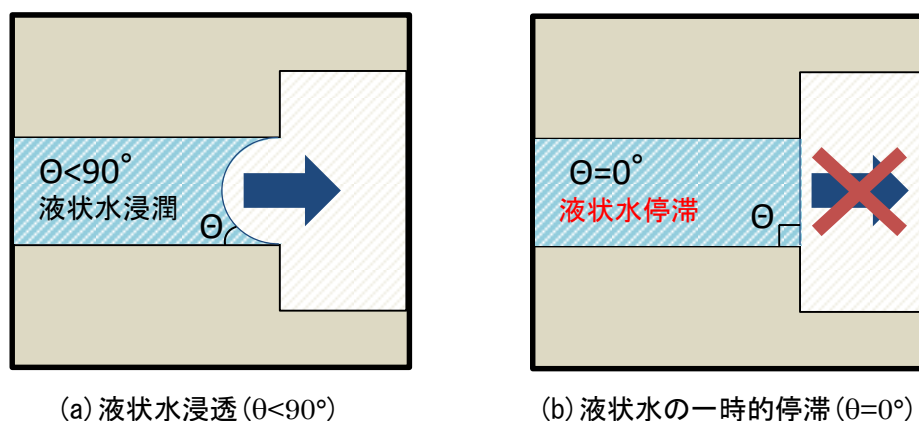


図 3.3 ピン止め効果による液状水浸透の抑制

Thamdrup らは⁷⁾、ガラス製ナノ流路を用いて、液状水の浸透に伴う気泡の発生過程を観察し、管路内に存在する気泡が液体の浸入を阻害することを確認している。図 3.4 は Thamdrup らの文献から引用したものであり、33nm から 158nm までの複数の流路深さにおける脱イオン水の流れを観察した結果を示している。流路深さが 111nm 及び 158nm においては、気泡は生じていないことが分かる。一方で、流路深さが小さくなると、Film Flow や Corner Flow の影響が顕在化し、液状水の浸透に伴い気体が巻き込まれることで、気泡が生成されていることを確認できる。しかしながら、気泡の生成による液状水浸透の阻害は一時的なものであることが知られており、長期に亘る液状水の浸透に対しては、本現象の影響は小さいことが知られている。

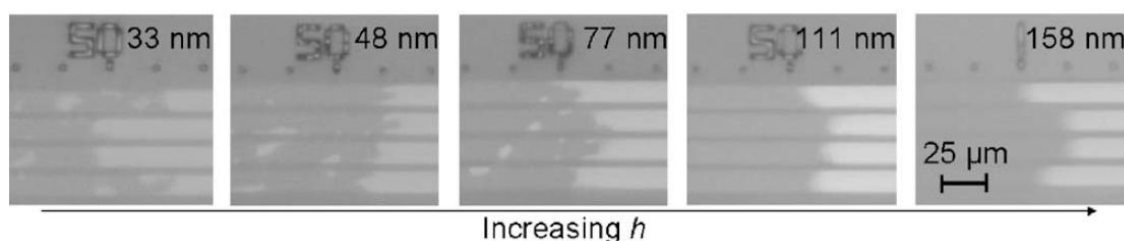


図 3.4 ガラス製ナノチャネルへの液状水の浸透及び気泡の生成⁷⁾

3.3 ガラス製マイクロ流路を用いた液状水浸透挙動の観察実験

3.3.1 実験背景/目的

コンクリートの空隙内で起きている現象を直接観察することは極めて困難ではあるが、微小空間中における液状水の浸透を観察した事例は、3.2.2節でも示しているように数多く存在する。しかしながら、その多くが直管における浸透挙動を対象としているため、コンクリートの様な複雑なネットワークを有する空隙に対して、必ずしもその結果を適用することはできない。そこで本実験では、微小空間中における液状水の浸透挙動を観察する手法として、マイクロテクノロジーの分野で広く用いられているガラス製マイクロ流路を用いた実験方法を参考にして液状水の浸透試験を実施した。本実験では、比較的簡単に任意の形状の流路を作製できるため、液状水を浸透させる流路の形状は単純直管だけではなく、インクボトル形状などコンクリートの空隙の形状を模擬したものを作製した。以上の流路を作製し、本実験では、流路内に種々の湿潤状態を設定することで、流路の形状や流路内の湿潤条件が液状水の浸透に与える影響を明らかにし、模型流路において、浸透を抑制する支配要因を確認することを目的とした。

3.3.2 ガラス製マイクロ流路の作製

図 3.5 に示す株式会社ピーエムティー製の卓上型 NC 微細加工機 Micro MC-1 を用いて、76×26×1.3mm のスライドガラス上に深さ 500 μ m のマイクロ流路を作製した。マイクロ流路の作製例を図 3.6 に示す。マイクロ流路は 2 枚のガラスで構成されており、一枚にマイクロ流路を作製し、もう一枚には液状水の注水及び排水用の直径 1mm の貫通孔を作製した後、二枚を貼り合わせて作製した。図 3.7 に流路加工後から完成までの具体的な工程を示す。



図 3.5 卓上型 NC 微細加工機 (Micro MC-1)

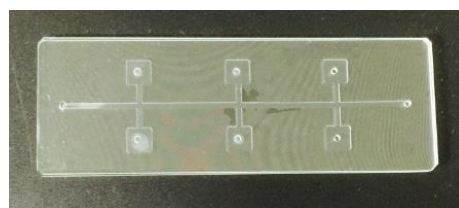


図 3.6 マイクロ流路の作製例

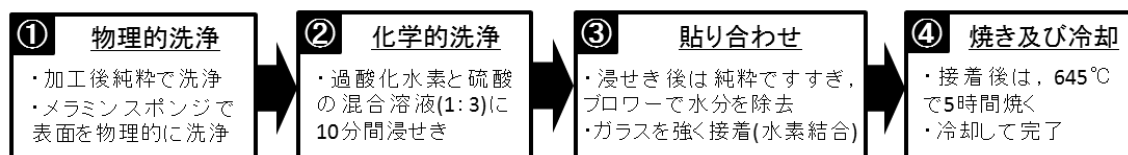


図 3.7 流路加工後の工程

3.3.3 実験概要

本実験で作製したマイクロ流路の形状を図 3.8 示す。流路は、コンクリートの種々の空隙の形状に対応させるため、直管のみの流路、主経路にインクボトルを有する流路、そして、壁面にインクボトルを有する流路の計 3 種類を用意した。なお、壁面インクボトルを有する流路については、インクボトル部に予め排水孔を設けており、この部分を開閉できるようにした。そのため、閉塞時はデッドエンド空隙を模擬しており、排水孔にセロハンテープを張り付けることで液状水の出入りを遮断した。流路内の初期条件は表 3.1 に示す通りである。まず、流路の形状が液状水の浸透挙動に与える影響について確認するため、流路内が乾燥した状態で液状水を浸透させた(A1~A4)。次に、流路内の湿潤状態が液状水の浸透に与える影響について検討するため、任意の箇所液状水を配置した(B-1~B-8)。最後に、流路内に存在する気泡が液状水浸透挙動に与える影響を明らかにするため、流路内の任意の箇所に気泡を配置して浸透試験を実施した(C-1~C-4)。尚、本実験では、浸透させる液状水と予め流路内に存在する液状水を見分けるために、図 3.9 に示した食用色粉(青色)を混合させた着色液状水(以下、着色水)を浸透水として使用した。注水孔の周りには義歯安定剤を用いて着色水を溜めておくための堰を作製した。着色水はマイクロピペットを用いて注入し、流路内の湿潤条件や流路形状により変化する着色水の浸透挙動を観察した(図 3.10)。

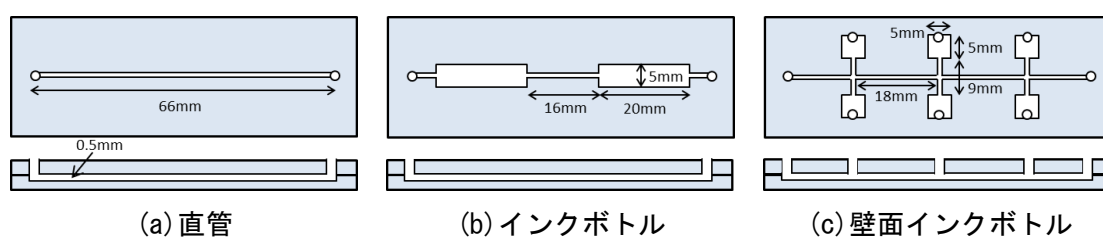


図 3.8 マイクロ流路のデザイン



図 3.9 着色液状水



図 3.10 試験風景

表 3.1 流路内初期条件

シリーズ	流路種類	含水条件	開閉条件	名称	条件模式図
シリーズ A: 流路形状の影響	直管	乾燥		A-1	
	インクボトル	乾燥		A-2	
	壁面インクボトル	乾燥	開放	A-3	
		乾燥	閉塞	A-4	
シリーズ B: 流路内に存在する液状水の影響	直管	湿潤		B-1	
	インクボトル	湿潤		B-2	
	壁面インクボトル	湿潤	開放	B-3	
		湿潤	閉塞	B-4	
		湿潤	開放	B-5	
		湿潤	開放	B-6	
		湿潤	開放	B-7	
		湿潤	閉塞	B-8	
シリーズ C: 流路内に存在する気泡の影響	壁面インクボトル	湿潤	閉塞	C-1	
		湿潤	閉塞	C-2	
		湿潤	開放	C-3	
		湿潤	閉塞	C-4	

3.3.4 流路形状が液状水浸透挙動に与える影響(シリーズ A)

流路の形状が液状水浸透挙動に与える影響について検討した結果(シリーズ A)を図 3.11 から図 3.14 に示す。図中には、流路の初期条件を模式的に示したものと着色水浸透後の最終浸透位置を示している。

試験結果を見ると、流路の形状に依らず着色水が流路の最深部まで到達していることが分かる。また、着色水の浸透は瞬時に完了しており、浸透を抑制する因子の存在は確認されなかった。流路径が急激に拡大する箇所(インクボトル)を有する A-2 に関しては、3.2.2 節で示したピン止め効果により一時的に浸透が抑制されるのではないかと予想していたが、そのような現象は一切確認されなかった。一方、壁面インクボトルを有する流路(A-3 及び A-4)では、排水孔を開放した条件に関しては、着色水がボトル内を満たすように浸透したが、閉塞条件ではボトル内への着色水の浸透は認められなかった。これは、インクボトル内の空気圧と毛管張力が釣り合ったためにボトル内への浸透が抑制されたものと思われる。このため、コンクリートの空隙内においても、液状水がデッドエンド空隙に到達した場合には、浸透圧と内部の空気圧が釣り合い、浸透が大幅に抑制されるものと思われる。

以上より、流路内が乾燥状態にある場合、着色水は流路の形状に依らず毛管張力により急激に浸透することを確認した。これは、コンクリートの空隙内が絶乾に近い状態にある場合の液状水の浸透挙動表現しているものと思われる。

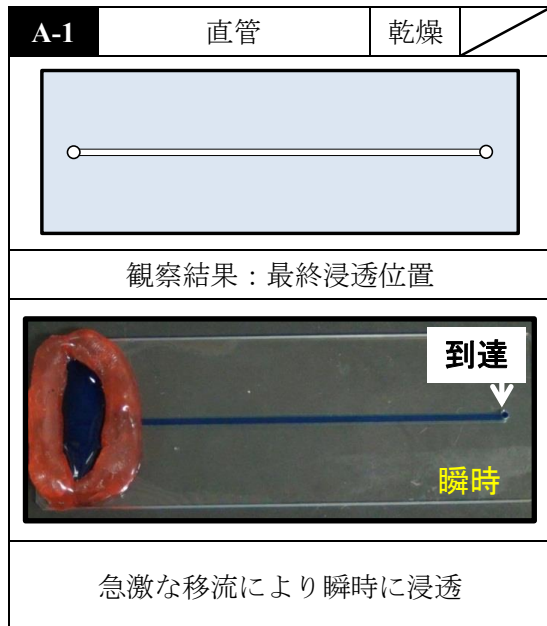


図 3.11 浸透試験結果：A-1

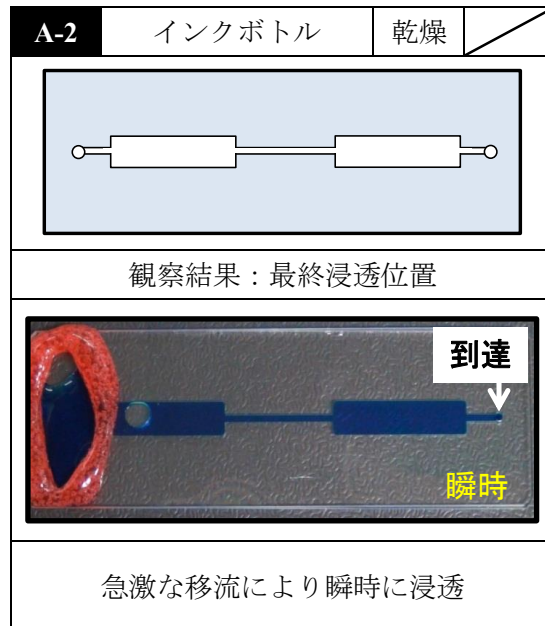


図 3.12 浸透試験結果：A-2

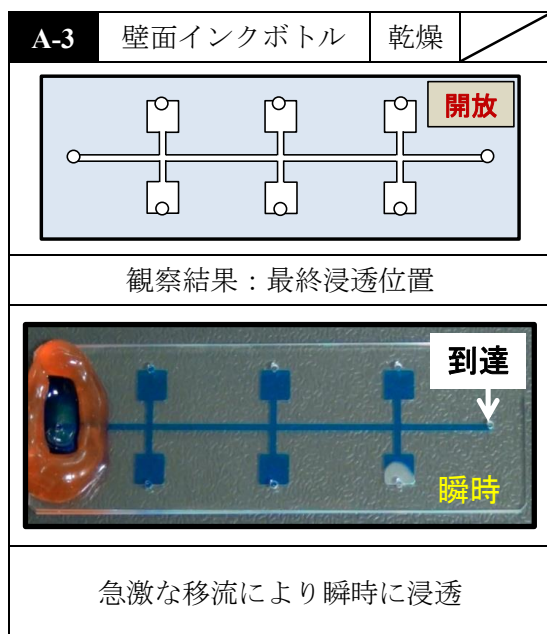


図 3.13 浸透試験結果：A-3

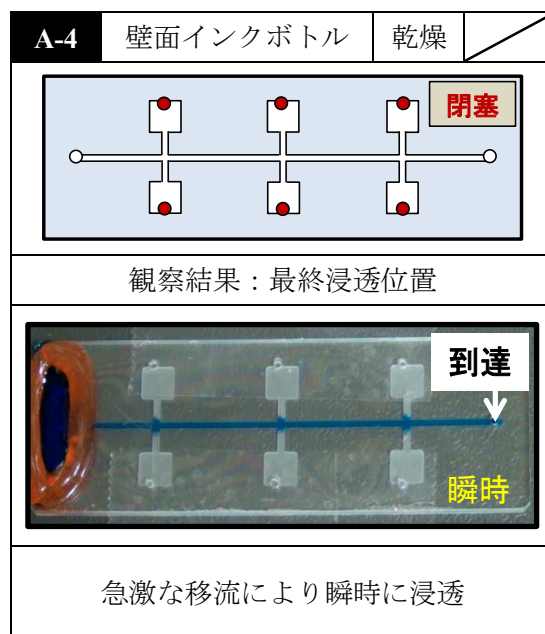


図 3.14 浸透試験結果：A-4

3.3.5 流路内に存在する液状水が液状水浸透挙動に与える影響(シリーズ B)

流路内に予め存在する液状水が、液状水浸透挙動に与える影響について検討した結果(シリーズ B)を図 3.15 から図 3.22 に示す。本シリーズでは、流路内の任意の箇所にも不連続に存在する様に液状水を配置した。液状水の初期位置は図中の模式図内に記している通りである。

実験結果を見ると、すべての条件において着色水が最深部まで到達していることを確認できる。特に B-1 から B-6 は浸透が瞬時に完了しており、液状水が流路内に存在しても浸透が抑制される様な現象は見受けられなかった。壁面インクボトルを有する流路では、ボトル内が液状水で満たされている場合(B-3 から B-6)、浸透の抑制は認められず、直管流路と似たような浸透挙動を示すことを確認した。一方、これまでの条件では、着色水が瞬時に最深部まで到達していたのに対して、初期条件として液状水を無作為に配置した B-7 及び B-8 では、僅かではあるが浸透が抑制されていることが確認された。流路内の状態に着目すると、図中黄枠内に示した様に、液状水が浸透する過程で主経路と壁面インクボトルの交差部に気泡が存在していることを確認できる。従って、流路の交差部に気泡が詰まったことで液状水の浸透が一時的に抑制されたのではないかと考えられる。コンクリートの空隙内においても、液状水は不連続に存在しているものと思われる。そのため、上記の様な気泡による抑制現象が生じている可能性は極めて高いと考えられる。

以上の検討より、液状水の存在位置により着色水の浸透挙動は大きく異なり、特に主経路と壁面インクボトルの交差部に気泡が存在することで、一時的ではあるが着色水の浸透が大幅に抑制されることを確認した。上記の現象がコンクリート内で生じ、塩分浸透を抑制している可能性は高いと考えられる。

また、2章において、意図的に外部から水分を供給した場合、塩分の浸透が促進されるような現象を確認したが、外部から供給された水分は、本検討で配置したような浸透の抑制に寄与しない位置に存在したのではないかと考えられる。

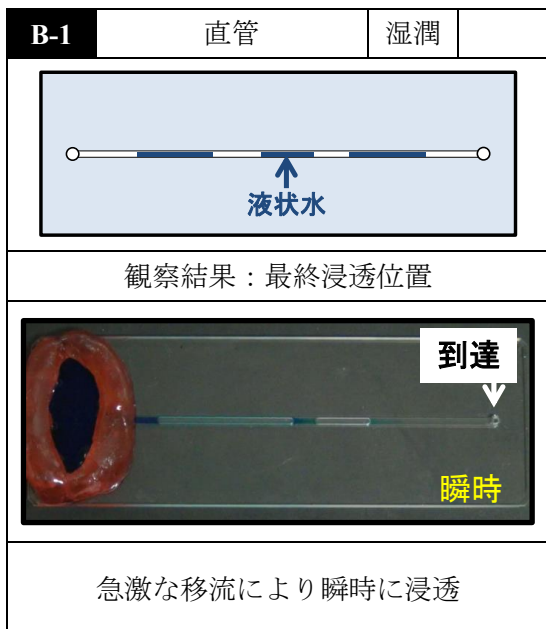


図 3.15 浸透試験結果：B-1

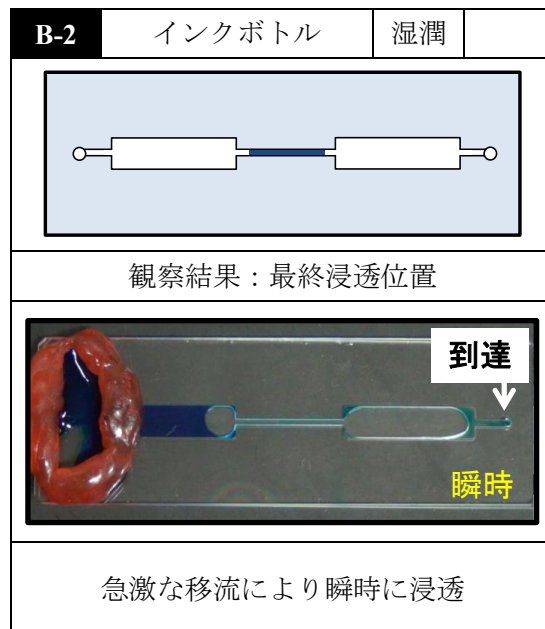


図 3.16 浸透試験結果：B-2

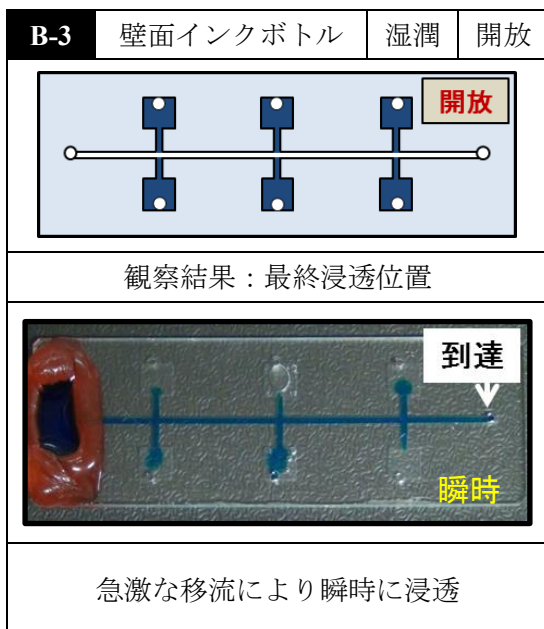


図 3.17 浸透試験結果：B-3

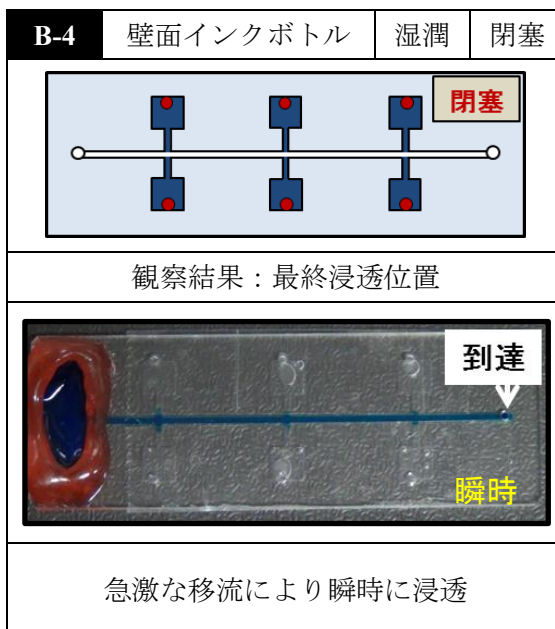


図 3.18 浸透試験結果：B-4

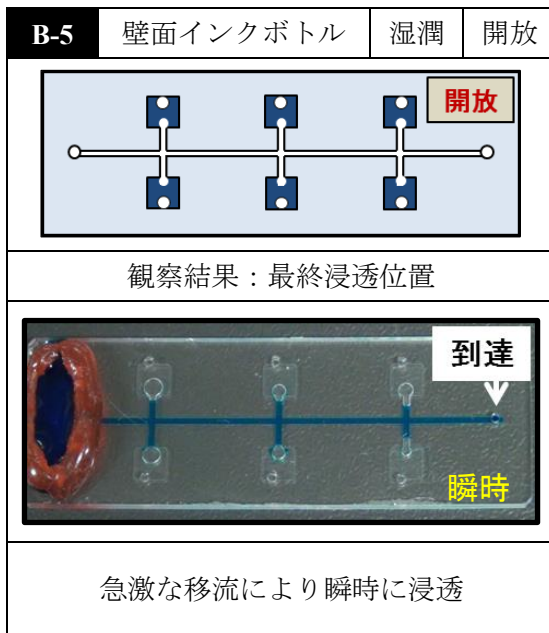


図 3.19 浸透試験結果：B-5

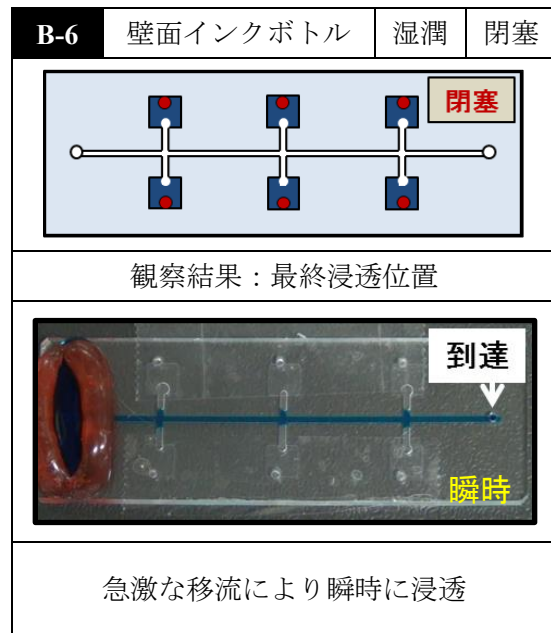


図 3.20 浸透試験結果：B-6

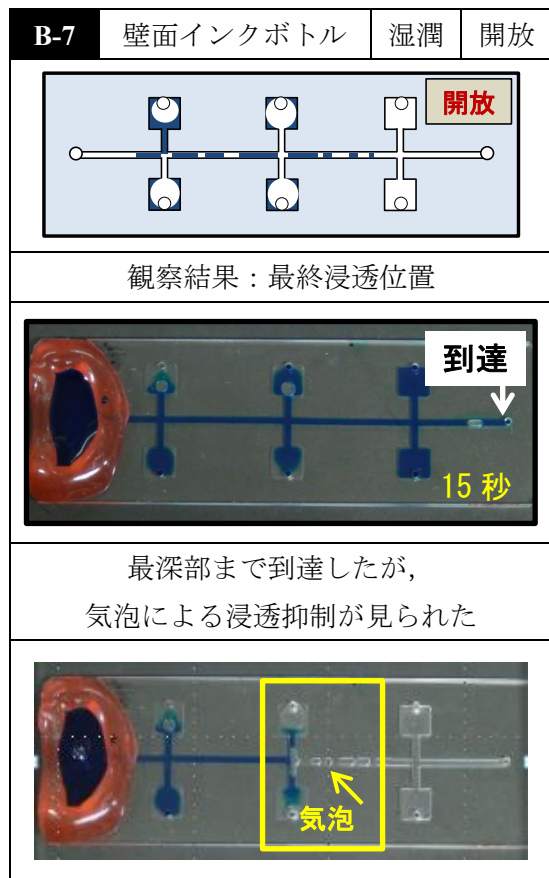


図 3.21 浸透試験結果：B-7

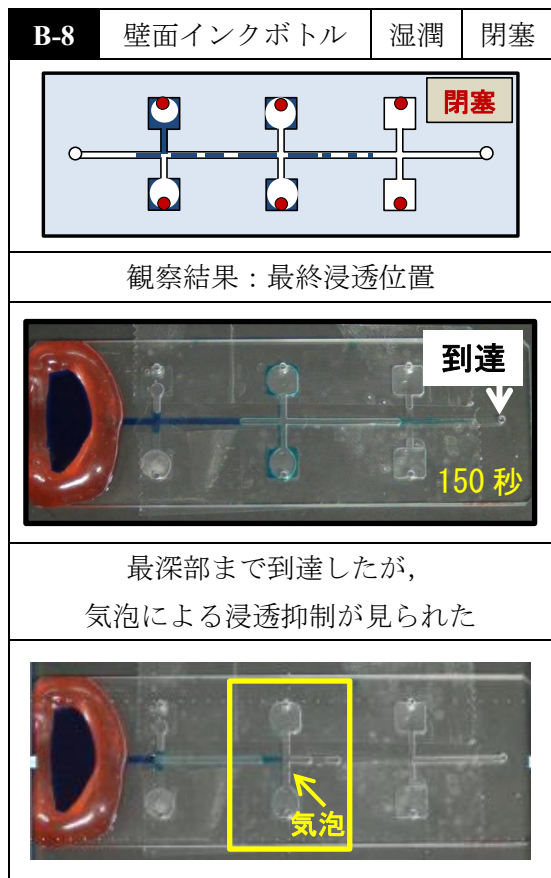


図 3.22 浸透試験結果：B-8

3.3.6 流路内に存在する気泡が液状水浸透挙動に与える影響(シリーズ C)

流路内に存在する気泡が、液状水浸透挙動に与える影響について検討した結果(シリーズ C)を図 3.23 から図 3.26 に示す。本シリーズでは、主経路と壁面インクボトルの交差部に気泡が存在する様に液状水を配置した。気泡及び液状水の初期位置は図中の流路模式図内に記している。C-3 及び C-4 はインクボトル内が不飽和な状態を模擬している。

実験結果を見ると、壁面インクボトルの排水孔が開放している条件(C-1 及び C-3)では、比較的早々に着色水が最深部まで到達しており、気泡による抑制効果は小さいことが分かる。これは、液状水の浸透に伴い気泡がインクボトル内の排水孔から排出されたことが原因であると考えられる。このため、壁面インクボトルが他の空隙と連続している場合においては、気泡による抑制は小さいものと思われる。次に、壁面インクボトル部が閉塞している条件では、これまでの条件とは明らかに異なる液状水浸透挙動を示しており、浸透が大幅に抑制されていることを確認できる。特に C-4 では、測定時間が 3600 秒ではあるが液状水の浸透が停滞している様な現象が確認された。流路内に着目すると、主経路と壁面インクボトルの交差部に存在する気泡が液状水の浸透を大幅に抑制していることが分かる。このことから、主経路と壁面インクボトル、特にデッドエンド空隙が交差している箇所が存在する気泡が液状水の浸透抑制の主要因であることが示唆された。

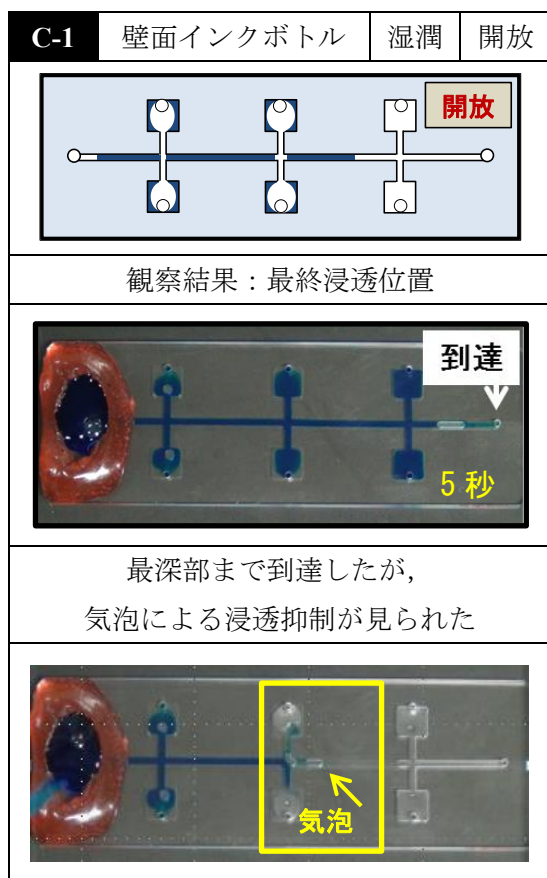


図 3.23 浸透試験結果：C-1

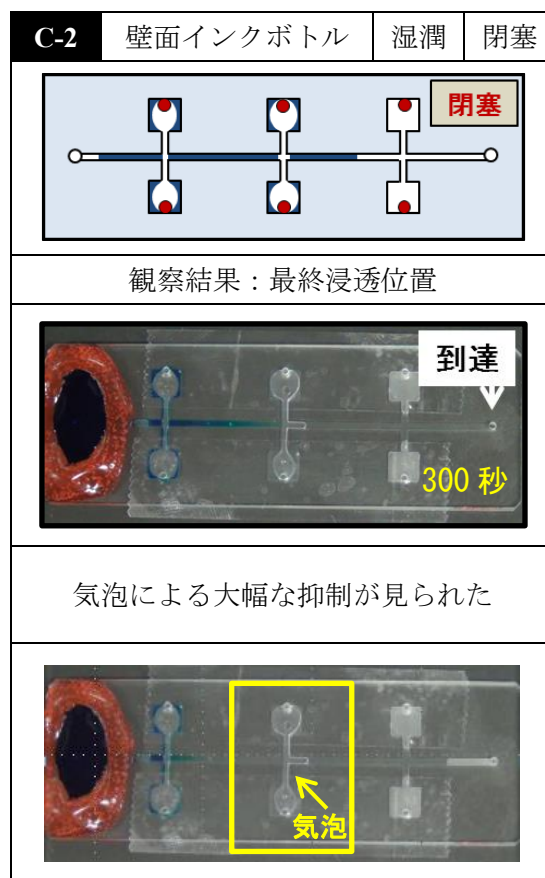


図 3.24 浸透試験結果：C-2

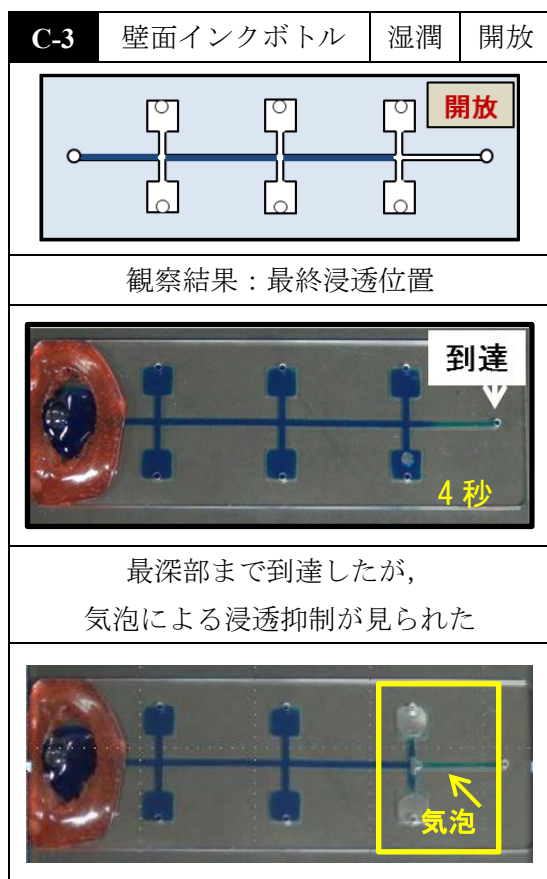


図 3.25 浸透試験結果：C-3

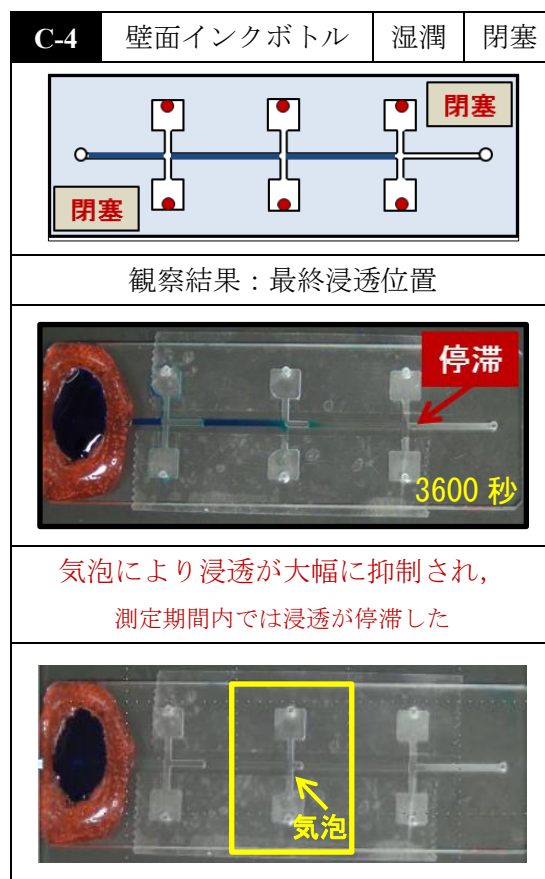


図 3.26 浸透試験結果：C-4

以上の検討より、流路内に存在する気泡が液状水浸透挙動に与える影響は極めて大きいものと考えられる。コンクリートの空隙はナノメートルからミリメートルまで存在するが、一般にナノ・マイクロバブル（直径 50 μm 以下）は、時間の経過に伴い内部圧力が上昇し、数秒から数日で自然に圧壊することが知られている⁸⁾。このため、コンクリートにおいても、ナノ・マイクロオーダーの空隙内では気泡は長期間存在することができないものと思われる。したがって、本検討で確認された現象がコンクリート内においても長期的に生じている場合、50 μm 以上の空隙に存在する気泡が浸透を抑制しているものと考えられ、現時点では、本現象が塩分浸透停滞現象、特に移流の停滞機構の支配要因である可能性が極めて高いのではないかと考えている。

3.3.7 絶乾状態の流路における気泡の生成

これまでの検討では、壁面インクボトルのサイズが 5 \times 5mm の流路を使用していたが、本検討では 7 \times 7mm の流路を使用し、流路内を乾燥状態に設定して液状水浸透試験を実施した。流路条件及び試験結果を図 3.27 に示す。結果を見ると、3.3.5 節で確認した結果と同様に液状水が最深部まで浸透していることが分かる。しかしながら、浸透試験後の流路内に着目すると、液状水が浸透した後に、主経路とインクボトルの交差部に気泡が形成されてい

ていることを確認した。これは、流路壁面を辿って液状水が壁面インクボトル内に浸透し、ボトル内の空気が押し出されたことで形成されたものと思われる。

以上より、絶乾状態にある場合、液状水は比較的深部まで浸透するが、空隙の形状次第では停滞に寄与していると考えられる気泡が形成されることを明らかにした。本現象が 2 章で確認した絶乾状態の供試体における塩分浸透の停滞に関与している可能性は極めて高いものと思われる。

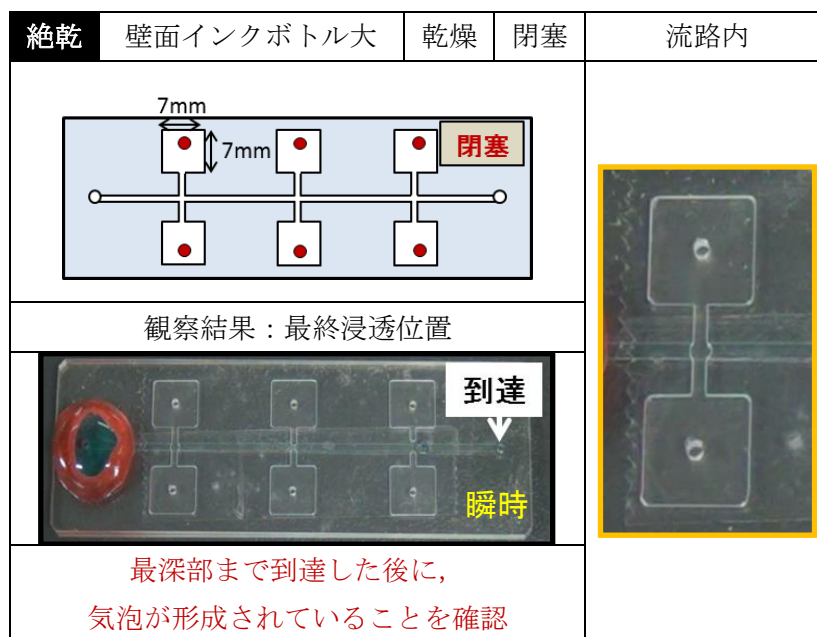


図 3.27 浸透試験結果：絶乾状態（壁面インクボトル大）

3.4 セメント硬化体への液状水浸透に対する気泡の影響

3.4.1 実験目的

3.3節では、流路の交差部に存在する気泡が液状水浸透に対して強く抑制を掛けていることを確認した。しかし、ガラス製流路で生じている現象が実際のコンクリートの空隙内で生じていると断定することはできない。そこで本実験では、コンクリートの空隙内においても、液状水の浸透に対して気泡による抑制機構が働いているかを検証することを目的に、溶存空気量を変化させた浸せき水を用いて塩水浸せき試験を実施した。本実験では、溶存空気量の低い浸せき水を用いることで、空隙内に存在する気泡が浸せき水中に溶解込み、浸透に対する抑制機構が働かなくなるのではないかと考えた。本実験でこのような結果を得ることができれば、3.3節で確認した現象がコンクリートの空隙内においても生じている可能性が高いのではないかと考えられる。

3.4.2 供試体概要

本実験では、表 3.2 に示す配合で作製した $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ のペースト円柱供試体を用いた。供試体は普通ポルトランドセメント(以下、OPC)を使用した N シリーズと OPC にフライアッシュを 20%内割置換(B 種相当)した FA シリーズを用意した。水粉体比は、40, 50, 60% の 3 水準に設定した。養生方法は、封緘養生の 1 水準であり 28 日間施した。使用材料の物性値を表 3.3 に示す。供試体は、ブリーディングの影響を排除するため、養生終了後に水冷式カッターを用いて上下端 10mm を切断した。その後、浸せき面(1 面開放)以外の面はエポキシ樹脂を用いて 3 層コーティングした。

表 3.2 ペースト供試体配合表

シリーズ名称	W/C (%)	置換率 (%)
N40	40	/
N50	50	
N60	60	
FA40	40	20
FA50	50	
FA60	60	

表 3.3 ペースト供試体配合表

セメント	普通ポルトランドセメント(密度 : 3.15g/cm^3)
混和材	フライアッシュ (ブレン値 : $3400 \text{cm}^2/\text{g}$), 高炉スラグ微粉末 (ブレン値 : $4250 \text{cm}^2/\text{g}$)

3.4.3 実験概要

本実験では、図 3.28 に示すように、異なる溶存空気量に設定した浸せき水に供試体を水平方向に設置し、室内塩水浸せき試験を実施した。浸せき水には、表 3.4 に示すように異なる溶存空気量の濃度 10%塩水を使用した。一つは水道水(飽和状態)、もう一つは真空ポンプを用いて 1 時間真空脱気して作製した脱気水(未飽和状態)を使用した。この際、浸せき水の溶存空気量は、図 3.29 に示すニッコー・ハンセン株式会社製のハンディ型ポータブル溶存酸素計(DO110 型)を用いて溶存酸素量を測定することで確認した。また、脱気水を用いた浸せき水は、大気中の気体が常時溶け込み、飽和状態に戻ろうとするため、1 日ごとに脱気水を作製して常に未飽和のものを使用した。以上の条件のもと、本実験では塩水浸せき試験中の供試体の重量変化を測定することで、浸せき水の溶存空気量が塩水の浸透挙動に与える影響について検討を実施した。尚、供試体重量は、1/100g 単位で測定可能な電子天秤(METTLER TOLEDO 製)を用いて測定した。

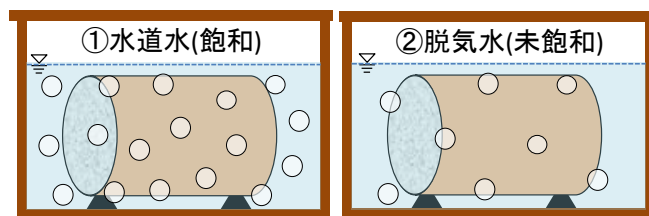


図 3.28 塩水浸せき試験の概略図

表 3.4 浸せき水条件

飽和酸素水	水道水に NaCl を添加した濃度 10%塩水を作製
脱気水	真空ポンプを用いて脱気水を作製し、NaCl を添加して濃度 10%の塩水を作製



図 3.29 溶存酸素計

3.4.4 溶存空気量の差異が液状水浸透挙動に与える影響

試験に用いた浸せき水の溶存酸素濃度 (mg/l) を図 3.30 に示す。水道水は概ね飽和溶存酸素濃度と同等の値を示しており、脱気水は常に未飽和状態にあることを確認した。このため、脱気水にのみ空隙内に存在する気泡が溶け込むことができるものと思われる。

浸せき試験中の重量変化率を図 3.31 及び図 3.32 に示す。結果を見ると、浸せき後初期の重量変化率は水道水、脱気水共に約 0.3%を示しており、浸せき水の溶存酸素濃度に依らず同様の吸水性状を示している様に見受けられる。このため、吸水初期の挙動は気泡による抑制よりも、毛管張力による浸透が支配的であるものと考えられる。ただし、浸せき開始までにエポキシを塗布する期間があったため、この際表層付近が乾燥したことが影響している可能性がある。

そこで、浸せき初期の影響を排除するため、浸せき7日目以降の重量変化率に着目した結果を用いて考察する。7日目以降の重量変化率を図3.33及び図3.34に示す。結果を見ると、水道水と脱気水の重量変化率に明確な差異が表れていることを確認できる。これは、脱気水を用いた場合、空隙内に存在する気泡が脱気水中に溶け込んだことで気泡による抑制が働かなかったものと考えられる。このことから、セメント硬化体においても、気泡による浸透の抑制機構が働いている可能性は極めて高いものと考えられる。さらに、7日目以降では、フライアッシュを用いた方が重量変化率は減少していることを確認できる。これは、第3章で確認した塩分浸透挙動と同様の挙動を示しており、フライアッシュを用いることで浸透に対する抵抗性が向上することを確認した。

以上より、セメント硬化体においても気泡による浸透抑制機構が明確に働いていることを確認した。このため、空隙内に存在する気泡が液状水の浸透を抑制する支配要因であると考えられる。したがって、このような気泡の存在が塩分浸透停滞現象、特に移流の停滞における支配要因である可能性が極めて高いものと思われる。

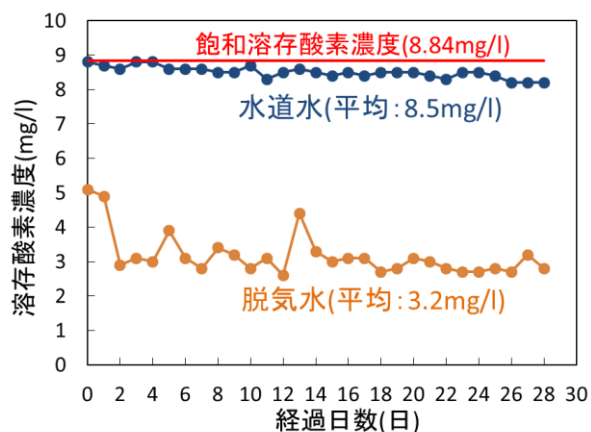


図 3.30 浸せき水溶存酸素濃度

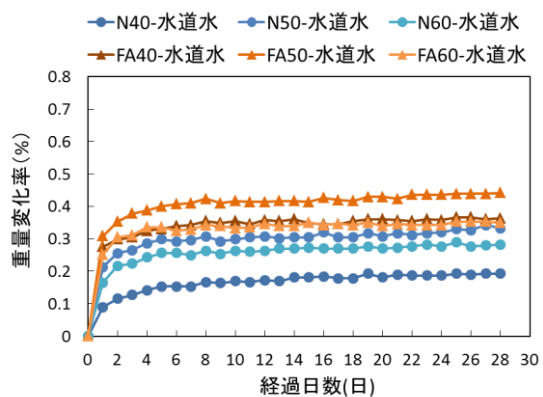


図 3.31 重量変化率(水道水)

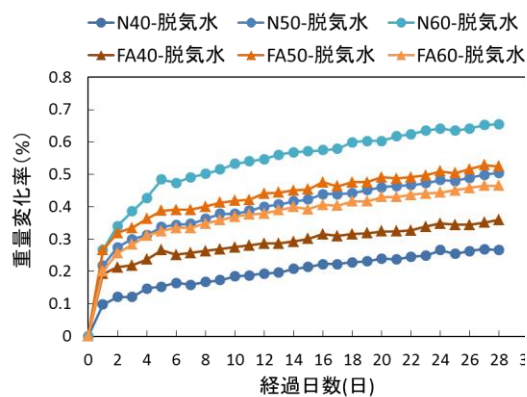


図 3.32 重量変化率(脱気水)

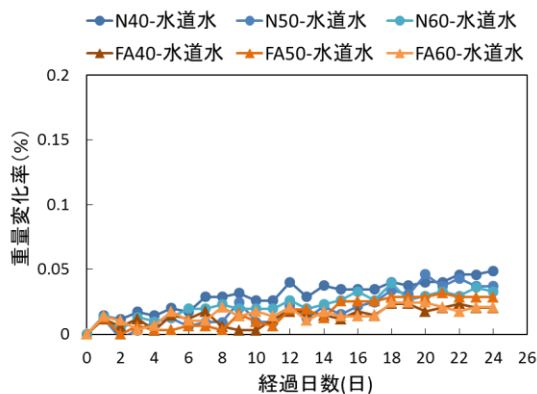


図 3.33 7 日目以降重量変化率(水道水)

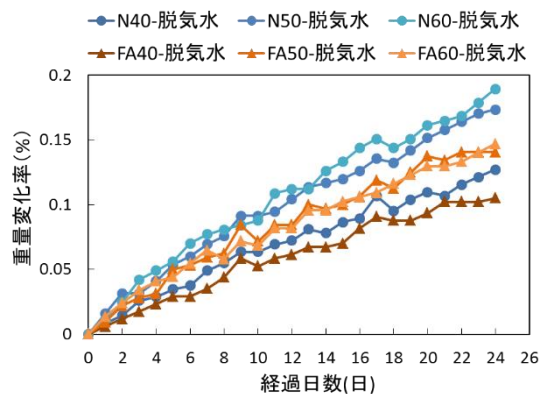


図 3.34 7 日目以降重量変化率(脱気水)

3.5 溶存空気量の差異が液状水のレオロジー特性に与える影響

3.5.1 実験目的

一般に、温度等が変化することで液状水のレオロジー特性が変化することが知られているが、溶存空気量が増加した場合も同様の変化は十分に考えられる。特にコンクリートの空隙の様な微小な空間ではその影響が顕著になる可能性は十分に考えられる。したがって、前節で確認した現象がレオロジー特性の変化によるものであれば、浸透抑制が気泡の影響と断定することはできない。そこで本検討では、溶存空気量を変化させた液状水のレオロジー特性を確認し、前節で得られた結果の妥当性を検討することを目的とした。

3.5.2 実験概要

本実験では、図 3.35 に示すレオメーター (MCR 302 : Anton Paar 社製) を用いて溶存空気量を変化させた液状水のレオロジー測定を実施した。測定概要を表 3.5 に示す。測定対象は水道水と脱気水である。プレートは平行プレートを用いて、間隙幅を 50 μ m, 100 μ m に設定した。



図 3.35 レオメーター

表 3.5 測定概要

測定対象	水道水(DO : 8.5mg/l) 脱気水(DO : 3.4mg/l)
プレート種類	平行プレート
間隙幅	50 μ m, 100 μ m

3.5.3 せん断応力-せん断速度関係

実験から得られた水道水及び脱気水のせん断応力-せん断速度関係を間隙幅ごとにまとめたものを図 3.36 及び図 3.37 に示す。結果として、間隙幅に依らず水道水及び脱気水の結果が概ね一致していることから、液状水のレオロジー特性は溶存空気量の差異に依存しないことを確認した。このため、3.4 節で確認した現象は、溶存空気量の差異によるレオロジー特性の変化ではなく、空隙内の気泡の影響を捉えているものと考えられる。

次に、測定した水道水及び脱気水の流体種類に着目すると、原点を通るニュートン流体的な挙動を示している様に見受けられる。しかしながら、図 3.38 及び図 3.39 に示した様に、低せん断速度領域を拡大してみると、僅かではあるが y 切片（降伏値）を有していることを確認できる。このため、微小な空間に挟まれた液状水は、極めてニュートン流体に近いものの、実際にはビンガム流体的な挙動を示すことを確認した。一般に、間隙幅が小さくなるにつれて、液体の粘度が増加し、非ニュートン流体の様な挙動を示すことが知られている⁵⁾。本結果においても、間隙幅が小さい程は y 切片（降伏値）が大きくなっており、この様な挙動と一致していることが分かる。

以上の結果より、溶存空気量の差異によるレオロジー特性の変化が認められなかったことから、前節で確認した溶存空気量の差異による吸水挙動の変化は、気泡による影響が支配的であることを明らかにした。さらに、微小な空間では、液状水が y 切片（降伏値）を有するビンガム流体的な挙動を示すことを確認した。これは、微小な空隙を有するコンクリートにおいても同様な挙動を示すと考えられる。このため、コンクリート中への液状水の浸透は、浸透が継続するために最低限必要な流れのせん断応力が降伏値を下回ることで停滞する可能性があることが示唆された。そして、この様な現象は気泡により浸透が大幅に抑制されることで生じるものと考えられる。したがって、塩分浸透停滞現象、特に移流の停滞現象は気泡による抑制機構と浸透する液状水のビンガム流体的な挙動が支配要因である可能性が極めて高いと考えられる。

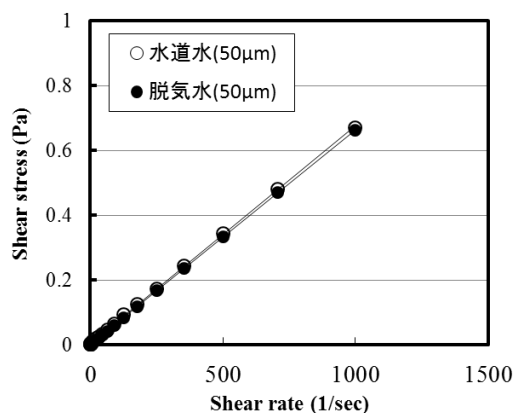


図 3.36 せん断応力-速度関係 (50 μm)

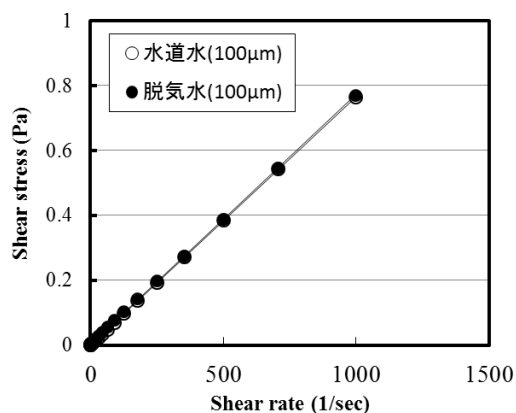


図 3.37 せん断応力-速度関係 (100 μm)

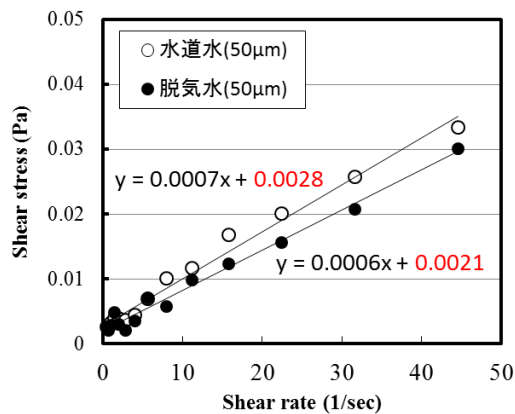


図 3.38 せん断応力-速度関係 (50 μm)
-せん断速度 0~50 (1/sec)

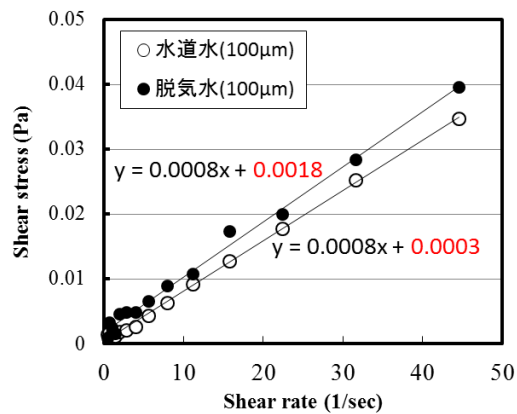


図 3.39 せん断応力-速度関係 (100 μm)
-せん断速度 0~50 (1/sec)

3.6 気液界面に固定された水分子層の影響

コンクリートのひび割れ内に気泡が存在することで、液状水の通水量が大幅に抑制されることが報告されている⁹⁾。一方で、ひび割れ面に気泡が存在していない状態においても、僅かではあるが時間の経過に伴い通水量が低減することが確認されている¹⁰⁾。本現象について、Kanyondo ら¹¹⁾は、目に見えないマイクロバブルの存在に着目しており、図 3.40 に示した様にマイクロバブルを形成する気液界面の水分子層が界面に固定されていると推測して、マイクロバブルの周囲を通過する水分子が固定された水分子層から水素結合等の作用を受けることで通水が抑制されると考察している。本現象がコンクリートの空隙内でも生じている場合、空隙内に気泡が存在することで、気泡の周囲に固定された水分子層の影響を受け、浸透が抑制されると考えられる (図 3.41)。しかし、具体的な機構は明らかになっていないため、本現象については今後より詳細に検討する必要がある。

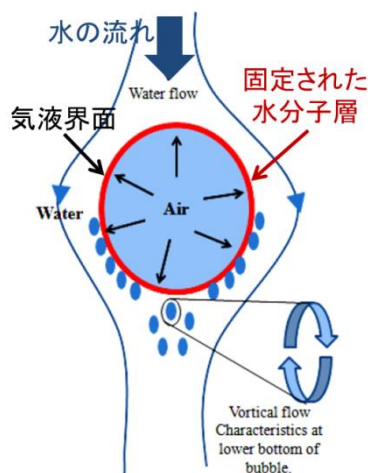


図 3.40 固定分子層の影響-概念図¹¹⁾

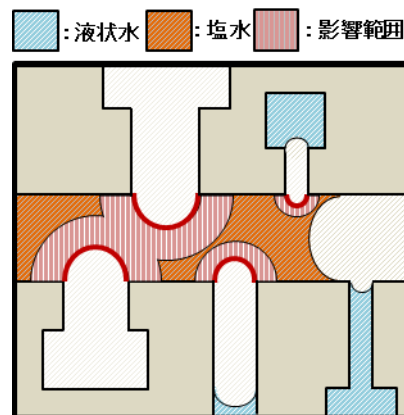


図 3.41 固定水分子層の影響-空隙内

3.7 まとめ

本章では、空隙構造や空隙内に存在する水分が移流に起因する液状水の浸透に与える影響を明確にし、移流の停滞現象を支配する要因を解明することを目的に検討を実施した。まず、空隙の形状や水分の存在位置が移流による浸透に与える影響について検討するため、マイクロテクノロジーの分野で用いられるガラス製マイクロ流路を用いて液状水浸透試験を実施した。その結果、壁面にデッドエンドのインクボトルを有し、且つ主経路とインクボトルの交差部に気泡が存在することで液状水の浸透が大幅に抑制されることを明らかにした。次に、上記の様な気泡による抑制がセメント硬化体でも生じているかを確認するため、水道水と脱気水から作製した浸せき水を用いて塩水浸せき試験を実施した。結果として、水道水と比較して脱気水を用いた方がより吸水量が増加する傾向を確認した。これは、空隙中の気泡が脱気水中に溶け込んだため、浸透に対する抑制効果が機能しなかったのではないかと考えられる。このため、セメント硬化体においても気泡による抑制機構が作用しているものと思われる。しかし、溶存空気量が増加することで、液状水のレオロジー特性が変化している可能性が考えられたため、レオメーターを用いて微小空間における液状水のレオロジー測定を実施した。その結果、液状水のレオロジー特性は溶存空気量の差異に依存していないことを明らかにした。同時に、せん断応力-せん断速度関係の結果から、低せん断速度領域に着目すると、僅かではあるが γ 切片（降伏値）を有しており、ビンガム流体的な挙動を示していることを確認した。

以上の検討結果より、移流の停滞現象は、気泡により液状水の浸透が大幅に抑制され、浸透が継続するために最低限必要な流れの力が降伏値を下回ることで生じる可能性があることを明らかにした。しかし、気泡による抑制機構は種々存在するものと考えられる。そのため、停滞機構をより具体的に解明するためには気泡による抑制機構を体系的にまとめる必要がある。

第3章の参考文献

- 1) Washburn, E., W. : THE DYNAMICS OF CAPILLARY FLOW., THE PHYSICAL REVIEW., Vol.17, No.3, pp.273-283, 1921
- 2) Quere, D., et al. : 表面張力の物理学—しずく, あわ, みずたま, さざなみの世界—, 吉岡書店, 2003
- 3) Tuller, M, and Or, D. : Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: Film and corner flow in angular pore space, Water Resource Research, Vol.37, No.5, pp.1257-1276, 2001
- 4) 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, pp311-321, 2009
- 5) Mate, M : マイクロ・ナノスケールのトライボロジー—摩擦, 潤滑, 摩耗へのボトムアップ的探究—, 吉岡書店, 2008
- 6) Mazouchi, A. and Homsy, G., M. : Thermocapillary migration of long bubbles in cylindrical capillary tubes, Physics of Fluids, Vol.12, No.3, pp.542-549, 2000
- 7) Thamdrup, L. H., et al. : Experimental investigation of bubble formation during capillary filling of SiO₂ nanoslits, Applied Physics Letters, Vol.91, 163505, 2007
- 8) 北森武彦, 庄子習一, 馬場嘉信, 藤田博之 : マイクロ化学チップの技術と応用, 丸善株式会社, 2004
- 9) 生駒勇人, 岸利治, 酒井雄也 : コンクリート中のひび割れ通水量の初期急速抑制機構の解明, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp.434-441, 2014
- 10) 佐藤成幸, Kayondo, M., 岸利治 : コンクリート中のひび割れを通る液状水からの気泡発生メカニズムに関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, 327-334, 2015
- 11) Kayondo, M. and Kishi, T. : Extended understanding of permeating water flow reduction in narrow gaps such as concrete cracks, Proceedings of The 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, pp.611-616, 2016

第4章

塩分浸透停滞現象を引き起こす支配機構の考察及び 停滞現象を考慮可能な塩分浸透簡易算定手法に関する 検討

4.1 概説

塩分の浸透現象の本質を理解するためには、移流と拡散の双方の浸透機構を深く理解することが求められる。しかしながら、コンクリートが有する極微小かつ複雑なネットワークで形成された空隙内で起きている現象を視覚的に捉えることは極めて困難であり、浸透現象については間接的な実験や理論的に推考するより他はない。さらに、これまでに数多くの研究者により塩分浸透現象に関する研究がなされてはいるが、停滞現象に着目した研究事例は少ない。また、塩分の浸透が停滞するという事実に対して懐疑的な意見も未だ多い。そのため、塩分浸透現象の本質を理解するうえで停滞機構の解明は極めて重要であると考えられる。

本章では、移流と拡散の双方の停滞に着目して、第2章及び第3章で得られた知見とこれまでに蓄積されてきた既往研究の知見を踏まえて、塩分浸透停滞現象の機構及びその支配要因を包括的に考察する。そして、停滞現象の機構を踏まえて塩分浸透停滞現象を表現可能な塩分浸透簡易算定手法に関して検討する。

4.2 塩分浸透に影響を与える諸要因

4.2.1 水粉体比

コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾において、拡散係数を算定するために水粉体比が変数として用いられている様に、水粉体比が塩分浸透挙動に与える影響は極めて大きい。本研究でも第2章において、普通ポルトランドセメントを使用した供試体に対して水粉体比を40, 50, 60%の3水準に設定することで水粉体比が塩分浸透挙動に与える影響について検討した。結果として、水セメント比が低い程、塩分浸透抵抗性が向上することを確認した。このような傾向は、空隙構造の緻密化に起因しているものと考えられているが²⁾³⁾、本研究においても水セメント比が低い程、空隙構造が緻密に形成されていたことから、上記の理解は妥当であると思われる。

4.2.2 養生条件

養生は、コンクリートが所要の強度、水密性等の耐久性を確保するために必要不可欠な作業工程であり、コンクリートの一生を左右する極めて重要な要因であると言っても過言ではない。本研究で議論している塩分浸透挙動に対しても養生の影響は大きく、第2章でその影響について検討した。本研究では、移流に起因する塩分浸透現象に着目したため、養生は気中養生と封緘養生の2種類に設定した。気中養生を施した供試体では、養生中の水分逸散に起因して表層が乾燥したことで、反応が十分に進行せず、空隙構造が粗に形成されていた。このため、供試体表層の低品質領域を辿って急激な移流により塩分が深部まで浸透する現象が確認された。封緘養生を施した供試体では、気中養生と比較して空隙構造が緻密に形成されており、なお且つ表層付近の水分も十分に保持されていたため、塩分浸透深さは極めて浅く、殆どの供試体において塩分浸透の停滞が確認された。このような塩分浸透挙動は、移流に起因する浸透が支配的な条件下で生じる。一方で、本研究では検討していないが、水中養生を施したコンクリートでは塩分浸透挙動は大きく変化する。水中養生を施すことで、コンクリートの品質は大幅に向上するが、養生中常に水分が供給されるため、養生後はコンクリートの空隙内が水分で満たされていると考えられる。この際、コンクリート中への塩分浸透を考えると、空隙内が水分で満たされている場合、移流による浸透が限りなく制限されるため拡散による浸透が支配的になり、短期的には移流と比較して浸透が抑制されている様に見える。しかし、このような条件では比較的粗大な空隙にも水分が存在するため、吸着や固定化の影響を受けながらも、時間の経過と共に確実に内部へと塩分が浸透することが知られている⁴⁾⁵⁾。このため、養生条件により出来上がるコンクリートの品質も大きく変化し、塩分浸透抵抗性も向上するが、それと同時に塩分浸透機構も変化することを留意する必要がある。

4.2.3 使用材料

フライアッシュや高炉スラグ微粉末などをコンクリート用混和材として使用することで塩分浸透抵抗性が向上することが知られており⁶⁾, これは主にフライアッシュのポゾラン反応や高炉スラグ微粉末の潜在水硬性による空隙構造の緻密化や屈曲度の増加, さらに優れた吸着、固定化能力に起因していると考えられている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾. 一方で, 普通コンクリートと比較して養生の影響を受けやすいことが分かっている¹¹⁾. 本研究においても, 混和材を用いた供試体において, 適切な養生を施すことで塩分浸透抵抗性が極めて向上することを確認したが, 養生条件により塩分浸透挙動が顕著に変化することを確認した. さらに, 混和材の置換量も塩分浸透現象に影響を与える要因の一つであり, 置換量が増加することで吸着や固定化能力が大きく変化することが明らかにされている¹²⁾¹³⁾.

以上のことから, フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材を用いる場合, 適切な置換量を設定し, 十分な養生を施す必要があるが, 本条件さえ満たすことができればコンクリートの塩分浸透抵抗性は格段に向上すると言える.

4.2.4 環境条件

実環境では, 様々な条件により塩分がコンクリートに供給される. 基本的に海水面との距離により条件は変化し, 海水中, 干満帯, 飛沫帯, 海上大気部に区分される. さらに, コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾では, 飛来塩分が多い地域と少ない地域で異なる表面塩化物イオン濃度が定められており, 環境条件の変化を飛来塩分量で表現している. そのため, 示方書で算定される鉄筋位置やある深さでの塩化物イオン濃度は, 環境条件による表面塩化物イオン濃度の変化に比例する. しかし, 本条件ではコンクリートの特性が同じである場合, 環境条件により変化する表面塩化物イオン濃度に依存してコンクリート中への塩化物イオンの浸透深さが変化すると考えられるが, 海水面からの高さが異なり表面塩化物イオン濃度が違うにも拘わらず, 塩分浸透深さが一致しているという事例が報告されている¹⁴⁾. 上記の現象は, 混和材を用いたコンクリートにおいて確認されており, 混和材を用いた場合, 表面塩化物イオン濃度に依らず, 塩分がある一定の深さで停滞する可能性があることが示唆されている.

以上より, 環境条件により表面塩化物イオン濃度が増加することで, コンクリート中へと浸透する塩分量は増加すると思われるが, 品質の良いコンクリート, 例えば混和材を用いたコンクリートでは, 環境条件に依存しない様な塩分浸透挙動を示す可能性がある.

4.3 移流による塩分浸透の停滞機構

4.3.1 空隙内に存在する気泡と微小空隙における液状水のビンガム流体的挙動

特に移流に起因する塩分浸透の停滞現象に着目したこれまでの研究では、コンクリートの空隙構造や含水状態が支配的な要因である可能性が高いと考えられてきた⁴⁾¹⁵⁾。しかし、本研究において空隙構造や含水状態が塩分浸透停滞現象に与える影響について検討した結果、第3章で示した様に、これらは塩分浸透距離の深浅に対して影響を与えている要因ではあるものの、塩分浸透停滞現象を支配する要因ではないことを明らかにした。そして、第4章において移流に起因する液状水浸透が空隙内に存在する気泡により大幅に抑制されていること、さらに、微小空間中では液状水が降伏値を有するビンガム流体的な挙動を示すことを確認し、これらの要因が移流の停滞現象を支配している可能性が高いことを示した。このことから、本研究では移流の停滞現象は以下の機構により生じていると考察した。

「移流に起因する塩分浸透は、空隙内、特に空隙が交差する部分に気泡が存在することで浸透が大幅に抑制され、最低限流れ必要な力が降伏値を下回ることによって停滞する。」

図4.1は上記の機構を模式的に示したものである。塩水が外部から移流により浸透してくる際に、空隙内に液状水が不連続に存在する場合(図中①)、空隙が交差する箇所気泡が存在することで浸透が大幅に抑制される(図中②)。そして、気泡による抑制により、液状水の流れの力が低下し、最終的に最低限必要な流れの力が降伏値以下になることで移流による浸透が停滞するものと思われる(図中③)。ここで、空隙内に存在する気泡は、サイズが小さくなるにつれて水中に溶解しやすくなり、やがて消滅することが知られている¹⁶⁾。そのため、上記した機構は気泡が安定的に存在することができると考えられる約50 μm 以上の空隙で生じている挙動を表現しているが、液状水の浸透は粗大な空隙から浸透していくことが数値解析的な検討により明らかにされており¹⁷⁾、移流の停滞が比較的粗大な空隙において生じているという解釈は妥当であると考えられる。

以上が本研究で得られた結果を考察した上で現状最も可能性の高い停滞機構だと考えている。しかし、本研究では気泡による物理的な抑制のみを検討したが、上記の抑制機構をより明確なものにするためには、停滞時の力の釣り合い等を考える必要があると思われる。

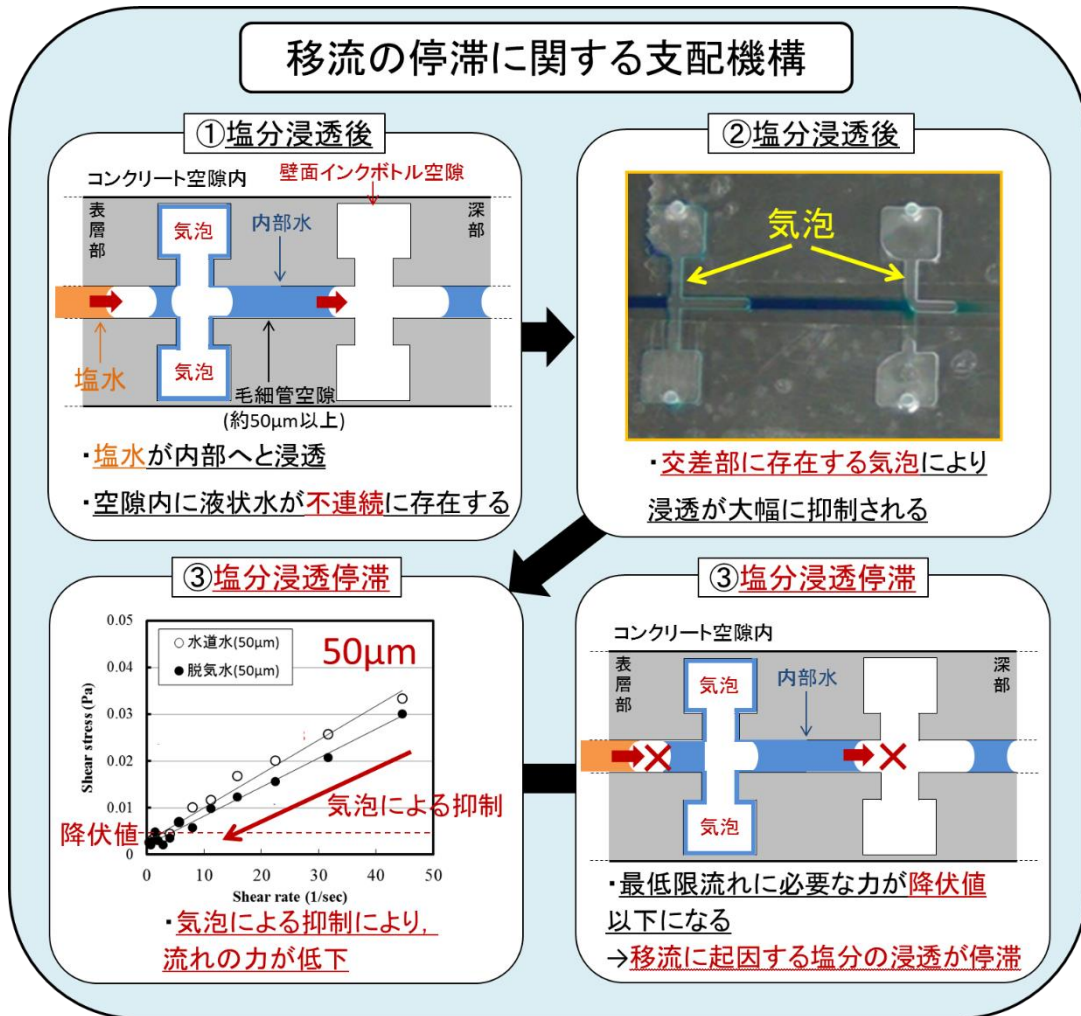


図 4.1 移流の停滞に関する支配機構

4.4 拡散による塩分浸透の停滞機構

4.4.1 空隙壁面との電気的相互作用

半径が 10nm 以下の空隙では、細孔溶液中を浸透するイオンが空隙壁面との電気的相互作用の影響を強く受けることが実験的及び解析的に示されている^{18) 19)}。さらに、中村ら²⁰⁾により、ナノオーダー空間における電気的相互作用が塩化物イオンの侵入に与える影響について検討するため、ナノテクノロジー分野の技術を活かしたガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験が行われた結果、流路深さが 16nm の場合、電気二重層の影響を受けて塩化物イオンの浸透が大幅に抑制されることを確認されている。また、同論文内で中村らは、空隙壁面のゼータ電位が負の値を有し、空隙直径が電気二重層の厚さであるデバイ長さ程度であれば、拡散による塩化物イオンの浸透が停滞する可能性がある」と論じている(図 4.2)。したがって、拡散が停滞するために重要となるのは空隙壁面のゼータ電位であ

る。空隙壁面のゼータ電位は、カルシウムイオンの存在形態により影響を受けることが報告されており²¹⁾、松永ら²²⁾は、**図 4.3** に示す様に普通ポルトランドセメントのみを使用した場合、ゼータ電位の値が正に、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材を使用した場合には、高置換率であればゼータ電位が負の値を有することを示している。さらに松永らは、混和材を高置換率で用いた場合におけるケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) の Ca/Si 比の低下に伴いゼータ電位が小さくなることを示している (**図 4.4**)。

以上より、既往の知見を踏まえると、空隙壁面との電気的相互作用が拡散の停滞を支配する機構である可能性が極めて高いと考えられる。このような機構が有効に作用するためには、空隙壁面のゼータ電位が重要となるが、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材を適切な置換量で使用することで対処することが可能である。

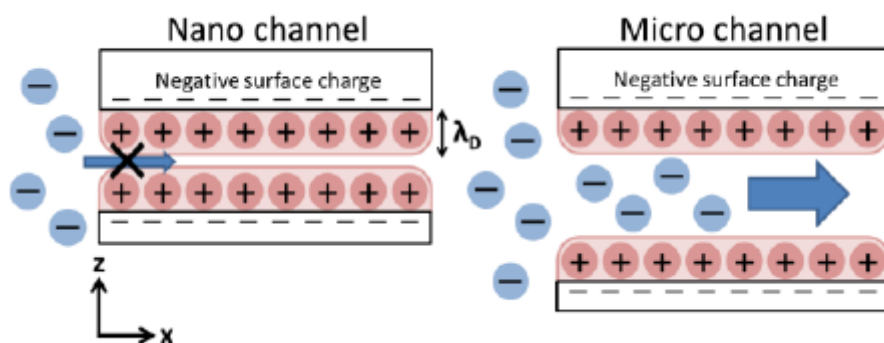


図 4.2 Exclusion-Enrichment Effect (EEE)²⁰⁾

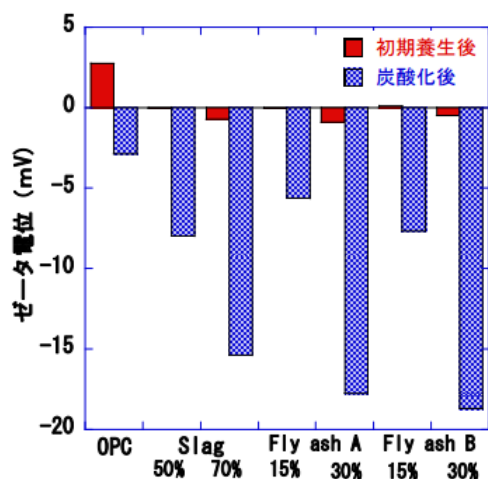


図 4.3 使用材料によるゼータ電位の変化²²⁾

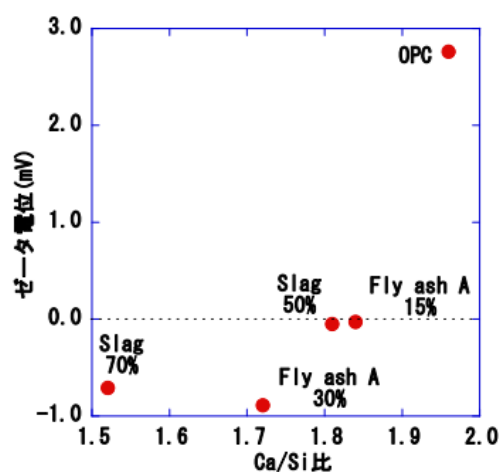


図 4.4 Ca/Si 比とゼータ電位の関係²²⁾

4.5 コンクリート中への塩分浸透の停滞及びその条件

前節までに、移流と拡散が個々に停滞する機構を記したが、実環境では双方の浸透機構によりコンクリート中に塩分が浸透する。そのため、塩分浸透が完全に停滞するためには、移流と拡散の両方が同時に停滞する必要がある。しかし、すべてのコンクリートにおいて塩分浸透が停滞するというのではなく、条件に応じて浸透が停滞するか否かが決定される。したがって、停滞する条件を見極めることが重要であり、本節ではこの条件について前節までの検討を踏まえて考察する。

初めに、移流に関しては、すべてのコンクリートにおいて浸透が停滞するものと思われる。その機構は4.3節で記した。ただし、停滞する深さが条件によって大きく異なってくると考えられる。基本的には水セメント比や養生条件に依存しており、高品質なコンクリートでは移流による浸透は表層から近い位置で停滞するが、品質が低下すると深部まで塩分が浸透する。このため、移流に関してはコンクリートの特性（配合や養生条件）や環境条件により、特に初期の塩分浸透の深さが変化すると考えられる。

したがって、完全に塩分浸透が停滞するかそうでないかは、拡散が停滞するか否かで決定される。拡散による塩分浸透に関しては、4.4節で記したように空隙壁面との電氣的相互作用により停滞するものと考えられる。ここで重要となるのは空隙壁面のゼータ電位であり、このゼータ電位が負の値を有する場合には微小な空隙における拡散による塩分浸透は停滞し得る。このため、ゼータ電位の値を支配する使用材料や置換率が条件として重要となる。

表4.1は図4.4を参考にして作成した拡散が停滞するための条件を記している。

以上より、図4.5に示す様に、実環境では移流と拡散の組み合わせで4通りの塩分浸透挙動が生じていると考えられる。したがって、塩分浸透を完全に停滞させるためには、拡散を停滞させればよいのだが、より浅部で浸透を停滞させるためには移流による浸透を制御する必要がある。そのためには、混和材を適切な置換率で使用し、適切な養生を施す必要がある。

表 4.1 拡散による塩分浸透の停滞条件

使用材料	置換率	ゼータ電位	停滞／継続
普通ポルトランドセメント		正	継続
フライアッシュ	20%未満	正	継続
	20%以上	負	停滞
高炉スラグ微粉末	70%未満	正	継続
	70%以上	負	停滞

実環境における塩分浸透挙動			
【①浅部停滞】	【②浅部継続】	【③深部停滞】	【④深部継続】
<p>表面からの距離</p>	<p>表面からの距離</p>	<p>表面からの距離</p>	<p>表面からの距離</p>
移流浸透 ○浅部で停滞	移流浸透 ○浅部で停滞	移流浸透 ×深部で停滞	移流浸透 ×深部で停滞
拡散浸透 ○停滞	拡散浸透 ×継続	拡散浸透 ○停滞	拡散浸透 ×継続
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 高品質なコンクリートを作製 ✓ 適切な置換率で混和材を使用 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 高品質なコンクリートを作製 ✓ OPC使用 ✓ 混和材低置換率 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 低品質なコンクリートを作製 ✓ 適切な置換率で混和材を使用 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 低品質なコンクリートを作製 ✓ OPC使用 ✓ 混和材低置換率

図 4.5 実環境における塩分浸透挙動

4.6 塩分浸透停滞現象を考慮した塩分浸透算定手法の構築

4.6.1 概説

現在の耐久性照査では、表面塩化物イオン濃度 C_0 と拡散係数 D_a が一定と仮定した上で、Fick の拡散則の解析解に基づきコンクリート中への塩化物イオンの浸透予測がなされている。しかしながら、拡散則に従い拡散現象のみに囚われた議論では、塩分の浸透が停滞する現象を的確に表現することはできない。また、塩分の浸透現象は主に移流により生じていると考えられ、拡散に重きを置いている従来の評価手法から移流を主体にした評価手法への転換の時期に到達していると思われる。

そこで本節では、耐久設計に用いる簡易法として、既に実務において広く用いられている拡散方程式の解析解を用いる評価手法はそのままに、材料や配合条件に応じて拡散係数を変化させることにより、塩分浸透の停滞や継続に対応可能な塩分浸透算定手法を提案する。また、移流と拡散の拡散係数を個々に設定することでそれぞれの浸透停滞を表現することを試みる。そのため、各々の拡散係数から導出されるプロファイルを合算することで移流と拡散の双方の浸透機構に対応することが可能であると考えた。

4.6.2 塩分浸透に関する既存モデル

(1) 示方書における塩化物イオンの拡散予測手法²³⁾

塩化物イオンの浸透予測には式(4.1)に示す示方書式が一般的に用いられる。本予測式は、式(4.2)に示す拡散方程式 (Fick の第 2 法則) を表面塩化物イオン濃度及び拡散係数を一定と仮定して解いた場合の解析解である。

$$C(L, t) = \gamma_{cl} \cdot \left[C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right] + C_i \quad (4.1)$$

ここで、 $C(x, t)$: 深さ x (cm), 時刻 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m³), C_0 : 表面における塩化物イオン濃度(kg/m³), D_{ap} : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm²/年), C_i : 初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³), erf : 誤差関数, γ_{cl} : 予測の精度に関する安全係数である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (4.2)$$

ここで、 C : 液相の塩化物イオン濃度, D_c : 塩化物イオンの拡散係数, x : コンクリート表面からの距離, t : 時間である。対象構造物から採取したコンクリートコア等の試料を用いてコンクリート表層からの塩化物イオン濃度の分布を測定し、式(4.1)を用いて回帰分析することで表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数を算出する。なお、対象構造物の点検結果がない場合は、類似の環境及び構造物における点検結果等に基づく見かけの拡散係数と表面塩化物イオン濃度を用いて式(4.1)により塩分浸透予測を行う。

この様に、現在の示方書式は扱っている塩化物イオンの浸透機構が拡散現象のみとなっているため、本手法を用いた場合、時間の経過とともに確実に塩分が内部へと浸透してしまう。このため、現状としては塩分の浸透が停滞する現象を表現することはできない。

(2) 差分法による拡散係数の算出手法¹⁵⁾

高橋らは、構造物が施工されてから調査時点までの拡散係数を算出するのではなく、各調査時点間の見かけの拡散係数の平均値を、差分法を用いた繰返し計算により算出する手法を提案している。図 4.6 に実際の計算結果を示す。図を見ると、拡散係数が極めて 0 に近い値を示しており、塩化物イオンの浸透が概ね停滞していることを表現できている。

以上より、対象構造物の点検結果が複数材齢ある場合には、施工されてからではなく前回調査時との材齢間において上記した差分法により見かけの拡散係数を算出することで、より実現象に近い値を得ることができると思われる。

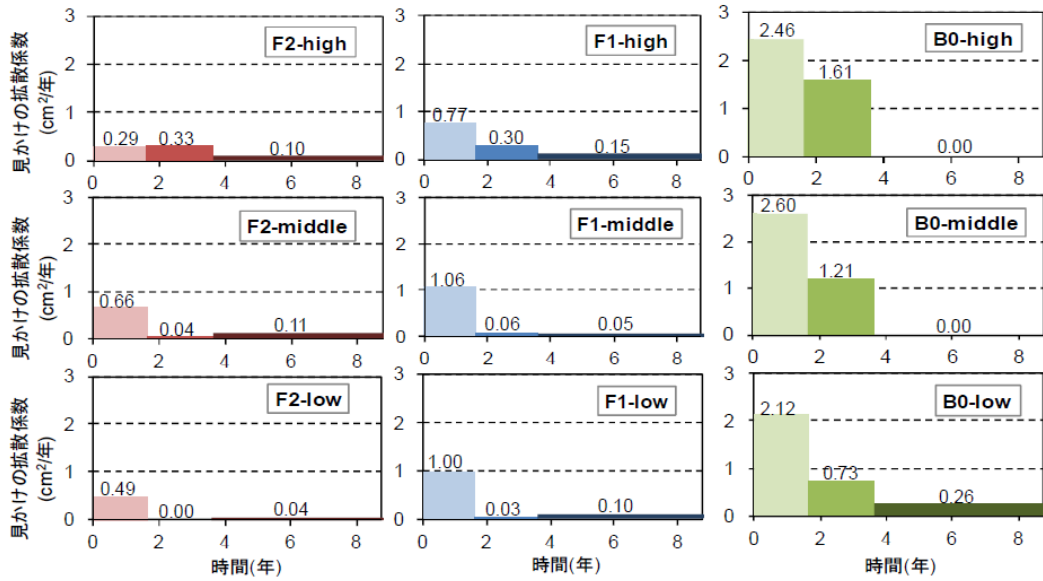


図 4.6 差分法による見かけの拡散係数の算出結果¹⁵⁾

(3) 水分移動を考慮した塩化物イオン浸透モデル⁵⁾

小池らは、塩化物イオンの浸透モデルとして、移流と拡散双方の浸透を考慮した移流拡散モデルを提案している。モデルは塩化物イオンの浸透を式(4.3)に示す移流拡散方程式として表しており、塩化物イオン浸透試験の差分解析を行いモデルの妥当性を検討している。

$$\frac{dC}{dt} = D_c \cdot \frac{d^2C}{dx^2} - v_w \cdot \frac{dC}{dx} \quad (4.3)$$

ここで、 C : コンクリート中の塩化物イオン量(kg/m³), D_c : 見かけの拡散係数(cm²/day), v_w : 液状水の移動速度(cm/day), t : 時間(day), x : 距離(cm)である。さらに、各種解析パラメータは以下式(4.4)から式(4.11)から算出される。

$$D_{ap} = at^{-b} \quad (4.4)$$

$$a = 2.0 \times 10^{-4} \cdot V_{cap}^{-2.1} \quad (4.5)$$

$$b = 7.0 \times 10^{-5} \cdot V_{cap}^{-2.5} \quad (4.6)$$

$$X_{ap} = \alpha[1 - \exp(-\beta \cdot t)] \quad (4.7)$$

$$\alpha = 1.1 \times 10^2 \cdot V_{cap} - 22.8 \quad (4.8)$$

$$\beta = 2.0 \times 10^{-7} \cdot V_{cap}^{-3.9} \quad (4.9)$$

$$v_w = \alpha\beta \cdot \exp(-\beta \cdot t) \quad (4.10)$$

$$C_0 = C_{0ini} + k_1[1 - \exp(-k_2 t)] \quad (4.11)$$

ここで、 D_{ap} ：見かけの拡散係数(cm^2/day)、 V_{cp} ：連続空隙量(ml/g)、 a 、 b ：実験係数、 X_{cap} ：液状水の移動位置(cm)、 α 、 β ：実験係数、 C_0 ：表面塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_{0mi} ：塩水濃度の表面塩化物イオン濃度への換算値(kg/m^3)、 k_1 、 k_2 ：実験係数である。図 4.7 は実際に小池らが行った実験の結果と解析値を比較した結果である。図を見ると、水分移動に伴う塩化物イオンの浸透を概ね捉えていることが分かる。このことから、移流による塩分浸透を考慮する場合、移流拡散方程式を使用することは極めて有用であると思われる。ただし、本検討は絶乾状態における塩分浸透に対して行われた検討であり、拡散現象が生じる場合に同様の精度で再現できるかは明示されていない。

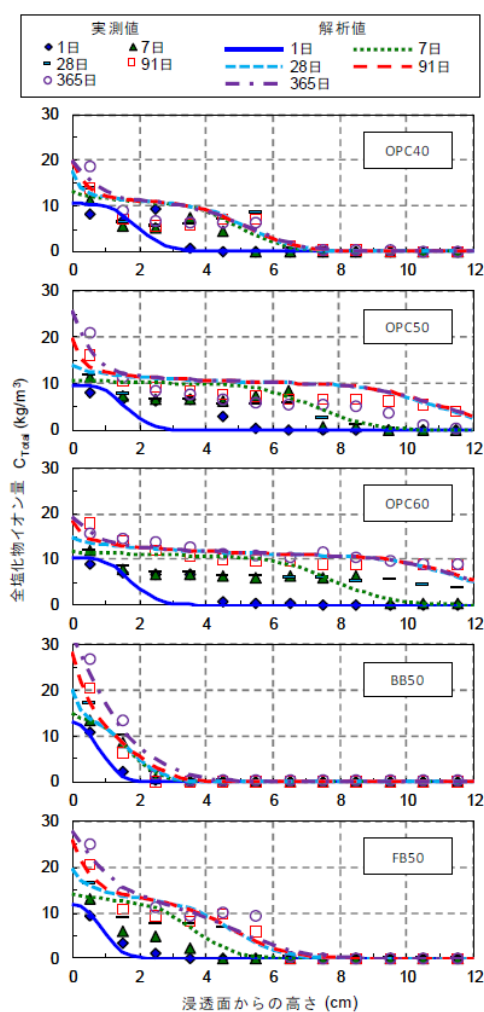


図 4.7 差分法による見かけの拡散係数の算出結果⁵⁾

4.6.3 移流と拡散双方の停滞を表現する塩分浸透簡易算定手法に関する検討

本検討で構築する塩分浸透簡易算定手法は、拡散による塩分浸透に加えて、もう一つの主な浸透機構である移流も同時に考慮する。本検討で構築する手法では、移流と拡散の浸透現象を表現するにあたり、これら二つの浸透を個々に評価する。本手法の算定プロセスを図4.8に示す。まず、液状水の浸透が停滞する深さと停滞に要する時間を算出し、液状水の浸透が停滞する際のコンクリート内における液状水の浸透分布を算出する。この際、液状水の浸透停滞深さのばらつきを考慮するために累積分布関数を用いて液状水浸透分布式を導出する。そして、移流により浸透した塩分量に関しては、便宜的に拡散方程式の解析解を用いて表現し、停滞深さのばらつきを考慮するために塩分量に対して液状水浸透分布式を乗じることによって移流による塩分浸透分布を算定する。また、先に求めた液状水の浸透が停滞する時間において、移流による浸透が停止すると仮定することで、移流の停滞現象を表現した。拡散により浸透した塩分の浸透分布に関しては、混和材の置換率の概念を導入し、既往の研究を参考にして導出した置換率係数を用いて拡散の停滞現象を表現する。最終的に、移流と拡散双方の塩分浸透を足し合わせることで、移流と拡散を考慮した塩分浸透分布を算定した。以下に算定方法の詳細を示す。

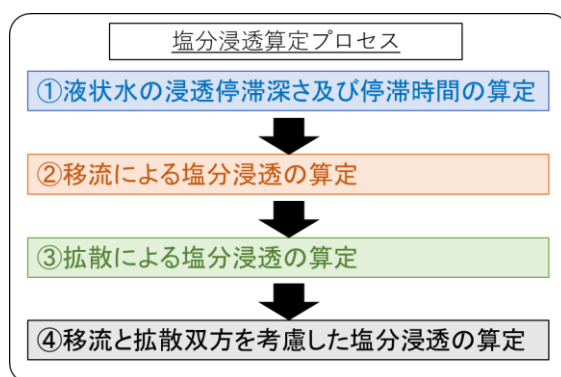


図 4.8 提案する塩分浸透簡易算定手法の算定プロセス

4.6.3.1 液状水浸透停滞深さ及び浸透停滞時間の算定

まず初めに、移流により浸透した液状水の浸透停滞深さと停滞に要する時間を算定する。一般に、コンクリート中への液状水の浸透は式(4.12)に示す Washburn の式を用いて表現される。

$$L = \sqrt{\frac{r\gamma\cos\theta}{2\mu} \cdot t} \quad (4.12)$$

ここで、 L ：浸透距離， γ ：表面張力， θ ：接触角， μ ：粘性係数， t ：時間である。本式は、液

状水浸透の駆動力を式(4.13)で表現される毛管張力, 浸透に対する抵抗力を式(4.14)の Hagen-Poiseuille の式で表される粘性摩擦力として, 両者のつり合いを取ることで導出される。

$$\Delta P = \frac{2\gamma\cos\theta}{r} \quad (4.13)$$

ここで, ΔP : 毛管張力, γ : 表面張力, θ : 接触角, r : 管半径である。

$$\Delta P = \frac{8\mu LV}{r^2} \quad (4.14)$$

ここで, ΔP : 圧力損失, μ : 粘性係数, L : 液状水浸透距離, V : 浸透速度である。式(4.12)から求まる液状水浸透距離 L は浸透時間 t の平方根に比例していることが分かる。このため, Washburn の式では, 液状水の浸透がある時間で停滞する現象を表現することはできない。

前章において, 微小空隙中の液状水は, バルクにおけるレオロジー挙動とは大きく異なり, 降伏値を有するビンガム流体的な挙動を示すことを確認した。そこで本検討では, 便宜的に液状水の浸透がある速度以下になると停止するものと仮定して, 式(4.13)と式(4.14)の関係から式(4.15), (4.16)を導出し, これらの式を用いて液状水の浸透停滞深さと停滞に要する時間を算出することにした。

$$L_{mean} = \frac{\gamma\cos\theta}{4\mu} \times \frac{r}{V_{lim}} \quad (4.15)$$

$$t_{lim} = \frac{2\mu}{\gamma r \cos\theta} \cdot L_{mean}^2 \quad (4.16)$$

ここで, L_{mean} : 液状水浸透停滞深さ, V_{lim} : 浸透停滞速度, t_{lim} : 浸透停滞時間である。なお, 式中の細孔径 r は式(4.17)を用いて便宜的に算出し, この細孔径 r が水セメント比や使用材料, 養生条件により変化することで, 液状水の浸透停滞深さや時間も変化する。

$$r = 500 \times W/C \times \beta \times \omega \quad (4.17)$$

ここで, W/C : 水セメント比, β : 養生係数, ω : 混和材係数である。本研究では, 養生係数 β は気中養生で 5.0, 封緘養生で 2.0, 水中養生で 1.0 と設定した。また, 混和材係数 ω は, 普通セメントを使用した場合は 1.0, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末を混和した場合は 0.5 とした。

次に, 液状水の浸透が停滞する際のコンクリート内の液状水の浸透分布を算出する。液状

水の浸透が停滞する深さは、**図 4.9** に示すように、深さ方向に一定ではなくばらつきを有している²⁴⁾。そこで、液状水の浸透が停滞する深さを**図 4.10** に示すように正規分布で表せるものと考え、式(4.15)で求めた L_{mean} を液状水の浸透が停滞する深さの平均値と設定し、式(4.18)に示す累積分布関数を応用した式を用いて液状水の浸透分布を算出する。

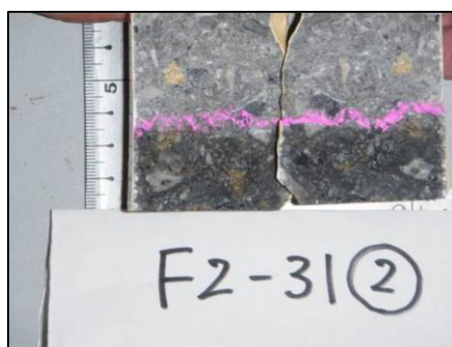


図 4.9 液状水浸透深さのばらつき²⁴⁾

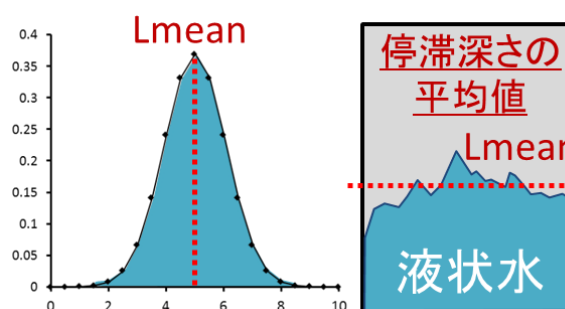


図 4.10 停滞深さの正規分布

$$W(L) = 1 - \int_{-\infty}^L \frac{1}{\sqrt{2\pi}s_d^2} \exp\left(-\frac{(t - L_{mean})^2}{2s_d^2}\right) dt \quad (4.18)$$

ここで、 W : 深さ L における移流による液状水の浸透確率、 L : 表面からの距離、 t : 確率変数、 s_d : 標準偏差である。なお、ばらつきを示す標準偏差は、式(4.19)から式(4.21)に示す Islam et al.により実験的に求められた式²⁵⁾を用いて算出する。

$$OPC : s_d = 0.175 \times L_{mean} \quad (4.19)$$

$$FA : s_d = 0.216 \times L_{mean} \quad (4.20)$$

$$BFS : s_d = 0.375 \times L_{mean} \quad (4.21)$$

ここで、 s_d : 標準偏差である。式(4.18)を用いて導出した液状水浸透分布の一例を**図 4.11** に示す。

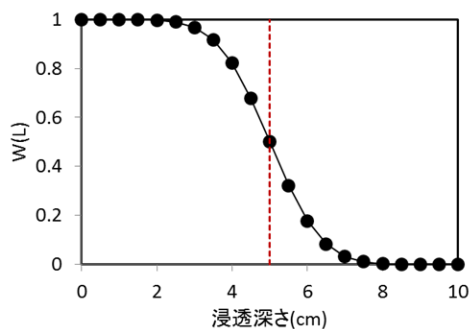


図 4.11 導出した液状水浸透分布の一例

4.6.3.2 移流による塩分浸透の算定手法

移流により浸透した塩分量は便宜的ではあるが、拡散方程式の解析解を用いて表現する。式(4.22)は移流による浸透が支配的な空隙において停滞深さまで塩分が完全に浸透した場合を表現するものである。ここで、移流は太径の空隙を支配的に浸透するものと考え、移流が支配的な空隙の割合、すなわち全空隙における太径の割合を乗じている。

$$C_{ad}(L, t) = \varphi_{ad} \cdot \left\{ \gamma_{cl} \cdot \left[C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{L}{2\sqrt{D_{ad} \cdot t}} \right) \right] \right\} \quad (4.22)$$

ここで、 $C_{ad}(L, t)$ ：深さ L 、時間 t における移流により浸透した塩分量、 φ_{ad} ：移流が支配的になる空隙の割合(本検討では 0.8 に設定)、 C_0 ：表面塩化物イオン濃度、 D_{ad} ：移流による浸透を表現するための塩化物イオンの等価拡散係数、 γ_{cl} ：予測の精度に関する安全係数(1.0)である。上式のみを用いた場合でも移流による塩分浸透を便宜的に算定することが可能であるが、前述したように浸透が停滞する深さはばらつきを有しており、移流による浸透が生じるすべての空隙に塩分が完全に浸透する可能性は低い。そこで、式(4.18)から求まる液状水の浸透分布を式(4.22)に乗じることで停滞深さのばらつきを考慮する。よって、移流による塩分浸透の算定式は式(4.23)となる。

$$C'_{ad}(L, t) = C_{ad}(L, t) \cdot W(L) \quad (4.23)$$

ここで、 $C'_{ad}(L, t)$ ：深さ L 、時間 t における移流により浸透した修正塩分量である。なお、移流による浸透は、式(4.16)で得られる浸透限界時間 t_{lim} に達した段階で停滞すると仮定し、 t_{lim} 以降は停滞時の塩分浸透分布を常に保持するものとした。これにより、移流による浸透が停滞することを表現した。

4.6.3.3 拡散による塩分浸透の算定手法

拡散による塩分浸透は、前章で述べたように、極微小な空隙において空隙壁面のゼータ電位が負の値を有する場合に停滞するものと思われる。したがって、拡散の停滞はゼータ電位、すなわち混和材の置換率に強く依存している。以上を踏まえて本手法では、拡散による塩分浸透は式(4.25)を用いて算定する。本式は従来の示方書式を基本としているが、混和材の置換率の概念を導入するため、式(4.26)に示した置換率係数 R を拡散係数に乗じている。さらに、拡散による浸透は、細径の空隙において生じるものと考え、全空隙における細径の割合を乗じている。

$$C'_{dif}(L, t) = \varphi_{dif} \cdot \left\{ \gamma_{cl} \cdot \left[C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{L}{2\sqrt{D_{dif} \cdot R \cdot t}} \right) \right] \right\} \quad (4.24)$$

ここで、 $C'_{dif}(L,t)$: 時間 t , 深さ L における拡散により浸透した塩分量, D_{dif} : 拡散による浸透を表現する塩化物イオンの拡散係数, R : 置換率係数, φ_{dif} : 拡散が支配的になる空隙の割合(本研究では 0.2 に設定)である.

$$R = 1 - \int_{-\infty}^P \frac{1}{\sqrt{2\pi s_d^2}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2s_d^2}\right) dt \quad (4.25)$$

ここで、 P : 置換率, t : 確率変数, μ : 平均(本検討では, FA=15, BFS=50 に設定した), s_d : 標準偏差(本検討では, FA=2.5, BFS=10 に設定した)である. 図 4.12 は置換率と置換率係数の関係を示している. 置換率に応じて置換率係数が変化の様になっており, 例えばフライアッシュの置換率が 20%であれば, $R=0.02$ となる. 値の設定は表 4.1 に示した置換率とゼータ電位の関係を参考にした. ここで, 式(4.24)では, 置換率係数 R は拡散係数 D_{dif} に乗じるため, 混和材の置換率が高くなるほど拡散による塩分の浸透は遅くなる. したがって, 混和材を高置換率で用いた場合, 拡散による浸透は限りなく遅くなり, 停滞しているように見える. 以上のように, 混和材の置換率の概念を導入することで拡散による浸透の停滞を表現した.

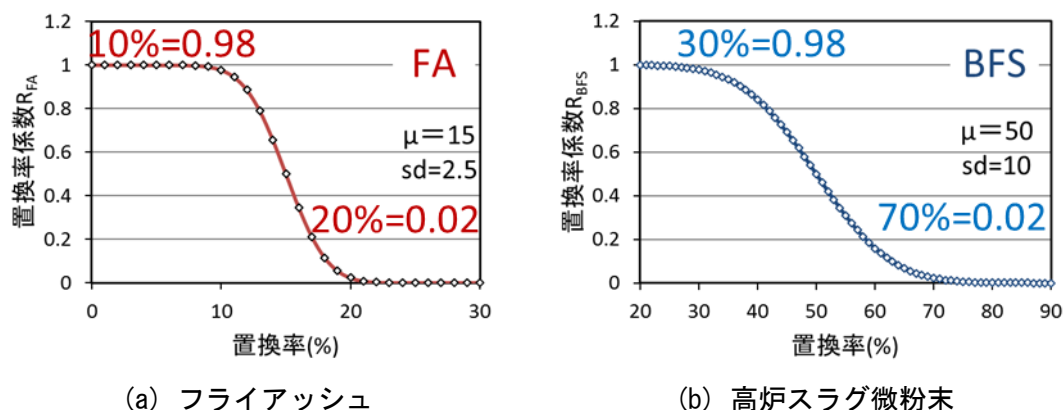


図 4.12 混和材置換率と置換率係数の関係

4.6.3.4 試験結果と解析結果の比較

最終的に, 式(4.23)及び式(4.24)を足し合わせることで移流と拡散双方の停滞現象を考慮した塩分浸透分布を算定する(式(4.26)). 本節では, 第 2 章で実施した室内塩水浸せき試験の結果及び既往の研究で報告されている分析結果と算定手法から得られる解析値を比較し, 構築した算定手法の妥当性を検証する. まず, 第 2 章で実施した試験結果と解析結果を比較する. 図 4.13 及び図 4.14 に実験結果と解析結果の比較を示す. また, 表 4.2 及び表 4.3 に「FA50S-養生のみ」及び「BB50S-養生のみ」の解析に用いたパラメータを示す. 図を見ると, プロットで示した実験結果を実線で示した解析結果が概ね良好に対応していることが分かる. 次に, 高橋ら¹⁵⁾が実施した塩分分析の結果と解析結果の比較を図 4.14 に示す. 本

結果は塩分の浸透が停滞している条件であるが、解析結果を見ると分析結果を概ね再現できていることが分かる。よって、構築した簡易算定手法を用いることで塩分浸透停滞現象を表現可能であることを確認した。ただし、普通セメントのみを使用した B0 シリーズに関しては、実験結果、解析結果ともに塩分浸透が停滞しているように見受けられるが、解析では浸透は停滞していない。そのため、より長い材齢で解析を実施した場合、浸透先端部が前進するような結果が得られる。

以上より、本検討で構築した簡易算定手法の妥当性を確認するためにも、より長期の材齢に対する実験結果と比較し、実際に塩分浸透が継続しているかを確認する必要があるものと思われる。さらに、拡散係数や表面塩化物イオン濃度を配合や養生条件、環境条件によって表現する式を構築する必要がある。本検討では、塩分浸透停滞現象を表現可能な塩分浸透簡易算定手法の枠組みを構築したものと考えており、今後は上記した課題も含めて耐久設計への適用を目指して検討を進めていきたい。

$$C'_{ad}(L, t) = C_{ad}(L, t) \cdot W(L) \quad (4.26)$$

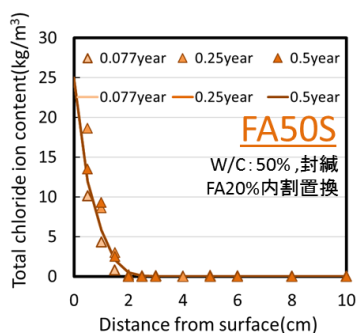
ここで、 $C(x, t)$ ：移流と拡散による浸透を考慮した時刻 t 、深さ x における塩分量である。

表 4.2 解析パラメータ (FA50S-養生のみ)

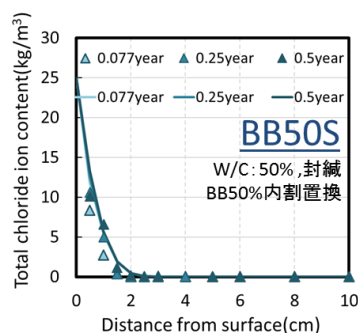
W/B	β	ω	γ	μ	Θ
50	2.0	0.5	0.073	10	60
P	C0	D_{ad}	D_{ad}	φ_{ad}	φ_{dif}
20	25	12.5	0.05	0.8	0.2

表 4.3 解析パラメータ (BB50S-養生のみ)

W/B	B	ω	γ	μ	Θ
50	2.0	0.5	0.073	10	60
P	C0	D_{ad}	D_{ad}	φ_{ad}	φ_{dif}
50	25	12.5	0.05	0.8	0.2



(a) FA50S-養生のみ



(b) BB50S-養生のみ

図 4.13 試験結果(混和材シリーズ)と解析結果の比較

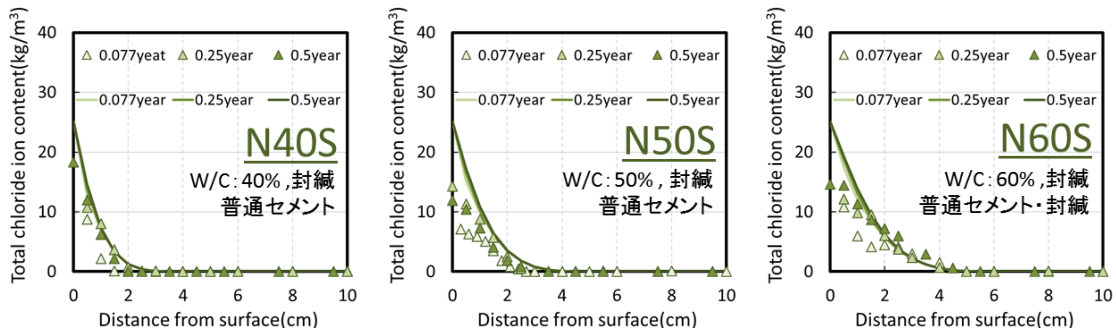


図 4.14 試験結果(普通セメントシリーズ)と解析結果の比較

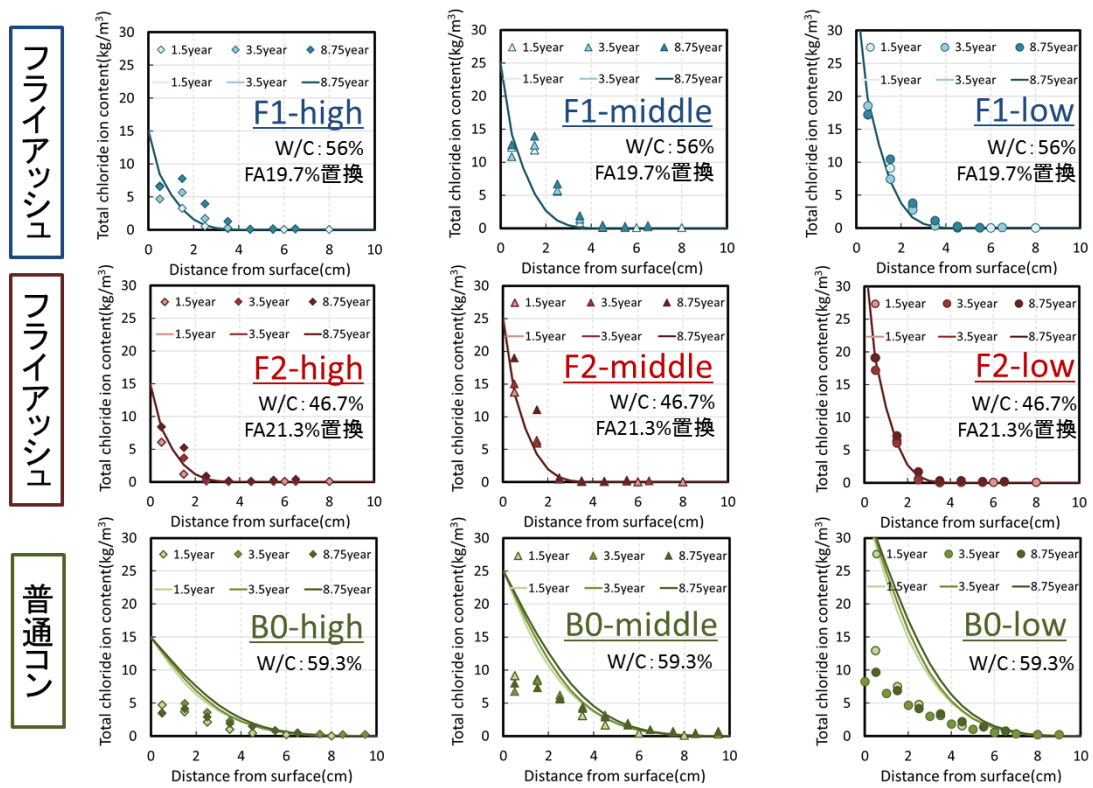


図 4.15 既往文献の分析結果¹⁵⁾と解析結果の比較

4.7 まとめ

本章では、まず塩分浸透に影響を与える要因について既往の研究を踏まえて論じた。気中、封緘養生を施したコンクリートは、養生により程度は異なるがコンクリート内部が不飽和湿潤状態にあるため、移流による塩分浸透が支配的になる。しかし、水中養生を施した場合、養生後のコンクリート内部は極めて湿潤な状態にあるため、拡散による浸透が支配的になる。このため、質の高い養生を施すことでコンクリートの品質も向上するが、特に実環境で生じている現象を室内試験において議論する際は、養生条件により塩分浸透機構が大きく変化することを留意する必要があると思われる。また、品質の良いコンクリート、例えば混和材を用いたコンクリートでは、環境条件、特に表面塩化物イオン濃度に依存しない塩分浸透挙動を示す可能性があることを示した。

次に、移流及び拡散の停滞機構を本研究で得られた結果と既往の知見を踏まえて整理した。移流に関しては、**第2章**及び**第3章**で得られた結果を踏まえて、空隙が交差する部分に気泡が存在することで浸透が大幅に抑制され、最低限流れに必要な力が降伏値を下回ることによって停滞する可能性があると考えた。拡散に関しては、既往の知見より、混和材を高置換率で用いることで空隙壁面のゼータ電位が負の値を示し、極微小な空隙内においては空隙壁面との電気的相互作用により拡散による浸透が停滞する可能性があることを示した。移流による浸透はコンクリートの品質によって浸透深さが変化するものの、必ず上記した機構により停滞するものと推察している。そのため、塩分浸透が停滞するかどうかは、拡散が停滞するか否かで決まると考える。また、混和材を適切な置換率で用いて適切な養生を施すことで、浅部において塩分浸透を停滞させることが可能であると思われる。

最後に、移流と拡散の塩分浸透を個々に評価することで、塩分浸透停滞現象を評価可能な塩分浸透簡易算定手法の枠組みの構築を試みた。本検討で構築した手法では、移流と拡散を個々に評価するため、移流は液状水の浸透停滞深さと停滞時間に加えて停滞深さのばらつきを考慮する液状水浸透分布式を、拡散は混和材の置換率の概念を導入した置換率係数を導入することで、移流と拡散それぞれの停滞を表現した。最終的に、既往の文献で報告されている塩分分析の結果と構築した算定手法から求めた解析結果を比較したところ、浸透が停滞している条件を概ね良好に再現できることを確認した。以上より、塩分浸透停滞現象を表現可能な塩分浸透簡易算定手法の枠組みを構築することができたが、今後、より精度の高い浸透予測を可能とするために、表面塩化物イオン濃度や拡散係数を配合や養生条件、環境条件によって表現する式の構築を試みる。

第4章の参考文献

- 1) (社)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2012
- 2) 張金喜，藤原忠司，西城能利雄，阿部哲：各種配合のコンクリートの塩分環境下における耐凍害性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.625-630，2001
- 3) 村上祐治，山下英俊，鈴木篤，大津正康：コンクリートの塩分浸透における乾燥及び微細構造の影響，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.14，No.1，pp.831-836，1992
- 4) 志村雅仁，岸利治，鎌田知久：コンクリートへの塩分浸透に支配的な影響を与える停滞限様に関する実験的検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp.478-483，2015
- 5) 小池賢太郎，山口明伸，武若耕司，福重耕平：水分移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデルに関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.843-848，2016
- 6) 笹谷輝彦，鳥居和之，佐藤健一，川村満紀：海洋環境下におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究，土木学会論文集，No.571/V-36，pp.91-104，1997
- 7) 小柳翔平，高橋佑弥，石田哲也：高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを混和したセメント硬化体の材料物性・塩分浸透性状の経時変化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.109-114，2015
- 8) 佐藤道生，蓮見亮，皆川浩，久田真：フライアッシュの混和によるコンクリートの遮煙性能の向上について，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.67，No.2，pp.309-321，2011
- 9) 真島耕平，川原真一，菊池道生，佐伯竜彦：高炉スラグ微粉末およびシリカヒュームを用いたセメント系硬化体の塩分浸透抵抗性，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.452-459，2012
- 10) 伊代田岳史，小宮山祐人：異なる塩分濃度における浸漬試験での各種混和材の塩分固定化性能比較，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp.470-477，2015
- 11) 川村満紀，鳥居和之，五十嵐心一，藤井剛：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおける養生条件の塩素イオン透過性に及ぼす影響，材料，Vol.38，No.431，pp.953-958，1989
- 12) 品田健太，佐伯竜彦：混和材を用いたモルタルの塩化物イオン拡散性状と内部組織，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.697-702，2005
- 13) 宮原茂禎，丸屋剛，石田哲也：セメントおよび混和材の種類が塩素の固定に与える影響，大成建設技術センター報，第39号，pp.24-2-24-9，2006
- 14) 佐々木章，竹内直也，岸利治，蔵重勲：混和材を使用したコンクリート護岸から採取したコアを用いた塩分浸透停滞に関する研究，土木学会第67回年次学術講演会講演概要集，第V部，pp.171-172，2012
- 15) 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

- 16) 北森武彦, 庄子習一, 馬場嘉信, 藤田博之: マイクロ化学チップの技術と応用, 丸善株式会社, 2004
- 17) 酒井雄也, 岸利治, 中村兆治: サイズオーダーの異なる空隙への液状水浸入に関する数値解析的検討, 第66回セメント技術大会講演要旨, pp.106-107, 2012
- 18) 後藤誠史, 茂啓二郎, 高木達雄, 大門正機: セメント硬化体の細孔径分布とイオン拡散, セメント技術年報, Vol.36, pp.49-52, 1982
- 19) 高橋佑弥, 石田哲也, 岸利治: 低水セメント比領域に着目したコンクリート中の塩分浸透および液状水移動に関する熱力学連成解析の高度化, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.796-801, 2012
- 20) 中村兆治, 酒井雄也, 岸利治: コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学的実験による検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.842-846, 2013
- 21) 名和豊春ほか: C3A および C4AF への高性能減水剤に及ぼす pH の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.44, pp.80-85, 1990
- 22) 松永正吾, 佐々木謙二, 星野裕美, 佐伯竜彦: セメント系硬化体のゼータ電位に関する基礎的研究, 第26回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2008
- 23) (社)土木学会: 2013年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], 2013
- 24) Md. Shafiqul ISLAM, Toshiharu Kishi: Proposal of Analysis Methods Beased on Stagnation of Chloride Ion in Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.374-382, 2013
- 25) Md. Shafiqul ISLAM: Stagnation of Liquid Water/ Chloride Ion Penetration in Concrete and Application of the Knowledge to Durability Design and LCCA, Doctoral thesis at University of Tokyo, 2011

第 5 章

結論

本研究では、コンクリート中への塩分浸透が停滞する現象に関して、特に移流による塩分浸透の停滞機構を解明すること、ならびに本現象を表現可能な塩分浸透算定手法を構築することを主眼に検討を実施した。本章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文の結論とする。

第 1 章では、本研究の背景、目的、既往の研究及び本論文の構成について述べた。塩分浸透停滞現象の機構を解明するためには、移流と拡散双方の停滞機構を論じる必要がある。しかし、これまでは、拡散を主体にした議論が多く、移流に関する知見が十分に蓄積されているとは言い難い。そこで本論文では、既往の研究を踏まえて、コンクリートの含水状態及び空隙構造に着目し、これらが塩分浸透挙動及び塩分浸透停滞現象に与える影響を明らかにすることを第一の目的とした。そして、得られた条件を基に、種々の試験を実施し、移流が停滞する機構を解明することを第二の目的とした。最後に、拡散の停滞機構に関する既往の知見と合わせて、移流と拡散双方の停滞機構から塩分浸透停滞現象について論じた上で、停滞現象を考慮可能な塩分浸透簡易算定手法の枠組みを構築することを第三の目的とした。

第 2 章では、コンクリートの含水状態及び空隙構造が塩分浸透挙動及び停滞現象に与える影響を明らかにすることを目的に、室内塩水浸せき試験、塩分分析、空隙構造分析、水分保有率測定を実施した。本検討では、種々の材料を用いたコンクリート供試体を作製し、養生後に乾燥過程や吸水・吸湿過程を施すことで含水状態や空隙構造を意図的に変化させた供試体を使用した。空隙構造や水分保有率の測定は塩水浸せき試験直前の供試体を対象に実施し、塩水浸せき後 28 日、91 日、182 日が経過した供試体から塩分分析を実施した。結果として、水セメント比が低い程、また封緘養生を施すことで極めて高い塩分浸透抵抗性を示すことを確認した。特に混和材を用いた供試体では、早期の段階で浅部において塩分浸透

が停滞した。一方、乾燥を施した供試体では、乾燥温度が高い程塩分がより深部へと浸透していた。空隙構造と水分保有率の結果に着目すると、乾燥を経験することで空隙構造の粗大化や水分保有率の低下が認められた。このため、空隙構造の粗大化や水分保有率の低下に伴い塩分浸透抵抗性は低下するものと思われる。しかしながら、105°C乾燥を施した供試体において、塩分浸透が深部で停滞していたことから、空隙構造や含水状態は塩分浸透深さに影響を与える要因ではあるものの、塩分浸透停滞現象を支配する要因ではないことが示唆された。さらに、乾燥後に水分を再供給した供試体では、空隙構造や水分保有率が養生のみを施した供試体と同程度まで回復していたにも拘わらず、乾燥後の供試体と比較して、塩分がより深部まで浸透しており、塩分浸透抵抗性の低下が確認された。養生後に残存している水分と乾燥後に意図的に外部から供給した水分では、存在位置や状態が異なるものと思われる。このため、空隙構造が密で不飽和湿潤状態にあるだけでは塩分の浸透は抑制されず、空隙内における水分の存在位置や状態が塩分浸透挙動に強く影響を与えていることが示唆された。

以上より、空隙構造や含水状態は塩分浸透深さには影響を与えているものの、塩分浸透停滞現象を支配する要因ではないことを明らかにした。また、空隙内における水分の存在位置や状態が塩分浸透挙動を理解するための重要な要因であることが示唆された。

第3章では、前章の結果を踏まえて、空隙の形状や空隙内に存在する水分が移流に起因する液状水の浸透に与える影響を明確にし、移流の停滞現象の支配要因を解明することを目的に検討を実施した。まず、空隙の形状や水分の存在位置が液状水の浸透に与える影響について検討するため、マイクロテクノロジー分野で用いられるガラス製マイクロ流路を作製し、液状水浸透試験を実施した。結果として、直線流路や直線流路中にインクボトル部を有する流路では、流路内の液状水の有無に依らず急激な移流により液状水が浸透するのを確認した。一方で、主経路となる直線流路と交差する形でデッドエンドのインクボトル部を有する流路では、交差部に気泡が存在する様に液状水を配置した結果、液状水の浸透が停滞している様な挙動が見受けられた。流路内に着目すると、流路の交差部に存在する気泡が液状水の浸透を抑制していることを確認した。また、内部に液状水を配置していない、すなわち乾燥している状態においても、壁面インクボトルのサイズが大きい場合、液状水が浸透した後に主経路と交差する部分に気泡が形成されることを確認した。したがって、絶乾状態においては内部まで液状水が浸透した後に気泡による抑制が表れるのではないかと考えられる。以上より、空隙内、特に主経路とデッドエンド空隙の交差部に存在する気泡が移流による液状水の浸透を大幅に抑制している可能性が示唆された。

次に、気泡による抑制機構がセメント硬化体においても生じていることを確認することを目的に、溶存空気量を変化させた浸せき水を用いた塩水浸せき試験を実施した。脱気水を用いることで空隙内に存在する気泡が脱気水中に溶解込み、気泡による抑制効果が作用しないのではないかと考えた。結果として、水道水と脱気水では吸水量に顕著な差が見られ、

セメント硬化体においても空隙内に存在する気泡の影響が極めて大きいことを明らかにした。しかし、溶存空気量が増加することで液状水の粘度などのレオロジー特性が変化している可能性が考えられた。そこで、脱気水と水道水を対象にレオメーターを用いたレオロジー測定を実施した。本検討では、平行プレートを用いて間隙幅を 50, 100 μm に設定して試験を行った。結果として、間隙幅に関係なく水道水と脱気水でレオロジー特性の変化は認められなかった。したがって、セメント硬化体で確認した吸水量の差異は、水道水と脱気水のレオロジー特性の差異ではなく、溶存空気量の差異に起因していることを明らかにした。さらに、せん断応力-せん断速度関係において、低せん断速度領域を拡大してみると、僅かではあるが y 切片を有していることを確認した。また、間隙幅が小さくなると y 切片の値はより大きくなっていく。このことから、微小空隙中においては、液状水はニュートン流体ではなく降伏値を有するビンガム流体的な挙動を示すことが確認された。これは、間隙幅が小さくなるにつれて、液体の挙動がビンガム流体に近づいていくという既往の知見と一致しており、本試験においても僅かではあるが同様の現象が確認されたと考えられる。

以上より、移流による塩分浸透は、空隙内、特に主経路とデッドエンド空隙の交差部に存在する気泡により液状水の浸透が大幅に抑制され、浸透が継続するために最低限必要な流れのせん断応力が降伏値を下回ることで停滞する可能性があることを明らかにした。

第 4 章では、既往の研究を踏まえて、塩分浸透に影響を与える諸要因について論じた上で、移流の停滞機構に関しては前章までの結果を踏まえて再考し、拡散の停滞機構については既往の知見を基に論じた。最後には、塩分浸透停滞現象を考慮可能な塩分浸透簡易算定手法の枠組みの構築を試みた。

移流の停滞機構に関しては、前章までの検討から、主経路とデッドエンド空隙が交差する部分に存在する気泡により浸透が大幅に抑制され、最終的に最低限必要な流れのせん断応力が降伏値を下回ることで停滞する可能性があることを考察した。拡散に関しては、既往の知見を整理し、空隙壁面のゼータ電位が負の値を有する場合、極微小な空隙では空隙壁面との電気的相互作用により塩化物イオンの拡散が大幅に抑制され、停滞する可能性があることを示した。塩分浸透停滞現象は、移流と拡散双方が停滞することで生じるのだが、移流に関しては、コンクリートの品質によって浸透深さは変化するものの、上記の機構により必ず停滞するものと考えている。このため、塩分浸透が完全に停滞するには拡散が停滞するか否かに左右されるものと思われる。拡散が停滞するか否かは空隙壁面のゼータ電位に依存しているが、これは、混和材の置換率に依存していると言い換えることができる。このことから、混和材を適切な置換率で使用し、適切な養生を施すことで塩分浸透は浅部で停滞するものと推察される。しかし、混和材を使用しない場合や低置換率で使用した場合には、移流が停滞しても拡散は継続する。したがって、実環境における塩分浸透現象は、移流が浅部もしくは深部で停滞する 2 通り、拡散が停滞もしくは継続する 2 通りで 2×2 の 4 通りの浸透パターンが存在するものと考えられる。以上より、塩分浸透停滞現象は移流と拡散が上記した機

構により停滞することで生じ、これは各種条件を満たすことで意図的に生じさせることができるものと思われる。

最後に、塩分浸透停滞現象を考慮可能な塩分浸透簡易算定手法に関する検討を実施した。本手法では、移流と拡散を個々に評価することで各々の停滞機構を考慮することを試みた。まず、液状水の浸透がある速度以下になると停滞するという仮定を設け、Washburnの式を基に液状水の浸透が停滞する深さと時間を算出する式を導出した。さらに、液状水の浸透停滞深さのばらつきを考慮するため、液状水の停滞深さが正規分布形であると仮定して、累積分布関数を応用して液状水浸透分布式を導出した。移流により浸透した塩分量は便宜的に拡散方程式の解析解を用いて表現し、停滞深さのばらつきを考慮するため、液状水浸透分布式を乗じることで移流による塩分浸透を算定する式を構築した。この際、移流の浸透は液状水の浸透が停滞した時点からは進行しないものと考え、以降は塩分浸透分布が変化しないと仮定することで移流による浸透が停滞することを表現した。さらに、拡散に関しては、従来の示方書式をベースにしているが、拡散係数に本検討で構築した混和材の置換率を考慮する置換率係数を乗じることで混和材の置換率の概念を導入した。この置換率係数は、混和材の置換率により変動し、高置換した場合には拡散が停滞する状況を表現できるようにした。最後に、既往の文献で報告されている分析結果を対象に解析を実施したところ、構築した算定手法を用いることで塩分浸透停滞現象を表現できることを確認した。

以上より、塩分浸透停滞現象を表現可能な塩分浸透簡易算定手法の枠組みを構築することができたものと思われる。今後は耐久設計に適用することを目指して各種パラメータの妥当性の検証など、詳細な検討を進めていく予定である。

第5章は本章であり、結論としてこれまでの章を総括し、得られた成果について述べた。

謝辞

本論文を審査していただきました、主査 岸利治博士(東京大学生産技術研究所教授)、副査 前川宏一博士(東京大学大学院工学系研究科教授)、副査 石田哲也博士(東京大学大学院工学系研究科教授)、副査 長井宏平(東京大学生産技術研究所准教授)、副査 北垣亮馬博士(東京大学大学院工学系研究科講師)に御礼申し上げます。

主査である岸先生には、結果の表層のみを見て考察を行っていた私に対して、現象の本質を追求する姿勢を叩き込んで頂き、研究者としてあるべき姿を示して頂きました。3年間、先生の背中を見続けてきて、自分に足りないもの、何が必要なのかを教えて頂きました。未熟な私を研究室に迎えて頂き、ご指導下さいましたことに厚く御礼申し上げます。

副査である前川先生、石田先生、長井先生、北垣先生には、研究を進めるにあたり、大変貴重なご示唆を頂きました。前川先生には、一つの仮説を検証するためには多角的な検討が必要であり、そのためには仮説を立てた自分自身の考えすら疑わなければならない、というお言葉を頂き、研究者に必要な素養をご指導頂きました。石田先生には、博士研究の肝となる機構の理論的な考察の助言を頂きました。長井先生には、ランチミーティングなどで常に的確な質問や助言を頂きました。北垣先生には、化学的な側面からご示唆を頂きました。ここに感謝の意を表します。

後藤誠二先生(山口大学名誉教授)、浅賀喜与志先生(帝京科学大学名誉教授)には、セメント化学の観点から貴重なご示唆を頂きました。先生方から様々なセメント化学の知見を学ばせて頂きました。松本浩嗣先生(東京大学生産技術研究所特任講師)には、ランチミーティングの際にご示唆を頂きました。酒井雄也先生(東京大学生産技術研究所助教)には、研究のみならず、博士課程の学生としてのあり方などを未熟な私にご指導頂きました。先生方からのご指導により研究者として成長することができました。厚く御礼申し上げます。

研究室のスタッフの皆様には、博士研究を行うにあたり、多大なご協力を頂きました。秘書の田畑和泉様には、様々なサポートをして頂き、研究生活を支えて頂きました。御礼申し上げます。内藤壽久氏には、試料の採取など実験を手伝って頂きました。氏のご協力なしでは潤滑に実験を進めることができなかつたと思います。深く感謝しております。宮菌雅裕氏(住友大阪セメント)、阿部睦樹氏(東日本旅客鉄道)、永野匡敏氏(東日本旅客鉄道)には、研究に関して多くのご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

博士課程として進学したことで、同じ研究室で過ごした岸・長井研のメンバーの多くは私よりも後輩でしたが、多くのことを学ばせて頂きました。Vu Viet Hung 博士, Kayondo Muzafalu 氏, Tarekegne Biruktawit Taye 氏, 志村雅仁氏, 木村俊也氏, 山崎慈生氏, 山口寛史氏, 佐藤成幸氏, 面来洋児氏, 佐相駿氏, 中原啓太氏, Vishakha Shankar 氏, Iwvananji Sikombe 氏, Tep Meta 氏, 田中俊成氏, Liyanto Eddy 氏, Punyawut Jiradilok 氏, 高原進語氏, 小池真登氏, 伊藤秀氏, 坂田理子氏, 柏貴裕氏, Rajamurugan Sundaram 氏に感謝の意を表します。

最後に、私の博士課程進学に対して全面的な理解と協力を頂いた家族に感謝いたします。

付録 I 乾燥過程及び吸水・吸湿過程中のコンクリート供試体の重量変化

第 2 章において室内塩水浸せき試験前に供試体に施した乾燥過程及び吸水・吸湿過程
中のコンクリート供試体の重量変化を図 I.1 及び図 I.2 に示す。供試体重量は、1/100g 単位
で測定可能な電子天秤（METTLER TOLEDO 製）を用いて測定した。

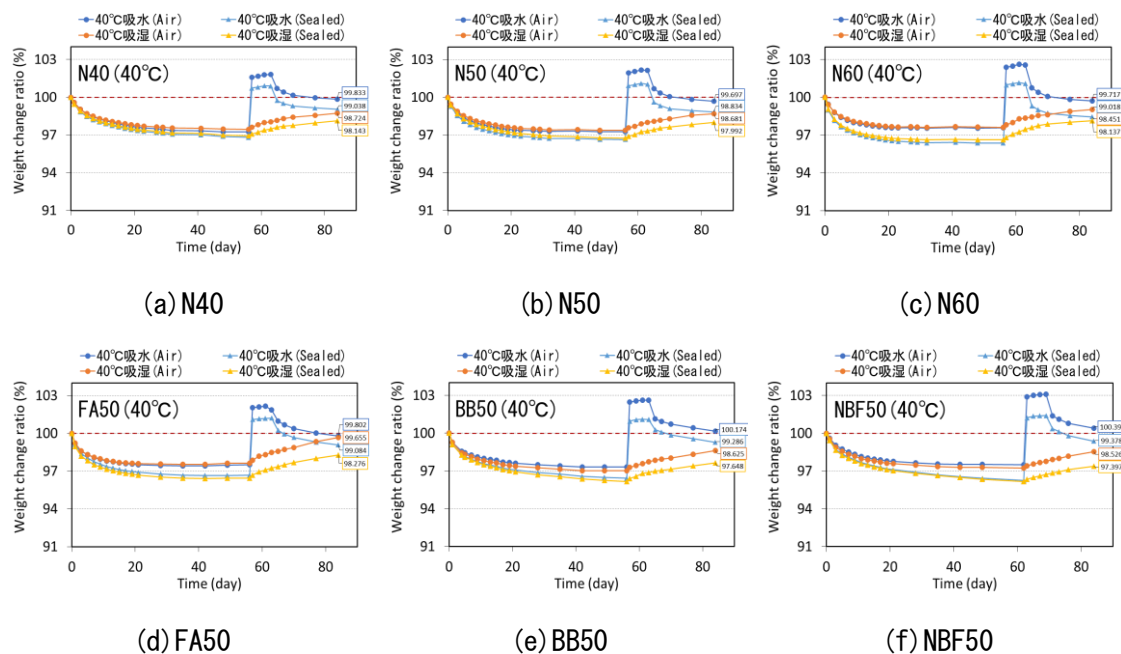


図 I.1 重量変化率：40°C乾燥及び吸水・吸湿過程

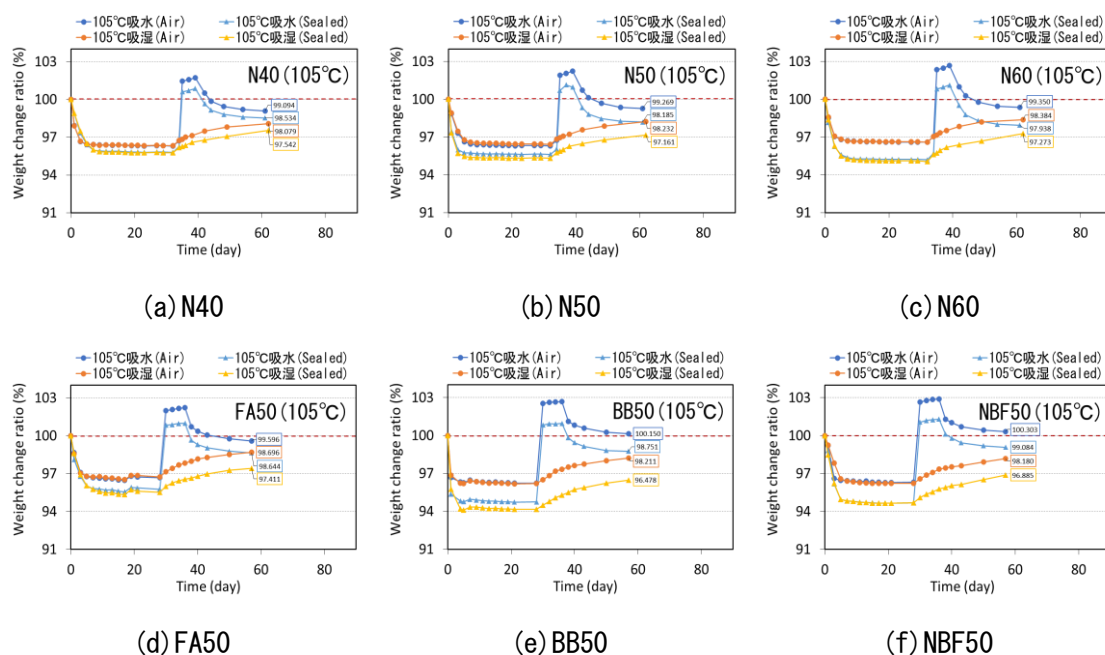
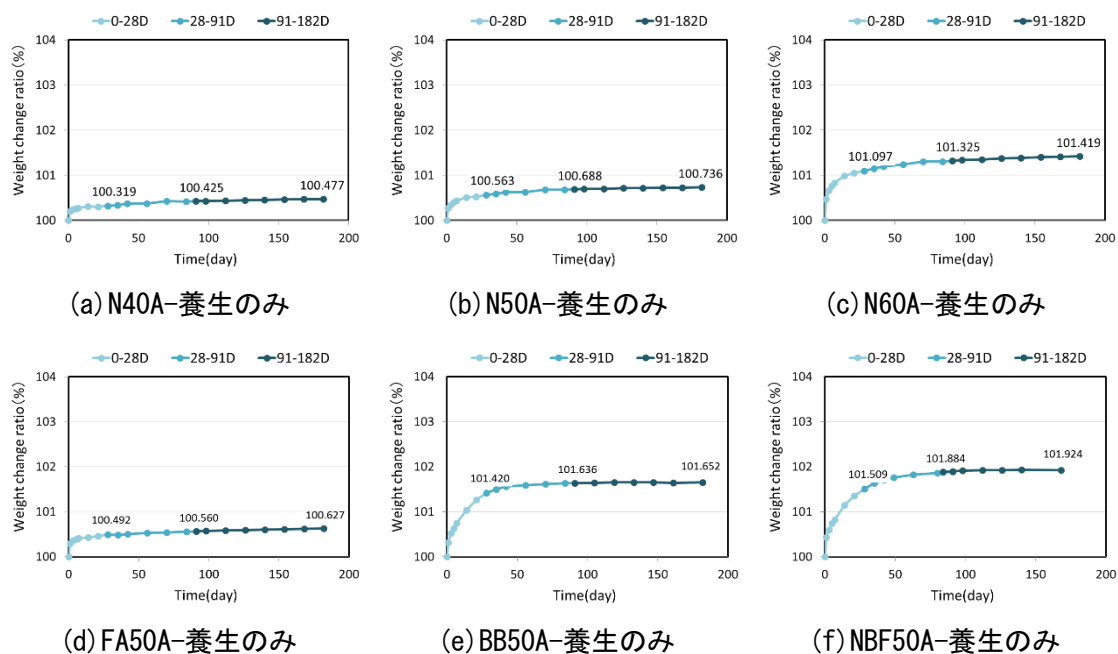


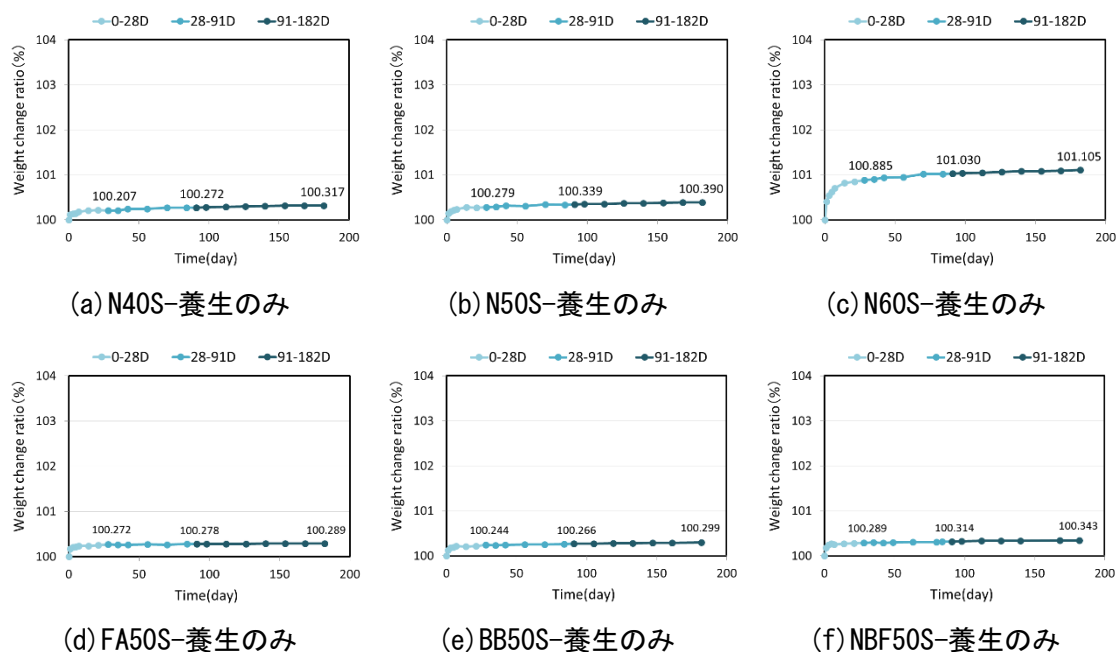
図 I.2 重量変化率：105°C乾燥及び吸水・吸湿過程

付録Ⅱ 塩水浸せき試験中のコンクリート供試体の重量変化

第2章で実施した室内塩水浸せき試験中のコンクリート供試体の重量変化を図Ⅱ.1から図Ⅱ.18に示す。供試体重量は、1/100g単位で測定可能な電子天秤(METTLER TOLEDO製)を用いて測定した。



図Ⅱ.1 重量変化率：室内塩水浸せき試験(養生のみ：気中)



図Ⅱ.2 重量変化率：室内塩水浸せき試験(養生のみ：封緘)

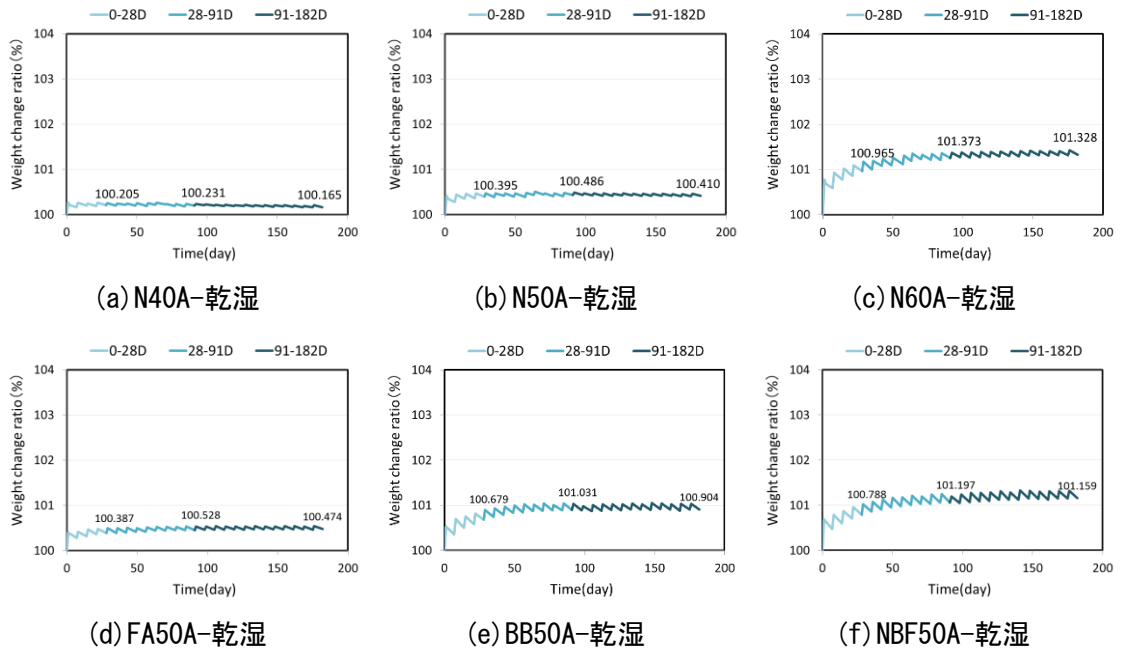


図 II. 3 重量変化率：室内塩水浸せき試験(乾湿：空中)

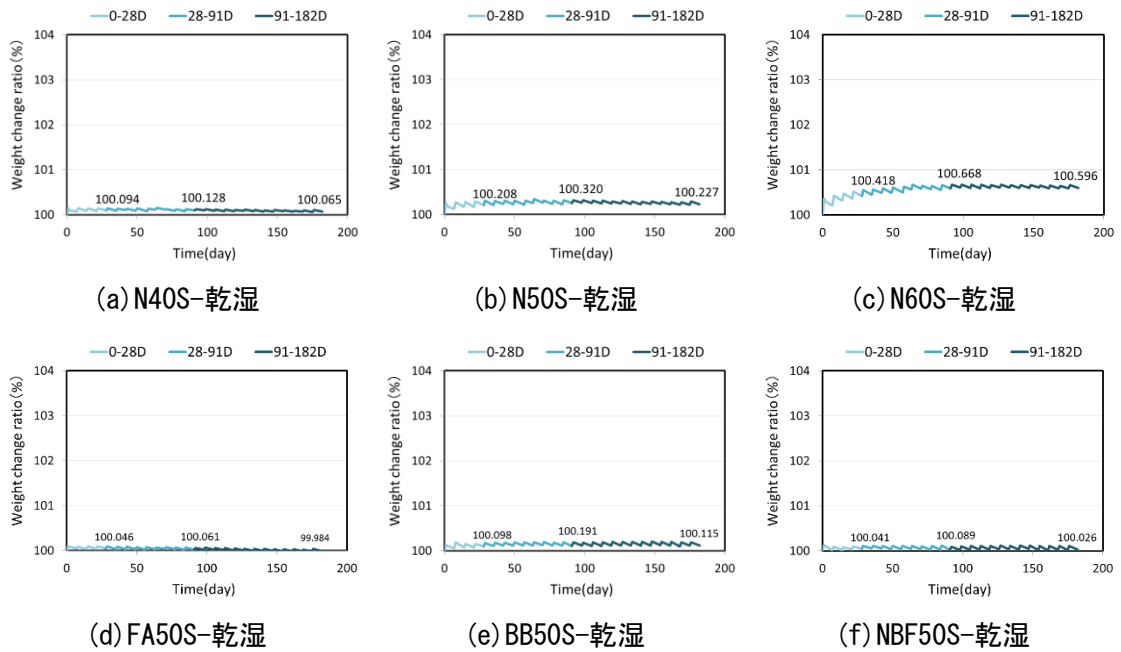


図 II. 4 重量変化率：室内塩水浸せき試験(乾湿：封緘)

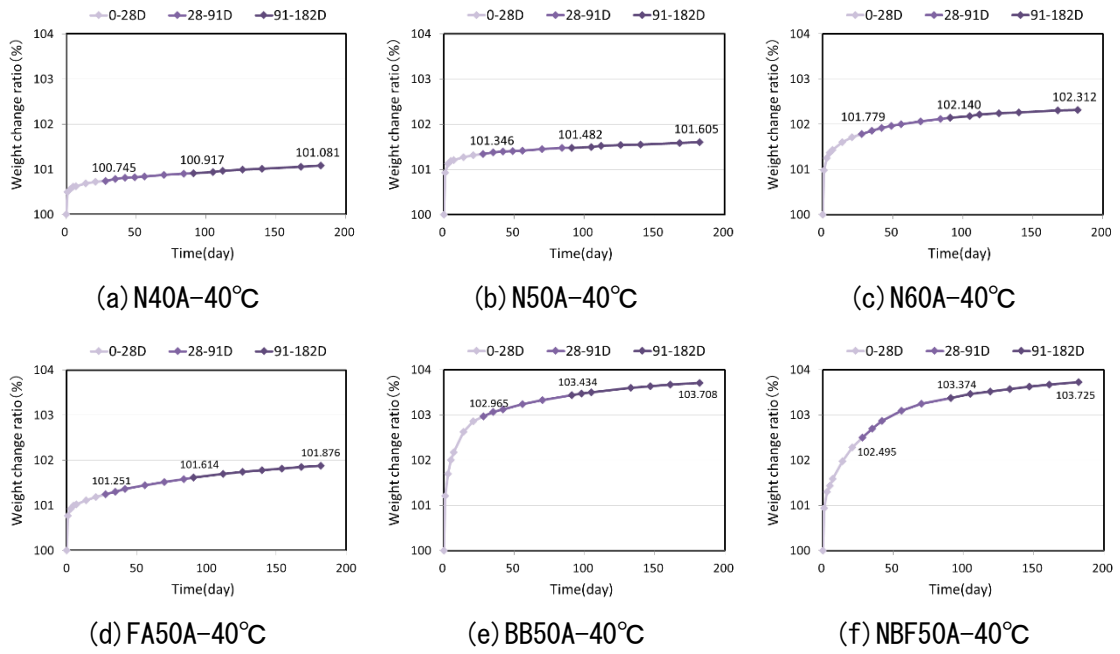


図 II. 5 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (40°C：気中)

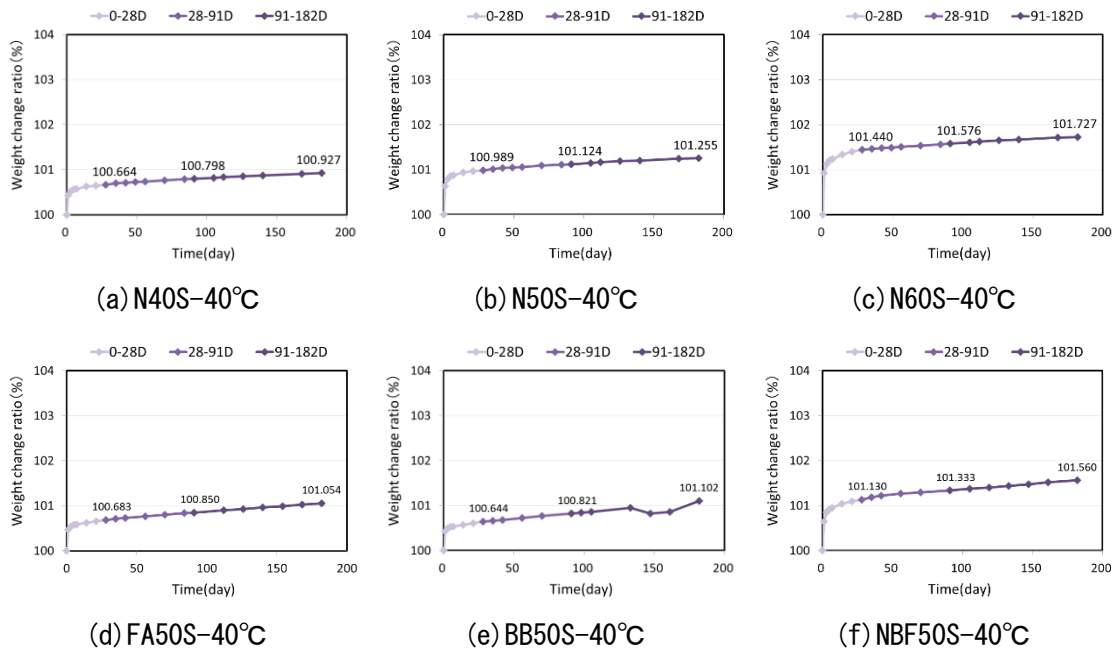


図 II. 6 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (40°C：封緘)

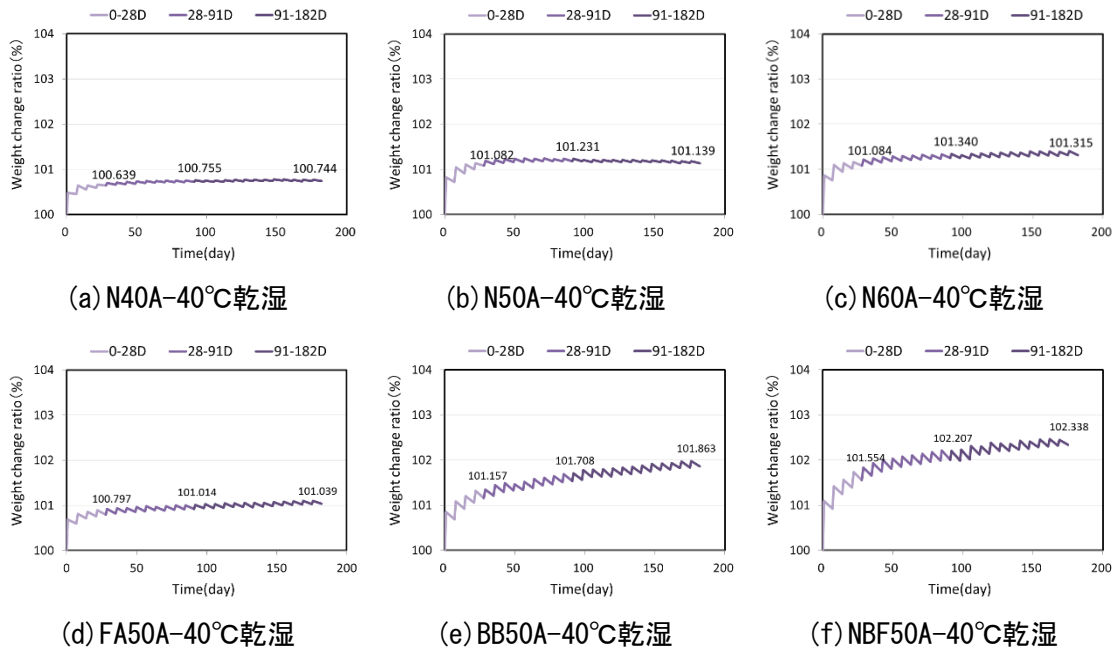


図 II.7 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (40°C乾湿：気中)

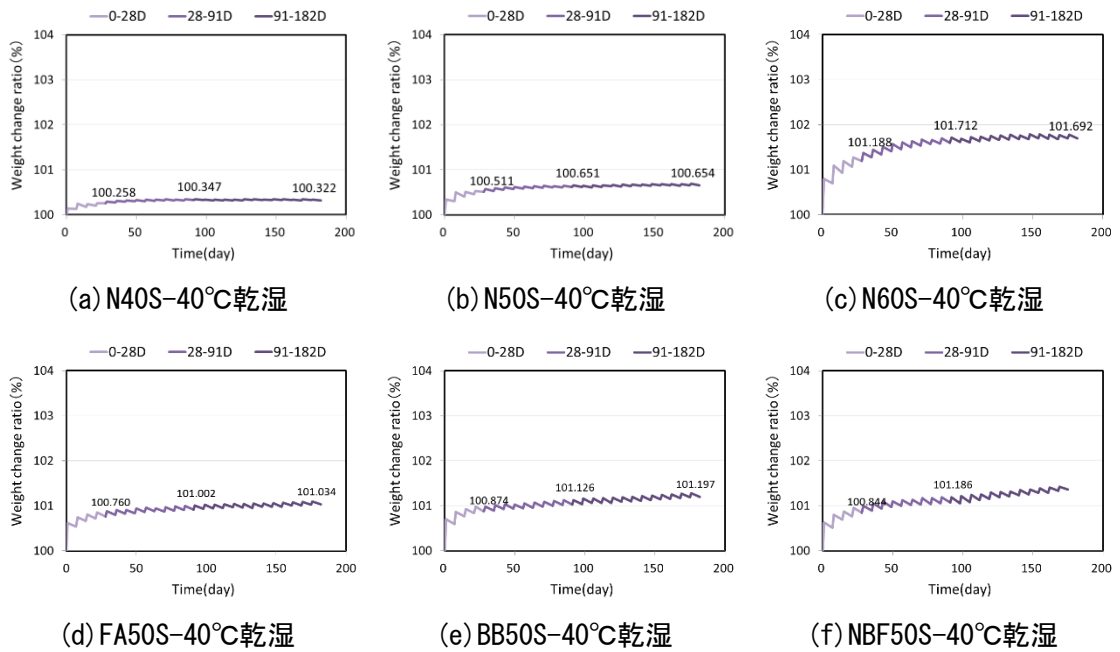


図 II.8 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (40°C乾湿：封緘)

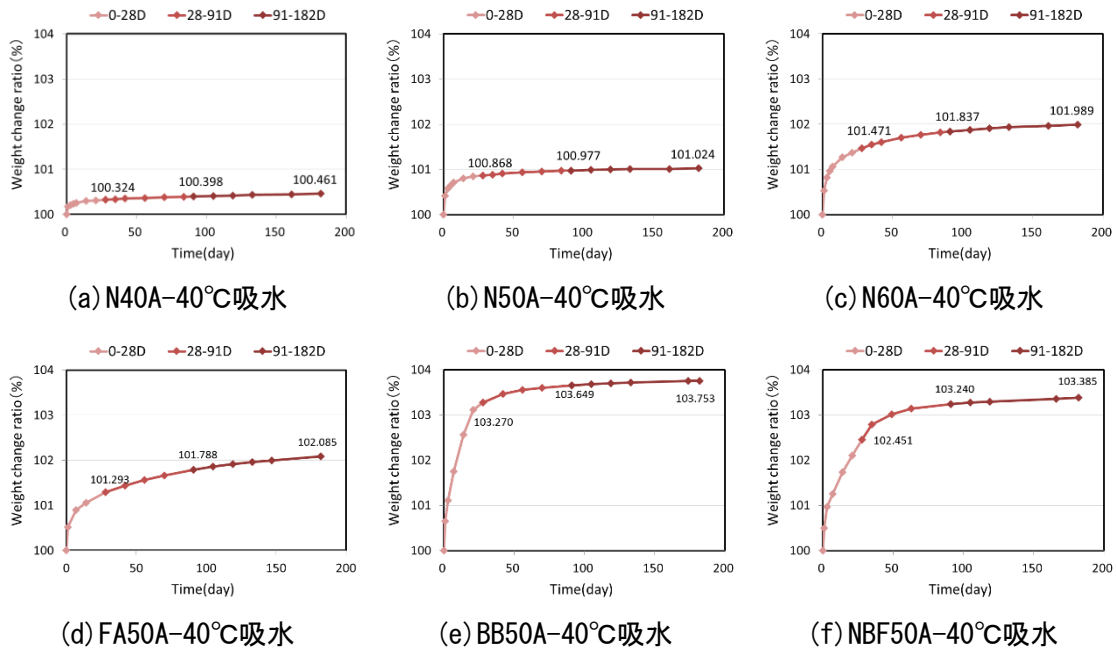


図 II. 9 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (40°C吸水：気中)

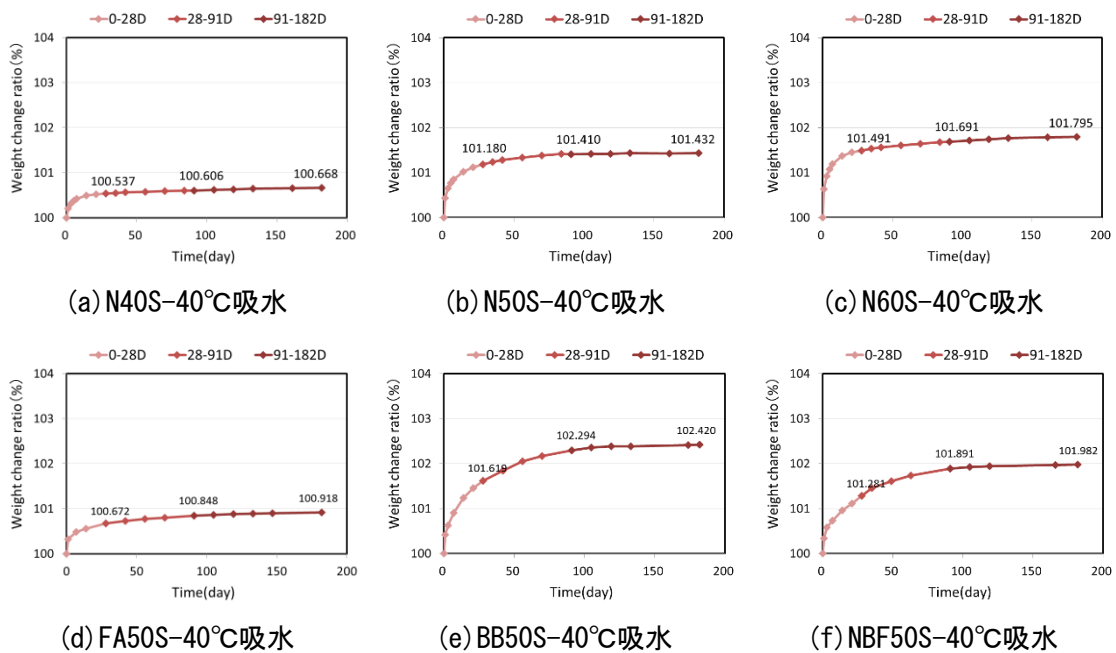


図 II. 10 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (40°C吸水：封緘)

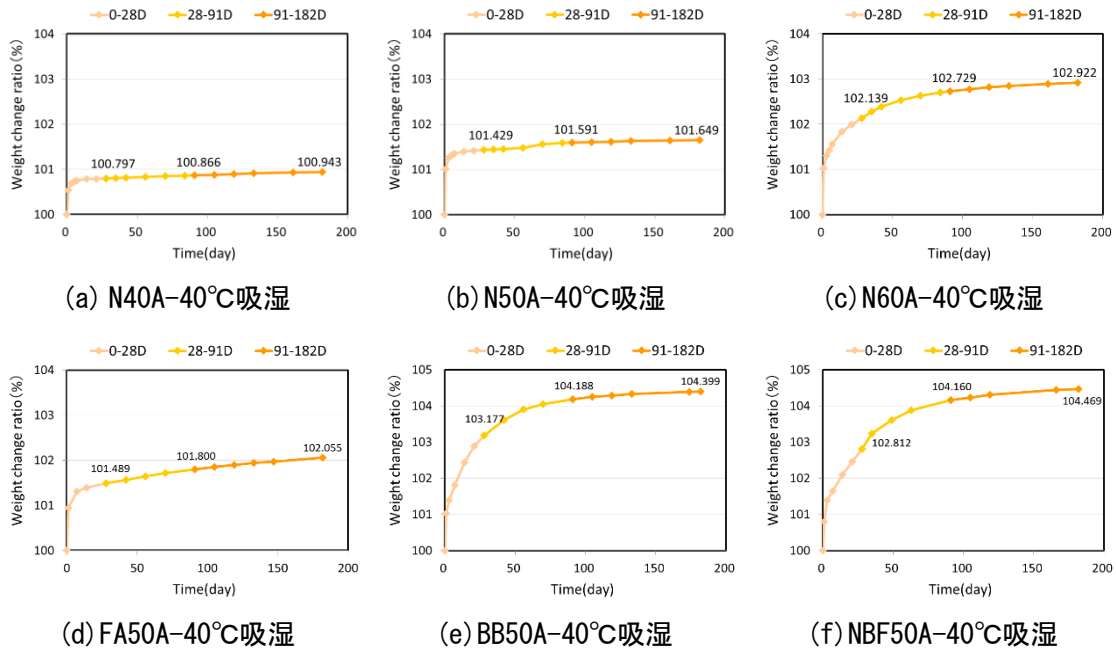


図 II. 11 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (40°C吸湿：気中)

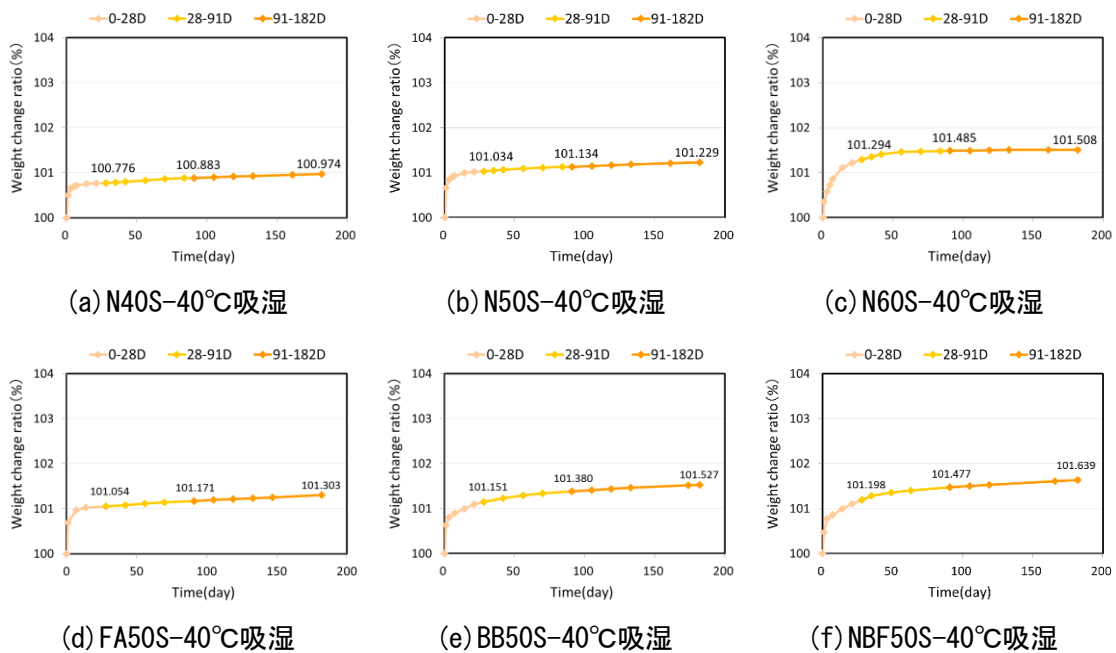


図 II. 12 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (40°C吸湿：封緘)

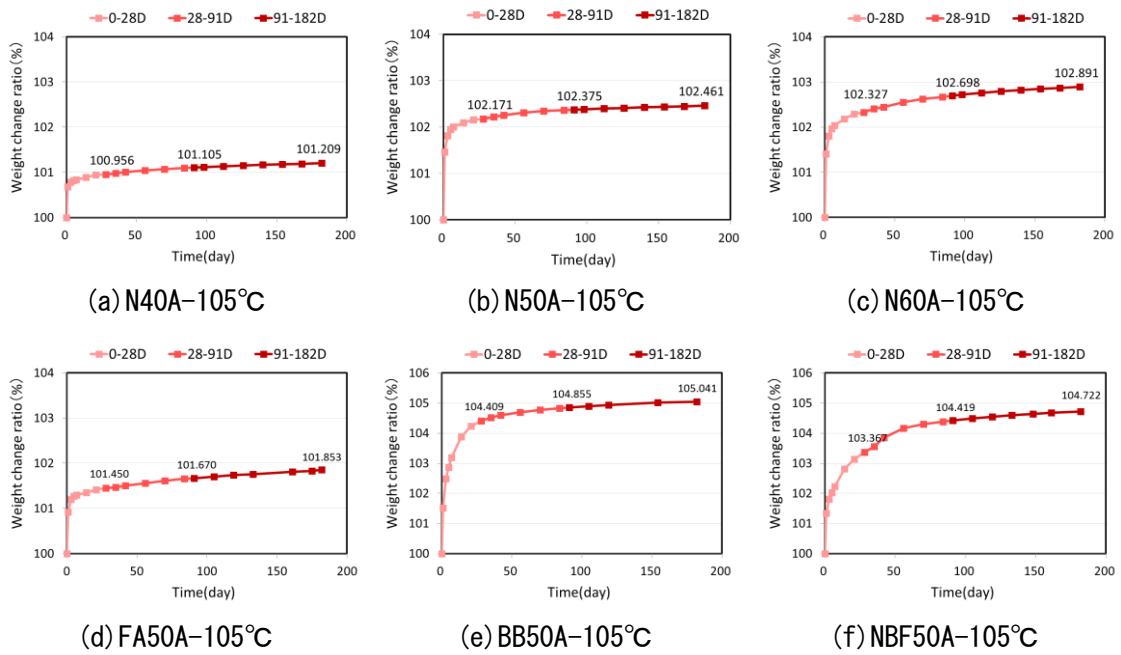


図 II. 13 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (105°C：気中)

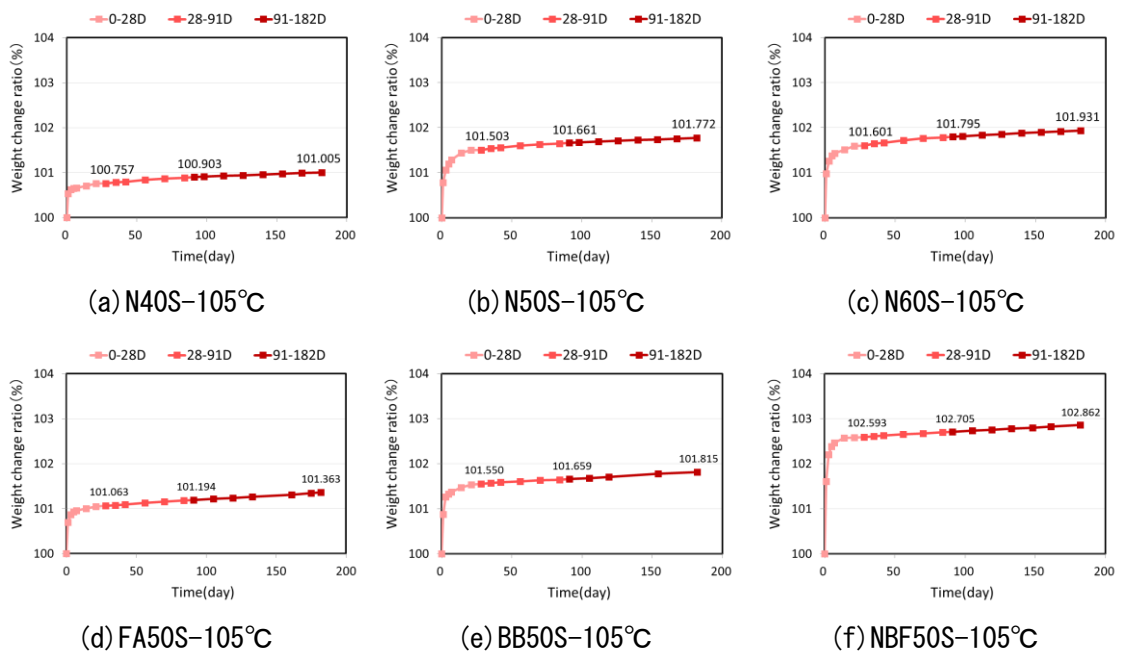


図 II. 14 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (105°C：封緘)

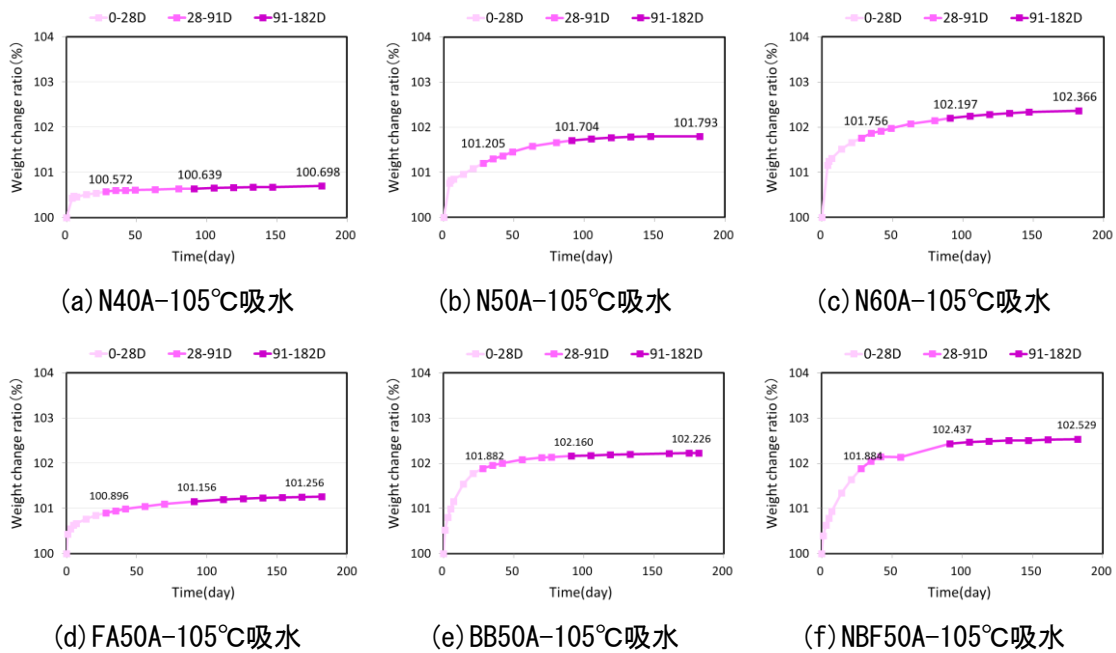


図 II. 15 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (105°C吸水：気中)

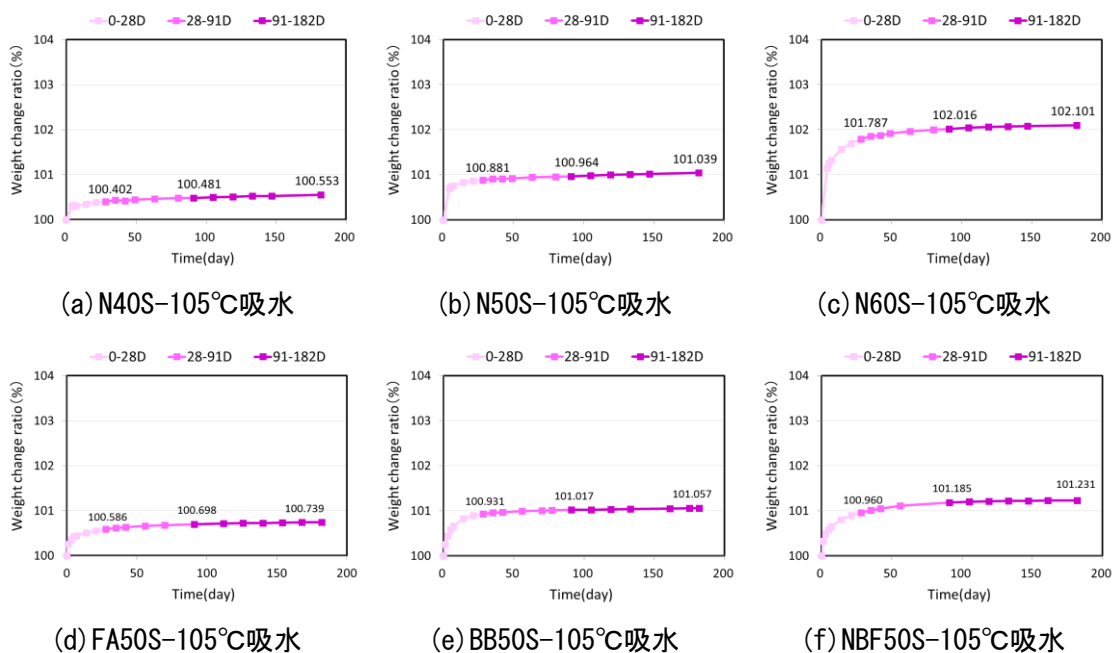


図 II. 16 重量変化率：室内塩水浸せき試験 (105°C吸水：封緘)

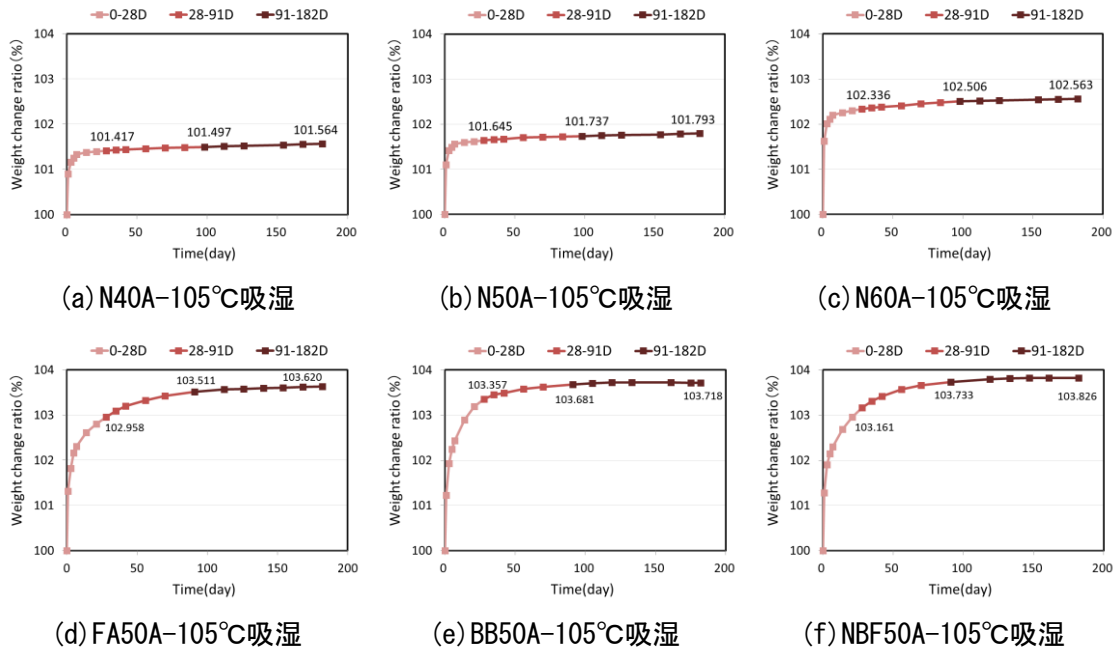


図 II. 17 重量変化率：室内塩水浸せき試験(105°C吸湿：気中)

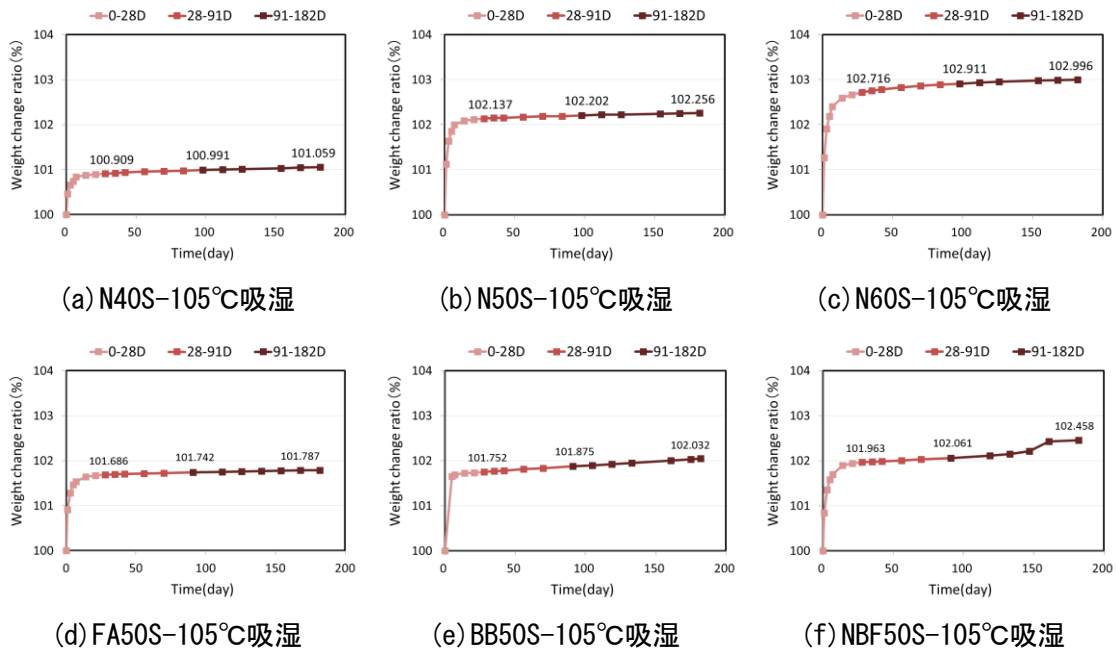


図 II. 18 重量変化率：室内塩水浸せき試験(105°C吸湿：封緘)