

博士学位論文

氏名（本籍）	金子 樹 （新潟県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第142号
学位授与年月日	平成28年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
学位論文題目	コンクリート中への塩化物イオンの 浸透・拡散性状に関する研究

論文審査委員	主査	阿部 道彦 教授
	副査	遠藤 和義 教授
	〃	小野里 憲一 教授
	〃	今本 啓一 教授
	〃	(東京理科大学)
	〃	梶田 佳寛 名誉教授
	〃	(宇都宮大学)

論文要旨

コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する研究

金子 樹

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象としては、中性化や塩害、アルカリシリカ反応、凍害、化学的侵食などがある。このうち、塩害とは JIS A 0203「コンクリート用語」では、コンクリート中の塩化物イオンによって鋼材が腐食し、コンクリートにひび割れ、剥離、剥落などの損傷を生じさせる現象と定義される。塩害において劣化因子となる塩化物イオンは、あらかじめコンクリートの材料が有している初期塩分と構造物の供用中に外部からコンクリート中に浸透する外来塩分がある。前者により生じる内在型の塩害は、1986年に導入された塩分総量規制により、除塩していない海砂の使用が禁止されたことやコンクリート材料に由来する塩化物イオン量が一般に 0.30kg/m^3 以下とされたことから、近年ではあまり見られない現象である。

一方、外来塩分とは海岸地域における海からの潮風による飛来塩分や寒冷地域などで道路に散布される凍結防止剤に由来する塩化物イオンである。これらの塩化物イオンによる外来型の塩害では、コンクリートの表面に付着した塩化物イオンがコンクリート中に浸透・拡散し、鉄筋位置まで到達することで上記と同様に鉄筋の腐食が生じる。そのため、建設時には健全であったコンクリートに生じる経年劣化のひとつであり、近年でも劣化が懸念される地域では対策が必要とされている。また、このような地域では、二酸化炭素の浸透・拡散に起因し劣化の過程が類似する中性化と比べても、外来型の塩害による劣化は著しく激しい。

このような劣化に対して、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性とは、日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS 5 と略記）では、広義の概念で「劣化作用の環境下において建築物および部材が要求性能を維持存続できる能力」と捉えられており、計画供用期間の級として短期（およそ 30 年）から超長期（およそ 200 年）までの 4 段階を規定し、この期間中において構造安全性、耐火性、使用性などの性能を確保し続ける必要があるとしている。

そして、JASS 5 や日本建築学会の調査設計指針において、外来型の塩害が懸念される場合の設計手法として、コンクリートに必要とされる塩化物イオンの浸透抵抗性について実環境を想定して定めることが望ましいとしている。しかし、自然環境において塩化物イオンの浸透抵抗性を評価するには長期間の屋外暴露試験が必要なこと、短期間に試験室で塩化物イオンの浸透促進試験を行うには標準化

された JIS などの試験方法がないこと、また、経年による塩化物イオンの浸透・拡散性状を評価するにあたり不明な点が多いことなど、技術的な資料の整備が十分でないのが現状である。

このような背景のもと、本研究は、実験および既往の研究によるデータのとりまとめから、外来型の塩害を想定したコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状および塩化物イオンの浸透促進試験における諸条件の影響および試験方法やその評価方法について一連の検討による成果をまとめたものであり、本論文は第 1 章から第 8 章で構成されている。

第 1 章「序論」では、研究の背景として近年では懸念される塩害はコンクリートの外部から塩化物イオンが浸透・拡散する外来型であること、また、このような塩害に対して評価を行うための技術的な資料が不足していることを述べ、本研究の目的および構成と概要を示し、関連する用語を定義した。

第 2 章「塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する既往の研究」では、関連する学会である日本建築学会の JASS 5 および土木学会のコンクリート標準示方書について、塩害を受けるコンクリートに対するこれまでの仕様書・示方書の改定の経緯、現行版での取扱いを整理し、また、既往の研究から塩化物イオンの浸透・拡散性状についてとりまとめを行った。

これより、各関連学会ではいずれも Fick の 2 次方程式の解析解である拡散方程式（以下、拡散方程式と略記）を用いて塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する耐久性の評価を行い、評価においては拡散方程式の特性値である表面塩化物イオン量および拡散係数を年数の経過にかかわらず一定としていることを明らかにした。

また、耐久性の評価について、その精度向上のためには拡散方程式の特性値の経時変化や浸透促進試験と実環境との関係が明確でないこと、その要因として各種の試験方法や条件が試験結果に影響をおよぼすものの統一されて用いられる促進試験法がないことが課題であることを明らかにした。さらに、この塩化物イオンの浸透促進試験について、土木学会規準および国外における規定や既往の研究で用いられた試験方法に関するとりまとめを行い、これらの試験方法における課題の抽出を行った。

第 3 章「コンクリート中に浸透した塩化物イオンの拡散性状」では、コンクリート中に存在する塩化物イオンのコンクリート中における拡散性状に関して検討を行うため、あらかじめ浸透促進試験でコンクリート中に外部から塩化物イオンを浸透させた水セメント比 0.55 の普通コンクリートを用いて、乾湿シリーズ、乾燥シリーズ、湿潤シリーズおよび中性化シリーズの計 4 シリーズ、10 パターンの環境条件について実験を行った。実験では、環境温度（50℃、20℃）や浸漬水の NaCl 濃度（3%の塩水、水道水）、乾燥中の浸透面の処理（開放、封かん）、コンクリートの中性化の影響を実験水準とした。

また、いずれの環境条件も 7 日を 1 サイクルとして乾湿シリーズの乾燥・湿潤状態を切り替えるタイミングで試験体の質量変化を測定し、5、10 および 20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

その結果、コンクリート中における塩化物イオンの拡散性状は、コンクリートに出入りする水がおよぼす影響が大きいことを明らかにした。また、コンクリート中への水の浸透がない場合において、コンクリートの乾燥による水分の蒸発では塩化物イオンはコンクリートの内部に残留し、塩化物イオンの濃度差により拡散するが、その程度は水の移動に伴う拡散よりも小さいことを明らかにした。

第 4 章「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・拡散性状」では、第 3 章で明らかにしたように、コンクリート中の水の移動が塩化物イオンの浸透・拡散に大きく影響することから、いずれも 1 サイクルを 7 日としてサイクル中の乾燥・湿潤日数を変化させた 4 パターンの乾湿繰返し条件により、コンクリートにおける吸水性状と塩化物イオン量の関係について実験を行った。実験は、水セメント比 0.5 および 0.6 の普通コンクリートを用いて、サイクルパターン以外の促進条件は環境温度 50℃、浸漬水の NaCl 濃度 3% で共通とし、乾燥・湿潤状態の切替え時における試験体の質量変化および促進 10、20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

実験結果から、コンクリート中に浸透する水の量とコンクリート中に蓄積する塩化物イオン量には相関関係があり、浸漬水の NaCl 濃度を 3% とした場合にはコンクリートに浸透した水が含む塩化物イオンの約 65% がコンクリート中に蓄積されることを明らかにした。また、拡散方程式における特性値は経時により変化する傾向を示し、このような経時変化を考慮することで、より実状に近い耐久性の評価を行うことが可能であることを明らかにした。

第 5 章「仕上塗材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果」では、一般に鉄筋コンクリート造建築物では外装仕上げにより建物の美観および耐久性能の確保を図ることから、仕上塗材を対象とした塩化物イオンの浸透抑制効果について実験を行った。仕上塗材は紫外線などの影響による経年劣化を生じることから、建物の供用中には改修が行われその性能が維持される。そのため、本章ではこのような改修を想定した仕上塗材を対象とし、水セメント比 0.55 の普通コンクリートに対して、4 種類の仕上材とこれらの仕上材を中性化抑制効果が小さいとされるリンに重ね塗りした計 7 条件について、環境温度 50℃、浸漬水に NaCl 濃度 3% とした乾燥 3 日、湿潤 4 日の乾湿繰返しによる浸透促進試験を行い、乾燥・湿潤状態の切替え時における試験体の質量変化および促進 10、20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

その結果、仕上材を施したコンクリートであっても塩化物イオンの浸透・拡散性状は仕上材なしの

場合と同様に拡散方程式による評価ができ、仕上材の種類による塩化物イオンの浸透抑制効果は中性化の抑制効果とおおよそ類似するが、仕上材の表面の形状も影響すると考えられることを明らかにした。しかし、仕上材の施工にあたり、リシン下地がある場合には仕上材の表面が砂壁状となることからコンクリート中に浸透する塩化物イオン量は仕上材単体よりも大きくなることを明らかにした。

第 6 章「促進および屋外暴露環境における塩化物イオンの浸透・拡散性状」では、日本建築学会およびコンクリート工学会を中心にコンクリートの品質や塩化物イオン量の測定方法などの条件から選定された、促進試験 18 報および屋外暴露試験 7 報の既往の研究結果から、促進および暴露試験において拡散方程式から算出される特性値である拡散係数および表面塩化物イオン量に関する検討を行った。

その結果、促進試験の方法は乾湿繰返しまたは塩水浸漬に二分され、乾湿繰返しでは試験期間にかかわらず、いずれの特性値も一定であることを示した。その他の試験方法では、拡散係数は塩水浸漬による促進試験および屋外暴露試験において、また、表面塩化物イオン量は屋外暴露試験において試験期間の経過に伴い変化し、やがて一定の値に収束することを明らかにし、一定の値となる期間は屋外暴露では拡散係数では約 4 年、表面塩化物イオンでは約 4.5 年であった。また、これらの特性値はコンクリートの水セメント比 0.4~0.6 の範囲では水セメント比による違いは明瞭ではなく各試験方法において同様な値を示すこと、同一水セメント比における拡散係数は促進試験においては屋外暴露試験の約 10 倍程度大きい範囲に分布することを明らかにした。

第 7 章「塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験における試験条件」では、第 6 章で示したように促進試験では乾湿繰返しよりも塩水浸漬の方が屋外暴露試験をより模擬した試験結果を得ることができるとの検討結果に基づき、第 2 章で整理した塩水浸漬による促進試験における課題である、浸漬水の塩水濃度、試験期間および評価のための測定範囲について、これまで検討に用いてきた実験および既往の文献のデータから検討を行った。

その結果、浸漬水の塩水濃度が高いほど表面塩化物イオン量は大きくなるが、拡散係数には影響しないこと、促進試験期間を 182 日とした場合の耐久性の評価は 365 日よりもわずかに安全側となる結果を得ることを明らかにした。また、塩化物イオン量の測定範囲は、コンクリートの表層部を含め、浸透面から 40~50mm 程度とすることで精度よく評価できることを明らかにした。

第 8 章「結論」では、第 2 章から第 7 章における研究の成果を要約し、総括と結論を述べた。

SUMMARY

Study on Penetration and Diffusion Properties of Chloride Ion into Concrete

Tatsuki Kaneko

Most of salt attacks on reinforced concrete buildings are now exogenous type due to the airborne salt from the sea, and they cause the corrosion of reinforcement. It is desired that required penetration resistance of chloride ion to concrete is decided on the basis of the actual environment. The mechanism is that chloride ion attaches to the concrete surface, and then penetrates and diffuses into concrete. However, it is said that preparation of technical data is not enough in current condition. This thesis presents the penetration and diffusion properties of chloride ion into concrete by experiments and literature survey. Furthermore, the effects of each accelerated test conditions and methods on the test results are studied. This thesis is composed of 8 chapters.

Diffusion properties of chloride ion in concrete are divided into two types which are due to with water movement and due to concentration difference. According to the results of experiments, the effect of the former was larger. Therefore, suppress of water penetration into concrete by surface finish was valid to durability improvement of structures.

In general, it is said that penetration and diffusion properties of chloride ion in concrete follow the diffusion equation which is prescribed by two characteristic values. These characteristic values which are chloride ion content of concrete surface and diffusion coefficient showed the tendency to change with passing period, and then respectively converge to the constant value at the actual environment.

In the accelerated tests, immersing in salt water test showed similar tendency with the actual environment. Then, in this study, the test conditions of the immersing in salt water test was considered, to estimate the penetration and diffusion properties of chloride ion in concrete. Consequently, appropriate conditions and methods were proposed about NaCl concentration of salt water, test term and measurement range for the estimation of concrete durability.

コンクリート中への塩化物イオンの
浸透・拡散性状に関する研究

金 子 樹

コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する研究

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	3
1.2 本研究の構成と概要	6
1.3 用語の定義	8
第2章 塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する既往の研究	11
2.1 関連学会における規定	13
2.1.1 日本建築学会	13
2.1.2 土木学会	17
2.2 塩化物イオンの浸透促進試験方法	24
2.2.1 JSCE-G 571「電気泳動法によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」	24
2.2.2 JSCE-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」	27
2.3 コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する既往の研究	30
2.3.1 塩化物イオンの浸透・拡散性状	30
2.3.2 塩化物イオンの浸透促進試験方法	37
2.4 まとめ	50
第3章 コンクリート中に浸透した塩化物イオンの拡散性状	55
3.1 実験概要	57
3.1.1 実験方法および環境条件	57
3.1.2 試験体の作製および試験方法	58
3.2 試験体の質量変化	61
3.3 全塩化物イオン量の分布	63
3.3.1 乾湿シリーズ	65
3.3.2 湿潤シリーズ	66

3.3.3	乾燥シリーズ	67
3.3.4	中性化シリーズ	68
3.4	拡散方程式による塩化物イオン量の積分値	69
3.4.1	拡散方程式による特性値	69
3.4.2	塩化物イオン量の積分値	71
3.5	まとめ	73
第4章	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・拡散性状	77
4.1	実験概要	79
4.1.1	実験方法および乾湿繰返し条件	79
4.1.2	試験体の作製および試験方法	80
4.2	塩化物イオン量の分布と拡散方程式による解析	83
4.2.1	全塩化物イオン量の実測値	83
4.2.2	拡散方程式による解析	84
4.3	水の浸透に伴う塩化物イオンの移動に関する考察	90
4.3.1	乾湿繰返しによる質量変化	90
4.3.2	乾湿繰返しによる吸水量と蒸発量	91
4.3.3	累積吸水量と塩化物イオン量	93
4.4	まとめ	96
第5章	仕上塗材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果	99
5.1	実験概要	102
5.1.1	実験方法および仕上材の種類	102
5.1.2	試験体の作製および試験方法	102
5.2	コンクリート中の全塩化物イオン量	106
5.3	拡散方程式による検討	109
5.4	乾湿繰返しにおける吸水量と塩化物イオン量	112
5.4.1	試験体の質量変化	112
5.4.2	累積吸水量と塩化物イオン量	114
5.5	まとめ	117

第6章 促進および屋外暴露環境における塩化物イオンの浸透・拡散性状	121
6.1 文献調査の概要	123
6.1.1 調査対象とした文献の選定条件	123
6.1.2 調査対象とした文献の概要	124
6.2 データの取扱いと検討方法	128
6.2.1 塩化物イオン量	128
6.2.2 検討方法と対象データの選別	128
6.3 既往の文献における実験結果	130
6.3.1 既往の文献における実験の水準および結果の概要	130
6.3.2 既往の文献における実験結果	142
6.4 拡散係数および表面塩化物イオン量	143
6.4.1 モデル式による曲線回帰の検討方法	143
6.4.2 拡散係数	144
6.4.3 表面塩化物イオン量	146
6.4.4 拡散係数および表面塩化物イオン量の経時変化のまとめ	148
6.5 各種試験方法における拡散係数	150
6.6 まとめ	152
第7章 塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験における試験条件	157
7.1 浸漬水の塩水濃度	160
7.2 試験期間	163
7.3 塩化物イオン量の測定範囲	165
7.3.1 表層部における塩化物イオン量の取扱い	165
7.3.2 測定深さ	168
7.4 まとめ	177
第8章 結論	181
本研究における発表論文リスト	189
謝辞	191

第 1 章

序 論

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

鉄筋コンクリートは設計における自由度の高さや施工の容易性、経済性などの理由から多くの建築物や土木構造物に用いられる構造材料である。コンクリートは、その出荷量が1990年度の1億9800万 m^3 をピークに減少傾向にある¹⁾ものの、2014年度では9400万 m^3 で²⁾、このうちの約6割が建築分野において使用されている³⁾。このように、現在においても建築材料の中で最も多量に使用されているものである。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性への関心は、旧建設省建築研究所で1980～1984年に実施された建築物の耐久性向上技術の開発（通称、耐久性総プロ）を機にそれまで以上に高まり、多くの研究が行われた。現在では、これらの研究の成果から日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS 5 と略記）において、1997年版から導入された計画供用期間の級に応じた耐久設計基準強度を用いることで、設計段階から構造物が一定の耐久性を有するよう配慮がなされている。

また、近年ではコンクリートの出荷量と同様に新規の建築事業も減少傾向にある。一方で、2006年に閣議決定された住生活基本計画（全国計画）⁴⁾では、住生活の安定の確保及び向上の促進に関する施策についての横断的な視点の基本のひとつとして、ストック重視の施策展開があげられている。ここでは、環境や資源、エネルギー問題が深刻化する中で、これまでのスクラップアンドビルドのようなフロー型の社会から、「いいものを作って、きちんと手入れして、長く大切に使う」といったストック型の社会への移行が重要であるとしている。

建築物のストックは年々増加し、集合住宅のみを見ても全国のマンションストック戸数は、2013年末の時点で約601万戸あるとされている（図1-1）⁵⁾。これらのストック建築物には前述の耐久性総プロや耐久設計基準強度の導入以前のものも多く、また、近年に施工されたものも含め、これから供用される建築物については適切な耐久性の評価に基づく維持保全により、その安全性や使用性を確保することが重要となる。そのため、フロー、ストックを問わず鉄筋コンクリート構造物については、その耐久性が社会的にもますます関心が高くなっていくもの考えられる。

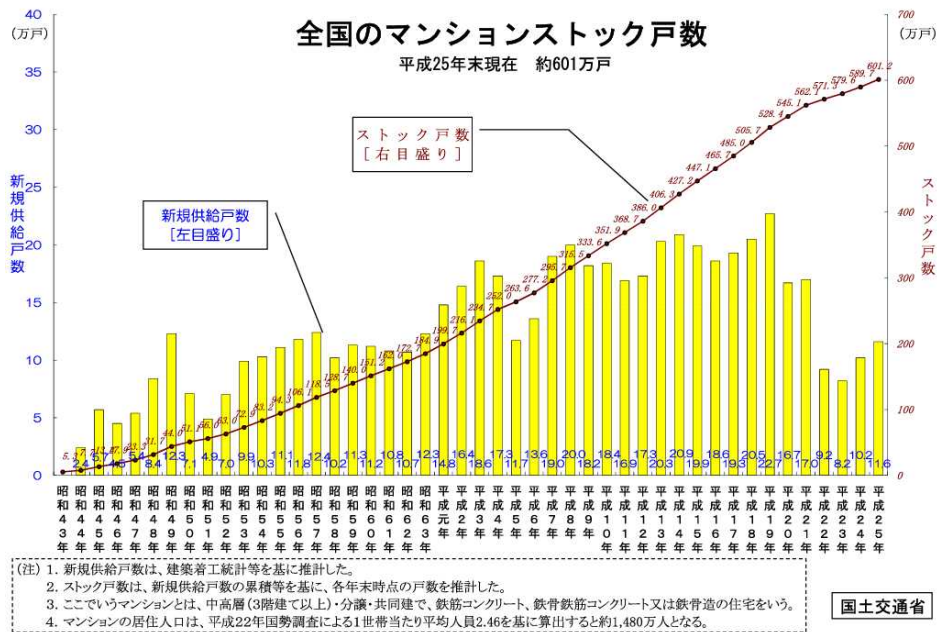


図 1-1 全国のマンションストック戸数⁵⁾

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象としては、中性化や塩害、アルカリシリカ反応、凍害、化学的侵食などがある。このうち、塩害とはコンクリート中の塩化物イオンによって鋼材が腐食し、コンクリートにひび割れ、剥離、剥落などの損傷を生じさせる現象⁶⁾である。塩害において劣化因子となる塩化物イオンには、あらかじめコンクリートの材料が有している初期塩分と構造物の供用中に外部よりコンクリート中に浸透する外来塩分がある。前者により生じる内在型の塩害は、1986年に導入された塩分総量規制により、除塩していない海砂の使用が禁止されたことやコンクリート材料に由来する塩化物イオン量が一般に 0.30kg/m^3 以下とされたことから、近年ではあまり見られなくなっている。

一方で、外来塩分とは海岸地域における海からの潮風による飛来塩分や寒冷地域などで道路に散布される凍結防止剤に由来する塩化物イオンである。これらの塩化物イオンによる外来型の塩害では、コンクリートの表面に付着した塩化物イオンがコンクリート中に浸透・拡散し、鉄筋位置まで到達することで鉄筋の腐食が生じる。すなわち、建設時には健全であったコンクリートに生じる経年劣化のひとつであり、近年でも劣化が懸念される地域では対策が必要とされている。そのため、海岸地域における外来型の塩害では建築物が常に劣化環境のもとに曝されることから、JASS 5では、このような地域に用いられるコンクリートについて、その品質や設計、施工、評価の手法を示している。

また、海に囲まれた日本国内においては、外来型の塩害を受けるおそれのある地域は広く、全国的な調査として当時の建設省が行った報告^{7)・8)}でも、海からの飛来塩分量については、日本海側、東北地方の太平洋側、沖縄県全域で多く、太平洋側がこれに次ぎ、瀬戸内海側に面した地域では少ないことが示されている。このような地域では、実際に塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化事例も確

認（写真 1-1 および写真 1-2）されており、二酸化炭素の浸透・拡散に起因し劣化の過程が類似する中性化と比べても、外来型の塩害による劣化は著しく激しいとされている。



写真 1-1 塩害による劣化事例(沖縄県)



写真 1-2 塩害による劣化事例(神奈川県)

このような劣化に対して、JASS 5 では鉄筋コンクリート造建築物の耐久性は、広義の概念で「劣化作用の環境下において建築物および部材が要求性能を維持存続できる能力」と捉えられており、計画供用期間の級として短期（およそ 30 年）、標準（およそ 60 年）、長期（およそ 100 年）および超長期（およそ 200 年）の 4 段階を規定し、この期間中において構造安全性、耐火性、使用性などの性能を確保し続ける必要があるとしている。

さらに、JASS 5 や日本建築学会の調合設計指針において、外来型の塩害が懸念される場合の設計手法として、コンクリートに必要とされる塩化物イオンの浸透抵抗性について実環境を想定して定めることが望ましいとしている。しかし、自然環境における塩化物イオンの浸透抵抗性を評価するには長期間の屋外暴露試験が必要なこと、短期間に試験室で塩化物イオンの浸透促進試験を行うには標準化された JIS などの試験方法がないこと、また、経年による塩化物イオンの浸透・拡散性状を評価するにあたり不明な点が多いことなど、技術的な資料の整備が十分でないのが現状である。

このような背景のもと、本研究は、実験および既往の研究によるデータのとりまとめから、外来型の塩害を想定したコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状、塩化物イオンの浸透促進試験における諸条件の影響および試験方法やその評価方法について一連の検討による成果をまとめたものであり、本論文は第 1 章から第 8 章で構成されている。

1.2 本研究の構成と概要

本研究は全 8 章で構成されており、各章の概要を以下に示す。

第 1 章「序論」では、研究の背景として近年では懸念される塩害はコンクリートの外部から塩化物イオンが浸透・拡散する外来型であること、また、このような塩害に対して評価を行うための技術資料が不足していることを述べ、本研究の目的および構成と概要を示し、関連する用語を定義した。

第 2 章「塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する既往の研究」では、関連する学会である日本建築学会の JASS 5 および土木学会のコンクリート標準示方書について、塩害を受けるコンクリートに対するこれまでの仕様書・示方書の改定の経緯、現行版での取扱いを整理し、既往の研究から塩化物イオンの浸透・拡散性状についてとりまとめを行った。また、これらから本研究における課題を明確にした。

第 3 章「コンクリート中に浸透した塩化物イオンの拡散性状」では、コンクリート中に存在する塩化物イオンの拡散性状について、あらかじめ浸透促進試験で外部から塩化物イオンを浸透させた水セメント比 0.55 の普通コンクリートを用いて、乾湿シリーズ、乾燥シリーズ、湿潤シリーズおよび中性化シリーズの計 4 シリーズ、10 パターンの環境条件について実験を行い、その結果について述べた。

第 4 章「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・拡散性状」では、水セメント比 0.5 および 0.6 の普通コンクリートを用いて、いずれも 1 サイクルを 7 日としてサイクル中の乾燥・湿潤日数を変化させた 4 パターンの乾湿繰返し条件について、コンクリートにおける吸水性状と塩化物イオン量の関係について実験を行い、その結果について述べた。

第 5 章「仕上塗材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果」では、一般に鉄筋コンクリート造建築物では外装仕上げにより建物の美観および耐久性能の確保を図ることから、仕上塗材を対象とした塩化物イオンの浸透抑制効果について実験を行った。仕上塗材は紫外線などの影響による経年劣化を生じることから、建物の供用中には改修が行われその性能が維持されるため、改修を想定した仕上塗材を対象とし、水セメント比 0.55 の普通コンクリートに対して、4 種類の仕上材とこれらの仕上材をリシンに重ね塗りした計 7 条件について、乾湿繰返しによる浸透促進試験を行い、その結果について述べた。

第6章「促進および屋外暴露環境における塩化物イオンの浸透・拡散性状」では、日本建築学会およびコンクリート工学会を中心にコンクリートの品質や塩化物イオン量の測定方法などの条件から選定された、促進試験18報および屋外暴露試験7報の既往の研究結果から、促進および暴露試験において拡散方程式から算出される特性値である拡散係数および表面塩化物イオン量に関する検討を行い、その結果について述べた。

第7章「塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験における試験条件」では、促進試験では乾湿繰返しよりも塩水浸漬の方が屋外暴露試験をより模擬した試験結果を得ることができるとの第6章の検討結果に基づき、第2章で整理した塩水浸漬による促進試験における課題である、浸漬水の塩水濃度、試験期間および評価のための測定範囲について、これまで検討に用いてきた実験および既往の文献のデータから検討を行い、その結果について述べた。

第8章「結論」では、第2章から第7章における研究の成果を要約し、総括と結論を述べた。

1.3 用語の定義

本論文に用いる用語について、以下のように定義するものとする。

・**全塩化物イオン量** : 硬化コンクリートから硝酸で抽出される塩化物イオン量で、コンクリート容積中のすべての塩化物イオン量を示す。すなわち、細孔溶液中に存在する可溶性塩化物イオンとセメントの水和物に固定、吸着されている塩化物イオンを合わせたもの

・**拡散方程式** : 非定常状態の拡散を示す Fick の第 2 法則より求められる方程式の解析解。ただし、本研究では $C_{int}=0$ とする。

$$C(x_i, t) = (C_0 - C_{int}) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_i}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} + C_{int}$$

ここに、 t : サイクル数 (年)

x_i : コンクリート表面からの距離 (cm)

$C(x_i, t)$: 距離 x_i (cm) におけるサイクル数 t (年) での塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_{int} : コンクリート中の初期塩化物イオン量 (kg/m^3)

D : 見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$) 年

$\operatorname{erf}()$: 誤差関数

・**拡散係数** : 全塩化物イオンのコンクリート中における分布より拡散方程式から求められる塩化物イオンの見掛けの拡散係数

・**表面塩化物イオン量** : 全塩化物イオンのコンクリート中における分布より拡散方程式から求められるコンクリート表面の塩化物イオン量

・**表層部** : コンクリートにおいて塩化物イオンの浸透面から約 10mm 以内の範囲

第1章の参考文献

- 1) 全国生コンクリート工業組合連合会：20年の歩み、p.267、1995.6
- 2) 全国生コンクリート工業組合連合会：40年の歩み、p.113、2015.9
- 3) 経済産業省製造業局住宅産業窯業建材課：平成26年生コンクリート統計年報、p.2、2015.4
- 4) 国土交通省：住生活基本計画（全国計画）、2011.3
- 5) 国土交通省：平成25年度マンション総合調査結果報告書、2014.4
- 6) 日本規格協会：JIS A 0203 コンクリート用語、p.10、2014
- 7) 建設省：総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」報告書第一編、1988.11
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説、2004

第 2 章
塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する
既往の研究

第2章

塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する既往の研究

本章では、コンクリート中における塩化物イオンの浸透・拡散性状を検討するにあたり、関連学会における耐久性に関する設計・評価手法および規準化された塩化物イオンの浸透促進試験方法について調査を行った。また、既往の研究から、塩化物イオンの浸透・拡散性状、浸透促進試験における試験結果におよぼす各種試験条件の影響および促進試験条件と実環境との関係について調査を行った。これらの調査より、塩化物イオンの浸透・拡散性状の評価に関する課題の現状を把握し、本研究の位置づけを明らかにすることとした。

2.1 関連学会における規定

2.1.1 日本建築学会

日本建築学会では、建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS 5 と略記）において、「海水の作用を受けるコンクリート」として海水に接するコンクリートおよび海水のしぶきや潮風などを受けるおそれのあるコンクリートについて、その品質や設計、施工に関して規定し、以下のように改定されてきた。

JASS 5 が発刊された昭和 28 年（1953 年）版¹⁾では、14 節「その他のコンクリート」において「海水中のコンクリート」として、常時海水に接するコンクリートを対象とし、水密コンクリートやかぶり厚さを増すこととしていた。その後、昭和 40 年（1965 年）版²⁾では 14 節「海水の作用を受けるコンクリート」として、海水に接するコンクリートに加えて海岸付近で海のしぶきや潮風などを受けおそれのあるコンクリートへと適用範囲を拡大し、水セメント比の上限やかぶり厚さを増すこととしていた。昭和 44 年（1969 年）版³⁾からは昭和 40 年版の内容を引き継ぎつつ、15 節「特殊なコンクリート」の中に「海水の作用を受けるコンクリート」の項を設けている。1986 年（昭和 61 年）版⁴⁾からは再び 22 節「海水の作用を受けるコンクリート」として章立てされ、海水作用を表 2-1 に示す 3 区分とし、それぞれの区分に応じた水セメント比やかぶり厚さなどを規定していた。なお、これらの区分はいずれも直接コンクリートに海水が接する状況であり、潮風に含まれる海塩粒子（飛来塩分）の影響を受けるおそれがある箇所は、2 章「コンクリートの種類および品質」で鉄筋に防錆処置を行うこととしている。また、1997 年（平成 9 年）版⁵⁾では、計画供用期間の級の導入にあたり、海水作用区分と計画供用期間の級に応じた最小かぶり厚さが規定された。

表 2-1 適用箇所の区分⁴⁾

海水作用区分	適用箇所
A	潮の干満および常時波しぶきを受ける部分
B	常時海中にある部分
C	時おり波しぶきを受ける部分

2009年(平成21年)版⁶⁾では、25節「海水の作用を受けるコンクリート」として大幅な見直しが行われ、現行の2015年(平成27年)版⁷⁾においてもこの内容が踏襲されている。ここでは、海岸地域に建設する海水に接する部分に使用するコンクリート、直接波しぶきを受ける部分に使用するコンクリートおよび飛来塩分の影響を受ける部分に使用するコンクリートに対して、飛来塩分量により表2-2に示す塩害環境の区分を設定している。

また、それぞれの区分および計画供用期間の級に応じて最小かぶり厚さ、耐久設計基準強度および水セメント比の最大値などをそれぞれ表2-3のように規定している。さらに、表2-3に示す以外の塩害環境の区分と供用期間の級の組合せ(重塩害環境、塩害環境で標準、長期、超長期および準塩害環境で超長期)となる場合には、建築物の計画供用期間中に著しい劣化が生じないか、または容易に維持管理ができる構造になっているものとする事とされている。

表 2-2 飛来塩分量による塩害環境の区分^{7)より作成)}

塩害環境の区分	飛来塩分量*1 (NaCl)	地域と立地条件の例*2
重塩害環境	25mddを超える	<ul style="list-style-type: none"> 海水に接する部分で潮の干満を受ける部分、および波しぶきを受ける部分 日本海側、沖縄県全域、伊豆諸島・奄美諸島等の離島部などの地域で、汀線から20m程度の範囲
塩害環境	13mddを超え 25mdd以下	<ul style="list-style-type: none"> 日本海側、沖縄県全域、伊豆諸島・奄美諸島等の離島部などの地域で、汀線から20~70m程度の範囲 東北地方の太平洋側の地域で、汀線から20m程度の範囲
準塩害環境	4mdd以上 13mdd以下	<ul style="list-style-type: none"> 海水に接する部分で常時海中にある部分 日本海側、沖縄県全域、伊豆諸島・奄美諸島等の離島部などの地域で、汀線から70~150m程度の範囲 東北地方の太平洋側の地域で、汀線から20~100m程度の範囲 オホーツク海側、太平洋側、九州地方の東シナ海側の地域で、汀線から50m程度の範囲

*1 mddは、飛来塩分量の単位でmg/dm²/dayの意味で、1dm=0.1mである。

*2 建築物が遮蔽物で囲まれて海に面していない場合、重塩害環境は塩害環境に、塩害環境は準塩害環境に、準塩害環境は海水の作用を受けるコンクリートの対象外と考えてよい。

表 2-3 最小かぶり厚さ、耐久設計基準強度および水セメント比の最大値^{7より作成}

塩害環境の 区分	計画供用 期間の級	最小かぶり 厚さ (mm)	耐久設計基準強度 (N/mm ²)		水セメント比の最大値 (%)	
			普通ポルトランド セメント	高炉セメント B種	普通ポルトランド セメント	高炉セメント B種
塩害環境	短期	50	36	33	45	50
		60	33	30		
準塩害環境	短期	40	30	24	55	60
		50*1	24*1	21*1		
	標準	40	36	33		
		50	33	30		
		60*1	30*1	24*1		
	長期	50	36	33		
60*1		33*1	30*1			

*1 海中にある部分に適用する。(地上部にも適用可能)

これらの規定は、水セメント比を小さくすることによるコンクリートの組織の緻密化やかぶり厚さを大きくすることで塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透する時間を長くすることにより耐久性を確保することを目的としている。そのため、コンクリート中の塩化物イオンの浸透・拡散性状は式(2-1)を用いて以下のように評価することとされている。

$$C = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad \text{式 (2-1)}$$

ここに、t : 経過時間 (年)

x : コンクリート表面からの距離 (cm)

C : 距離 x (cm) における経過時間 t (年) での塩化物イオン量 (kg/m³)

C₀ : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)

D : 見かけの拡散係数 (cm²/年)

erf() : 誤差関数

このうち、拡散係数は式(2-2)および式(2-3)により算出された値を、コンクリート表面の塩化物イオン量は飛来塩分量から求められる推定式により算出された表2-4に示す値をそれぞれ用いている。

- ・普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$D = 0.65 \times 10^{(-3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5)} \quad \text{式 (2-2)}$$

- ・高炉セメントを使用する場合

$$D = 10^{(-3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2)} \quad \text{式 (2-3)}$$

ここに、D : 見かけの拡散係数 (cm²/年)

W/C : 水セメント (結合材) 比

表 2-4 各塩害環境区分のコンクリート表面の塩化物イオン量 C₀ 値 (Cl⁻:kg/m³)⁷⁾

重塩害環境	塩害環境	準塩害環境
11.0	6.9	3.6

また、コンクリート中の鋼材が腐食するときの塩化物イオン量、いわゆる腐食発生限界塩化物イオン量は、1.2~2.4kg/m³と言われており、一般に 1.2kg/m³が採用されている。しかし、JASS 5 では既存建築物の調査でも腐食限界塩化物イオン量として用いられる 1.2kg/m³を大きく上回っても鉄筋が腐食していないとの事例⁸⁾もあることから、かぶり厚さや水セメント比によって異なるとして提案⁹⁾された表 2-5 を用いて、検討を行っている。

表 2-5 W/C と腐食限界塩化物イオン量 (kg/m³) の関係⁷⁾

W/C=65%	W/C=55%	W/C=45%
1.6	2.5	3.0

これらの評価手法を用いて検討した結果、塩害環境ではかぶり厚さと耐久設計基準強度の組み合わせで満足できる結果となるのは、表 2-3 で示したように計画供用期間の級が短期の場合のみであり、標準や長期とするためには表面被覆材の使用などを検討する必要がある。また、重塩害地域についても同様にかぶり厚さと耐久設計基準強度の組み合わせでは十分な耐久性を確保することが難しい。そのため、これらの対処方法については表面被覆材の使用、防せい (錆) 鉄筋・耐食鉄筋の使用、その他の鉄筋腐食抑制方法を組合せて用いることを特記によるとしている。また、解説には各種塗膜仕上材による遮塩性能について行われた実験結果¹⁰⁾が記載されている。

その他、材料、設計かぶり厚さ、施工および品質管理・検査についてはコンクリートに海水の作用を受けるおそれのある場合について、設計かぶり厚さを最小かぶり厚さ+15mm とすることや許容ひび割れ幅を 0.2mm とするといった、一般仕様のコンクリートよりも厳しい規定が設けられている。

2.1.2 土木学会

土木学会では、コンクリート標準示方書（以下、示方書と略記）において、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材の腐食として、外来型の塩害に対する塩化物イオンの浸透・拡散性状について、その設計・評価手法が規定されている。

示方書は、平成11年（2000年）版の〔施工編〕の改訂より、これまでの仕様規定型から性能照査型へと移行を始め、2002年までに各編が性能照査型へと移行した。塩化物イオンの影響に関する照査は、2002年に制定された〔施工編〕¹¹⁾では2.3「塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査」および6.4.4「塩化物イオンに対する拡散係数の照査」に記されている。ここでは、塩化物イオンの侵入にはコンクリートに曲げひび割れが生じている場合のひび割れ幅の影響を考慮し、曲げひび割れ幅が許容ひび割れ幅以下に抑えられた場合には、コンクリートの品質とひび割れ幅の影響を考慮して拡散係数を評価するとしている。また、コンクリートの塩化物イオンの侵入に対する抵抗性を照査するのに必要な拡散係数の例として、水セメント比との関係式が以下のように見直された。これは、実構造物から得られたデータから求められた平成11年版までの関係式に対し、低水セメント比のコンクリートを含めて更にデータの収集が図られ検討されている（図2-1および図2-2）。なお、これらの関係式は前述したJASS5における水セメント比と拡散係数の関係式（式(2-2)および式(2-3)）のもととなったものである。

- ・普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad \text{式 (2-4)}$$

- ・混和材料（BS、SF）を使用する場合

$$\log D = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad \text{式 (2-5)}$$

ここに、D : コンクリートの拡散係数 (cm²/年)

W/C : 水セメント（結合材）比 (%)

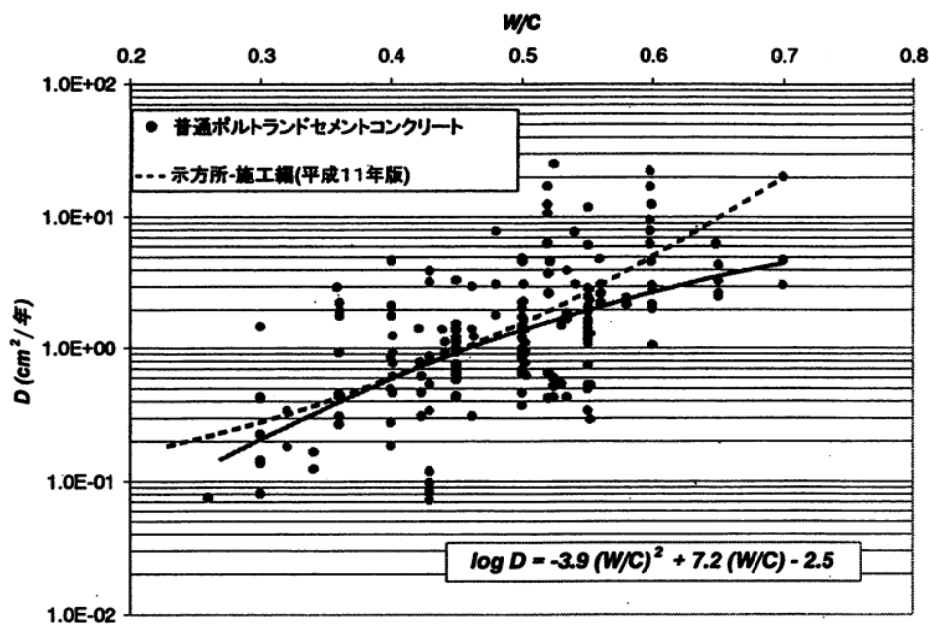


図 2-1 普通ポルトランドセメントを用いた場合の水セメント比と塩化物イオンの拡散係数の関係¹²⁾

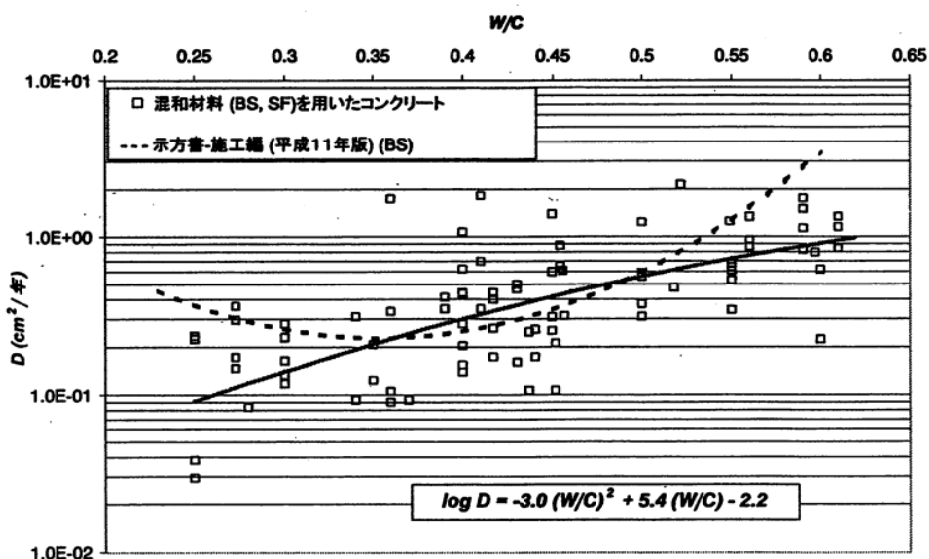


図 2-2 混和材料(BS、SF)を用いた場合の水セメント比と塩化物イオンの拡散係数の関係¹²⁾

2007年の示方書の改訂では、これまでの〔構造型能照査編〕と〔耐震性能照査編〕に〔施工編〕の耐久性照査に関する項を併せて〔設計編〕として制定された。そのため、塩害に対する照査は2007年制定の「設計編：本編」¹³⁾の8章「耐久性に関する照査」に記され、これまで地域によらず規定されていたコンクリート表面の塩化物イオン濃度（ C_0 ）の値が環境作用として太平洋側と日本海側といった地域により飛来塩分量が異なることを考慮して見直された。

現行の示方書である2012年制定版¹⁴⁾〔設計編：本編〕では8章に、〔設計編：標準〕には2編にそ

れぞれ「耐久性に関する照査」として、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査を以下のよう
に規定している。

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査は、鋼材に腐食が生じても構造物が所要の性能を
有していれば供用上の問題がないと判断されるが、鋼材の腐食発生から腐食ひび割れが発生するまで
の期間を精度よく予測することが難しい現状から、鋼材の腐食の開始（不動態皮膜が破壊された時点）
を照査対象の限界状態としている。そのため、式（2-6）により鋼材位置における塩化物イオン濃度
について確認することを原則としている。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad \text{式 (2-6)}$$

ここに、 γ_i : 構造物係数（一般に 1.0～1.1 としよ）

C_{lim} : 鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m³)

C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 (kg/m³)

このうち、 C_{lim} はあらかじめ塩化物を混入した供試体による促進試験などでは 0.3～0.6kg/m³ であり、
実環境での暴露実験では 1.2～2.4kg/m³ とされ、広い範囲で報告されている。これは、試験方法や試
験条件の違いによると考えられ、また、水セメント比が小さいほど C_{lim} は大きく、セメントの種類に
よっても異なるとされている。そのため、類似の構造物の実測結果や試験結果により定めてよく、そ
れらによらない場合、式（2-7）～式（2-10）を用いてよとされている。ただし、水セメント比の範
囲は 0.30～0.55 とし、凍結融解作用を受ける場合にはこれらの小さな値とするのがよとされている。

- ・普通ポルトランドセメントを用いた場合

$$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad \text{式 (2-7)}$$

- ・高炉セメント B 種相当、フライアッシュセメント B 種相当を用いた場合

$$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1 \quad \text{式 (2-8)}$$

- ・低熱ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントを用いた場合

$$C_{lim} = -2.2(W/C) + 2.6 \quad \text{式 (2-9)}$$

- ・シリカフェームを用いた場合

$$C_{lim} = 1.20 \quad \text{式 (2-10)}$$

ここに、W/C : 水セメント（結合材）比

また、 C_d は式(2-11)に示す Fick の拡散方程式の解と初期塩化物イオン濃度を考慮した式をもとに推定してよいこととしている。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) + C_i \quad \text{式 (2-11)}$$

ここに、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)

c_d : 耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値 (mm) (施工誤差をあらかじめ考慮して式(2-12)で求めることとする)

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数 (年) (一般に、耐用年数 100 年を上限とする)

γ_{cl} : C_d のばらつきを考慮した安全係数 (一般に、1.3 としてよい。ただし、高流動コンクリートを用いる場合は 1.1 としてよい)

x : コンクリート表面からの距離 (cm)

D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$) (一般に、式 2-13 により算定してよい)

C_i : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3) (一般に、 $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ としてよい)

$\operatorname{erf}(s)$: 誤差関数、 $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$

$$c_d = c - \Delta c_e \quad \text{式 (2-12)}$$

ここに、 c : かぶり (mm)

Δc_e : 施工誤差 (mm)

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \lambda \cdot \left(\frac{w}{l} \right) \cdot D_0 \quad \text{式 (2-13)}$$

ここに、 γ_c : コンクリートの材料係数 (一般に 1.0 としてよい。ただし、上面の部位に関しては 1.3 とするのがよい)

D_k : コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

λ : ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数 (一般に、1.5 としてよい)

D_0 : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数 ($\text{cm}^2/\text{年}$) (一般に、 $400 \text{ cm}^2/\text{年}$ としてよい)

w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比 (一般に、式(2-14)で求めてよい)

$$\frac{l}{w} = \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} \left(\text{または} \frac{\sigma_{pe}}{E_p} \right) + \epsilon'_{csd} \right) \quad \text{式 (2-14)}$$

ここに、 σ_{se} 、 σ_{pe} 、 ϵ'_{csd} の定義は、ひび割れ幅の設計応答値の算定に用いた値とする

以上のような拡散方程式を用いて耐久性に関する照査を行う場合、拡散方程式の特性値 (D_k) およびコンクリート表面塩化物イオン濃度 (C_0) は、以下により求めてもよい。

(1) コンクリートの塩化物イオン拡散係数の設定

- (i) 水セメント比と見掛けの拡散係数との関係式 (式 (2-15) ~式 (2-18))
- (ii) 電気泳動法や浸せき法を用いた室内実験または自然暴露実験
- (iii) 実構造物調査

このうち、(i) の関係式はコンクリートの使用材料および水セメント比から予測する式である。また、(ii) の室内実験方法については 2.2 節に詳細を示す。

- ・ 普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log D_k = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad \text{式 (2-15)}$$

- ・ 低熱ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log D_k = 3.5(W/C) - 1.8 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad \text{式 (2-16)}$$

- ・ 高炉セメント B 種相当、シリカフェームを使用する場合

$$\log D_k = 3.2(W/C) - 2.4 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad \text{式 (2-17)}$$

- ・ フライアッシュセメント B 種相当を使用する場合

$$\log D_k = 3.0(W/C) - 1.9 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad \text{式 (2-18)}$$

ここに、 D_k : 見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

W/C : 水セメント (結合材) 比

これらの関係式は電気泳動法により得られた実験結果から導かれたものである¹⁵⁾。また、2007年版まで採用されていた関係式 (式 (2-4) および式 (2-5)) では、水セメント比の二次関数として定式化していたが、理論的な関係が明確でないこと、見掛けの拡散係数の対数を取ることから算定値に大きな差がないことを考慮し、簡便な一次関数として定式化された。

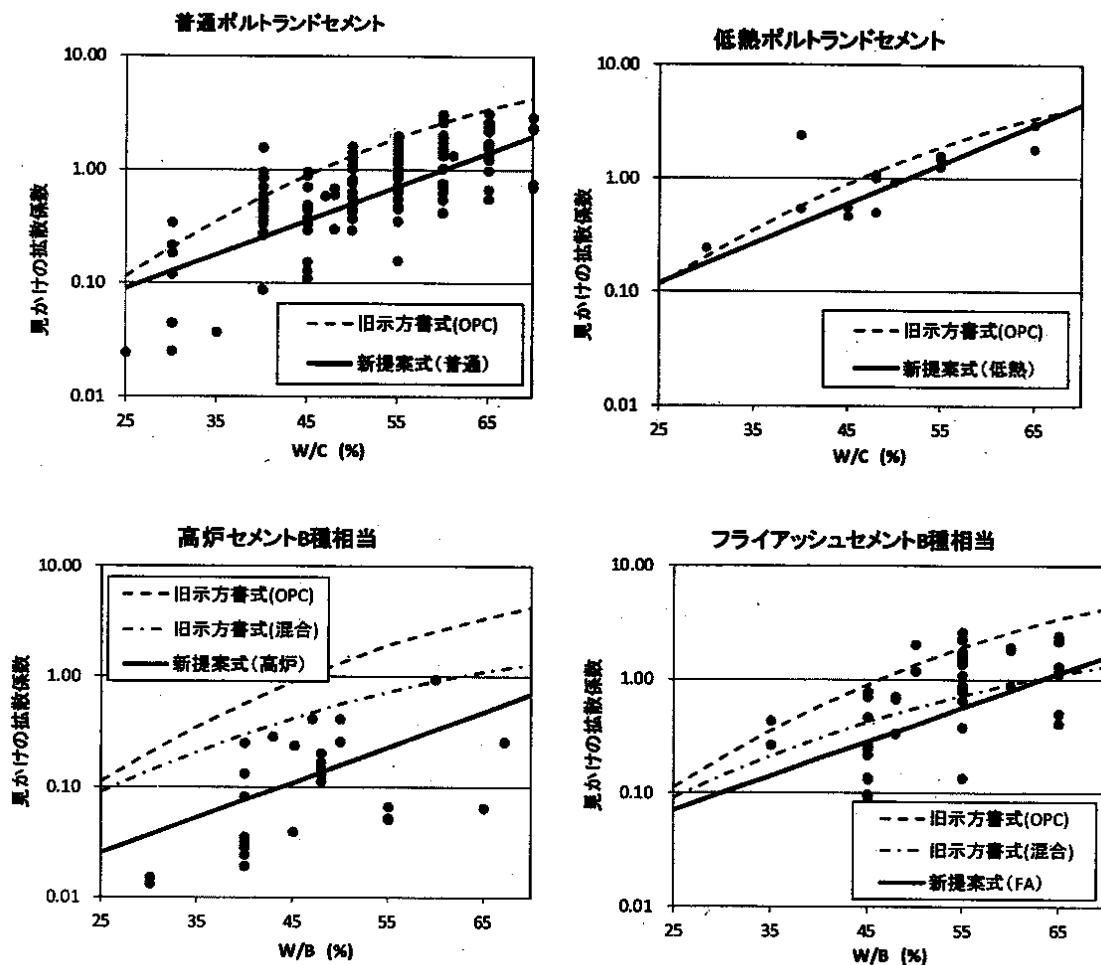


図 2-3 拡散係数と水セメント比の関係¹⁵⁾

(2) コンクリート表面塩化物イオン濃度

対象地域の飛来塩分量に応じて設定することとし、表 2-6 により求めてもよい。また、建設地点近傍において、飛来塩分補集箱（土研式タンク法）やドライガーゼ法（JIS Z 2382）などにより信頼性の高い飛来塩分データが利用可能な場合、式（2-19）を用いて求めてもよい。

表 2-6 コンクリート表面塩化物イオン濃度 (kg/m³) の関係¹⁴⁾

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

$$C_0 = -0.016 \times C_{ab}^2 + C_{ab} + 1.7 \quad (C_{ab} \leq 30.0) \quad \text{式 (2-19)}$$

ここに、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_{ab} : 飛来塩分量 (mdd 、 $\text{mg/dm}^2/\text{day}$)

2.2 塩化物イオンの浸透促進試験方法

硬化コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状を早期（短期）に評価するための促進試験方法は、土木学会で JSCE-G 571¹⁶⁾「電気泳動法によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」および JSCE-G 572¹⁷⁾「浸せきによるコンクリート中の見かけの拡散係数試験方法（案）」がそれぞれ示されている。これらは、いずれも 2003 年に制定されたものであり、2.1.2 項に述べたように土木学会のコンクリート標準示方書が 2002 年制定版より仕様規定型から性能照査型に移行したことを受けたものである。すなわち、塩化物イオンのコンクリート中への侵入に伴う鉄筋腐食に関する照査を行うためにはコンクリートの配合設計にあたり見掛けの拡散係数の予測が求められることによる。以下にこれらの試験方法の概要を示す。

また、土木学会以外、例えば日本工業規格や日本建築学会、コンクリート工学会といったその他の機関には、塩化物イオンの浸透・拡散性状を評価するための促進試験方法に関する規定・規準はない。

2.2.1 JSCE-G 571「電気泳動法によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」

(1) 試験概要¹⁸⁾

本試験方法は、電場に電圧を印加することによってイオンの移動が加速されることを利用して、短時間でコンクリート中の塩化物イオン拡散係数を測定する試験方法である。しかし、本試験で求められる拡散係数は実効拡散係数と呼ばれるものである。そのため、示方書で規定され、耐久性照査に用いる見掛けの拡散係数とは異なり、実効拡散係数を見掛けの拡散係数に変換する方法については付属書に示されている。

また、電気泳動現象（イオンがコンクリートの細孔溶液中を、電位勾配を駆動力として移動する現象）と拡散現象とでは、①細孔壁面における電荷の影響、②塩化物イオン以外のイオンの移動による影響、③電氣的に高められたイオンの移動速度の影響などにより相違が生じる。したがって、電気泳動と拡散とでは塩化物イオンの移動の雰囲気は異なると予想され、これらの影響による相違については理論的な説明は十分にされていない。一方で、浸せき試験のような拡散現象を評価する試験結果と電気泳動法による試験結果が、比較的類似した値になるとの報告も多く、上記の影響は小さいのではとの見方もある。このように、電気泳動現象と拡散現象との相違を十分に理解し、両者の関係にどこまでの理論的な裏付けがなされているかを認識しておくことが重要となる。

なお、本試験は塩化物イオンの浸透抵抗性が高いコンクリートでは、浸せき方法による促進試験よりも試験期間が著しく短くなる。そのため、高耐久性性能を有する新素材などの試験に有効であるが、鋼繊維など伝導性の材料を含むコンクリートには適用できない。

(2) 試験方法¹⁶⁾

図 2-4 に示すように、塩化物イオンを含む溶液と接しているコンクリート供試体の両側に直流の定電圧を印加すると、負電荷を持つ陰極側の塩化物イオンはコンクリート中の細孔中を通過して陽極側へ電気泳動していく。そして、陽極側への塩化物イオンの移動流束が一定に達したとき、電気泳動は定常状態にあるとみなし、この時の移動流束を測定する。定常状態における移動流束は、コンクリートの細孔構造や細孔溶液中でのイオンの移動のし易さを反映しており、電気化学法則（Nernst-plank の式）を適用して実効拡散係数を計算できる。

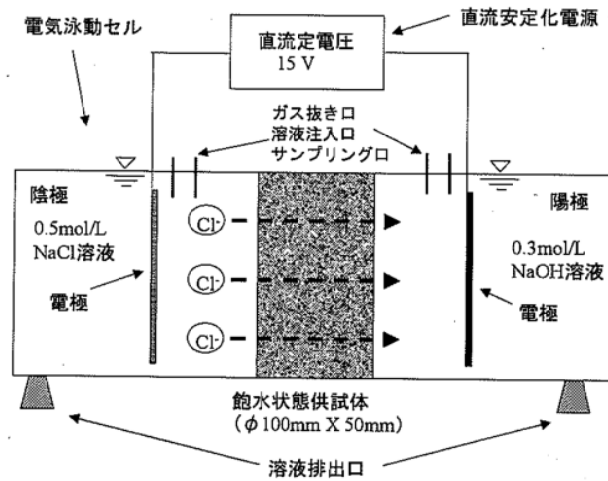


図 2-4 電気泳動試験装置の概略¹⁸⁾

試験は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室内で行い、直流安定電源で直流定電圧 15V を電極間へ印加し、陽極側への塩化物イオンの移動流束が一定になる定常状態まで継続する。通常、最低 5 回の測定でいずれも塩化物イオンの移動流束がほぼ一定と認められた場合に、定常状態と判断して実験を終了できる。

電気泳動試験中は、所定の間隔（毎日を標準とする）で電流値、供試体面の電位差、溶液温度ならびに陰極側および陽極側の塩化物イオン濃度を測定する。また、試験終了後は、供試体の質量を測定する。

定常状態における塩化物イオンの移動流束 (J_{Cl^-}) は、式 (2-19) で算出される各測定間における移動流束 ($J_{\text{Cl}^-(t)}$) が通常、最低 5 回の測定でほぼ一定の値とみなされる時に、それらの平均値とする。また、求められた塩化物イオンの移動流束から、式 (2-20) を用いて塩化物イオンの実効拡散係数を算出する。

$$J_{Cl(t)} = \frac{V_{(t)}^{II} \Delta C_{Cl(t)}^{II}}{A \Delta t} \quad \text{式 (2-20)}$$

ここに、 $J_{Cl(t)}$: 塩化物イオンの各測定間における流束 ($\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$)

$V_{(t)}^{II}$: 塩化物イオン濃度測定時の陽極側の溶液体積 (L)

A : 供試体断面積 (cm^2)

$\Delta C_{Cl(t)}^{II} / \Delta t$: 各測定間における陽極側塩化物イオン濃度の増加率 ($(\text{mol}/\text{L})/\text{年}$)

$$D_e = \frac{J_{Cl} R T L}{|Z_{Cl}| F C_{Cl} (\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad \text{式 (2-21)}$$

ここに、 D_e : 実効拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

R : 気体定数 ($8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

K : 絶対温度測定値 (K)

Z_{Cl} : 塩化物イオンの電化 ($= -1$)

F : フェデラー定数 ($96,500 \text{ C}/\text{mol}$)

C_{Cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値 (mol/L)

$\Delta E - \Delta E_c$: 供試体表面間の測定電位 (V)

L : 供試体厚さ (mm)

実効拡散係数から見掛けの拡散係数への換算は式 (2-22) により求める。このうち、 k_1 および k_2 はセメントの種類やセメント水和物量に影響を受ける係数で、一般に、固定化などによってコンクリート中を自由に拡散する塩化物イオンの濃度と拡散する塩化物イオンの濃度が線形関係とみなされる場合には、 $k_1 \cdot k_2$ は式 (2-23) で表せるとしてよい。また、図 2-5 は電気泳動試験と同様のコンクリートを 1 年以上塩分環境に浸せきさせた結果¹⁶⁾ から得られた $k_1 \cdot k_2$ の関係図で、実効拡散係数から見掛けの拡散係数への算定にあたり、参考とすることができる。

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad \text{式 (2-22)}$$

ここに、 D_{ae} : 電気泳動試験による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

D_e : 電気泳動試験による実効拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

k_1 : コンクリート表面におけるコンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いにかかわる係数

k_2 : セメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象に係わる係数

$$k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(1 - \frac{C_b}{C_{total}}\right) \quad \text{式 (2-23)}$$

ここに、 ε : コンクリートの空隙率 ($\varepsilon = V_{\text{pore}}/V_C$)

V_{pore} : コンクリート中の空隙容積

V_C : コンクリートの容積

C_b : コンクリート中で固定化された塩化物イオン濃度

C_{total} : コンクリート中の全塩化物イオンの濃度

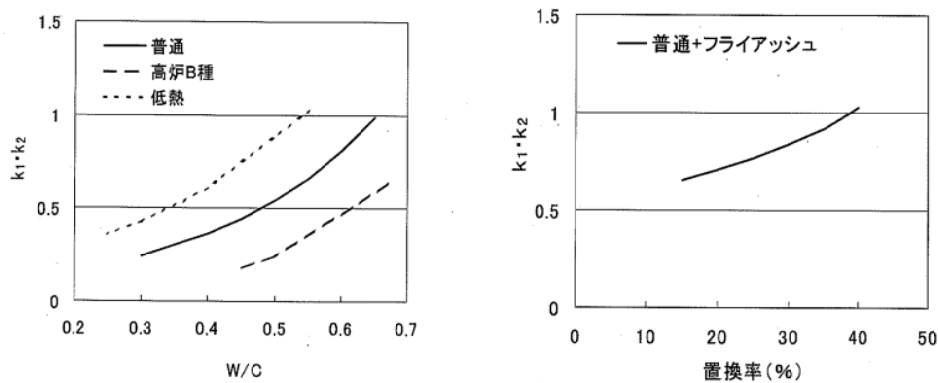


図 2-5 $k_1 \cdot k_2$ の関係図(参考)¹⁶⁾

2.2.2 JSCE-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」

(1) 試験概要¹⁹⁾

本試験は、コンクリートを塩化ナトリウム水溶液に浸せきすることにより、示方書による耐久性照査を行う際に用いる見掛けの拡散係数を直接求めるものである。見掛けの拡散係数は、種々の実構造物や自然暴露供試体から得られたデータにより、水セメント比との関係から回帰分析して得られた式から予測するのが一般的である。しかし、この回帰式には材料の種類、配合だけでなく環境要因や施工要因などがすべて包含されている。そのため、ある程度の実状に即した値を予測できるものの、そのばらつきは大きい。そこで、実際に構造物に用いるコンクリートと同等のコンクリートを用いて、試験により見掛けの拡散係数を求めることで、より合理的かつ信頼性の高い照査が可能になると考えられる。

また、本試験では浸せき溶液として、海水中の塩化物イオン濃度の約 3 倍に相当する濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液を用いる。そのため、海水環境をそのまま再現したものとはなっていない。しかし、飛沫帯などの乾湿繰返しを受ける環境では、コンクリート表層部の細孔溶液中の塩化物イオンは 10% の塩化ナトリウム水溶液相当に濃縮されている状態も測定されていることから、本試験ではこの濃縮現象による影響をあらかじめ考慮したものとなっている。

(2) 試験方法¹⁷⁾

試験体はφ100×200mmの円柱供試体から、ブリーディングなどの材料分離の影響を除くため、上下25mmを除去したφ100×150mmとし、このうち、供試体作製時のコンクリート打込み面を試験面とする。塩水への浸せきは、養生などの前処理を行った試験体について、温度20±2℃、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に所定の期間、試験面が常時溶液に接するようにする。なお、浸せき期間は最低でも91日間とし、コンクリートの種類などにより表2-7を目安とすることができる。

表 2-7 塩化物イオンの浸透深さの目安 (mm)¹⁷⁾

セメントの種類	W/C(%)	浸せき期間 (ヵ月)			
		3	6	9	12
普通ポルトランド セメント	40	10~15	20~25	30~35	40~45
	45	20~25	30~35	40~45	50~55
	50	30~35	40~45	50~55	60以上
	60	40~45	55~60	60以上	
高炉セメント	40	10~15	15~20	20~25	25~30
	45	15~20	20~25	25~30	30~35
	50	20~25	25~30	30~35	35~40
	60	25~30	30~35	40~45	50~55

所定の期間、浸せきを行った試験体はJIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」またはJSCE-G 574「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法」に準拠して全塩化物イオン濃度を測定する。

供試体ごとに各深さの位置で測定された全塩化物イオンの値を、式(2-24)を用いて回帰分析し、浸せき試験によるコンクリート表面の全塩化物イオン(C_{a0})ならびに塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D_{ap})を同時に求める。

$$C(x, t) - C_i = C_{a0} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right) \quad \text{式 (2-24)}$$

ここに、 x : 暴露面から全塩化物イオンを測定した個所までの距離 (mm)

t : 浸せき期間 (年)

$C(x,t)$: 距離 x (mm)、浸せき期間 t (年) において測定されたコンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオン量 (%)

C_{a0} : 浸せき試験によるコンクリート表面の塩化物イオン量 (%)

C_i : 初期に含有されるコンクリート単位質量あたりの全塩化物イオン (%)

D_{ap} : 浸せき試験による見掛けの拡散係数 (cm²/年)

erf : 誤差関数 ただし、 $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$

2.3 コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する既往の研究

前項までは、塩化物イオンの浸透・拡散性状の評価に関する関連学会による規定および規準化された塩化物イオンの浸透促進試験方法について述べた。本節では、既往の研究結果から、塩化物イオンの浸透・拡散性状の評価における精度の向上を目的とし、これらの評価手法や試験方法における問題点および課題を抽出するため、文献の整理を行った。

2.3.1 塩化物イオンの浸透・拡散性状

(1) コンクリート中への塩化物イオンの浸透

コンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する解析手法には、Fick の拡散方程式を解く場合に外部環境とコンクリート表面との境界条件が大きく影響する。2.1 節で述べた関連学会の規定ではいずれも、この境界条件はコンクリート表面の塩化物イオン量 (C_0) として一定の値を用いて耐久性の評価を行うとしている。しかし、コンクリート中への塩化物イオンの浸透について、梶田ら²⁰⁾ は、塩化物イオンの浸透促進実験の結果から、表面塩分濃度が時間によって変化するような境界条件を設定することで、塩分の実際の状況をよくシミュレートできると報告している。また、同様に経過時間に応じてコンクリート表面の塩化物イオン量が増加するとの実験および調査結果の報告は多数見られ、その解析モデルについても検討されている。

丸屋ら²¹⁾ はコンクリート中の全塩化物を図 2-6 に示すように固定塩化物と自由塩化物に分類している。このうち、固定塩化物はコンクリート中を移動しない塩化物、すなわちフリーデル氏塩などとして固相にある固相塩化物とカルシウムアルミネート水和物の層間などに吸着しているとされる吸着塩化物とし、一方で自由塩化物はコンクリート中を移動する塩化物であり液相の塩化物イオンに相当するとし、自由塩化分が可溶性塩化分として測定される一部であるとしている。

また、可溶性塩化物量が自由塩化物量にある程度相当していることを前提に、表層における可溶性塩化物量とコンクリートの空隙が海水で飽水状態にあるとして算出した自由塩化物量と比較すると、前者が後者よりもはるかに大きくなっていることが実構造物の調査結果から明らかになっている。さらに、試験体中の液相の塩化物イオン濃度が浸漬液の塩化物イオン濃度よりも高くなる現象も浸透促進実験より明らかにされている。しかし、このような場合でも浸漬液の塩化物イオン濃度よりも表層の塩化物イオン濃度が瞬間的に高くなることは考えられない。

そのため、時間とともに表層付近で塩化物イオン濃度の凝縮が起きていると推察しており、コンクリート中での塩化物イオンの移動を解析するにあたり、表層部における濃縮現象をモデル化している。このモデルでは、図 2-7 に示すように濃度拡散（濃度差を駆動力とする拡散）と擬似吸着（正の電荷

に陰イオンである塩化物イオンが引き寄せられることによる移動)によりコンクリート表層での塩化物イオンの濃縮現象を表しており、式(2-25)のような関数として示されている。

このモデルについて実験結果から検証し、表層の自由塩化物量が同一であれば、図2-8に示すとおり、モルタルおよびコンクリートの試験体の表層部における塩化物量は経過時間に伴い増加し、やがてほとんど変化しなくなる。また、自由塩化物量は浸漬液の自由塩化物量よりも大きい値になっている。なお、自由塩化物量の実測値とは可溶性塩化物量の実測値から換算した値である。

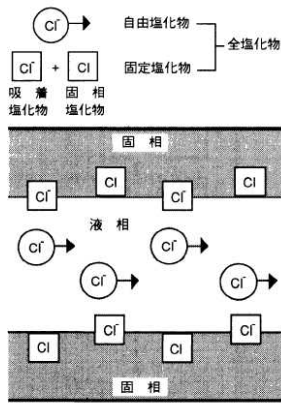


図2-6 コンクリート中の全塩化物イオンの分類²¹⁾

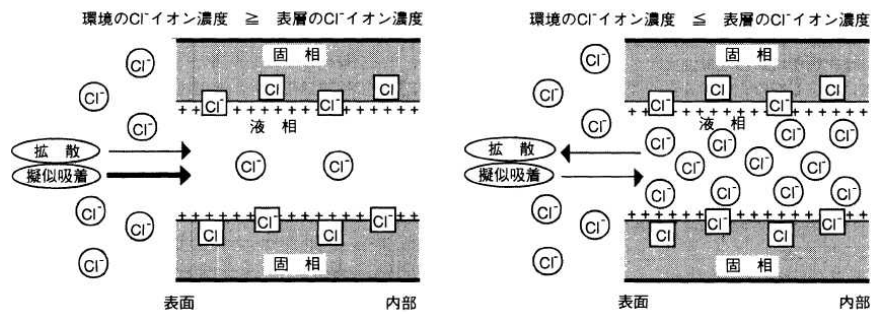


図2-7 コンクリート表層部における塩化物イオンの濃縮機構²⁰⁾

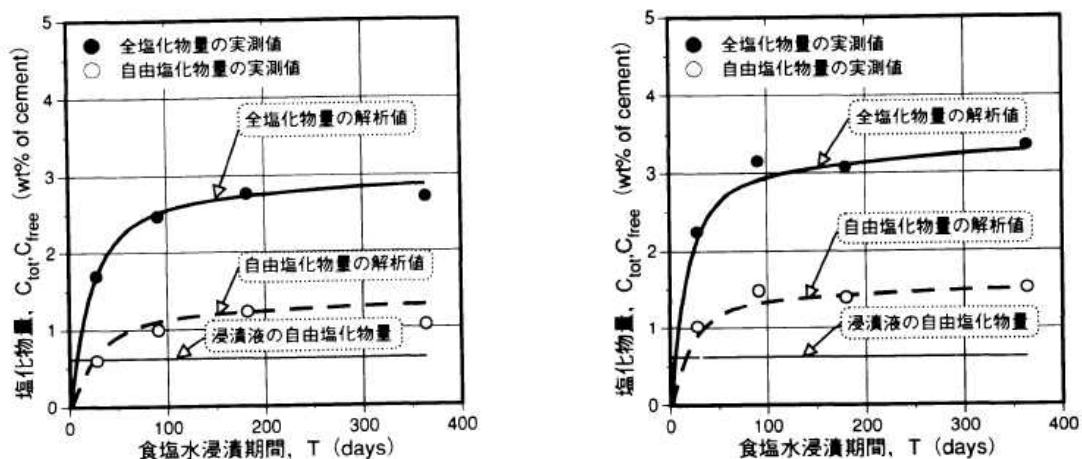
$$F'_c = F'_c + S_c(C_{free}) \quad \text{式(2-25)}$$

ここに、 F'_c : 擬似吸着も考慮するときのコンクリート表面における塩化物イオンの拡散流束 (mol/cm²/day)

F'_c : 濃度拡散のみを考慮するときのコンクリート表面における塩化物イオンの拡散流束 (mol/cm²/day)

S_c : 擬似吸着のみ考慮するときのコンクリート表面における塩化物イオンの拡散流束 (mol/cm²/day)

C_{free} : コンクリート表層における自由塩化物量 (wt% of cement)



a) 普通ポルトランドセメント：モルタル b) 普通ポルトランドセメント：コンクリート

図 2-8 表層部における塩化物量の変化²¹⁾

また、飛来塩化物イオン量とコンクリート中に浸透する塩化物イオン量との関係について、山田ら²²⁾はコンクリート表面に付着した塩化物イオンがすべてコンクリート中に浸透するのではないとしてモデルの解析を行っている。このモデルでは、図 2-9 に示すようにコンクリート内部へ浸透する塩化物イオンは、コンクリート表面で細孔入り口面積に相当する部分（有効面積）に到達し、吸着することとしている。この関係について、未知数となる値を暴露 12 年および暴露 7 年の実大暴露実験の結果から同定し、図 2-10 に示すように飛来塩化物イオン量がある程度大きくなると、浸透塩化物イオン量の増加は頭打ちとなることを示している。また、コンクリート表面における塩化物イオン量の洗い出し作用を考慮し、塩化物イオンのフラックス（流束）を直接与える境界条件として式 (2-26) を定式化している。なお、この式では上記のほか水セメント比の影響および仕上材の効果も考慮できる境界条件となっている。

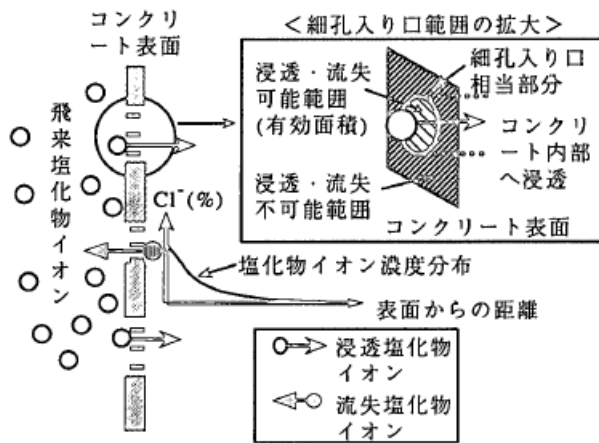


図 2-9 コンクリート表面モデル²²⁾

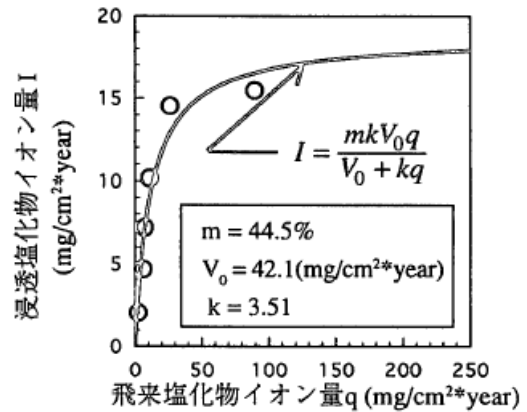


図 2-10 浸透塩化物イオン量と
飛来塩化物イオン量の関係²²⁾

$$I_t = \frac{mkV_0q}{(V_0+kq)} - \alpha mC_0 \quad \text{式 (2-26)}$$

- ここに、 I_t : 洗い出し作用を考慮した浸透塩化物イオン量 (mg/cm²*sec)
 m : 飽和面積率 (コンクリート単位表面積中の全ての有効面積の割合)
 k : 比例定数
 V_0 : 単位時間当たりの吸着した塩化物イオンの離脱量 (mg/cm²*sec)
 q : 飛来塩化物イオン量 (mg/cm²*sec)
 α : 流失量 (mg/cm²*sec)
 C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (mg/cm²*sec)

(2) 仕上材による塩化物イオンの浸透抑制効果

塩化物イオンはコンクリート表面に付着し、コンクリート中へと浸透するため、コンクリート表面を仕上材により保護することは、塩化物イオンの浸透抑制に効果的である。そのため、2.1.1項でも述べたように JASS 5 ではかぶり厚さと耐久設計基準強度の組合せでは十分な耐久性を確保することが難しい場合に、表面被覆材の使用、防せい（錆）鉄筋・耐食鉄筋の使用、その他の鉄筋腐食抑制方法を組合せて用いることを特記によるとしている。通常の建築物においては、ほとんどの場合、外装に表面仕上げが施されることから、仕上材による塩化物イオンの浸透抑制が期待されるが、その効果（遮塩性能）に関する既往の研究は少ない。

池永ら¹⁰⁾は複層仕上塗材および、屋上用塗膜防水材を対象として仕上材料やメーカ、上塗材の有無などについて 20 条件の仕上材を施工したモルタル試験体について、塩水浸漬による浸透促進試験から塩化物イオンの浸透抑制効果を検討している。また、この実験では仕上材が経年劣化を生じることか

ら、促進劣化試験により劣化させた仕上材についても塩化物イオンの浸透促進試験を実施し、表 2-8 のように仕上材の劣化に伴い浸透抑制効果が低下する傾向を示している。

表 2-8 仕上材の促進劣化試験および塩化物イオンの浸透促進試験結果 ¹⁰⁾より作成

仕上材 番号	名称	種類	上塗材の 有無	製造 会社	促進試験結果		浸透促進試験結果			遮塩 効果率 (%)	
					劣化率 (%)		仕上材なしに対する比率 (%)				
					10 サイクル	30 サイクル	0 サイクル	10 サイクル	30 サイクル		
1	複 層 仕 上 塗 材	合成樹脂エマルジョン系	なし	A	1.17	6.42	43.3	52.4	89.0	63.9	
2		合成樹脂エマルジョン系	あり (フッ素)	A	0	4.17	12.8	9.6	34.5	90.1	
3		合成樹脂エマルジョン系	あり (アクリルウレタン)	A	0.48	9.63	9.6	14.7	77.9	89.9	
4		合成樹脂エマルジョン系	あり (シリコンタイル)	A	0.46	6.63	8.1	19.8	38.0	91.9	
5		合成樹脂エマルジョン系 防水型	なし	A	3.85	20.5	57.6	100	100	38.4	
6		合成樹脂エマルジョン系 防水型	あり (アクリル)	B	0	0.88	9.0	5.8	18.2	94.0	
7		合成樹脂エマルジョン系 防水型	あり (アクリルウレタン)	C	0.13	11.1	0.8	1.3	1.6	98.5	
8		合成樹脂エマルジョン系 防水型	あり (アクリルウレタン)	D	2.19	19.0	5.6	4.8	6.4	95.9	
9		反応硬化形合成樹脂 エマルジョン系	あり (アクリル)	C	1.13	32.1	9.4	28.8	84.7	93.4	
10		合成樹脂溶液系 (エポキシ)	あり (アクリル)	C	2.23	18.4	5.5	6.5	8.0	96.69	
11		合成樹脂溶液系 (ウレタンゴム)	なし*	A	0.77	4.25	1.1	1.6	1.4	99.0	
12		合成樹脂溶液系 (ウレタンゴム)	あり (アクリルウレタン)	A	0	0.75	0.5	0.6	0.6	99.1	
13		合成樹脂溶液系 (クロプロレンゴム)	なし*	A	1.92	15.1	37.6	25.2	39.1	65.9	
14		合成樹脂溶液系 (クロプロレンゴム)	あり (アクリルウレタン)	A	0	10.5	2.6	3.4	3.6	97.1	
15		屋根 用塗 膜防 水材	アクリルゴム系	なし	B	0.50	2.71	2.6	2.3	3.2	96.8
16		アクリルゴム系	あり (アクリル)	B	0.07	0.50	2.1	2.2	2.8	97.6	
17		クロプロレンゴム系	なし	E	0.67	1.29	1.1	1.5	5.1	98.8	
18		クロプロレンゴム系	あり (CSM)	E	0.33	0.63	0.8	1.9	7.2	98.9	
19		その他	シリコンゴム系	なし	F	0	10.4	0.8	1.7	1.2	99.1
20		シリコンゴム系	あり (シリコン)	F	0	7.75	0.7	1.7	1.1	99.2	

また、谷川ら²³⁾は塩化物イオンの浸透による鉄筋腐食を防止するため、塩化物イオンおよび鉄筋の腐食要因となる酸素および水の浸透を阻止し、長期の塩害防止機能を把握する目的で、ひび割れ追従性を有するアクリルゴム系防水塗膜について実大構造物を用いた屋外暴露試験を行っている。屋外暴露試験は、沖縄県本部町備瀬崎の海岸で行われ、暴露構造物は図2-11に示すように柱・梁・スラブで構成され、塗膜の有無および初期塩化物イオンの有無（初期塩化物イオンありのコンクリートは塩化ナトリウムを12kg/m³混入）による4条件としている。屋外暴露期間10年の結果より、図2-12および表2-9に示すようにアクリルゴム系防水塗膜では、暴露期間中における鉄筋の腐食要因に対する浸透抑制効果および十分なひび割れ追従性を示したとしている。

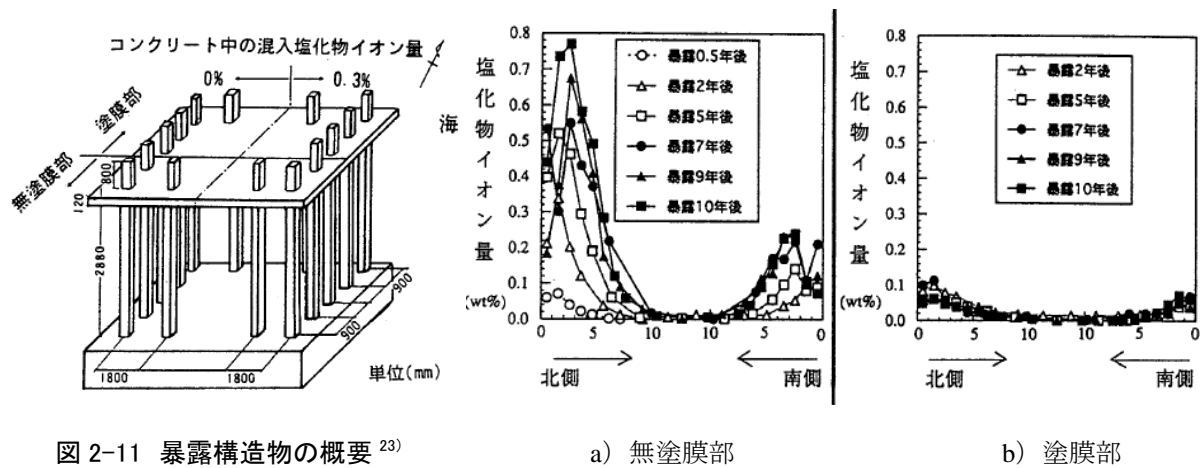


図2-11 暴露構造物の概要²³⁾

図2-12 梁の塩化物イオン量分布(初期塩化物イオンなし)²³⁾

表2-9 コンクリートのひび割れの発生状況²³⁾

塗膜の種類	無塩部(0%)	有塩部(0.3%)
無塗膜部	暴露3.5年でひび割れ(0.1-0.3mm)	暴露3カ月でひび割れ(0.1-0.3mm)
塗膜部	暴露10年後でひび割れなし	暴露7年で微細なひび割れ(0.1mm)

(3) コンクリート中における塩化物イオンの拡散

コンクリート中の塩化物イオンの浸透・拡散性状は、拡散方程式における特性値であるコンクリート表面の塩化物イオン量と拡散係数で評価される。このうち、拡散係数はコンクリート中での塩化物イオンの拡散する速さを示す特性値である。すなわち、拡散係数はコンクリートが有する特性値であるため、コンクリートの水セメント比が小さい（強度が高い、緻密である）ほど拡散係数も小さいと

され、2.1節で述べたように関係式も提案されている。また、2.1節の関連学会基準では、本項(1)で述べたコンクリート表面の塩化物イオン量と同様に、拡散係数も時間の経過によらず一定の値を用いて耐久性を評価することとされている。

しかし、金谷、梶田ら²⁴⁾は海岸で行ったコンクリート試験体による暴露試験結果から、図2-13に示すように拡散係数は材齢とともに減少し一定の値に近づくことを示しており、同様な傾向はほかにも多く報告されている。

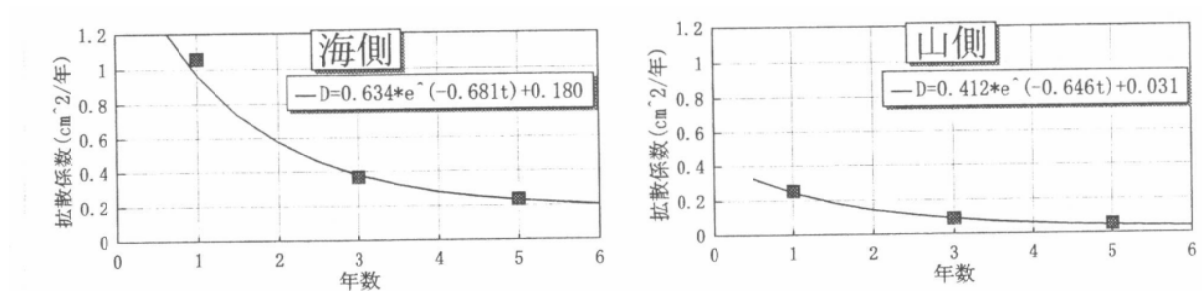


図 2-13 拡散係数の推定値の経時変化²⁴⁾

また、天沼、梶田ら²⁵⁾は海洋環境下の飛沫帯に2年間暴露したコンクリート試験体について、屋内へ回収した後に、湿潤、乾湿繰返し、乾燥、密閉、屋外暴露のそれぞれの環境下で保存した試験体の塩化物の分布について報告している。その結果、①湿潤下では塩化物は水分の浸入と濃度勾配により内部へ移動する。②密閉下では塩化物は濃度勾配による拡散によってのみ内部に移動する。③乾燥下では表面側の含水率の低下による塩化物量の上昇によって濃度勾配がより大きくなり、塩化物が内部に移動することを明らかにしている。

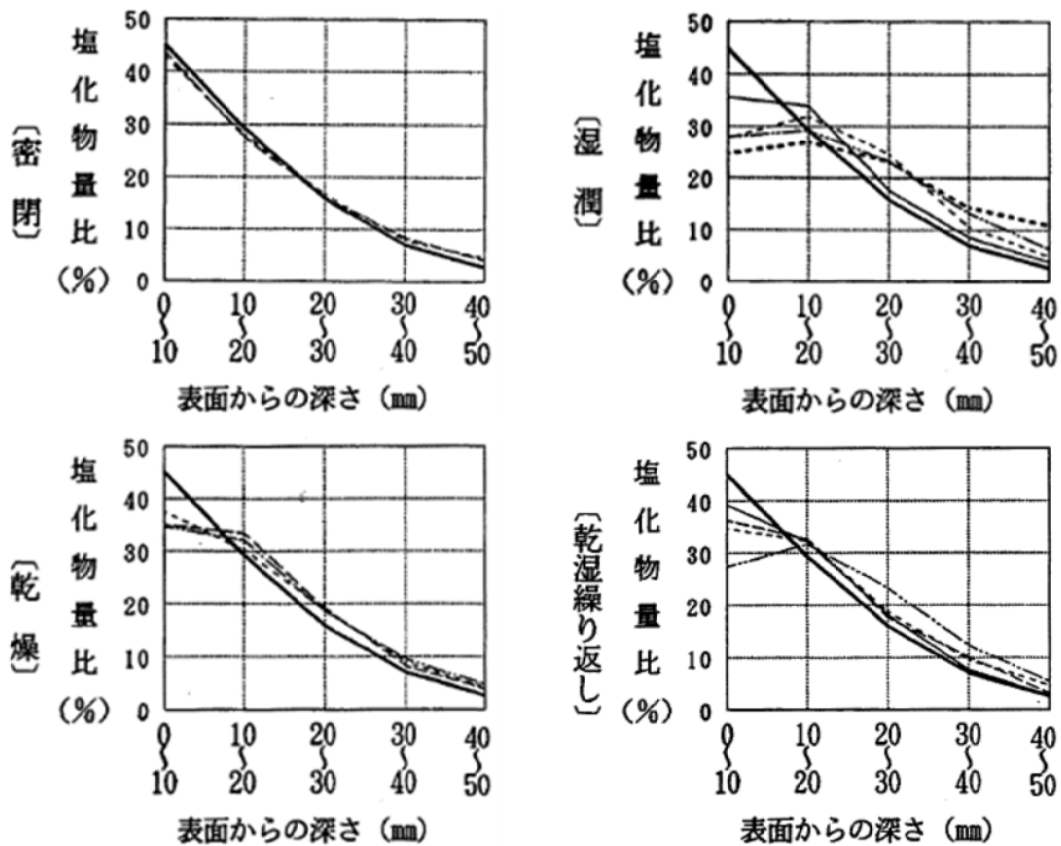


図 2-14 塩化物の分布(全塩化物量比)²⁵⁾

2.3.2 塩化物イオンの浸透促進試験方法

(1) 各種試験条件の影響

鉄筋コンクリート構造物にとって塩害は重大な劣化現象であり、耐久性の評価にあたってはコンクリートにおける塩化物イオンの浸透・拡散性状の把握が重要となる。しかし、塩化物イオンの浸透・拡散性状を評価するための促進試験方法については、中性化や乾燥収縮、凍結融解、骨材のアルカリシリカ反応性といったその他の劣化現象と異なり、日本工業規格 (JIS) による規格がない。そのため、コンクリートの塩化物イオンの浸透・拡散性状について、規準化された試験方法は 2.2 節に述べたように 2003 年に土木学会において制定された電気泳動法や塩水浸せきによる試験方法のみである。

一方で建築分野では、上記試験方法が制定される以前から乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験が主流であり、近年においても電気泳動法や塩水浸せき試験が採用された実験報告は少ないのが現状ある。しかし、これらの乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験には試験方法に関する規格・規準などがないため、各実験によりその試験条件は様々であり、試験方法について検討した実験報告もある。ここでは、乾湿繰返し試験における試験条件について既往の文献から整理した。既往の文献の概要を表 2-10 に示す。

表 2-10 既往の文献における塩化物イオンの浸透促進試験方法

著者	W/C	前養生	促進方法
梶田ら ²⁰⁾	実験Ⅰ (塩水浸漬) 0.45、0.55、 0.65	封かん 4 週 + 気中 2 週 (20℃)	塩水浸漬 (20℃、NaCl 1.5、3、6、12%)
	実験Ⅱ (乾湿繰返し) 0.50、0.60		塩水浸漬 (20℃、NaCl 3%) 4 日 + 乾燥 (50℃) 3 日
村上ら ²⁶⁾	実験Ⅰ (塩水浸漬) 0.50、0.65、	28 日水中 + エポキシ処理 + 48 時間水中 (20℃)	塩水浸漬 (20℃、NaCl 3%)
	実験Ⅱ (乾湿繰返し) 0.80、1.00		乾燥 (30℃、80%R.H.) 16、36、72 時間 + 塩水浸漬 (20℃、NaCl 3%) 8 時間
湯浅ら ²⁷⁾ (乾湿繰返し)	0.60	1、3、7、28 日脱型 → 14 月まで気中 (20℃)	塩水浸漬 (20℃、NaCl 3%) 3 日 + 乾燥 (50℃) 4 日
野田ら ²⁸⁾ (塩水浸漬)	0.25、0.30、 0.40、0.55	2 日脱型 + 湿潤 1 日 → 3、7、28 日まで気中	塩水浸漬 (NaCl 5%)
高橋、湯浅ら ²⁹⁾ (乾湿繰返し)	0.40、0.60、 0.80	封かん 28 日 (20℃)	塩水浸漬 (5、20、30、50℃、NaCl 3%) 3 日 + 乾燥 (50℃) 4 日

① 乾湿繰返し試験と塩水浸漬試験の違い

梶田²⁰⁾らは塩化物イオンの浸透促進試験として塩水浸漬試験と乾湿繰返し試験の両方を実施し、図 2-15 に示すように同一の試験期間において、塩水浸漬よりも乾湿繰返し試験の方が塩素イオン浸透量が多くなることを示している。

村上ら²⁶⁾も同様に塩水浸漬試験と乾湿繰返し試験を行い、図 2-16 に示すように塩水浸漬試験 200 日に比べて乾湿繰返し試験 50 サイクルでは累積の塩水浸漬期間がいずれも 400 時間のみであるにもかかわらず、塩化物イオンの浸透量が多いことを示した。また、乾湿繰返し試験における乾燥時間を 16 時間、36 時間、72 時間と変えた場合に、乾燥時間を長くすることにより塩化物イオンの浸透が加速されることを示している。

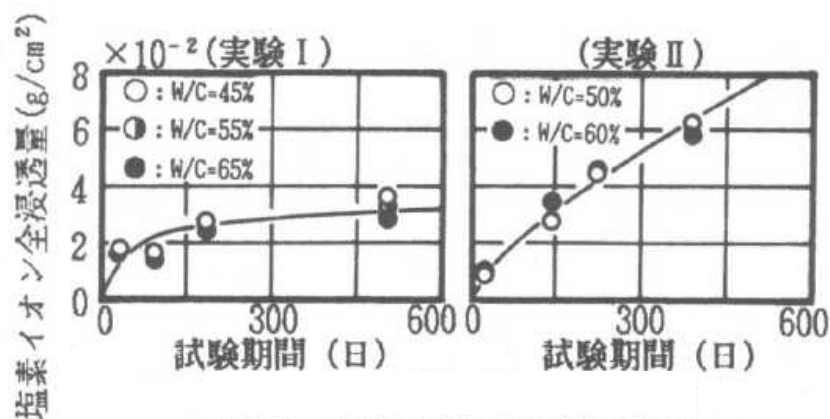
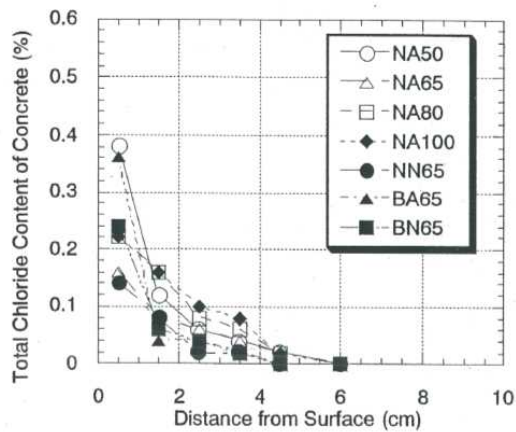
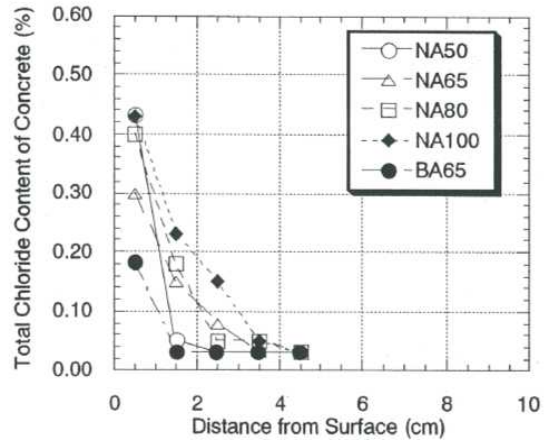


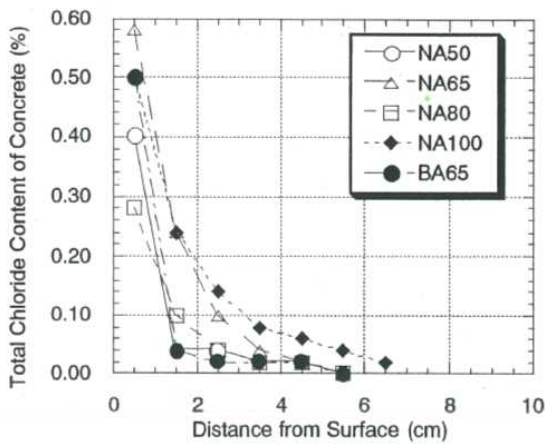
図 2-15 塩分全浸透量の経時変化²⁰⁾



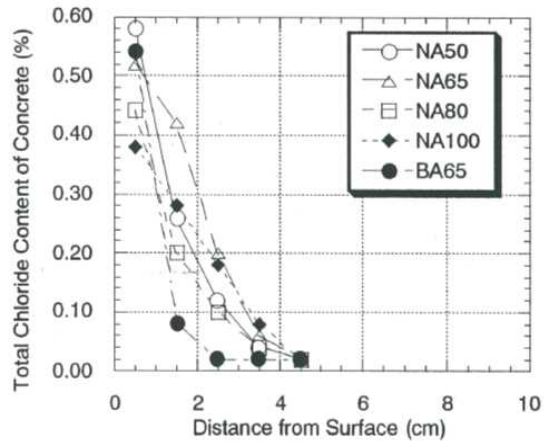
a) 塩水浸漬 200 日



b) 乾湿繰返し 50 サイクル (乾燥 : 16 時間)



c) 乾湿繰返し 50 サイクル (乾燥 : 36 時間)



d) 乾湿繰返し 50 サイクル (乾燥 : 72 時間)

図 2-16 全塩化物イオン量の分布²⁶⁾

②浸漬用の塩水における NaCl 濃度

梶田ら²⁰⁾は塩水浸漬試験において、浸漬水の NaCl 濃度を 1.5%、3%、6%、12%としてその濃度の違いによる塩化物イオン浸透への影響を検討した。その結果、浸漬水の NaCl 濃度が高くなるに伴いコンクリート中の塩素イオン量は大きくなるが、浸漬水の NaCl 濃度には比例せず、ほぼ平方根に比例することを示している。



図 2-17 浸漬水の塩分濃度の影響²⁰⁾

③試験体の乾燥開始材齢および促進試験開始前の乾燥期間

湯浅ら²⁷⁾は同一のコンクリートについて、コンクリートの打込み後から脱型までの材齢を1日、3日、7日および28日として脱型時期における影響について検討を行った。実験では、試験体は各材齢で脱型後、20℃気中養生として材齢14ヵ月から乾湿繰返しにおける浸透促進試験を開始した。その結果、図2-18に示すようにコンクリート中への塩化物イオンの浸透性状に脱型時期の影響は明白には認められなかったが、同様な条件で行った屋外暴露試験では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは脱型時期が早いほど拡散係数が大きくなる傾向を示している。

また、野田ら²⁸⁾は水セメント比20%、30%、40%、55%のコンクリートについて、塩水浸漬による浸透促進試験の開始前の養生として材齢3日まで湿潤状態とした後、試験開始材齢である材齢3日、7日および28日まで乾燥期間を変化させて、前養生における試験体への乾燥の影響について検討を行った。その結果、図2-19に示すように水セメント比40%および55%といった普通強度のコンクリートでは促進開始材齢が長いほど拡散係数は大きくなり、水セメント比30%以下の高強度コンクリートでは乾燥材齢の影響は認められないことを示している。

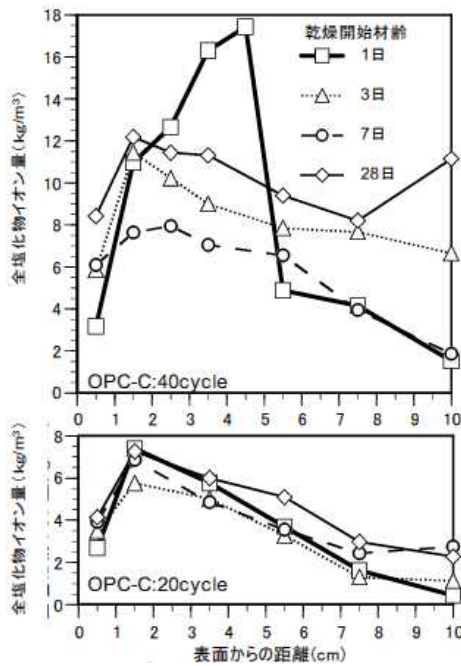


図 2-18 全塩化物イオン量の分布²⁷⁾

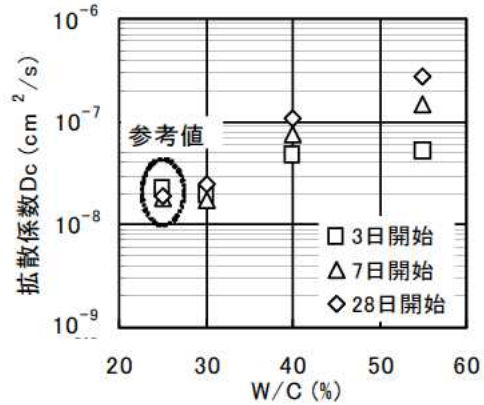


図 2-19 拡散係数と水セメント比の関係²⁸⁾

④環境温度

高橋、湯浅ら²⁹⁾は乾湿繰返しによる浸透促進試験において、試験環境の温度条件を5℃、20℃、35℃および50℃とし、環境温度の影響について検討を行った。その結果、図2-20示すように、環境温度が高いほど塩化物イオンは浸透量が大きく、深い位置まで浸透している。また、図2-21に示すように環境温度と拡散係数は比例関係ではなく、拡散係数はある温度から急激に大きくなり、その温度はコンクリートの水セメント比により異なることを示している。

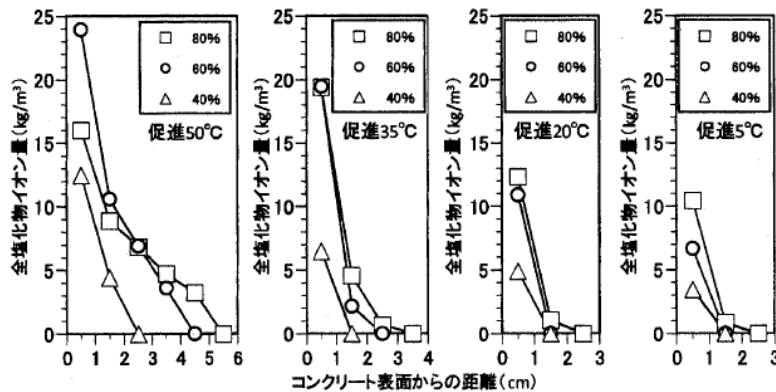


図 2-20 全塩化物イオン量の分布²⁹⁾

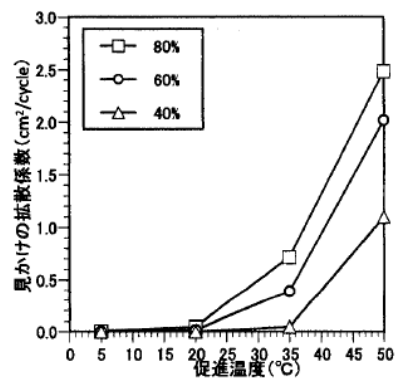
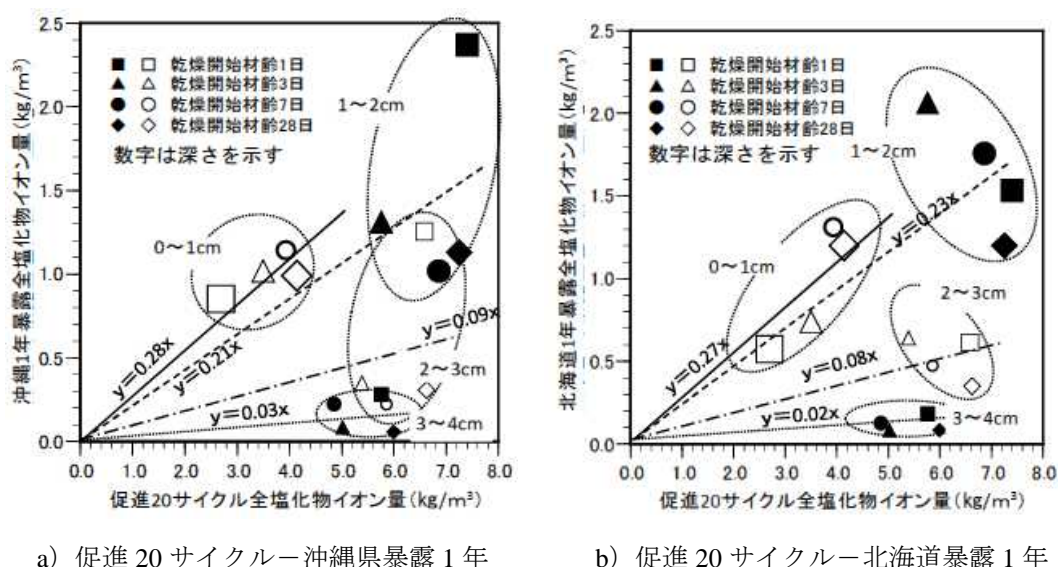


図 2-21 試験温度と
拡散係数の関係²⁹⁾

(2) 塩化物イオンの浸透促進試験結果と実環境との関係

本項(1)では塩化物イオンの浸透促進試験方法における各種試験条件の影響についてまとめた。しかし、これら促進試験により求められたコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状と実際に塩害の影響を受けるおそれのある環境下との関係についてはあまり多くは報告されていない。

湯浅ら²⁷⁾は、表2-10に示した乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験結果と北海道泊および沖縄県辺野喜でそれぞれ行った屋外暴露試験との結果から、図2-22に示すように表層における浸透量を基準とすると、浸透促進試験では屋外暴露に比べて内部ほど塩化物イオンの浸透量が多いことを示した。なお、屋外暴露試験において北海道と沖縄県による地域差の影響は見られず、図2-23のようにコンクリート中に浸透する塩化物イオン量は同程度であることを示している。



a) 促進 20 サイクルー沖縄県暴露 1 年

b) 促進 20 サイクルー北海道暴露 1 年

図 2-22 促進試験と屋外暴露試験における全塩化物イオン量²⁷⁾

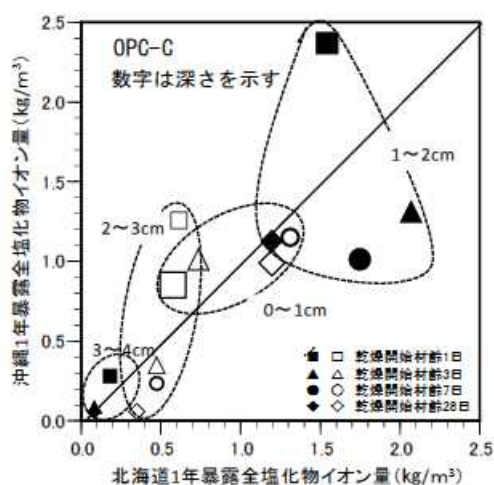


図 2-23 塩化物イオン量の暴露地による違い²⁷⁾

コンクリート中の塩化物イオンの浸透し易さを示す拡散係数については、田中ら³⁰⁾は早強ポルトランドセメントを用いた水セメント比25~55%のコンクリートについて、5%の塩水に試験体の1/2を浸した浸透促進試験結果と新潟県の信濃川関屋分水の河口付近（海岸線から約20m）での屋外暴露試験結果の関係から、図2-24に示すように同一のコンクリートを用いても拡散係数には大きな差が見られることを示している。

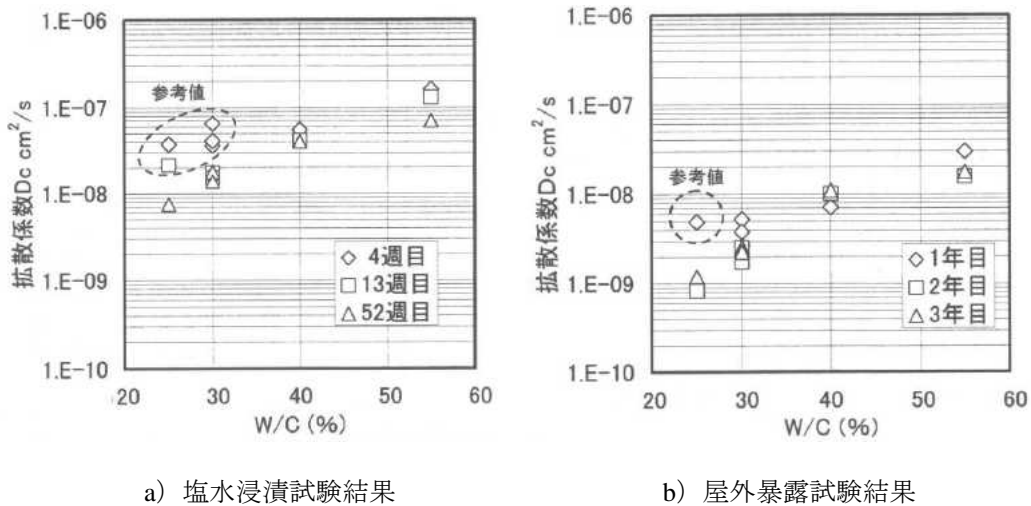
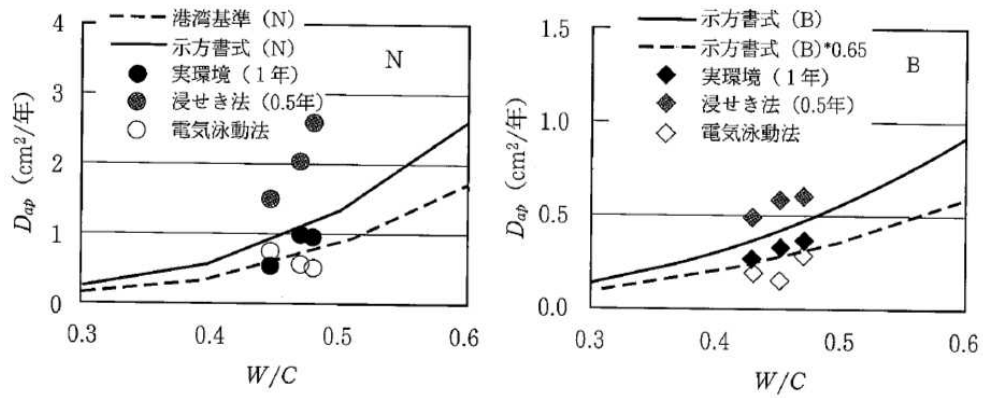


図2-24 拡散係数と水セメント比の関係³⁰⁾

また、山路ら³¹⁾は2.2節で示した電気泳動法¹⁸⁾および浸せき法¹⁹⁾と実環境暴露により求められた拡散係数について図2-25のように示している。ここでは、田中らの報告³⁰⁾と同様に浸せき法では実環境よりも拡散係数は大きくなっている。一方で、電気泳動法で求められた拡散係数は実環境の場合とおおよそ近い値を示しているが、水セメント比の増加に伴い拡散係数が大きくなるとの傾向は示されていない。これは、図2-25に示す拡散係数は見かけの拡散係数であり、電気泳動法では試験により求められる実効拡散係数を式(2-22)により換算したものである。この実効拡散係数から見かけの拡散係数への換算には $k_1 \cdot k_2$ が必要となるが、図2-26に示す通り、水セメント比と $k_1 \cdot k_2$ の関係には、大きなばらつきがある中で求められたものである。なお、2.1.2項に示した式(2-15)~式(2-18)の水セメント比と拡散係数の関係式は、これらの電磁泳動法の試験結果から求められたものである。



a) 普通ポルトランドセメント

b) 高炉セメント B 種

図 2-25 水セメント比と拡散係数³¹⁾

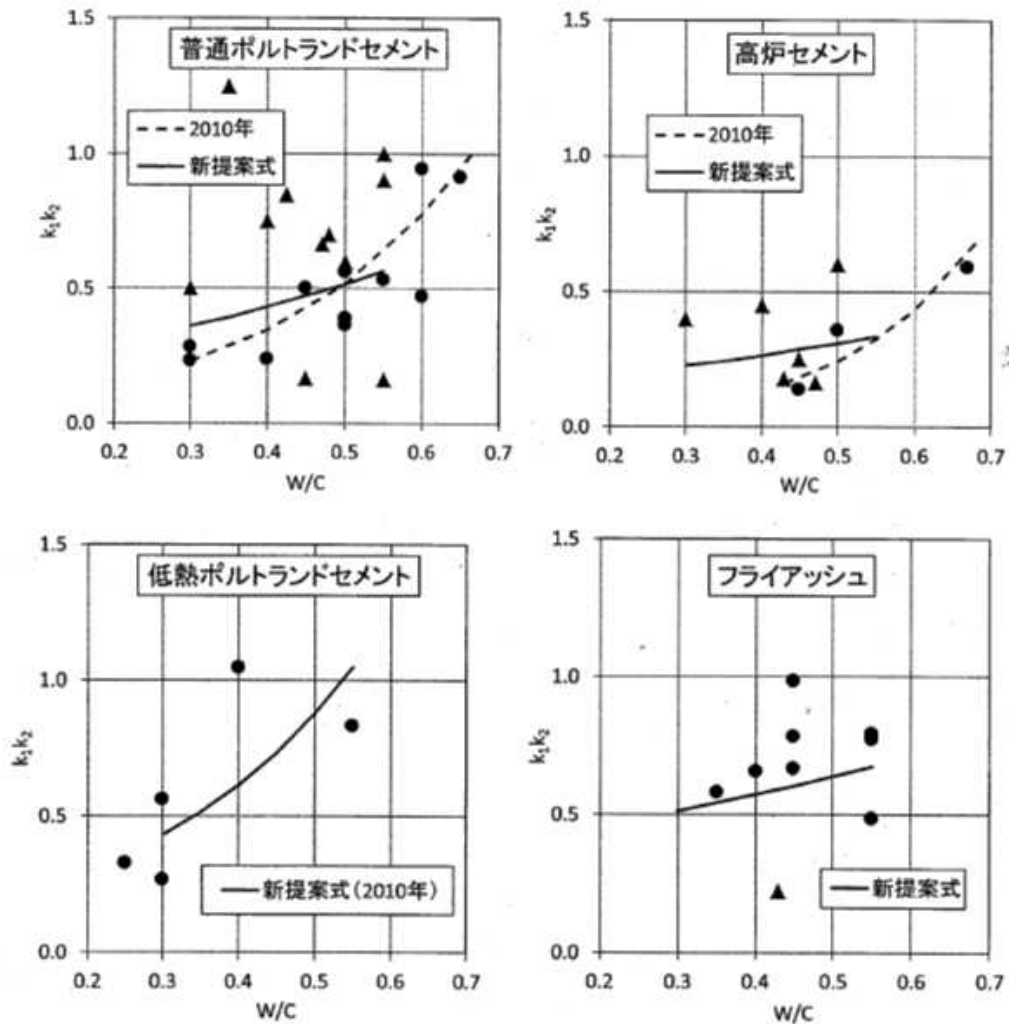


図 2-26 水セメント比と $k_1 \cdot k_2$ の関係¹⁵⁾

(3) 国外における塩化物イオンの浸透促進試験方法の動向

国外においては、コンクリート中への塩化物イオンの浸透促進試験方法がいくつか規準化されており、それらは2.2節に示した土木学会規準と同様に、直接的に塩水に長期間接触させる試験または電氣的に急速浸透を促す試験方法である。このうち、代表的な浸透促進試験方法としては以下の図2-27から図2-30に示すものがあげられる。

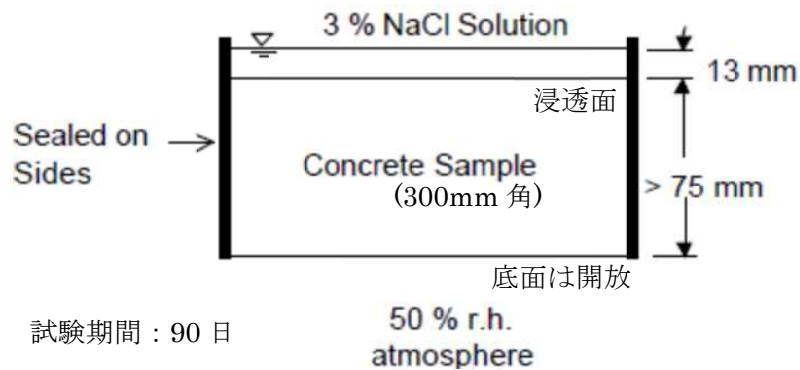


図 2-27 AASHTO T259 (Salt ponding test) の試験方法 ³²より作成)

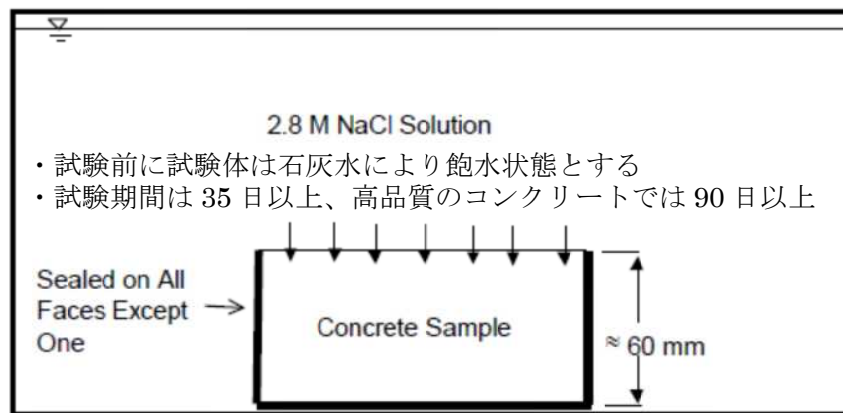


図 2-28 Nord Test NT Build 443 (Bulk diffusion test) の試験方法 ³²より作成)

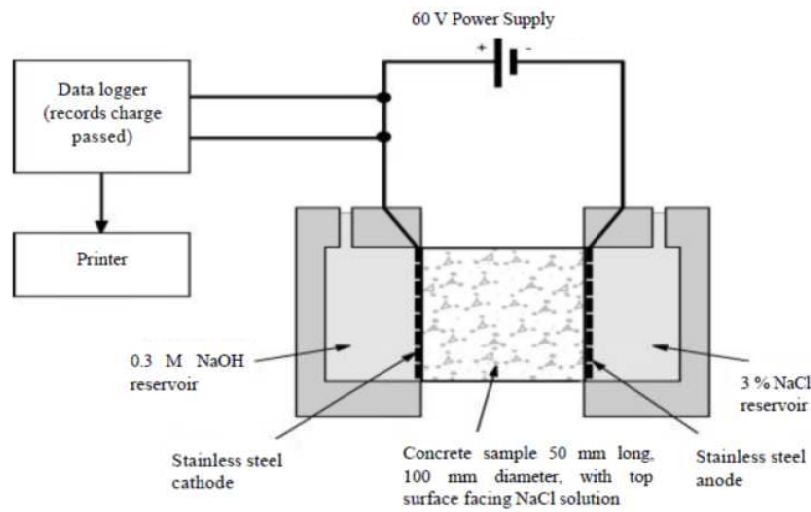


図 2-29 AASHTO T277 (ASTM C1202) (Rapid chloride permeability test(RCPT))の試験方法³²⁾

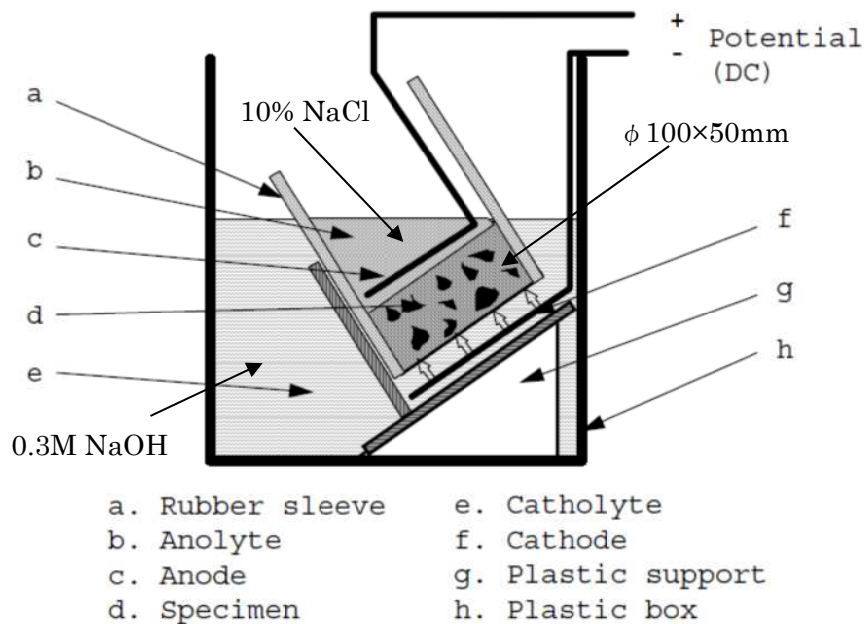
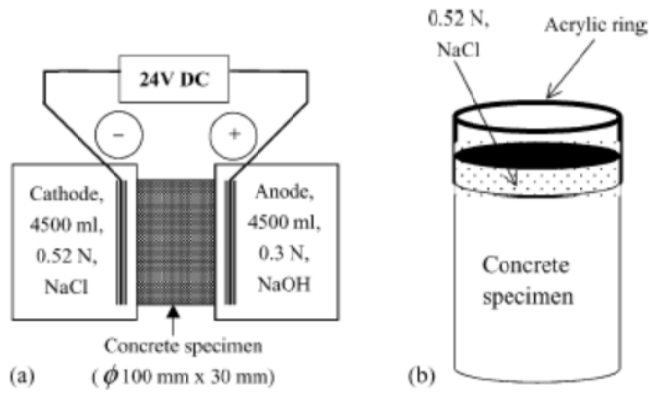


図 2-30 NT Build 492 の試験方法^{33)より作成)}

これらの試験方法では、AASHTO T277 (ASTM C1202) の RCPT (Rapid Chloride Permeability test) が短期間でコンクリートの塩化物イオンの浸透抵抗性を評価できることから、世界中で広く用いられており、土木学会で規準化されている電気泳動法も同様な試験方法である。

Yang ら³⁴⁾ は図 2-31 に示す方法で行った AASHTO T277 による RCPM 試験と AASHTO T259 による salt ponding 試験結果から、図 2-32 に示すように、それぞれの試験方法で求められる拡散係数 (RCPT 試験では実効拡散係数) には相関性があることを示している。



a) RCPT 試験

b) salt ponding 試験

図 2-31 試験方法の比較³⁴⁾

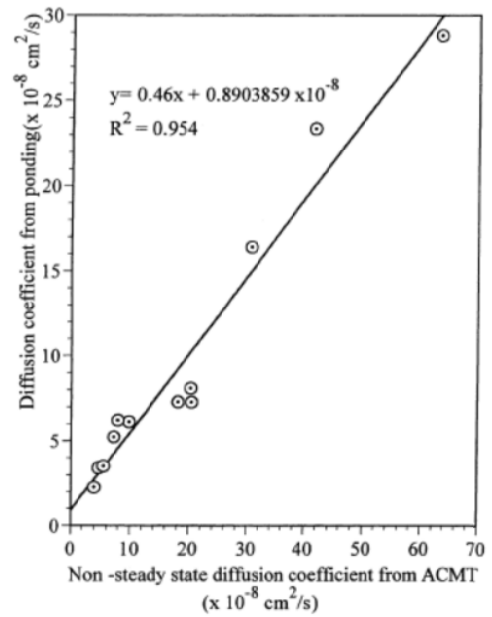


図 2-32 RCPT による実効拡散係数と

salt ponding による拡散係数の関係³⁴⁾

一方で、Shi ら³⁵⁾ は RCPT 試験により求められる実効拡散係数は、図 2-33 および図 2-34 に示すように、コンクリートの材料や調合による影響を受け、混和材の種類や混合率、骨材量によっても異なるとしている。そのため、RCPT を標準試験とするには、これらのパラメータの影響を明らかにするのは難しいとしている。また、Stanish ら³²⁾ の試験方法について調査・整理した報告からも、表 2-11 に示すように短い試験期間で評価を行う試験では試験方法に応じて注意点があり、それをよく理解したうえで試験を行うことが重要であるとしている。

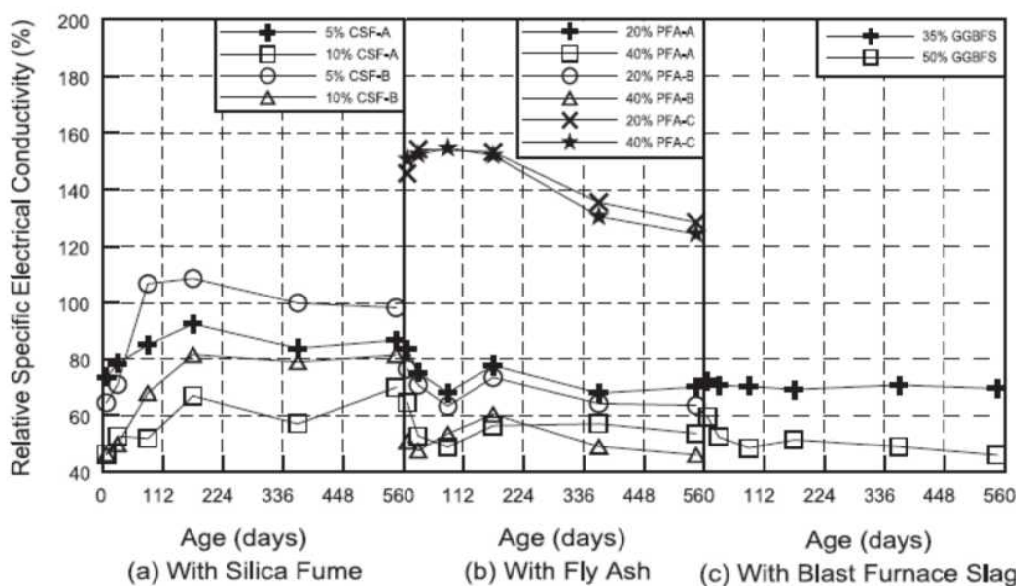


図 2-33 RCPT 試験における相対電気伝導率におよぼす混和材料の種類の影響³⁵⁾

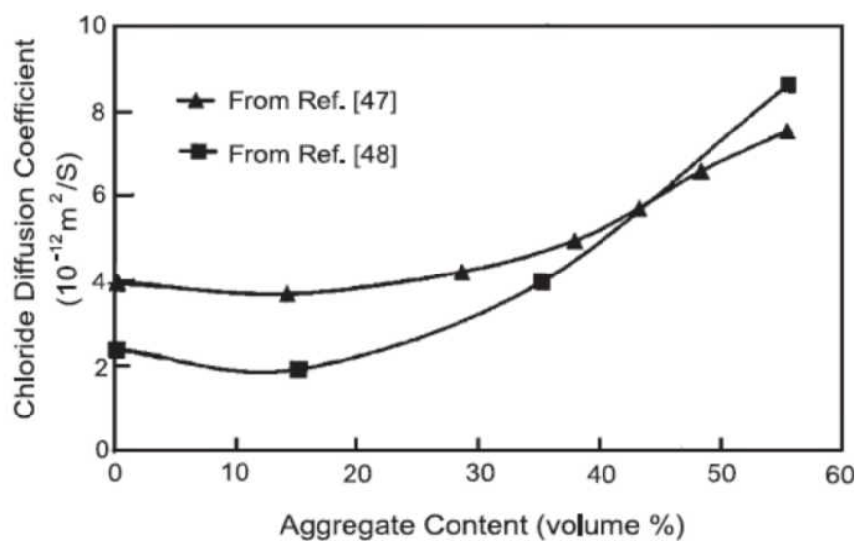


図 2-34 RCPT 試験における実効拡散係数におよぼす骨材量の影響³⁵⁾

表 2-11 塩化物イオンの浸透促進試験方法のまとめ ³²⁾

Test method		Considers Chloride ion movement	At a Constant Temperature	Unaffected by Conductors in the concrete	Approximate Duration of Test products
Long Term	AASHTO T 259 (the ponding)	Yes	Yes	Yes	90 Day after curing and conditioning
	Bulk Diffusion (Nordtest)	Yes	Yes	Yes	40-120 Days after curing and conditioning
Short Term	RCPT (T277)	No	No	No	6 hours
	Electrical Migration	Yes	Yes	No	Depends on Voltage and Concrete
	Rapid Migration	Yes	Yes	No	8 hours
	Resistivity	No	Yes	No	30 Minutes
	Pressure penetration	Yes	Yes	Yes	Depends on pressure and Concrete (but potentially long)
Other	Sorptivity-Lab	No	Yes	Yes	1 week incl. Conditioning
	Sorptivity-Field	No	Yes	Yes	30 minutes
	Propan-2-ol Counter-diffusion	No	Yes	Yes	14 days with thin paste samples
	Gas Diffusion	No	Yes	Yes	2-3 hrs

2.4 まとめ

本章では、コンクリート中における塩化物イオンの浸透・拡散性状について、関連学会における耐久性に関する評価手法、塩化物イオンの浸透促進試験方法および既往の文献における塩化物イオンの浸透・拡散性状、浸透促進試験結果におよぼす各種試験条件の影響、促進試験条件と実環境との関係について、それぞれ調査・整理を行った。これらの文献調査より得られた知見を以下に示す。

- 1) 日本建築学会の標準仕様書および土木学会の示方書について、塩害環境下に用いられるコンクリートの耐久性に関する評価手法では、いずれも Fick の拡散方程式の解析解である同様な式を用いて評価するとしている。また、評価にあたっては特性値となるコンクリート表面の塩化物イオン量 (C_0) は建設される地域（環境区分）により、拡散係数 (D) は水セメント比との関係式からそれぞれ求めることができるとしている。
- 2) 1) の評価手法では、コンクリート表面の塩化物イオン量および拡散係数は経過年数にかかわらず一定の値を用いて評価を行うとしている。しかし、既往の文献では各種実験結果より、表面塩化物イオン量および拡散係数のいずれも経年により変化し、また、この変化を考慮することで、より実状に近い塩化物イオンの浸透・拡散性状を評価できると考えられる。
- 3) コンクリート中への塩化物イオンの浸透促進試験について、土木学会規準である電気泳動法および浸せき試験の方法を整理した。また、国外においても電気泳動法は急速に塩化物イオンが浸透することから、広く用いられている試験方法であるが、試験結果は各種要因の影響を大きく受けると指摘されている。
- 4) 建築分野における既往の研究では、これらの土木学会規準の試験方法により行われた実験結果は少なく、乾湿繰返しによる浸透促進試験が主であった。また、電気泳動法や塩水浸漬試験を含め、これらの浸透促進試験と実環境との関係についての報告は少なく、いずれの試験方法でも実環境とは異なる傾向を示している。
- 5) 塩化物イオンの浸透促進試験方法について、塩水浸漬試験と乾湿繰返し試験の関係および各種試験条件の影響について整理した。その結果、塩水浸漬試験に比べて乾湿繰返し試験の方が塩化物イオンの浸透・拡散する量は多く、また、試験開始前の養生において乾燥期間が長いほど、乾湿繰返し中の乾燥時間が長いほど、浸漬水の NaCl 濃度が高いほど、環境温度が高いほどコンクリート中に

浸透・拡散する塩化物イオン量が大きくなると報告されていた。

各種基準類および既往の文献の調査結果から、コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する耐久性の評価にあたり、その精度向上のためのコンクリート表面の塩化物イオン量および拡散係数の経時による変化量や、塩化物イオンの浸透促進試験の結果と実環境との関係が明確でないこと、また、その要因として各種の試験方法や試験条件が結果に影響をおよぼすものの統一されて用いられる浸透促進試験がないことが課題であることを明らかにした。

そこで、本研究ではこれらを踏まえ、コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状について検討することとした。

第 2 章の参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、昭和 28 年版、p.214、1953.11
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、昭和 40 年版、1965
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、昭和 44 年版、pp.449～450、1969.5
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、1986 年版、pp.403～414、1986.9
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、1997 年版、pp.506～520、1997.1
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、2009 年版、pp.594～611、2009.2
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、2015 年版、pp.614～631、2015.7
- 8) 古賀一八、林典男、平田延明：高濃度塩化物イオン含有 RC 建築物の含水率および鉄筋腐食調査、コンクリート工学年次論文集、Vol.30 No.1、pp.783～788、2008
- 9) 堀口賢一、丸屋剛、武若耕司；腐食発生限界塩化物イオン濃度に及ぼすコンクリート配合の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.29 No.1、pp.1377～1382、2007
- 10) 池永博威：塗膜系仕上材の耐候性劣化と遮塩性能に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 432 号、pp.11～18、1992.2
- 11) 土木学会：2002 年制定 コンクリート工事標準示方書 [施工編]、pp.24～28、80、2002.3
- 12) 土木学会：コンクリートライブラリー108 2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料、pp.83～88、2002.3

-
- 13) 土木学会：2007年制定 コンクリート工事標準示方書 [設計編]、pp.56、110~111、119~122、2007.3
 - 14) 土木学会：2012年制定 コンクリート工事標準示方書 [設計編]、pp.44、73~74、148~157、2012
 - 15) 土木学会：コンクリートライブラリー138 2012年版コンクリート標準示方書改訂資料、pp.71~89、2013.3
 - 16) 土木学会規準：JSCE-G 571-2013「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実行拡散係数試験方法（案）」
 - 17) 土木学会規準：JSCE-G 572-2013「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」
 - 18) 土木学会規準関連小委員会：土木学会規準「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実行拡散係数試験方法（案）（JSCE-G 571-2003）」の制定、土木学会論文集 No.767/V-64、pp.1~9、2004.8
 - 19) 土木学会規準関連小委員会：土木学会規準「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）（JSCE-G 572-2003）」の制定、土木学会論文集 No.767/V-64、pp.11~16、2004.8
 - 20) 榊田佳寛、友澤史紀、安田正雪、原謙治：コンクリート中の塩化物浸透速度に関する実験、コンクリート工学年次論文集 10-2、pp.493~498、1988
 - 21) 丸屋剛、Somnuk TANGTERMSIRIKUL、松岡康訓：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化、土木学会論文集 No.585 V-38、pp.79~95、1998.2
 - 22) 山田義智、大城武、榊田佳寛：塩害環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する解析的研究、日本建築学会構造系論文集、第501号、pp.13~18、1997.11
 - 23) 谷川伸、山田義智、大城武、川村満紀：厳しい環境下での鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究（アクリルゴム系防水塗膜の効果）、日本建築学会構造系論文集、第487号、pp.11~19、1996.9
 - 24) 金谷光秀、榊田佳寛、阿部道彦、西山直洋：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状、コンクリート工学年次論文集 Vol.18 No.1、pp.747~752、1996
 - 25) 天沼邦一、榊田佳寛、吉崎芳郎、御所窪邦男：コンクリートの乾湿にともなう塩化物の移動について、コンクリート工学年次論文集 Vol.14 No.1、pp.787~792、1992
 - 26) 村上祐治、大津政康、山下英俊：乾燥を受けるコンクリートの塩分浸透について、自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集、pp.109~116、1993.5
 - 27) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇、高橋英孝：エコセメントを用いたコンクリートの遮塩性に関する検討、コンクリート工学年次論文集 Vol.31 No.1、pp.1039~1044、1996
 - 28) 野田一弘、河野広隆、田中良樹：コンクリートの塩分浸透に及ぼす塩水浸漬材齢の影響、コンクリート工学年次論文集 Vol.24 No.1、pp.597~602、2009
 - 29) 高橋英孝、湯浅昇、松井勇、笠井芳夫：温度の違いがコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響、日本建築学会大会講演梗概集（北陸）A-1、pp.1295~1296、2010.9

- 30) 田中良樹、藤田学、河野広隆、渡辺博志：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性、コンクリート工学年次論文集 Vol.23 No.2、pp.517～522、2001
- 31) 山路徹、審良善和、大里陸男、森晴夫：異なる試験方法により求めた銅スラグ細骨材コンクリートの塩化物イオン拡散係数の比較、土木学会コンクリート技術シリーズ 85、2009
- 32) K.D. Stanish, R.D. Hooton and M.D.A. Thomas : Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A literature Review
- 33) Nordic council of ministers : NT Build 492「Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments」、1999.11
- 34) C.C. Yang and, L.C. Wang : The diffusion characteristic of concrete with mineral admixtures between salt ponding test and accelerated chloride migration test、Materials Chemistry and physics 85、pp.266～272、2004
- 35) Caijun Shi : Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results、Cement and Concrete Research 34、pp.537～545、2004

第3章

コンクリート中に浸透した 塩化物イオンの拡散性状

第3章

コンクリート中に浸透した塩化物イオンの拡散性状

第2章で調査・整理したとおり、日本建築学会および土木学会では塩害を受けるおそれのある地域に建設される鉄筋コンクリート構造物について、その耐久性について評価し、また、対策を検討することとされている。外来型の塩害は、コンクリート表面から劣化因子である塩化物イオンがコンクリート中に浸透し、内部へ拡散することで鉄筋腐食を生じる原因となる劣化現象である。そのため、コンクリートの中性化と同様にコンクリート表面を仕上材で保護することにより劣化の進行を抑制することが効果的となる。しかし、既存建築物などにおいては、すでにコンクリート中に塩化物イオンが浸透している場合に、仕上材により新規に浸透する塩化物イオンを抑制しても、一度コンクリート中に浸透した塩化物イオンは内部に拡散するとされている。

これは、一般にコンクリート中における塩化物イオンの拡散機構が水の移動に伴う移流と濃度差を駆動力とするものに分けられる¹⁾うちの后者によるとされている²⁾。しかし、これらの拡散機構の違いがコンクリート中に浸透した塩化物イオンの拡散性状におよぼす影響については不明な点が多い。そこで、本章ではコンクリート表面から内部に浸透した塩化物イオンについて、乾燥・湿潤の環境条件がコンクリート中における拡散性状におよぼす影響を把握するため、実験を行った。

3.1 実験概要

3.1.1 実験方法および環境条件

本実験では、予備促進としてコンクリート表面から塩化物イオンをあらかじめ浸透・拡散させた試験体を用いて、表3-1に示す10パターン¹⁾の環境条件におけるコンクリート中での塩化物イオンの浸透・拡散性状の検討を行った。

環境条件は、コンクリート中への塩化物イオンの供給の有無や乾燥・湿潤状態によりコンクリート中の水分量の違いが要因となるように、3パターンの乾湿シリーズ（記号：50A、20A、20B）、2パターンの乾燥シリーズ（20C、20D）および湿潤シリーズ（20E、20F）、3パターン²⁾の中性化シリーズ（20G、20H、20I）の計10パターンを設定した。これらの環境条件は、基本条件として乾燥状態では20℃、60%R.H.を、また、湿潤状態では20℃、NaCl 3%水溶液（以下、塩水と表記）への浸漬を設定し、いずれも7日間を1サイクルと定義した。

乾湿シリーズは、1サイクルとなる7日間を乾燥状態で3日、湿潤状態で4日として、上記の基本条件とする“20A”に対し、湿潤状態において浸漬水に塩化物イオンをほとんど含まない水道水を用い

た“20B”および環境温度を50℃とした“50A”をそれぞれ設定した。環境温度については、2.3.2項で整理したとおり、高橋・湯浅らによる環境温度が高いほど塩化物イオンのコンクリート中への浸透量が大きく、深い位置まで浸透しているとの報告³⁾から、多量の塩化物イオンをコンクリート中に浸透・拡散させるため、高温条件における作業性を考慮して50℃を設けた。

乾燥シリーズは、基本条件の乾燥状態においてコンクリートから水分の蒸発が生じるように試験面を開放したままとした“20C”、および水分の蒸発を防ぐために封かん処理を行った“20D”とした。湿潤シリーズは、基本条件の湿潤状態を継続した“20E”、および浸漬水を水道水とした“20F”とした。また、中性化シリーズはいずれも乾燥状態を20℃、60%R.H.、CO₂濃度5.0%とし、基本条件の湿潤状態と乾湿繰返しとした“20G”、浸漬水を水道水として乾湿繰返しとした“20H”、および試験面を開放したままで乾燥状態を継続した“20I”を設定した。

表 3-1 環境条件の一覧

条件	乾湿シリーズ			乾燥シリーズ		湿潤シリーズ		中性化シリーズ		
記号	50A	20A	20B	20C	20D	20E	20F	20G	20H	20I
温度	50℃	20℃		20℃		20℃		20℃		
日数*1 (/サイクル)	乾燥	3日		7日		0日		3日		7日
	湿潤	4日		0日		7日		4日		0日
浸漬水	塩水	水道水		—	塩水	水道水	塩水	水道水	—	
CO ₂ 濃度	大気			大気		—		5.0%		
浸透面*2	開放			開放	封かん	開放		開放		

*1 1サイクルは7日間とした。

*2 浸透面の封かんは、予備促進終了時にエポキシ樹脂で封かん処理を行った。

3.1.2 試験体の作製および試験方法

(1) 使用材料およびコンクリートの調合

表 3-2 に使用材料の品質、コンクリートの計画調合およびコンクリート試験結果を示す。コンクリートに使用した材料は、いずれも一般的に用いられる材料とし、セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は陸砂および硬質砂岩砕石、練混ぜ水は上水道水、化学混和剤はリグニンスルホン酸系 AE 減水剤とした。

コンクリートの調合は、呼び強度 30 程度の一般的な普通コンクリートとし、水セメント比 0.55 で目標スランプ 18cm および目標空気量 4.5%、単位粗骨材かさ容積は 0.57m³/m³、AE 減水剤の使用量はセメント質量×0.25%とした。なお、実験に使用したコンクリートにおける使用材料に由来する全塩化物イオン量（初期塩化物イオン量）は 0.06kg/m³であった。

表 3-2 使用材料の品質、コンクリートの計画調合およびコンクリート試験結果

コンクリートの計画調合						コンクリート試験結果					
W/C	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				フレッシュコンクリート		コンクリート密度 (kg/m ³)		圧縮強度 (N/mm ²)	
		W	C	S	G	スランプ (cm)	空気量 (%)	4w 水中	1w 水中 + 3w 気中	4w 水中	1w 水中 + 3w 気中
0.55	48.2	173	315	846	937	20.5	4.0	2306	2251	35.6	36.0

セメント：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3316cm²/g、塩化物イオン量 0.021%）

細骨材：大井川産陸砂（絶乾密度 2.52g/cm³、吸水率 2.04%、F.M. 2.82）

粗骨材：青梅産硬質砂岩砕石（最大寸法 20mm、絶乾密度 2.64g/cm³、吸水率 0.64%、実積率 62.0%）

練混ぜ水：東京都八王子市 上水道水

化学混和剤：リグニンスルホン酸塩系 AE 減水剤 標準形

(2) 試験体の作製

コンクリートは 20℃、60%R.H.の恒温恒湿室で室温に調整した材料を用いて、容量 100L の水平パン型ミキサで練り混ぜた。試験体は、寸法 10×10×40cm として鋼製型枠を用いて成型、コンクリートの打込み翌日に脱型した。脱型後の試験体は材齢 1 週まで標準養生として、その後 4 週まで上記室内で気中養生とした。養生後の試験体は、コンクリート表面から塩化物イオンを浸透・拡散させるため、予備促進として環境温度 50℃における乾湿繰返しである 50A で 10 サイクルの乾湿繰返しを行った。

図 3-1 に試験体の取扱い方法を示す。試験体は、材齢 4 週までの気中養生中に長手方向に 3 分割し、塩化物イオンの浸透面（試験面）以外の 5 面をエポキシ樹脂により封かん処理とした。試験面は、試験体の作製時にブリーディングなどが試験面におよぼす影響が生じないように、コンクリートの打込み時に底面となる面とした。

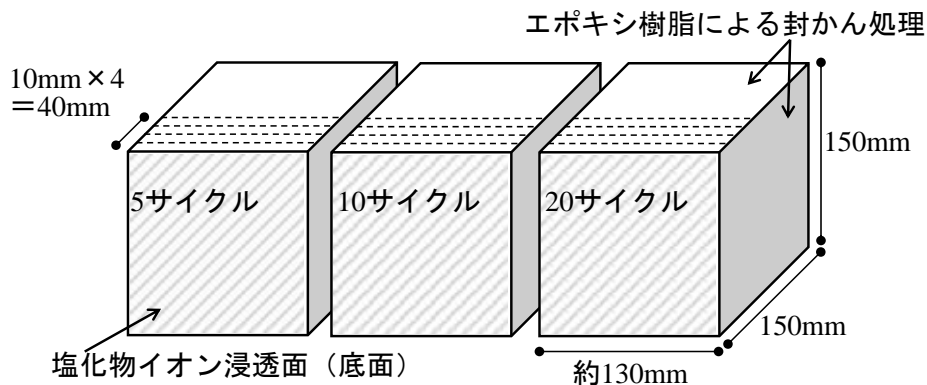


図 3-1 試験体の取扱い方法

(3) 試験方法

コンクリート中の塩化物イオン量は、予備促進終了後から表 3-1 に示した 10 パターンの各環境条件に移行した後、5、10 および 20 サイクル終了時に測定した。塩化物イオン量の測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、電位差滴定法により全塩化物イオン量を測定した。

塩化物イオン量の測定にあたり、測定用の分析試料は塩化物イオンの浸透面より 10mm ずつ、深さ 40mm まで採取した。また、分析試料の採取は、乾式コンクリートカッターで 10mm 厚に切断し、封かん処理用のエポキシ樹脂の付着した部分を除去した約 100g について、150 μ m のふるいを全量通過するまで微粉碎とした。

3.2 試験体の質量変化

図 3-2 に乾湿シリーズにおける期間と累積吸水量および累積蒸発量の関係を示す。また、図 3-3 に期間と質量変化率の関係を示す。累積吸水量、累積蒸発量および質量変化率は、乾湿シリーズにおける乾燥・湿潤状態の切替えとなる時点（1 サイクル中の 4 日目と 7 日目）に測定した試験体の質量から算出し、質量変化率は各環境条件への移行時（予備促進の終了時）の質量で除した百分率とした。また、これらの値は各期間において試験実施中の試験体すべての平均とした。（例えば、7 サイクル時の値は 10 および 20 サイクル用試験体の平均値）

乾湿シリーズでは、環境温度 50°C（50A）の方が 20°C（20A）よりも乾燥時におけるコンクリートの蒸発量が大きく、湿潤時の吸水量よりも大きかった。また、期間の経過に伴い環境温度 20°C の場合（20A、20B）では徐々に増加し、50°C（50A）では減少した。浸漬水の違いでは、浸漬水を塩水とした場合（20A）と水道水とした場合（20B）で大きな差はなく、ともに期間の経過に伴い質量変化率は増加した。

湿潤シリーズでは、浸漬水の違いは乾湿シリーズと同様に、浸漬水を塩水とした場合（20E）と水道水とした場合（20F）では大きな差は見られず、期間の経過に伴い質量変化率は増加した。

乾燥シリーズでは、塩化物イオンの浸透面を開放とした場合（20C）において質量変化率は期間の経過に伴い減少した。また、コンクリート中の水分の蒸発を防止するために浸透面を封かんとした場合（20D）においても、期間の経過に伴い質量変化率が減少した。そのため、完全な封かん状態であったとはいえないものの、減少の程度は小さかった。

中性化シリーズでは、質量変化率は CO₂ 濃度以外が同じ条件となる乾湿シリーズおよび乾燥シリーズと同様な傾向であったものの、質量変化率の増減は小さかった。

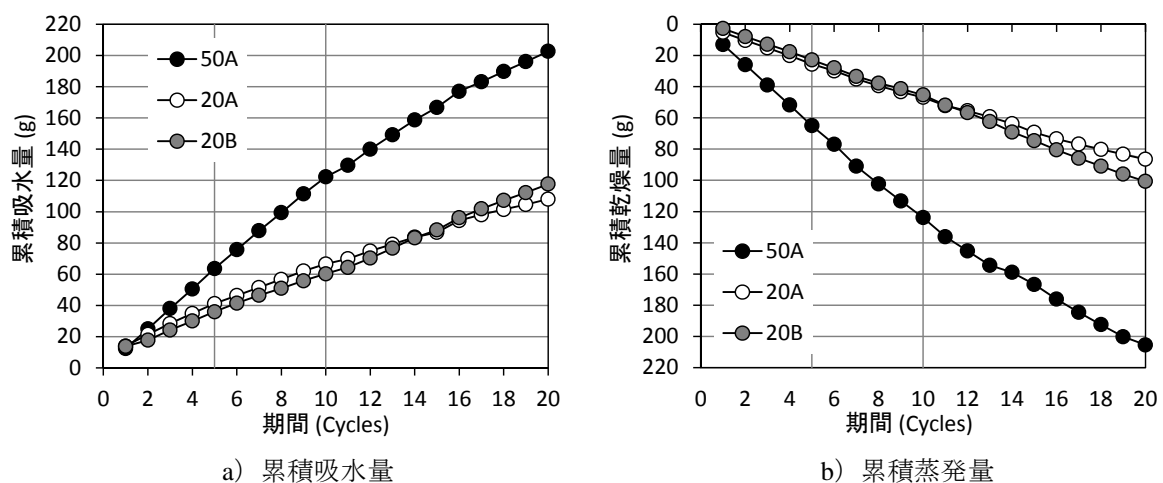
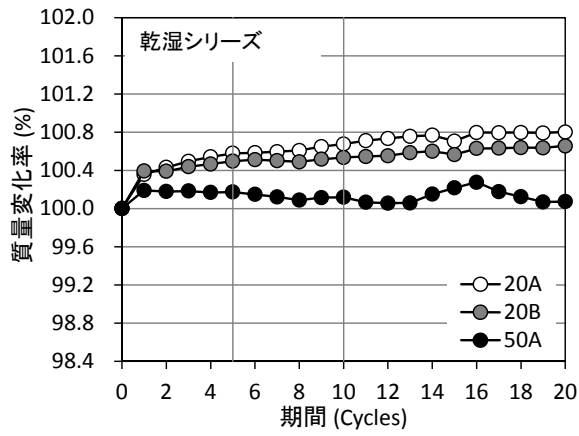
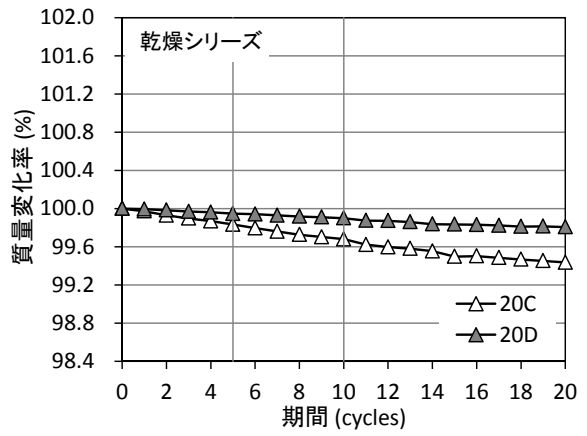


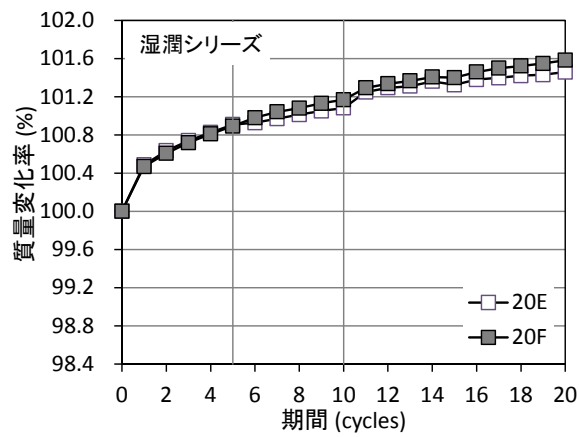
図 3-2 乾湿シリーズにおける期間と累積吸水量および累積蒸発量



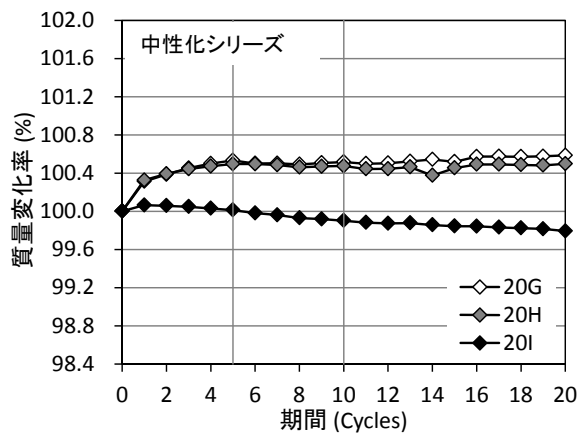
a) 乾湿シリーズ



b) 乾燥シリーズ



c) 湿潤シリーズ

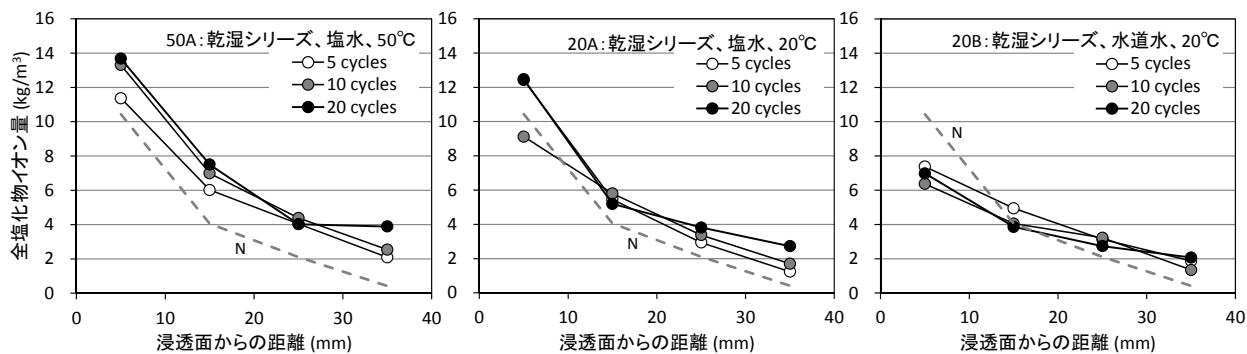


d) 中性化シリーズ

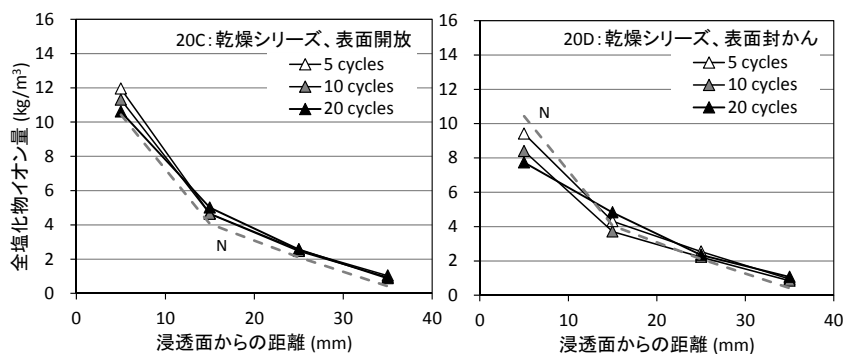
図 3-3 期間と質量変化率

3.3 全塩化物イオン量の分布

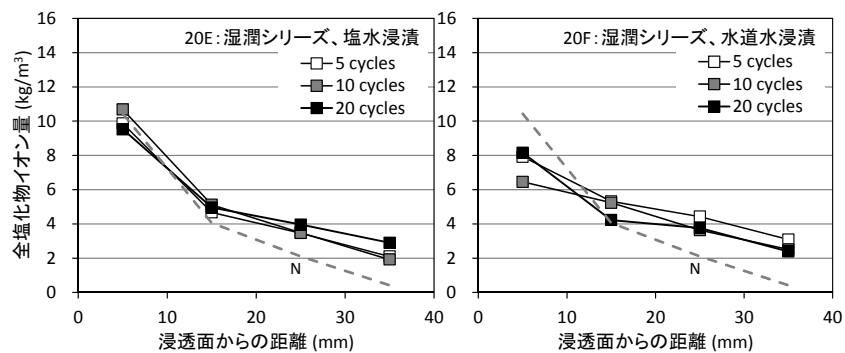
図 3-4 に浸透面からの距離と全塩化物イオン量の関係を示す。浸透面からの距離は、深さ 0～10mm の測定値を 5mm、10～20mm の測定値を 15mm のように 35mm までを表している。また、以降において記号“N”は予備促進終了時を示すものとする。



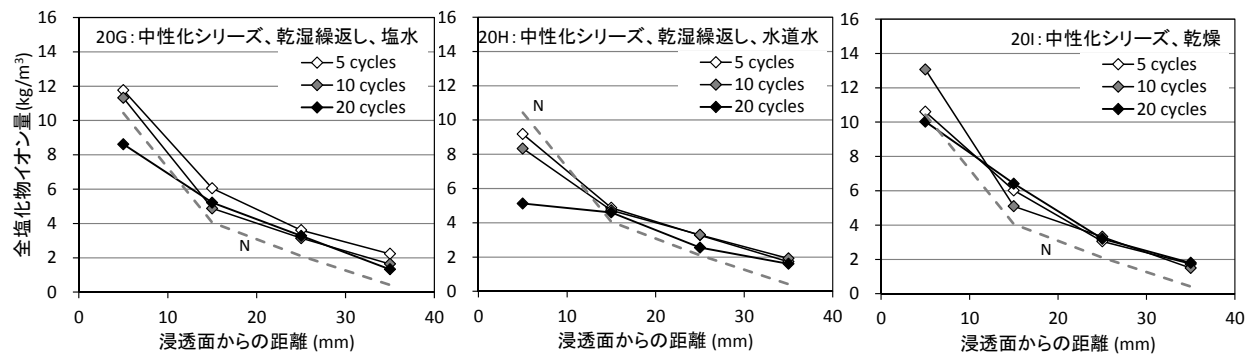
a) 乾湿シリーズ：左から 50A (50°C、塩水)、20A (20°C、塩水)、20B (20°C、水道水)



b) 乾燥シリーズ：左から 20C (開放)、20D (封かん)



c) 湿潤シリーズ：左から 20E (塩水)、20F (水道水)



d) 中性化シリーズ：左から 20G (塩水)、20H (水道水)、20I (乾燥、開放)

図 3-4 浸透面からの距離と全塩化物イオン量

3.3.1 乾湿シリーズ

乾湿シリーズにおける各環境条件の全塩化物イオン量の比較を図3-5に示す。

乾湿シリーズでは、図3-4に示したようにいずれも浸漬水を塩水とした環境温度が50℃の場合(50A)と20℃の場合(20A)では、ともに塩化物イオン量はコンクリートの表層部から内部まで予備促進が終了した時点のNよりも増加しており、内部では期間の経過に伴う増加も見られた。また、図3-5 a)に示すように環境温度50℃(50A)では20℃(20A)よりもコンクリート表面からの距離によらず、多くの塩化物イオン量が浸透・拡散している。これは、3.2節のように環境温度50℃では20℃よりも乾燥状態による水分蒸発量が大きいため、湿潤状態へ切り替えた際のコンクリート中に浸透する浸漬水の量が大きいと考えられる。

環境温度20℃において水道水を用いた場合(20B)では、図3-4 a)の右側の図に示すように、表層部の塩化物イオン量は予備促進終了時(N)よりも小さく、コンクリートからの塩化物イオンの流出がうかがえる。そのため、図3-5 b)に示すように浸漬水に塩水を用いた場合(20A)に比べて、表層部の塩化物イオン量は小さいが、内部では同程度であった。すなわち、コンクリート内部に拡散する塩化物イオン量には、コンクリート中に浸透する水に含まれる塩化物イオン濃度は影響しないと考えられる。

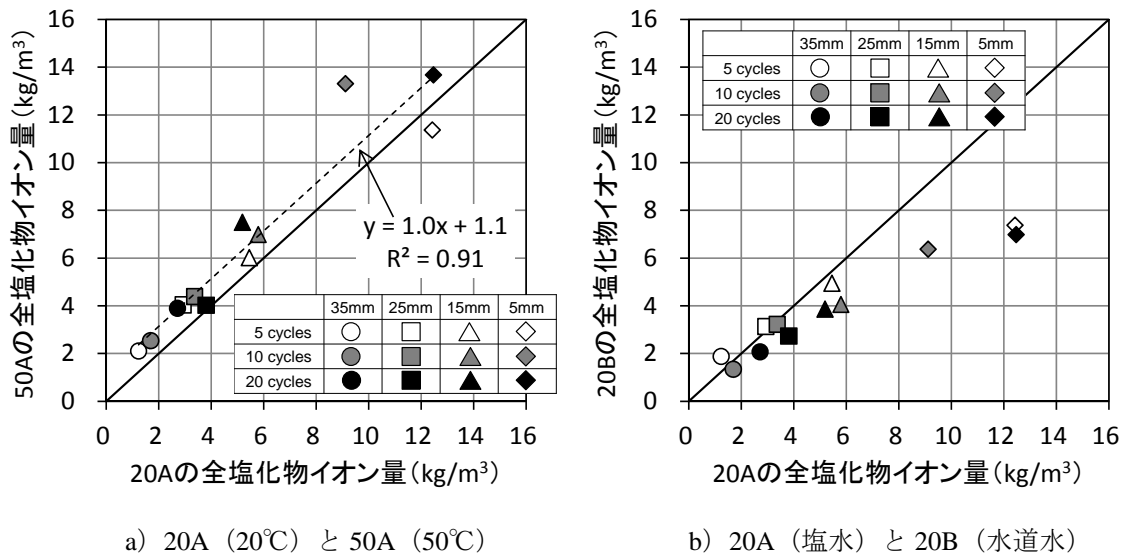


図3-5 各環境条件における全塩化物イオン量の比較 ①

3.3.2 湿潤シリーズ

湿潤シリーズにおける各環境条件の全塩化物イオン量の比較を図 3-6 に示す。

湿潤シリーズでは、図 3-6 a) に示すように浸漬水の違いによるコンクリート中に浸透・拡散した塩化物イオン量は、前項の乾湿シリーズと同様に塩水を用いた場合 (20E) に比べて、水道水を用いた場合 (20F) では、塩化物イオン量は表層部では少ないものの、内部では同程度であった。

ともに浸漬水に塩水を用いた、乾湿シリーズ (20A) と湿潤シリーズ (20E) における試験条件の違いでは、図 3-6 b) に示すように塩化物イオン量は表層部の 5mm では乾湿シリーズ (20A) の方が大きい、それよりも深い部分では同程度であった。また、図 3-4 に示したように、湿潤シリーズで塩水を用いた場合 (20E) における表層部 5mm の塩化物イオン量は予備促進終了時 (N) と同程度であり、予備促進後に塩水に浸漬することによる塩化物イオンの増加は見られなかった。

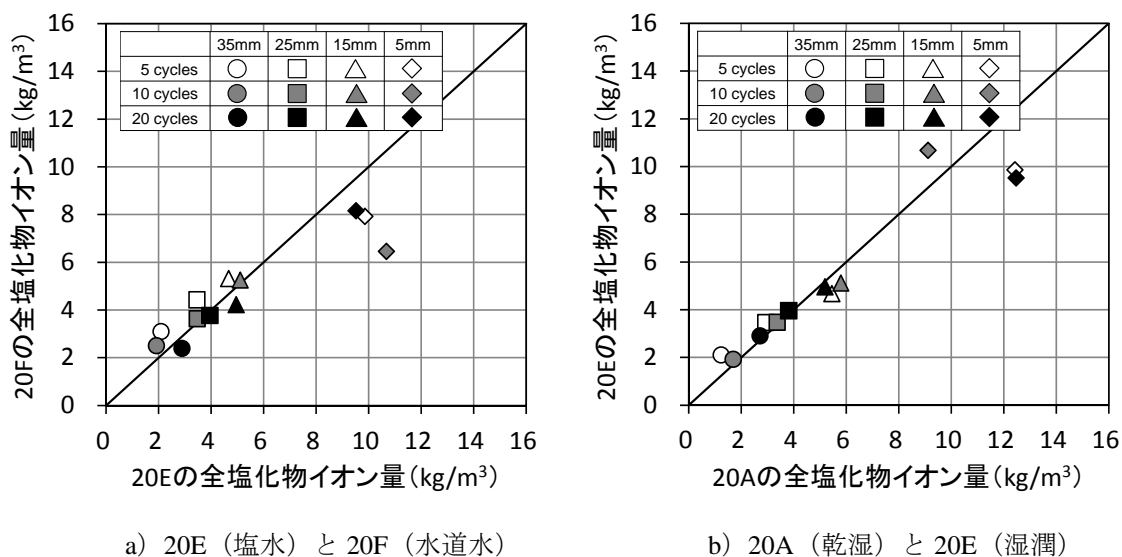


図 3-6 各環境条件における全塩化物イオン量の比較 ②

3.3.3 乾燥シリーズ

乾燥シリーズにおける各環境条件の全塩化物イオン量の比較を図3-7に示す。

乾燥シリーズでは、図3-4に示したように、浸透面を開放とした場合(20C)では予備促進終了時(N)と比べて表層部の塩化物イオン量の増減は小さく、内部ではわずかに増加している。一方で、浸透面を封かんとした場合(20D)では、予備促進終了時(N)よりも塩化物イオン量は表層部では小さく、内部ではわずかに増加している。これは、表層部では封かん処理に用いたエポキシ樹脂を除去する際にコンクリート表面(浸透面)の極表層が削り落ちたため、見かけ上塩化物イオン量が減少したものと考えられる。

また、浸透面を開放(20C)および封かん(20D)とした場合では、ともにコンクリート内部では予備促進終了時(N)よりも塩化物イオン量がわずかに増加しているが、その図3-7 a)に示すように増加量は同程度であった。これは、コンクリート内部での塩化物イオンの濃度差による拡散機構によるものと考えられる。しかし、図3-7 b)に示すように乾湿シリーズにおいて、湿潤期間に塩化物イオンの供給が少ない水道水を用いた場合(20B)と比べても、乾燥シリーズ(20C)における内部の塩化物イオンの増加量は小さく、濃度差による拡散は水の移動による拡散よりも小さいと考えられる。

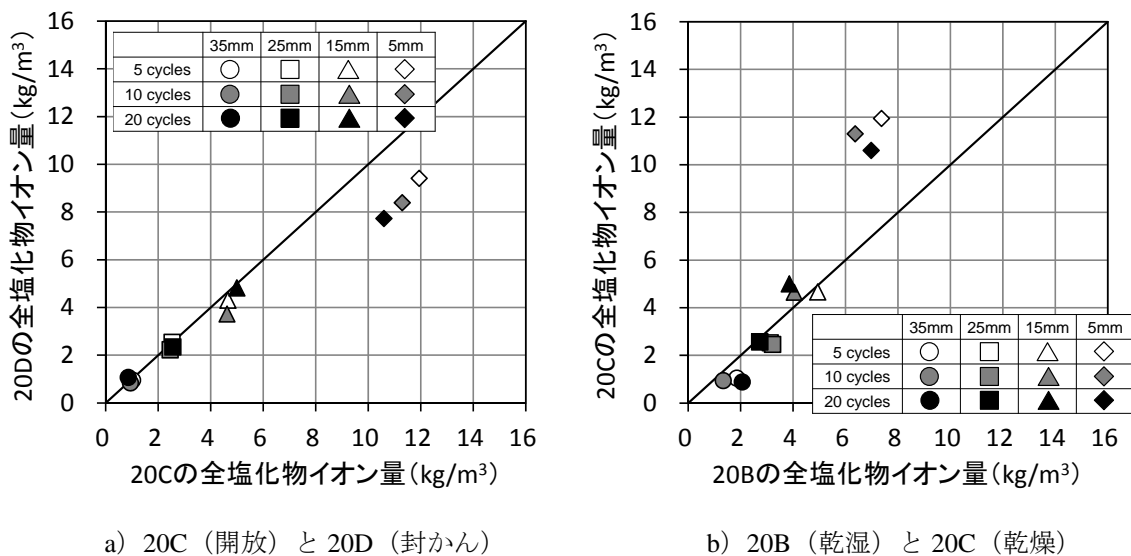


図3-7 各環境条件における全塩化物イオン量の比較 ③

3.3.4 中性化シリーズ

一般に、中性化したコンクリートではセメント水和物などに固定されていたフリーデル氏塩が細孔溶液中に溶け出すことから、この塩化物イオンがコンクリート内部に拡散することが知られている。そのため中性化シリーズでは、深さ方向に塩化物イオン量のピークが移行するものと想定していた。しかし、本実験における中性化シリーズの各測定サイクル時の中性化深さは、20G および 20H では 20 サイクルまで 0mm、また、20I では 5 サイクルで 0mm、10 サイクルで 3.0mm、20 サイクルで 5.2mm であり、実験期間内ではコンクリートの中性化の進行は小さく、いずれの条件でも最も表層部として分析試料を採取した 10mm 以内であった。そのため、コンクリートの中性化が塩化物イオンの浸透・拡散性状におよぼす影響については確認することはできなかった。

なお、乾燥状態において CO₂ 濃度が高い中性化環境であっても、図 3-4 に示したとおり塩化物イオンの浸透・拡散性状については、これまでに述べたその他の条件が同様な乾湿シリーズおよび乾燥シリーズと同様な傾向を示した。

3.4 拡散方程式による塩化物イオン量の積分値

コンクリート中の塩化物イオンは、一般に式 (3-1) に示す Fick の二次方程式の解析解である拡散方程式に従ってコンクリート内部に浸透・拡散するものとされている。本項では、この拡散方程式を用いて、その特性値およびコンクリート中の塩化物イオン量の積分値について検討を行った。なお、本実験におけるサイクル数 (t) は、予備促進として行った 50°C の乾湿繰返し (50A) の 10 サイクルを加えたサイクル数とした。すなわち、5 サイクル時の計算にあたっては t=15 を、10 サイクル時では t=20、20 サイクル時では t=30 としている。

$$C(x_i, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_i}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \quad \text{式 (3-1)}$$

ここに、t : サイクル数 (cycles)

x_i : コンクリート表面からの距離 (mm)

$C(x_i, t)$: 距離 x_i (mm) におけるサイクル数 t (cycles) での塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)

D : 見かけの拡散係数 (cm^2/cycle)

$\operatorname{erf}()$: 誤差関数

3.4.1 拡散方程式による特性値

図 3-8 に表面塩化物イオン量 (C_0)、図 3-9 に拡散係数 (D) の算出結果をそれぞれ示す。式 (3-1) に示す拡散方程式は、表面塩化物イオン量 (C_0) が係数となる関数である。そのため、本来は期間と塩化物イオン量の間には、コンクリート表面において常に $C_0 \text{ kg/m}^3$ の塩化物イオンが供給されている同条件での比較が前提となる。したがって、本実験のように予備促進の終了後から塩化物イオンの供給条件や、供給の有無が変わる場合、期間 (サイクル) による比較には相応しくないため、本実験においては測定時の瞬間値を比較するものとして、表面塩化物イオン量および拡散係数を扱うこととする。

表面塩化物イオン量には、コンクリートの表層部の塩化物イオン量が大きく影響する。そのため、浸漬水に水道水を用いた場合 (20B、20F および 20H) では、3.3 節で述べたのとおり表層部で塩化物イオンの流出が起きていることから、表面塩化物イオン量は小さくなった。また、全塩化物イオン量の分析試料の採取時にコンクリートの表面が削り落ちたと考えられる乾燥シリーズの浸透面を封かんとした場合 (20D) を除き、その他の環境条件では、ばらつきはあるものの、表面塩化物イオン量は概ね予備促進終了時 (N) と同程度であった。

一方で、拡散係数は浸漬水に水道水とした場合 (20B、20F および 20H) では塩水とした場合より大きな値を示した。これは、コンクリート中の塩化物イオン量の分布が、表層部では少なく、内部で

は大きくなったことにより、表層部と内部との塩化物イオン量の差（分布の傾き）が小さくなったことによるものである。また、乾燥シリーズ（20C および 20D）では予備促進終了時（N）よりも拡散係数は小さく、その他の環境条件では予備促進終了時（N）と同程度であった。

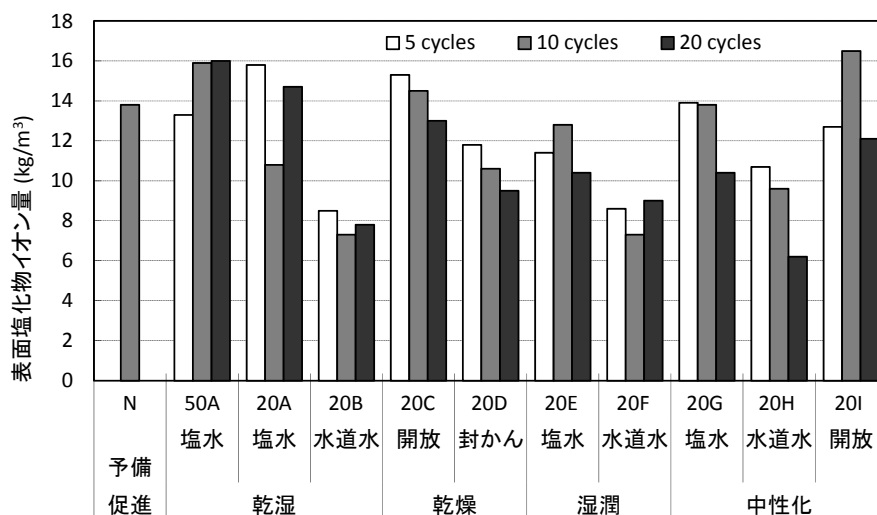


図 3-8 表面塩化物イオン量(C₀)

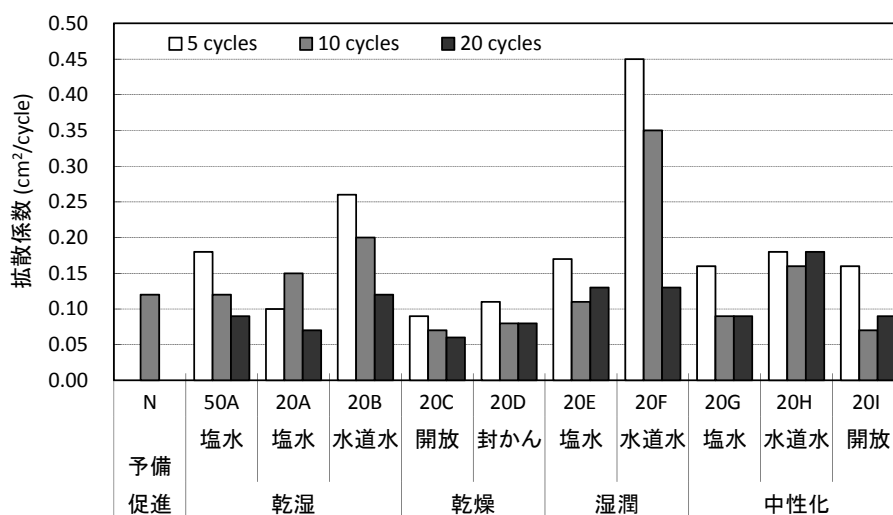


図 3-9 拡散係数(D)

3.4.2 塩化物イオン量の積分値

図 3-10 にコンクリート中の塩化物イオン量の積分値を示す。塩化物イオン量の積分値は式 (3-2) より、図 3-8 および図 3-9 で示した特性値の値を用いて算出した。

$$S = \int C(x_i, t) \quad \text{式 (3-2)}$$

ここに、S : 塩化物イオン量の積分値 (g/m²)

C(x_i, t) : 式 (3-1) で表される拡散方程式

予備促進の終了後も塩水に浸漬することでコンクリート中に塩化物イオンが供給された場合 (50A、20A および 20E) では、期間の経過に伴い塩化物イオン量の積分値が増加している。しかし、中性化シリーズで塩水への浸漬を行った場合 (20G) では期間の経過に伴い塩化物イオン量の積分値は減少した。一方で、水道水に浸漬した場合 (20B および 20F) では、期間の経過に伴い塩化物イオン量の積分値が減少しており、コンクリートからの塩化物イオンの流出がうかがえる。

また、湿潤シリーズで浸漬水に水道水を用いた場合 (20F) では、予備促進終了時 (N) に比べて塩化物イオン量の積分値が大きくなっているが、これは前述のように表面塩化物イオン量が小さく、拡散係数が大きくなったため、塩化物イオンがコンクリートの内部深くまで浸透していると見做されたためである。これは、図 3-11 に示すように、本実験で測定範囲の最深部である 35mm の塩化物イオン量が同程度の湿潤シリーズで塩水に浸漬した場合 (20E) や、表層部での塩化物イオンの流出が同様に見られた乾湿シリーズで浸漬水に水道水を用いた場合 (20B) と比較しても、より内部まで塩化物イオン量が拡散していると見做されている。しかし、本実験では塩化物イオン量の測定範囲が 35mm までであるため、35mm 以上の内部における塩化物イオン量の分布は実際には不明であるが、これほど内部に塩化物イオンが浸透・拡散することは考え難い。

乾燥シリーズでは、期間によらずコンクリート中の塩化物イオン量の積分値は同程度であった。これは、3.2 節に示したように浸透面を開放とした場合 (20C) ではコンクリート内の水分の蒸発により試験体の質量が減少しても、コンクリート内部には塩化物イオンが残留していることを示しており、天沼ら²⁾の報告と同様であった。すなわち、コンクリート内に侵入した塩化物イオンは、乾燥環境下ではコンクリートの外部への流出が生じないことがわかる。

そのため、乾湿シリーズにおいて、環境温度 50℃ (50A) では 20℃ (20A) よりも塩化物イオン量の積分値が大きいのは、図 3-2 に示したようにコンクリート中に浸透した塩水の量が多く、また、乾燥時にはコンクリート中に残留するため、塩化物イオン量がコンクリート中に蓄積されたものと考えられる。

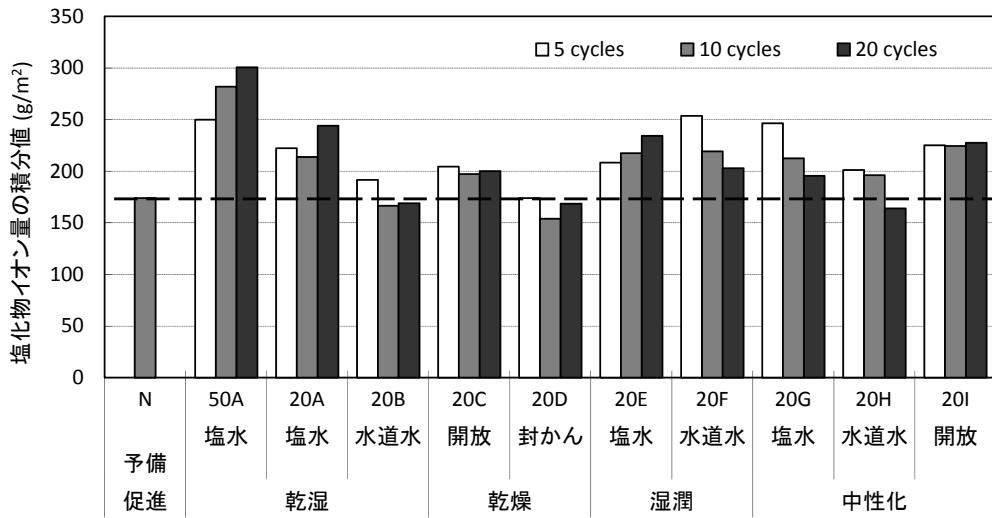


図 3-10 コンクリート中の塩化物イオン量の積分値

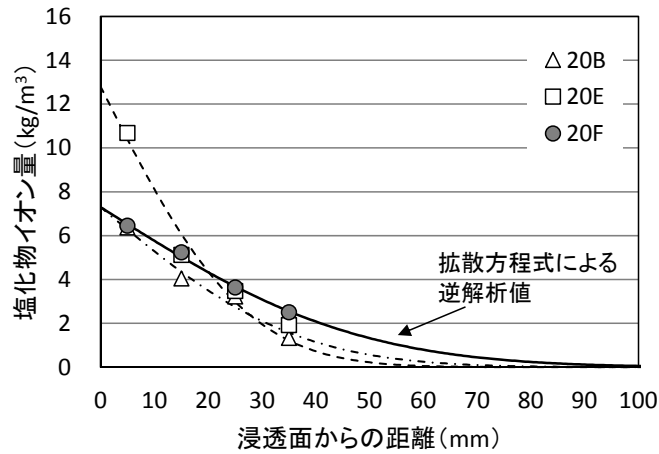


図 3-11 塩化物イオン量の実測値と拡散方程式による逆解析値

3.5 まとめ

本章では塩化物イオンの浸透・拡散性状について、コンクリート中に浸透した塩化物イオンの拡散性状を明らかにすることを目的に、外部からコンクリート中に塩化物イオンを浸透させた試験体について、10パターンでの乾燥・湿潤条件における塩化物イオンの拡散性状について実験的に検討を行った。実験結果より得られた知見を以下に示す。

- 1) 乾湿シリーズ、湿潤シリーズともに浸漬水が塩水または水道水であっても、塩化物イオンはコンクリート内部に拡散する。これは、コンクリート中の水の移動による移流であり、乾湿シリーズや湿潤シリーズといった試験条件や浸漬水の違いによる差は小さい。
- 2) 乾燥シリーズでは、コンクリート中の塩化物イオンの濃度差によって、塩化物イオンは内部に拡散するが、1) の水分の移動による移流よりもその程度は小さい。
- 3) コンクリート内に浸透した塩化物イオンは、湿潤環境では表層部からコンクリートの外部に流出する。しかし、乾燥環境ではコンクリート中の水分が蒸発しても塩化物イオンはコンクリート内に残留する。
- 4) 乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験において、試験体の質量変化は乾燥時・湿潤時ともに環境温度 50℃の方が 20℃よりも、乾燥および吸水といったコンクリートにおける水の増減が大きいのため、50℃では多くの塩化物イオンがコンクリート中に蓄積されるため、20℃よりも表層部から内部まで多く塩化物イオン量が浸透・拡散する。

以上より、コンクリート中における塩化物イオンの拡散性状には、コンクリートを出入りする水がおよぼす影響が大きいことを明らかにした。また、コンクリート中への水の浸透がない場合でも、コンクリートの乾燥による水分の蒸発では塩化物イオンはコンクリートの内部に残留し、また、濃度差により拡散するが、その程度は水の移動による移流よりも小さいことを明らかにした。

第3章の参考文献

- 1) 丸屋剛、Somnuk TANGTERMSIRIKUL、松岡康訓：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化、土木学会論文集 No.585 V-38、pp79～95、1998.2
- 2) 天沼邦一、榊田佳寛、吉崎芳郎、御所窪邦男：コンクリートの乾湿にともなう塩化物の移動について、コンクリート工学年次論文集 Vol.14 No.1、pp.787～792、1992
- 3) 高橋英孝、湯浅昇、松井勇、笠井芳夫：温度の違いがコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響、日本建築学会大会講演梗概集（北陸）A-1、pp.1295～1296、2010.9

第4章

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・拡散性状

第4章

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・拡散性状

外来型の塩害では、塩化物イオンは海からの飛来塩分としてコンクリート表面に付着し、雨や潮風の湿分に溶け込みコンクリート内に浸透するとされている。また、第3章で明らかにしたとおり、コンクリートに浸透した塩化物イオンはコンクリート中における水の移動と塩化物イオンの濃度差により、コンクリート内部で拡散する。特に、コンクリート中で水の移動がある領域では塩化物イオンの拡散は水の移動の影響を大きく受ける。一方で、コンクリートの乾燥時には、水は蒸発によりコンクリートから外部に逸散するため、塩化物イオンはコンクリート中に残留する。このように、塩化物イオンはコンクリートの乾湿繰返し環境によりコンクリート内に蓄積するため、その量はコンクリートの吸水や乾燥の性状と密接な関係があると考えられる。

また、第2章で調査・整理したとおり、コンクリート内に蓄積される塩化物イオン量には限りがあると考えられることから、塩化物イオン量の浸透・拡散性状は経時により変化する傾向があることが多数報告されている。

しかし、塩化物イオンのコンクリート中への浸透量や蓄積量および拡散性状とコンクリートの吸水性状との関係については不明な点が多い。そこで、本章では乾湿繰返しによる浸透促進試験からコンクリートの質量変化と塩化物イオン量の関係について実験的に検討を行った。

4.1 実験概要

4.1.1 実験方法および乾湿繰返し条件

本実験では、塩化物イオンの浸透促進として乾湿繰返しによる促進試験を行った。乾湿繰返しによる浸透促進試験は、第2章で整理したように一般化された試験方法はないものの建築分野において広く用いられている試験方法である。

本実験における実験の要因と水準を表4-1に、乾湿繰返しサイクルを表4-2にそれぞれ示す。本実験では、乾湿繰返しにおける乾燥・湿潤期間の違いからコンクリートの吸水性状および塩化物イオンの浸透・拡散性状の関係を明らかにすることを目的とし、いずれも7日間を1サイクルとする4パターンの乾湿繰返しサイクルを設定した。Case.1~Case.3は、1サイクル中に乾燥と湿潤の日数の割合が異なるように、“Case.1”は湿潤5日+乾燥2日、“Case.2”は湿潤4日+乾燥3日および“Case.3”は湿潤3日+乾燥4日とした。これらに加えて、1サイクルに乾燥と湿潤の日数の割合はCase.1（計湿潤5日、乾燥2日）と同じであるが、1サイクル内での乾湿繰返し回数が2回となるように、湿潤3

日+乾燥1日+湿潤2日+乾燥1日を1サイクルとする“Case.4”を設けた。

乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験は、第3章の実験結果より、環境温度50℃では20℃に比べてコンクリート中に浸透・拡散する塩化物イオン量が多くなることから、50℃とした。また、乾湿繰返しは温度50℃、湿度30%R.H.、風量0.5m/s程度とした循環式乾燥機で行い、湿潤時は乾燥機内に設置した水槽でNaCl濃度3%の水溶液に試験体を浸漬した。

表 4-1 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比	0.5、0.6
試験体の養生条件	標準養生4週+20℃気中養生4週
浸透促進条件	1サイクルを7日とする乾湿繰返し(表4-2参照)
乾燥条件	気中50℃
湿潤条件	温度50℃、NaCl3%水溶液への浸漬

表 4-2 乾湿繰返しサイクル

日数	1	2	3	4	5	6	7
Case.1	湿潤					乾燥	
Case.2	湿潤				乾燥		
Case.3	湿潤			乾燥			
Case.4	湿潤			乾燥	湿潤		乾燥

4.1.2 試験体の作製および試験方法

(1) 使用材料およびコンクリートの調合

表 4-3 に使用材料の品質、コンクリートの計画調合およびコンクリートの性状を示す。コンクリートに使用した材料は、いずれも一般的に用いられる材料とし、セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は陸砂および硬質砂岩砕石、練混ぜ水は上水道水、化学混和剤はリグニンスルホン酸系 AE 減水剤とした。

コンクリートの調合において、水セメント比は呼び強度 36 程度の普通コンクリートとなる 0.5、および浸透促進試験で塩化物イオン量の侵入量が多くなるように強度の低い 0.6 の 2 水準とした。また、いずれも一般的なコンクリートと同様に、目標スランプ 18cm および目標空気量 4.5%、単位粗骨材かさ容積は 0.58m³/m³、AE 減水剤の使用量はセメント質量×0.25%とした。

表 4-3 使用材料の品質、コンクリートの計画調合およびコンクリートの性状

コンクリートの計画調合						コンクリートの試験結果					
W/C	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				フレッシュコンクリート		コンクリート密度 (kg/m ³)		圧縮強度 (N/mm ²)	
		W	C	S	G	スランプ (cm)	空気量 (%)	4w 水中	4w 水中 + 4w 気中	4w 水中	4w 水中 + 4w 気中
0.5	46.6	174	348	824	945	20.5	5.0	2350	2299	46.5	51.9
0.6	48.0	174	291	847	945	19.5	4.8	2347	2315	35.4	42.4

セメント：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3316cm²/g）

細骨材：大井川産陸砂（絶乾密度 2.60g/cm³、吸水率 1.69%、F.M.2.78）

粗骨材：青梅産硬質砂岩砕石（最大寸法 20mm、絶乾密度 2.62g/cm³、吸水率 0.95%、実積率 61.5%）

練混ぜ水：東京都八王子市 上水道水

化学混和剤：リグニンスルホン酸塩系 AE 減水剤 標準形

(2) 試験体の作製

コンクリートは温度 20℃、湿度 60%R.H.の恒温恒湿室で室温に調整した材料を用いて、容量 50L の水平パン型ミキサで練り混ぜた。試験体は、寸法 10×10×40cm として鋼製型枠を用いて成型し、コンクリートの打込み翌日に脱型した。脱型後の試験体は材齢 4 週まで標準養生とし、その後 8 週まで上記室内で気中養生とした。

図 4-1 に試験体の取扱い方法を示す。試験体は、浸透面（試験面）から 70mm までの塩化物イオン量を測定対象とするため、小口（10×10cm）の 2 面を塩化物イオンの浸透面として開放した。また、その他の 4 面には気中養生中（材齢 7 週目）にエポキシ樹脂を用いて封かん処理を行った。試験体は、乾湿繰返し 10 サイクルが終了した時点で半分は切断し、一片は塩化物イオンの測定に、もう一片は切断面にエポキシ樹脂による封かん処理を施して乾湿繰返しを継続した。そのため、1～10 サイクルまでは長さ 40cm の試験体に 10×10cm が 2 面開放されているが、11～20 サイクルでは長さ約 20cm の試験体に開放面は 1 面のみとなっている。

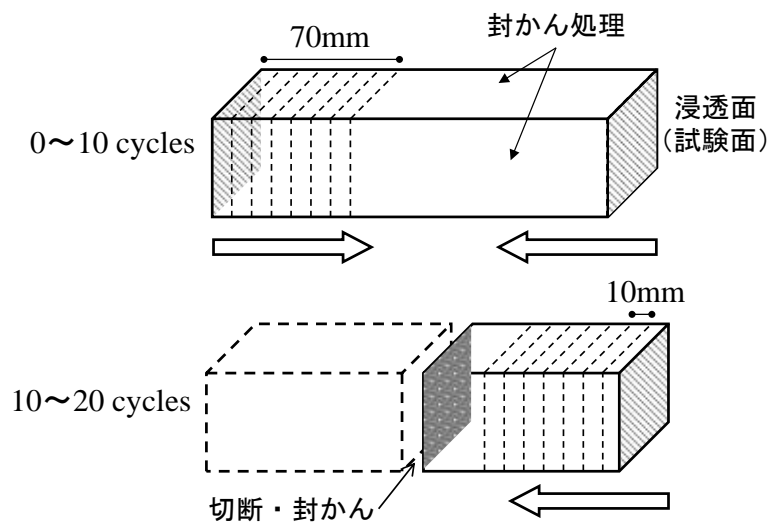


図 4-1 試験体の取扱い方法

(3) 試験方法

コンクリート中の塩化物イオン量は、10 および 20 サイクルの終了時に測定した。塩化物イオン量の測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、電位差滴定法により全塩化物イオン量を測定した。

塩化物イオン量の測定用の試料は、塩化物イオンの浸透面より乾式コンクリートカッタで 10mm ずつ、深さ 70mm まで採取し、封かん処理用のエポキシ樹脂の付着した部分を除去した後、全量が 150 μ m のふるいを通してまで微粉碎とした。

4.2 塩化物イオン量の分布と拡散方程式による解析

4.2.1 全塩化物イオン量の実測値

図 4-2 に浸透面からの距離と全塩化物イオン量の関係を示す。図中の表記について、浸透面からの距離は深さ 0~10mm の測定値を 5mm、10~20mm の測定値を 15mm のように 65mm までを表している。

浸透面からの距離と全塩化物イオン量の関係は、1 サイクルにおいていずれも乾燥 2 日・湿潤 5 日となる Case.1、Case.4 と乾燥 3 日・湿潤 4 日の Case.2、乾燥 4 日・湿潤 3 日の Case.3 に大別された。そのため、コンクリート中への塩化物イオンの浸透量は、おおよそ Case.1=Case.4<Case.2=Case.3 となり、1 サイクル中の乾湿繰返し回数よりも 1 サイクル中に乾燥期間を長くすることで塩化物イオンの浸透量は大きくなった。

水セメント比の違いでは、Case.2 および Case.3 では促進期間 10 サイクルの全塩化物イオン量は浸透面から 35mm までは W/C 0.6 が W/C 0.5 よりも大きく、45mm 以上では同程度となった。その後 20 サイクルでは各測定位置で塩化物イオン量は増加し、W/C 0.6 ではいずれも W/C 0.5 よりも大きく、水セメント比が大きいほど塩化物イオン量は大きくなった。

一方で、Case.1 および Case.4 では促進期間 10 サイクルでの全塩化物イオン量は、表層部の 5mm において W/C 0.5 が W/C 0.6 よりも大きく、浸透面から 15mm 以上では W/C 0.6 の方がわずかに大きかった。一方で、20 サイクルでは 10 サイクルからの塩化物イオンの増加量は少なく、特に W/C 0.5 では 10 サイクルと同程度のもも見られ、また、表層部ではいずれも W/C 0.5 の塩化物イオン量が W/C 0.6 よりも少なくなった。

Case.1 および Case.4 の 10 サイクルで見られた、表層部での水セメント比と塩化物イオン量の関係は、梶田ら¹⁾も同様な実験結果を報告している。これは、第 3 章で示したように湿潤環境下では塩化物イオンの流出が起こるため、促進試験条件やコンクリート表面に影響するものと考えられる。

以上のように、乾湿繰返しにおける塩化物イオンの浸透促進試験では、乾湿繰返し回数よりも乾燥期間を十分に (50°C で 3 日程度) 設けることでコンクリート中の塩化物イオン量は大きくなる。また、水セメント比が大きいほどコンクリート中の塩化物イオン量は大きくなるが、表層部ではこの関係が逆転する場合がある。

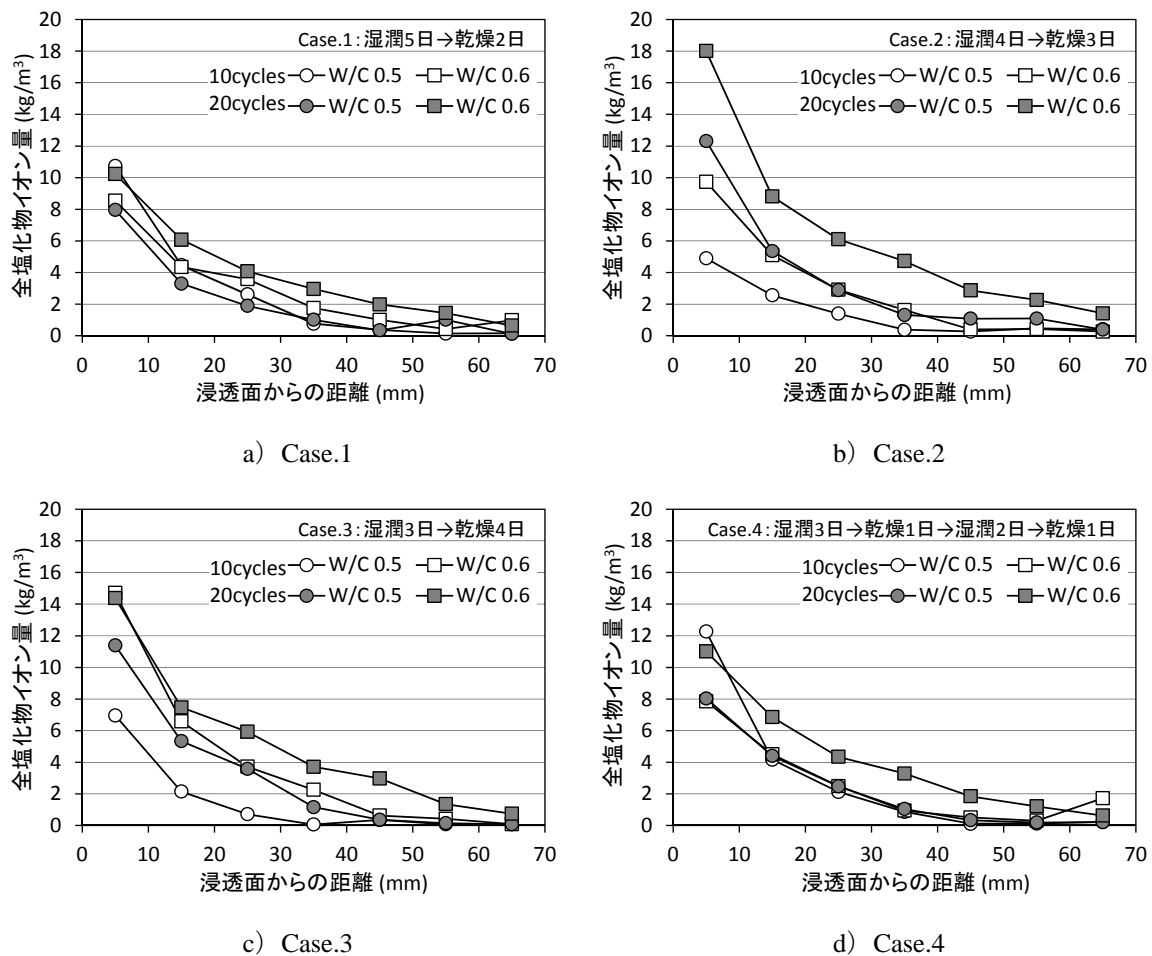


図 4-2 浸透面からの距離と全塩化物イオン量

4.2.2 拡散方程式による解析

第 2 章で整理したとおり、日本建築学会の JASS 5 および土木学会のコンクリート標準示方書では、いずれもコンクリート中の塩化物イオンの浸透・拡散を評価するため、式 (4-1) に示すような拡散方程式を用いている。コンクリート標準示方書では、2.1.2 項の式 (2-11) で示したように、右辺にコンクリート材料に由来する初期塩化物イオン量 (初期塩化物イオン濃度: C_i) を加えることとしているが、本実験では材料由来の塩化物イオン量が少ない (同様な材料を用いた第 3 章では 0.06kg/m^3) ことから、初期塩化物イオン量は考慮しないこととした。

$$C(x_i, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_i}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} \quad \text{式 (4-1)}$$

ここに、 t : サイクル数 (cycles)

x_i : コンクリート表面からの距離 (mm)

$C(x_i, t)$: 距離 x_i (mm) におけるサイクル数 t (cycles) での塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)

D : 見かけの拡散係数 (cm^2/cycle)

$\operatorname{erf}()$: 誤差関数

この拡散方程式は、特性値となる表面塩化物イオン量 (C_0) を境界条件として、拡散係数 (D) に従って塩化物イオンがコンクリート中を浸透・拡散するものである。これらの特性値を浸透面からの距離と塩化物イオン量の関係から最小二乗法などで最適化分析を行い、誤差二乗和が最小となる値を算出した。なお、誤差二乗和とは、全塩化物イオンの実測値と拡散方程式で算出される逆解析値との差の二乗和を示す。本項では、この式 (4-1) を用いて 2 通りの解析を行った。

(1) 全促進期間による解析 (解析 (1))

式 (4-1) の拡散方程式では、表面塩化物イオン量は環境条件を、拡散係数はコンクリートの性質を表す特性値である。すなわち、それぞれが同一の条件下であれば同じ値を示すとされている。そのため、JASS 5 およびコンクリート標準示方書では、第 2 章で整理したとおり、関連する関係式や地域区分、または実験や調査などから求められた値を用いて、経過時間に係わらず一定の値を用いて評価を行うこととしている。そこで本項では、これらに倣い促進期間 10 サイクルおよび 20 サイクルの両方の測定値を用いて誤差二乗和が最小となる特性値を算出した。

表 4-4 に全促進期間による解析 (解析 (1)) の結果の一覧を示す。なお、標準誤差とは誤差二乗和を試料数-1 で除した値の平方根を示す。

解析 (1) による解析では、標準誤差は $0.62 \sim 1.74 \text{kg/m}^3$ であり、一部のデータでは実測値と解析値 (曲線) との差が見られた。

表 4-4 解析(1)による解析結果の一覧

浸透促進条件	Case.1		Case.2		Case.3		Case.4	
	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6
水セメント比								
表面塩化物イオン量 (kg/m^3)	11.1	10.3	11.5	15.9	12.3	16.4	12.4	10.9
拡散係数 (cm^2/cycle)	0.12	0.28	0.10	0.21	0.09	0.20	0.11	0.24
誤差二乗和	16.7	5.0	24.8	39.5	9.0	11.4	18.0	7.8
標準誤差 (kg/m^3)	1.13	0.62	1.38	1.74	0.83	0.94	1.18	0.77

(2) 各促進期間による解析（解析（2））

解析（1）では10サイクルおよび20サイクルのいずれの場合も特性値が同じであるとして解析を行った。しかし、2.3節に示したように、拡散方程式の特性値である表面塩化物イオン量および拡散係数は、いずれも経年により変化するとの見解があり、浸透促進試験や屋外暴露試験結果からも報告されている。そこで、本項では10サイクルおよび20サイクルにおいて、それぞれサイクル別に解析を行った。

表4-5に各促進期間における解析（解析（2））の結果の一覧を示す。各条件における標準誤差は0.20～1.52kg/m³であり、図4-3に示す解析（1）と解析（2）における誤差二乗和の関係でも示されるように、ほぼすべての条件において解析（1）よりも解析（2）において標準誤差は小さくなった。そのため、図4-4～図4-7に示すように実測値と拡散方程式による逆解析で得られた曲線との関係からも、解析（2）の方がより実測値に近い値が算出されている。

表4-5 解析(2)による解析結果の一覧

浸透促進条件		Case.1		Case.2		Case.3		Case.4	
水セメント比		0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6
表面塩化物イオン量 (kg/m ³)	10C*	13.6	9.5	6.0	11.6	10.0	18.0	16.7	9.4
	20C*	9.9	11.1	15.4	19.1	13.8	15.4	9.8	12.2
拡散係数 (cm ² /cycle)	10C	0.15	0.34	0.20	0.23	0.08	0.18	0.10	0.25
	20C	0.08	0.23	0.08	0.19	0.10	0.22	0.11	0.22
誤差二乗和	10C	1.2	2.2	0.4	0.7	0.2	3.1	1.7	3.0
	20C	1.9	2.0	3.3	13.8	1.4	6.2	0.2	1.4
標準誤差 (kg/m ³)	10C	0.44	0.61	0.27	0.34	0.20	0.71	0.53	0.71
	20C	0.57	0.58	0.74	1.52	0.48	1.02	0.17	0.48

* 10Cおよび20Cは、それぞれ10サイクルおよび20サイクルを示す。

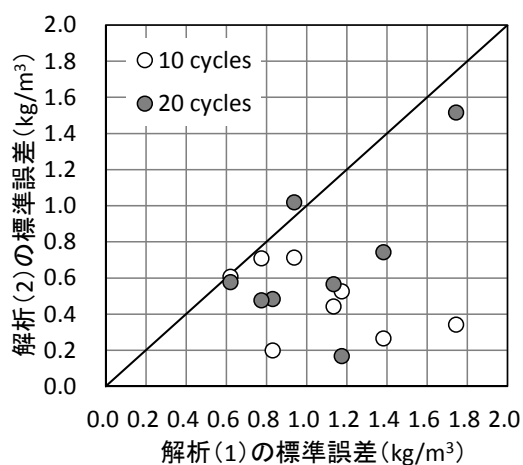


図4-3 解析(1)および解析(2)における標準誤差の関係

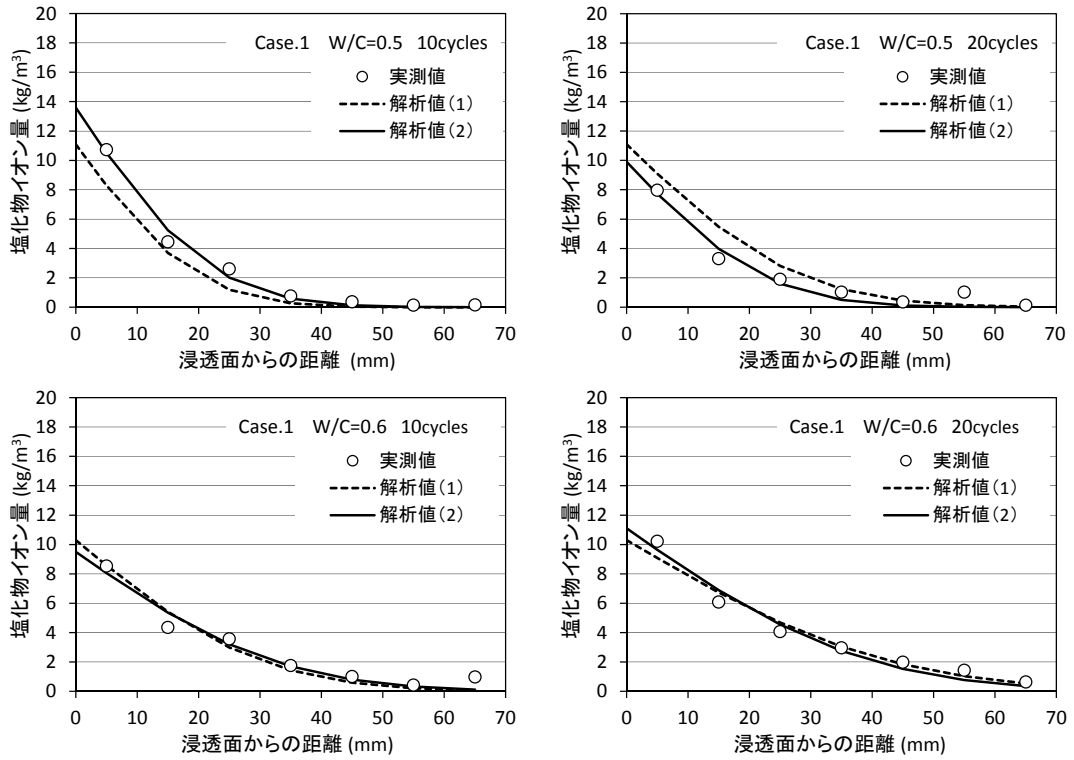


図 4-4 塩化物イオン量の測定値と拡散方程式による解析曲線 (Case.1)

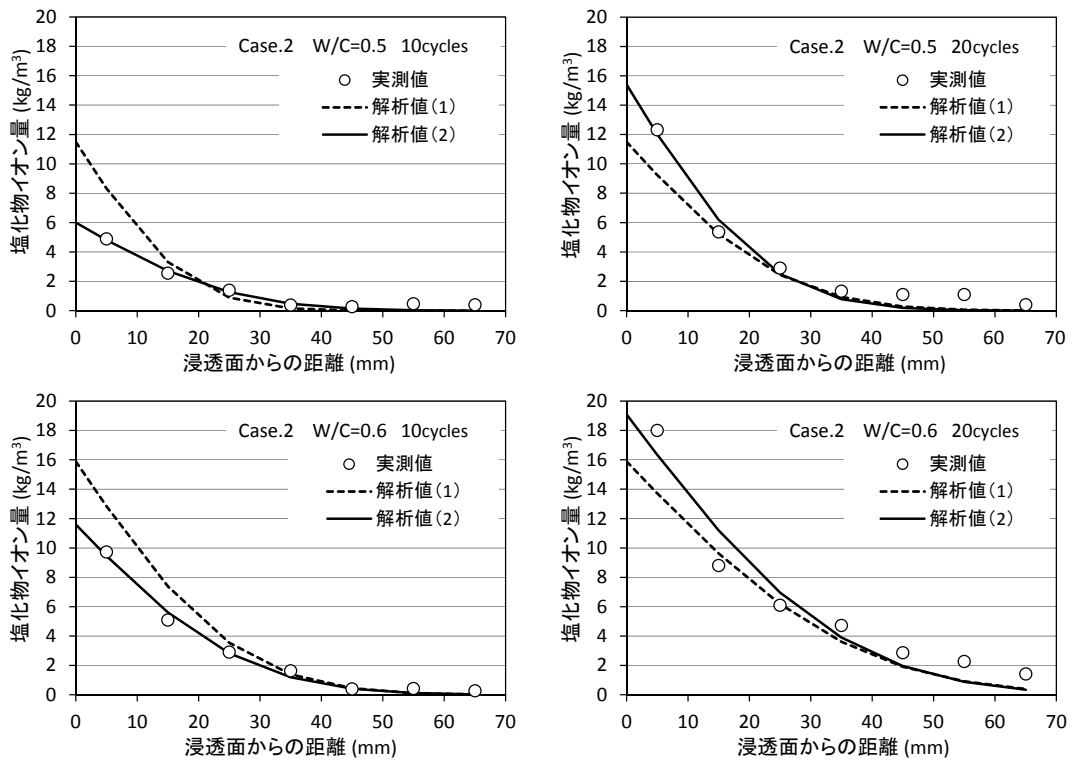


図 4-5 塩化物イオン量の測定値と拡散方程式による解析曲線 (Case.2)

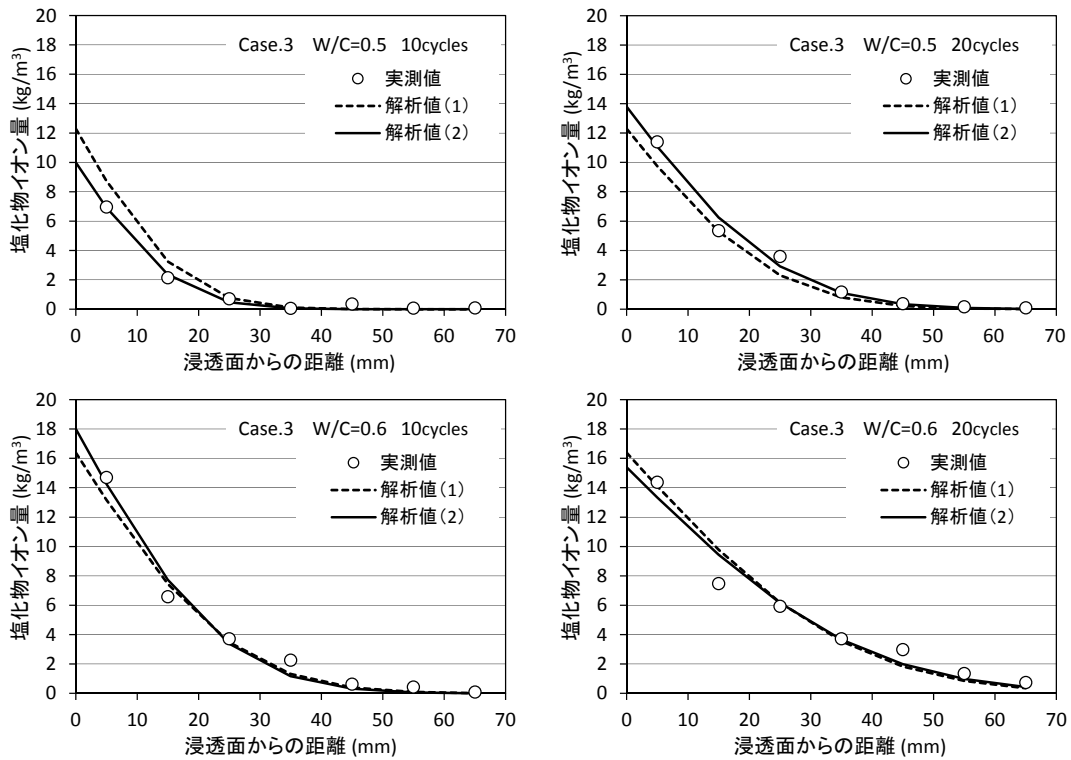


図 4-6 塩化物イオン量の測定値と拡散方程式による解析曲線 (Case.3)

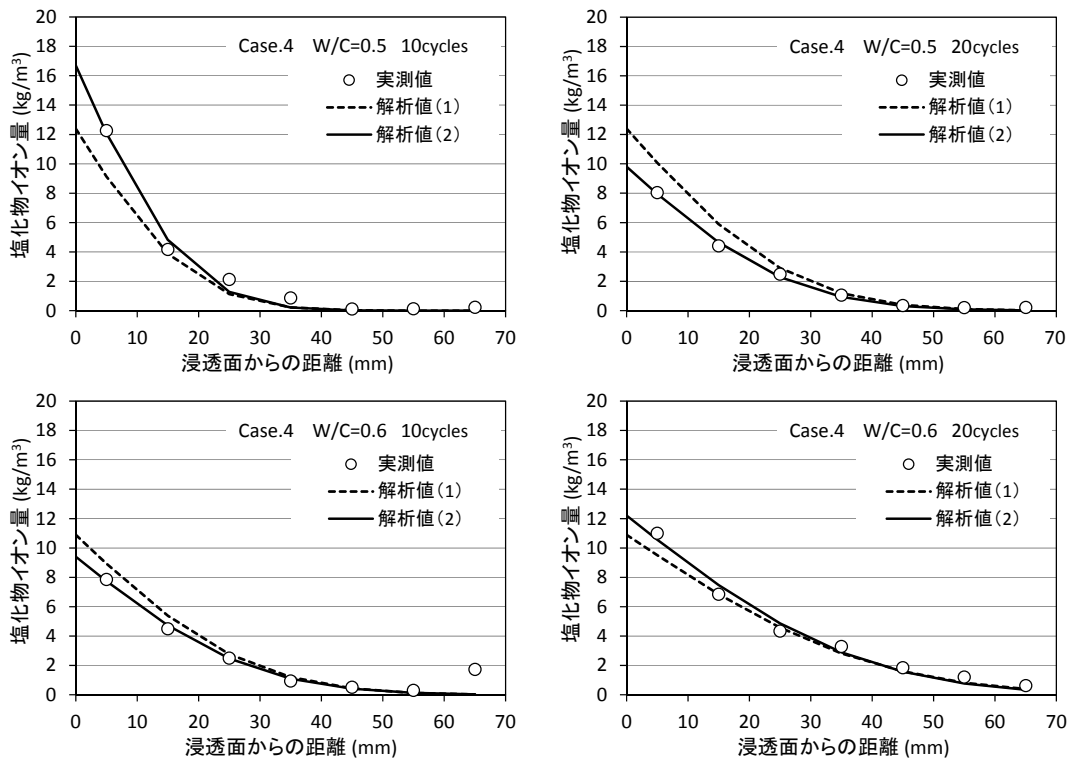


図 4-7 塩化物イオン量の測定値と拡散方程式による解析曲線 (Case.4)

(3) 拡散方程式による解析に関する検討

図4-8に表面塩化物イオン量の解析値を、図4-9に拡散係数の解析値をそれぞれ示す。

表面塩化物イオン量は、試験体の表層部における全塩化物イオン量に大きく影響されるためばらつきが大きく、同じ浸透促進条件でも水セメント比や解析方法および促進期間により大きく異なるものが見られた。解析(1)の結果では、表面塩化物イオン量はCase.1およびCase.4ではW/C 0.6よりもW/C 0.5の方が大きく、また、同一水セメント比ではW/C 0.5ではCase.1~Case.4で同程度であるが、W/C 0.6ではCase.1=Case.4<Case.2≤Case.3と、1サイクルにおける乾燥日数が長いほど大きくなった。

一方、拡散係数は促進条件にかかわらず、解析(1)および解析(2)のいずれの解析方法であっても同一水セメント比であればおおよそ同じ値であった。

また、解析(2)における10サイクルから20サイクルへの経過時間に伴う特性値の変化には、水セメント比や浸透促進条件による明確な傾向は認められないが、表面塩化物イオン量は大きく、拡散係数は小さくなるものが多数であった。

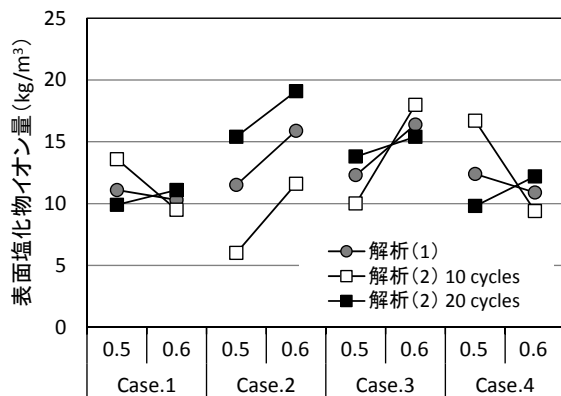


図4-8 表面塩化物イオン量の解析値

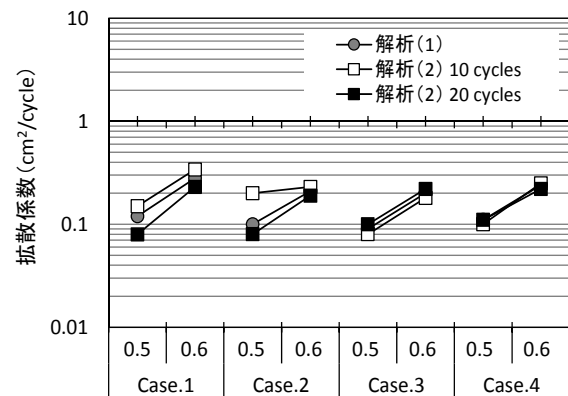


図4-9 拡散係数の解析値

4.3 水の浸透に伴う塩化物イオンの移動に関する考察

4.3.1 乾湿繰返しによる質量変化

図 4-10 に促進期間と試験体の質量変化率の関係を示す。質量変化率は、浸透促進試験中の乾湿切り替え時に測定した試験体の質量に対して、1～10 サイクルまでは浸透促進試験の開始時、11～20 サイクルでは 11 サイクル開始時（10 サイクル終了時の塩化物イオン測定用に試験体の切断および切断面の封かん処理後）の試験体質量を基準として百分率で表した。そのため、4.1.2 (2) 項に示したように、1～10 サイクルまでは浸透面として $10 \times 10 \text{cm}$ が 2 面、11～20 サイクルでは 1 面が開放されている。

W/C 0.6 では、W/C 0.5 よりも 1 サイクル目および 11 サイクル目の浸透促進の開始、再開時の吸水による試験体の質量の増加が大きく、その後の乾湿繰返しによる質量変化の幅も大きかった。乾湿繰返しによる 1 サイクル内の質量変化の幅は、W/C 0.5 では Case.1～Case.3 で同程度であるが、W/C 0.6 では $\text{Case.1} < \text{Case.3} \leq \text{Case.2}$ と乾燥日数が 1 サイクル中に 2 日の Case.1 では小さく、乾燥日数が 3 日以上の場合 Case.2 および Case.3 では大きくなった。

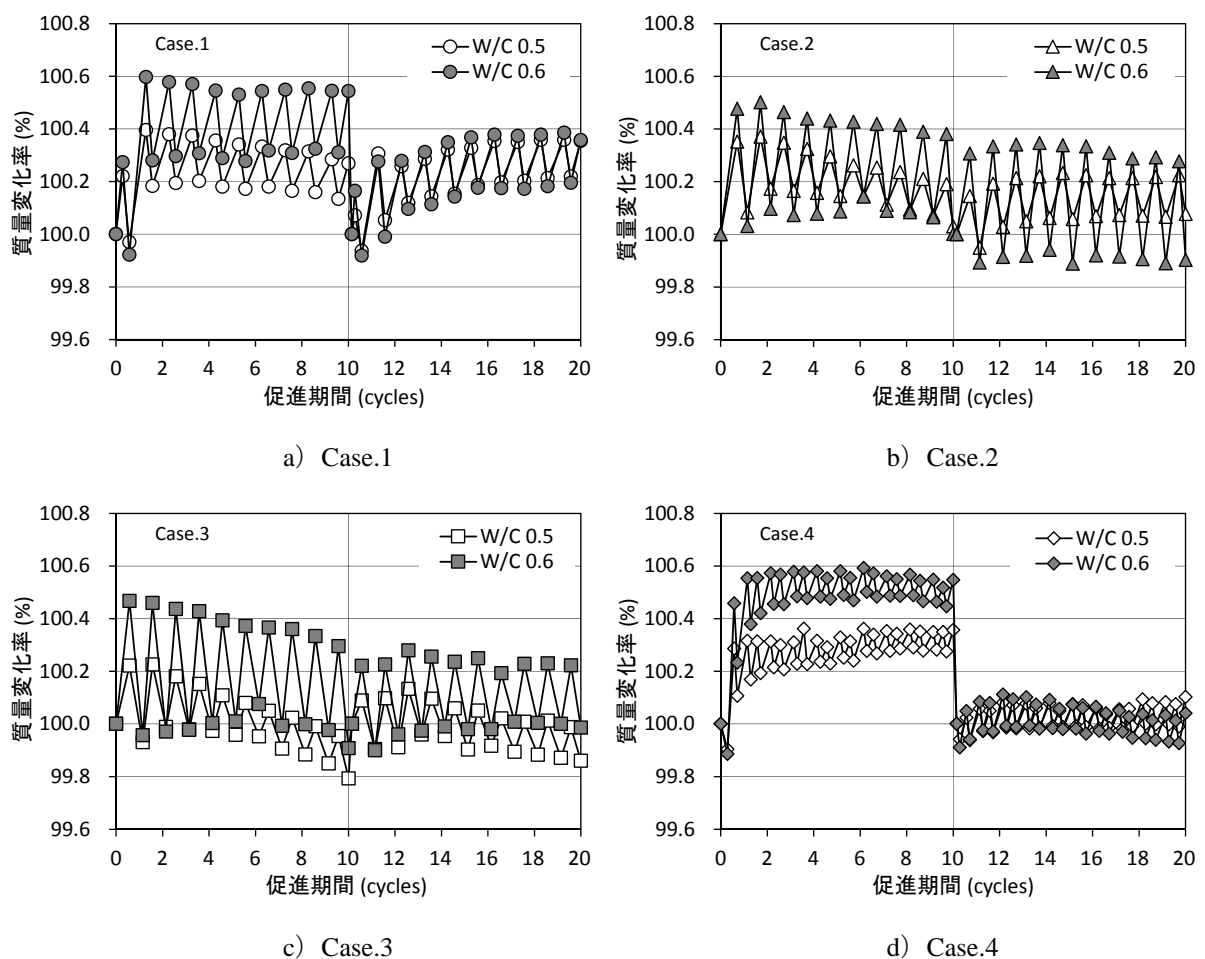


図 4-10 促進期間と質量変化率

4.3.2 乾湿繰返しによる吸水量と蒸発量

図 4-11 に乾湿繰返しによる試験体の質量増減の概念を示す。本章では、1 サイクル内における試験体の質量変化について、湿潤時の質量の増加量を吸水量 (W_i)、乾燥時の減少量を蒸発量 (D_i) と定義した。Case.4 では b) のように 1 サイクル中に湿潤および乾燥状態が 2 回ずつあるため、吸水量および蒸発量はそれぞれ 1 サイクル中の 2 回の質量増減量の和とした。また、ここでは各サイクル時の吸水量または蒸発量の累積を累積吸水量または累積蒸発量と定義した。なお、4.1.2 (2) 項に示したように、1~10 サイクルでは浸透面が 2 面あるが、1 面 (100cm²) あたりの吸水量または蒸発量として換算した。

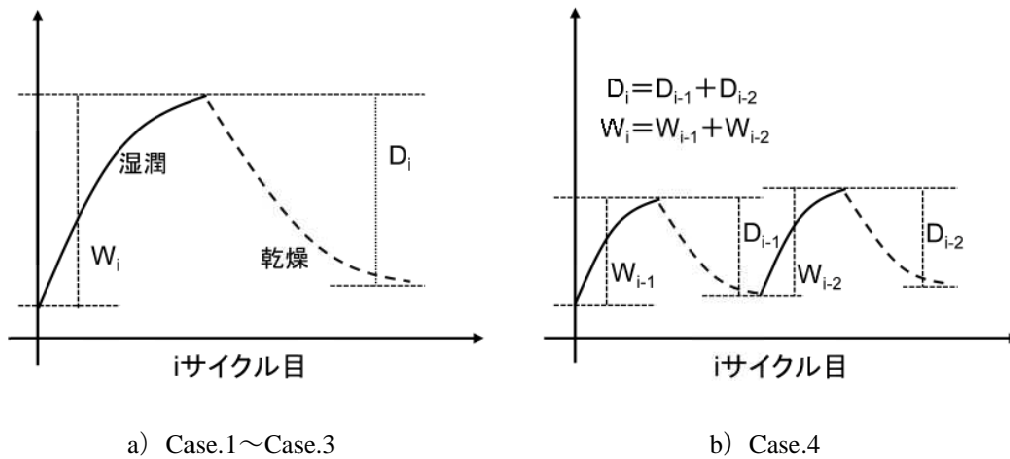


図 4-11 吸水または蒸発による試験体の質量増減の概念図

促進期間と累積吸水量の関係を図 4-12 に、累積蒸発量との関係を図 4-13 にそれぞれ示す。促進期間の経過に伴い累積吸水量および累積蒸発量は直線的に推移した。水セメント比では、W/C 0.6 における吸水量および蒸発量がいずれも W/C 0.5 よりも大きく、乾燥・湿潤環境による質量の変動が大きかった。

湿潤環境における試験体の吸水量は、W/C 0.5 では $Case.3 \leq Case.2 < Case.1 = Case.4$ となり、Case.1 および Case.4 と Case.2 および Case.3 で大別された。一方で W/C 0.6 では、吸水量は $Case.4 < Case.1 < Case.3 \leq Case.2$ であり、ともに湿潤日数が 1 サイクル中に 5 日である Case.1 と Case.4 でも吸水量は異なるが、いずれも 1 サイクル中の湿潤日数が少ない Case.2 (3 日) や Case.3 (4 日) よりも吸水量は少なかった。また、W/C 0.6 における Case.2 と Case.3 では、10 サイクルの累積吸水量は Case.3 の方が大きいですが、20 サイクルでは Case.2 の方が大きくなった。そのため、累積吸水量はほぼ直線的に増加するが、Case.2 では上に凸、Case.3 では下に凸と促進期間の経過に伴う吸水量の累積過程には傾向の違いが見られた。

乾燥状態における試験体の蒸発量は、W/C 0.5 では Case.1~Case.4 における差はほとんどなく、同程度であった。しかし、W/C 0.6 では吸水量と同様に Case.4 < Case.1 < Case.3 ≤ Case.2 の関係であり、Case.1 および Case.4 と Case.2 および Case.3 で大きな差が見られた。また、W/C 0.6 における Case.2 と Case.3 を比較すると、10 サイクルでは Case.3 が、20 サイクルでは Case.2 の方が累積蒸発量は大きく、吸水量と同様に促進期間の経過に伴う累積過程による違いが見られた。

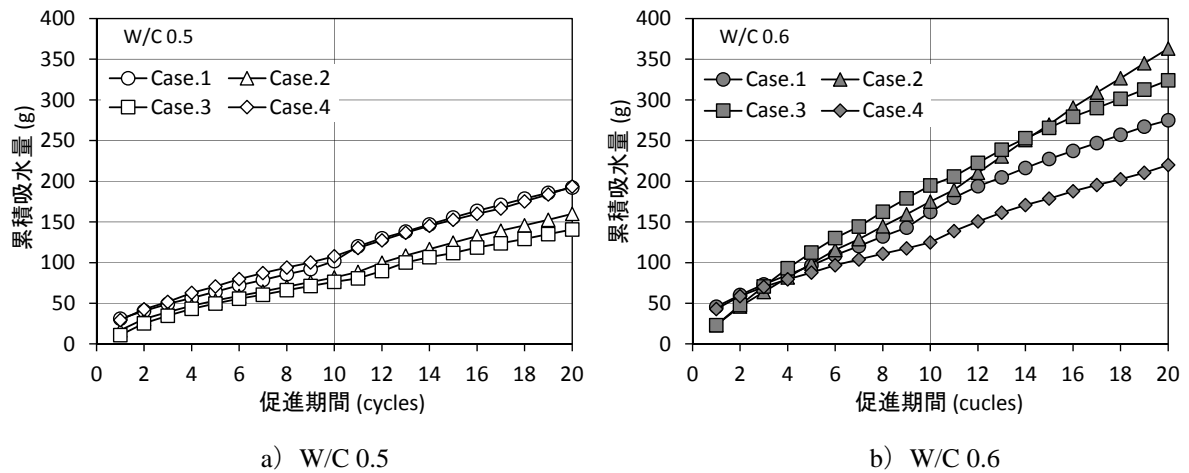


図 4-12 促進期間と累積吸水量

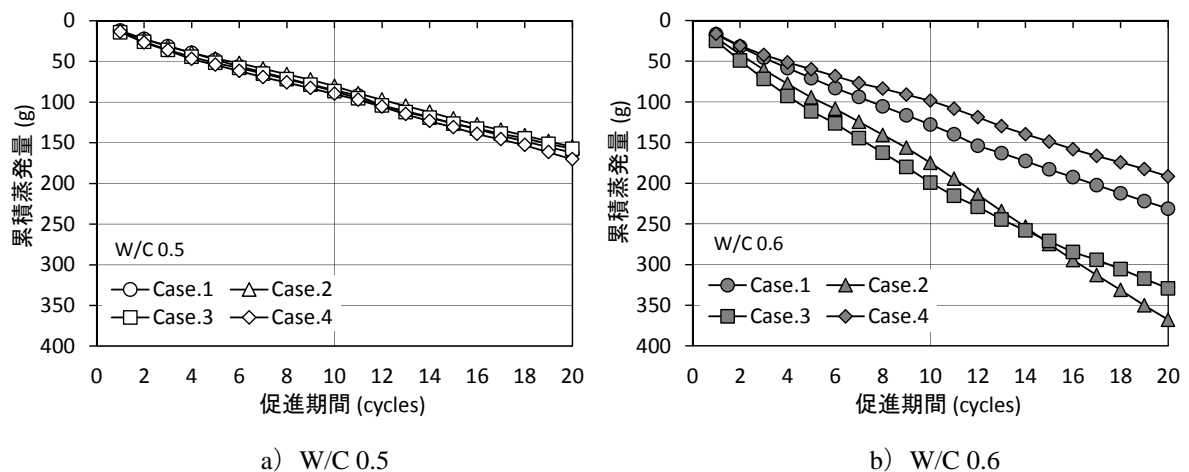


図 4-13 促進期間と累積蒸発量

図 4-14 に累積吸水量と累積蒸発量の関係を示す。W/C 0.5 では、Case.2 が 1 : 1 の関係に沿って推移しており、Case.3 では蒸発量が、Case.1 および Case.4 では吸水量がそれぞれ大きかった。一方、W/C 0.6 では Case.1、Case.2 および Case.4 では W/C 0.5 と同様な傾向を示し、Case.3 では 1 : 1 に沿うような推移であった。

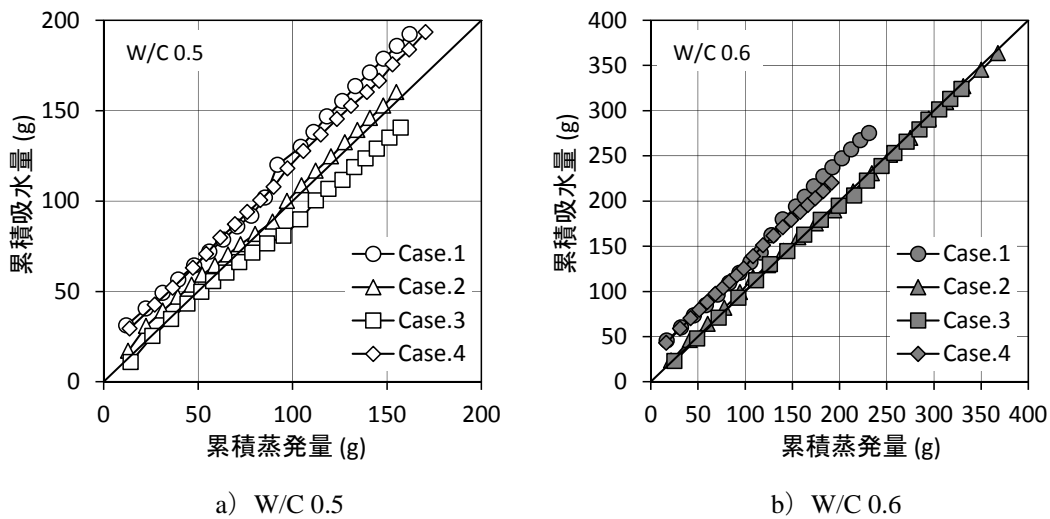


図 4-14 累積蒸発量と累積吸水量

以上より、本実験における乾湿繰返しによる試験体の質量変化は、浸透促進条件や水セメント比により様々な傾向を示したが、大きくは Case.1 および Case.4 と Case.2 および Case.3 に分けられる。また、質量変化量は W/C 0.5、W/C 0.6 いずれも Case.4 < Case.1 であり、これらはどちらも 1 サイクルが乾燥 2 日、湿潤 5 日となるが、乾湿繰返し回数が Case.1 は 1 回、Case.4 が 2 回と異なるものである。すなわち、質量変化におよぼす乾湿繰返しにおける乾燥・湿潤期間の影響は、1 サイクルにおける乾湿繰返し回数よりも、1 度の乾燥期間を長く設ける方が大きいと考えられる。

このように、乾湿繰返しによる試験体の質量変化は、4.2.1 項に示したように、浸透促進条件とコンクリート中の塩化物イオン量の関係と同様であり、乾湿繰返しによるコンクリートの累積吸水量と塩化物イオン量には相関があるものと考えられる。

4.3.3 累積吸水量と塩化物イオン量

前項までの検討から、浸透促進条件により質量変化とコンクリート中の塩化物イオン量に相関性があることが推察された。また、第 3 章の実験結果より、コンクリート中における塩化物イオンの浸透・拡散には、コンクリート中への水の浸透が大きく影響することを明らかにしている。そこで、本項では乾湿繰返し環境におけるコンクリートの吸水量と塩化物イオン量の関係について検討を行うこととした。

図 4-15 に累積吸水量および塩化物イオン量の積分値を示す。塩化物イオン量の積分値は表 4-5 に示した表面塩化物イオン量および拡散係数を用いて式 (4-2) から算出した。これらの特性値は、4.2.2 項でより実測値に近い解析値を導いた解析 (2) より算出された値である。

$$S = \int_0^{\infty} C(x_i, t) dx$$

式 (4-2)

ここに、S : 塩化物イオンの積分値 (g/m²)

C(x_i, t) : 距離 x (mm) におけるサイクル数 t (cycles) での塩化物イオン量 (kg/m³)

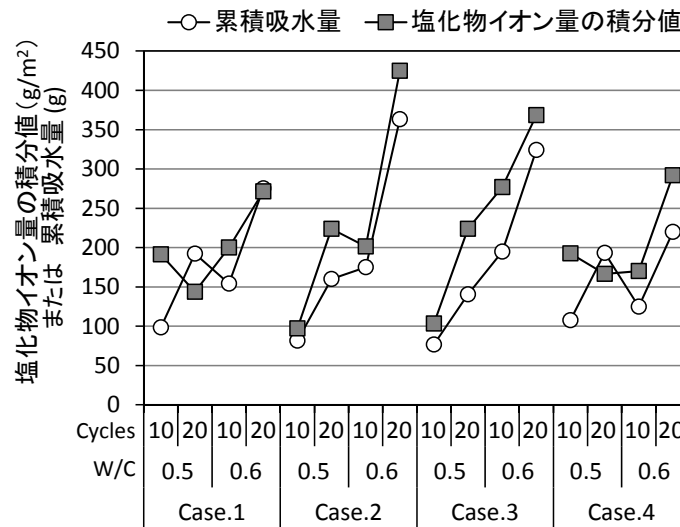


図 4-15 累積吸水量および塩化物イオン量の積分値

Case.1 および Case.4 で一部例外は見られるが、各浸透促進条件および水セメント比において、累積吸水量と塩化物イオン量の積分値は類似の変化を示しており、両者の間には相関性が確認できる。

そこで、塩化物イオン量の積分値を浸透面あたりの塩化物イオン量に換算した値と、累積吸水量から算出した吸水中の塩化物イオン量の関係を図 4-16 に示す。なお、吸水中の塩化物イオン量は式(4-3)より算出した。

$$A_{Cl} = A_w \cdot \rho \cdot \frac{Cl^-}{NaCl}$$

式 (4-3)

ここに、A_{Cl} : 吸水中の塩化物イオン量 (g/100cm²)

A_w : 吸水量 (g)

ρ : 浸漬水の NaCl 濃度 (=3%)

Cl⁻ : 塩化物イオンの分子量 (=35.5)

NaCl : 塩化ナトリウムの分子量 (=58.5)

乾湿繰返しによりコンクリート中に浸透した水に含まれる塩化物イオン量と、コンクリート中に蓄積された塩化物イオン量である積分値には相関関係が見られた。また、この関係は水セメント比や浸透促進条件、促進期間によらず、吸水した水 (NaCl 濃度 3%) に含まれる塩化物イオンの約 65% がコ

ンクリート中に蓄積していることを示している。

浸漬水に使用する塩水の NaCl 濃度とコンクリート中の塩化物イオン量の関係については、梶田ら¹⁾による塩水浸漬実験 (NaCl 濃度 1.5~12%) の結果から、平方根に比例すると報告されている。そのため、コンクリート中に浸透・拡散する塩化物イオン量は、浸漬水の NaCl 濃度の違いにより異なるものと考えられるが、梶田らの実験では質量変化を考慮した検討はされていない。

したがって、本章で明らかにしたコンクリート中に蓄積した塩化物イオンは、浸透した水に含まれる塩化物イオン量の約 65% であるとの考察は、NaCl 濃度 3% の浸漬水を用いた場合の実験結果であるとの注意が必要である。

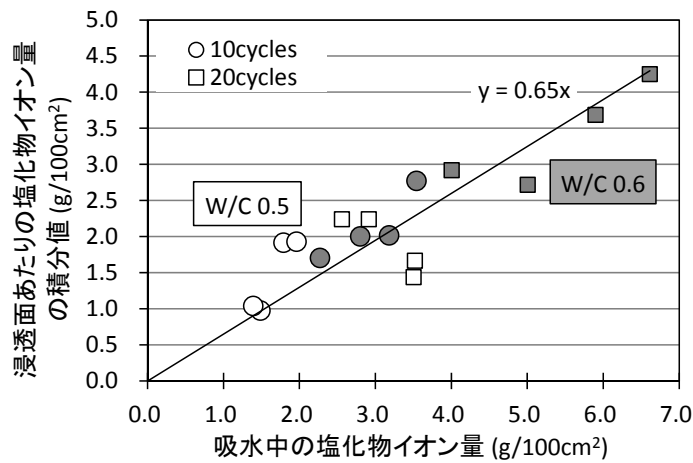


図 4-16 吸水中の塩化物イオン量と浸透面あたりの塩化物イオン量の積分値

4.4 まとめ

本章では塩化物イオンの浸透・拡散性状について、コンクリートの吸水性状と塩化物イオンのコンクリートにおける浸透量や蓄積量および拡散性状との関係を明らかにすることを目的に、いずれも 1 サイクルを 7 日とした 4 パターンの異なる乾湿繰返しによる浸透促進試験から、コンクリートの質量変化と塩化物イオン量の関係を実験的に検討した。実験結果より得られた知見を以下に示す。

- 1) 拡散方程式から得られる特性値であるコンクリート表面の塩化物イオン量は、促進期間の経過に伴い増加する傾向を示し、乾湿繰返し条件における 1 サイクル中の乾燥日数が長いほど大きくなった。
- 2) 拡散方程式から得られる特性値である拡散係数は、促進期間の経過に伴い減少する傾向を示し、乾湿繰返し条件にかかわらず同一水セメント比であれば同程度の値となった。
- 3) 乾湿繰返しによる累積吸水量および累積蒸発量はほぼ直線的に増加し、1 サイクル（7 日間）中に乾燥期間が 3 日以上となる場合には、試験体の質量変化の幅は大きくなった。
- 4) コンクリート中に蓄積される塩化物イオン量とコンクリート中に浸透する水が含む塩化物イオン量との間には相関関係が見られた。また、本実験（湿潤時、NaCl 濃度 3%への浸漬）では水セメント比や乾湿繰返し条件、浸透促進期間によらず、コンクリート中に浸透した水が含む塩化物イオンの約 65%がコンクリート中に蓄積された。

以上より、NaCl 濃度 3%の浸漬水を用いた乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験結果から、コンクリート中に浸透する水とコンクリート中に蓄積する塩化物イオン量に相関性があることを明らかにした。また、拡散方程式における特性値は経時により変化することを明らかにした。これは、耐久性の評価を行うにあたり一定の特性値を用いるのではなく、経時による変化を考慮した方が実状に近い評価を行えると考えられることを示している。

第 4 章の参考文献

- 1) 梶田佳寛、友澤史紀、安田正雪、原謙治：コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験、コンクリート工学年次論文集 10-2、pp.493～498、1988

第5章

仕上塗材によるコンクリート中への 塩化物イオンの浸透抑制効果

第5章

仕上塗材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果

第3章および第4章で明らかにしたとおり、外来型の塩害では塩化物イオンはコンクリートの表面から水とともに浸透し、コンクリート内に蓄積される。すなわち、コンクリートの表面に仕上材を施すことにより、コンクリート中への水の浸透を抑制することは外来型の塩害に対する劣化対策として効果的である。そのため、第2章で調査・整理したように、これまでも仕上材による塩化物イオンの浸透抑制効果について実験的検討が行われており、JASS 5ではかぶり厚さと耐久設計基準強度の組合せでは十分な耐久性を確保することが難しい場合の対策のひとつに表面被覆材（仕上材）の使用があげられている。

仕上材により抑制される劣化現象としては、コンクリートの中性化が代表的である。コンクリートの中性化では、劣化因子となる二酸化炭素のコンクリート中への侵入を仕上材により抑制することで、中性化の進行を遅らせることが可能となる。塩害においては、中性化における二酸化炭素と同様に劣化因子となる塩化物イオンの浸透は抑制できる。しかし、第3章で明らかにしたとおり、一度コンクリート内に浸透した塩化物イオンは外部からの塩化物イオンの供給がなくてもコンクリート内部に存在する塩化物イオンの濃度差により拡散する。そのため、建築物が供用される初期から塩化物イオンの浸透を抑制することが重要となる。

建築分野における外装仕上材は、鉄筋コンクリート構造物の躯体の表面に塗材やタイルを施すことで美観や耐久性の向上が図られる。特に、仕上塗材は種類が多く、施工が容易であることから様々な部位に用いられている。そのため、仕上塗材によるコンクリートの耐久性向上に関してはこれまでも多くの報告があるが、中性化を含めそのほとんどは新築時に用いられる仕上塗材が対象^{例えば 1)}とされており、2.3.1 (2) に示した仕上材による塩化物イオンの浸透抑制効果に関する研究も同様である。

一般に、仕上塗材は紫外線などの影響により経年劣化を生じる。そのため、10～15年程度を目安として建物の供用中に塗替えや重ね塗りなどの改修が推奨されている。

筆者らは既存の鉄筋コンクリート造の集合住宅を対象として行った建物調査の結果から、屋外に面する開放廊下やバルコニーの上げ裏において構造物の寿命に影響するような鉄筋腐食などの劣化が生じやすいことを報告²⁾している。これは、上げ裏ではかぶり厚さが小さくなりやすく、また、仕上材として多く用いられるリシンには中性化の抑制の効果が乏しいためである。（リシンの中性化抑制効果はJASS 5においてコンクリート素地に対する中性化率が1.02（外装薄塗材 E）とされている³⁾）

このように、仕上材は建物の供用期間中に数度の改修によりコンクリートの耐久性能を確保することが必要となる。建物の改修にあたっては、その工法や仕上材の選定は多種多様であるが、このような改修を対象とした仕様の仕上塗材を施したコンクリートの耐久性に関する報告はない。

また、仕上材が施されたコンクリートについて、塩化物イオンの浸透・拡散性状を評価する手法は示されておらず、コンクリート素地の場合と同様に拡散方程式を適用することについて十分な検討はされていない。

そこで、本実験では外装仕上材の改修時に用いられる仕上材などを対象とし、コンクリートへの塩化物イオンの浸透抑制効果および拡散方程式の適用について浸透促進実験より検討を行った。

5.1 実験概要

5.1.1 実験方法および仕上材の種類

表 5-1 に実験に使用した仕上塗材および塗料（以下、仕上材と表記）の種類を示す。本実験では、仕上材の種類として一般に集合住宅を中心に新築時や建物の改修時に広く用いられる仕上材 A～D の 4 種類の仕上材それぞれの性能に加えて、仕上材 A（リシン）を下地材として仕上材 B～D を重ね塗りの場合の計 7 条件とした。なお、以降において、重ね塗りをした試験体は“A+○”（○は B～D）と、仕上材を施工していないコンクリート素地のものを“N”とそれぞれ表記する。

表 5-1 仕上材の種類

記号	一般名称	JIS による分類
A	アクリルリシン	外装薄塗材 E*1
B	水性反応硬化形塗材（軒天用）	—
C	反応硬化形低 VOC 水性塗料	1 種*2
D	弾性アクリルリシン	可とう形外装薄塗材 E*1

*1 JIS A 6909 「建築用仕上塗材」による分類

*2 JIS K 5663 「合成樹脂エマルジョンペイント及びシーラー」による分類

5.1.2 試験体の作製および試験方法

(1) 使用材料およびコンクリートの調合

表 5-2 に使用材料の品質、コンクリートの計画調合およびコンクリートの試験結果を示す。コンクリートに使用した材料は、いずれも一般的に用いられる材料とし、セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は陸砂および硬質砂岩砕石、練混ぜ水は上水道水、化学混和剤はリグニンスルホン酸系 AE 減水剤とした。

コンクリートの調合は、呼び強度 30 程度の普通コンクリートとし、水セメント比 0.55、目標スラン

プ 18cm および目標空気量 4.5%、単位粗骨材かさ容積は 0.59m³/m³、AE 減水剤の使用量はセメント質量×0.25%とした。

表 5-2 使用材料の品質、コンクリートの計画調合およびコンクリート試験結果

コンクリートの計画調合						コンクリート試験結果					
W/C	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				フレッシュコンクリート		コンクリート密度 (kg/m ³)		圧縮強度 (N/mm ²)	
		W	C	S	G	スランプ (cm)	空気量 (%)	4w 水中	1w 水中 + 3w 気中	4w 水中	1w 水中 + 3w 気中
0.55	46.8	170	309	826	969	18.5	4.7	2302	2251	35.7	36.1

セメント：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3316cm²/g、塩化物イオン量 0.021%）

細骨材：大井川産陸砂（絶乾密度 2.52g/cm³、吸水率 2.04%、F.M.2.82）

粗骨材：青梅産硬質砂岩砕石（最大寸法 20mm、絶乾密度 2.64g/cm³、吸水率 0.64%、実積率 62.0%）

練混ぜ水：東京都八王子市 上水道水

化学混和剤：リグニンスルホン酸塩系 AE 減水剤 標準形

(2) 試験体の作製

コンクリートは温度 20℃、湿度 60%R.H.の恒温恒湿室で室温に調整した材料を用いて、容量 100L の水平パン型ミキサで練り混ぜた。試験体は、寸法 10×10×40cm として鋼製型枠を用いて成型し、コンクリートの打込み翌日に脱型した。脱型後の試験体は材齢 1 週まで標準養生とし、その後 6 週まで上記室内で気中養生とした。

図 5-1 に試験体の取扱い方法を示す。試験体は成型時にブリーディングなどが試験面におよぼす影響が生じないように、コンクリートの打込み時に底面となる 10×40cm の 1 面を試験面とした。試験面以外の 5 面は仕上材 A の施工前にエポキシ樹脂を用いて封かんとし、また、試験体は仕上材の施工後に長手方向に 2 分割し、切断面はエポキシ樹脂を用いて封かん処理とした。

仕上材の施工は写真 5-1 および写真 5-2 に示すように、仕上材 A は吹付け、仕上材 B～D はローラ塗りとし、気中養生中の材齢 3 週で仕上材 A（リシン）を、また、材齢 4 週で仕上材 B～D を施工し、材齢 6 週から浸透促進試験を開始した。なお、仕上材の所要量はメーカーのカタログ値の最小量を目安として、専門工事業者が施工を行った。

写真 5-3 にそれぞれの仕上材の外観を示す。仕上材 A、仕上材 D には細骨材が含まれるため、これらの仕上材および仕上材 A を下地とした仕上材 A+○では、表面形状が砂壁状となった。

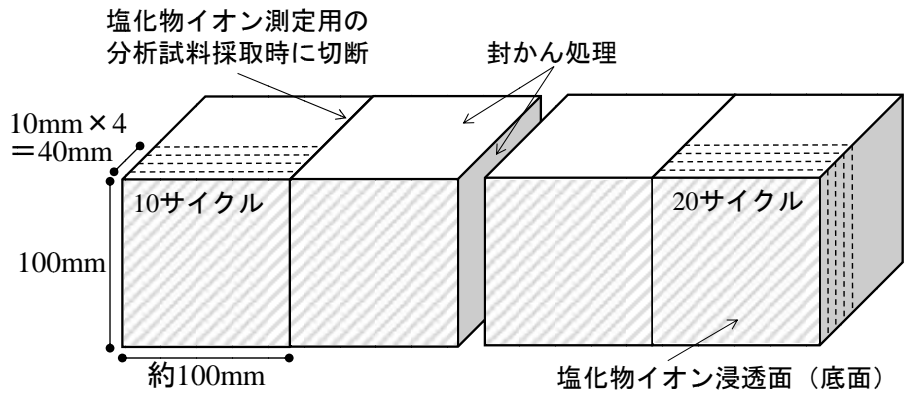


図 5-1 試験体の取扱い方法



写真 5-1 吹付けによる仕上材の施工風景



写真 5-2 ローラによる仕上材の施工風景

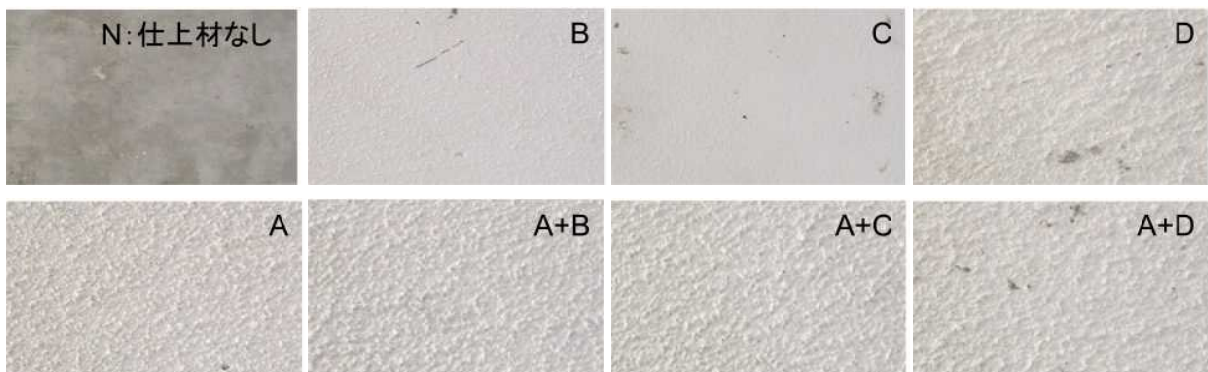


写真 5-3 各種仕上材の外観

(3) 試験方法

塩化物イオンの浸透促進試験は、第4章の結果からコンクリート中への塩化物イオンの浸透量が多くなるように、環境温度 50℃において乾燥 3 日、NaCl 濃度 3%水溶液への浸漬 4 日の計 7 日を 1 サイクルとする乾湿繰返しとした。コンクリート中の塩化物イオン量は、促進期間 10 および 20 サイクルにおいて、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、電位差滴定法により全塩化物イオン量を測定した。

塩化物イオン量の測定用の試料は、試験面が 10×10cm となるように切り出した部分について、乾式で仕上材を削り落とした。その後、乾式コンクリートカッタを用いて浸透面から 10mm ずつ、深さ 40mm まで試料を採取した。試料は、封かん処理用のエポキシ樹脂の付着した部分を除去し、全量が 150μm のふるいを通過するまで微粉碎した。

5.2 コンクリート中の全塩化物イオン量

図 5-2 に浸透面からの距離と全塩化物イオン量の関係を示す。いずれの仕上材を施したコンクリートでも、仕上げなしの N と同様に浸透面に近いほど、塩化物イオン量は多くなった。仕上材の種類による塩化物イオンの浸透抑制効果は、仕上材 A では塩化物イオン量は N と同程度であった。その他の仕上材 B~D では、N よりも塩化物イオン量は少なく、仕上材単体では C<D<B の順で塩化物イオンの浸透抑制効果が見られた。

図 5-3 に下地材の有無による塩化物イオン量の比較を示す。リシンを下地とした場合の塩化物イオン量は下地なしの仕上材単体よりも大きくなった。そのため、仕上材 A を下地材として新規の仕上材を重ね塗りした場合、仕上材単体よりも塩化物イオンの浸透抑制効果は小さくなり、耐久性能が低下すると考えられる。また、下地材の有無による塩化物イオン量の差は、促進期間 10 サイクルよりも 20 サイクルで大きく、材齢の経過に伴い下地材の有無の影響が大きくなる可能性が考えられる。

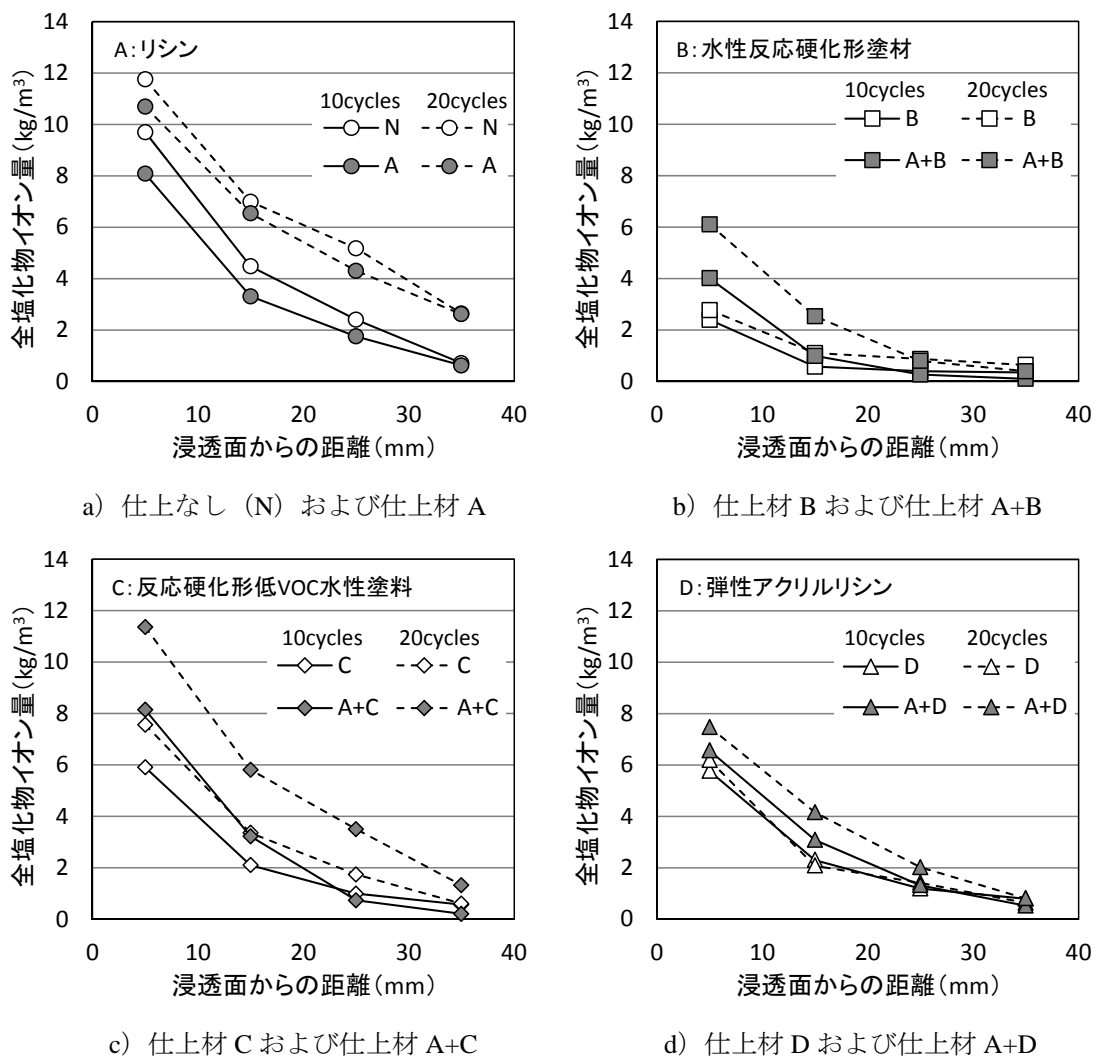


図 5-2 浸透面からの距離と全塩化物イオン量

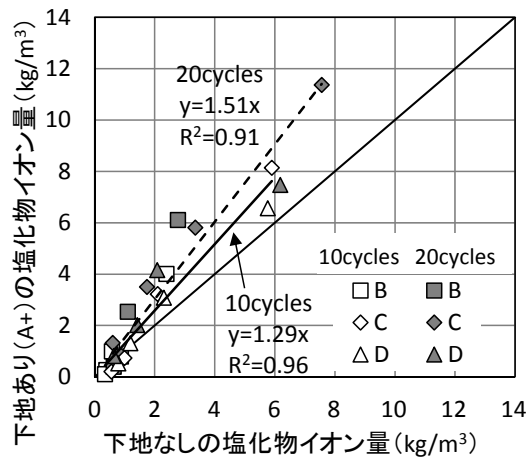


図 5-3 下地材の有無による塩化物イオン量の比較

図 5-4 に同様の仕上材を施したコンクリートを用いて実験を行った促進中性化試験結果を示す。促進中性化試験用の試験体は水セメント比 0.6 で普通ポルトランドセメントおよび普通骨材を用いたコンクリートであり、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」をもとに 20°C、60%R.H.、二酸化炭素濃度 5.0%の環境において促進期間 52 週まで行ったものである⁴⁾。

仕上材 A では、塩化物イオンの浸透促進試験と同様に N と同程度でありコンクリートの耐久性の向上効果は見られなかった。その他の仕上材の中性化抑制効果は C<B<D の順であり、前述の C<D<B となった塩化物イオンの抑制効果とは異なっている。また、仕上材 A を下地材とした重ね塗りした場合、図 5-5 に示すとおり下地材なしよりも中性化深さは小さくなり、中性化抑制効果が向上し、塩化物イオンの浸透抑制とは逆の傾向であった。

以上より、塩化物イオンの浸透性状は中性化と異なり、仕上材の表面の形状が影響すると考えられ、写真 5-3 に示したように仕上材 A や仕上材 D、仕上材 A+○といった砂壁状の場合に塩化物イオンが多く浸透する傾向がある。

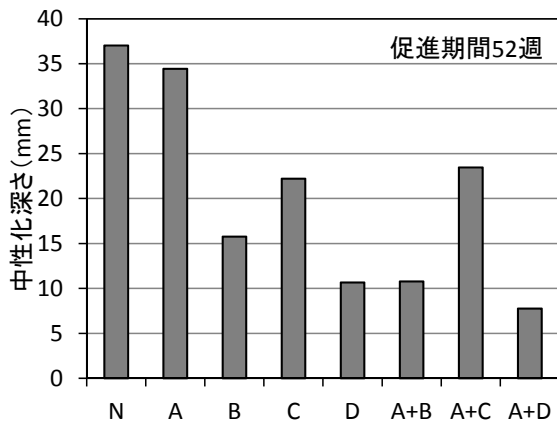


図 5-4 促進中性化試験結果

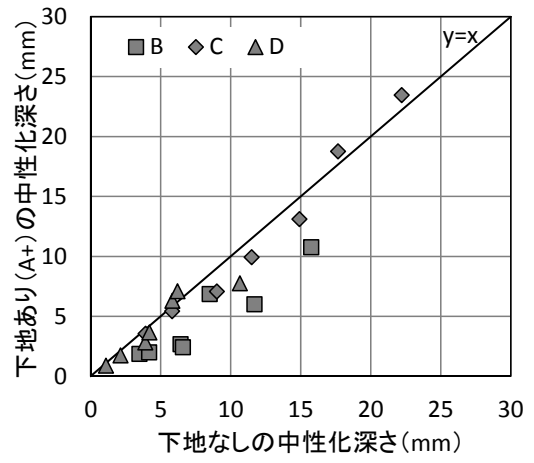


図 5-5 下地材の有無による中性化深さの比較

5.3 拡散方程式による検討

図 5-6 に全塩化物イオン量の実測値と拡散方程式による逆解析により求めた曲線との関係を示す。仕上材を施したコンクリートであっても、式 (5-1) に示す拡散方程式による解析値は実測値と比較的に近い値をとった。そのため、コンクリートに仕上材が施されている場合でも仕上材がない場合と同様に拡散方程式により塩化物イオンの浸透・拡散性状は評価できる。

$$C(x_i, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_i}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \quad \text{式 (5-1)}$$

ここに、 t : サイクル数 (cycles)

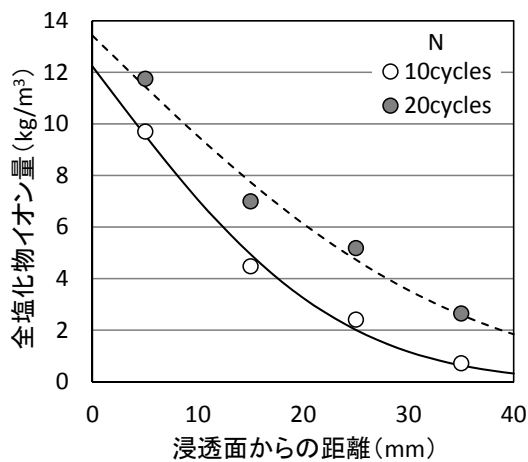
x_i : コンクリート表面からの距離 (mm)

$C(x_i, t)$: 距離 x_i (mm) におけるサイクル数 t (cycles) での塩化物イオン量 (kg/m^3)

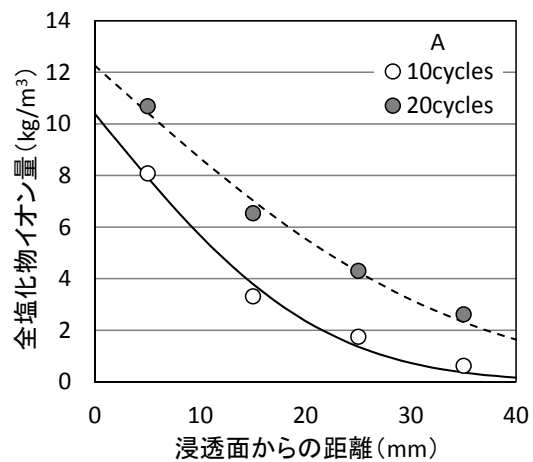
C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)

D : 見かけの拡散係数 (cm^2/cycle)

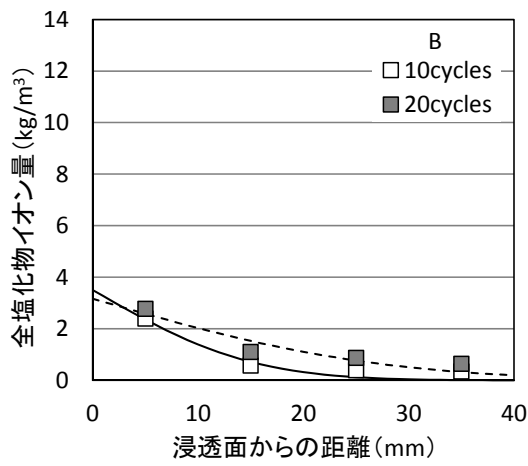
$\operatorname{erf}()$: 誤差関数



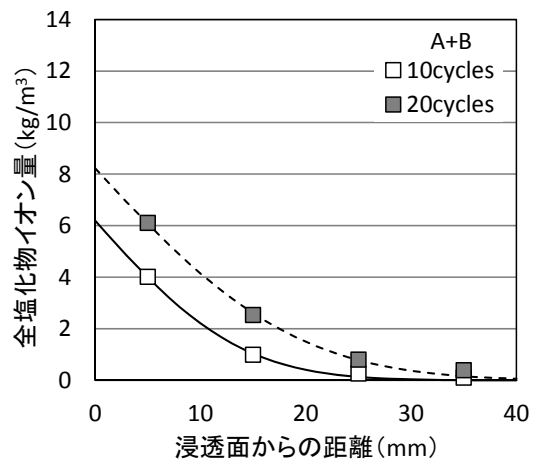
a) 仕上なし (N)



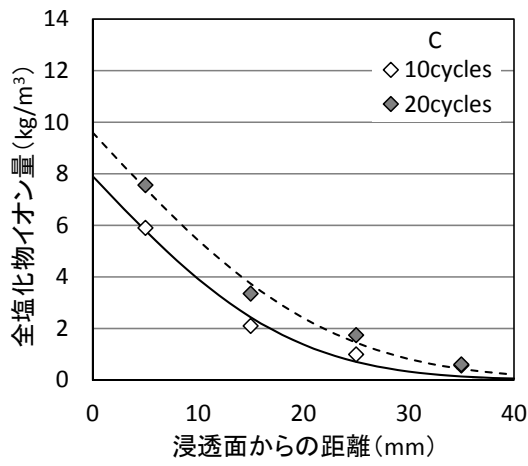
b) 仕上材 A



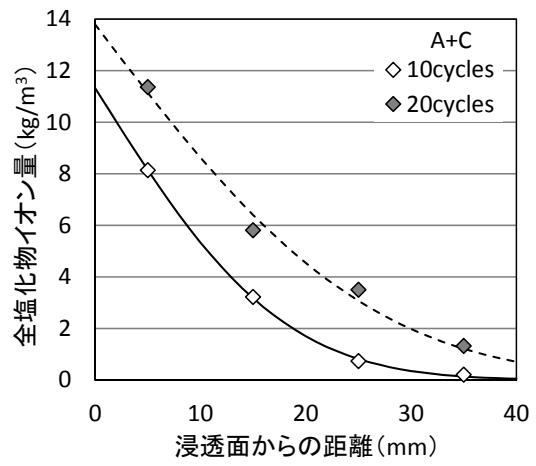
c) 仕上材 B



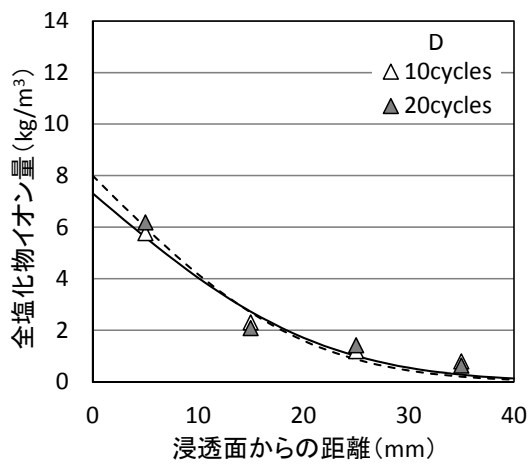
d) 仕上材 A+B



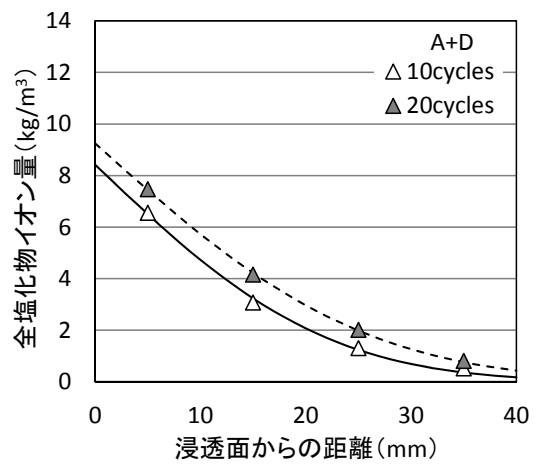
e) 仕上材 C



f) 仕上材 A+C



g) 仕上材 D



h) 仕上材 A+D

図 5-6 全塩化物イオン量の実測値と拡散方程式による逆解析曲線

式(5-1)の拡散方程式により最小二乗法などで算出された拡散係数を図5-7に、表面塩化物イオン量を図5-8にそれぞれ示す。

拡散方程式より求められる拡散係数は、コンクリート中における塩化物イオンの拡散のし易さを示す特性値である。本実験では同一のコンクリートを用いているため、いずれの仕上材を施したコンクリートでも拡散係数は $0.06\sim 0.18\text{cm}^2/\text{cycles}$ と、その差は小さく同程度であった。

一方、コンクリート表面と周辺環境との境界条件を示す表面塩化物イオン量は、仕上材がある場合には仕上材なしのNよりも小さくなり、同じ促進試験においても仕上材の種類により値が異なった。また、仕上材A(リシン)を下地材として重ね塗りとした場合には、仕上材B~Dのいずれにおいても仕上材単体よりも表面塩化物イオン量は大きくなった。これは、図5-9に示すように、仕上材の表面が凹凸のある砂壁状であることにより浸透面の表面積が増加し、表面に付着する塩化物イオン量が増加したことによるものと考えられる。

これらの結果より、仕上材Aを下地材とした場合には下地材なしと比べて拡散係数は同程度であり、表面塩化物イオン量が大きくなった。そのため、前述のようにコンクリート中に浸透・拡散する塩化物イオン量が大きくなったものと考えられる。

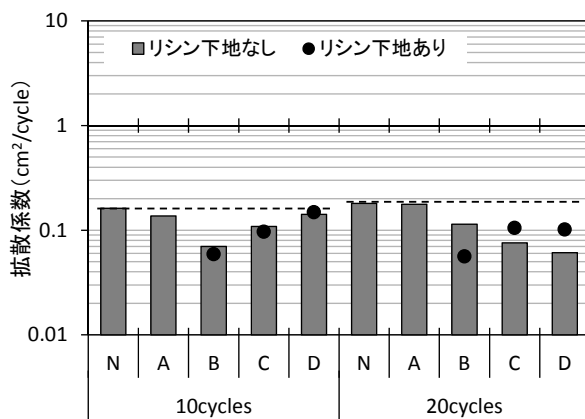


図 5-7 拡散係数

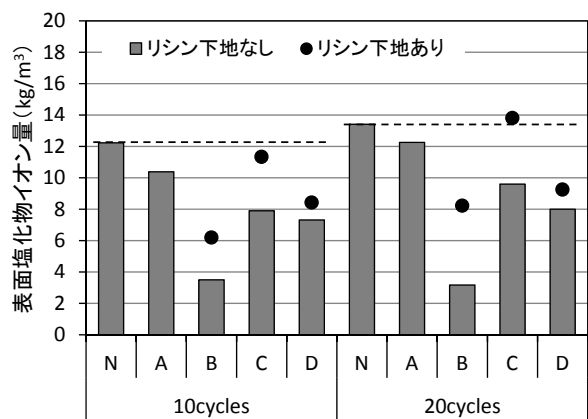


図 5-8 表面塩化物イオン量

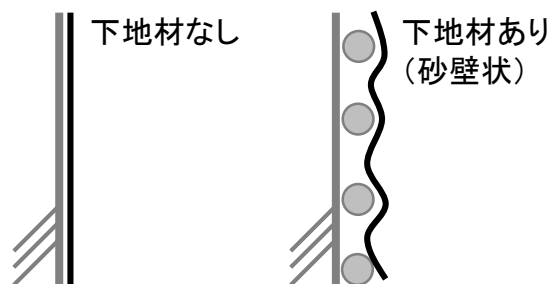


図 5-9 下地材の有無による表面形状の違いの概念図

5.4 乾湿繰返しにおける吸水量と塩化物イオン量

第4章では、乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験において、コンクリートの吸水量と蓄積される塩化物イオン量に相関性があることを明らかにした。本節では第4章と同様に仕上材を施したコンクリートを用いて、乾湿繰返しによる浸透促進試験から吸水量と塩化物イオン量の関係について検討を行った。

5.4.1 試験体の質量変化

図5-10に促進期間と質量変化率の関係を示す。質量変化率は浸透促進試験中の乾湿切替え時に測定した試験体の質量を試験開始時の質量で除して百分率として表した。なお、1～10サイクルまでの質量変化率は塩化物イオン量の10サイクル測定用および20サイクル測定用の2つの試験体の平均値とし、10～20サイクルは20サイクル測定用の試験体の値である。

仕上材A+Cを除くすべての試験体では、期間の経過に伴い質量変化率は減少した。仕上材Aでは仕上材なしのNと比べて浸透促進の開始初期から10サイクルまでは質量の増加量が小さいが、10サイクル以降ではNと同様に推移した。また、質量変化におよぼす下地材の有無による影響は、仕上材Dでは仕上材A+Dとほぼ同じ推移を示したが、仕上材Bでは仕上材A+Bよりも大きく、仕上材CではA+Cよりも小さくなり、下地材の有無による明確な傾向は見られなかった。

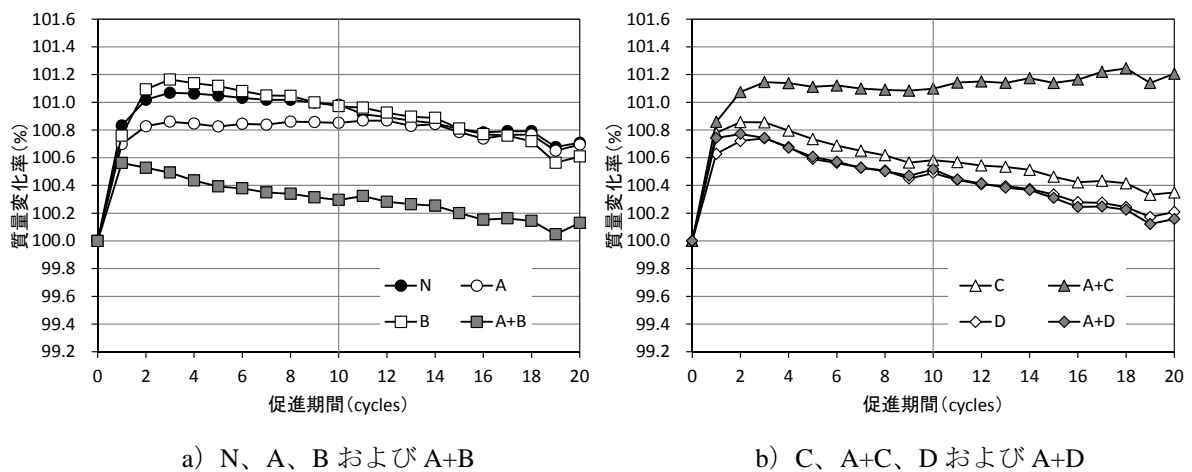


図 5-10 促進期間と質量変化率

図 5-11 に促進期間と累積吸水量の関係を、また、図 5-12 に促進期間と累積蒸発量の関係をそれぞれ示す。なお、ここで累積吸水量および累積蒸発量は、乾湿繰返しにおけるコンクリートの質量変化から、湿潤時の増加量を吸水量、乾燥時の減少量を蒸発量としてそれぞれの累積を示し、本章では図 5-1 に示した浸透面の 1 面あたり (10×20cm) の量で表すものとする。

累積吸水量は、いずれの仕上材であっても直線的に推移した。仕上材の種類による累積吸水量は仕上材なしの N と比べて、仕上材 A では同程度かやや大きく、仕上材 A+C では同程度かやや小さく、その他の仕上材ではいずれも小さかった。下地材の有無による累積吸水量の違いは、仕上材 B および仕上材 A+B では同程度であったが、仕上材 C および仕上材 D では下地材が有りの場合に大きくなった。

累積蒸発量はいずれの仕上材であっても直線的に推移した。仕上材の種類による傾向は累積吸水量と同様に、累積蒸発量は仕上材なしの N に比べて仕上材 A ではわずかに大きく、仕上材 A+C ではわずかに小さく、その他の仕上材ではいずれも小さくなった。下地材の有無の影響は、いずれの仕上材も下地材有りの方がなしよりも累積蒸発量は大きくなった。

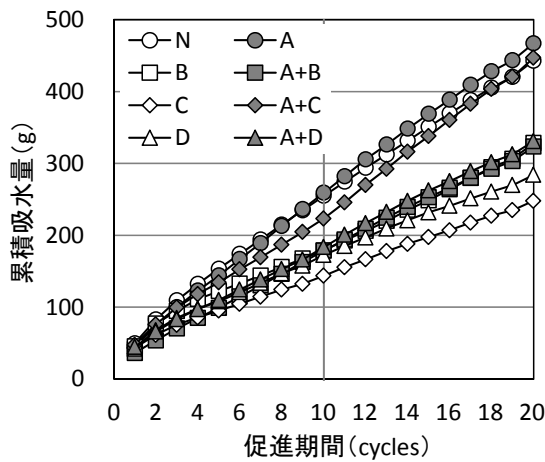


図 5-11 促進期間と累積吸水量

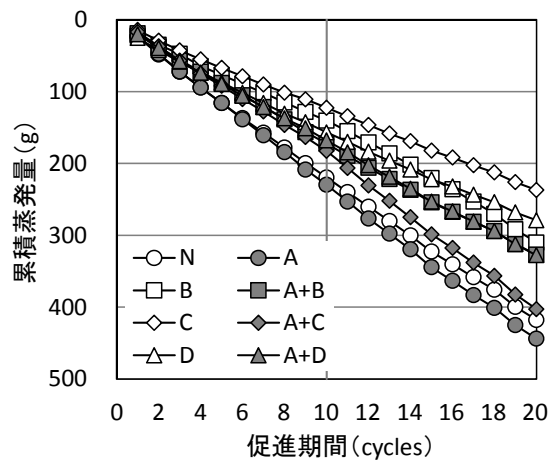
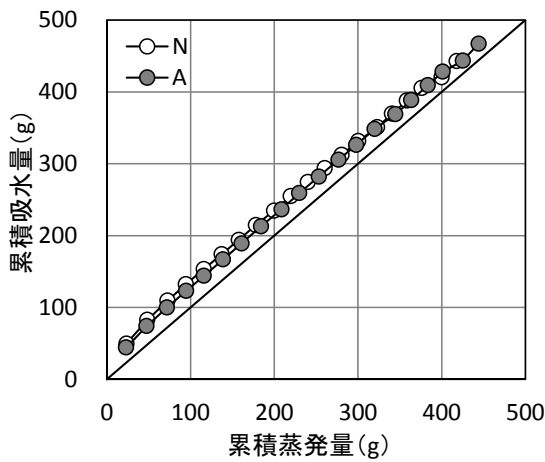
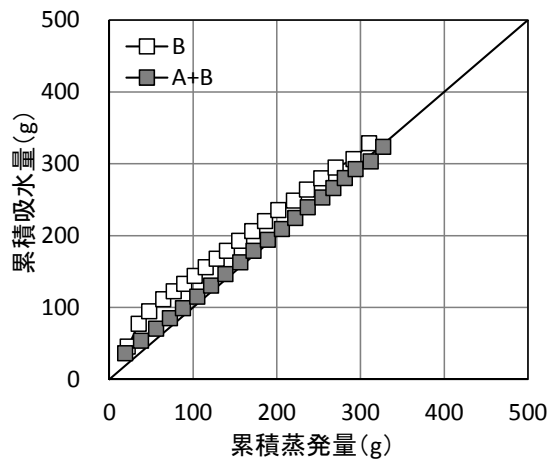


図 5-12 促進期間と累積蒸発量

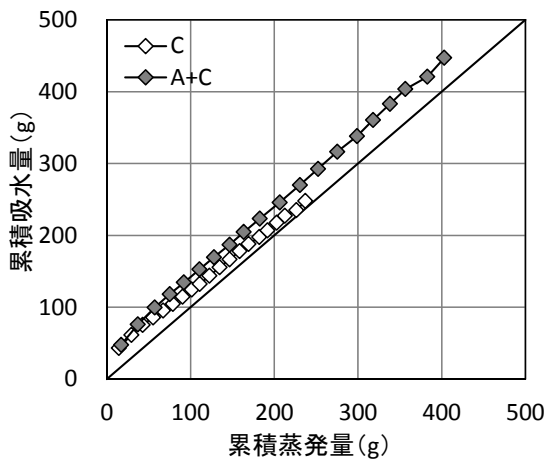
図 5-13 に累積蒸発量と累積吸水量の関係を示す。上記のように累積吸水量および累積蒸発量が大きかった仕上材なしの N、仕上材 A および仕上材 A+C ではほぼ 1:1 の傾きに沿うような推移を示した。一方でこれらよりも累積吸水量および累積蒸発量の小さかったその他の仕上材では、わずかに蒸発量の方が大きく、促進期間の経過に伴い累積蒸発量側に寄る傾向を示した。



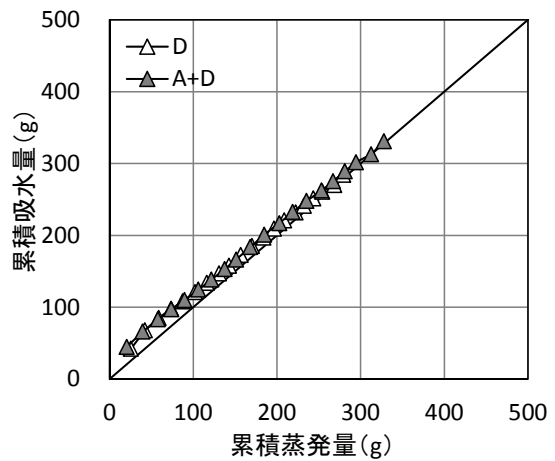
a) 仕上材 N および仕上材 A



b) 仕上材 B および仕上材 A+B



c) 仕上材 C および仕上材 A+C



d) 仕上材 D および仕上材 A+D

図 5-13 累積蒸発量と累積吸水量

5.4.2 累積吸水量と塩化物イオン量

図 5-14 に塩化物イオン量の積分値と累積吸水量を示す。塩化物イオン量の積分値は 5.3 節で示した図 5-7 の表面塩化物イオン量および図 5-8 の拡散係数を用いて、式 (5-2) から算出した。なお、累積吸水量は前項と同様に浸透面の 1 面あたりの量である。

$$S = \int_0^{\infty} C(x_i, t) dx \quad \text{式 (5-2)}$$

ここに、S : 塩化物イオンの積分値 (g/m²)

C(x_i, t) : 距離 x (cm) におけるサイクル数 t (cycles) での塩化物イオン量 (kg/m³)

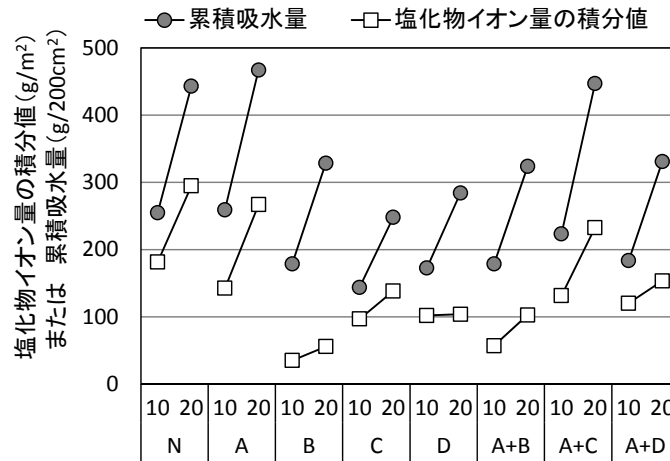


図 5-14 塩化物イオン量の積分値および累積吸水量

ここでも、4.3.3 項と同様に累積吸水量の大きい条件では塩化物イオン量の積分値も大きく、これらの関係に相関性がうかがえる。そのため、仕上材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果は仕上材の遮水性が高いほど大きくなると考えられる。

また、累積吸水量から式 (5-3) により単位面積あたりに換算して算出した吸水中に含まれる塩化物イオン量と塩化物イオン量の積分値の関係を図 5-15 に示す。

$$A_{Cl} = \frac{A_w}{0.02} \cdot \rho \cdot \frac{Cl^-}{NaCl} \quad \text{式 (5-3)}$$

ここに、 A_{Cl} : 吸水中の塩化物イオン量 (g/m²)

A_w : 吸水量 (g/200cm²)

ρ : 浸漬水の NaCl 濃度 (3%)

Cl^- : 塩化物イオンの分子量 (35.5)

$NaCl$: 塩化ナトリウムの分子量 (58.5)

第 4 章では、本実験と同じく環境温度 50°C で湿潤時を NaCl 濃度 3% 水溶液への浸漬とした乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験結果から、コンクリートに吸水される水に含まれる約 65% の塩化物イオンがコンクリート中に蓄積されることを示した。この結果から図 5-15 には $y=0.65x$ の直線を併記した。本実験結果では仕上材 B および仕上材 A+B を除く仕上材において、塩化物イオン量の積分値はおおよそ吸水中の塩化物イオン量の 65% となり、第 4 章と同様な傾向を示した。

現在のところ、このようにコンクリートの質量変化と塩化物イオン量の関係について検討した報告はなく、仕上材 B のように異なる傾向を示す条件は不明であるが、これまで述べた本実験の結果から仕上材を施したコンクリートであっても、塩化物イオンの浸透・拡散性状は仕上材のないコンクリートと同様に評価できるものと考えられる。

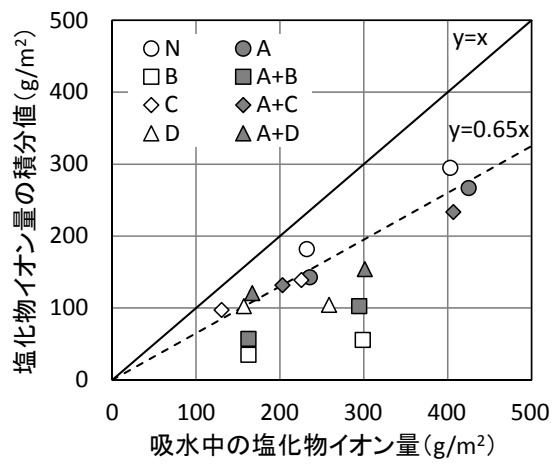


図 5-15 吸水中の塩化物イオン量と塩化物イオン量の積分値

5.5 まとめ

本章では塩化物イオンの浸透・拡散性状について、外装仕上材の改修時に用いられる4種類の仕上材と、これらをリシン下地に重ね塗りした計7条件を対象とし、コンクリートへの塩化物イオンの浸透抑制効果および拡散方程式の適用について実験的に検討を行った。実験結果より得られた知見を以下に示す。

- 1) 仕上材を施すことでコンクリート中への塩化物イオンの浸透は抑制され、その効果は仕上材の種類により異なる。
- 2) リシンを下地材として仕上材を重ね塗りした場合、拡散方程式の特性値である拡散係数は同程度であるが、表面塩化物イオン量が大きくなる。そのため、コンクリート中への塩化物イオンの浸透量は下地材がない場合よりも大きくなる。
- 3) 仕上材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果は、仕上材による遮水性が高いほど大きい。また、一部の仕上材を除き、仕上材なしの場合と同様に浸透促進試験によりコンクリート中に浸透した水に含まれる塩化物イオンの約65%がコンクリート中に蓄積される。
- 4) コンクリートに仕上材が施されている場合でも、仕上なしと同様にコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状は拡散方程式により評価することができる。

以上より、仕上材を施したコンクリートへの塩化物イオンの浸透・拡散性状は仕上なしの場合と同様に評価することができ、仕上材の種類による塩化物イオンの浸透抑制効果は仕上材の遮水性によることを明らかにした。しかし、建物の大規模修繕などにおいて、仕上材の施工にあたり既存のリシンが下地となる場合にはコンクリート中に浸透する塩化物イオン量が仕上材単体よりも大きくなることに注意が必要である。

第5章の参考文献

- 1) 長瀬公一、久保田浩、高山勝行、加藤淳司、親本俊憲、大岡督尚、河野政典、安田正雪ほか：躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価（その 1～8）、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州） A-1、pp.1123～1138、2007.8
- 2) 金子樹、磯貝大介：築 20 年以上経過した既存鉄筋コンクリート造建築物の劣化診断における調査および評価手法に関する研究、コンクリート構造物の非破壊検査論文集 Vol.4、pp.17～24、2012.8
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、2015 年版、pp.205～208、2015.7
- 4) 金子樹、吉岡昌洋、長谷川淳、磯貝大介：改修用仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する実験的研究、長谷工技報 No.30、pp.23～28、2014.3

第 6 章

促進および屋外暴露環境における 塩化物イオンの浸透・拡散性状

第6章

促進および屋外暴露環境における塩化物イオンの浸透・拡散性状

外来型の塩害を想定したコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する研究は、これまでも多く報告^{例えば 1) ~ 22)}されている。これらの研究から第2章で整理したとおり、日本建築学会ではJASS 5、土木学会ではコンクリート標準示方書において、それぞれ塩害が懸念される場合には鉄筋コンクリート構造物について耐久性を評価し、その対策を検討することとされている。また、日本建築学会では調合設計指針²³⁾において、コンクリートに必要とされる塩化物イオンの浸透抵抗性について実環境を想定して定めることが望ましいとしているが、技術的な資料の整備が十分でないのが現状である。

この理由としては、自然環境において塩化物イオンの浸透抵抗性を評価するには長期間の屋外暴露試験が必要となること、短期間に試験室で浸透促進試験を行うには標準化されたJISなどの試験方法がないことなどがあげられる。コンクリート中への塩化物イオンの浸透促進試験方法については、2.2節で整理したように土木学会においてJSCE-G 571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」²⁴⁾およびJSCE-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法」²⁵⁾が規準化されている。しかし、建築分野における研究報告ではこれらの試験方法を準用したものは少なく、ほとんどの研究で独自の促進試験方法が用いられており、その試験条件は多様である。

そこで、本研究ではこれらの多様な条件で行われた浸透促進試験と屋外暴露試験による既往の文献から、硬化コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状について検討を行った。

6.1 文献調査の概要

6.1.1 調査対象とした文献の選定条件

調査対象とした既往の文献は、日本建築学会およびコンクリート工学会を中心に以下の条件を満たすものとした。なお、本章では同一の材齢でひとつの試験体における深さ方向に連続した塩化物イオン量の測定値を「試験体条件」と定義する。

-
- 1) 調合設計の方法やスランプ値などにより、建築用コンクリートと判断できるもの
 - 2) 骨材は海砂を使用していないもの（除塩済みは除く）
 - 3) コンクリートの水セメント比は 0.40 以上かつ 0.65 以下
 - 4) コンクリート中の全塩化物イオン量を測定しているもの
 - 5) 塩化物イオン量を浸透面より 40mm 以上測定しているもの
 - 6) 1つの試験体条件につき、測定点が深さ方向に 4 点以上あるもの
 - 7) 屋外暴露は陸上で実施しているもの（飛沫帯、海上および海中は除く）

6.1.2 調査対象とした文献の概要

(1) 既往の文献の実験概要

表 6-1 に調査対象とした既往の文献について実験概要の一覧を示す。前項の選定条件を満足する既往の文献は、塩化物イオンの浸透促進試験が 18 報^{1) ~18)}、塩害地域における屋外暴露試験が 7 報^{7)、12)、14)、19~22)}であった。表 6-2 に各種試験方法における検討データの試験体条件数と測定点数を示す。なお、文献 2) では未公表のデータを一部追加した。

表 6-1 既往の文献の実験概要

浸透促進試験 (Adw: 乾湿繰返し試験、Aw: 塩水浸漬試験)							
著者	W/C	セメント*1	試験条件			測定条件	
			方法	乾燥環境	湿潤環境	材齢	位置*2 (mm)
野村、嵩 ¹⁾	0.45, 0.55, 0.65	N, H, M, FA, FB, BA, BB	Adw	60°C(2days)	20°C, NaCl 10%(5days)	4, 8, 13cycles	5, 15, 25, 35, 50, 70
梶田 ²⁾	0.45, 0.55, 0.65	N	Aw	—	20°C, NaCl 1.5, 3, 6, 12%	30, 90, 180, 500days	2.5, 10, 22.5, 37.5, 52.5, 67.5
	0.5, 0.6	N	Adw	60°C(3days)	20°C, NaCl 3%(4days)	3, 10, 15, 25, 20, 30, 40, 62, 79, 95cycles	5, 15, 25, 35, 45
平田、枝広 ³⁾	0.45, 0.55, 0.65	N, BB, FA, W	Aw	—	NaCl 3%	7, 28days	5, 15, 25, 45
			Adw	(24hours)	NaCl 3% (24hours)	7, 28days	
掛川、梶田 ⁴⁾	0.45, 0.55, 0.65	N	Adw	60°C, 60%R.H.(2days)	20°C, NaCl 3%(1days)	25, 50, 100cycles	5, 15, 25, 35, 45, 55, 65
松本 ⁵⁾	0.54, 0.57	N	Aw	—	NaCl 3%	3, 5, 7, 12months	5, 15, 25, 35, 45
安達、枝広 ⁶⁾	0.4, 0.5, 0.6	N, SF	Adw	50°C(24hours)	50°C, NaCl 3%(24hours)	4, 8, 12cycles (7days/cycle)	5, 15, 25, 35, 45
田中 ⁷⁾	0.40, 0.55	H	Aw	—	NaCl 5%	52weeks	5, 15, 25, 35, 45
SORN ⁸⁾ 、 山根 ⁹⁾ 、 山田 ¹⁰⁾	0.45, 0.55, 0.60, 0.65	N	Adw	50°C(3days) + 室温(1day)	50°C, NaCl 3%(4days)	10, 15, 20, 30, 40, 50cycles	5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85
徳村、 山田 ^{11)、12)}	0.5, 0.6	N, E	Adw	50°C(3days) + 室温(1day)	50°C, NaCl 3%(4days)	10, 20, 40, 50, 60cycles	5, 20, 30, 45, 55, 75
高橋、湯浅 ¹³⁾	0.4, 0.6	N, SF	Adw	50°C(4days)	50°C, NaCl 3%(3days)	10, 20, 40, 60cycles	5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 100
湯浅 ¹⁴⁾	0.6	N, E	Adw	50°C(4days)	50°C, NaCl 3%(3days)	20, 40,cycles	5, 15, 25, 35, 55, 75, 100
高橋、湯浅 ¹⁵⁾	0.6	N, H, M, L, BB, FB	Adw	50°C(4days)	50°C, NaCl 3%(3days)	10cycles	5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85
原、石川 ¹⁶⁾	0.45, 0.55, 0.65	N, FA, FB, FC	Adw	40°C(4days)	40°C, NaCl 3%(3days)	20cycles	7.5, 22.5, 37.5, 52.5, 67.5
高橋、湯浅 ¹⁷⁾	0.6	不明	Adw	(4days)	NaCl 3%(3days)	5cycles	5, 15, 25, 35, 45, 55
金子、阿部 ¹⁸⁾ (第4章)	0.5, 0.6	N	Adw	50°C(2, 3, 4days)	50°C, NaCl 3% (3, 4, 5days)	10,20cycles	5, 15, 25, 35, 45, 55, 65

*1 セメントの記号は JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」による。また、その他“W”は白色セメント、“SF”はシリカフェュームセメントを示す。

*2 測定点は文献中の図表より読み取った値を示す。

表 6-1 既往の文献の実験概要(つづき)

塩害地域での屋外暴露試験(E)						
著者	W/C	セメント*1	暴露環境		測定条件	
			地域	海岸からの距離(m)	材齢	位置*2 (mm)
掛川、榊田 ¹⁹⁾	0.45, 0.55, 0.6	N	沖縄県 国頭村 辺野喜	10, 100, 350	162, 457days	5, 15, 20, 75
金谷 ²⁰⁾ 、竹田 ²¹⁾ 、森本 ²²⁾ 、阿部、榊田	0.45, 0.55, 0.65	N	北海道 岩内郡 共和町	80	2, 8years	5, 10, 15, 25, 30, 37.5, 47.5, 57.5, 65
	0.6	N	北海道 岩内郡 共和町	50, 80, 150	1, 3, 5, 7, 10, 18years	5, 15, 25, 35, 45
田中 ⁷⁾	0.40, 0.55	H	新潟県 新潟市 関屋分水	20	1, 3years	5, 15, 25, 35, 45
徳村、山田 ¹²⁾	0.5, 0.6	N, E	沖縄県 国頭村 辺野喜	40	0.5, 1, 1.5, 3years	5, 20, 25, 30, 45, 55, 75
湯浅 ¹⁴⁾	0.6	N, E	北海道 岩内郡 共和町、 沖縄県 国頭村 辺野喜	40	1year	5, 15, 25, 35, 45

*1 セメントの記号は JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」による。また、その他“W”は白色セメント、“SF”はシリカフェームセメントを示す。

*2 測定点は文献中の図表より読み取った値を示す。

表 6-2 各種試験方法における検討データ数

試験方法	発表年	文献数	検討データ数*		
			試験体条件	測定点	
浸透促進試験	乾湿繰返し (Adw)	1986~2014	16	195	1185
	塩水浸漬 (Aw)	1988~2001	4	69	378
屋外暴露試験 (E)	1994~2011	7	90	531	

* 検討データ数は 6.2.2 項のデータ選別後の値を示す。

(2) 塩化物イオンの浸透促進試験

塩化物イオンの浸透促進試験には、前述のように JIS により標準化された試験方法がない。そのため、各文献により試験条件が異なるが、いずれも乾湿繰返し試験（記号：Adw）と塩水浸漬試験（記号：Aw）に大別され、湿潤環境では NaCl 濃度 3%の塩水に浸漬するものが大半であった。また、近年の研究では第 3 章から第 5 章で行ったような環境温度 50℃で 1 サイクルを約 7 日とする乾湿繰返し試験が多く見られた。

試験に用いられたコンクリートは、水セメント比 0.40~0.65、セメントの種類は普通ポルトランドセメントをはじめ各種ポルトランドセメントや混合セメント、普通エコセメントなど多様であった。また、本研究の調査対象では土木学会規準である JSCE-G 572²⁵⁾と同様な試験条件（塩水浸漬、温度

20°C、NaCl 濃度 10%) は見られず、また、JSCE-G 571²⁴⁾ のような電気泳動による試験もなかった。

(3) 塩害地域における屋外暴露試験

屋外暴露試験（記号：E）では、実施された地域が沖縄県辺野喜、北海道共和町、新潟県関屋分水に限られ、いずれも海岸から近く、飛来塩分量の多い地域であった。暴露期間は1～3年以内が多いものの、10年や18年といった長期の試験結果も見られた。

また、試験に用いられたコンクリートは、普通ポルトランドセメントや普通エコセメントなどであり、水セメント比は0.40～0.65であった。

6.2 データの取扱いと検討方法

6.2.1 塩化物イオン量

調査対象として選定された既往の文献より、記載された表または図から測定位置（浸透面からの距離）および全塩化物イオン量の測定値を読み取った。全塩化物イオン量は、文献により「コンクリート重量に対する NaCl%」、「mg/g」、「コンクリートの重量%」などの表記が見られたため、すべて「kg/m³」に換算した。単位換算にあたり、コンクリート密度は文献中に調合に関する記載がある場合には単位量の和とし、調合が不明な場合には 2300kg/m³とした。

6.2.2 検討方法と対象データの選別

(1) 拡散方程式

コンクリート内部への塩化物イオンの浸透・拡散は、式 (6-1) に示す拡散方程式を用いて検討を行うこととした。この式は Fick の二次拡散方程式について、特性値である拡散係数や表面塩化物イオン量を一定として求められた解析解であり、表面塩化物イオン量を境界条件として、拡散係数に従い塩化物イオンがコンクリート中に浸透・拡散するものである。本章では、これらの特性値についてコンクリートにおける浸透面からの距離と全塩化物イオン量との関係から、最小二乗法などにより誤差二乗和が最小となる値を算出した。

また、本章では除塩していない海砂を使用したコンクリートは対象外としていること、いずれの文献も実験報告であることからコンクリート材料に由来する初期塩化物イオン量は小さいと判断し、考慮しないこととした。なお、期間については浸透促進試験、屋外暴露試験にかかわらず、単位は試験期間の日数（1年=365日）とし、拡散係数の単位は“mm²/day”とした。

$$C(x_i, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_i}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} \quad \text{式 (6-1)}$$

ここに、 t : 期間 (days)

x_i : コンクリート表面からの距離 (mm)

$C(x_i, t)$: 距離 x_i (mm) における期間 t (days) での塩化物イオン量 (kg/m³)

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)

D : 見かけの拡散係数 (mm²/day)

$\operatorname{erf}()$: 誤差関数

(2) 表層部で塩化物イオン量が減少するデータの除外

文献調査を行うにあたり、一部のデータでは塩化物イオン量のピークが表層部ではなく内部で見られるものがあった。この現象は第 3 章で見られたような表層部における塩化物イオンの流出や、コン

クリートの中性化によるフリーデル氏塩の影響などが考えられる。このような場合には、図 6-1 に示すように塩化物イオン量の分布はピーク近傍で上に凸となる極値を持つ山型で、内部に向けて塩化物イオン量が収束する曲線が想定される。

しかし、式 (6-1) の拡散係数は図中に示すような表面からの距離が長くなるに伴い塩化物イオン量が減少する曲線を前提としている。そのため、表層部での塩化物イオン量の低下を考慮した近似はできない。したがって、本章ではこのような分布を示す試験体条件のデータは除外することとした。

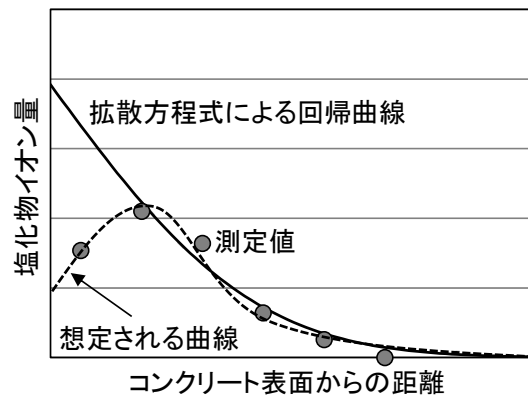


図 6-1 対象データの選別方法に関する概念図(表層部での塩化物イオン量の低下する場合)

(3) 試験体の 2 面を試験面とした実験データの取扱い

一部の試験では、1 つの試験体について対称となる 2 面を試験面としている。このような場合には図 6-2 に示すように、試験体の中央付近で塩化物イオン量の少ないケース①では試験面それぞれの試験結果を検討対象とする。しかし、中央付近まで塩化物イオンが浸透しているケース②では、両方の試験面からの影響範囲が不明であることから、いずれの面も検討対象から除外することとした。

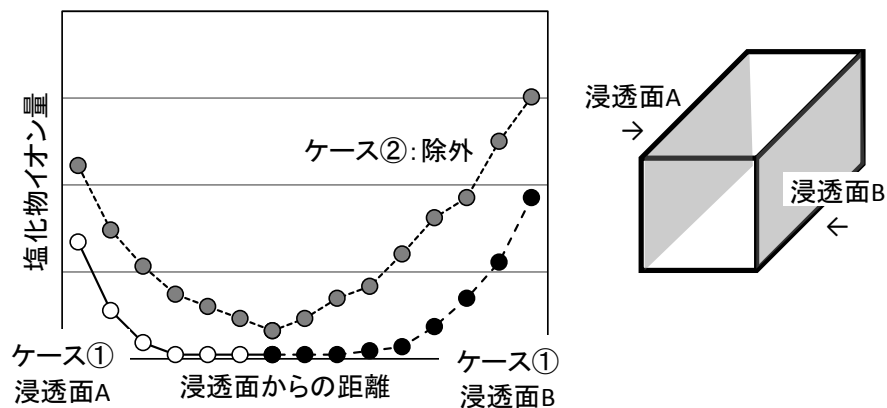
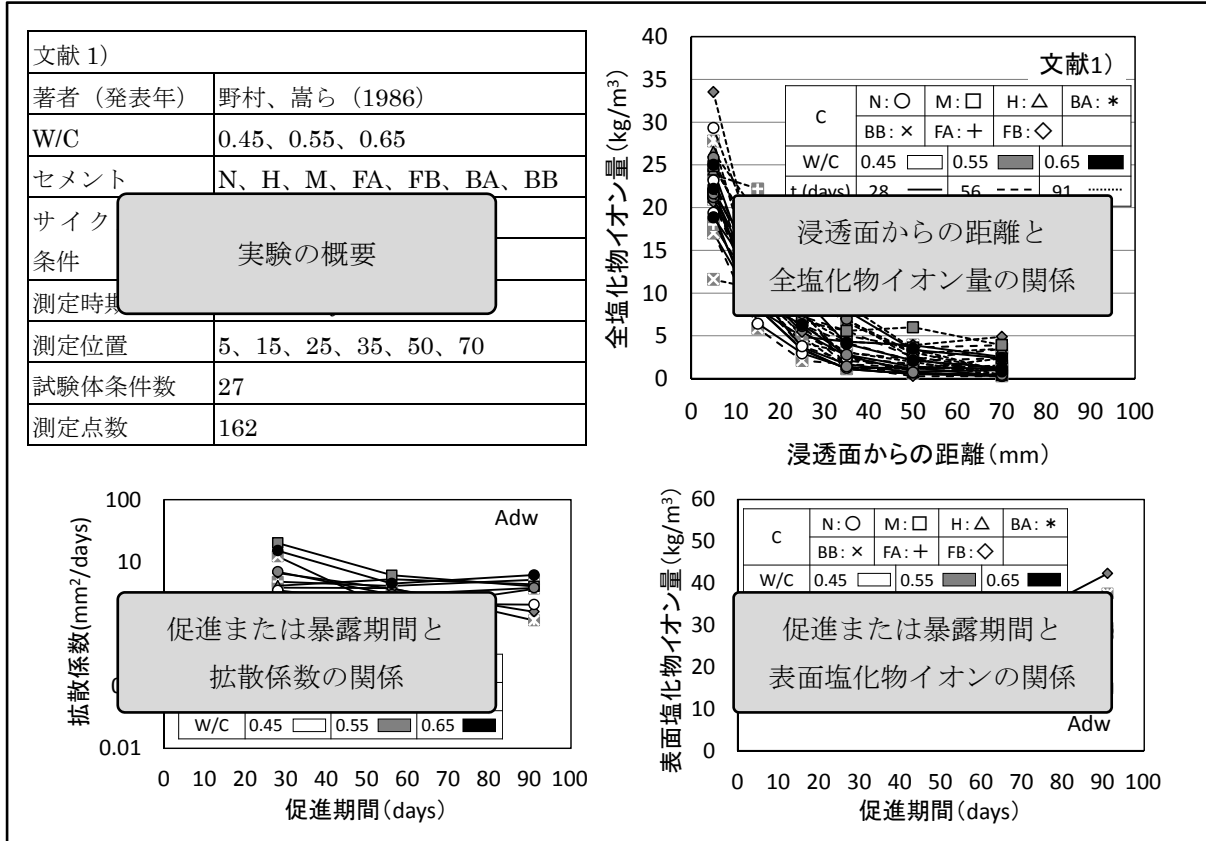


図 6-2 対象データの選別方法に関する概念図(2 面を浸透面とした場合)

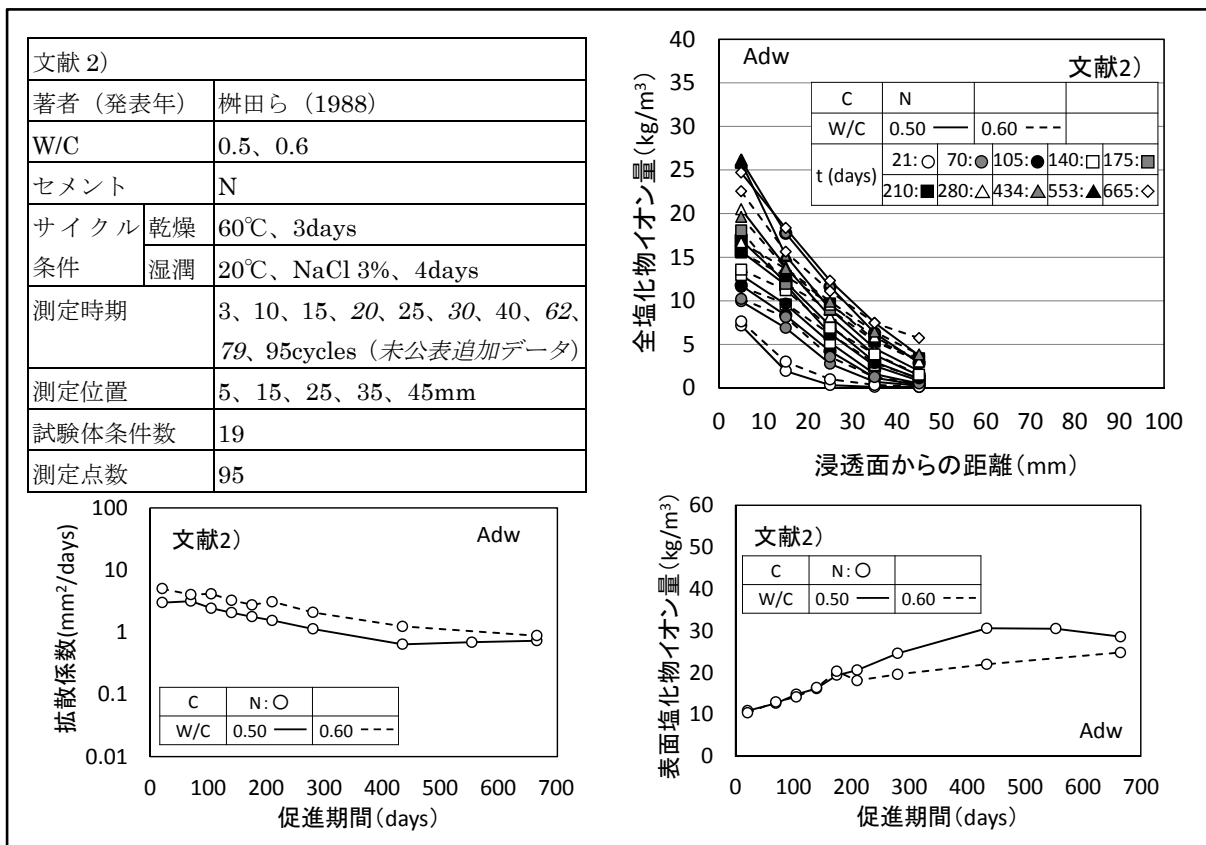
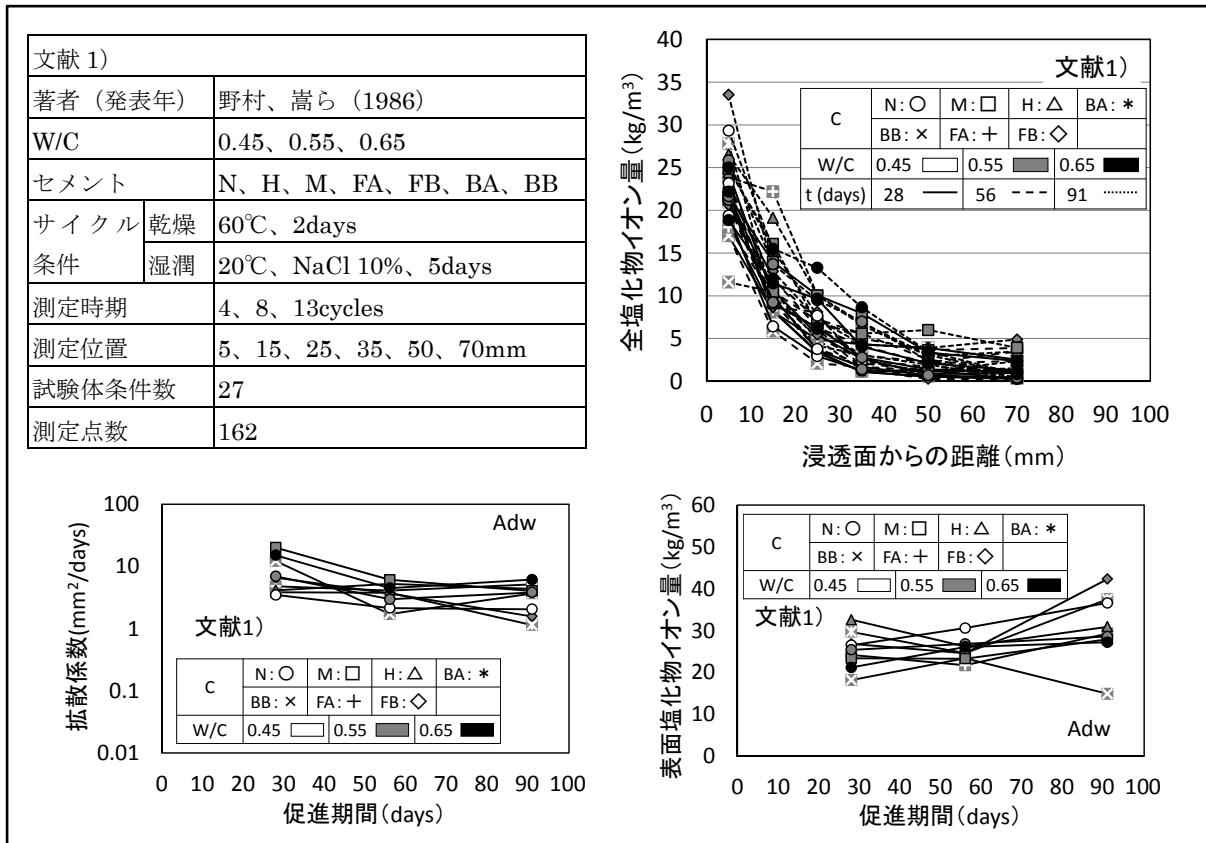
6.3 既往の文献における実験結果

6.3.1 既往の文献における実験の水準および結果の概要

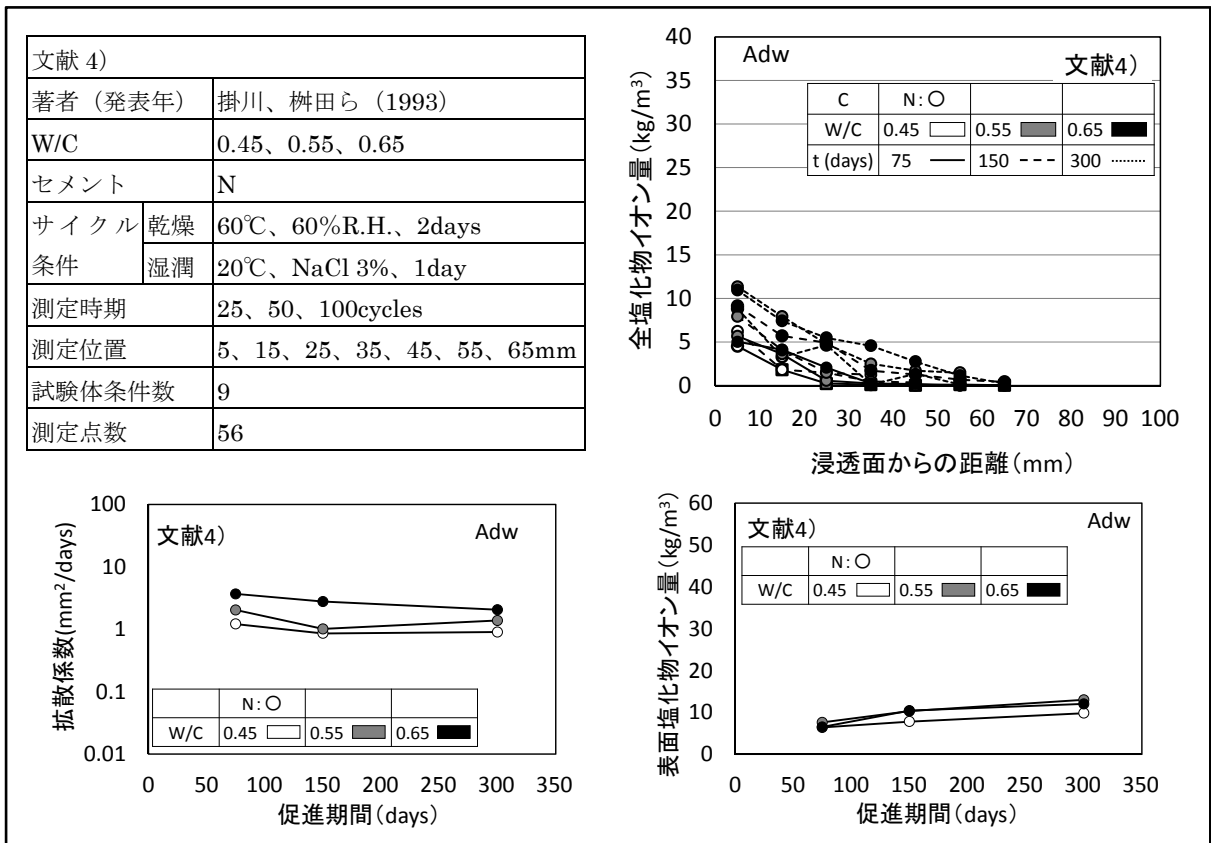
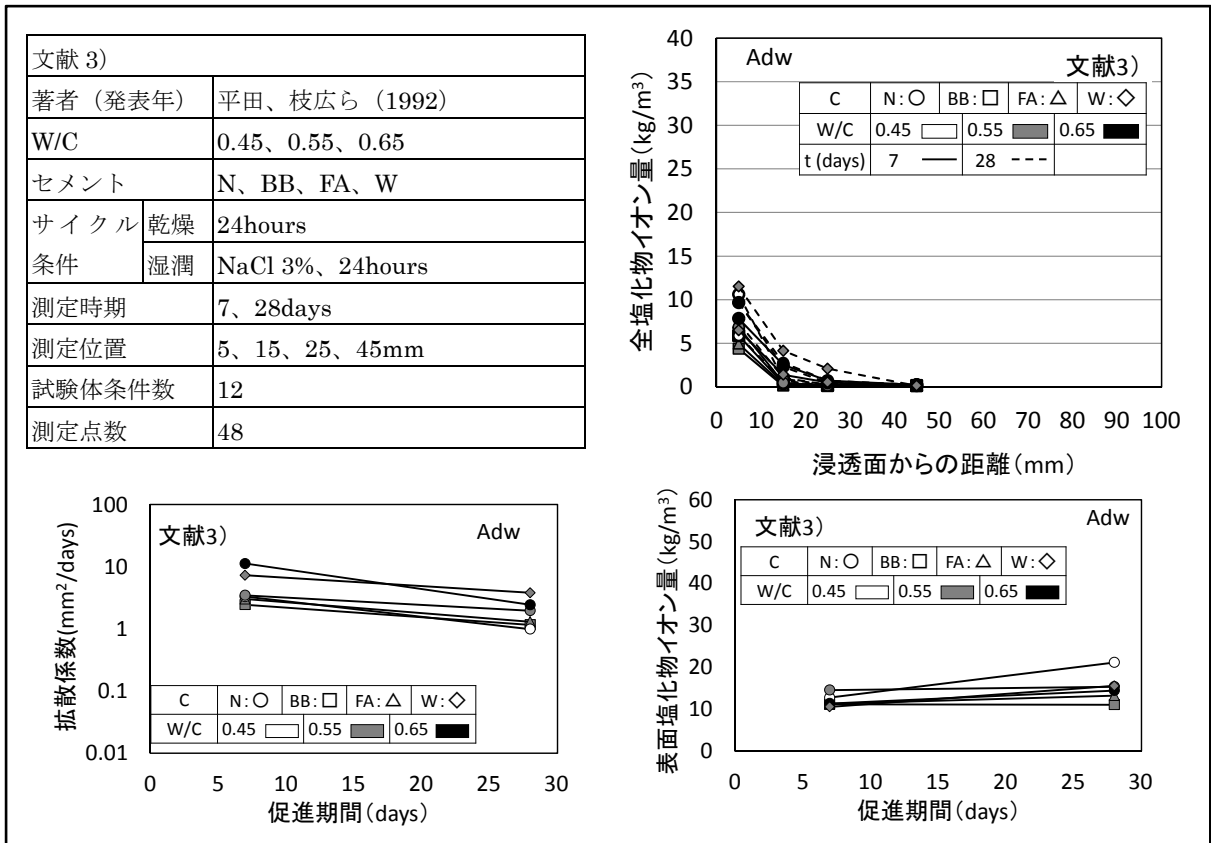
以降に既往の文献における実験の概要および結果をまとめた実験概要シートをそれぞれ示す。なお、実験概要シートの凡例は以下によるものとする。



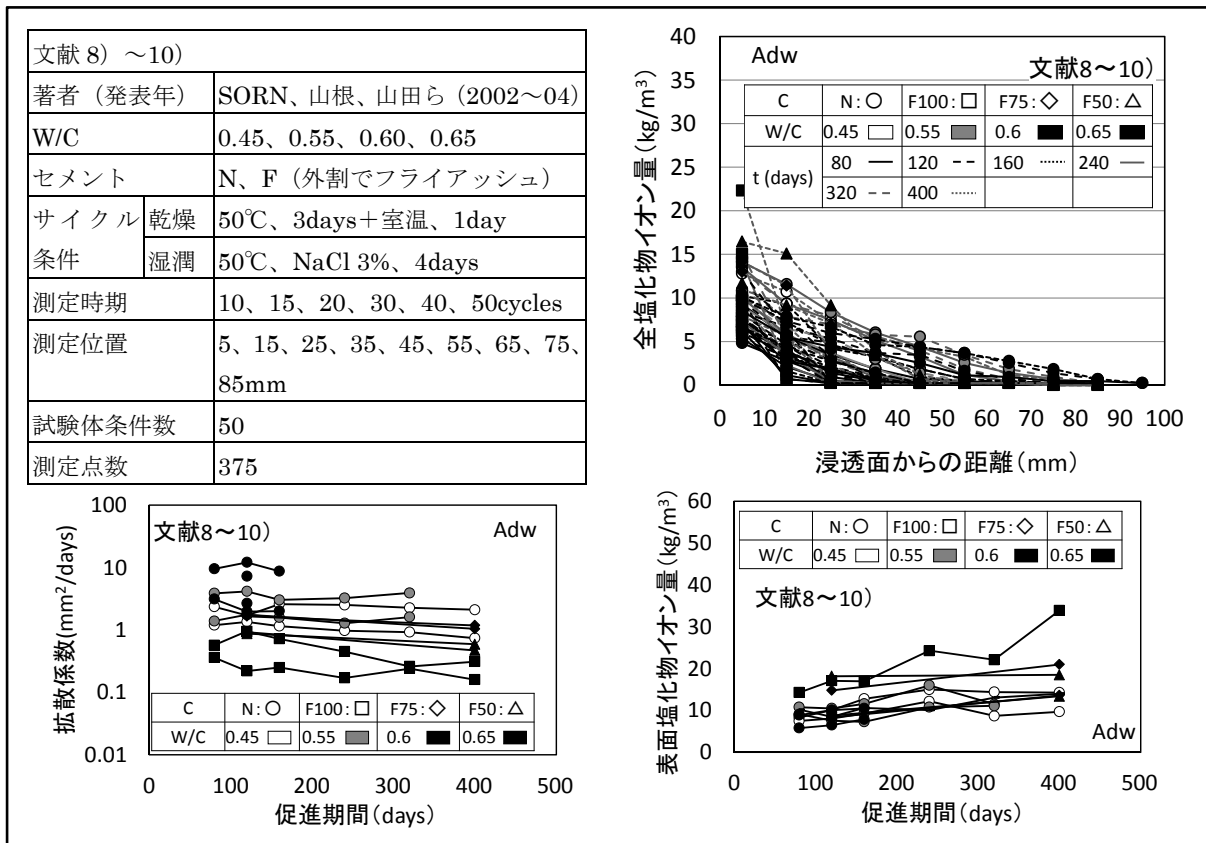
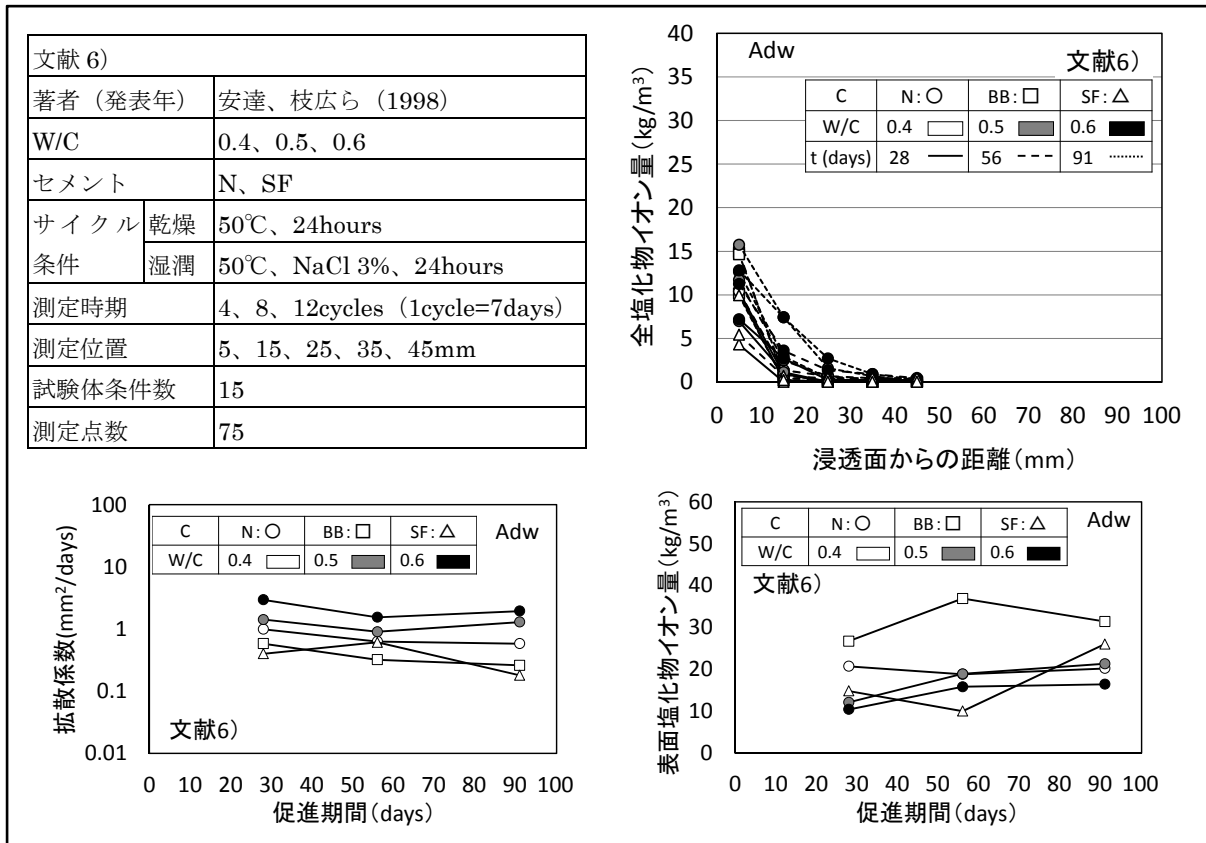
(1) 乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験 (Adw)



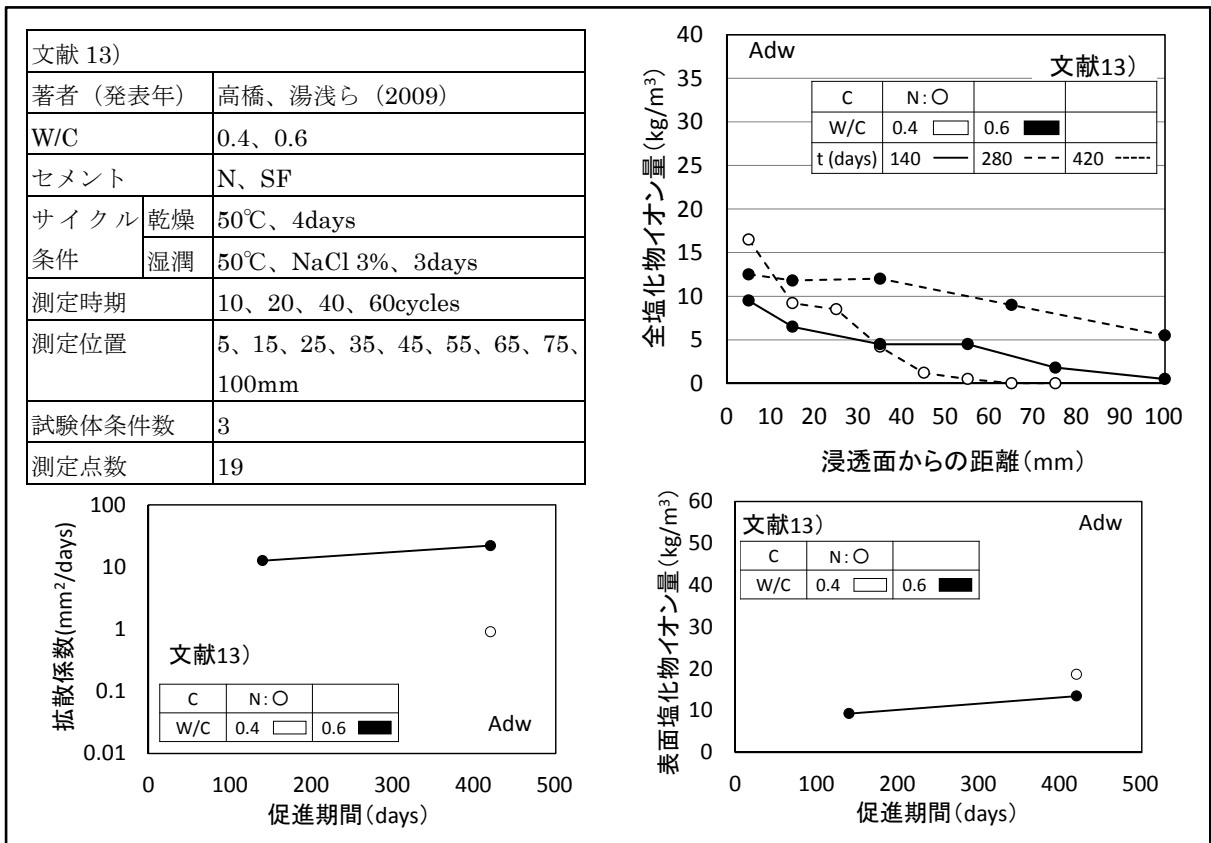
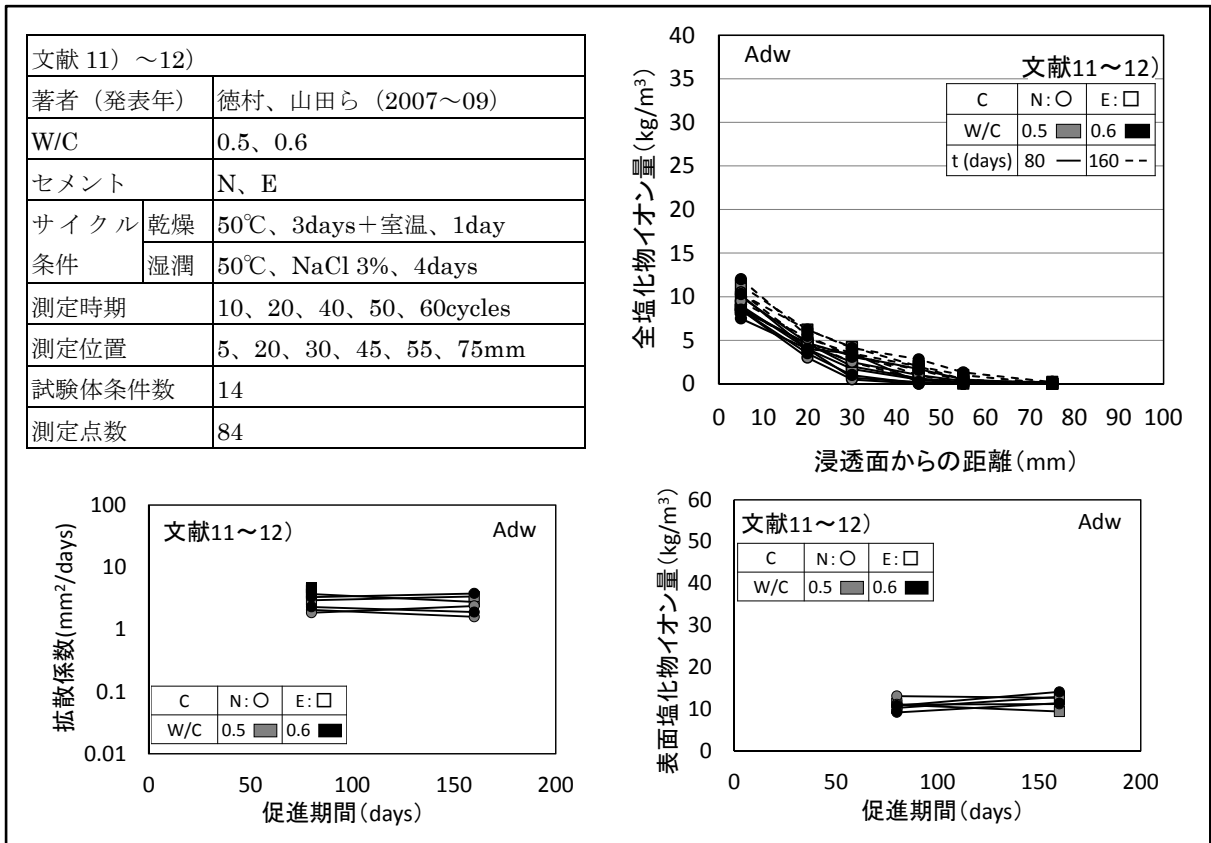
乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験 (Adw) (つづき)



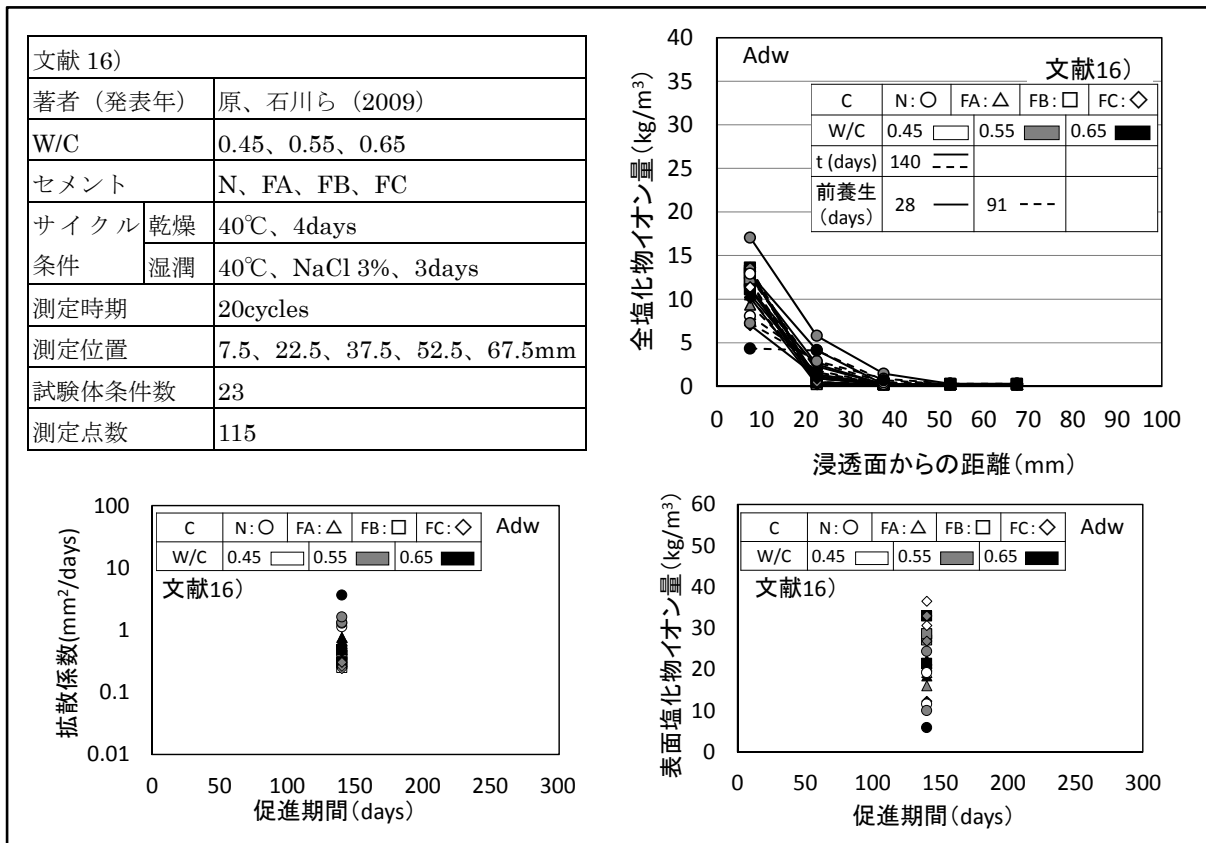
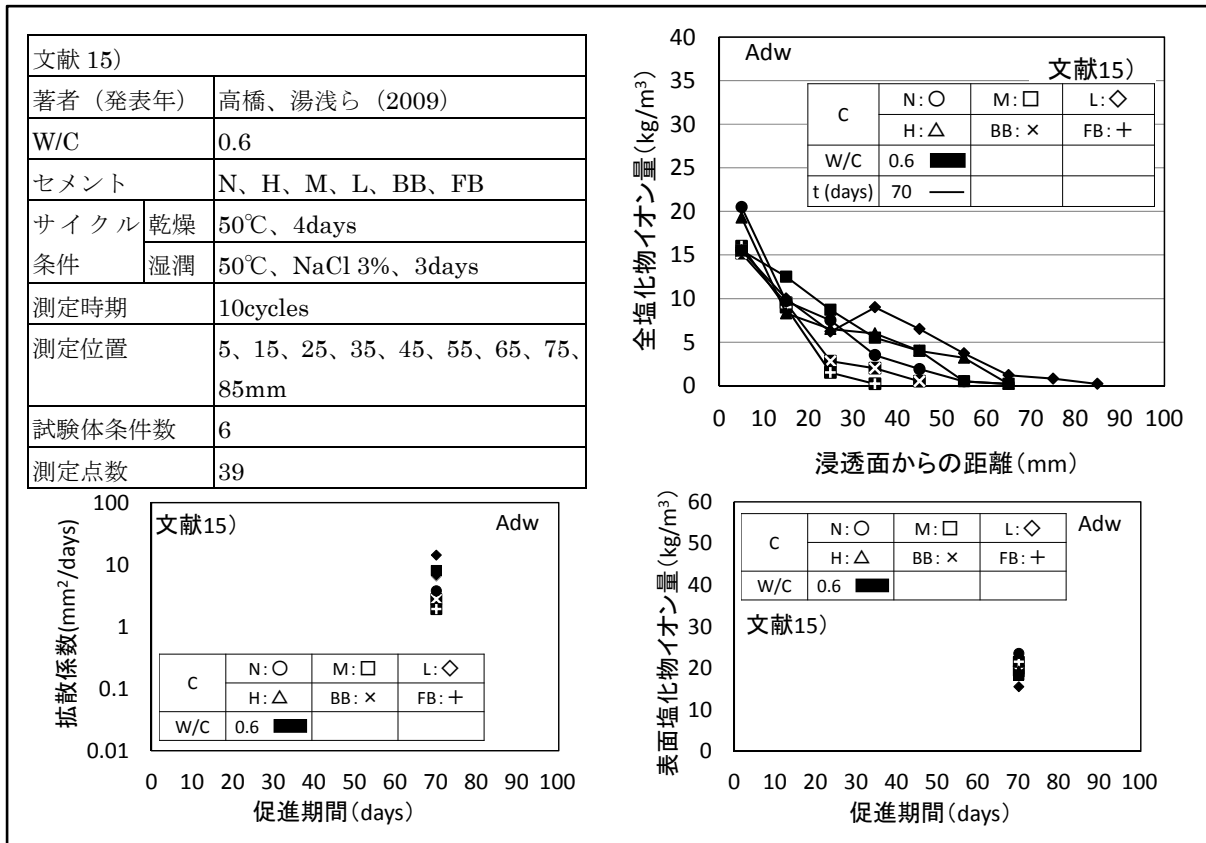
乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験 (Adw) (つづき)



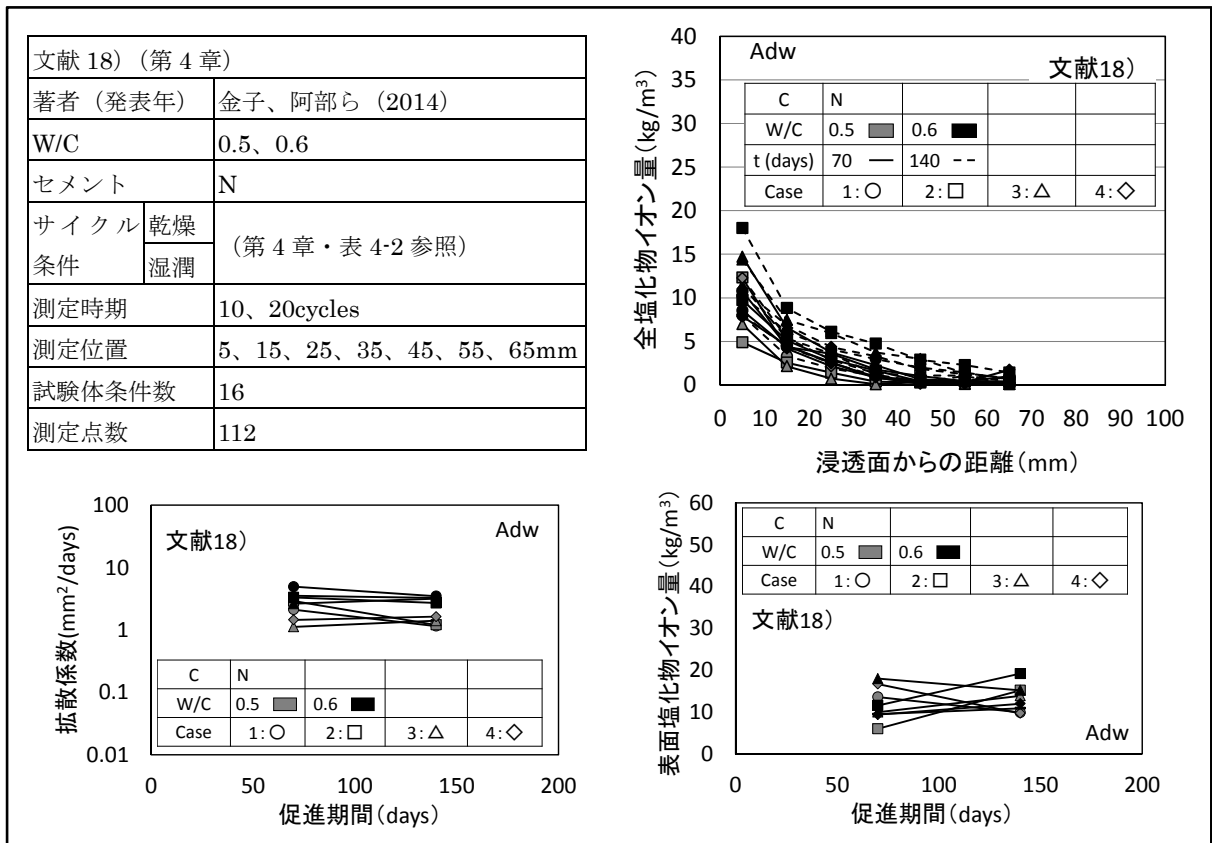
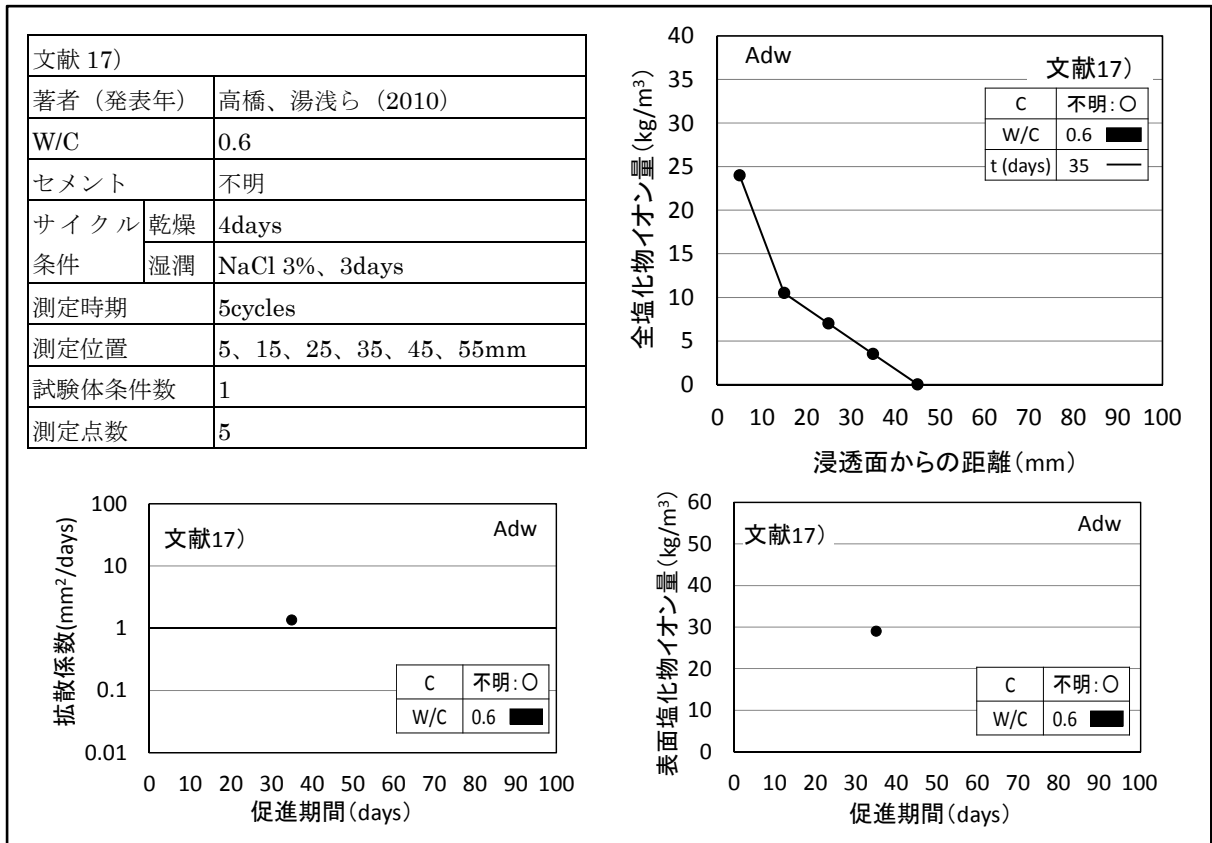
乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験 (Adw) (つづき)



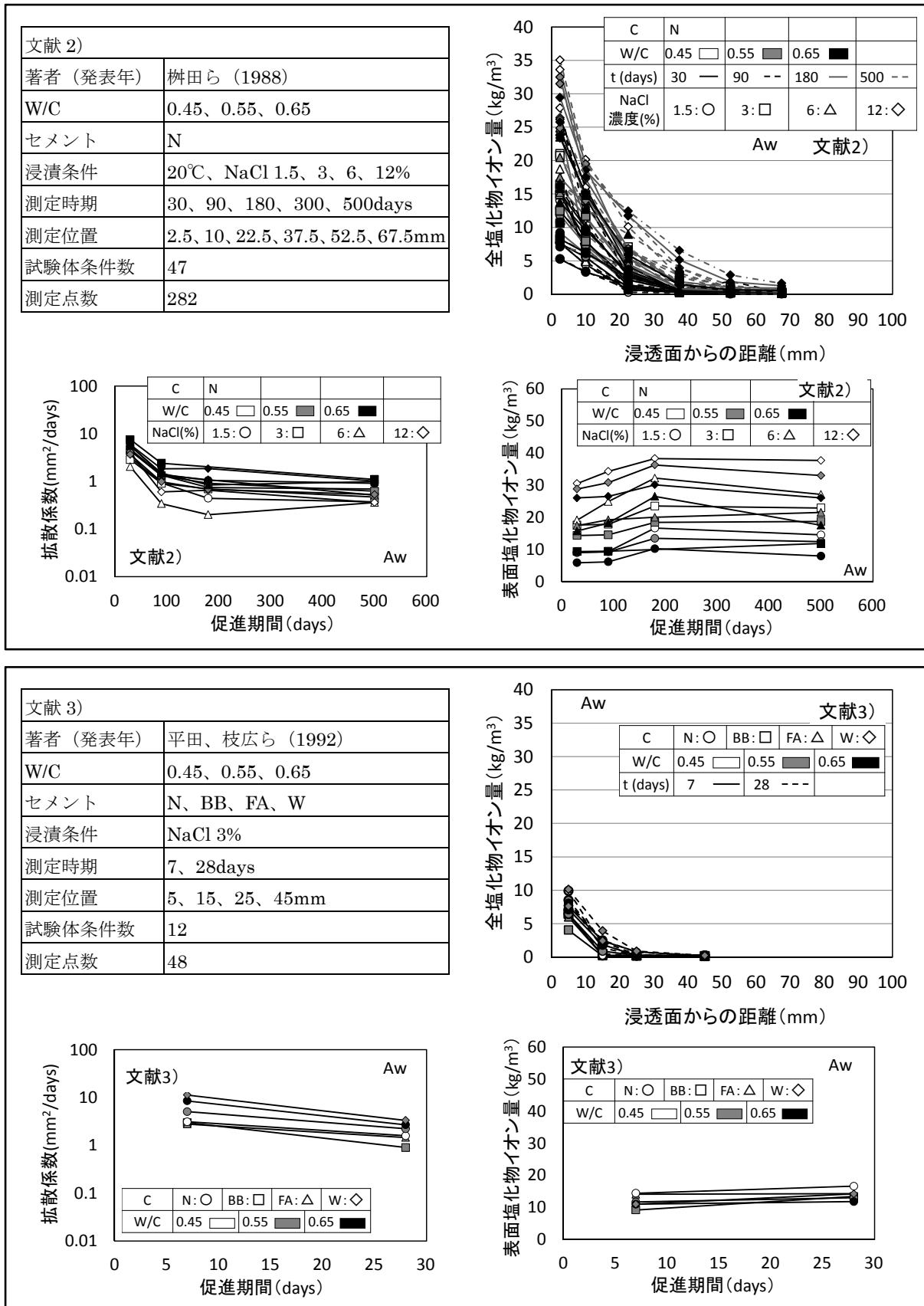
乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験 (Adw) (つづき)



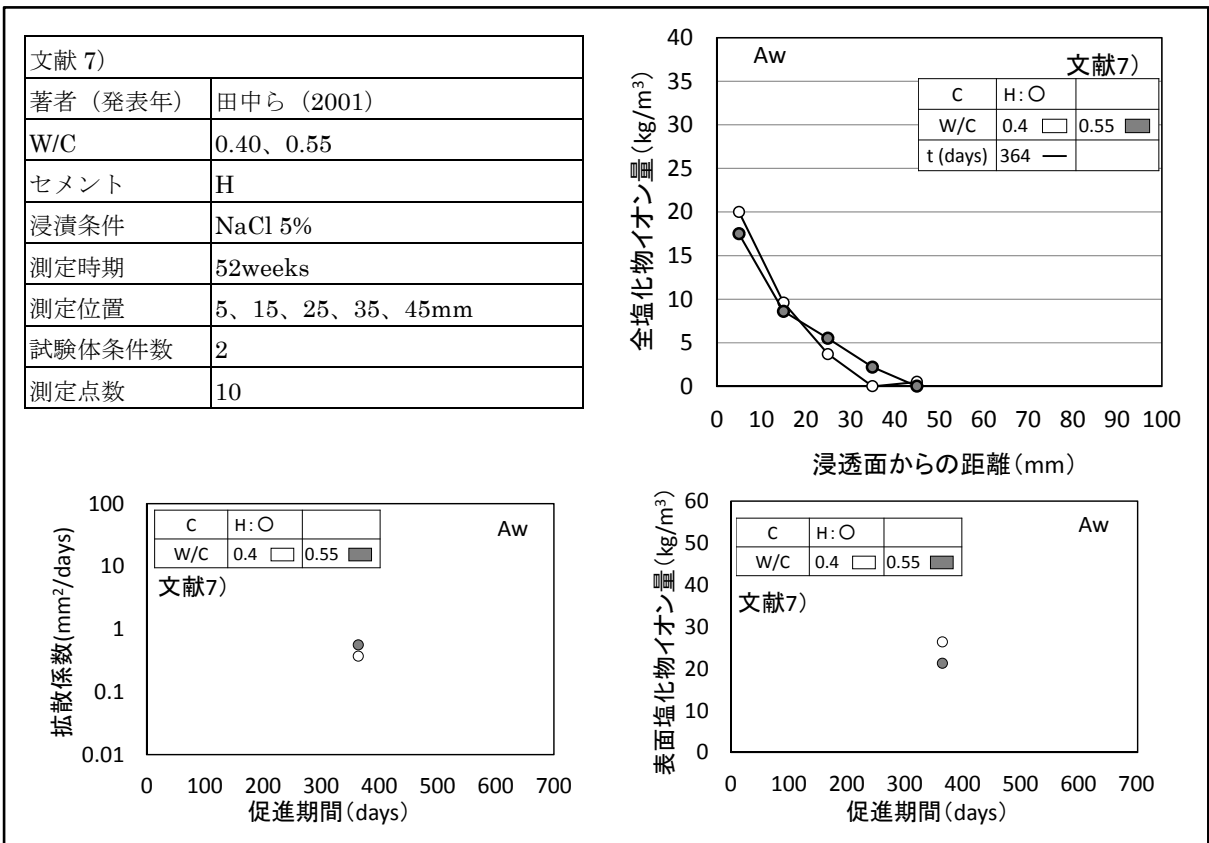
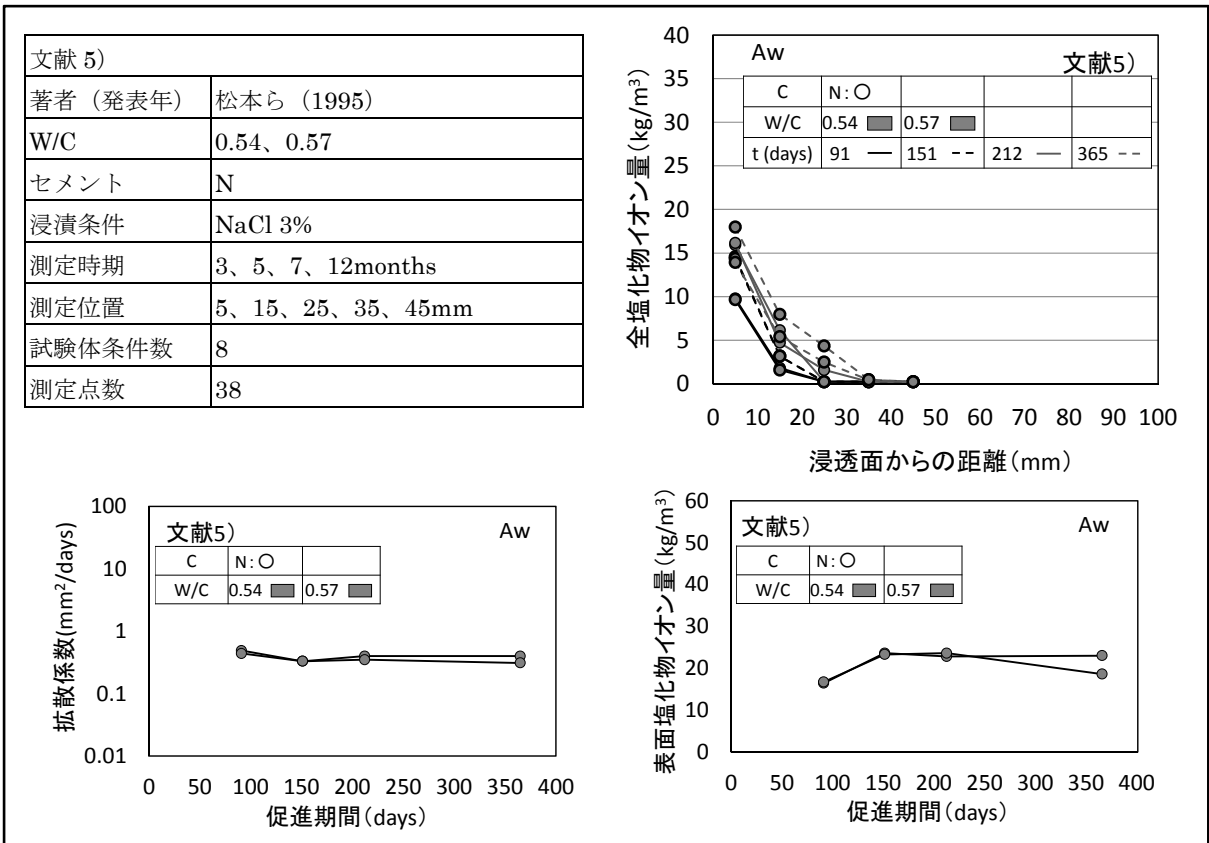
乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験 (Adw) (つづき)



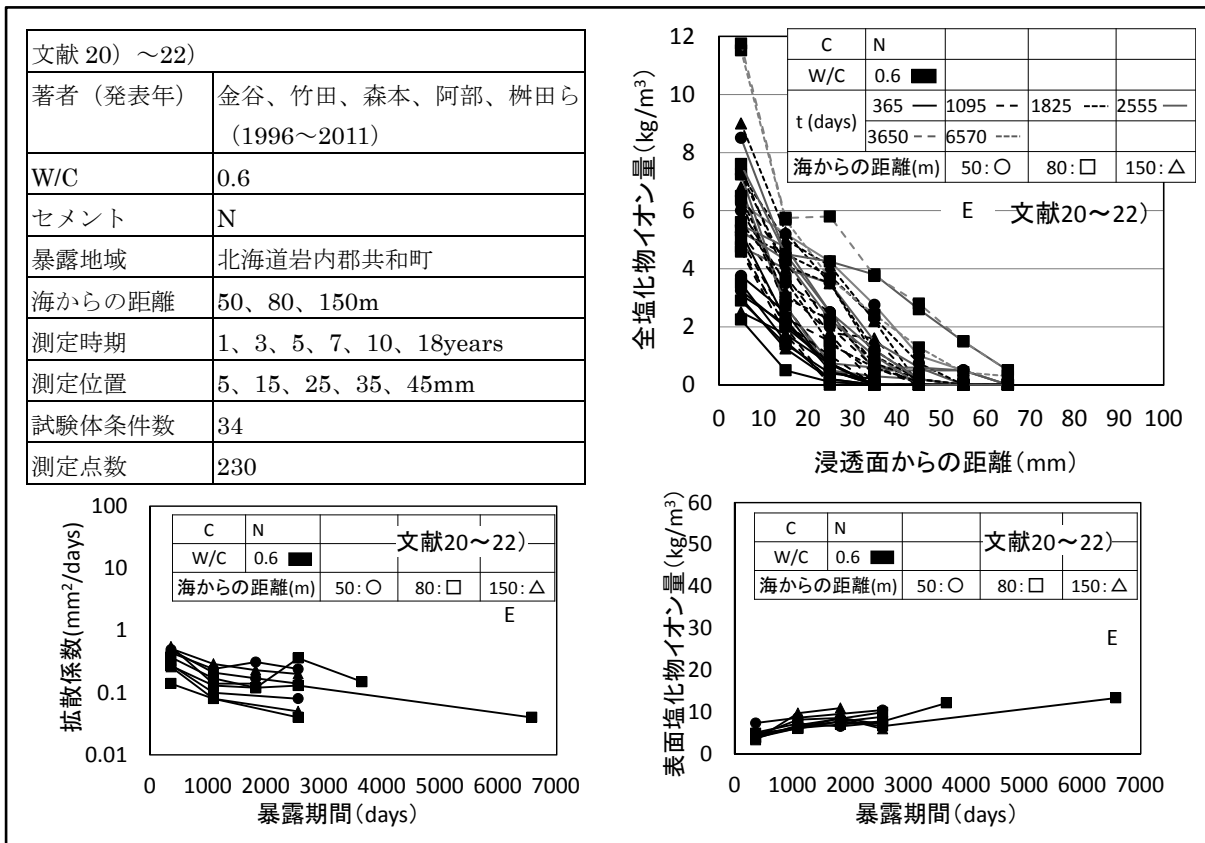
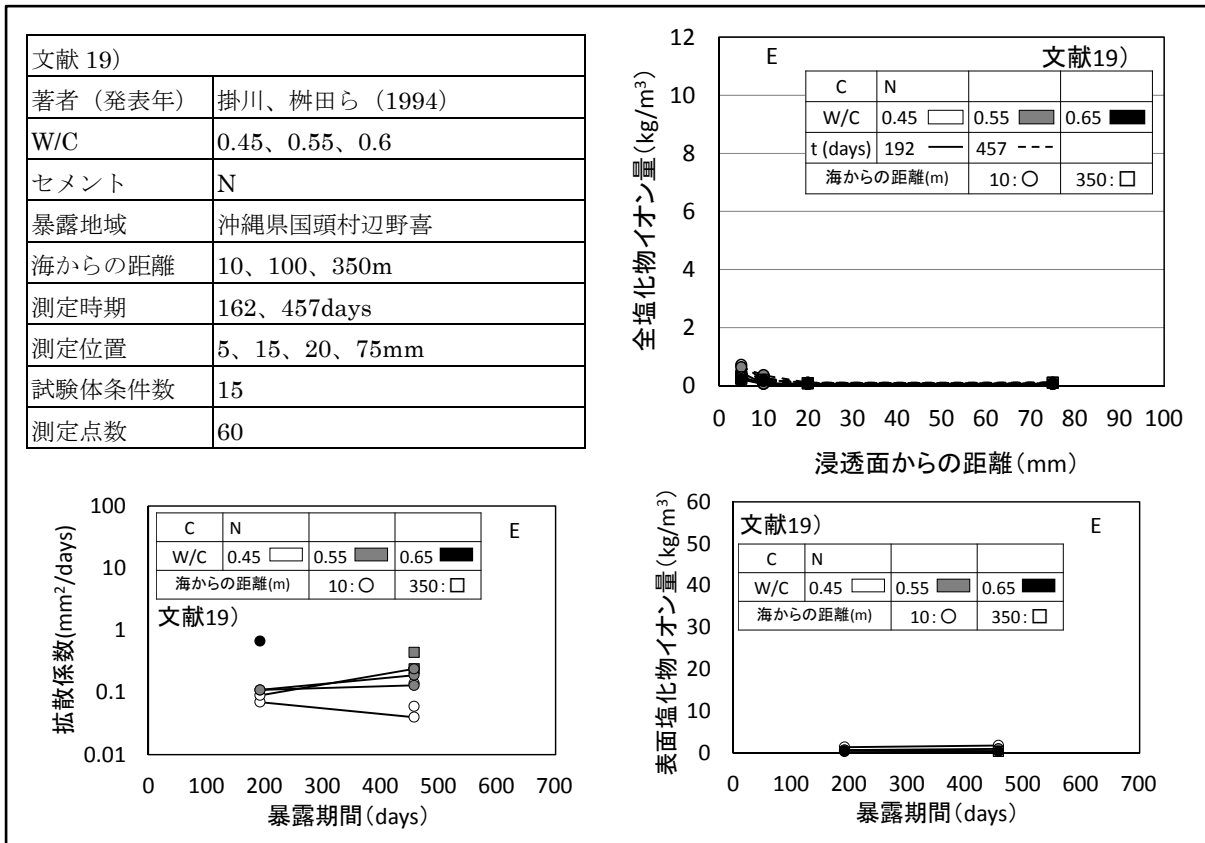
(2) 塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験 (Aw)



塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験 (Aw) (つづき)

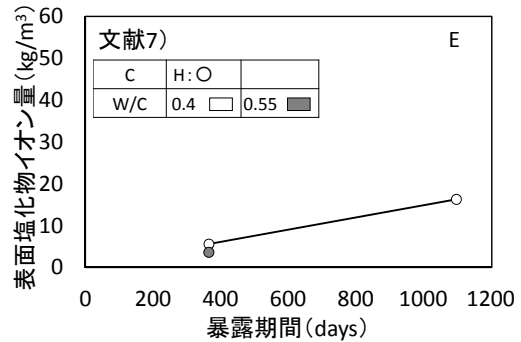
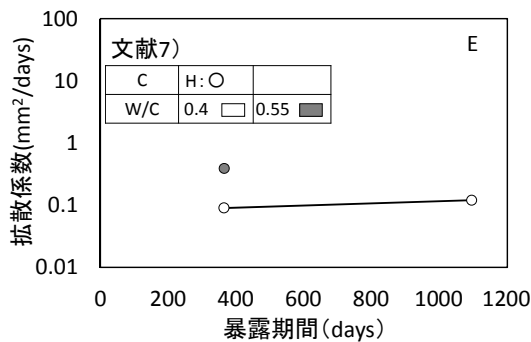
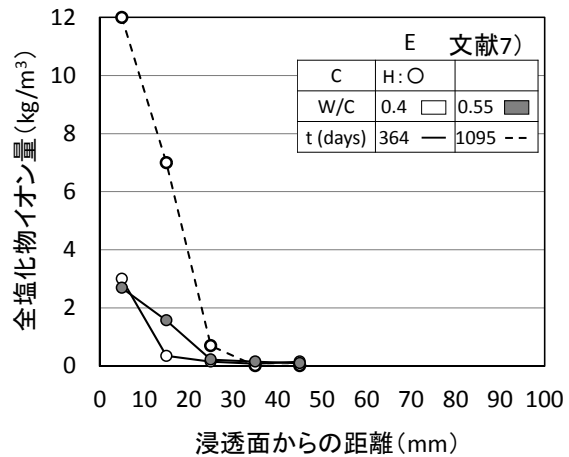


(3) 屋外暴露試験 (E)

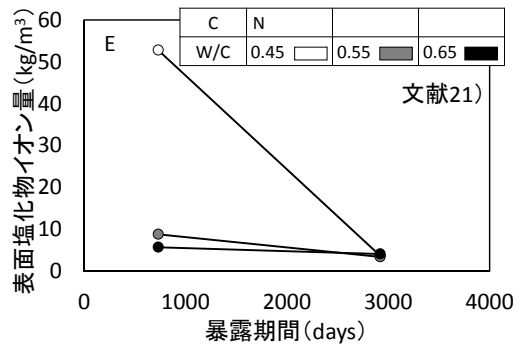
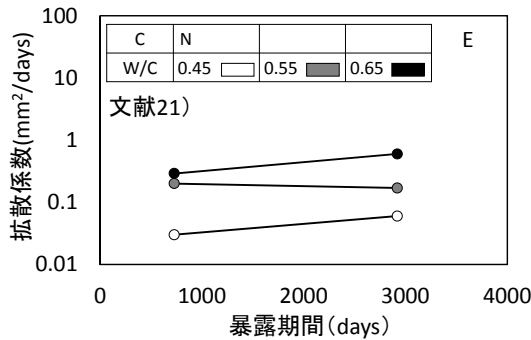
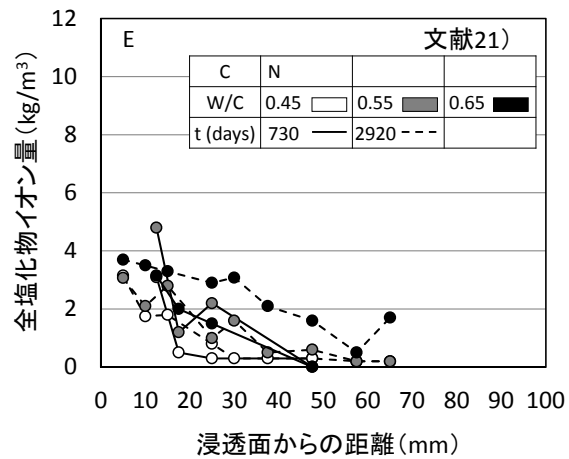


屋外暴露試験 (E) (つづき)

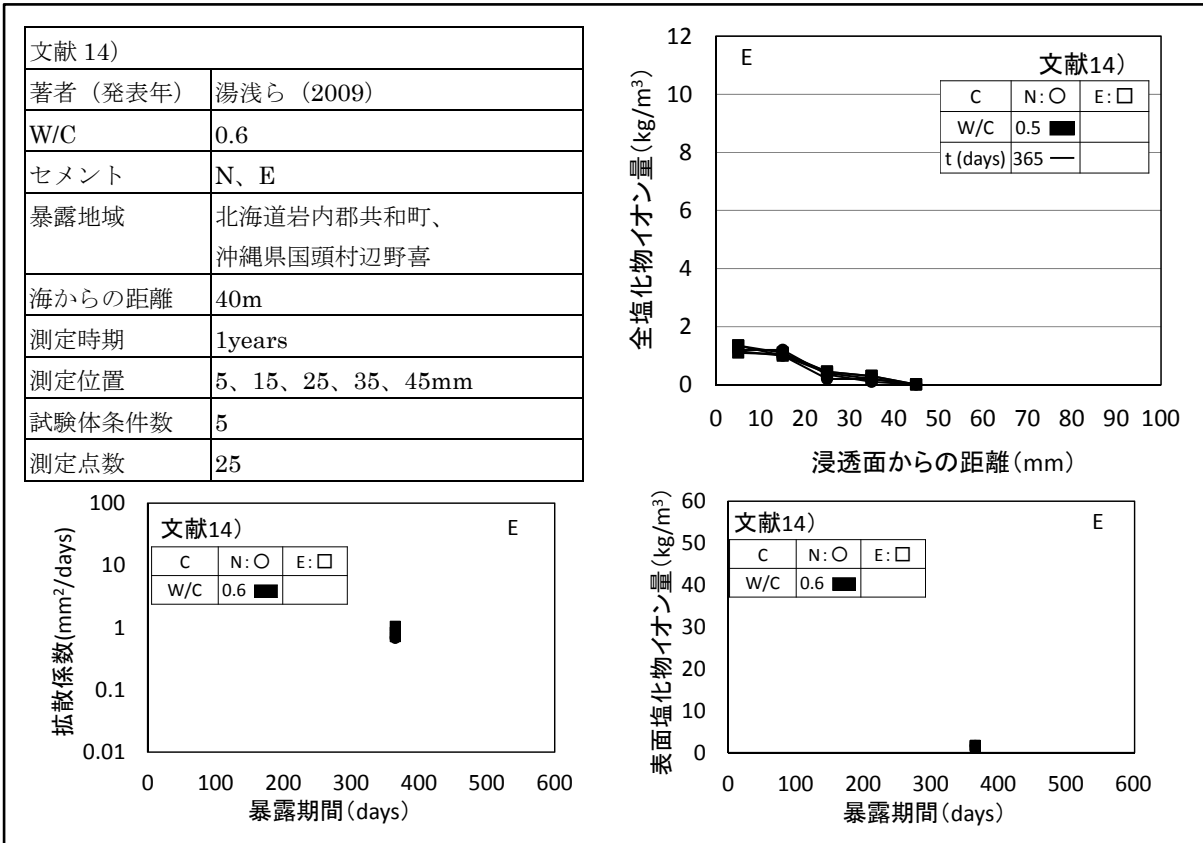
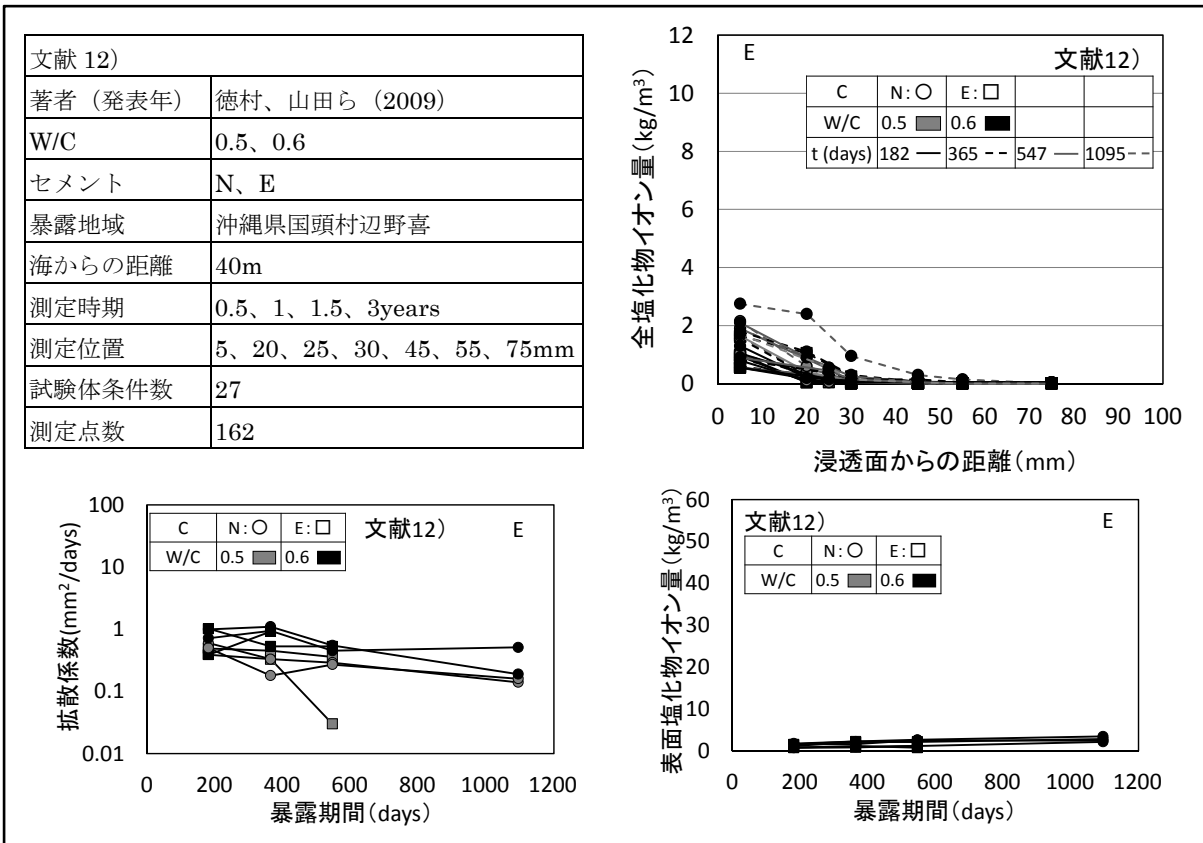
文献7)	
著者 (発表年)	田中ら (2001)
W/C	0.40、0.55
セメント	H
暴露地域	新潟県新潟市関屋分水
海からの距離	20m
測定時期	1、3years
測定位置	5、15、25、35、45mm
試験体条件数	3
測定点数	15



文献21)	
著者 (発表年)	竹田、榊田ら (2002)
W/C	0.45、0.55、0.65
セメント	N
暴露地域	北海道岩内郡共和町
海からの距離	80m
測定時期	2、8years
測定位置	5、10、15、25、30、37.5、47.5、57.5、65mm
試験体条件数	6
測定点数	39



屋外暴露試験 (E) (つづき)



6.3.2 既往の文献における実験結果

6.2.2 (2) で行った表層部での塩化物イオン量の低下によるデータの選別では、除外の対象となったデータは文献 14) や文献 19) で多く、特に文献 14) の Adw では、すべての試験体条件が除外の対象となり、このような現象には試験の方法による影響もあると考えられる。

コンクリート中の塩化物イオン量は、促進試験では乾湿繰返しの Adw および塩水浸漬の Aw ではいずれも同様な分布を示し、表層部の塩化物イオン量が極めて大きく、浸透面からの距離が長くなるに伴い小さくなった。一方で、屋外暴露試験 (E) では浸透面に近い位置であっても促進試験のように膨大な塩化物イオンは存在していない。そのため、促進試験において得られるコンクリート中の塩化物イオン量の分布は暴露環境下における分布とは異なり、コンクリートの内部では同程度の塩化物イオンであっても表層部では非常に大きくなる。

また、促進試験および暴露試験では、いずれも拡散係数や表面塩化物イオン量は同一の実験においてばらつきは見られるものの、試験期間の経過に伴い拡散係数は減少し、表面塩化物イオン量は増加する傾向を示した。

6.4 拡散係数および表面塩化物イオン量

6.4.1 モデル式による曲線回帰の検討方法

式(6-1)に示した拡散方程式は、ある実験値の測定時点までの拡散係数および表面塩化物イオン量をいずれも一定であるとして求められた解析解である。しかし、前節の既往の文献による実験結果から促進試験および暴露試験では、いずれも拡散係数は期間の経過に伴い減少し、表面塩化物イオン量は増加する傾向が見られた。また、文献2)のように長期間にわたり連続した測定を行っている実験では、拡散係数および表面塩化物イオン量が試験期間の経過に伴い変化し、一定の値に収束する傾向も見られた。

このような傾向は、2.3.1項で調査、整理したとおり、コンクリート中に蓄積される塩化物イオンには限りがあるためと考えられるとの山田ら²⁶⁾の報告もあり、また、文献20)や文献21)でも同様に報告されている。

そこで、本章では経時に伴う拡散係数および表面塩化物イオン量の変化について、図6-3に示すような式(6-2)および式(6-3)のモデル式で検討することとした。

$$\log_{10}D = \log_{10}D_c + (\log_{10}D_0 - \log_{10}D_c) \times e^{-k_d t'} \quad \text{式(6-2)}$$

ここに、D : 見かけの拡散係数 (mm²/day)

D_c : 経時により収束する拡散係数の定値 (mm²/day)

D₀ : 初期の拡散係数 (mm²/day)

k_d : 実験により定まる係数

t' : 期間 (days)

$$C_0 = C_{0c} \times (1 - e^{-k_c t}) \quad \text{式(6-3)}$$

ここに、C₀ : 表面塩化物イオン量 (kg/m³)

C_{0c} : 経時により収束する表面塩化物イオン量の定値 (kg/m³)

k_c : 実験により定まる係数

t : 期間 (days)

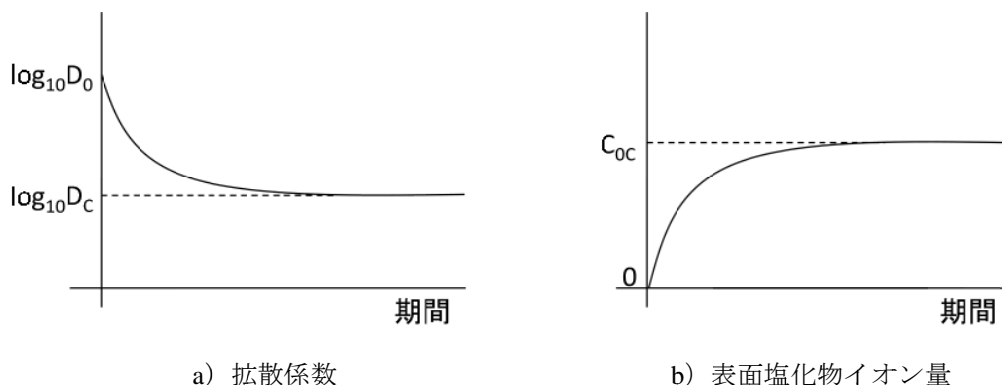


図 6-3 経時変化によるモデル式 の概念

なお、以降の検討においては、対象とした試験体条件の約 83%が普通ポルトランドセメント (N) であったことから、セメントの種類による影響を除くため N のみのデータを用いる (外割でフライアッシュを使用しているものは除く) こととした。また、同様に促進試験においては、最もデータ数の多い NaCl 濃度 3%の浸漬水を用いた試験体条件に限定した。

6.4.2 拡散係数

図 6-4 に促進または屋外暴露期間と拡散係数の関係を、また、表 6-3 に式 (6-2) のモデル式で求められた回帰曲線の係数を示す。表 6-3 に示す値は、対数で表した拡散係数について最小二乗法などを用いて導かれる回帰曲線との誤差二乗和が最小となるように求めた。

促進期間と拡散係数の関係について、水セメント比による傾向は図 6-4 中で分類したとおり、 $0.4 \leq W/C \leq 0.45$ 、 $0.45 < W/C \leq 0.6$ および $0.6 < W/C \leq 0.65$ に大別された。

促進試験において、塩水浸漬の A_w では促進期間の経過に伴い拡散係数は小さくなり、いずれの水セメント比であっても実験値は少ないが、 $W/C 0.6$ 以下では約 200 日で、 $W/C 0.65$ では約 300 日で一定となるような式 (6-2) のモデル式に沿う経時変化を示した。また、経時により一定となった値を示す D_c は、 $W/C 0.6$ 以下では同程度であり、水セメント比の影響は小さいと考えられ、また、 $W/C 0.65$ ではこれらの値よりも大きくなった。

乾湿繰返しの A_{dw} では、 $W/C 0.6$ 以下において実験値の中で最も促進期間の短い 7 日であっても、その後の促進期間の実験値と同程度の拡散係数を示した。そのため、モデル式による回帰曲線の係数について $0.4 \leq W/C \leq 0.45$ では D_0 が、 $0.45 < W/C \leq 0.6$ では D_c および k_a がそれぞれ実験値と乖離し、 $W/C 0.6$ 以下では式 (6-2) のようなモデル式での回帰は相応しくないと考えられる。また、 $W/C 0.6$ 以下における実験値の分布は、 $0.8 \sim 3 \text{mm}^2/\text{days}$ に多く、 A_w と同様に水セメント比による影響は小さかった。一方、 $W/C 0.65$ では拡散係数は A_w と同様にモデル式に従うような経時による変化を示したものの、同一の促進期間であっても実験値のばらつきは大きかった。

屋外暴露試験においても、暴露期間と拡散係数の関係には水セメント比における明瞭な違いは見られず、ばらつきはあるものの塩水浸漬による促進試験の A_w と同様にモデル式に沿う経時変化を示し、およそ 1500 日（約 4 年）で拡散係数は一定の値となった。また、一定となる D_c は、 $W/C 0.6$ 以下における A_w の約 $1/3.6$ や A_{dw} における $0.4 \leq W/C \leq 0.6$ の実験値の平均 ($2.47 \text{ mm}^2/\text{day}$) の約 $1/20$ と、屋外暴露試験により得られる拡散係数は促進試験に比べて小さかった。

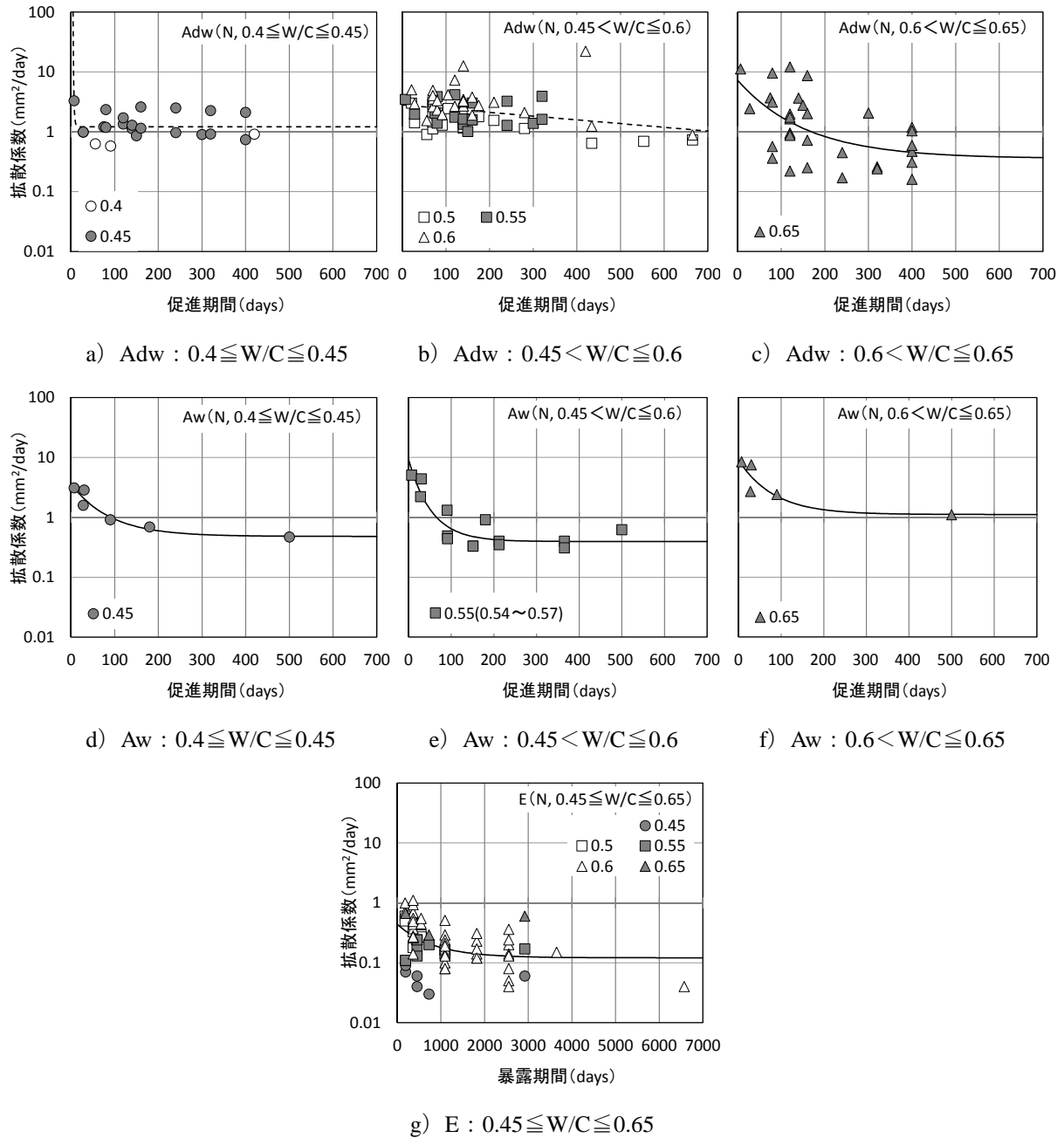


図 6-4 促進または暴露期間と拡散係数(普通ポルトランドセメント)

表 6-3 式(6-2)による回帰曲線の係数

試験方法	W/C	試験体条件数	D ₀ (mm ² /day)	D _c (mm ² /day)	k _d
Adw	0.4 ≤ ≤0.45	23	4.8×10 ²⁷	1.21	0.593
	0.45 < ≤0.6	71	2.81	3.1×10 ⁻⁵⁴	1.2×10 ⁻⁶
	0.6 < ≤0.65	32	7.32	0.36	0.006
Aw	0.4 ≤ ≤0.45	6	3.64	0.48	0.111
	0.45 < ≤0.6	14	9.32	0.39	0.019
	0.6 < ≤0.65	5	9.07	1.11	0.012
E	0.45 ≤ ≤0.65	73	0.44	0.12	0.001

6.4.3 表面塩化物イオン量

図 6-5 に促進または暴露期間と表面塩化物イオン量の関係を、また、表 6-4 に式 (6-3) のモデル式で求められた回帰曲線の係数を示す。なお、表 6-4 に示す値は回帰曲線と表面塩化物イオン量の実験値との関係において誤差二乗和が最小となるように最小二乗法を用いて算出した。

促進試験において、乾湿繰返しの Adw では拡散係数と同様に促進開始の極初期から表面塩化物イオン量は一定の値であり、C_{oc}は水セメント比に係わらず同程度であった。しかし、W/C0.45 を超える範囲では促進期間 200 日以上において C_{oc} よりも著しく大きな実験値も見られた。塩水浸漬の Aw では、いずれの水セメント比でも Adw と同様に促進試験の開始初期に表面塩化物イオン量は一定の値に収束した。また、C_{oc}は W/C0.6 以下では同様な値であり、W/C0.65 ではこれらの値よりも小さく、コンクリートの表層部における塩化物イオンの流出が大きいものと考えられる。

一方、屋外暴露試験では促進試験と同様に水セメント比による表面塩化物イオン量の違いは明瞭には見られず、C_{oc}は促進試験よりも小さかった。また、試験環境は海岸から 10~350m であり、このうちのほとんどが 100m 以内であった。これらの地域は、表 6-5 に示すように JASS 5²⁷⁾ では重塩害または塩害環境に、コンクリート標準示方書²⁹⁾ では飛来塩分が多い地域の汀線付近に分類される。本研究で得られた屋外暴露試験の C_{oc}は 8.5kg/m³であり、これらの関連学会が示す値と近い値を示した。

屋外暴露試験では促進試験よりも期間による表面塩化物イオン量のばらつきは小さく、表面塩化物イオン量がほぼ一定の値となる期間も約 1700 日 (約 4.5 年) と促進試験に比べて非常に長い。また、耐久設計施工指針²⁸⁾ では解説において、屋外暴露試験の結果から表面塩化物イオン量の経時変化は、おおむね 5 年で 1 年目のおおよそ 2~2.5 倍となって収束するとしている。本研究で得られた回帰曲線では、これと同様に表面塩化物イオン量の経時変化は約 4.5 年で 1 年時 (t=365 日) の約 2.6 倍で収束している。

このように、自然環境では経年により徐々にコンクリート表面に付着する飛来塩分が増えることから、同様な環境の区分であれば地域差にあまり影響されないものと考えられる。

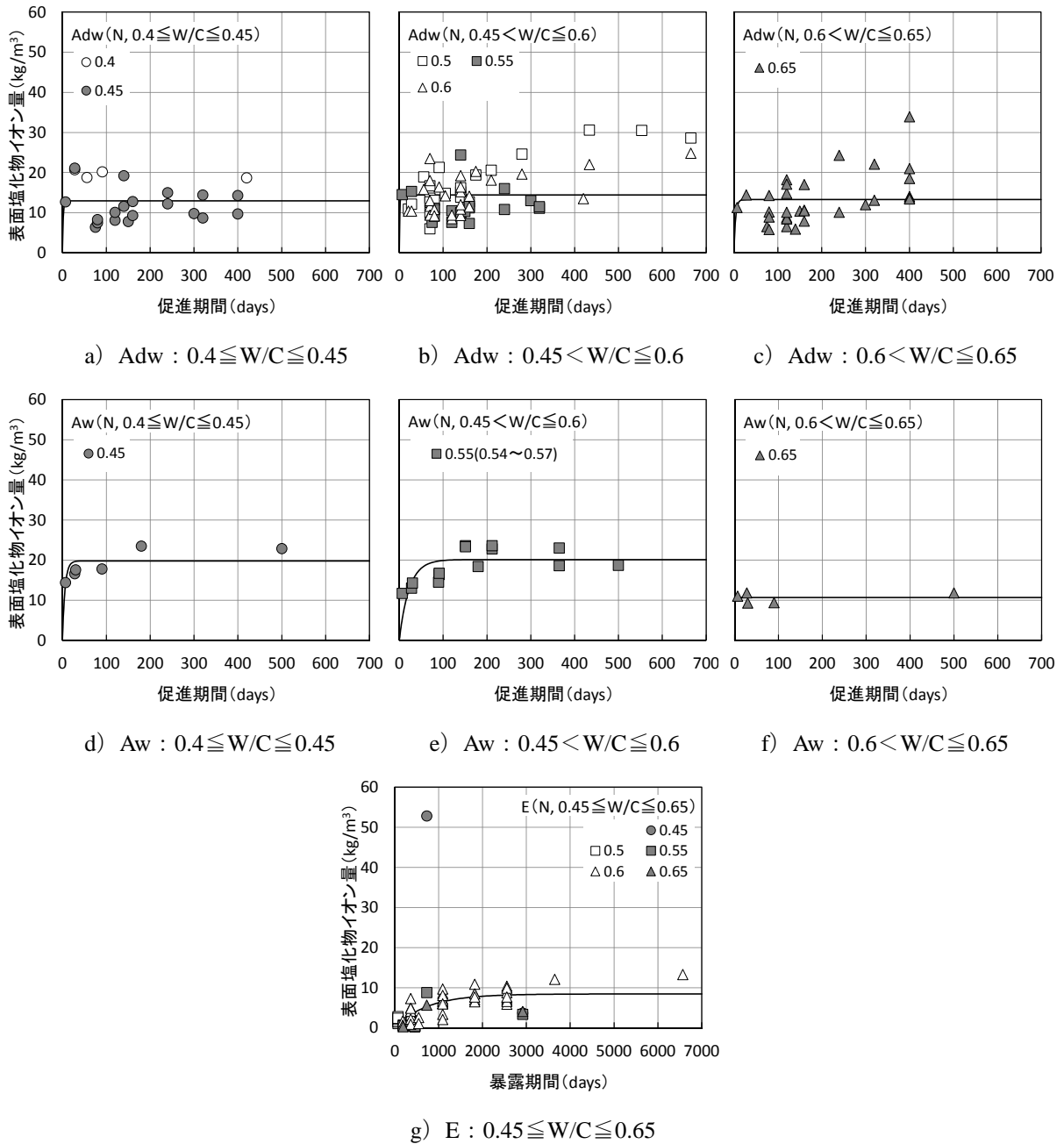


図 6-5 促進または暴露期間と表面塩化物イオン量(普通ポルトランドセメント)

表 6-4 式(6-3)による回帰曲線の係数

試験方法	W/C	試験体条件数	C _{0c} (kg/m ³)	k _c
Adw	0.4 ≤ ≤0.45	23	12.9	0.569
	0.45 < ≤0.6	71	14.4	1.000
	0.6 < ≤0.65	32	13.3	0.257
Aw	0.4 ≤ ≤0.45	6	19.8	0.173
	0.45 < ≤0.6	14	20.1	0.044
	0.6 < ≤0.65	5	10.7	3.509
E	0.45 ≤ ≤0.65	73	8.5	0.001

表 6-5 関連学会で示される表面塩化物イオン量(kg/m³)

日本建築学会 JASS 5-2013						
重塩害環境		塩害環境			準塩害環境	
11.0		6.6			3.6	
土木学会 コンクリート標準示方書 設計編-2012						
地域の区分	飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
		汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

6.4.4 拡散係数および表面塩化物イオン量の経時変化のまとめ

本章における検討では、試験期間の経過に伴う拡散係数および表面塩化物イオン量の変化には、いずれの試験方法であっても水セメント比による違いは明瞭には見られなかった。

さらに、促進試験における W/C0.6 以下について、乾湿繰返しの Adw ではいずれの拡散係数や表面塩化物イオン量の実験値が、塩水浸漬の Aw では一定の値となる D_c や C_{0c} がそれぞれ同程度であり、これらの値に比べて屋外暴露の E では小さくなった。

また、Aw および E における拡散係数と表面塩化物イオン量では、いずれもモデル式に沿う経時変化を示した。経時変化により特性値が一定の値となる期間は、W/C0.6 以下の Aw では拡散係数で約 200 日、E では拡散係数で約 4 年、表面塩化物イオン量で約 4.5 年であり、屋外暴露試験では同様な期間でそれぞれの特性値が一定の値となる経時変化を示した。しかし、Adw では、拡散係数および表面塩化物イオン量は促進試験の開始からすぐに特性値が一定の値となるため、促進期間の経過に伴う変化は確認できなかった。

実際の構造物を想定すると、コンクリート表面に付着した塩化物イオンが雨などの水とともにコンクリート中に浸透する。そのため、乾湿繰返しによる促進試験はこのような現象を模擬する試験方法として多く用いられていた。しかし、乾湿繰返しでは浸漬水の移流による影響が大きく、非常に多く

の塩化物イオンが試験開始から早期にコンクリート中に浸透・拡散するものと推察される。一方、塩水浸漬では浸漬水の移流による影響は乾湿繰返しほど急激ではなく、コンクリート中に浸透する塩化物イオン量が多いものの、屋外暴露試験と類似した塩化物イオンの拡散性状を示したものと考えられる。

6.5 各種試験方法における拡散係数

拡散係数について、JASS 5²⁷⁾では式(6-4)(以下、JASS 5式と略記)を、また、土木学会のコンクリート標準示方書²⁹⁾では式(6-5)(以下、土木学会式と略記)を水セメント比との関係からそれぞれ示している。

- ・ JASS 5 式 (普通ポルトランドセメントを使用する場合)

$$D = 0.65 \times 10^{(-3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5)} \quad \text{式 (6-4)}$$

- ・ 土木学会式 (普通ポルトランドセメントを使用する場合)

$$\log D = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad \text{式 (6-5)}$$

ここに、D : 見かけの拡散係数 (cm²/年)

W/C : 水セメント (結合材) 比

これらの式は第2章で整理したとおり、JASS 5式では指数を二次関数で表しているが、これは2002年制定のコンクリート標準示方書で示された式を基にして、その後の研究成果から提案されたものである²⁷⁾。一方で土木学会では、2007年制定の示方書まではこのように拡散係数の対数を水セメント比の二次関数として表していた。しかし、図6-6中に示すように拡散係数を対数軸とした場合では一次関数でも算定値に大きな差はなく、耐久設計におよぼす影響も小さいことを確認し、また、二次関数とする理論的な根拠がないことから、2012年版では一次関数として表された³⁰⁾。したがって、本研究では検討にあたり土木学会式と同様に式(6-6)のような拡散係数の対数を水セメント比の一次関数として表すこととした。

$$\log_{10} D = a(W/C) + b \quad (0.45 \leq W/C \leq 0.65) \quad \text{式 (6-6)}$$

ここに、D : 見かけの拡散係数 (mm²/day)

W/C : 水セメント (結合材) 比 (%)

a : 実験により定まる係数

b : 実験により定まる係数

図6-6に水セメント比と拡散係数の関係を示す。また、表6-6に回帰曲線の係数および各水セメント比で算出される拡散係数を示す。表6-6に示す回帰曲線は6.4.2項と同様に拡散係数を対数で表した際の誤差二乗和が最小となるように最小二乗法などにより算出した。この対数における誤差二乗和を

「試験体条件数-1」で除した値の平方根とする標準誤差は、それぞれ Adw では 0.38、Aw では 0.44、E では 0.33 となり、同程度の値であった。

本研究の対象範囲である水セメント比 0.40~0.65 において、拡散係数の分布は促進試験では 0.1~10mm²/day、屋外暴露試験では 0.01~1mm²/day となり、両者は 10 倍程度異なる範囲であった。そのため、実験値は図 6-6 中に併記した関連学会の式に対して促進試験では大きく上側に、また、屋外暴露試験では近い位置を示し、回帰曲線は土木学会式と類似した。

また、Adw において回帰曲線の傾きは小さく、水セメント比の違いによる拡散係数の差は小さかった。一方、Aw および E では、いずれも水セメント比の増加に伴い拡散係数は大きくなる回帰曲線を示したが、前述の標準誤差に比べてその差は小さく、図 6-6 にも示されるように実験値のばらつきに対して水セメント比による拡散係数の差は小さかった。

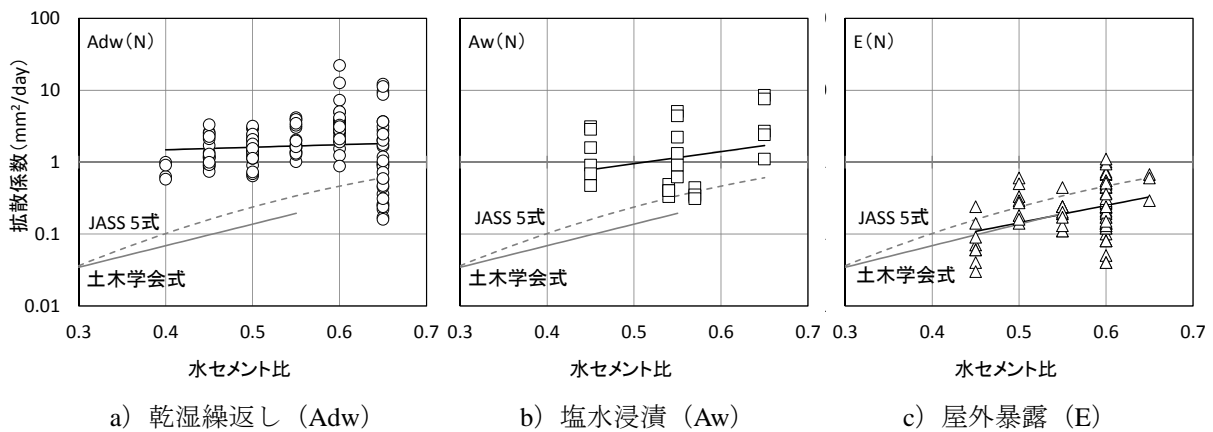


図 6-6 水セメント比と拡散係数(普通ポルトランドセメント)

表 6-6 回帰曲線の係数および算出される拡散係数

試験方法	試験体条件数	a	b	算出される拡散係数 (mm ² /day)		
				W/C0.45	W/C0.55	W/C0.65
Adw	126	0.35	0.03	1.55	1.68	1.82
Aw	25	1.67	-0.86	0.79	1.15	1.69
E	73	2.41	-2.05	0.11	0.19	0.33
JASS 5式		—		0.16	0.34	0.61
土木学会式		—		0.10	0.19	—

6.6 まとめ

本章では塩化物イオンの浸透・拡散性状について、既往の文献による実験結果のまとめから、浸透促進および屋外暴露環境において拡散方程式より算出される拡散係数および表面塩化物イオン量に関する検討を行った。考察より得られた知見を以下に示す。

- 1) 拡散係数は、塩水浸漬による促進試験および屋外暴露試験では試験期間の経過に伴い減少し、一定の値に収束する傾向を示し、後者では約4年で一定の値となった。また、乾湿繰返しによる促進試験においては水セメント比0.65では同様な傾向を示したが、0.6以下ではこのような経時変化は見られず、試験期間によらず同程度の値を示した。
- 2) 表面塩化物イオン量は、屋外暴露試験では暴露期間の経過に伴い増加し、約4.5年で一定の値に収束する傾向を示した。しかし、促進試験においては試験方法によらず、試験開始初期から一定の値を示した。
- 3) 拡散係数および表面塩化物イオン量では、いずれの試験方法でも水セメント比0.4～0.6の範囲においては水セメント比による違いは明瞭には見られず、それぞれ同様な値となった。
- 4) 水セメント比による拡散係数の違いは実験値のばらつきに対して非常に小さく、また、拡散係数の実験値は屋外暴露試験よりも促進試験では10倍程度大きな範囲に分布した。

以上より、拡散方程式により算出される拡散係数および表面塩化物イオン量について、屋外暴露試験および塩水浸漬試験では提案したモデル式に沿う経時変化を示した。しかし、乾湿繰返しによる促進試験では試験開始初期からこれらの特性値はおおよそ一定であり、経時変化を示さないことを明らかにした。すなわち、促進試験においては塩水浸漬の方が屋外暴露のような実環境に類似した塩化物イオンの浸透・拡散性状を模擬できると考えられる。

第6章の参考文献

- 1) 野村信一、和泉意登志、嵩英雄：コンクリート中への塩分浸透量に及ぼす水セメント比およびセメント種類の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）A-1、pp.249～250、1986.8
- 2) 榊田佳寛、友澤史紀、安田正雪、原謙治：コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.10 No.2、pp.493～498、1988
- 3) 平田成秀、枝広英俊、依田彰彦：コンクリートへの塩分浸透に関する 2、3 の実験（その 1～その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）A-1、pp.1061～1064、1992.8
- 4) 掛川勝、榊田佳寛、松本裕二、小俣一夫：表面被覆及び浸透性吸水防止材の塩害防止効果に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.15 No.1、pp.709～714、1993
- 5) 松本典人、佐野清史、宮川豊章、藤井學：高流動コンクリートの塩化物イオン浸透性について、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17 No.1、pp.163～166、1995
- 6) 安達晋悟、枝広英俊、十代田知三、藤井和俊：高強度・軽量コンクリートの透気・透水性と細孔構造から検討した塩分浸透性、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.133～136、1998
- 7) 田中良樹、藤田学、河野広隆、渡辺博志：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性、コンクリート工学年次論文集 Vol.23 No.2、pp.517～522、2001
- 8) SORN VIRA、山田義智、大城武：乾湿繰り返し塩分浸透促進試験によるフライアッシュコンクリートの遮塩性評価、日本建築学会九州支部研究報告 第 41 号、pp.25～28、2002.3
- 9) 山根茂之、SORN Vira、山田義智、大城武：フライアッシュを細骨材の一部代替として用いたコンクリートの塩化物イオン浸透性状と鉄筋の防食性に関する研究（その 1）、日本建築学会九州支部研究報告 第 42 号、pp.1～4、2003.3
- 10) 山田義智、長嶺健吾：コンクリート中の塩化物イオン量の経過時間変化、日本建築学会九州支部研究報告 第 43 号、pp.113～116、2004.3
- 11) 徳村忠太、山田義智：エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透性と鉄筋腐食、日本建築学会九州支部研究報告 第 46 号、pp.201～204、2007.3
- 12) 徳村忠太、山田義智：エコセメントを用いたコンクリートの塩害環境下における塩化物イオン浸透特性に関する実験的研究、日本建築学会九州支部研究報告 第 48 号、pp.145～148、2009.3
- 13) 高橋英孝、湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：コンクリートの水セメント比が塩化物イオンの浸透特に及ぼす影響、第 63 回セメント技術大会講演要旨、pp.122～123、2009
- 14) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇、高橋英孝：エコセメントを用いたコンクリートの遮塩性に関する検討、コンクリート工学年次論文集 Vol.31 No.1、pp.1039～1044、2009
- 15) 高橋英孝、湯浅昇、松井勇、笠井芳夫：セメントの違いがコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）A-1、pp.189～190、2009.8
- 16) 原孝志、石川嘉崇、木下茂、大崎幸雄：フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性に関する研究（その 4）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）A-1、pp.545～546、2009.8
- 17) 高橋英孝、湯浅昇、松井勇、笠井芳夫：温度の違いがコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）A-1、pp.1295～1296、2010.9

-
- 18) 金子樹、阿部道彦：乾湿繰返しによるコンクリートの吸水性状と塩化物イオンの浸透・拡散に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集 第79巻 第702号、pp.1073～1079、2014.8
 - 19) 掛川勝、榊田佳寛、大城武、清水昭之、鹿毛忠継、伊部博：飛来塩分とコンクリートへの塩分浸透に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）A-1、pp.147～148、1994.9
 - 20) 金谷光秀、榊田佳寛、阿部道彦、西山直洋：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18 No.1、pp.747～752、1996
 - 21) 竹田祐二、榊田佳寛、中村成春：海岸地域におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透挙動、コンクリート工学年次論文集 Vol.24 No.1、pp.609～614、2002
 - 22) 森本悠、榊田佳寛、杉山央、李榮蘭：海岸地域におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）A-1、pp.583～584、2011.8
 - 23) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説、pp.48～56、2015.2
 - 24) 土木学会標準：JSCE-G 571-2013 電気泳動法によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）
 - 25) 土木学会標準：JSCE-G 572-2013 浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）
 - 26) 山田義智、大城武、榊田佳寛：塩害環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透性に関する解析的研究、日本建築学会構造系論文集 第501号 pp.13～19、1997.11
 - 27) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009、25節 海水の作用を受けるコンクリート、pp.594～611、2009.2
 - 28) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説、pp.108～118、2004.3
 - 29) 土木学会：2012年制定 コンクリート工事標準示方書〔設計編〕、pp.148～157、2012
 - 30) 土木学会：コンクリートライブラリー138 2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料 基本原則編・設計編・施工編、pp.71～89、2013.3

第7章

塩水浸漬による塩化物イオンの 浸透促進試験における試験条件

第7章

塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験における試験条件

第2章で整理したように、コンクリート中への塩化物イオンの浸透促進試験は、JISで標準化された試験方法はなく、土木学会により電気泳動法（JSCE-G 571）および浸せき法（JSCE-G 572）が示されているのみである。土木学会では、このうちの電気泳動法による実験から得られた実効拡散係数から算出した見掛けの拡散係数より求められた水セメント比と拡散係数の関係式（図2-3）が示されている。これは、山路ら¹⁾による実環境暴露と電気泳動法および浸せき法の実験結果から、拡散係数は実環境と電気泳動法では同程度であるが、浸せき法ではこれらよりも大きくなるとの報告（図2-25）によるものであり、第6章でも同様な結果（図6-6）であった。

しかし、電気泳動法において実行拡散係数から見掛けの拡散係数を算出する際に用いる係数 $k_1 \cdot k_2$ と水セメント比の関係については、そのばらつきが極めて大きいことやデータ数が少ないこと（図2-26）、また、試験方法が煩雑であることが指摘され、課題となっている。

一方、土木学会で示される浸せき法では、コンクリートを浸漬する塩水がNaCl濃度10%と実環境で劣化因子となる海水の約3%に比べて非常に高濃度であることや、試験期間が長期となることが指摘されている²⁾。しかし、塩水浸漬による促進試験は、第6章より近年の建築分野において促進試験方法として最も多く採用されている乾湿繰返しに比べて、実際に塩害を受ける環境に類似したコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状を示すことを明らかにした。そのため、実環境における耐久性の評価にも有効であると考えられるが、上記のような課題については十分な検討がされていない。

また、塩化物イオンの浸透促進試験によりコンクリートの塩化物イオンの浸透抵抗性を評価する際には、これまで行ってきたようにコンクリート表面からの距離と塩化物イオン量の関係から、拡散方程式を用いて特性値である拡散係数や表面塩化物イオン量を求めるのが一般的である。しかし、このような検討を行うにあたりデータを採取するためのコンクリート中の塩化物イオン量の測定間隔や深さ、位置などの測定範囲について明確に示されたものはない。そのため、第6章で検討の対象とした既往の文献においても、塩化物イオン量の測定範囲はそれぞれであるが、このような塩化物イオン量の測定範囲は拡散方程式より求められる特性値に影響をおよぼすことが考えられる。

そこで、本章では塩水浸漬における塩化物イオンの浸透促進試験方法について、浸漬水の塩水濃度、試験期間、測定範囲といった各種試験条件の影響およびデータ採取時の測定範囲について検討を行った。

7.1 浸漬水の塩水濃度

コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状を表す拡散方程式は、式(7-1)に示すように表面塩化物イオン量と拡散係数の2つの特性値を持つ関数である。このうち、表面塩化物イオン量はコンクリートと周辺環境との境界条件であり、拡散係数はコンクリートが有する塩化物イオンの浸透のし易さを示す性質である。したがって、塩水のNaCl濃度は、表面塩化物イオン量には影響するものの、コンクリートの性質を示す拡散係数には影響しないものと考えられる。しかし、前述のように土木学会の浸せき法において指摘されるNaCl濃度について、これらの特性値との関係は十分な検討がされていない。

そこで、塩水浸漬による促進試験における浸漬水のNaCl濃度の影響について、NaCl濃度を実験水準として変化させた実験結果から検討を行った。検討に用いた実験結果は梶田ら³⁾により報告されたものに、同実験より得られて未公表であったデータを一部追加して行うこととした。なお、第6章で検討を行った既往の文献のうち、NaCl濃度を実験の水準とした塩水浸漬試験の報告は梶田らによるもののみであった。検討に用いた実験の要因と水準を表7-1に、実験により得られたコンクリート表面からの距離と塩化物イオン量の関係を図7-1にそれぞれ示す。

$$C(x_i, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_i}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} \quad \text{式 (7-1)}$$

ここに、t : 促進期間 (days)

x_i : コンクリート表面からの距離 (mm)

$C(x_i, t)$: 距離 x_i (mm) における促進期間 t (days) での塩化物イオン量 (kg/m³)

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)

D : 見かけの拡散係数 (mm²/day)

$\operatorname{erf}()$: 誤差関数

表 7-1 梶田ら³⁾による実験の要因と水準

要因	水準
セメント	普通ポルトランドセメント
水セメント比	0.45、0.55、0.65
促進試験方法	20℃における塩水浸漬
塩水の NaCl 濃度	1.5、3、6、12%
試験期間	浸漬 30、90、180、500days
測定位置	2.5、10、22.5、37.5、52.5、67.5mm

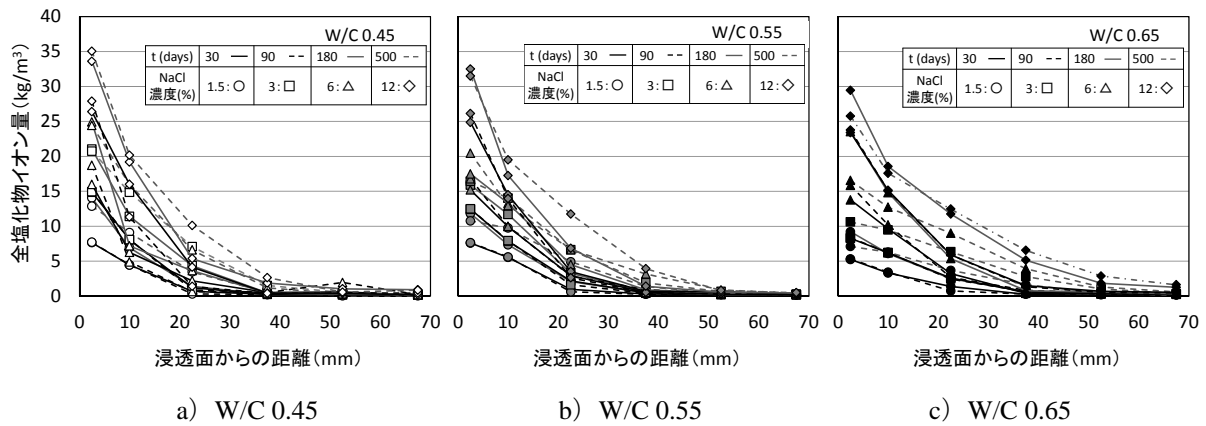


図 7-1 梶田ら³⁾による実験の浸透面からの距離と塩化物イオン量

塩水浸漬試験における浸漬水の NaCl 濃度について、表面塩化物イオン量との関係を図 7-2 に、拡散係数との関係を図 7-3 にそれぞれ示す。なお、表面塩化物イオン量および拡散係数の算出には式(7-1)より最小二乗法などを用いて行った。また、図 7-1 中には、式(7-2)より求めた想定される表面塩化物イオン量を破線で示した。この値は、湿潤状態におけるコンクリートの含水率を 10%として塩水(浸漬水)が満たされていると仮定した場合の塩化物イオン量である。

$$C_0' = \gamma \cdot \frac{\rho}{100} \cdot \frac{Cl^-}{NaCl} \cdot \frac{u}{100} \quad \text{式 (7-2)}$$

ここに、 C_0' : 想定される表面塩化物イオン量間 (kg/m³)

γ : コンクリートの単位容積質量 (kg/m³)

ρ : 浸漬水の NaCl 濃度 (%)

Cl^- : 塩化物イオンの分子量 (=35.5)

NaCl : 塩化ナトリウムの分子量 (=58.5)

u : コンクリートの含水率 (=10%)

コンクリート表面と周辺環境との境界条件を示す表面塩化物イオン量は、浸漬水の NaCl 濃度が高くなるに伴い大きくなった。実験値では、いずれの表面塩化物イオン量も想定される値よりも大きく、水セメント比が小さいほど、促進期間が長いほど大きくなった。特に、水セメント比の小さい W/C0.45 では、促進期間の経過による表面塩化物イオン量の増加量が大きかった。これは、丸屋ら⁴⁾の報告のようなコンクリート表面における浸透した塩化物イオンの濃縮が生じているものと考えられる。すなわち、低水セメント比ほど、コンクリート表面の近傍に蓄積される塩化物イオン量が多くなるものと考えられる。

一方、コンクリート中における塩化物イオンの浸透し易さを示す拡散係数は、浸漬水の NaCl 濃度による違いは見られず、いずれの条件でも同程度であった。

式 (7-1) に示した拡散方程式では、同一の材齢および拡散係数であっても表面塩化物イオン量が異なると、コンクリート中の塩化物イオン量も異なる。すなわち、図 7-1 に示したような浸漬水の NaCl 濃度の違いによるコンクリート中の塩化物イオン量の大小は、表面塩化物イオン量の違いによるものである。

したがって、第 6 章において検討対象とした実験の多くで試験条件として用いられた NaCl 濃度 3% では、これ以上の NaCl 濃度であっても試験により求められる拡散係数には影響しない。また、NaCl 濃度 3% は塩害の劣化因子となる海水に近い濃度であることから、促進試験の条件として妥当な濃度であると考えられる。

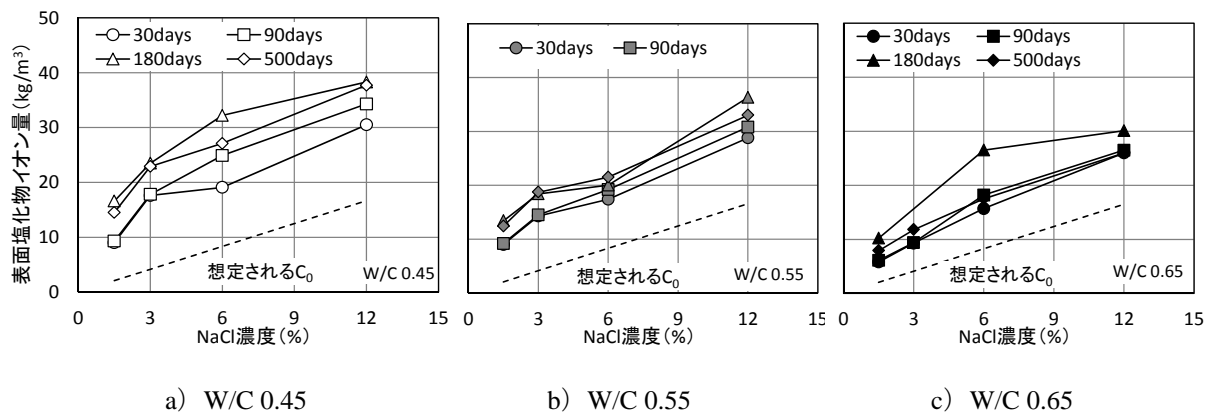


図 7-2 浸漬水の NaCl 濃度と表面塩化物イオン量

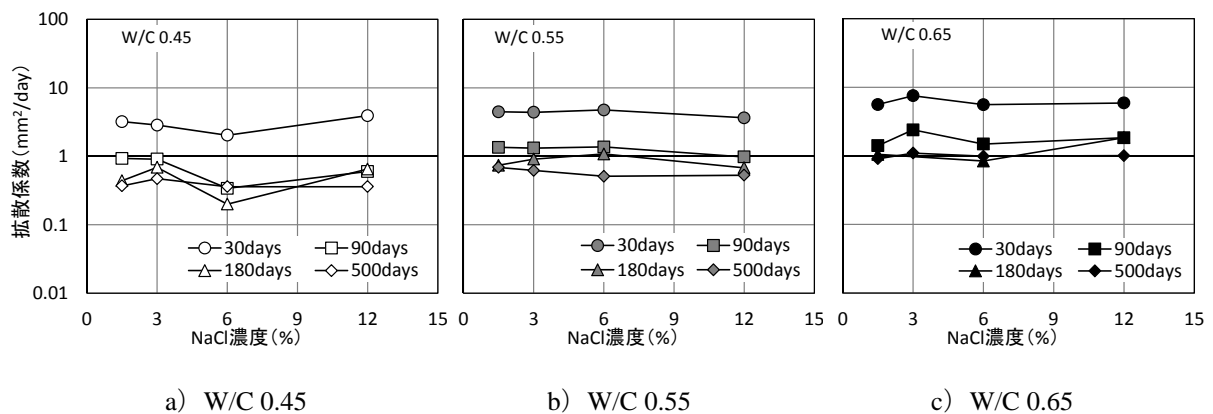


図 7-3 浸漬水の NaCl 濃度と拡散係数

7.2 試験期間

第2章で整理したとおり、土木学会の浸せき法⁵⁾では表7-2のように、浸せき期間は最低でも3ヶ月とし、コンクリートの種類や水セメント比に応じた浸せき期間と塩化物イオンの浸透深さの目安が示されている。しかし、これに準じて耐久性の設計・評価に必要な拡散係数を適切に定めるためには、低水セメント比のコンクリートなどでは、12ヶ月と試験期間が長期にわたることが指摘されている²⁾が、この試験期間についての検討方法は明確にはされていない。

表 7-2 塩化物イオンの浸透深さの目安 (mm)⁵⁾

セメントの種類	W/C(%)	浸せき期間 (ヵ月)			
		3	6	9	12
普通ポルトランド セメント	40	10~15	20~25	30~35	40~45
	45	20~25	30~35	40~45	50~55
	50	30~35	40~45	50~55	60以上
	60	40~45	55~60	60以上	
高炉セメント	40	10~15	15~20	20~25	25~30
	45	15~20	20~25	25~30	30~35
	50	20~25	25~30	30~35	35~40
	60	25~30	30~35	40~45	50~55

そこで、ここでは第6章で求めた回帰曲線を用いて特性値の経時変化を考慮し、塩水浸漬における促進試験によりコンクリートの耐久性の評価におよぼす試験期間について検討を行うこととした。

なお、検討には第6章で求めた塩水浸漬試験 (Aw) における $0.45 < W/C \leq 0.6$ の回帰曲線である式 (7-3) および式 (7-4) を用いて算出した拡散係数、表面塩化物イオン量を用いて式 (7-1) に示す拡散方程式を用いてコンクリート中の塩化物イオン量を算出した。

$$\log_{10}D = \log_{10}D_c + (\log_{10}D_0 - \log_{10}D_c) \times e^{-k_d t'} \quad \text{式 (7-3)}$$

ここに、D : 見かけの拡散係数 (mm²/day)

D_c : 経時により収束する拡散係数の定値 (mm²/day) (=0.39)

D₀ : 初期の拡散係数 (mm²/day) (=9.32)

k_d : 実験により定まる係数 (=0.019)

t' : 促進期間 (days)

$$C_0 = C_{0c} \times (1 - e^{-k_c t'}) \quad \text{式 (7-4)}$$

ここに、 C_0 : 表面塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_{0c} : 経時により収束する表面塩化物イオン量の定値 (kg/m^3) (=20.1)

k_c : 実験により定まる係数 (=0.044)

t' : 促進期間 (days)

表 7-3 に促進期間 28、91、182 および 365 日として式 (7-3) および式 (7-4) から得られた拡散係数および表面塩化物イオン量を示す。また、これらの値を用いて式 (7-1) より $t=365$ 日とした場合の浸透面からの距離と塩化物イオン量との関係を図 7-4 に示す。これより、促進期間 365 日と比較して 28 日および 91 日では拡散係数や表面塩化物イオン量が乖離するため、逆解析で求められる塩化物イオン量の分布は異なる値を示した。これは、表面塩化物イオン量が約 50 日で、拡散係数が約 200 日で概ね一定の値となっているためである。一方、促進期間 182 日では求められる塩化物イオン量は 365 日よりも僅かに大きい値であり、これは耐久性について設計や評価を行う際には安全側となる。

以上より、塩水浸漬による促進試験を行う場合には、浸漬期間は 182 日を目安とすることができると考えられる。これは、コンクリートにおけるその他の耐久性を評価する促進中性化や乾燥収縮試験がそれぞれ JIS や JASS 5 で 182 日の試験期間を設定していることから、耐久性試験に要する期間としては妥当であると考えられる。

表 7-3 式 (7-3) および式 (7-4) より算出される特性値

促進期間 (t')	表面塩化物イオン量 (kg/m^3)	拡散係数 (mm^2/days)
28 日	14.3	2.57
91 日	19.8	0.70
182 日	20.1	0.44
365 日	20.1	0.40

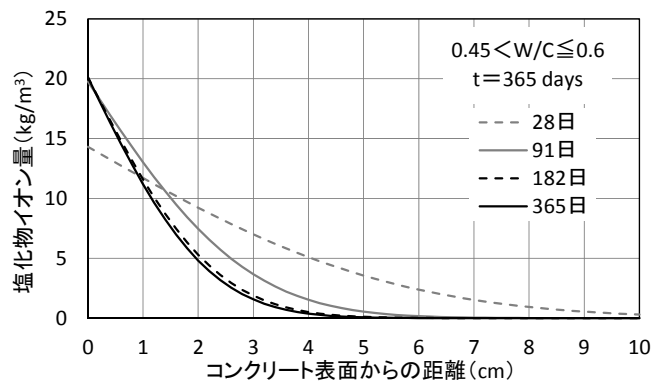


図 7-4 式 (7-1) より算出される浸透面からの距離と塩化物イオン量

7.3 塩化物イオン量の測定範囲

第3章からこれまで、拡散方程式を用いてコンクリート中における塩化物イオンの浸透・拡散性状を検討してきた。このように拡散方程式は、一般的に特性値である拡散係数および表面塩化物イオン量を算出し、コンクリートの耐久性の評価を行うために用いられる。このような特性値は、コンクリートの表面からの距離と塩化物イオン量の関係から求められるが、算出には深さ方向に最低2点以上の塩化物イオン量の測定値が必要となる。したがって、深さ方向に塩化物イオン量の測定数が多いほど、また、測定範囲が深いほど信頼度の高い特性値が求められ、耐久性の評価について信頼性も向上する。

土木学会では、JSCE-G 573「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法(案)」⁶⁾を設けている。ここでは、実構造物の耐久性の調査にあたり、採取したコンクリートコアにおける全塩化物イオン量の分布から、拡散係数および表面塩化物イオン量を算出するための回帰分析に用いる試料採取深さを示しているが、工学的に検討した報告は示されていない⁷⁾。また、実構造物における耐久性の調査にかかわらず、浸透促進試験における塩化物イオンの測定範囲についても、同様に検討された報告はない。

そこで、本節では拡散方程式より求められる拡散係数および表面塩化物イオン量について、コンクリート中の塩化物イオン量の測定範囲に関する検討を行った。

7.3.1 表層部における塩化物イオン量の取扱い

土木学会におけるJSCE-G 573⁶⁾では、実構造物において全塩化物イオン量の分布から、拡散係数および表面塩化物イオン量を算出するための回帰分析に用いる測定値として、以下の条件および図7-5が示されている。

- 1) コア1本あたり原則として5か所以上、少なくとも3か所以上で試料採取を行う。
- 2) 試料の採取方法、切断の位置あるいは間隔を適宜変更する。
- 3) 中性化した領域およびそこから1cm以内の深部の測定値は用いない方がよい。
- 4) 全く中性化が進行していない場合にも、表面から1cm以内の測定値は用いない方がよい。
- 5) 隣接する前後の深さ位置での測定値と著しく異なる測定値は除外する方がよい。

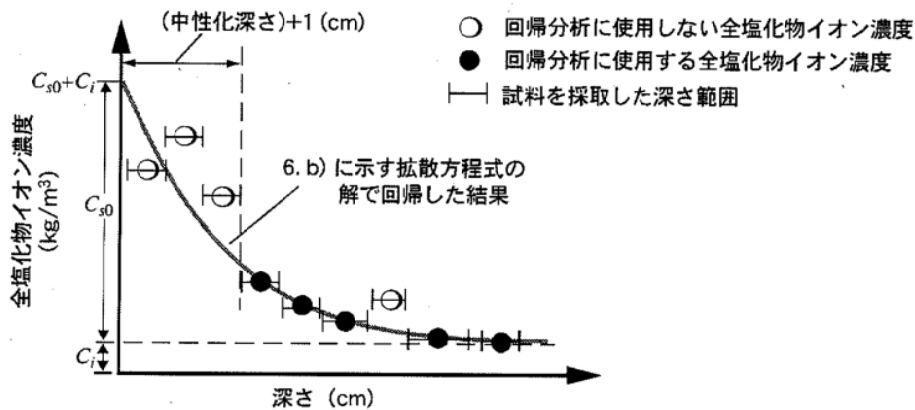


図 7-5 JSCE-G 573 における塩化物イオン量の測定値の取扱い⁶⁾

JCSE-G 573 では、実構造物を対象としているため、コンクリートの中性化した部分については塩化物イオンの移動や濃縮が生じること、また、中性化が生じていない場合にも表層部では施工時の影響でモルタル量の多いコンクリートになりやすいことや、外界の気象作用の影響を受けることから、表層部の塩化物イオン量の測定値を用いない方がよいとしている。

しかし、塩化物イオンの浸透促進試験においては、コンクリートの中性化や気象の影響はほとんどないものと考えられる。そこで、表層部（浸透面より 10mm 以内）の塩化物イオン量の測定値の有無が拡散方程式により算出される拡散係数および表面塩化物イオン量におよぼす影響について検討を行った。

塩化物イオンの測定値について表層部込みと表層部抜きで算出される拡散係数を図 7-6 に、また、表面塩化物イオン量を図 7-7 にそれぞれ示す。本検討は、第 6 章で検討の対象とした既往の文献による実験結果（Adw：乾湿繰返しによる促進試験、Aw 塩水浸漬による促進試験、E：屋外暴露試験）を用いて行い、特性値は式 (7-1) の拡散方程式を用いて誤差二乗和が最小となるように算出した。なお、これらの既往の文献では屋外暴露試験であっても中性化深さに関する記述がないため、検討においてはコンクリートの中性化による影響は考慮されないものとする。

拡散係数は、促進試験および屋外暴露試験のいずれも表層部込みに対して表層部の塩化物イオン量の測定値を用いない表層部抜きでは近い値を示すが、一部のデータでは 10 倍以上大きな値も見られた。また、屋外暴露試験では表層部込みよりも表層部抜きの拡散係数が小さくなるものも多く見られ、表層部の塩化物イオン量の測定値の有無が、促進試験よりも算出される拡散係数におよぼす影響は大きかった。

一方、表面塩化物イオン量では、表層部の測定値の有無により算出される値が乖離するものが多数見られた。外部よりコンクリート中に塩化物イオンが浸透・拡散する場合には、塩化物イオン量の分

布は浸透面に近いほど大きくなり、6.3節に示したとおり促進試験では特に大きい。そのため、表層部の塩化物イオン量の測定値が表面塩化物イオン量を算出する際に大きな影響をおよぼすものと考えられる。

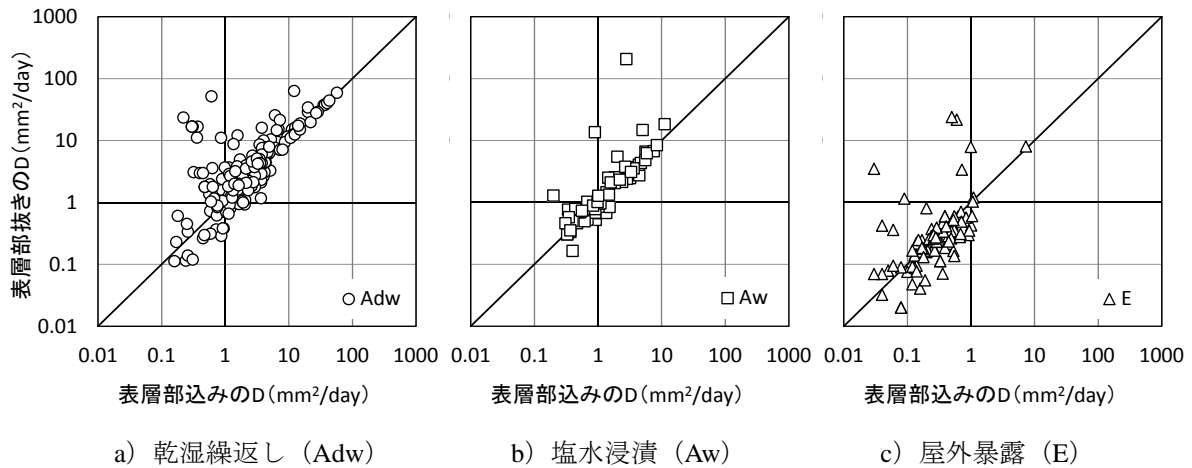


図 7-6 拡散係数の算出におよぼす表層部の塩化物イオン量の測定値の影響

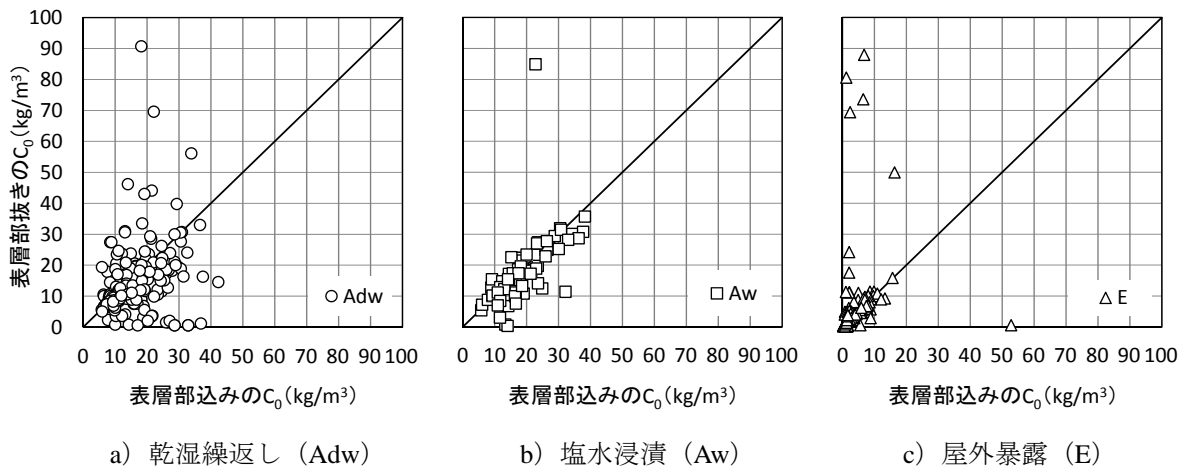


図 7-7 表面塩化物イオン量の算出におよぼす表層部の塩化物イオン量の測定値の影響

また、図 7-6 および図 7-7 に示した表層部込みおよび表層部抜きでの拡散係数、表面塩化物イオン量の組合せから、式 (7-1) より求めた逆解析値と実験値の標準誤差を図 7-8 に示す。ここで、標準誤差とは全実験値と逆解析値の誤差二乗和（表層部抜きの場合においても表層部の実験値とその深さにおける逆解析値の関係を含む）を実験値の数-1 で除したものの平方根を示す。

促進試験においては、乾湿繰返しおよび塩水浸漬のいずれも表層部込みの場合に比べて表層部抜きでは逆解析値と実験値との標準誤差が大きくなった。これは、6.3節に示したように、促進試験ではコ

ンクリート中の塩化物イオン量が表層部において極めて大きく、浸透面からの距離が長くなるに伴い小さくなる分布を示すため、表層部抜きの場合の逆解析値と表層部の塩化物イオン量が乖離したことによるものである。

一方、6.3節で示したように表層部においても膨大な塩化物イオン量が存在しない屋外暴露試験では、一部を除いて表層部の測定値の有無による標準誤差の影響は小さかった。すなわち、屋外暴露試験では表層部の測定値の影響は小さいものの、実際には表層部のコンクリートでは上記のように中性化や気象作用のような影響を受けるおそれも想定されるため、注意が必要であると考えられる。

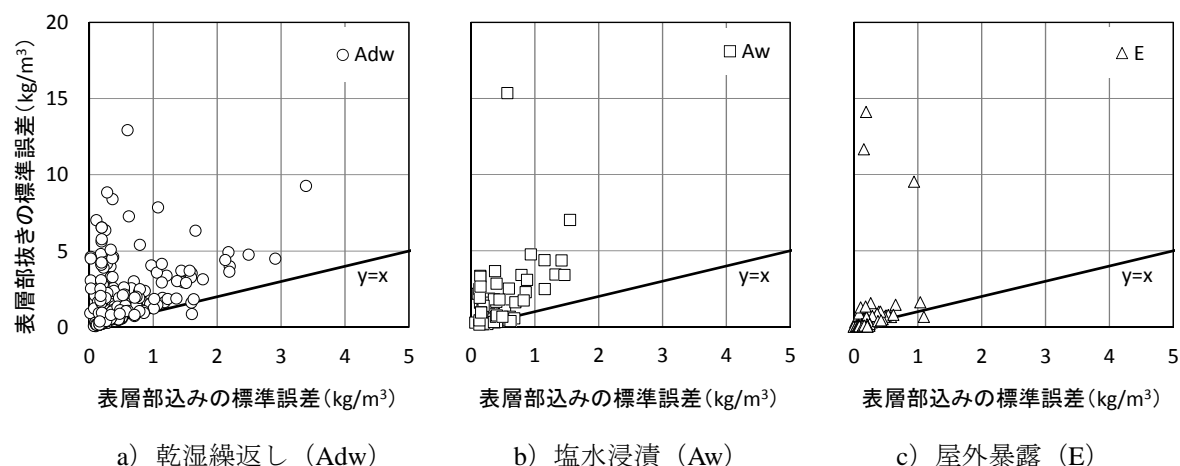


図 7-8 実験値と逆解析値との標準誤差におよぼす表層部の塩化物イオン量の測定値の影響

7.3.2 測定深さ

式 (7-1) に示した拡散方程式によりコンクリート中における塩化物イオン量の浸透・拡散性状を評価する場合、前述のとおり拡散係数および表面塩化物イオン量は、深さ方向に 2 点以上の塩化物イオン量の測定値があれば算出できる。また、求められるこれらの特性値については、図 7-9 に示すように塩化物イオン量の測定値が多いほど、また、測定範囲が深いほど、コンクリート中の塩化物イオン量の分布を正確に評価することができると考えられる。そこで、本項ではコンクリート中の塩化物イオン量の測定深さと拡散方程式により算出される特性値の関係について検討を行った。

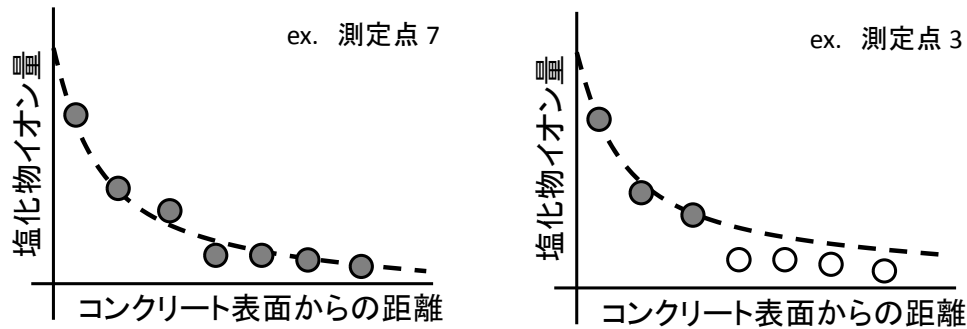


図 7-9 測定範囲と拡散方程式における評価の概念図

測定深さの検討にあたり、測定深さのほかに測定間隔の影響が考えられる。土木学会の JSCE-G 573⁶⁾では、試料の採取方法、切断の位置あるいは間隔を適宜変更するとしており、明確に示されていない。第 6 章で調査対象とした既往の文献では、測定深さや測定間隔はそれぞれ異なったものを採用していたが、その中でも 10mm 間隔が大半であった。測定間隔は、小さい場合には塩化物イオン量の測定に用いる試料の量が少なく調整も難しく、大きい場合には評価に対する信頼性の低下し、また、試料の量が多いため調整にかかる労力が増大する。そのため、これまで行ってきた経験も踏まえると、10mm 間隔程度が適切であると考えられる。

そこで、本項では検討において第 4 章で行った促進試験の結果を用いることとした。第 4 章の実験は、乾湿繰返しにおける促進試験であるが、6.3 節に示したとおり乾湿繰返しでも塩水浸漬と同様なコンクリート中の塩化物イオン量の分布を示すこと、第 6 章で検討対象とした既往の文献では塩水浸漬試験において 10mm 間隔でこのような深さまで連続した塩化物イオン量を測定している実験がないことから検討対象として適するものと判断した。第 4 章の実験では、表 7-4 の実験概要および図 7-10 の実験結果に示すように、10mm 間隔で 70mm までの塩化物イオン量を測定しており、促進試験の条件が 4 種類であることからコンクリート中の塩化物イオン量の分布も多様である。

表 7-4 第 4 章の実験の要因と水準

要因	水準
セメント	普通ポルトランドセメント
水セメント比	0.5、0.6
促進試験条件	1 サイクルを 7 日とする乾湿繰返し (表 4-2 参照)
乾燥条件	気中 50°C
湿潤条件	温度 50°C、NaCl 3%水溶液への浸漬
測定期間	10、20 サイクル
測定位置	5、15、25、35、45、55、65mm

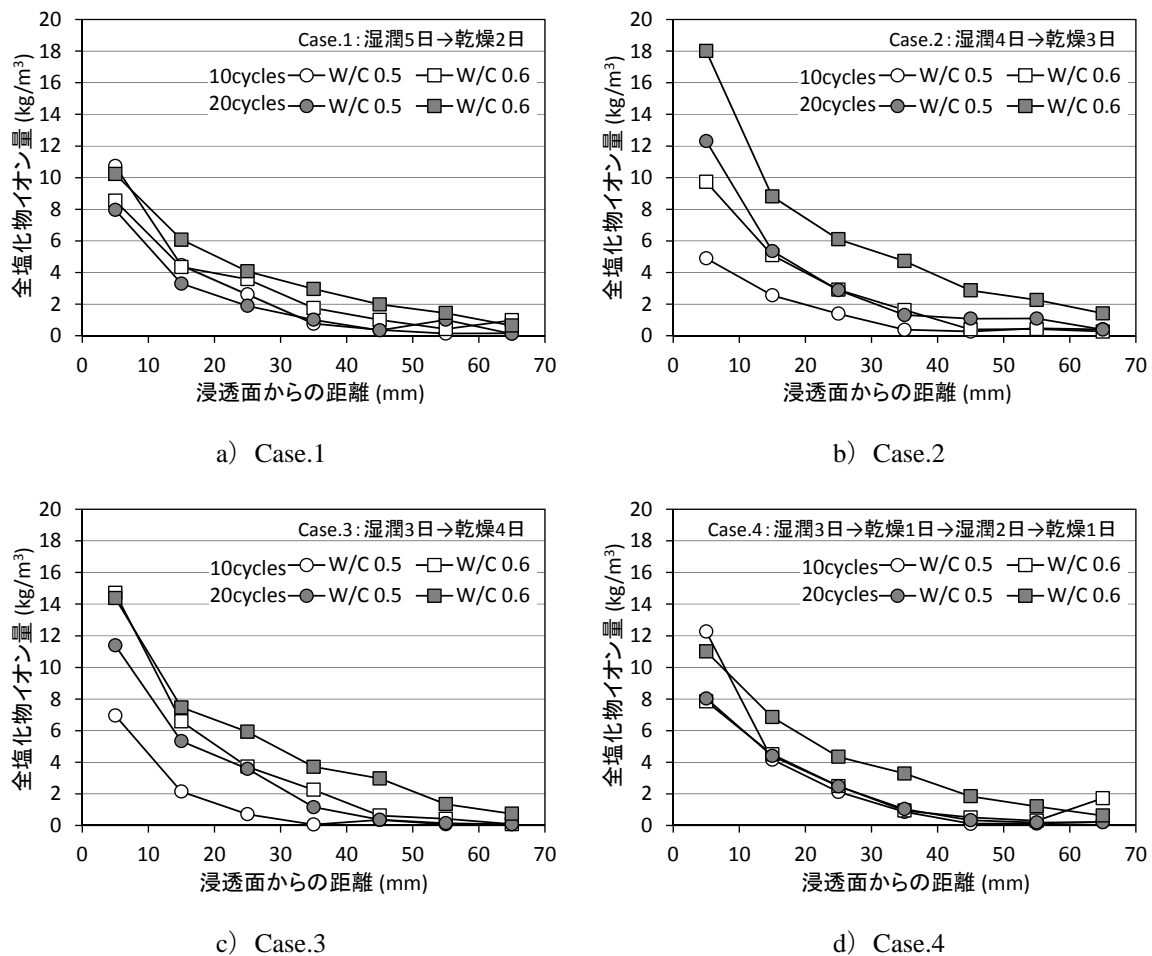


図 7-10 第 4 章における浸透面からの距離と全塩化物イオン量

検討にあたり、測定位置 5mm はコンクリートの浸透面から 0~10mm より採取した試料を、同様に 15~65mm についてもそれぞれ試料を採取した位置の中間を示している。また、以降において測定深さは特性値の算出に用いる塩化物イオン量の測定値のうち最も深い位置を示すものとし、図 7-11 に示すように 5-65 は 5~65mm までの測定値を用いていることを示すものである。

さらに、5-65 は本実験におけるすべての測定値を用いたものであることから、コンクリート中の塩化物イオンの分布を最も正確に示すものと考え、これを真値とした。なお、以降の検討においては、これまでと同様に式 (7-1) に示した拡散方程式を用いて行うが、その単位は式 (4-1) のように、 $t : \text{days} \rightarrow \text{cycles}$ 、 $D : \text{mm}^2/\text{day} \rightarrow \text{cm}^2/\text{cycle}$ とそれぞれ読み替えるものとする。

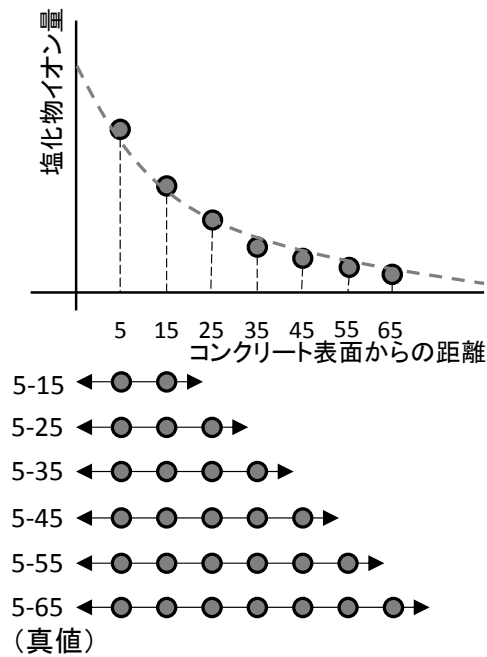


図 7-11 測定範囲の検討における記号および真値の考え方

(1) 測定深さと拡散方程式の特性値

拡散方程式において算出される表面塩化物イオン量および拡散係数について、図 7-12 に 5-65 で算出される値と各測定深さで算出される値との関係を示す。表面塩化物イオン量は、5-55、5-45 および 5-35 では 5-65 と同程度の値を示したが、5-25 および 5-15 では 5-65 よりも大きな値を示し、その差は表面塩化物イオン量の増加に伴い大きくなった。一方、拡散係数でも 5-55 および 5-45 では 5-65 と同程度の値であったが、5-35、5-25 および 5-15 では 5-65 よりも小さくなった。

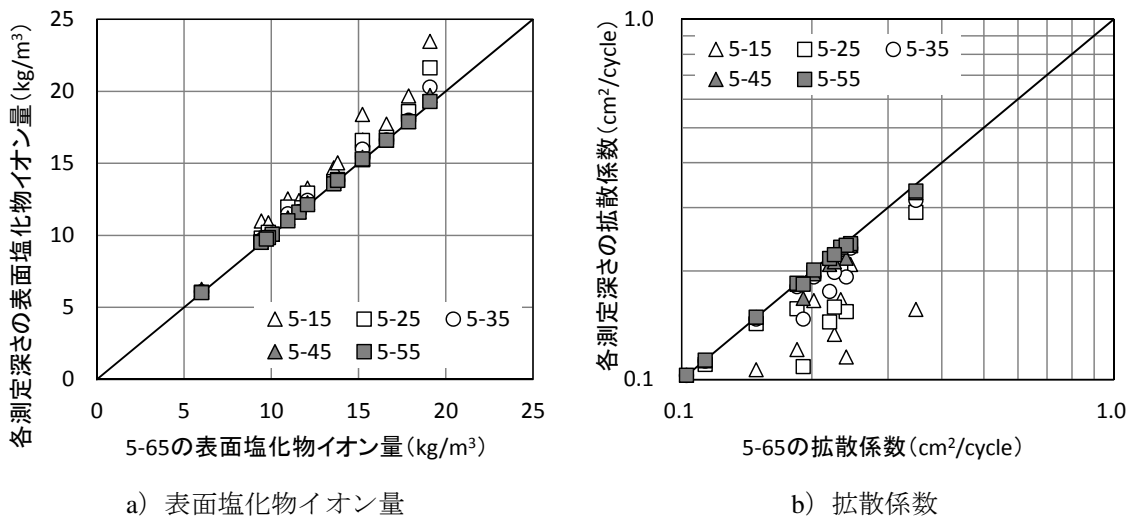


図 7-12 5-65 と各測定深さにおける特性値

実験条件のうち、コンクリート中の塩化物イオン量が最も少ない水セメント比 0.5 の促進期間 10 サイクルと、最も多い水セメント比 0.6 の促進期間 20 サイクルについて、それぞれ各測定深さにおける 5-65 に対する拡散係数比および表面塩化物イオン量比を図 7-13 に示す。

コンクリート中の塩化物イオン量の少ない W/C0.5 の 10 サイクルでは、表面塩化物イオン量および拡散係数はいずれも 5-55~5-25 まで 5-65 と同様な値を示す。しかし、塩化物イオンの多い W/C0.6 の 20 サイクルでは 5-45 であっても 5-65 と乖離し、真値と同程度の特徴値を得るための測定深さは、コンクリート中の塩化物イオン量が多いほど、大きくなると考えられる。

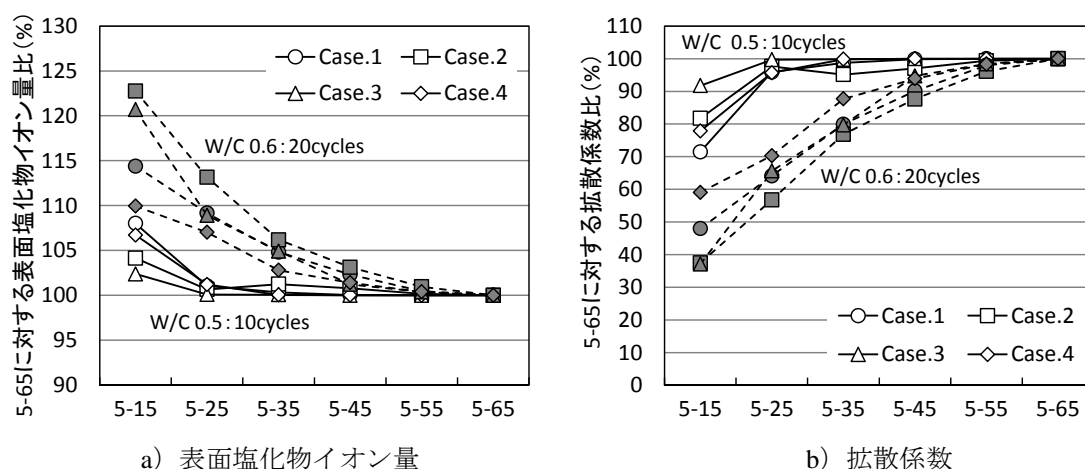


図 7-13 各測定深さにおける 5-65 に対する特性値の比率

また、特性値から拡散方程式により算出される塩化物イオン量の逆解析値について、例として Case.2 における W/C0.5 の 10 サイクルおよび W/C 0.6 の 20 サイクルで式 (7-1) より算出した逆解析曲線を図 7-14 に、逆解析曲線と実測値との差を図 7-15 にそれぞれ示す。

コンクリート中の塩化物イオン量の少ない W/C0.5 の 10 サイクルでは、いずれの測定深さでも逆解析値は実測値と近い値を示すのに対して、塩化物イオン量の多い W/C0.6 の 20 サイクルでは測定深さが小さい場合には逆解析値と実測値は乖離し、その差は測定深さが小さいほど大きくなった。

このように、測定深さが大きくなるに伴い、拡散方程式から算出される表面塩化物イオン量および拡散係数はいずれも真値に近い値を示し、逆解析値も実測値に近い値となる。すなわち、測定深さが小さい場合には、コンクリートにおける塩化物イオンの浸透・拡散性状を十分に評価できておらず、また、測定深さが大きすぎる場合には必要以上のデータを測定しているものと考えられる。したがって、適切な測定深さはコンクリート中の塩化物イオン量によって異なり、塩化物イオン量が多いほど測定深さも大きくなると考えられる。

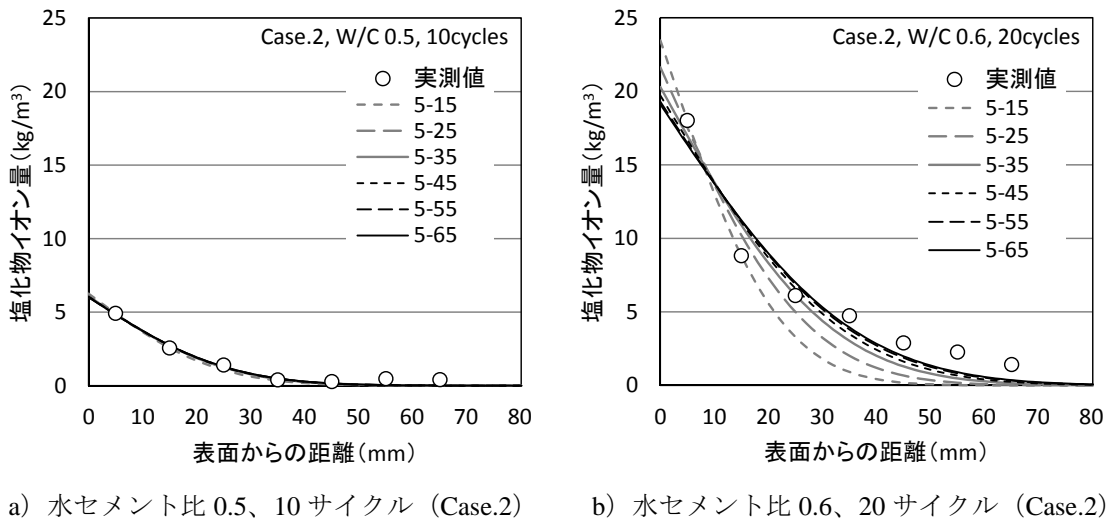


図 7-14 各測定深さにおける逆解析曲線

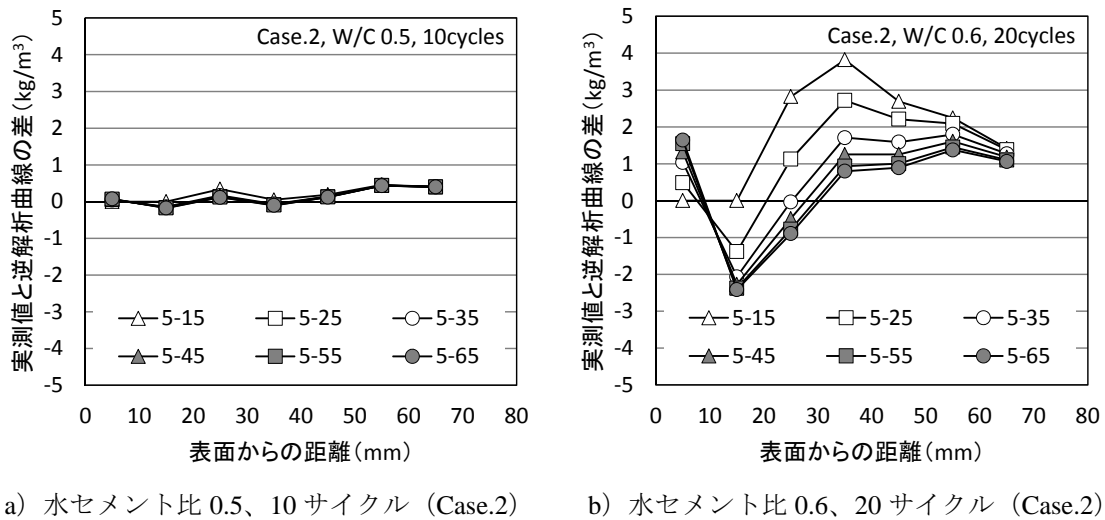


図 7-15 各測定深さにおける実測値と逆解析値の差

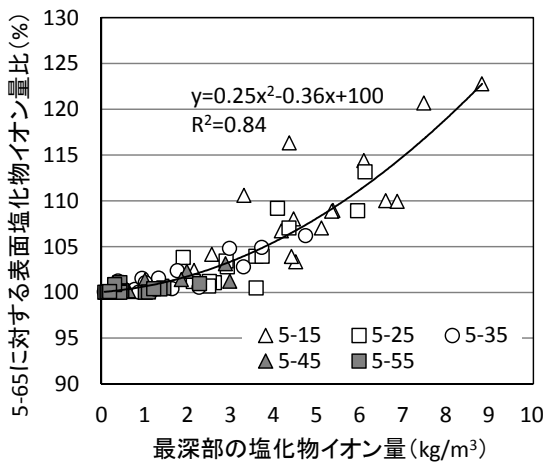
(2) 測定深さと最深部の塩化物イオン量

(1) で検討したとおり、測定深さと拡散方程式により求められる表面塩化物イオン量や拡散係数の関係には、コンクリート中の塩化物イオン量の影響が推察された。しかし、実際に促進試験や屋外暴露試験、実建物調査などにおいて、信頼のできる評価結果を得るための測定深さは、拡散方程式を用いる前の段階で決定しなければならない。そこで、測定深さにおける最深部の塩化物イオン量と拡散方程式により求められる特性値の関係について検討を行った。

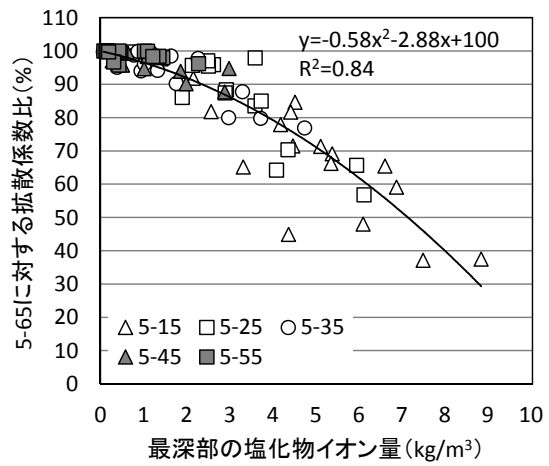
図 7-16 に各測定深さにおける最深部の塩化物イオン量と 5-65 に対する拡散係数比および表面塩化物イオン量比の関係を示す。表面塩化物イオン量および拡散係数では、いずれも最深部の塩化物イオン量が大きいほど 5-65 と乖離し、それぞれに相関性が見られた。

また、図 7-17 に図 7-16 の x 軸を $0\sim 3.5\text{kg/m}^3$ とした拡大図を示す。コンクリート中の鉄筋が腐食する塩化物イオン量は、一般医に $1.2\sim 2.4\text{kg/m}^3$ とされるために 1.2kg/m^3 が採用されることが多く、また、水セメント比により表 7-5 に示すような腐食発生限界塩化物イオン量が提案され、JASS 5³⁾ でも紹介されている。図 7-17 から、測定深さの最深部がこれらの塩化物イオン量の範囲であれば、ほぼ 5-65 と同様な表面塩化物イオン量および拡散係数を得ることができる。すなわち、実建物の調査においては、塩害による鉄筋の腐食が見られない場合、調査範囲は鉄筋位置までをひとつの目安とできると考えられる。

また、促進試験においては、第 4 章の各試験条件でこれらの腐食発生限界塩化物イオン量となるコンクリート表面からの距離は図 7-18 に示すように最も小さい 1.2kg/m^3 であっても最大で 50mm 程度である。すなわち、測定範囲としては 40~50mm 程度を対象とすれば、おおよそ真値に近い拡散係数および表面塩化物イオン量を得ることができると考えられる。

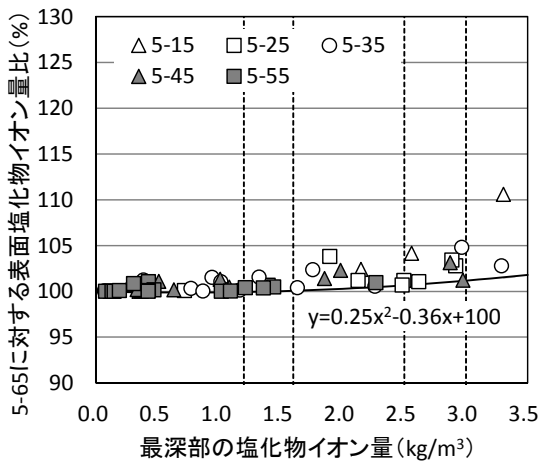


a) 表面塩化物イオン量

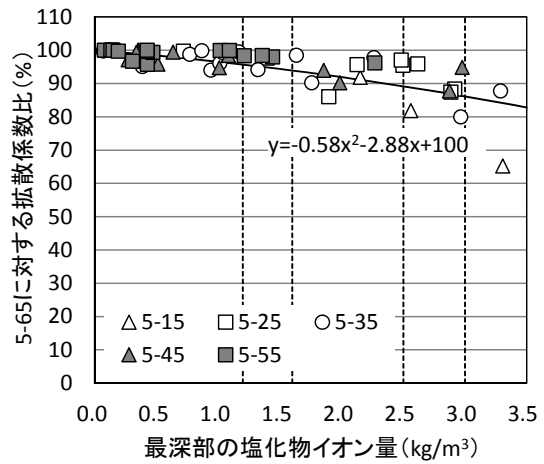


b) 拡散係数

図 7-16 最深部の塩化物イオン量と 5-65 に対する特性値の比率 (x 軸: 0~10kg/m³)



a) 表面塩化物イオン量



b) 拡散係数

図 7-17 最深部の塩化物イオン量と 5-65 に対する特性値の比率 (x 軸: 0~3.5kg/m³)

表 7-5 水セメント比と鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン量の関係(kg/m³)⁸⁾

W/C 0.65	W/C 0.55	W/C 0.45
1.6	2.5	3.0

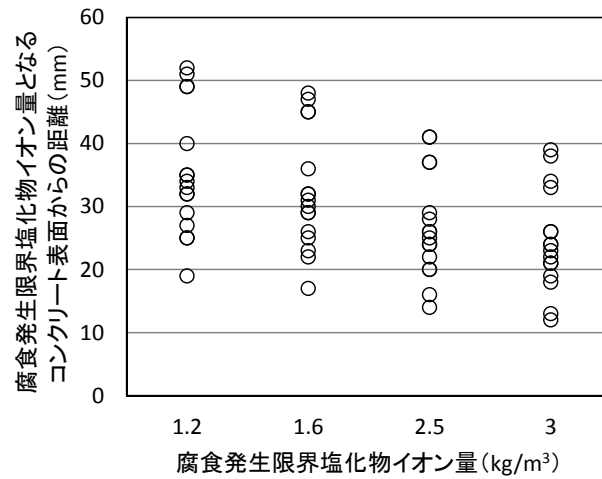


図 7-18 腐食発生限界塩化物イオン量となるコンクリート表面からの距離

7.4. まとめ

本章では塩化物イオンの浸透・拡散性状について、塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験方法における、各種試験条件の影響および10mm間隔として塩化物イオン量を測定し評価を行う場合のデータ採取時の測定範囲について検討を行った。考察より得られた知見を以下に示す。

- 1) 塩水浸漬における促進試験では、浸漬水とする塩水のNaCl濃度は拡散係数には影響しないが、NaCl濃度が高くなると表面塩化物イオン量が大きくなるため、コンクリート中に浸透する塩化物イオン量は多くなる。
- 2) 塩水浸漬における促進試験では、試験期間182日では、365日と同程度の表面塩化物イオン量および拡散係数を得ることができる。
- 3) 拡散方程式から拡散係数を求めるにあたり、コンクリートの表層部(10mm以内)の測定値を除外した場合、得られる値は表層部の測定値を除外しない場合に比べ10倍以上大きな値を示すことがある。また、表面塩化物イオン量は、表層部の測定値を除外した場合は除外しない場合に比べて得られる値が乖離することがある。
- 4) 測定深さが小さい場合には、得られる拡散係数は小さく、表面塩化物イオン量は大きくなる。また、真値と同程度の特性値を得るための測定深さはコンクリート中の塩化物イオン量が多いほど大きくなり、最深部の塩化物イオン量と得られる表面塩化物イオン量および拡散係数には相関性が見られる。
- 5) 塩化物イオン量の測定範囲は、促進試験においては浸透面から40~50mm程度、実建物調査においては塩害による鉄筋の腐食が見られない場合には鉄筋位置までを目安とすることができる。

以上より、塩水浸漬における促進試験におけるコンクリート中の塩化物イオンの浸透・拡散性状は、試験方法はNaCl濃度3%の塩水に182日間の浸漬とし、コンクリート中の塩化物イオン量は表層部を含めて10mm間隔で40~50mmまで(4、5点)測定を行うことで評価できることを明らかにした。

第7章の参考文献

- 1) 山路徹、審良善和、大里陸男、森晴夫：異なる試験方法により求めた銅スラグ細骨材コンクリートの塩化物イオン拡散係数の比較、土木学会コンクリート技術シリーズ 85、2009
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー138 2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料 基本原則編・設計編・施工編、pp.71～89、2013.3
- 3) 榊田佳寛、友澤史紀、安田正雪、原謙治：コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.10 No.2、pp.493～498、1988
- 4) 丸屋剛、Somnuk TANGTERMSIRIKUL、松岡康則：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化、土木学会論文集 No.585 V-38、pp.79～95、1998.2
- 5) 土木学会規準：JSCE-G 572-2013「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」
- 6) 土木学会規準：JSCE-G 572-2003「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）」
- 7) 土木学会規準関連小委員会：土木学会規準「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）（JSCE-G 572-2003）」の制定、土木学会論文集 No.767 V-64、pp.17～25、2004.8
- 8) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、2015年版、pp.614～631、2015.7

第 8 章

結 論

第8章

結論

近年、環境や資源・エネルギー問題への深刻化についての社会的な意識が高まる中、建築分野においてもこれまでのスクラップアンドビルドなフロー型の社会から、「いいものを作って、きちんと手入れして、長く大切に使う」といったストック型の社会への移行が重要視されている。建築物の維持保全については、適切な耐久性の評価に基づく維持保全計画により、その安全性や使用性を確保することが必要であり、建築材料として最も用いられている鉄筋コンクリート構造物についても同様である。

鉄筋コンクリート構造物の経年劣化のひとつであり、コンクリート中の塩化物イオンによって鋼材が腐食し、コンクリートにひび割れ、剥離、剥落などの損傷を生じさせる塩害は、現在も構造物の供用中に外部よりコンクリート中に浸透する塩化物イオンによる外来型の塩害が海岸地域などでは懸念されており、中性化などその他の劣化要因よりも、その劣化は著しく激しいとされている。外来型の塩害は、コンクリートの表面に付着した塩化物イオンがコンクリート中に浸透・拡散し、鉄筋位置まで到達することで鉄筋の腐食が生じる。そのため、日本建築学会では、このような地域に用いられるコンクリートについて、その品質や設計、施工、評価の手法を示し、外来型の塩害が懸念される場合にはコンクリートに必要とされる塩化物イオンの浸透抵抗性について実環境を想定して定めることが望ましいとしているが、技術的な資料の整備が十分でない。

そこで本研究では、実験および既往の研究によるデータのとりまとめから、塩化物イオンの浸透促進試験における諸条件の影響および試験方法やその評価方法について外来型の塩害を想定したコンクリート中における塩化物イオンの浸透・拡散性状を明らかにすることを目的とし検討を行った。本論文で行った一連の研究は、今後の鉄筋コンクリート構造物における外来型の塩害に対する耐久性の評価および維持保全計画の立案において、より実状に即した提案に繋がるものと考えられる。

本研究における結果は以下のようにまとめられる。

第1章は「序論」であり、研究の背景として近年では懸念される塩害はコンクリートの外部から塩化物イオンが浸透・拡散する外来型であること、また、このような塩害に対して評価を行うための技術資料が不足していることを述べ、本研究の目的および構成と概要を示し、関連する用語を定義した。

第 2 章「塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する既往の研究」では、関連する学会である日本建築学会の JASS 5 および土木学会のコンクリート標準示方書について、塩害を受けるコンクリートに対するこれまでの仕様書・示方書の改定の経緯、現行版での取扱いを整理し、また、既往の研究から塩化物イオンの浸透・拡散性状についてとりまとめを行った。

これより、関連学会ではいずれも Fick の第 2 法則の解析解である拡散方程式を用いて塩化物イオンの浸透・拡散性状に関する耐久性の評価を行い、評価においては拡散方程式の特性値である表面塩化物イオン量、拡散係数を年数の経過にかかわらず一定としていることを示した。

また、耐久性の評価について、その精度向上のためには拡散方程式の特性値の経時変化や浸透促進試験と実環境との関係が明確でないこと、その要因として各種試験方法や条件が試験結果に影響をおよぼすものの統一されて用いられる浸透促進試験がないことが課題であることを明らかにした。さらに、課題として明らかになった塩化物イオンの浸透促進試験方法について、土木学会規準および国外における規定や既往の研究で用いられた試験方法に関するとりまとめを行い、これらの試験方法における課題の抽出を行った。

第 3 章「コンクリート中に浸透した塩化物イオンの拡散性状」では、コンクリート中に存在する塩化物イオンのコンクリート内での拡散性状に関して検討を行うため、あらかじめ浸透促進試験でコンクリート中に外部から塩化物イオンを浸透させた水セメント比 0.55 の普通コンクリートを用いて、乾湿シリーズ、乾燥シリーズ、湿潤シリーズおよび中性化シリーズの計 4 シリーズ、10 パターンの環境条件について実験を行った。実験では、環境温度（50℃、20℃）や浸漬水の NaCl 濃度（3%の塩水、水道水）、乾燥中の浸透面の処理（開放、封かん）、コンクリートの中性化の影響を実験水準とした。また、いずれの環境条件も 7 日を 1 サイクルとして乾湿シリーズの乾燥・湿潤状態を切り替えるタイミングで試験体の質量変化を測定し、5、10 および 20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

その結果、コンクリート中における塩化物イオンの拡散性状は、コンクリートに出入りする水がおよぼす影響が大きいことを明らかにした。また、コンクリート中への水の浸透がない場合では、コンクリートの乾燥による水分の蒸発では塩化物イオンはコンクリートの内部に残留し、塩化物イオンの濃度差により拡散するが、その程度は水の移動による移流よりも小さいことを明らかにした。

第 4 章「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・拡散性状」では、第 3 章で明らかにしたように、水の移動が塩化物イオンの浸透・拡散に大きく影響することから、いずれも 1 サイクルを 7 日としてサイクル中の乾燥・湿潤日数を変化させた 4 パターンの乾湿繰返し条件に

について、コンクリートにおける吸水性状と塩化物イオン量の関係について実験を行った。実験は、水セメント比 0.5 および 0.6 の普通コンクリートを用いて、サイクルパターン以外の促進条件は環境温度 50℃、浸漬水の NaCl 濃度 3% で共通とし、乾燥・湿潤状態の切替え時における試験体の質量変化および促進 10、20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

実験結果から、コンクリートに浸透する水の量とコンクリート中に蓄積する塩化物イオン量には相関関係があり、浸漬水の NaCl 濃度を 3% とした場合にはコンクリート中に浸透した水が含む塩化物イオンの約 65% がコンクリート中に蓄積されることを明らかにした。また、拡散方程式における特性値は経時により変化する傾向を示し、このような経時変化を考慮することで、より実状に近い耐久性の評価を行うことが可能であることを明らかにした。

第 5 章「仕上塗材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果」では、一般に鉄筋コンクリート造建築物では外装仕上げにより建物の美観および耐久性能の確保を図ることから、仕上塗材を対象とした塩化物イオンの浸透抑制効果について実験を行った。仕上塗材は紫外線などの影響による経年劣化を生じることから、建物の供用中には改修が行われその性能が維持される。本章ではこのような改修を想定した仕上塗材を対象とするため、水セメント比 0.55 の普通コンクリートに対して、4 種類の仕上材とこれらの仕上材を中性化抑制効果が小さいとされるリシンに重ね塗りした計 7 条件について、環境温度 50℃、浸漬水に NaCl 濃度 3% とした乾燥 3 日、湿潤 4 日の乾湿繰返しによる浸透促進試験を行い、乾燥・湿潤状態の切替え時における試験体の質量変化および促進 10、20 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定を行った。

その結果、仕上材を施したコンクリートであっても塩化物イオンの浸透・拡散性状は仕上材なしの場合と同様に拡散方程式による評価ができ、仕上材の種類による塩化物イオンの浸透抑制効果は仕上材の遮水性によることを明らかにした。しかし、仕上材の施工にあたり、リシン下地がある場合にはコンクリート中に浸透する塩化物イオン量は仕上材単体よりも大きくなることに注意が必要であることを明らかにした。

第 6 章「促進および屋外暴露環境における塩化物イオンの浸透・拡散性状」では、日本建築学会およびコンクリート工学会を中心にコンクリートの品質や塩化物イオン量の測定方法などの条件から選定された、促進試験 18 報および屋外暴露試験 7 報の既往の研究結果から、促進および暴露試験において拡散方程式から算出される特性値である拡散係数および表面塩化物イオン量に関する検討を行った。

その結果、促進試験の方法は乾湿繰返しまたは塩水浸漬に二分され、乾湿繰返しでは試験期間にかかわらず、いずれの特性値も一定であることを示した。その他の試験方法では、拡散係数は塩水浸漬

による促進試験および屋外暴露試験において、また、表面塩化物イオン量は屋外暴露試験において試験期間の経過に伴い変化し、やがて一定の値に収束することを明らかにし、一定の値となる期間は屋外暴露では拡散係数では約 4 年、表面塩化物イオンでは約 4.5 年であった。また、これらの特性値はコンクリートの水セメント比 0.4~0.6 の範囲では水セメント比による違いは明瞭ではなく各試験方法において同様な値を示すこと、同一水セメント比における拡散係数は促進試験においては屋外暴露試験の約 10 倍程度大きい範囲に分布することを明らかにした。

第 7 章「塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験における試験条件」では、第 6 章で示したように促進試験では乾湿繰返しよりも塩水浸漬の方が屋外暴露試験をより模擬した試験結果を得ることができるとの検討結果に基づき、第 2 章で整理した塩水浸漬による促進試験における課題である、浸漬水の塩水濃度、試験期間および評価のための測定範囲について、これまで検討に用いてきた実験および既往の文献のデータから検討を行った。

その結果、浸漬水の塩水濃度が高いほど表面塩化物イオン量は大きくなるが、拡散係数には影響しないこと、促進試験期間を 182 日とした場合は 365 日よりもわずかに安全側の試験結果を得ることを明らかにした。また、塩化物イオン量の測定範囲は、コンクリートの表層部を含め、浸透面から 40~50mm 程度とすることで精度よく評価できることを明らかにした。

コンクリート中における塩化物イオンの移動には、水の移流によるものと濃度勾配によるものがあるとされる。このうち、前者による影響が特に大きく、コンクリート中において水が存在する範囲では塩化物イオンの浸透・拡散性状は水の移動の影響を大きく受ける。そのため、表面仕上材などによりコンクリート中への水の浸入を抑制することは、耐久性の向上に有効に作用する。

また、自然環境においては、拡散方程式により求められる特性値である表面塩化物イオン量および拡散係数は経時により変化し、やがて一定の値に収束する傾向を示し、このような特性値には水セメント比による差は小さい。建築分野ではこれまで、外来型の塩害を想定し、自然環境と同様な状態を模擬した乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透促進試験が主に用いられてきた。しかし、乾湿繰返し試験では試験開始の極初期に多量の塩化物イオンがコンクリート中に浸透・拡散するため、自然環境のような特性値の経時変化を確認することはできない。一方で、塩水浸漬による塩化物イオンの浸透促進試験では、自然環境と同様に特性値の経時変化を示すことから、自然環境と同様な塩化物イオンの浸透・拡散性状を模擬できる促進試験方法であると考えられる。

しかしながら、塩水浸漬試験により、コンクリート中の塩化物イオンの浸透・拡散性状を検討した研究報告は現状では十分とは言い難い。そのため、本研究で示した塩水浸漬による試験方法における

実験や、屋外暴露試験や実建物を対象とした実環境の調査結果と併せてデータの蓄積を行い、実環境と促進試験の関係から、耐久性の評価方法および塩化物イオンの浸透・拡散の予測方法における精度の向上が今後の課題である。

本研究に関する対外発表論文リスト

【学・協会誌論文】

- ・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・拡散に関する考察、日本建築学会構造系論文集 第79巻 第702号、pp.1073～1079、2014.8（第4章）
- ・金子樹、阿部道彦、梶田佳寛：促進および屋外暴露環境におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散に関する考察、日本建築学会構造系論文集 第81巻 第722号、pp.643～653、2016.4（第6章、第7章）

【研究報告】

- ・Tatsuki Kaneko, Michihiko Abe : Effects of Dry and Wet Conditions for Penetration and Diffusion of Chloride Ion in Concrete, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, R2-2, 2015.6（第3章）
- ・金子樹、阿部道彦：コンクリート中の塩化物イオン評価に関する測定範囲の影響、第12回日本・韓国材料施工 JOINT SYMPOJIUM 論文集、pp.315～318、2015.7（第7章）
- ・金子樹：コンクリートへの塩化物イオンの浸透促進試験における乾湿繰返し条件に関する実験的研究、長谷工技報 No.29、pp.11～17、2013.2（第4章）
- ・金子樹：コンクリート内の塩化物イオンの浸透・拡散におよぼす乾燥・湿潤条件の影響に関する実験的研究、長谷工技報 No.30、pp.17～22、2014.3（第3章）
- ・金子樹：コンクリートへの塩化物イオンの浸透促進試験における乾湿繰返し条件に関する実験的研究 続報 塩化物イオンの浸透・拡散性状について、長谷工技報 No.31、pp.9～14、2015.3（第4章）
- ・金子樹：改修用仕上材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果、長谷工技報 No.32、pp.19～25、2016.3（第5章）

【口頭発表】

- ・金子樹、阿部道彦：コンクリートへの塩化物イオン浸透促進試験における乾湿繰返し条件の影響に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.483～484、2012.9（第4章）
- ・金子樹、彦根俊海、阿部道彦：コンクリート内への塩化物の浸透・拡散に関する乾燥・湿潤条件の影響（その2）塩化物イオン量、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.419～420、2013.8（第3章）

- ・彦根俊海、金子樹、阿部道彦：コンクリート内への塩化物の浸透・拡散に関する乾燥・湿潤条件の影響（その1）実験概要および質量変化、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.419～420、2013.8（第3章）
- ・金子樹、彦根俊海、阿部道彦：各種仕上げ塗材によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.395～396、2014.9（第5章）
- ・金子樹、阿部道彦：硬化コンクリートにおける塩化物イオン量の測定深さおよび点数と拡散方程式による解析値、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.741～742、2015.9（第7章）
- ・秋泰信、金子樹、阿部道彦：モルタル内への塩化物イオンの浸透性状に関する実験的研究、日本建築学会関東支部研究報告集 84（I）、pp.161～164、2014.3
- ・彦根俊海、小熊悠暉、金子樹、阿部道彦：コンクリート内への塩化物イオンの浸透・拡散に関する実験的研究、日本建築学会関東支部研究報告集 83（I）、pp.265～268、2013.3（第3章）
- ・須藤智大、金子樹、阿部道彦：硬化コンクリート中への塩化物イオンの浸透促進方法に関する実験的研究、日本建築学会関東支部研究報告集 82（I）、pp.17～20、2012.3（第4章）

謝 辞

本論文は、筆者が2011年から2016年に長谷工コーポレーションと工学院大学との共同研究で実施した実験データを基に、2014年より工学院大学大学院工学研究科建築学専攻博士後期課程において行った一連の研究の成果をとりまとめたものであります。

本論文をまとめるにあたり、終始あたたかいご指導とご教授を賜りました工学院大学建築学部建築学科教授 阿部道彦博士に心より感謝申し上げます。阿部先生のご指導により、コンクリート工学における幅広い知識の必要性と膨大なデータを多角的に検討する姿勢ならびに論文における細部の表現方法を学ぶことができました。

本論文の審査に貴重なお時間を割いてご精読いただいた工学院大学建築学部建築学科教授 遠藤和義博士、小野里憲一博士、宇都宮大学名誉教授 梶田佳寛博士、東京理科大学工学部建築学科教授 今本啓一博士に深く感謝いたします。特に梶田先生には実験計画の段階から、多大なるご指導、ご助言をいただき、本研究を学位論文としてまとめるきっかけを与えていただきました。

本論文をまとめるにあたり、工学院大学建築学部建築学科准教授 田村雅紀博士、琉球大学工学部環境建設工学科教授 山田義智博士をはじめとした諸先生方からの適切なお助言および論文から、多くの示唆を得ることができました。

筆者がコンクリート工学を学ぶにあたり、工学院大学において卒業論文および修士論文のご指導をいただいた恩師である工学院大学教授 嵩英雄博士には、大学院修士課程の修了後も学位を志すよう叱咤激励のもと常に気にかけていただきました。嵩先生のご指導の下で研究に没頭した日々にお教えいただいた研究への取り組み方やコンクリート工学に対する興味は、現在の研究活動の根底となっております。先生のご指導、ご鞭撻に心より御礼申し上げます。

工学院大学嵩研究室の先輩方である、米子高専教授 玉井孝幸博士、株式会社フローリック 因幡芳樹博士、西祐宜博士、守屋健一氏には日頃より貴重なご意見、ご助言をいただき、研究を行う上での範とさせていただいております。そして、阿部研究室の須藤智大氏、彦根俊海氏、小熊悠暉氏、秋泰信氏をはじめとする卒業生各位には本論文に用いたデータの収集に多大なるご協力を、また、卒業生である東急建設株式会社 古川雄太氏には同年代でコンクリートの研究に従事する者として、ご助言と励ましをいただきました。

本論文の執筆の機会をいただきました株式会社長谷工コーポレーション 大栗育夫会長、辻範明社長、技術研究所 常松豪常務兼所長、横川英夫前所長、大倉真人副所長、吉岡昌洋博士およびグループ採用センター 田嶋知子部長、人材開発部 野尻精治部長には、工学院大学大学院への入学と研究

への取組みをご奨励いただき、2年間での学位取得とすることができました。

また、建設およびコンクリート業界や学協会において、いくつかの研究会、委員会に参加させていただき、多くの方々と接する機会をいただきました。皆様とのつながりから、幅広い経験や知識、情報をご提供いただき、研究に関する考え方や見聞を広げることができました。

その他、大勢の方々からのご助言、励ましやデータの提供を賜りましたこと、心より感謝を申し上げます。

筆者が学生時代より互いに切磋琢磨し、多くの勉強や研究をともにした山下光博博士、恩賀彩子氏、地引直人氏、井手杏里氏、中山優氏には、建築学およびコンクリート工学の基礎を学ぶ上で多くの刺激と経験を共有させていただきました。

最後に、本論文を執筆するにあたり、長きにわたりあたたかなご支援をいただきました父 隆美、母 美智子、姉 麻美および研究生活に理解を示し、支えてくれた友子に、改めてここに感謝の意を表します。

2016年3月 金子 樹