

飛来塩分を受けるコンクリート表面における塩分侵入メカニズム

コンクリート研究室 青木 慶彦
主指導教員 下村 匠

要旨：飛来塩分環境下に曝されたコンクリート構造物への塩化物イオン浸透予測を行うための基礎的研究として、塩水粒子が一定量循環する構造の風洞型飛来塩分環境再現装置内に薄板モルタル供試体を短期間暴露した。あわせて、同時に暴露した薄板モルタル供試体に、高圧洗浄機を用いた洗浄試験を行った。その結果、飛来塩分が連続で供給される場合、モルタル表面の塩分量は一定期間で平衡状態に達するが、その後も内部への塩分の浸透は継続することが実験的に明らかとなった。また、高圧洗浄装置による洗浄を施したコンクリートは内部への塩分浸透量が低減することが明らかとなった。

1. はじめに

コンクリート工学の分野における塩害とは、腐食促進物質である塩化物イオンの飛来およびコンクリート中への侵入により、埋設された鉄筋が腐食し構造部材の力学性能が著しく低下する現象を指す。塩害によるコンクリート構造物の劣化進行予測を行うためには、劣化外力である環境作用の影響の定量化が不可欠である。塩害を生じさせる主要な環境作用は構造物への飛来塩分であるので、コンクリートへ飛来塩分の量や状況と、コンクリート中への塩分の侵入の関係を明らかにする必要がある。しかし、実構造物では、局所的な地形の影響や、気象作用の時間的変動、降雨による洗い流しや日射の有無など予見し難い様々な因子の影響を受けることから、塩害の環境条件を特定し、侵入した塩分との間に精度の良い関係を見出すことが困難である。

コンクリート構造物表面に到達した飛来塩分がコンクリート内部に侵入するメカニズムを理解し、これを合理的に表現するモデルを構築するためには、系統的で再現性の高い実験データが必要であり、それには条件の精密に制御された実験室レベルでの塩害暴露試験が有効であると著者らは考えるに至った。そこで風洞型飛来塩分環境再現装置(以下、風洞と呼称)を着想し、プロトタイプでの検討を経て、大型版を製作した。現在この風洞を用いて種々の実験を行っている。

本研究では、上記風洞を使用して、薄板モルタル供試体を飛来塩分に曝し、表面に付着した塩分が浸透する過程の再現実験を行った。そして、この過程を数値解析により表現することを試みた。また、本試験装置を利用し、飛来塩分が付着したコンクリート表面を高圧水で洗浄することによる塩分除去効果もあわせて検討した。実環境では雨水により表面に付着した塩分を洗い流す効果があると考えられる。この洗い流し作用を積極的に利用し、高圧洗浄機による洗浄を定期的に施すことにより、コンクリート中への塩分侵入を長期的に抑制することが確認されれば、構造物の塩害に対する維持管理対策の

一つとして有効に活用できる可能性がある。

2. 実験概要

2.1 風洞型実験装置

実験装置の概要を図-1に示す。これは、著者らの既往の研究における簡易風洞装置の基本原則を踏襲し、風洞容積が大きく多量の試験体を相当数暴露試験可能であること、実験条件の詳細な制御および長期的に安定した稼動が可能であることを開発目標とし、作製したものである。

風路の断面は一階、二階共に縦横 100cm×100cm である。直径 89cm のプロップ型送風機により風を発生させ風洞内を循環させる。造風部より 120cm の位置にある、塩水粒子発生装置から塩水粒子を発生させる。塩水粒子発生装置では、濃度 3%の塩水を満たした水槽に毎分 6 リットルの空気を吸気し、エアレーションさせて塩水粒子を発生させる。風洞は 2 階建て構造になっており、1 階、および 2 階に供試体が設置できる場所を設けた。供試体への飛来塩分量は、供試体設置位置(塩水粒子発生装置からの距離、床面からの高さ)によって異なるが、供試体を設置した状況でその位置への飛来塩分量を予め測定しておく。

風洞本体は、型枠用化粧合板と一部プラスチックで構成されている。飛来塩分が漏れ出さない程度に気密が保たれている。また、風洞内の断面欠損を最小限にとどめるためと、風洞内を循環する塩分による腐食防止のため、造風部の動力機関は風洞外に設置し、ベルトを介してプロペラを回転させる構造とした。

供試体の暴露位置は、一階部、二階一部、二階二部の三箇所である。一箇所の暴露位置につき断面 10cm×10cm のコンクリート供試体を 9 個暴露でき、最大で 27 個の供試体を同時に暴露することが可能である。

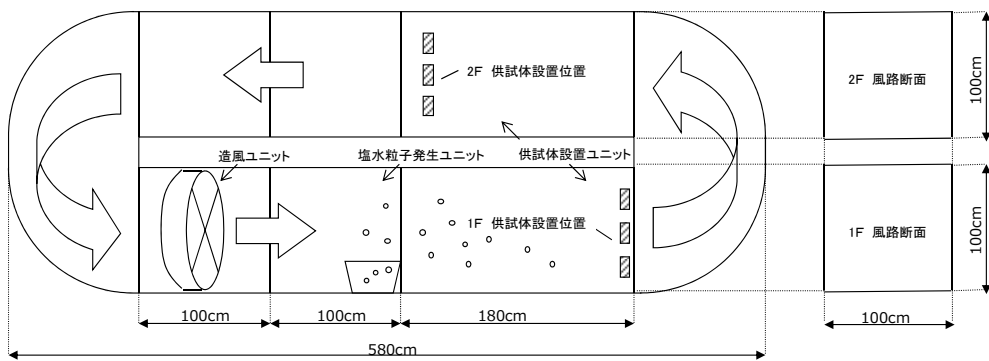


図-1 風洞型実験装置の概要

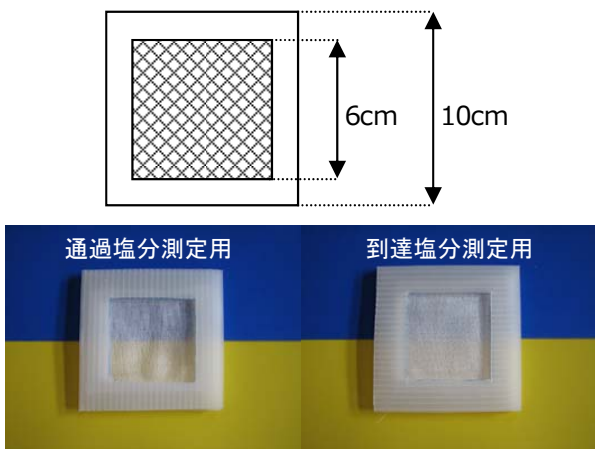


図-2 ガーゼ供試体の概要

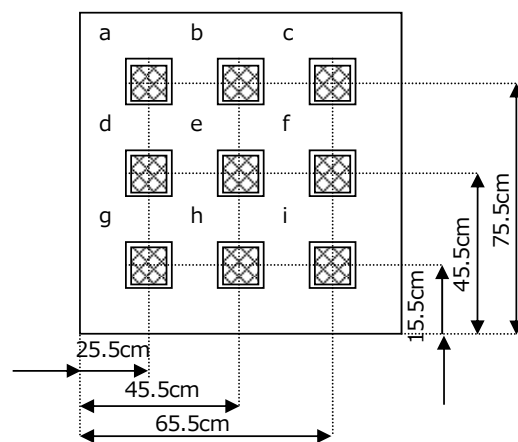


図-3 供試体の設置位置

2.2 風洞内の飛来塩分量の測定

風洞内の各供試体設置位置における飛来塩分量を JIS-Z2382「大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定」に規定されたガーゼ法により測定をした。

ガーゼ供試体の概要を図-3 に示す。ガーゼには医療用ガーゼを使用し、規準に従い2枚重ねにした。ガーゼは縦横10cm、厚さ3mmの穴のあいたプラスチック板にはさみ、受風部分は $0.36\text{cm}^2 (=0.36\text{dm}^2)$ とした。塩水粒子を含んだ風がガーゼに当たったとき、風はガーゼを通過するが塩分はすべて捕集されると仮定し、大気中を通過する塩分量(以下、通過塩分量と呼称)を計測した。また、ガーゼ裏にプラスチック板を重ね空気が透過しないようにしたガーゼでは、大気中に置かれた物体表面に付着する塩分(以下、到達塩分量と呼称)が捕集されると仮定した。

供試体の設置位置と暴露状況を図-3 および図-4 に示す。通過・到達塩分測定は塩水粒子発生源より1.8m(一階部の供試体設置位置に相当)及び、3.6m(二階部の供試体設置位置に相当)の両地点において風速 $0.1\text{m/s} \sim 2.1\text{m/s}$ のもとでそれぞれ4時間暴露した。暴露時間を4時間としたのは、ガーゼの塩分捕集能力と、暴露時間に比例し



図-4 ガーゼ供試体の暴露状況
(二階供試体設置位置)

て捕集塩分量も増え続ける2つの要件を満たす最短の時間であるからである。

採取した塩分の分析は、JIS-Z2382に基づき、ガーゼをイオン交換水に浸し十分に温浴させた後、吸引濾過し、その濾液の Cl^- イオン濃度をイオン電極を用いて電位を計測し算出した。その後、単位時間、単位面積あたりの塩分付着量を、 $\text{mdd}(\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day})$ の単位で算出した。

2.3 飛来塩分調査結果

風洞 1 階および 2 階の各供試体設置位置での飛来塩分量を図-5、図-6 にそれぞれ示す。図-7 は参考のために示した。新潟県の日本海海岸の江線付近に位置する、出雲崎夕日ライン橋における月ごとの飛来塩分量である²⁾。

風洞内での飛来塩分量は 1 階が平均で 27.1mdd、最大 70.1mdd、2 階が平均で 14.5mdd、最大 22.1mdd であることから、出雲崎夕日ライン橋の最も到達塩分が多い冬期間の 10~20 倍程度の飛来塩分量環境であることがわかる。また、通過塩分量の 20% 前後が到達塩分量となった。

1 階では設置位置が高くなるにつれて塩分量は減り、風速に関する目立った相関性は見られない。1 階部では、飛来塩分発生装置に近いので、径の大きな塩水粒子が重力で沈降する海岸江線付近での状況に近いといえる。

2 階では、風速、設置高さ共に高くなると塩分量が増え、全体的に一樣な分布で塩分が飛来している。径の小さな塩水粒子が沈降せず、風によって長距離を輸送される、比較的海岸線から離れた位置での状況に近いといえる。

風洞は一年以上連続運転を行っている。風洞内の飛来塩分量が一定に保持されているか確認する必要があるため、定期的に調査した結果、各階の暴露位置において飛来塩分量がほぼ一定であることが確認されている。

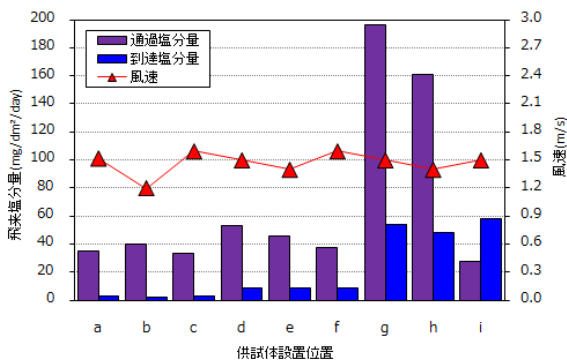


図-5 一階供試体設置位置における飛来塩分環境

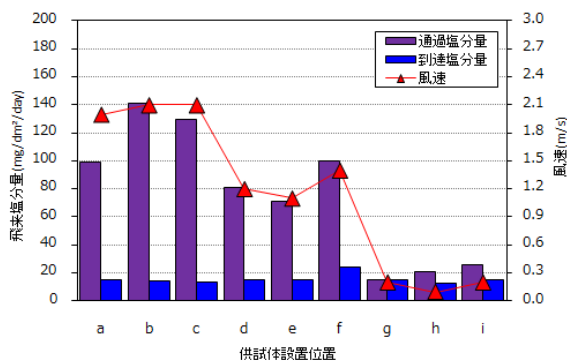


図-6 二階供試体設置位置における飛来塩分環境

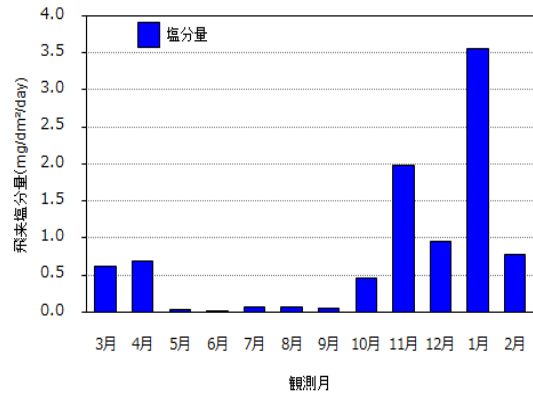


図-7 実地試験における年間飛来塩分量
(観測地域：新潟県日本海沿岸)

2.4 実験概要

(1) 供試体

表-1 および図-8、図-9 に供試体の示方配合および概要を示す。コンクリート供試体は W/C=50%，モルタル供試体は W/C=30,40,50% の三種類を準備した。薄板モルタル供試体の寸法は、4cm×4cm×1cm とした。モルタル供試体の成形は、4cm×4cm×16cm 型枠にプラスチック板を差し込んで仕切ったものにモルタルを流し込んで作製した。

暴露時に供試体の一面のみ飛来塩分に曝されるように、他の面をエポキシでシールし、塩分侵入を防いだ。飛来塩分測定時のガーゼ供試体の断面 10cm×10cm と同じになるよう、モルタル供試体を 4 体組み合わせ、それから固定する木枠にはめ込んだときの断面が 10cm×10cm となるようにし、暴露した。

表-1 供試体の示方配合

W/C (%)	S/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE
30	0.9	-	312	1040	958	-	14.56
40	1.4	-	318	795	1152	-	11.13
50	1.9	-	324	648	1260	-	9.07
50	2.0	43	162	324	770	1043	3.24

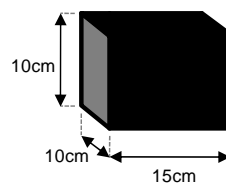


図-8 コンクリート供試体

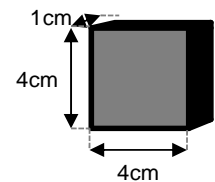


図-9 モルタル供試体

(2) 暴露試験

暴露試験は塩水粒子発生源より 3.6m の、二階供試体設置位置において行った。

供試体の暴露位置と暴露位置において予め測定した飛来塩分量を表-2 に示す。暴露位置は、先に行われた飛来塩分量調査において平均的である箇所を選定した。

コンクリート供試体を用いた、塩分侵入抑制効果試験では、192 日間暴露し、塩分侵入抑制効果の有無、洗浄時間および吐水圧の検討を行う。

薄板モルタル供試体を用いた塩分浸透性状確認試験では、供試体を風洞内に設置後 48 日間暴露し、飛来塩分によるモルタル表面に付着する塩分量と浸透塩分量を計測する。一部の供試体は、暴露期間中に高圧洗浄を定期的に行い、浸透塩分量の相違を検討する。洗浄の概要を図-9 に示す。洗浄は市販の高圧洗浄機を用いた。洗浄は 6 日毎に 5 秒間行った。

表-2 供試体の暴露位置と検討項目

検討項目	設置位置	飛来塩分量 (mdd)	W/C (%)	洗浄の有無	洗浄頻度 (日)	吐水圧	洗浄時間 (秒)
塩分除去効果の有無	a	18.2	50	○	3	強	30
	c	16.6		○	6		
	f	20.1		○	12		
	d	18.7		x	無洗浄		
吐水圧・洗浄時間	b	22.1	○	6	強	5	
	e	14.3	○	6	弱		
モルタル供試体を用いた表面近傍の塩分浸透性状	a	18.2	50	x	-	-	-
	c	16.6	40	○	6	強	5
	d	18.7	30	x	-	-	-
				○	6	強	5



図-10 高圧洗浄の概要

(3) コンクリート、モルタルの塩分量の測定

塩分量の測定用の試料の採取方法をコンクリート供試体は図-11、モルタル供試体は図-12 にそれぞれ示す。コンクリート供試体は卓上フライス盤を用いて、塩分供給面より深さ方向に、5, 10, 20, 40, 80mm の位置とした。5mm 地点の試料は暴露面から採取し、それ以外の点の試料は側面から穿孔して採取した。試料採取後の供試体は、穿孔跡にシリコンを充填し、更にエポキシ樹脂で被覆し、再び飛来塩分に曝した。モルタル供試体の表面、表層、内部の 3 点の塩分量を測定した。表面の塩分は、日本道路協会「鋼道路橋塗装・防食便覧」⁵⁾ に示されているガーゼ拭き取り法に従い採取した。表層部分は 2.5mm の刃を有したコンクリートカッターによってモルタル供試体を表面から切削し得られる切削粉を用いた。内部は深さ 2.5mm~10mm の位置のモルタルを粉砕機で粉砕した試料を用いた。

塩分分析は、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に基づいて行った。この際、試料体積

は粉末試料重量より、密度を用いて算出した。密度は、風洞内が湿度 90% 以上であることから湿潤状態の密度を計算に用いることとした。なお、湿潤状態、表乾状態、絶乾状態をそれぞれ計測し、いずれを用いても塩分量の測定結果に大きく影響しないことを確認した。

塩分量の測定は、暴露開始後 6, 12, 24, 48 日に行った。分析時は供試体を二片取り出し、一方は塩分浸透量調査、一方は洗浄試験に用いた。分析によって損失した個所には、新たに同様の薄板モルタル供試体をはめ込み、暴露試験を開始した。

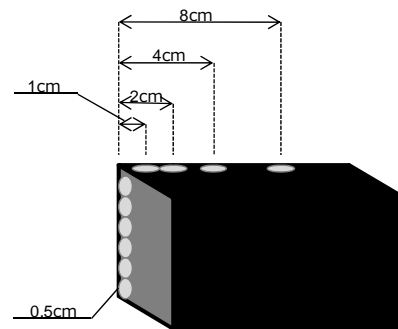


図-11 コンクリート供試体の試料の採取方

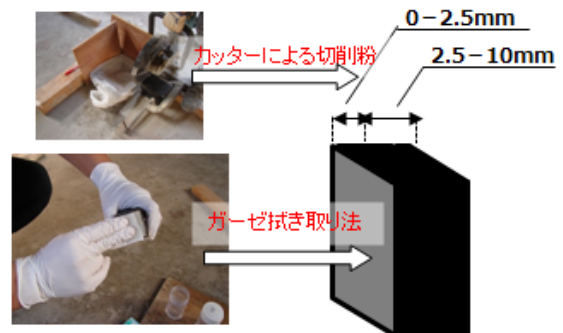


図-12 モルタル供試体の試料の採取方法

3.4 試験結果

3.4.1 塩分侵入抑制の有無

暴露開始から144日時点での供試体内の塩分分布の経時変化を図-13(表面から5mm地点)、図-14(表面から10mm地点)をそれぞれ示す。表面から20mm, 40mm, 80mmのデータは144日暴露時点でも浸透した塩分量が僅かであり、比較検討には困難であることから割愛した。

暴露 24 日では、無洗浄供試体を含めてまだ塩分の侵入は見られない。暴露 96 日では、無洗浄の供試体に最も塩分侵入が見られ、これに比べて洗浄を行ったケースはいずれも塩分の侵入の低減が認められた。表面に近い深さ 5mm の点の塩分量が低下しているだけでなく、深さ 10mm の点においても低下していることから、表面の洗浄により内部への侵入が抑制されていることを示している。更にこの抑制効果は、96 日以降の暴露日数に比

例して顕著になった。洗浄間隔の影響については、12日おきよりも6日おき、3日おきの方が高い除去効果が得られたが、6日と3日ではもはや差が小さく、洗浄間隔の影響の頭打ちが見られた。

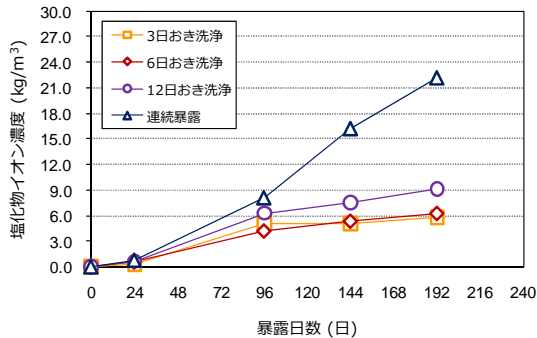


図-13 深さ5mmの位置の塩分量の経時変化

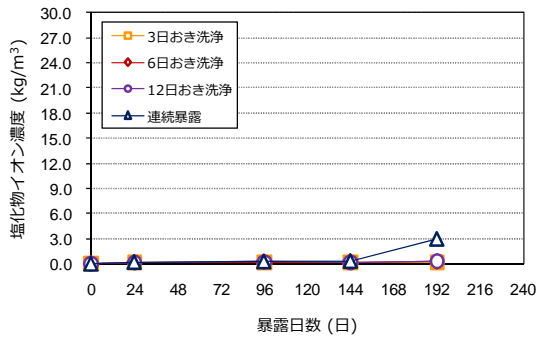


図-14 深さ10mmの位置の塩分量の経時変化

3.4.2 洗浄時間および吐水圧の影響

洗浄時間および吐水圧の影響の実験結果の経時変化を図-15に示す。洗浄時間の影響では、30秒間高圧洗浄を施した供試体と5秒間高圧洗浄したものでは、暴露144日間でもその差は僅かであり、洗浄時間を長くしても塩分除去効果は正比例で向上しないことが示唆された。

吐水圧の影響では、5秒間高圧洗浄を施した供試体と5秒間低圧洗浄を施した供試体では、暴露144日間でもその差は僅かであることから、吐水圧による影響は殆ど無いものと考えられる。

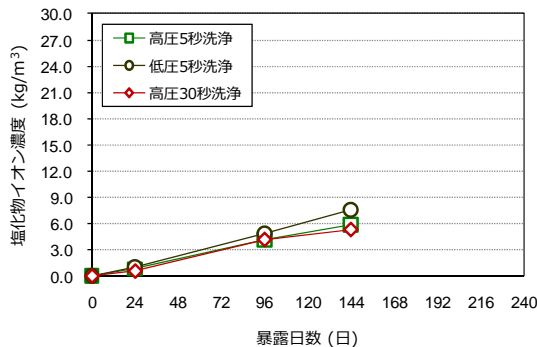


図-15 洗浄時間および吐水圧による違い(深さ5mmの位置)

3.4.3 連続暴露した供試体

モルタル供試体の内部の塩分量、内部+表層の塩分量、内部+表層+内部の塩分量の経時変化を W/C=50, 40, 30%の順に、図-16, 17, 18にそれぞれ示す。

表面、表層、内部の塩分量を同一次元で比較するため、塩分量は(質量/面積)の次元で整理している。表面塩分量はガーゼ拭き取り法による付着塩分、表層の塩分量とは表面を通過して深さ0~2.5mmの位置に留まっている塩分量、内部とは深さ2.5mmの面を通過して2.5mm~10mmの位置に留まっている塩分量を表す。図には、予め測定した該当供試体位置における飛来塩分量から計算される累積飛来塩分量の計算値を直線で示している。

6日間暴露時点では、累積飛来塩分量に対して表面に付着する量は、配合に関わらず3~4%とほぼ同等となった。累積飛来塩分量に対して表面+表層+内部の塩分量は、W/C=50, 40, 30%の順に64, 57, 52%となった。すなわち、モルタル表面に到達した塩分の30~50%は付着も浸透もしていないこととなる。表層+内部の塩分量はW/C=50, 40, 30%の順に48, 44, 39%であった。すなわち、モルタル表面に到達した塩分の40~50%が内部に浸透したこととなる。

塩分量は、その後徐々に増加したが24日と48日時点では増加の傾向が一定となった。連続的に飛来塩分が到達する場合、モルタル表面に留まる塩分量は、ある程度の期間で平衡状態に達するが、その後もモルタル内への浸透は継続することが示唆される。

6日間暴露時点では各供試体ともに、内部に浸透する塩分量が比較的多い。これは、供試体の含水状態が影響しているものと考えられる。すなわち、風洞内は湿度90%以上であるので乾燥した供試体を暴露開始すると、初期に吸湿が進み湿潤状態に移行する。その際、塩分も一緒に侵入したと考えられる。

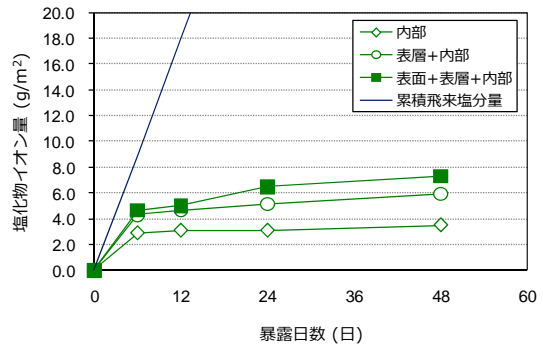


図-16 W/C=50供試体の塩分量の経時変化

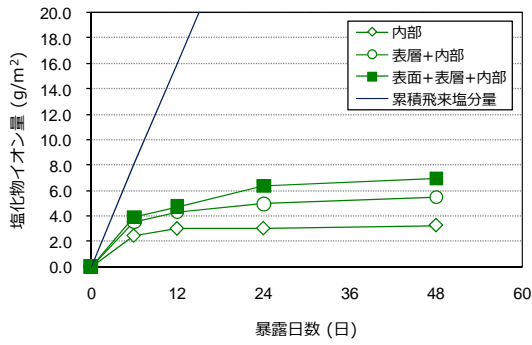


図-17 W/C=40%供試体の塩分量の経時変化

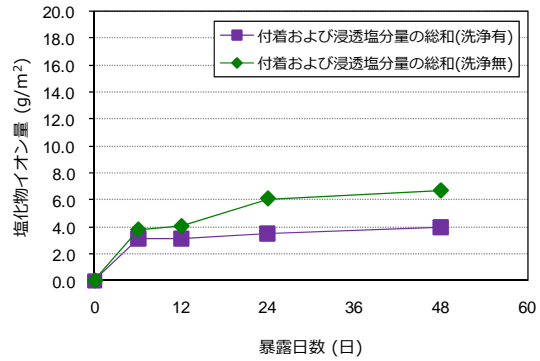


図-19 薄板モルタル供試体の総塩分量の経時変化

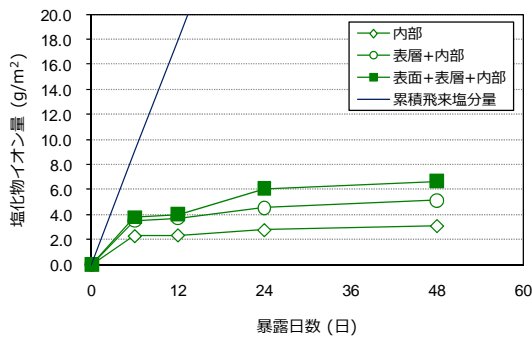


図-18 W/C=30%供試体の塩分量の経時変化

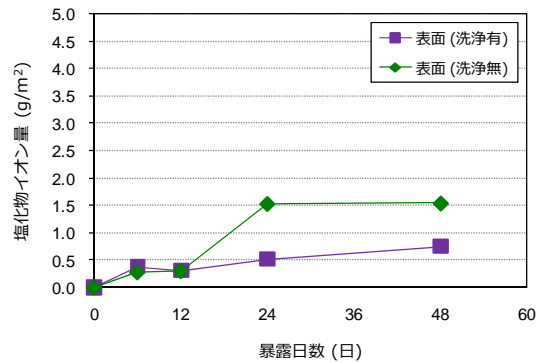


図-20 薄板モルタル供試体の表面の塩分量の経時変化

3.4.2 高圧水洗浄した供試体

実験は、W/C=50, 40, 30%について行ったが、傾向は同じであったため、W/C=30%のシリーズの結果のみを示す。

図-19はモルタル供試体の総塩分量（表面に留った量と浸透した量の総和）を示している。累積飛来塩分量も示している。洗浄を行うことによりモルタル供試体の総塩分量が減少していることがわかる。

図-20はガーゼ拭き取りによる表面部に付着した塩分量の経時変化である。前回報告時には、高圧水による洗浄の影響が確認されなかったが、24日以降は影響が確認できた。

図-21はモルタル中に侵入した塩分のうち、表層部（深さ0~2.5mm）に存在する塩分量の経時変化である。

図-22は内部（深さ2.5~10mm）に存在する塩分量の経時変化である。1回目の洗浄は6日の測定の直前に行っている。図-21において洗浄したものの方が6日の塩分量が少ないことから、洗浄による塩分除去効果は表層部（深さ0~2.5mm）に存在する塩分に有効であることが確認できる。一方、図-22では、6日の塩分量の測定結果において洗浄の有無による違いが認められないことから、内部（深さ2.5~10mm）に存在する塩分は、洗浄により除去されないといえる。そして、図-21, 22ともに、6日以降の塩分の増加がないことから、洗浄により、表層部の塩分の増加が抑えられ、その結果それより内部への塩分の浸透も抑えられているといえる。

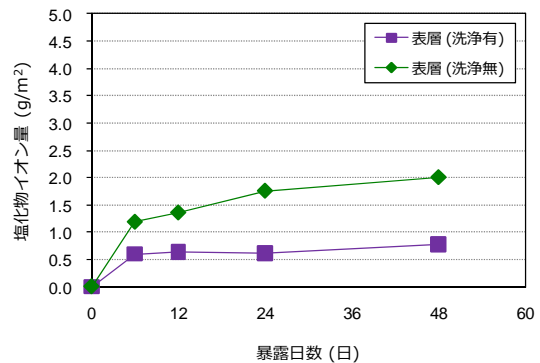


図-21 薄板モルタル供試体の表層の塩分量の経時変化

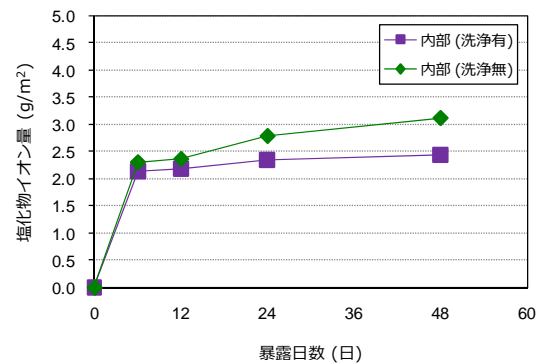


図-22 薄板モルタル供試体の内部の塩分量の経時変化

3.4.3 飛来塩分を受けるコンクリートの塩分侵入に関する境界条件の表現の検討

コンクリート中の塩分移動解析法は精粗多種あるが、多くは濃度拡散型のモデルの範疇にある。これと組み合わせる境界条件モデルとしては、環境条件に応じて実験的に同定したコンクリート表面における塩分濃度を与える場合が多い。

ここでは、コンクリート中の塩分移動解析法として、気液二相水と自由塩分、固定塩分を考慮した移動モデルを用いる。解析法では、コンクリートが気中、水中、乾湿繰り返し環境におかれた場合のコンクリート中の物質移動が、それぞれの移動メカニズムに応じて区別できる長所がある。そこで、この解析法のフレームワークに立脚し、気中に置かれたコンクリートが飛来塩分を受ける場合の、塩分侵入に関する境界条件の表現方法を検討する。

気中に置かれたコンクリートの熱伝達境界、湿度伝達境界モデルと同型の、自然境界条件により表現することを試みる。

$$J = m \cdot (C_f(0,t) - \beta \cdot V_l \cdot C_a(t))$$

ここに、 J ：境界における塩分の流出入流束[kg/m²/s]、 m ：塩分の侵入に関する表面伝達係数[m/s]、 $C_f(0,t)$ ：表面近傍のコンクリート中の自由塩分量[kg/m³]、 β ：実験定数[s/m]、 V_l ：コンクリート単位体積中の液状水体积積[m³/m³]、 $C_a(t)$ ：コンクリート表面に単位時間あたりに到達する飛来塩分量[kg/m²/s(または mg/dm²/day)]である。 m は流出入過程の進行速度を表す実験係数で、コンクリート表面近傍の空気の対流境界層の状況の他のコンクリートの細孔構造の影響も受けると考えられる。 β は、飛来塩分量を該当飛来塩分環境下で平衡するコンクリート中の塩分量に置換するための実験係数であり、到達する塩分量を付着する塩分量との関係などに依存すると考えられる。これらの係数値と実測諸値との関係は今後系統的な検討が必要であるが、今回は任意に設定することにする。

図-23、24に W/C=30%の供試体中に侵入した塩分量(表層+内部)の実験結果と計算結果を示す。実験結果では、初期における侵入塩分が解析結果よりも多い。しかし、暴露期間が経過するにつれて侵入塩分量の増加が緩やかになる傾向は、解析結果においても再現されている。

初期の塩分侵入が多いことについては、水分移動の解析精度とも関係すると考えられる。今後広範囲の実験データを用いて検討を重ねたい。

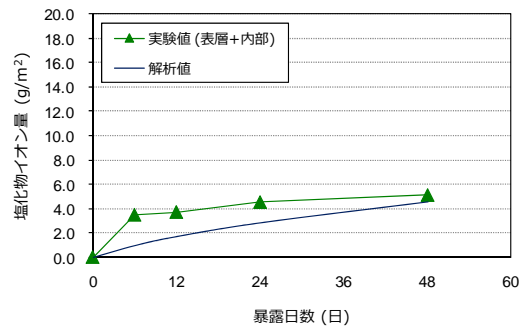


図-23 W/C=30%供試体の塩分量の経時変化(連続暴露)

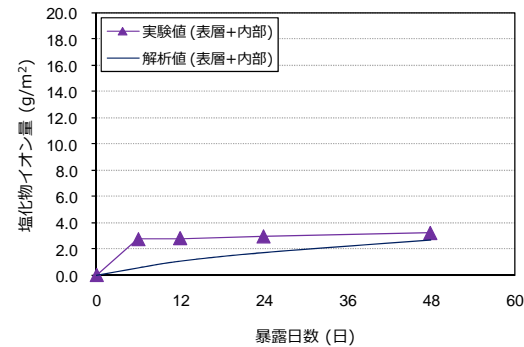


図-24 W/C=30%供試体の塩分量の経時変化(洗浄有)

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 連続して飛来塩分を受けるモルタル供試体において、表面に付着する塩分量は一定期間で平衡状態に達するが、その後もモルタル内部への塩分の浸透は継続することが確認された。
- (2) 飛来塩分によりコンクリート中に塩分が浸入する環境下において、コンクリート表面を高圧水洗浄することにより塩分侵入を低減する効果があることが確認された。
- (3) 高圧水洗浄を施す際の吐水圧は、高圧にする方がより塩分侵入抑制効果がある。その一方で、洗浄時間の影響は確認されていないことから、本実験の範囲内では短時間でも塩分侵入抑制効果があり、逆に洗浄時間を長くしてもその効果には限度があることが示唆された。
- (4) 高圧水洗浄の塩分除去効果は、表面及び表層部分で顕著であることが確認された。一方、内部に浸透した塩分は高圧水洗浄による除去はできないことが確認された。
- (7) 高圧水による洗浄では、配合によらず塩分侵入抑制効果があり、本実験の範囲では表面より 2.5mm 付近までの塩分の除去を確認できた。
- (8) 飛来塩分を受けるモルタル供試体への塩分侵入に関する境界条件は、表面での流束を表す自然境界条件型の形式により表現可能であることを示した。