

論文 風洞試験による飛来塩分を受けるモルタルの表面塩分量および塩分浸透性状の検討

青木 慶彦^{*1}・上浦 健司^{*2}・福地 大樹^{*3}・下村 匠^{*4}

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、飛来塩分が連続して供給される場合、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。

キーワード：飛来塩分、風洞、表面塩分量、高圧洗浄

1. はじめに

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、コンクリート構造物表面への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¹⁾。

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²⁾。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²⁾を経て、大型版³⁾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の一部が洗い流される。この洗い流し効果を積極的に利用し、高圧水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、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¹⁾における簡易風洞装置の基本原理解を踏襲し、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、製作したものである。

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。

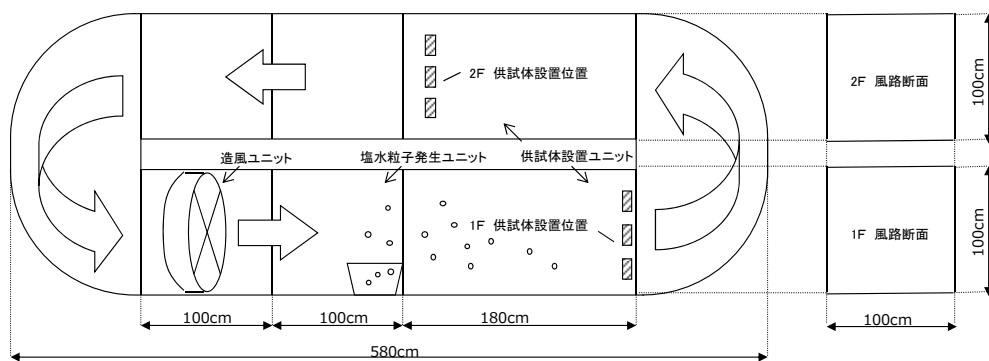
風洞本体は、型枠用化粧合板と一部プラスチックで構成されている。飛来塩分が漏れ出さない程度に気密が保たれている。また、風洞内の断面欠損を最小限にとどめるためと、風洞内を循環する塩分による腐食防止のため、造風部の動力機関は風洞外に設置し、ベルトを介してプロペラを回転させる構造とした。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

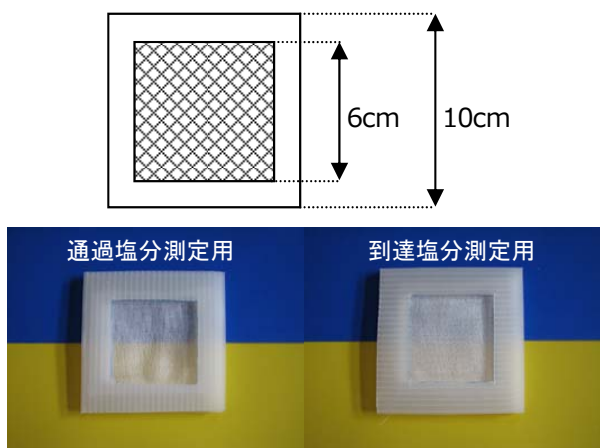
*2 東日本旅客鉄道(株) 工修 (正会員)

*3 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (非会員)

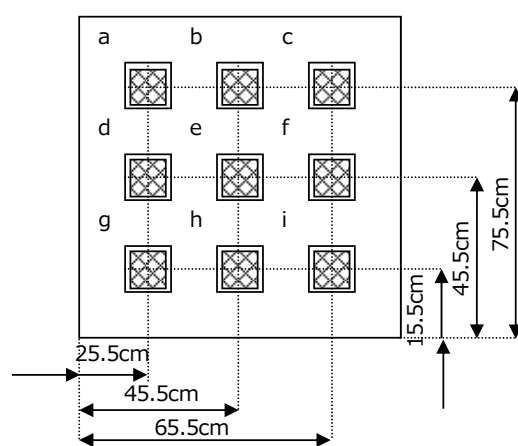
*4 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 准教授 工博 (正会員)



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 風洞断面内の供試体の設置位置

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した。

ガーゼ供試体の概要を図－2 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 $36\text{cm}^2 (=0.36\text{dm}^2)$ 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)及び、3.6m(二階部の供試体設置位置)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。暴露時間の4時間とは検討の結果定めたもので、本塩分捕集法で安定した通過・到達塩



図－4 ガーゼ供試体の暴露状況
(二階供試体設置位置)

分量の測定値を得るのに最低限必要と判断した暴露時間である。

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することで行った。その後、単位時間、単位面積あたりの通過・到達塩分量を、 $\text{mdd}(\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day})$ 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。新潟県の日本海岸の汀線付近に位置する、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⁾。

風洞内での到達塩分量は 1 階が平均で 21.7mdd、最大 58.1mdd、2 階が平均で 15.6mdd、最大 23.9mdd 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汀線付近での状況に近いといえる。

2 階では設置位置が高いほど風速が大きく、通過塩分量はその位置における風速と相関が見られた。これは、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場所での状況に近いといえる。しかし、到達塩分量は設置位置によらず全体的に一樣となった。この理由は現段階では明らかではないが、径の小さい海水粒子が飛来する状況下で生じる現象であると考えられ、物体表面に到達した海水粒子の附着・離脱メカニズムと密接に関連すると考えられる。

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を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。

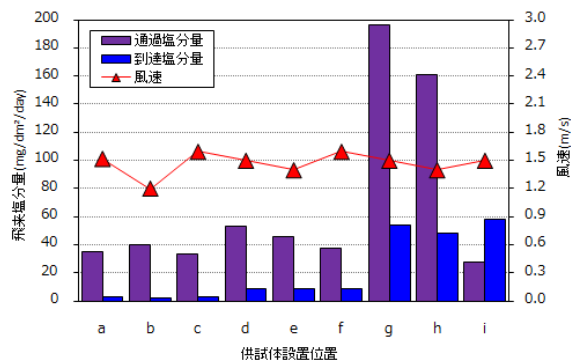


図-5 一階供試体設置位置における飛来塩分環境

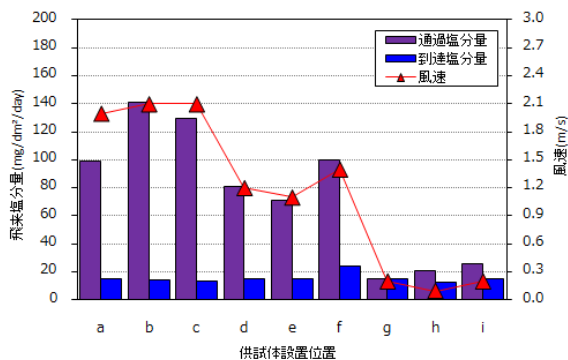


図-6 二階供試体設置位置における飛来塩分環境

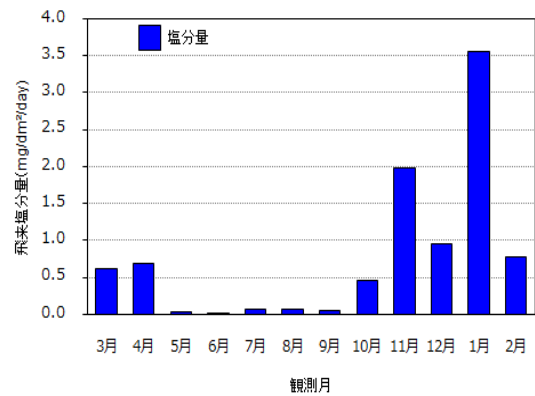


図-7 実地試験における年間飛来塩分量
(観測地域：新潟県出雲崎海岸)

2.4 実験概要

(1) 供試体

表-1 および図-8 に薄板モルタル供試体の示方配合および概要を示す。モルタルは 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。供試体は、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、材齢 42 日で暴露した。

表-1 供試体の示方配合

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)				湿潤密度 (g/cm ³)
		W	C	S	AE	
30	0.9	312	1040	958	14.56	2.20
40	1.4	318	795	1152	11.13	2.21
50	1.9	324	648	1260	9.07	2.29

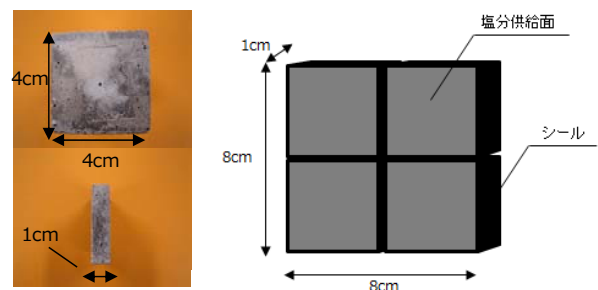


図-8 供試体の概要

(2) 暴露試験

暴露試験は 2 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、先に行った飛

来塩分量調査において平均的である箇所を選定した。

暴露試験では、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を実施し、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 日ごとに 5 秒間行った。洗浄頻度及び、一回あたりの洗浄時間は、一昨年における洗浄試験において得られた結果に基づいて決定した⁴⁾。

表-2 供試体の暴露位置と検討項目

設置位置	飛来塩分量 (mdd)	供試体 W/C(%)	洗浄の有無	洗浄頻度 (日)	洗浄時間 (秒)
a	18.2	50	×	-	-
			○	6	5
c	16.6	40	×	-	-
			○	6	5
d	18.7	30	×	-	-
			○	6	5



図-9 高圧洗浄の概要

(3) モルタル表面、表層、内部の塩分量の測定

塩分量の測定用の試料の採取方法を図-10 に示す。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、風洞内が相対湿度 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。

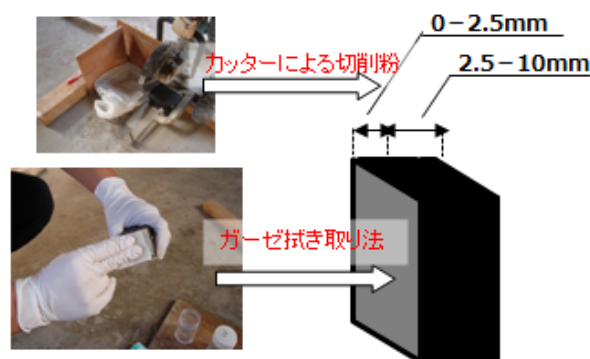


図-10 試料の採取方法

3.4 試験結果

3.4.1 連続暴露した供試体

モルタル供試体の表面の塩分量、表層+内部の塩分量、表面+表層+内部の塩分量の経時変化を W/C=50, 40, 30%の順に、図-11, 12, 13 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、モルタル内への浸透はその後も継続することがわかる。

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。

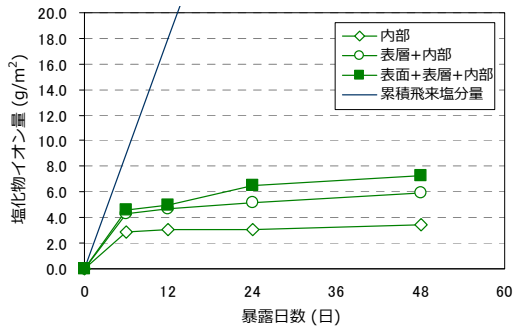


図-11 塩分量の経時変化 (W/C=50%)

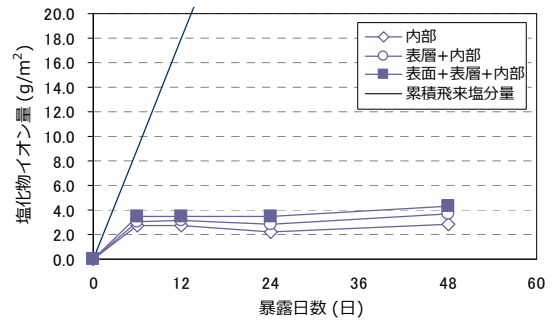


図-14 塩分量の経時変化 (W/C=50%, 洗浄有)

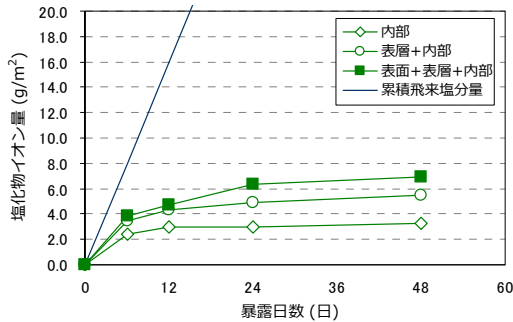


図-12 塩分量の経時変化 (W/C=40%)

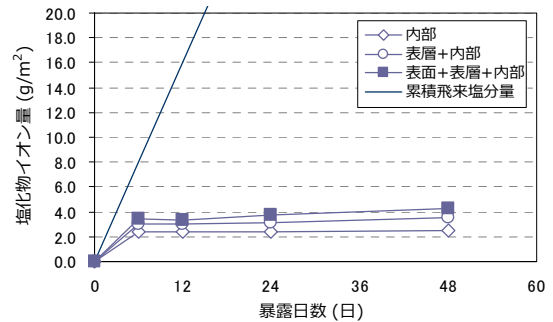


図-15 塩分量の経時変化 (W/C=40%, 洗浄有)

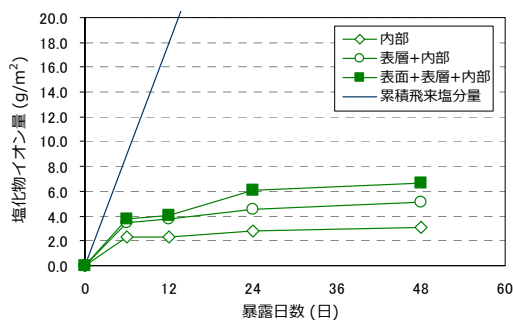


図-13 塩分量の経時変化 (W/C=30%)

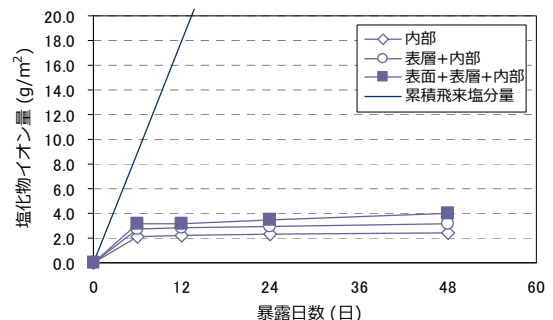


図-16 塩分量の経時変化 (W/C=30%, 洗浄有)

3.4.2 高圧水洗浄した供試体

洗浄を施した供試体の表面の塩分量，表層+内部の塩分量，表面+表層+内部の塩分量の経時変化を W/C=50, 40, 30%の順に，図-14, 15, 16 にそれぞれ示す。

洗浄を施さない供試体と比較すると，表面，表層，内部ともに塩分量が少ない結果が得られた。ただし，表面は，6 日および 12 日分析時点では，明確な洗浄効果が認められなかった。これは，短期間の暴露では，付着塩分量がごく僅かであったためと考えられる。配合に関わらず，24 日分析結果では，洗浄を施さない供試体と比較し，50%程度の付着塩分の低減が確認された。

表層部分における塩分量は，6 日時点でいずれの配合の供試体も無洗浄の供試体と比較して塩分量が約 50%低減されている。したがって，表面から 2.5mm までの深さに侵入していた塩分が高圧水洗浄により除去されたことになる。いずれの配合も，6 日以降は表層の塩分量が概ね一定となっており，定期的な洗浄によって塩分の侵

入が抑制されていることが確認できる。

内部の塩分量は，いずれの配合の供試体も一回目の洗浄が行われる前に浸透した塩分量が，その後も一定に保たれている。表面を洗浄することにより，それ以降の塩分侵入が抑制されている。しかし，一度内部へ浸透した塩分を取り除く効果は得られていないことから，洗浄による塩分の洗い流しは，表面および表面よりごく浅い部分(本実験では 2.5mm)までであると考えられる。

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

飛来塩分を受けるコンクリートにおける塩分の侵入過程を数値シミュレーションにより再現する方法を検討する。コンクリート中の塩分移動解析に用い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が，ここでは，コンクリート表面への飛来塩分量（到

達塩分量)を直接境界条件に取り入れることを考える。

まず、コンクリート中の塩分移動解析法として、気液二相水分の移動、液状水中の自由塩分の濃度拡散、セメント硬化体による塩分の固定を考慮した移動モデルを用いる⁶⁾。本解析法では、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表現できる長所がある。この移動モデルと組み合わせて使う、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境界条件モデルとして、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考え、次のように表す⁷⁾。

$$J = m \cdot (C_f(0, t) - \beta \cdot V_l \cdot C_a(t)) \quad (1)$$

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 : 周辺環境の相対湿度に平衡するコンクリート単位体積中の液状水体積[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。

式(1)において、 m は流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流れ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。今回はコンクリート中の塩分移動モデル⁶⁾中の塩化物イオン拡散係数と連動させた数を設定する。 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、到達する塩分量と付着する塩分量との関係などに依存すると考えられる。 β の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 $\beta=25000\text{s/m}$ と設定することにする。 $C_f(0, t)$ は変数であり、コンクリート中の塩分移動の解として求まる。 $C_a(t)$ は本研究の実験の再現解析では実測値を用いる。 V_l は環境条件と細孔構造より定まる水分移動モデル⁶⁾中の変数のひとつである。

図-17に W/C=40%の供試体を飛来塩分環境下に連続暴露した場合の、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傾向が表現されていないことについては、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。また、高圧水による塩分浸透抑制効果についても数値解析で再現できるようにする予定である。

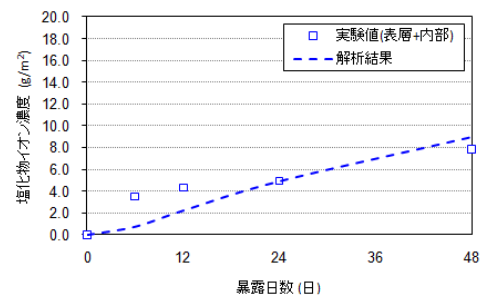


図-17 W/C=40%供試体中の塩分量の経時変化

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) 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。
- (3) 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。

参考文献

- 1) 佐伯竜彦, 中村大剛: 飛来塩分環境下におけるコンクリート表面の塩化物イオン浸透流束に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 1017-1022, 2007.7
- 2) 山下寛生, 下村匠, 山田文則: 飛来塩分の影響を受けるコンクリートの表面塩分に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 1011-1016, 2007.7
- 3) 上浦健司, 青木慶彦, 下村匠: コンクリートへの塩害環境作用を再現する飛来塩分発生装置の開発, 第26回土木学会新潟会研究調査発表会論文集, pp. 242-245, 2008.11
- 4) 青木慶彦, 上浦健司, 下村匠: 高圧水洗浄によるコンクリート中への塩分侵入抑制メカニズムの検討, 第27回土木学会新潟会研究調査発表会論文集, pp. 300-303, 2009.11
- 5) 鋼橋における劣化現象と損傷の評価, 土木学会 pp.130-131, 1996
- 6) 小林悟志, 下村匠: コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.831-836, 2002.6
- 7) 西利明: ひび割れを有するコンクリート中における水分移動現象のモデル化, 長岡技術科学大学修士論文, 1999.3