

# 論文 高濃度 NaCl により乾湿繰返し作用を受けたコンクリートの塩分浸透性状

佐川 康貴\*1・島山 繁忠\*2・濱田 秀則\*3・今村 壮宏\*4

**要旨:** 本論文では、凍結防止剤に由来する高濃度の塩化物イオンを含む漏水によるコンクリート橋の塩害を想定し、室内実験において飽和 NaCl を用いた浸漬試験を行い、コンクリートへの塩分浸透性状の検討を行った。また、凍結防止剤が散布される 4 か所のコンクリート橋の桁端部において曝露試験を行った。その結果、室内実験では水セメント比が高いと乾湿繰返しよりも連続浸漬の方が多く塩化物イオンが浸透する傾向を示した。また、曝露試験の結果、コンクリート橋桁端部の漏水が認められる場所では曝露期間 1 年程度で腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回る濃度を示した。

**キーワード:** 塩害, 凍結防止剤, 塩化物イオン, 乾湿繰返し

## 1. はじめに

1990 年のスパイクタイヤの使用禁止以降、冬期道路に凍結防止剤が多く散布されるようになり、内陸部の橋梁においても、塩害による損傷が散見され始めている。その原因は、ジョイント部などから流れ出た凍結防止剤を含む漏水によるものである<sup>1)2)</sup>。凍結防止剤による塩害の特徴としては、凍結防止剤には NaCl や CaCl<sub>2</sub> が用いられ、15%溶液などの高濃度の溶液や粒状で散布されるため、凍結防止剤を含んだ漏水は高濃度の塩化物イオンを含有すると考えられる。また、塩化物イオンの供給が冬期に限られること、漏水や雨水がない場合は乾燥するため、乾湿繰返し作用を受けていることなどが挙げられる。

凍結防止剤により塩害を生じたコンクリート橋では、供給される塩化物イオン濃度が高いことに加え、桁端の空間は狭あいであることが多く、補修が困難である。場合によっては架け替えを余儀なくされる場合もある。また、既往の研究において、高濃度 NaCl および乾湿繰返し作用を受けたコンクリートの塩分浸透性状を検討した事例は少ない。

本研究では、塩水の濃度および乾湿繰返し作用が、コ

ンクリートの塩分浸透性状に及ぼす影響についてあきらかにするため、室内実験を行った。また、凍結防止剤が散布される環境におけるコンクリートへの塩化物イオンの供給の実態について明らかにするため、コンクリート供試体を設置し、曝露試験を行った。

## 2. 乾湿繰返し試験による塩分浸透性状評価

### 2.1 実験概要

#### (1) 供試体の作製および養生方法

本実験では、水結合材比および乾湿繰返し条件を変化させ、それらの要因がコンクリート中への塩化物イオンの浸透速度に及ぼす影響や、塩化物イオン濃度の分布に関して実験的に検討を行った。表-1 に本試験で使用したコンクリートの配合を示す。水結合材比による塩分浸透抵抗性を検討するため、水結合材比 W/B は 45, 55, 65% の 3 水準を設定した。また高炉スラグ微粉末 4000 (以下 BFS と称す) 混和コンクリートも作製し、BFS の有無による塩分浸透性状の相違を検討した。目標スランブおよび目標空気量は 8.0±2.0cm, 4.5±1.0% とした。これらのフレッシュ性状を満たすように、試験練りを行い、細

表-1 コンクリートの示方配合

配合名	W/B(%)	s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE減水剤 (g/m <sup>3</sup> )	AE剤 (ml/m <sup>3</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)
			水 W	セメント C	BFS	S	G				
N45	45	45.5	175	389	-	771	1035	1215	7.78	8.5	4.3
N55	55	47.5	175	318	-	832	1106	994	6.36	7.3	5.4
N65	65	47.5	175	269	-	851	1054	841	5.38	6.0	3.7
B55	55	46.5	175	159	159	810	1051	1392	3.18	8.5	3.9

\*1 九州大学大学院工学研究院 社会基盤部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*2 九州大学大学院工学府 建設システム工学専攻

\*3 九州大学大学院工学研究院 社会基盤部門 教授 博士 (工学) (正会員)

\*4 西日本高速道路(株) 九州支社 保全サービス事業部 改良課

表-2 塩分浸透試験条件

配合名	浸漬条件	乾湿サイクル
N45	飽和NaCl	連続浸漬
		2日浸漬5日乾燥(2/5)
	3%NaCl	2日浸漬5日乾燥(2/5)
N55	飽和NaCl	連続浸漬
		2日浸漬5日乾燥(2/5)
		4日浸漬10日乾燥(4/10)
	3%NaCl	連続浸漬
		2日浸漬5日乾燥(2/5)
N65	飽和NaCl	連続浸漬
		2日浸漬5日乾燥(2/5)
		4日浸漬10日乾燥(4/10)
	3%NaCl	2日浸漬5日乾燥(2/5)
B55	飽和NaCl	2日浸漬5日乾燥(2/5)

骨材率，AE 剤の添加率を調整し，配合を決定した。また，BFS 混和コンクリートでは，結合材 (C+BFS) の SO<sub>3</sub> が質量に対して 2.0% となるように無水石膏を添加した。打設時のスランプ，空気量は表-1 に示す通りである。塩分浸透試験の供試体として 10×10×40cm の角柱供試体を作製した。打設は室温 20℃ の実験室にて行った。脱型は打設後 24 時間で行い，その後，温度 20℃ で材齢 28 日まで水中養生した。水中養生が終了した後，塩分浸透試験開始までの間，温度 20℃，湿度 60% の恒温恒湿室に静置し，その間に打設側面 10×40cm の一面を除く全ての面にエポキシ樹脂を塗布した。

## (2) 試験方法および条件

材齢 35 日目に試験を開始した。表-2 に塩分浸透試験における溶液の種類，濃度および乾湿繰返しのサイクルを示す。浸漬する溶液は，飽和 NaCl (26.5%) または 3% NaCl 溶液とした。飽和 NaCl 溶液は凍結防止剤を想定したものであり，3%NaCl 溶液は海洋環境下を想定したものである。また，乾湿サイクルは，連続浸漬，2 日浸漬 5 日乾燥 (以下 2/5 と称す)，または 4 日浸漬 10 日乾燥 (以下 4/10 と称す) を 1 サイクルとした。試験は実験室内で行い，温度は成り行きとした。試験期間 13，26，52 週に供試体を 10×10×7cm に割裂し，試料を大型カッターで浸透面から 3cm までは 1cm 間隔で，3cm から 7cm までを 2cm 間隔でコンクリートカッターによりスライスし，ディスクミルを用いて 100μm 程度に粉碎した。粉碎した試料は，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」に従い，塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により全塩化物イオン濃度の測定を行った。

## 2.2 実験結果および考察

### (1) 塩化物イオン濃度分布

図-1～図-3 に各配合の塩化物イオン濃度分布を示す。図-1 に示す N45 の塩化物イオン濃度分布に着目すると，試験開始 13 週では塩化物イオン濃度が高い方から飽和 NaCl 連続浸漬，飽和 NaCl 2/5，3%NaCl 2/5 の順となっていることが分かる。飽和 NaCl では乾湿繰返しより連続浸漬の方が塩分が浸透する傾向となった。しかし，試験開始 26 週および 52 週では飽和 NaCl 連続浸漬と飽和 NaCl 2/5 が同程度となり，連続浸漬と乾湿繰返しによる差は認められなかった。また，それぞれの深さにおける塩化物イオン濃度を比較すると，飽和 NaCl の塩化物イオン量は，3%NaCl の 2 倍程度を示すことが明らかとなった。

次に，図-2 の N55 の塩化物イオン濃度分布に着目すると，13 週における 0～1cm の塩化物イオン濃度は飽和 NaCl 溶液連続浸漬が最も高くなり，飽和 NaCl 溶液で 14～18kg/m<sup>3</sup> 程度，3%NaCl 溶液で 4～8kg/m<sup>3</sup> を示した。3%NaCl 2/5 と 3%NaCl 連続浸漬を比較すると，乾湿繰返しを行った前者の方が塩化物イオン濃度は高くなっており，既往の研究<sup>3)</sup>で報告されている傾向と一致する結果であった。

飽和 NaCl 溶液を用いた場合は，13 週では連続浸漬が最も濃度が高いものの，26 週，52 週と進むにつれ，傾向が逆転し，乾湿繰返しの方が濃度が高くなった。なお，26 週で飽和 NaCl 2/5 の濃度が小さくなっており，その原因としてコンクリート中の骨材の配置状況による影響が考えられるが，本研究の範囲内ではその原因を明らかにすることができなかった。52 週においては，飽和 NaCl 溶液を用いた条件では 6cm の位置においても 3kg/m<sup>3</sup> 以上の高い濃度を示しており，塩分の浸透がコンクリート供試体中の浸透可能な深さである 10cm まで既に達したものと考えられる。よって，52 週の飽和 NaCl の測定結果については，一方向の浸透現象としては表現できない可能性があるとして示唆される。

また，B55 の塩化物イオン濃度分布に着目すると，表面付近の塩化物イオン濃度は N55 と同等であるものの，それより深い位置での塩化物イオンは非常に低い傾向を示していることが分かる。2～3cm においては 0～1cm の 10 分の 1 程度の濃度となった。本実験の結果より，飽和 NaCl 溶液という厳しい塩分供給条件下においても BFS は高い塩分浸透抵抗性を有していることが明らかとなった。

さらに，図-3 に示す N65 の塩化物イオン濃度分布に着目すると，13 週では飽和 NaCl 溶液の浸漬条件による違いは見受けられなかったが，26 週以降では連続浸漬の塩化物イオン濃度が最も高くなった。また，飽和 NaCl

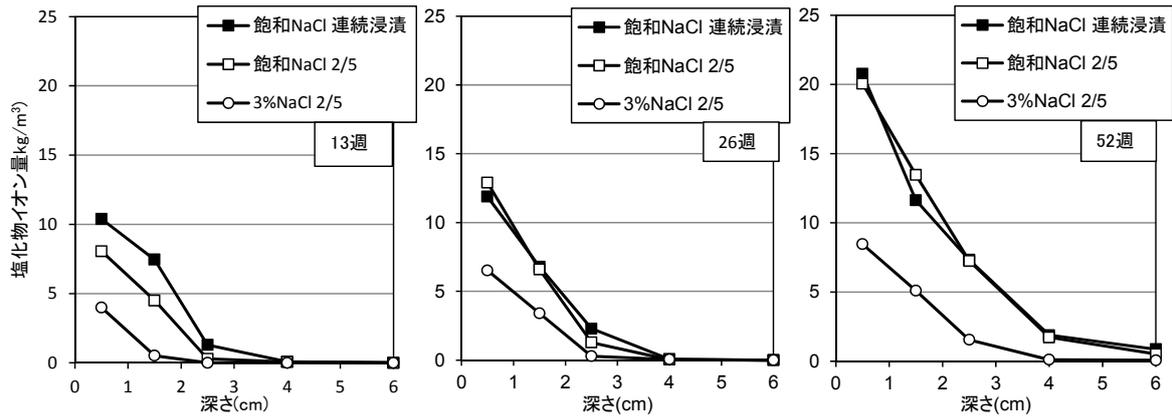


図-1 N45の塩化物イオン濃度分布

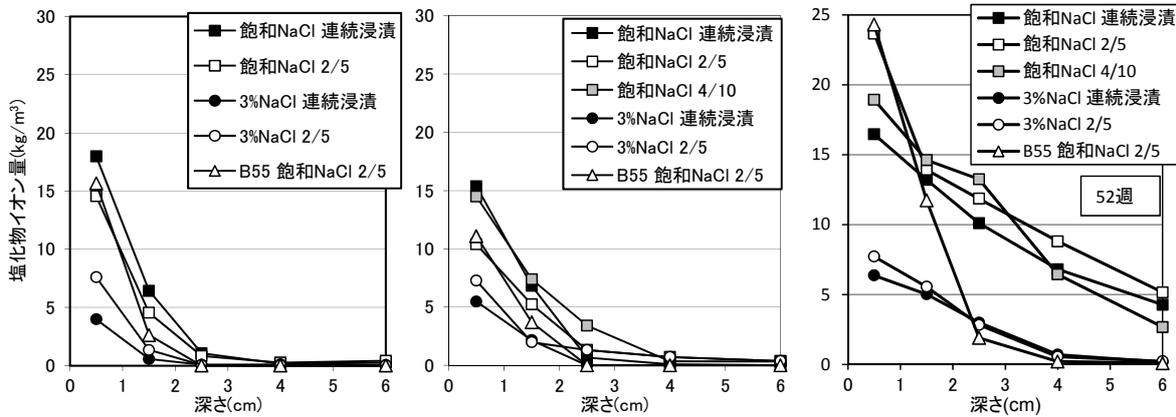


図-2 N55 および B55 の塩化物イオン濃度分布

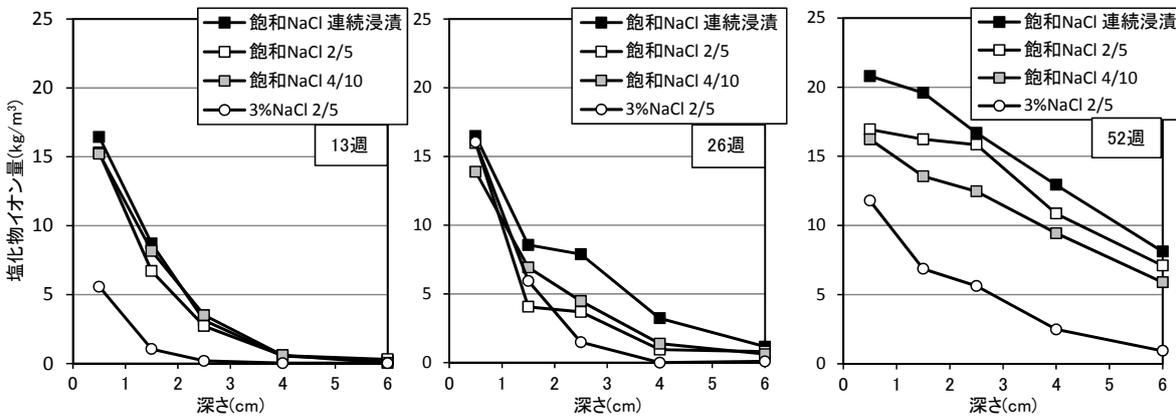


図-3 N65の塩化物イオン濃度分布

溶液の52週については、N55の場合と同様に、6cm位置の濃度が高く、供試体最深部である10cmまで塩分が既に達した状態であったと考えられる。

以上の結果より、NaCl溶液による乾湿繰返しがコンクリート中の塩化物イオン濃度分布に及ぼす影響は、浸漬溶液の濃度およびコンクリートの水セメント比により異なる結果となった。すなわち、3%NaClでは、N55の配合による限られた実験結果ではあるが、乾湿繰返しを行った方が塩化物イオン濃度が高くなる傾向を示した。一方、飽和NaClを用いた場合、N45およびN65では連続

浸漬の方がコンクリート中の塩化物イオン濃度が乾湿繰返しよりも高い傾向であったのに対し、N55では時間の経過とともに乾湿繰返しの方が濃度が高くなる結果を示した。これらの差が生じるメカニズムの解明については、今後の課題である。

(2) 拡散係数および表面塩化物イオン濃度

図-1～図-3に示した結果のうち、代表的な浸漬条件として、飽和NaCl連続浸漬、飽和NaCl 2/5、3%NaCl 2/5について、塩化物イオン濃度の測定値を一次元のFickの拡散方程式の解に最小二乗法によりフィッティングさせ、

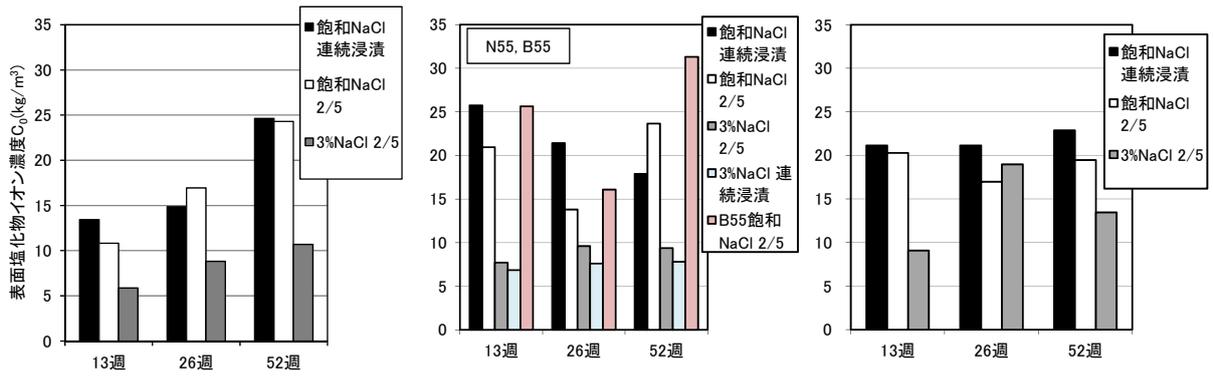


図-4 表面塩化物イオン濃度  $C_0$  算出結果 (kg/m³)

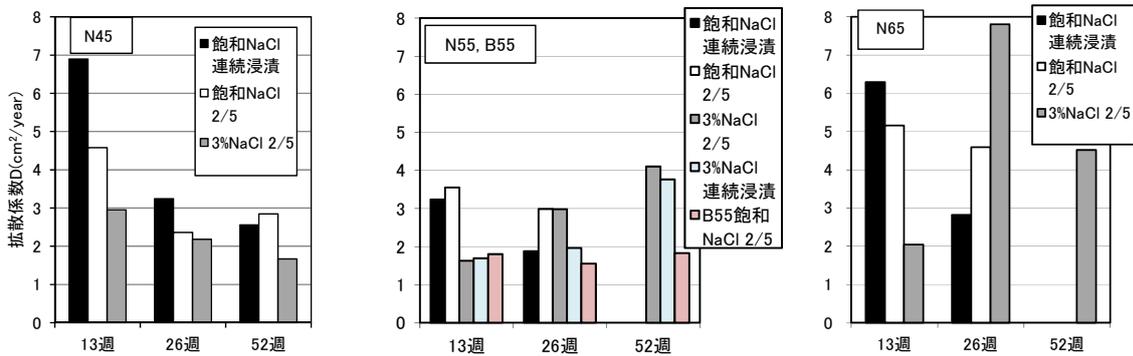


図-5 拡散係数 D 算出結果 (cm²/year)

拡散係数  $D$  および表面塩化物イオン濃度  $C_0$  を算出した。図-4 に各配合における表面塩化物イオン濃度  $C_0$  を、図-5 に各配合における拡散係数  $D$  をそれぞれ示す。なお、(1)で述べた通り、飽和 NaCl 溶液を用いた N55 および N65 の 52 週ではコンクリート供試体の最深部付近まで塩化物イオンが到達したと推測された。このような場合、一次元の拡散現象としては評価できないため、拡散係数  $D$  が極端に大きく算出されたため、図中からは除外している。ただし、表面塩化物イオン濃度  $C_0$  については、塩化物イオンが供試体の最深部に到達したことによる影響は相対的に小さいと考えられるため、図中に示した。

図-4 に示すように、N45 では表面塩化物イオン濃度  $C_0$  は、時間の経過とともに増加する傾向を示し、試験開始から 52 週において、飽和 NaCl 溶液で  $24\sim 25\text{kg/m}^3$  を、3%NaCl 溶液で  $9\sim 10\text{kg/m}^3$  を示した。他の配合については、概ね、13 週の段階から  $C_0$  は、高い値を示した。BFS を用いた B55 は N55 に比べて  $C_0$  が高くなり、52 週で約  $31\text{kg/m}^3$  となった。拡散係数  $D$  については、飽和 NaCl を用いた場合、N45 および N65 では連続浸漬の方が乾湿繰返しよりも高いのに対し、N55 では乾湿繰返しの方が高く、(1)で述べた濃度分布結果と一致する結果が得られた。

### 3. 曝露試験による塩分浸透性状評価

#### 3.1 実験概要

凍結防止剤が散布される状況におけるコンクリートの塩分浸透性状を把握するため、実際に凍結防止剤が散布される路線にあるコンクリート橋 4 橋 (A 橋, K 橋, M 橋, T 橋) の橋台に供試体を設置し、曝露試験を行った。曝露試験に用いた供試体は  $15\times 15\times 25\text{cm}$  の角柱供試体であり、N45, N55, N65 の 3 要因とした。本実験に用いた供試体の配合は表-1 と同様である。浸透面は打設時の底面および型枠側面の 2 面とし、浸透面以外の面はエポキシ樹脂を塗布した。九州内陸部に位置するコンクリート橋の橋台のパラペット前面に写真-1 に示すように供試体を設置した。なお、設置時の上面が打設時の底面となるよう設置した。供試体は 2 月に設置し、翌年 5 月に回収した。供試体を設置した 4 橋が位置する区間の凍結防止剤 (NaCl) 散布量は、舗装面  $1\text{m}^2$  当たり年間  $0.97\text{kg/m}^2$  (直近 3 か年の平均) である。

供試体回収後、図-6 に示す灰色着色部より試料を採取し、塩化物イオン濃度を測定した。以下では最も塩化物イオン濃度が高いと考えられる N65 の結果について述べる。供試体表面から  $1\text{cm}$  ずつスライスし、浸透面からの深さ  $3\text{cm}$  まで測定した。なお、M 橋のみ塩化物イオン量が他の橋に比べ深部まで高い値を示したため、追加で



写真-1 曝露供試体設置状況 (A橋)

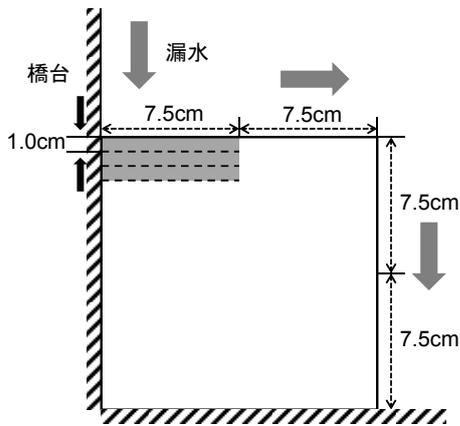


図-6 塩化物イオン量測定用試料採取位置

浸透面から深さ 5cm の位置まで測定を行った。

### 3.2 結果および考察

図-7 に曝露供試体の塩化物イオン濃度分布を示す。図より、K 橋は表面から順に塩化物イオン濃度が低下する傾向となった。次に、A 橋は 0~1cm と 1~2cm の塩化物イオン濃度が同程度となり、2cm より深い位置では低下した。M 橋および T 橋は表面付近の塩化物イオン量が内部よりも低くなる傾向が確認された。このような濃度分布は中性化により塩化物イオンが濃縮した場合にも認められる現象ではあるが、曝露試験の期間は 1 年であり、中性化の可能性は低いと考えられる。また、凍結防止剤による塩害の場合、塩化物イオンの供給が冬期に限定されるため、塩化物イオン濃度のピークがシフトすることが指摘されている<sup>4)</sup>。また、渡辺ら<sup>5)</sup>によれば、冬期以外の季節では凍結防止剤を含まない漏水により、コンクリート表面の塩分が洗い流されることが考えられ、ピーク位置の変動はそれらの複合的要因によるものと推察される。

測定の結果、M 橋が最も塩化物イオン濃度が高く、1~2cm の位置で  $7.6\text{kg/m}^3$  を示した。また、濃度が低い 0~1cm の領域を除外し 1cm より深部のデータを用いて拡散係数を求めた結果、 $17.7\text{cm}^2/\text{year}$  という極めて高い結

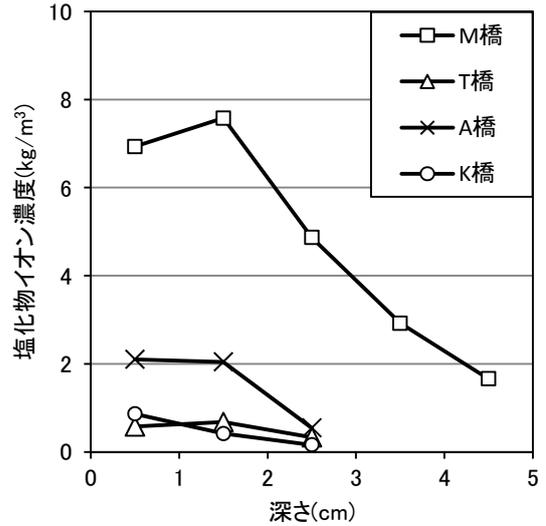


図-7 曝露供試体の塩化物イオン濃度分布



写真-2 M橋における曝露試験状況

果が得られた。これは、2.で行った室内実験に比較しても高い値であり、厳しい塩害環境下であると推察された。M 橋の供試体設置位置は、縦断勾配の低い側の橋台であり、また、他の橋の設置位置と比べ、写真-2 に示すように漏水が多い条件下であった。さらに道路横断方向の中央に設置しているため日射が当たりにくく、漏水が乾燥しにくい状況であったためであると考えられる。M 橋以外にも、A 橋においても表面付近では腐食発生限界塩化物イオン濃度として一般的に使用される  $1.2\text{kg/m}^3$  を超えており、厳しい塩害環境であると考えられる。なお、室内試験と曝露試験との比較検証については、

### 4. まとめ

本研究では、凍結防止剤による塩害を想定し、飽和 NaCl 溶液を用いてコンクリートの乾湿繰返し試験を行った。また、実際に凍結防止剤が散布される環境において曝露試験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 飽和 NaCl 溶液を用いて連続浸漬または乾湿繰返し試験を行った結果、3%NaCl 溶液を用いた場合に比

べてコンクリート中の塩化物イオン濃度が高くなることを確認した。3%NaCl 溶液を用いた場合、水セメント比 55%において、連続浸漬よりも乾湿繰返し（2 日浸漬，5 日乾燥）の方が塩化物イオン濃度が高くなる結果となった。また，飽和 NaCl 溶液を用いた場合には，N45 および N55 では，連続浸漬および乾湿繰返しによる塩化物イオン量の大きな差は認められなかったが，N65 においては乾湿繰返しよりも連続浸漬の方が塩化物イオンは高くなることが明らかとなった。

- (2) 飽和 NaCl 溶液に対しても，高炉スラグ微粉末を混和した場合の塩分浸透抵抗性は，混和なしの場合と比較して非常に高い。
- (3) 曝露試験を行った結果，桁端部で漏水が認められる箇所に設置した供試体において高い塩化物イオン量が認められた。また，コンクリート表面付近の塩分濃度が低い傾向が確認された。
- (4) 曝露試験において最も塩化物イオン浸透量が大きかったコンクリートの拡散係数は，室内試験により得られた拡散係数よりも高い結果が得られた。室内試験と曝露試験の比較検証は，今後の課題である。

#### 謝辞

本研究は，九州大学と西日本高速道路（株）における

「包括的な連携推進に関する協定」に基づいて行った共同研究の成果の一部である。関係者各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 熊谷和夫，高橋秀喜，青山實伸：北陸地方の橋梁けた端部のコンクリート部材の損傷特性と劣化推移，土木学会論文集，Vol.798／VI-68，pp.31-39，2005
- 2) 岩城一郎，子田康弘，大越雅城，上原子晶久，鈴木基行：凍結防止剤により劣化したプレテンションホロスラブ桁橋の詳細調査とその劣化機構の解明，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.53-56，2013
- 3) 来海豊，岩淵研吾：コンクリートへの塩化物の浸透に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.523-528，2001
- 4) 三村陽一，吉武勇，辻和秀，浜田純夫：凍結防止剤によるコンクリート版の塩分浸透に関する解析的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，pp.1231-1236，2005
- 5) 渡辺暁央，小保田剛規，河野成弘：凍結防止剤による下部工の塩化物イオンの浸透性に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.741-746，2008