

論文 凍結防止剤影響下の実構造物の塩分浸透分布に基づく簡易予測手法

矢野 峻規*1・久保 善司*2・橋爪 康憲*3・竈本 武弘*4

要旨: 凍結防止剤によるコンクリート構造物の劣化が顕在化しつつあり、場合によっては深刻な劣化状態に至るものもある。他方で、凍結防止剤散布下にある構造物を対象とした、その浸透予測手法は確立に至っておらず、予測手法の確立が重要な課題となっている。本研究では、凍結防止剤による塩分浸透状況を把握するための調査を行い、調査時点までに浸透した塩分の総量に着目した簡易な浸透予測手法について検討を行った。その結果、検討した簡易手法によって塩分浸透予測が可能であり、4cm より深い位置では、比較的良好に実測値を再現することができた。

キーワード: 塩害, 凍結防止剤, 簡易予測, 塩分浸透

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化要因の一つである塩害における塩分の供給源としては、コンクリート中の塩分の総量規制が施行されて以降、主に外来塩分に限定される。外来塩分の供給については、沿岸部における飛来塩分と、積雪寒冷地域における凍結防止剤の2種類に大きく分類される。飛来塩分に関しては多くの知見が蓄積され、Fickの拡散方程式の理論解を用いたコンクリート中への塩分浸透予測、および塩害の標準的な対策手法は確立されている。他方、凍結防止剤については、塩分の浸透性状が飛来塩分によるものと異なり、漏水や飛沫による局所的浸透の取扱いや、境界条件(表面塩分濃度や散布量)の設定方法など、解決すべき課題が多く、それらを考慮した浸透予測の研究事例は少ない。また、スパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散布量は増加傾向にあり、多量の散布を必要とするケースにおいては、深刻な劣化を生じた構造物も報告されている¹⁾ため、これらの予測手法を確立することが、維持管理上の重要な課題となっている。

既往の研究^{2), 3)}では、拡散方程式における表面塩化物イオン量を凍結防止剤散布量から推定し、調査結果をもとに拡散係数を与えることで、凍結防止剤の特徴を考慮することを試みた例がある。しかし、表面塩化物イオン量の変動する問題を取り扱えず、汎用性およびその設定の合理性については多くの課題が残されている。また、拡散方程式の差分分解を用いて季節的な塩分浸透を考慮した研究^{4), 5)}もあるものの、拡散方程式のパラメータは回帰分析によるもので、それらを合理的に設定するには至っていない。このように、凍結防止剤による塩分浸透は未だ予測手法が確立されていないのが現状である。

そこで、凍結防止剤による塩分浸透状況を把握するための調査を行い、その結果から浸透した塩分の総量(総浸透量)に着目した簡易予測手法について検討を行った。

2. 凍結防止剤散布下の実構造物の調査および結果

2.1 調査概要

凍結防止剤による塩分浸透の実態調査を目的として、凍結防止剤散布地域の橋梁の橋脚下部を対象に、以下の各調査を行った。当該橋梁は凍結防止剤の散布があり、供用年数は23年で、凍結防止剤散布開始から約20年経過している。当該橋梁の橋脚部では、凍結防止剤の影響は外観上においても表れており、変色が認められるもの、鉄筋腐食による錆汁、ひび割れ、浮きが認められるもの、それらが認められないもの(健全)までであった。凍結防止剤による影響が異なる橋脚を選定し、調査を行った。

(1) 外観調査

ひび割れ、漏水の影響による変色(濡れ色や錆汁など)、浮き、剥離などの有無を、目視により確認した。それらの結果に基づき、各橋脚の劣化度(外観評価)を劣化小、中、および大の3段階で評価した(判定基準は、劣化小: 外観変状無し, 劣化大: 上記の確認項目が顕著に表れている, 劣化中: 大小の中間程度)。劣化程度の評価例および、それぞれの外観評価に該当する橋脚数を写真-1に示す。

(2) 表面水分率調査

凍結防止剤による塩分供給は液状であるため、コンクリート表面含水状態は、漏水、すなわち凍結防止剤の影響を把握するための重要な要因となる。高周波表面水分計を用いて、コンクリート表面の水分率を測定した。測定は左右、中央3分割して行い、同一箇所において3点

*1 金沢大学 自然科学研究域環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類准教授 (正会員)

*3 西日本高速道路エンジニアリング関西 道路技術部 (非会員)

*4 西日本高速道路(株) 京都高速道路事務所 (正会員)



劣化：小（2 橋脚） 劣化：中（4 橋脚） 劣化：大（5 橋脚）

写真-1 調査対象構造物（外観評価別）

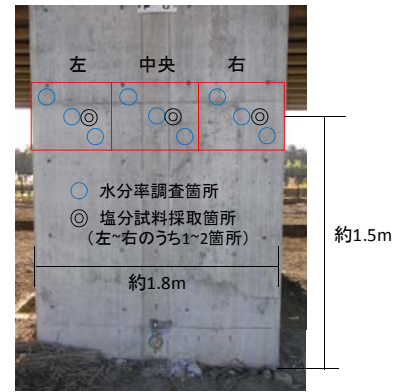


写真-2 調査概要

測定し、その平均値を求めた（写真-2 参照）。

(3) 塩分浸透調査

コンクリート内部への塩分の浸透状況を把握するため、ドリル法による試料採取を行った。試料は、深さごと（表面は 1cm, それ以降は 2cm ずつ）に、各橋脚から 1~2 箇所ずつ採取した。試料は密封し、室内にて湿式法（JCI-SC5）による塩分分析を行った。分析結果から塩分浸透分布を求めた。

2.2 調査結果に基づく塩分浸透の特徴

表面水分率調査の結果を外観評価とともに図-1 に示す（表面水分率は、約 4 年間に年数回程度測定した水分率の平均値）。外観評価において劣化小（健全）と評価された箇所における水分率は 4%前後と低かった。劣化中および劣化大においては、概ね 8%を超えるものが多く、漏水の影響によって表面部の含水状態が高く維持されており、凍結防止剤の影響も大きいものと推定される。なお、漏水経路が各種要因によって変化し、漏水の影響を受けにくくなったなどによって、劣化大および劣化中においても低い水分率を示す箇所もあった。

塩分調査から得られた浸透分布を図-2 に示す。8cm 以深は外挿し、分布の面積を求めた。分布の面積は、今までに浸透した塩化物イオン量の総量、即ち、散布開始から調査時点までの浸透量（以後、総浸透量と称する）である。外観評価（劣化小~大）ごとに示し、劣化中のものは総浸透量の大小で 2 つに分けて示した。また、求めた総浸透量および、その他の調査結果を整理したものを表-1 に示す。

対象橋脚の凍結防止剤散布量は同一であるにもかかわらず、総浸透量に大きな差が生じた。劣化小と評価された箇所においては、凍結防止剤の影響はほとんど受けていない。他方、劣化中および劣化大と評価された箇所においては、全ての箇所凍結防止剤の影響を受けており、総浸透量は 30 kg/m^3 から 100 kg/m^3 を若干上回る範囲であり、平均は 63.4 kg/m^3 であった。劣化中および劣化大のいずれも平均付近の総浸透量のものが多かった。

表-1 調査結果

測定番号	橋脚	劣化度	水分率(%)	総浸透量(kg/m^3)
1	A	大	9.4	49.3
2	A	大	4.7	39.5
3	B	大	9.4	81.6
4	C	大	6.8	46.7
5	D	大	10.6	102.8
6	E	大	8.9	86.3
7	F	中	9.6	65.8
8	F	中	4.2	34.6
9	G	中	9.0	88.8
10	G	中	9.6	57.1
11	H	中	9.6	62.0
12	H	中	6.4	57.3
13	I	中	9.1	67.4
14	I	中	7.5	48.3
15	J	小	4.1	0.9
16	K	小	4.1	2.9

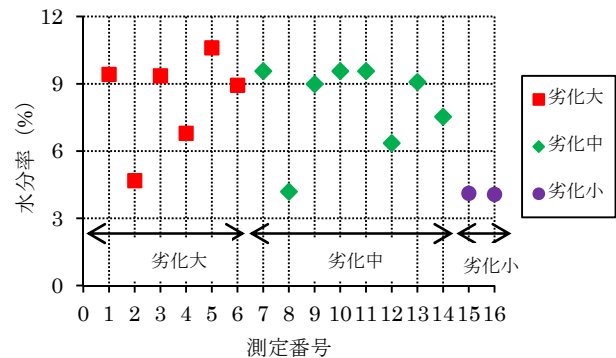


図-1 外観調査および水分率調査結果

浸透分布の形状については、分布の最大値（ピーク）の位置が概ね 2cm 位置（1~3cm の平均）にあった。既往の研究⁶⁾では、表面が最大値となる形状も見られるが、塩分分析のサンプル採取時期が 10 月であり、目的とする橋脚下部においては散布期間外の漏水（雨水のみ）により、表面近傍の塩分が洗い出されたものと考えられる。また、分布の概形については、「最大値は卓越せず、塩化物イオン量の深さ方向の変化が小さいもの（タイプ α ；図-2 中実線）」、「最大値が大きく卓越したもの（タイプ β ；図-2 中破線）」に大きく分類された。今回得られた

調査結果の中で多い形状はタイプ α であった。

3. 総浸透量を考慮した簡易予測手法の概要

3.1 モデルの概要

凍結防止剤の複雑な浸透メカニズムを考慮する予測モデルは存在するものの、現実の境界条件はきわめて複雑であるため、境界条件同定に大きな労力が必要である。また、境界条件のあるケースにおいて設定することが可能であっても、それらの汎用性が乏しいことが短所として挙げられる。そのため、ここでは可能な限り簡易なモデルでかつ、点検データあるいは塩分分析結果などの調査データのフィードバックによって境界条件を簡便に設定することを念頭においた簡易な予測モデルを検討することとした。

そこで、コンクリート中の塩分浸透量（散布開始から調査時点までの総浸透量）に着目し、これらの浸透が平均的に毎年生じるものとした浸透条件をフラックスとして与え、内部での塩分の移動は拡散に従うとした解析モデルによる簡易予測手法を検討することとした。実態的なデータに基づき境界条件を定めるため、一定の精度、少なくとも浸透量は現実のものに対応するモデルとなる。

モデルの概要を図-3に示す。塩分が浸透する期間（12～3月）においては、所定の総浸透量が平均的に流入するとしてフラックスを与えた（図-3： f_{in} ）。それ以外の時期（4～11月）においては、雨水による表面部の塩化

物イオンの流出を、平均的なフラックスとして与え、内部では濃度拡散が生じるとした、Fickの拡散方程式の差分法を用いた（図-3： f_{out} ）。流入と流出の差分が総浸透量に等しくなるように両者を決定した。つまり、境界条件を上記のフラックスで与える以外は、通常の拡散方程式を用いた予測手法となり、塩分浸透の総量を律速とすることが本解析モデルの特徴であり、解析の妥当性は、塩分浸透の総量をパラメータとすることによって担保している。

雨水による流出量については、既往の研究⁷⁾では、凍結防止剤散布直後から次の散布前までに約20～25%の塩化物イオンの流出があるとした報告がある。それを参考にして、流出時のフラックスは総浸透量の20%とした。なお、濃縮現象として炭酸化の影響も考えられるが、漏水の影響があることから、炭酸化の進行は遅いものと推察されたため、今回は影響を小さいものとして塩分濃縮は生じていないものとして解析モデルを構築した。

3.2 解析結果に与える解析パラメータの影響分析

本手法においては、塩分の総浸透量から求められる流入のフラックス、散布期間外の流出フラックス、およびコンクリート品質（拡散係数）が解析パラメータとなる。これらが解析結果に与える影響を分析した。流出時のフラックスはいずれのケースにおいても、上述した総浸透量の20%が一定量で流出するように与えた。拡散係数は、土木学会標準示方書⁸⁾のW/Cによって決定されるものを

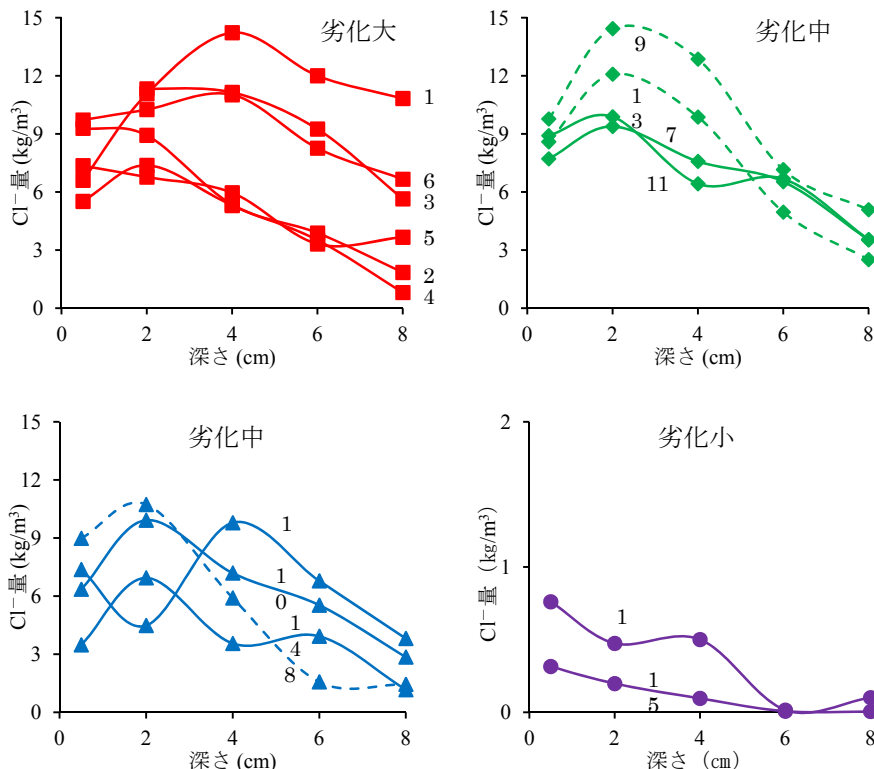


図-2 調査地域の浸透分布

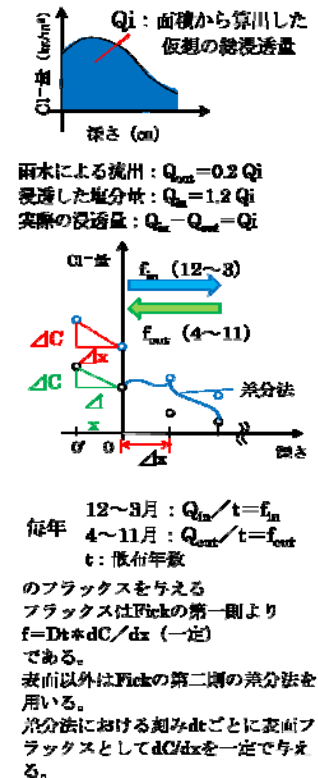


図-3 予測モデルの概要

用いた。

(1) 浸透分布の形状

本手法を用いて得られる浸透分布について、異なる総浸透量における解析結果を図-4に示す。総浸透量は20 kg/m³刻みで与え、W/C=55%で20年後に所定の総浸透量となるように解析を行った。得られた浸透分布の最大値の位置および、分布の形状は総浸透量によって変化せず、総浸透量を変化させても相似な分布形状となる。

また、異なる拡散速度における解析結果を図-5に示す。拡散係数はW/Cより算出し5%刻みで与え、総浸透量は20年で100 kg/m³とした。ただし、本来は同一の環境であれば、W/Cが小さいものほど総浸透量は小さくなるため、図-5の例では、環境条件は異なるものと考えなければならない。同一浸透量の場合には、W/Cを大きくすると、結果の分布形状は最大値が小さく、深い部分への浸透量が増加し、最大値の位置は僅かに深くなった。

(2) かぶり位置の塩化物イオン量の年推移

かぶり位置の塩化物イオン量の1年ごとの推移について、異なる総浸透量におけるW/C=55%の解析結果を図-6に示す。対象橋脚と同一のかぶり深さで検討し、8 cm位置の塩化物イオン量の推移を示した。

10年付近までは指数関数的に増加し、それ以降は比例的に増加する。これは、かぶり位置に塩化物イオンが達した直後は、最大値とかぶり位置の塩化物イオンの傾きが大きいものの、ある程度の浸透期間を経ると、当該位置での濃度差が小さくなり、一定の増加を示すようになったものと考えられる。

また、腐食発生限界塩化物イオン量として、1.2 kg/m³および2.4 kg/m³に達するまでの期間を求め、整理したものを表-2に示す。

腐食発生限界塩化物イオン量に達するまでの期間は、総浸透量の大きいものほど短くなる。総浸透量が多い80~100 kg/m³においては、20 kg/m³の相違は1.2 kg/m³に達するまでの期間に1年の差を生じる。他方、総浸透量が少ない20~40 kg/m³においては、20 kg/m³の相違は1.2 kg/m³に達するまでの期間に7年の差を生じる。いずれの場合にも、今回の対象橋脚の場合では、早期に1.2kg/m³の濃度に達する解析結果となった。他方、2.4kg/m³まではそれよりも時間を要し、総浸透量40kg/m³以上では最大で20年、最小で10年程度を要する解析結果が得られた。また、腐食に達するまでの期間の総浸透量による差は、閾値を2.4 kg/m³とした方が顕著であった。

すなわち、凍結防止剤の影響の大小を表すパラメータとして、総浸透量を考える場合、上記の腐食発生限界塩化物イオン量に達する期間の特徴から、40kg/m³前後で大きく挙動が異なり、これ以上の総浸透量では、早期に限界量に達するとともに、その大小による達する期間の

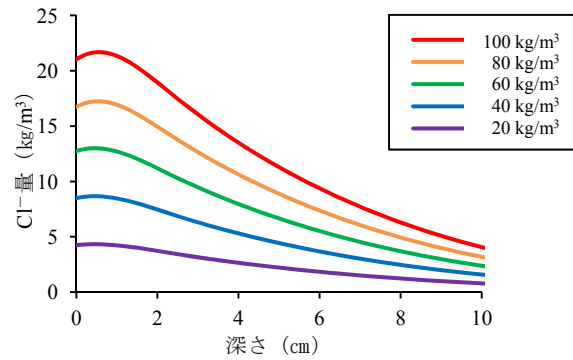


図-4 異なる総浸透量における浸透分布

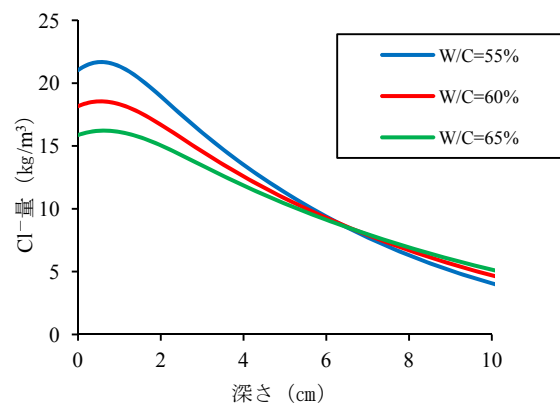


図-5 異なる拡散速度における浸透分布

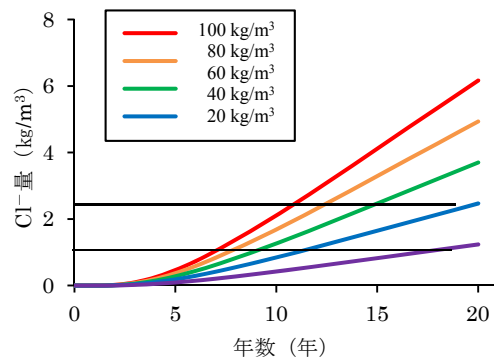


図-6 かぶり位置の塩化物イオン量の年推移

表-2 腐食量に到達する年数

総浸透量 kg/m ³	W/C=55%	
	Cl=1.2kg/m ³	Cl=2.4kg/m ³
20	19.6	34.9
40	12.3	19.6
60	9.7	14.7
80	8.4	12.3
100	7.5	10.8

差異が小さく、凍結防止剤の影響は相当に大きいと考えられる。したがって、今回のかぶり深さにおいては総浸透量 40kg/m^3 を凍結防止剤の影響度の大小の目安と考えられる。

3.3 本手法の実構造物への適用

(1) 浸透分布の再現性

橋脚の塩分分析によって得られた総浸透量に対して、 $W/C=55\%$ として解析を行った。得られた浸透分布を図-7に示す。先述の分類(タイプ α 、タイプ β)ごとに、今回得られたものの中で、凍結防止剤の影響が無いもの(紫)、凍結防止剤の影響があり総浸透量が多いもの(青)、少ないもの(緑)、その間のもの(赤)の4つを選択した。図中の数字は表-1に示した測定番号であり、括弧内は総浸透量を表す(図-8および図-9も同様)。また、実測値と解析値の差を図-8に示す。

表面から2cmまでは、いずれの浸透分布においても解析値と実験値は必ずしも一致せず、相違が認められた。表面付近の差が大きい原因として、実橋脚の塩分浸透は液状で生じるのに対して、解析モデルはすべて拡散による浸透として捉えているため、表面付近の塩分移動を正確に表現することは困難であったものと考えられる。著者らが行った浸透実験⁸⁾(乾湿繰返し試験)においても、深さ2~3cmは液状の浸透が生じたため、本手法によって表面付近(2cmまで)の塩分移動の正確な再現は難しいものと考えられる。他方、表面から4cm以上においては、タイプAでは概ね解析値と実験値は一致し、タイプBでは若干精度が劣る結果となった。

本研究の簡易予測手法の維持管理の補修の要否の判断や腐食発生時期、腐食進行速度の大きな把握などへの適用を考えた場合、塩化物イオン量の推定値として閾値を基準に3水準(1.2kg/m^3 未満、 $1.2\sim 2.4\text{kg/m}^3$ 、 2.4kg/m^3 以上)に分類できる程度、および到達する年数を3~5年程度の精度が要求されるとすれば、上記の相違はそれほど大きくないものと判断される。また、表面付近の塩化物イオン量は季節的に変動し、凍結防止剤の影響度によっても大きく異なるため、表面付近を正確に予測することよりも、かぶり位置付近の精度を高めることが合理的であると考えられる。さらに、かぶり深さにおける塩化物イオン量の推定精度として、橋脚間のばらつき、塩化物イオン量の測定(同定)精度がそれほど高くないことも考慮すると、上記で述べた簡易予測手法の適用範囲においては、本解析の精度に大きな問題はないものと考えられる。ただし、定量的な要求精度については更なる検討を行う必要がある。

(2) かぶり位置の塩化物イオンの推移予測

本手法で比較的良好な近似をしたタイプ α (図-7、および図-8と同一測点)について、かぶり位置(8cm)に

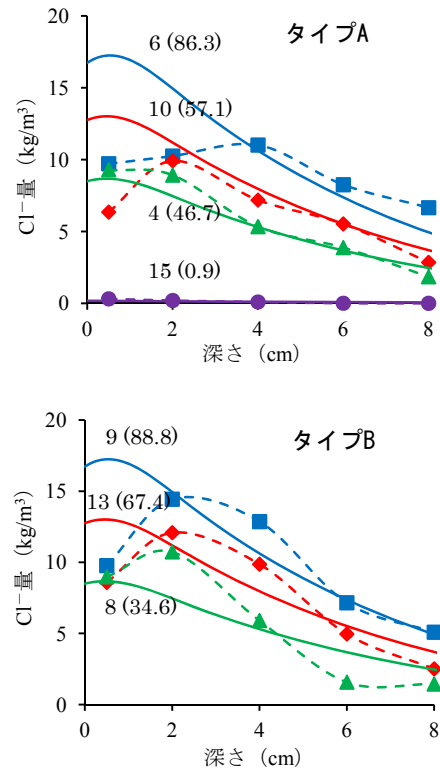


図-7 得られた塩分浸透分布(解析値, 実測値)

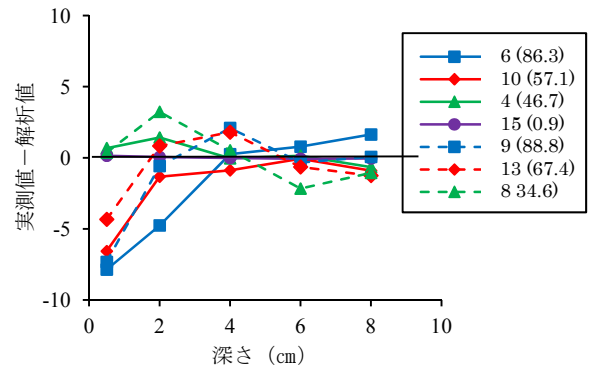


図-8 実測値と解析値の差

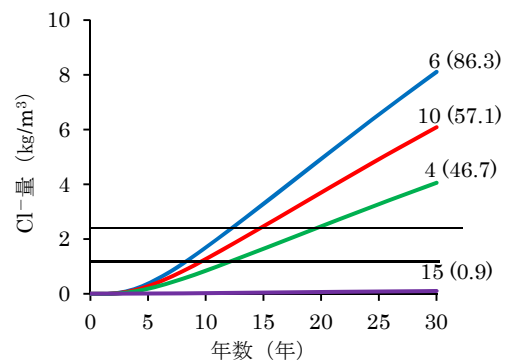


図-9 かぶり位置のCl⁻推移

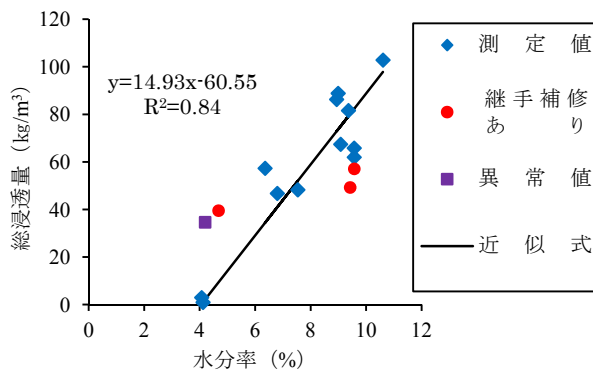


図-10 総浸透量と表面水分率の関係

おける塩化物イオンの推移予測を図-9に示す。今回の対象橋脚の場合、凍結防止剤の影響を受ける橋脚では10年前後で 1.2 kg/m^3 を上回った。他方、 2.4 kg/m^3 では、総浸透量が多い測定番号6のものでは約12年、総浸透量が少ない測定番号4のものでは約20年となった。

(3) 総浸透量の推定方法

本手法において、塩分の総浸透量が重要な解析パラメータとなる。今回は塩分調査による実データから算出したものの、対象となる全ての橋脚において塩分調査を行うことは費用的に困難である。そこで、総浸透量を推定する手法について検討した。

凍結防止剤の塩分供給は漏水によるものであり、表面水分率と凍結防止剤の影響（塩分浸透）の間には関係があるものと推察される。そこで、表面水分率と総浸透量の関係を検討した。表面水分率と総浸透量の関係を図-10に示す。伸縮継手の補修経歴があり、測定位置への水分供給が減少した点（継手補修あり）、および漏水経路の変化などによって水分率の傾向が実際の影響と顕著に異なった点（異常値：外観から過去に凍結防止剤の影響を確認）は、除外し整理した。4%で総浸透量が 0 kg/m^3 になる点を通るよう近似直線を引いた。

水分率が8%を越えると、総浸透量の範囲が大きくなったものの、近似直線の決定係数は $R^2=0.84$ となり、近似精度は比較的良好であった。

したがって、本手法に必要な総浸透量を水分率から大まかに同定することは可能であるものと考えられる。ただし、凍結防止剤散布量、年数、コンクリート品質などの条件は構造物によって異なり、水分率と総塩分浸透量の関係も異なるものと考えられる。各種条件下において同様のデータを収集し、それを分析することによって、本研究と同様の手法を、異なる条件においても適用することが可能となるものと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果を以下に示す

- (1) 対象橋脚の総塩分浸透量の範囲は $30 \sim 100 \text{ kg/m}^3$ の範囲であった。
- (2) かぶり位置の塩化物イオンの推移予測の結果からは、いずれも10年程度で 1.2 kg/m^3 を上回る濃度に達した。 2.4 kg/m^3 を達するまでの期間には、総浸透量による相違が認められた。
- (3) 浸透した塩分の総量に基づく簡易な浸透予測が可能であった。
- (4) 簡易予測手法の再現性を検討したところ、4cmより深い位置では、比較的良好に実測値を再現することができた。

参考文献

- 1) 関口武一, 笹井幸男, 石橋喬康: 塩害を受けたRC床版の劣化度調査と保全工事, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.5, pp.41-49, 1994.5
- 2) 横山和昭, 稲葉尚文, 山根立行: 凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透の予測手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.881-887, 2006
- 3) 酒井秀昭: 凍結防止剤散布地域の橋梁高欄の塩化物イオン量の予測方法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.66, No.3, pp.268-275, 2010.7
- 4) 朝倉啓仁, 林田宏, 田口史雄, 島田久俊: 凍結防止剤の散布期間を考慮したコンクリート部材の塩分浸透解析手法, 土木学会北海道支部論文報告集, 第63号, F-3, 2007
- 5) 遠藤裕丈, 田口史雄, 田畑浩太郎: 凍害の影響を考慮したコンクリートの塩化物イオン浸透予測技術に関する研究, 第86回北海道開発技術研究発表会, 維-18, 2013.2
- 6) 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
- 7) 平野誠志, 石川裕一, 青山實伸, 宮里心一: 凍結防止剤散布による塩化物イオンの季節変動に関する考察, コンクリート工学年次論文集 Vol.32, No.1, pp.815-820, 2010
- 8) コンクリート標準示方書[維持管理編], 土木学会, pp.113, 2007
- 9) 久保善司, 奥裕里衣, 橋本庄一郎, 橋爪康憲, 樺山好幸: 凍結防止剤を想定したコンクリート中への塩分浸透に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.67, V-091, pp.181-182, 2012.9