

論文 凍結防止剤散布の影響を受けた構造物におけるモニタリング結果に基づく凍結防止剤の影響度の推定

井端 志帆*1・矢野 峻規*2・久保 善司*3・橋爪 康憲*4

要旨: 凍結防止剤散布下のコンクリート構造物の合理的な維持管理手法の確立を念頭に、簡易な点検結果からその影響度を推定することを目的とした。影響度評価を行うための点検項目として外観観察、表面水分率に着目し、実構造物における表面水分率測定および塩分分析結果から、外観による劣化度評価、表面水分率データと塩分浸透との関係性について検討を行うとともに、統計的手法を用いてその妥当性について検討を行った。その結果、外観観察および表面水分率から凍結防止剤の影響度（塩分浸透量）の推定が可能であることが明らかとなった。

キーワード: 塩害、凍結防止剤、表面水分率、自然電位、分極抵抗

1. はじめに

我が国において、膨大な数のコンクリート構造物は、高度経済成長期に集中的に整備され、現在では、供用期間の長期化および早期劣化に起因した維持管理を必要とする多くの構造物が存在する。経済的な制約条件を満足しつつ構造物の健全性を保つためには、適切な維持管理が必要であり、そのために劣化状況の把握と劣化予測が必要とされている。

コンクリート構造物の劣化予測は、劣化機構ごとに異なるため、劣化機構を特定した上で行われる。劣化機構には様々なものがあるが、海洋に囲まれ、温帯モンスーンの気候区分に属する我が国の地理的要因によって、塩害は代表的な劣化原因とされる。

塩害の原因となるものには、主に沿岸部における飛来塩分と、凍結防止剤によるものの2種類に分類される。飛来塩分による塩分浸透は、濃度差による拡散現象としてフィックの拡散方程式が適用されており、コンクリート中での物質移動を支配する見かけの拡散係数と、境界条件として表面塩化物イオン濃度を定め、浸透予測が行われている¹⁾。

他方、凍結防止剤による塩害については、スパイクタイヤ禁止以降、凍結防止剤の散布量は増加傾向にあり、多量の散布により深刻な劣化を生じている構造物も報告されている²⁾。凍結防止剤に起因する塩害の特徴としては、塩分供給が冬季に限定されること³⁾、浸透する溶液の塩分濃度が比較的高く、散布量により濃度変化があり、液状での塩分浸透を生じることである。また、漏水経路および量により、同一部材においても、その影響が異なること、さらには、桁端部など、その被害が特定箇所に現れることなども特徴である。

凍結防止剤による塩分浸透予測に関する幾つかの研究・報告はされているものの^{4),5)}、飛来塩分による塩害とは特徴が大きく異なるため、従来の飛来塩分による予測手法を適用することは難しく、また、浸透現象が複雑であるため、未だ確立されていないのが現状である。

鉄筋腐食の進行には水分が必要であり、鉄筋近傍の含水状態が高いものほど腐食速度は大きいとされる。他方、コンクリート細孔中の含水率が高いほど、塩化物イオンの移動速度が速くなるとされている⁶⁾。そのため、表面近傍の含水分布にもよるが、漏水などで濡れやすい箇所ほど腐食が進みやすい可能性が高い。

本研究では、凍結防止剤散布下に置かれている橋脚を対象として劣化調査、および水分率や自然電位、分極抵抗の腐食モニタリングを4年間実施するとともに、凍結防止剤散布による浸透塩分量の測定を行い、凍結防止剤の影響の実態を明らかにした。それらのデータを用いて水分率および塩化物イオン量の関係性を分析し、凍結防止剤の影響度（塩分浸透量）を評価する指標の探求を行うこととした。また、統計解析を用いてデータ分析を行い、凍結防止剤の影響度の推定を統計的に分析することにより、その妥当性の検証を試みた。

2. 凍結防止剤の影響を受けた橋脚の腐食モニタリング

2.1 対象構造物

凍結防止剤散布地域の橋梁の橋脚下部を調査対象とした。当該高架橋梁の供用年数は約23年であり、凍結防止剤散布から約20年経過していた。地面から約1.5m位置の橋脚下部を調査対象とした。凍結防止剤を含んだ漏水の影響の異なる橋脚群から、外観目視においても漏水の影響により鉄筋腐食による錆汁、ひび割れ、浮きが認め

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類准教授 (正会員)

*4 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 (非会員)



図-1 外観評価の例

られるものから、ひび割れ等の変状の認められないものまで、凍結防止剤による影響が異なる橋脚を選定した。なお、凍結防止剤の散布量は全ての橋脚において同一である。

2.2 調査項目

(1) 外観観察および外観評価

ひび割れ、漏水の影響による変色の有無（濡れ色、錆汁等による変色）、剥離・剥落の有無（たたき点検を別途実施）を主に近接目視によって確認した。それらの結果に基づき、各橋脚の劣化程度（外観評価）を劣化大、劣化中、および劣化小の3段階で評価した（劣化小：外観変状なし、劣化大：錆汁、漏水による変色、浮き、ひび割れ顕著、劣化中：大小の中間程度）。劣化程度の評価例を図-1に示す。なお、漏水の影響については、左右、中央の3箇所（図-1参照）に分け、その有無を目視によって確認した。

(2) 表面水分率

高周波型表面水分率計を用いて、橋脚下部（地上1.5m）の左右、中央箇所測定を行った（同一箇所3点測定し、平均値を代表値とした）。ただし、水分率計の測定上限が12%であるため、上限を超えた測定値は12%として扱い、平均値を同様に求めた。

表面水分率は、コンクリート表面部付近の含水状態のおよその大小を評価できるものとし、これにより漏水の大小の影響を把握することとした。

(3) 電気化学的腐食測定

電気化学的測定は携帯型鉄筋腐食診断機（照合電極：銀/飽和塩化銀電極）を用いて、自然電位および交流インピーダンス法による分極抵抗の測定を行った。コンクリート表面を霧吹きで濡らし、コンクリート表面近傍を湿潤状態とし、測定を行った。

自然電位および分極抵抗の測定条件は、ガード対極を使用し、二重対極センサー方式で行い、印加交流電圧（AC）を10mVとした。開始周波数および終了周波数を10Hzおよび20mHzとし分極抵抗を求めた（簡易法）。

自然電位測定によって求められた電位値から腐食状

表-1 自然電位による腐食判定基準

電位(mV vs.Ag/AgCL)	腐食の判定基準
$E > -90$	90%以上腐食無し
$-90 \geq E \geq -230$	不確定
$-230 > E$	90%以上腐食有

表-2 分極抵抗による腐食判定基準

分極抵抗測定値 $R_p(k\Omega cm^2)$	腐食速度の判定
$130 \sim 260 < R_p$	不動態状態（腐食無し）
$52 \leq R_p \leq 130$	低～中程度の腐食速度
$26 \leq R_p \leq 52$	中～高程度の腐食速度
$R_p \leq 26$	激しい、高い腐食速度

態を評価する方法として、ASTM C 876⁷⁾の判定基準を用いた。ASTM規格は、照合電極としてCSE（飽和硫酸銅電極）を用いたものであるが、本研究で用いた飽和塩化銀電極に換算したものを判定基準とした。自然電位の腐食判定基準を表-1に示す。

分極抵抗測定によって腐食速度の判定を行った。分極抵抗による腐食判定基準はCEB（ヨーロッパコンクリート委員会）から提案されている判定基準を用いた。分極抵抗の腐食速度の判定基準を表-2に示す。

(4) 塩分分析

対象橋脚下部（地面から1.5m付近）の2箇所から試料を採取した（1箇所につき2点ずつ）。採取はドリル法によって行い、表層部分は表面から深さ10mmまでを採取し、それ以降は20mmごとに採取した。なお、後述の塩化物イオン量はすべてかぶり深さ（鉄筋位置）に相当する試料（80mm位置：70～90mm）の結果を用いた。直ちに密封式のポリ袋に入れ、塩分分析実施まで密封保管した。採取した試料の塩化物イオン量は湿式法（JCI-SC5）により塩分分析を行った。

(5) モニタリング期間と測定間隔

対象橋脚に対して、電気化学的腐食測定および表面水分率の経時変化を測定した。測定は2010年から開始し、夏季および冬季を含み、年2回以上の測定を4年

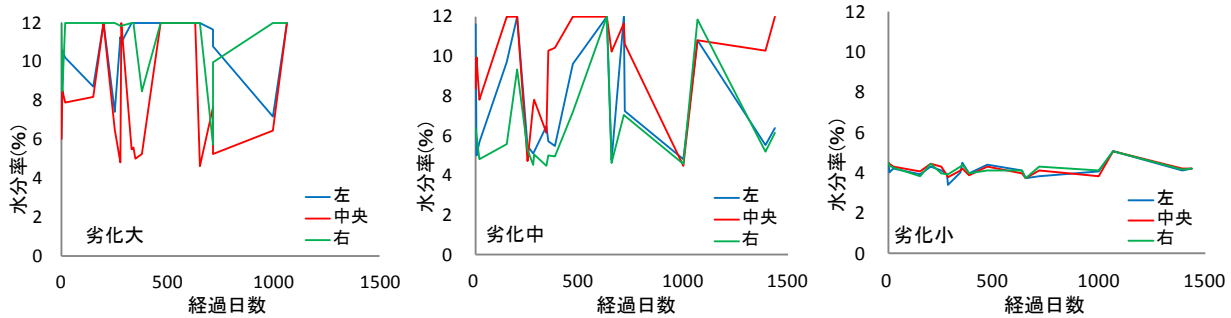


図-2 水分率経時変化

間実施した。劣化の著しいものについては、補修が実施されたため、一部の橋脚については測定期間が約3年までとなったものもあった。

3. モニタリング結果および考察

3.1 表面水分率

モニタリングを行った橋脚のうち、外観観察から劣化大、劣化中、および劣化小と評価された橋脚それぞれにおける代表的な表面水分率の経時変化を図-2に示す。図中には測定位置の左右、中央の区別も示した。なお、後述の3.2および3.3における腐食モニタリング結果は、劣化程度ごとに同一橋脚のものを示した。

劣化程度小と評価された橋脚は、いずれの橋脚、いずれの箇所においても、概ね一定の低い表面水分率を示した。劣化中もしくは劣化大と評価された橋脚は高い表面水分率を示し、漏水量の変動によると考えられる表面水分率の変動が認められた。

他方、劣化中もしくは大と評価された橋脚であっても測定箇所によっては低い水分率を示す箇所もあった。一例を図-3に示す。同一橋脚においても漏水は様に生じるのではなく、上部構造からの漏水経路が異なり、影響も異なる。極端な場合には、漏水の影響を受けない箇所も存在しえる。漏水によって水分が供給される場合には、局所的な影響が大きいたことが確認されると同時に、それらの特徴を踏まえた維持管理対策が必要であるものと考えられる。

3.2 自然電位

3.1 同様、外観観察から劣化大、劣化中、および劣化小と評価された橋脚それぞれにおける自然電位の代表的な経時変化を図-4に示す（各劣化程度の橋脚は3.1と同一、左右、中央区別も同様）。

劣化小と評価された橋脚においては、自然電位は非腐食領域を推移しており、供用期間20年経過後も腐食は生じていないものと考えられる。他方、劣化程度の大きなものほど、自然電位は卑側の値を推移し、劣化中のもものでは、不確定領域または腐食領域、劣化大のもものでは、腐食領域を推移するものが多かった。した

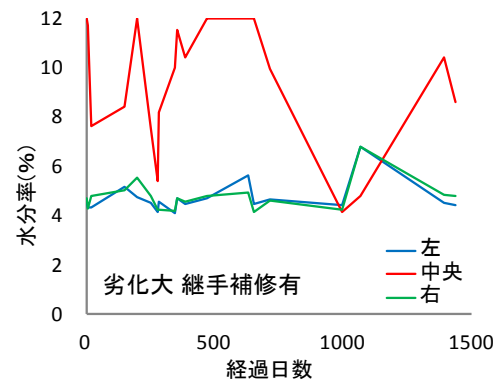


図-3 漏水の影響を受ける橋脚の水分率経時変化

がって、劣化中および劣化大のものでは、腐食が生じている可能性が高い。なお、左右、中央の箇所による相違は、3.1で述べたと同様の理由によるものと考えられる。

3.3 分極抵抗

3.1 同様、外観観察から劣化大、劣化中、および劣化小と評価された橋脚それぞれにおける分極抵抗の代表的な経時変化を図-5に示す（各劣化程度の橋脚は3.1および3.2と同一、左右、中央区別も同様）。

劣化小と評価された橋脚においては、非腐食を示す領域を推移しており、自然電位における評価と同様、腐食は生じていないものと考えられる。劣化大または劣化中と評価されたものでは、腐食を示す領域を推移しており、劣化大のものでは、さらに激しい腐食を示す分極抵抗を示すものもあった。なお、含水状態や温度などの影響で分極抵抗、すなわち、腐食速度が経時的に変動しているものと考えられる。箇所による影響はこれまで述べたとおりであり、劣化程度と腐食速度の関係については、季節的な変動も加わるため、それらの影響を考慮し、腐食状態を把握することも必要であろう。

4. 計測データの分析

4.1 外観評価と表面水分率

外観評価と表面水分率の関係を図-6に示す。表面

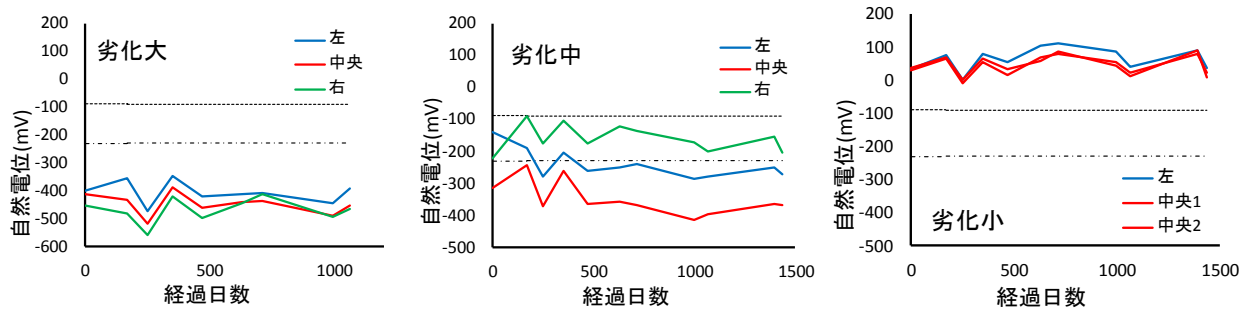


図-4 自然電位経時変化（左から劣化程度大・中・小）

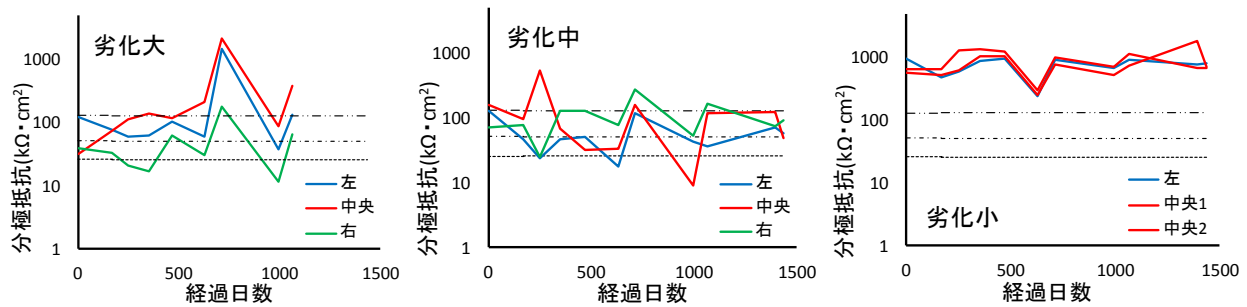


図-5 分極抵抗経時変化（左から劣化程度大・中・小）

水分率は各測定箇所での4年間の計測値の平均値を用い、目視による漏水の有無の区別も同時に示した。

ばらつきは大きいものの、劣化程度が大きいものほど、また、漏水の影響のある箇所ほど、表面水分率は大きい傾向を示した。外観からはほぼ健全と判断される劣化程度小のものでは、4%程度であり、乾燥状態にあるため、凍結防止剤の影響はほとんど受けていないものと推定される。劣化中において表面水分率が小さい箇所があったが、それらは「漏水無し」と判断された箇所であった。他方、劣化大においては「漏水無し」と判断された箇所は無かった。

他方、劣化中および大において、比較的低い水分率を示す箇所があったこと、あるいは水分率にばらつきが生じた原因として、表面水分率の経時変化から、上部構造の継手の補修を実施した橋脚があり、漏水が解消されたこと、あるいは、その他の理由で漏水経路が変化した箇所が生じたなどが推察された。さらに、上述したとおり、劣化中のものでは、「漏水無し」の箇所もあり、比較的低い水分率を示す原因となったものと考えられる。

これらの点を除けば、劣化程度中のものは表面水分率6~8%程度、劣化程度大のものは8%以上となるものと考えられる。外観目視による漏水の影響の有無も凍結防止剤の影響評価においては重要な要因となることが確認された。また、これらの結果から、同一橋脚内の調査においても目視の段階において漏水や変色などから、より影響の大きいと推定される箇所を調査対

象とすることが望ましいものと考えられる。

なお、漏水経路の変化、継ぎ手の補修などの影響を受けている箇所についても、4.1における分析では除外せず、分析を行った。

4.2 外観評価と塩化物イオン量

外観評価と塩化物イオン量の関係を図-7に示す。劣化小であれば、 1.2kg/m^3 を超えるものはない。劣化中または劣化大のものでは 2.4kg/m^3 を超えるものが多い。また、塩化物イオン量の範囲は大きい、この原因は4.1で述べたばらつきの原因と同様であると判断した。なお、「漏水無し」と判断されたものでは、 2.4kg/m^3 を超えるものはなかった。したがって、外観評価によって概ね塩化物イオン量の大小（ 1.2kg/m^3 未満、 $1.2\sim 2.4\text{kg/m}^3$ 、 2.4kg/m^3 より大きい）などの大まかな推定が可能であるものと考えられる。なお、これらの塩化物イオン量は供用20年程度経過したものであるため、凍結防止剤の影響年数等によって異なるため、あくまで同様の使用条件における評価であり、他の条件や年数においては凍結防止剤の影響度として扱われるべきものである。

4.3 表面水分率と塩化物イオン量

表面水分率と塩化物イオン量の関係を図-8に示す。表面水分率が5%以下のものでは、 1.2kg/m^3 を超えるものではなく、「漏水無し」のものでは、それらよりも小さい。他方、表面水分率が8%を超えるものでは、 2.4kg/m^3 を超えるものが多い。ただし、その範囲は大きかった。

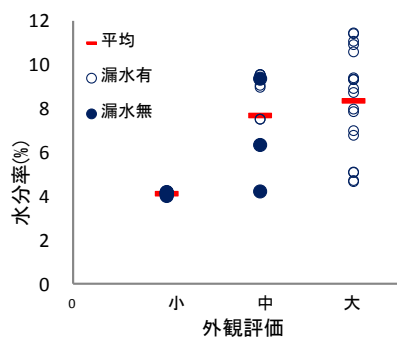


図-6 外観評価と水分率

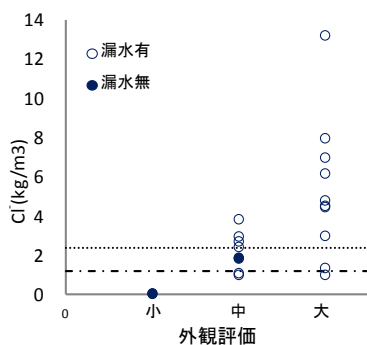


図-7 外観評価と塩化物イオン量

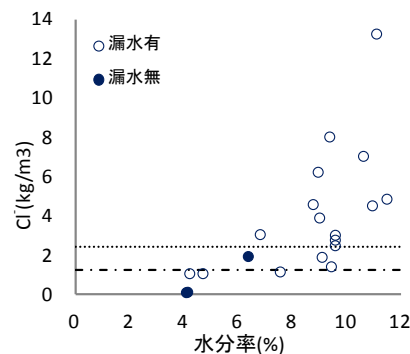


図-8 水分率と塩化物イオン量

4.4 凍結防止剤の影響度推定

ここまでの分析結果から、外観評価、漏水の有無から概ね塩化物イオン量の推定は可能であるものと考えられる。ただし、継ぎ手の補修、漏水経路の変化については、評価結果に誤りが生じる原因となるため、水分率の測定によって情報を補完することでより確度の高い推定結果を得ることが可能であるものと考えられる。

以上の考察に基づき、対象橋脚下部における外観評価、漏水の有無、水分率の区分に基づくかぶり深さの塩化物イオン量（影響度）の推定案を表-3に示す。なお、使用条件や年数の異なる場合には、影響度の大小に置き換えて本推定案を用いることが可能であるものと考えられる。

表-3 塩化物イオン量推定案

Cl ⁻ (kg/m ³)		外観評価		
水分率	漏水	小	中	大
5%以下	無	~1.2	~1.2	/
	有			
5~8%	無	/	1.2~2.4	/
	有			
8%以上	無	/	1.2~2.4	/
	有			

用いて分析を行った。

表面水分率のカテゴリーとしては、4年間の計測データの平均値が5%以下のものを1、5~8%のものを2、8%以上のものを3としてカテゴリー変数を与えた。

外観評価のカテゴリーとしては、劣化小のものを1、中のものを2、大のものを3としてカテゴリー変数を与えた。漏水の有無のカテゴリーとしては、無しを1、有を2としてカテゴリー変数を与えた。

分析を行った結果を表-4に示す。各説明変数と目的変数の相関については、範囲、偏相関係数、カテゴリー数量は値が大きいほど予測値に大きい影響を与えていると解釈される。

外観評価、表面水分率、漏水の順で塩化物イオン量の予測値に与える影響が大きい結果が得られた。

外観評価については劣化程度が大きくなるほど影響が大きい。表面水分率も表面水分率が高いほど影響が大きい。漏水は漏水が無いものほど影響が大きい。漏水のカテゴリー内の数量には大きく偏りがあり、これにより影響度を推定できていない可能性が考えられる。

P値とは、アイテムの効果の有意性の検定に用いられ、P値が0.01以下であれば危険率1%でそのアイテムの効果有と判定される。今回、どの説明変数においてもP値は0.01を下回っており、効果有と判定された。

また、全変動のうちの回帰式で説明できる部分の割合を決定係数といい、大きいほどデータはよくあてはまっていると判断されるものであるが、今回の解析の

5. 統計手法による分析

5.1 数量化理論による統計分析

4で検討した塩化物イオンの推定を、統計的手法を用いてその妥当性の検討を行う。塩分量推定に用いるデータはカテゴリカルデータと位置づけられ、表面水分率や塩化物イオン、外観評価など分析を行うにあたり用いる指標（カテゴリー）が多数存在する。本研究では、多変量解析の手法の一つである数量化理論I類を用いてカテゴリーデータから塩化物イオン量の推定を行うこととした。

数量化理論とはカテゴリカルデータの解析手法の総称であり、その中でも数量化理論I類とは、多くの変数から特定の変数を予測する際に、予測する変数である目的変数が量的変量、予測に用いる変数である説明変数が質的変量のとときに用いる解析方法である。つまり、数量化理論I類とは、説明変数がカテゴリカルデータの場合の回帰分析である。今回、市販のエクセル統計を用いて分析を行った。

5.2 塩化物イオン量の推定

塩化物イオン量を目的変数とし、表面水分率、外観評価、漏水の有無を説明変数として数量化理論I類を

決定係数 (R^2 値) は約 0.53 であり, それほど大きな値を示さなかった。この要因としては, 今回データ数が限られたため, 個々のデータに大きく影響されたものと考えられる。

今回の統計分析から推定された塩化物イオン量 (表-4 のカテゴリ-数量から計算) と, 4.4 における塩化物イオン推定案を比較し, その正誤を表-5 にまとめて示す。劣化大および小のものはおおむね 4.4 での検討と合致した。他方, 劣化中のもものでは, 合致しない場合もあった。この原因としては, 上述したように, 漏水のカテゴリ-内の数量に大きく偏りがあり, カテゴリ-数量が正しく推定されなかったことによるものと考えられる。

以上の解析から, 表面水分率および外観評価をカテゴリ-データとして用い, 統計分析することにより, 塩化物イオン量 (凍結防止剤) のおよその推定が可能である可能性が示唆された。しかし, データ数が限られていることを踏まえると, より正確な推定を行うためには, データの収集を行い, さらなる分析を行う必要がある。

本研究において, 水分率は数年間の測定結果の平均値を代表としたものの, 実橋脚において本論文での検討結果を用いる際には, 漏水等の影響を反映した測定値を得るための工夫 (計測条件; 時期, 回数) が必要であろう。他方, 適切な代表値を得ることが可能となれば, 簡易な点検に基づく凍結防止剤の影響評価を行うことで, より合理的な維持管理に繋がるものと考えられる。

6. 結論

本研究の範囲内で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 漏水の経路によって同一橋脚においても, その影響程度が対象箇所によって異なった。
- (2) 表面水分率, 外観評価の評価により, おおまかな塩化物イオン量 (凍結防止剤の影響度) の推定が可能であった。
- (3) 外観評価によって, かぶり位置の塩化物イオン量は劣化小のものでは 1.2kg/m^3 以下, 劣化大のものでは 2.4kg/m^3 以上と推定された。
- (4) 水分率が 8% 以上の場合には, 劣化大のものが多く, かぶり位置の塩化物イオン量は 2.4kg/m^3 以上かつ, 多量の塩化物イオン量を含むものがほとんどであった。

謝辞

本研究の実施にあたり, 旭化成ジオテック (株), 大同塗料 (株), BASF ジャパン (株), 住友大阪セメント

表-4 塩化物イオン量を外的基準とした解析結果

	カテゴリ	例数	カテゴリ-数量	範囲	偏相関係数	P値
外観評価	1	2	-3.667	5.611	0.577	0.003
	2	8	-1.270			
	3	9	1.944			
漏水	1	3	1.213	1.441	0.169	0.003
	2	16	-0.228			
表面水分率	1	3	-1.198	2.450	0.355	0.007
	2	3	-1.766			
	3	13	0.684			

表-5 推定塩分量の正誤表

CI (kg/m^3)		外観評価		
水分率	漏水	小	中	大
5%以下	無	○	×	△
	有	○	○	×
5~8%	無	△	○	△
	有		×	○
8%以上	無	△	×	△
	有		○	○

(株) より多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

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, pp1017-1022, 2007.7
- 2) 桑原 信夫, 梅村 靖弘, 酒井 秀昭: 高速道路橋における床版の塩化物イオン浸透予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.791-796, 2010.7
- 3) 平野 誠志, 石川 裕一, 青山 實伸, 宮里 心一: 凍結防止剤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, 2010.7
- 4) 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, pp881-886, 2006.6
- 5) 青山 實伸, 松田 哲夫: 凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp807-812, 2004.6
- 6) 日本コンクリート工学協会: セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集, pp147-160, 1996.5
- 7) ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete, 1999