

報告 塩害環境にあるコンクリート道路橋の点検データの傾向分析

中村 浩士*1・新倉 功也*1・江泉 翔太*2・中村 英佑*3

要旨：本報告では、国内の沿岸部に位置する 454 橋のコンクリート道路橋の上部構造の点検データを対象として傾向分析を行った。この結果、初期塩化物イオン濃度は 1980 年代後半以降に竣工された橋梁で小さくなる傾向にあり、表面塩化物イオン濃度は海岸線からの距離が小さい橋梁で大きくなる傾向にあった。また、見掛けの拡散係数と竣工年や供用年数の関係は必ずしも明確ではなかった。これらの分析結果を過去に実施した下部構造での分析結果と比較したところ、初期塩化物イオン濃度は同様傾向を示し、表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数は上部構造において小さくなる傾向にあった。

キーワード：塩害、コンクリート道路橋、見掛けの拡散係数、点検データ、予防保全

1. はじめに

国内では、1980 年代からコンクリート道路橋の塩害による劣化が顕在化したため、最小かぶりの規定の見直しや塩化物総量規制等の対策が行われた。これらの新設橋を対象とした対策は、現行の道路橋示方書¹⁾でも踏襲されている。塩害によるコンクリート内部の鋼材腐食は、コンクリート道路橋の他の劣化要因と比較して進行速度が速く、耐荷性能に与える影響が甚大である²⁾。また、劣化後の補修や補強に多大な費用を要するだけでなく、補修後に再劣化が生じる可能性が高い³⁾。このため、塩害による劣化が生じる可能性がある既設のコンクリート道路橋に対しては、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）⁴⁾」（以下、塩害特定点検）が定められ、予防保全的な観点から塩害の兆候を早期に発見するための点検が行われている。塩害特定点検では、原則として 10 年に 1 度の頻度でコンクリート内部の塩化物イオン濃度を測定し、塩化物イオンの浸透状況を把握するとともに補修の要否を検討することとされている。

塩害特定点検が定められてから約 20 年が経過し、国内のコンクリート道路橋の点検データが蓄積されてきた。国内のコンクリート道路橋の塩害対策の検討や予防保全型メンテナンスを効率的に進めていくためには、この点検データを活用し、コンクリート道路橋への塩害の影響の傾向を正確に把握しておく必要がある。

そこで、本報告では、2005 年度から 2023 年度までの約 20 年間に国内の沿岸部に位置する 454 橋のコンクリート道路橋の上部構造から得られた点検データを対象として傾向分析を行った。具体的には、点検データを用いてコンクリートの初期塩化物イオン濃度、表面塩化物イオン濃度、見掛けの拡散係数を算出し、傾向を分析した。また、本報告で算出したコンクリート道路橋の上部構造

の分析結果について、過去に実施した下部構造での分析結果⁵⁾と比較した。

2. 分析方法

2.1 対象橋梁

対象橋梁は、国土交通省が管理する道路橋のうち、塩害特定点検にもとづいて、コンクリート表面から深さ方向の塩化物イオン濃度の分布が測定されたコンクリート道路橋の上部構造である。

表－1 に、分析対象の橋梁数を現行の道路橋示方書に規定されている塩害の影響地域ごとに示す。分析対象の橋梁数は、RC 橋 114 橋、PC 橋 340 橋の合計 454 橋である。塩害の影響地域は、地域区分（B、C）ごとに、海岸線からの距離にもとづき、対策区分（S、I、II、III）に分類される。点検データの内訳としては、地域区分 B では、RC 橋、PC 橋ともに対策区分 S が最も多く、地域区分 C では、RC 橋は対策区分 S、PC 橋は対策区分 II が最も多く含まれていた。なお、地域区分 A の沖縄については、点検データを入手できなかったため、本分析の対象外である。

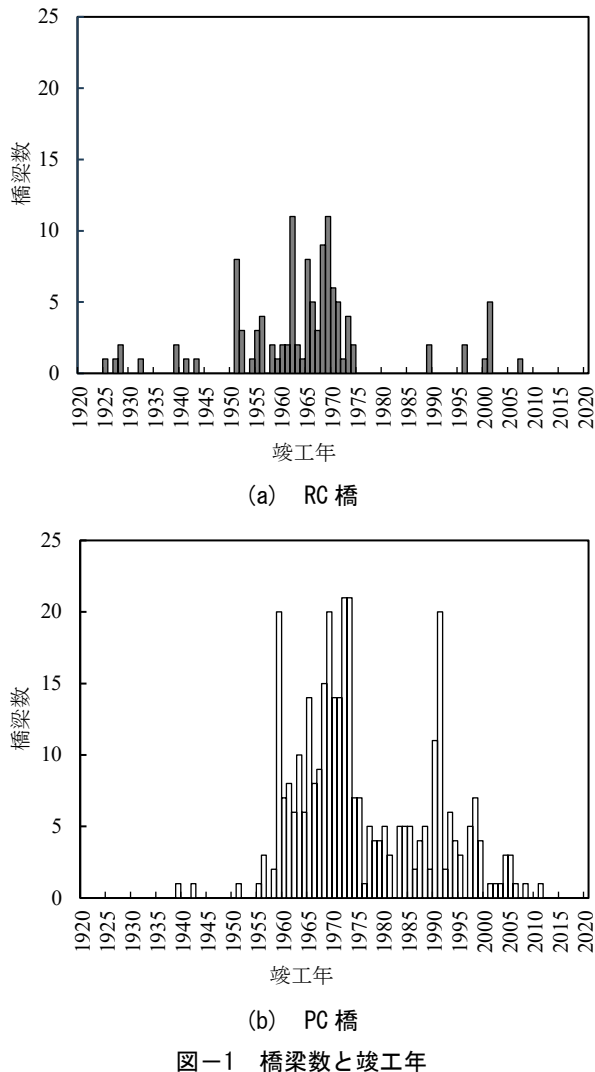
表－1 塩害の影響地域別の橋梁数

地域 区分	地域	海岸線 からの距離	対 策 区 分	橋梁数		
				上部構造		合計
				RC橋	PC橋	
B	北海道、 東北、北陸 の日本海側	海上部、0～100m	S	11	52	63
		100～300m	I	8	30	38
		300～500m	II	1	5	6
		500～700m	III	1	2	3
C	上記以外 の地域 (沖縄を除く)	海上部、0～20m	S	33	47	80
		20～50m	I	12	24	36
		50～100m	II	23	129	152
		100～200m	III	25	51	76
合計				114	340	454

*1 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員（正会員）

*2 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員（正会員）

*3 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員



図－1(a), (b)に、分析対象のRC橋とPC橋の橋梁数を竣工年別に示す。竣工年は上部構造の架設竣工年とした。分析対象の橋梁は、1925年から2011年に竣工されたものである。点検データの内訳としては、RC橋は1950年代から1970年代、PC橋は1960年代から1970年代と1990年前後に竣工されたものが多く含まれていた。

2.2 塩害特定点検の点検データの整理方法

塩害特定点検では、JISA 1154にもとづき、コンクリートコア採取やドリル削孔等により試料を採取し、コンクリート表面から深さ方向の塩化物イオン濃度の分布を測定する。また、得られた深度ごとの塩化物イオン濃度から見掛けの拡散係数等を算出し、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に到達する年や将来の鉄筋位置での塩化物イオン濃度等を予測する。しかし、塩害特定点検の点検データでは、これらの具体的な算出方法が記録されていないため、点検者によって異なる算出方法が採用された可能性がある。このため、本分析では、塩害特定点検の点検データとして記録されているコンクリート表面からの深さ方向の塩化物イオン濃度の分布を用

い、既往の文献(6)を参考として式(1)から初期塩化物イオン濃度、表面塩化物イオン濃度、見掛けの拡散係数を算出した。

$$C(x,t)-C_i=C_0\cdot\left(1-\operatorname{erf}\left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap}t}}\right)\right) \quad (1)$$

ただし、 $C(x,t)$ ：深さ x と供用期間 t の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 x ：コンクリート表面からの深さ (mm)、 t ：供用期間 (年)、 C_0 ：実構造物から採取されたコンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D_{ap} ：実構造物から採取されたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 C_i ：初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 erf ：誤差関数とする。

算出にあたって、初期塩化物イオン濃度については、塩化物イオン濃度の分布において、外部からの塩化物イオンの浸透が認められないとみなせるコンクリート内部の塩化物イオン濃度の最小値とした。具体的には、コンクリート表面と内部の塩化物イオン濃度を比較し、内部において塩化物イオン濃度の変化が一定に落ち着く範囲の最小値とした。表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数については、塩化物イオン濃度の分布を式(1)に最小二乗法でフィッティングして算出した。なお、点検データには、中性化によるコンクリート表層での塩化物イオンの濃縮が認められるもの、初期塩化物イオン濃度の判別が困難なもの、塩化物イオン濃度の分布においてコンクリート表面側よりも内部側の測定値が極端に大きいもの等、式(1)を用いて見掛けの拡散係数等を適切に算出できないものが含まれていた。本分析では、これらの点検データについては不採用とし、適切に算出することが可能な454橋の点検データを用いて分析を行った。

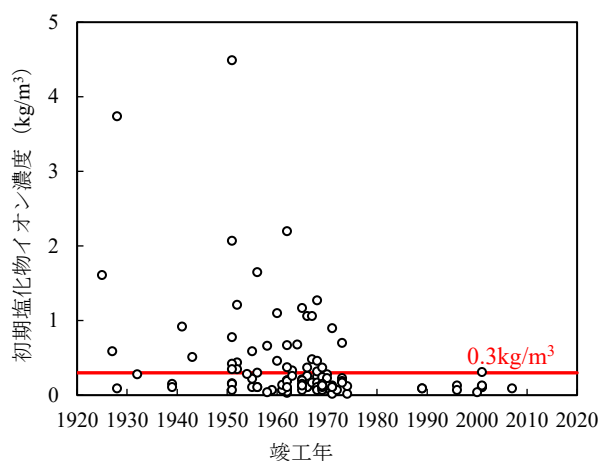
3. 分析結果

3.1 初期塩化物イオン濃度

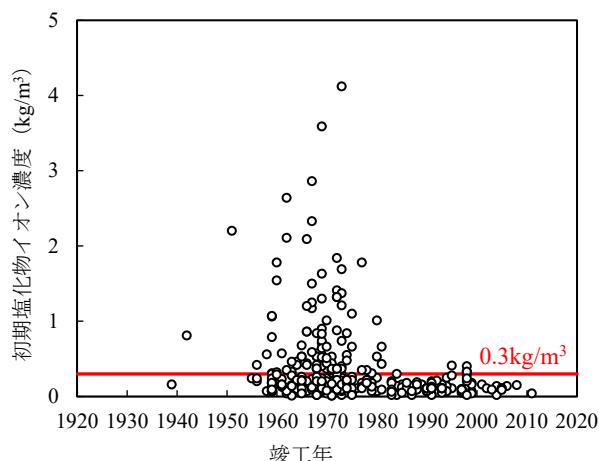
図－2(a), (b)に、RC橋とPC橋の初期塩化物イオン濃度と竣工年の関係を示す。初期塩化物イオン濃度は、RC橋、PC橋ともに1970年代までは現行のJISA 5308に定められるレディーミクストコンクリートの塩化物含有量の上限值である 0.3 kg/m^3 を超えるものが多くあった。これらには最大で 5 kg/m^3 程度のものもあった。しかし、初期塩化物イオン濃度は、1970年代半ば以降に減少に転じ、1980年代後半以降には 0.3 kg/m^3 程度まで減少した。1974年の海砂の使用に関する規制や1986年の塩化物総量規制により、フレッシュコンクリートに含まれる塩化物イオン量が抑制された効果と考えられる。

3.2 表面塩化物イオン濃度

図－3(a), (b)に、RC橋とPC橋の表面塩化物イオン濃度と塩害の影響地域の関係を箱ひげ図で示す。ここで、箱ひげ図は、箱が四分位範囲(全データの25%から75%

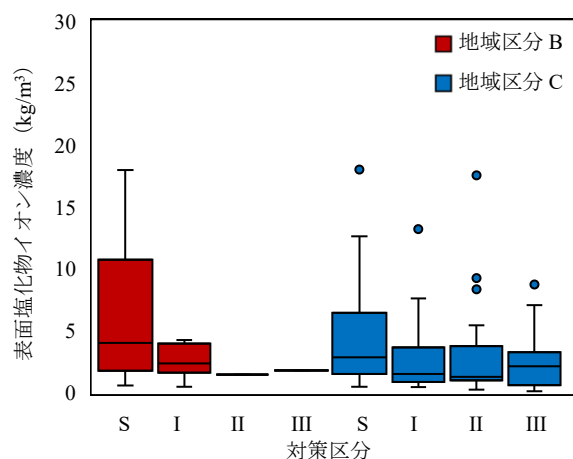


(a) RC 橋

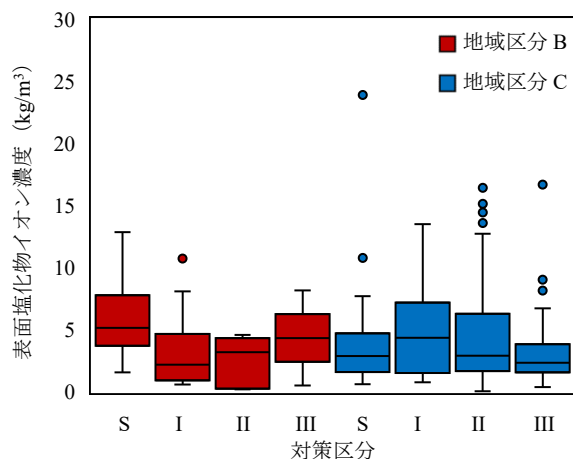


(b) PC 橋

図-2 初期塩化物イオン濃度と竣工年の関係



(a) RC 橋



(b) PC 橋

図-3 表面塩化物イオン濃度と塩害の影響地域の関係

の範囲)を示し、ひげの上下端は外れ値を除くデータの最大値と最小値、箱内の横線は中央値を示している。ひげの長さは四分位範囲の1.5倍とし、ひげの上下端を超えるデータを外れ値として、図中に○印で示している。なお、塩害の影響地域と海岸線からの距離の関係は、表-1に記載のとおり、対策区分SからIIIにかけて海岸線からの距離が大きくなる。

表面塩化物イオン濃度の中央値に着目すると、RC橋、PC橋ともに地域区分Bの対策区分Sで最も大きくなった。また、箱ひげ図の形状に着目すると、RC橋では地域区分Bと地域区分Cの両方において、海岸線からの距離が小さいほど表面塩化物イオン濃度が大きいものが多い傾向にあった。PC橋では、RC橋よりも表面塩化物イオン濃度の外れ値が多くばらつきが大きいので、同様の傾向を明確には確認できなかったが、地域区分Bでは、対策区分S、地域区分Cでは対策区分Iで表面塩化物イオン濃度が大きいものが多い傾向にあった。表面塩化物イオン濃度は、ばらつきが認められるものの、全体

的な傾向としては、海岸線からの距離が小さいほど大きくなる傾向にあると考えられる。

3.3 見掛けの拡散係数

(1) 見掛けの拡散係数と竣工年の関係

図-4(a), (b)に、RC橋とPC橋の見掛けの拡散係数と竣工年の関係を示す。RC橋、PC橋ともに1960年代から1970年代に竣工されたものの見掛けの拡散係数が大きくなる傾向にあった。一方、1980年代以降に竣工されたものに注目すると、RC橋では1960年代から1970年代に竣工されたものと同程度の見掛けの拡散係数のものが散見された。PC橋では、見掛けの拡散係数は突出して大きいものが少なくなり、全体的な傾向として徐々に小さくなる傾向にあった。また、1980年代以降に竣工されたものでは、PC橋ではRC橋よりも見掛けの拡散係数が小さいものが多い傾向にあった。一般に、PC橋では材齢初期にプレストレスを導入するために強度発現が必要とされるため、RC橋よりも水セメント比の小さいコンクリートが使用されることが多い。本分析に用い

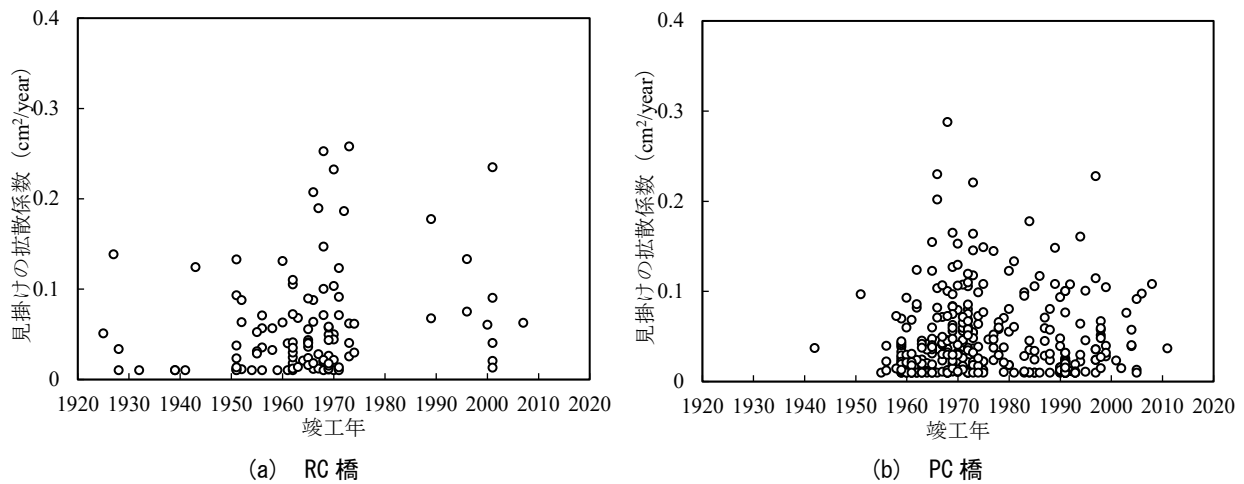


図-4 見掛けの拡散係数と竣工年の関係

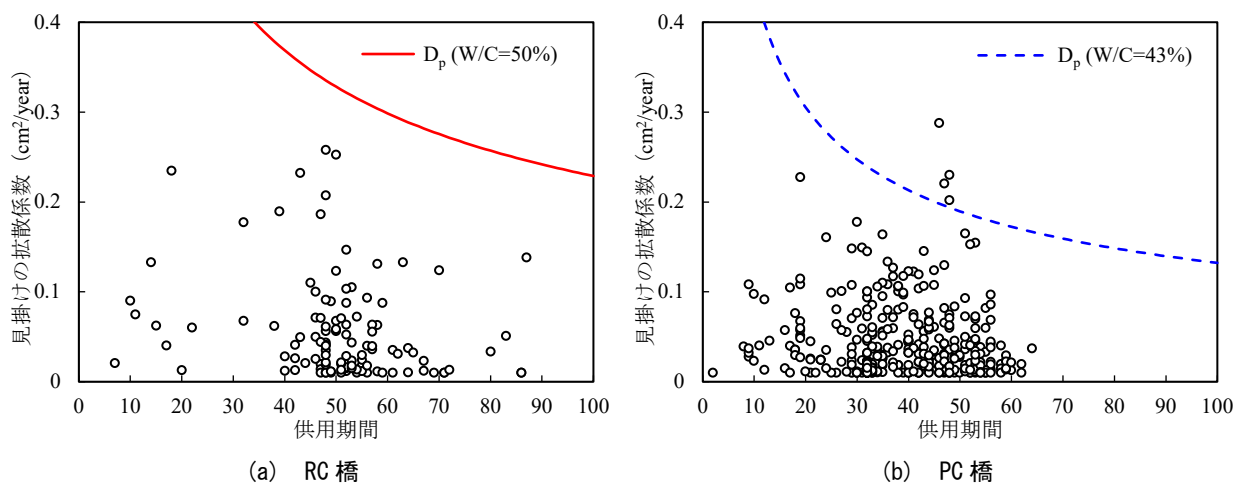


図-5 見掛けの拡散係数と供用期間の関係

た点検データからはコンクリートの水セメント比やセメント種別に関する情報を得ることができなかったが、RC橋とPC橋に使用されたコンクリートの水セメント比の違い等によって、見掛けの拡散係数の傾向に差が生じたのではないかと推察される。

(2) 見掛けの拡散係数と供用期間の関係

図-5(a), (b)に、RC橋とPC橋の見掛けの拡散係数と供用期間の関係を示す。ここで、供用期間は、上部構造の架設年度から塩害特定点検の実施年度までの期間とした。これらの図には、既往の文献 7) を参考として式(2)から算出し見掛けの拡散係数の予測値も示した。

$$D_p(t) = D_r \cdot t^{k_D} \quad (2)$$

ただし、 D_p ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数の予測値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 t ：塩化物イオンの侵入に対する設計耐用年数 (年)、 D_r ：参照見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 k_D ：設計耐用年数感度パラメータ (普通ポルトランドセメント： $k_D=0.52$) とする。

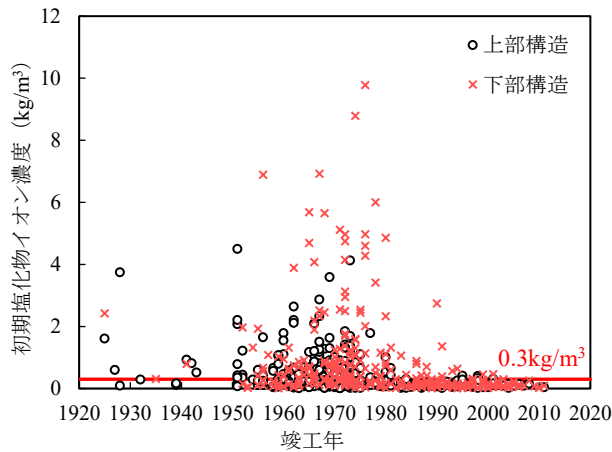
また、 D_r は、既往の文献 7) を参考として、式(3)によって算出した。

$$\log_{10} D_r = 3.4(W/C) - 1.3 \quad (3)$$

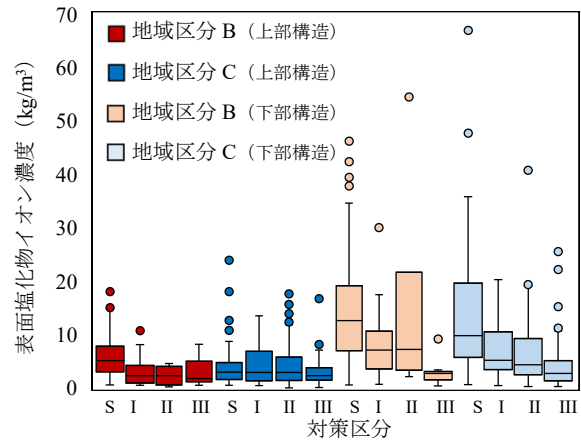
ただし、 W/C ：水セメント比 (現行の道路橋示方書における水セメント比の目安を参考として、RC橋では50%、PC橋では43%) とする。

見掛けの拡散係数の算出結果と式(2)による予測値の關係に着目すると、RC橋ではすべての算出結果が式(2)による予測値を下回り、PC橋では4個を除いてすべての算出結果が式(2)による予測値を下回った。PC橋で式(2)による予測値を上回った4個の算出結果は、前述のとおり1960年代から1970年代に竣工されたものであり、1980年代以降に竣工されたものはすべて式(2)による予測値を下回った。国内のコンクリート道路橋の上部構造における見掛けの拡散係数は、式(2)による予測値よりも概ね小さくなる傾向にあると考えられる。

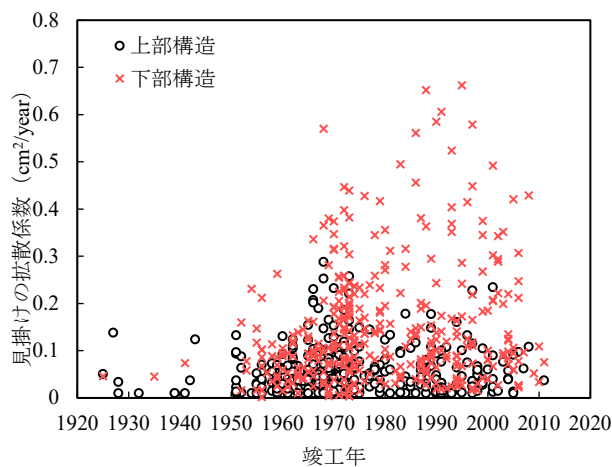
図-5(a), (b)に示されるとおり、式(2)による見掛けの拡散係数の予測値は、供用期間が長いほど、すなわち、コンクリートの材齢が経過するほど小さくなる傾向にある。しかし、本報告で対象としたコンクリート道路橋の上部構造における見掛けの拡散係数と供用期間の關係では、このような傾向を確認できなかった。この原因としては、RC橋の見掛けの拡散係数と竣工年の關係が明確



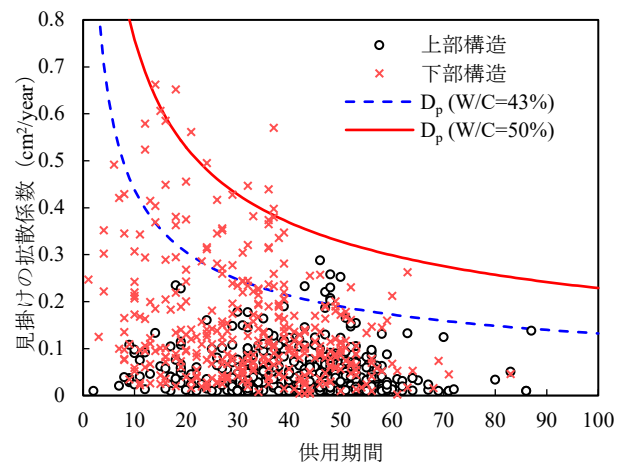
(a) 初期塩化物イオン濃度と竣工年の関係



(b) 表面塩化物イオン濃度と塩害の影響地域の関係



(c) 見掛けの拡散係数と竣工年の関係



(d) 見掛けの拡散係数と供用期間の関係

図-6 上部構造と下部構造の比較

でなかったこと、PC 橋では 1980 年代以降に竣工されたもので見掛けの拡散係数が徐々に小さくなったことが挙げられる。本報告のように異なるコンクリートが使用された多数のコンクリート道路橋を対象とした傾向分析では、見掛けの拡散係数と供用期間の関係は必ずしも明確ではなかった。例えば、既往の文献⁸⁾では、建設約 14 年までの鉄筋コンクリート橋脚の塩化物イオン浸透抵抗性の追跡調査が行われており、供用期間が長いほど見掛けの拡散係数が小さくなることが確認されている。見掛けの拡散係数と供用期間の関係を検証するためには同一構造物での点検データの分析が必要であり、この点については、引き続き点検データを蓄積し、分析することが必要と考えられる。

3.4 上部構造と下部構造の比較

本節では、本報告で算出したコンクリート道路橋の上部構造 (PC 橋, RC 橋を合わせて上部構造として図示) の初期塩化物イオン濃度、表面塩化物イオン濃度、見掛けの拡散係数について、過去に実施した下部構造 (RC 構造) での分析結果⁵⁾と比較し、コンクリート道路橋を構

成する構造ごとに塩害の影響の傾向について把握を行う。下部構造の分析は、日本国内の 369 橋の道路橋の下部構造における塩害特定点検の点検データを対象として行われたものであり、本報告で対象とした上部構造とは別の道路橋の点検データも含まれている。図-6 に、上部構造と下部構造の初期塩化物イオン濃度、表面塩化物イオン濃度、見掛けの拡散係数を比較して示す。

(1) 初期塩化物イオン濃度

図-6(a) の上部構造と下部構造の初期塩化物イオン濃度と竣工年の関係によると、上部構造と同様に、下部構造の初期塩化物イオン濃度は、1970 年代までは 0.3kg/m^3 を超えるものが多かったが、1980 年代以降に減少する傾向にあった。このため、上部構造と下部構造の両方において、1974 年の海砂の使用に関する規制や 1986 年の塩化物総量規制の効果が現れたと考えられる。しかし、原因は必ずしも明確ではないが、1970 年代から 1980 年代に着目すると、上部構造よりも下部構造で初期塩化物イオン濃度が大きくなる傾向にあった。

(2) 表面塩化物イオン濃度

図-6(b)の上部構造と下部構造の表面塩化物イオン濃度と塩害の影響地域の関係によると、ばらつきは認められるが、表面塩化物イオン濃度は、上部構造よりも下部構造で大きくなる傾向にあった。また、下部構造では上部構造と比較して、海岸線からの距離が小さいほど表面塩化物イオン濃度が大きくなる傾向が明確に現れた。下部構造では、上部構造と比較して、表面塩化物イオン濃度の最大値も大きくなる傾向にあり、この傾向は海岸線からの距離が最も小さい対策区分Sで明確に現れた。特に沿岸部や海上部に位置する下部構造では、海からの波しぶき等が直接作用することも起こり得るため、上部構造よりも厳しい塩害環境下で多量の塩化物イオンが供給されたためではないかと考えられる。

(3) 見掛けの拡散係数

図-6(c)の上部構造と下部構造の見掛けの拡散係数と竣工年の関係によると、見掛けの拡散係数は、全体的な傾向として上部構造よりも下部構造で大きくなる傾向にあった。前述のとおり、本分析に用いた点検データからはコンクリートの水セメント比やセメント種別に関する情報を得ることができなかったが、一般に、コンクリート道路橋の上部構造では下部構造よりも水セメント比の小さいコンクリートが使用されるため、上部構造の見掛けの拡散係数が小さくなったのではないかと考えられる。また、原因は必ずしも明確ではないが、見掛けの拡散係数が上部構造よりも下部構造で大きくなる傾向は、1980年代以降に竣工されたもので明確に現れた。

図-6(d)の上部構造と下部構造の見掛けの拡散係数と供用期間の関係によると、上部構造と同様に、下部構造においても見掛けの拡散係数の算出結果は式(2)による予測値を概ね下回る傾向にあった。また、前述のとおり、上部構造では供用年数の増加に伴う見掛けの拡散係数の低下は明確には認められなかったが、下部構造では供用年数が長くなるほど見掛けの拡散係数が小さくなる傾向にあった。このような上部構造と下部構造における見掛けの拡散係数と供用期間の関係の傾向の違いの原因は明確ではないため、引き続き、点検データを蓄積し、分析することが必要と考えられる。

4. まとめ

本報告では、2005年度から2023年度までの約20年間に国内の沿岸部に位置する454橋のコンクリート道路橋の上部構造から得られた点検データを対象として傾向分析を行った。本分析で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 初期塩化物イオン濃度は、1980年代以降に竣工された上部構造で小さくなる傾向にあった。海砂の使用に関する規制や塩化物総量規制の効果と考えられる。
- (2) 表面塩化物イオン濃度は、ばらつきが認められたものの、海岸線からの距離が小さい上部構造で大きくなる傾向にあった。海岸線に近いほど飛来塩分が多量に供給され、厳しい塩害環境で供用されたためと考えられる。
- (3) 見掛けの拡散係数は、上部構造の竣工年や供用期間との関係は必ずしも明確ではなかったが、既存の見掛けの拡散係数の算出式による予測値よりも小さくなる傾向にあった。
- (4) 上部構造での分析結果を過去に実施した下部構造での分析結果と比較したところ、初期塩化物イオン濃度は同様の傾向を示したが、表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数は上部構造において小さくなる傾向にあった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，pp.183-187，2017.11
- 2) 田中良樹，河野広隆，渡辺博志，鈴木雅博：塩害を受けたプレテンション PC 桁の耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.973-978，1999
- 3) 七尾雄作，吉田英二，中村英佑：コンクリート橋の塩害再劣化の事例調査，土木技術資料，pp.8-11，2024.3
- 4) 国土交通省道路局：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案），2004
- 5) 川井菜緒，内田雅一，中村英佑：道路橋下部構造における塩害に対する耐久性の傾向分析，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第24巻，pp.633-636，2024.10
- 6) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp.134-135，2022
- 7) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.170-171，2022
- 8) 内田雅一，江泉翔太，新倉功也，中村英佑：沖縄県におけるフライアッシュコンクリートを用いた海上橋下部構造の耐久性追跡調査，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第24巻，pp.493-498，2024.1