

# 新潟県沿岸部における橋梁の塩害劣化の実態調査と 塩害耐久設計に関する一考察

指導教員：丸山久一

田中泰司

コンクリート研究室：高橋 毅

## 1. はじめに

新潟県を含む日本海側の地域では約30年前から季節風による多量の飛来塩分<sup>1)</sup>や、寒冷地域で使用される凍結防止剤に起因する塩害の問題に悩まされてきた。この塩害劣化の問題に対し、全国の飛来塩分量調査結果に基づき、塩分拡散計算による耐久設計法が構築され、構造物の設計に用いられている。今後の耐久設計の信頼性と合理性をより確実なものとするためには、実構造物の塩害劣化状況と塩分浸透予測に基づく劣化予測との比較検証が不可欠である。そこで本研究では新潟県の沿岸部にある橋梁の塩害劣化状況の調査を行った。次に、調査データを集計・分析し、2012年度版のコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>（以下、コン示）に示された耐久設計手法と実態調査結果との比較を行い、その妥当性について検討を行った。また、塩分浸透解析による劣化予測の精度向上を目指し、飛来塩分量を直接的に反映した境界条件の適用可能性について、検討を行った。

## 2. 調査対象

橋梁の劣化調査は、飛来塩分による塩害に焦点を当てることとし、新潟県沿岸部にある橋梁を調査することとした。調査対象橋梁は新潟県村上市から糸魚川市までの、海岸から500m以内に架かっている道路橋及びボックスカルバートの335橋とした。海岸から500mとしたのは、この距離以上、海岸から離れている橋梁では塩害による補修がこれまでに行われていないことが既往の調査<sup>3)</sup>によって明らかになっているからである。

## 3. 現地調査方法

本研究では、その橋の代表的な劣化度として、主桁及び床版下面の塩害劣化を、独自に設定した評価指標を用いて橋梁のグレーディングを行った。

表-1 塩害劣化のグレーディングと評価指標

評価レベル A (潜伏期~ 進展期)	健全。 (セパ近傍の軽微な劣化は許容 する)
評価レベル 1 (加速期前期)	主桁または床版下面に塩害起 因のひび割れが発生している。 錆汁が認められる。 補修履歴がある。
評価レベル 2 (加速期後期~ 劣化期)	主桁または床版下面から鉄筋 が露出し腐食している。 補修後、再劣化ひび割れが発生 している。
評価レベル 3 (劣化期)	耐荷力の低下が顕著であり、崩 落の危険性がある。

表-1 に塩害劣化のグレーディングと評価指標を示す。この評価レベルは、ひび割れ・剥離といった目視点検によって明確に確認できるものを指標とすることで、観測者による評価の差異を少なくすることに留意して定めた。また、部分的であっても劣化を確認した場合には、その劣化に相当するレベルを橋全体の劣化状態とした。

## 4. 調査結果

### 4.1 調査結果の概要

本研究で調査した橋梁は、PC 橋が 129 橋 (39%)、RC 橋が 162 橋 (48%)、鋼橋が 44 橋 (13%) であった。構造種別で分けると、RC 橋の版桁構造が最も多く 112 橋 (33%)、次いで PC 橋の版桁構造が 70 橋 (21%) であり、この 2 種類の橋で全体の半分以上を占めた。橋長 15m 未満の小規模橋梁の割合は 64%、橋長 15m から 50m の中規模橋梁は 19% であり、これらで大部分を占めた。評価レベル 1 以上の劣化が生じていた橋梁の割合は全体の 68% に達しており、沿岸部では塩害による早期劣化が深刻であることを改めて示す結果となった。

表-2 表面塩化物イオン量および飛来塩分量と海岸からの距離の関係

	海岸からの距離(km)				
	飛沫帯	汀線付近	0.1	0.25	0.5
表面塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	13	9	4.5	3	2
飛来塩分量 (mdd)	12.63	3.17	1.83	1.21	0.8

#### 4.2 現行の耐久設計手法による劣化推定曲線との比較

図-1にPC橋、図-2にRC橋の調査橋梁の供用年数と海岸からの距離を評価レベルごとに色分けしたものと、現行の耐久設計手法を参考にして算出した劣化推定曲線を示す。ここでは、橋名板や過去の資料・地図などから供用年数が取得できた207橋のデータ(PC橋:103橋, RC橋:104橋)を示した。黄色の線は評価レベル1となる供用年数を示している。図-1がプレテンションPC桁(W/C=36%, かぶり25mm)、図-2がRC桁(W/C=55%, かぶり35mm)を想定した曲線を表している。かぶりには、塩害対策指針<sup>4)</sup>以前の道路橋示方書<sup>5)</sup>の仕様規定値を用いた。

塩害劣化は、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4段階に分けることができる。通常、進展期と加速期の境界で、塩害ひび割れが発生すると言われているが安全側の評価となるように、式(1)に示すフィックの拡散方程式の解から得られる鋼材位置における塩化物イオン濃度が鋼材の発錆限界値(以下、 $C_{lim}$ )となったら、すみやかに腐食ひび割れが発生するものとし、評価レベル1になると仮定した。初期含有塩化物イオン $C_{(\alpha, 0)}$ は、安全を見てJIS規格の上限値である $0.3\text{kg/m}^3$ とした。式(1)より、各構造形式の鉄筋位置における塩化物イオン濃度が $C_{lim}$ に達する時刻 $t$ を求め、これを劣化推定年数とした。また、拡散係数 $D_c$ は普通ポルトランドセメントを用いていると仮定し、式(2)より算出した。 $C_{lim}$ は2012年度版のコン示を参考に、水セメント比(W/C)の関数として式(3)により算出した。

$$C_{(\alpha, t)} = C_0 \left( 1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) + C_{(\alpha, 0)} \quad (1)$$

$$\log_{10} D_c = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2)$$

$$C_{lim} = (-3.0 \times W/C + 3.4) \quad (3)$$

表面塩化物イオン濃度としては、表-2に示す、コン示に定められている汀線からの距離(飛沫

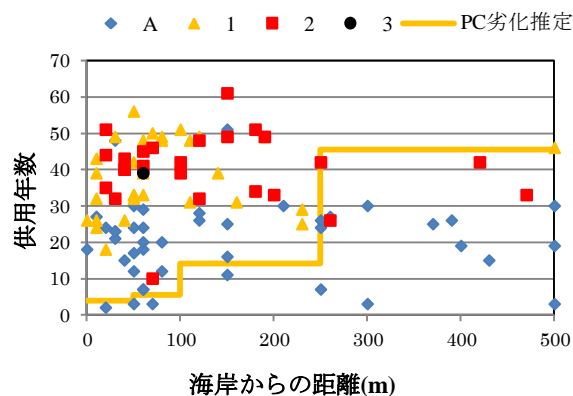


図-1 海岸からの距離-供用年数の関係(PC橋)

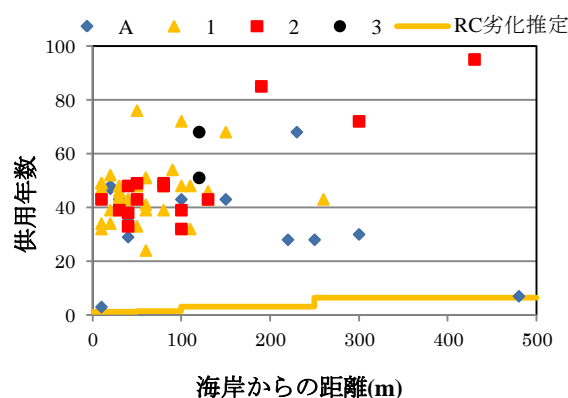


図-2 海岸からの距離-供用年数の関係(RC橋)

帯、汀線付近、100m~250m、250m~500m)に対応する表面塩化物イオン濃度を用いた。

現地調査から得た供用年数-海岸からの距離の関係を見ると、海岸からの距離が近いほど、また、供用年数が大きいほど劣化が生じやすい傾向であることがわかる。海岸から100m以内にある橋は竣工から10年~20年で塩害劣化が生じているのに対し、海岸から100m以上離れたら20年以上で劣化が生じていることから、海岸からの距離は塩害劣化の進展速度に影響していると考えられる。評価レベル1と、評価レベル2には、海岸からの距離や供用年数などに明確な差は現れなかった。

図-1, 2の調査結果には、かぶりの施工誤差やコンクリート品質の影響が含まれているものの、劣化が生じている大半の橋梁の供用年数が、推定劣化年数よりも大きかった。このことより、式(1)~(3)により求められる劣化推定曲線はかなり安全側の評価を与えるといえる。

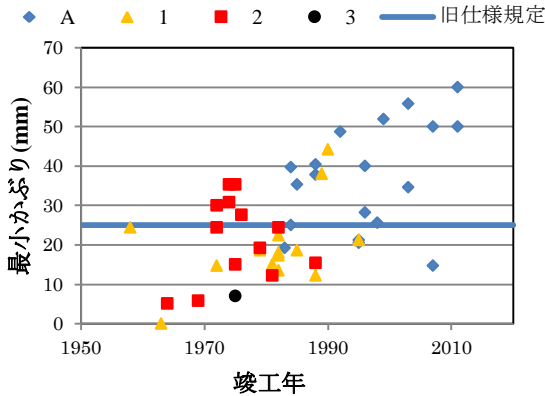


図-3 PC 橋桁の最小かぶり-竣工年の関係

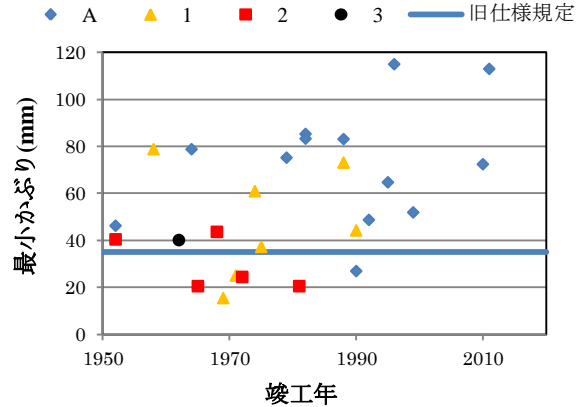


図-4 RC 橋桁, RC 橋脚の最小かぶり-竣工年の関係

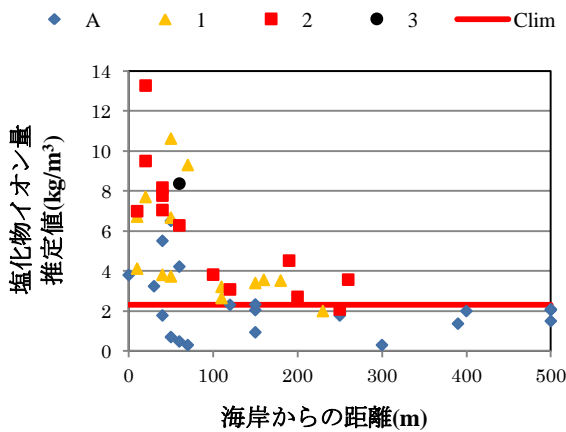


図-5 PC 橋の海岸からの距離-塩化物イオン量の関係

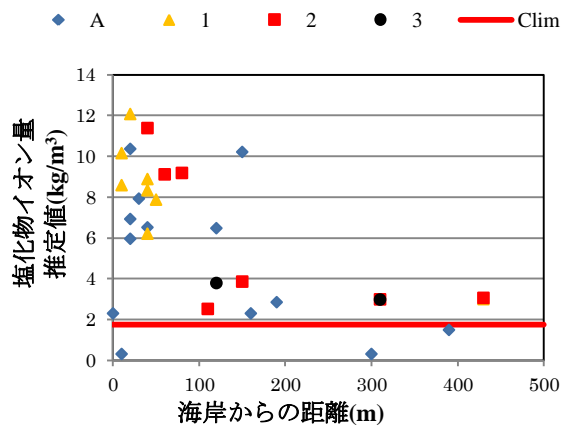


図-6 RC 橋桁, RC 橋脚の海岸からの距離-塩化物イオン量の関係

## 5. かぶり測定調査

### 5.1 かぶり測定調査の概要

図-1, 図-2では, かぶりを一定の値に仮定して評価を行ったが, かぶりは耐久性を支配する因子である。そこで, より詳細に劣化推定を行うため, 電磁波レーダーによるかぶり測定調査を実施した。かぶり測定調査は, 供用年数が明らかとなっていて, 簡易な足場で測定可能な橋梁である58橋を対象とした。調査対象部位は, 床版下面・ウェブ・フランジ・橋脚とし, それぞれ軸方向・軸直交方向のかぶりを測定した。測定されたかぶりの最も小さいものを, その橋の代表的なかぶりともみなし, データ整理を行った。

### 5.2 かぶり測定調査結果

図-3, 図-4に測定したかぶりと竣工年の関係を示す。RC 橋の桁部は供用年数を取得できたものが少なく, 十分数のかぶりデータが得ら

れなかったため, 橋脚部のデータと併せて示す。このグラフから, 時代が新しくなるほどかぶりが大きくなっていることがわかる。また, 高度成長期の橋梁では, 仕様規定で定められたかぶりよりも小さいものも多数確認された。この図より, 大局的にはかぶりが小さいものほど, また供用年数の大きなものほど劣化している割合が大きいといえる。

### 5.3 鉄筋位置の塩化物イオン量の推定

測定したかぶりを用いて, 各橋梁の鉄筋位置における現在の塩化物イオン量をコンクリートの耐久設計法により推定

した。水セメント比は図-1, 2と同様に, PC 橋では36%, RC 橋では55%と仮定した。PC 橋を対象として, 計算により推定された塩化物イオン量と海岸からの距離の関係を図-5に示す。推定された塩化物イオン量は, 海岸からの距離の影響が大きい傾向がある。実際に劣化してい

る橋の塩化物イオン量の推定値の多くは、閾値である  $C_{lim}$  を上回っており、健全な橋梁の塩化物イオン量は多くの場合、 $C_{lim}$  を下回っているの  
で、妥当な推定ができてい  
ると言える。

RC 橋桁や RC 橋脚を対象として、計算により推定された塩化物イオン量と海岸からの距離の関係を示したものを図-6に示す。図-6に示されている結果の約8割がRC橋脚のデータである。橋脚の配筋の特徴として、かぶりが大きいことが挙げられる。劣化推定では塩化物イオン量が  $C_{lim}$  以上に達しているものがほとんどだが、実際には健全であるものが多い。その傾向は、特に海岸からの距離が小さい場合に顕著である。この理由としては、かぶりが大きいために、鉄筋が錆びてから表面にひび割れが現れるまでにかなりの時間を要することが考えられる。そのほかの理由としては、拡散係数の大きなコンクリートに対して、境界条件として表面塩化物イオン濃度を与えた場合に、飛来塩分量以上の塩分が浸透してしまうことが挙げられる。

## 6. 塩分浸透解析

### 6.1 塩分浸透解析の概要

沿岸部の橋梁を対象とした劣化予測と実態調査結果の比較から、塩分浸透計算における境界条件の設定方法を改善することで、予測精度が向上できる可能性があることが示唆された。

本研究で対象としている陸上にある構造物の場合、飛来塩分によって塩分が輸送され、構造物表面に付着し、内部へ浸透することから、より現実に則した形で塩分浸透を推定するために、境界条件として塩分流束を与えて塩分浸透解析を行うことにした。コンクリート中の塩分濃度分布は、拡散方程式を差分法で数値的に計算して求めた。

### 6.2 塩分浸透解析方法

塩分浸透解析では、フーリエ則(式(4))と平衡方程式(式(5))から拡散方程式を導出し、差分法によって各時刻の深さ方向の塩分濃度分布を求めた。

$$J_i = -k \frac{\partial C}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J_i}{\partial x_i} \quad (5)$$

ここで、 $J$ は塩分流束( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{sec}$ )、 $C$ はコンクリート中の塩分濃度( $\text{mg}/\text{cm}^3$ )、 $t$ は時間( $\text{sec}$ )をそれ

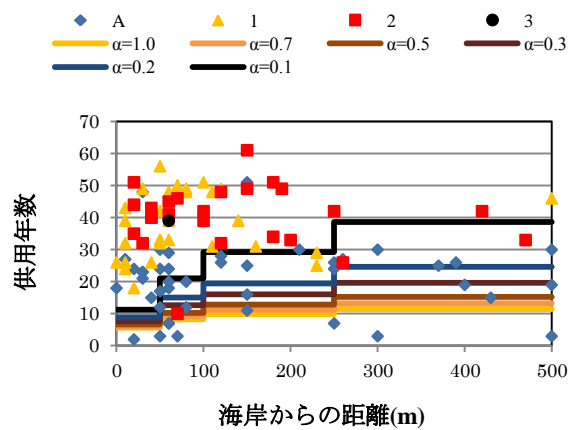


図-7 PC橋の現地調査結果と感度解析結果

ぞれ表している。なお、コンクリートの初期塩化物イオン量は  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$  と仮定した。

境界条件としての、コンクリート表面における塩分流束に関する検討事例が少ないため、ここでは飛来塩分量 ( $C_{air}$ ) の1次関数として仮定した(式(6))。また、この表面塩分流束 ( $J_0$ ) は時刻によらず一定とした。

$$J_0 = \alpha \times C_{air} \quad (6)$$

ここで、飛来塩分量には、表面塩化物イオン濃度 ( $C_0$ ) の算出に用いられた飛来塩分量<sup>6)</sup>の測定結果のうち、北陸エリアのものを用いた(表-2)。境界条件として流束を与えた場合、表層の塩分濃度は時間とともに無制限に増大してしまう。しかし、コンクリート中の塩分量は空隙量に応じた上限値が存在するはずである。たとえば、 $W/C=55\%$ のコンクリートの吸水率は約4.5%である<sup>7)</sup>。このことから一般的なコンクリート配合を仮定し、空隙が塩化ナトリウム(見かけの密度  $1.0\text{kg}/\text{m}^3$  と仮定)で満たされている状態の塩化物イオン量を算出すると、 $27.1\text{kg}/\text{m}^3$ となる。コンクリートの表層はブリージングや壁面効果の影響で空隙率が多少大きくなるを考え、本解析では塩化物イオン量の上限値を  $30\text{kg}/\text{m}^3$  とした。

### 6.3 流束の係数に関する検討

劣化予測計算に用いる流束を決定するために、累積飛来塩分量 ( $C_{air} \times t$ ) と浸透塩分量の比を表す係数  $\alpha$  の感度解析を行った。 $\alpha=0.1\sim 1.0$ の各パターンで解析を行い、現地調査結果と照合し、適切な値を設定することとした。解析条件については、 $W/C$ は、PCの場合36%、RCの場合55%とし、かぶりは旧仕様規定の値を用いた。 $C_{lim}$ は既往の研究<sup>8)</sup>を参考に供試体実験によって求め

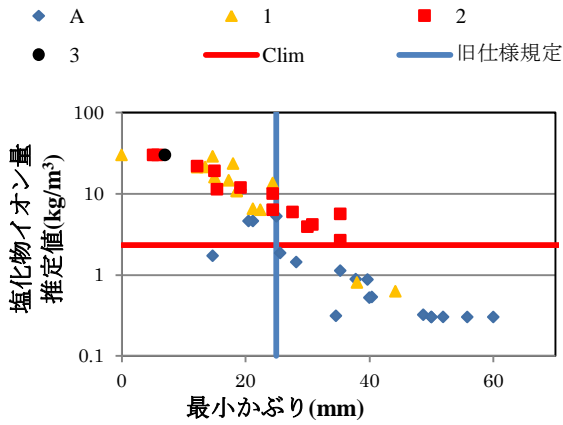


図-8 PC橋のかぶり-塩化物イオン量の関係(解析)

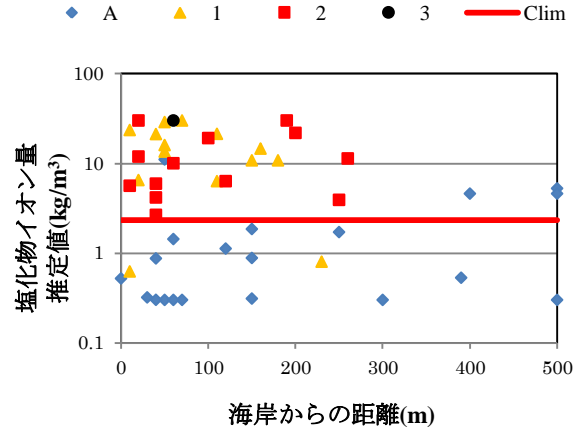


図-10 PC橋の海岸からの距離-塩化物イオン量の関係(解析)

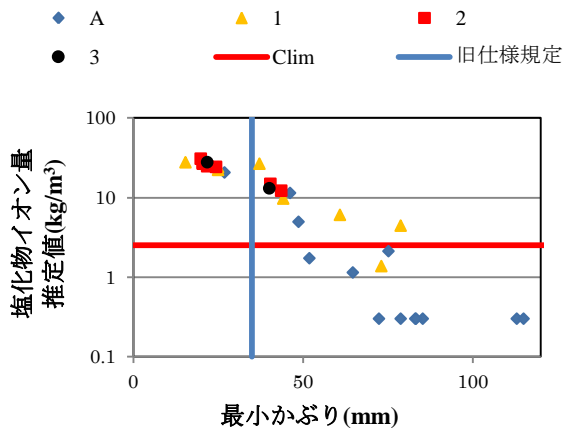


図-9 RC橋・RC橋脚のかぶり-塩化物イオン量の関係(解析)

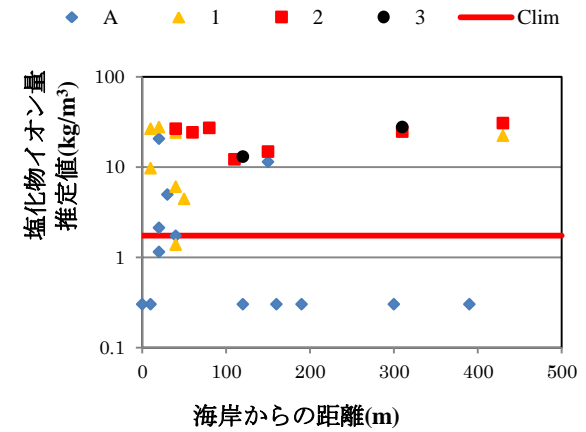


図-11 RC橋・RC橋脚の海岸からの距離-塩化物イオン量の関係(解析)

られた値 (W/C=55%の時:  $C_{lim}=2.5\text{kg/m}^3$ , W/C=36%の時:  $C_{lim}=3.5\text{kg/m}^3$ ) を用いて推定を行った。PC橋を対象とした解析結果を図-7に示す。 $\alpha$ を小さくするほど、劣化に至る供用年数は大きくなるものの、 $\alpha$ の変化に対して劣化に至る年数の変化は小さかった。たとえば、 $\alpha=1.0$ と $\alpha=0.1$ では塩分浸透量の累積値は10倍異なるが、劣化に至る年数の違いは約2倍程度である。飛来塩分量と累積塩分浸透量の関係は、構造物の置かれた環境条件や部位によって大きくばらつくことが知られている<sup>9)</sup>ものの、既往の調査結果は、おおむね $\alpha=0.1\sim 1.2$ の範囲に収まっている。また、 $\alpha$ が1~0.5の間では、解析結果に大きな差異は見られなかったことから、本検討では $\alpha=1$ で解析を行うこととした。 $\alpha=1$ の場合でも、PC橋の劣化推定年数と現地調査の結果は、大きく乖離しないことが図-7からみてとれる。

表-3 数値解析および現行の設計法と現地調査結果との整合率の比較(PC橋)

現地調査結果		健全	劣化
整合率	本解析	80%	93%
	コン示	70%	93%

#### 6.4 塩分浸透解析結果

次に、かぶり測定調査によって求めたかぶりをを用いて、鉄筋位置の現在の塩化物イオン量の推定を塩分浸透解析によって行った。図-8にPC橋、図-9にRC橋の鉄筋位置の塩化物イオン量と最小かぶりの関係を示す。流束一定の境界条件を与えた場合、濃度一定の境界条件の場合と比べて、推定される塩化物イオン量は、かぶりの影響が大きくなる傾向となった。発錆限界値 $C_{lim}$ と現地調査結果との相関性は高く、PC、RCともに $C_{lim}$ を閾値として劣化しているものと健全なものをおおよそ区別することが出来た。

表—4 数値解析および現行の設計法と現地調査結果との整合率の比較 (RC 橋, RC 橋脚)

現地調査結果		健全	劣化
整合率	本解析	69%	94%
	コン示	23%	100%

次に、図-10 に PC 橋、図-11 に RC 橋の鉄筋位置の塩化物イオン量と海岸からの距離の関係を示す。塩分流束を境界条件として与えることによって、特に海岸に近い RC 橋の劣化予測精度が改善され、RC、PC のいずれにおいても海岸からの距離の大小にかかわらず、計算結果と調査結果がおおむね整合する結果となった。表-3 に PC 橋、表-4 に RC 橋における、数値解析およびコン示の耐久設計法により推定された塩化物イオン量と現地調査より得られた塩害劣化度との整合率を示す。これらの表では、現地調査で与えられた評価（健全・劣化）と、解析・コン示により与えられた評価（ $C_{lim}$  以下・以上）の整合率を表している。これらの表より、PC 橋については、解析もコン示も同程度で比較的高い整合率であることから、PC 部材のような低水セメント比のコンクリート部材に対する劣化推定精度はいずれの方法も十分に高いと判断される。一方、RC 橋では、健全な橋の推定において、コン示の方法と数値解析で整合率に大きな差が現れた。コン示の方法では、健全なものでも鉄筋位置での塩化物イオン量が  $C_{lim}$  よりも大きく評価されてしまうケースが多かったため、現地調査による劣化判定と塩化物イオン量の推定による評価の整合性が低くなっている。これに対し、塩分流束を境界条件に与えて浸透解析を行うことで、整合率を約 70% まで引き上げることができた。

以上より、塩害耐久設計において境界条件を工夫する事で、より実態に近い劣化推定が行える可能性が高いことが示された。

### 6.5 塩分浸透解析とコン示の耐久設計法との比較

上記の検討により、塩分浸透解析の有用性を確認することができたので、次に、コン示の耐久設計法と本研究の塩分浸透解析の二つの方法で、最小かぶりを求め、比較を行った。設計供用年数は 50 年とした。計算結果を表-5 に示す。W/C はそれぞれ PC 橋で 36%、RC 橋で 55% とし

表—5 設計供用年数 50 年の場合の最小かぶりの計算値 (cm)

形式	距離(m)	コン示 2012	数値解析
PC	飛沫帯	8.8	4.8
	汀線付近	7.5	4.2
	100~250	4.7	4.0
	250~500	2.6	3.7
RC	飛沫帯	22.0	10.3
	汀線付近	19.5	9.4
	100~250	13.7	9.3
	250~500	9.7	9.2

た。この結果より、コン示の耐久設計法では、最小かぶりは海岸からの距離の感度が大きく、特に RC 橋の場合には、海岸近くでは大きなかぶりが必要となる。一方、解析の結果は、海岸からの距離の感度が少なくなる傾向となった。また、海岸からある程度はなれた場所では、両者の最小かぶりがほぼ同程度となった。このように、実態との整合性を高めるように劣化予測方法を改善することによって、耐久設計の合理化が可能となると期待される。

### 7. まとめ

本論文で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 塩分浸透解析により鉄筋位置の塩化物イオン量を推定した結果、実構造物の塩害劣化状況と塩化物イオン量の推定値との相関性は高く、 $C_{lim}$  を閾値として劣化判定することの妥当性を改めて確認することができた。
- (2) コンクリート表面の塩分浸透流束の検討を行った結果、累積飛来塩分量と浸透飛来塩分量を同程度と考えて塩分浸透解析を行うと、劣化推定結果は実際の劣化状況とおおむね整合することが明らかとなった。
- (3) コン示による PC 橋の劣化予測結果は、実態調査結果との整合率が高かった。一方、RC 部材に対しては塩分量を過大に見積もっていると判断されるケースもあった。これに対して、塩分流束を境界条件とすることで、RC 部材の劣化予測の整合率を高められることが示された。
- (4) 設計供用年数を 50 年として、最小かぶりを算出した結果、数値解析により得られた最小かぶりは、コン示に比べて海岸からの距

離の影響が小さくなった。

#### 参考文献

- 1) 加藤丈和, 松山公年: 道路橋の塩害対策に関わる電気防食の追跡調査, 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, Vol.30, pp.350-353, 2012.11
- 2) 土木学会, 【2012年制定】コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2012.3
- 3) 田中泰司, 丸山久一: 新潟県上越地区における塩害被害橋梁のライフサイクルコストの実態調査, コンクリート技術シリーズ, Vol.98, pp.393-400, 2012.7
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, 1984.2
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III  
コンクリート橋編, 1978.1
- 6) 土木学会: 2007年度版コンクリート標準示方書改訂資料, 2008.3
- 7) 清水五郎, 中田善久, 久保田英樹: コンクリートの吸水性状に基づく中性化深さの予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp616-621, 2012
- 8) 堀口賢一, 丸屋剛, 武若耕司: 腐食発生限界塩化物イオン濃度に及ぼすコンクリート配合の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp1377-1382, 2007
- 9) 佐伯竜彦, 堀岡祐介: 新潟県沿岸の飛来塩分環境とコンクリートへの塩分浸透性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp923-928, 2006