

塩害橋の予防保全に向けた診断手法の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 25

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：木村嘉富、田中良樹、

本間英貴

**【要旨】**

塩害環境下にある橋梁の鋼材腐食に起因する損傷については、従来の研究により劣化予測手法が提案されているが、劣化機構については未だ解明されていないところも少なくはない。予防保全に向けた的確な診断を行うためには一定の信頼性を有する予測手法の確立が急務である。本研究課題では、塩害環境の厳しい場所に建設されている橋梁に着目した調査を通じて、劣化予測手法の検証とさらなる高度化に取り組んでいる。平成 25 年度は、昨年度から継続し、建設中の海中橋脚における初期物性値についての詳細調査や飛来塩分の付着量調査を行うとともに、平成 21 年度より土木研究所が実施してきた沖縄県での塩害調査（塩化物イオン調査、表面塩分拭き取り調査など）と併せて沖縄県が実施してきた塩害橋調査についても整理・分析し結果を取り纏めた。

キーワード：塩害、予防保全、沖縄、劣化予測、鋼材腐食

**1. はじめに**

塩害環境下にある橋梁の鋼材腐食に起因する損傷については、従来の研究により、コンクリート内部への塩分浸透や鉄筋の腐食進行といった劣化の予測手法が提案されているが、未だ解明されていないところも少なくはない。予防保全に向けた的確な診断を行うためには一定の信頼性を有する予測手法の確立が急務である。このためには、個別の橋梁に関して、劣化に関する初期の品質・現地の環境条件はもとより長期にわたる状態観測結果が不可欠となるが、そのような一貫したデータ蓄積はほとんどされていない。したがって、橋梁の建設時から必要な初期データを獲得しつつ、あわせて長期にわたる状態観測結果が得られる環境整備を行うとともに、多数の実橋梁に対する臨床的アプローチにより塩害実態に関するデータを集積・分析し、既往の劣化予測手法の検証及び高度化について検討を行う必要がある。

土木研究所は、平成 21 年度より沖縄県の塩害環境下の橋梁を 100 年以上にわたって供用するための維持管理手法を確立することを目的として、同県と協力協定を結んでいる。この協力協定の下で、沖縄県が多数保有している離島架橋を中心に調査フィールドとして研究を進めることとした。

本研究は平成 21 年度から開始し、塩害で撤去された橋梁を用いた鉄筋腐食量調査をはじめ、沖縄県内の離島架橋を中心に既設塩害橋の鉄筋腐食状況調査やコア採取による塩分浸透調査、また架橋環境を把握したうえでガーゼ拭き取り法による飛来塩分付着状況等を調査するとともに、建設中の離島架橋において塩化物イオン濃度な

どの初期物性値調査を実施してきた。

平成 25 年度は、建設中の海中橋脚における初期物性値の経年変化把握や上部工の付着塩分量についての非破壊検査による新たな調査手法の検討を実施するとともに、過年度から土木研究所が実施していた塩害に関する実態調査に加え、沖縄県が実施してきた塩害橋調査結果を整理分析し、塩害に関する維持管理手法の高度化を目的とした、塩害橋の劣化予測手法の検討を実施した。

**2. 建設中の海中橋脚での初期塩分経過調査**

**2.1 調査目的**

予防保全に向けた的確に塩害対策を行うためにはコンクリート内部への塩分浸透メカニズムの把握が必要と考えられる。それには、個々の橋梁に関する初期の品質・現地環境と長期にわたる状態観測が不可欠である。

本調査は、沖縄県の建設中の離島架橋を対象とし、過年度に実施した建設当初の初期物性値調査結果に対して、数年経過した時点における初期データの経年変化の把握を目的として調査を実施した。

**2.2 調査対象橋梁**

対象橋梁の伊良部大橋は、沖縄県の宮古島と伊良部島を結ぶ本橋部の橋長 3、540m の離島架橋である。平成 18 年に着工し平成 27 年 1 月の完成を目指して現在建設中である。架橋位置を図-2.2.1 に示す。

なお、伊良部大橋の P21 橋脚および P41 橋脚は、経年的な材料物性値の変化をモニタリング可能とするため、継続的に橋脚からのコア採取が可能かつコア採取による

橋脚へのダメージを軽減するためにコンクリートかぶりを120mm増厚している(図-2.2.2)。



図-2.2.1 調査対象橋梁位置図

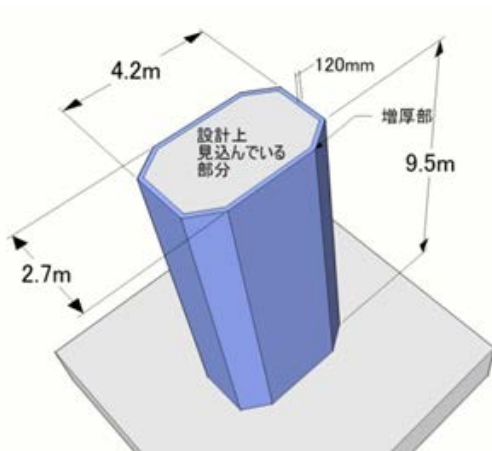


図-2.2.2 伊良部大橋橋脚 (P21)

伊良部大橋の下部構造には、長期耐久性を目的として、遮塩性向上のためのフライアッシュを混和したコンクリートが使用された。フライアッシュの配合については、事前に室内配合試験、実機配合試験により選定を行っている<sup>1)</sup>。

### 2.3 初期物性値調査(経過調査)

伊良部大橋 P21 橋脚については、平成 22 年 5 月にコンクリートが打設され、7 ヶ月後の平成 22 年 12 月に橋脚の増厚したかぶり部分からコアを採取し、コンクリートの初期物性について調査を行っている。主に、外来塩分の内部浸透に影響を及ぼす物性を調査対象とし、以下の調査を実施した<sup>2)</sup>。

- 1) 圧縮強度試験(静弾性係数も測定)
- 2) 塩化物イオン濃度(JIS A 1154 全塩化物イオン)
- 3) 急速塩分浸透性試験
- 4) 中性化深さ
- 5) 細孔量測定
- 6) 細孔径分布

平成 25 年度は、コンクリート打設から 3 年 8 ヶ月後の平成 26 年 2 月に前回調査の近傍にてコア採取を行い、初期物性値の経過状況を確認した。なお、コアは H. W. L から +5.6m (No.1)、+3.3m (No.2)、+1.0m (No.3) の位置の 1m 四方内から採取した。採取位置を図-2.3.1 に示す。

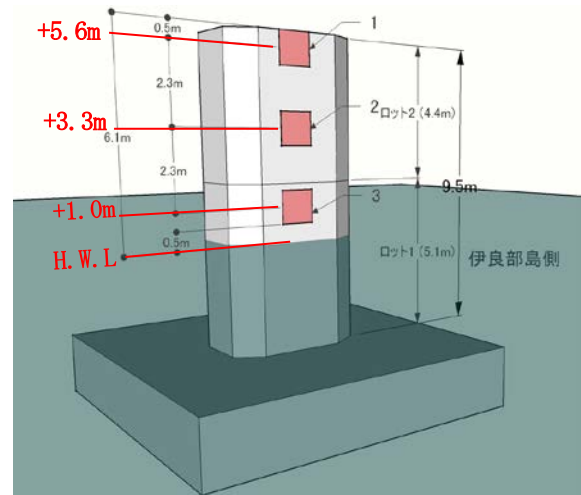


図-2.3.1 コア採取位置図

採取したコアを用いた調査項目は以下のとおりである。

- 1) 圧縮強度試験
- 2) 塩化物イオン濃度
- 3) 中性化深さ

#### 2.3.1 圧縮強度・静弾性係数

上記の No.1、No.2、No.3 から採取したコアを  $\phi 50 \times 90\text{mm}$  に成形し、JIS A 1108、JIS A 1149 に準拠して試験を行った。試験結果について、採取したコアを用いた圧縮強度の平均値について、平成 22 年度調査結果と併せて図-2.3.2 に示す。

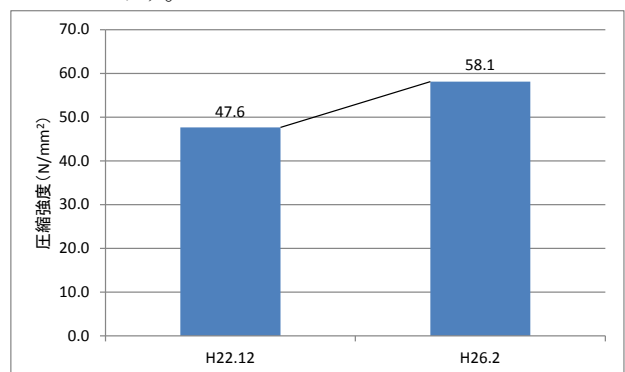


図-2.3.2 圧縮強度の推移

圧縮強度については、前述のとおり、伊良部大橋橋脚にはフライアッシュが混和されているため、平成 22 年度

調査（コンクリート打設後7ヶ月）後もコンクリート強度の発現が継続していたことが伺える。

また、圧縮強度と静弾性係数の関係について道路橋示方書<sup>3)</sup>による算出値にプロットしたところ、図-2.3.3に示すとおり、圧縮強度の増加に対して静弾性係数は微減となり、道路橋示方書の算出値からは若干低い値となった。

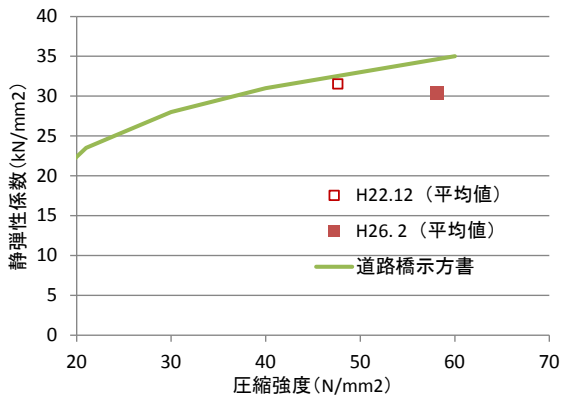


図-2.3.3 圧縮強度と弾性係数の関係

### 2.3.2 塩化物イオン濃度

高さ方向に塩化物イオン濃度の浸透状況を把握するため、図-2.3.1に示すNo.1～No.3の位置で塩化物イオン濃度計測用のコアを採取した。コアは各箇所よりφ25mmの小径コアを5本採取し、表面から40mmまでは10mm間隔でスライスし、40mm以深は20mm間隔でスライスした。スライスした試料を用いて粉砕、抽出、濾過を行い、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠して塩分分析を行った。

なお、前回調査時はコアを20mm間隔でスライスしていたが、表面近傍付近の状況を詳細に確認するため、今回は10mm間隔でスライスすることとした。

図-2.3.4はP21橋脚の初期と約4年後の塩化物イオン濃度の分布を示す。

約4年経過した表面近傍の塩化物イオン濃度は初期からさらに高く変化した。表面から20mm以深の塩化物イオン濃度は初期とほぼ同様であった。

また、塩化物イオンの浸透が表面近傍で顕著に認められたことから、打設後約4年経過したP21橋脚から採取したコアを高分解能の分析可能な電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)にて塩化物イオン濃度の計測を行った。

EPMAによる測定元素は、炭素(C)、塩素(Cl)、ナトリウム(Na)、カルシウム(Ca)、硫黄(S)の5元素とし、蒸着物質には炭素を用いた。なお、分析結果は検出した特性X線の値から標準物質を用いて算出したwt%（重量

パーセント）で表示されている。

海面から最も近い位置(+1.0m)で採取されたNo.3コアの分析結果を図-2.3.5に示す。

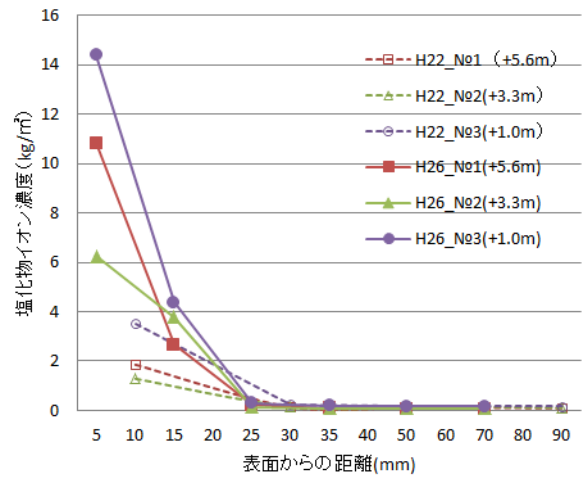


図-2.3.4 塩化物イオン濃度分布

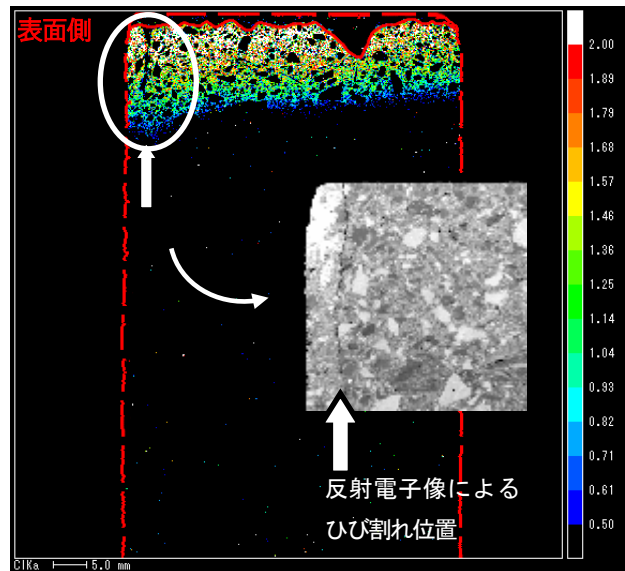


図-2.3.5 No.3コアのEPMA分析結果（測定物質：塩素）

炭素の侵入が見られた領域（図中の赤色実線）から奥側（画面下側）に13mm程度の深さで濃度の高い部分が見られた。コア表面側1mm～2mmの分布が認められない領域は、炭素の侵入領域と一致し、中性化による塩素の移動（濃縮現象）が生じていると考えられる。

また、ひび割れ位置に合致するように塩素の分布の認められない部分があった。この部分では炭素の分布結果からは判断の付きにくい程度の中性化が進行しており、濃縮現象により分布が見られなくなったと考えられる。

EPMAによる計測結果を塩化物イオン濃度の表面からの深さ方向についての分布を図-2.3.6に示す。

表面から深さ5～10mmの範囲で塩化物イオン濃度が急

速に増加し最大値を示したが、20～25mm以深では、ほぼ0近くに収束しており、前述の電位差滴定法による計測結果とほぼ同様の傾向となった。

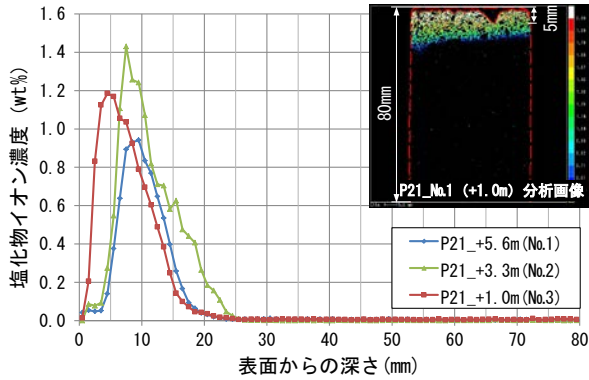


図-2.3.6 P21 塩化物イオン濃度分布 (EPMA)

### 2.3.3 中性化深さ

縦方向に割裂させたコアの割裂面にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し中性化深さを測定した。なお、測定は割裂後すぐに実施した。測定結果を表-2.3.1に示す。

表-2.3.1 中性化深さ測定結果 (mm)

コア	No.1 (+5.6m)	No.2 (+3.3m)	No.3 (+1.0m)	コンクリート 標準示方書
H22.12	3.9	1.1	1.0	0.7
H26.2	0.0	2.3	0.0	3.8

No.2 コアでは、前回調査から中性化が進んでいるのに対し、No.1 およびNo.3 については、中性化の反応が示されなかった。

No.2 コアについては、中性化は進行しているものの、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>の下式に基づき中性化深さ(y)を算出したところ、3.8mmとなり、測定結果よりも計算値の方が大きい値となった

$$\text{中性化深さ}(y) = (-3.57 + 9.0W/B) \sqrt{t}$$

ここに、W/B (有効水結合比) = 0.495

t (中性化期間) = 3.8年 (3年9ヶ月)

No.1 とNo.3 のコアについて、中性化反応を示さなかったため、塩化物イオンと同様にEPMAによる詳細調査を実施した。

中性化による硫黄の移動(濃縮現象)を確認するため、SO<sub>3</sub> (三酸化硫黄) の分布に着目した。No.1 コアのEPMAによる分析結果を図-2.3.7に示す。

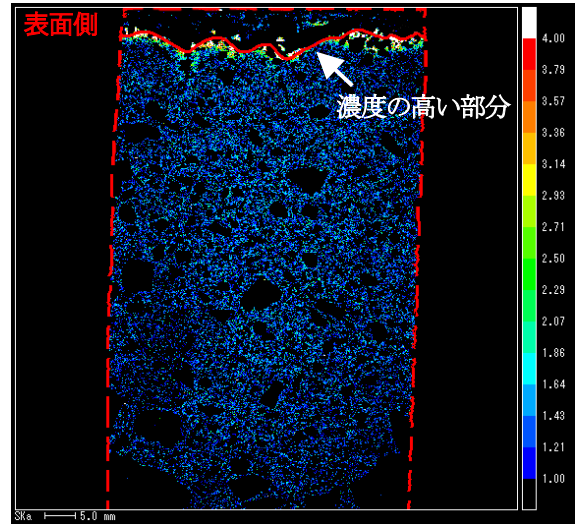


図-2.3.7 No.1 コアのEPMA分析結果 (測定物質: 硫黄)

炭素の侵入が見られた領域(図中の赤色実線)から奥側(画面下側)に2mm～3mm程度の深さで濃度の高い部分が見られた。

コア表面5mm～7mmの分布が認められない領域は、炭素の侵入領域と一致し、中性化による硫黄の移動(濃縮現象)<sup>5)</sup>が生じていると考えられる。

フェノールフタレイン溶液による測定結果とEPMAによる結果(測定物質: 硫黄)の比較を図-2.3.8に示す。

その結果、海面から離れるほど中性化が進んでいる状況が見受けられた。また、約4年後に採取されたコアについて、フェノールフタレイン溶液では、No.1 (+5.6m) とNo.3 (+1.0m) は中性化反応が見られなかったが、EPMAによる分析結果では中性化の状況が確認された。

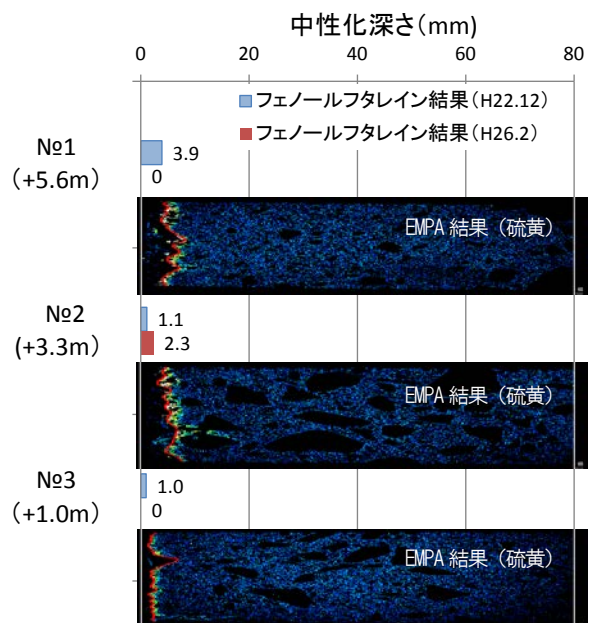


図-2.3.8 中性化試験結果比較



## 2.4 塩化物イオン濃度の予測

伊良部大橋 P21・P41 橋脚における調査結果をもとに、一般的に用いられるフィックの拡散方程式<sup>4)</sup>をもとにした下式より、100 年後の鋼材位置での塩化物イオン濃度  $C_d$  を推定した。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot C_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

設計拡散係数  $D_d = 0.58\text{cm}^2/\text{年}$  は、参考資料<sup>6)</sup>より、表-2.4.1 に示す使用材料をもとに算出した。

表-2.4.1 使用材料

混和材	フライアッシュ Type II
W/C	49.5%
初期塩化物イオン濃度	0.1kg/m <sup>3</sup>

コンクリート表面の塩化物イオン濃度  $C_0$  は、参考資料<sup>7)</sup>より、調査位置における高さ方向の分布を図-2.4.1 より推定した。

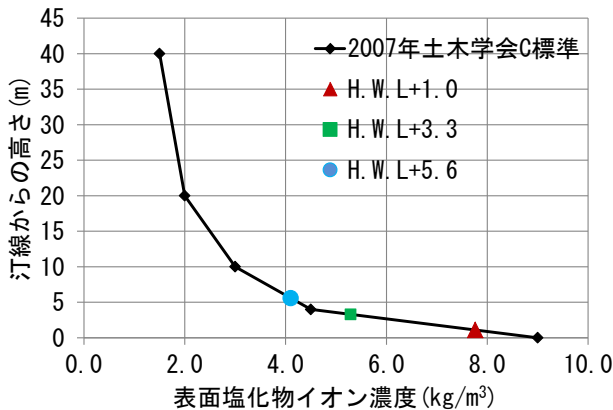


図-2.4.1 調査位置における表面塩化物イオン濃度

調査位置における実測値と 100 年後の関係として、P21 橋脚の結果を図-2.4.2 に示す。なお、鋼材腐食発生限界濃度  $C_{lim}=1.81$  は、参考資料<sup>6)</sup>よりフライアッシュセメント B 種相当を用いた場合を参照した。

試算の結果、100 年後には鉄筋位置（表面から 90mm）で腐食発生限界濃度  $1.81\text{kg/m}^3$  を越える結果となったが、これは施工後、すぐ表面近傍に塩分が浸透し高い濃度になっているためと考えられる。

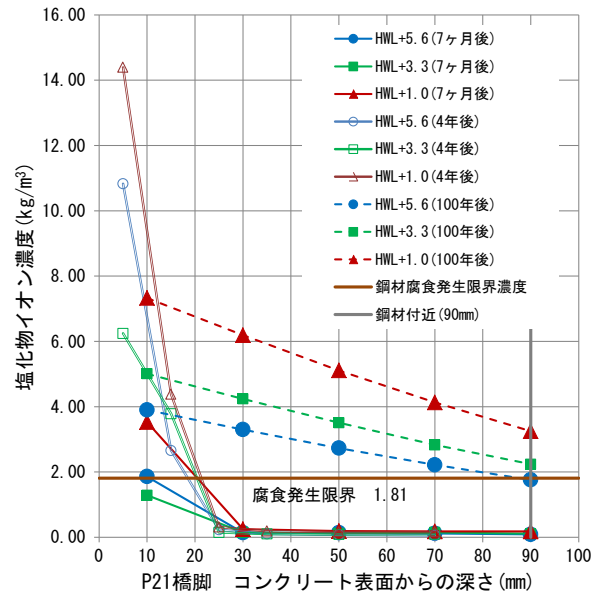


図-2.4.2 塩化物イオン濃度の将来予測 (P21 橋脚)

## 2.5 物性値取得の継続について

伊良部大橋におけるコンクリートの初期物性値データは、塩分浸透による劣化予測を行う上で非常に貴重なデータである。今後も継続的にデータを蓄積することにより、今回試算した 100 年後の予測値を検証していく必要がある。

## 3. 非破壊検査による表面付着塩分量調査手法の検証

### 3.1 調査目的

橋梁の表面に付着しコンクリート内部の鋼材腐食の要因の一つとして考えられる飛来塩分は、地形や風向などの環境的要因や橋梁構造形式など要因により付着する場所や量が異なってくるといった報告がされている<sup>8)</sup>。

過年度より実施してきたガーゼ法やコア抜きによる調査方法では、局所的な数値を代表値としているため、面的な分布状況の把握はできていない。

平成 25 年度は、季節風の影響を受ける PC 橋を対象に分光分析による非破壊検査でコンクリート表面に付着した塩分を面的に測定する方法について従来のガーゼ拭き取り法との比較による測定精度の検証を行った。

### 3.2 分光分析による付着塩分測定の概要

分光分析法は、図-3.2.1 に示すようにコンクリート表面にハロゲンランプを照射し、その反射光を波長と吸光度に分けることで非破壊により、コンクリートの表面に

ある塩分を面的に計測する方法である<sup>9)</sup>。本手法は、果物の糖度を光で分ける方法として、既に一般化された技術であり、それをコンクリート用に応用したものである。プローブヘッドの車輪にエンコーダーを内蔵することで、測定位置と塩分濃度の数値から、測定箇所の塩分分布のコンター図を作成することが可能である。

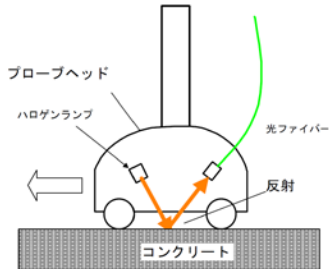


図-3.2.1 測定概要

### 3.3 調査対象橋梁

調査対象橋梁である結橋は、沖縄県本島北部の国頭群大宜味村根路銘に位置し(図-3.3.1)、平成23(2011)年3月に竣工した橋長99mの3径間連結PCポステンT桁橋(写真-3.3.1)である。適用示方書である道路橋示方書平成14年版から、架橋位置における塩害の対策区分としては影響が厳しい対策区分Sとなっているため、塩害対策として最外縁鋼材からの最小かぶり70mmを確保した他に、非鉄性のポリエチレンシース管が採用されている。

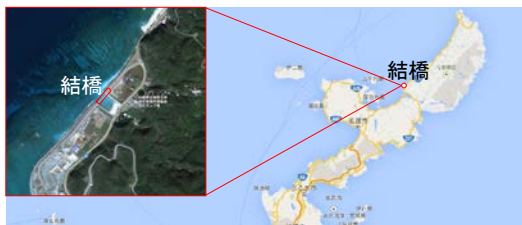


図-3.3.1 結橋位置図



(a) 全景 (山側から)



(b) 第3径間桁下面状況 (A2側から)

写真3.3.1 結橋架橋状況

### 3.4 調査方法

#### 3.4.1 調査箇所

付着塩分量の調査箇所を図-3.4.1に示す。

側面図に示すとおり、橋軸方向に3ブロックに分けてNo.1(北側端部)とNo.3(南側端部)は陸上部から測定を行った。

一方、No.2(中央部)に関しては、海上であるため橋梁点検車を用いて測定した。

ガーゼ拭き取り法については、図-3.4.2に示すとおり、ウェブ両側と下フランジ下面にて各桁で計測を行った。同様に分光分析法についても図-3.4.3に示すとおり、各桁の下フランジ下面と両側ウェブの下フランジ下面から1mの高さの範囲で測定を実施し、ガーゼ拭き取り法と分光分析法で調査した箇所について、コンクリート表面にある付着塩分量の比較を行った。

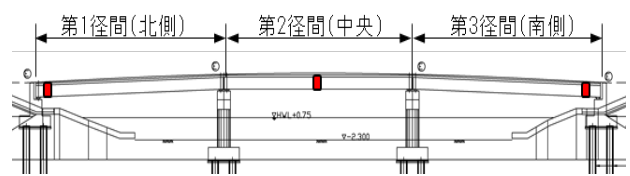


図-3.4.1 調査箇所側面図

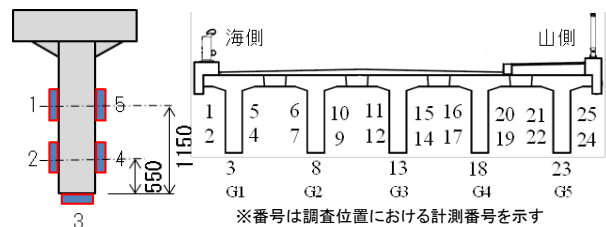


図-3.4.2 ガーゼ拭き取り法計測位置断面図

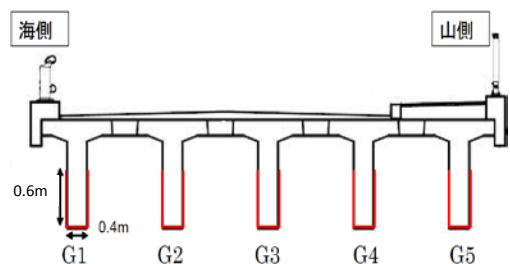


図-3.4.3 分光分析法計測範囲断面図

#### 3.4.2 付着塩分調査方法

ガーゼ拭き取り法は過年度から実施してきた「ガーゼ拭き取り塩素イオン検知管法<sup>10)</sup>」により図-3.4.2の示す位置について20cm×20cmの範囲で付着した塩化物イオンの測定を行った。また、分光分析法については、図

-3.4.3の測定範囲において、ウェブの海側及び山側の桁側面は6ライン(0.6m)、桁下面は4ライン(0.4m)計測した。

各方法の測定状況を写真-3.4.2に示す。

なお測定は、波飛沫が激しい冬季の2013年1月21日に実施した。

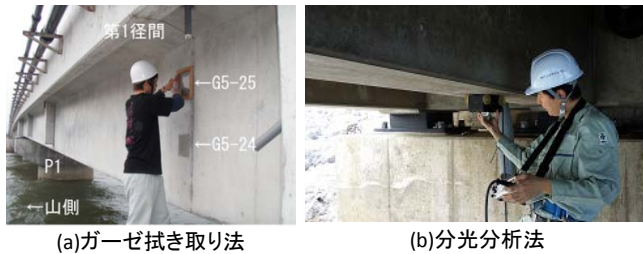


写真-3.4.2 測定状況

### 3.5 調査結果比較

ガーゼ拭き取りの結果を図-3.5.1に示す。

各測定箇所での付着塩分量は、いずれの径間でも下フランジ下面で多く付着する傾向であった。各径間の最大位置は、各径間ともにG2桁下面(計測位置8)と、比較的中桁の桁下面で多く付着する傾向であった。

径間全体では、第1径間および第2径間よりも第3径間での付着塩分量が顕著に多く、各径間毎の全平均付着塩分量で比較すると、第1・2径間に比べて第3径間の全平均付着塩分量は約5倍も多い結果となった。

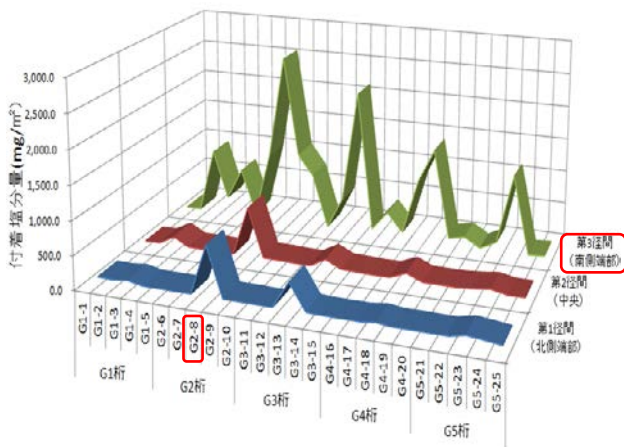


図-3.5.1 ガーゼ拭き取り測定結果

図-3.5.2に分光分析による測定結果を示す。なお、スケールは最大値が6.0kg/m³と設定されている。

塩化物イオン濃度の分布の高低は、橋軸方向では、端部である第3径間の数値が著しく高く、第1径間は第2

径間より若干高くなる傾向が見られる。

橋軸直角方向では、海側が山側より高く、下フランジ下面がウェブ側面より高い傾向であった。

桁の上部に行くに従って塩化物イオン濃度の数値が低くなるのは、海水による飛来塩分が桁下側に多く付着する傾向があると考えられる。

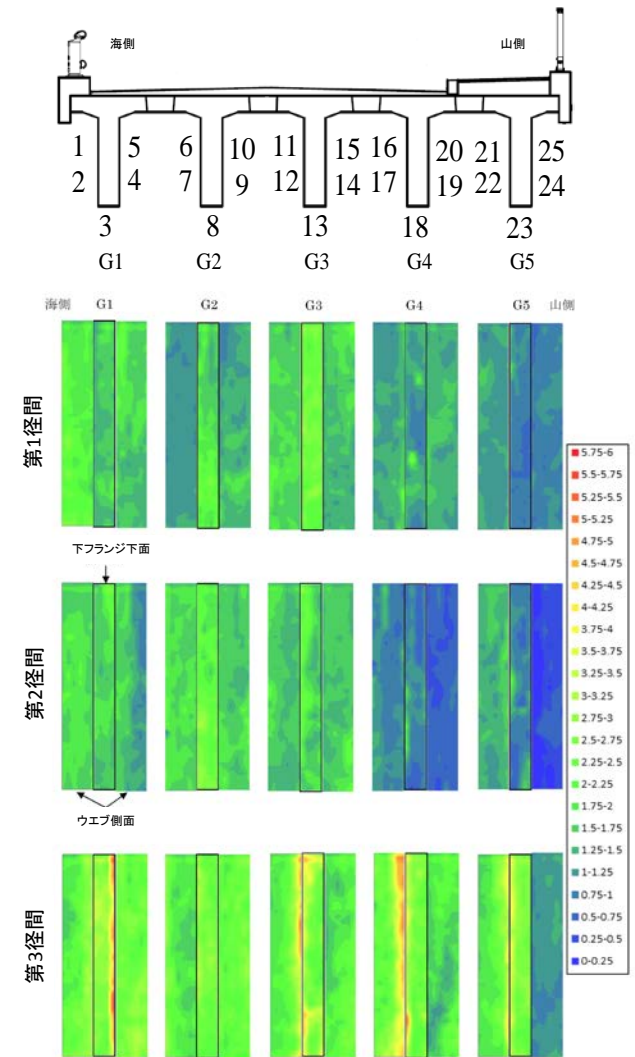


図-3.5.2 分光分析法測定結果

### 3.6 分光分析の適用性について

以上の結果から分光分析による非破壊検査は、ガーゼ拭き取りとの相関も確認することが出来、その精度を確認することが出来た。分光分析は、面的な分布状況を把握できることから、ガーゼ拭き取りなどピンポイントの調査では測定出来ていなかった隅角部付近の付着塩分濃度を測定でき、詳細調査や補修範囲の決定のためのスクリーニングのための技術として使用することが可能といえる。



## 4. 塩化物イオン拡散予測の高度化検討

### 4.1 検討目的

塩害環境下にある橋梁の鋼材腐食に起因する損傷については、従来の研究により劣化予測手法<sup>4)</sup>が提案されているが、未だ十分な劣化機構が解明されていない。塩害橋の劣化予測手法を確立するため、過年度より実施してきた塩分調査結果を整理・分析し、既往の劣化予測手法の検証および高度化について検討を行った。

### 4.2 既往の調査結果整理

#### 4.2.1 調査対象橋梁

調査対象橋梁の一覧を表-4.2.1に示す。調査対象橋梁は、土木研究所が調査を実施した瀬底大橋、浜比嘉大橋、伊良部大橋、羽地奥武橋の4橋に加え、沖縄県が調査した本部大橋、炭焼橋、高平橋、平良橋の4橋の計8橋について調査結果の整理を行った。対象橋梁は全て沖縄県内の海上部または海岸線から100m以内に位置することから、道路橋示方書<sup>3)</sup>に基づいた地域区分は「A」、塩害の影響度合が激しい対策区分は「S」と、非常に厳しい塩害環境下に位置している。

表-4.2.1 調査対象橋梁

橋梁名	竣工年	調査箇所	調査実施年	経過年数
瀬底大橋	1985年	P7	2012年	27年
	1985年	P8	2011年	26年
	1985年	P11	2009年	24年
浜比嘉大橋	1997年	P5・P11	2012年	15年
伊良部大橋 (建設中)	2010年(打設年)	P21(1回目)	2010年	0.6年
	2010年(打設年)	P21(2回目)	2014年	4年
	2011年(打設年)	P41	2013年	1年
羽地奥武橋	1982年	A1・P1・P2・A2	2010年	28年
本部大橋	1975年	A1・A2	2011年	36年
		P1・P2・P3・P4・P5		
炭焼橋	1976年	A1・A2	2008年	32年
高平橋	1975年	A1・A2	2008年	33年
平良橋	1974年	A1・A2	2008年	34年

各橋梁で整理分析した項目は以下のとおりである。

- ・塩化物イオン濃度(表面・内部)
- ・中性化
- ・コンクリート物性値
- ・コア採取位置(高さ・方向)
- ・気象条件
- ・損傷の有無

#### 4.2.2 鋼材位置での塩化物イオン濃度および表面付着塩分量

調査より得られたコンクリート内部における塩化物イオン濃度より、海面から調査位置の高さと鋼材位置をかぶり70mm程度と仮定しコンクリート表面から70mm程度の塩化物イオン濃度との分布を図-4.2.1に示す。なお、鋼材の腐食発生限界値 $1.9\text{kg}/\text{m}^3$ は、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>より水セメント比50%と仮定し下式より算定した。

$$C_{lim} = -3.0(w/c) + 3.4 \quad (0.3 \leq w/c \leq 0.55)$$

$$C_{lim} = 1.9\text{kg}/\text{m}^3 \quad (w/c = 0.50)$$

海面から高さ方向に鋼材位置での塩化物イオン濃度の分布からは、海面から10m以下で鋼材腐食発生限界値を超過する傾向が認められ、5m以下の全調査試料に対しては、約60%が超過していた。

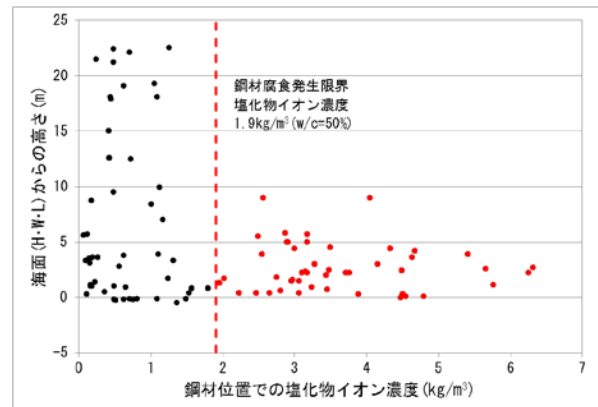


図-4.2.1 海面からの高さと同材位置での塩化物イオン濃度の分布

調査より得られたコンクリートの表面付着塩分量と鋼材位置での塩化物イオン濃度の関係を図-4.2.2に示す。海面から高さ5m以下(丸印)では、表面付着塩分量の増加にともない鋼材腐食発生限界も超過する傾向にある。このことから、海面から5m以下では外部からの塩分供給が激しいと考えられる。

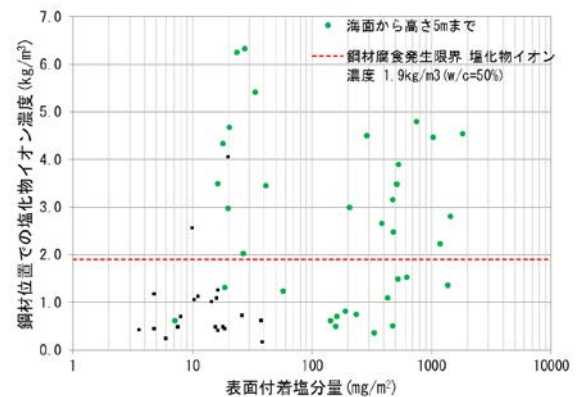


図-4.2.2 表面付着塩分量と鋼材位置での塩化物イオン濃度の関係



### 4.3 塩化物イオンの拡散の予測検討

4.2のコア採取によるコンクリート内部の塩化物イオン濃度調査結果（以下、実測値と記す）を用いた回帰分析から算出した拡散予測値と実測値との比較検証を図り、塩害劣化予測の高度化検討を実施した。なお、回帰分析では、ひび割れの有無による影響が大きいことが知られていることから<sup>4)</sup>、すでに鋼材位置で腐食発生限界値を超過した回帰分析結果については、ひび割れ発生が疑われるため、予測検討からは除外した。

#### 4.3.1 拡散係数および表面塩化物イオン濃度予測値の算出方法

試料採取したコンクリート表面からの塩化物イオン濃度分布から、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>の下式より、見かけの拡散係数および表面における塩化物イオン濃度を回帰分析により求めた。

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

ここに、

$C(x, t)$	kg/m <sup>3</sup>	深さx(mm)、建設時からの時刻t(年)における塩化物イオン濃度
$C_0$	kg/m <sup>3</sup>	表面における塩化物イオン濃度
$C_i$	kg/m <sup>3</sup>	初期含有塩化物イオン濃度
$D_{ap}$	cm <sup>2</sup> /年	塩化物イオンの見掛けの拡散係数
erf	-	誤差関数
$\gamma_{cl}$	-	予測の精度に関する安全係数（一般的に1.0としてよい）

初期含有塩化物イオン濃度は、施工当時の塩化物イオン濃度の記録が存在しない箇所もあるため、影響が最も少ないと考えられる採取したコンクリートコアの最深部の塩化物イオン濃度を、その構造物の初期塩化物イオン濃度と仮定した。

中性化の影響を適切に行うため、コンクリート標準示方書<sup>11)</sup>より中性化深さ+10mm以内のデータおよび明白に異常なデータと判断可能なデータを除いて回帰分析を実施した。

#### 4.3.2 拡散係数と表面塩化物イオン濃度の分布

4.2.2より、高さ方向にコンクリート内部の塩化物イオン濃度および表面付着塩分量に傾向が認められたことから、回帰分析結果より求めた見かけの拡散係数および表面塩化物イオン濃度について、高さ方向の分布で検討を行った。海面からの高さで見かけの拡散係数の分布を図4.3.1に示す。図-4.3.1に示した見かけの拡散係数0.5kg/m<sup>3</sup>(赤線)は、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>より、水

セメント比50%と仮定して下式より算定した。

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0(w/c) - 1.8 \quad (0.3 \leq w/c \leq 0.55)$$

$$D_{ap} = 0.5 \text{ cm}^2/\text{年}$$

調査試料における経過年数の平均は約25年経過しており、すでに塩害劣化が生じている箇所もあることから、見かけの拡散係数が0.5cm<sup>2</sup>/年を大きく超過した箇所については、塩害劣化による影響と考えられる。また、竣工後まもない伊良部大橋で一部見かけの拡散係数が大きい箇所については、2回目以降の調査で0.5kg/m<sup>3</sup>以下を示したことから調査時の試料数が少なかったためと考えられる。

海面からの高さと表面塩化物イオン濃度の分布を図4.3.2に示す。図-4.3.2には平成23年度年度報告書にて表面塩化物イオン濃度分布から想定した下式より、表面塩化物イオン濃度の分布線(赤線)を示す。今回の試料のうち約70%が想定した分布線以内に位置する。

$$C_0 = \begin{cases} 5\text{kg/m}^3 & (H \geq 15\text{m}) \\ -1.5H + 27.5 \text{ kg/m}^3 & (15\text{m} > H \geq 5\text{m}) \\ 15\text{kg/m}^3 & (5\text{m} > H) \end{cases}$$

H: 海面(H・W・L)からの高さ

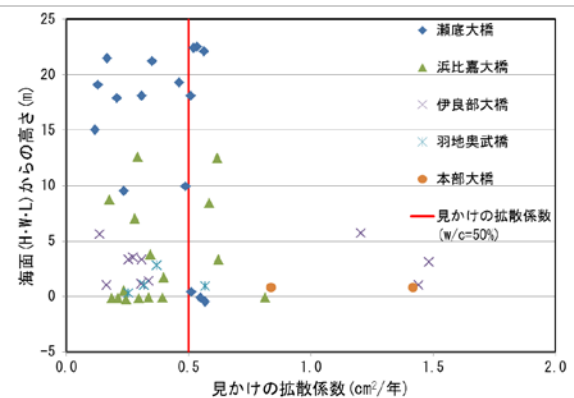


図-4.3.1 海面からの高さで見かけの拡散係数の分布

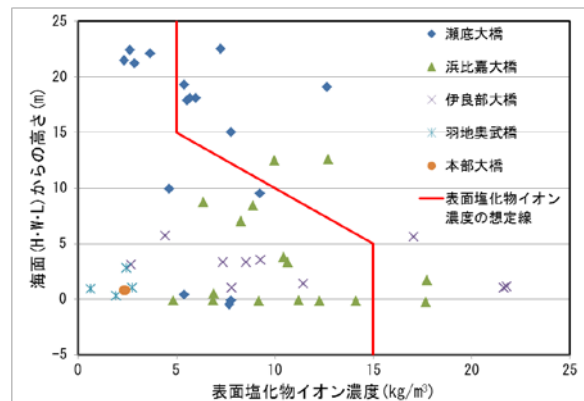


図-4.3.2 海面からの高さで表面塩化物イオン濃度の分布

### 4.3.3 拡散予測と実測値との比較検討

4.3.2 より、見かけの拡散係数はコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>から水セメント比 50%で仮定して得られた見かけの拡散係数  $0.5\text{cm}^2/\text{年}$  とし、表面の塩化物イオン濃度は海面からの高さ方向に考慮した想定値より拡散予測を行った。予測結果および実測値を図-4.3.3～図-4.3.7 に示す。また、参考として水セメント比 50%で得られた値  $0.5\text{cm}^2/\text{年}$  を 4 倍した拡散係数  $2.0\text{cm}^2/\text{年}$  の予測結果も併せて示す。なお、経過年数は調査試料の平均経過年数 25 年として、高さ方向の分割は表-4.3.1 のように設定した。

表-4.3.1 拡散予測の設定条件

高さ m	見かけの 拡散係数 $\text{cm}^2/\text{年}$	表面の塩化物 イオン濃度 $\text{kg}/\text{m}^3$	実測値の試料個数	
			腐食発生限界値 $1.9\text{kg}/\text{m}^3$ 未満	腐食発生限界値 $1.9\text{kg}/\text{m}^3$ 以上
15m以上	15	0.5	11	0
10～15m	12.5	0.5	2	0
5～10m	7	0.5	7	8
2～5m	3	0.5	10	20
2m未満	0.5	0.5	20	20

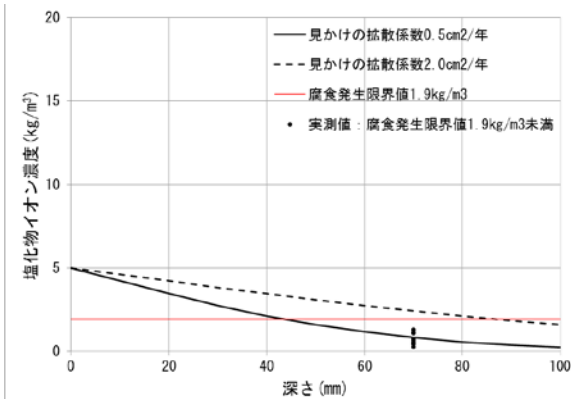


図-4.3.3 高さ 15m 以上の拡散予測

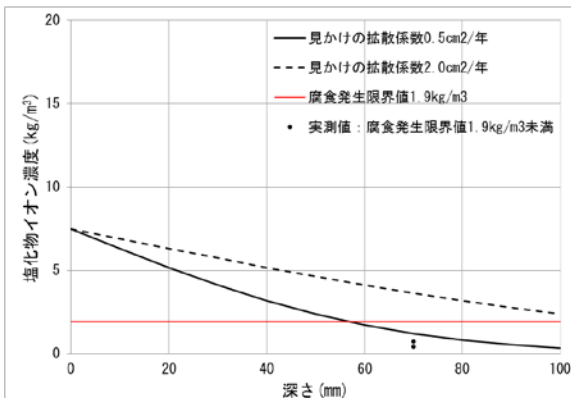


図-4.3.3 高さ 10m～15m(12.5m)の拡散予測

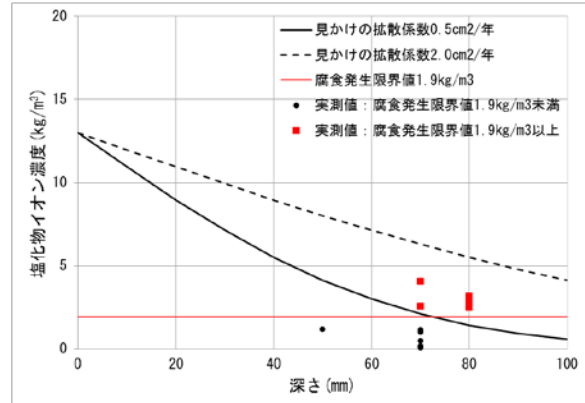


図-4.3.3 高さ 5～10m(7.0m)の拡散予測

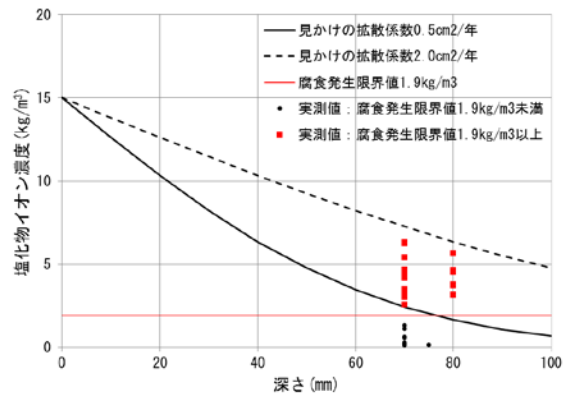


図-4.3.3 高さ 2m～5m(3.0m)の拡散予測

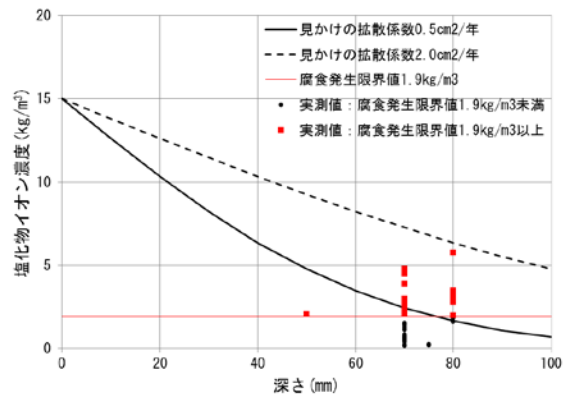


図-4.3.3 高さ 2m 未満 (0.5m)の拡散予測

水セメント比 50%で仮定して得られた見かけの拡散係数  $0.5\text{cm}^2/\text{年}$  とした拡散予測では、想定した腐食発生限界値以下の試料に対しては、海面からの高さ 15m 以上の極一部を除いた実測値に対して安全側の評価としている。また、見かけの拡散係数を  $2.0\text{cm}^2/\text{年}$  とすることで、想定した腐食発生限界値を越えた全ての実測値に対して安全側に評価している。

このことから、水セメント比 50%を仮定した見かけの拡散係数および高さ方向を考慮した表面塩化物イオン濃度想定値より算出された拡散予測は、今回の調査試料から得られた鋼材位置における塩化物イオン濃度を比較的精度良く反映している結果となった。

#### 4.4 拡散予測式の検討

4.3.3の拡散予測の検討では、水セメント比50%で仮定して得られた見かけの拡散係数0.5cm<sup>2</sup>/年と、海面からの高さ方向に考慮した想定値より求めた表面塩化物イオン濃度の結果を用い、下式より拡散予測の検討を行った。

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

検討の結果、見かけの拡散係数を0.5cm<sup>2</sup>/年から2.0cm<sup>2</sup>/年にあげることで腐食発生限界値を越えた試料を安全側に評価出来ることがわかった。以上より、予測の精度に関する安全係数(γ<sub>cl</sub>)について検討を行う。

ここに、回帰分析から得られた見かけの拡散係数と鋼材位置での塩化物イオン濃度の関係を図-4.4.1に、経過年数と鋼材位置での塩化物イオン濃度の関係を図-4.4.2に示す。

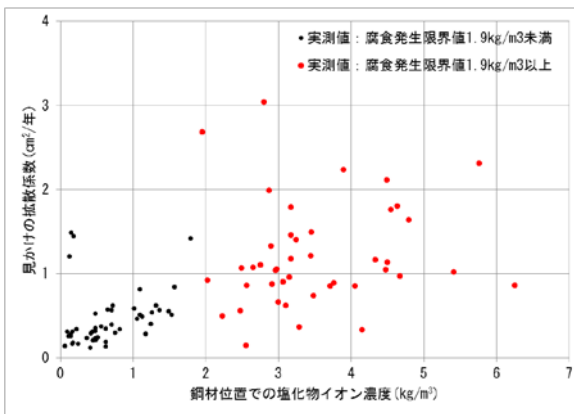


図-4.4.1 見かけの拡散係数と鋼材位置での塩化物イオン濃度

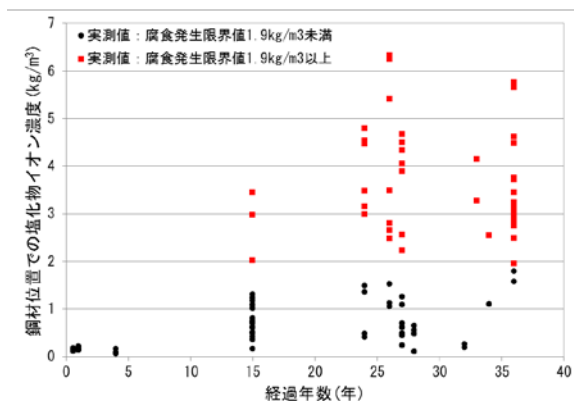


図-4.4.2 経過年数と鋼材位置での塩化物イオン濃度

図4.4.1から、見かけの拡散係数の上昇の伴い腐食発生限界値を超える試料の増加が認められ、見かけの拡散係数2.0以上では全ての試料が腐食発生限界値以上である。同様に図-4.4.2からも、経過年数が進むにつれて腐食発生限界値以上となる試料の増加が伺える。

以上より、予測の精度に関する安全係数(γ<sub>cl</sub>)については、式全体に考慮するのではなく拡散係数および経過年数の項に対して考慮する方が、より精度良く反映されることから下式が考えられる。

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

C(x, t)	kg/m <sup>3</sup>	深さx(mm)、建設時からの時刻t(年)における塩化物イオン濃度
C <sub>0</sub>	kg/m <sup>3</sup>	表面における塩化物イオン濃度
C <sub>i</sub>	kg/m <sup>3</sup>	初期含有塩化物イオン濃度
D <sub>ap</sub>	cm <sup>2</sup> /年	塩化物イオンの見掛けの拡散係数
erf	-	誤差関数
γ <sub>cl</sub>	-	予測の精度に関する安全係数(一般的に1.0としてよい)

ここに、見かけの拡散係数が2.0以上の場合では、全ての試料で腐食発生限界値以上となる結果を考慮して、表-4.4.1に予測精度に関する安全係数を示す。

表-4.4.1 予測精度に関する安全係数

対象橋脚の損傷状況等	損傷無し	損傷状況等により判断
γ <sub>cl</sub> : 予測の精度に関する安全係数	1.0	~ 4.0

表面塩化物イオン濃度は、海面からの高さ方向に傾向が見られることから、下式より算出する。

$$C_0 = \begin{cases} 5\text{kg/m}^3 & (H \geq 15\text{m}) \\ -1.5H + 27.5\text{kg/m}^3 & (15\text{m} > H \geq 5\text{m}) \\ 15\text{kg/m}^3 & (5\text{m} > H) \end{cases}$$

H: 海面(H·W·L)からの高さ

今回の塩化物イオンの拡散予測については、試料数の関係から下部構造に限定されるため、上部構造における塩化物イオンの拡散予測については今後の課題である。

## 5. まとめ

5年間実施してきた研究の成果を以下に示す。

- ・年間を通した上部構造の表面拭取調査結果からは、風向風速の関係から季節変動や部位による付着塩分濃度の違いが明確になった。
- ・非破壊検査機器を用いた表面塩分調査では、簡易な計測で詳細調査や補修範囲を決定するための選定技術として可能性が分かった。
- ・コアを用いた塩分調査結果より、コンクリート内部の塩化物イオン濃度を用いた回帰分析結果から、海面からの高さ方向における表面塩化物イオン濃度の分布傾向がわかった。
- ・水セメント比 50%で仮定した見かけの拡散係数と高さ方向の表面塩化物イオン濃度分布を用いた拡散予測から、鋼材位置における塩化物イオン濃度を、実測値に対して安全側に精度良く予測することができた。
- ・損傷状況から腐食発生限界以上が疑われる場合には、塩化物イオンの拡散予測の精度に関する安全係数の考え方を明確することができた。
- ・伊良部大橋では、建設初期からの物性値を得られたため、今後も継続して調査・比較検証を実施することで、さらに精度向上に寄与すると考えられた。

今回検討された拡散予測式について、管理の現場における予防保全のための塩害予測として使用して頂き、更なる精度向上が図られることを期待する。

**謝辞：**沖縄県の方々をはじめ、本調査にご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 喜友名禎、砂川勇二：伊良部大橋下部工の耐久性向上を目的としたコンクリートの検討について、第28回沖縄県ブロック国土交通研究会、2008.7
- 2) 土木研究所資料 第4235号：海洋環境下に建設されたコンクリート橋脚の初期物性値－伊良部大橋 P21 橋脚－、2012.8
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III.コンクリート橋編 2012.3
- 4) (公社) 土木学会：コンクリート標準示方書・維持管理編、2013
- 5) 岸谷孝一、小林一輔、樫野紀元、宇野祐一：塩化物を含むコンクリート中における鉄筋腐食と中性化との関係、コン

クリート工学論文集 第2巻第1号、1991.1

- 6) (公社) 土木学会：コンクリート標準示方書-設計編、2012
- 7) (公社) 土木学会：コンクリート標準示方書-維持管理編、2007
- 8) 花井拓、岡智彦、木村嘉富、田中良樹：塩害環境下にある既設橋梁への付着塩分と気象・海象条件との関係、土木学会第67回年次講演会、2012.9
- 9) 戸田勝哉、内田康平、原田健二、下村匠：分光分析による融雪剤の影響を受けた橋梁の塩分分布測定結果、土木学会第68回年次学術講演会、2013.9
- 10) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧、2007.12
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書【標準編 土木学会規準および関連規準】、2013.11



## STUDY ON ENHANCED DIAGNOSTICS TOWARD PREVENTIVE MAINTENANCE OF BRIDGES AGAINST CHLORIDE-INDUCED DETERIORATION

**Budget :** Grants for operating expenses

General account

**Research Period :** FY2009-2013

**Research Team :** Bridge and Structural Engineering Research Group

**Author :** Yoshitomi KIMURA

Yoshiki TANAKA

Hidetaka HOMMA

**Abstract :** Previous researches introduced some prediction methods for deterioration caused by corrosion of steel members of bridges under chloride environment. However, the deterioration mechanism is not fully understood. In order to provide diagnosis toward preventive maintenance, establishment of the prediction methods with certain reliability is expected. This research project tackles the verification and enhancement of the prediction methods through studies focusing on the bridges under severe chloride environment. In FY2013, the following surveys were conducted: (1)detailed investigation of initial material properties of submerged piers under construction, (2)survey of chloride contents on the surface of bridges. Additionally, the results of the investigation of chloride-induced deterioration conducted since 2009 in Okinawa and the survey of salt-attacked bridges performed by Okinawa Prefecture were compiled.

**Key words :** chloride-induced deterioration, preventive maintenance, Okinawa, deterioration prediction, corrosion of steel members