

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 24 年度は、過年度に引き続き、厳しい塩害環境下である沖縄県の橋梁で、海中橋脚の塩分量調査およびコンクリート上部構造表面で年間を通じた表面付着塩分量の調査を行った。

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調査フィールドとして研究を進めることとした。

平成 24 年度は、厳しい塩害環境下にある橋梁の塩害に関する維持管理手法を高度化するため、過年度より実施している既設橋脚の塩分量調査を継続し、前年度と異なる形状の橋脚で調査を実施した。同じく実施しているコンクリート上部構造表面への塩分付着量についても年間を通して調査を行った。また、新設橋脚の初期物性値取得についても平成 22 年度に引き続き実施した。

2. 厳しい塩害環境下にある橋脚の塩分量調査

2.1 調査対象

調査対象は、昭和 60(1985)年竣工の瀬底大橋の P7 とした。また、本報告では、一昨年度から実施している瀬底大橋 P8、P11 の調査結果についても比較のためにあわせて考察する。橋梁の位置を図-1 に、橋梁を写真-1 に示す。



図-1 調査対象位置図

瀬底大橋は沖縄本島北西部の本部半島と瀬底島を東西方向に結ぶ離島架橋であり、冬場には東シナ海から北よりの強い季節風に曝される環境にある。

調査対象とした橋脚については、瀬底大橋 P7、P8 は主航路近傍の比較的水深の深い場所に位置しているのに対し、瀬底大橋 P11 が汀線付近に位置しており、P7 が張出し式橋脚、P8、P11 壁式橋脚である。調査位置の違いに

よるコンクリート内部への塩分浸透の影響について確認するものとした。



写真-1 瀬底大橋（瀬底島より）

2.2 調査内容

それぞれの調査対象橋脚について、コア採取による塩化物イオン濃度計測、拭き取りによる表面付着塩分計測を行った。調査対象のP7橋脚(写真-2)では、海面からの高さによる塩分量の違いを確認するため、高さ方向に5か所設定した。また、橋脚形状の違いも確認するため、高さEL+23mの位置で桁下より外側の梁端部も設定した。



写真-2 P7橋脚（瀬底島側より）

2.3 調査結果

2.3.1 コア採取による塩化物イオン濃度分布

(1) P7橋脚東西面の調査結果

P7橋脚の東面および西面調査位置における深さ方向の塩化物イオン濃度分布を図-1、2に示す。また、高さ方向における表面付着塩分量の分布を図-3に示す。

図-1、2より、鋼材付近（コンクリート表面から70mm）の塩化物イオン濃度は、梁部（高さでEL+19~23m）での平均0.7 kg/m³に対して、柱下部（高さでEL+1m~10m）での平均3.6 kg/m³となり、梁部に比べて約5倍も大きく、標準的な腐食発生限界濃度(1.2kg/m³)よりも遙かに

大きい値であった。

また、柱下部で塩化物イオン濃度が4.0kg/m³越えた3箇所（波線グラフ）では、コア採取時に鋼材付近（深さ80~100mm）で、コア断面を横断した面的ひび割れ（写真-3）が認められた。これは鉄筋が腐食膨張することによってひび割れが鉄筋配置面に進展していき、それぞれが接続することによって生じたと考えられる。

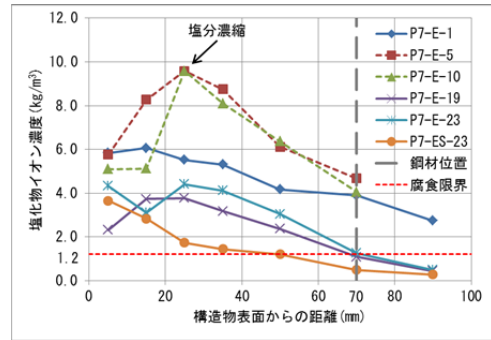


図-1 P7橋脚 東面調査結果※破線：面的ひび割れ

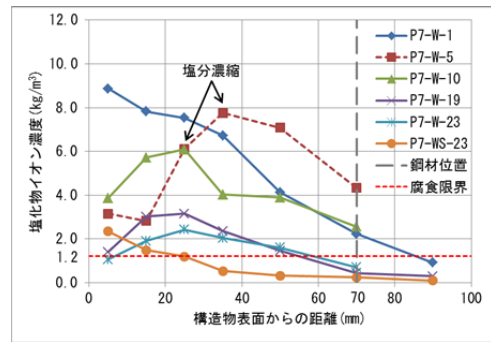


図-2 P7橋脚 西面調査結果※破線：面的ひび割れ



写真-3 コア削孔内の面的ひび割れ (P7-W-5)

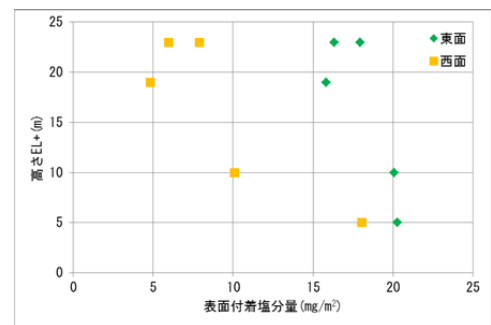


図-3 表面付着塩分量の分布

柱下部では、図-3より海面に近いほど表面付着塩分量が多く、高さEL+5、10では深さ25mm付近に表面より塩分量が高いことから、内部への塩分濃縮移動により、鋼材付近での塩化物イオン濃度が高くなったと考えられる。

また、東面と西面における鋼材付近の塩化物イオン濃度では、東面平均2.6kg/m³に対して西面平均1.8kg/m³と東面が約1.5倍程度高く、これは図-3より東面での表面付着塩分量が多いためと考えられる。

(2) P7 橋脚梁部の調査結果

P7 橋脚の梁部側面(写真-4)において、深さ方向の塩化物イオン濃度分布および表面付着塩分量の結果を図-4に示す。

図-4より、梁側面(P7-S-22, 19)では、表面付着塩分量と表面付近での塩化物イオン濃度に相関は認められた。

梁下面(P7-S-20)では表面付着塩分量が極端に高く、深さ15mm付近で塩分濃縮により表面付近では塩化物イオン濃度は低下した。鋼材付近における塩化物イオン濃度には、3箇所ともに大きな違いは認められないが、梁下面では、今後内部への塩分濃縮移動により、鋼材付近での塩化物イオン濃度が高まるものと考えられる。

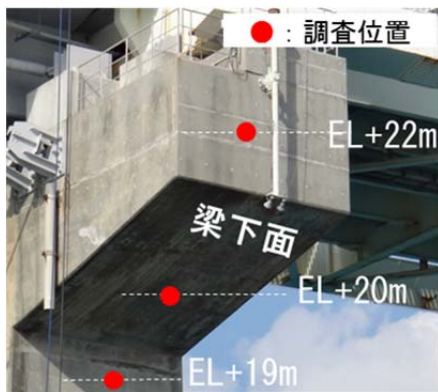


写真-4 P7 橋脚梁部側面(南面)

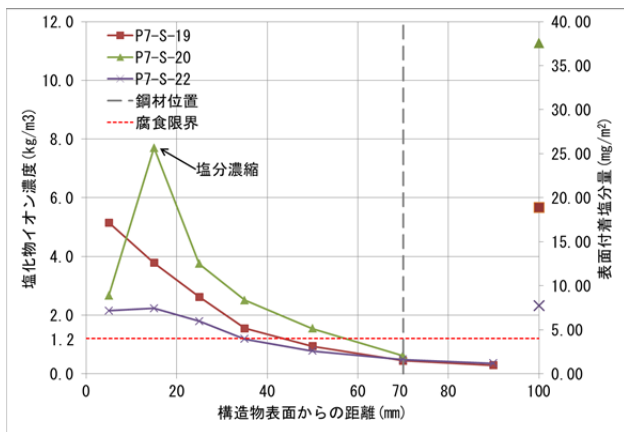


図-4 P7 橋脚梁部側面調査結果

つぎに、P7 橋脚梁部(写真-5、6)の中央と端部における塩化物イオン濃度分布の結果を図-5に示す。

鋼材付近における塩化物イオン濃度で比較すると、同一高さ(EL+23m)では、中央では深さ25mm付近に塩分濃縮が見られ、端部に比べて約3倍近く高い傾向であった。

また、柱中央における高さEL+23mとEL+19mでは、EL+23mの方が高い傾向であった。



写真-5 P7 橋脚梁部(西面)



写真-6 P7 橋脚梁部(東面)

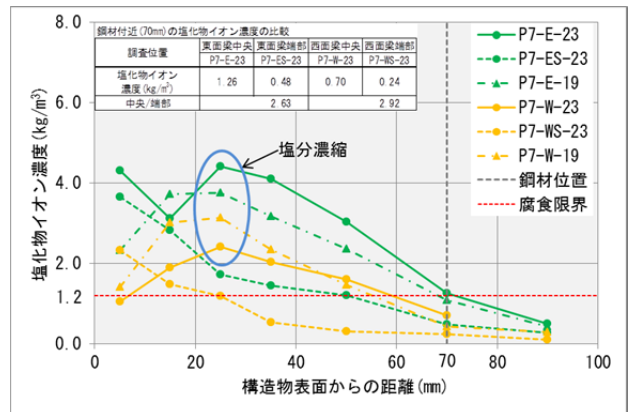


図-5 P7 橋脚梁部調査位置での塩分濃度分布

以上より、橋脚形状の違いから、梁部端部および梁側面よりも桁の直下に位置する中央や梁下面では、降雨などによる表面の洗い流し効果が小さく、また、コンクリート内部における塩分濃縮の影響から、鋼材位置における塩化物イオン濃度が高まる傾向にあると考えられる。

2.3.3 塩化物イオン濃度と拡散係数

過年度の調査結果を含めた深さ方向の塩化物イオン濃度分布より、フィックの拡散方程式で近似して得られた拡散係数 D_c と、高さ方向の分布を図-6に、鋼材付近(コンクリート表面から70mm)の塩化物イオン濃度の分布を図-7に示す。

図-6より、高さ15m以上における拡散係数は、その平均値 $0.4 \text{ cm}^2/\text{年}$ 程度なのに対し、15m以下での拡散係数は、海面に近づくにつれて高まる傾向にあり、その約5割に損傷が生じていた。

図-7より、拡散係数 $D_c \geq 0.5 \text{ cm}^2/\text{年}$ 以上の鋼材付近の塩化物イオン濃度は、標準的な腐食発生限界濃度($1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$)よりも大きい値を示し、その約6割に損傷が生じていた。拡散係数と鋼材付近の塩化物イオン濃度には比例関係が認められ、拡散係数が高くなるにつれ損傷が生じる箇所も増加傾向であった。

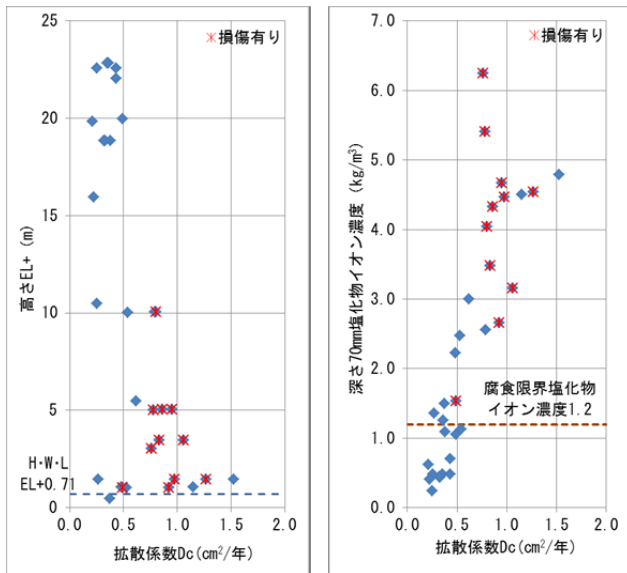


図-6 拡散係数の高さ分布

図-7 拡散係数と塩分濃度

※拡散係数の特異値($2.0 \text{ cm}^2/\text{年}$ 以上)は除く

※損傷はコア削孔より面的ひび割れ箇所

3. 海岸部に位置する橋梁の付着塩分調査

3.1 調査対象橋梁

調査対象橋梁である結橋(写真-7)は、沖縄本島北部の国頭郡大宜味村根路銘に位置(図-8)する。冬場には東シナ海から北よりの季節風に曝される環境にある(写真-8)。

橋梁概要としては、橋長は99m、上部工形式は3径間連結PCポステンT桁橋(写真-9)で、平成23(2011)年11月に竣工した橋梁である。適用示方書である道路橋示方書¹⁾から、結橋の架橋位置における塩害の対策区分としては、影響が激しい対策区分Sに位置する。



図-8 結橋位置図



写真-7 結橋 全景(山側から7月時)



写真-8 現地状況(上1月時 下7月時)



写真-9 結橋 桁下状況(A2側から7月時)

3.2 調査方法

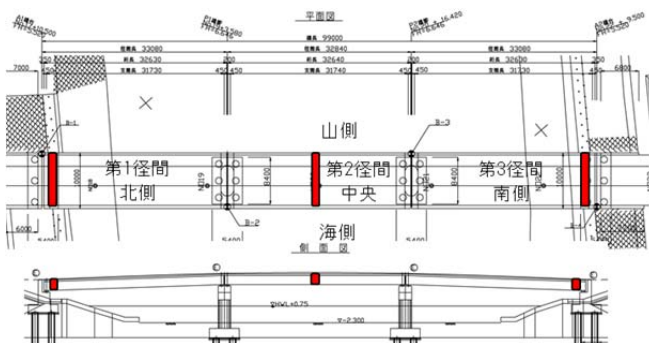
季節毎の付着塩分量の違いに着目し、平成23年12月から平成24年1月まで約1年間にわたる表面付着塩分を、琉球大学富山准教授の協力のもと、定期的に桁表面に付

着した塩分量をガーゼ拭き取りによる調査を行った。

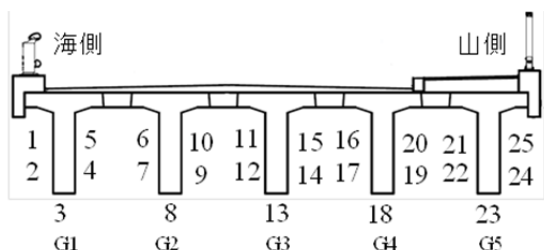
調査実施時期を表-1に、調査箇所を図-9に、調査状況を写真-10に示す。なお、中央径間である第2径間については、橋梁点検車による調査となるため、波飛沫が激しい冬季(1月または2月)と、比較的波が穏やかな夏季(7月)の年2回の実施とした。

表-1 調査箇所および時期

時期	平成23年	平成24年	平成24年	平成24年	平成24年	平成24年	平成25年
径間	12月1日	1月5日	2月9日	4月17日	7月17日	10月26日	1月21日
第1径間	○	○	○	○	○	○	○
第2径間			○	○	○	○	○
第3径間	○	○	○	○	○	○	○
天候	曇り	曇り	晴れ	晴れ	曇り	晴れ	晴れ



※赤線は調査位置を示す



※番号は調査位置における計測番号を示す

図-9 調査位置図(上:平面・側面位置、下:断面位置)



写真-10 拭取り調査状況(左:第1径間、右:第2径間)

3.3 調査結果

3.3.1 付着塩分量調査の結果

平成23年12月から平成24年1月までの表面付着塩分の調査結果として、代表して第3径間G1桁の調査結果を図-10に示す。また、全径間で調査を行った平成24年2月、7月、平成25年1月の結果を各径間毎に図-11から図-13に示す。

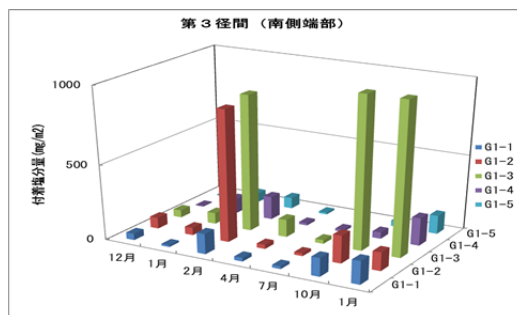


図-10 第3径間G1桁(年間)

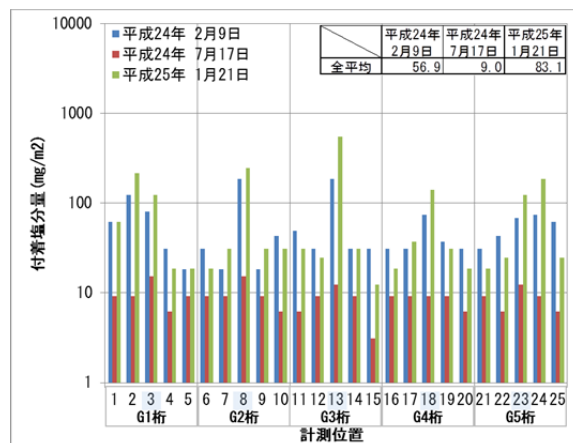


図-11 第1径間(北側)

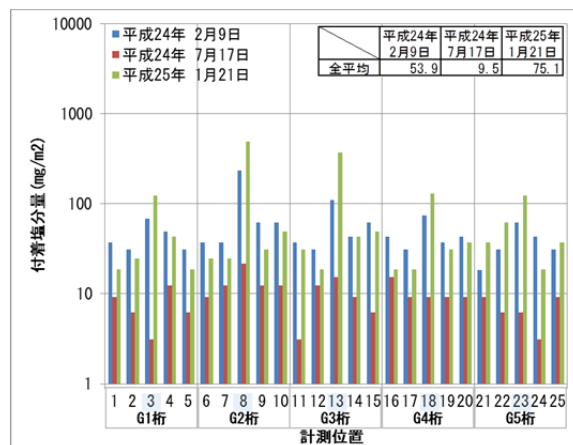


図-12 第2径間(中央)

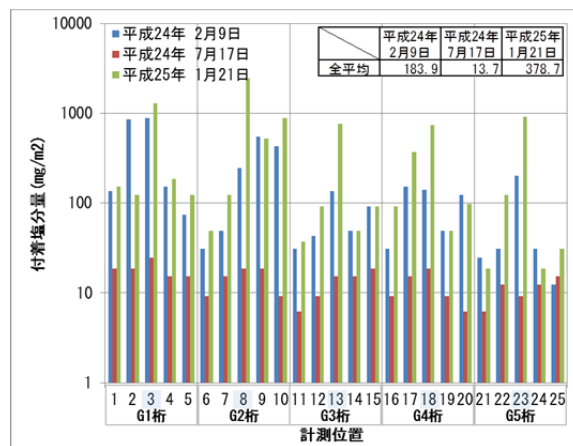


図-13 第3径間(南側)

今回の調査結果からは、以下の知見が得られた。

図-10 より橋梁全体として付着塩分量の変動は、10月～2月に増加し、4月から7月は減少する傾向となった。

各部位で比較すると、桁下面の付着塩分量が多い傾向にあり、各径間の最大位置は、第1径間（北側）ではG3桁下面（計測位置13）、第2径間（中央）および第3径間（南側）では、G2桁下面（計測位置8）と、径間によって異なる桁位置となった。

各径間で比較すると、第1径間（北側）および第2径間（中央）に比べて、第3径間（南側）の付着塩分量が非常に多く、最も付着塩分量が多く計測された平成25年1月21日で各径間の平均値で比較すると、第3径間（南側）の付着塩分量は他の径間に比べて約5倍も多いことがわかった。

以上より、付着塩分量は、各径間や桁の部位によって異なり、季節毎にも変動することが認められた。

3.3.2 気象条件と付着塩分量の関係

平成24年における結橋付近における気象観測データとしては、気象庁の伊是名気象台の観測データを参照した。平成24年における月ごとの平均風速と最大風速を図-14に、降水量を図-15に、調査を実施した月を代表して1, 4, 7, 10月における風向頻度を図-16に示す。

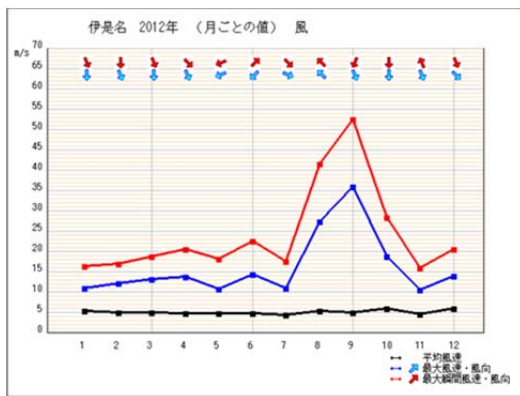


図-14 平成24年における月ごとの風速

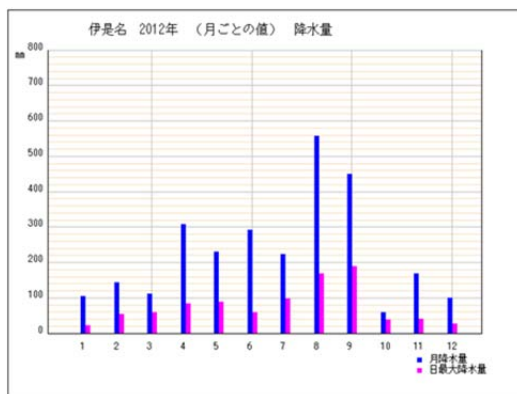


図-15 平成24年における月ごとの降水量

平均風速は、年間を通して5m/s前後と大きな変動は認められない。また、8月から9月にかけて最大風速が突出して大きいのは、台風の影響である。

降水量は、月ごとの合計降水量の平均が約230mmであり、4月から9月にかけて降雨が多い状況である。また、特に8月から9月にかけて降水量が突出して大きいのは、台風の影響である。

風向頻度は、10月および1月では北よりの海側からの風向頻度が多く、4月および7月では東から南西の陸側からの風向頻度が多い状況である。このことから季節による風向に大きな違いが認められた。

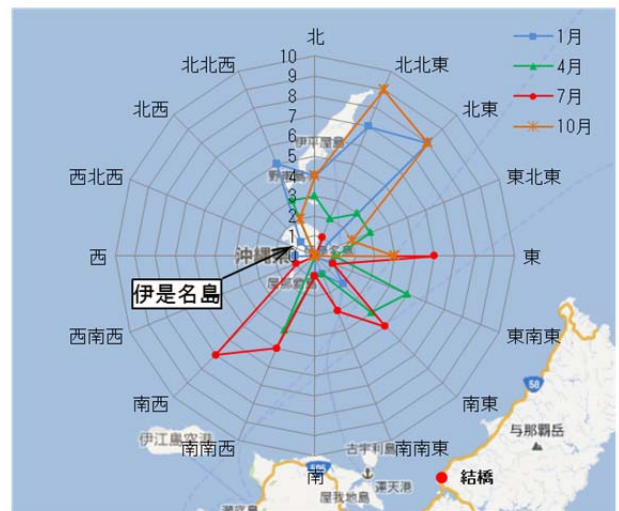


図-16 平成24年1・4・7・10月における風向頻度

3.3.3 考察

定期的な付着塩分量の調査および気象データより、冬季（10月～3月）では、北よりの海側からの風向となり、かつ降水量が少ないことから、付着塩分量が増加すると考えられる。特に、架橋位置の地形的要因により、北よりの海側からの風向時に、第3径間（南側）で波飛沫等が高まることから、付着塩分量が激しくなる傾向にあると考えられる。

また、夏季には東から南西方向と陸側からの風向が多く、かつ降水量も多いことから、部位によっては桁が洗浄されることで付着量が減少したと考えられる。

結橋周辺の気象データが伊是名島と直近ではないことから、結橋周辺における風向風速との整合性を確認する必要がある。このため、結橋に近接した根路銘ポンプ場（図-17）の屋上に風向風速計を設置し、平成24年12月から平成25年3月までの約1年間の計測を行う予定である。

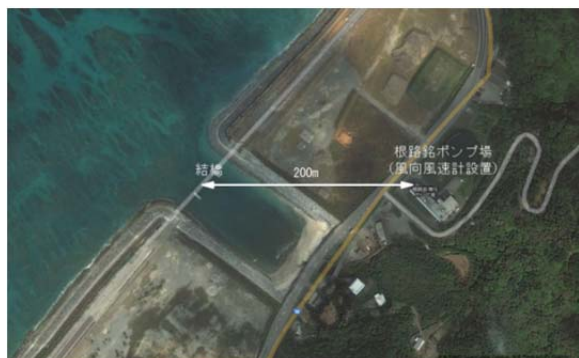


図-17 根路銘ポンプ場位置図

平成 23 年度における表面付着塩分浸透試験の結果からは、表面に供給された塩分は比較的早い段階で表層近傍に浸透してしまうことが想定された。このことから、結橋では、冬季に付着塩分量が増加し、夏季に減少する結果から推察すると、冬季に付着した塩分が表層近傍に吸収されたことにより、夏季に減少することが想定される。このため、表層近傍において（かぶり程度）コア採取による浸透塩分量を確認する必要が考えられる。

4. 新設橋脚の初期物性値の取得

伊良部大橋は沖縄県の宮古島と伊良部島を結ぶ離島架橋(図-18)で現在建設中である。



図-18 調査箇所位置図

当該橋梁は経年的な材料物性値の変化をモニタリングすることを目的として、将来コアサンプリングが可能となるように、一部の橋脚 (P21, P41) でコンクリートかぶりを増厚 (+120mm) している。このうち、P21 では、平成 22 年度 (コンクリート打設から約 8 ヶ月経過) に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た。今年度は、コンクリート打設から約 1 年半経過した P41 橋脚 (写真-11) で、同様にコア採取を行った。



写真-11 伊良部大橋 P41 橋脚

コア採取位置は、当該橋脚の高さが海面 (H. W. L.) から約 3.8m と低いため、海面付近 (H. W. L から+1.0m) 橋脚天端付近の 2 箇所から各 $\phi 50\text{mm}$ のコア 2 本、 $\phi 100\text{mm}$ のコア 3 本を採取した。なお、コア採取にあたっては、橋脚周辺に足場が設置されていないため、写真-12 に示す特殊高所技術 (ロープアクセス) を用いて行った。なお、供用後に行う調査も同様な方法で行う予定である。

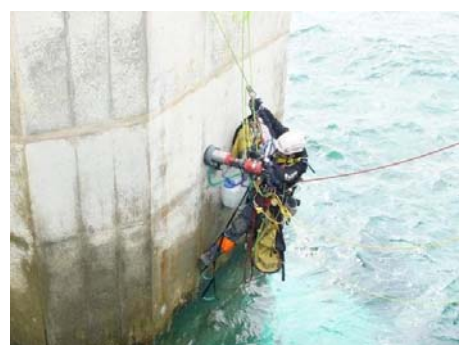


写真-12 特殊高所技術によるコア採取

採取したコアについては、以下の調査を実施中である。

- 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) RCPT 試験 ※同配合の供試体を使用
- 4) 中性化深さ
- 5) 細孔量測定
- 6) 細孔径分布

現時点で結果 (速報値) の出ている、中性化深さと塩化物イオン濃度については以下のとおりである。

中性化深さは、採取したコアの平均値が 0.6mm であり、コンクリート標準示方書²⁾ に示される中性化速度から求められる中性化深さ (1.1mm) よりも小さい値を示す結果となった。

採取したコアを分析することによって得られた深さ方向の塩化物イオン濃度分布を図-19 に示す。参考に P21 (平成 22 年度調査) の結果も併せてプロットした。コア

採取位置は、P41 が海面 (H. W. L.) から +1.1m、+3.3m で、P21 は +1.0m、+3.3m、+5.6m である。なお、P21 (平成 22 年度調査) は採取したコアを 20mm 間隔で切断して塩化物イオン濃度を測定したのに対し、今年度実施した P41 は、表面付近の浸透状況を確認するため、10mm 間隔で切断して測定した。P41、P21 とともにコンクリート打設後間もないため、表面から比較的深い 25mm 以深では、初期含有塩分量相当なのに対し、表面付近 (深さ 5~10mm 以内) では、非常に高い塩化物イオン濃度を示し、海面に近い方がより高い傾向が見て取れる。

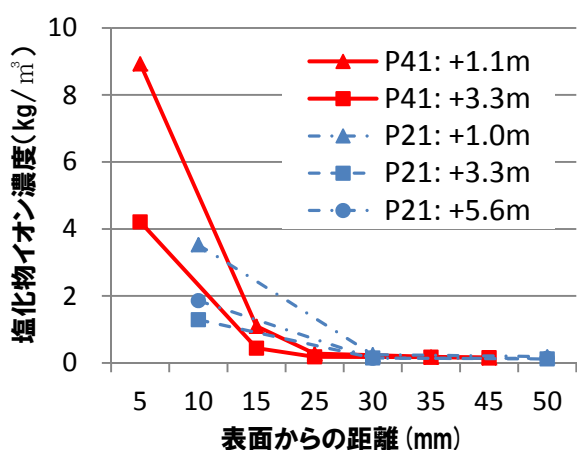


図-19 塩化物イオン濃度分布

引き続き残りの物性調査を実施し、過年度に実施した P21 橋脚の調査結果と併せて取りまとめを行う予定である。また、伊良部大橋については、供用後も継続的にコア採取を行い、塩害の予防保全に向けた基礎データとして蓄積していく計画である。

5. まとめ

既設橋脚およびコンクリート上部構造ならびに新設橋脚の塩分量調査によって以下の知見が得られた。

- 1) 橋脚高さ方向での鋼材付近における塩化物イオン濃度は、梁部と柱下部では柱下部の方が約 5 倍も高く、すでに損傷が生じている箇所もあった。
- 2) 橋脚梁部の中央と端部では、中央で内部に塩分濃縮が認められ、鋼材付近における塩化物イオン濃度は約 3 倍近く高かった。
- 3) 過年度の調査結果を含めた高さ方向における拡散係数の分布および鋼材付近の塩化物イオン濃度の分布から、損傷が生じた箇所での拡散係数は高く、鋼材付近における塩化物イオン濃度も高い値を示した。
- 4) 橋脚に付着する飛来塩分量は、高さが高くなるにつ

れて小さくなるが、15m 以上ではほぼ一定となった。

- 5) 上部構造に付着する飛来塩分量は、卓越する風向や降雨量の影響を受ける。また、同一橋梁であっても、架橋位置の地形的要素により、各調査位置で付着塩分量に違いが認められた。
- 6) 完成後間もない新設橋脚の塩化物イオン濃度については、表面付近で非常に高い濃度を示した。

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) 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編 平成 14 年 3 月
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], 2007

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

Abstract : Previous researches introduced some prediction methods for deterioration caused by corrosion of steel members of bridges under chloride environment. However, the deterioration mechanism, such as chloride penetration and corrosion rate of steel member, 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 2012, the following surveys were conducted on bridges in Okinawa: (1) survey of salt content in underwater bridge piers, (2) periodic survey of salinity on surface of concrete superstructure.

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