

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、
花井拓

【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 23 年度は、厳しい塩害環境下である沖縄既設橋脚の塩分調査、コンクリート橋上部構造へ付着した塩分の内部への浸透過程の再現実験を行った。

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 23 年度は、厳しい塩害環境下にある橋脚の塩害に関する維持管理手法を高度化するために、過年度より実施している既設橋脚の塩分調査の範囲をさらに拡大し、環境の異なるいくつかの橋脚を対象として調査を実施した。また、過年度より厳しい塩害環境下にあるコンクリ

ート橋上部構造表面への塩分付着について調査しているが、この付着塩分の内部への浸透を再現する実験を行った。

2. 厳しい塩害環境下にある橋脚の塩分調査

2.1 調査対象

調査対象は、昭和 60(1985)年竣工の瀬底大橋 P8、平成 9(1997)年竣工の浜比嘉大橋 P5・P11 とした。また、本報告では、過年度に実施した瀬底大橋 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。これらの橋梁の位置を図-1 に、それぞれの橋梁を写真-1、2 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。一方の浜比嘉大橋は沖縄東部の勝連半島の東に、平安座島と浜比嘉島を南北方向に結ぶ離島架橋である。北側に本島があることから瀬底大橋と比べれば穏やかな環境であると考えた。また、調査対象とした橋脚については、浜比嘉大橋 P5 が水深 1m 程度の浅瀬に、瀬底大橋 P11 が汀線付近に位置しているのに対し、瀬底大橋 P8 と浜比嘉大橋 P11 は主航路近傍（浜比嘉大橋 P11 は主航路に隣接）の比較的水深の深い場所に位置しており、このような海底地形の塩分浸透への影響についても確認することとした。



写真-1 瀬底大橋（瀬底島より）

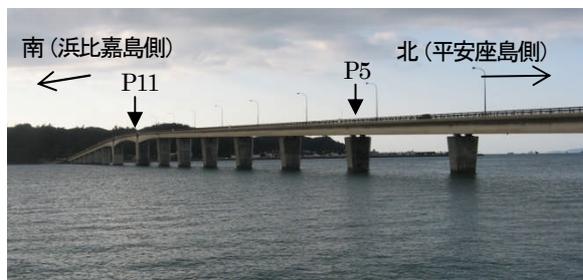


写真-2 浜比嘉大橋（平安座島より）

表-1 調査対象橋梁・橋脚

橋梁	環境	橋脚	水深
瀬底大橋	厳しい	P8	深い
		P11	汀線付近
浜比嘉大橋	比較的穏やか	P5	浅い
		P11	深い

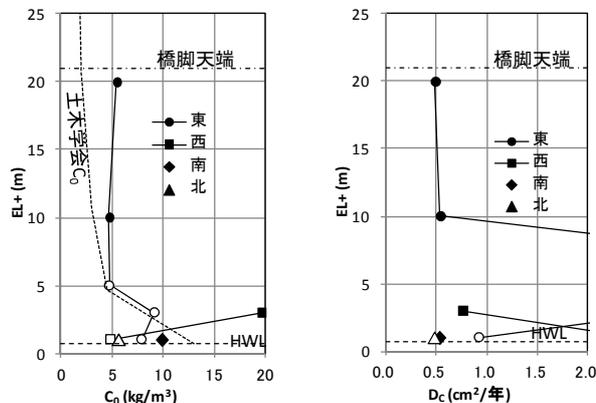
2.2 調査内容

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。調査対象箇所は、海面からの高さによる違いを確認するために高さ方向に数か所設定した。また、周方向についても、面する方向による違いを確認するために数か所設定した。

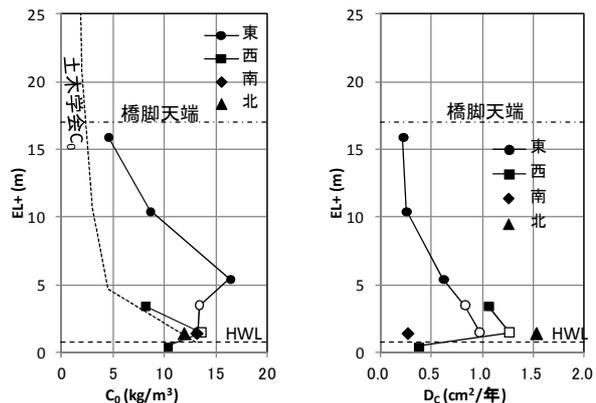
2.3 調査結果

2.3.1 コア採取による塩化物イオン濃度分布

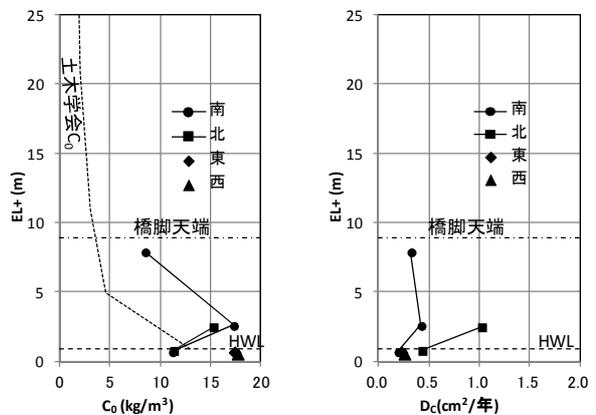
コア採取による深さ方向の塩化物イオン濃度分布をフィックの拡散方程式で近似して得られた表面塩化物イオン濃度 C_0 、拡散係数 D_c を図 2~5 に示す。



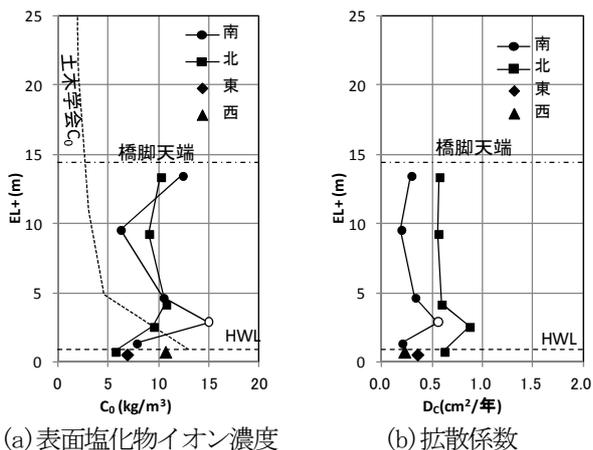
(a) 表面塩化物イオン濃度 (b) 拡散係数
図-2 瀬底大橋 P8 の表面塩化物イオン濃度と拡散係数
(白抜きは面的ひび割れが確認されたコア)



(a) 表面塩化物イオン濃度 (b) 拡散係数
図-3 瀬底大橋 P11 の表面塩化物イオン濃度と拡散係数
(白抜きは面的ひび割れが確認されたコア)



(a) 表面塩化物イオン濃度 (b) 拡散係数
図-4 浜比嘉大橋 P5 の表面塩化物イオン濃度と拡散係数



(a) 表面塩化物イオン濃度 (b) 拡散係数
 図-5 浜比嘉大橋 P11 の表面塩化物イオン濃度と拡散係数 (白抜きは面的ひび割れが確認されたコア)

塩化物イオン濃度分布では、表面付近で値が低下しているケースが多く見られたが、そのような場合には、フィック式への近似において表面付近のデータは無視した。また、本調査においては、コア採取孔壁面に、躯体表面と平行な方向のひび割れ (以下「面的ひび割れ」) が多数確認されている (写真-3)。このようなコアの塩化物イオン濃度分布は、面的ひび割れが深でもかなり高い塩化物イオン濃度を示しており、フィックの式への適合が悪かった。これらのコアの中には、採取時に面的ひび割れから海水がしみだしてきたようなものもあり、表面のひび割れから面的ひび割れ内部に浸透した海水により、新たな塩分の供給面が形成されていた可能性がある。これらのデータについては、単純にフィックの式で評価することは妥当ではないので、図の中では、参考値として白抜きで示している。表面塩化物イオン濃度の図に破線で示している「土木学会 C_0 」は、文献1)の海岸からの距離や地域による C_0 の値を、以下のような考え方で高さ方向に分布させたものである。すなわち、1)高さ 1m (ここでは HWL からの高さとした) が汀線からの距離 25m に相当、2) HWL の値は「飛沫帯」の値、とした。



写真-3 コア採取孔壁に確認されたひび割れ (瀬底大橋 P8 瀬底島側 EL+5.02m)

表面塩化物イオン濃度は、ほとんどのデータで土木学会式による値を上回っているが、HWL 付近では小さくなる傾向が見られた。また、概ね、海面からの高さが高くなるにつれて C_0 は小さくなっているものの、橋脚天端付近では若干上昇しているケースも見られる (図-5(a))。海面付近では、海水飛沫による塩分供給が大きいのが、海面より高くなるにつれてこの供給量が小さくなると考えられ、土木学会式にも反映されている。一方で、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透は降雨などによる表面の洗い流しの影響を受けることが知られており、橋脚天端付近では、上部構造の影になることによりこの洗い流し効果が小さくなり、長期的には高い塩化物イオン濃度となったとも考えられる。橋梁位置や、橋脚位置の水深による表面塩化物イオン濃度の明確な差は見られなかった。

拡散係数は、面的ひび割れの確認された位置では異常値を示すが、その他では概ね $0 \sim 2 \text{ cm}^2/\text{年}$ の範囲に収まっている。浜比嘉大橋では、北面の方が拡散係数が大きい傾向にある。拡散係数は、コンクリートの緻密さに密接な関係があるが、塩化物イオンの拡散は、乾湿繰り返しなどの環境要因にも影響を受けるため、日射などによりこの差が生じたことも考えられる。

図-6 は図-2~5 の表面塩化物イオン濃度の値を HWL からの距離で整理し、重ねて示したものである。橋脚毎にデータを色分けして示しているが、天端位置もその色に合わせて一点鎖線で示している。橋脚天端付近の値の上昇をのぞけば、 C_0 の値は、図中の黒太破線 (下式) でおおよそ包絡できる。

$$C_0 = \begin{cases} 5 \text{ kg/m}^3 & (H \geq 15\text{m}) \\ -1.5H + 27.5 \text{ kg/m}^3 & (15\text{m} > H \geq 5\text{m}) \\ 20 \text{ kg/m}^3 & (5\text{m} > H) \end{cases}$$

H: HWL からの高さ

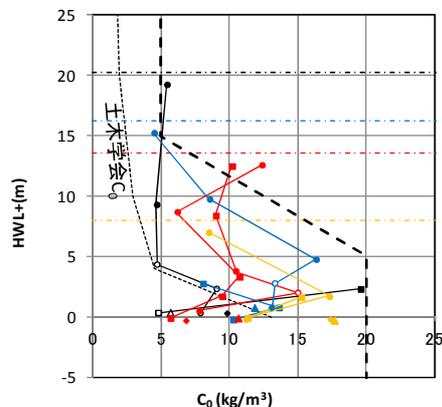


図-6 表面塩化物イオン濃度 (全データ)

2.3.2 鉄筋位置での塩化物イオン濃度と面的ひび割れの関係

面的ひび割れは、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ていると考えられることから、鉄筋腐食と密接な関係があると想定される。図-7、8は、それぞれ面的ひび割れが確認された、あるいは確認されなかったコアの、鉄筋付近（コンクリート表面から70mmの位置）の塩化物イオン濃度の度数分布を示している。面的ひび割れが確認されたコアでの塩化物イオン濃度最低値は 1.53kg/m^3 、平均値は 3.81kg/m^3 であった。この最低値は、一般的に言われている腐食限界塩化物イオン濃度（ 1.2kg/m^3 ）程度である。面的ひび割れは、鉄筋の腐食が開始され、ある程度の膨張圧が生じた時に発生すると考えられることから、鉄筋自体の腐食発生はこれよりも低い塩化物イオン濃度で生じるものと考えられる。一方で、塩化物イオン濃度が 6.25kg/m^3 に達していても、面的ひび割れが生じていなかったコアも確認されている。

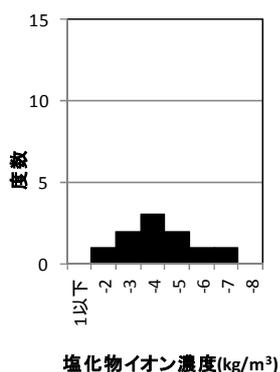


図-7 面的ひび割れが確認されたコアの鉄筋位置での塩化物イオン濃度

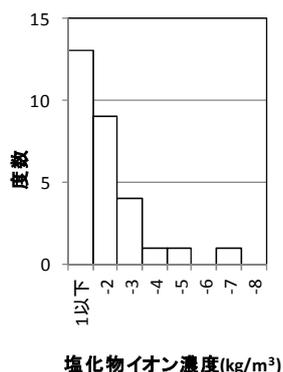


図-8 面的ひび割れが確認されなかったコアの鉄筋位置での塩化物イオン濃度

2.4 塩化物イオン拡散予測

2.3.1で推定された表面塩化物イオン濃度の高さ方向分布（図-6）を用いて、塩化物イオンの拡散予測を行った。拡散係数は、参考文献1)のセメント種類と水セメント比（W/C）から求まる値のうち、「W/C=0.5程度の普通ポルトランドセメント」を想定し、 $D_c = 1.3\text{cm}^2/\text{年}$ とした。結果を図-9に示す。50年後、100年後における、塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 、 2.5kg/m^3 に達する深さを示している（図中の凡例 Y_{x-c} の x が経過年数、 c が塩化物イオン濃度（ kg/m^3 ））。供用100年間で鉄筋位置における塩化物イオン濃度を 1.2kg/m^3 に抑えようとするとかぶりが300mmも必要となる結果となった。かりに 2.5kg/m^3 と

しても、250mmが必要となる。以上の結果からは、激しい塩害環境下における橋脚においては、かぶりの確保だけでは対応が困難であることが予想され、コンクリート塗装、鉄筋塗装、高耐性の鉄筋の使用などが必要と考えられる。

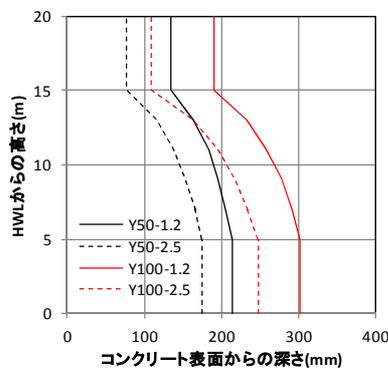


図-9 塩化物イオンの到達深さ予測

一方で、図-6の C_0 の計算に用いた今回のデータは、中性化による表面付近の塩化物イオンの濃縮現象が生じている可能性が高い。この濃縮を生じている分布形状から得た C_0 を用いての拡散予測は前提が異なり、かなり安全側の評価を与えている可能性もあるため、今後の更なる検討が必要である。

3. 表面付着塩分浸透試験

本研究課題では、過年度よりコンクリート橋上部構造への表面付着塩分をガーゼ拭き取りにより調査している。ガーゼ拭き取りは簡易な調査手法であるが、実際の塩分浸透予測などに活用するためには、表面に付着した塩分がどのように内部に浸透していくのかを把握しておく必要がある。更に、表面付着状態から内部浸透へのメカニズムが明らかにできれば、表面にある状態で洗浄などを行うことにより、塩害を予防できる可能性も考えられる。また、一般的に言われている構造部位による降雨などによる塩分洗い流しの効果についてもより合理的な説明が可能になると考えられる。以上より、表面に付着した塩分のコンクリート内部への浸透を確認するための供試体レベルでの試験を実施した。

3.1 調査方法

コンクリート表面に付着した塩分が内部に浸透するメカニズムを確認する目的で、コンクリート供試体（ $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 50\text{mm}$ ）を作製し、表面付着塩分を霧吹きによる定期的（1週間間隔）な供給により再現した（図-10）。噴霧した塩水については、過年度の実橋梁における表面

付着塩分拭き取り調査によって確認された塩分量を再現する目的で、表-2の2パターンを目標に作成した。また、降雨による洗い流しの効果や、洗浄による表面塩分除去の効果を確認する目的で、定期的（1週間毎、2週間毎、3週間毎、洗浄無し）に高圧洗浄機による表面洗浄を実施した。これらの試験ケースを表-3にまとめる。試験期間終了時に、表面の拭き取り調査、コア採取による内部の塩化物イオン濃度の確認を実施した。

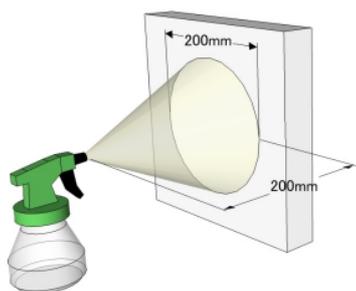


図-10 塩水噴霧条件

表-2 噴霧される塩水に含まれる塩分量
(Cl⁻換算 / NaCl換算)

塩分量 ケース	mg、0.09m ² 当たり		月当たり、m ² 当たり (mg/m ² /月)
	1回分	9回累計	
1	0.3/0.5	2.7/4.5	15.2/25
2	10.3/17.0	92.9/153	516/850

表-3 試験ケース名

塩分量ケース	洗浄間隔			
	1週間	2週間	3週間	洗浄無し
1(少)	1-1	1-2	1-3	1-0
2(多)	2-1	2-2	2-3	2-0

3.2 調査結果

3.2.1 表面付着塩分量

拭き取りにより得られた表面付着塩分量を図-11に示す。洗浄しない1-0、2-0をのぞいて、いずれの供試体も、拭き取りの3日前に最後の洗浄を行い、1日前に最後の塩水噴霧を行っている。

塩分量の多い2-xのシリーズの方が、1-xに比べて表面塩分量はわずかに多い結果となっているが、1回当たりの塩分供給量の比率(約1:34)ほどの差は出ていない。1-xのシリーズで得られた値は、1回当たりに供給される塩化物イオン量(約0.3mg)とほぼ等しく、最後の噴霧で供給された塩分がほぼそのまま表面に残ったとも考え

られる。それと比較して2-xシリーズにおいては、供給量(約10.3mg)の5%以下しか検出されなかった。

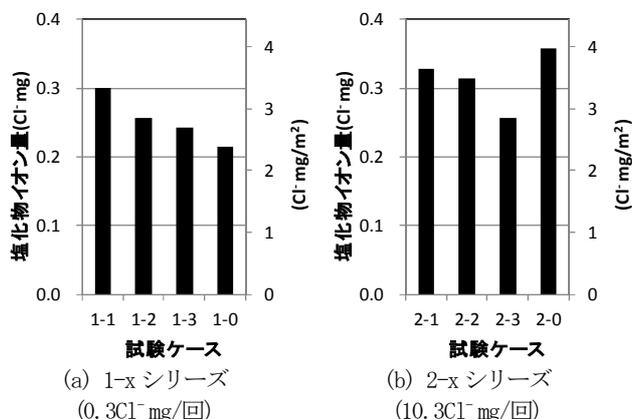


図-11 表面付着塩化物イオン量

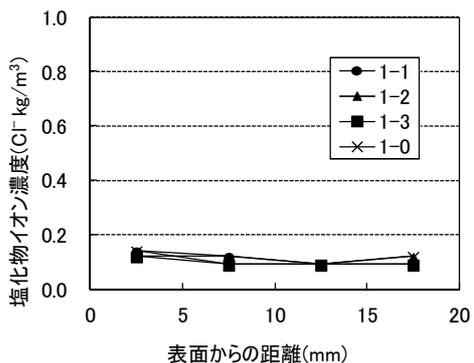
洗浄間隔の違いで比較すると、両シリーズにおいて、洗浄間隔が長くなるほど表面付着塩分量が少なくなる結果となった。洗浄無しのケースについて言えば、2-0は最も高い値を示したものの、逆に1-0は最も低い値となった。

3.2.2 内部の塩化物イオン濃度分布

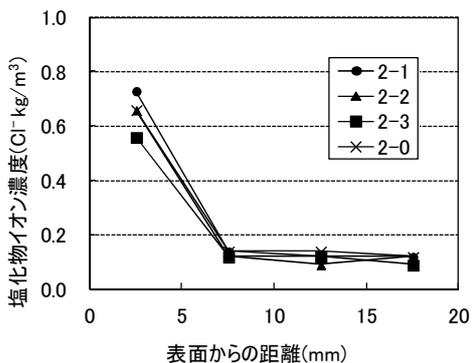
採取したコアを表層から5mm間隔でスライスし、塩化物イオン濃度を計測した結果を図-12に示す。2-xシリーズの表層5mmのデータをのぞいて、全てのデータで0.1kg/m³程度の値となっているが、これは許容値内の初期塩分であると想定される。

初期塩分を控除して考えた場合、1-xシリーズではほとんど内部への塩化物イオンの浸透がないのに対し、2-xシリーズでは表層5mm程度まで、塩化物イオンが浸透しているのが分かる。初期塩分を除けば、表層5mm程度までの塩化物イオン濃度は0.5~0.6kg/m³程度である。

洗浄間隔の違いで比較すると、2-xシリーズにおいては、表層5mm区間で若干の差が生じているが、洗浄間隔1週間、2週間、3週間で比較してみると、表面付着塩化物イオンと同様に、洗浄間隔が長いほど塩化物イオン濃度が低い結果となっている。これらの結果は、既往の研究²⁾などと異なるものであるが、今回の結果は塩分量の絶対値が小さく、誤差の範囲であった可能性も考えられる。



(a) 1-x シリーズ (0.3Cl mg/回)



(b) 2-x シリーズ (10.3Cl mg/回)

図-12 塩化物イオン濃度分布

3.2.3 考察

本試験では、実際の橋梁上部構造の表面拭き取り調査によって得られた表面付着塩分量相当の塩分を噴霧する塩水に含ませ、実橋での環境を再現しようとした。しかし、2-x シリーズの表面付着塩分量の結果からも分かるように、噴霧から1日程度経過した時点では、拭き取りによって採取される塩分はほとんど残存していない(図-11(b))。この結果から、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る。ただし、長期間供用している橋梁と、打設直後の今回の供試体では条件も異なる。例えば、実橋梁においては、既に内部に侵入している塩化物イオンによって濃度勾配

がゆるめられ拡散の駆動力が弱められている等の可能性も考えられる。

4. まとめ

平成 23 年度の橋脚の塩分調査によって得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 表面塩化物イオン濃度は海面からの高さが高くなるにつれて小さくなる傾向にある。また、橋脚天端付近では、表面塩化物イオン濃度が高まる傾向が確認されたが、これは上部構造の影になることにより降雨による洗い流し効果が小さくなっている可能性が考えられる。
- 2) 1)の結果を考慮した劣化予測によれば、非常に厳しい塩害環境においては、一般に用いられるかぶりの確保だけでは鋼材を腐食から保護することが困難である可能性が示された。一方で、この劣化予測を算定した塩化物イオン濃度分布では、表面付近の中性化による濃縮の影響を受けている可能性が高く、この点については更なる検討が必要と考えられる。

平成 23 年度の表面付着塩分浸透試験によって得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 外部から飛来し、コンクリート表面に付着する塩分は、比較的早い段階で表層近傍に浸透してしまう可能性がある。今回の供試体を用いた調査では、水洗いによる、内部への塩分浸透の抑制については、効果が見られなかった。

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) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2007
- 2) 青木慶彦ほか：「風洞試験による飛来塩分を受けるモルタルの表面塩分量および塩分浸透性状の検討」、コンクリート工学年次論文集、32 巻、1 号、pp821-826、2010. 7. 1.

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 environment. In FY 2011, survey of chloride contents in existing bridge piers in Okinawa, where environment is very harsh in terms of chloride attack, and an experiment that reproduces intrusion of chloride ion adhered to surface of concrete superstructure were conducted.

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