

離島架橋下部工長寿命化のための 電気防食システムの提案

比嘉徹¹⁾・〇崎原盛伍¹⁾・金田一男¹⁾・親泊宏¹⁾・奥間正博²⁾・玉寄将太²⁾

1) (株)ホープ設計 技術管理部

2) 沖縄県土木建築部宮古土木事務所道路整備班

キーワード：橋梁，維持管理，長寿命化，電気防食，遠隔監視システム

1. はじめに

亜熱帯性気候に位置する沖縄では、高度成長期に建設された数多くの社会インフラは、厳しい塩害環境において、供用開始から約20年程度で劣化が顕在化し、補修・補強が必要となる事例が多い¹⁾。一方で、これら社会インフラの再構築は、社会情勢的にも困難な状況にあり、その対策として既存インフラ構造物の長寿命化が各方面で構築されつつある²⁾。

社会インフラを構成する上で重要となるコンクリート構造物では、経年による変状に加え、塩害、中性化、ASRに代表される耐久性に影響を及ぼす劣化現象も確認されている。そのうち塩害や中性化による劣化は、コンクリート内部鉄筋の腐食に起因し、コンクリートかぶり部がはく離、はく落する劣化現象を引き起こし、構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすことになる。これらへの劣化対策では、表面保護工法に代表される外部からの腐食因子を遮断することで内部鉄筋の腐食を抑制する間接

的な補修工法が従来から用いられてきた。

しかし、本県のように、塩害の厳しい環境では、補修後に既に蓄積された塩化物イオンに起因した再劣化も認められている。その対策としてコンクリート内部鉄筋の腐食反応そのものを電気化学的に直接停止させる電気防食工法があり、その積極的な応用の提案も重要と考える³⁾。

2. 対象橋梁の概要

対象橋梁は図-1に示すように、宮古島といけ間島を結ぶ池間大橋である。図-2に示すように、橋長 $L=1425\text{m}$ の離島架橋であり、県が管理する橋梁の中で重要度の高い橋梁となっている。



図-1 位置図

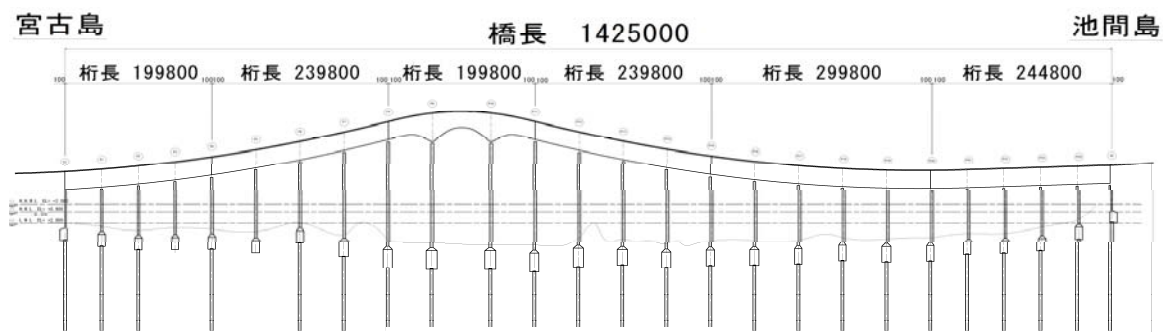


図-2 橋梁一般図(単位：mm)

沖縄県土木建築部道路管理課が策定した県管理橋梁の長寿命化修繕計画においては、本橋梁は表-1に示すように「個別管理橋梁」として指定されている。

表-1 個別管理橋梁（沖縄県）

橋梁名	橋長(m)	路線名	管理事務所	選定理由
古宇利大橋	1960	県道247号線 (古宇利屋嘉地線)	北部土木 (計6橋)	離島架橋 沖縄本島と古宇利島
瀬底大橋	762	県道172号線 (瀬底健堅線)		離島架橋 沖縄本島と瀬底島
羽地奥武橋	77.2	県道110号線		離島架橋 沖縄本島と奥武島
屋我地大橋	300	県道110号線		離島架橋 奥武島と屋我地島
野甫大橋	320	県道179号線 (田名野甫線)		離島架橋 「伊平屋島と野甫島」
伊計大橋	198.25	県道10号線 (伊計平良川線)		離島架橋 宮城島と伊計島
世開橋	96.3	県道10号線 (伊計平良川線)	中部土木 (計4橋)	離島架橋 「沖縄本島と宮城島」
平安座海中大橋	280	県道10号線 (伊計平良川線)		離島架橋 沖縄本島と宮城島
浜比嘉大橋	900	県道238号線 (浜比嘉平安座線)		離島架橋 宮城島と平安座島
世渡橋	99	県道230号線 (池間大浦線)	宮古土木 (計2橋)	離島架橋 宮古島と池間島
池間大橋	1425	県道230号線 (池間大浦線)		離島架橋 宮古島と池間島

本橋は1992年に供用開始し、厳しい塩害環境の中で供用23年目に入っている状況である。補修設計に先立ち、本橋梁の下部工の外観変状調査、鉄筋の腐食度調査及びコンクリートコア採取を現場にて実施し、同コアを用いて、塩化物イオン含有量試験を実施した。結果、塩分量調査を実施した12橋脚中4橋脚で、塩化物イオン含有量が、発生限界値1.2kg/m³を上回る値を示した。また、コンクリートかぶりの浮き箇所が多数確認されたが、図-3に示すように、鉄筋腐食度状況はいずれも点錆程度であった。

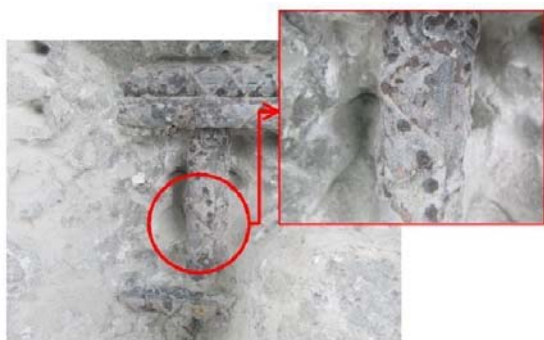


図-3 鉄筋腐食度調査結果

これらの外観調査及び室内試験結果をもとに、今後の橋梁長寿命化を図るため、適切な補修工法の選定が必要であり、その際の技術的課題が以下のように挙げられる。

- (1) 現在、本橋梁の供用年数は23年であるが、劣化速度が速い状況である。
- (2) 塩化物イオン含有量は鉄筋位置で高い状況である。
- (3) 著しい塩害環境における鉄筋の腐食防止が必要である。
- (4) 橋長の長い離島架橋であり、補修後の維持管理の利便性を図るための対策が必要である。

3. 塩分量調査結果

ここでは主に塩分量試験結果についての考察を記述する。

塩分量試験の結果、塩分量試験を実施した12橋脚において比較的コンクリート表面での塩分量が高いことが確認できた。表面での塩分量は橋脚の上部および海面部付近でそれぞれ行ったが、明確な塩分量の差異は見られなかった。

図-4に示すグラフは、風向の影響を考慮した観点から、調査した12橋脚の塩化物イオン含有量を方向別に平均化した値である。グラフより、起点より右側（北東）及び起点より左側（南東）は鉄筋位置での塩化物イオン含有量が、発生限界値1.2kg/m³を上回った。その他の方向の結果も比較的塩分量が高い状況である。起点より右側（北東）で塩分量が突出して高いのは季節風の影響が考えられる。

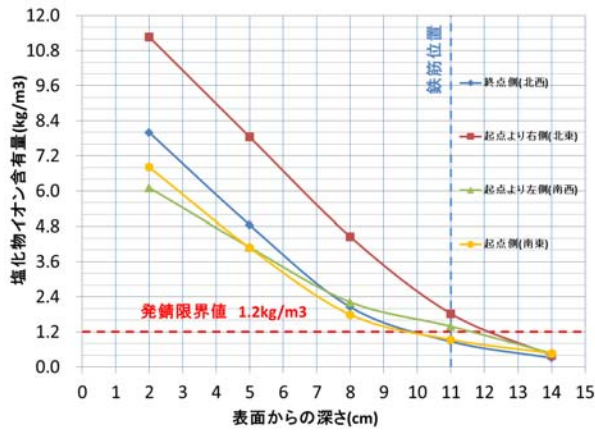


図-4 コア採取箇所毎の塩分量試験結果

4. 塩化物イオンの浸透予測

塩分量試験を実施した下部工について、有効な対策を検討するために塩化物イオンの浸透予測の検討を行った。

P20 橋脚において塩化物イオン量拡散係数から、図-5 に示すように、竣工 25 年後の塩化物イオン含有量と、竣工 50 年後（表面補修後：表面被覆を想定 25 年後）の塩化物イオン含有量の表面からの深さ関係を図-6 に示す、鋼材位置における塩化物イオン濃度と経過年数の関係を算定した。

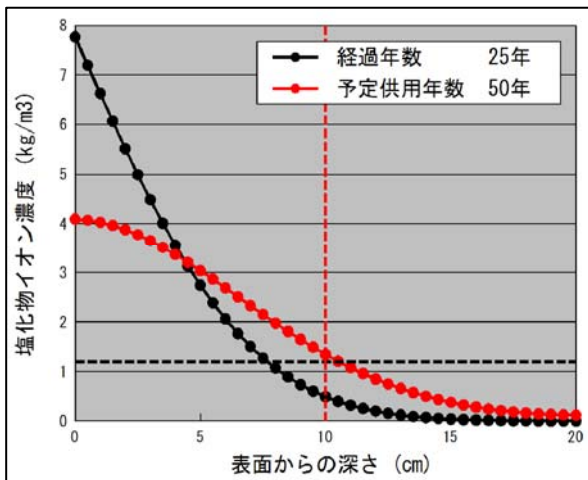


図-5 塩化物イオン濃度と表面からの深さの関係

検討結果、図-5 に示すように竣工 25 年では発錆限界値を超過することはないが竣工 50 年後には鉄筋位置で塩化物イオン含有量が発錆限界値(1.2kg/m³)を超過する結果となった。

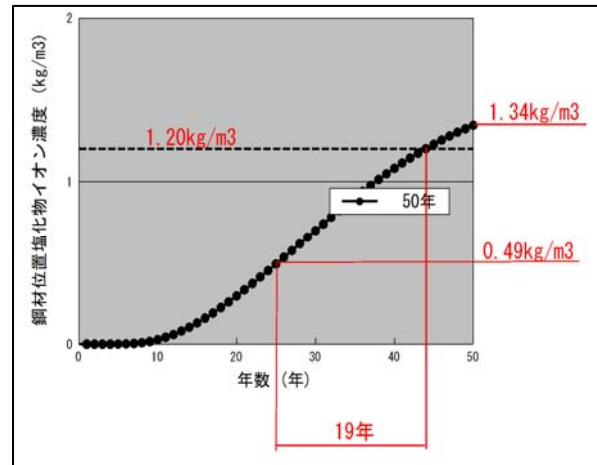


図-6 鋼材位置塩化物イオン濃度と経過年数の関係

また、図-6 に示すように、今後 19 年（竣工 44 年）後には、鋼材位置での塩化物イオン含有量が発錆限界値を超過することになる。

表-2 鋼材設置位置塩化物イオン含有量一覧表

	竣工より25年 現在 (kg/m ³)	竣工より50年 25年後 (kg/m ³)	竣工より75年 50年後 (kg/m ³)	何年後に 1.2kgを超えるか	塩化物イオン 拡散係数 (cm ² /年)
A1	0.57	1.44	1.68	16年後	0.633
P2	0.33	1.15	1.51	27年後	0.471
P6	1.55	2.45	2.52	すでに超えている	1.162
P8	0.44	1.05	1.22	43年後	0.662
P9	1.58	2.69	2.81	すでに超えている	1.027
P10	2.25	3.23	3.28	すでに超えている	1.398
P12	2.81	3.72	3.74	すでに超えている	1.691
P15	0.08	0.58	1.03	50年後以上	0.287
P17	0.06	0.47	0.86	50年後以上	0.273
P18	0.28	1.06	1.47	32年後	0.428
P20	0.49	1.34	1.63	19年後	0.580
P21	0.38	1.43	1.95	18年後	0.440
P22	0.13	0.72	1.16	50年後以上	0.325
A2	0.19	0.84	1.23	47年後	0.386

表-2 については、今回塩分量試験を実施した橋台 2 基および 12 基について、P20 と同様に算定した結果を示す。算定した結果、竣工 50 年後において発錆限界値を超過する橋脚が 3 基増えることが予想された。以上を踏まえ、耐久性確保の観点から下記の考え方にに基づき、電気防食を提案した。

①鉄筋位置での塩化物イオン含有量が発錆限界値 (1.2kg/m³) を超過している橋脚については、すでにコンクリート内部に相当量の塩分が浸透しており、他の橋脚についても今後、塩分量は供給される。

②鉄筋が既に腐食され、その腐食の進行を抑えないと、今後、耐荷力の低下を誘発する可能性がある。

③電気防食は外部電源を利用して、既設橋脚の鉄筋位置での腐食電位を低下させ、鉄筋の腐食を阻止する工法であるため、本橋梁の長期的な耐久性を確保できる。

5. 電気防食工法の選定

上記の 3. 塩分量調査結果および、4. 塩化物イオンの浸透予測を踏まえ、耐久性向上およびイニシャルコストを考慮して、既に鉄筋位置で発錆限界値 (1.2kg/m³) を超過している橋脚 (4 橋脚 : P6、P9、P10、P12) について電気防食工法を提案した。

表-3 に各種電気防食工法の一般的な特徴を示す。

表-3. 各種電気防食工法(陽極材)の一般的な特徴

項目	長所	短所
電源方式	外部電源	電流調節ができる 電源設備が必要
	内部電源	電流設備が必要ない 電流調節は不可
陽極の材質	チタン系	長寿命 コスト高
	カーボン系	コスト低 短寿命
	亜鉛系 (流電陽極)	電源設備が不要 交換が必要
陽極材の形状	面上陽極	電流分布の均一性に優れる 設置全面の下地処理が必要
	線上陽極	部分的な前処理でよい 美観に劣る
	点状陽極	局部的防食 広範囲の防食に不向き

表-3 のように各種の電気防食があり、海中橋脚への電気防食工法の採用実績は少ないが、飛沫帯にあることやRC構造物であること等の条件が同様である海上栈橋には多くの実績がある。

比較検討した結果、長寿命である外部電

源方式・チタン陽極材を用いた線状陽極のものが最適であり、電気防食工法は、チタングリッド陽極方式を採用した。

6. 維持管理方法の検討

電気防食工法を採用したため今後、日常の維持管理が重要課題である。そのため、現地計測による維持管理と遠隔監視装置による維持管理について比較検討を行った。比較条件を以下に示す内容で行った⁴⁾。

【現地計測による維持管理方法】

- (1) 初年度に従来電源装置 4 基を設置
- (2) 点検の種類は日常・定期点検とする。
- (3) 点検者は技術員が実施する。
- (4) 電源装置、配線修繕費用として 10 年毎に 200 万円の費用を見込む。

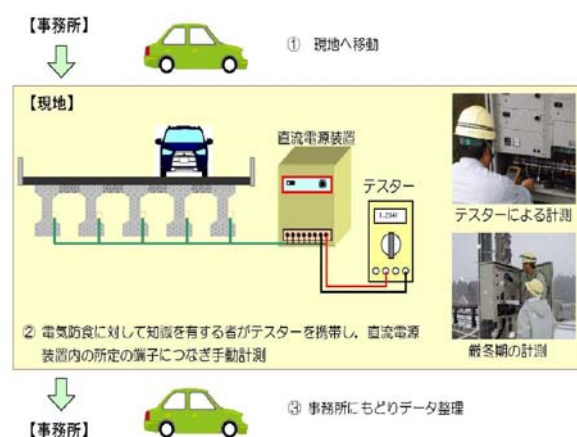


図-7 現地計測による維持管理のイメージ

【遠隔監視装置による維持管理方法】

- (1) 遠隔監視用親機 1 台、子機 4 台を配置し、通信回路は 1 回路とする。
- (2) 設置費用に装置間の接続工事を含める。
- (3) 維持管理費は通信費、定期点検、点検結果のとりまとめ費用とする。
- (4) 遠隔監視装置、電源装置、配線修繕費用として 10 年毎に 200 万円の費用を見込む。
- (5) 遠隔監視しても定期点検は実施する。(外観目視のみ、頻度は少ない)

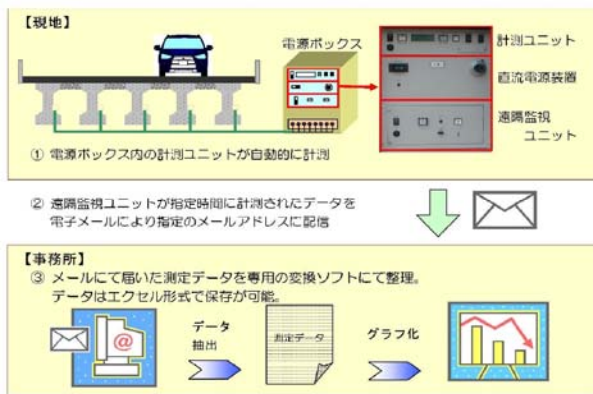


図-8 遠隔監視装置による維持管理のイメージ

比較検討の結果、図-9より、今後10年間は、現地計測による維持管理が有利であるが、10年以後については、遠隔監視システムの方がライフサイクルコストで有利となる。

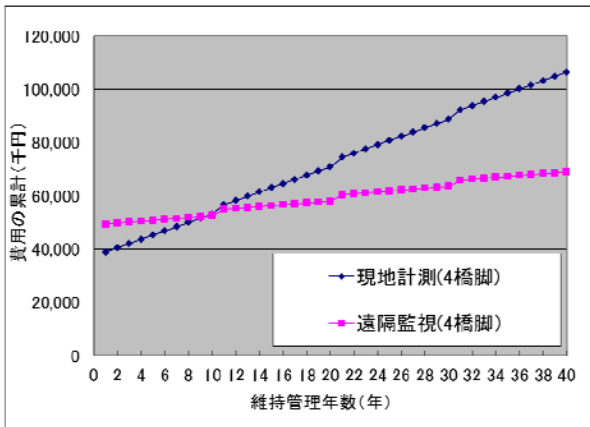


図-9 現地計測と遠隔監視装置の比較

図-10では、更に劣化予測の結果にもとづいて、10年後に2橋脚追加、20年後に2橋脚追加を行った場合の検討も下記のように行った。結果としては、それぞれ遠隔監視システムの方が有利となった。

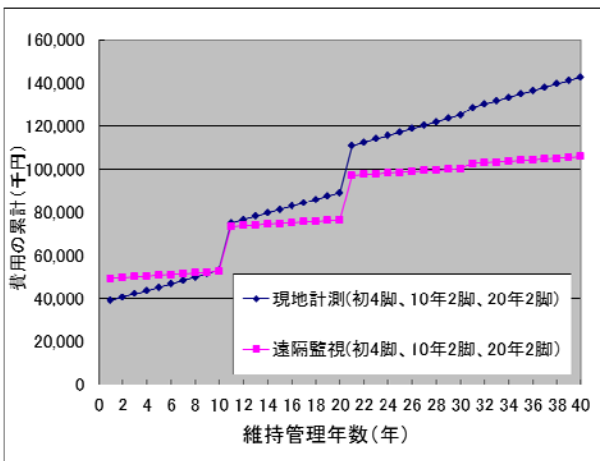


図-10 現地計測と遠隔監視装置の比較

7. 遠隔監視システム概要

池間大橋橋脚は橋長約1425m間に24基が点在しているため、遠隔監視システムを構築するためには各電源装置を接続する必要がある。そのため遠隔監視ユニットおよび計測ユニット含む親機をA2橋台箱桁内に設置し、各橋脚上の箱桁内部に配置した直流電源装置（子機）とLANケーブルにより接続することで親機による一括計測と遠隔監視データの集中管理ができるシステムを構築した⁵⁾。



図-11 親機（左）、子機（右）設置状況

A2橋台側に設置した親機により、現地の通電状況は、橋脚の鉄筋位置における電位を毎日電子メールで送信を行い、復極量は月一回の自動計測とデータ送信を行うようにプログラム設定を行っている。

8. 設置効果の確認（現在の状況）

本橋梁に関する電気防食システムの工事は、現在、P6橋脚が完了している。図-12にP6橋脚の陽極配置後の状況、図-13に現在までのP6橋脚の遠隔監視結果を示す。7月17日より通電を開始しており電源電圧は気温の変化により多少の上昇傾向を示している。（8月～9月中旬までの電圧上昇は試験的に調節したものである。）

また、復極量は毎月1日の測定結果となり基準値の100mV以上を保ち良好な電気防食効果が確認できる。



図-12 陽極配置完了



図-13 遠隔監視結果

この様に毎日の測定データが把握できるため、気温・湿度などの影響を踏まえて通電管理が可能であり、通電状況や異常値も事務所内で把握することができるため継続した維持管理が可能であると考えられる。

9. 総括

離島にある本橋梁は、海上橋梁である上に、橋長が長いため、橋脚部の電気防食の効果確認が非常に困難である。また、電気防食に関する点検・データ確認には、専門の技術が必要であるため、担当職員による管理行為も困難と考える。また、点検業務を外注した場合の維持管理コストの増加が見込まれる。

ここで提案した「橋脚電気防食遠隔操作シ

ステム」は、下部工に確実に施工でき、観測期間は短い、飛沫の影響による湿度の変化に伴う通電性の変化は見られていない。

従って、電気防食工法の効果確認、維持管理における人員不足等の問題解消を実現し、点検コストを軽減した上で橋梁の耐久性を確実に確保することが可能となった。

電気防食工法の下部工への施工実績は少ないが、今後、池間大橋橋脚のように海上に位置し海水の飛沫を受ける海上RC橋脚などにおいては、高い維持管理の効果が期待ものとする。

また、今回の下部工施工に対して以下のような配慮を行い、観察していく必要がある。

- ①陽極材埋め込み深さの増加：コンクリートの湿潤状況の影響を軽減。
- ②下部工配筋量に対応した陽極材の配置：陽極埋め込み切削量を軽減できる工法の採用。
- ③橋脚毎の通電量調整機能：各橋脚毎の腐食状況に応じた調整が可能。

参考文献

- 1) 沖縄県でのコンクリート橋の塩害劣化とその対策に関する研究 大城武：
http://www.jsce-oki.tec.u-ryukyu.ac.jp/doc/H240910_prog4.pdf
- 2) 沖縄県橋梁長寿命化修繕計画(案)平成23年3月：
http://www.pref.okinawa.jp/site/doboku/dorokan/hoshu/documents/okinawa_kyouryouchou_jumyouka3.pdf
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法設計施工指針(案)
- 4) 株式会社ピーエス三菱 技報第11号(2013年)：
type-S、type-D 併用によるPI-Slit工法の施工ー深見新橋ー 青山敏幸 他
- 5) 株式会社ピーエス三菱 技報第13号(2015年)
電気防食工法の遠隔監視システムについて
青山敏幸 他