

# 本州四国連絡橋の予防保全

長谷川 芳 己

本州四国連絡橋は、我が国の重要な社会資本の一つである。

本州四国連絡橋は、建設後の経過年数が短く、いまだ大きな変状はなく、大規模な補修補強は行われていない。しかし、架橋地点は海峡部に位置し、飛来塩分の影響を受ける厳しい腐食環境下にある。このため、吊橋、斜張橋をはじめとする海峡部橋梁群は、長寿命化によりライフサイクルコストを低減できる予防保全を行っている。

ここでは、海峡部橋梁の予防保全に関する非破壊検査及び技術について述べる。

キーワード：予防保全、ライフサイクルコスト、長期防錆型塗装、主ケーブル送気乾燥システム、全磁束法、非破壊検査、電着工法

## 1. はじめに

本州四国連絡橋は、図一1に示すように三つの自動車道から成り、総延長は約170 km、海峡部橋梁の延長は約25 kmである。

神戸淡路鳴門自動車道は、世界最長の吊橋である明石海峡大橋がある。大鳴門橋は、外海の太平洋に面し最も厳しい腐食環境下にある。

瀬戸中央自動車道は、3吊橋、2斜張橋、1トラス橋からなり、鉄道を併設したダブルデッキ構造である。これらの海峡部橋梁群は、「瀬戸大橋」と呼ばれている。

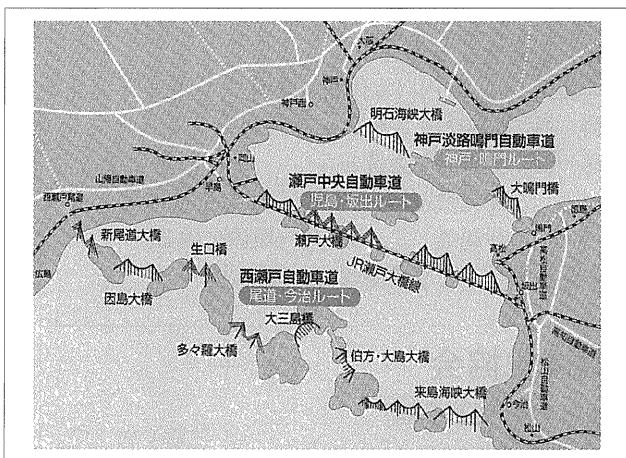
西瀬戸自動車道は、5吊橋、3斜張橋がある。このルートは段階的に施工され、本州四国連絡橋で最も古

い大三島橋は、供用開始から約25年を経過している。

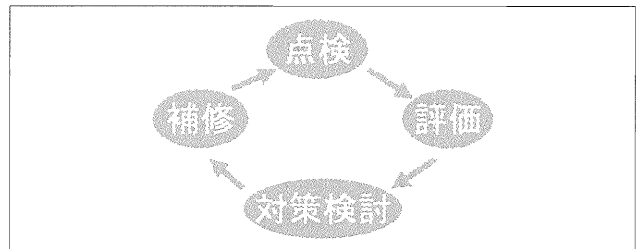
本州四国連絡高速道路株式会社（以下、当社）は、「200年以上の長期にわたり利用される橋をめざし、万全な維持管理に努めます」を経営理念の一つとしている。

本州四国連絡橋は、架橋地点の厳しい自然条件を克服し架設されたもので架替えは困難である。また他に代替交通機関は少なく、海峡部の厳しい腐食環境下にある。このため、当社は、構造物が機能低下を引起こさないよう維持管理し、耐久性を確保する予防保全を基本方針としている。

予防保全は、図一2に示すようにまず点検及び非破壊検査による調査を行い、この調査結果に基づき劣化進展予測を行う。



図一1 本州四国連絡橋の概要



図一2 予防保全のサイクル

この調査の結果、劣化進展予測を評価し対応（補修時期、補修方法）を判断する。補修は、構造物の劣化が生じる前、または劣化の初期段階で行う。

この予防保全により、大規模補修を回避し、常に交通を確保し、長寿命化によりライフサイクルコストを低減する。

以下に、予防保全に関する非破壊検査、劣化進展予測、補修技術の概要を説明する。

## 2. 塗替え塗装

吊橋、斜張橋など海峡部橋梁の塗替え塗装面積は、約400百万m<sup>2</sup>と膨大な面積である。このため塗替え塗装は、補修費のなかで大きな比重を占め、塗替え塗装のコスト縮減は、最優先課題である。また、海峡部橋梁を健全に保つため最優先すべき管理項目である。

塗装は、厳しい腐食環境下にあるため図-3に示す長期防錆型塗装系を採用している。

下地は防錆力を有する無機ジンク（亜鉛）リッチペイント、下塗りは無機ジンクリッチペイントを保護する耐水性、耐アルカリ性に優れたエポキシ樹脂塗料、上塗りは耐候性の高いフッ素樹脂塗料（あるいはポリウレタン樹脂塗料）で構成している。建設時は、下地～上塗りまで工場で塗装し、現場塗装は継手部のみである。

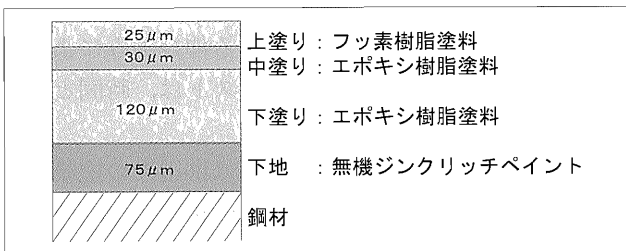


図-3 塗装構成

無機ジンクリッチペイントは、金属亜鉛粉末を高濃度に配合しているため、電気化学的に鋼より亜鉛が犠牲となる性質があり防錆力の面で非常に優れている。

無機ジンクリッチペイントの施工は、鋼材表面に付着しているミルスケール、錆、その他の付着物を十分除去し、鋼材表面にアンカーパターンを施す必要がありブラスト処理が不可欠である。しかし、現場でのブラスト処理は、耐久性の確保が困難であるばかりでなく、多大な費用の増加を招く。

このため、耐久性を確保しコスト縮減を図るため、塗替え塗装は、上塗りと中塗りに限定し、下塗りを保護層とし無機ジンクリッチペイントを健全に保つ予防保全を基本とする。

塗替え塗装は、塗替え時期の判断が重要であり、ライフサイクルコストに大きく影響する。塗替え時期は、塗膜の観察から得られる上塗り、中塗りの消耗データにより判断している。

塗膜の変状（錆、剥がれ）は、1～2年間隔で行われる基本点検の目視で把握するが、消耗量は確認でき

ない。

当社は、各橋梁にあらかじめ写真-1に示すように定点を設置し、塗膜厚、光沢度、付着力を定期的に調査している。これを「定点塗膜調査」と称している。

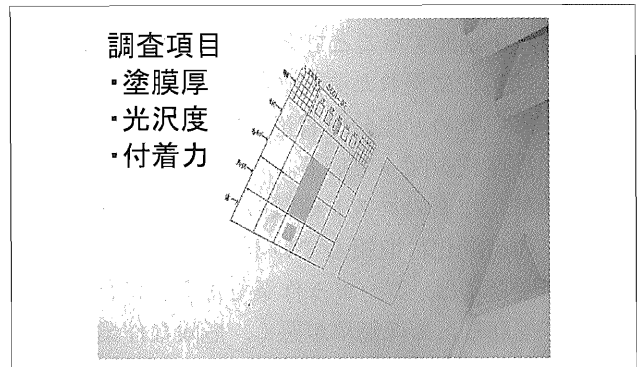


写真-1 定点設置状況

消耗量は、塗膜を破壊採取し、写真-2に示す走査型電子顕微鏡（SEM）による断面写真から表層のフッ素樹脂塗料（あるいはポリウレタン樹脂塗料）の減少塗膜厚を直接測定し図-4のように消耗速度を算定している。

合わせて、光沢度計、クロスカット法で、光沢度、付着性を測定し、耐候性、耐久性を評価している。

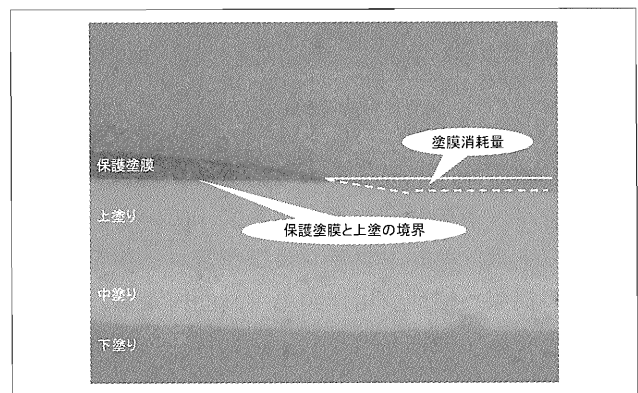


写真-2 塗膜断面写真（SEM）

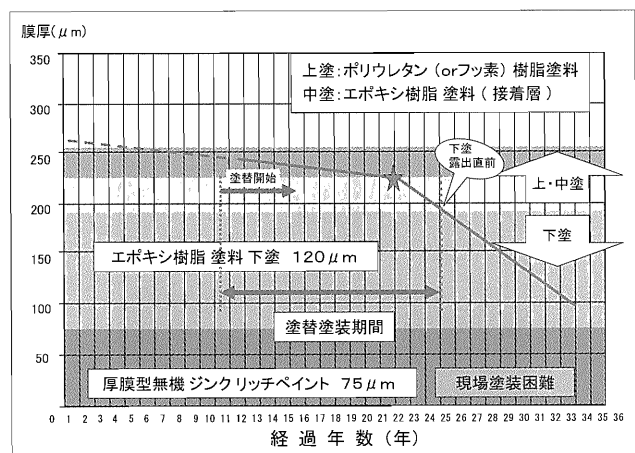


図-4 塗膜の消耗と塗替え時期

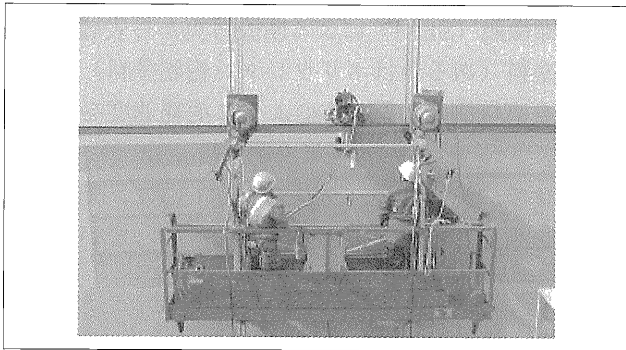
これら上塗りのフッ素樹脂塗料（あるいはポリウレタン樹脂塗料）の消耗速度から、無機ジンクリッチペイントを保護する下塗りが露出する時期を予測する。

塗替え塗装は、下塗りが露出するまでに完了する。

塗替え塗装のコスト縮減は、塗替え時期も含め塗替えサイクルを延伸することである。このため、耐候性、特に紫外線劣化に優れた高耐久性塗料の開発、高品質の塗膜を得るため、塩分付着量、塗膜厚の確保など品質管理の高度化を図っている。

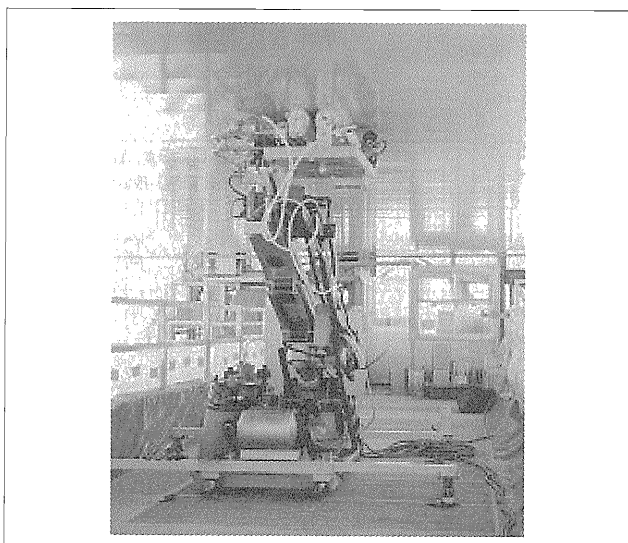
また塗替え作業のコスト縮減のため、作業機械の開発、作業の自動化に取り組んでいる。

主塔の塗替えは、ゴンドラ作業である。ゴンドラは、風により揺れるため稼働率が悪く、危険な作業である。このため、強力な磁石で主塔に吸着しゴンドラの揺れを防止する写真—3 に示す磁石車輪を開発した<sup>1)</sup>。



写真—3 磁石車輪ゴンドラ

箱桁など平面的に連続した塗装面は、写真—4 に示す塗装ロボットを開発し省力化を図っている。この塗装ロボットは、ケレンブラシ及び塗装ロールを備え、桁外面の橋梁点検補修用作業車（外面作業車）に搭載され、作業車を橋軸直角方向に移動する動作と作業車



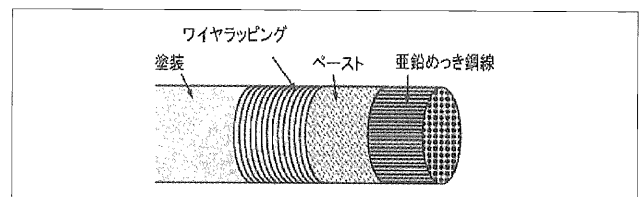
写真—4 箱形塗装ロボット

自体が橋軸方向の移動動作により、箱桁全体を自動で塗装できる<sup>2)</sup>。

### 3. 送気乾燥システム

吊橋の主ケーブルは、極めて重要な構造部材である。その取替えは非常に難しく、ケーブル防食は、吊橋の維持管理の最重点項目である。

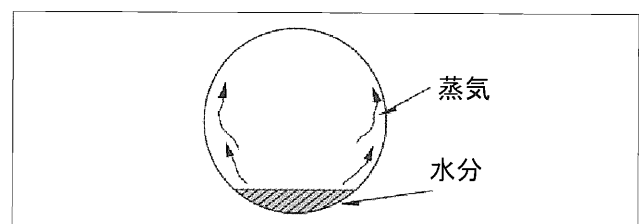
従来のケーブル防食は、防錆ペースト+ワイヤラッピング+塗装による仕様で行われていた。しかし、1989年11月、因島大橋（1983年供用開始）のケーブル内部の開放調査により、ケーブル内部に水分と腐食が確認された。



図—5 従来のケーブル防食

塗装は、ケーブルの温度等による伸び縮みにより割れて遮水性が損なわれ、防錆ペーストは、時間とともに劣化することが分かった。

ケーブル内には、工事中あるいは供用後の塗膜の割れから侵入した水が存在する。図—6 に示すように、この水は、外気温の上昇により蒸発し、気温の低下により結露する。このサイクルを繰り返して腐食する。特に、ケーブル側面の腐食は、著しく、側面表層付近は、長く湿潤状態が継続している。

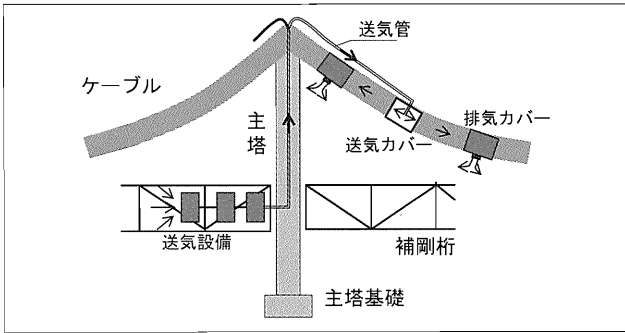


図—6 腐食メカニズム

このため、従来のケーブル防食方法は、長期間、完全に遮水することは難しく、高湿度の日本では防食できないと判断し、図—7 に示す主ケーブルを気密化し、乾燥空気を送気しケーブルを防食する、「主ケーブル送気乾燥システム」を開発した。

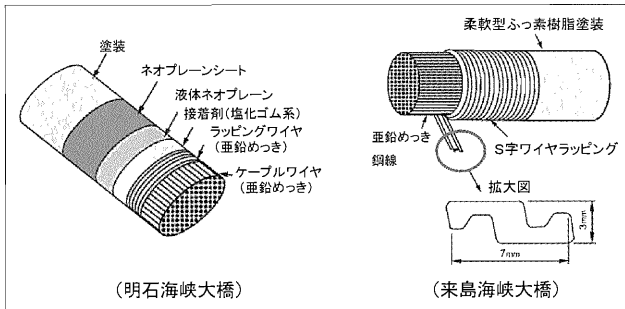
気密化は、送気乾燥システムの効果を左右する重要な項目である。

最初の施工となった明石海峡大橋は、従来の丸ワイヤラッピングの上にゴムラッピングを追加し気密化を図った。防錆ペーストは使用していない。



図一七 送気乾燥システム設備配置図

来島海峡大橋は、従来の丸ワイヤラッピングから図一八に示す気密化の高いS字形ワイヤラッピングとし、ワイヤラッピング上は柔軟型フッ素樹脂塗料を塗装した。

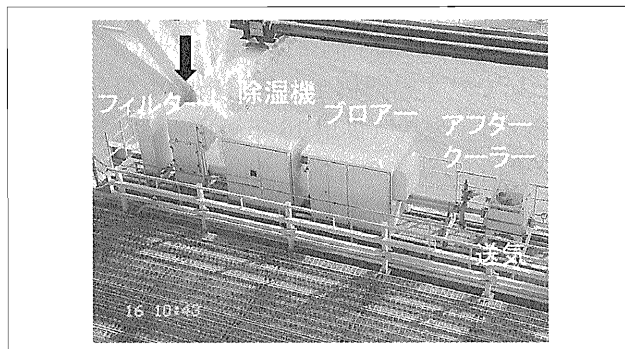


図一八 気密化構造

既設吊橋は、劣化ペーストが、  
 ①腐食ワイヤの腐食を進展させないこと、  
 ②送気ケーブル内の送気乾燥に影響しないことを確認し、ペースト、ラッピングは、現状のままとし、ケーブルの伸びに追従する柔軟型フッ素樹脂塗料により気密化を図った。柔軟型フッ素樹脂塗料は、総合塗膜(200~250 $\mu\text{m}$ )で50%以上の伸び率を確保している。

ケーブルバンド部の合わせ部、端部は、すべて下層にブチルゴム、表層に変成シリコンを施した二重コーキングで気密化している。

送気設備は、写真一五に示すように海塩粒子の侵入



写真一五 送気設備

を防止するフィルタユニット、除湿機、送風機(ルーツブローア)、送気カバー、排気カバーから構成している<sup>3)</sup>。

フィルタユニットは、プレフィルタ+中高性能フィルタ+超高性能フィルタから構成し、海塩粒子の侵入を防止する。プレフィルタは二重構造とし10 $\mu\text{m}$ 程度以上の粗塵、中高性能フィルタは大気中の海塩粒子相当(2 $\mu\text{m}$ )の粉塵、超高性能フィルタは、極微細な粒子を対象に除去する。

除湿機は、空気中に含まれる水分をシリカゲルに吸着させる乾式除湿機である。

送風機は、送気量及び圧力の調整が容易なルーツ式ブローアとし、送気量の調整ができるインバータ駆動である。

送気カバー及び排気カバー設置部分は、ケーブル内への空気の流入、流出を容易にするため防錆ペースト及びラッピングワイヤはすべて除去している。また、送気カバー及び排気カバーには、直接ケーブル素線の状態が観察できるよう点検用の窓を設置している。

送気乾燥システムは、亜鉛めっき鋼線また腐食亜鉛めっき鋼線とも湿度60%以下では腐食の発生、進展がないことを確認し、安全側の40%を管理目標として運転している。

送気乾燥システムは、2002年度にすべての吊橋への設置を完了し運転を行っている。一部の既設吊橋において、高湿度状態が長期間解消しない区間、気密化の不備、特にケーブルバンド部のコーキング不良が原因と推定される高湿度区域も見られた。

これらについては、ケーブル内部への送気量を増やす送気バンドの増設、コーキング部の気密化構造の改善により対応している。

#### 4. ハンガロープ(全磁束法)

ハンガロープは、主ケーブルから補剛桁を吊下げる重要な部材である。

最も経過年数の長い因島大橋において、供用後16年を経過したところからハンガロープ(CFRC)表面に、錆や錆汁を発見し、ロープを取外し工場で開放調査を行ったところロープ内部に腐食を確認した。

内部腐食は、目視による外観検査で把握することは不可能である。このため、ロープ内部を定量的に把握できる非破壊検査方法の開発に着手し、「全磁束法」で、ハンガロープ内部の腐食状況を、精度よく把握できることが可能となった。

全磁束法は、図一九に示すようにハンガロープを軸

方向に強く磁化するとロープ中に流れる磁束がロープ健全部の断面積に比例するという原理を用いた非破壊検査方法であり、飽和漸近領域における磁束を比較することによりロープ断面の腐食度を評価するものである。

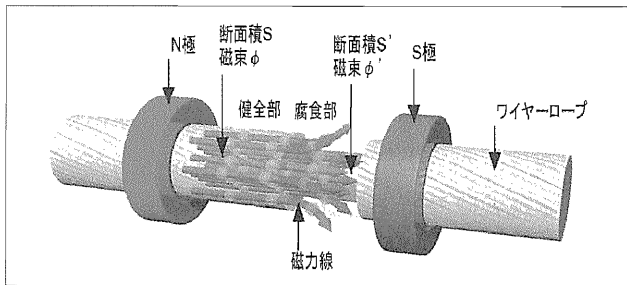


図-9 全磁束法の原理

この全磁束法の開発をうけて、他橋梁の調査を開始したところ、腐食環境の厳しい橋梁のハンガロープ桁定着部の一部に著しい腐食を確認した。

ハンガロープは、取替え可能な部材であるが、健全度の適切な評価と長寿命化対策により、長期間使用することによりライフサイクルコストを低減できる。

当社は、ハンガロープの合理的管理手法を確立するため

- ①断面腐食量の定量的評価
- ②断面腐食量とロープ強度の関係把握
- ③ハンガロープの使用限界設定
- ④防食対策による延命化及び補修・取替え方法について検討を進めている。

まず、腐食ロープの強度を把握する。素線単体の場合は、断面積減少率と強度低下率がほぼ一致するが、ハンガロープは、撚り構造であるため、全磁束法によって求めた断面積減少率と強度低下率は一致しない。そのためロープ構成毎に、断面積減少率と強度低下率の関係を求めておく必要がある。

本州四国連絡橋で使用されているCFRCハンガロープの断面積減少率と強度低下率との関係を図-10に示す<sup>1)</sup>。

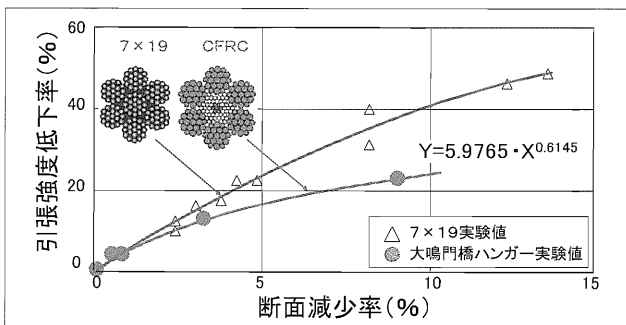


図-10 断面減少率と強度低下率

次に、ロープの使用限界を設定し残余寿命を予測する。ハンガロープの適切な交換頻度を決定するため、腐食進展予測と使用限界を設定する。

次に、ハンガロープの腐食進展予測を行い、使用限界状態を設定し残余寿命を推定する。これにより適切な交換時期を決定する。

最後に、ハンガロープの長寿命化対策を紹介する。ハンガロープの腐食は、ロープ内部の空隙から始まる傾向がみられる。そのため樹脂による空隙充填などの防食対策の研究を行っている。また、ハンガロープの腐食は、定着部の近傍に特定される傾向も強い。

経済的な補修方法の一つとして、図-11に示すような定着部以外の健全な部分はそのまま再利用し、定着部近傍のみ部分的に交換する方法に着手している。

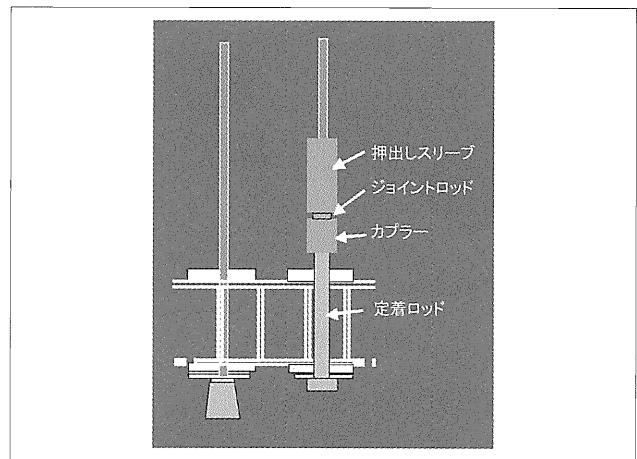


図-11 ハンガロープ部分取替え工法

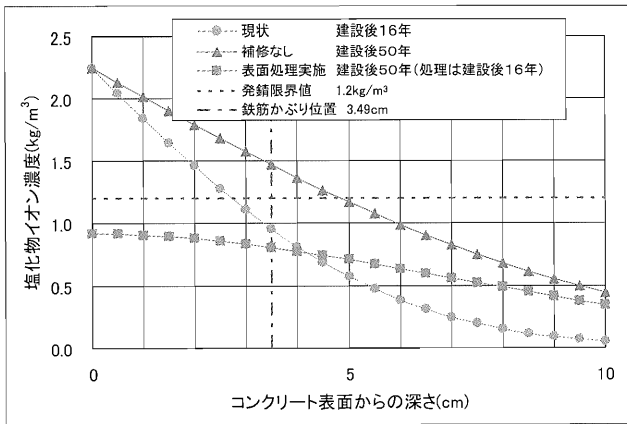
## 5. コンクリート構造物

アンカレッジなどマスコンクリート構造物の維持管理は、点検及び非破壊検査による調査、その調査結果による劣化予測とこれらの評価により今後の対応を判断する予防保全を構築している。

調査項目は、鉄筋かぶり、中性化深さ、塩分含有量及び自然電位である。

劣化予測は、200年にわたる塩化物イオンの拡散予測、中性化深さの浸透予測を行う。

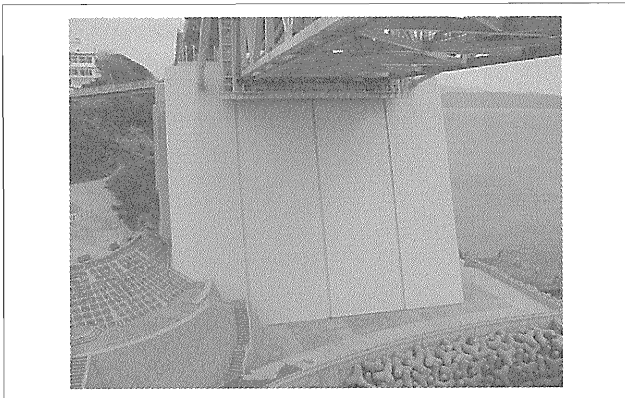
一例として、大鳴門橋1A道路桁の塩分含有量について述べる。現状(供用16年後)の塩化物イオン濃度及び供用50年後の拡散予測の結果を図-12に示す。その結果、対策を講じない場合は供用50年後に設計かぶり位置(35mm)で塩化物イオン濃度が腐食限界濃度(1.2kg/m<sup>3</sup>)に達すると予想されるのに対して、供用16年後に表面被覆を行った場合は、将来にわたって塩化物イオン濃度が腐食限界値を下回る



図一12 塩化物イオン拡散予測 (例)

結果となっている<sup>5)</sup>。

コンクリート構造物の維持管理は、写真一6に示すような表面被覆工によることが最もライフサイクルコストを低減できる。



写真一6 マスコンクリートの予防保全 (表面被覆工)

一般には表面被覆工は、樹脂系の塗装が施工されている。しかし、樹脂系塗装は、バインダである有機質の紫外線劣化により十数年サイクルで塗替えが必要であり補修費が継続する。樹脂系塗装の代替品として、含浸系材料がある。含浸系材料は、無機系材料であり紫外線劣化もほとんど生じず、長期の耐久性が期待できるコスト削減につながる。この含浸系材料が適用できるのか効果を確認するため暴露試験を開始している。

含浸系材料の効果が確認されれば、塗替えサイクルの延長によりコンクリート構造物の維持管理コストは、大幅に削減される。

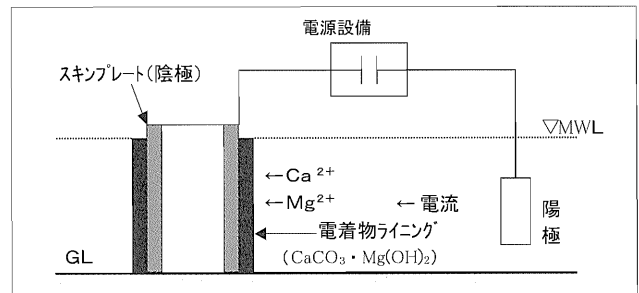
## 6. 鋼ケーソン (電着工法)

本州四国連絡橋の海中基礎は、鋼製ケーソンを外殻とし内部にプレパックドコンクリートまたは水中不分散性コンクリートを充填する設置ケーソン工法で構築している。

しかし、供用11年後の瀬戸大橋において、鋼ケーソン外壁(スキンプレート)に局部的に腐食が進行する孔食を確認した。鋼ケーソンは、外殻の形状保持や補強のため、内部にストラッドや補強材の鋼材が多数配置されている。孔食は、一般の腐食の数倍のスピードで腐食が進むため、スキンプレートが腐食し、内部鋼材が腐食、膨張すると、コンクリートにひび割れや剥離を引起し、剛体基礎としての一体性が失われる。このため、ケーソン外殻のスキンプレートの防食対策を行っている。

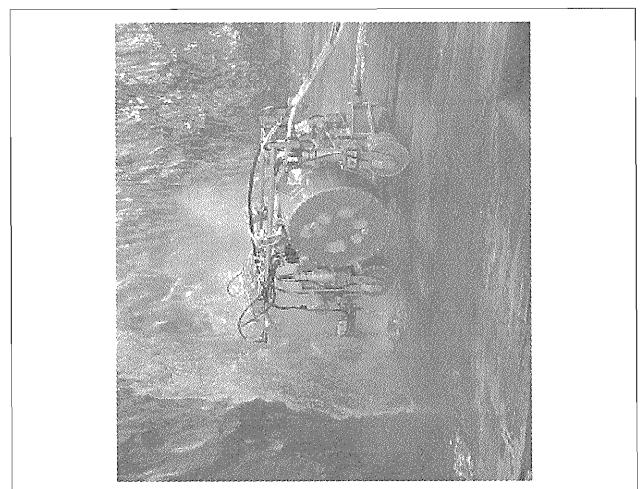
防食方法は、大規模、大水深、強潮流の条件下で施工可能で主体的作業がダイバに依存することなく、孔食部分を補修充填し、スキンプレートの被覆防食が可能な電着工法を採用した。

電着工法は、図一13に示すように海中に垂らした陽極と鋼ケーソンとの間に微弱の直流電流(1A程度)を流し、スキンプレートに炭酸カルシウムと水酸化カルシウムを主成分とする防水性能と耐久性を有する無機物を析出・付着させることにより鋼材を防護する工法である<sup>6)</sup>。



図一13 電着工法の概念

この工法は、海中構造物の防食方法として知られていたが、鋼管杭で試験的に行われていたのみであった。この電着工法を大規模、大水深、強潮流の条件下で適



写真一7 鋼ケーソン壁面清掃装置

用するため、数年間の実証試験により、経済的に最適な付着物を得るための施工条件であるスキンプレートと陽極間の距離、電流密度、析出時間を決定した。

1999年、瀬戸大橋の海中基礎において施工を開始した。施工は、通電開始前に壁面に付着しているスケールを写真-7に示すウオータージェットにより除去する。通電後、約8,000時間の析出時間で厚さ約5mmの電着物が得られる。

なお、来島海峡大橋の鋼ケーソンは、建設時に電気防食を施工している。

## 7. おわりに

本報文で紹介した予防保全は、本州四国連絡橋の建設で培った設計・施工技術を基礎に、今までの維持管理で蓄積した維持管理の知識、技術を現時点で集大成したものである。本州四国連絡橋は、多種多様な部材を対象に、厳しい環境下で維持管理を行っている。今後も、ここに述べた予防保全・補修技術を基盤として、長寿命化によりライフサイクルコストを低減する予防保全の確立に努めたい。

### 《参考文献》

- 1) 坂本光重, 河野正樹, 土山正巳, 秋山和夫: ゴンドラとロールによる

塗装の機械化—吊り橋の主塔用塗装装置の開発—, 建設の機械化, 10号, pp.39-45, 2003

- 2) 坂本光重: 箱用塗装ロボットの開発, 高速道路と自動車, 45巻, 第1号, pp.62-65, 2002.1
- 3) T. Takazawa, H. Hoashi, K. Furuya and K. Ogawa, "Corrosion Protection System of Cable and Non-destructive Inspection of Suspender Ropes in a Suspension Bridge," IAMBAS 2002, Barcelona, Spain.
- 4) A. Moriyama, S. Suzuki, H. Hoashi and Y. Yoshida, "Establishment of the Non-Destructive Inspection Technique for Suspender Ropes of Suspension Bridges", Proc. of the 4th International Cable Supported Bridge Operators' Conference, Copenhagen, Denmark, June, 2004
- 5) Y. Sano, K. Tsuru and T. Sugimoto, "Maintenance of Concrete Bridge Structures in a Highly Saline Environment", Proc. of IAB MAS, Kyoto, Japan, October, 2004
- 6) Y. Yanaka and M. Kitagawa, "Maintenance of Steel Bridges on Honsyu-Shikoku Crossing", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp.131-150, Jan., 2002

J C M A

### 【筆者紹介】

長谷川芳己 (はせがわ よしみ)  
本州四国連絡高速道路株式会社  
管理事業本部  
保全事業部  
橋梁保全課長



現場技術者のための

# 建設機械整備用工具ハンドブック

- ・建設機械整備用工具約180点の用語解説と約70点の使い方を収録。
- ・建設機械の整備に携わる初心者から熟練者まで幅広い方々の参考書として好適。

■ A5判 120頁

■ 定 価: 会 員 1,050円 (消費税込), 送料420円  
非会員 1,260円 (消費税込), 送料420円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289