

◆ 特集：橋梁の維持管理・補修補強 ◆

本州四国連絡橋—海上長大橋—の維持管理

帆足博明* 森山 彰**

1. はじめに

本州四国連絡橋は、1999年5月1日の西瀬戸自動車道の概成をもって、神戸淡路鳴門自動車道、瀬戸中央自動車道と合わせ3ルートが完成し、建設の時代から本格的な維持管理の時代を迎えることとなった。

本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という）の維持管理は、1979年に完成した大三島橋からその取り組みが始まり、建設においても将来の維持管理を考慮した種々の対応を行ってきた。

以下、本四連絡橋建設における維持管理上の配慮、大三島橋の完成以来実施してきた長大橋の維持管理の特徴と基本的な考え方、さらに現在実施している具体例として鋼材防食技術、非破壊検査技術などについて紹介する。

2. 建設における維持管理上の配慮

本四連絡橋の海峡部橋梁の一覧を表-1示す。

1979年に完成した大三島橋の塗装には、下地に厚膜型無機ジンクリッチペイント、上塗りに塩ゴム系塗料を用いた重防食塗装系の採用や防錆処理高カボルトを開発、採用することで長期耐久性の確保に努めた。因島大橋（1983年完成）および大鳴門橋（1985年完成）の2橋は何れも補剛トラス形式の吊橋で、重防食塗装系の上塗りに塩ゴム系塗料より耐久性のあるポリウレタン樹脂塗料を採用するとともに、補剛桁、ケーブルの点検・補修用に作業車を開発設置した。

1988年に完成した瀬戸中央自動車道の橋梁は道路・鉄道併用橋であるため、補剛桁など主要部材の疲労設計、部材製作に十分な注意が払われた。また、点検補修用作業車は鉄道空間を阻害しないで作業が可能な様に桁内面用を追加する等種々の工夫が加えられた。

伯方・大島大橋、生口橋の桁にはトラス形式に比べ単純な箱桁形式が採用され、桁の維持管理は飛躍的に簡素化された。

表-1 海峡部橋梁一覧

橋梁名	構造形式	支間割 (m)	完成年
明石海峡大橋	3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋	960 + 1,991 + 960	1998
大鳴門橋	3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋	93 + 330 + 876 + 330	1985
下津井瀬戸大橋	張出径間付単径間補剛トラス吊橋	230 + 940 + 230	1988
櫃石島橋	3径間連続鋼トラス斜張橋	185 + 420 + 185	1988
岩黒島橋	3径間連続鋼トラス斜張橋	185 + 420 + 185	1988
与島橋	2 + 3径間連続トラス橋	125 + 137 + 175 + 245 + 165	1988
北備讃瀬戸大橋	3径間連続補剛トラス吊橋	274 + 990 + 274	1988
南備讃瀬戸大橋	3径間連続補剛トラス吊橋	274 + 1,100 + 274	1988
新尾道大橋	5径間連続鋼箱桁斜張橋	85 + 215 + 85 + 81 + 81	1999
因島大橋	3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋	250 + 770 + 250	1983
生口橋	3径間連続複合箱桁斜張橋	150 + 490 + 150	1991
多々羅大橋	3径間連続複合箱桁斜張橋	270 + 890 + 320	1999
大三島橋	単径間ソリッドリブ2ヒンジアーチ橋	297	1979
伯方橋	3径間連続鋼箱桁橋	90 + 140 + 90	1988
大島大橋	単径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋	140 + 560 + 140	1988
来島海峡第一大橋	3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋	50 + 140 + 600 + 170	1999
来島海峡第二大橋	2径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋	250 + 1,020 + 245	1999
来島海峡第三大橋	単径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋	260 + 1,030 + 280	1999

その後、明石海峡大橋、来島海峡大橋、多々羅大橋および新尾道大橋に順次着手した。これらの橋の塗装系の上塗りにはこれまで採用してきたポリウレタンに比べさらに耐久性のあるふっ素樹脂塗料を採用した。表-2に塗装仕様とその変遷を示す。

また吊橋主ケーブルの防錆法の検討が進められ、主ケーブルに乾燥空気を送り込みケーブル内を相対湿度60%以下とする送気システムが明石海峡大橋と来島海峡大橋に建設当初から導入された。さらに新尾道大橋では、箱桁内面の塗装を省略し、除湿による防食方式を採用している。これら後半に建設された橋梁には、それまでの海峡部橋梁の維持管理から得られた経験を踏まえ、コスト削減を目指した各種手法を積極的に取り入れてきた。

3. 海上長大橋の維持管理の特徴と基本方針

本四連絡橋は、瀬戸内海をまたぎ本州と四国を結ぶ高規格幹線道路であり、通行止めの場合の代替路線が無いことが大きな特徴である。

このような路線の重要性から、日常の点検を重視し、早期に変状等を発見しそれらが顕在化する前に対策を講じる予防保全を維持管理の基本方針としている。

また、海峡部は自然条件が厳しく、強風や飛来塩分の影響を強く受けるなど、厳しい腐食環境に曝されている。このため、一旦大規模な補修を

施するとなれば、高所での作業足場の構築や資機材の搬出入等に陸上工事とは比較にならない費用を要することになる。従って予防保全は、大規模な補修に至る前に、適切な補修あるいは劣化因子の排除等の予防的な対策を実施し、延命化を図るものであり、ライフサイクルコストの低減に繋がる重要な考え方である。

本州四国連絡橋公団（以下「本四公団」という）では、通常の業務として定期点検（巡回点検、基本点検、精密点検）を実施し、各種の変状の早期発見に努めるとともに、その変状の原因と程度を表-3に示す6段階に判定することとしている。当然この判定に基づき補修などの措置を講ずることになっており、点検→判定→補修が系統的に実施できる様に点検要領¹⁾を整備している。図-1にその基本フローを示す。

また、地震や強風等の襲来を受けた場合には異常時点検を実施し安全を確認している。さらに、これらの異常時荷重に対する長大橋の挙動の把握は、動態観測により行っている。動態観測は、外力である地震、風を観測するとともに、橋の挙動を観測するシステムである。動態観測は維持管理にとって重要であるとともに、長大橋の設計時に用いた仮定の妥当性を検証し、今後の長大橋設計に有用な資料を得るという意味でも重要である。

本四連絡橋の維持管理はたかだか20年程度の経

表-2 塗装仕様の変遷

基準名および適用橋梁	塗装系	1次下地処理	2次下地処理	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	第7層	合計膜厚(μ)
鋼橋等塗装基準・同解説(案) (昭和52年3月) 大三島橋	2	原板 プラスチック	HBS K 5611 無機ジンクリッチプライマー 20	製品 プラスチック HBS K 5603 厚膜型無機ジンクリッチペイント 75	JIS K 5633 1種短ばく型エッチングプライマー 約10	HBS K 5604 フェーノールジンクロメートペイント 30	HBS K 5601 フェーノールMIO (中塗) 60	HBS K 5601 フェーノールMIO (中塗) 60	HBS K 5602 塩化ゴム系 (中塗) 35	HBS K 5602 塩化ゴム系 (上塗) 35	285
鋼橋等塗装基準・同解説(案) (昭和55年3月) 因島大橋、大鳴門橋、 伯方・大島大橋、瀬戸 大橋、生口橋	5(1)	原板 プラスチック	HBS K 5611 無機ジンクリッチプライマー 20	製品 プラスチック HBS K 5603 厚膜型無機ジンクリッチペイント 75 [700]	ミスト コート — [160]	HBS K 5606 厚膜型エポキシ (下塗) 60 [320]	HBS K 5606 厚膜型エポキシ (下塗) 60 [320]	HBS K 5608 ポリウレタン用 (中塗) 30 [170]	HBS K 5608 ポリウレタン (上塗) 30 [140]	—	255
鋼橋等塗装基準・同解説(案) (平成2年4月) 明石海峡大橋、新尾道 大橋、多々羅大橋、来 島海峡大橋	E	原板 プラスチック	HBS K 5611 無機ジンクリッチプライマー 20	製品 プラスチック HBS K 5603 厚膜型無機ジンクリッチペイント スプレー75 [700]	ミスト コート — [160]	HBS K 5606 厚膜型エポキシ樹脂 塗料 下塗 スプレー60 [300]	HBS K 5606 厚膜型エポキシ樹脂 塗料 下塗 スプレー60 [300]	HBS K 5606 エポキシ樹脂 塗料 中塗 スプレー30 [170]	HBS K 5625 ふっ素樹脂 塗料 上塗 スプレー25 [140]	—	250

験があるに過ぎず、まだ完成されたものとは言い難い。そのため点検記録、補修履歴をデータベース化し、今後の点検補修のために役立てることにしている。

表-3 変状の判定基準

判定	変状の状況
A	変状が著しく、安全性能または使用性能から見て、緊急補修の必要がある場合。
B	変状があり、安全性能または使用性能の低下が見られ補修が必要であるが、緊急性を要しない場合。または、調査が必要な場合。
C	変状はあるが、安全性能または使用性能の低下は見られない。変状の進行状況を継続的に観察するか、または、詳細調査を実施する必要がある場合。
D	変状がないか、もしくは軽微な場合。
Q	変状の有無・程度の判定が困難で、別の手法により再点検する必要がある場合。
E	安全な交通や第三者に対し被害を及ぼす恐れがあり、緊急補修の必要がある場合。

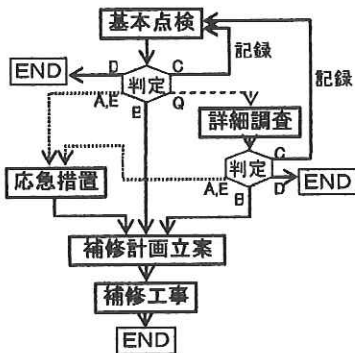


図-1 点検補修判定フロー

4. 長大橋の維持管理技術の具体例

4.1 鋼材の防食

4.1.1 吊橋ケーブルの送気システム

吊橋のケーブルは、直径約5mmの亜鉛メッキ鋼線を束ねたものであり、明石海峡大橋を例にとると、φ5.23mmの鋼線を36,830本束ね、直径は約1.1mである。ケーブル内には断面積の約17～19%の空隙がある。従来のケーブルの防食方法は、円形に束ねたケーブル表面に防錆材（鉛丹、高分子系防錆ペースト）を塗布し、ラッピングワイヤをケーブルの円周方向に隙間なく巻き付け、その表面を塗装する方法がとられてきた。図-2に従来のケーブル防食方法を示す。

しかし明石海峡大橋の建設に当たり、国内の既設吊橋の主ケーブル内部を調査した結果、①ケー

ブル内に水分が存在する、②ペーストは劣化し保水体化している、③表面から2～3層の鋼線に錆が発生している、ことが判明した²⁾。

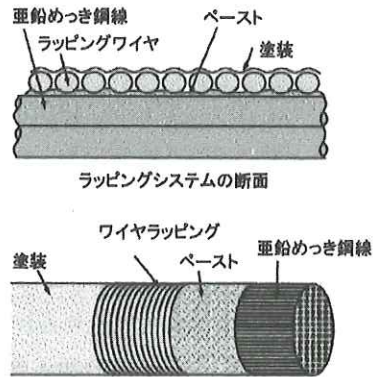


図-2 従来のケーブル防食方法

この調査結果を踏まえ、腐食の原因究明や新しいペースト材料等の検討を行うと同時に、一方で亜鉛メッキ鋼線は相対湿度が60%以下では発錆しないことを利用し、①ケーブルの空隙に空気を送り込むことが可能か、②実橋でどの程度の距離まで送気が届くか、③気密性を保持するためケーブル表面をどのようなラッピングをすれば良いか等を、模型実験及び実橋ケーブルにより確認し実用化を決定した²⁾。

このケーブルの送気システムを図-3に示す。大気中の塩分や有害物質等をエアフィルターで除去した空気をシリカゲルの中を通し水分を除去した後、送気バンドよりケーブル内に送気するものである。送気バンドの両側約150m～250mの箇所に排気口を設け、その区間のケーブル内部を乾燥する。

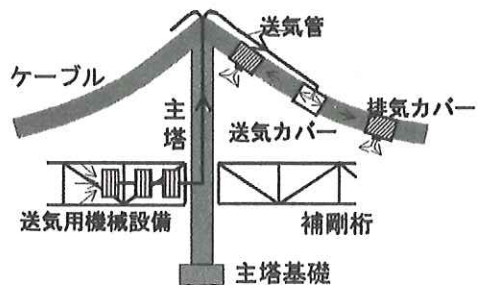


図-3 ケーブル送気システム

また、ケーブル表面は気密性を高めるため、明石海峡大橋ではワイヤラッピングの上にネオプレーン（ゴム）シートを巻きその上に柔軟型塗料を塗布した（図-4）。また、米島海峡大橋ではS字断面のワイヤによる気密化をはかりその表面に柔軟型塗料を塗布した（図-5）。

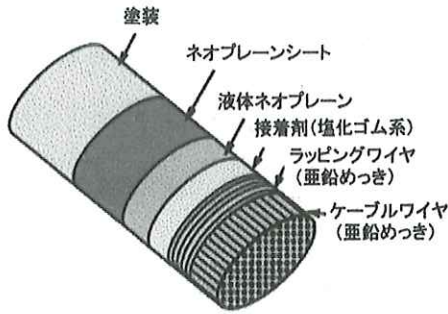


図-4 明石海峡大橋のラッピング方式

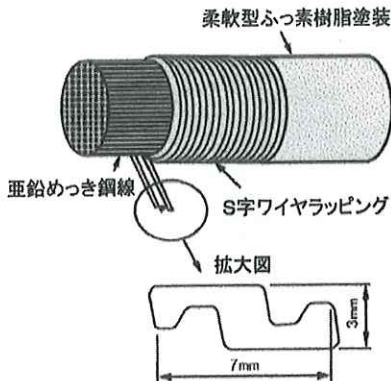


図-5 来島海峡大橋のラッピング方式

現在、送気口及び排気口での湿度の計測を実施し、システム稼働状況を確認するとともに、送気バンド及び排気バンドに監視用の点検窓を設け鋼線の状態を目視点検が出来るようにしている。写真-1に送気バンド設備を示す。

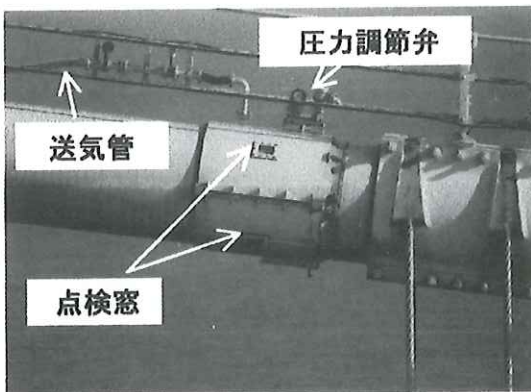


写真-1 送気バンド

なお、明石海峡大橋や来島海峡大橋以前に建設された瀬戸大橋をはじめ、大鳴門橋、因島大橋などの既存吊橋にもこのシステムを導入している。

4.1.2 箱桁内の除湿システム

本四連絡橋の海峡部橋梁の箱桁内面の防食は、

「無機ジンクリッチプライマー+変成エポキシ樹脂塗料」による塗装を基本としている³⁾。

新尾道大橋において採用した箱桁内面の防食方法は、従来の塗装に代わり箱桁内の湿気を除湿機により除去することにより腐食環境を改善し、防食しようとするものでライフサイクルコストの低減を目指したものである。

除湿機は、処理風量300m³/h、除湿能力2.1kg/h(25℃、相対湿度40%時)であり、全長546m(全容量21,400m³)の橋を5つのエリアに分けて計5台を設置している。除湿機は、箱桁内の相対湿度を管理値(60%)以下に保持できるように自動運転を行っている。ただ、気温の下がる早朝など一時的に相対湿度が管理値を上回るものの僅かであり、目視による外観調査により発錆等の不具合のないことを確認している⁴⁾。今後は箱桁内の気密化をさらに徹底し、データの蓄積を引き続き行うとともに、運転の効率化を図りシステムとしての品質を高めていく予定である。

また、新尾道大橋以外の箱桁橋においては、箱桁内部の温度・湿度の変化や侵入塩分量の測定等による腐食環境の調査を実施している。その結果によると、箱桁内の相対湿度は温度変化に連動して変化するが、鋼材面に結露が生じる程高くなることはほとんどなく、さらに現場継手部の隙間などをシール材等で気密化を図れば侵入塩分量も微量となるため、海上橋であっても比較的良好な環境にあることが確認された⁵⁾。これらの結果を踏まえ、箱桁内部の塗替塗装計画等の維持管理方針を策定する予定である。

4.1.3 塗替え塗装

本四連絡橋の海峡部橋梁の外表面塗装は、全体で約400万m²に及び、その塗替え費用が維持管理の全体コストに占める割合は大きい。さらに、作業が高所で自然条件も厳しいことから、経済性の観点から既に述べたように耐久性に富む重防食塗装系を採用している。

この重防食塗装系は、以下の特長を有している。

- (1) 下地に使用する厚膜型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た塗料であり、亜鉛メッキと同様に鋼材に対して電気化学的防錆作用を有するため防錆効果に優れている。しかし、現場ではこの塗料の施工管理が難しく、コストもかかるため塗替えは困難である。
- (2) 無機ジンクリッチペイントは耐久性には優れるが、点錆などが一旦発生すると、その錆が周囲に広がるよりも深さ方向に進行する傾向がある。また、この塗装系については歴史が

浅いため、その腐食形態、劣化パターン等が未だ十分解明されていない。

このことから本塗装系の塗替えにあたっては、

- (1) 鋼材表面に施工された厚膜型無機ジンクリッチペイントの層を傷めない。
- (2) 上塗り塗料は耐久性の高いふっ素樹脂塗料とし、塗替えのサイクルを可能な限り延ばす。

ことにしており、これにより維持管理コストを縮減することを目指している。

また、合理的な塗替え時期の設定のため、各橋の部材の代表的位置に定点塗膜調査のための測定箇所を設定し、膜厚、光沢度、チョーキング等を定期的に測定し、塗膜劣化の進行状況の把握、劣化メカニズムの解明を行うこととしている⁶⁾。これにより、各橋梁の塗膜の損耗速度を把握し、塗替え着手時期を決定することとしている。

さらに、今後本格化する塗替えに対し、①足場の合理化、②品質管理マニュアルの充実、③箱桁等の平面的な部位の省力化・合理化を目指した自動塗装機械の開発、④より耐久性のある新規塗料の開発及び多層塗りから少層塗りとする新規塗料の開発等に取り組んでいる。

4.1.4 鋼ケーソンの電着工法

海峡部橋梁の海中基礎は、設置ケーソン工法により建設されたものが多い。この工法は、鋼製のケーソン（鋼殻）の中に、コンクリートを打設して基礎とするもので、ケーソン表面は海水に接している。瀬戸大橋の基礎で鋼板の腐食状況を調査したところ、孔食の発生が確認された。

海中にある鋼材の防食には電気防食や水中塗装等の工法があるが、基礎設置地点の水深が深くかつ潮流が速いため潜水作業を極力なくすこと、補修後の維持管理を低減できること等を主眼に、電着工法の適用を検討した。この工法は、ケーソンを陰極とし海水中に設置した陽極との間に直流電流を流すことにより海水中のCa、Mgイオンをケーソン表面に導き、 CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を電着形成

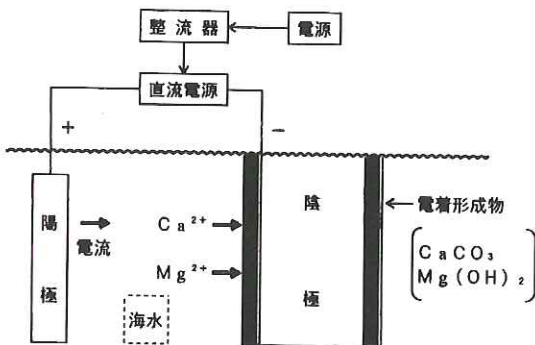


図-6 電着工法の概念図

物として析出させるものである（図-6）⁷⁾。この電着形成物は、コンクリートと同等以上の強度特性や水密性を有する。

現在、実構造物での施工を開始したところであり、今後、施工法の改良やデータ収集を行い、海中鋼構造物の防食工法として確実なものにしたいと考えている。

4.2 非破壊検査

4.2.1 ハンガーロープの非破壊検査

吊橋のハンガーロープは、図-7に示す断面形状をしたロープを使用しているものが多い。このロープは防錆のため鋼線に亜鉛メッキを施し、さらにロープ表面を塗装している。

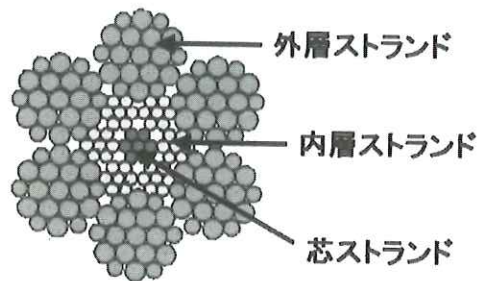


図-7 ハンガーロープ断面構成図

建設後、16年経過した因島大橋のハンガーロープの表面に錆が確認されたため、内部の発錆状況を確認する必要がある。そのため、目視点検の不確実さをカバーする適切な非破壊検査方法の開発と、ハンガーロープを取り外して開放調査を行った。この結果、非破壊検査として全磁束法が十分適用可能であることが確認された⁸⁾。全磁束法は図-8に示すように、断面積と磁束の間に比例関係があるという原理を利用したもので、磁束を測定することによりワイヤロープの腐食等による断面の減少を定量的に評価できる。

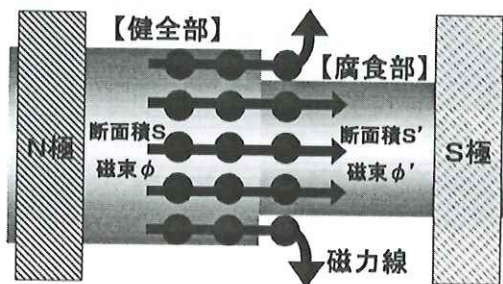


図-8 全磁束法概念図

現在、ハンガーロープの健全性調査や長寿命化の検討など、合理的な管理手法を確立するため検討を行っているところである。

4.2.2 疲労部材のモニタリング

瀬戸大橋は、道路・鉄道併用橋であり、橋体の健全性を確保するためには疲労に対する配慮が不可欠である。建設時点では、溶接継ぎ手構造の設計や部材製作の品質管理に疲労を考慮した基準を作成して対応してきた。

部材製作時に発生した微細なブローホール等(許容欠陥範囲内の欠陥)は検査には合格と判定されるが、長期間の使用を考えると疲労損傷のきっかけになる可能性があることから、これらの位置と大きさのデータを全て記録し維持管理に引き継ぐことにした。

維持管理段階での実橋における溶接内部欠陥の追跡調査のため、新たに超音波探傷装置を開発した。この装置は移動性がよく、横向きや上向き姿勢での探傷が可能のように、装置本体を分割可能な構造とするとともに、探触子に塗装の影響を受けにくいものを選定した。また、測定値処理部にデータの蓄積、検索、将来の寿命予測が可能な解析機能を持たせている。定期的に実施している調査では、溶接欠陥の疲労亀裂への進展は確認されていないが、供用年数が長くなるに従い本システムの重要性も増してくるため、より合理的な機器への改良も必要であると考えている。

4.2.3 コンクリート構造物の非破壊検査

海上部に位置するコンクリート構造物は飛来塩分の影響を強く受けることが懸念される。このため、本四連絡橋の置かれている環境を考慮し、想定する劣化を塩害と中性化とし、定期点検の一項目として非破壊検査を実施している。この検査では、コンクリート中の塩化物イオン濃度、中性化深さ、鋼材の自然電位および鋼材かぶりを調査している。塩化物イオン濃度は、ドリル削孔により採取した粉末試料を用いて「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法(JCI-SC5)」により測定し、中性化深さは塩化物イオン濃度測定用に削孔したドリル孔において、フェノールフタレイン法で調査している。

塩分の浸透量や中性化深さ等の調査結果からコンクリート部材の劣化予測・評価を行い、想定した供用期間内に塩害等の発生が懸念される場合、早期に劣化予防対策等を講じようとするものである。

5. おわりに

今回の報文は主に本四連絡橋のうち海峡部長大橋について、その維持管理の特徴と基本的な考え方及び現在実施中の主な維持管理技術と今後の展望を紹介した。これらの技術が社会資本の長寿命

化のために少しでも参考になれば幸いである。

また、これらの維持管理技術を最終的にはライフサイクルコストを考慮した保全システムとして体系的に確立していく必要があり、そのためには他分野の先端技術を大いに活用しながら維持管理のための技術をさらに発展させて行かねばならないと考えている。莫大な資金と長い年月をかけて建設した貴重な社会資本を長期間に亘りその健全性を維持し、後世に引き継いでいくことが我々の責務である。

長大橋の維持管理に関して読者諸兄の忌憚のないご意見と適用可能な先端技術に関してご指導をいただければ幸甚である。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：点検管理要領第2集長大橋梁点検
- 2) 古家和彦：送気乾燥による吊橋ケーブル防食試験，本四技報，Vol.21，No.84，1997.10
- 3) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等塗装基準・同解説（案）（平成2年4月）
- 4) 廣田昭次、小島久邦、東秀樹：新尾道大橋桁内除湿設備の最適化運転の試み，本四技報，Vol.26，No.98，2002.3
- 5) 村上博基：海上箱桁橋の内部腐食環境について，土木学会第58回年次学術講演会概要集（投稿中）
- 6) 本州四国連絡橋公団：保全管理要領2-1定点塗膜調査
- 7) 岩垣富春、安村尚人、佐々木晴敏：海中橋脚の電着防食，橋梁と基礎，Vol.33，No.8，1999.8
- 8) 小川和也、前田泰男、明石良男、守谷敏之：吊橋ハンガーロープの全磁束法による腐食強度評価，土木学会第56回年次学術講演会概要集，2001年9月

帆足博明*



本州四国連絡橋公団保全部橋梁保全課長
Hiroaki HOASHI

森山 彰**



本州四国連絡橋公団保全部橋梁保全課長代理
Akira MORIYAMA