



8. 本州四国連絡橋の保全技術

1) 海峡部長大橋の保全年針

海峡部長大橋の保全の基本は、時間とともに進む劣化を抑制して橋の機能を維持するため定期的に行う計画的な維持管理です。

橋の劣化原因には、鋼材の錆による腐食やコンクリートの塩害や中性化による劣化があります。これらの劣化から部位を保護するための塗装なども時間とともに劣化するため、表に示す

ような対策を定期的実施しています。

計画的な維持管理

	劣化対策
鋼材	
上部工	塗装、ケーブル送気
下部工	電気防食
付属物	亜鉛メッキ
コンクリート	塗装など

2) アセットマネジメントを実践するための予防保全の取組

①上部工（塗替塗装）

海峡部長大橋は、大部分が鋼製であり、長期にわたり機能を保全するには、錆を抑えるのが最も重要です。よって、海峡部長大橋では、塗装が最も基礎的な維持管理です。

塗装は、紫外線や水分によって劣化が進むため、定期的な塗替えが必要です。本州四国連絡橋の塗装面積は約400万㎡です。これは東京ドーム300個を超える膨大な面積です。今後、経年劣化が進むにつれ塗装費用は大きくなっていき、維持管理費のおおよそ半分以上を占めるようになることから、本州四国連絡橋のライフサイクルコストを最小化するには、塗装のコスト削減が最も重要です。

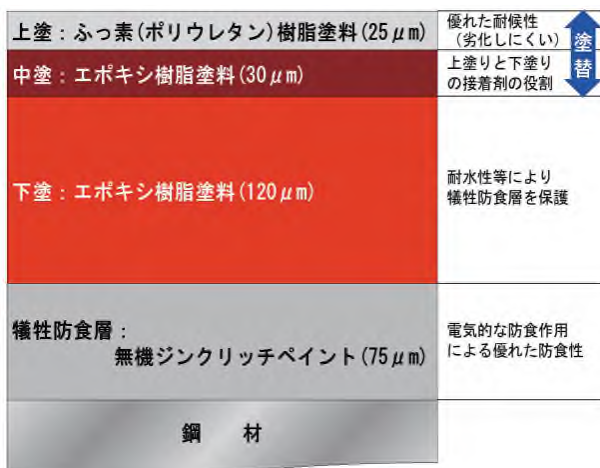
このため、塗替塗装のサイクルを長くするよう、建設段階において、長期に耐久性が期待できる多層構造の塗装系を開発しました。この塗装系は、犠牲防食層により十分な防食性能を確

保し、この犠牲防食層を保護するため、接着性が良好で全体を一体化する下塗・中塗と耐候性の高い上塗を重ねたものです。

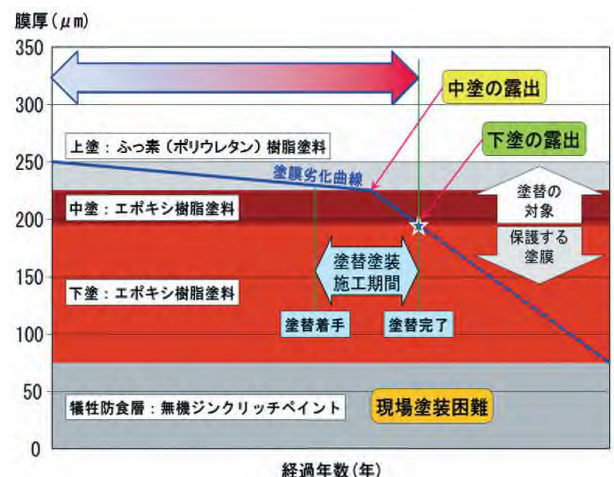
従って、塗装の防食機能の確保は、犠牲防食層を健全な状態に保つことが基本ですが、犠牲防食層の無機ジンクリッチペイントは現場での塗替えが困難で、仮に塗替えると非常に大きな費用を要します。そこで、下塗が露出する前に中塗と上塗を塗替える予防保全を基本とし、定期的に塗替塗装を実施しています。

なお、明石海峡大橋以降の上塗には、耐候性に優れたふっ素樹脂塗料を採用してきましたが、より耐候性に優れた高耐久性ふっ素樹脂塗料を研究・開発・採用することで、さらなるライフサイクルコストの削減に努めています。

塗替塗装の時期は、定期的に定点で塗膜の厚さの減り具合を調査して劣化の進み方を予測し、最適な塗替え時期を判断しています。



本州四国連絡橋の塗装系



塗装の劣化予測図

	1980	1990	2000	2010
明石海峡大橋 大鳴門橋		1985▼大鳴門橋 塗替え	1998▼明石海峡大橋 塗替え	
瀬戸大橋		1988▼下津井瀬戸大橋 1988▼榎石島橋 1988▼岩黒島橋 1988▼与島橋 1988▼北備讃瀬戸大橋 1988▼南備讃瀬戸大橋		
しまなみ海道		1983▼因島大橋 1979▼大三島橋 1987▼伯方・大島大橋	1999▼新尾道大橋 塗替え 1999▼多々羅大橋 塗替え 1999▼来島海峡第一、第二、第三大橋	
上塗り塗料の変遷	塩化ゴム系塗料	ポリウレタン樹脂塗料	ふっ素樹脂塗料	高耐久性ふっ素樹脂塗料

上塗り塗料の変遷

②上部工（ケーブル送気システム）

吊橋のケーブルは、吊橋を構成する部材の中でも最も重要な部材です。ケーブルは、取替えが困難なため、確実な防食が必要です。

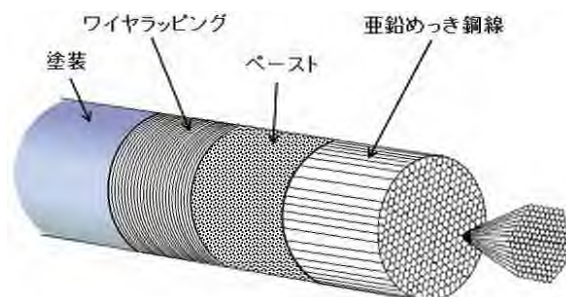
従来は、主に塗装により水を遮断する方法で防食することとしていましたが、瀬戸大橋で供用10年後に塗装などを除去してケーブルを観察したところ腐食が確認され、この方法では防食が不十分なことが明らかになりました。これは、温度変化が大きく、多雨で湿度の高い我が国の気候のもとでは、温度変化により塗装にひび割れが生じやすく、ひび割れから水が侵入し、その水が乾燥しにくいためと考えられます。

そこで、我が国の気候のもとでも有効な防食システムとして、ケーブル内部に乾燥した空気を送り込んでケーブルの腐食を抑制する「送気乾燥システム」を世界に先駆けて開発しました。

実験により、ケーブルを構成する亜鉛めっき銅線は、湿度60%以下の場合には腐食が生じないことが確認されています。そこで、この送気乾燥システムによりケーブル内部の湿度を常に60%以下に保持することにより、腐食の要因を根本から排除し、確実な防食が実現できます。

システムは、補剛桁内に乾燥空気を製造する送気用の機械設備を配置し、ケーブルに適当な間隔で設置した送気カバーからケーブル内部に乾燥空気を送り込みます。乾燥空気は、ケーブル内を移動し排気カバーから排出されます。これにより、ケーブル内部を乾燥した状態に保持し続けます。システムの稼働状況は、ケーブル

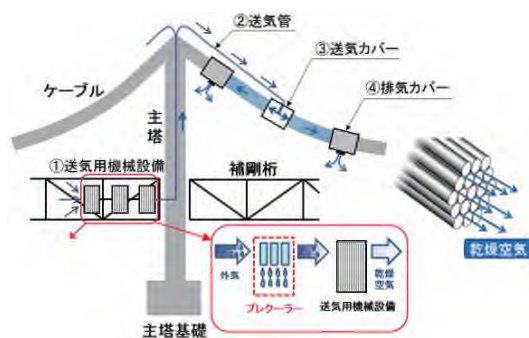
内部の湿度を常時モニタリングしてチェックしています。



従来のケーブル防食方法



ケーブル腐食状況（従来のケーブル防食方法）



ケーブル送気乾燥システム概念図



送気カバー

明石海峡大橋で送気乾燥システムが稼働して10年後にケーブルの調査を行いました。ケーブルの表面にも内部にも腐食はなく、システムが確実に機能していることが確認できました。

8. 本州四国連絡橋の保全技術

また、明石海峡大橋では、さらに送気乾燥システムの運転高度化を図るため、平成28年度に従来の送気用機械設備にプレクーラーを追加しました。これにより、システムの運転効率化と、より安定した乾燥空気をケーブル内部へ送気することが可能となりました。

この送気乾燥システムは、本州四国連絡橋の吊橋全10橋に導入しています。このほか、当社の技術支援により長崎県の平戸大橋、広島県の安芸灘大橋、首都高速道路のレインボーブリッジなどに導入されている他、海外の吊橋においても導入が進んでいます。

③鋼箱桁の送気乾燥システム

長大橋の箱桁内面の防食対策としては、従来は塗装を行っていましたが、新尾道大橋では塗装を行わず桁内の湿度を鋼材が腐食しない程度に保つための送気乾燥システムを開発し、採用しています。塗装面積が外面の約4倍である内面の塗装・塗替えを省略でき、コストが大幅に節減できました。

本システムを本格的に採用したのは、国内では新尾道大橋が初めてです。



桁内の除湿設備（新尾道大橋）

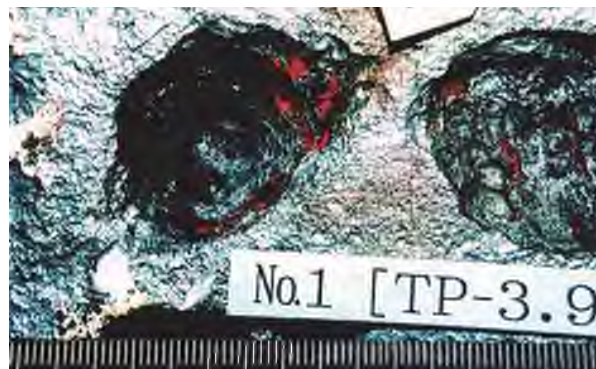
④下部工（電気防食等）

○電着防食工法

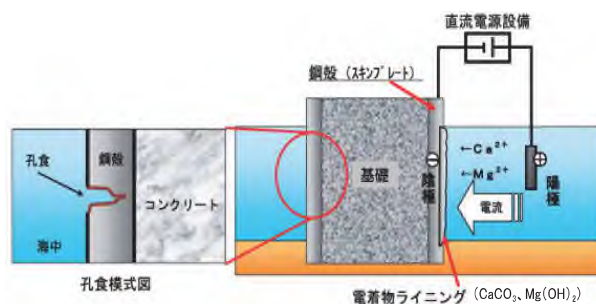
海中基礎では、鋼ケーソン（箱状の鋼殻構造物）を設置し、その内部にコンクリートを打設する設置ケーソン工法を多く採用しています。

瀬戸大橋のいくつかの鋼ケーソンの表面では、孔食（局部的に進行する腐食）が発生しました。

この対策として、海水中に微弱電流を流すこ



スキンプレートの孔食の様子



電着工法の概念図

とにより、海水中に存在するカルシウムやマグネシウム等の陽イオンを鋼ケーソン表面に誘導し、炭酸カルシウムや水酸化マグネシウム等を主成分とする物質を付着させて被膜を形成する電着防食工法を開発し、採用しています。

○電気防食工法

瀬戸大橋以降に建設した来島海峡大橋では、建設時に予め、鋼ケーソンの防食対策を行っています。工法としては、塗装に加え、ケーソン壁面に犠牲陽極となるアルミニウム塊を取付け、異種金属間で発生する電流を利用して錆を防ぐ「電気防食」を併用しています。

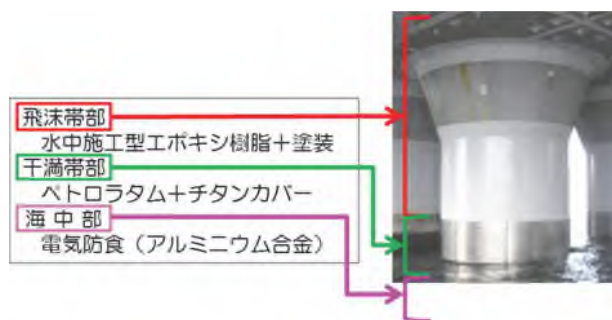


予めアルミニウム陽極を取付けた鋼ケーソン

○大鳴門橋多柱基礎の防食

うず潮で名高い鳴門海峡にある大鳴門橋の主塔基礎は、潮流を阻害しないよう、多柱基礎を採用しています。多柱基礎は、鋼管と内部の鉄筋コンクリートで構成されており、鋼管を腐食から守るための防食工事を行っています。

防食方法は、場所毎に適切な方法を採用しており、飛沫帯部は水中施工型エポキシ樹脂+塗装、干満帯部はペトロラタム（石油ワックスの一種）及びそれを保護する耐食性に優れたチタンカバー、海中部は電気防食（アルミニウム合金）を採用しています。



大鳴門橋多柱基礎の防食工法

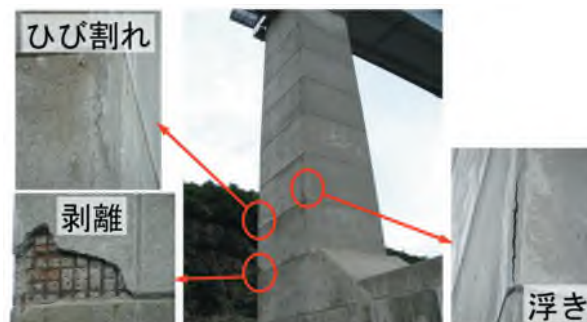
⑤コンクリート構造物（表面被覆等）

海峽部長大橋は、海上に架かることから、常に潮風に曝されたり海水の波しぶきを受けるなど、厳しい塩害環境に置かれています。コンクリート構造物は、表面から内部に浸透した塩分によって内部の鉄筋に腐食が生じ、鉄筋が膨張することによりコンクリートにひび割れが生じ、その後、浮き、剥離へと進展します。これを防止するため、必要に応じコンクリート構造物表面の被覆を行います。

当社では、系統的かつ定量的に劣化や損傷の程度を把握し、適切に維持管理を行うフローを構築しており、長寿命化や美観のため表面にPCパネルを設置している一部のコンクリート構造物を除き、このフローにより経済的に長寿命化を図ることとしています。

まず、定期的に非破壊検査を行い、コンクリート中の塩分量や中性化の深さを調査します。

続いて、劣化予測として、調査結果から数十年後から100年後の鉄筋位置での塩分（塩化物



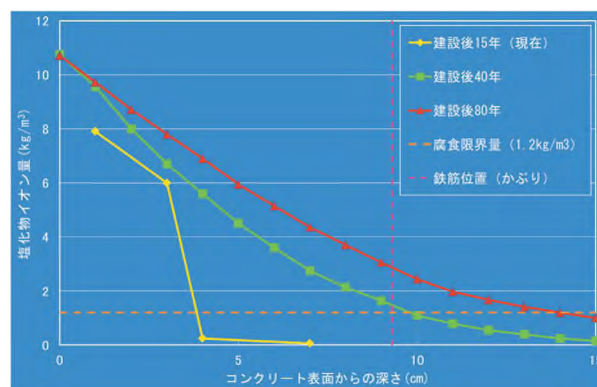
塩害による損傷事例



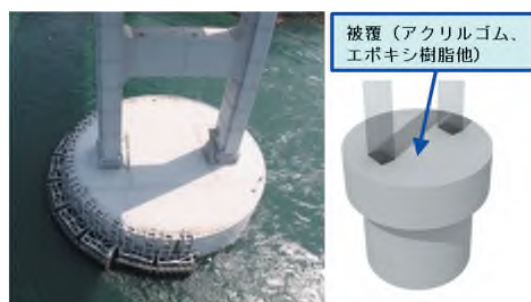
コンクリート構造物の維持管理フロー

イオン）の量を予測し、これが鉄筋に腐食が生じる限界を超えるかどうかを判定します。

その結果、将来的に限界を超えると予測される場合は、塩分の侵入を防止するため、コンクリート被覆を行います。



コンクリートの劣化予測（例）



主塔基礎天端のコンクリート被覆

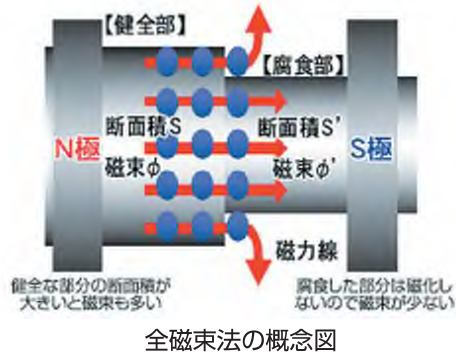
8. 本州四国連絡橋の保全技術

⑥その他の維持管理技術

○吊橋ハンガーロープの非破壊検査

吊橋のハンガーロープは、主ケーブルに補剛桁を吊下げる重要な部材です。

明石海峡大橋及び来島海峡大橋を除く吊橋のハンガーロープには、塗装された鋼より線を用いており、ロープ内部の腐食状況の確認には、ロープの仮撤去・解体が必要でした。そこで、ロープを強く磁化した時に流れる、ある断面の磁力線の数を測定し、健全な部分と比較することにより腐食による断面減少を推定する非破壊検査技術である「全磁束法」を開発し、維持管理の省力化を図りました。



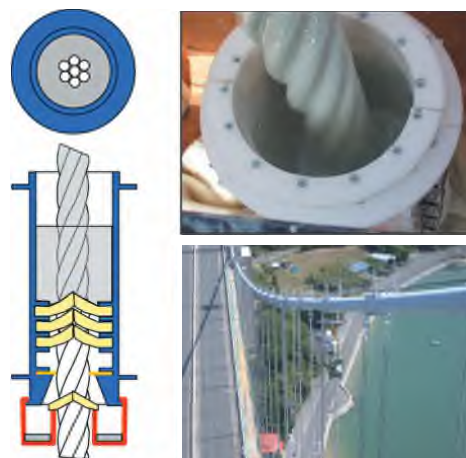
全磁束法の概念図



現地計測状況

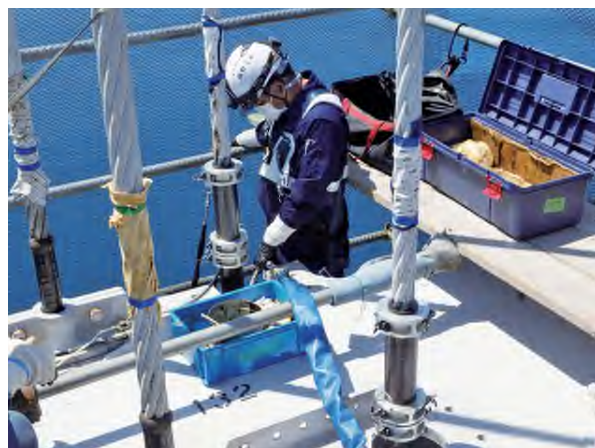
○吊橋ハンガーロープの防食

因島大橋の鋼より線を用いたハンガーロープでは、塗膜が劣化するだけでなく、雨水が侵入して滞留したことが原因と考えられる内部の腐食も発生しています。このため、ハンガーロープの塗替塗装には、ハンガーロープを塗料に浸し内部まで塗料を充填させる「浸漬塗装工法」を採用しています。



浸漬塗装工法(左：概念図、右：施工状況)

一方、特に腐食環境の厳しい大鳴門橋では、ハンガーロープ定着部に著しい腐食が確認され、調査した結果、一部のロープには大きな断面欠損が生じていました。このため、特に断面欠損の大きいロープについては新品に交換するとともに、その他のロープを含め、防錆効果のある材料（ペトロラタム）をロープ内部に圧入、充填し、その後、ロープの外周に防食用テープを巻く「内部充填工法」により腐食の進行を抑制することとしています。



内部充填工法

○吊橋ハンガーロープの制振対策技術

明石海峡大橋のハンガーロープには、長いものでは200mを超えるものがあります。台風などにより20m/秒程度の強風が吹くと、2本並んだハンガーロープのうち風下側のものが大きく振動する現象が確認されました。

そこで、このような振動の発生条件、振動特性及びその制振方法について調査・実験等を行った結果、ハンガーロープに、直径10mmのロープを螺旋状に巻き付けることにより、制振効果が得られることを確認しました。ロープを巻き付ける機械を開発し、対策工事を実施した結果、現在のところ、ハンガーロープに有害な振動は発生していません。



ハンガーロープ制振対策工事の状況

○斜張橋ケーブルの制振対策技術

多々羅大橋のケーブルは非常に長く、風雨時にレインバイブレーションという振動の発生が懸念されていました。

そこで、ケーブル表面に多数の凹部（インデント）を設けることにより、振動を抑えられることが確認できたので、制振対策として採用することにしました。

現在までのところ、強風によるケーブルの有害な振動は確認されていません。



インデントケーブル

○赤外線サーモグラフィによる点検技術の開発

橋を構成する部材には、大型車が繰返し走行することによって、疲労による亀裂が発生します。疲労による亀裂の中で、鋼床版のデッキプレートとUリブの溶接部に生じる亀裂（ビード貫通亀裂）を、赤外線サーモグラフィを用いて、遠

隔から非接触で効率よく高精度に検出できる点検手法を開発し、実橋の点検に適用しています。

なお、この点検技術は、神戸大学との連携協力協定に基づく共同研究で開発しました。

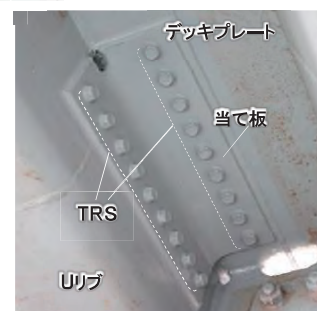
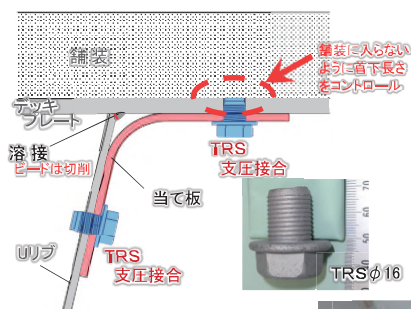


鋼床版の疲労亀裂点検

○鋼床版下面からの亀裂補修

鋼床版のデッキプレートとUリブ溶接部に発生するビード貫通亀裂に対して、下面からのみの作業で施工可能かつ効果的な補修法を開発しました。この工法は、当て板とデッキプレート及びUリブとの接合に、自身のねじ山が孔壁を塑性変形させることで雌ねじを形成しながら鋼材を締結するワンサイドボルト（TRS）を用いて鋼床版の下面からのみで施工を行うものです。これにより、補修時に鋼床版上の舗装を剥ぐ作業がなくなるため、舗装の防水性能の低下や交通規制を最小限に抑えることができるなどの利点を有しています。

なお、この補修法は関西大学と当社で開発し実物大の実験により性能を確認しました。



鋼床版の下面からの亀裂補修

8. 本州四国連絡橋の保全技術

3) 長期保全計画

当社では、本州四国連絡橋を200年以上利用可能とするよう、アセットマネジメントの考え方による予防保全を具体的に推進するため、2100年までの長期保全計画を作成しています。

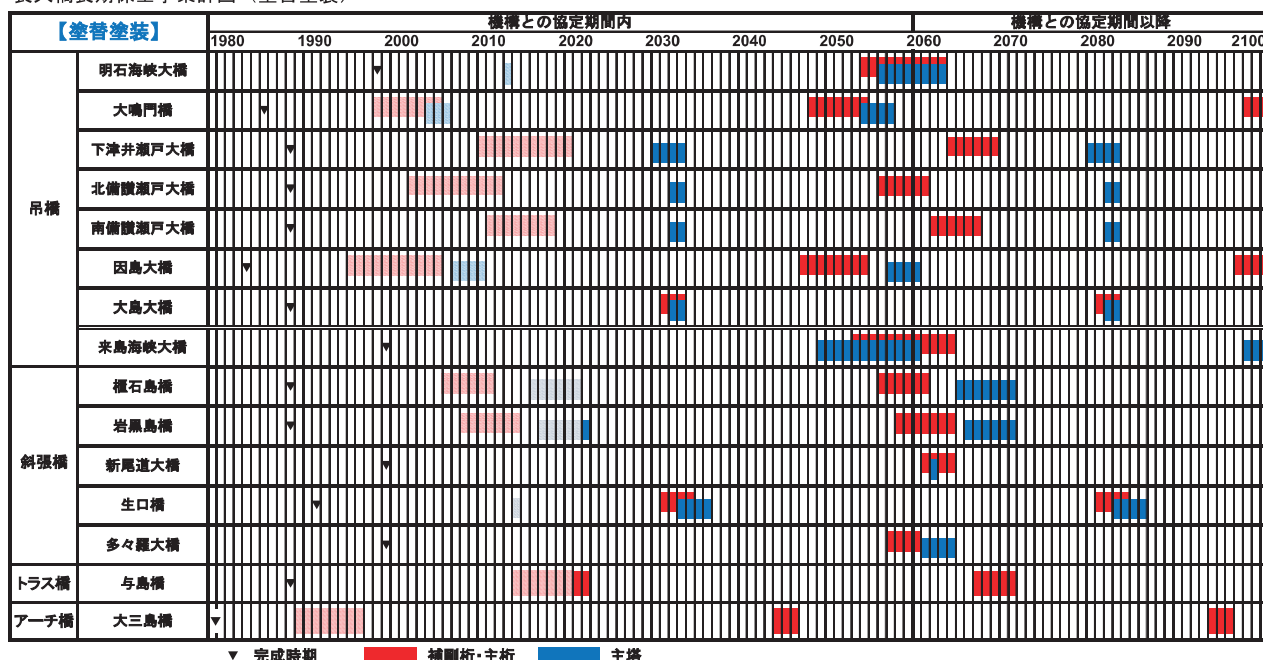
海外の既往例をみると、アメリカの一部の長大吊橋では、ケーブルを構成する鋼線に破断が確認されるなど変状が大きく進展したため、大規模な補修が余儀なくされています。

このため、供用後70年経過後から補修費が加速的に増加し、補修費の累計額が当初の建設費用を超えたとの報告もあります。

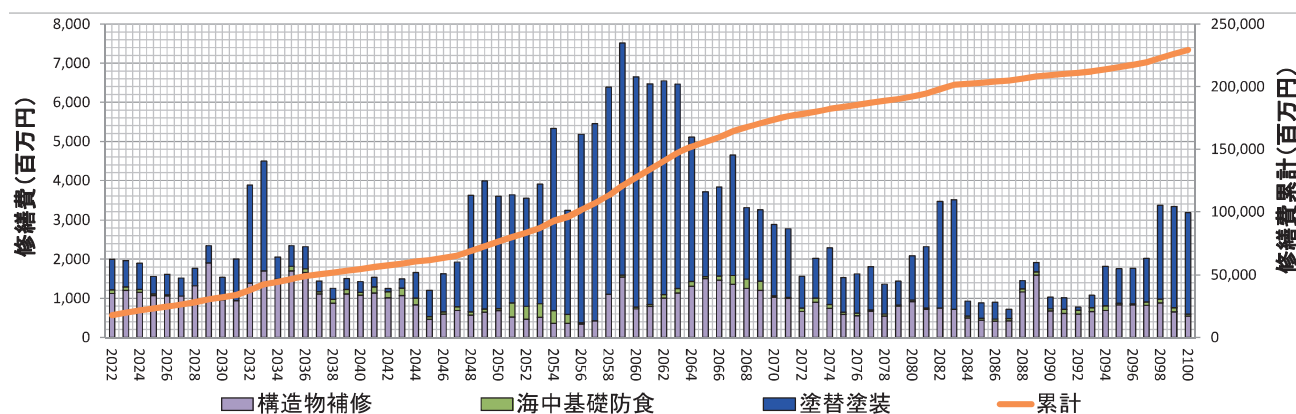
当社の長期保全計画に基づいて修繕費を算出すると、年により修繕費のバラツキはあるものの、補修費の急激な増加を抑えることができおり、予防保全の効果が反映されています。

この長期保全計画は、現時点のデータに基づいて作成したもので、今後の点検結果や最新の知見をもとに、適宜見直しを行っていきます。

長大橋長期保全事業計画（塗替塗装）



2100年までの長期保全計画の例（塗替塗装）



2100年までの長期保全計画による修繕費の推移