

5. 吊橋の維持管理

5.1 吊橋の維持管理

吊橋の場合、構造が多岐にわたっており部材数が多いこともあり、異常を早期に発見し、小さな損傷のうちに適切な対策を講じること（予防的維持管理）を怠ると、大規模な損傷を招き橋としての機能を低下させることになる。その状態をさらに放置すれば架け替えを余儀なくされるだけでなく、落橋事故につながりかねない危険がある。また、吊橋の損傷に対したただ補修しただけでその後の予防的維持管理を実施しなければ、損傷～補修を繰り返すことになってしまう。逆に、予防的維持管理の継続により健全度を良好な状態に保持し続けることが吊橋を劣化させないための何よりの方法となる。

予防的維持管理を確実に機能させるためには、対象となる吊橋の特性に十分に配慮された予防的維持管理要領を供用時まで設定するとともに、維持管理業務の運営についても明確にしておく必要がある。維持管理業務運営の明確化とは、維持管理体制（組織、人員、責任の所在）、予算等の将来にわたって予防的維持管理の障害となりうる課題を事前に解決しておくことである。

吊橋の維持管理要領は、

- ① 構造特性
- ② 要求機能
- ③ 架橋地点の自然条件
- ④ 規模
- ⑤ 使用材料

を考慮したうえで策定されるべきである。策定された維持管理要領は、異常の発見が早期になされ、異常に対する判断と対応が的確にでき、円滑に運用できるものでなければならない。

吊橋の維持管理フローの概念の一例を図-5.1.1に示す¹⁾。

また、小吊橋の維持管理要領を策定する場合は、上述のほかに

- ① 通行量が比較的少ない。
- ② 架橋地点の地形が複雑である。
- ③ 幹線道路に位置しない場合がある。
- ④ 設計上の耐用期間が長期ではない。
- ⑤ 必ずしも維持管理に配慮した設計となっていない。
- ⑥ 長大吊橋に比較して構造詳細が簡略化されている。

等の特殊性を考慮する必要がある²⁾。

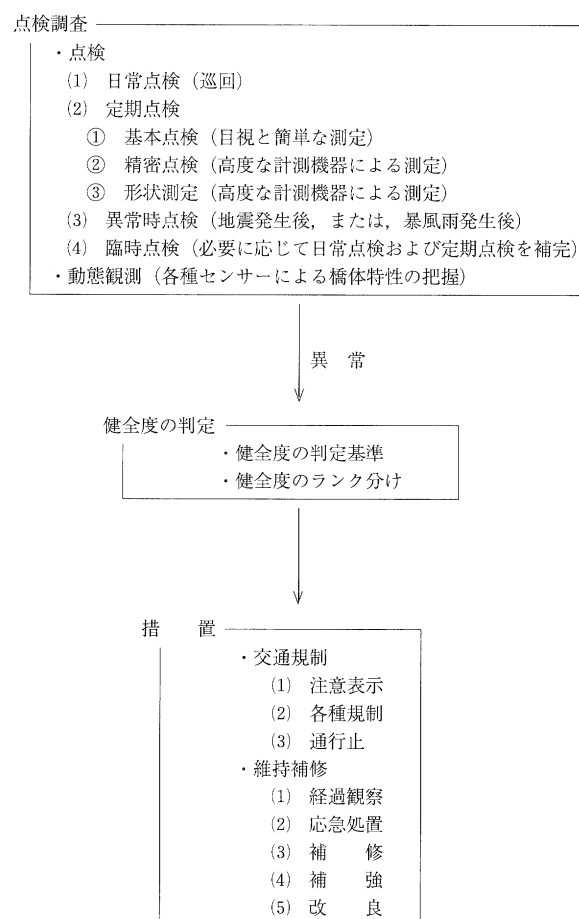


図-5.1.1 吊橋の維持管理フロー例

5.2 吊橋の点検調査

点検調査は、吊橋の状態を把握するためのものであり、対象となる吊橋の特性を考慮した調査項目が事前に明確になっていなければならない。

長大吊橋における点検調査の調査項目例を表-5.2.1に示す。

また、吊橋主ケーブルの詳細調査を実施する際の調査項目例を表-5.2.2に示す。

小吊橋の点検調査の調査項目を設定するにあたって、特に注意する必要がある構造部位を下記に示す²⁾。

1) 主ケーブル定着部

小吊橋の主ケーブル定着部には泥や落葉がたまりやすく湿潤状態になる場合が多く腐食が進行しやすい。

表-5.2.1 長大吊橋における点検調査の調査項目例（日本道路公団）

吊	橋面	① 路上障害物の有無	形状測定	① 主ケーブル・サグ
		② 舗装の損傷と汚損状況		② 補剛桁形状
		③ 高欄、ガードレールの破損・腐食・錆		③ 補剛桁端部の橋軸方向移動量
		④ 路上のクラック、表面の剝離、コルゲーション、わだち		④ 主塔鉛直度
		⑤ 露出鉄筋の有無		⑤ 測定時の気温、ケーブル温度
		⑥ 道路照明の設備状況		⑥ 橋台、橋脚の沈下、移動、傾斜
		⑦ 標識類の損傷および整備状況	橋台橋脚	① 主塔基礎および補剛桁支承座部の変状の有無
		① 縦桁、横桁と床版の取付部および上フランジの腐食、欠損		② 付帯設備工の腐朽破損状態
	床組関係	② 縦桁支点付近のフランジと腹板または端補剛材との溶接部の亀裂		③ 基礎、躯体および上屋の亀裂、剝落（風化を含む）
		④ 露出鉄筋の有無		④ 主塔基礎および補剛桁支承座部の変状の有無
		③ 連結部ボルト、ナットの弛緩、腐食および欠損	主	① 基部アンカーボルトの異常の有無
		④ 塗装の老化および鋼材の腐食		② 基部内部の滞水の有無
		① 本体の損傷、段差、遊間の異常		③ 部材の損傷状態
		② 異常音の発生、振動状態		④ 防水および換気の状態
	伸縮装置	③ 鋼フィンガー、取付ボルト・ナットの弛緩および欠損	塔	⑤ 塗装の老化および鋼材の腐食
		④ 支承の機能、据付状態および清掃		⑥ ボルト・ナットの弛緩および腐食
		⑤ 連結、溶接部のボルト・ナットの弛緩、腐食および欠損		⑦ 付帯設備の破損および腐食
		⑥ ゴミおよび排水の状態		① 塔頂サドル部のケーブルの滑り量の測定
		⑦ 路面上すべり止めの剝離、欠落	主ケーブル	② ソケット部のクリープ拔出し量の測定
		⑧ 塗装の老化および鋼材の腐食		③ ソケット定着部の損傷および腐食
	主横トラス	① 縦桁支承部の異常の有無	ケ	④ ラッピングワイヤー塗装の老化およびワイヤーの緩み破損
		② ガセットプレートの溶接部の亀裂、またはボルト・ナットの弛緩		⑤ 塔頂サドルカバーの防水および損傷の状態
		③ 車両走行時の振動状態	ケーブルバンド	⑥ スプレーサドル部の防水および損傷の状態
		④ 照明ポスト取付部の状態		① ケーブルバンドのボルト軸力の測定
		⑤ 部材の変形および破損	ブ	② ケーブルバンドのスリップの有無
		⑥ 塗装の老化および鋼材の腐食		③ コーキング材の老化および欠落
	補剛桁	① 吊材定着部の清掃、腐食および破損	吊	④ ハンドロープ、ハンドロープ支柱の緩みおよび破損
		② 斜材および上、下構造と弦材連結部の溶接および取付ボルトの状態		⑤ 塗装の老化および鋼材の腐食
		③ 部材連結部のボルト・ナットのひずみおよび腐食	材	① ソケット金属の移動量の計測
		④ 部材の変形および破損		② ソケット定着部の損傷および腐食
		⑤ 塗装の老化および鋼材の腐食	関	③ 吊材クランプおよび吊材振止金具部のワイヤーの損傷および腐食
		① 橋台とエンドリンクシュアの取付部		④ ケーブルバンド曲率部でのワイヤー損傷および腐食
	支承関係	② ストッパー橋台埋込部	ステイ	⑤ 塗装の老化
		③ タワーリンク、エンドリンク部材の変形、溶接部の亀裂		① ステイロープ・サグのたるみ
		④ リンクブラケット部の変形、溶接部の亀裂	サドル	② ステイロープの破断
		⑤ 取付ボルトの弛緩および腐食		③ ステイバンドのスリップの有無
		⑥ 端部ウィンドタングの橋台埋込部の状態	アンカー	① アンカーボルトの損傷および破損
		⑦ 主塔部ウィンドタング取付部の状態		② サドルカバーの損傷および破損
		⑧ ウィンドシュアすべり面の摩耗状態		③ 塗装の老化および鋼材の腐食
		⑨ リンクシュアのピンと支圧面の摩耗状態		① 引張材埋込部付近のコンクリートのクラック
		⑩ 塗装の老化および鋼材の腐食		② 定着ガーダー部のボルト・ナットの弛緩
				③ 塗装の老化および鋼材の腐食

表-5.2.2 主ケーブル詳細調査の調査項目例（日本道路公団）

外面調査	主ケーブル表面外観	内面調査	ラッピングワイヤー亜鉛メッキ残留厚
内面調査	外層ケーブル素線表面外観	室内試験	ケーブルバンド・コーキング部素線表面外観
	外層ケーブル素線亜鉛メッキ残留厚		外層ケーブル素線腐食生成物
	外層ケーブル素線腐食形態		ケーブルバーストの劣化度分析
	内層ケーブル素線腐食形態		ラッピングワイヤー腐食生成物
	主ケーブル内の滞水状況	その他	ラッピングワイヤーの残留張力
	ラッピングワイヤー裏面外観		ケーブルストランドの張力測定

主ケーブル定着部にクリップ止め構造が採用されている場合、クリップは一般に亜鉛メッキの付着量が少ないため小吊橋の中で最も発錆しやすい部材の一つとなり、ワイヤーの発錆につながるため念入りの点検調査が必要となる。また、クリップの取付方向が誤っている場合は、所定の強度が得られずケーブルのずれにつながる。

主ケーブルがコンクリートで被覆されていたり、コンクリートに直接埋め込まれている定着部の場合、主ケーブルに沿ってコンクリート内に水が浸入することもあり、目に見えない部分で腐食が進行していることもあるため注意すべきである。

2) 塔 頂 部

小吊橋の塔頂部は、一般に点検調査がしにくく損傷を発見することが困難になりがちであるので、塔頂部へのアクセス方法を維持管理要領に組み込むなどして、必ず定期的に塔頂部に登り、点検調査をしなければならない。

ケーブルがサドルカバーで覆われている場合、点検調査による損傷の発見が一層困難になるとともに、サドルカバーの内部が湿潤状態におかれることがあり、主ケーブル一般部より腐食が早まることに注意する必要がある。

3) 吊 材

小吊橋の吊材では、吊材の緩みに注意する必要がある。吊材の緩みの原因は、一つはケーブルバンドの滑りによる（ケーブルバンドの滑りは、締付け力不足、フィラーの不適正等で生ずる）ものであり、もう一つは主ケーブルのクリーブによりサグが下がるためである。

吊材の緩みは、補剛桁に過大な曲げを生じさせ補剛トラス上弦材の座屈を引き起こす場合があるため、注意する必要がある。

また、吊材の補剛桁への取付け部も損傷しやすい箇所であり、点検調査の際には注意する必要がある。

4) 耐 風 索

耐風索は一般に緩みやすいため、点検調査の頻度を高め、緩みを除去する必要がある。

5.3 吊橋の損傷事例とその補修

現在供用されている吊橋の中には、建設後 100 年以上を経過している吊橋も少なくない。しかし、これらの吊橋では建設当時には予期しなかった交通容量の増大や長年の供用による部材の腐食等に対処するために、種々の補修・補強による機能改善がなされ、現在の供用に至っている。また、比較的新しい吊橋であっても供用のために機能改善を余儀なくされた吊橋もある。

これまでに生じた既設吊橋の機能維持のための技術的課題は、決して過去のものではなく現在および未来に生じる可能性を持っている。

そして、これらの歴史的経験の上に現在の吊橋技術が存在していることを忘れてはならない。

5.3.1 Williamsburg 橋主ケーブルの点検調査および補修^{3)~5)}

ニューヨーク市の East 河には、100 年前後の歴史を持つ吊橋が多数架橋されているが、これらの吊橋では老朽化と著しい損傷が問題となっている。

その中の一つの吊橋である Williamsburg 橋は、主ケーブルのワイヤーの破断をはじめとした損傷が橋全体にわたって発生し、安全性および補修方法が世界的に注目され、一時は架け替えも検討された吊橋である。

Williamsburg 橋（1903 年）は、Brooklyn 橋（1883 年）よりも安い建設費で、より短い工期で、ただし橋長はより長くを追求した。そのため、ケーブル用ワイヤーに亜鉛メッキしないワイヤーが採用された。亜鉛メッキしないワイヤーを採用することによりワイヤー本数を少なくでき、ワイヤー自体も安価であったからである。しかし、このことが、後々に大きな技術的課題を与えることになった。供用から 7 年を経た 1910 年には、点検により主ケーブルの腐

表-5.3.1 Williamsburg 橋主ケーブルの維持管理経緯⁴⁾ (本州四国連絡橋公団)

1903 年	12 月 9 日開通
1910 年	点検により主ケーブルの腐食とワイヤーの破断を確認
1912 年	中央径間中央部主ケーブルで錆の発生を確認
1915 年～1922 年	主ケーブル外層のラッピングを除去 亜鉛メッキワイヤーにより再ラッピング
1934 年	アンカレイジ内で錆水の浸入を確認 多数のワイヤーで腐食と破断を確認
1934 年～1935 年	損傷ワイヤーを亜鉛メッキワイヤーに取替え
1944 年～1946 年	亜麻仁油を塔頂から主ケーブルに注入
1963 年～1964 年	魚油と無機質アルコールの混合物を塔頂から主ケーブルに注入
1979 年～1980 年	主ケーブル表層の検査と表層ワイヤーのサンプル試験を実施→ワイヤーの強度低下が判明
1983 年～1985 年	表層ワイヤーの著しい腐食と破断を確認
1987 年～1988 年	TAC* が主ケーブル内部に至る詳細な検査とサンプル試験を実施
1988 年	橋全体の補修を決定 (TAC : 主ケーブルは補修・維持管理により今後 100 年は十分に安全と結論)
1992 年～	主ケーブルの補修

* TAC : Williamsburg Bridge Technical Advisory Committee

食とワイヤーの破断が確認された。これに対して幾度かの補修を実施したにもかかわらず、主ケーブルの腐食は進行し続けた。主ケーブル以外にも

- ① 塩分、漏水および周期的な塗装の欠如による鋼部材の腐食
- ② 冬季の塩まきと排水の悪さによるアプローチ部床版の損傷
- ③ 周期的な点検調査の欠如によるグレーチングの損傷・落下

といった維持管理の不適切さに起因する技術的課題が生じた。

主ケーブルのこれまでの維持管理の経緯を表-5.3.1 に示すとともに、1987 年～1988 年に実施された主ケーブルの内部にまで至る詳細な点検調査、補修要領およびその後の維持管理方針を下記に示す。

(1) 主ケーブルの詳細な点検調査

主ケーブルの詳細な点検調査は、以下に示す要領で実施された。

- ① アンカレイジ近傍、中央径間中央部および主塔位置で主ケーブルのラッピングを解除する。
- ② 円周方向の 8 等分位置で主ケーブルにくさびを打ち込み内側のワイヤーを露出させる。
- ③ 各位置で深さの異なる 4 点からワイヤーをサンプリングする。
- ④ サンプル・ワイヤー表面外観を目視により調査する。
- ⑤ サンプル・ワイヤーの冶金学的な試験を実施する。
- ⑥ サンプル・ワイヤーの引張強度試験、疲労強度試験を実施する。

(2) 主ケーブルの調査結果

主ケーブルの詳細な点検調査により、以下に示す結果が得られた。

① アンカレイジ内の外側主ケーブル（スプレーサドル～ストランドシュー間）でワイヤーの破断が多数発見された。特に、スプレー点付近の状態が悪く、Manhattan 側が最も悪い状態にあった。このため、アンカレイジの内空を拡張するとともにスプレーサドルを新しいものに交換した。また、2 本のストランドを取り替えるとともに多数のワイヤーを継いだ。

② ①の原因としては、鳥のフンの影響とアンカレイジの屋根からの塩分を含んだ水の漏水が挙げられる。

③ 主ケーブルの安全率は、当初の 4.0 からは低下しているものの少なくとも 3.0 は確保されており、アンカレイジ内のケーブルを補修することにより 3.5 程度に高まった。

(3) 主ケーブルの保護

主ケーブルのこれ以上の損傷を防ぐため、以下に示す主ケーブルの保護対策が実施された。

① 純粋な生の亜麻仁油を浸透させることによる腐食の抑制

ワイヤー間に、浸透性の良い純粋な生の亜麻仁油を注入する。ケーブル最下点（中央径間中央部、側径間スプレー点）から塔頂に向かって注油する。注油は、ラッピング解除後くさび（硬い木製またはプラスチック製）を用いて、長さ約6mの溝状に主ケーブルを開く。この溝に純粋な生の亜麻仁油を注入する。

主ケーブルを開き破断ワイヤーが発見された場合は、破断したケーブルワイヤーを新しいケーブルワイヤーと継ぐ（破断ワイヤーの端部を切断した後、新しいワイヤーを特殊な圧着フェルールにより継ぎ、ねじ切りされたフェルールによって新しいワイヤーのもう一方の端部と継ぐ）。

② 主ケーブルの締め付け

ケーブルワイヤー間の空隙をなくし、ケーブル内に水分や酸素が入りにくくするために1000kNジャッキと同等の性能を有する油圧締め付け機により主ケーブルを締め付ける。

③ 鉛丹ペーストによるコーティング

鉛丹ペーストをケーブルワイヤーに直接塗布することにより、水分を遮断する。

④ ワイヤーラッピング

非亜鉛メッキワイヤーによりラッピングする。

⑤ ネオプレン・ラッピング

ワイヤーラッピングされた主ケーブル表面を152mm幅のネオプレンシートで螺旋状にラッピングする。

ケーブルバンドの縁は、ポリウレタンでコーキングする。

ケーブル表面を滑りにくくするために粉状のくるみの殻をふりまく。

⑥ アンカレイジ内のケーブル保護

アンカレイジ内のケーブルはラッピングされないため、防水ケーブル、防水屋根、換気装置により保護する。

(4) 維持管理による主ケーブルの保護

補修後の主ケーブルには、以下に示す維持管理が計画されている。

① 定期点検の実施

定期点検は、下記の項目を中心に実施する。

- ・アンカレイジ内ケーブルワイヤーの破断・腐食の調査
- ・ネオプレンラッピングの緩み、錆汚れ、油の浸出の調査
- ・ケーブルバンドおよびスプレーサドルのボルトの緩み、コーキング材、ケーブルの滑りの調査

② 詳細な点検調査

5～7年に1回は、ネオプレンラッピングを解除し詳細な点検調査を実施する。

③ 特別点検

定期点検等で損傷が発見されたときには、別途特別な点検調査を実施する。

④ 日常の予防的維持管理

日常の予防的維持管理として以下を実施する。

- ・路面からの塩分、堆積物の洗浄
- ・補修塗装
- ・10年以下をサイクルとした塗装塗り替え
- ・アンカレイジ内の腐食予防
- ・定期点検結果に基づく補修

5.3.2 既設吊橋の技術的課題とその対策例

既設吊橋に生じた機能を維持するための技術的課題とその対策を表-5.3.2に示す⁶⁾。

表-5.3.2 既設吊橋の技術的課題とその対策例 1

No.	橋 名	完成年	技 術 的 課 題	対 策	備 考
1	Wheeling 橋	1860	不明	・補修（詳細不明）	
2	Cincinnati 橋	1867	・交通容量増大 ・アンカレージ内ケーブルの損傷 ・主塔の曲げ変形 ・鋼床版の腐食 ・補剛トラス ・鉛直材損傷（交通衝撃） ・下弦材接続部アイバーの断面欠損	・ケーブル追加（1897） ・交通制限（支間当りバス2台） ・歩行者制限（100 フィート当り 100 人） ・動態観測	1987 年に詳細点検実施
3	Brooklyn 橋	1883	・主ケーブルの腐食 ・主塔の腐食 ・補剛桁の腐食，寿命	・スプレーポイントの移設 ・ワイヤーの一部取替え ・吊材の取替え（1986） ・アンカレージ内メンテナンス空間の確保 ・再ラッピング ・主ケーブル内部調査 等 ・支柱の取替え（1986） ・歩道部桁の取替え（1990）	
4	Williamsburg 橋	1903	・橋本体の腐食（約 400）	・ワイヤーの取替え ・吊材の取替え ・ラッピングの取替え ・ワイヤーのサンプリング試験 ・補剛トラス・床桁の補修・補強 ・歩道の補修 ・車道の架け替え 等	供用後7年でワイヤーの破断を発見 1992 年より主ケーブルの本格的補修を開始
5	Manhattan 橋	1909	・ケーブルアイバーの腐食 ・地下鉄の偏心载荷による床版・床桁のねじり損傷	・ソケットによるストランド連結 ・ロッド，アンカーガーダーに盛替え ・補剛トラス部に横構を追加 ・タワーリンクのクラック補修 ・RC床版のグレーチング化 ・伸縮装置の取替え ・補修用作業台の設置	
6	Queensboro 橋	1909		・アンカレージの補修 ・主ケーブル定着アイバーの補修	
7	Benjamin Franklin 橋	1926		・再ラッピング ・RC床版を鋼床版に取替え（1979～87） ・縦桁の取替え	
8	Portugas 橋	1927	・主ケーブルの腐食	・主ケーブルの取替え ・吊材の取替え	主ケーブルを全面取替え 補剛桁は補修再使用
9	George Washington 橋	1936	・吊材の腐食 ・下段デッキ増設による吊材の伸び ・リベットの腐食 ・RC床版の寿命	・吊材と桁との取合い部の防護 ・塔頂サドルのジャッキ・アップ ・H. T. B への取替え ・鋼床版への取替え（1977～78）	
10	Oakland Bay 橋	1936	・主ケーブルの腐食 ・桁載荷能力の強化	・主ケーブルの内部調査 ・縦桁補強	
11	Golden Gate 橋	1937	・吊材の腐食 ・RC床版の腐食 ・交通量増大 ・風による曲げねじれ振動	・吊材の取替え（1971～77） ・鋼床版への取替え（1982～85） ・アプローチ拡幅（1960） ・メンテナンス用作業通路の設置 ・補剛トラスに下横構を付加（1954）	

表-5.3.2 既設吊橋の技術的課題とその対策例 2

No.	橋 名	完成年	技 術 的 課 題	対 策	備 考
12	Bronx-Whitestone 橋	1939	- 風による - 鉛直振動 - 非対称ねじれ振動 - 対称ねじれ振動	- 補剛桁上にトラスを付加 - ステイケーブルの設置 - センターダイアゴナルステイの強化 - TMDの設置	アメリカ初の橋梁用 TMD
13	Chesapeake Bay 橋	1952	- 主ケーブルの腐食 - 凍結防止剤による R C 床版の塩害	- 主ケーブルの内部調査 - プレキャスト床版への取替え (1982～87)	
14	Delaware Memorial 橋	1952	- 主ケーブルの腐食 - 吊材の接触疲労 (フレッチング) - 伸縮装置の設計不良 - ゴミの滞積	- 主ケーブルの内部調査 - 吊材の取替え - 桁連結部の接触防護 - 補修 - 清掃・塗装 - 水洗い	
15	Köln Rodenkirchen 橋	1954	交通量増大 (交通渋滞の解消)	- 拡幅 (4 車線→8 車線) (1991～94) - R C 床版→鋼床版 - 塔柱の増設 (2 塔柱→3 塔柱) - 主ケーブルの増設 (2 面→3 面)	
16	Mackinac 橋	1957	- 主ケーブルの腐食 - 対傾構ガセットの疲労	- バンドボルトの取替え - クラックの補修	
17	Walt Whitman 橋	1957	- 主ケーブルの腐食 - 支承, 床版の腐食	- 再ラッピング - 取替え (1983)	
18	Forth Road 橋	1964	交通量増大	補剛トラスと主塔の交差部の横力支持機構の改造 (1989～90)	
19	Severn 橋	1966	交通量増大による損傷	- 塔柱の補強 - 吊材の取替え (全量) - 補剛桁, 鋼床版の補強 - 塔頂サドル, スプレーサドルの改造・補強 - アンカレイジ全体重量の増加	1987～90 年に補修補強
20	Verrazano Narrows 橋	1967	車両火災による上路床組の損傷		
21	Angostura 橋	1967	- アンカー部ストランドの腐食 - 設計不良, 疲労 - 腐食, 疲労 - 摩耗	- ビームのクラック補修 H. T. B の取替え - 支承, 伸縮装置の取替え	
22	Humber 橋	1981	吊材への水の浸入	- 軽質油の圧入による滞留水の排出 - 外周のメタルコーティング (1986～)	
101	三好橋	1927	ケーブルアンカー部の腐食によりケーブル破損	アーチ橋への改修	1987 年にケーブルの破損を発見
102	若戸大橋	1962	交通量増大 (交通渋滞の解消)	- 拡幅 (2 車線→4 車線) (1987～90) - R C 床版→鋼床版	
103	大渡橋	1963	R C 床版の劣化	鋼床版への取替え (1991)	

参考文献 (5 章)

- 1) 山名：海峡部橋梁の維持管理，橋梁と基礎，1988.8
- 2) 宮田：小吊橋の維持管理，橋梁と基礎，1988.8
- 3) Sandler, R. and Schwartz, S. I. (三木・辰巳・松浦・細川・清田・田辺 訳)：Spanning the 21st Century—世界的な橋の再建計画—，橋梁と基礎，1989.9-10
- 4) Williamsburg Bridge Technical Advisory Committee: Summary Report to the Commissioners of Transportation of the City and State of New York, Williamsburg Bridge Technical Advisory Committee, 1988.6
- 5) Bruschi, M. G. and Koglin, T. L.: Main Cable Preservation for the Williamsburg Bridge, Structural Engineering International, 1994.5
- 6) 長大橋の健全度評価と補修補強技術に関する研究調査委員会：長大橋の健全度評価と補修補強技術に関する研究調査報告書（昭和 63 年度海外調査），（財）海洋架橋調査会，1989.3