

供用開始後50年が経過した斜張橋ケーブルの状態把握 と今後の維持管理

—R231石狩河口橋の事例—

札幌開発建設部 道路設計管理官

○洞 奈津子

村上 雄樹

谷野 淳

石狩河口橋は斜張橋および合成鋼桁からなる全長1412.7 mの長大橋で、完成から50年が経過している。斜張橋の斜材ケーブルは橋桁を支える重要な部材であり、防錆防食のための被覆がされている。このため、外部からの目視点検では、被覆内部のケーブル素線に発生した腐食等の劣化把握が困難である。本稿では石狩河口橋において実施した斜張橋ケーブルの状態把握と今後の維持管理の取組について報告する。

キーワード：斜張橋、斜材ケーブル、維持管理、長寿命化

1. はじめに

石狩河口橋は石狩川の最下流部に位置し、2径間連続合成鋼桁、3径間連続鋼斜張橋、4径間連続合成鋼桁4連の合計6橋で構成される全長1412.7 mの北海道の国道では二番目に長い橋梁である。詳細を図-1、2および表-1に示す。本橋は完成から50年が経過しており、平成7年から9年にかけて斜材ケーブル及び鋼床版の大規模な補修が行われている¹⁾。石狩湾河口付近に位置し強風や飛来塩分などの厳しい腐食環境下に置かれていること、稚内

から留萌を通じて札幌へ至る日本海側の人流・物流を担う国道231号に位置するため重車両交通も多く疲労劣化の影響も受けており、補修から26年が経過した本橋梁の斜材ケーブル定着部の損傷が顕在化している。

斜材ケーブルは斜張橋の生命線ともいべき重要な部材であり防錆防食のための被覆がされている。このため、外部からの目視点検では、被覆内部のケーブル素線の状態を把握することが困難である。

本稿では石狩河口橋において実施した斜材ケーブル内部の状態把握と今後の維持管理の取組について報告する。

表-1 石狩河口橋の諸元

橋長・幅員	L=1,412.7 m W=11.5 m(車道8.0 m+歩道2.5 m)
構造形式	1~2径間 2径間連続鋼合成鋼桁橋 3~5径間 3径間連続鋼床版斜張橋 6~21径間 4径間連続鋼合成鋼桁橋×4連
施工時期	1~5径間 1969~1972年 6~21径間 1973~1975年
交通条件	交通量9,964台/12h 大型車混入率23.0% (R3交通センサス)
環境条件	海岸から約1.6km(直線距離) P3~P9間は河川上を横架

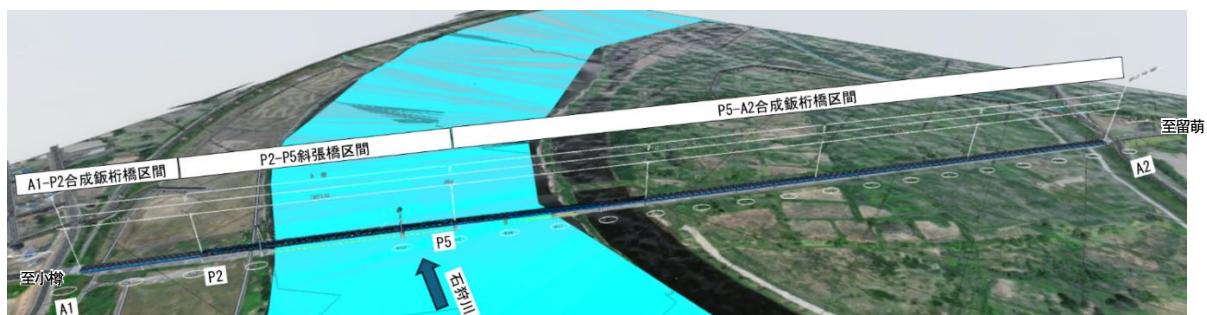
図-1 石狩河口橋 位置図 出典：札幌開発建設部HP²⁾

図-2 石狩河口橋 (CIM)

2. 斜材ケーブルの詳細調査

(1) 斜材ケーブルの現状と外観調査

石狩河口橋の斜張橋部は延長288 mで2つの主塔から張られた16本の斜材ケーブルで橋桁を吊り上げる構造である(図-3)。斜材ケーブルは平成7~9年に補修が行われてから26年が経過しているが、外観調査では主塔側定着部及び一般部の損傷程度は小さいことが確認されている(写真-1)。一方で、ケーブルに付着・進入した水分は桁側(下側)に流下するため、特に桁側定着部の損傷程度が大きく、ケーブルを保護する定着部カバーの劣化が進行し、鋼材の破断が確認された(写真-2)。

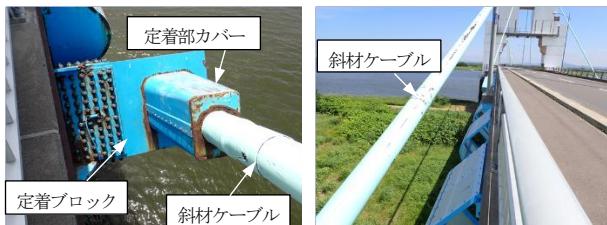


写真-1 斜材ケーブルの劣化状況(上段・中段)
(左: 主塔側定着部、右: 一般部)



写真-2 斜材ケーブルの劣化状況(下段)
(左: 桁側定着部 右: 桁側定着部拡大)

(2) 斜材ケーブルの内部調査

ケーブルカバーの内部は図-4に示すように種々の保護材で覆われており、外観から目視で確認することができない構造である。ファイバースコープによる内部調査も試みたが、ケーブル内部の素線の状態を確認するまでは至らなかった。

そこで、ケーブルを被覆しているカバーを開削して内部調査をすることとした。建設当初からケーブル素線はプラスチックラッピングで被覆されており、平成7~9年の補修において、钢管による定着管($\phi 165\text{ mm}$)、熱

収縮PEカバー、PE管による被覆が追加された。現在は図-4のとおり、4層の被覆構造となっている。このため、これらの被覆を開削することで、全16箇所のケーブル内部の状況を確認した。

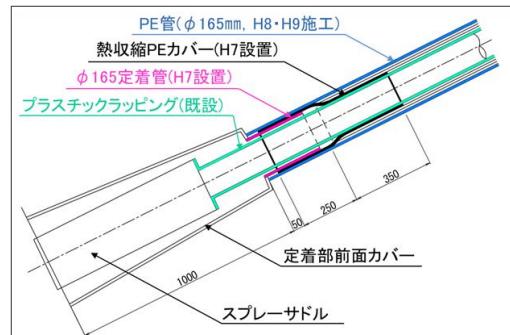


図-4 斜材ケーブルカバー4層構造の概要

a) ケーブルカバー開削方法

4層構造のカバー開削の手順を写真-3~6に示す。PE管、熱収縮PEカバーおよびプラスチックラッピングの3層は工具で一部切断することで手作業での開削が比較的容易であったが、定着管は钢管のため、ディスクグラインダーを用いて切断を行った。なお、定着管の構造は半円を溶接して筒状にしているため、溶接箇所にはあて板があり、その部分は切断する厚さが大きくなる。図-5に示すようにケーブルが軸線に対し偏心して取り付けられている可能性もあるため、誤ってケーブル素線を破断しないような注意が必要であった。



写真-3 PE管撤去



写真-4 热收縮PEカバー撤去



写真-5 定着管撤去



写真-6 プラスチックラッピング撤去

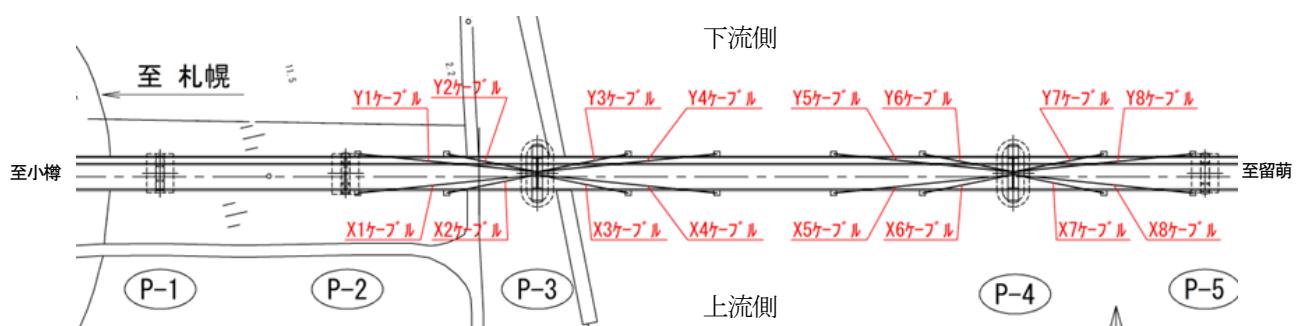


図-3 石狩河口橋 斜材ケーブル位置図

b) ケーブルカバーの内部調査結果

ケーブル内部を調査した結果を表-2および写真-7に示す。全16箇所においてケーブル素線には白錆が発生していた。ケーブルの被覆カバーの腐食劣化の状態に比例して、内部のケーブル素線の腐食劣化も進んでおり、白錆のほかに赤錆の発錆が6箇所でみられた。しかしながら、いずれも錆による素線の損傷程度は小さく電動ブラシにより錆を除くことができた(写真-8)。

表-2 斜材ケーブル素線の調査結果

X1	薄い白錆	Y1	厚い白錆+赤錆
X2	薄い白錆	Y2	薄い白錆
X3	薄い白錆	Y3	薄い白錆
X4	厚い白錆+赤錆	Y4	厚い白錆+赤錆
X5	厚い白錆+赤錆	Y5	厚い白錆+赤錆
X6	薄い白錆	Y6	薄い白錆
X7	厚い白錆+赤錆	Y7	厚い白錆
X8	薄い白錆	Y8	厚い白錆

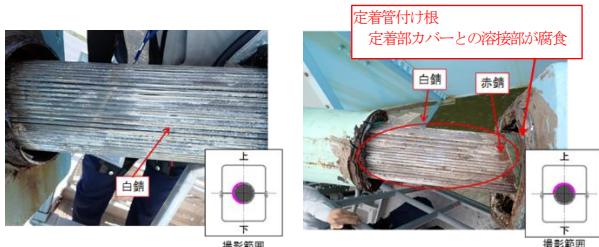


写真-7 斜材ケーブル素線の劣化状況
(左:X8ケーブルの白錆、右:X4ケーブルの白錆と赤錆)



写真-8 斜材ケーブル素線の錆落とし状況(X4ケーブル)
(左:ブラッシング前、右:ブラッシング後)

3. 張力計測による安全性の評価

前章のとおり、斜材ケーブル内部を調査した結果、目視的には橋梁の安全性が脅かされるような致命的な損傷がみられなかったが、橋梁の構造的視点からも安全性を確認すること、今後の補修や維持管理方針を決定するための基礎資料を得ることを目的に全ケーブルの張力を測定した。

(1) 調査方法

斜材ケーブル計16本の張力は、ケーブルの固有振動数と比例関係にあり、式(1)の弦の理論式で求められる。

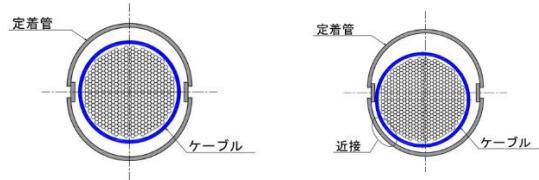


図-5 X6ケーブルの偏心
(左:設計、右:実際の位置)

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

式(1)を張力について変形した式(2)から張力を算定した。

$$T = 4 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot f_n^2 / n^2 \quad \dots \dots \text{式(2)}$$

ここに、
T : 張力 [N]

L : ケーブル長 [m]

ρ : ケーブルの単位長さ当たり質量 [kg/m]

f_n : n次モードの固有振動数 [Hz]

n : モード次数

n次の固有振動数すなわち f_n の算出にあたり、写真-9のとおり無線式加速度計を用いた加速度計測を実施した。斜材ケーブルの手の届く範囲(上段ケーブルは定着ブロックから5.0m、角度が急な下段ケーブルは定着ブロックから2.5m)に専用金具を用いて結束バンドで加速度計を固定し実施した。風や自動車交通等による常時微動を計測するため1箇所当たり30分計測した。



写真-9 斜材ケーブル振動数調査の状況
(左:上段ケーブル、右:下段ケーブル)

(2) 張力調査結果

図-6に代表としてX1ケーブルの法線方向振動波形に関するフーリエスペクトル波形を示す。フーリエスペクトル波形とは、前項の加速度計測で得られた異なる振動数

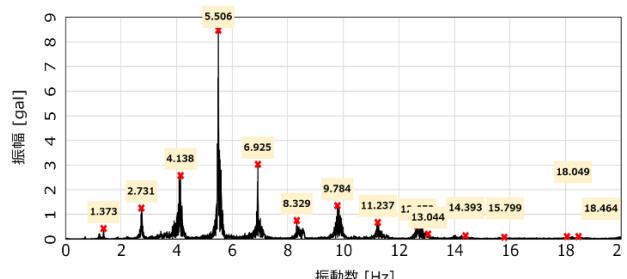


図-6 X1ケーブルにおけるフーリエスペクトル波形(法線方向振動)

の波形が組み合わさった複雑な波形を個々の振動成分に数学的に分解するもので、各振動成分の振幅を表現したものである³⁾。図-6に示すとおり、X1ケーブルでは4次モード（固有振動数が5.506 Hz）に相当する振幅が最も卓越している。同様に全16ケーブルで振幅が最も卓越している振動モードを抽出し、式(2)から張力Tを算出した。結果を表-3に示す。結果いずれも許容張力である5,109 kN以下であった。

表-3 各ケーブルの張力算出結果

ケーブル名	卓越振動数 [Hz]	次数	張力 [kN]	ケーブル名	卓越振動数 [Hz]	次数	張力 [kN]
X1	5.506	4	2,439	Y1	5.524	4	2,454
X2	4.987	2	2,609	Y2	4.993	2	2,615
X3	4.633	2	2,239	Y3	4.889	2	2,494
X4	3.009	2	2,905	Y4	2.738	2	2,404
X5	7.193	5	2,647	Y5	5.890	4	2,774
X6	7.184	3	2,380	Y6	7.496	3	2,591
X7	7.297	3	2,481	Y7	5.017	2	2,640
X8	5.615	4	2,544	Y8	2.912	2	2,736

※ケーブル1本当たりの許容張力：5,109 kN

(3) 安全性の評価

前項で算出した各ケーブルの張力について安全性を評価するため、図-7に過年度（平成5年）に実施された張力計測結果との比較を示す。前述したとおり平成7～9年にかけて鋼床版の大規模な補修が行われており¹⁾、対傾構や縦リブに補強鋼材（約150 ton）を追加し鋼床版の補強がされている（写真-10）。このため、過年度の張力測定においても本計測と同様の計測手法が用いられているが、今回の調査（令和7年）と比較して張力がやや小さくなっている。今回の調査結果をみると、特にX4ケーブルとY4ケーブルで張力の差が501 kNと大きいことが分かった。ただし、その傾向は過年度の調査でも同様でありX4ケーブルとY4ケーブルに損傷は確認されていない。これより、その要因は建設当時の架設方法や施工精

度に起因する可能性が高いと考えられる。また、平成5年の調査と比較して鋼材重量の増加に対応して張力が大きくなっているが、X4ケーブルとY4ケーブルに差が生じる傾向はほぼ同様であり、経年的な変化によるケーブル張力の変化は軽微であると評価した。



写真-10 鋼床版の大規模補修
(左: 対傾構補強 右: 縦リブ補強)

4. ひずみ計測機を用いた橋梁安全性の監視

前述のとおり、建設から50年が経過し腐食および疲労劣化の環境下にある石狩河口橋については斜材ケーブルの内部調査および張力調査の結果、橋梁は目視的にも構造的にも安全であることが確認できた。一方で調査結果が判明するまでの期間も橋梁が安全であることを確認する必要があった。そこで、橋梁の状態をリアルタイムで把握するために、光ファイバセンサを用いたモニタリングを実施したので紹介する。

(1) ひずみ計測機の概要

光ファイバセンサとIoT技術を併用し、橋梁主桁のひずみデータをリアルタイムに収集できる計測システム（OSMOS）を活用した。図-8にOSMOSにおける計測機器の設置位置、写真-11にOSMOSの設置状況を示す。

OSMOSでは主桁のひずみを計測可能な光ファイバセンサを箱桁内に設置して常時観測することで、異常を即座に検出できる仕組みとし安全性を担保した。また、大型車両通行時の挙動性状など本橋の今後の維持管理に有効なデータを併せて取得した。

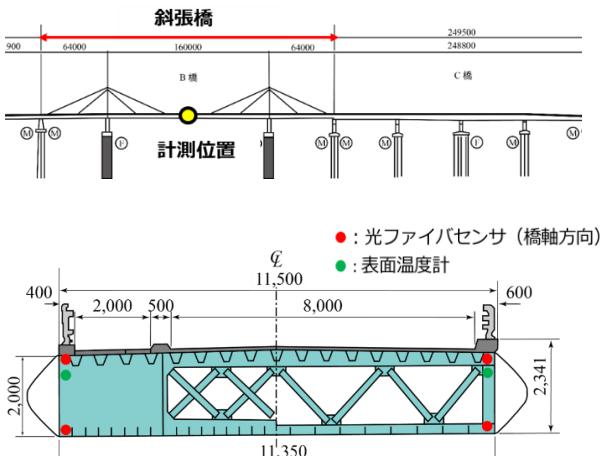


図-8 計測システム設置位置

(上: 側面図、下: 断面図)



図-7 今回調査と過年度(平成5年)調査結果との比較

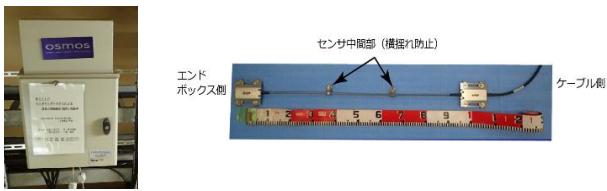


写真-11 OSMOS (ひずみ計測システム)
(左: モニタリングステーション、右: 光ファイバセンサ)

(2) 橋梁安全性の監視手法

今回、橋梁の安全性として着目するのは斜材ケーブルであるが、斜材ケーブル素線のPC鋼材は主桁鋼材 (SS材) に比べ約5倍の降伏強度を有する (図-9)。このため、橋梁上に大きな荷重が載荷された場合には斜材ケーブルより先に主桁が降伏する。したがって、主桁のひずみを監視することで橋梁の安全性を確認することができる。このような考え方に基づいて、主桁の活荷重ひずみをリアルタイムで監視することとした。活荷重による設計最大ひずみは 300μ であるため、安全性を考慮して 250μ を閾値とした。ひずみが閾値を超えるとアラートが発動する仕組みを構築した。なお、OSMOSを設置してから今まで、橋梁の異常によるアラートは発動していない。

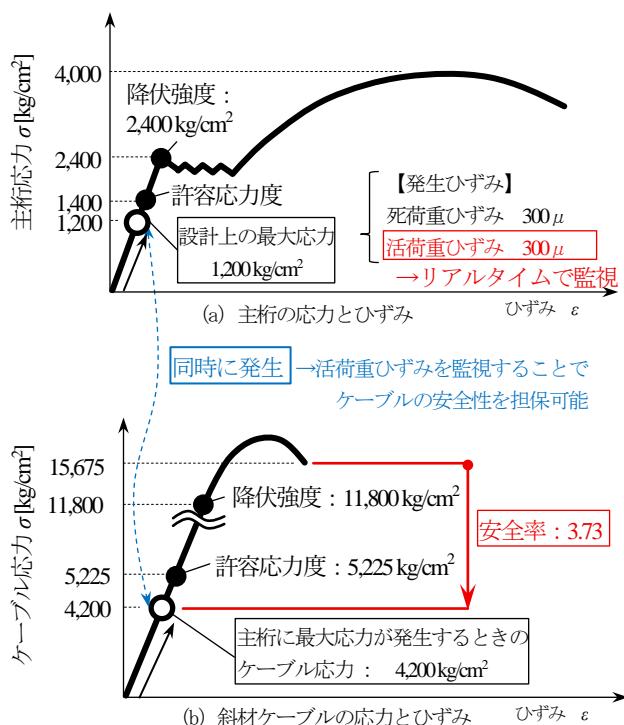


図-9 主桁と斜材ケーブルの応力ひずみ曲線

5. 今後の維持管理

(1) 定着部カバーの更新

斜材ケーブルの桁側定着部は、前述のとおり付着・侵入した水分が桁側（下側）に流下することによる桁側定着部内部への防水対策が必要であるとともに、内部のケーブル素線の状況が容易に確認できる構造が必要である。そこで、全箇所の定着部カバー（写真-2）を今後随時更新する計画とした。令和7年度に試行として1箇所で実施したので以下に記す。

a) 定着部カバーの構造

更新前後の定着部カバーの概要を写真-12に示す。部材接合部は今後の補修時の取り外しを想定するとともに、溶接熱によるケーブル素線への悪影響を回避しボルト接合を基本とした。また、ケーブルの振動による定着部への応力集中を回避するため、定着管の管径を大きくする構造としたほか、従前のカバーにはなかった点検用の開口部を定着部カバーの下面側に設けた。開口部の材質はポリカーボネイト製とし、ボルト止め構造とした（写真-13）。

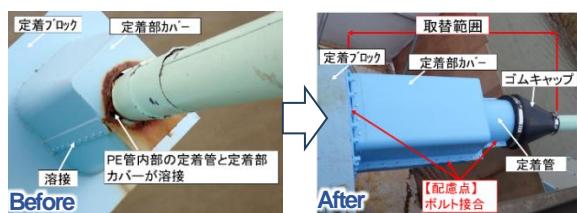


写真-12 定着部カバーの更新状況
(左: 更新前、右: 更新後)



写真-13 定着部カバーの配慮点

b) 定着部カバーの防水対策

定着部カバーの防水対策について以下に記す。カバー縫手は雨水の浸入を防止するため左右側面とした。水抜き孔を設けるとともに、点検用開口部は定着部カバーの下面側に設置し、更に水切り用の補強プレートを設けることで水の浸入を防止する構造とした（写真-13）。

c) 設置時の留意事項

今回の定着カバーの更新を試行した結果に基づき、今後の留意事項を以下に記す。

定着ブロック側内部の補強リブとボルト配置の施工余裕が小さいため、現場確認してから穴の位置を選定しなければボルト位置があわない可能性がある。吊り足場のチェーンを取付ける際に支障になるため、足場組立時に留意する必要がある。その他、ボルト削孔径はボルト塗装の膜厚分を考慮した方がよい（写真-14）。



写真-14 定着カバー設置時の状況
(左:ボルト用削孔状況、右:定着部カバー取付状況)

(2) 斜材ケーブルの防食

2. (2)で示したように、素線の腐食状況を確認した結果、全16箇所で白錆、うち6箇所では赤錆による腐食が確認された。このため、これらの箇所における今後の防食について検討した。表-4に斜材ケーブルの防食方法の比較を示す。

第1案の防食テープによる被覆は、施工後に素線の腐食状況を目視で確認することが困難なため、維持管理性に劣る。第2案の防錆剤を圧入充填して防食する方法は、素線束内部が密着しているため内部への浸透が期待できない上、斜材ケーブルへの適用事例は少ない。このため、既設の防食レベルの回復と目視点検時の視認性確保の観点から、第3案の常温亜鉛メッキ塗料の塗布を選定することとした。

6. おわりに

本稿では完成から50年が経過し、特に腐食劣化が顕在化している斜材ケーブル定着部の点検・調査の結果、橋梁の安全性が確認されたこと、および今後の維持管理として斜材ケーブルの内部状況を容易に確認できる定着部カバーの更新について紹介した。

当時架設された橋梁の寿命は50～70年程度と言われることもあり⁴⁾、長寿命化には斜張橋の生命線ともいえる斜材ケーブルの予防保全が重要視される。本文に述べた斜材ケーブル定着部の内部調査や定着部カバーの更新は、将来他橋のケーブルで同様な劣化が発生した場合にも適用できると考える。

今後は石狩河口橋の長寿命化に向けた補修年次計画を策定していく方針であるが、さらに老朽化が進めば、いずれ補修・修繕による対応だけでは限界を迎える。重要なインフラに対しての更新需要の高まりも予想される。これらに備え、長寿命化を基本としつつも、LCC評価を踏まえた上で架け替え計画も視野に入れた戦略的な判断が必要であると考える。

謝辞：本稿執筆にあたり、室蘭工業大学の協力を得た。ここに記して感謝申し上げる。

表-4 斜材ケーブルの防食方法の比較

防食方法	第1案 防食テープ	第2案 防錆材圧入・表面被覆工法	第3案 常温亜鉛メッキ塗料塗布
概要	・防食テープを巻き付けて防食  写真是NETISホームページより引用	・防錆剤をケーブル内に圧入し防食 上記は素線束のイメージ	・常温亜鉛メッキ塗料を塗布し防食  現地で採用 写真是(株)ローバルホームページより引用
施工性	○	△	◎
適用性	○	△	○
経済性	○	△	○
維持管理性	△	△	○
評価	○	△	◎

※上記の評価は本橋に限ったものである

参考文献

- 1) 北海道開発局札幌開発建設部：
一般国道 231 号石狩町 石狩河口橋の維持管理に関する報告
石狩河口橋の建設から維持管理の経緯、1997
- 2) 札幌開発建設部ホームページ「石狩川治水 100 年」
https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/kasen_keikaku/kluhh4000000oj4.html
- 3) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、1996
- 4) 国土技術総合研究所プロジェクト報告：住宅・社会資本の管理運営技術の開発、2006