

I-80 白鳥大橋ケーブル防食工事について

北海道開発局 室蘭開発建設部 正会員 高田 敦
北海道開発局 室蘭開発建設部 正会員 渋谷 元
北海道開発局 室蘭開発建設部 山地 健次
新日鐵・神鋼 J V 正会員 坂本 良文

はじめに

吊橋におけるケーブルは、補剛桁・交通荷重などを支える重要な部材であり、その防食構造は吊橋の寿命を大きく左右することとなる。白鳥大橋のケーブル防食は、従来の吊橋と異なる防食構造を採用している。ここでは、白鳥大橋のケーブル防食工事の概要について報告する。

1. 白鳥大橋ケーブル防食構造

従来の長大吊橋のケーブル防食方法は、図-1に示すようにケーブル表面に防錆ペーストを塗布し、円形断面の亜鉛メッキ鋼線を巻付け（ラッピング）、さらに重防食塗装する方法で行われてきた。

しかし、このような防食構造では、橋面舗装等の死荷重や活荷重が防食層の施工後に作用した場合、ケーブルは軸方向に伸びが生じることから、図-2に示すようにワイヤ相互に隙間が生じ、塗膜に割れが発生することが考えられる。また、本橋のように積雪寒冷地に建設される吊橋では、ケーブル内の水分が凍結融解を繰り返した場合、ケーブルの体積膨張により防食層を損傷させる可能性がある。

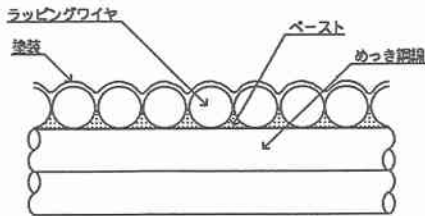


図-1 従来のラッピングシステム

このようなケーブル挙動に対応するため、ラッピングワイヤに異形線（S字型ワイヤ）を使用し、ワイヤ相互の噛み合わせ効果により塗膜の割れを防ぎ、さらに塗装下地の変化に対する追従性の良い柔軟型塗料を使用する世界初のS字ワイヤラッピング工法を本格的に採用することとした。

白鳥大橋ラッピングシステムを図-3に示す。

2. ラッピング

2.1 ラッピングワイヤの形状・特性

ラッピングに使用するS字ワイヤは、JIS G 3505の軟鋼線材に規定するSWRM 6～12の線材を熱処理した後

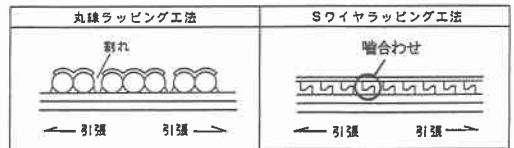


図-2 ラッピングワイヤ挙動概念

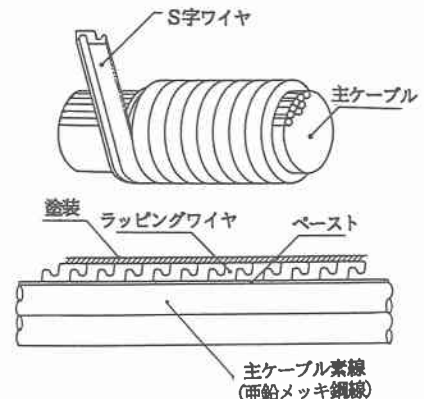


図-3 S字ワイヤラッピング工法

CRD (Casette Roller Dice) と呼ばれる装置で常温圧延し、S字型へ加工する。この装置は、S型になるよう小さなローラーであらゆる方向から圧延する仕組みとなっている。これに熔融亜鉛メッキを行う。ラッピングワイヤの製造概念を図-3に示す。



図-3 S字ワイヤの製造概念

S字ワイヤの強度特性は、丸線用鋼材に比べ炭素量の少ない軟鋼線材を使用しているが、加工が複雑なことからロックドコイルロープに近い伸び、ねじり特性を示す。S字ワイヤの形状を図-4に、特性を表-1に示す。

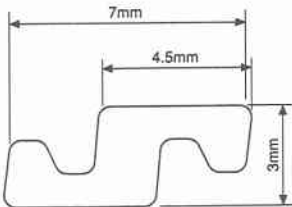


図-4 S字ワイヤの形状

2.2 初期導入張力

従来の方法によるラッピングワイヤの巻付け張力は、メインケーブルの張力変化にともなうケーブル素線のポアソン効果とラッピングワイヤの温度変化のみ考慮して必要張力を算定していた。これにワイヤ巻付け直後に生じるバルジング効果（ラッピングの進行とともに巻付けたワイヤの張力が徐々に低下する現象）による張力低下量を、巻付け張力に対して2/3～3/4程度として巻付けたワイヤの残留張力がゼロ以上となるように初期導入張力を設定している。

本橋では、ラッピング後の舗装荷重・活荷重によるケーブル張力増加が大きいことから、従来の考え方に基づき初期導入張力を算定した場合、約300kgfとなり巻付け張力が高すぎ施工が困難となることから、新たな施工方法を確立する必要性があった。

そこで、本橋の初期導入張力の決定において、従来の考え方に加えて次の点を考慮することとした。

- ① ラッピングワイヤにより締付けられたケーブルの径と内圧力の変化（空隙率の変化）をケーブル断面方向のバネ定数を用いて評価する。
- ② バルジング効果を定量的に把握し、導入張力の算定に採用する。

これらについて、本ラッピングに先立ち実橋で測定した。

バネ定数はケーブルを鋼製バンドで締付け、その時の締付け力とケーブル周長を測定した。測定結果を図-5に示す。ラッピングによる空隙率の変化は過去の実績より約1.5%減少することとし、ラッピング後の空

表-1 ワイヤの特性

材 料	線 材	軟鋼線材 JIS G 3505 (軟鋼線材) に規定するSWRH 6～12の線材とする。
	亜 鉛	JIS H 2107 (亜鉛地金) に規定する最純亜鉛地金とする。
機械的性質	引張特性	引張強さ 55kg/mm ² 以上
	伸び	1.5% 以上
亜鉛メッキ付着特性	ねじり回数	最小 6回
	亜鉛付着量	280g/m ²
	メッキ付着性	メッキ層を指で軽く擦ってはけ落ちるような亀裂や剝離を生じない。

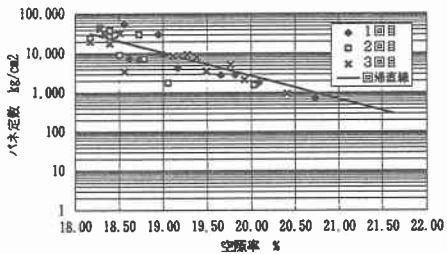


図-5 空隙率とバネ定数の関係

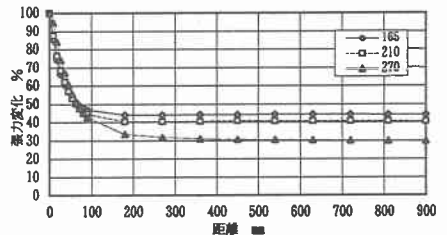


図-6 バルジング効果による張力変動

隙率をケーブルバンド近傍の18.5%と仮定し、回帰式からバネ定数を求めると20000kg/cm²となる。

バルジング効果は、巻付け張力を3ケース設定しラッピングワイヤに歪みゲージを張付け、ラッピングマシンで巻付けながら連続的に測定した。測定結果を図-6に示す。バルジング効果による初期導入張力の残留割合は、現実的な張力レベル（200kgf程度）より 約40%と評価できる。そこで、初期導入張力算定において導入張力に対する残留張力を安全側の1/3とした。

ケーブル張力の増加によるケーブル素線の細り、締付けられたケーブルのバネ定数を考慮したラッピングワイヤの張力低下量は次式で求めることができる。

$$\Delta T_w = \frac{\left(D' - \frac{1}{K} \cdot \frac{T_w}{A_p} \cdot 2tp \right) \cdot \left(1 + \frac{T_w}{E_p A_p} \right) - \left(D'' - \frac{1}{K} \cdot \frac{T_w}{A_p} \cdot 2tp \right) \cdot \left(1 + \frac{T_w}{E_p A_p} \right)}{\left(D' - \frac{1}{K} \cdot \frac{T_w}{A_p} \cdot 2tp \right) \cdot \frac{1}{E_p A_p} + \frac{1}{K} \cdot \frac{2tp}{A_p} \cdot \frac{T_w}{E_p A_p}}$$

ここに、

- △Tw:ラッピングワイヤ張力減少量
- Tw:ラッピングワイヤ張力
- K:ケーブルバネ定数
- Ep:ラッピングワイヤの弾性係数
- Ap:ラッピングワイヤの断面積
- tp:ラッピングワイヤの高さ
- D':ラッピング開始時のケーブル直径
- D'':橋体完成時のケーブル直径

ケーブルバネ定数を20000kg/cm²とすると、張力低下量は約40kgfとなる。

温度変化によるラッピングワイヤ張力の低下量は、ケーブル断面とラッピングワイヤ間の温度差を5℃とすると16kgfとなる。

これから、ラッピング後のワイヤ残留張力をゼロ以上とするために必要な初期導入張力は次のようになる。

初期導入張力 = (40+16) × 3 = 168kgf → 200kgf

これにラッピングマシンの巻付け張力変動を考慮し、1割増した220kgfを目標導入張力とした。

2.3 テストラッピング

本ラッピングに先立ち、実橋でのラッピング作業の作業性を確認するため巻付け試験を実施した。確認項目としては、巻付け状況、機械類の作動状況、表面の仕上がり、目標張力に対する変動幅、最適ペースト量の確認を行った。

テストラッピングの結果は、ラッピングマシンの回転数と前進速度との同調、ケーブルバンド乗り越し、ワイヤ溝部相互の噛み合い、巻付け後の表面の仕上がり状態、設定張力に対する実張力変動幅は特に問題はなかった。防錆ペースト塗布量は、3水準で塗り分けケーブル素線間への充填性が最も高い1.9kg/m²とした。

2.4 ラッピングマシン

ラッピングマシンの一般図を図-7に示す。ラッピングマシンは、ラッピングワイヤを巻き取ったボビン(220kg) 2個を回転ドラムに装着し、ドラムを回転させることによりワイヤをケーブル表面に巻き付ける。

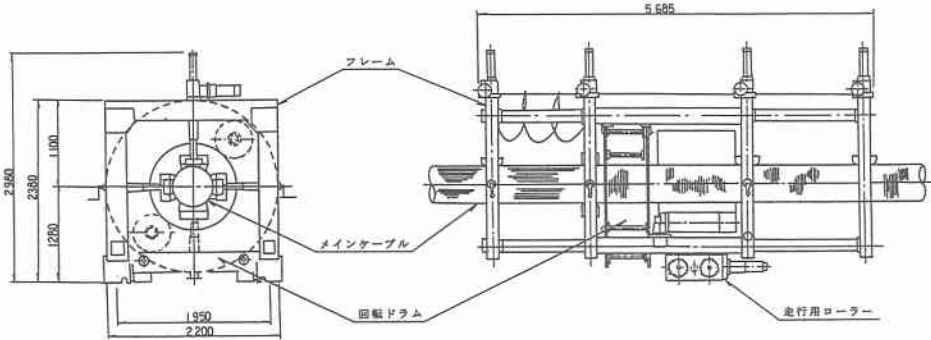


図-7 ラッピングマシン一般図

ラッピングマシンの諸元を表-2に示す。今回使用したラッピングマシンは、本体側面の下部に設置された走行用ローラーにガイドロープを巻付け、ローラーを回転させることによりマシン全体を移動させる。図-8にラッピングマシンの走行概念を示す。

S字ワイヤによるラッピングでは、ワイヤを相互に噛み合わせながら巻付けなければならないため、巻付け回転速度とマシンの進行速度を同調させる必要がある。そのため、巻付け回転速度の信号を走行用ローラーに送り、進行速度を制御する機構とした。すなわち、図-9に示すように回転ドラムが1回転する間にマシンは9mm前進することになる。

ラッピングワイヤの張力は、回転ドラム内のターンシーブの先に設置したロードセルで検出し、外部のデジタル表示計とプリンターに出力される。これによりリアルタイムに張力管理することが可能である。

2.5 施工状況

ラッピング作業は、ラッピングマシン2台を使用し左右のケーブルを同時並行に施工した。施工順序を図-10に示す。

各径間ともケーブル下端から塔頂へ向かって施工した。中央径間は、施工中にケーブル内に侵入した雨水を排出するため、中央部の数パネルを後施工とした。

表-2 ラッピングマシン諸元

適用ラッピングワイヤ	S字ラッピングワイヤ
巻付け張力	MAX 250kg×2本
巻付けワイヤ数	2条
巻付け回転数(可変速)	0.3rpm~30rpm
ワイヤボビン収納量	300kg×2本
巻付けケーブル直径	φ410mm~φ480mm
乗り越しケーブルバンド長さ	MAX 1860mm
走行用ガイドロープ	IWRC φ16mm
走行速度(可変速)	2.7mm/min~270mm/min~2700mm/min (巻付け同調時) (走行時max)

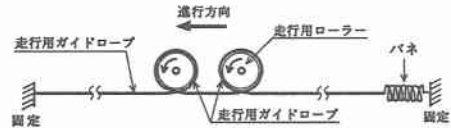


図-8 ラッピングマシン走行概念

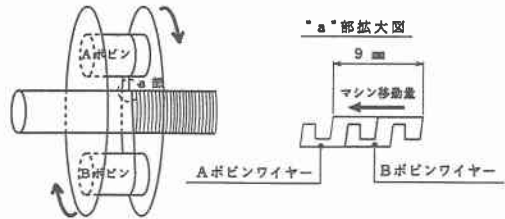


図-9 ラッピングマシン移動量

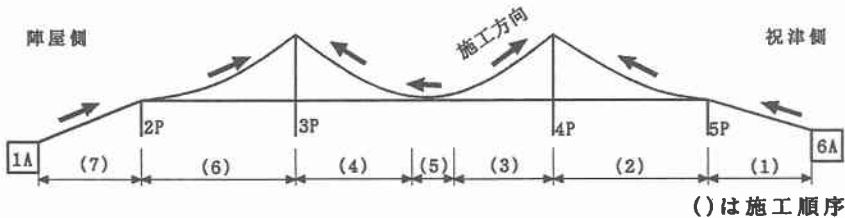


図-10 ラッピング施工順序

施工フローと概要は、次の通りである。

①ペースト塗布

ペーストはパネル毎に1.9kg/m²を計量しコテでむら無く塗布する。ペーストの塗布範囲はラッピング施工量の1日分を基本とする。ペースト塗布状況を写真-1に示す。

②ボビンセット

ラッピングワイヤを巻取ったボビンの交換は1パネル(バンド間の施工区間をいう)毎にクレーンまたはトラムウェイサポートロープにより行う。

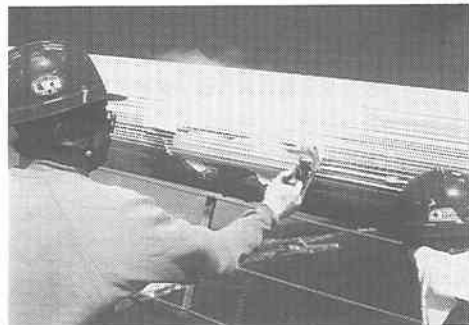


写真-1 ペースト塗布状況

③ラッピング始端部

ラッピングの巻始めは、バンド端部から100mm程度離れた位置で70～80mm機械巻きを行い、張力抜け防止のろう付け（テリット溶接）をした後、バンド溝部へ押し込む。（図-11）

④ラッピング一般部

バルジング効果低減等を目的にプレスクイズバンド（布製：締付け力約200kg、50cm間隔）を事前に取り付け、ラッピングの進行に合わせて取り外す。ラッピングは、2個のポビンから供給されるワイヤを180°の位相で同時に巻付ける。施工時の管理基準を表-3に示す。ラッピング後、張力抜け防止のため、1m間隔でろう付けを行う。ラッピング施工状況を写真-2に、ワイヤ巻付け状況を写真-3に示す。

⑤ラッピング終端部

終端部は、バンド端まで機械巻を行い、ろう付け後余長ワイヤを残してワイヤを切断する。ラッピングマシン移動後、S字ワイヤの噛合わせを利用して、余長ワイヤをバンド溝部へ押し込む。

⑥ケーブルバンド乗越し

ラッピングマシンを支持している、3箇所の油圧ローラーを順次上下させケーブルバンドを乗り越す。この時回転ドラムの一部を解放する。

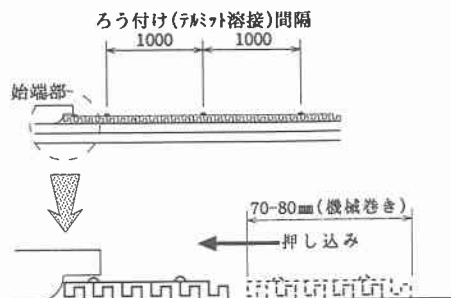


図-11 ラッピング始端部

表-3 ラッピング管理基準

工 程	管 理 基 準
ラッピング張力	巻付け張力 標準：220kgf 下限：200kgf 張力の振幅平均が220kgf以上であり、下限が200kgfを下回らないこと。 ポビン相互間の張力差が20kg以内であること。
巻付け状態	Sワイヤの溝部が噛合い、相互のラッピングワイヤに隙間がないこと。 ケーブルに対してほぼ直角にワイヤが巻かれていること。
ろう付け状態	ラッピングの始終端部、中間が1m間隔でろう付けされていること。 ろう付け数量：2点×3列/箇所 ケーブルに対してほぼ直角に巻付けられていること。 ろう付けのグラインダー仕上げと、突起高さ1mmの確保

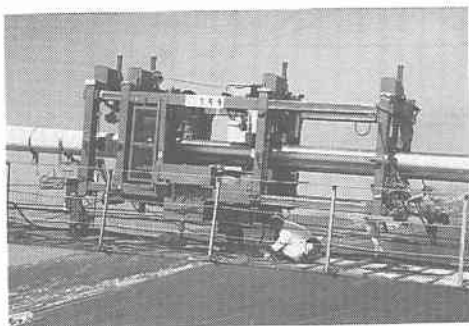


写真-2 ラッピング施工状況



写真-3 ワイヤ巻付け状況

3. 塗 装

本橋は、積雪寒冷地に建設されることから、ケーブル内部に侵入した水分の凍結による体積膨張に対しても塗膜層が損傷しない塗装系を採用するため、ケーブル供試体による凍結融解促進試験などを実施した。その結果、塗装下地の変化に対して追従性の良い柔軟型塗料を採用した。ケーブル塗装構成を表-4に示す。

塗装作業に先立ち、ラッピングワイヤからはみ出したペーストを電動工具で除去した後、塗料との付着性確保のためワイヤ表面の油分などをシンナーで拭き取った。

表-4 ケーブル塗装構成

素地調査	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	合計膜厚
電動工具、シンナーを使用して付着したペーストを除く。	柔軟型エポキシ樹脂塗料下塗 (180g/m ²) 膜厚 40μ	柔軟型エポキシ樹脂塗料中塗 (300g/m ²) 85μ	柔軟型エポキシ樹脂塗料中塗 (300g/m ²) 85μ	柔軟型フッ素樹脂塗料上塗 (120g/m ²) 25μ	柔軟型フッ素樹脂塗料上塗+ ノンスリップ (240g/m ²) -	195μ

塗装膜厚の管理は、電磁式膜厚測定機による非破壊検査を基本とし、電動回転式膜厚測定機による破壊検査を数パネル毎に行い、非破壊検査結果の妥当性を確認した。これは、非破壊検査ではラッピングワイヤ表面の亜鉛メッキ厚も計測するため事前にメッキ厚を計測し控除する必要があったためである。

施工結果は、目標膜厚に対し十分な膜厚が確保されており、非破壊検査・破壊検査ともに整合していた。ケーブル塗装完了状況を写真-4に示す。

4. コーキング

コーキングの目的は、ケーブルバンドとラッピングワイヤの隙間を埋め、ケーブル内への雨水の侵入を防止することである。

ラッピングワイヤにS字ワイヤを採用したことにより、ワイヤ間の拘束が高まり、メインケーブルの伸びによるラッピングワイヤ変位はケーブルバンド端部に集中する可能性がある。

本橋では、これまで採用されてきた三角目地構造に変えて、ムーブメントに対する適応性、耐久性、止水性に優れている新たな目地構造を採用した。コーキング構造を図-12に示す。

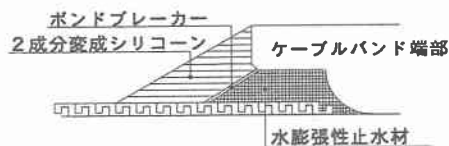


図-12 コーキング構造



写真-4 ケーブル塗装完了状況

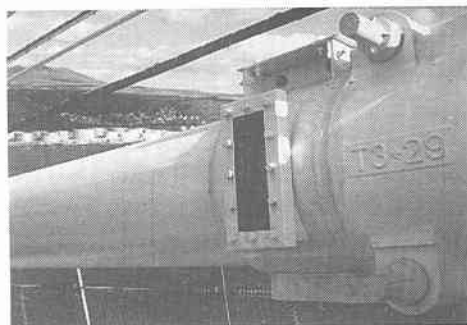


写真-5 モニタリングバンド

おわりに

ラッピング作業は、平成8年5月から開始し、約5ヶ月で終了した。作業中はワイヤの切断、噛み合わせ不良、巻付け張力低下やバラツキなどのトラブルは発生しなかった。また、ラッピング後のケーブル表面は、ペーストの汚れも少なくケーブル形状の跡が若干残ったが、良好であった。

施工管理面では、従来のラッピング工法は、張力管理の他にワイヤ間の隙間についても管理する必要があったが、S字ワイヤの採用により張力のみの管理となり、施工管理が容易となった。

ケーブル防食において、ラッピング施工中の雨水の侵入を可能な限り防止することも重要である。従って今後は塔頂から下向きに施工可能な機構とすることも検討する必要がある。

白鳥大橋において採用した「S字ワイヤラッピング工法」は、従来のラッピング工法に比べ施工後の水の侵入防止は十分に可能であると考ええる。今後は、施工中にケーブル内に閉じ込められた水や結露によるケーブル素線への影響について、写真-5に示すモニタリングバンドを利用して追跡調査し、新たな対策の必要性について検討する必要があると考える。