

Sワイヤラッピングによるケーブル防食技術の開発

Development of Corrosion Protection Methods Using S-shaped Wire Wrapping System

江口立也^{*(1)}
Tatsuya EGUCHI
三輪清貴^{*(1)}
Kiyotaka MIWA

鈴村恵太^{*(2)}
Keita SUZUMURA
佐々木信博^{*(4)}
Nobuhiro SASAKI

松岡徹郎^{*(3)}
Tetsuro MATSUOKA
遠藤英一^{*(5)}
Eiichi ENDO

渡辺竹紀^{*(1)}
Takenori WATANABE
聖生守雄^{*(6)}
Morio SEIRYU

抄 録

吊橋のケーブルは補剛桁を支える要であり、長期耐久性が求められる。そこでケーブルの防食方法として、従来の防食システムに比べて遮水性の高いS字形断面のラッピングワイヤを用いたSワイヤラッピングと柔軟型塗装を組み合わせた新しい防食構造を開発した。更に送気乾燥システムを併用することでケーブル内の滞留水排除を行うより確実な防食法について提案した。

Abstract

The cables of a suspension bridge which are the components that support girders require long term endurance. A new corrosion protection system for cables was developed, which consists of S-shaped wire wrapping and elastic type coating. The new system prevents infiltration of water better than previous systems. In addition, a dehumidification system for the cables is applied at the same time, which makes it a more reliable corrosion protection system.

1. 緒 言

21世紀に向け、1998年に明石海峡大橋、北海道の白鳥大橋が開通、そして来島大橋が1999年に供用を開始し、関門橋以来続いた国内の長大吊橋の建設は一段落を迎えようとしている¹⁾。ケーブルに関する開発は、長大吊橋の建設プロジェクトと歩調を合わせる形で行われてきた。材料面においては従来の1 600MPa級に代わり1 800MPa級の高強度ワイヤ²⁾を実用化するとともに、防食面においてもケーブルを長期にわたり健全に維持していくための様々な研究開発に取り組んできた³⁻⁵⁾。

新たな防食システムの開発の背景には、1989～1991年にかけて実施された因島大橋や大鳴門橋のケーブル腐食調査がある。これらの調査によって、ケーブル防食塗装には塗膜のふくれやわれなどの欠陥が認められ、ケーブル内部にも腐食原因となる滞留水が存在し、ワイヤに腐食が進行していることが明らかとなった^{4,5)}。また、海外の吊橋ケーブルにおいても、国内と同様に数多くの腐食調査が実施されるとともに、ケーブル防食の重要性がより一層認識されている^{1,3,6)}。こうした状況の中、当時建設中であった明石海峡大橋、来島大橋等への適用を図るためにも、ケーブル内部の腐食原因の究明と新たな防食方法の検討が急務となっていた。

これらの検討で、ケーブル腐食の主な原因はケーブル内の滞留水が激しい腐食環境を形成したためであることが推定された^{3,6)}。それを踏ま

えて、ケーブル防食方法として外部からの水浸入を極力防止可能な構造が要求され、更に水の浸入を完全に防止することは困難なため、ケーブル内部の滞留水への対策が必要であると考えられた^{4,5)}。

本報では、吊橋ケーブルの新たな防食システムとして、従来の丸線ラッピングワイヤに代わりS字形断面のラッピングワイヤを噛み合わせるSワイヤラッピングシステムの開発を中心に報告する。更に、ケーブル内の滞留水を排除する送気乾燥システムに関して、その設計思想と有効性についても言及する。

Sワイヤラッピングシステムは白鳥大橋で初めて採用され、来島大橋、安芸灘大橋へと引き続き適用された。一方、送気乾燥システムについても、明石海峡大橋、来島大橋に用いられた。

2. 吊橋ケーブルの現状

2.1 既設ケーブルの防食概要

一般的な吊橋ケーブルの防食構造を図1に示す。ケーブルは約5 mm径の高強度ワイヤで構成され、ワイヤには300g/m²(最小付着量)以上の溶融亜鉛めっきが施されている。そして、ケーブルを外界の腐食環境から遮断するためにケーブル表面に防錆ペーストを塗布し、その上を約4 mm径の亜鉛めっきした軟鋼線でワイヤラッピングし、更に塗装が行われている。防錆ペーストはペースト状の油性防錆材料で、結露しやすいケーブル表面の凹凸を埋め、ケーブル内部への水浸入防止と防錆を目的として使用されている⁷⁾。

*⁽¹⁾ エンジニアリング事業本部 鉄橋海洋事業部 建設技術部 マネジャー
神奈川県相模原市西橋本5-9-1 ☎229-1131 ☎(042)771-6165

*⁽²⁾ エンジニアリング事業本部 開発推進部 防食開発グループ マネジャー

*⁽³⁾ エンジニアリング事業本部 開発推進部 機械・システム開発グ

ループ マネジャー

*⁽⁴⁾ エンジニアリング事業本部 開発推進部 防食開発グループ

*⁽⁵⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 表面処理研究部 主任研究員

*⁽⁶⁾ エンジニアリング事業本部 開発推進部 部長

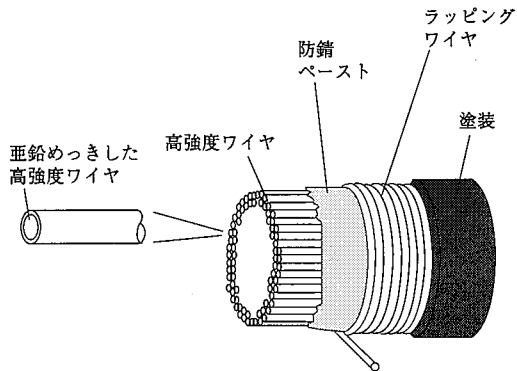


図1 一般的なケーブル防食構造

国内外のケーブル防食仕様の変遷の一例を表1に示す^{1,3,7-11)}。防錆ペーストに関しては、海外では鉛丹ペースト、国内では有機鉛系の防錆ペーストが主として用いられてきた。また、塗装においては、初期にはフタル酸系、因島では塩化ゴム系、大鳴門橋からはエポキシ樹脂系(下中塗)+ウレタン樹脂系(上塗)が適用されてきた。一方、塗装の代わりに、ネオプレンゴムやプラスチック等によってケーブル上に直接被覆を施す方法¹²⁾もある。ネオプレンゴムラッピングは、1.6mm厚の未加硫ゴム材料をラッピングワイヤ上にハーフラップで巻付け、3.2mm厚みの防食ライニングをケーブルに施す方法であり、従来の塗装に比べて遮水性の向上が期待できるものとして明石海峡大橋に採用された。

2.2 実橋における腐食調査結果

建設後6、7年経過した因島大橋、大鳴門橋においてケーブル腐食調査が実施された。因島大橋及び大鳴門橋の防食仕様は、表1に示すように塗装を除き、同一のものである。塗膜の状態は、因島大橋ではふくれが、大鳴門橋ではわれが多く見られた。両橋とも、ケーブル内には滞留水が存在し、ワイヤ表面には一部鉄錆が認められる等、腐食が進行していた。これは滞留水が温度変化の大きい

ケーブル表層部で結露による濡れを生じさせ、厳しい腐食環境を形成したためと考えられる。また、防錆ペーストを塗布した部分にも腐食が認められ、ペーストが劣化することによって保水体化し、腐食を促進する可能性も示唆されている^{4,5)}。

2.3 ケーブルの腐食対策

このような腐食を防止するためには次のような対策が有効と考えられた。

第一はラッピング構造の改良である。すなわち、図2のように、従来の丸線ワイヤラッピングでは、荷重、温度等の変化によるケーブル軸方向の伸びに対してラッピングワイヤ間に隙間が生じ、塗膜のわれを引き起こすため、雨水が浸入しやすい構造となっていた。これに対し、Sワイヤラッピング¹³⁻¹⁶⁾では、相互のラッピングワイヤが噛み合った構造となるため、ラッピングワイヤ間の変位は抑制され、塗膜におけるわれの発生を防ぎ、外部からの新たな水の浸入を防止することができる。

第二は塗装系の改良である。従来の塗装に比べ、より耐候性に優れ、可とう性に富む材料を用いることで、長期にわたり塗膜欠陥の防止が期待できる¹⁵⁻¹⁷⁾。

第三はケーブル内部環境の改善である。Sワイヤラッピングに柔軟型の塗装を組み合わせることで、外部からの水の浸入に対する遮水性は従来の防食構造に比べ格段に向上できるが、100%完璧に

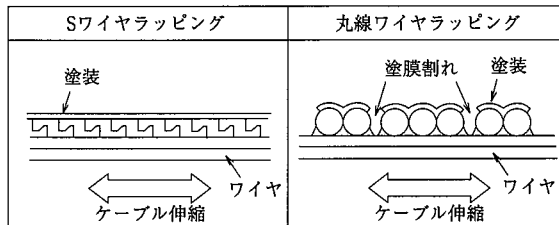


図2 ラッピング構造

表1 ケーブル防食仕様の変遷

国内			
主要橋梁	ペースト	ワイヤラッピング	被覆/塗装
若戸(1962)	ジंकクロメート	丸線ラッピングワイヤ	フタル酸系塗装
関門(1973)	高分子有機鉛	丸線ラッピングワイヤ	フタル酸系塗装
平戸(1977)	高分子有機鉛	丸線ラッピングワイヤ	塩化ゴム系塗装
因島(1983)	鉛酸Ca高分子有機鉛	丸線ラッピングワイヤ	塩化ゴム系塗装
大鳴門(1985)	鉛酸Ca高分子有機鉛	丸線ラッピングワイヤ	エポキシポリウレタン樹脂系塗装
レインボー(1994)	りん酸アルミニウム	丸線ラッピングワイヤ	ネオプレン樹脂系塗装
白鳥(1998)	りん酸アルミニウム	S字ラッピングワイヤ	柔軟型エポキシ・ふっ素樹脂系
明石*1 (1998)	なし	丸線ラッピングワイヤ	ネオプレンゴム巻+ハイバロン塗装
来島*1 (1999)	なし	S字ラッピングワイヤ	柔軟型エポキシ・ふっ素樹脂系
海外			
主要橋梁	ペースト	ワイヤラッピング	被覆/塗装
ブルックリン(1883)	鉛丹	丸線ラッピングワイヤ	油性ペイント*2
ウィリアムズバーグ*3 (1903)	鉛丹	丸線ラッピングワイヤ*4	油性ペイント*2
ゴールデンゲート(1937)	鉛丹	丸線ラッピングワイヤ	油性ペイント*2
ニューポート(1968)	なし	なし	プラスチックラッピング(FRP)
第二チェザピーク(1973)	なし	なし	ネオプレンゴム巻+ハイバロン塗装
ハンバー(1979)	鉛丹	丸線ラッピングワイヤ	下塗+MIO*5)

*1 明石海峡大橋、来島大橋では送気乾燥システム併用。 *2 最近の補修にはネオプレンゴム巻+ハイバロン塗装を適用するケースが多い。
 *3 ワイヤに裸鋼線を使用。 *4 丸線ラッピングワイヤに裸鋼線を使用。
 *5 MIO (Micaceous Iron Oxide : 雲母状酸化鉄) 顔料を多く含有したエポキシ樹脂塗料

防止することは難しい。また、遮水性が優れているため、一度ケーブル内部に浸入した水は抜けにくく、逆に腐食の要因と成り得ることも想定された。

従って、前述の外部からの保護を目的とした防食構造と併せ、送気乾燥システム^{4,5)}によるケーブル内部の改善を図ることが現状の防食システムとして最も有効な方法であると考えられた。送気乾燥システムは、乾燥空気をケーブル内に送気することによって、ケーブル内の湿潤環境を乾燥状態に改善し、これによってワイヤの腐食を防止しようとする新たな吊橋ケーブルの防食システムである。既に箱桁内部の防食方法としては、海外ではファロー橋やリトルベルト橋で、国内においても数橋実施例^{18,19)}が報告されているが、ケーブルに適用した例はなく、本格的には明石海峡大橋が初めてである。

3. 新しい防食システム

3.1 Sワイヤラッピング

3.1.1 Sワイヤラッピングの構造

Sワイヤラッピングは図3に示すように、ケーブルにS字形断面のラッピングワイヤを相互に噛み合わせた状態で螺旋状に巻き付けたものである。Sワイヤラッピングの特長としては、隣り合うS字形のラッピングワイヤ同士が緊密な噛み合いによって拘束されるため、ラッピング面に隙間が空くことがなく、優れた遮水性、気密性を有する点が挙げられる。また、Sワイヤラッピングでは、従来の丸線ワイヤラッピングと異なり、凸凹がなく、一様にフラットなラッピング表面が形成できるため、塗装下地としても丸線ワイヤラッピングに比べ良好な条件となる。

3.1.2 S字ラッピングワイヤの製造

S字ラッピングワイヤは図4に示すように、軟鋼線材を熱処理した後、S字形断面へ圧延し、溶融亜鉛めっきを施したものである。製造上の特徴としては、圧延工程でロール圧延とCRD(Cassette Roller Dice：小さなローラーであらゆる方向から圧延する方法)を併用していることが挙げられる。S字ラッピングワイヤの機械的特性を表2に示す。

3.1.3 Sワイヤラッピングの有効性の確認

1) 塗膜欠陥の防止性

Sワイヤラッピングの特長として、荷重や温度等によるラッピングワイヤ相互に生じる隙間が抑制され、塗膜に欠陥を生じにくいことが挙げられる。そこで、塗膜欠陥の防止性を確認するために、実物大ケーブル試験体による凍結融解試験を北海道開発局と共同で実施した^{15,16)}。

試験はワイヤラッピング及び塗装を施した実物大ケーブル(径300mm、長さ1000mm)を用い、その内部に空隙の10%相当(約

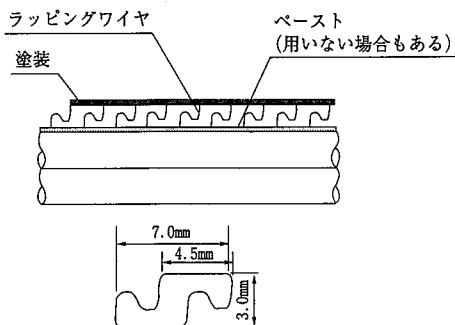


図3 Sワイヤラッピング

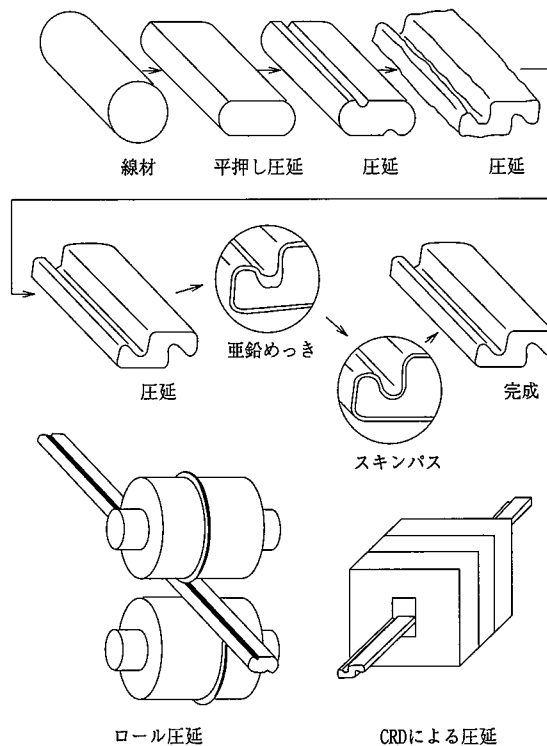


図4 S字ラッピングワイヤの製造工程

表2 S字ラッピングワイヤの機械的特性

材料	線材	軟鋼線材 JIS G3505	
		SWRM6~12	
	亜鉛	最純亜鉛地金 JIS H2107	
機械的 性能	引張特性	引張強さ	55kgf/mm ² (540MPa)以上
		伸び	1.5%以上
	ねじり回数	6回以上	
	亜鉛めっき付着量	280g/m ² 以上	

2)の水を注入し、-30℃~5℃の冷熱サイクルを90日間与えることにより実施した。この冷熱サイクルにより、注入した内部水が凍結融解を繰り返す、これに伴うケーブル径方向の強制変位を発生させ、塗膜のわれの進展、ピンホール発生から塗膜欠陥の防止性を評価した。なお試験体の仕様は、2種類のワイヤラッピング(Sワイヤラッピングと丸線ワイヤラッピング)と、2種類の塗装系(柔軟型塗装系と非柔軟型塗装系)を相互に組み合わせた4ケースとした。

その結果、塗膜欠陥は、Sワイヤラッピングより丸線ワイヤラッピングに、柔軟型塗装系より非柔軟型塗装系に多く発生し、Sワイヤラッピングに柔軟型塗装系を組み合わせたものが塗膜欠陥の防止においては最も優れていることが明らかとなった。

2) Sワイヤラッピングの遮水性

Sワイヤラッピングの特長に遮水性の高さが挙げられる。遮水性は特に雨水等の浸入防止性能として重要である。そこで、ラッピング面の遮水性を確認するために、写真1に示すような水蒸気透過試験を実施した。試験は、模擬的に製作したSワイヤラッピング平面と丸線ワイヤラッピング平面とのそれぞれに対して、片面を高湿度環境に保った状態で低湿度側へ通過する水蒸気量を計測することで実施した。なお、透過水蒸気量は低湿度側に設けた塩化カルシウム

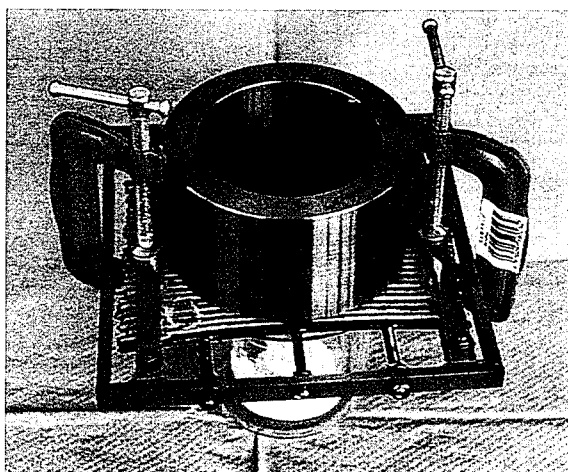


写真1 水蒸気透過試験

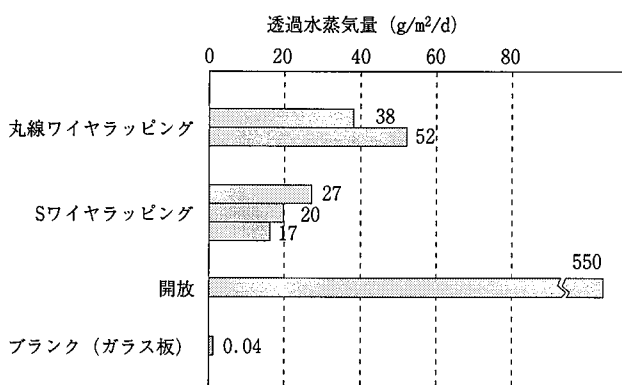


図5 ラッピングの水蒸気透過性

の重量変化により計測した。

その結果、図5に示すように、Sワイヤラッピングは丸線ワイヤラッピングに比べ約2～3倍の水蒸気透過防止性を有することが分かった。また、水滴を直接ラッピング面に滴下した場合、丸線ワイヤラッピングでは水滴が容易に透過したが、Sワイヤラッピングでは透過せずに表面に留まることも分かった。以上よりSワイヤラッピングの遮水性は丸線ワイヤラッピングに比べて優位にあることが確認できた。

3)Sワイヤラッピングの気密性

Sワイヤラッピングの特長に気密性の高さが挙げられる。気密性は、特に後述の送気乾燥システムとの併用において重要な性能である。そこで、ラッピング面の気密性を確認するために気密試験を実施した。試験は、図6に示すような複数の貫通孔を設けた鋼管(径450mm)にワイヤラッピングと塗装を施した試験体に内圧を作用させ、圧力の経時変化によって気密性を評価した。なお、ワイヤラッピングについてはSワイヤラッピングと丸線ワイヤラッピングの2種類とし、塗装は柔軟系塗装とした。

その結果、図7に示すように、Sワイヤラッピングは丸線ワイヤラッピングに比べ気密性に優れていることが確認できた。更に塗膜に傷を設けた場合において、丸線ワイヤラッピングはSワイヤラッピングに比べ大きな漏洩を示す結果となり、この結果からもSワイヤラッピングの方が気密性が高いことが判明した。

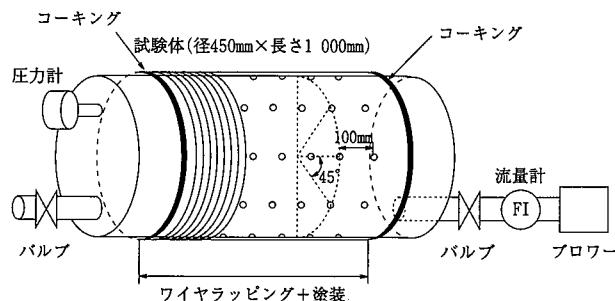


図6 気密試験

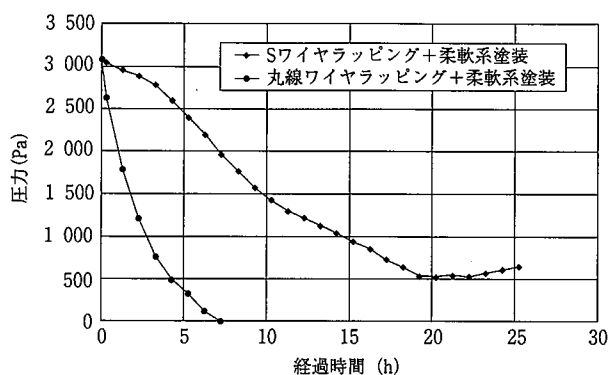


図7 気密試験の圧力降下結果

3.1.4 Sワイヤラッピングマシン

図8、写真2に、ラッピング施工に使用するSワイヤラッピングマシンを示す。本マシンはS字ラッピングワイヤを巻き取った2個のポピンを搭載したドラムを回転させて、ケーブルにS字ラッピングワイヤを巻き付ける機構を有している。S字ラッピングワイヤは従来の丸線ラッピングワイヤと異なり、曲げに対する方向性がある。

そこで、ラッピングワイヤに無理な曲げやねじれが作用することを防ぐため、ポピンからケーブルに巻き付けられるまでの区間がほぼ同一面内になるようなワイヤリング経路とした。実際のラッピング動作では、隣り合うS字ラッピングワイヤ同士を緊密に噛み合わせるために、ドラムの回転とラッピングマシンのケーブル軸方向への走行を同期させる必要がある。従来行われてきた塔頂ウインチによる牽引方式では微妙な速度調整は困難であるため、本マシンではガイドロープ駆動による自走方式を採用した。これは、ラッピングマシン両側面の下部に設置した走行ローラにガイドロープを巻き付け、走行ローラの回転によってガイドロープを手繰りながら走行する方式であり、マシンの微妙な速度調整が可能となっている。

また、従来1パネル(ケーブルバンドから次のケーブルバンドまでの区間)の終端部で実施していた人力作業による手巻きラッピングを極力不要とすべく、ほぼ100%機械ラッピングができるようなマシンの寸法、構造とした。ケーブルバンドとハンガーロープの乗り越し機能も従来と同様に搭載している。そして、施工現場における品質の確保を行うため、従来と同様にドラム内で測定したラッピングワイヤの張力を無線で操作盤に送信し、リアルタイムでモニターできる機能も有している。前述の仕様は実物大のケーブルを用いた施工性試験結果をフィードバックし、改良を加え設定したものである。そのラッピングマシンの諸元を表3にまとめて示す。

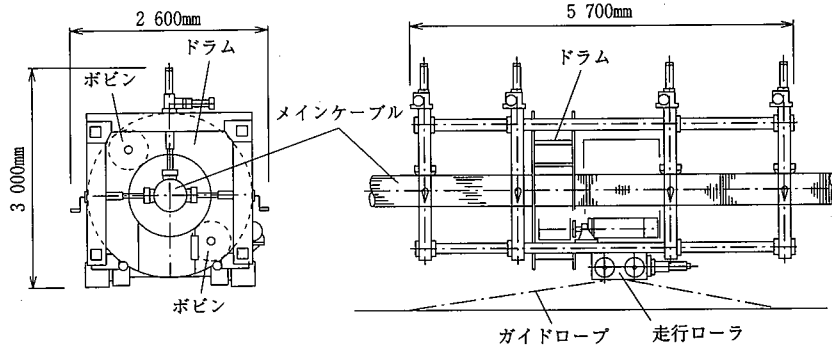


図8 Sワイラッピングマシン

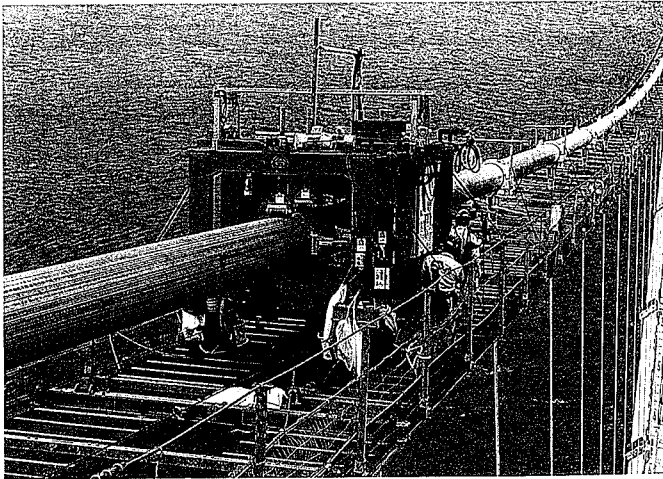


写真2 Sワイラッピングマシン

表3 ラッピングマシンの諸元

概略寸法	長さ5 700mm×幅2 600mm×高さ3 000mm
適用ラッピングワイヤ	S字ラッピングワイヤ
巻付ワイヤ数	2条
巻付回転数	最大30rpm
巻付張力	最大2 500N×2条
ラッピングワイヤ搭載量	最大300kg×2ポビン
走行速度	最大270mm/min(巻付時) 最大2 700mm/min(走行時)
登坂能力	上進, 下進とも約30° まで可能

3.2 新たなケーブル塗装仕様

3.1.1で述べた凍結融解試験によってSワイラッピングに柔軟型塗装系を適用することが有効であることが分かった。そこで、近年の鋼構造物の塗装系として、優れた耐候性を示し、最も期待耐用年数が高いと考えられているふっ素樹脂系上塗を用いた塗装系²⁰⁾を基本とし、この塗装系に可とう性を付与した新規のケーブル用柔軟型塗装系を開発した。なお、一般に亜鉛めっき面(特に新設亜鉛めっき面)への塗装は密着性を確保する観点から鉄面に比べ慎重な配慮を要する^{21,22)}。

3.2.1 柔軟型塗装系

本塗装系は図9に示すように、亜鉛めっき面との密着性が良好なエポキシ樹脂系下塗、耐水・防食性能に優れたエポキシ樹脂系中塗(2回塗)、耐候性に優れたふっ素樹脂系上塗の4層から構成され、総膜厚は200 μ m程度である。

塗装系には塗料の配合を調整することで可とう性を付与させ、ラッピング面の動きに対し塗膜の追随性を高くできるようにした。図10は塗料の配合が違う2種類の柔軟型塗膜と非柔軟型塗膜の温度変化に対する伸び率を測定した結果である。柔軟型塗膜Aは、柔軟型塗膜Bに比べ低温下では高い伸び率を示すが、高温下では凝集強度低下のため、低い伸び率を示す結果となった。しかし、柔軟型塗膜A・Bともに、非柔軟型塗膜に比べ伸び率が大きいことが分かる。

3.2.2 柔軟型塗装系の防食性能確認試験

柔軟型塗装系の防食性能(亜鉛めっき面との密着性)を確認することを目的として、溶融亜鉛めっき板に塗装を行い、次に示す各種の試験により評価を行った。

1)実環境に近い大気暴露試験

- (i) 屋外暴露試験4か月(神奈川県相模原市)
- (ii) 塩水散布屋外暴露試験4か月(1日1回3%NaCl水溶液を散布し、屋外暴露)

2)実験室での腐食促進試験

- (i) 浸漬試験2か月(20℃水溶液に浸漬)
- (ii) 温度勾配試験28日(試験面を20℃, 裏面を10℃とする温度勾

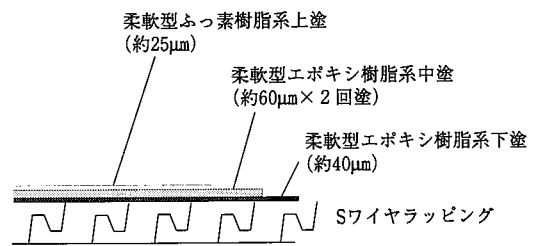


図9 ケーブル防食塗装系

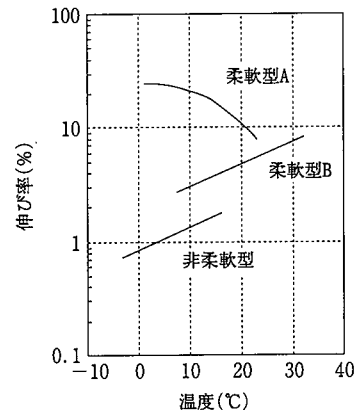


図10 塗膜の温度変化に対する伸び率

表4 柔軟型塗装系の防食性能確認試験

No.	塗装系	大気暴露試験		促進試験		
		屋外暴露試験4か月	塩水散布屋外暴露試験4か月	浸漬試験2か月	温度勾配試験28日	複合サイクル試験8サイクル
1	柔軟型A	◎	◎	◎	◎	○
2	柔軟型B	◎	◎	◎	○	◎

評価基準 ◎：強度や破壊形態に問題ないもの、○：強度は強いが、層間剥離など不安要素が残るもの、△：顕著に層間剥離やめっき面での剥離兆候を示すもの、×：めっき面での剥離が顕著に認められるもの

配をかけて浸漬することにより、塗膜の透水性を大きくした促進浸漬試験)

(iii) 複合サイクル試験(塩水噴霧、冷熱サイクル及び乾湿の複合繰り返し試験)

これらの試験を実施後、各試験毎に塗膜外観の目視観察、ごばん目テープ剥離試験、プルオフ密着強度試験、そしてクロスカット剥離幅試験を行い、その防食性能を評価した。その結果を表4にまとめて示す。表から分かるように、開発した柔軟型塗装系はSワイラッピング面への密着性が優れ、長期耐久性を有することが確認できた。

3.3 送気乾燥システム

ケーブル内の滞留水は、自然状態では排水されにくい。強制的な方法によって対処するのが効果的である。これに対して検討されたのが送気乾燥システムである。本システムは、乾燥空気をケーブル内に送気することでケーブル内の滞留水を除去し、ワイヤの腐食を防止しようとする新たなケーブルの防食システムである。このシステムの実現には二つの大きな課題が考えられた。一つは送気条件(送気圧力、送気距離、送風量)を設定するために必要な設計法の案出であり、もう一つは送気による乾燥効果の定量的な把握であった。

3.3.1 ケーブル内空気流の推定式

ケーブルはラッピングシステムによって遮水され、十数メートルピッチにケーブルバンドが取り付けられている。ケーブル内を空気が流れる場合、塗膜のわれやバンド継ぎ目部等から空気が漏洩する可能性がある。

一方、ケーブルは多数の約5mm径のワイヤで構成されているため、ワイヤ同士で構成される微小な空隙が存在する。この空隙はケーブル断面積の約20%を構成するもので、全体としては非常に大きな空間となる。しかし、ワイヤ同士で構成される空隙は非常に小さいため、この中を空気が流れる場合、圧力損失が大きく影響する。ケーブル内の送気の可能性については、因島大橋や北備讃瀬戸大橋の実橋において送気試験が実施され、比較的低い圧力で漏洩を伴いながらケーブル内を空気が流れることが確認されている⁴⁾。

これらの試験結果を踏まえて、ケーブル内を流れる空気流に対して次式が提案されている²³⁾。

$$Q_n = Q(1-x)^{n-1}$$

$$\Delta P = CQ \{1 + (1-x) + (1-x)^2 + \dots + (1-x)^{n-1}\}$$

ここで、 Q_n ：nの通過流量(nは入口から距離)
 Q ：初期流量
 x ：単位長さ当たりの漏洩比
 ΔP ：送気距離nの時の圧力損失
 C ：ケーブル条件に依存した係数(空隙の形状、構成比率等)

式から分かるように、圧力損失は送気流量と漏洩によって決まる。送気乾燥システムを設計する上で最も重要な項目は漏洩比xの

設定である。しかし、これはケーブル防食構造からの漏洩であるため、そのラッピング仕様や状態に左右される。したがって、実橋での試験結果等を蓄積し、今後の設計へ反映させる必要があると考えられる。なお、漏洩比xは、送気長と初期流量、及び区間内(入口部、中間部、出口部)の圧力値を計測することで求められる。

3.3.2 送気による乾燥効果の確認

ケーブル内のワイヤ間に保持された滞留水によってケーブル内は湿潤環境にある。この滞留水をケーブル内への乾燥空気の送気によって除去することができるかどうか重要である。基本的な除湿の考え方は次のとおりである。乾燥空気が通過する部分と水が存在する部分との間に蒸気圧差が生じるため、乾燥空気が飽和水蒸気圧に至るまで水分が移動する。そして、この移動した水分を含んだ空気がケーブル内を送気され、外部に排出されることで除湿される。

これに対して、乾燥空気がケーブル内の一部を流れることでケーブル内の滞留水を除去できるかどうかを確認するために、図11に示す実物大ケーブル(径600mm、長さ2000mm)を用いた試験を行っている⁴⁾。除湿量と時間との関係を示す図12の結果から分かるように、ケーブル内に注入された2500gの水は300時間で乾燥することができ、ケーブル内を流れる乾燥空気によって十分除湿可能であることが確認できている。すなわち、乾燥空気をケーブル内を送気すれば、ケーブル内の滞留水の除去は可能である。

3.3.3 ラッピングシステムと送気乾燥システムとの関係

ケーブル内を送気する乾燥空気によって、ケーブル内は徐々に乾燥されるが、実橋においてその運用を考えた場合、どれくらいの期間で乾燥できるかが重要な問題である。すなわち、建設中あるいは供用後に浸入した水分量と送気乾燥システムによって除去できる水分量との関係によって乾燥に費やす期間が決まる。しかし、供用後に新たに浸入する水分量が乾燥空気によって除去できる水分量より多いと、ケーブル内を乾燥させることは不可能となる。また、できるだけ効率的に乾燥させる上でも外部からの浸入水を極力防止し、気密性の高いラッピングシステムとの併用が望ましい。したがって、このような送気乾燥システムを実橋に適用する上では、Sワイ

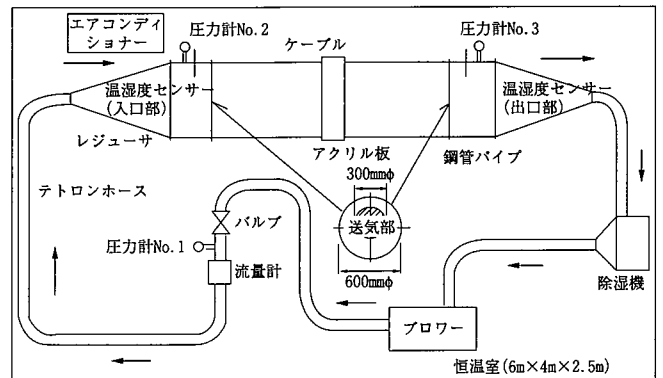


図11 送気乾燥試験システム概念図

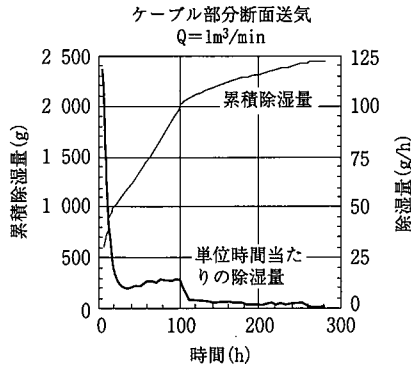


図12 送気乾燥試験結果

ラッピング等の気密性の高いラッピングシステムを組み合わせることが防食に対して効率的でかつ効果的と考えられる。

3.3.4 明石海峡大橋における実施例

次に明石海峡大橋での送気乾燥システムの設計条件を示す²³⁾。また、送気システムの運用計画の基礎資料とするために3P~4A間の一部で行われた送気試験の結果について図13に示す。設計条件としては、ケーブル内の滞留水はケーブル空隙率の15%、漏洩比は0.014/m以下、送気圧力としては3000Pa以下となるように設定し、この条件において1年間で乾燥できる送気長として140mを選定した。これに合わせて、効率的な配管ルートの設定を行い、送気乾燥設備として、除湿器、ブローア等の能力並びに配管径を設計している。また、図13の結果から分かるように、この試験において2000Paの圧力で、3か月間の送気によって送気カバーから4パネル目にあたる約56mまで乾燥効果が確認できている。そして実橋では、約1年足らずで排気口(140m区間)まで乾燥でき、送気乾燥システムが十分機能していることが確認されている。

4. 結 言

吊橋ケーブルを長期にわたり腐食から効果的に防止していく新たな方法として、Sワイヤラッピングと柔軟型塗装系を適用することを提案した。更に滞留水への対策として、送気乾燥システムが効果的であることに言及した。

ケーブルは吊橋のメイン部材であり、長期にわたり吊橋の機能を健全に維持していく上では、その防食に対する重要性はますます高まってくる。提案したSワイヤラッピングシステムにおいても今後現地での腐食調査等を行い、その結果をフィードバックするなど、システムとしてより一層の技術の高度化を図っていく必要があると考える。

謝辞

本開発において、多大な御協力をいただいた本州四国連絡橋公団、北海道開発局の関係各位に、お礼を申し上げます。

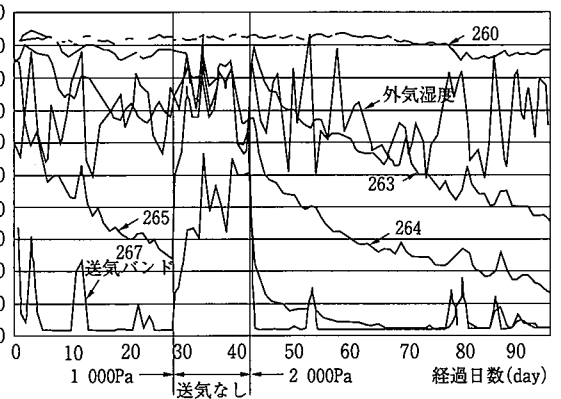
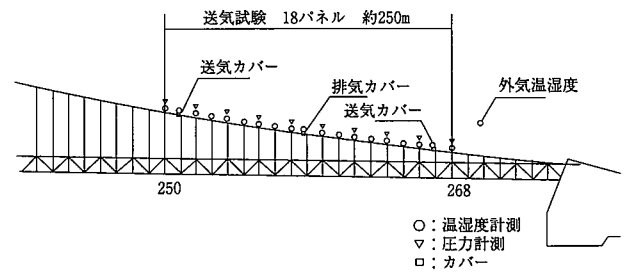


図13 明石海峡大橋ケーブル内相対湿度計測結果

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会:吊橋、技術とその変遷、初版、東京、土木学会、1996.268p.
- 2) 高橋稔彦 ほか:製鉄研究、(332),53(1989)
- 3) 保田雅彦 ほか:本四技報、61(16),10(1992)
- 4) 古家利彦:本四技報、84(21),12(1997)
- 5) 佐伯彰一 ほか:土木学会誌、1(83),11(1998)
- 6) Stahl, F.L. et al.:Cable Corrosion. 1st ed. New York, ASCE Press, 1996
- 7) 橋本定明:塗料の研究、107,34(1983)
- 8) 秦健作 ほか:防錆管理、10,343(1998)
- 9) 岡野哲 ほか:橋梁と基礎、8,107(1998)
- 10) 音川庫三 ほか:塗装技術、1(22),26(1998)
- 11) 山田光二 ほか:製鉄研究、(285),88(1975)
- 12) Thomas J. et al.:Materials Performance、(29),38(1990)
- 13) 本間徹 ほか:第51回土木学会年次学術講演会、(51),1997,p.IV-239
- 14) 高田敦 ほか:第52回土木学会年次学術講演会、(52),1998,p.384
- 15) 西本聡 ほか:第51回土木学会年次学術講演会、(51),1997,p.IV-224.
- 16) 渋谷元 ほか:土木学会誌、1(82),3(1997)
- 17) 坂本良文 ほか:土木学会北海道支部年次技術研究発表会、1997,p.1-81
- 18) 藤野陽三 ほか:土木学会構造工学論文集、(36A),1(1990)
- 19) 金子正猪 ほか:橋梁と基礎、5,31(1999)
- 20) 川西 弘明:材料と環境、(47),691(1998)
- 21) 中島浩二郎:塗装技術、5,124(1982)
- 22) 岩見勉:防錆管理、2,17(1989)
- 23) 下村稔 ほか:本四技報、86(22),63(1998)