

# 暴露試験による吊橋ケーブル防食法の防食性能評価

古家彦<sup>1</sup>・北川信<sup>2</sup>・中村俊一<sup>3</sup>・鈴木恵太<sup>4</sup>・聖生守雄<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 広島県道路公社 事業部 技術専門監 (〒730-0015 広島市中区橋本町 7-14)

<sup>2</sup>正会員 本州四国連絡橋公団 長大橋技術センター長 (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通 4-1-22)

<sup>3</sup>正会員 Ph. D. 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)

<sup>4</sup>正会員 新日本製鐵株式会社 開発推進部 マネージャー (〒229-0006 相模原市西橋本 5-9-1)

<sup>5</sup>正会員 工修 新日本製鐵株式会社 開発推進部 担当部長 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

吊橋ケーブルに種々の防食方法を施した試験体を製作し、海浜地区に4年間におよび暴露した後、解体調査し、これらの防食性能を比較研究した。主な試験体は、従来の防食仕様(鉛酸カルシウム含有高分子有機鉛ペースト+ワイヤラッピング+塗装)、海外での一般的仕様(鉛丹ペースト+ワイヤラッピング+ゴムラッピング)、および新しく提案した改良仕様(改良ペースト+Sワイヤラッピング+塗装)である。いずれの防食仕様においてもケーブル表面の被覆には顕著な劣化等は認められなかったが、ケーブル内部には腐食が認められた。しかし、改良仕様の試験体の腐食は従来および海外仕様の試験体に比べ小さいことを見出した。

*Key Words: suspension bridges, cable corrosion, galvanized wires, corrosion protection, corrosion simulation tests, wire protection paste*

## 1. 緒言

近年実施された因島大橋および大鳴門橋のケーブル現地調査により、ケーブルは予想した以上に腐食が進行していることが判明し<sup>1)2)3)</sup>、ケーブルの腐食原因の究明および防食方法の改良が急務となった。筆者らは、ケーブル内の腐食環境(温度・湿度測定)の調査やケーブル内の濡れ環境をシミュレートした亜鉛めっき鋼線の腐食試験等を実施し、ケーブルの主たる腐食原因は、ケーブル内部に侵入した水がケーブル内部を高湿度化し、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、亜鉛めっき鋼線に対して厳しい腐食環境を形成したためであること、および従来用いられていた高アルカリ系ペーストの劣化が亜鉛めっき鋼線の腐食を促進したためであること、を見出した<sup>4)</sup>。

本研究では、これらの腐食原因の抑制が可能であると考えられる数種類の新しいケーブル防食仕様を提案し、これらの防食性能を確認するため平成5年から8年の4年間に及ぶ暴露試験を実施した。暴露試験終了後、これらの試験体を解体し、目視観察を中心としたケーブル内部の腐食評価を定量的に行い、新防食法の防食性能を評価した。また、暴露試験体

には従来防食仕様も含まれており、腐食生成物の解析により筆者らの推定した腐食機構の確認も試みた。

## 2. ケーブル新防食仕様

### (1)従来の防食仕様

因島大橋に用いられた吊橋ケーブルの防食構造を図-1に示す。ケーブルは約5mm径の高張力ワイヤで構成されている<sup>5)</sup>。ワイヤには350g/m<sup>2</sup>(50μm)の熔融亜鉛めっきが施され、さらにその上に架設期間中の防錆を目的とする数μm厚の一次防錆処理が行われている。ケーブル架設後に、ケーブルは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、その上に亜鉛めっきした軟鋼線でラッピングし、さらに防食塗装されている<sup>6), 7), 8)</sup>。

このように複合的な防食構造を有するケーブルに腐食が発生した要因を分析した結果、これを防止する方法としては、ペーストの性能改良、ケーブル表面からの水の侵入の防止、ケーブル内の結露の防止、ケーブル内への水の侵入の防止、が有効であると考えられた<sup>4)</sup>。そこで、以下に示す新しい防食方法を提案した。

表-1 各種ペーストの成分

	ペースト	成分 (重量%)	
従来ペースト	鉛酸カルシウム	鉛酸カルシウム	30
	高分子有機鉛	高分子有機鉛	25
	高分子有機鉛	炭酸カルシウム	43
改良ペースト	鉛丹	鉛丹	92
	鉛丹	あまに油	8
	高分子有機鉛	高分子有機鉛	60
改良ペースト	リン酸アルミ	炭酸カルシウム	40
		リン酸アルミ	25
		炭酸カルシウム	42
		高分子有機鉛	8
	バナジン酸ナトリウム	熱処理したあまに油	25
		バナジン酸ナトリウム	15
		炭酸カルシウム	42
		熱処理したあまに油	25
	アルキルベンゼンスルホン酸	その他	5
		アルキルベンゼンスルホン酸	14
炭酸カルシウム		60	
ポリサルファイド	熱処理したあまに油	25	
	その他	1	
	ポリサルファイド	ポリサルファイド	100

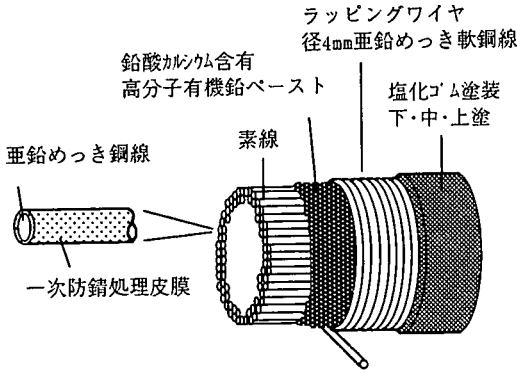


図-1 因島大橋のケーブルの防食構造

### (2) ペーストの性能改良

国内外で用いられているペースト成分を表-1に示す。海外では一般的に鉛丹ペースト<sup>6),7),8)</sup>が用いられてきた。鉛丹は鉄面の防錆顔料としてよく知られているが、亜鉛には好ましくないとの報告もある<sup>9),10)</sup>。平戸大橋や関門橋では高分子有機鉛ペーストが用いられたが、これは亜鉛や鉄の防錆性に優れた鉛系防錆顔料を乾性油で処理した防錆剤である。因島・大鳴門橋等では鉛酸カルシウム含有高分子有機鉛ペーストが用いられた。このペーストは高アルカリにより亜鉛を不動態化させる防食設計であったが<sup>8)</sup>、長期間の供用により固化が認められ、筆者らはこのペーストは劣化するとアルカリ下で形成された亜鉛の不動態が壊れやすく、さらに腐食生成物に金属鉛の発生をともない腐食電池が形成され、亜鉛めっき鋼線の腐食を促進する可能性があることを見出した<sup>4)</sup>。そこで、中性顔料と劣化しにくい乾性油を用いた表-1に示す4種類の改良ペーストを提案した。リン酸アルミやバナジン酸ナトリウム<sup>11)</sup>ペーストは亜鉛めっきの防錆に優れた顔料を適用したもので、コーキング材として一般的に用いられているポリサルファイド<sup>12)</sup>やアルキルベンゼンスルホン酸ペーストは亜鉛との付着性を重視したペーストである。

### (3) ケーブル表面からの水の侵入の防止

ケーブル表面からの水の侵入を防止するために、ラッピングワイヤーの形状に着目した。従来のラッピングワイヤーは4mm径の亜鉛めっきした軟鋼線を用いていたが、ケーブルの変形に追従できずラッピング上の塗膜にわれ等の欠陥を生じやすい傾向があった。

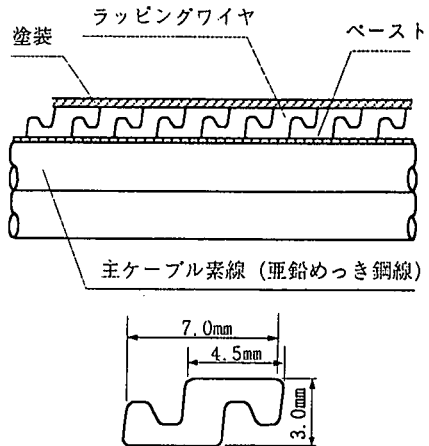


図-2 Sラッピングワイヤー

そこで、図-2に示すようなS断面のワイヤーを開発し、隣接するSワイヤーをかみ合わせ、ケーブルが伸縮しても表面に隙間ができないラッピング面を形成する方法を考案した。この方法は、本実験の中間結果をふまえて白鳥大橋や来島大橋で実際に採用された<sup>13),14)</sup>。

ワイヤラッピング表面の防食被覆に関しても対策を講じた。国内の斜張橋ケーブルや海外の吊橋（ニューポート橋）で実績のあるプラスチックラッピング<sup>6),7),15)</sup>、および海外で実績のある遮断性に優れたネ

表-2 試験体の防食仕様

No.	試験体名	防食仕様			注水
		ペースト	ラッピングワイヤ	塗装/被覆	
7*	従来防食系	鉛酸カルシウム高分子有機鉛	4mm 亜鉛めっき鋼線	塩化ゴム塗装	あり
5*	従来防食系(注水なし)	鉛酸カルシウム高分子有機鉛	4mm 亜鉛めっき鋼線	塩化ゴム塗装	なし
1*	海外一般系	鉛丹	4mm 亜鉛めっき鋼線	ゴムラッピング	あり
8	海外一般系	鉛丹	4mm 亜鉛めっき鋼線	塩化ゴム塗装	あり
20*	平戸, 関門ペースト	高分子有機鉛	4mm 亜鉛めっき鋼線	ゴムラッピング	あり
2*	改良ペースト 1	リン酸アルミニウム	4mm 亜鉛めっき鋼線	ゴムラッピング	あり
6-1	改良ペースト 2	バナジウム酸トリウム	4mm 亜鉛めっき鋼線	ゴムラッピング	あり
6-2	改良ペースト 3	アルキルベンジメチン酸	4mm 亜鉛めっき鋼線	ゴムラッピング	あり
3	改良ペースト 4	ポリリカルファイト	4mm 亜鉛めっき鋼線	ゴムラッピング	あり
4*	ペーストなし	なし	4mm 亜鉛めっき鋼線	ゴムラッピング	あり
13*	改良ペースト +ラッピングワイヤ形状変更	リン酸アルミニウム	Sワイヤ	エポキシ樹脂系塗装	あり
15*	プラスチックラッピング	なし	なし	繊維強化プラスチック被覆	あり
14*	ゴムラッピング	なし	なし	ゴムラッピング	あり
16*	矽シート巻き	なし	なし	断熱材/矽シート	あり
17*	フッ素シート巻き	なし	なし	断熱材/フッ素シート	あり
19*	無防食	なし	丸線	なし	なし
9	バンド部 1	(a)横割(水抜きなし)、(b)縦割(水抜きなし)、(c)縦割(水抜きなし)			あり
18-1	バンド部 2	縦割り(下面一部開放)			あり
18-2	バンド部 3	縦割り(下面開放)			あり
18-3	バンド部 4	横割り(水抜き孔)			あり

\*についてはケーブルを解体し内部の腐食状況を調べた。No. 16, 17, 19 のサイズは 200mm×700mm とした。

オプレンゴムラッピング+ハイパロン塗装<sup>(9),(7),(16)</sup>を検討した。プラスチックラッピングは、アクリル樹脂系のプラスチック材料を繊維強化材であるガラスクロスマットに含浸させ巻きつけたものである。ネオプレンゴムラッピングは、ネオプレン系の接着剤を塗布した後、厚さ 1.6mm の未可硫のゴムシートをハーフラップで巻きつけ、耐候性をもたせるためにハイパロン塗装を施した防食方法である。

#### (4) ケーブル内の結露防止

ケーブル内に滞留水が存在する場合、ケーブル内は高湿度となり、さらに外気温度に伴い温度変化するため結露が生じ亜鉛めっき鋼線を濡らす。以後、濡れとは、目視や触手により水滴の付着が確認されるレベルと定義する。そこで、ケーブル内の温度変化を小さくできれば、結露による濡れを極力防止することが可能であると考え、スポンジ状の独立発泡の断熱材をケーブル表面に被せ、さらにチタンの薄板およびフッ素繊維強化プラスチック板で押さえる方法を検討した。

#### (5) ケーブル内部水の排除

腐食の直接原因は、ケーブル内に存在する水である<sup>(9),(7)</sup>。そこで、ケーブル内部に侵入してくる水分を除去することができれば、非常に有効な防食手段となる。従来より、ケーブルバンドの下面には水抜きの穴が設けられ、自然排水が実施されており、腐

食程度が一般部に比較して軽微であると報告されている<sup>(9),(7)</sup>。そこで、ケーブルバンド部での水抜き穴の効果を確認することも調査の対象とした。

さらに、ケーブル全長にわたり乾燥空気を内部に送り込み、強制排水あるいは除湿することが可能であれば非常に有望である。この送気システムは明石海峡大橋で実際に採用された<sup>(1),(2),(3),(17),(18)</sup>が、本論文では対象外とした。

### 3. 暴露試験体と試験方法

#### (1) 暴露試験体

暴露試験体の防食仕様の一覧を表-2 に示す。防食仕様の種類を分類すると、因島大橋等で用いられた鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペーストにワイヤーラッピングおよび塩化ゴム塗装した試験体(No. 7, 5)、海外で用いられている鉛丹ペーストにワイヤーラッピングおよびゴムラッピングさらにハイパロン塗装した試験体(No. 1)、鉛丹ペーストにワイヤーラッピングおよび塩化ゴム塗装した試験体(No. 8)、高分子有機鉛および改良ペーストにワイヤーラッピングおよびゴムラッピングさらにハイパロン塗装した試験体(No. 20, 2, 6, 3)、リン酸アルミにS字ラッピングエポキシ樹脂系の下塗・中塗を行ったのちフッ素樹脂系の上塗塗装を行った試験体(No. 13)、ペーストを用いずワイヤーラッピングおよびゴムラッピン

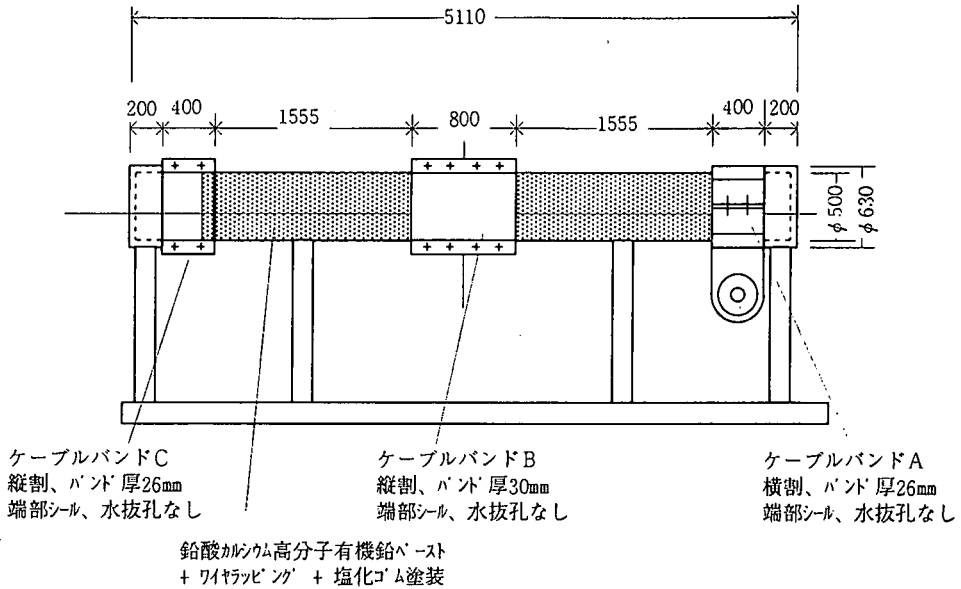


図-3(b) バンド部試験体

グさらにハイパロン塗装した試験体 (No. 4), ペーストを用いずプラスチックラッピングした試験体 (No. 15), ペーストを用いず直接ゴムラッピングさらにハイパロン塗装を行った試験体 (No. 14), 断熱材を巻きつけた後にチタンのカバーを行った試験体 (No. 16), 断熱材を巻きつけた上にフッ素シートを巻きつけた試験体 (No. 17), ペーストを用いずワイヤラッピングのみ行った試験体 (No. 19) である。なお, No. 6 試験体は左右半分の部分に異なる 2 種類のペーストを施した。また, 断熱材は厚さ 35-40mm とし, No. 16 試験体には発泡ゴム材, No. 17 試験体には発泡ポリエチレン材を用いた。試験体のサイズは径 600mm, 長さ 2,000mm とした。ただし, No.16, 17, 19 の試験体は径 200mm, 長さ 700mm とし, ケーブルバンド試験体は径 500mm, 長さ 5,000m および径 600mm, 長さ 3,000mm とした。暴露試験体の詳細を図-3 (a) に, ケーブルバンド部試験体の詳細を図-3 (b) に示した。

ケーブル内には, 腐食を促進するため注水ホースを用いて 5.8 リットルの 50ppmNaCl 水溶液を注入した。ただし, No. 5 の試験体はケーブル内に注水を行わず, カッターで塗膜に傷をつけた。

## (2) 試験方法

暴露場所は, 兵庫県姫路市広畑製鉄所内の岸壁から約 30m の地点とした。暴露期間は, 約 4 年 (1992.1 ~1996. 10) であった。測定した飛来塩分量は 43mdd,

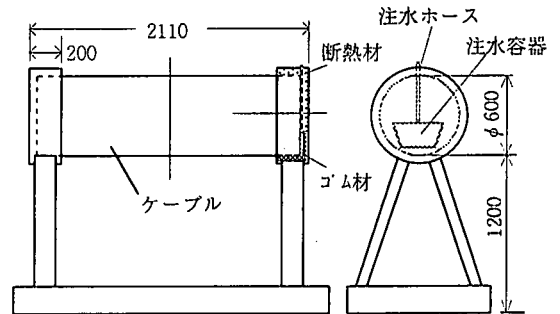


図-3(a) ケーブル暴露試験体

試験体表面の塩分付着量は  $5 \sim 20 \text{mg/m}^2$  であった。暴露試験の全貌を写真-1 に示す。

## (3) 調査項目

ケーブル外観については, ケーブル被覆の劣化・われ・ふくれ等の欠陥が発生していないか目視観察を行った。また, ファイバースコープをケーブル端面から挿入して, 内部の腐食状況を観察した。これらの調査は 1 年ごとに実施した。

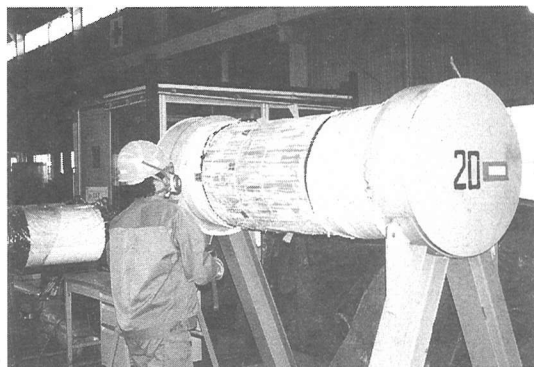
暴露試験開始後 4 年目に, ケーブル試験体を解体して内部の腐食状況を調査した。最初に, ケーブル防食被覆を除去した直後のケーブル内の水濡れ状況, ペーストの劣化状況, ペースト塗布面の腐食状況を目視観察した。つぎに, ケーブル内にくさびを 2-3

表-3 腐食状況の評価基準

腐食状況	亜鉛 評点	鉄錆 評点	評点
亜鉛酸化物発生面積率 0%	5	5	9
亜鉛酸化物発生面積率 0.1%以下	4		8
亜鉛酸化物発生面積率 1%以下	3		7
亜鉛酸化物発生面積率 33.3%以下	2		6
亜鉛酸化物発生面積率 33.3%以上	1		5
鉄錆発生面積率 0.3%以下	1~5	4	4
鉄錆発生面積率 5%以下		3	3
鉄錆発生面積率 33%未満		2	2
鉄錆発生面積率 33%以上		1	1



写真-1 暴露試験の全貌



(a)



(b)

写真-2 試験体の調査状況

層目まで打ち込み内部を観察した。最後に、上面から一段づつストランドを解体して、中心部の腐食状況を観察した。ただし、解体調査を行ったのは、No.1,

8方位のペーストを除去し  
亜鉛めっき鋼線の腐食状況を評価  
(100mm×150mm)

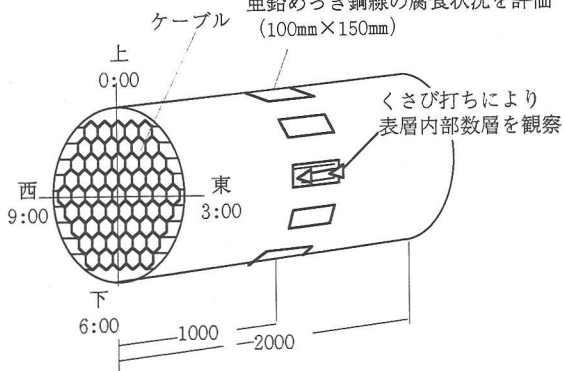


図-4 腐食調査位置

2, 4, 5, 7, 13, 20, 16, 17, 19 である。写真-2(a)にケーブル表層部およびくさびを打ち込んだ状態での観察状況を、写真-2(b)に解体作業中の状況を示した。

腐食状況の評価は、鉄錆発生状況についてはASTM D-610-08に順じ、亜鉛の腐食生成物発生状況については日本塗料検査協会塗膜評価基準の白亜化判定基準に順じて9段階に分けた<sup>19),20)</sup>(表-3)。腐食評価位置については図-4に示すように、ラッピングワイヤ裏面、ケーブル表面、くさび打ちによるケーブル表層内部(8方位)とし、内部については全てのストランドについて行った。

#### 4. 外観調査結果

##### (1)外観調査

因島大橋等で用いられた「鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペースト+ワイヤラッピング+塩化ゴム塗装仕様(No.7, 5)」では、注水を行った試験体(No.7)にのみ、ケーブル下面においてラッピングワイヤの隙間にふくれが認められた。因島大橋の現地調査におい

でも同様のふくれが認められており、本暴露試験体の結果は実橋での特徴を再現していると考えられる。

「鉛丹ペースト+ワイヤラッピング+塩化ゴム塗装(No.8)」も同様に、ケーブルの下面において、ラッピングワイヤの隙間にふくれが認められた。「ネオプレンゴム巻+ハイパロン塗装仕様(No.1, 20, 2, 6, 3, 4, 14)」に関しては、ハイパロン塗装にチョーキング(白亜化)し表面に白い粉末が認められた。ゴム材は柔軟性、弾性を十分に保持していた。ゴムシートの密着性は、全体的に良好であったものの、ケーブル下面の没水部では手では剥がせる程度であった。「Sワイヤラッピング+エポキシ/フッ素塗装を行った試験体(No.13)」に関しては、塗膜は光沢を保持し、塗膜のわれ・ふくれ・劣化もほとんど認められず、耐候性は良好であった。「繊維強化プラスチック被覆試験体(No.15)」に関しては、被覆層の外観変化は見られず、われ・変色等の欠陥も全く認められなかった。「チタンシート巻試験体(No.16)およびポリエチレンシート巻試験体(No.17)」には、いずれも外観上の変化はほとんど認められなかった。

以上の結果のように、ケーブル防食被覆には、いずれも顕著な劣化等は認められずおおむね良好であった。

## (2) ファイバースコープによる調査

ケーブル素線の隙間に挿入可能な直径 0.64mm×長さ 1000mm のファイバースコープ(OLYMPUS 製 IF6PD4)を試験体端部の鋼製キャップに設けた穴からケーブル内のワイヤ素線の隙間に挿入し、ケーブル内部の腐食状況の目視観察を行った。写真-3はファイバー画像と試験体解体調査時の実際の腐食状況とを比較した一例である。ファイバー画像の解像度は鮮明でないものの、健全な試験体には金属光沢が見られ、白錆が発生したものは白っぽく写り、腐食状況を大まかに把握することが可能であった。したがって、この技術は実際のケーブルの健全度を推定するための有効な手段となると思われる。

## 5. 解体調査結果

### (1) 解体直後の状況

防食被覆除去直後は、注水した全ての試験体で下面から側面にかけて濡れが認められた。ただし、ペーストを塗布した試験体ではほとんど滞留水は流れ出てこなかったのに対し、ペーストを塗布していない試験体(No.4, 14, 15)では防食被覆層を除去した瞬

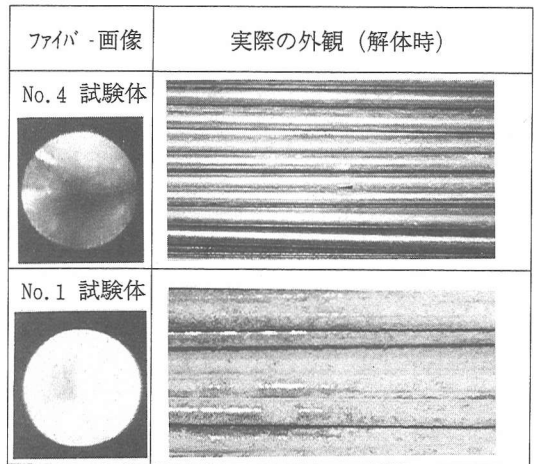


写真-3 ファイバースコープ画像

間に多量の水(2~3リットル以上)が流れ出てきた。これはペーストが保水したためと考えられる。滞留水の pH は、鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペーストを用いたものは腐食部近傍で pH 10 付近のアルカリ性を示したが、それ以外のペーストはいずれもほぼ中性を示した。注水を行わず塗膜傷を設けた試験体(No.5)では、傷を設けた上面近傍とケーブル下面にわずかに濡れが認められた。また、無防食の試験体(No.19)には濡れが認められなかった。

ペーストの状態は、鉛丹ペーストは柔軟性がなく粉状であったが、鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペーストは柔軟性はなく硬化していた。ただし、いずれのペーストも濡れのある部分では水と混ざりあったため柔らかい状態であった。一方、劣化しにくい油分を用いた改良ペースト(リン酸アルミペースト、バナジン酸ナトリウム、アルキルベンゼンスルホン酸ペースト、ポリサルファイドペースト)は柔軟性を保持していた。高分子有機鉛ペーストは、柔軟性はあるものの、上記4つの改良ペーストに比較してやや硬化が認められた。

### (2) ケーブル内部の腐食状況

#### a) 鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペースト+ワイヤラッピング+塩化ゴム塗装(注水あり)(No.7)

ケーブル表層部の腐食外観を写真-4(a)(b)に示す。ケーブル表面およびラッピングワイヤ裏面の腐食は、ケーブル上半分ではわずかであったが、下面に鉄錆の発生が多く認められ、とくに4:30と7:30の方位の腐食が大きかった。腐食は、めっき鋼線がほとんど消費せずに黒く変色した部分と、ペーストと白錆が混合し所々に鉄錆が認められる腐食部とが混在し

た局部腐食であった。腐食部には濡れが認められ、腐食部近傍のめっき鋼線の黒変部分では pH 10 のアルカリ性を示していた。亜鉛めっき鋼線の黒変部分腐食生成物を採取し、X線回折を行ったところ金属鉛が認められた。

劣化した鉛酸カルシウムペーストに接した亜鉛めっき鋼線の腐食機構については、高アルカリ環境下で不動態化した亜鉛めっきがペースト成分中の有機酸により破壊され、局部腐食を引き起こし、さらに腐食におけるカソード反応として鉛イオンが還元され金属鉛が析出し、この鉛が亜鉛と局部電池を形成しめっき鋼線の腐食を促進すると考えられる<sup>4)</sup>。本調査の場合も、腐食が局部的であり、高アルカリ環境であり、腐食生成物中に金属鉛が認められるため、この機構に準じた反応が進行していると考えられる。

くさびを打った状況を写真-4(c)に示す。1層目裏面から2, 3層目では、全面が白錆に覆われ、鉄錆の発生が認められた。結露等による濡れが生じ、亜鉛めっきが腐食により消費され、鉄錆が発生したと考えられる<sup>21), 22)</sup>。

以上のように、ケーブル表層部の腐食状況は実橋の腐食と似た形態を示していることから、本暴露試験によりケーブルの腐食防食について議論することは妥当であると考えられる。ただし、実橋では側面の腐食が大きかったのに対し、暴露試験では4:30と7:30の位置の腐食が大きかった。これは、ケーブル内の濡れの状態および滞留水の分布状況が、実橋と暴露試験体で異なっているためと考えられる。

解体による内部の腐食状況を写真-5に示す。ケーブル上半分部の腐食はわずかであったが、下部になるにしたがい腐食が激しくなり、濡れが認められた下半部では鉄錆が顕著に認められるような激しい腐食を示した。

b) 鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペースト+ワイヤラッピング+塩化ゴム塗装(注水なし) (No. 5)

ケーブル表層部の腐食外観は、ケーブルの最下面と塗膜にキズを設けた上面において、白錆および鉄錆が認められたものの、注水を行った試験体(No.7)に比較して腐食は明らかに小さかった。くさび打ち観察においても、上面と下面のみ腐食が認められた。

解体による内部の腐食状況も、濡れが認められたケーブルの上面とケーブルの下面に腐食が認められた。このケーブル試験体には注水を行っていないことから、被覆欠陥部より腐食原因となる水が進入したと考えられた。

c) 鉛丹ペースト+ワイヤラッピング+塗装またはゴムラッピング (No. 1, 8)

No.1 および No.8 ともにケーブル表層部の腐食状況は類似していた。ラッピングワイヤ裏面や素線1層目表は、亜鉛めっき鋼線の表面が全体的に黒く変色し、腐食が大きい部分では白錆とペーストが混合し鉄錆発生も認められた。

黒く変色した部分の腐食生成物を採取し、X線回折を行ったところ金属鉛が認められた。この鉛は鉛丹ペーストから溶けだした鉛イオンが、亜鉛腐食のカソード反応として還元され、金属鉛として析出したものと考えられる。金属鉛は亜鉛と局部電池を生じめっき鋼線の腐食を促進する可能性があり、そのためめっき鋼線の腐食が大きかったと推定される。くさび打ちによるケーブル表層内部は、全面が白錆に覆われ、腐食の大きいものでは、所々に鉄錆の発生が認められ、結露等の濡れが原因で、腐食が生じていると考えられる。

解体によるNo.1試験体内部の腐食状況は、ケーブル内部は全体に白錆の発生が認められ、特に湿り気のある下部では鉄錆の発生も多く認められた。

d) 高分子有機鉛ペースト+ワイヤラッピング+ゴムラッピング+ハイバロン塗装 (No. 20)

ケーブル表層部の腐食外観は、ラッピングワイヤ裏面や素線1層目表には、白錆の発生が認められたが、鉄錆の発生はほとんど認められなかった。くさび打ちによるケーブル表層内部では、白錆の発生が認められたが、鉄錆は認められなかった。解体による内部の腐食状況は全体的に小さかったが、水濡れのあるケーブル下面に腐食が認められた。没水環境に近い最下面よりも、やや上部に濡れがあり、気液界面近傍の腐食が大きく、わずかに鉄錆の発生も認められた。

e) 改良ペースト(リン酸アルミ, バナジン酸ナトリウム, アルキルベンゼンスルホン酸) (No. 2, 6-1, 6-2, 3)

ケーブル表層部の腐食外観は、ラッピングワイヤ裏面および素線1層目とも、濡れのある下面においても腐食はいずれのペーストも小さかった。リン酸アルミ, バナジン酸ナトリウムは、腐食はわずかで金属光沢が認められた。アルキルベンゼンスルホン酸は、4:30と7:30のみ白錆に覆われ鉄錆の発生が認められたものの、それ以外の部分の腐食は小さく、めっきの金属光沢が認められた。ペースト界面では、防錆顔料が適切に作用するとともに、ペーストの油

分も劣化が小さいためめっき面への密着性が高く、亜鉛めっき鋼線の腐食を防止していると考えられる。しかし、くさび打ちによる表層内部（ペースト非塗布部）では、いずれのペーストにおいても、めっき鋼線が厚い白錆に覆われ、鉄錆の発生も認められた。とくに下側面（4:30と7:30の位置）の腐食が大きかった。No.2のリン酸アルミペーストの試験体のみ解体調査を実施したが、濡れの認められた部分に腐食が認められ、腐食の大きい部分ではわずかであるが鉄錆の発生も認められた。

f) Sワイヤラッピング+エポキシ樹脂系下・中塗+フッ素樹脂系上塗 (No. 13)

ケーブル表層部の腐食外観を写真-6に示す。ラッピングワイヤ裏面や素線1層目表の腐食はわずかであったが、くさび打ちによる表層部の観察では、濡れの認められた側面～下面に腐食が認められ、側面では亜鉛の腐食生成物に覆われ鉄錆の発生が認められた。解体による内部の腐食状況を写真-7に示すが、ケーブル中心よりやや上の部分が湿った状態であり、鉄錆の発生もわずかに認められた。同じリン酸アルミペーストを用い、防食被覆が異なる試験体 No.2と腐食形態の傾向は一致しており、ペースト塗布されためっき線の防食効果は認められるが、ケーブル内部の防食効果は認められなかった。

g) ペーストなし (No. 4)

ケーブル表層部の腐食外観に関しては、ラッピングワイヤ裏面および素線表層（1層目～数層）は、濡れの認められた下面に腐食が認められた。没水状態に近い6:00付近の位置よりも、4:30と7:30付近の気液界面に近い湿った部分での腐食が大きく、亜鉛の腐食生成物に覆われるとともに鉄錆の発生もわずかに認められた。

解体による内部の腐食状況に関しては、内部の腐食は全体的に小さく、没水状態に近い6:00付近の位置では薄い亜鉛の腐食生成物に覆われたが、鉄錆の発生は認められなかった。4:30と7:30付近の気液界面に近い湿った部分では亜鉛の腐食生成物に覆われごくわずかであるが鉄錆の発生が認められた。

ペーストを塗布した試験体と比較すると、ペースト塗布部分では、改良ペースト（リン酸アルミ、バナジン酸ナトリウム、アルキルベンゼンスルホン酸、ポリサルファイド）、高分子有機鉛、ペーストなし、鉛丹、鉛酸カルシウム含有高分子有機鉛の順に腐食が小さかった。しかし、ケーブル内部のペースト非

塗布面では、ペーストなし、高分子有機鉛、改良ペースト（リン酸アルミ、バナジン酸ナトリウム、アルキルベンゼンスルホン酸、ポリサルファイド）、鉛丹、鉛酸カルシウム含有高分子有機鉛の順に腐食が小さい傾向が認められた。したがって、適切なペーストを選定すればペースト塗布面を効果的に防食可能であるが、ペーストの塗られていない部分では、ケーブル内の水を閉じこめることにより湿った環境を形成したり、ペーストの保水により腐食を大きくする傾向が認められた。

h) ネオプレンゴムラッピング (No. 14)

ケーブル表面には直接ネオプレン系接着剤が塗布されている。この接着剤を剥がしめっき鋼線の腐食状況を観察すると、亜鉛めっき鋼線の腐食は小さく、下側面から下面にかけてわずかに亜鉛の腐食が認められる程度であった。くさび打ちによる内部の観察結果においても、下側面～下面にかけてわずかに亜鉛の腐食が認められる程度であった。

i) プラスチックラッピング (No. 15)

ケーブル表層部の腐食外観は、ネオプレンゴムラッピングのみの試験体と同様に、めっき鋼線には腐食は小さく、下側面～下面にかけてわずかに亜鉛の腐食が認められる程度であった。くさび打ちによる内部の観察結果においても、下側面～下面にかけてわずかに亜鉛の腐食が認められる程度であった。

j) 断熱材の影響 (No. 16, 17)

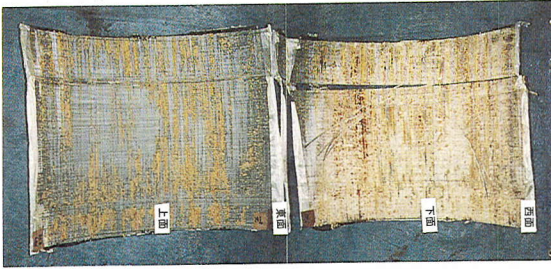
No.16 試験体のケーブル表層部および解体による内部の腐食外観は、ケーブル表層および内部とも、全面が厚く亜鉛の腐食生成物に覆われ鉄錆の発生も多く認められた。今回の試験で用いた断熱材は保水性が高く、湿った腐食環境を形成したためと考えられる。したがって、今回の試験では、断熱材の効果については議論することは出来なかった。

k) 無防食 (No. 19-1)

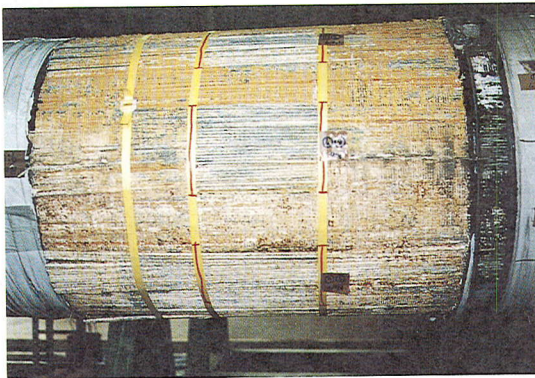
ラッピングワイヤは亜鉛の腐食生成物に覆われたものの、ケーブル内のワイヤは表層、内部ともに腐食はほとんど認められなかった。腐食が小さかった原因は、一度水がケーブル内に進入しても容易に排出されたためと考えられる。

しかし、実橋のケーブルに無防食を適用することは長期的には適さないと考えられる。局部的に水が溜まりやすい部分が発生したり、付着塩分濃度の高い部分の発生が予想されるためである。

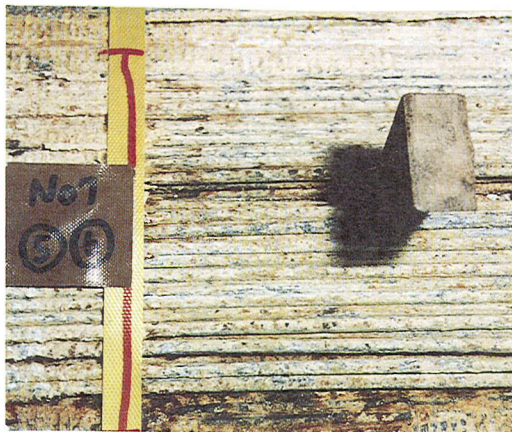




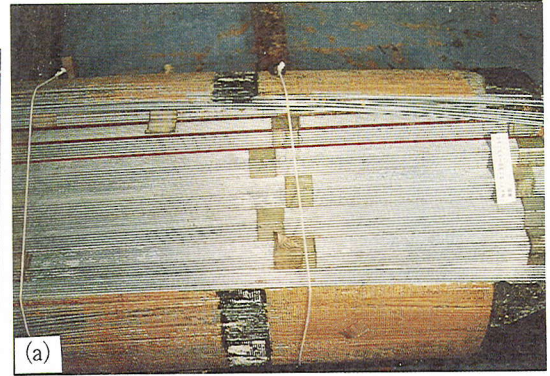
(a)



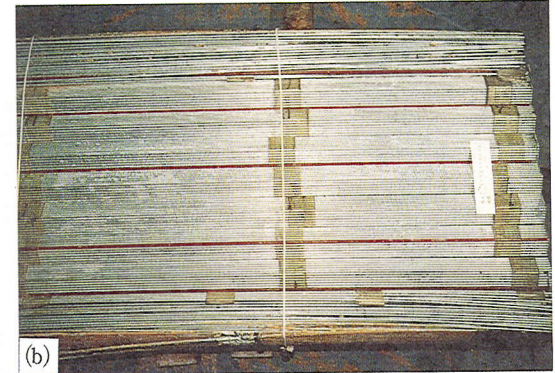
(b)



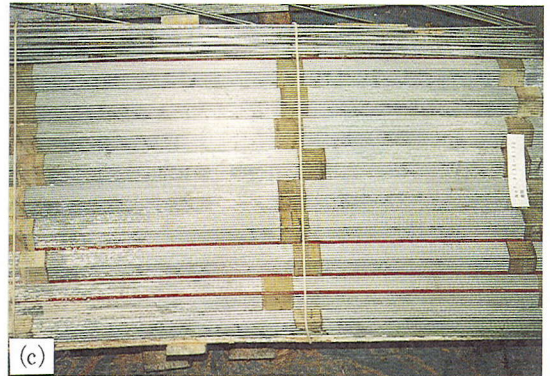
(c)



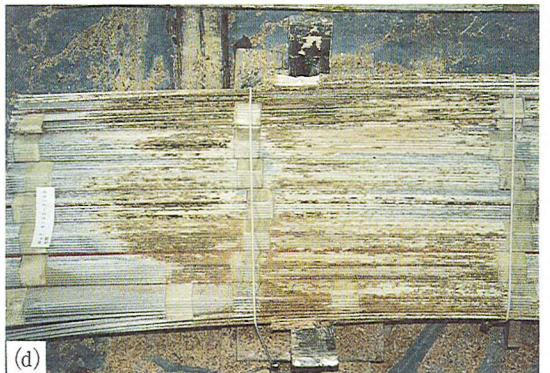
(a)



(b)



(c)



(d)

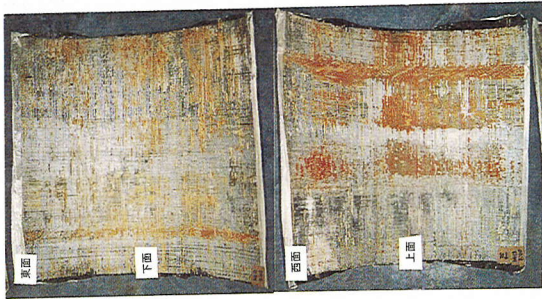
写真-4 No.7 試験体のケーブル表層部腐食外観

- (a) ラッピングワイヤー裏面
- (b) ケーブル表層部
- (c) くさび打ち観察

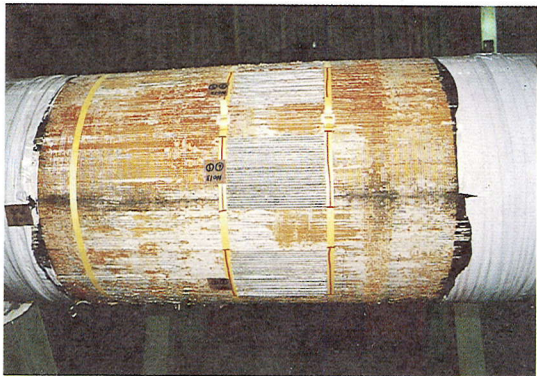
写真-5 No.7 試験体のケーブル内部外観

- (a) 0:30-11:30
- (b) 1:30-10:30
- (c) 3:30-8:30
- (d) 5:00-7:00

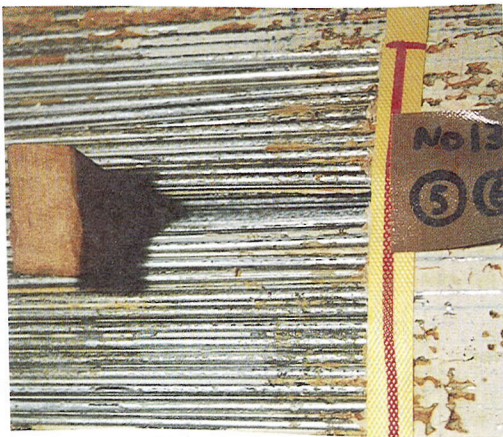




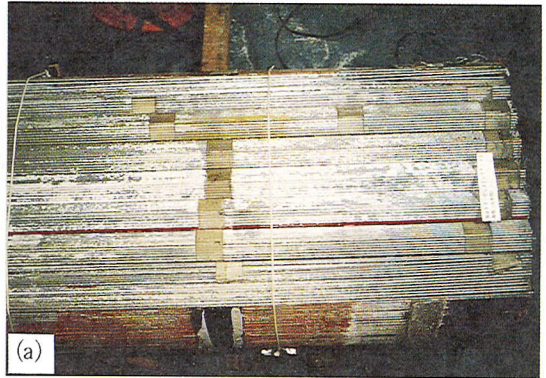
(a)



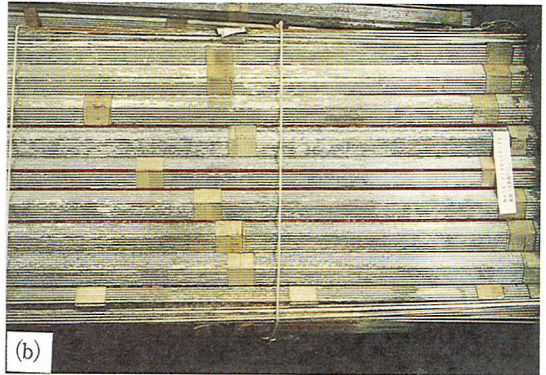
(b)



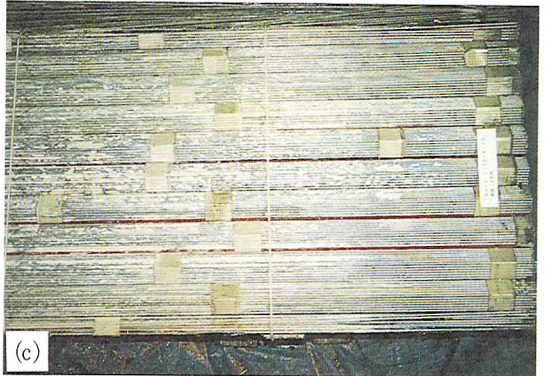
(c)



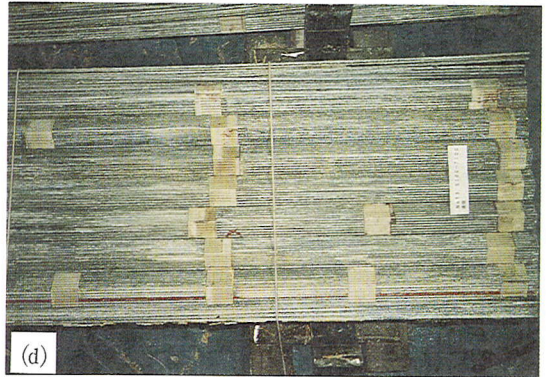
(a)



(b)



(c)



(d)

写真-6 No.13 試験体のケーブル表層部腐食外観  
 (a)ラッピングワイヤー裏面  
 (b)ケーブル表層部  
 (c)くさび打ち観察

写真-7 No.13 試験体のケーブル内部外観  
 (a) 0:30-11:30 (b) 1:30-10:30  
 (c) 3:30-8:30 (d) 5:00-7:00

表-4 暴露試験体ケーブル内表層部の腐食評価結果

No.	ラッピングワイヤ裏面								1層目表								1層目裏～2, 3層目							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
7	8	8	1	1	1	1	4	8	7	7	6	1	1	1	4	7	8	9	7	1	1	1	3	3
5	1	3	7	3	2	8	8	1	1	7	7	6	3	6	7	4	1	8	8	8	5	5	9	9
1	9	2	1	1	1	1	2	9	9	9	1	1	1	1	4	9	5	1	1	3	1	2	5	
8	3	3	1	1	1	1	3	3	6	4	1	1	3	1	3	4	6	7	3	1	1	1	2	4
20	7	7	6	7	7	4	7	7	7	6	4	5	5	5	6	7	8	7	5	7	6	6	5	7
2	8	8	8	8	8	8	7	8	9	8	9	8	8	7	8	9	8	8	8	4	8	1	1	5
6-1	7	8	7	8	8	8	7	8	9	9	8	8	8	8	9	9	9	9	4	1	1	2	3	9
6-2	8	8	1	7	7	1	7	8	9	8	8	4	7	3	7	9	9	9	5	1	5	3	1	6
3	9	9	2	5	3	2	9	9	9	9	9	8	7	7	9	9	9	8	6	6	6	6	3	9
4	8	8	3	3	3	4	8	8	9	9	6	3	4	4	7	8	7	9	6	7	5	6	8	9
13	8	8	8	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	9	9	9	7	6	3	6	6	7	3	7
15									9	9	9	8	7	7	9	9	9	9	9	8	6	8	8	9
14									9	9	9	7	7	7	9	9	9	9	8	7	6	7	8	8
16									1	2	1	1	2	1	1	1	3	1		1	1	1		1
17									2	2	1	3	4	4	2	1	4	3		5	5	1		3
19	9	9	8	6	7	6	8	9	9	9	9	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
9(a)	3	3	3	2	2	2	3	4	3	3	2	1	1	1	3	3	5	5	4	1	1	1	4	5
9(b)	2	3	3	2	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1	2	2	1	3	3	1	1	2	4	4
9(c)	3	2	2	1	2	1	2	3	4	3	1	1	1	1	3	3	4	4	2	1	1	1	3	4
18-1	3	8	7	2	3	6	7	7	5	7	7	2	3	3	8	7	5	8	7	5	5	5	7	8
18-2	4	9	9	3	3	9	9	9	6	9	7	4	3	7	9	8	5	9	9	7	7	8	9	9
18-3	3	3	4	3	2	4	4	3	7	8	6	4	3	6	8	8	7	7	6	6	5	6	7	8

① ; 0:00、② ; 1:30、③ ; 3:00、④ ; 4:30、⑤ ; 6:00、⑥ ; 7:30、⑦ ; 9:00、⑧ ; 10:30

1) ケーブルバンド部 (No. 9, 18-1, 18-2, 18-3)

水抜き穴を設けていない No.9(a)(b)(c)では、バンド内に濡れが認められ、ケーブルバンド内面、ケーブル表面、およびくさび打ちによる表層内部は、亜鉛の腐食生成物に覆われるとともに鉄錆の発生も認められた。水抜き孔を設けた 18-1, 18-2, 18-3 では、水抜き孔のサイズはそれぞれ異なっていたものの、いずれも腐食は小さく、鉄錆の発生は認められなかった。このようにケーブルバンドの水抜き孔による防食効果はケーブルバンド部において認められたものの、ケーブルバンド近傍のワイヤラッピングし塗装を施した一般部分においてはケーブルバンド部分に比べ腐食は大きかった。したがって、水抜き孔によるケーブル内の滞留水の除去効果はケーブルバンド部のごく限られた部分に限定されると考えられる。

6. 調査結果の総括

ラッピングワイヤ除去後とくさび打ちによる暴露試験体の表層部における、腐食状況評価結果の総括

を表-4 に示す。この表より以下のことが理解される。

鉛丹ペースト試験体(No.1, 8)は、ネオプレンゴム巻きおよび塩化ゴム塗装のいずれについても発錆状況が高く、評点が低い。鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペースト試験体(No.5, 7)も、注水のある場合の評点は低く、注水が無い場合でも評点は高くない。評点が低かった原因として、腐食生成物中の金属鉛の影響が懸念される。一方、改良ペーストを用いた試験体(No.2, 3, 6-1, 6-2)は、上述の従来ペーストよりはかなり高い評点が得られている。改良ペーストの中では、リン酸アルミペーストとバナジン酸ペーストがやや良いようである。リン酸アルミペーストにS字ラッピングをした試験体(No.13)では、さらに高い評点が得られている。ただし防食効果が認められるのはペースト塗布面のみで、1層目裏面から内部では効果は認められず、ペーストの関与していない部分では結露等の濡れによる腐食が進行していると考えられる。

ペーストを用いなかった試験体(No.4, 14, 15)については、ワイヤラッピングをした試験体(No.4)の方が、ラッピングなしの試験体(No.14, No.15)より評点が

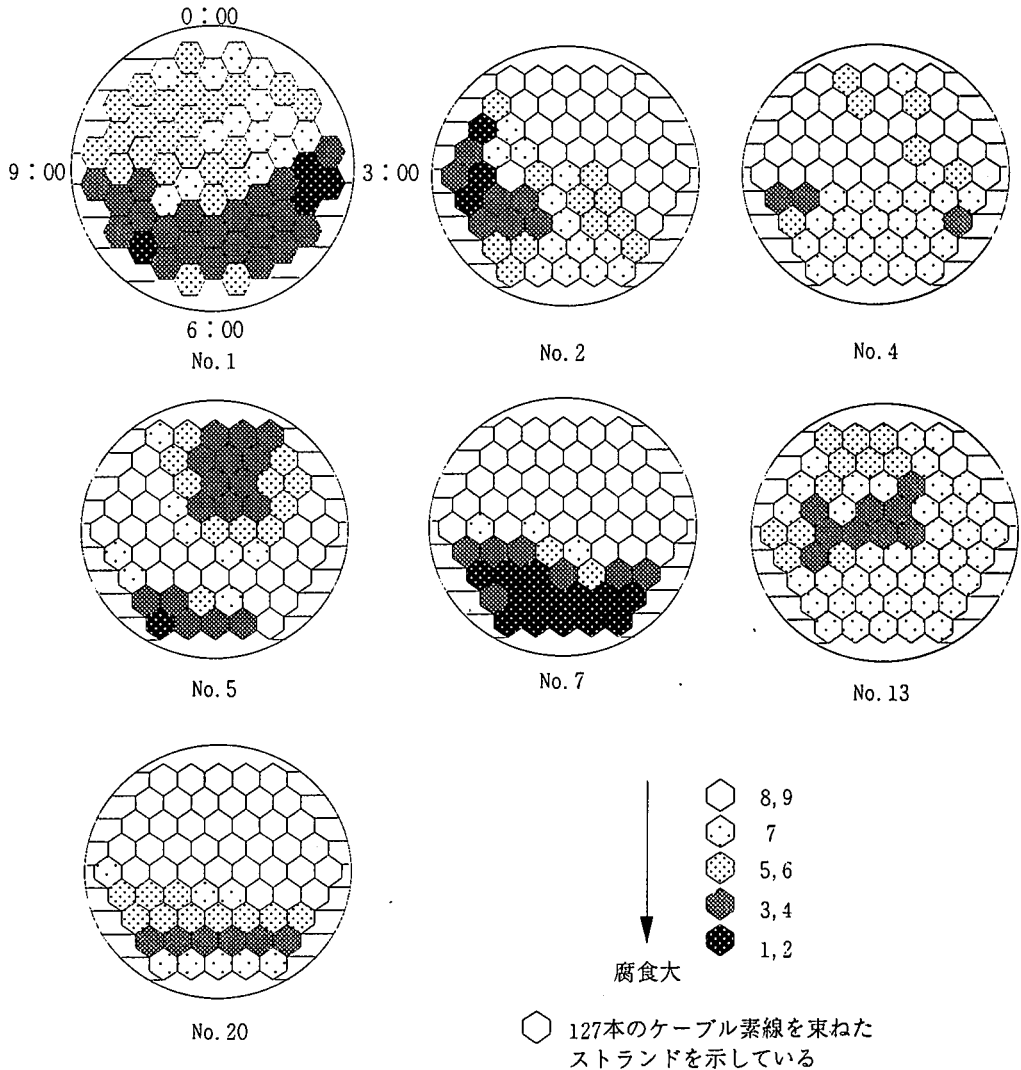


図-5 試験体断面内の腐食状況

低い結果を示している。ラッピングワイヤと素線との接触部は窪んだ構造のため結露を生じやすく、より厳しい腐食環境を形成したためと考えられる。

試験体断面内の腐食状況のまとめを図-5に示す。鉛丹ペースト試験体(No.1)、鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペースト試験体(No.5, 7)が他の試験体に比較して腐食が大きく、ペーストを用いなかった試験体(No.4)の腐食が小さいことがわかる。鉛丹ペースト試験体(No.1)、鉛酸カルシウム高分子有機鉛ペースト試験体(No.5, 7)の腐食が大きく進行している原因としては、滞留水へのペーストの溶出による影響と考えられた。

No.2, No.4, No.13, No.20の結果から、腐食は没

水環境に近い6:00付近よりも、気液界面に近い下側面で大きい傾向が認められた。この部分では、濡れが保持されるとともに、腐食に必要な酸素の供給が大きかったためと考えられる。

表-4と図-5の結果から、適切なペーストを塗布したものはケーブルの内部での厳しい腐食環境においても、ペースト接面を防食できることが確認できた。4年間と短期間ではあるが、厳しい腐食環境の中でも改良ペーストは健全であり、ケーブル内への水の侵入を防止できれば長期にわたり防食性能を発揮すると思われる。一方、内部水がある場合、ペーストにより塗布面の防錆効果は期待できるものの、塗布されていないケーブル内部においては防錆効果は期



待できず、ペーストがない試験体より腐食が大きい傾向が認められた。これはペーストが注入水をケーブル内部に閉じこめ、蒸した様な状況を形成したためと推定される。ペーストは外部からの水の侵入を確実に防止することが可能な反面、一度侵入した水を排出しにくくケーブル内を湿った環境に保持させる傾向が認められた。

## 7. 結言

吊橋ケーブルに種々の防食方法を施した試験体を製作し、海浜地区に4年間におよび暴露した後、解体調査し、これらの防食性能を比較研究した。得られた知見を以下に述べる。

- (1)ケーブル防食被覆、すなわちラッピングワイヤや塗装または被覆については、ゴムラッピングおよびハイパロン塗装、Sワイヤおよびエポキシ・フッ素塗装、チタン巻き等いずれの試験体も顕著な欠陥は認められなく良好な結果を示した。
- (2)防食被覆に傷を設けた試験体では、内部注水を行わないにもかかわらず、ケーブル内には腐食が認められた。これは、被覆欠陥部から腐食原因の水が侵入したためと考えられる。したがって、ケーブル防食被覆には長期にわたり傷やワレ等の欠陥を生じにくいものを適用することが重要であると考えられた。
- (3)ケーブル内の腐食状況にはペーストによる違いが顕著に認められた。防錆顔料や有機成分を改良した新規改良ペースト（リン酸アルミ、バナジウム酸ナトリウム、アルキルベンゼンスルホン酸）はペースト塗布面において良好な防錆性を示した。一方、鉛酸カルシウム含有高分子有機鉛ペーストおよび鉛丹ペーストは、亜鉛めっき鋼線の防錆ペーストとしては好ましくなかった。これは腐食初期に生じる金属鉛の影響と考えられた。
- (4)ペーストを塗布しなかった試験体は、改良ペーストを用いた試験体より腐食が大きかった。とくに、浸水部と酸素の供給が大きい浸水上部の腐食が大きかった。
- (5)ペースト塗布面は適切なペーストを選定することにより防食可能である。しかし、ケーブル内に滞留水が存在する場合には、ペーストがケーブル内部の湿った環境を保持するため、腐食を促進する傾向が認められた。
- (6)ケーブル内の結露防止を目的とした断熱被覆防

食は、保水しやすい断熱材を用いたため腐食が大きくなり、適切な評価はできなかった。今後は、保水しない材料の選択が求められる。

- (7)ケーブルバンドに水抜き穴を設け内部水を自然排出することにより、バンド部近傍に限定されるが、防食効果は認められた。
- (8)ケーブル内の水が抜けやすい無防食の試験体、水抜き孔を設けたバンド試験体、ケーブル内に注水を行わなかった試験体の腐食が小さかったことから、ケーブル内部の水を排除することはケーブルを防食する上で重要であることが明らかとなった。したがって、送風乾燥のような内部水の強制排除による防食方法は有望であると考えられた。

因島大橋や大鳴門橋のケーブルで腐食が発見されて以来、レインボーブリッジや白鳥大橋ではペーストおよび被覆材の改良が行われ、明石海峡大橋や来島大橋では更にケーブル内部を乾燥させる防食方法の改良が試みられている。今後は、これらを定期的かつ長期的にモニタリングし、防食性能を継続評価することが重要であると考えられる。最後に、本論文は数年間に及ぶ研究成果をまとめたものであり、この間に多くの方より協力や助言をいただいた。ここに謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 古家彦：送気乾燥による吊橋ケーブル防食試験，本四技報，Vol. 21, No.84, pp.12-18, 1997.
- 2) 奥川淳志：明石大橋のケーブル防錆，ワイヤー束に空気を通す，メンテナンス，pp.24-27, Mar., 1997.
- 3) 佐伯彰一，河藤千尋：送気による吊橋ケーブルの防食，土木学会誌，vol.83, January, pp.11-13, 1998.
- 4) 古家彦，北川 信，中村俊一，鈴木恵太，聖生守雄：吊橋ケーブルの腐食機構，土木学会論文集，1999.
- 5) 高橋稔彦，今野信一：橋梁ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線の開発，製鉄研究，第332号，pp.53-58, 1989.
- 6) 保田雅彦，鈴木周一，木村一也：吊橋ケーブルの防食技術の検討，本四技報，Vol.16, No.61, pp.10-20, 1992.
- 7) Stahl, F.L. and Gagnon, C.P.: Cable Corrosion, ASCE Press, 1996.
- 8) 橋本定明：長大つり橋のケーブル防錆法，塗料の研究，Vol. 107, pp. 34-39, 1983.
- 9) 日刊工業新聞社：塗料便覧。
- 10) 理工出版社：解説塗料学。
- 11) 岡井敏博：新規防錆顔料，TECHNO-COSMOS, Mar., Vol.1, pp.17-23, 1992.
- 12) 日本シーリング材工業会：コーキングハンドブック。
- 13) 坂本良文，鈴木恵太：白鳥大橋ケーブル防食構造に関する検討，土木学会北海道支部年次技術研究発表会，1-81, 1997.
- 14) 高田敦，渋谷谷，山地健二，坂本良文：白鳥大橋ケーブルラッピング施工，第52回土木学会年次学術講演

- 会, pp.384-385, 1998.
- 15) 山田光二, 茅根道生: 長大橋ケーブルの防食, 製鉄研究, 第 285 号, pp.88-96, 1975.
- 16) Thomas, J. and Mcfarland, T. N.: Neoprene Elastomeric Cable Wrap System for Suspensuion and Cable-Stay Bridges, *Materials Perfaormance*, vol.29, pp.38-40, 1990.
- 17) 岡野 哲: 防食技術の変遷, 橋梁と基礎, 8, pp.107-110, 1998.
- 18) 藤野陽三, 上田雅俊, 延藤 遵: 鋼ボックス内部の腐食環境と防錆について, 土木学会構造工学論文集, vol.36A, pp.1-11, 1990.
- 19) 大日本塗料(株): 防食塗料と塗装, 日本塗料新聞社, 1996.
- 20) (社)日本鋼構造協会: 鋼橋塗膜調査マニュアル, JSSC テクニカルレポート, 1993.
- 21) 日本鉛亜鉛需要研究会: 亜鉛とその耐食性, 1975.
- 22) ユーリック H. H., レヴィー R. W.: 腐食反応とその制御 (第 3 版), 産業図書, 1994.
- (1998. 12. 7 受付)

## CORROSION PERFORMANCE EVALUATION OF SUSPENSION BRIDGE CABLE CORROSION PROTECTION METHODS BY FIELD EXPOSED TESTS

Kazuhiko FURUYA, Makoto KITAGAWA, Shun-ichi NAKAMURA,  
Keita SUZUMURA and Morio SEIRYU

The cable specimens with various kinds of corrosion protection methods were exposed near the sea side for four years, and the inside were investigated by opening them. The specimens include the conventional systems used on the Innoshima and Onaruto Bridges, those manly used on USA and UK, and newly proposed methods with improved pastes and S-wire wrapping. The difference was not clear on their appearances among the specimens, but corrosion was detected inside the cable. But, the newly proposed methods showed better performance against corrosion compared with the conventional methods and overseas methods.