

# 吊り橋ハンガーロープの自動浸漬塗装方法およびその塗料の開発について

Automated Paint Application to Hanger-ropes for Cable Suspension Bridges



関西ペイント販売(株)  
建設塗料本部  
防食技術部(大阪)  
末廣 明  
Akira  
Suehiro



本州四国連絡高速道路(株)  
しまなみ尾道管理  
センター付  
小原 誠  
Makoto  
Ohara



関西ペイント販売(株)  
建設塗料本部  
建設塗料営業部  
古江賢一  
Kenichi  
Furue

## 1. はじめに

吊り橋は主塔・補剛桁・メインケーブル・ハンガーロープから構成されている橋である。

これらの部材はそれぞれ役割を担っているが、ハンガーロープは補剛桁を支える機能を持ち、橋の強度を維持する上で重要な役割を担う部材である。(写真1)

従来からハンガーロープの防食は亜鉛メッキと塗装による方法で施工されている。

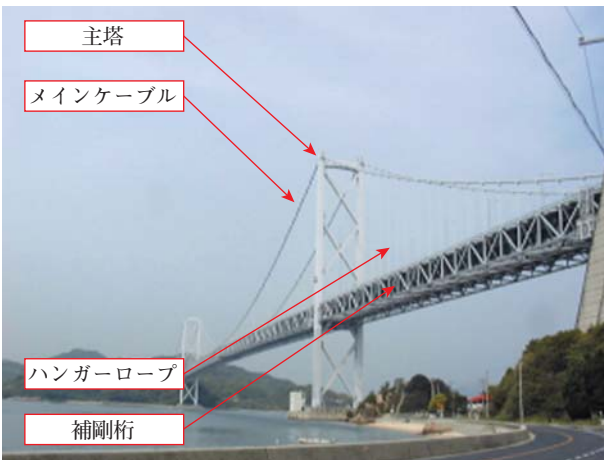


写真1 吊り橋の構造

しかしながら、近年の調査・点検などでハンガーロープ内部に腐食が見られたことから、より有効な腐食進行防止の検討が必要となった。

このロープは図1、写真2に示すような形状であり、亜鉛メッキ鋼線を螺旋状に結んだものである。

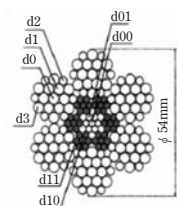


図1 ハンガーロープ断面図



写真2 ハンガーロープ

ハンガーロープの新設時の防食法は亜鉛メッキによる犠牲防食と塗装による環境遮断効果によるものであった。塗装仕様は、下塗りにエポキシ樹脂塗料、上塗りに塩化ゴム系塗料またはポリウレタン樹脂塗料を用いた硬質塗膜による表面被覆防食法が採用されていた。今回の塗料開発・塗装方法の検討では、既に自動車などが通行している吊り橋のハンガーロープを補修塗装し、腐食の進行を抑制することが課題である。

一方、ハンガーロープの塗装については過去に自動浸漬塗装法<sup>1)</sup>を確立し、実用化されてきた。この塗装法は新設時の塗装方法として実橋に適用され多くの実績を有している。

この塗装法をベースに、ハンガーロープ塗替塗装に必要な機能を付与した塗料の開発・塗装方法の検討について以下に紹介する。

## 2. ハンガーロープの腐食について

ハンガーロープの腐食事例を見てみると、撚(よ)り線の間(谷部)に塗膜のワレが発生している事例や、撚り線の間(谷部)に赤さびが発生している事例などがある。(写真3)



写真3 ハンガーロープの腐食事例

これは外観観察からわかることであるが、ハンガーロープの内部も腐食しているという調査報告もある。

ハンガーロープの腐食のメカニズムは以下のように考えられる。

- ①塗膜の劣化とロープの振動により、撚り線の上に塗膜ワレが生じる。

- ②塗膜フレ発生箇所から腐食因子である水分・塩分・酸素がロープ内部に進入する。
- ③ロープ内部の亜鉛メッキ鋼線の腐食が進行する。  
ハンガーロープの塗替塗装においては、塗膜のフレ対策およびロープ内部の防食が必要である。

### 3. ハンガーロープ塗替用塗料の開発

ハンガーロープの塗替塗装に求められる機能としては、従来の塗料よりもロープの振動・動きに追従できる柔軟性と塗料が内部浸透しやすい塗装方法・条件が求められる。

また、自動車などが通行している中での塗替塗装作業であり、塗料の飛散対策が必要である。

#### 3.1 塗膜のフレ対策（柔軟型塗料の適用）

メインケーブルなどでも類似した事例があり、現在メインケーブルの塗替用塗料としては柔軟型エポキシ樹脂系塗料と柔軟型ふっ素樹脂系塗料が用いられている。

この柔軟型塗料系は多くの実績があり、この考え方をハンガーロープ補修用塗料にも適用し開発を行った。メインケーブル用の柔軟型塗膜の性能を表1に示す。

表1 メインケーブル用柔軟型塗膜の性能

試験項目	メインケーブル用柔軟型塗膜
伸び率*1 (%)	70
内部応力 (MPa)	2.7
塩水噴霧試験 1,500hr	異常なし
耐複合腐食サイクル試験 JIS法 250サイクル	異常なし
酸素透過阻止性*2 (製科研式) mg/cm <sup>2</sup> ・24hr	0.2×10 <sup>-2</sup>
水蒸気透過阻止性*3 mg/cm <sup>2</sup> ・24hr	4.8×10 <sup>-2</sup>

※1：本州四国連絡橋公団 ケーブル類用塗替塗装系X4の伸び率試験方法に準拠。

※2：日本道路公団 JHS 417の酸素透過阻止性試験方法に準拠。

※3：日本道路公団 JHS 417の水蒸気透過阻止性試験方法に準拠。

#### 3.2 自動浸漬塗装への応用

##### 3.2.1 塗料粘度と膜厚

メインケーブル用の柔軟型塗料は、刷毛塗りを主体に開発されたものであり、自動浸漬塗装に適用するには、可使用時間などの改良が必要である。

図2は、自動浸漬塗装における粘度と膜厚の関係である。この結果から、①粘度が高くなれば膜厚も厚くなる傾向に

ある。②粘度が高くなると膜厚のバラツキが大きくなる。ということが分かる。即ち、自動浸漬塗装の場合、塗料の粘度が塗着する膜厚を左右する。

自動浸漬塗装で均一な膜厚を確保するには、塗装中の粘度を一定に保つ必要がある。

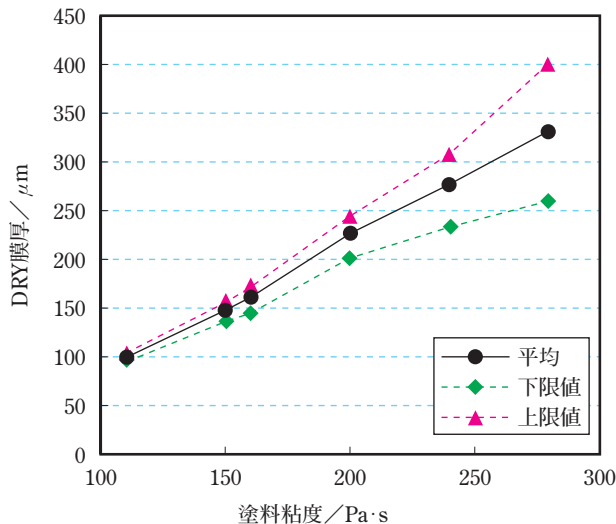


図2 自動浸漬塗装における塗膜厚と粘度の関係

〈粘度測定条件〉  
粘度計：リオン式粘度計  
液温：30℃（浸漬塗装時の温度）

##### 3.2.2 塗料の可使用時間

メインケーブル用の従来の柔軟型エポキシ樹脂塗料は可使用時間が短く、自動浸漬塗装に適していない。そこで、加熱残分・硬化剤の種類や当量比など種々検討し、自動浸漬塗装用の柔軟型エポキシ樹脂塗料を開発した。一方、上塗りである柔軟型ふっ素樹脂塗料は可使用時間が長く粘度変化も少ないことからメインケーブル用の既存製品を適用した。図3に上記塗料のベース・硬化剤を混合した後の経時粘度変化を示す。

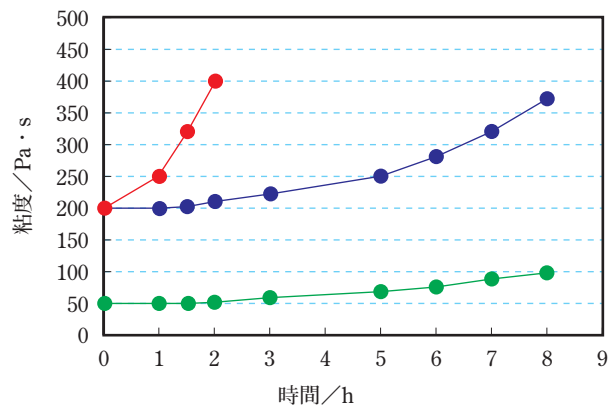


図3 塗料混合後の粘度変化 (20℃)

● ハンガーロープ用柔軟型エポキシ樹脂塗料  
● メインケーブル用柔軟型エポキシ樹脂塗料  
● 柔軟型ふっ素樹脂塗料

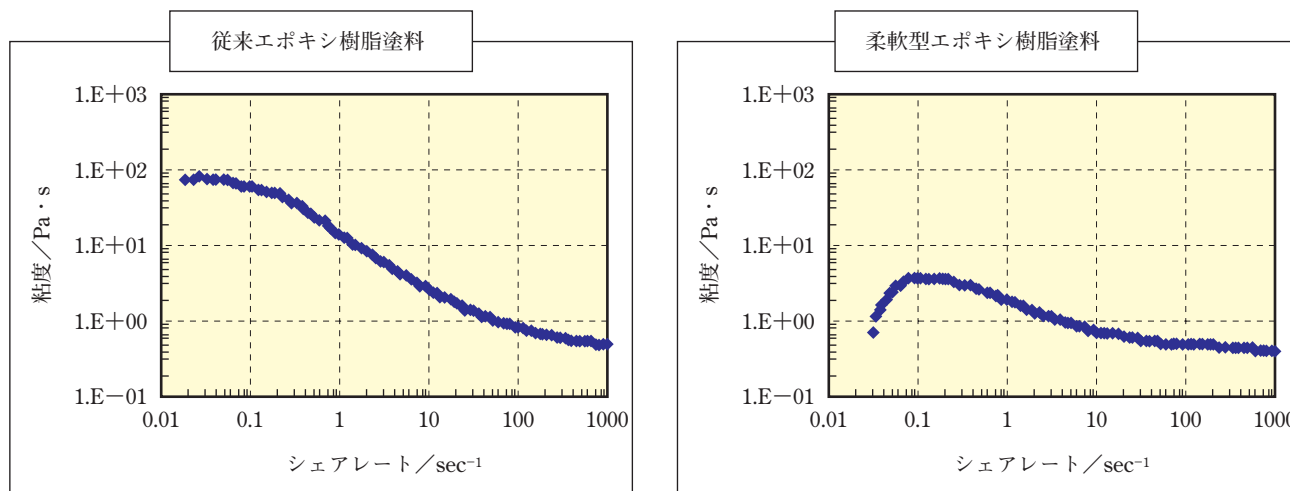


図4 各塗料のずり速度と粘度の関係

測定機器：Haake RS-150  
測定温度：23℃

### 3.3 塗料のロープ内部への浸透

ハンガーロープの腐食を抑制する機能として、下塗り塗料（柔軟型エポキシ樹脂塗料）のロープ内部への浸透性が重要である。そこで、柔軟型エポキシ樹脂塗料の粘性についてタレ止め剤・レオロジーコントロール剤を用いて検討を行った。図4は従来ハンガーロープに適用していたエポキシ樹脂塗料と今回開発した柔軟型エポキシ樹脂塗料（自動浸漬塗装用）のずり速度と粘度の関係を示す。

今回開発した柔軟型エポキシ樹脂塗料は、低ずり速度での粘度が比較的に低いことが分かる。即ち、ロープ内部への浸透しやすい粘性が得られていると考える。

### 3.4 モデル塗装試験

新たに開発した柔軟型エポキシ樹脂塗料を用いてモデル塗装試験を実施した。

写真4は、実際のハンガーロープ（3m）に自動浸漬塗装を行い、内部に塗料が浸透しているかどうかの検証を行ったものである。その塗装試験結果の一例を表2に示す。試験A～Cは塗料粘度、貯留高さの水準が異なる試験結果である。この貯留高さとは、塗装機中に留める塗料の高さを表しており、この貯留高さを高くすることで塗料の重量圧が掛かることおよびロープと塗料が接する時間が長くなるので、ロープ内部に塗料が浸透しやすいと考えた。従来の自動浸漬塗装では、貯留高さが15cm程度であったが内部への浸透性を考慮し30cmで試験を実施した。試験結果の考察を以下に説明する。

塗料粘度とロープ表面の膜厚は相関性があり、試験A・Bの場合（塗料粘度=150Pa·sの場合）は130μm程度の膜厚が塗布され、試験Cの場合（塗料粘度=200Pa·sの場合）は230μm程度の膜厚が塗布される。

塗料使用量に着目すると試験AとBでは、ロープ表面の膜厚はほぼ同じであるが塗料使用量は1mあたり168gも異

なる。実験誤差を加味してもかなりの差である。この塗料使用量の差は、ロープ内部への浸透量の差であると考えられる。さらにロープ表面の膜厚から理論使用量を算出した結果と比較してみる。



写真4 モデル塗装試験状況

表2 柔軟型エポキシ樹脂塗料のモデル塗装試験結果

試験No	A	B	C
塗料粘度 (リオン式 Pa·s)	150	150	200
貯留高さ	15cm	30cm	30cm
塗装速度 (m/分)	1	1	1
塗料使用量 (g/m)	203	371	408
ロープ表面の膜厚 (μm)	127	133	229
ロープ表面の膜厚から算出した理論塗料使用量 (g/m)	71	74	124

<理論使用量の計算条件>

- ロープ1mあたりの表面積：0.22m<sup>2</sup>
- 塗料の加熱残分：72%
- 塗料の密度：1.26g/cm<sup>2</sup>
- 溶剤の密度：0.87g/cm<sup>2</sup>
- 塗料の希釈率：150Pa・sの場合 15%  
200Pa・sの場合 12%

試験A・Bでは、約73g/m程度、試験Cでは、124g/mとなる。試験の誤差や撚り線の間の膜厚がやや厚くなることを加味しても、各々の塗料使用量と理論塗料使用量との差はかなり大きく、試験C（貯留高さ30cmの場合）の差異は約290g/mもある。

これらは、ロープ内部に浸透した量であり、ロープ内部腐食防止に有効であると考えられる。

上述の検証は、定量的な見地での浸透性評価であるが、実際にこれら試験ロープを切断・解体し塗料の浸透状況を確認した。写真5はロープ内部の撚り線の写真である。

この写真からも分かるように実際に塗料はロープ内部に浸透している。



写真は塗装後のハンガーロープを切断した断面である。ハンガーロープの周囲の白い部分が塗膜であり、塗料がロープ内部にまで浸透していることが分かる。

写真5 ロープ内部の塗料浸透状況

表3 開発品の性能

試験項目	ハンガーロープ用 柔軟型塗膜
伸び率*1 (%)	100
内部応力 (MPa)	2.7
塩水噴霧試験 1,500hr	異常なし
耐複合腐食サイクル試験 JIS法 250サイクル	異常なし
酸素透過阻止性*2 (製科研式) mg/cm <sup>2</sup> ・24hr	0.3×10 <sup>-2</sup>
水蒸気透過阻止性*3 mg/cm <sup>2</sup> ・24hr	5.0×10 <sup>-2</sup>

※1：本州四国連絡橋公団 ケーブル類用塗替塗装系X4の伸び率試験方法に準拠。

※2：日本道路公団 JHS 417の酸素透過阻止性試験方法に準拠。

※3：日本道路公団 JHS 417の水蒸気透過阻止性試験方法に準拠。

3.5 開発品の性能について

今回、ハンガーロープ塗替用として開発した塗料の塗装系を以下の表3に示す。

塗装系は柔軟型エポキシ樹脂塗料 (180μm) ~ 柔軟型ふっ素樹脂塗料 (30μm) とした。

4. 浸漬塗装機の改良

吊り橋のハンガーロープの塗替塗装作業は既に自動車などが通行している橋で行われることが想定される。従って、作業時の塗料の飛散などについては新設時よりも留意する必要がある。

ここでは、浸漬塗装機・塗装方法の改良ポイントの一部を紹介する。

この浸漬塗装機・塗装方法の改良は本州四国連絡高速道路株式会社 (旧 本州四国連絡橋公団) 殿と株式会社ブリッジエンジニアリング殿と共同で研究開発を行った。

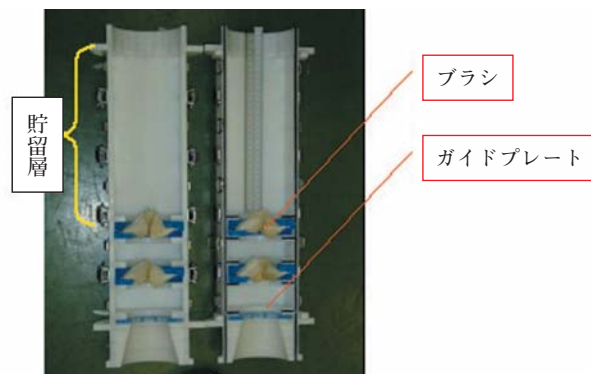


写真6 浸漬塗装機内部の状態

写真6は浸漬塗装機の内部の状態を写したものである。

この浸漬塗装機は、筒状の形をしており、写真中央のブラシの間にロープを挟み込むようにセットされる。筒の上部には塗料を留めておく層があり、この筒が下へ移動することで浸漬塗装される。

<改良のポイント>

- ①塗料を留めておく層を高くした。(貯留高さを30cmまで可能。)
- ②ロープを挟み込むブラシを1段増やし、2段とした。
- ③ガイドプレートを取り付け、浸漬塗装機に回転機能を設けた。

塗料飛散を防止するための工夫としてハンガーロープを挟み込むブラシを2段にした。

このことで浸漬塗装機の下部からの塗料の漏れを防ぐ効果と浸漬塗装機の左右の揺れが少なくなるという効果が得られた。また、浸漬塗装機に回転機能を持たせたことでロープとブラシの隙間がより少なくなった。図5は従来のブラシの動きと改良後のブラシの動きを表している。

改良後のブラシの動きは撚り線の形状に沿ってブラシが回転することが図から分かる。



これら塗料・浸漬塗装機の実用性を確認するため、実際の吊り橋で試験を実施し、概ね良好な結果が得られた。  
(写真7)

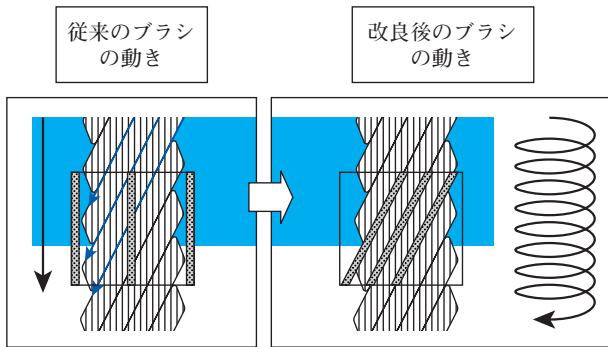


図5 塗装機の回転機能について



写真7 吊り橋での塗装試験状況

## 参考文献

- 1) 菊田真人、梶浜哲二郎、松村真佐男：「長大橋ハンガーロープの自動塗装装置の開発」、塗料の研究、**110**、p56～59 (1985)
- 2) 加藤裕司、長野孝行：「吊り橋ハンドロープの浸漬塗装工法の開発」、1999年度 色材研究発表会講演要旨集、p148、**149**
- 3) 本州四国連絡橋公団編：「吊橋ケーブル防食システム検討報告書」、1996年3月
- 4) 加藤裕司、酒井政義：「長大橋ハンドロープの浸漬塗装工法の開発」、塗料の研究、**134**、p43～p49 (2000)

## 5. おわりに

本稿では、ハンガーロープ塗替用の塗料開発経緯・性能について紹介した。これらの研究成果が、多くの吊り橋構造の橋梁または、ハンガーロープに類似した構造物の維持管理に携わる方々に役立てば幸いである。

## 6. 謝 辞

本研究にあたり多大なるご協力を頂いた本州四国連絡高速道路株式会社 (旧 本州四国連絡橋公団) 殿と株式会社ブリッジエンジニアリング殿に感謝いたします。