

狭小トンネル用耐食性電車線支持物の開発

片山 信一* 白木 理倫** 松村 周**

鈴木 正夫*** 太田 聡***

Development of Anti-corrosive Supporting Equipment of Overhead Contact Line for Narrow Section Tunnels

Shin-ichi KATAYAMA Tadanori USUKI Itaru MATSUMURA

Masao SUZUKI Satoshi OOTA

There are narrow section tunnels (tunnels not considering space for overhead contact line when constructed) on non-electrified lines. When electrifying non-electrified lines, supporting equipment of overhead contact lines for narrow section tunnels are required. We developed anti-corrosive supporting equipment for narrow section tunnels particularly considering application to coastal tunnels. We confirmed improvement in anti-corrosive property through energized exposure test at an anti-salt testing station.

キーワード：電車線支持物，狭小トンネル，腐食，絶縁水平パイプ，亜鉛めっき鋼，塗装

1. はじめに

非電化線区を電化する場合、建設時に架空電車線の設置スペースを考慮していないトンネル、いわゆる狭小トンネルに対応する特殊な電車線支持物（以下、支持物と略）が必要になる。開業時期が古い海岸沿いの非電化線区には短い狭小トンネルが点在することが多い。そのようなトンネルに設置される支持物は、絶縁を目的に表面距離に余裕を持たせることが困難である。一方で、支持物は塩分を含んだ風の吹き込みやトンネル漏水による汚損を受けるにもかかわらず降雨による汚損物除去効果（雨洗効果）がなく、絶縁および腐食に関して非常に厳しい環境に置かれる。

そこで、海岸沿いの狭小トンネルから撤去された支持物等について腐食状況を調査し、その結果に基づいて支持物構成部材である絶縁水平パイプ（後述）と亜鉛めっき鋼製金具の耐食性向上策を検討した。さらに、試作品を塩害試験場における暴露試験に供したところ効果が認められたので報告する。

2. 対象とした狭小トンネル用支持物

今回対象とした狭小トンネル用支持物は絶縁水平パイプを適用した方式である。その一例を図1に示す。絶縁水平パイプは鋼の丸棒をFRPで被覆したもので、限られたスペースで絶縁のための表面距離を確保するために用

いられている。本方式は紀勢本線新宮～和歌山間電化（1978年供用開始）にあたって開発された¹⁾。

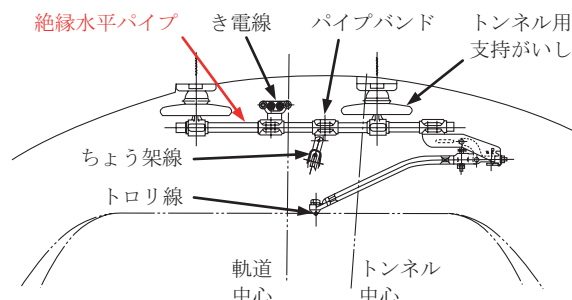


図1 絶縁水平パイプを用いた狭小トンネル用支持物の例（曲線区間用）（文献1）の図に加筆

3. 海岸沿いにおける支持物等の腐食状況調査

耐食性向上策を検討するため、明かり区間を含め、海岸沿いにおける支持物等の腐食状況調査を行った。

3.1 狭小トンネル用支持物

海岸沿いの狭小トンネルから撤去された支持物の外観を図2に示す。架設期間は17年である。全体が汚損しており、特に支持がいしの汚損が著しい（図2(a), (b)）。がいしの金具部分はキャップ、ピンともに全体的に亜鉛めっきが腐食して、部分的に赤茶色の鉄の錆が認められた。特にピンでは磁器部との接着部付近に鉄の錆が認められた（図2(c)）。パイプバンドも全体的に亜鉛めっきが腐食して、部分的に赤茶色の鉄の錆が認められた（図2(d)）。絶縁水平パイプは部分的に鉄の錆の付着による赤茶色の汚損が認められた（図2(e)）。表1に絶縁水平パイプの絶縁抵抗測定結果を示す。表面の鉄錆が付着し

* 電力技術研究部 集電管理研究室（現 三和テック株式会社）

** 電力技術研究部 集電管理研究室

*** 浮上式鉄道技術研究部 電磁路技術研究室

特集：電力技術

た赤茶色の箇所および白色の箇所に測定用端子を当て、乾燥状態と霧吹きによる湿潤状態で測定を行った。赤茶色に汚損した部分は絶縁抵抗の低下が認められた。

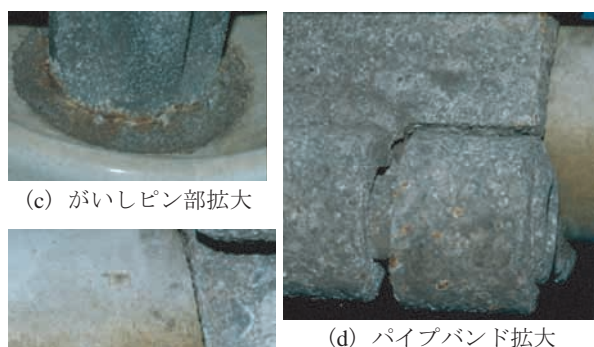
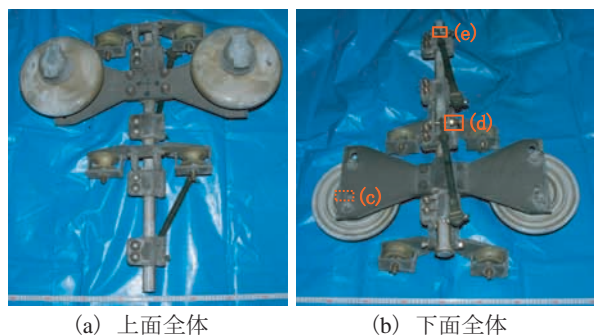


図2 狭小トンネル用支持物撤去品の外観

表1 絶縁水平パイプの絶縁抵抗測定結果 (狭小トンネル撤去品)

部位	絶縁抵抗 (MΩ)	
	乾燥	湿潤
赤茶色の箇所	200	0.1
白色の箇所	∞	∞

3.2 明かり区間支持物

前節のトンネル直近の明かり区間から撤去された支持物の外観を図3に示す。架設期間は17年である。がいしではキャップが腐食してその腐食生成物(亜鉛および鉄)が流れ落ちたと思われる汚損が磁器部表面(かさ側)に認められた(図3(c))。ピンでは赤茶色の鉄の錆が著しかった。本支持物は明かり区間でありながら絶縁水平パイプが使用されており、それを把持するパイプバンドから錆が流出し周辺に付着していた(図3(d))。表2に絶縁水平パイプの絶縁抵抗測定結果を示す。赤茶色の汚損部分か白色部分かにかかわらず、湿潤状態では∞を維持できていなかった。

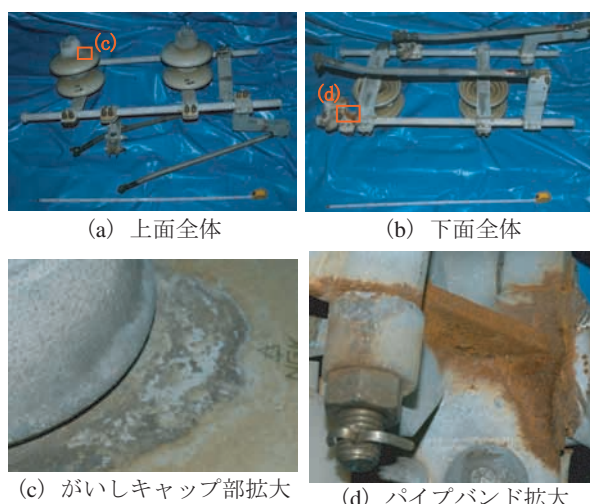


図3 明かり区間支持物撤去品の外観

表2 絶縁水平パイプの絶縁抵抗測定結果 (明かり区間撤去品)

部位	絶縁抵抗 (MΩ)	
	乾燥	湿潤
赤茶色の箇所	2000	2
白色の箇所	∞	2

3.3 明かり区間引留部懸垂がいし

明かり区間の引留部に架設されている懸垂がいしの外観を図4に示す。キャップにおいては亜鉛めっきが腐食して、その腐食生成物が流れ落ちたと思われる汚損が磁器部表面(かさ側)に認められた(図4(a))。ピンにおいては、赤茶色の鉄の錆が磁器部との接着部付近に認められた(図4(b))。

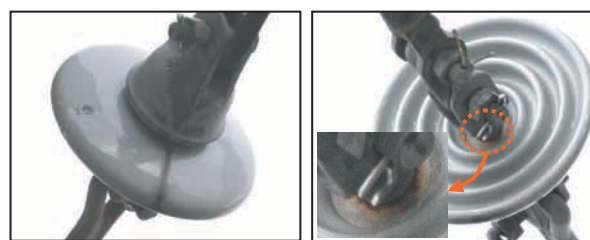


図4 明かり区間引留部懸垂がいしの外観

4. 腐食対策と効果の検証

前章に述べた海岸沿いにおける腐食状況調査結果に基づき、狭小トンネル用支持物の構成部材として絶縁水平パイプと、パイプバンドやがいしの金具部分の亜鉛めっき鋼を対象として耐食性向上策を検討し、試作・試験を行った。

絶縁水平パイプには、浮上式鉄道において地上コイル締結用ブッシュへの適用を目指して開発された耐久性の高いFRP筒形材²⁾に適用されている製法(Sheet Winding法)を応用した。Sheet Winding法は、強化繊維(ガラス繊維やカーボン繊維)に樹脂を含浸させたシー

ト(プリプレグという)を金型(金属棒)に巻き付け、加熱成形してFRPパイプを製作するものである。積層回数や積層する材質、繊維の方向等をコントロールすることにより、さまざまな寸法、形状、特性のFRPパイプを製作することが可能である³⁾。本開発においてはまず1次試作を行い、その結果を踏まえ2次、3次試作を行った。その構造を図5に、仕様を表3に示す。現用の絶縁水平パイプは鋼心が荷重を負担している。本開発品も鋼心入りとしたが、Sheet Winding法で製造されたFRPパイプは中空でも荷重負担能力を有し、業務用釣竿等への適用例がある。

亜鉛めっき鋼についてはチタン等耐食性が高い材質への置き換えも考えられるが、コストの観点から塗装等の表面処理で亜鉛めっきの劣化を防ぐ方法⁴⁾を検討した。

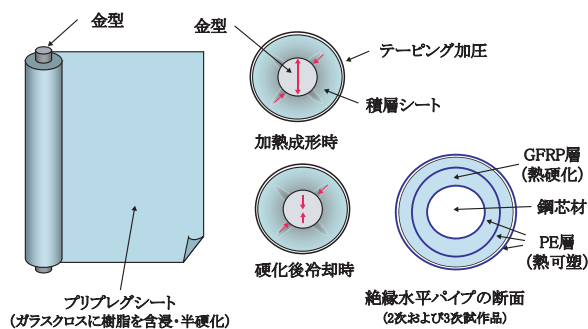


図5 試作絶縁水平パイプの構造

表3 試作した絶縁水平パイプの仕様

	1次試作品	2次試作品	3次試作品	
寸法	φ 34mm × 長さ 1010mm			
製法	Sheet Winding 製法			
層 構 成	心材	一般構造用圧延鋼材 (SS400)		
	内層	GFRP	PE	PE
	↓	PE	GFRP	GFRP
	↓		PE	PE
	↓		GFRP	GFRP
外層		PE	PE	
最外層 処理	2次硬化処理	PE層のみ	硬化前のパイプにシュリンク処理(同時加工)後、シュリンクチューブ除去	
端部 処理	EP系接着剤による封止	GFRP円柱とEP系接着剤による封止	GFRP円柱とEP系接着剤による封止	
色	群青色	薄緑色	薄緑色	
試作の ねらい	絶縁水平パイプ製作へのSheet Winding法の適用検討	最内層と中間層にもPE層を配置し心材への遮水性強化	硬化時のテーピングによる凹凸を減らすため、熱収縮チューブによる一体成型の適用	

GFRP：ガラス繊維強化プラスチック、PE：ポリエチレン
EP：エポキシ

4.1 絶縁水平パイプ1次試作品試験

4.1.1 試験片

絶縁水平パイプの1次試作品のほか、比較のため現用品も試験に供した。現用品のパイプバンド(本体は亜鉛

めっき鋼、ボルト・ナットはSUS304またはSUS XM7)と組み合わせて試験を行った。

4.1.2 試験方法

鉄道総研の勝木塩害試験場(新潟県村上市鶴泊)で暴露試験を行い耐食性を評価した。まず無加圧での暴露試験を2006年12月に開始し、2010年9月までの3年9ヶ月間実施した。

課電暴露試験は絶縁水平パイプを斜めに設置し、パイプバンドを500mm間隔で2個取り付け、その間に電圧を加えた。課電電圧は直流3.0kVで、上側のパイプバンドを正極とした。暴露期間は2008年6月～2009年3月の9ヶ月間である。

4.1.3 試験結果

図6に無加圧での暴露開始から3年9ヶ月後の絶縁水

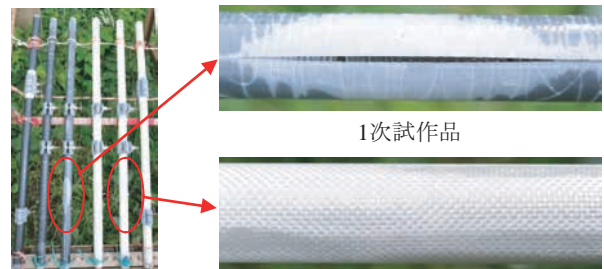


図6 無加圧暴露試験における絶縁水平パイプ1次試作品外観(暴露期間3年9ヶ月)



(a) 課電暴露試験状況



(b) 1次試作品下面



(c) 現用品下面

図7 課電暴露試験後の絶縁水平パイプ1次試作品外観(暴露期間9ヶ月)

特集：電力技術

平パイプの外観を示す。現用品は表面が劣化して繊維が毛羽立っていた。1次試作品は2009年3月（暴露開始から2年3ヶ月後）に端部から水分が浸入している様相が、2010年4月（同、3年4ヶ月後）には外側のPE（ポリエチレン）層シートを巻き付けたときの縦方向の接着部が剥離している様相が認められた。2010年7月（同、3年7ヶ月後）にはPE層の縦方向接着部が開口した。

図7に9ヶ月間の課電暴露試験後の絶縁水平パイプの外観を示す。いずれの絶縁水平パイプも2個のパイプバンド間において下面が焼損しており、特に現用品の焼損が著しかった。いずれも亜鉛めっき鋼製のパイプバンドが腐食しており、その腐食生成物が絶縁水平パイプの下面に流れ落ちたため、絶縁が低下し電流が流れて焼損したものと考えられる。

4.2 絶縁水平パイプ2次試作品および亜鉛めっき鋼腐食対策試験

4.2.1 試験片

(1) 絶縁水平パイプ

外層に紫外線吸収を目的としたPE（ポリエチレン）層を配置した1次試作に対し、2次試作では積層パイプの最内層と中間層にもPE層を配置し、芯材への遮水性を強化した。

(2) 亜鉛めっき鋼の腐食対策

パイプバンドについては1次試作品の課電暴露試験結果から、腐食生成物が流れ落ちることにより絶縁が低下し絶縁水平パイプの焼損を招いたと考えられた。そこで、次の3つの表面処理による腐食対策を検討した。

①飽和ポリエステル樹脂の粉体塗装

飽和ポリエステル樹脂のコーティングはレール締結装置の電食対策として検討された例がある⁵⁾。

②エポキシ系樹脂塗装+ステンレスフレック含有固体潤滑塗膜の重ね塗り

亜鉛めっき層の上に施すことができる塗装で、塗膜が損傷しても亜鉛めっきによる防食作用が期待でき、自動車等に用いられる例がある。

③セラミック（アルミナ）溶射⁶⁾

アルミナは耐熱性と耐食性に優れる⁷⁾。

なお、②は後述するように結果が良好だったので、パイプバンドについては2枚の部品でパイプをはさみ込む形状

にしたもの（ヒンジレス形状）を、がいしの金具部分については磁器部との組立前に金具の全面に塗装を施したものを製作し、これを「耐食性提案品」と称する（4.3節参照）。

4.2.2 試験方法

絶縁水平パイプの課電暴露試験は4.1.2項と同様である。懸垂がいしはφ180について試験を行い、キャップを上にして設置した。課電暴露試験の試験片と課電電圧の組み合わせを表4に示す。

4.2.3 試験結果

(1) 腐食対策①

腐食対策①を施したパイプバンドと、現用品および2次試作品の絶縁水平パイプを組み合わせた課電暴露試験を実施した。課電電圧3.0kVにおける腐食状況を図8に示す。暴露期間は2009年6月～2010年11月の17ヶ月間で、図8は撤去後の状況である。暴露開始4ヶ月後に上側（正極側）のパイプバンドのボルト・ナット周辺に焼損が認められ、1年3ヶ月後には焼損はさらに著しくなった。現用品の絶縁水平パイプではパイプも著しく焼損した。課電電圧1.5kVでも状況は同様であった。これは、ボルト・ナット取付部付近が腐食して、流れ出した錆を経由して電流が導通したことによると考えられる。飽和ポリエステル樹脂粉体塗装は、電流の導通や放電により焼損してしまうため、耐アーク性を兼ね備えた腐食対策が必要と考えられた。

絶縁水平パイプは、現用品と比較し2次試作品では焼損状況から改善が認められた。改良すべき点としてパイプ表面に残存するテーピング除去後の凹凸があった（図8(a)の試験片では端部に存在）。

なお、がいしの金具部分の腐食対策として①を施す試験は上述の結果を踏まえて取り止めた。

(2) 腐食対策②

がいしの金具部分へ腐食対策②を適用する試験を行っ



図8 課電暴露試験における2次試作品パイプとパイプバンド（腐食対策①）の外観（暴露期間17ヶ月）

表4 課電暴露試験の試験片および課電電圧（kV）

試験片種別		亜鉛めっき鋼（パイプバンド、がいしの金具部分）の腐食対策				
		なし	①	②	③	提案品*
絶縁水平パイプ	現用	3.0	1.5, 3.0	3.0	3.0	
	1次試作品	3.0				
	2次試作品		1.5, 3.0			
	3次試作品					3.0
懸垂がいし				3.0		

*パイプバンドはヒンジレス形状+②の塗装
懸垂がいしは組立前に金具全面に②の塗装

た。なお、この段階の試験では既に磁器部と金具部を接着し組み立てたがいしに塗装を施したため、塗装は金具表面のみであり、キャップ内面は塗装されていない。

課電電圧 3kV におけるがいしの腐食状況を図 9 に示す。暴露期間は 2009 年 10 月～2010 年 11 月の 13 ヶ月間で、図 9 は 11 ヶ月後の状況である。腐食対策②におけるがいし磁器部への錆の流出は現用品に比べ明らかに少ない。わずかな錆の流出はキャップ内面の腐食によるものと考えられ、キャップ内面も塗装することによりさらなる腐食低減が見込まれる。

腐食対策①で見られたように、一般的な塗膜は絶縁物のため、流出した腐食生成物で電流の経路ができてしまった場合は専らその部分が著しく焼損すると考えられる。そこで、腐食対策②の効果の理由を調べる目的で塗膜の絶縁抵抗を測定した。抵抗測定用のサンプルは一般の浴室用タイル(絶縁物)に幅 10mm、厚さ 0.26～0.28mm でラインを描いたもので、長さ 50mm で測定を行った。その結果、抵抗値は 0.1～0.35MΩ、抵抗率は 5.2～19.6Ωm であった。塗膜が導電性を有する場合は漏れ電流が分散するため、局部的焼損が生じにくいものと考えられる。

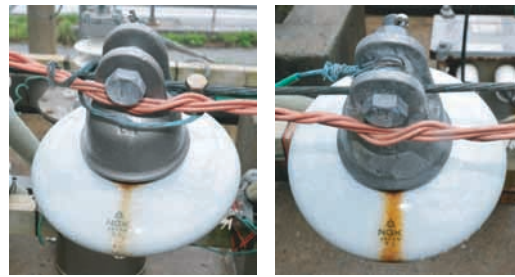
現用品の絶縁水平パイプに腐食対策②を施したパイプバンドを組み合わせて、電圧 3.0kV での課電暴露試験を行った。暴露期間は 2010 年 4 月～2010 年 11 月の 7 ヶ月間で、7 ヶ月後の腐食状況を図 10 に、7 月～9 月にかけての 70 日間の漏れ電流測定結果を図 11 に示す。現用のパイプバンドについても比較のため改めて同時に試験を行った。塩害が著しい冬期を経っていないため、両者とも外観上顕著な腐食、汚損はないが、漏れ電流は腐食対策②の方が有意に少なかった。現用パイプバンドでは目視ではわからないものの、腐食生成物の流出による絶縁性の低下がより大きかったと考えられる。

(3) 腐食対策③

現用品の絶縁水平パイプに腐食対策③を施したパイプバンドを組み合わせて電圧 3.0kV での課電暴露試験を行った。その際の腐食状況を図 12 に示す。試験は腐食対策②と同時に行った。暴露開始後 7 ヶ月時点でボルト接触部が腐食して焼損しているのが認められた。これは、ボルトの締め付けによりセラミックが割れて母材の鉄が錆び、流れ出した錆を経由した漏れ電流により焼損したのと考えられる。

4.3 狭小トンネル用耐食性支持物部材提案品

絶縁水平パイプについては 4.2.3 項 (1) で述べたように、2 次試作品でも改良すべき点 (パイプ表面に残存するテーピング除去後の凹凸) が認められた。そこで、熱収縮チューブを用いた一体成形を適用することにより、パイプ表面の平滑化を図った 3 次試作品を製作し、本開発における最終的な提案品とした。



(a) 腐食対策② (b) 現用品

図 9 課電暴露試験におけるがいし (腐食対策②) の外観 (暴露期間 11 ヶ月)



(a) 現用品パイプ+パイプバンド(腐食対策②)



(b) 現用品パイプ+パイプバンド(現用品)

図 10 課電暴露試験におけるパイプバンド (腐食対策②) の外観 (暴露期間 7 ヶ月)

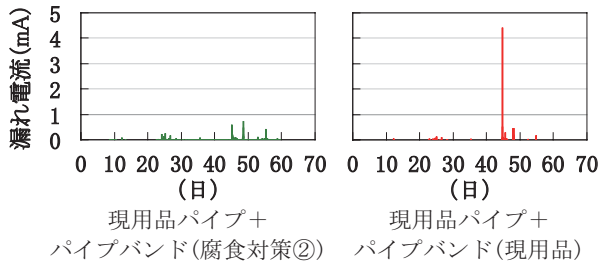


図 11 絶縁水平パイプの課電暴露試験における漏れ電流



図 12 課電暴露試験におけるパイプバンド (腐食対策③) の外観 (暴露期間 7 ヶ月)

一方、亜鉛めっき鋼については腐食対策②が良好な結果を示した。ただし、現用品のパイプバンドはヒンジ形状で、組立後に熔融亜鉛めっきを施しており、めっき後の塗装では覆いきれない部分がある。そこで、2 枚の部品でパイプを挟み込み、ボルト・ナットで固定する形状

特集：電力技術

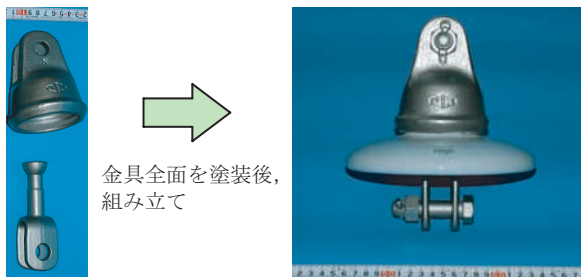


図 13 懸垂がいしの耐食性提案品

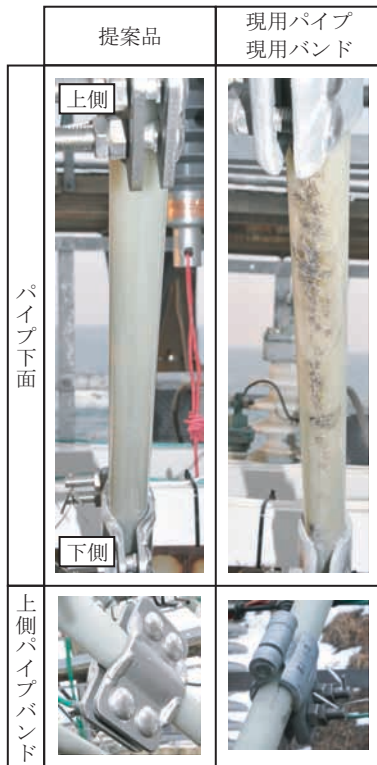


図 14 課電暴露試験における絶縁水平パイプの外観（暴露期間2ヶ月）

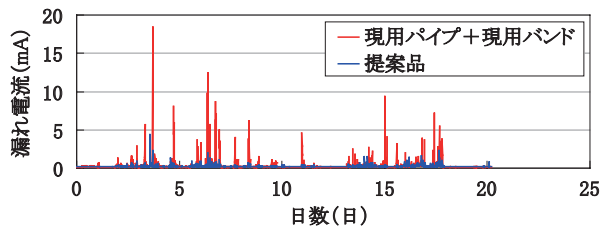


図 15 課電暴露試験における絶縁水平パイプの漏れ電流測定結果

（以下、ヒンジレス）とし、全面に腐食対策②の塗装を施したものを提案品とした。懸垂がいしについては、金具に塗装を施した後に磁器部と組み立てたものを提案品とした。懸垂がいし（提案品）の外観を図13に示す。

絶縁水平パイプとパイプバンドについては課電暴露試験に供した。2010年12月に試験を開始し2ヶ月経過（課電開始後2日で停電したため、20日間無加圧、点検時に再課電）時点の外観を図14に示す。比較のため同時に試験を開始した現用品どうしの組み合わせでは既にパイプ下

面が著しく焼損しているのに対し、提案品ではバンドの腐食、パイプの焼損とも認められない。約20日間にわたる漏れ電流測定結果を図15に示す。現用品どうしの組み合わせに比べ提案品では漏れ電流が大幅に小さくなっている。

5. まとめ

狭小トンネル用支持物の構成部材として、絶縁水平パイプと亜鉛めっき鋼製金具の耐食性向上策を検討し、試作品を塩害試験場における暴露試験に供した。

- (1) 絶縁水平パイプについては、製作にSheet Winding法を適用し、1次～3次試作品により改良を重ねた。その結果、3次試作品と(3)に述べる塗装を施したヒンジレス形状パイプバンドを組み合わせて課電暴露試験に供したところ、1ヶ月時点で焼損等の問題は認められず、絶縁抵抗、漏れ電流ともに現用品に比べ良好であった。
- (2) パイプバンドおよびがいしの金具部分の亜鉛めっき鋼については、エポキシ系樹脂塗装+ステンレスフレーク含有固体潤滑塗膜の重ね塗りが耐食性が良好で、漏れ電流による焼損も認められなかった。
- (3) 絶縁水平パイプについては3次試作品と全面に(2)の塗装を施すためヒンジレス形状にしたパイプバンドの組み合わせを、がいしについては磁器部との組立前に金具全面に(2)の塗装を施したものを耐食性提案品とした。

謝辞

腐食状況の現地調査および撤去品提供にあたり四国旅客鉄道株式会社にご協力頂いた。厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) 角野勇, 古沢孝司: 紀勢本線電車線路設備の概要と単線トンネル内架線支持方式, 電気鉄道, Vol. 32, No. 10, pp. 6-11, 1978
- 2) 松江仁, 饗庭雅之, 鈴木正夫: FRP プッシュを適用した推進浮上案内兼用コイルの応力評価, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 11, pp. 17-22, 2008
- 3) 鈴木正夫, 太田聡, 片山信一, 白木理倫, 長谷伸一, 重枝秀紀: SW (Sheet Winding) 製法による電車線支持用絶縁水平パイプの開発, J-Rail 2009, pp. 307-308, 2009
- 4) 大谷南海男: 金属表面工学, 日刊工業新聞社, pp. 223-232, 1962
- 5) 田中裕, 出野市郎: 経済的な電食防止法の開発, 鉄道総研報告, Vol. 5, No. 5, pp. 53-61, 1991
- 6) 祖川理: セラミックコーティング, 内田老鶴圃, pp. 4-7, 1996
- 7) 日本セラミックス協会: これだけは知っておきたいファイナセラミックスのすべて—第2版—, 日刊工業新聞社, pp. 17-18, 2005