

亜鉛めっきマルチケーブルの耐久性について

細居 清剛*1・西川 伸之*2・堀井 智紀*3

プレストレストコンクリート部材において「PC鋼材の防錆」は非常に重要な役割を担っており、構造物全体の耐久性にも大きな影響を与える。現在、橋梁用外ケーブルでは基本的な防錆方法であるセメントグラウトのほかにも防錆被覆PC鋼材が開発され、主として用いられている。本稿では橋梁用外ケーブルに使用を限定することにより、品質の安定性と施工性を大幅に向上させた「亜鉛めっきマルチケーブル」の各種試験結果ならびに性能について示した。

キーワード：外ケーブル，防錆方法，品質安定，施工性向上

1. はじめに

これまでPC鋼材の防錆方法については多くの議論，研究がなされ，とくに橋梁用外ケーブルにおいては透明シースや内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線など防錆被覆PC鋼材の開発が行われてきた。近年では，これらの技術は試験方法や仕様，施工手順などが確立され，一般的に使用されている。

しかしながら本稿で示す「亜鉛めっきマルチケーブル」は未だ使用実績は多くなく，その性能照査方法が確立されていない。今回，橋梁用の外ケーブルに用いた場合の耐久性を確認するために実施した各種性能確認試験の結果について報告する。

2. 亜鉛めっきPC鋼材

鉄鋼材料の防錆方法のなかでも亜鉛めっきの歴史は古く，現在でも世界中でもっとも用いられている方法の一つである。

しかしながら亜鉛めっきは犠牲防食と呼ばれる電気化学反応を特徴とした方法であり，腐食環境下では亜鉛自身を減少させながら内部鋼材の腐食を防ぐため，恒久的なものではない。また，フレッシュコンクリートのような強アルカリ環境下でも水素を発生させるため，PC鋼材のような高張力鋼に使用する場合，水素脆性破壊の懸念があった。このことから一般的には内ケーブルPC鋼材に用いられるケースは少なかった（現在では *fib Bulletin 64: Effect of zinc on prestressing steel* にその使用について言及されている）。その反面，亜鉛めっきにはさまざまな利点があり，①樹脂被覆PC鋼材の場合，防錆層が損傷して鋼材が露出した場合にその箇所は無防備状態になるのに対し，亜鉛めっきは損傷部周辺の亜鉛が反応し，露出した鋼材部を防錆する効果がある，②防錆層が金属で構成され，かつ薄膜

であるため樹脂被覆PC鋼材のような特殊なくさびではない通常のくさびで定着が可能である，③防錆層を形成した後にホットストレッチ処理を行うことが可能であるため，低リラクセーション品が容易に製作できる，ことがあげられ，国内外の斜張橋斜材に数多く用いられてきた実績の多い防錆方法である。したがってその性能を把握し，弱点を補って適切に使用することができれば非常に高性能な防錆PC鋼材であると考えられる。

3. 亜鉛めっきマルチケーブル

亜鉛めっきマルチケーブルは亜鉛めっきPC鋼より線を複数本束ねて一定のピッチで撚り合わせ，その外側を高密度ポリエチレンで一括被覆したケーブルであり，橋梁用外ケーブルに特化したPCケーブルである。図-1に亜鉛めっきマルチケーブルの概要を示す。

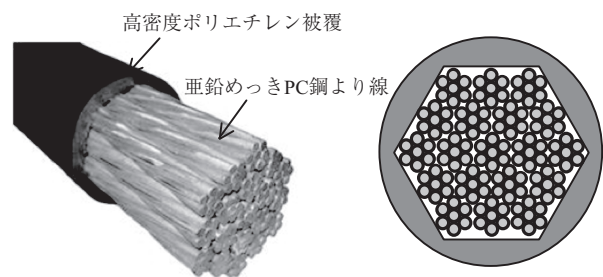


図-1 亜鉛めっきマルチケーブルの概要

外側の高密度ポリエチレンは従来より斜張橋斜材ケーブルに使用しているものと同材料としているため，耐候性や耐薬品性に非常に優れている。また，最小被覆厚さを6mm以上としているため，耐損傷性，耐水性，耐塩性にも優れている。ゆえに，①配線作業時や供用時に内部の亜鉛層が外的損傷を受ける可能性が低い，②外気とPC鋼

*1 Kiyotaka HOSOI：神鋼鋼線工業(株) 技術部 PC鋼線技術室

*2 Nobuyuki NISHIKAWA：大成建設(株) 関西支店 新名神高速道路 坊川第三橋工事作業所

*3 Tomonori HORII：神鋼鋼線工業(株) 技術部 PC鋼線技術室

材との接触が遮断されるため亜鉛の減少速度がきわめて遅くなる、といえる。また、工場ですべての防錆層を加工した後に現場搬入を行うため、① 輸送・保管時に紫外線劣化や腐食を発生する可能性が低い、② 品質が安定する、③ 施工現場での省工程化が促進される、などの特長がある。なお、定着端部の防錆材料には前述された弱点を補うため、ポリブタジエンやエポキシ樹脂などの亜鉛と無反応かつ、水密性が確保される材料を選択する。

4. 性能評価方法

これまで亜鉛めっきマルチケーブルの耐食性、耐候性などの性能評価は主に自社基準に基づき実施してきたが、(公社)プレストレストコンクリート工学会発刊の「PC箱桁外ケーブルに用いる防錆被覆PC鋼材の性能照査指針(平成24年4月)」に桁内で外ケーブルを使用する場合に必要な性能が明記されたことから、その試験方法をベースとした性能評価方法を新たに検討した。

この指針は主に防錆被覆PC鋼材についての指針とされているが、桁内外ケーブルとしての要求性能は同じであることから、試験供試体の仕様・作成方法などを一部変更することにより適用した。

4.1 試験項目

試験項目を表-1に示す。項目のうち、定着性、機械的特性、耐疲労性についてはPTシステム(ポストテンション方式において、PC鋼材、定着具、被覆材などから構成されたもの)として所定の機能が確保されているかを、それ以外の項目はPC鋼材の腐食からの保護機能が確保されているかを確認することが目的である。試験供試体はフレットング疲労試験、引込摩耗試験には実物大ケーブル(19S15.2mm)を使用し、その他の試験には亜鉛めっきPC鋼より線にポリエチレン被覆を施したもの、または亜鉛めっきPC鋼より線を使用した。

4.2 試験方法

(1) 耐候性

これまで耐候性の評価には促進耐候性試験(サンシャインウェザーメーター)を用いており、耐紫外線という意味では十分な性能を確認済みである。しかしながら、ここで言う耐候性は桁内を想定した環境気温の変化による被覆層の劣化であり、恒温槽を用いて冷熱繰返し試験を実施した。写真-1に試験状況、写真-2に試験後供試体を示す。試験後のポリエチレン被覆に特に変状は認められず、内部の亜鉛めっきPC鋼材にも錆は発生しなかった。

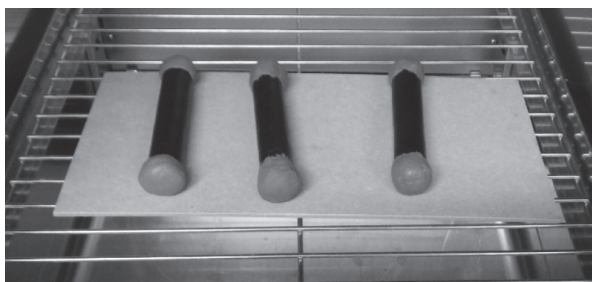


写真-1 冷熱繰返し試験(恒温槽内)

表-1 試験項目

項目	試験名称	試験方法
耐候性	冷熱繰返し試験	-20℃～40℃の環境に置くことを1サイクル(1日)とし、これを100日繰り返す。
耐水性	連続結露法	温度50℃、相対湿度95%以上の環境で2400時間放置する。
耐塩性	中性塩水噴霧試験	0.7Puで緊張後に5%NaCl水溶液を3600時間噴霧する。
耐薬品性	酸・アルカリ浸漬試験	3M・CaCl ₂ 、3M・NaOH、飽和Ca(OH) ₂ 、5%H ₂ SO ₄ (液温度23℃)に1000時間浸漬する。
	曲げ試験	PC鋼材径の32倍の円筒に巻き付ける。
耐損傷性	引込み磨耗試験	偏向部を模擬したコンクリートブロック(R=3000mm)を用いて、PC鋼材に張力を与え、張力を保持した状態で8回移動させる(保護管内を滑らせる)。
	引張破断試験	引張試験を行い、防錆層(亜鉛めっき、ポリエチレン)を追従させる。
	耐衝撃性試験	錘を一定高さより、落下させ衝撃を与える。
耐疲労性	2本重ね圧縮試験	PC鋼材を平行に並べ、上下から緊張時の腹圧相当の荷重載荷を行う。
	フレットング疲労試験	ケーブル端部をフレームに緊張・固定し、中央の偏向部(R=3000mm)により繰返し荷重(下限荷重0.6Pu、応力振幅50N/mm ²)を200万回以上与える。
定着性	定着具の疲労試験	PC鋼材に定着具を取り付け、軸方向に繰返し引張荷重(下限荷重0.6Pu、応力振幅100N/mm ²)を200万回以上与える。
	定着具と緊張材を組み合わせた性能試験	定着具と緊張材を組み合わせた引張試験を実施する。
機械的特性	引張試験	引張強度確認試験を実施する。
	リラクゼーション試験	リラクゼーション1000時間試験を実施する。

Pu: PC鋼材の規格最大試験力

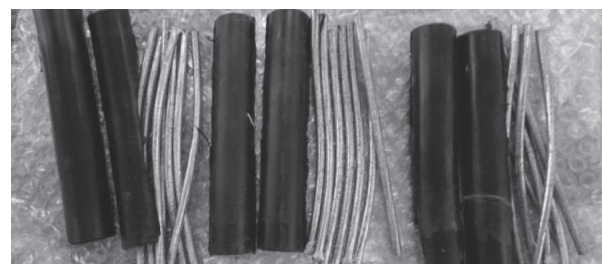


写真-2 試験後供試体(解体状況)

(2) 耐水性、耐塩性、耐薬品性

これらはいずれも供用中にケーブル内部に腐食因子の侵入がないことを確認する試験であり、PC鋼材の防錆性能を評価するうえで重要な試験である。それぞれの評価には連続結露法試験、中性塩水噴霧試験、耐薬品性試験を用いたが、ポリエチレン被覆に変状などの発生はなく、ケーブル内部への塩分や薬品の侵入も確認されなかった。写真-3～6に試験状況ならびに試験結果を示す。

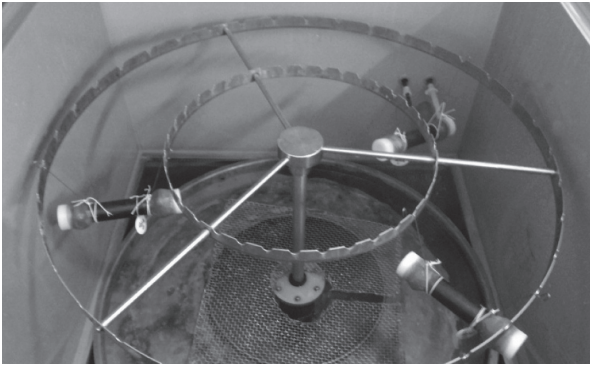


写真 - 3 連続結露法試験

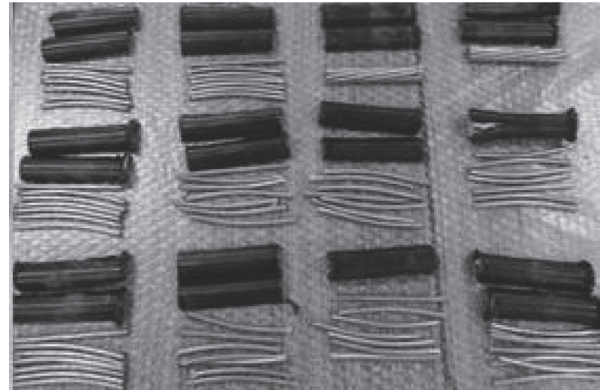


写真 - 6 耐薬品性試験 (試験後供試体)

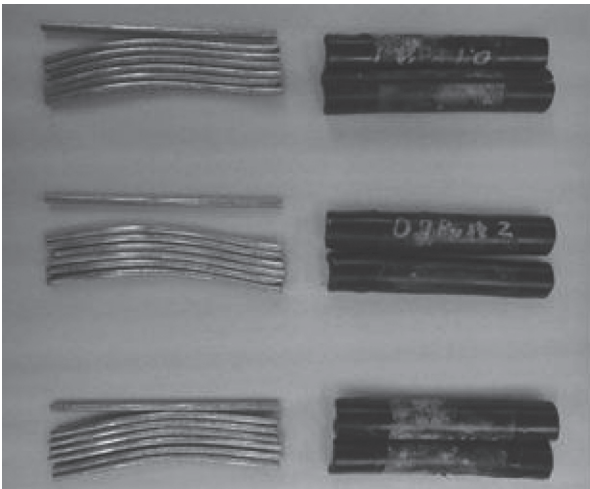


写真 - 4 中性塩水噴霧試験 (試験後供試体)

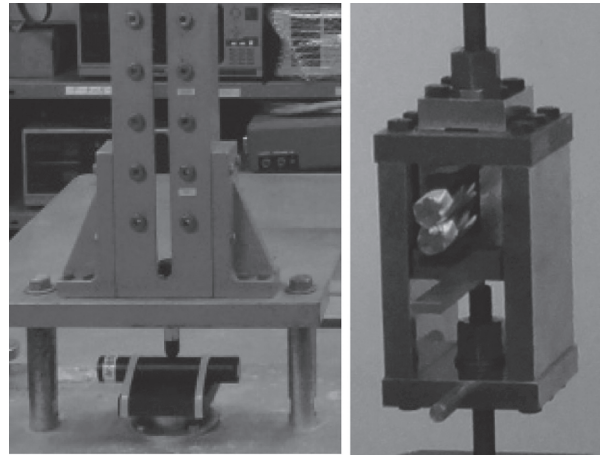


写真 - 7 耐衝撃性試験 (左), 2本重ね圧縮試験 (右)

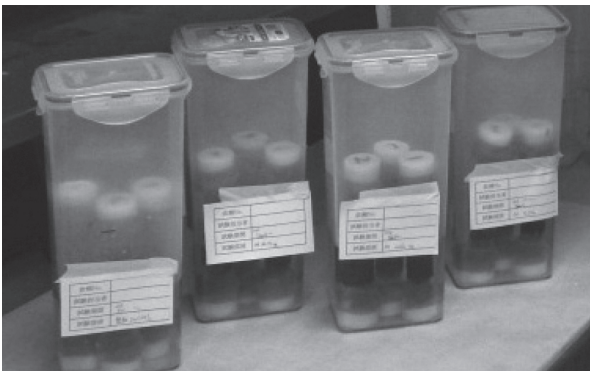


写真 - 5 耐薬品性試験

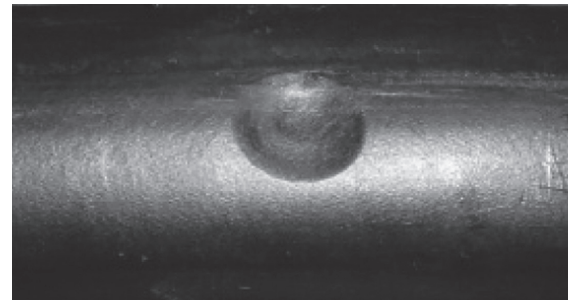


写真 - 8 耐衝撃性試験 (試験後供試体)

(3) 耐損傷性

外ケーブルは配線作業時に架設用受け台との摩擦や、コンクリート角面との接触により防錆層が損傷する場合がある。また、供用時にも偏向部での曲げや腹圧などにより防錆層が変形・減少する可能性がある。それらに対する抵抗性を確認するため数種類の試験を実施した。試験状況ならびに試験後供試体を写真 - 7 ~ 10 に示す。

耐衝撃性試験はポリエチレン被覆に凹みが出るもののその量は少なく、内部めっき部は無損傷であった。また2本重ね試験も亜鉛層は変形するものの素地が露出することは

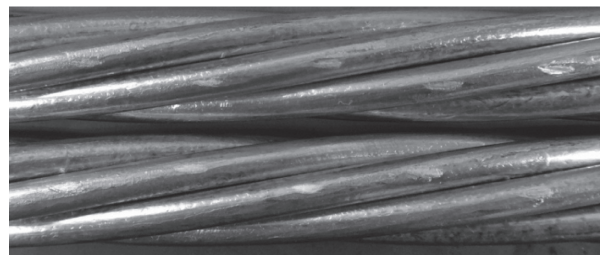


写真 - 9 2本重ね圧縮試験 (試験後供試体)

なかった。

亜鉛めっきマルチケーブルは厚肉のポリエチレンを一括

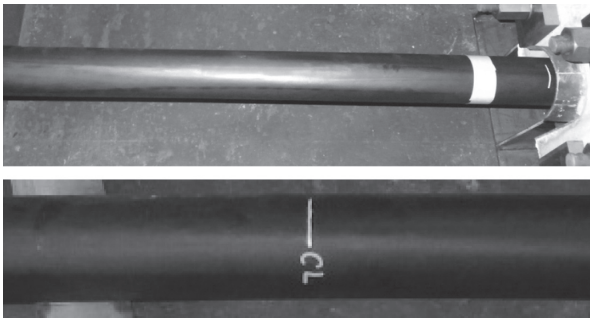


写真 - 10 引込摩耗試験状況 (上), 試験後供試体 (下)

被覆し、ケーブル体に加工しているため耐損傷性・施工性に優れているが、反面、ECF ストランドなどの防錆被覆 PC 鋼材よりも配線作業時の長さあたり重量が大きいため、引込み時の被覆材への負担が大きい可能性がある。それらを正当に評価するため、引込み摩耗試験には実物大ケーブル (19S15.2 mm) を用いた。試験では実際の引込み時に想定される以上の荷重を載荷したが、ポリエチレン被覆部に損傷は発生しなかった。

(4) 耐疲労性

PC 鋼材の疲労は主に定着具によるものと偏向部でのフレットング疲労があげられるが、定着具によるものに関しては各工法メーカーによって試験が実施されている。フレットング疲労に関しては製品開発当初にも実施し、問題ないことは確認しているが、今回は n 数を増やすために改めて行うこととした。試験状況を写真 - 11 に試験後供試体を図 - 2 ~ 3 に示す。

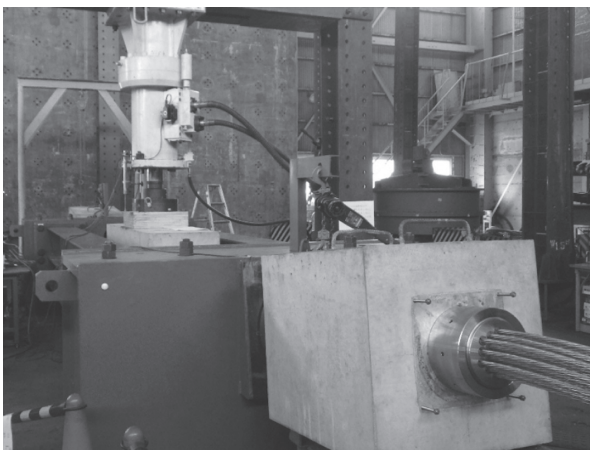


写真 - 11 フレットング疲労試験状況

試験の結果、200 万回繰り返し後も鋼材の破断はなく、供試体を解体し残留強度の確認も行ったが強度低下は確認されなかった。また、もっとも腹圧がかかる亜鉛めっき PC 鋼より線の内 No.3 のめっき部を目視観察ならびに顕微鏡による拡大観察を行ったが、変形しているものの亜鉛めっき層が残存しており、鋼材部分が露出することはなかった。

フレットング疲労試験は実物大ケーブルを使用するた

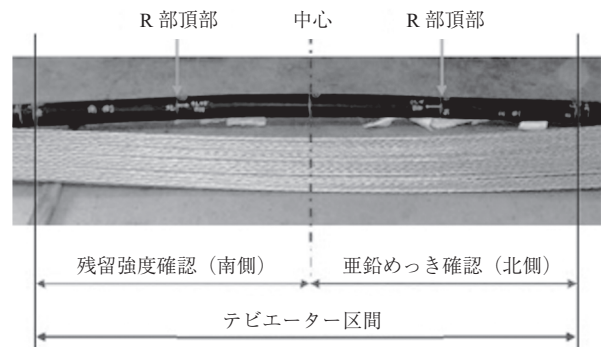


図 - 2 試験後供試体の解体状況

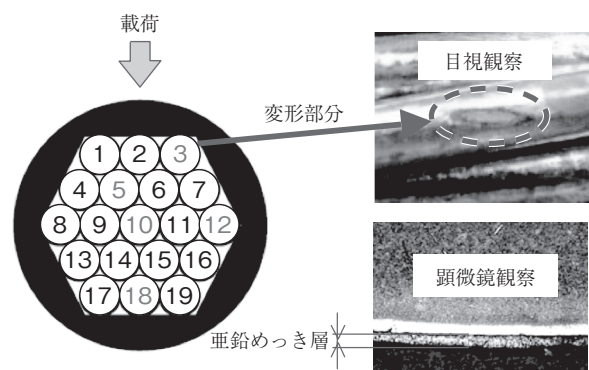


図 - 3 亜鉛めっき部の観察

表 - 2 亜鉛めっきマルチケーブルのフレットング疲労試験結果

実施年	載荷条件	繰返回数	試験結果
2003 年 9 月	下限荷重 0.6 Pu, 応力振幅 50 N/mm ²	300 万回	鋼材に破断 無し
2013 年 3 月		200 万回	
2013 年 5 月			

め頻繁に実施することができないが、表 - 2 に示すように今回で試験回数 3 回となり信頼できるデータになったと考えられる。

5. おわりに

今回、亜鉛めっきマルチケーブルの各種性能確認試験を実施することにより、その高耐久性を明確にすることができた。今後、橋梁用外ケーブルの選択肢の一つとして検討いただければ幸いである。

最後に、実験を行うにあたり多くのご指導とご協力をいただきました西日本高速道路 (株) 宝塚工事区・猪名川工事区、の皆様にも厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：PC 箱桁外ケーブルに用いる防錆被覆 PC 鋼材の性能照査指針，2012。
- 2) fib：Effect of zinc on prestressing steel, fib Bulletin 64, 2012。

【2014 年 1 月 29 日受付】