

最新の防食技術による外ケーブル用P C鋼材

黒沢建設 (株)	正会員	○平井 圭
(株) ハナミズキ・ブリッジ・プランニング	正会員 工博	角谷 務
黒沢建設 (株)		福地 啓太

1. はじめに

P C構造物に対するミニマムメンテナンス化やライフサイクルコストの縮減などの耐久性が重視されるようになり久しい。橋梁分野においては新規に建設される橋梁に内・外ケーブル併用構造が多くの採用事例を得ていることや、過去に建設された橋梁の現行作用荷重に未対応な場合の補強手段として外ケーブル補強工法が用いられることが多いことなどから、外ケーブル工法がP C橋に対する耐久性向上のために有用技術であることは明白である。しかしながら、現状で実績のある外ケーブル工法においては耐久性に対して改良の余地が残されていることも事実である。

上記のような点を鑑み、施工性に優れ耐久性を有する外ケーブル工法用の防食P C鋼材を開発するに至った。

本稿では、最新の防食技術による外ケーブル用P C鋼材の概要を紹介するとともに、偏向部に着目して腹圧力を受けた場合の防食構造の性状を確認するために実施した腹圧試験の結果を述べる。

2. 従来工法の課題点

従来の外ケーブル工法では、透明シースに普通P C鋼より線を挿入したのちにセメントグラウトを充填する工法と7本よりP C鋼より線の外周にエポキシ樹脂によって400 μ m以上の被覆を形成した外周塗装型P C鋼より線（以下、外周塗装型という）を用いる工法が採用されている。透明シース工法において、道路橋示方書ではP C鋼材を挿入、緊張したのちに速やかにグラウトを充填することになっているが、冬季凍結の可能性がある場合はグラウトができず、グラウト充填前にP C鋼材が発錆した事例が過去に発生した。また写真-1に示すようなグラウトの未充填部がある場合はP C鋼材の防錆機能が発揮されない懸念があるため、未充填部に再注入を実施するなど作業が煩雑になる。透明シースは紫外線に対して、損傷を受けやすく、ひび割れ等が発生した場合、補修を前提とする。

外周塗装型は、塗膜厚さが400 μ m以下であると、偏向部での鋼材の保護が不十分となる。また塗膜厚さが500 μ m以上になるとくさびの歯がP C鋼材素地まで到達しにくいため定着性能が不安定になる場合がある。したがって膜厚管理が極めて重要であるが、適切な製作精度が確保できなかった事例が過去に発生した。また、エポキシ樹脂は紫外線によって劣化する材料であるため、白化現象が生じた場合、補修を前提とする。

3. 防食P C鋼材の概要

今回開発した防食P C鋼材は、JISG3536に規定された7本よりP C鋼より線のよりを一時的に開き、静電粉体塗装方法によって素線1本ごとに膜厚200 μ m程度のエポキシ樹脂被膜を形成してよりを復元したエポキシ樹脂全素線塗装型P C鋼より線（以下、全素線塗装型という）の外周にグリスを塗布して高密度ポリエチレンで被覆を施した重防食P C鋼より線である。したがって紫外線に対しては、十分な耐久性を有する。

全塗装型に用いたエポキシ樹脂被膜の物性を表-1に、



写真-1 透明シースのグラウト未充填箇所

被覆に用いたポリエチレン樹脂の物性値を表-2 に示す。エポキシ樹脂被膜の物性値は、エポキシ樹脂塗装鉄筋のエポキシ樹脂被膜の物性値とほぼ同様であり、格別に硬度が硬かったり特別な性能を付与したりしたものではない。また、ポリエチレン被覆は汎用パイプの成型に使用されている一般的な高密度ポリエチレンであるが、一般的なポリエチレン樹脂のデュロメータ硬さが 65~67 であることから、比較的硬度の高い材料となっている。また、エポキシ樹脂被膜とポリエチレン被覆の間に塗布したグリスは、その特性上油分の分離が避けられず使用時に分離した油分が周囲を汚すことを考慮して離油量が少ないものとした。

写真-3 に重防食PC鋼より線の外観を、写真-4 に外周塗装型と全素線塗装型の外観比較を示す。外周塗装型はより溝が埋められているが、全素線塗装型の外観は普通PC鋼より線と変わらない。また全素線塗装型は、内ケーブルとして優れた防錆性能を発揮するとともに、薄膜であることから普通PC鋼より線と同じ定着具を使用可能であることが確認されており^{2),3)}、さらに沖縄本島内で実施したポリエチレン被覆なしの状態における自然暴露試験や疲労試験においても優れた耐久性を有していることが確認されている^{4),5)}。

表-1 エポキシ樹脂被膜の物性値

項目	物性値
鏡面光沢度	80
引っかき硬度(鉛筆法)	H
付着性(クロスカット法)	100/100
耐おもり落下性(デュボン式) 1/2" 500g×cm	50

表-2 ポリエチレン樹脂の物性値

項目	物性値
密度 (g/cm ³)	0.956
引張降伏応力(MPa)	29
曲げ弾性率 (MPa)	1350
硬さ (デュロメータ D)	69



写真-3 重防食PC鋼より線



写真-4 外周塗装型と全素線塗装型の外観比較

4. 腹圧試験の概要

腹圧試験は、まず曲げ半径 3,000mm、曲げ区間長約 900mm、直線区間は曲線区間の両側に約 1,000mm としたポリエチレン製ダクトを配置したコンクリート部材に、外ケーブルとして設計頻度が高い 19S15.2 の重防食PC鋼より線を挿入して、コンクリート部材の両端部に設置した容量 4,000kN のセンターホールジャッキにて緊張張力を導入し、さらにその荷重を保持した状態でケーブルを 150mm だけ移動させたのちに除荷し、コンクリート部材からケーブルを抜き出してポリエチレン被覆、エポキシ樹脂塗膜の状況を確認することとした。腹圧試験の概要を図-1 に、腹圧試験の状況を写真-5 に、重防食PC鋼より線の製造時における被膜厚さ測定結果を図-2 に示す。

本試験では、国内外の規準⁶⁾を参考として 19S15.2 の外ケーブルに対する最少曲げ半径を採用した。また、偏向部は一般的に 1,000mm~1,500mm の長さで設計されることが多いため、ケーブルの腹圧区間をより厳しい条件となるように約 900mm とした。緊張力は、実施工においては 0.82Py (0.7Pu) であるが試験条件では 0.85Py とした。また、実構造物における外ケーブルは緊張時に伸びが発生するが、試験ケーブルは長さが短いために 0.85Py を保持した状態で 150mm の移動をして施工時の状況を再現している。

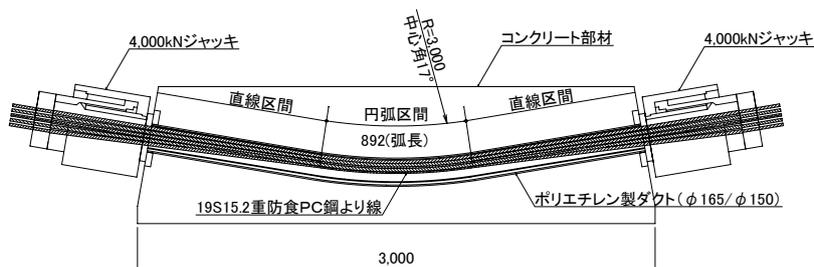


図-1 腹圧試験の概要



写真-5 腹圧試験状況

緊張力を開放した試験ケーブルは、ダクトから抜き出してポリエチレン被覆の状態を目視で確認して、被覆の変形が確認された部分については被覆を除去してエポキシ樹脂被膜の状況を目視確認した。さらに、被覆の変形部はノギスを用いて被覆厚さを測定し、エポキシ樹脂被膜の変形が確認された箇所については電磁式膜厚計を用いて被膜厚さを測定して被覆厚さおよび被膜厚さの変形量を求めた。試験を実施したケーブルは3ケーブルとした。

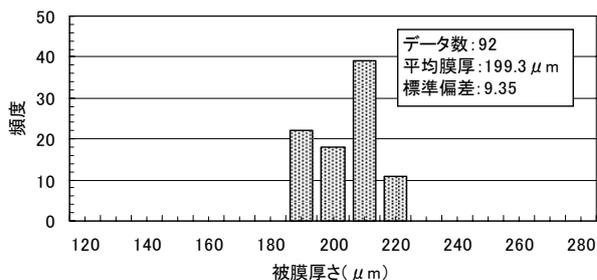


図-2 製造時の被膜厚さ測定結果

5. 腹圧試験結果

腹圧試験後の重防食PC鋼より線のポリエチレン被覆の状況を写真-6に、エポキシ樹脂被膜の状況を写真-7に示す。ポリエチレン被覆には、腹圧を受けた箇所PC鋼より線のより形状による圧痕が見受けられるが、被覆の破れは確認されなかった。また、圧痕は図-3に示すケーブル断面に対して曲げの内側に位置するPC鋼より線に比較的多く発生していたが、曲げの外側においても発生していた。これは、曲げの内側に位置する鋼材は配列の各段の積算された腹圧を受けることによって多くの圧痕が発生したと考えられる。表-3に曲げ内側に位置するPC鋼より線において、目視によって被覆の変形量が特に多いと判断した任意の箇所に対する被覆厚さ測定した代表値を示す。健全部の被覆厚さの平均値は2.43mmであり、圧痕部の被膜厚さの平均値は1.93mmであり、変形量の平均値は0.51mmであった。また、変形量が最も多い箇所では0.89mmであった。

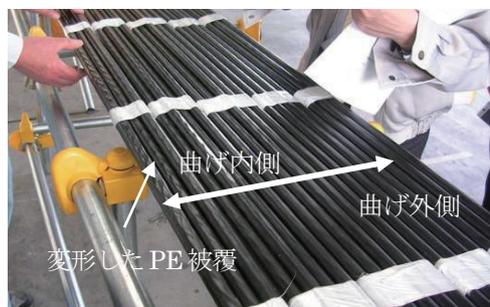


写真-6 腹圧試験後の状況

図-4にエポキシ樹脂被膜の変形後の膜厚分布を、図-5に変形量の分布を示す。図-4によれば、変形量の絶対値で最も被膜厚さが薄くなった箇所では約140μmであった。図-5において図中の横軸は、試験体ケーブルの曲げ区間の一端から他端までの距離を表し、縦軸

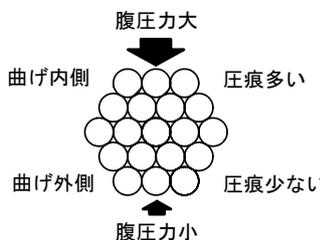


図-3 ケーブル断面



写真-7 エポキシ樹脂被膜の状況

表-3 ポリエチレン被覆の変形量測定結果代表値

	測定結果							平均値
	2.41	2.28	2.37	2.38	2.37	2.49	2.51	
健全部の被覆厚さ(mm)	2.41	2.28	2.37	2.38	2.37	2.49	2.51	2.43
圧痕部の被覆厚さ(mm)	1.92	2.05	2.12	1.86	1.48	1.84	1.90	1.93
被覆の変形量(mm)	0.49	0.23	0.25	0.52	0.89	0.65	0.61	0.51

は被膜の変形量を表している。被膜の変形量は、変形箇所の膜厚を測定して、その箇所に隣接した健全部の膜厚を測定して両者の差とした。また、図中には N=3 としたケーブルの測定結果をすべてプロットしている。まず、変形量に着目すると平均値は 26 μm 程度であり、変形量の最大値は 53 μm であった。また、図中の横軸 500mm の位置は曲げ区間の中央部であるが、変形はその両側 200mm 離れた箇所に多く見受けられ、中央部の変形箇所は少ない結果となった。

全塗装型は、既往の研究 ⁷⁾ によって変形後の被膜厚さが約 70 μm 以上であれば防食性能を保持することが確認されており、今回の試験結果においては被膜の変形箇所でも十分に防食性能を発揮できるものといえる。

6. おわりに

耐久性に配慮した全素線塗装型 PC 鋼より線にグリスを塗布したのちにポリエチレン被覆を施した重防食 PC 鋼より線について、外ケーブルに偏向部を再現した腹圧試験を実施した。実使用状態における一般的な偏向部の条件よりも過酷な条件においても、本重防食 PC 鋼より線は防食性能を保持できることが確認されたことから、重防食 PC 鋼より線はこれからの外ケーブル工法に対して従来の工法における課題を解決することができた。

7. 謝辞

本試験を実施するにあたり、横浜国立大学名誉教授の池田先生をはじめ、財団法人土木研究センターの小林参与には貴重な意見と試験方法に対するご指導を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 1) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針（改定版），コンクリートライブラリー112,平成 15 年 11 月
- 2) 財団法人土木研究センター：建設技術審査証明報告書「SCストランド」，平成 17 年 3 月
- 3) 財団法人土木研究センター：SCストランドとKT B 定着具の定着性能確認試験報告書，平成 18 年 12 月
- 4) 小島孝昭・豊福俊泰・小林一輔：塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の性能評価－屋嘉比橋上部工追跡調査－，コンクリート工学，Vol44，No.11，pp.29~37，2006 年 11 月
- 5) Hirai, et al.: Introduction of high performance cable system composed of epoxy resin coated PC strand, The first fib Congress 2002, Session7, pp.243~248, 2002, 10.
- 6) 社団法人プレストレストコンクリート技術協会：外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案),平成 8 年 3 月
- 7) 平井他：被膜に損傷を受けたエポキシ樹脂全塗装 PC 鋼より線の防錆性能に関する研究, 第 13 回プレストレストコンクリート発展に関するシンポジウム論文集, pp.565~570, 2004 年 10 月

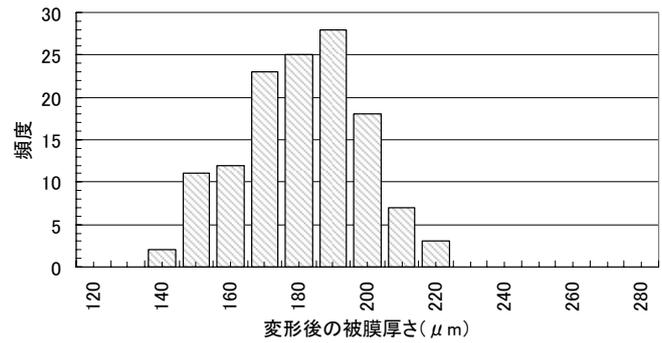


図-4 変形後の膜厚さ分布

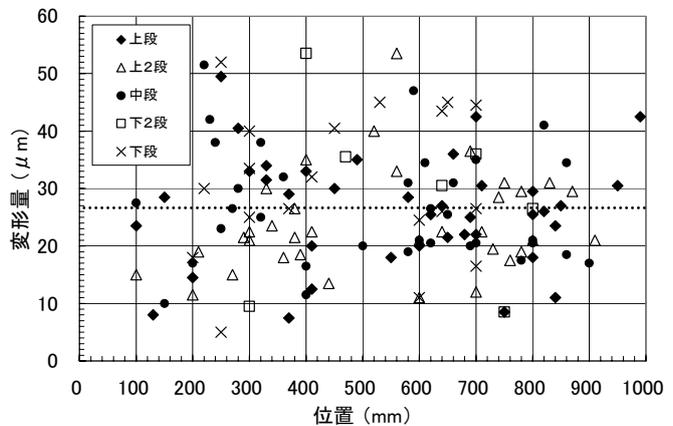
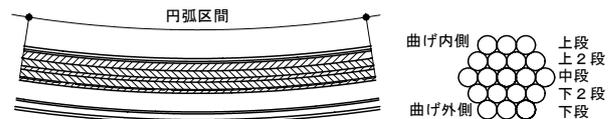


図-5 膜厚変形量の分布