

エポキシ樹脂で防錆されたPC鋼より線の力学的特性と耐久性能の探究

黒沢建設(株) 正会員 ○平井 圭
 黒沢建設(株) 正会員 福地 啓太
 九州産業大学 正会員 豊福 俊康

1. はじめに



PC構造物を耐久的にする方策として、緊張材に防錆処理を行ったPC鋼材を使用することが多くなってきている。発注者側から高耐久なPC構造物とするために発注条件として防錆処理PC鋼材の使用を前提とした発注形態や技術提案として設計・施工段階で防錆処理PC鋼材の使用を提案する場合がある。このような昨今の状況において、防錆処理を行ったPC鋼材として熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を用いて防錆塗膜を形成したものが一般的に使用されている。この防錆PC鋼より線は緊張材としての性能確認は多くの研究成果と使用実績が公表されているが、塗膜形成方法がPC鋼より線の基礎的な力学的挙動や耐久性に与える影響については十分に言及されていないのが実情である。

本稿では、エポキシ樹脂を用いた二種類の防錆処理PC鋼より線に着目し、それらに対して3次元有限要素法による解析や引張試験、曲げ試験、クリープ試験、導入力伝達長試験など実施して、塗膜形成方法がPC鋼より線の各種挙動に与える影響を探究した結果を報告する。

2. エポキシ樹脂塗装PC鋼より線の種類と概要

エポキシ樹脂を用いてPC鋼より線を防錆する方法には全素線塗装型と内部充填被覆型の二種類が存在する。前者はPC鋼より線の全素線の表面に約200 μ mの厚さのエポキシ樹脂の塗膜を形成したものであり、塗装後のPC鋼より線は無塗装のPC鋼より線と同様に素線の動きが自由であることから同一の可撓性と考えられる。全素線塗装型は土木研究センターから設計施工ガイドライン¹⁾が発刊され、設計上、施工上の取り扱い方法が示され、同センターの建設技術審査証明報告書²⁾に品質規準が示されている。また、緊張材としての機械的性質や耐久性については既に報告されている文献³⁾を参照されたい。後者は、PC鋼より線の素線内部の空隙にエポキシ樹脂を充填して外周部には約600 μ mの厚さの塗膜を形成したものであり、塗装後の各素線はエポキシ樹脂で拘束されるため、棒材と等しい可撓性と考えられる。内部充填被覆型は土木学会から設計施工規準(案)⁴⁾と品質規準(案)⁴⁾が発刊されている。表-1に全素線塗装型と内部充填被覆型の概要を示す。

表-1 エポキシ樹脂塗装PC鋼より線の種類と概要

| 項目 | 全素線塗装型 | 内部充填被覆型 |
|--------------------|---|--|
| 製品外観 |  |  |
| 塗膜厚さ範囲 | 全素線の外周が120 μ m~280 μ m | クラウン部の平均値が400 μ m~900 μ m 各素線間の隙間を充填する。 |
| 許容曲げ半径 | より線径の2.5倍 (32mm~38mm) | より線径の32倍(400mm~480mm) |
| 塗装前の素地調整 | ショットブラスト処理 | サンドブラスト処理もしくは化学的処理 |
| 機械的性質 | JIS G 3536 -2014に準拠 | |
| 付着機構 (コンクリートなど) | PC鋼より線のより溝による (普通PC鋼より線と同様) | 塗膜表面に埋設されたグリット材 (粒径150 μ m程度) による |

3. 3次元有限要素法による塗膜の挙動解析

3. 1 解析条件

エポキシ樹脂塗装PC鋼より線が緊張時に素線が動いた場合の素線と塗膜の挙動について実験的に検証することは困難である。そのため、曲げ変形が発生した場合の素線と塗膜の挙動について汎用3次元有限要素法解析ソフトを用いた線形解析を行った。解析時の各材料の諸元および境界条件を表-2に、解析モデルの概要を図-1に示す。解析対象は、呼び径が12.7mmの全素線塗装型と内部充填被覆型であり、モデル寸法はより線のより1ピッチ相当の長さ約190mmとした。解析モデル中の材料は、PC鋼より線の素線は弾性係数が210,000N/mm²でポアソン比が0.28であり、エポキシ樹脂の弾性係数が材料試験から求めた3,100 N/mm²でポアソン比が0.34である。境界条件は、より線の一端を完全拘束し、他端は鉛直のみ拘束し、全素線塗装型ではより線内部の空隙に充填されたエポキシ樹脂要素の弾性係数を1/1000にして内部樹脂の影響がないようにした。荷重条件は、荷重スパン40mm、支点間隔を190mmとして1箇所あたりに1kNの2点集中荷重とした。

表-2 解析条件および材料諸元

| 項目 | 条件および特性値 | |
|-------|----------|--------------------------|
| 弾性係数 | 素線 | 210,000N/mm ² |
| | エポキシ | 3,100N/mm ² |
| ポアソン比 | 素線 | 0.28 |
| | エポキシ | 0.34 |
| 境界条件 | 素線と塗膜 | 完全付着 |
| | 素線間 | 拘束なし |
| | 塗膜間 | 拘束なし |
| | より線端部 | 片側：完全拘束 片側：鉛直のみ拘束 |

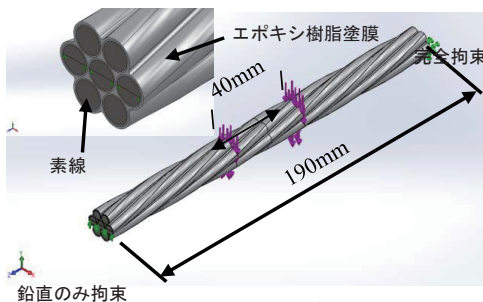


図-1 解析モデル図

3. 2 解析結果

図-2に曲げ変形をさせた場合の解析結果を示す。図中の(a)は内部充填被覆型の変形量を、(b)は全素線塗装型の変形量を示す。内部充填被覆型では最大の変位量が0.9mmであったのに対して、全素線塗装型では最大の変位量が6.34mmであった。両者の変位量の差異は、塗膜により素線の動きが拘束されるか否かによるものであり、内部充填被覆型では塗膜で素線の動きが拘束されること、全素線塗装型では素線が自由に動くことが両者の曲げ剛性の違いとして表れていると考えられる。また端部で素線が開く傾向にあるが素線が自由に動くことを表現しているためより線の解析に影響はないもと考えられる。

図-3に最大曲げ変形時の塗膜に発生したせん断応力度の分布を示す。内部充填被覆型ではより線のより溝部に沿ってせん断応力度が分布しており、その最大値は最大曲げ変形部の40.7N/mm²であった。一方で全素線塗装型では、最大曲げ変形部の塗膜全体にせん断応力度が発生しており、その最大値は12.1N/mm²であった。この両者の相違も塗膜による素線の動きが拘束されているか否かによるものであると考えられ、内部充填被覆型では塗膜全体が曲げ変形に抵抗しているためにより溝部にせん断応力度が集中する結果となり、全素線塗装型では素線が自由に動くためにより溝部ではなく塗膜全体にせん断応力度が発生する結果となっ

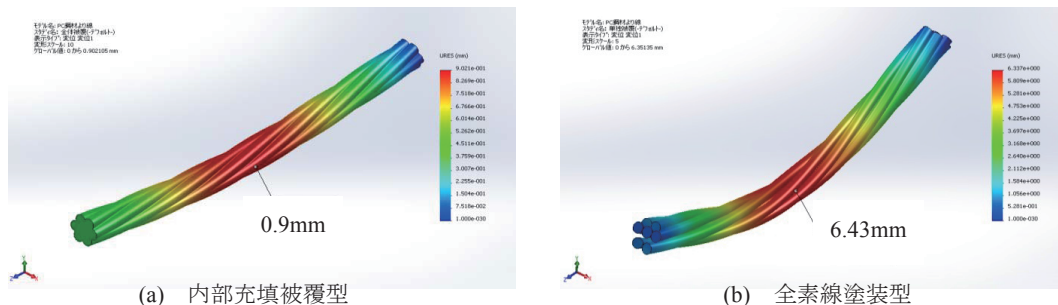


図-2 曲げ変形の解析結果

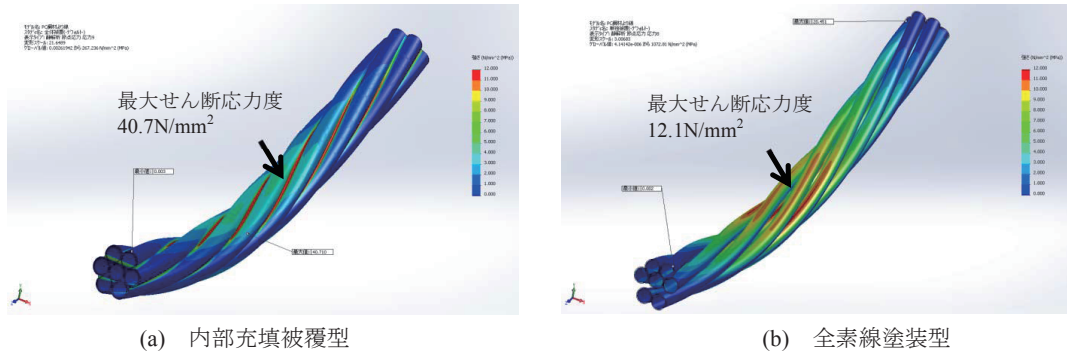


図-3 せん断応力度の分布

たとえられ。

本解析によれば、内部充填被覆型はより溝にせん断応力が集中する傾向があるため、塗膜の損傷を防ぐために施工時などに過度に変形を与えないように配慮が必要である。

4. 各種実験によるP C鋼より線の性状

曲げ試験・クリープ試験・導入力伝達長試験によっても塗膜がP C鋼より線の挙動に与える影響について確認を行った。

4. 1 P C鋼より線の曲げ試験

塗膜形成方法の違いが曲げ変形に与える影響について把握するために、片持ち状態で荷重した場合と2点集中荷重した場合について試験を実施した。試験に供したより線径はすべて12.7mmである。片持ち状態で荷重する試験は、長さ1mのより線の片側端部を治具により固定して先端に10N、30N、50Nの順番に荷重して、そのときの先端部のたわみ量を測定した。試験状況を写真-1に、荷重と先端変位の関係を図-4に示す。試験結果によれば、いずれの荷重段階においても内部充填被覆型はほかの2種類と比較してたわみ量が小さい挙動を示している。50N荷重時のたわみ量は、内部充填被覆型では約250mmで、ほかの2種類はほぼ同様のたわみ量で約470mmであった。2点集中荷重は、支点距離800mmで荷重点距離はよりピッチである150mmとし、P C鋼より線の素線（上端と下端）にひずみゲージを貼り付けて荷重とひずみの関係を測定した。試験の状況を写真-2に、荷重とひずみの関係を図-5に示す。試験結果によれば、1kN荷重したときの内部充填被覆型の上端素線は圧縮ひずみの540 $\mu\epsilon$ であり、下端素線は引張ひずみの640 $\mu\epsilon$ であった。そのほか2種類はほぼ同様のひずみであり、上端素線は圧縮ひずみの1,200 $\mu\epsilon$ であり、下端素線は引張ひずみの800 $\mu\epsilon$ であった。

曲げ試験における変形挙動は、内部充填被覆型では素線の動きを拘束するため断面が一体となって挙動して曲げに対する抵抗が大きく、普通P C鋼より線と全素線塗装型は素線が自由に動くために曲げに対する抵抗が小さい結果となった。

4. 2 塗膜のクリープ性状把握試験



写真-1 片持ち荷重の状況

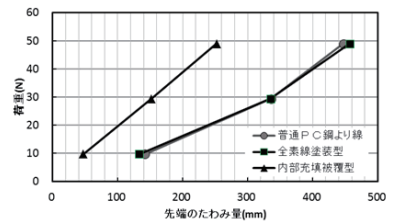


図-4 荷重と先端変位の関係



写真-2 2点集中荷重の状況

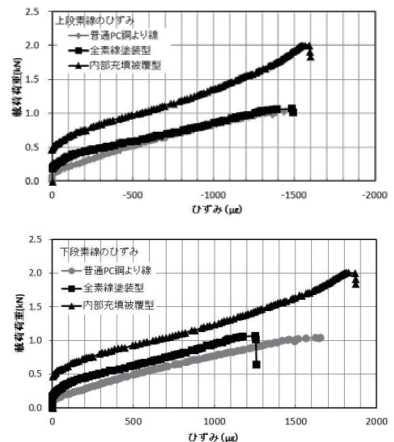


図-5 2点集中荷重の荷重-ひずみ関係

巻径800mmの木製ドラムにP C鋼より線を巻きつけた状態で最外周の素線にひずみゲージを貼り付けて、その後ドラムからP C鋼より線を引き出したときの素線のひずみ変化を24時間計測した。試験の状況を写真-3に、試験より得られた時間とひずみの関係を図-6に示す。試験結果によれば、内部充填被覆型はドラムに巻きつけた状態で最外周の素線が引張側となるため引出後はその反力のために圧縮ひずみとなっている。一方で、ほかの2種類はほぼ同様の引張ひずみが発生している。各素線が自由に動く場合、ドラムに巻きつけた状態では、よりピッチが小さくなり引出後は元のよりピッチに戻ろうとする引張ひずみが発生したのと考えられる。



写真-3 クリープ試験状況

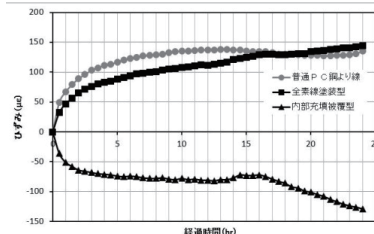


図-6 時間と素線ひずみの関係

4. 3 コンクリートとの付着性状

プレテンション部材を想定して、100mm×100mmの断面で長さ3,000mmのコンクリートにプレストレスを導入した場合の導入力伝達長さをコンクリート側面に貼り付けたひずみゲージにて圧縮ひずみを測定することにより確認した。試験に供したより線径はφ15.2であり、内部充填被覆型は表面にグリット材が埋設されたタイプである。各P C鋼より線は同時緊張装置で同時に緊張し、プレストレス導入力はすべて $0.6P_u=0.6 \times 261=156.6\text{kN}$ となるようにした。プレストレス導入時のコンクリート強度は材齢1日で 44N/mm^2 であった。図-7に試験より得られた部材端部からの距離と圧縮ひずみの関係を示す。普通P C鋼より線では、端部から約700mmの位置で $450\mu\epsilon$ の一定ひずみとなっており、全素線塗装型では端部から800mmの位置で $450\mu\text{m}$ の一定ひずみとなっている。内部充填被覆型は端部から600mmの位置で $400\mu\text{m}$ の一定ひずみとなっている。いずれの塗装材も導入力の伝達長さは普通P C鋼より線よりも長くなっており、プレストレスが完全に導入されたときのひずみの値は全素線塗装型は普通P C鋼より線と同様であり、内部充填被覆型では10%程度小さい値であることが確認された。これは付着機構に起因するものと推測される。

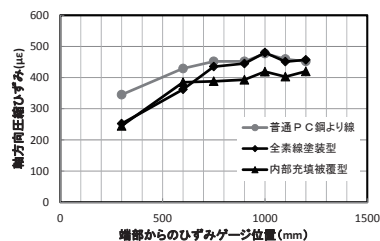


図-7 導入力伝達長さ試験結果

5. おわりに

本稿では、エポキシ樹脂で防錆されたP C鋼より線の基礎的な性状について、解析的・実験的に確認を行いその結果を紹介した。基礎的な性状を正しく把握することは、塗膜の健全性やP C鋼より線の耐久性を検討する場合において非常に重要な項目である。今回検討を実施した2種類のエポキシ樹脂塗装P C鋼より線は、施工時や使用時に示す挙動が異なり作用応力度が集中する箇所が異なる。それぞれの挙動を十分に理解して、塗膜に損傷が発生しないように取扱いに留意することが肝要である。

謝辞 本稿で紹介した解析や試験を実施するに際して、横浜国立大学名誉教授の池田尚治先生には多大なるご助言とご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)土木研究センター：エポキシ樹脂全素線塗装型P C鋼より線を用いたP C構造物の設計施工ガイドライン，平成22年3月
- 2)土木研究センター：「S Cストランド」建設技術審査証明報告書 建技審証第0434号，平成22年3月
- 3)豊福，神山，上津，田中：16年間にわたる塩害に対応した高耐久性P C橋の建設に関する研究報告，プレストレストコンクリート Vol.1.56 No.5, 2014
- 4)土木学会：エポキシ樹脂を用いた高機能P C鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針（案），2010年版