

FRP-鋼ハイブリッドケーブル埋め込み緊張補強技術の曲げ補強効果に関する実験的検討

茨城大学 正会員 ○岩下 健太郎, 茨城大学 正会員 呉 智深, 茨城大学 塩田 暁伸

1. 研究背景と目的

耐腐食性に優れた FRP (Fiber Reinforced Polymer) 製のケーブル (より線や棒材) をコンクリート表層部に埋め込む技術 (Near Surface Mounted ; NSM, 概念図を図-1 に示す) が開発され, また, FRP ケーブルを緊張する技術 (Prestressed Near Surface Mounted ; PNSM) の開発により, 腐食による機能低下が完全に防止された上で, 剛性やひび割れ抑制といった使用性に対する大きな補強効果が得られることになった¹⁾²⁾. さらに, 鋼材の周囲に FRP を巻きつけ接着した緊張材 (FRP-鋼ハイブリッドケーブル) の開発により材料コストの低減を図っている³⁾ (図-2). 本研究では, FRP より線や FRP-鋼ハイブリッドケーブルの付着強さを両引きせん断試験および梁の曲げ試験により実験的に検討した.

2. FRP-鋼ハイブリッドケーブルの開発

FRP-鉄筋ハイブリッドケーブルの開発構想としては, 鋼材を主要構造材として材料コストを低減させ, その周囲に安価で電気絶縁性がある玄武岩繊維複合材 (BFRP) を, 最外縁に最高級の構造性能, 耐腐食性, そして引張疲労・クリープ耐久性を有する炭素繊維複合材 (CFRP) を, それぞれ巻き立て接着した構造形式にすることで, 構造性能や耐腐食性が確保され, 安価な緊張材の創出を図った. 構造性能としては, 荷重-ひずみ曲線 (図-3) に示すように, 引張剛性, 引張降伏強度, 引張強度, そして, 靱性が総合的に向上される. 本研究では, 樹脂含有率が 60% となる分量のエポキシ樹脂を含浸させた連続繊維シートを, 繊維方向と鋼より線の長手方向を合わせて接着し, エアバックフィルムで全体を覆って内部の空気を抜いて 1 気圧に保ち, さらに環境温度を 80℃ にして 3 時間養生して樹脂を硬化させる工程で FRP-鋼ハイブリッドケーブルを作製した.

3. 両引きせん断試験による FRP-鋼ハイブリッドケーブルの付着強さの検討

ケーブルの種類を考慮して両引きせん断試験を行い, FRP-鋼ハイブリッドケーブルの付着強さを実験的に検討した. 両引きせん断試験体は幅 200mm, 高さ 150mm, そして長さ 300mm の矩形コンクリート塊に, 試験装置に接続するための $\phi 24$ 鋼ボルトを埋め込み, ケーブルを両側面の溝にエポキシパテで埋め込み・接着した形状である. なお, 過去の研究²⁾において最適とされた, 埋め込み材にエポキシパテを適用し, その外側をポリマーセメントで補強 (かぶり補強) する方法を採用した. 埋め込み材を充填する前にダイヤモンドサンダーで溝表面を削り, エポキシプライマーを 0.5kg/m^2 の基準量で塗布することで溝内の表面処理を行った. 一方, ケーブルを傷つけずに引っ張るためにケーブルの片側端部を鋼管に差し込んだ上で膨張セメントを充填して固定し, $\phi 24$ 鋼ボルトを引っ張ることでケーブルに引張応力を発生させる構造とした (図-4 参照). 試験は 500kN 万能試験機を用い,

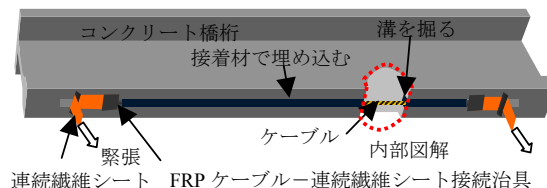


図-1 PNSM の概念図

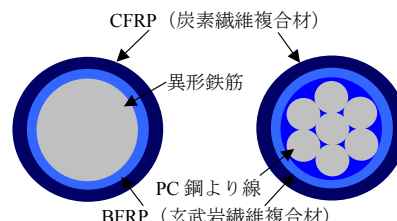


図-2 FRP-鉄筋ハイブリッドケーブルの断面図

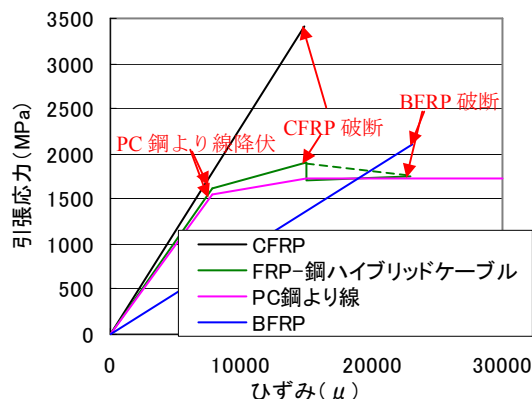


図-3 各種材料の引張応力-ひずみ関係

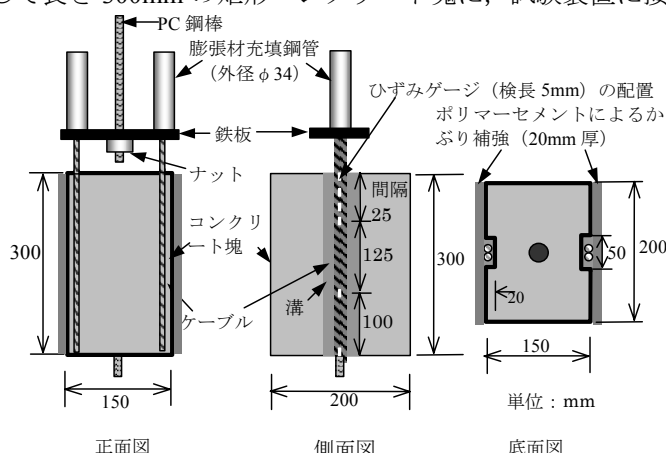


図-4 両引きせん断付着試験の詳細寸法図

キーワード FRP-鋼ハイブリッドケーブル, 埋め込み緊張 (PNSM) 技術, コンクリート, 接着界面, 付着強さ

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部都市システム工学科 TEL 0294-38-5247

1mm/min の速度で実施した。ここで、計測項目は荷重およびケーブルのひずみ（片側 6 本のひずみゲージによる）とした。また、試験体数はケーブルの種類ごとに 2 体とした。試験結果より、荷重とすべり量の関係を図-5 に示す。ここで、ケーブルの断面積を合わせるために、FRP-鋼ハイブリッドケーブルおよび PC 鋼より線は 1 本、CFRP より線は 2 本使用した。一方、ケーブルのすべり量はひずみを繊維方向の距離に関して積分したものと考えられ、式(1)より求めた。

$$\delta(x) = \int_0^x \varepsilon dx \quad (1)$$

0 破壊形態は、PC 鋼より線を用いた場合はケーブルの早期引き抜け（図-6、界面 A）であったのに対し、CFRP より線および FRP-鋼ハイブリッドケーブルの場合はコンクリートかぶり内部（図-6、界面 B）での剥離であった。よって、FRP とエポキシパテ（埋め込み材）の接着界面はかなり強いため、FRP で巻き立てることでケーブルの付着が確保されることが確認された。また、荷重-すべり量関係の挙動は FRP-鋼ハイブリッドケーブルを用いた場合と CFRP より線を用いた場合ではほぼ同様であった。

4. 梁の 4 点曲げ試験による FRP-鋼ハイブリッドケーブル埋め込み緊張補強技術の補強効果およびケーブルの付着強さの検討

ケーブルの引張破断強度の 30% で緊張・埋め込み接着補強した RC 梁の 4 点曲げ試験をケーブルの種類を考慮して行った。RC 梁の詳細寸法などを図-7 に、荷重-変位の関係を図-8 にそれぞれ示す。FRP-鋼ハイブリッドケーブルを用いた場合と CFRP より線を用いた場合で鉄筋降伏前の曲げ挙動は同程度だが、内部でのすべり音とともに急激に荷重が低下しており、以後の荷重は不安定化している。このような現象が発生した一因として、製品の CFRP より線に比べてハンドメイドの FRP-鋼ハイブリッドケーブルは、表面の均一性が確保できておらず、剥離の起点となったひび割れ端においてより大きな応力集中が生じ、噛み合わせとすべりを繰り返して荷重変動が大きくなったことが考えられる。また、ひび割れ端を起点として進展する剥離はある程度進展すると曲げモーメントが小さくなるために剥離が一時的に停止し、荷重が回復すると再度剥離が進展するということを繰り返しながら段階的に剥離が進展していったと推測される。ただし、現段階では試験体数が不足しており、十分な考察ができないため、今後、さらに実験データを蓄積して究明していく。

5. 研究成果のまとめ

安価で耐腐食性が確保された FRP-鋼ハイブリッドケーブルを埋め込み接着した場合に、ケーブルとエポキシパテ（埋め込み材）の接着界面にすべりが生じ始める前は CFRP ケーブルを用いた場合と同程度の付着強さおよび補強効果が得られるが、剥離の起点となるひび割れ端の周辺からすべりが生じ始めた後は補強構造物の曲げ構造性能が不安定化することがわかった。今後、すべりが生じ始めた後の荷重の不安定化に関する究明を進めるとともに、荷重低下の制御法に関する検討を進めていく。

謝辞：日鉄コンポジット株式会社には炭素繊維材料および含浸、接着材をご提供いただいた。ここに示して謝意を表す。

参考文献：1) Nordin, H.; Taljsten, B.; and Carolin, A., "Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted reinforcement (NSMR)" Proceedings of 1st International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2001), Vol. II, December 12-14, 2001, Hong Kong, China, pp. 1067-1075.

2) Z.S. Wu, K. Iwashita, X. Sun: Structural Performance of RC Beams Strengthened with Prestressed Near-Surface-Mounted CFRP Tendons, American Concrete Institute (ACI), SP-245-10, 2006, pp. 165-178.

3) 岩下 健太郎, 呉 智深: CFRP 被覆ハイブリッド化鉄筋の繰り返し荷重履歴に関する実験的研究, 日本複合材料学会 2006 年度研究発表講演会予稿集, B-34, 2006, pp. 135-136.

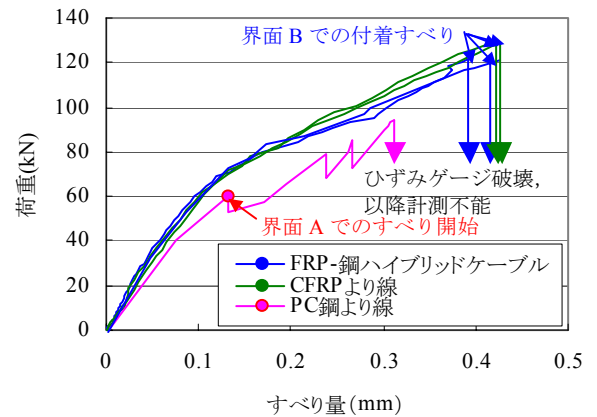


図-5 荷重-すべり量の関係

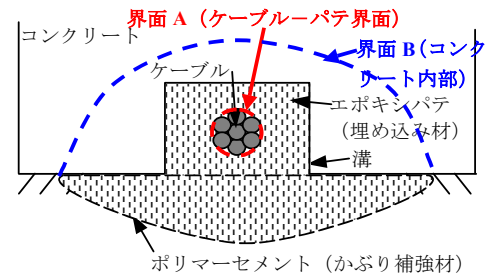


図-6 PNSM による補強構造物の断面図

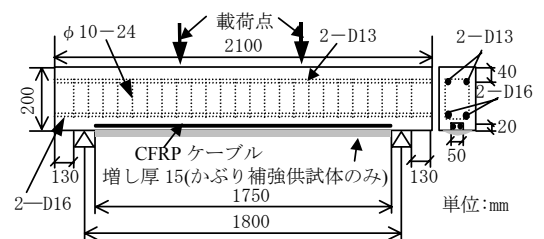


図-7 RC 梁の詳細寸法

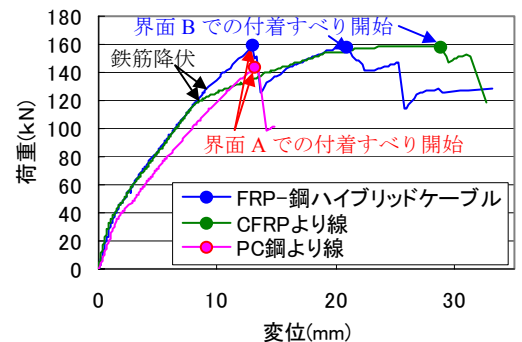


図-8 荷重-変位の関係