

FRP-鋼線ハイブリッドシート及び緊張接着による曲げ補強効果に関する実験的研究

名城大学 正会員 ○岩下 健太郎
茨城大学 正会員 呉 智深
茨城大学 橋本 拓也

1. 目的

RC, PC, そして鋼製構造物の使用性能や終局荷重, そして死荷重に対する補強も可能な補強技術として, PC 鋼材を用いた外ケーブル工法が主流となっている. また, 最近では, 連続繊維複合材 (Fiber reinforced polymers; FRP) の板やシートを緊張材に用いた緊張補強技術が開発されてきている一例として¹⁾. 本研究では, 低価格のバサルト (玄武岩) 連続繊維シートと炭素鋼線を組み合わせることにより, ①バサルト繊維材や炭素鋼線の使用による材料コストの低減, ②炭素鋼線をバサルト繊維材で覆った耐腐食構造形式の実現, ③炭素鋼線の高い引張弾性率, 引張強度とバサルト繊維材の高靱性を活かした高度な引張特性の実現を目的としてハイブリッド緊張材の構築を行った. さらに, 構築した FRP-鋼線ハイブリッドシートの引張特性やコンクリートに対する付着性状を初歩的に検討したうえで, これを緊張・補強材に適用した緊張接着補強技術による曲げ補強効果に対する実験的な検討を行った.

2. FRP-鋼線ハイブリッドシート構造形式の構築

玄武岩よりなるバサルト繊維材は低価格なことから緊張材耐腐食性や耐薬品性に優れているため, シート形状のバサルト繊維材で炭素鋼を覆い, エポキシ樹脂で含浸・硬化させた構造形式とすれば, 耐腐食構造にすることができる (図-1). また, 形状変化が容易な炭素鋼線を用いることにより, 緊張時にしなやかな性状を有する緊張材が創出され, 連続繊維シートの付着性状や施工性の高度化が図られる. さらに, バサルト繊維材と高度な引張特性や耐疲労・クリープ特性を有する炭素繊維材や低価格な炭素鋼を混入させることで, 引張弾性率を補い, 耐疲労・クリープ特性が高度化されることも示唆されている²⁾.

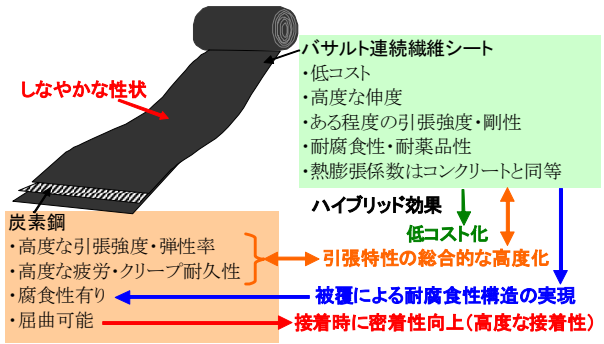


図-1 FRP-鋼線ハイブリッド構造形式の概念図

3. FRP-鋼線ハイブリッドシートの引張特性に関する検討

炭素鋼線の径 (0.25mm, 0.30mm, 0.50mm) を考慮した 3 種類の試験片をそれぞれ 3 本作成して静的引張試験を行い, 引張特性を検討した. なお, 3 種類の試験片で同一種類の炭素鋼線を用い, 断面積は同程度になるように本数を調整した (それぞれ 30 本, 21 本, 7 本). 各種材料の物性値を表-1 に, 試験片の詳細寸法を図-2 にそれぞれ示す. ここで, バサルト繊維シートを 2 層用い, その間に炭素鋼線を挟む構造形式とした. 上記の本数の炭素鋼線は, 引張弾性率 $E \times$ 断面積 A について, バサルト繊維シート 1 層に相当する. したがって, 作成した FRP-鋼線ハイブリッドシートは EA について 3 層のバサルト連続繊維複合材 (BFRP) に相当する. ひずみゲージを試験片両面の中央部に, π 型変位計を図-2 に示したつかみ部間にそれぞれ設置し, 標点間のひずみ, および変位を計測しつつ, 1mm/min 程度速度の変位制御で引張試験を実施した. 試験結果から, 荷重-ひずみ関係を図-3 に示す. ここで, π 型変位計から得られた変位からの換算ひずみとひずみゲージから得られたひずみはほぼ同程度であったため, 図-3 のひずみの値にはひずみゲージの値を採用した. 炭素鋼線は緩やかに降伏するため, コンクリート標準示方書 (土木学会) 一次降伏までの傾き (引張弾性率) は BFRP シート 3 層の場合と同等以上を参照して, 破断応力 σ_p に対して, $0.84 \sigma_p$ で一次降伏, $0.93 \sigma_p$ で二

表-1 各種材料の物性値一覧

バサルト連続繊維シート	
引張強度 (MPa, メーカー値)	2100
引張弾性率 (GPa, メーカー値)	91
公称目付量 (g/m ²)	200
公称厚さ (mm)	0.111
炭素鋼線	
引張強度 (MPa, メーカー値)	2200
引張弾性率 (GPa, メーカー値)	200
公称断面積 (mm ² /本): 0.25mm 径	0.049
: 0.30mm 径	0.071
: 0.50mm 径	0.196

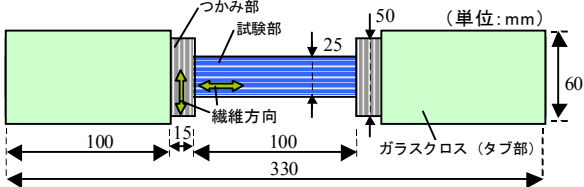


図-2 引張試験片の詳細寸法

キーワード 連続繊維複合材 (FRP), 炭素鋼線, ハイブリッド緊張材, 緊張接着, 曲げ補強

連絡先 〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学部建設システム工学科 TEL 0528-38-2352

次降伏と定義して、図-3 に示した。まず、 になっており、炭素鋼線およびBFRP の所定の性能が得られたうえ、ハイブリッド効果も示唆された。一方、炭素鋼線の断面積を同程度にしているため、炭素鋼線の周囲にすべりが生じない限り引張挙動は同様になると考えられるが、特に炭素鋼線径が 0.5mm の場合に二次降伏以降の傾きが小さくなっていることから、用いる炭素鋼線径はある程度小さくすべきことがわかった。

4. FRP-鋼線ハイブリッドシートの付着性能に関する検討

図-4 に示すように、中央に1本の曲げひび割れ（予亀裂）を模したコンクリート試験片の両面に FRP-鋼線ハイブリッドシートをエポキシ樹脂で接着した試験体を作成し、両引きせん断試験を行った。π型変位計を予亀裂に跨るように設置し、予亀裂の幅を変位として測定した。荷重-変位の関係を図-5 に示す。最大荷重、グラフの傾き（せん断剛性）ともに3層のBFRPシートを接着した場合と同等以上であった。また、下記の式（1）から求めた最大せん断応力および剥離破壊エネルギーともにBFRPシート3層の場合と同等以上であり、FRP-鋼線ハイブリッドシートを用いた場合に強い付着性能が得られることが示唆された。

$$\tau_y = \Delta \varepsilon \cdot E \cdot A / s_g / b, \quad G_f = P_{\max}^2 / (8b^2 \cdot E \cdot t) \quad (1)$$

（ここで、 $P_{\max}$ ：最大荷重、 b ：シート幅、 t ：シート厚さ）

5. FRP-鋼線ハイブリッドシートの緊張接着による曲げ補強効果に関する検討

図-6 に示す RC 梁を5体作成し、FRP-鋼線ハイブリッドシートを緊張接着したうえで4点曲げ試験を行い、その補強効果を初歩的に検討した。緊張力の導入方法や装置については著者らの過去の研究^{一例として1)}を参照していただくことにしてここでは割愛する。ここで、導入緊張力（無緊張、破断強度の25%、33%）および炭素鋼線の断面積（標準は120本（BFRPシート1層分）、240本（BFRPシート2層分））を考慮した。試験結果から荷重-変位の関係を図-7 に示す。終局破壊モードは無緊張のケースでシートの剥離進展破壊、緊張のケースではシートの破断破壊であった。導入緊張力が大きいほど、また、炭素鋼線の本数が多いほど、剛性や鉄筋降伏荷重、最大荷重といった曲げ構造性能指標が総合的に向上されることが明確に示された。

6. まとめ

FRP-鋼線ハイブリッドシートの引張特性や付着性能、そして緊張接着補強による曲げ補強効果に対して初歩的な検討を行い、FRP-鋼線ハイブリッドシートは曲げ補強材として適用可能であることが示唆された。また、緊張接着補強により、大きな曲げ補強効果が得られることが実験的に示された。

謝辞

バサルト繊維シートは中国 GBF 社より、エポキシ樹脂は日鉄コンポジット株式会社よりそれぞれご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 呉他, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.22, No.14, pp.1269-1285
- 2) 岩下他, 日本複合材料学会 2008 年度研究発表講演会, A-22, 東京
- 3) 土木学会編, 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリ 101, 2000

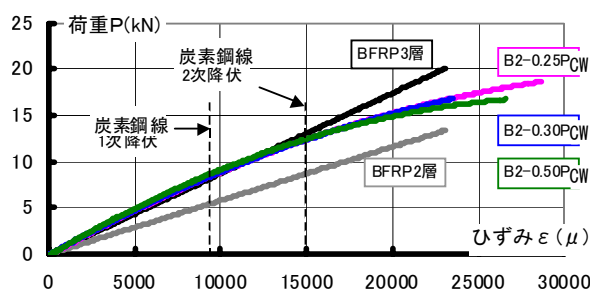


図-3 荷重-ひずみの関係

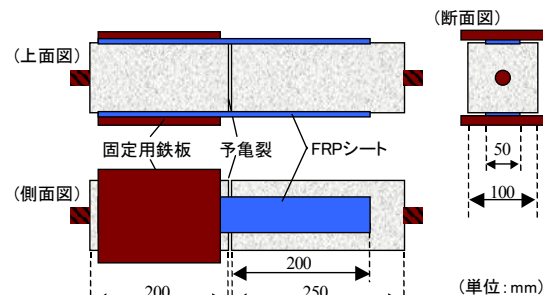


図-4 両引きせん断試験体の詳細寸法

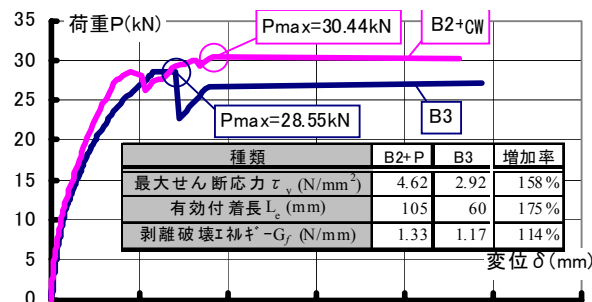


図-5 荷重-変位の関係（両引きせん断試験）

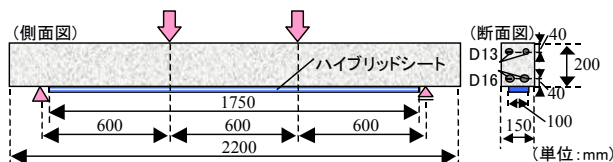


図-6 RC 梁試験体の詳細寸法

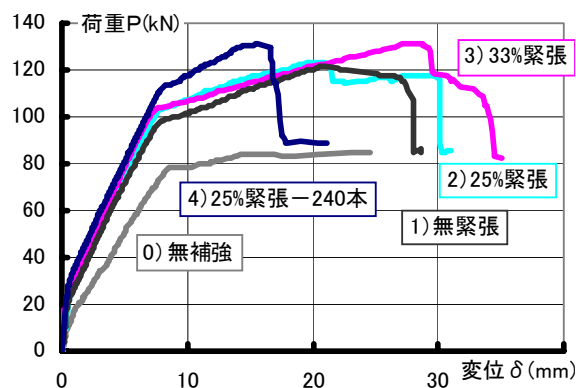


図-7 荷重-変位の関係（4点曲げ試験）