

GFRP シートの付着性状と可視性に関する基礎研究

早稲田大学 正会員 ○後藤 慶次

早稲田大学 正会員 佐藤 靖彦

デンカ（株） 山上 大智

1. はじめに

従来の連続繊維シート接着工法には、その補強効果を最大限に発揮するため、部材耐力の補強効果を重視した高強度、高弾性率の炭素繊維シートが用いられてきた。しかしながら、不透明である炭素繊維シートは、施工後は下地のコンクリートを目視で確認できず、インフラ構造物の維持管理において、経時的にコンクリート表面の変状やシートの接着・はく離状態を追跡しにくいという課題がある。筆者らは、上述の課題を解決するために、ガラス繊維シートに予めアクリル樹脂を含浸して硬化させたガラス FRP シート（以下、GFRP シート）と、透明な接着樹脂を組み合わせることで、施工後もコンクリート表面が目視で確認できる可視化補強材料を開発した。本研究では、この GFRP シートの付着性状と可視性の基本特性を把握するために実験的に検討した。

2. GFRP シートの付着性状

付着強度試験は「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法（案）」（JSCE-E543-2013）に準拠し、図-1 に示す供試体を作製して炭素繊維シートおよび GFRP シートの付着強度試験を行った。

本試験に使用したシートの材料特性を表-1 に示す。コンクリートの材齢 28 日の圧縮強度は 52.3 N/mm<sup>2</sup> であった。コンクリートの接着面をディスクサンダーで下地処理した後、プライマーを塗布し、シートをエポキシ接着剤で貼り付けることで一体化した。シートの幅は 50mm とし、定着長は 200 mm とした。载荷は 250 kN 万能試験機を用いて供試体両端の鉄筋を把持し、クロスヘッドの変位制御により単調载荷した。シート上にひずみゲージ（ゲージ長 5 mm）をブロックの連結部から 20mm ピッチで貼り付けてひずみを計測した。

3. はく離性状と界面はく離破壊エネルギー

付着強度試験の結果を表-2 に示す。全ての試験体が片面の試験面のみはく離して破壊した。図-2 に各試験体のはく離面の状態の一例を示す。炭素繊維シートの破壊性状はコンクリート表層がはく離したのに対して、GFRP シートの破壊性状は、主に GFRP シートと接着樹脂の界面破壊であった。

界面はく離破壊エネルギー  $G_f$  (N/mm) は、JSCE-E543-2013 に準じて式(1)を用いて算定した<sup>1)</sup>。

$$G_f = P_{max}^2 / (8b^2 \cdot E_f \cdot t_f)$$

(1)

ここに  $P_{max}$  は最大荷重(N)、 $b$ 、 $E_f$  および  $t_f$  はそれぞれシートの幅(mm)、ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)、厚さ(mm)である。

GFRP シートを用いた試験体の最大荷重の平均値は 12.3 kN であり、炭素繊維シートと比較して小さかったが、界面はく離破壊エネルギーは同程度であった。

キーワード GFRP シート、付着強度、界面はく離破壊エネルギー、可視性、白濁化

連絡先 〒194-8560 東京都町田市旭町 3 丁目 5-1 TEL 042-721-3651

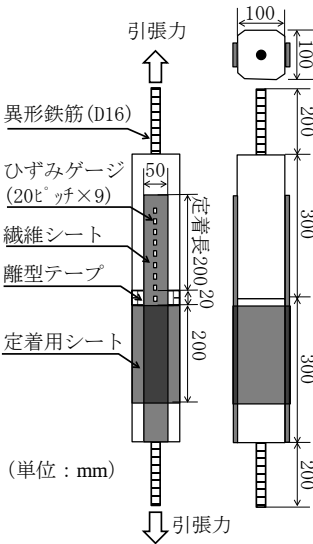


図-1 付着強度試験の供試体

表-1 シートの材料特性（カタログ値）

| シート                      | GFRP<br>シート             | 炭素繊維<br>シート        |
|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| 繊維の種類                    | 耐アルカリ<br>ガラス繊維<br>2方向平織 | 高強度<br>炭素繊維<br>1方向 |
| 目付量 g/m <sup>2</sup>     | 650                     | 200                |
| 比重                       | 2.8                     | 1.8                |
| 厚さ (mm)は1方向              | 0.232<br>(0.116)        | 0.111              |
| 引張強度 N/mm <sup>2</sup>   | 1,500                   | 3,400              |
| ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup> | 74                      | 230                |
| 引張剛性 tE kN/mm            | 8.6                     | 25.5               |

#### 4. GFRP シートのひずみ分布

図-3 に GFRP シートのひずみ分布を示す。最大荷重時のひずみ分布は、接着端部よりもひずみが大きくなる箇所が複数あり、はく離領域のひずみ分布が一定にならなかった。有効付着長は G-1、G-2 とともに 40 mm 程度であった。

#### 5. 付着強度試験における GFRP シートの外観変化

図-4 に各荷重ステップにおける GFRP シートの外観写真を示す。載荷前のシートは透明であり、コンクリート表面を目視で確認することができる。載荷後は、はく離の進行に伴って、シートの経糸部と緯糸部が白濁化し、不透明に変化していく様子が確認された。図-3 における荷重 5、12 kN のひずみ分布から推定されるはく離領域は、それぞれ 20、80 mm であり、図-4 における白濁化区間と概ね一致した。

また、荷重 12 kN を越えたあたりから、はく離の進行に偏りが発生し、最大荷重時に、最もはく離が進行した経糸部のはく離がシート末端に到達する様子が確認された。図-3 の最大荷重時にひずみ分布が一定にならなかったのは、このはく離の進行の偏りに因る可能性が考えられた。

出雲ら<sup>2)</sup>は、2 方向の炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートを用いた二面接着両引付着試験において、ひずみ分布が一定にならないことを報告し、シートが部分的にはく離し、シートがはく離していない部分に応力集中があったのではないかと考察している。今回の付着強度試験における GFRP シートの外観変化は、この考察を裏付ける結果であり、GFRP シートを用いた可視化補強材料が、補強後のコンクリート表面およびシートの接着・はく離状態の観察（可視化）に有用であることを示している。

#### 6. まとめ

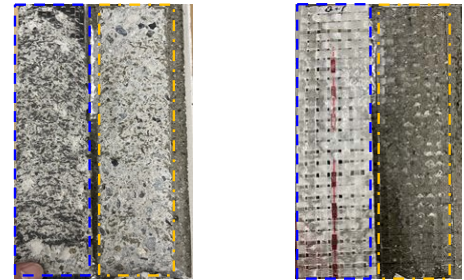
ガラス繊維シートに予め樹脂を含浸して硬化させた GFRP シートの付着性状を評価し、以下のことを確認した。付着強度試験における GFRP シートの界面はく離破壊エネルギーおよび最大付着応力は約 3 倍の剛性を有する炭素繊維シートと同程度であった。GFRP シートは、載荷前は透明性を有し、コンクリート表面が透けて見えるが、はく離が進行すると白濁化し、シートの状態を可視化することができた。

#### 参考文献

- 1) 小林朗, 尾崎允彦, 佐藤靖彦, 荒添正棋, 立石晶洋, 小森篤也: 高伸度弾性樹脂を用いて接着した FRP シートとコンクリートの付着挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.855-867, 2020.3
- 2) 出雲健司, 佐伯昇, 大沼博志: 連続繊維シートとコンクリート付着強さの算定, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.167-178, 2000.2

表-2 付着強度試験の結果

| シート         | 供試体 | 載荷速度<br>(mm/min) | $P_{max}$   | $G_f$         |
|-------------|-----|------------------|-------------|---------------|
|             |     |                  | 実験値<br>(kN) | 実験値<br>(N/mm) |
| GFRP<br>シート | G-1 | 0.3              | 12.9        | 0.96          |
|             | G-2 |                  | 11.9        | 0.81          |
| 炭素繊維<br>シート | C-1 | 3.0              | 23.7        | 1.10          |
|             | C-2 | 0.3              | 22.0        | 0.95          |



炭素繊維シート(C-2) GFRPシート(G-1)  
 □シートはく離面 □コンクリートはく離面

図-2 供試体のはく離面の状態

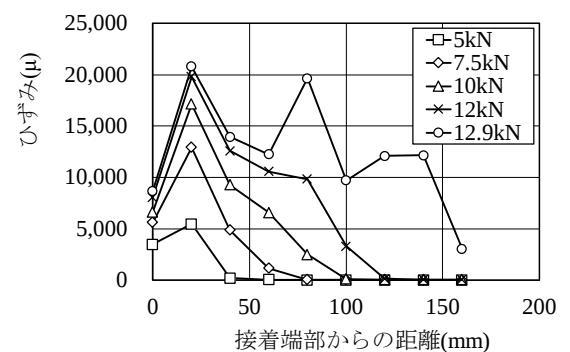


図-3 GFRP シート(G-1)の軸方向のひずみ分布

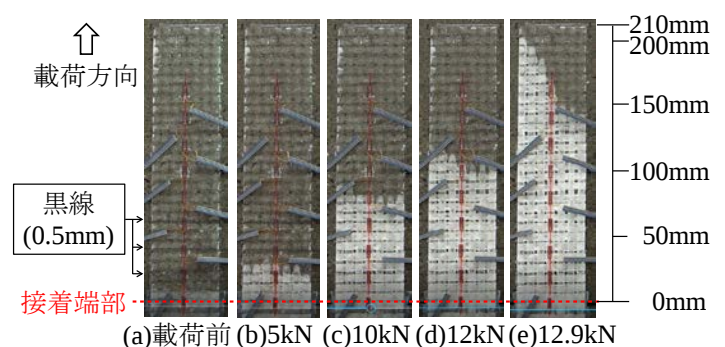


図-4 各荷重ステップにおける GFRP シート(G-1)の外観