

BFRP シートの両面付着試験における荷重速度の影響

名城大学 学生会員 ○柴垣 泰史, 正会員 岩下 健太郎
 槌屋ティスコ株式会社 松本 信行, 神崎 豊裕

1. 本研究の背景および目的

玄武岩繊維複合シート材 (BFRP シート) は, 伸び率において特に優れ, コンクリート構造物の補強材としての適用が検討されている. 本研究では, BFRP シートで補強した構造物に物体が衝突するなど高速荷重が負荷される状況を想定し, FRP とコンクリートの付着試験における荷重速度の影響を実験的に検証した.

2. 実験方法

コンクリートライブラリー101(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」に掲載されている試験方法(JSCE-E543-2000¹⁾)に基づき 100mm×100mm×300mm 供試体を 2 つ付け合わせた形状の供試体を作製し, 2000kN 万能試験機を用い, 両面付着試験を行った. ここで, 荷重速度は静的試験(5kN/min)と高速試験(1800kN/min)とした. 実験では, 荷重, 予亀裂から 5mm, 50mm, 100mm, 125mm, 150mm, 175mm, 195mm の位置に設置した検長 5mm のひずみゲージによる FRP ひずみ分布, 検長 50mm の π 型変位計による予亀裂の拡張量を変位として測定した. FRP シートの接着面はダイヤモンドサンダーによる研磨およびエタノールを浸み込ませたウェスによる洗浄を行った. その後, プライマーを 0.5kg/m² の割合で塗布し, 12 時間程度経過後に幅 50mm のバサルト繊維シートを片側 2 枚, 試験体の両側面に樹脂で接着した. 固定側ブロックには, バサルト繊維シートを巻きつけて接着, 固定した. その後, 7 日間常温で静置し, 引張実験を行った.

3. 実験結果と考察

荷重と変位の関係を示した図-1 において, 静的試験では 9.6kN, 高速試験では 16.2kN (68.7%高い) で局所的な剥離が生じて曲線の傾きが若干小さくなり, その後, 剥離が徐々に進展していき, 静的試験では 22.2kN, 高速試験では 40.60kN (82.9%高い) で完全

表-1 BFRP シートの物性一覧

設計引張強度 f_t (N/mm ²)	2000
設計引張弾性率 E_f (kN/mm ²)	90
設計破断ひずみ(%)	2.22
設計繊維目付(g/m ²) 公証厚さ t_f (mm) (長手方向のみ, 一層あたり)	580(0.22)
設計繊維含有率 V_f (%)	50
$E_f t_f$ (kN/mm)(長手方向のみ, 一層あたり)	19.8

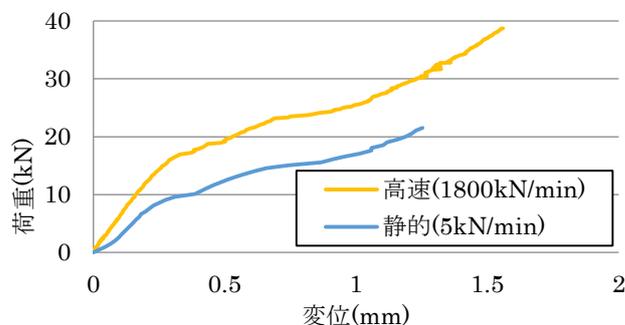


図-1 荷重-変位関係

剥離に到った. また, 完全剥離時の剥離時の荷重は高速試験の場合に静的試験の場合に比べて 68.7%向上した. 剥離はコンクリート深さで静的試験では 1~5mm 程度, 高速試験では 10~40mm 程度の位置で生じた. 次に, 同指針¹⁾より, FRP シートの付着強さを表す指標である界面剥離破壊エネルギー G_f を式(1)より算出した. その結果を図-2 に示す.

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b_c^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot n} \quad (1)$$

ここで, G_f : 界面剥離エネルギー(N/mm), P_{max} : 最大荷重(N), b_c : FRP シート幅(mm), n : FRP シートの層数, E_f , t_f については表-1 に掲載した値を採用した. また, National Research Council 発行の CNR-DT200 ガイドライン²⁾および Teng ら³⁾ (fib bulletin 14 ガイドラインに採録)による G_f の設計式は, それぞれ(2)式, (3)式のように表されている. これらの式より算定された値を図-2 に示す.

$$G_f = 0.03 \sqrt{\frac{2-B_f/w}{1+B_f/400}} \sqrt{f_c' f_r'} \quad (2)$$

$$G_f = 0.5 C_1^2 \sqrt{f_c' f_{cm}} / \gamma_c \quad (3)$$

静的試験における G_f の実験値は、いずれも式(2)、(3) の設計式による算定値より大きく、式(1) の両引き試験の評価式による算定値と同程度であった。よって、本研究で実施した静的付着試験における付着強さは、既往の静的付着試験結果と同等であることが実験的に示された。

次に、高速試験において、静的試験に比べて G_f が高い値となった原因を究明するために、有効付着長 (L_e) および FRP 剥離時のひずみ (ϵ_e) に対する荷重速度の影響を検証する。まず、FRP シートの完全剥離直前におけるひずみ分布を図-3 に示す。予亀裂から既に剥離が進展した個所では同程度の卓越したひずみが生じているが、そこから急激にひずみが小さくなっている。剥離端から剥離箇所のひずみの3%程度のひずみを伝達している箇所までの距離は有効付着長 (L_e) と呼ばれる。なお、図-3 から読み取ると、いずれの供試体でも 100mm 程度であった。また、Chen and Teng⁴⁾ および Wu and Niu⁵⁾ による L_e の評価式はそれぞれ(4)式、(5)式のように表されている。

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (4)$$

$$L_e = \frac{1.3\sqrt{E_f t_f}}{f'_c{}^{0.095}} \quad (5)$$

算定値は、(4)式より 93.1mm、(5)式より 194mm であり、静的試験と高速試験の実験値は(4)式～(5)式の範囲で同程度であった。よって、荷重速度は有効付着長に大きく影響しないことが実験的に明確となった。

一方、土木学会 コンクリートライブラリー101¹⁾ および CNR-DT200²⁾ による ϵ_e の評価式はそれぞれ(6)式、(7)式のように表されている。これらの式より算定された値を図-3 に示す。

$$\epsilon_e = \frac{\sqrt{2G_f E_f t_f}}{E_f} \quad (6)$$

$$\epsilon_e = \frac{\frac{1}{\gamma_{fd}\sqrt{\gamma_c}} k_{cr} \sqrt{\frac{2E_f G_f}{t_f}}}{E_f} \quad (7)$$

ここで、 γ_{fd} : FRP の安全係数(=1.2)、 γ_c : コンクリートの安全係数(=1.6)、 k_{cr} : 剥離モードに関する係数(モード I の場合、 $k_{cr}=1$)である。

算定値は、(6)式より 6734 μ 、(7)式より 4436 μ であり、静的試験における実験値 (5114 μ ～5932 μ) と同程度であった。よって、荷重速度が大きいほど剥離ひずみが大きくなることが実験的に明確となった。

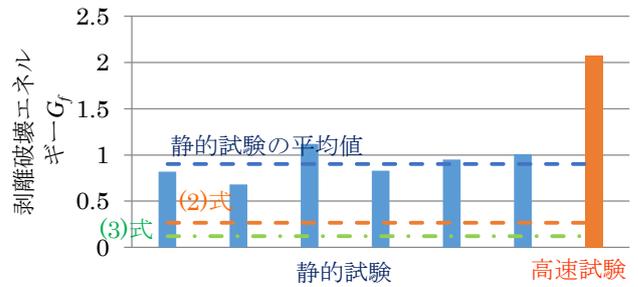


図-2 G_f の一覧

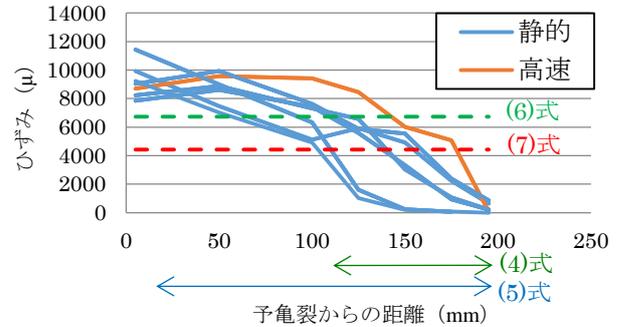


図-3 FRP シート剥離直前におけるひずみ分布

以上から、荷重速度がより大きい場合に、有効付着長は変化しないが剥離時ひずみは飛躍的に高まり、その結果、付着強さが大きくなることが実験的に明確となった。

4. まとめ

本研究では高速荷重を考慮した FRP シートの両面付着試験を行い、荷重速度は FRP の有効付着長にはほとんど影響しないが、荷重速度が大きいほど剥離時ひずみが高い値となり、その結果、付着強さが大きくなることが実験的に明確となった。

謝辞

本研究の一部は、名城大学自然災害リスク軽減研究センター (代表者: 小高 猛司) と JSPS 科研費 24760352 の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリートライブラリー101, 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, 2001.
- 2) National Research Council (NRC). (2004). "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures." CNR-DT200, Rome.
- 3) Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J., and Chen, J. F. (2003). "Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs." *Construction and Building Materials*, 17(6-7), 447-462.
- 4) Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L. (2002). *FRP-strengthened RC structures*, Wiley, West Sussex, England.
- 5) Wu, Z.S., and Niu, H.D. (2007). "Prediction of crack-induced debonding failure in R/C structures flexurally strengthened with externally bonded FRP composites," *JSCCE J. Materials, Concrete Structures, and Pavements*, 63(4), 620-639.