

熱可塑性 CFRP の鉄筋代替利用に関する実験的研究 ～その2 RC はりのせん断挙動～

東京工業大学 学生会員 ○桑鶴龍也
東京工業大学 フェロー 二羽淳一郎

鹿島建設(株) 正会員 大窪一正

1. 目的

高耐食性、高強度、軽量といった利点を有する繊維強化プラスチック(FRP: Fiber Reinforced Plastic)は、鉄筋の代替としてコンクリート内部の補強材として利用することが期待されている。母材に熱硬化性樹脂を用いた熱硬化性FRPは補強材として実用化されており、国内外で実際のコンクリート部材に適用されている。しかし、同材料は工場での成形後の再加工ができず、費用が高いため、未だ建設分野においては普及に至っていない。一方で、母材に熱可塑性樹脂を用いた熱可塑性FRPは比較的安価であることに加え、加熱による加工が可能であるため、長尺、定尺の製品から、設計に応じて切断、曲げ加工が可能である。これらの特徴から、熱可塑性FRPは、従来の課題を解決し、建設分野における普及の拡大が期待される。しかし、熱加工を施した熱可塑性FRPのコンクリート内部の補強材としての性能を確認している研究は未だ少ない。そこで本研究では、せん断補強材に熱可塑性炭素繊維強化プラスチック(TP-CFRP: Thermo Plastic Carbon Fiber Reinforced Plastic)を用いたRCはり部材の静的4点曲げ載荷試験を行い、そのせん断補強効果を評価することを目的とする。

2. 実験概要

本研究で用いた TP-CFRP は、図-1 に示すような7本の素線で構成されるより線状の材料である。また、母材に熱可塑性樹脂を用いているため、加熱後の加工が可能である。本研究では恒温槽で材料全体を均一に加熱した後に曲げ加工する方法によってせん断補強材の製作を行った。直線状での TP-CFRP の引張強度は 2081 N/mm^2 である¹⁾。

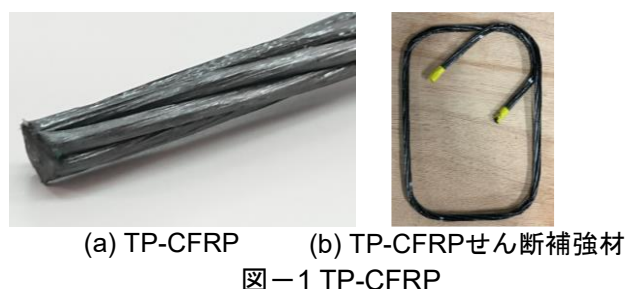


表-1に試験体諸元と実験結果を、図-2に試験体B-S6の概要を示す。せん断スパン比 a/d は2.8とした。引張補強鉄筋には SBPD1080/1230-D22 を用いた。テストスパンのせん断補強材として TP-CFRP を用い、その配置間隔を試験パラメータとした。一方、非テストスパンには、十分なせん断耐力を有するようにせん断補強鉄筋(SD345-D10)を配置した。TP-CFRP せん断補強材の曲げ内半径は $4.7\phi (=37.2 \text{ mm})$ (ϕ は断面直径)とした。

3. 実験結果

3.1 作用せん断力と変位の関係およびひび割れ性状

表-1に実験結果を、図-3に作用せん断力と試験体中央変位の関係を、図-4に試験体B-S2、B-S6の終局時のひび割れ性状を示す。

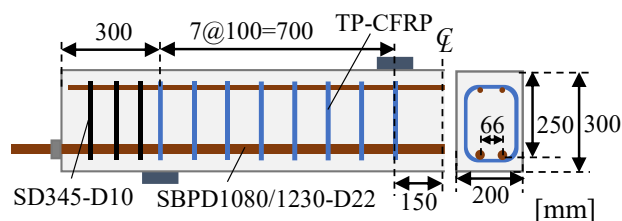
試験体B-S0では、斜めひび割れ発生直後に破壊に至り、その破壊モードは脆性的な破壊である斜め引張破壊であった。

試験体B-S2は斜めひび割れ直後には破壊に至らず、剛性が低下しながらも、載荷が進むにつれて斜めひび割れが開口した。その後、斜めひび割れが載荷点付近まで進展したあと ($V_{cp} = 95.5 \text{ kN}$)、徐々に耐力が減少した。B-S0に比べてわずかに靱性が上昇したが、その破壊モードは脆性的な斜め引張破壊であった。

表-1 試験体諸元と実験結果

試験体	r_w (%)	s (mm)	f'_c (N/mm ²)	V_{cp} (kN)	V_u (kN)	V_d (kN)
B-S0	0.00	233	36.6	69.1		67.5
B-S2	0.18			95.5		86.7
B-S4	0.30			92.4	106	92.3
B-S6	0.42			113.4	144	96.8

r_w : せん断補強材比, s : TP-CFRP せん断補強材の配置間隔, f'_c : コンクリート圧縮強度, V_{cp} : せん断ひび割れが載荷点付近まで進展したときの作用せん断力, V_u : 最大作用せん断力, V_d : PC 工学会指針によるせん断耐力の計算値



キーワード 熱可塑性 CFRP, せん断補強材, せん断挙動, 延性破壊

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 M1-21 TEL 03-5734-3577

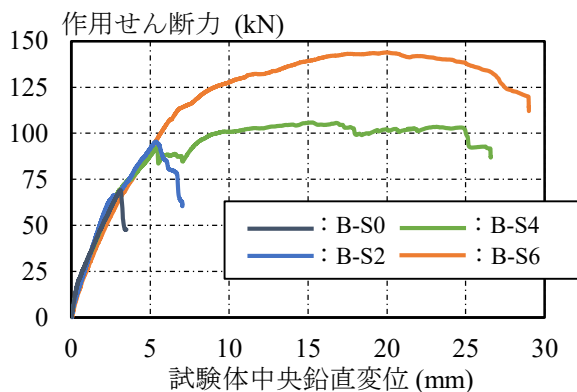


図-3 作用せん断力と試験体中央変位の関係

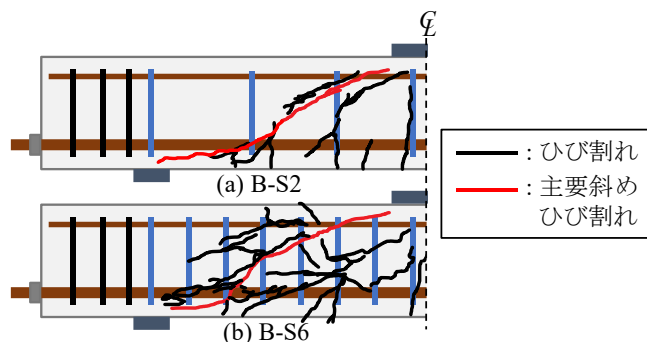


図-4 終局時のひび割れ性状

試験体 B-S4 では、斜めひび割れ発生後、剛性が低下しながらも、緩やかに作用せん断力は増加し続けた。斜めひび割れが載荷点付近まで進展したとき ($V_{cp} = 92.4$ kN) 一度作用せん断力が減少した。その後、載荷が進むにつれてひび割れが進展しながらも作用せん断力は増加、停滞、わずかな減少を繰り返した。最終的には、圧縮鉄筋の座屈により破壊に至ったが、作用せん断力が急激には減少しない延性的な破壊であった。

試験体 B-S6 では、斜めひび割れ発生後、剛性が低下しながらも、緩やかに作用せん断力は増加し続けた。斜めひび割れが進展し続け、載荷点付近まで進展したとき ($V_{cp} = 113$ kN)、さらに剛性が低下した。作用せん断力が最大となった後は、緩やかに作用せん断力が減少し続けたため、B-S6 は延性的な破壊をしたと言える。

以上のように、TP-CFRP をせん断補強材として用いることでせん断耐力が増加しており、一定のせん断補強効果を有することが認められた。また、十分なせん断補強材を配置することで、脆性的な破壊を防ぎ、はりの靱性を高めることが確認された。

3.2 設計せん断耐力との比較

棒部材の設計せん断耐力 V_d は修正トラス理論に基づき、コンクリート部分が受け持つせん断力 V_{cd} とせん断補強材が受け持つせん断力 V_{sd} との和で表される。本研究では、 V_{cd} は二羽ら²⁾の提案した式により、 V_{sd} はプ

レストレストコンクリート工学会『繊維強化ポリマー (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針』³⁾ (以下 PC 工学会指針) の式(1)~(3)によって求めた。なお、TP-CFRP の弾性係数 E には直線引張試験によって得られた $E = 96.5$ kN/mm² を用いた¹⁾。

$$V_{sd} = A_{wt} E \varepsilon_{fwd} \cdot z / s \quad (1)$$

$$\varepsilon_{fwd} = \sqrt{f'_{mcd} \frac{r_t \cdot E_s}{r_w \cdot E}} \times 10^{-4} \quad (2)$$

$$f'_{mcd} = (\Phi / 0.3)^{-1/10} \cdot f'_c \quad (3)$$

ただし、 A_{wt} : せん断補強材 1 組の断面積 (mm²)、 z : モーメントアーム長 (mm)、 ε_{fwd} : 終局限界状態におけるせん断補強材のひずみの設計用値、 f'_{mcd} : 寸法効果を考慮したコンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)、 r_t : 引張鉄筋比 (%), E_s : 引張鉄筋の弾性係数 (= 201 kN/mm²)

計算結果を表-1に示す。斜めひび割れが載荷点付近まで進展した V_{cp} 以降はひび割れ幅が大きく開口しており、修正トラス理論が成立していないとも考えられる。そこで、各試験体の V_{cp} と設計せん断耐力 V_d を比較した。 V_{cp}/V_d は 1.02, 1.10, 1.00, 1.17 であり、 V_{cp} は PC 工学会指針によって計算される設計せん断耐力と同程度であることが確認できた。ただし、B-S4 と B-S6 については、 V_{cp} 以降も作用せん断力が増加しており、そのせん断耐荷機構に関して今後詳細な検討が望まれる。

4. 結論

熱加工を施した TP-CFRP せん断補強材は一定のせん断補強効果を有し、せん断補強材比を 0.30% 以上にすることで脆性的な破壊を防止できることが確認された。また、RC はりの斜めひび割れが載荷点付近まで進展したときの作用せん断力は PC 工学会指針により計算される設計せん断耐力と同程度であることが確認された。

謝辞

本研究は、東日本高速道路(株)による技術研究助成を受けて実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 大窪ら: 熱可塑性 CFRP の鉄筋代替利用に関する実験的研究 ～その1 半円形フックの引抜き試験～, 土木学会第76回年次学術講演概要集(投稿中)
- 2) 二羽ら: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No. 372/V-5, pp, 167-176, 1986
- 3) プレストレストコンクリート工学会: 繊維強化ポリマー (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針, 2020年9月