

炭素繊維シートを用いた PC 部材へのねじり補強について

早稲田大学 正会員 ○何 海明

早稲田大学 フェロー会員 清宮 理

1. はじめに ねじりを受ける PC 部材の力学特性について、不明な点が多く、研究は十分されていない。一方、炭素繊維シート（以下 CFS）を用いて RC, PC 部材への補強法が適用しつつある。近年、研究実績も増え、大きな話題となっている。しかし、研究実績の大半は曲げ、せん断補強に関する研究で、ねじりに関する研究は少なく、CFS のねじり補強効果、ひび割れなどといった力学性状について把握されていないのが現状である。本研究では、CFS により補強された PC 部材のねじり載荷実験を行い、荷重－変位関係、ひび割れ性状、CFS の補強効果などについて調べた。また、材料の非線形、異方性などを考慮した 3 次元有限要素法解析を行い、実験結果との比較検討を行った。

2. 実験概要 図-1 に CFS で補強された供試体の詳細図を示す。図-2 に比較用の帯鉄筋で補強された供試体の詳細図を示す。CFS の材料特性は、繊維目付 600g/m^2 、設計厚さ 0.333mm 、引張強度 3400N/mm^2 、ヤング率 $2.3 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。CFS の補強量は帯鉄筋 SD295 の D10 の引張剛性 ($A \times E$) と同程度にし、CFS と帯鉄筋の引張耐力（面積 $\times$ 引張強度）比は 5.92 である。図に示すように、1 本につき幅 48 mm の CFS を 4 層用いた。供試体への導入プレストレスは 200kN （コンクリートへのプレストレス導入量は 5N/mm^2 ）で、載荷実験の直前に導入した。載荷位置での局部的な破壊を防ぐために両端を鋼板で補強した。

3. 実験結果 図-3 に各供試体のねじりモーメントとねじり率の関係図を示す。CFS-1 供試体について、最初のひび割れが観測されたときに CFS で被覆したコンクリート部分に既にひび割れが発生していた可能性も否定できない。ただ、ひび割れが発生すると、供試体のねじり剛性は大きく低下する。今回、荷重－変位曲線が大きく曲がったポイント（Re-1 供試体は $11.80\text{kN}\cdot\text{m}$, 0.00574rad/m 、CFS-1 供試体は $14.13\text{kN}\cdot\text{m}$, 0.00675rad/m ）を共通してひび割れ発生荷重として定義した。CFS-1 のひび割れ発生荷重は Re-1 より 1.2 倍、最大荷重は約 2 倍高くなり、CFS のねじり補強効果は十分得られた。図-4 に各供試体のひび割れ状況を示す。CFS-1 のひび割れは Re-1 より分散し、ひび割れ幅も小さい。Re-1 は終局段階でかぶりコンクリートの剥離が発生していた。それに対して CFS-1 は、かぶりコンクリートが CFS により拘束されたため、終局段階でもかぶりコンクリートの剥離は発生しなかった。載荷して終了後、CFS-1 を破壊させた。図-5 に CFS-1 供試体の最終破壊状況を示す。供試体下端のコンクリートが剥落し、圧壊した。また、載荷実験全過程において、CFS の破断と CFS とコンクリート間の顕著な剥離現象は観測されなかった。

4. 解析概要 CFS は異方性材料で、引張と圧縮挙動も異なる。さらに、CFS とコンクリートとの付着－すべりも考慮し

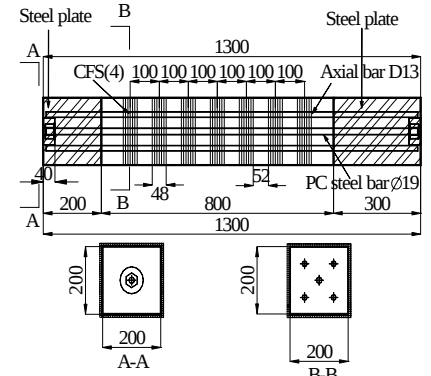


図-1 CFS-1 供試体 (単位 mm)

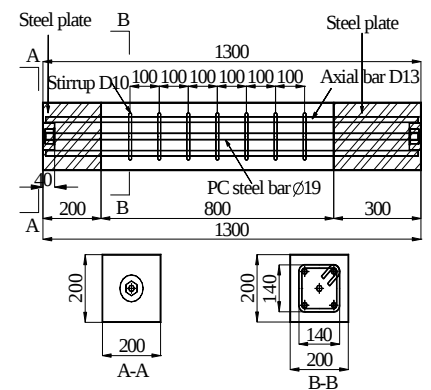


図-2 Re-1 供試体 (単位 mm)

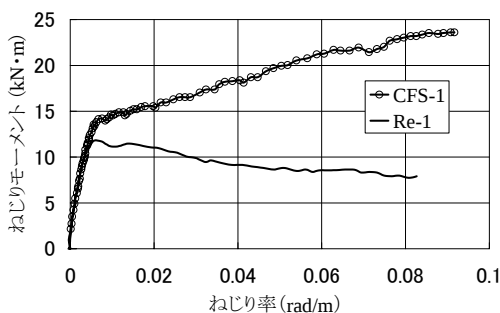


図-3 ねじりモーメント－ねじり率関係

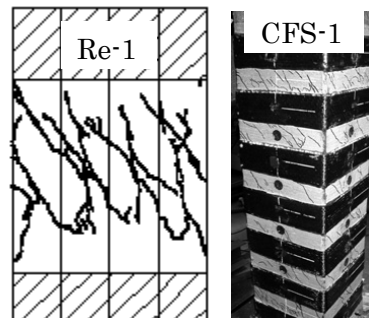


図-4 ひび割れ状況

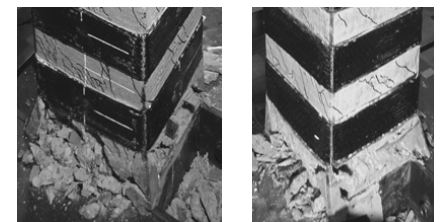


図-5 CFS-1 の破壊状況

キーワード 炭素繊維シート、ねじり、補強、載荷実験、有限要素法

連絡先 〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 51 号館 16F-01, Tel/Fax : 03-5286-3852

なければならない。図-6にCFSの材料特性を示す。Aは炭素繊維配置方向の引張-圧縮関係で、引張側はヤング率 $2.3 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度 3400 N/mm^2 として定義し、圧縮側は非常に小さいヤング率で定義した。BはCFSの他の方向での引張-圧縮関係で、非常に小さいヤング率で定義した。図-7にCFSとコンクリート間の界面要素の材料特性を示す。Aは法線方向で、Bはせん断方向である。 $\sigma_{\max}$ と $-\sigma_{\max}$ は43.2Mpaと93.1Mpa、 k_n は2490Mpa、それぞれ接着樹脂の材料特性である。 $\tau_{\max}$ と $-\tau_{\max}$ は付着強度5.0Mpa、 k_t は2490Mpaである。コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係として、横拘束の影響とひび割れによる影響を考慮したThorenfeldtらが提案した圧縮応力-ひずみ関係を用い、引張応力-ひずみ関係はHordijkが提案した非線形軟化曲線を用いた。鉄筋は降伏後 $E_T=1/100E$ のバイリニア型を用いた。図-8にコンクリートと鉄筋の材料特性を示す。図-9に解析モデルを示す。使用要素はコンクリートにSolid要素、CFSにShell要素、鉄筋に埋め込み鉄筋要素などである。

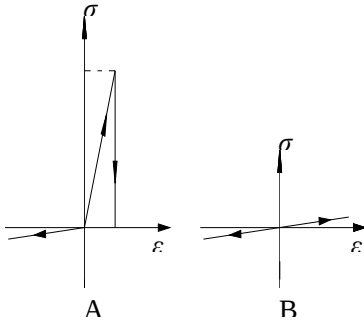


図-6 CFSの材料特性

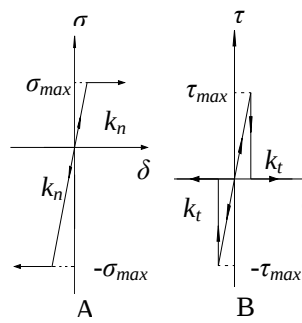


図-7 界面要素の材料特性

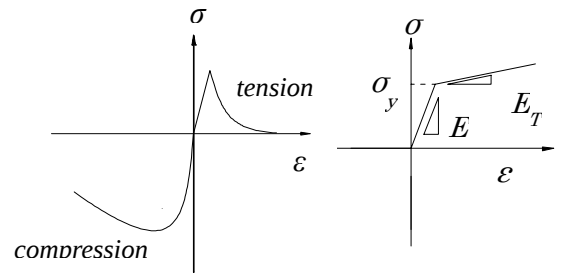


図-8 コンクリートと鉄筋の材料特性

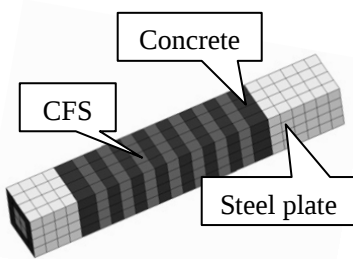


図-9 解析モデル図

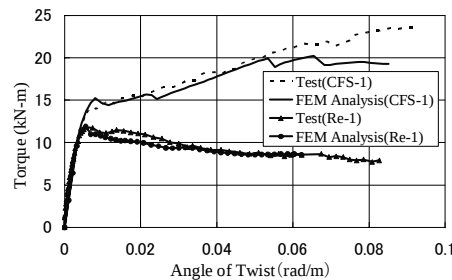


図-10 荷重-変位関係(解析結果)

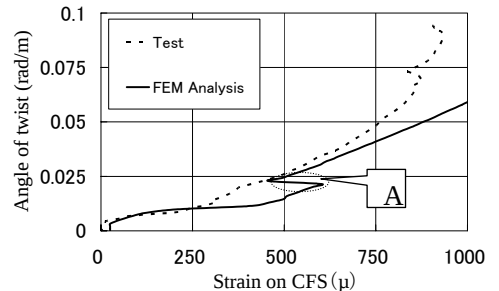


図-11 CFSのひずみ(解析結果)

5. 解析結果および実験結果との比較 図-10にねじりモーメントとねじり率関係の解析結果と実験結果との比較を示す。解析結果は実験結果とよく一致した。図-11に供試体中央のCFSのひずみの解析結果と実験結果を示す。CFSのひずみの解析結果はA部分において、すべり挙動を表した。それは界面要素のせん断応力は定義した $\tau_{\max}=5.0 \text{ Mpa}$ に達し、CFSとコンクリート間の付着が切れ、すべり現象が起きた。荷重-変位曲線（ねじりモーメントが15kN-m、ねじり率が0.02rad/m付近）にも影響した。また、図-12にひび割れの進展の解析結果を示す。Aはひび割れ発生時、ねじりモーメントは10.56kN-mで、Bは解析Step=30、ねじりモーメントは17.40N-mである。ひび割れの進展は供試体の4面の中央に発生し、荷重の増加につれて、両側に進展しにいった。実験で観測されたひび割れの進展状況と同じである。

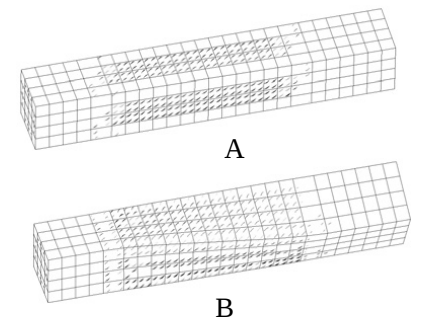


図-12 ひび割れの進展(解析結果)

6. 結論 本研究はCFSを帯鉄筋の代わりに、PC部材へのねじり補強を行った。得られた知見は以下の通りである。(1) CFSにより補強されたPC部材は帯鉄筋により補強されたPC部材より、最大耐力だけでなく、ひび割れ発生耐力も増加する。また、ひび割れを分散でき、ひび割れの幅も小さい。(2) CFSをPC部材の表面に貼り付けたことで、かぶりコンクリートのひび割れが抑えられ、かぶりコンクリートの剥離を阻止でき、コンクリート全断面をねじりに抵抗できる。また、CFSの供試体中心軸へのねじりモーメントのアーム長が長くなることで、CFSのねじりへの抵抗もより効果的である。(3) CFS等の材料非線型性を考慮した解析手法を用いて、荷重-変位関係、CFSのひずみ、ひび割れの進展などの実験結果を十分追跡でき、実験で観測できなかったCFSとコンクリートとの微小なはがれなども解析的にとらえることができた。

参考文献 何 海明・清宮 理, 炭素繊維で補強されたPC部材のねじり力学特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.28, No.2, pp.1147~pp.1422, 2006.7