

論文 RC引張部材の炭素繊維シートによる補強効果に関する 実験的検討

吉澤弘之^{*1)}・呉 智深^{*2)}

要旨：本論文では炭素繊維シートにより補強されたRC引張部材においてコンクリート、鉄筋、炭素繊維シートの相互作用による複合効果に関して、実験的な手法によりコンクリート内部に生じるひび割れの拘束効果及び分散効果、ひび割れ先端のシート剥離に関して検討を行い、破壊エネルギー法による解析値と比較した。

キーワード：炭素繊維シート、ひび割れ拘束効果、ひび割れの分散効果

1. 前書き

コンクリート構造物の引張応力作用部に接着された炭素繊維シートの補強効果は、RC構造物の耐力と靱性の向上、剛性の向上、及びひび割れの拘束効果、引張硬化等の複合効果等が考えられる。著者らは、炭素繊維シートの補強効果を確認するために繊維シートとコンクリート間の界面剥離破壊エネルギーを用い、炭素繊維シートで補強したRC構成材の引張特性に関する解析モデルの構築を試み、数種のモデルについて検討を行ってきた [1, 2]。しかし、解析モデルの構築に必要な数種のパラメータは実験によってしか得られず、また解析モデルの有効性と精度を確認するために、炭素繊維シート補強されたRC引張部材の実験的な検討が必要とされている。

繊維シート補強されたRC引張部材の実験的な検討はほとんど行われておらず [3]、炭素繊維シートのひび割れ拘束効果及びひび割れの分散効果に関する報告も少なく [4, 5]、ひび割れ幅、負荷応力状態、炭素繊維シートの剥離

長さ、さらに炭素繊維シートとコンクリート母材のせん断剥離性状等に関する定量的な報告はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本報告では、炭素繊維シート補強したRC引張部材の実験的な検討を行い、実験値と破壊エネルギー法を用いて算出した解析値との比較を実施した。

2. 実験方法

図-1に示すような100×100×500mmのコンクリート中にD19鉄筋を埋め込んだRC部材の向かい合う2面に各々、炭素繊維シートを貼り付け補強した。試験体中央には予亀裂(幅1mm、深さ5mm)を設けて、ひび割れが予亀裂部に発生するようにした。

供試体に用いたコンクリートは $G_{max}=20mm$ 、水セメント比59%、単位水量 $179kg/m^3$ であり、打設後28日の強度は22.4MPaであった。補強に使用した炭素繊維シートは繊維目付け300g/ m^2 の高強度タイプ及び高弾性タイプの2種類を用いた。鉄筋にはSD295AのD19を使用した。

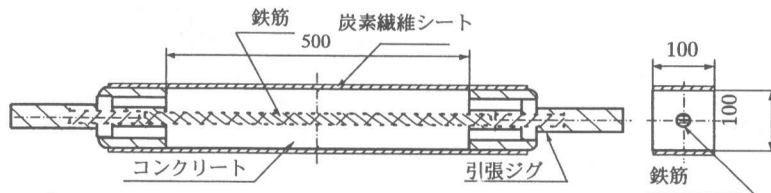


図-1 試験体寸法形状

*1 東燃(株) トウシート事業室、工修 (正会員)

*2 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科、工博 (正会員)

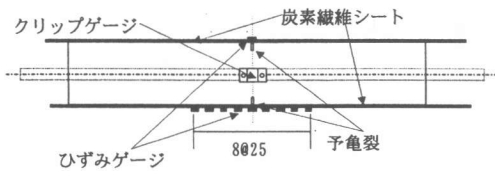


図-2 予亀裂周辺拡大図

表-1 に使用した材料物性を示し、表-2 に試験体の一覧を示す。

炭素繊維シートはディスクサンダーでコンクリート表面の下地処理を行った後、プライマーを塗布し、パテで段差等の処理を行った上にエポキシ樹脂で接着した。エポキシ樹脂の養生期間は1週間以上とした。

供試体の変形は鋼製ジグ両端の間隔を変位計にて測定した。図-2 に示すように予亀裂付近にゲージ長5mmのひずみゲージを配置した。また、予亀裂部にはクリップゲージを供試体の表、裏面に取り付け、ひび割れ幅の測定を行った。なお、供試体中央部に発生するひび割れを除き、最も初期に発生するひび割れ2本に関しては、新たにひび割れが観察された時点でクリップゲージを供試体の表、裏面に取り付けひび割れ幅を測定した。

鉄筋の降伏荷重以上の荷重を供試体に負荷させるために、鉄筋の両端には鉄筋グリップを取り付け、鉄筋グリップ先端に鋼製引張ジグを取り付けた。鋼製ジグの外側のつかみ部は、鉄筋グリップの内側の鉄筋が降伏した後も降伏しないように、十分太いものを使用した。炭素繊維シートの端部は鋼製引張ジグに接着し、はく離しないように鋼プレートとボルトで締め付けた。荷重は荷重制御で行い、荷重速度は2500 N/min一定とした。試験の状況を写真-1に示す。

3. 実験結果

3.1 応力 - ひずみの関係

図-3 に各供試体の平均応力 - 平均ひずみの関係を示す。平均ひずみは供試体の表裏2ヶの変位計で測定された平均値を、供試体の長さで

表-1 材料物性等

材料		性質	
炭素繊維シート	高強度タイプ	設計厚さ	0.167 mm
		ヤング率	230 GPa
	高弾性タイプ	設計厚さ	0.165 mm
		ヤング率	390 GPa
コンクリート	セメント	普通ポルトランドセメント	
	粗骨材	Gmax=20mm	
	強度	圧縮強度 f_c'	22.4 MPa
鉄筋	SD295A、D19	降伏強度 f_y	350 MPa
		引張強度 f_u	500 MPa

表-2 試験体種類

No.	炭素繊維シート種類	鉄筋比 ρ_s	炭素繊維シート比 ρ_{cf}	試験本数
1	-	3.00%	-	2体
2	高強度	3.00%	0.33%	2体
3	高弾性	3.00%	0.33%	2体

除して求めた。炭素繊維シート補強を行った供試体は鉄筋の降伏時の耐力が増加し、鉄筋の降伏後もひずみの増加に従って増加する。補強時の降伏強度及び鉄筋降伏後の荷重増加率はコンクリートを無視した計算値と良く一致する。

なお、今回の実験の範囲において炭素繊維シートはひ

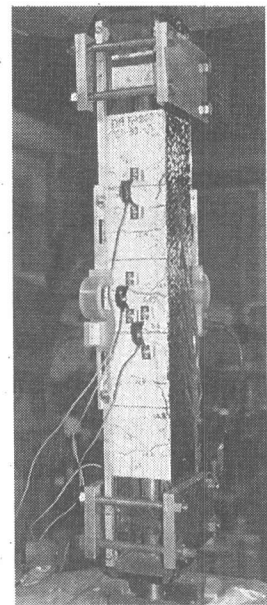


写真-1 試験状況

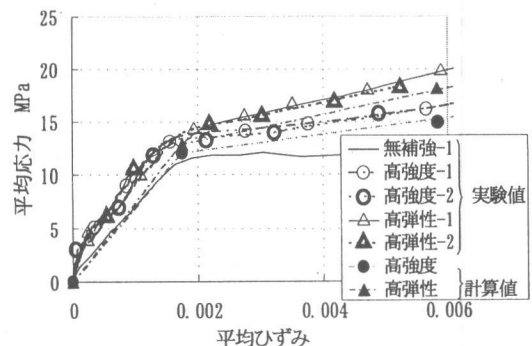


図-3 各供試体の平均ひずみ - 平均応力及び計算値の関係

び割れ部で破断せず、引張鋼製ジグとのはく離破壊かジグ部での破断（高弾性-1）であった。またジグ部で破断した高弾性-1 供試体のシート応力も設計強度を超えていた。試験は各種類2本ずつ実施したが、応力-ひずみの関係にはばらつきはほとんど無かった。

3.2 平均ひび割れ間隔

図-4 に無補強及び炭素繊維シートで補強した供試体の平均ひび割れ間隔と平均歪ひずみの関係を示す。今回の実験では無補強の試験体のひび割れは初期に1ヶ入るだけで、変形が数パーセント以内では他に入らなかった。炭素繊維シート補強したのも、鉄筋降伏後に生じるひび割れは少数であった。

図-4 より炭素繊維シート補強した際には、補強していない場合に比べ、平均ひび割れ間隔が大幅に小さくなり、炭素繊維シートのひび割れ分散効果が確認できる。

高強度、高弾性とシート弾性率を変えた場合には、ほとんど平均ひび割れ間隔に差が生じなかった。また、同仕様の供試体間には、ひび割れの入る平均ひずみには少々ばらつきがあったが、定常状態での平均ひび割れ間隔に差はほとんど無かった。

3.3 ひび割れ開口幅

図-5、6 に高強度及び高弾性炭素繊維シートで補強した供試体の平均応力、ひび割れ開口幅と供試体の平均ひずみとの関係を示す。図に示したひび割れ開口幅は、供試体の表、裏面生じたひび割れの平均値を示している。図5、6 に示すように高強度タイプ、高弾性タイプで補強した供試体とも、ひび割れ幅の増加傾向は鉄筋降伏後もほぼ直線となっている。

図-7 に無補強及びシート補強した供試体のひび割れ開口幅の比較を示す。補強したケースでは第一ひび割れのみ図に示している。平均ひび割れ間隔が、炭素繊維シート補強を行うと分散されることにより、平均ひび割れ幅は無補強の場合に比較して小さくなり、炭素繊維シートのひび割れ拘束効果が確認できる。

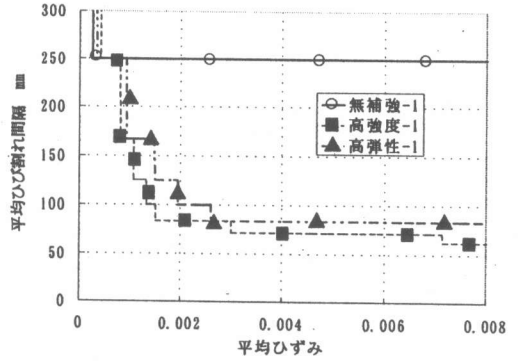


図-4 平均ひび割れ間隔と平均ひずみの関係

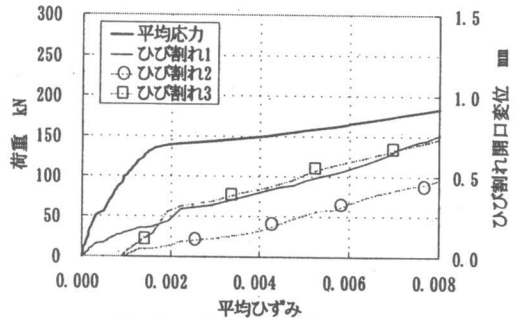


図-5 荷重、ひび割れ開口幅と平均ひずみの関係（高強度1）

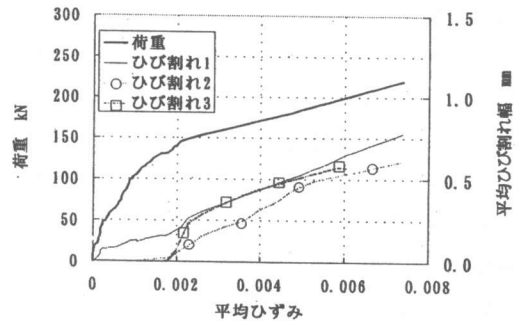


図-6 重、ひび割れ開口変位と平均ひずみの関係（高弾性1）

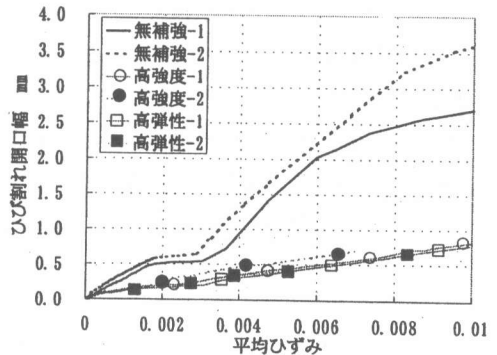


図-7 ひび割れ開口幅と平均ひずみの関係

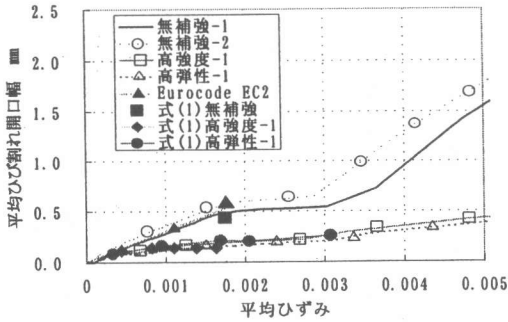


図-8 平均ひび割れ開口幅の実験値と計算値の比較

なお、高強度、高弾性とシート弾性率を変化させても、ひび割れ開口幅にほとんど差は生じなかった。また、同仕様の2体の供試体間のひび割れ開口幅にほとんど差は無かった。

Broms [6]は各ひび割れ開口幅の合計が供試体の変形量に等しいと仮定して

$$W_{ave} = S_{ave} \times \varepsilon_s \quad (1)$$

の関係を導き引張を負荷した鉄筋コンクリート部材の実験値と上式を比較し良く一致することを示した。ここで W_{ave} : 平均ひび割れ幅、 S_{av} : 平均ひび割れ間隔、 ε_s : 鉄筋ひずみである。この関係と Eurocode EC2 によるひび割れ開口幅と、今回の実験を比較したものを図-8に示す。本ケースでは鉄筋ひずみの代わりに、平均ひずみを用いて算出している。Eurocode EC2は無補強のケースにしか式が対応していないが、今回の無補強の実験結果に良く一致する。また平均ひび割れ間隔を実験から求めることが可能であれば、無補強、炭素繊維シートの場合とも(1)式と良く一致することが判る。

3.4 炭素繊維シートのひずみ及びシートのはく離

図-9及び10に高強度炭素繊維シートで補強した供試体の予亀裂周辺の炭素繊維シートひずみ分布を示す。縦軸は炭素繊維シートに生じたひずみ、横軸は予亀裂(供試体中央)からの距離、凡例中の数字は供試体の平均ひずみである。またグラフ下部の図はひび割れのスケッチであり、この横方向のスケールはグラフの横軸

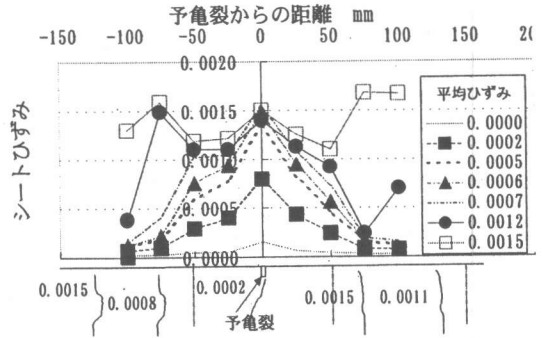


図-9 予亀裂周辺のシートひずみ分布 (高強度-1 変形初期)

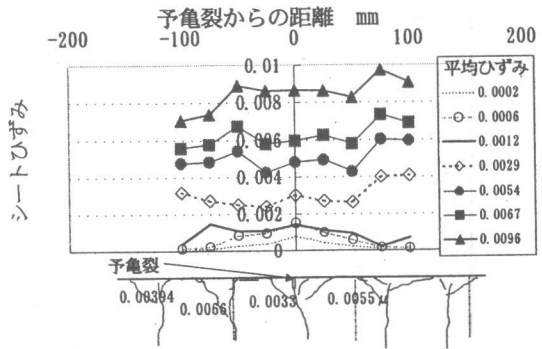


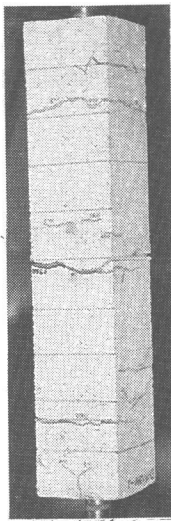
図-10 予亀裂周辺のシートひずみ分布 (高強度-1 最終時まで)

に一致させている。

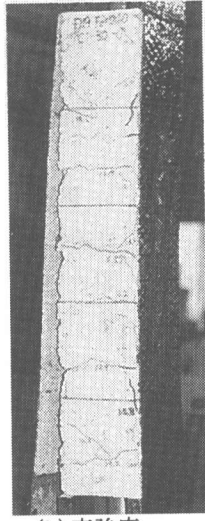
鉄筋降伏前の平均ひずみが小さい場合にはひび割れ先端部の炭素繊維シートにはひずみが集中する。平均ひずみが0.002程度から引張ひび割れ近傍には、図-10に示すような目に見えるせん断ひび割れが観察され始め、引張ひび割れ先端付近の応力を緩和する。さらに荷重を増加させると、炭素繊維シートにほぼ平行に層間剥離がせん断ひび割れ先端部より発生した。それが隣の引張ひび割れ部から発生した層間剥離と連結するのが観察された。

炭素繊維シートとコンクリートとの最終はく離性状に関しては、炭素繊維シートの端部の定着を鋼製ジグ部としたため、今回の実験では検討を行っていない。

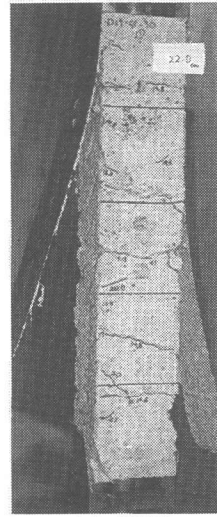
なお、ひび割れ先端部のたたき点検により、炭素繊維シートのはく離を検出しようと試みたが、引張ひび割れ先端近傍からせん断ひび



(a) 無補強



(b) 高強度



(c) 高弾性

写真2 試験体破壊状況

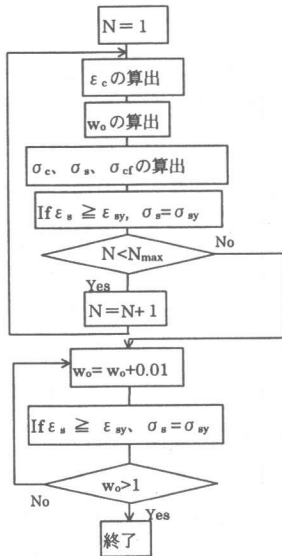


図-11 解析フロー図

割れが発生するまで、明白なはく離と見なせる部分は観察されなかった。炭素繊維シートのはく離長さに関しては、さらに実験的な検討を進めて報告を行う予定である。

4. 解析との比較

前報[2]で報告した破壊力学に基づいた破壊エネルギー法により、炭素繊維シートで補強したRC構成材の引張特性に関する解析を実施した。解析の詳細は省略するが、今回の解析では鉄筋の降伏を考慮し、炭素繊維シートのはく離

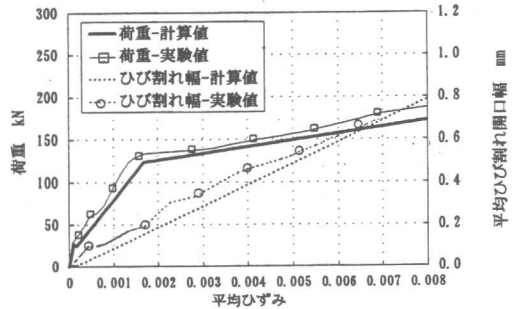


図-12 荷重、平均ひび割れ開口幅の実験値と計算値の比較 (高強度)

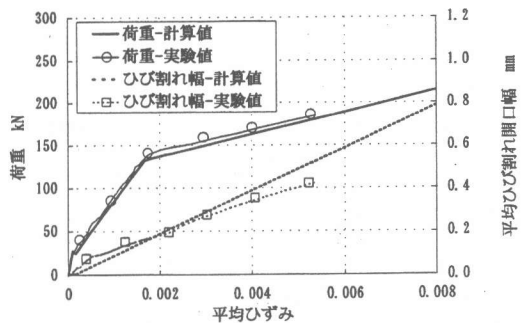


図-12 荷重、平均ひび割れ開口幅の実験値と計算値の比較 (高弾性)

長さは一定値 (25mm) と仮定して行った。試験片幅 b 、高さ t 、長さ L はそれぞれ試験体寸法と同じ 100、100、500mm とした。剥離した鉄筋とコンクリートの摩擦応力 $\tau_s = 25\text{MPa}$ 、限界ひび展抵抗値 $R_{lcf} = 0.010\text{N/m}$ とした。また、最大

ひび割れ数 N_{max} は実験より得られた5の値を用いた。最大ひび割れ数等に関しては、今後鉄筋量、炭素繊維シートの数量、ヤング率等を変化させた詳細な実験を行い、計算で算出できるようにしたいと考えている。

図-11に解析のフローを示し、図-12、13に計算値と実験値の比較を示す。実験値と解析値は非常によい一致を示し、本解析法の有効性が示された。

炭素繊維シートの剥離長さは、ひび割れ先端のシート応力に大きく影響し、シートの剥離進展、または破断等の終局耐力がこれにより変化する。しかし、剥離長さが初期剛性等の応力-ひずみの関係に与える影響は微小である。今後、終局耐力及び変形能力を算出するために、初期剥離長さ及びその進展に関する解析方法の検討を行う予定である。

5. 結論

炭素繊維シートで補強されたRC引張部材においてコンクリート、鉄筋、炭素繊維シートの相互作用による複合効果に関し、実験的な手法により検討を行い、破壊エネルギー法により予測された解析値と比較した結果以下の結論を得た。

- (1) 炭素繊維シート補強したRC引張部材のひび割れ幅は、無補強のものに比較して小さく、平均ひび割れ間隔も無補強のものに比較して小さくなり、炭素繊維シートのひび割れ分散効果が実験で確認された。
- (2) コンクリートの引張りひび割れ先端付近の炭素繊維シートの応力集中は、引張りひび割れ近傍に生じるコンクリートの微少なせん断ひび割れ、さらにはシートの剥離により緩和される。今回の実験の範囲ではひび割れ先端部での炭素繊維シートの破断は生じなかった。
- (3) 破壊エネルギー法により、炭素繊維シートで補強したRC構成材の引張特性に関する解析を実施した結果、解析値は実験値と非常によい一致を示し、本解析法の有効性が示され

た。今後さらに実験をすすめ、これに基づいてパラメータを決定し、さらに精度の良い解析を実施したいと考えている。

5. 謝辞 有意義なアドバイスをいただきました茨城大学材料研究室 福沢教授及び実験にご協力いただきました茨城大学構造工学研究室 田名部技術官に感謝いたします

なお本論文の一部は、平成8年度文部省科学研究費補助金 基盤A (課題番号08555107、代表: 呉智深) の援助を受けて行ったものであることを付記する。

参考文献

- [1] 吉澤弘之、呉智深: 破壊エネルギー解析法による炭素繊維シート補強をしたRC構成材の引っ張り特性に関する研究、構造工学論文集、Vol. 43A、pp. 1339-1346、1997. 3
- [2] 吉澤弘之、呉智深: 引張荷重を負荷した炭素繊維シート補強RC部材の剥離破壊性状に関する解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19、No. 2 pp. 141-146、1997
- [3] Nanni, A., Bankis, E. B. and Boothby, T. E. : External Bonded FRP Composites for RC Structures, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceeding of the Third Symposium, Vol. 1, pp. 303-310, 1997
- [4] 森成道、若下藤紀、松井繁之、西川和廣: 炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究、橋梁と基礎、pp. 25-32、1995. 3
- [5] 宇治公隆、横田和直、池田尚治: シート状炭素繊維による既設構造物の耐荷性能向上機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 695-700、1992
- [6] Brooms, B., B., : Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members, Journal of the American Concrete Institute, pp. 1237-1256, Oct., 1965