

# 論文 連続繊維シート補強コンクリート引張・曲げ部材のひび割れ挙動に関する検討

吉澤弘之<sup>\*1</sup>・呉 智深<sup>\*2</sup>

**要旨:**炭素繊維シート補強したRC曲げ供試体のひび割れ間隔、ひび割れ幅を実験的に測定し、無補強のものと比較し、さらに炭素繊維シート補強したRC部材との比較を実施した。その結果、炭素繊維シート補強したRC曲げ梁のひび割れ間隔は、無補強のものに比べ約50%、平均ひび割れ幅は最大で無補強のものに比べ65%程度と小さくなり、炭素繊維シートによるひび割れの分散効果が確認できた。また、平均ひび割れ幅と鉄筋ひずみから、炭素繊維シート補強RC梁の曲げひび割れ幅が算出できることを確認した。

**キーワード:**連続繊維シート、炭素繊維、曲げ補強、ひび割れ間隔、ひび割れ幅

## 1. まえがき

RC部材のコンクリートに引張ひび割れが生じた際に、連続繊維シートは鉄筋とともにひび割れ部で荷重を負担し、その荷重を連続繊維シートとコンクリートの界面のせん断力としてコンクリートに伝達する。連続繊維シートに生じる引張応力は、ひび割れの開口を拘束するとともに、ひび割れを分散させる。

連続繊維シートで補強されていないRC部材のひび割れ間隔、ひび割れ幅に関する研究は古くから行われ<sup>1), 2), 3)</sup>、様々なひび割れ算定式が提案されている。

連続繊維シートで補強された場合のRC部材のひび割れ間隔、ひび割れ幅に関しては、著者らは連続繊維シートで補強された引張荷重が作用するRC部材に関して鉄筋量、かぶりコンクリート厚さ、コンクリート強度、炭素繊維シートのヤング率及び補強量等をパラメータとして一連の詳細な実験を実施してきた<sup>4)</sup>。そしてひび割れ間隔、ひび割れ開口幅を実験的に測定し、ひび割れ幅の予測、引張硬化及びひび割れ周辺の連続繊維シートの剥離挙動に関して検討を行なってきた。

しかし、連続繊維シートで補強したRC曲げ部材に関しては、連続繊維シートによる曲げ

ひび割れの分散効果、ひび割れの開口拘束効果に関する実験的な検討はほとんど実施されていない。そこで本研究では、連続繊維シートとともに一般的に用いられている炭素繊維シートを用いて補強したRC曲げ供試体を用いた実験を実施した。そして、炭素繊維シート補強した構造物の設計指標及び、炭素繊維シートとRC部材の複合効果をモデル化するための基礎データとしてひび割れ間隔、ひび割れ幅を実験的に測定し、ひび割れ幅の予測、及びひび割れ周辺の炭素繊維シートの剥離挙動に関する検討を実施した。

## 2. 実験方法

曲げ供試体は図-1に示すように長さ210cm、梁せい20cm、幅15cmで、引張鉄筋にはD16を2本配置した。引張鉄筋の純かぶり厚さは、以前実施したRC引張部材とひび割れ間隔、ひび割れ幅とデータを比較するために、側面、引張縁とともに引張部材とほぼ同じ4.2cmとした。

補強材として目付300g/m<sup>2</sup>の高強度、または高弾性炭素繊維シートを2層重ねて補強した。供試体下面中央には予亀裂(人工ひび割れ。幅1mm、深さ5mm)を設けた。供試体のコンクリー

\*1 日鉄コンポジット(株)トウシート事業部 主任技師 工修 (正会員)

\*2 茨城大学工学部都市システム工学科 助教授 工博 (正会員)

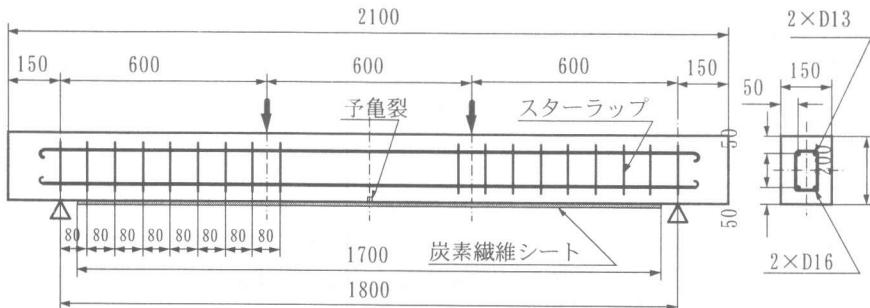


図-1 曲げ試験片寸法形状

ト表面は、ダイヤモンドディスクサンダーでサンディングを行った後、プライマーを塗布し、パテで段差等の処理を行った上に炭素繊維シートを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。載荷方法は4点曲げとし、荷重制御で実施した。荷重速度は1kN/minとした。測定項目は、ひび割れ幅、たわみ、鉄筋のひずみ、炭素繊維シートのひずみである。ひび割れ幅は側面鉄筋高さ位置において、検長10cmのコンタクトストレインゲージを用いて測定を行った。

実験に使用した材料の物性等を表-1に示し、曲げ供試体の仕様を表-2に示す。また、写真-1に試験状況を示す。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 荷重・変位の関係、梁の破壊形態

各供試体の荷重と梁中央の変位との関係を図-2に示す。炭素繊維シートで補強すると、鉄筋降伏時の荷重が無補強のものより増加し、鉄筋降伏後も荷重が増加することは既往の研究<sup>5)</sup>と同様である。表-3に各供試体の鉄筋降伏荷重、最大荷重を示す。

炭素繊維シートで補強した梁の最終破壊形態は写真-2に示すように、引張鉄筋位置でかぶりコンクリートが剥離破壊した。この際にかぶりコンクリートと炭素繊維シートは付着したままであった。これは許容値以上の大きなせん断力が、鉄筋とコンクリートの界面付近

表-1 使用材料の物性等

材料	性質		
炭素繊維シート	高強度 タイプ	設計厚さ ヤング率	0.167 mm 230 GPa
	高弾性 タイプ	引張強度	4200 MPa
コンクリート	粗骨材 $G_{max}$	設計厚さ ヤング率	0.165 mm 390 GPa
	圧縮強度 $f_c'$	引張強度	4000 MPa
鉄筋	降伏強度 $f_y$		390 MPa
SD295A	引張強度 $f_u$		580 MPa

表-2 曲げ供試体の仕様

No.	炭素繊維シート	引張鉄筋比 %	炭素繊維シート比 %
No. 1	-	1.34	-
No. 2	高強度 2層	1.34	0.167
No. 3	高弾性 2層	1.34	0.165

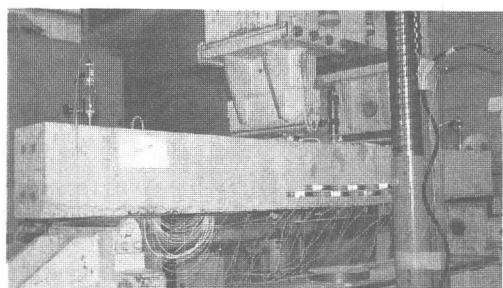


写真-1 実験状況

表-3 試験結果概要

No.	補強シート種類	鉄筋降伏荷重 kN	最大荷重 kN	最終破壊形態
No. 1	無補強	72.3	83.5	コンクリート圧壊
No. 2	高強度	98.1	136.5	かぶりコンクリートの剥離 破壊に伴う曲げ破壊
No. 3	高弾性	113.4	156.9	かぶりコンクリートの剥離 破壊に伴う曲げ破壊

に作用したことによって、引張鉄筋とコンクリートの付着切れが生じたものと考えられる。このようなかぶりコンクリートの剥離破壊による連続繊維シート補強梁の最終破壊現象は、

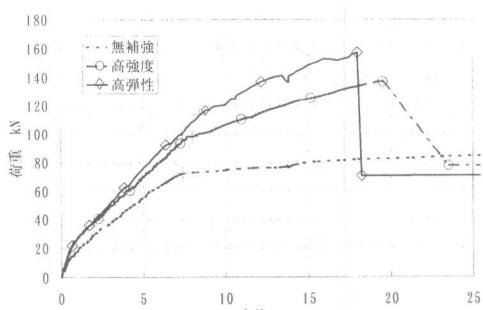


図-2 荷重-変位の関係

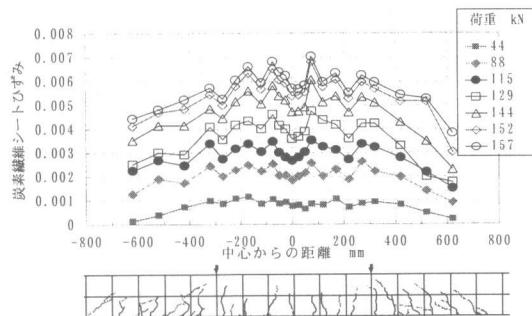


図-3 炭素繊維シートひずみ(高弾性)

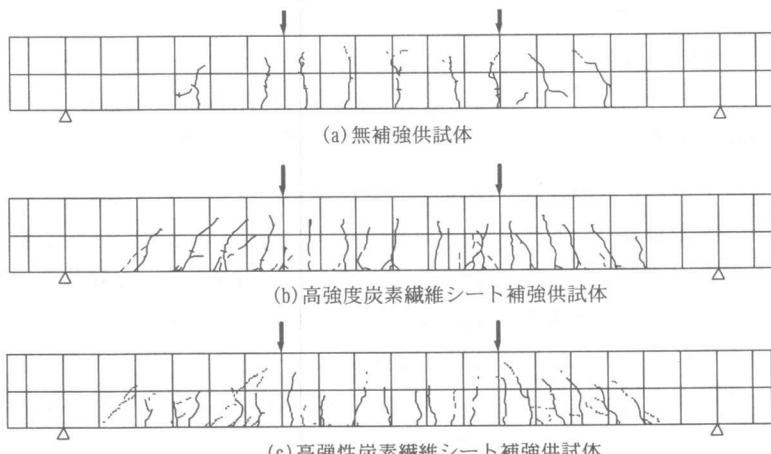


図-4 供試体のひび割れ状況(最終破壊直前)

これまでにウォータージェット等でコンクリート表面のモルタルをとばし、粗骨材が露出するような強い下地処理した際<sup>5)</sup>に見られるだけであった。今回の炭素繊維シート貼付の下地処理として実施した、ダイヤモンドディスクサンダーを使用した下地ケレンが、炭素繊維シートとコンクリートのせん断着强度を、通常のペーパーサンダー等の下地ケレンと比較して向上させた結果、このような破壊現象が生じたものと思われる。近年ペーパーディスクによる下地ケレンと同様に、よく用いられるようになったダイヤモンドディスクによる下地ケレンは、ペーパーサンダーの刃をダイヤモンドディスに変えるだけでの簡易な方法で行うことができるため、コンクリートと連続繊維シートの付着力を上げ、接着の信頼性を上げる有力な手段であると思われる。



写真-2 最終破壊状況(高弾性)

図-3に高弾性炭素繊維シート補強した梁の炭素繊維シートのひずみ分布を例として示す。図-3の下側に表示した供試体のひび割れ図の縮尺は、グラフの横軸に一致させている。最終破壊時の炭素繊維シートのひずみは、等曲げモーメントの区間では0.006以上の値となっている。最終破壊直前の荷重152kNにおいて、梁の中央から+500mmの場所と+600mmの場所

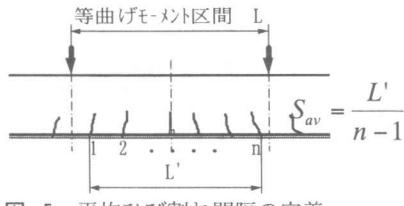


図-5 平均ひび割れ間隔の定義

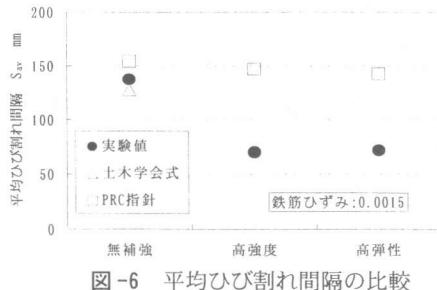


図-6 平均ひび割れ間隔の比較

に生じている炭素繊維シートのひずみの差は約0.002であり、この区間の炭素繊維シートとコンクリートの平均せん断応力は $390\text{GPa} \times 0.0165\text{cm} \times 2\text{層} \times 0.002 \div 10\text{cm} = 2.57\text{MPa}$ に達している。コンクリートのひび割れ先端付近では、炭素繊維シート界面から斜めに微小なせん断ひび割れが生じているため、微小な範囲では剥離破壊が生じていると思われる。しかし、微小せん断ひび割れ先端からの最終剥離破壊の進展は起こらず、引張鉄筋の位置に鉄筋とほぼ並行にコンクリートのせん断ひび割れが生じた直後に、この供試体は最大荷重に到達し最終破壊を起こした。

### 3. 2 平均ひび割れ間隔について

図-4に今回試験を実施した梁のひび割れ状況を示す。図中の実線は鉄筋降伏前に生じたひび割れを、破線は鉄筋降伏後に生じたひび割れを表している。この図から等曲げモーメント区間において、無補強供試体よりも、炭素繊維シート補強供試体の方がひび割れが分散している傾向がわかる。

今回試験を実施した梁の、鉄筋降伏前(鉄筋ひずみ:0.0015)の引張鉄筋位置での平均ひび割れ間隔を表-4に示す。また、図-5に今回実施した曲げ試験における平均ひび割れ間隔 $S_{av}$

表-4 各供試体の平均ひび割れ間隔  
(鉄筋ひずみ:0.0015)

No.	補強シート	平均ひび割れ間隔 mm
No. 1	無補強	137.5
No. 2	高強度	70.0
No. 3	高弾性	71.4

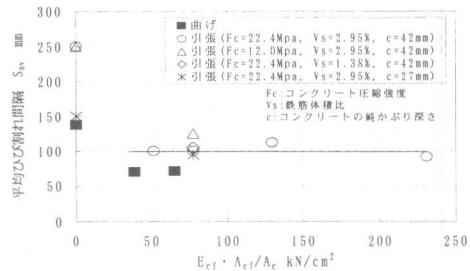


図-7 平均ひび割れ間隔と炭素繊維シート剛性との関係

の定義を示した。図-6に土木学会式と、ひび割れ幅を精度良く予測可能である<sup>3)</sup>といわれるPRC指針式<sup>6)</sup>によって算出した、無補強供試体の平均ひび割れ間隔を併記する。なおPRC指針は炭素繊維シートを鉄筋にヤング率比で換算し、既存の鉄筋量に加えたものを図-6に加えた。

今回載荷試験を実施した無補強供試体の平均ひび割れ間隔は土木学会式、及びPRC指針の値に近く、得られた無補強供試体の平均ひび割れ間隔は適切な値であったと考えられる。

炭素繊維シートで補強した供試体の平均ひび割れ間隔は、無補強供試体の平均ひび割れ間隔と比較して小さくなり、高強度、高弾性炭素繊維シートで補強したものはどちらも、無補強供試体の半分程度となった。炭素繊維シート補強した場合の平均ひび割れ間隔は、PRC指針で炭素繊維シートを鉄筋換算し、算出した値とは大きく異なる。補強に使用した炭素繊維シートの断面剛性は、高弾性のシートの方が高強度のものよりも約1.7倍高いが平均ひび割れ間隔は変化せず、平均ひび割れ間隔はほとんど炭素繊維シートの剛性の影響を受けていないことがわかる。この傾向はRC部材を炭素繊維シートで補強し引張荷重を負荷した場合と同一である<sup>4)</sup>。著者らが実施したRC引

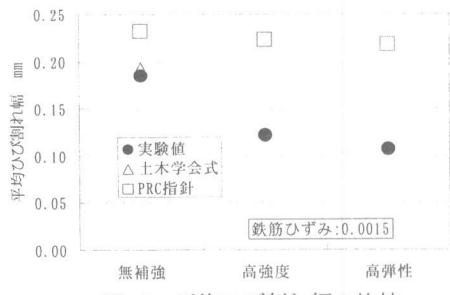


図-8 平均ひび割れ幅の比較

張部材の平均ひび割れ間隔の関係を、今回実施した曲げ部材と比較したものと図-7に示す。平均ひび割れ間隔を曲げ供試体と引張供試体で比較すると、曲げ供試体の方が小さい傾向を示している。

### 3.3 ひび割れ幅に関する

今回試験を実施した梁の、平均ひび割れ幅を表-4に示す。また、図-8に土木学会式とPRC指針式により算出した、無補強供試体の平均ひび割れ幅を実験値と比較した。今回載荷試験を実施した無補強供試体の平均ひび割れ間隔は、土木学会式により算出された値とほぼ同等で、今回の実験で得られた無補強供試体の平均ひび割れ幅は、平均ひび割れ間隔と同様に適切な値であると考えられる。この無補強供試体の平均ひび割れ幅と比較して、炭素繊維シートで補強した供試体の平均ひび割れ幅は、無補強の場合と比較して高強度炭素繊維シートの場合の平均ひび割れ幅は65%程度、高弾性シートでは60%程度と非常に小さくなつた。また、炭素繊維シート補強した場合の平均ひび割れ幅は、PRC指針で炭素繊維シートを鉄筋換算し、算出した値と大きく異なる結果となつた。

今回実施した曲げ部材のひび割れ幅を、著者らが以前実施したRC引張部材の平均ひび割れ幅をと比較したものを図-9に示す。平均ひび割れ幅を曲げ供試体、引張供試体で比較すると曲げ供試体の方が小さくなっている。

炭素繊維シート補強したRC引張部材の場合

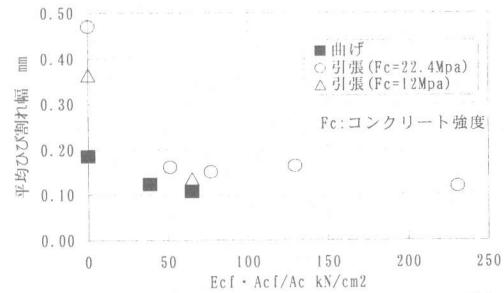


図-9 平均ひび割れ幅と炭素繊維シート剛性との関係

表-5 平均ひび割れ幅の計算値と実験値の比較  
(鉄筋ひずみ: 0.0015)

	平均ひび割れ間隔 mm	平均ひび割れ幅 mm	
		計算値	実測値
高強度	70.0	0.105	0.122
高弾性	71.4	0.107	0.107

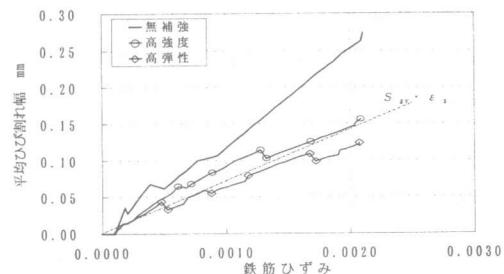


図-10 平均ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係

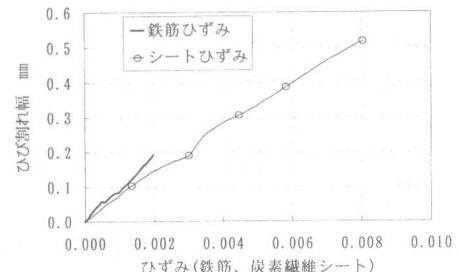


図-11 ひび割れ幅とひずみの関係

には、無補強の場合と同様に平均ひび割れ間隔  $S_{av}$  とひび割れ幅  $w_{av}$  の間に

$$w_{av} = S_{av} \varepsilon_{mean} \quad (1)$$

の関係が成立っていたが、曲げ供試体の場合も  $\varepsilon_{mean}$  に鉄筋ひずみを使用して平均ひび割れ幅を算出すると、表-5及び図-10に示すように計算値と実測値とほぼ一致する。

図-11に実測されたひび割れ幅と鉄筋ひずみ

み、炭素繊維シートひずみの関係の例を示す。ここで炭素繊維シートひずみは等曲げモーメント区間に貼り付けた15枚のひずみゲージで測定された値の平均値である。ひび割れ幅は鉄筋の降伏前、及び降伏後も炭素繊維シートのひずみにほぼ比例する。

図-12に曲げ供試体の荷重とひび割れ幅の関係を示す。例えば60kNの荷重を載荷した際のひび割れ幅は、無補強のものに比較して高弾性炭素繊維シートで補強した際には58%のひび割れ幅となった。高弾性炭素繊維シートの場合は同様に41%となった。断面剛性の高い炭素繊維シートを補強材として用いた方が、剛性が低いシートを用いたものよりも同じ荷重を負荷した際のひび割れ幅が小さくなり、炭素繊維シートの剛性によるひび割れ拘束効果が確認できた。

#### 4. 結論

連続繊維シート補強したRC曲げ梁のひび割れ間隔、ひび割れ幅等に注目し載荷試験を行い、RC引張部材の実験結果と比較検討を実施した結果以下の結論を得た。

- 1) 炭素繊維シート補強をしたRC梁の平均ひび割れ間隔は、無補強のものよりも小さくなり、平均ひび割れ間隔は補強する炭素繊維シートの剛性によってほとんど変化しない。この傾向はRC引張部材と同様であり、炭素繊維シート補強したRC引張部材と曲げ部材を比較すると、曲げ部材の平均ひび割れ間隔が小さい。
- 2) 炭素繊維シート補強をしたRC梁の平均ひび割れ幅は、無補強のものよりも小さくなり、平均ひび割れ幅は補強する炭素繊維シートの剛性によってほとんど変化しない。
- 3) 炭素繊維シート補強したRC梁のひび割れ幅は、鉄筋の平均ひずみに比例する。また、平均ひび割れ間隔と鉄筋ひずみから、平均ひび割れ幅を算出することが可能である。

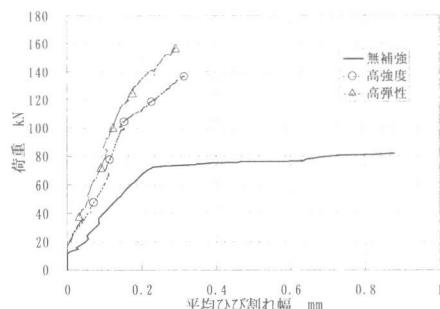


図-12 荷重と平均ひび割れ幅の関係

謝辞 実験にご協力いただきました田名部技術官、及び都市システム工学科構造工学研究室各位に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 角田与史雄:鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅:コンクリート・ジャーナル, vol. 8, No. 9, pp. 1-10, 1970.
- 2) Bengt, B.Broms: Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members, Journal of the American Concrete Institute, pp.1237-1256, oct., 1965.
- 3) 劉鍵, 大野義照, 李振宝, 鈴木計夫:鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に及ぼす各種要因の影響, コンクリート工学年次論文報告集 vol.17, No.2, pp.1019-1024, 1995.
- 4) 吉沢弘之, 吳智深:炭素繊維シート補強によるRC引張部材のひび割れ特性に関する研究, 土木学会論文集 No. 613/V-42, pp. 249-262, 1999. 2.
- 5) 水越睦視, 明星徹, 真鍋隆, 小林哲也:炭素繊維シート補強RC梁の曲げ形状に及ぼすシートの接着状態の影響, 土木学会第50回年次講演集 Vol.5, pp.400-401, 1995.
- 6) 日本建築学会:プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針