

# 論文 炭素繊維で曲げ補強したRCはりの耐力及び変形に関する実験的研究

高橋 義裕<sup>\*1</sup>・佐藤 靖彦<sup>\*2</sup>

**要旨：**RC はりの下面に炭素繊維（CFRP）シ - トを貼付し曲げ試験を行った。実験供試体は全部で 10 体で，CFRP のシ - ト層数をパラメ - タとし，シ - トの貼付方法としてコンクリ - トとシ - トとの間の緩衝材の有無と U 字巻き上げ補強の有無について実験的に検討した。緩衝材を設けた供試体では，その最大荷重は緩衝材を設けなかった供試体に対し最大で 46% 増加した。また，供試体に U 字巻き上げ補強を併用することにより，終局変位の増加と若干の最大荷重の増加が確認できた。

**キ - ワ - ド：**炭素繊維シ - ト，曲げ補強，緩衝材，U 字補強，曲げ耐力

## 1. はじめに

既存構造物の補強を行う上で重要なことは，曲げ及びせん断に対して十分な補強効果を有しているとともに，その施工性に優れていることであり，連続繊維シ - トはこの様な要求を十分に満たす新しい補強材である。現在，連続繊維シ - ト，特に炭素繊維（CFRP）シ - ト（以下「シ - ト」と呼ぶ）は，高い引張強度を持ち軽量で耐食性に優れ，施工性に優れたシ - ト状であるため，既存構造物の補強材に用いた事例が増加している。このような現状を踏まえて現在合理的な補強設計方法の確立に向けての積極的な検討が行われている。しかし，シ - トで補強された部材の耐力及び変形は，部材に巻き付けた場合を除き，シ - トの剥離により決定されることが多く，この場合，シ - トの大きな引張強度を十分に活用することができない<sup>1),2)</sup>。これらを改善するために，側面に帯状のシ - トをけたの全高さに渡り U 字に巻き上げることによる補強（以下「U 字補強」と呼ぶ），およびシ - トとコン

クリ - ト面との間に変形能力の大きい緩衝材（層厚を 0.5mm とした）をプライマ - を塗布した後に塗布した実験供試体を用いて静的曲げ試験を行い，はりの曲げ性状及びシ - トの性状について実験的に検討した。含浸接着樹脂は，シ - ト用の汎用エポキシ樹脂を使用した。

## 2. 実験概要

実験供試体は合計 10 体である。実験供試体の形状・寸法・鉄筋配置等については図 - 1 に示す。主鉄筋として D19 を 2 本，せん断補強鉄筋として，D10（SD295A）を 10cm ピッチで配置した。供試体 F0 は，シ - トを全く貼り付けてない RC はりで基準供試体である。供試体 F1 は下面にシ - トを 1 層，F2 は 2 層，F3 は 3 層それぞれ支点区間に渡り貼付（但し，支点部手前 3cm で貼り止め，支点はコンクリ - ト表面を直接支持している）した。供試体 F4，F5，F6 は，シ - ト層数はそ

\*1 北海学園大学教授 工学部土木工学科

工博 （正会員）

\*2 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻

工博 （正会員）

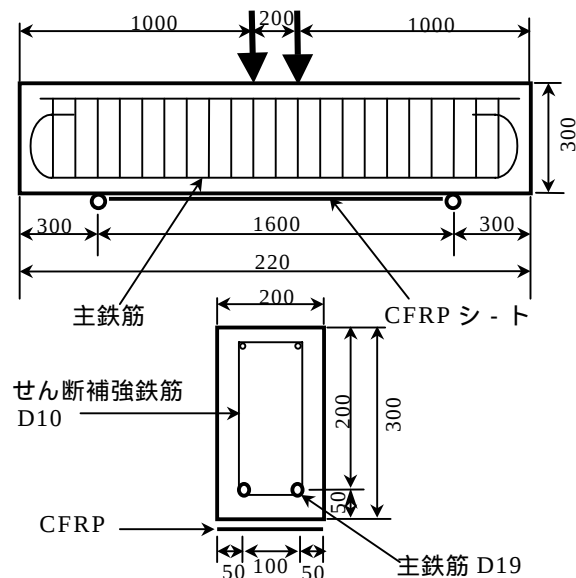


図 - 1 実験供試体

れぞれ供試体 F1, F2, F3 と同じであるが下面貼付シートとコンクリートとの間に緩衝材を塗布し、貼付した供試体である。供試体 F7, F8, F9 は、供試体 F4, F5, F6 に対し左右対称に 5cm 幅のシートを供試体下面から側面へと供試体の全高さ (30cm) に渡り 1 層の U 字状補強を施した (図 - 2 参照)。

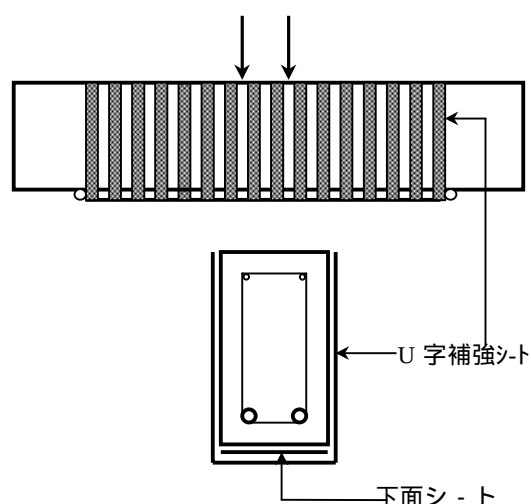


図 - 2 U字補強供試体

実験結果の一覧を表 - 1 に、各実験供試体に用いた材料の力学特性値を表 - 2 に示す。

本実験では、はりに二対称集中荷重を作用させ、荷重を約 5kN ずつ単調に増加させ破壊に至らしめた。なお測定は、はりの荷重載荷点での変位、主鉄筋およびシートのひずみである。下面のシートには、スパン中央より 10cm ピッチで両支点までゲージ長 5mm の一軸ひずみゲージを貼り付けた。

供試体コナ部は  $r=15\text{mm}$  の面取りを行った。コンクリートは、水セメント比 45%、細骨材率 38%、早強ポルトランドセメント、海砂及び川砂利を使用した。

以上の事により各実験供試体の破壊性状、主鉄筋のひずみ及びシートのひずみを測定した。また、比較検討の為、断面分割法による解析も試みた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊荷重及び破壊性状

先に示した表 - 1 より、シートで補強することにより曲げ耐力が大きくなることが明らかである。ただし下面にシートを貼付した場合は、全てシートの剥離破壊であった。一方、コンクリート面と CFRP シートとの間に緩衝材を用いたシート 1 層貼りの F4 供試体はスパン中央でのシート破断での破壊であった (写真 - 1 参照)。緩衝材を用いたシート 2 層、3 層の F5, F6 供試体は、載荷点と支点との中間部付近でのかぶりコンクリートの剥離であった (写真 - 2 参照)。U 字補強を施した供試体では、下面シートが剥離した後、シート巻き上げ部のうち、中央部より 15cm 及び 25cm のシートが巻き上げコナ部で水平に破断し破壊に至った。シート層数を増加させ緩衝材を用いることによりその破壊形状がシート破断からかぶりコンクリートの剥離破壊へと変化している。また、その最大荷重は基準供試体に対し平均で 32% ほど増加

表 - 1 実験結果一覧

| No | シ - ト層数 | 緩衝材 | U字巻上 | $f'_c(\text{MPa})$ | 最大荷重(kN) | 備 考              |
|----|---------|-----|------|--------------------|----------|------------------|
| F0 | 0       | ——— | ———  | 47.5               | 213      | 曲げ破壊（基準供試体）      |
| F1 | 1       | ——— | ———  | 35.8               | 227      | シ - ト剥離          |
| F2 | 2       | ——— | ———  | 40.2               | 244      | シ - ト剥離          |
| F3 | 3       | ——— | ———  | 39.0               | 270      | シ - ト剥離          |
| F4 | 1       | 有り  | ———  | 50.3               | 254      | シ - ト中央で破断       |
| F5 | 2       | 有り  | ———  | 50.3               | 278      | 一部かぶりコンクリ - トの剥離 |
| F6 | 3       | 有り  | ———  | 49.5               | 311      | 一部かぶりコンクリ - トの剥離 |
| F7 | 1       | 有り  | 有り   | 50.1               | 249      | シ - ト中央で破断       |
| F8 | 2       | 有り  | 有り   | 40.4               | 291      | 一部U字シ - ト破断      |
| F9 | 3       | 有り  | 有り   | 46.3               | 330      | 一部U字シ - ト破断      |

し，U字補強を併用することによりさらにその最大荷重は，平均で 36%増加した。

表 - 2 使用材料の特性値

|            |                   |       |                     |
|------------|-------------------|-------|---------------------|
| CFRP シ - ト |                   | 繊維目付量 | 300g/m <sup>3</sup> |
|            |                   | 設計厚さ  | 0.167mm             |
|            |                   | 引張弾性率 | 230GPa              |
|            |                   | 引張強度  | 3480MPa             |
|            |                   | 破断ひずみ | 15130 μ             |
| 鉄筋         | D19<br>( SD345 )  | 降伏強度  | 371MPa              |
|            |                   | 引張強度  | 570MPa              |
|            | D10<br>( SD295A ) | 降伏強度  | 377MPa              |
|            |                   | 引張強度  | 537MPa              |
| 緩衝材        |                   | 引張強度  | 1MPa                |
|            |                   | 伸び率   | 70%以上               |



写真 - 1 F4 供試体



写真 - 2 F5 供試体

### 3.2 変形状及び主鉄筋ひずみ

図 - 3 は，荷重と載荷点直下のたわみ関係を示したものである。図 - 3 ( a ) は，シ - ト層数が 2 枚で緩衝材の有無と U 字補強の有無による荷重 - たわみ関係を，図 - 3 ( b ) は，緩衝材を有する供試体でシ - ト層数の違いによる荷重 - たわみ関係を示したものである。図 - 3 ( a ) の方には，比較のため断面分割法による計算値も示してある。本解析では，コンクリ - トの圧縮応力 - ひずみ関係としてコンクリ - ト標準示方書<sup>3)</sup>によるものを用いた。コンクリ - トの引張応力 - ひずみ関係は，テンションステフニングモデル<sup>4)</sup>を用いた。解析における鉄筋比は，鉄筋断面積をかぶりの 2 倍を掛け合わせた面積で除したものをを用いた。また，はりの変形は，部材断面を 0.5cm ピッチで 60 分割，部材軸方向には 1cm ピッチで 160 分割し，それぞれの位置での曲率を数値積分することにより求めた。図 - 3 ( a ) より，緩衝材を塗布することにより最大荷重及び終局変位も増加しており，さらに U 字補強することにより最大荷重はそれほど大きな増加は見られないが，終局変位には大きな増加が見られる。本計算値では，200 k N 近傍までは，かなり良く追跡しているが，その後の荷重増加に対しての計算値

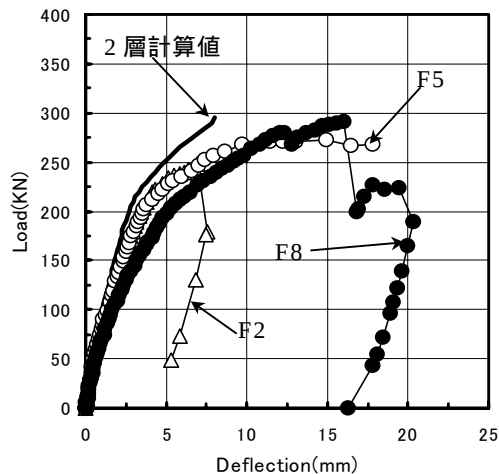


図 - 3 ( a ) 荷重 - 変位関係

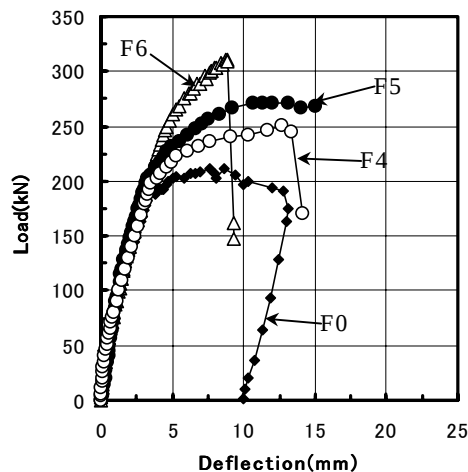


図 - 3 ( b ) 荷重 - 変位関係

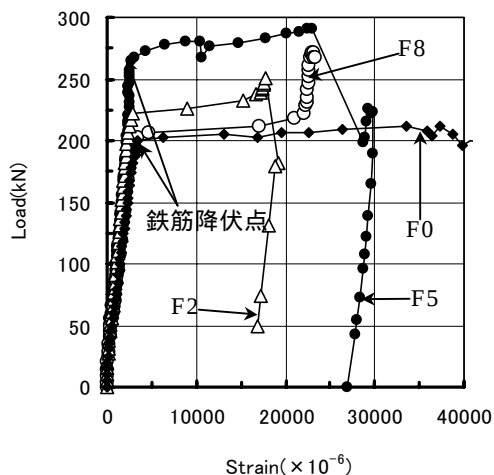


図 - 4 荷重 - 鉄筋ひずみ関係

たわみは実験値より小さめである。これは計算過程での剛性低下がうまく考慮されていないためと思われる。また、図 - 3 ( b ) より、シ - ト層数の増加によりその最大荷重も増加している。しかし、その終局変位はシ - ト層数の増加に対し、小さくなる傾向にある。すなわち、靱性が落ちる傾向にある。一方、図 - 3 ( a ) より U 字補強をすることによりこの靱性低下はかなり改善されることが分かる。

図 - 4 は、載荷点直下の鉄筋ひずみと荷重との関係を示したものである。同図は、シ - ト層数は 2 枚で、緩衝材の有無と U 字補強の有無との関係を示したものである。緩衝材が無い場合でも有る場合でも大体 220kN 前後で鉄筋が降伏しているが、U 字補強することによりその降伏荷重は 275kN 前後までに増加する。これは、後述のシ - トひずみの分布からシ - トが十分に作用荷重を受け持っているためであると思われる。

### 3.3 CFRP シ - トのひずみ性状

図 - 5 は、スパン中央での CFRP シ - トのひずみと荷重との関係を示したものである。図 - 5 ( a ) は緩衝材のないシ - ト層数が 1 層、2 層、3 層に対する荷重 - ひずみ関係を、図 - 5 ( b ) は、緩衝材を有する供試体でシ - ト層数が 1, 2, 3 層に対する荷重 - ひずみ関係を、図 - 5 ( c ) は、U 字補強でのシ - ト層数に対する荷重 - ひずみ関係を示したものである。図 - 5 ( d ) は、シ - ト層数が 1 層、図 - 5 ( e ) は、シ - ト層数が 2 層、図 - 5 ( f ) は、シ - ト層数が 3 層に対する、緩衝材の有無と U 字補強の有無に関する荷重 - シ - トひずみ関係を示したものである。図 - 5 ( a ) より、緩衝材が無い場合は 5,000 から 8,000  $\mu$  で最大荷重に達している（この場合の破壊はシ - トのピ - リング）。一方、緩衝材を塗布することによりシ - トのひずみは 8,000 から 15,000（ほぼ破断ひずみ）に達している。これは、緩衝材を塗布することによりコンクリ - ト面とシ - ト面との力の伝達が

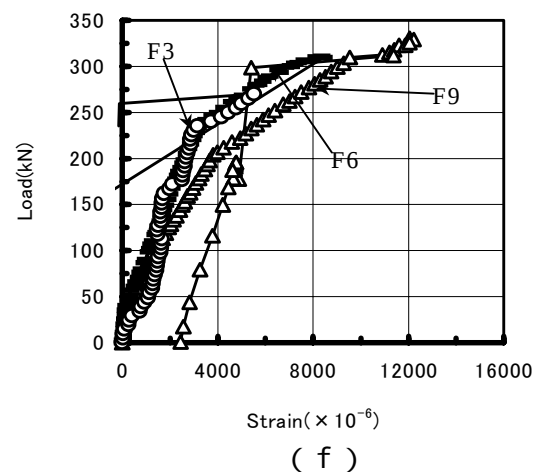
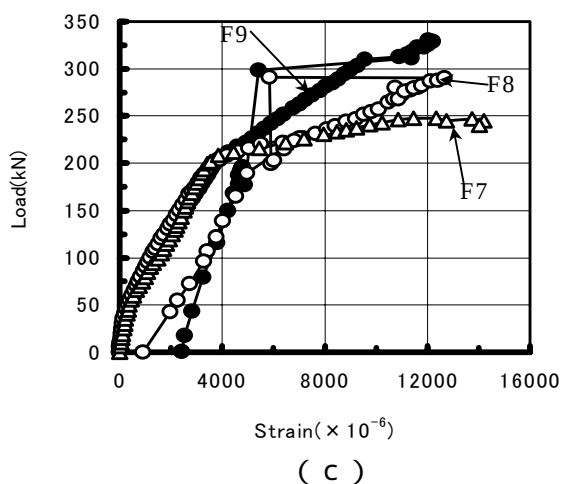
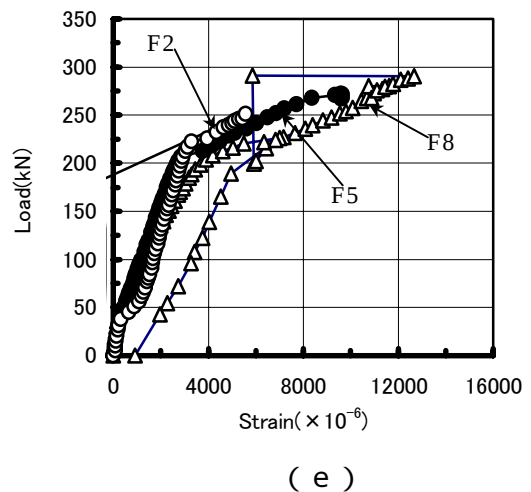
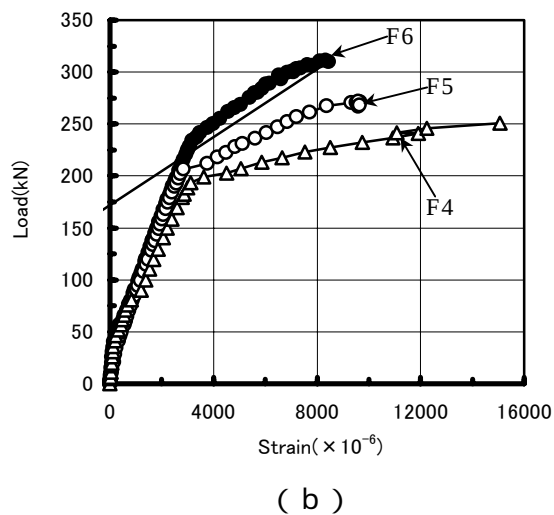
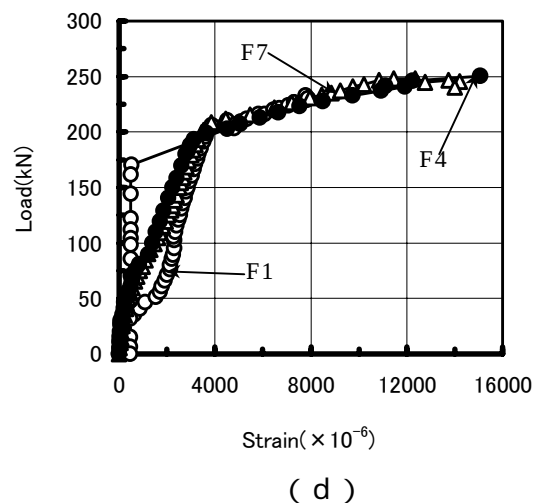
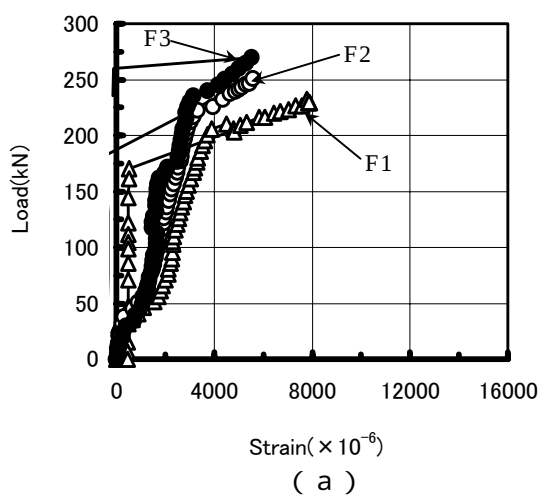


図 - 5 荷重 - シ - トひずみ関係

緩衝材を塗布しない場合に比べて滑らかとなり、シ - トに一樣に荷重が作用していると思われる。さらにU字補強供試体についての荷重 - ひずみ関係の図 - 5 ( c ) よりシ - トひ

ひずは、シ - トの破断ひずみ近傍にまでに達している。このことは、緩衝材を塗布しさらにU字補強を施すことにより、シ - トの破断でその部材の耐力が決定される可能性を示

唆している。図 - 5 ( d ) より、シ - ト層数 1 層の場合は、緩衝材の有無、U 字補強の有無による荷重 - ひずみ挙動はほぼ同様であるが、緩衝材がある場合はそのシ - トひずみはシ - ト破断近傍まで達していることが分かる。図 - 5 ( e ) と図 - 5 ( f ) のシ - ト層数が 2 層、3 層になると、緩衝材の塗布、さらに緩衝材塗布と U 字補強の組み合わせにおいてもシ - トひずみは、最大で 12,000  $\mu$  近傍にまでしか達しておらず、シ - ト破断近傍までには達していない。しかし U 字補強によりシ - トのひずみは他の供試体に比べ増加している。このことは、前述の鉄筋降伏荷重の増加にも対応している。

#### 4. まとめ

本研究は、単純支持された RC はりの下面に CFRP シ - トを貼付した実験供試体を用い、静的二点対称荷重が作用した場合の破壊性状、最大荷重、載荷点のたわみ、スパン中央での鉄筋及びシ - トのひずみ分布について、緩衝材の有無、ゼブラ状の U 字補強の有無についてシ - ト層数を変化( 1 層から 3 層まで) させて実験的に検討したものである。今後さらに検討すべき点もあるが本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

( 1 ) 破壊形式としては、緩衝材の無い場合はシ - トのピ - リング破壊、緩衝材がある場合でシ - ト層数が 1 層の場合はシ - ト破断 ( U 字補強の有る場合も)、2、3 層の場合は、かぶりコンクリ - トを剥ぎ取る剥離破壊、さらに U 字補強を併用した場合はシ - トの剥離と一部の U 字補強帯巻上げ部の破断破壊、であった。

( 2 ) シ - ト層数を増加 ( 緩衝材無し ) させても終局変位の増加は期待できないが、緩衝材を塗布し U 字補強を施すことによりこの処理を施さない場合に比べ終局変位は約 2.8 倍まで増加した。

( 3 ) 荷重 - 鉄筋ひずみの関係より、緩衝材と U 字補強を併用することによりその鉄筋の降伏点荷重が増加した。

( 4 ) 荷重 - シ - トひずみ分布から、緩衝材と U 字補強を併用することにより、シ - ト破断でその部材の最大荷重が決定される可能性を示唆した。

#### 謝 辞

本研究の遂行において CFRP シ - ト及び接着樹脂を提供して頂いた日鉄コンポジット ( 株 ) 及び緩衝材を提供して頂いた日石三菱 ( 株 ) の各位に深く感謝の意を表します。また、実験を進めるに当たっては、北海学園大学工学部土木工学科四年生の高橋、澤田、堤、大塚、吉武君の協力を得た。さらに、本研究の一部は、「平成 13 年度私立大学学術フロンティア推進事業」の補助金を受けた。ここに付記し謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 高橋義裕ほか：炭素繊維シ - トで曲げ補強したはりの曲げ性状に関する実験的研究，コンクリ - ト工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.509 - 514，1998
- 2) 高橋義裕ほか：炭素繊維シ - トにより曲げ補強した鉄筋コンクリ - トはりの耐力及び変形，コンクリ - ト工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1161 - 1616，1997
- 3) コンクリ - ト標準示方書・設計編 ( 平成 8 年制定 )，土木学会
- 4) 岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリ - トの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991