

# 論文 RC はりの CFRP シートによる曲げ補強効果に及ぼす 浮きの影響

鹿毛忠継<sup>\*1</sup>・梶田佳寛<sup>\*2</sup>

**要旨：**経年劣化や施工不良等により炭素繊維 (CFRP) シートに浮きが生じた場合の RC はりの曲げ補強効果を実験的に検討した。CFRP シートによる曲げ補強を行うと、耐力等は向上し、また、既往の算定式を用いて予測できる。試験体中央部や定着部で CFRP シートに浮きが生じた場合の RC はりの耐力は定着部のコンクリートや定着方法の影響を受けるが、本実験では、浮きが全くない場合と同程度の耐力を示した。また、浮きがある場合は、ひび割れの進展の抑制に関しては効果がなかった。今後、繰返し載荷や動的載荷が及ぼす浮きへの影響も検証する必要がある。

**キーワード：**炭素繊維 (CFRP) シート, RC はり, 曲げ補強, 浮き, 付着・定着

## 1. はじめに

炭素繊維シート (以下, CFRP シート) による既存 RC 構造物の耐震補強あるいは補修・補強工法は、兵庫県南部地震以降、その有効性が各方面で検証され、使用実績が急速に増加している。

本工法の特徴は、補修あるいは補強する部材や部位に、CFRP シートをエポキシ接着剤等で直接貼付けながら FRP として成型するという点であり、その効果は、炭素繊維自体の材料特性と接着剤の材料特性 (特に、接着力) や施工状況に影響を受けることが容易に推察される。しかし、本工法の共通的な施工仕様や検査手法はなく、発注者が作成した標準仕様 (特記事項) 等により施工・管理が行われているのが現状であり、CFRP シートと RC 部材との接着力が損なわれた場合の力学的性能や修繕方法等に関しては、あまり検討されていない。

本研究では、経年劣化や施工不良等により CFRP シートに浮きが生じた場合を想定した RC はりの曲げ補強効果を実験的に確認し、浮きの形態や定着箇所の性能が耐力や変形等に及ぼす影響を検証した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

RC はり試験体に使用したコンクリート、鉄筋、CFRP シートの材料特性を表-1～3に示す。各材料特性は JIS A1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法)、JIS 原案 (コンクリートの静弾性係数試験方法)、JIS Z2241 (金属材料引張試験方法)、JIS K7073 (炭素繊維強化プラスチックの引張強度試験方法)、JIS R7601 (炭素繊維試験方法) に従って求めた。

表-1 コンクリートの力学的特性

圧縮強度* (MPa)	ヤング係数* (GPa)	引張強度 (MPa)
25.6 / 29.9	20.7 / 22.2	2.0

\*:28 日強度 / 試験日での強度

表-2 鉄筋の力学的特性

降伏点強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (GPa)
345	491	206

\*1 建設省建築研究所 第2研究部材料環境研究室主任研究員 Ph.D. (正会員)

\*2 宇都宮大学工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

表-3 CFRP シートの力学的特性

CF 質量(g/m <sup>2</sup> )		CF 断面積(cm <sup>2</sup> /m)
200		1.11
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (GPa)	破断伸び (%)
4101	273	1.4 ~ 1.5

2.2 試験体

図-1 に RC はり試験体の概要を示す。試験体のコンクリートの設計基準強度は 21MPa であり、主筋に D13(SD295A)、あばら筋に D6 を使用した。引張鉄筋比は 0.87% ( $\gamma=1$ ) である。試験体は全部で 5 体あり、そのうち 4 体は試験体下面に CFRP シートをエポキシ接着剤(標準塗布量:0.4kg/m<sup>2</sup>)を含浸・塗布して貼付し、曲げ補強した。試験体種類は表-4 のとおりであり、比較用 RC 試験体(SP1)、標準(SP2,浮きなし)、中央部に浮きがあるもの(SP3,浮き面積率 56%)、千鳥に浮きがあるもの(SP4,50%)、中央部に浮きがありせん断スパン内で定着端部を補強したもの(SP5,56%)である。浮き(接着不良部)は、試験体にプライマー塗布後、マスキングテープを挟み、接着剤を含浸・塗布して作成した。なお、SP5 はあらかじめ作成しておいた CFRP シートを端部補強と同時に試験体下面に定着させた。

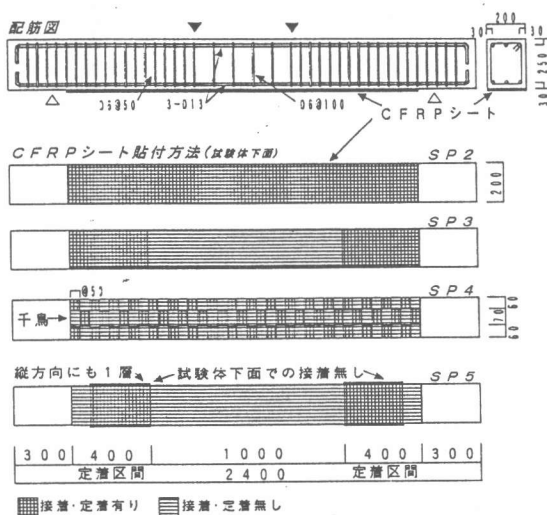


図-1 RC はり試験体概要

表-4 RC はり試験体種類

name	試験体の概要
SP1	比較用 RC はり
SP2	標準(浮きなし)
SP3	中央部に浮き(浮き面積率 56%)
SP4	千鳥状の浮き(浮き面積率 50%)
SP5	中央部に浮き(浮き面積率 56%) ただし、定着端部を CFRP 補強

2.3 試験方法

図-2 曲げ試験方法の概要を示す。載荷は 500kN 曲げ試験機を使用し、2 点集中単調載荷方式とした。荷重は 200kN ロードセルを用いて測定し、高感度型変位計により載荷点・中央変位、ストレインゲージにより鉄筋・CFRP シートのひずみ、パイ型変位計によりコンクリートのひずみ・ひび割れを各々測定した。

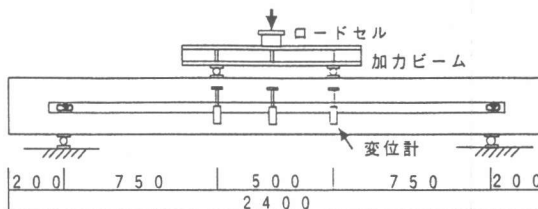


図-2 RC はり曲げ試験方法

3. 実験結果および考察

3.1 試験体の破壊状況

図-3 に各試験体の破壊状況を示す。SP2,SP3,SP4 とも片方の定着端部のコンクリートの破壊(試験後、CFRP シートの裏面を観察するとコンクリートが付着しており、接着界面での破壊(剥離)ではなく、表層部のコンクリートの破壊であることが確認された)により CFRP シートが剥離した。これらの試験体では別途、破壊しなかった端部で CFRP シートの接着力試験(日本建築仕上学会)を行ったところ、接着界面ではなく表層部のコンクリートが破壊し、引張強度は 1.12 ~ 2.53MPa であった。これはコンクリートの引張強度とほぼ一致する。また、SP5 では破壊モードを浮きの部分で

の CFRP シート破断にさせようとしたものであったが、結果的には補強部分と CFRP シートとの境界部分でシートが破断した。しかし、CFRP シートによるアンカー効果を確認するために補強した端部には何ら損傷は生じなかったため、破壊形態は定着部のコンクリートの力学的性能や定着方法に左右されるといえる。

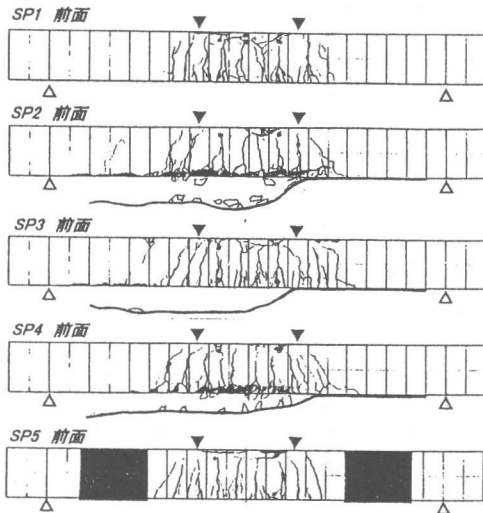


図-3 試験体の破壊状況

以上のことから、本実験での CFRP シートの接着力は充分あり、定着部に 50 % 程度の浮きが生じてても、本実験での定着部の長さ 400mm は充分なものであったことが確認された。ただし、本実験はモデル的に浮きを生じさせたものであり、CFRP シートの定着部に過大な浮き等が生じた場合やその発生形態によっては注意が必要である。

### 3.2 耐力

表-5、図-4 に RC はりの曲げ試験結果を示す。最大耐力  $P_u$  の計算値は式(1)(2)<sup>2)</sup>を用いて求めた。なお、 $\alpha$  は 1/2 と 2/3 の 2 種類とした。

$$P_u = 2M_u / a \quad (1)$$

$$M_u = (0.9 \cdot a_t \cdot S_{sy} \cdot d) + (0.9 \cdot a_f \cdot E_f / E_s \cdot S_f \cdot D) \cdot \alpha \quad (2)$$

$a_t, a_f$ : 引張主筋, CFRP シートの断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$E_s, E_f$ : 鉄筋, CFRP シートの弾性係数 (GPa)

$S_{sy}$ : 鉄筋の降伏点強度 (MPa)

$S_f$ : CFRP シートの引張強度 (MPa)

$d$ : 有効せい,  $D$ : はりせい,  $a$ : せん断スパン (cm)

$\alpha$ : CFRP シートの最大ひずみより求まる係数,

(= 曲げ実験結果 / 素材試験結果)

表-5 RC はりの曲げ試験結果

name	$P_y$ (kN)*	$P_u$ (kN)*	$P_u$ 計算値
SP1	72.28	86.60	$\alpha=1/2$
SP2	85.42	112.98	104.6(kN)
SP3	78.26	109.94	$\alpha=2/3$
SP4	85.12	115.92	116.3(kN)
SP5	79.14	112.98	

\*:  $P_y$ : 引張鉄筋降伏荷重,  $P_u$ : 最大耐力

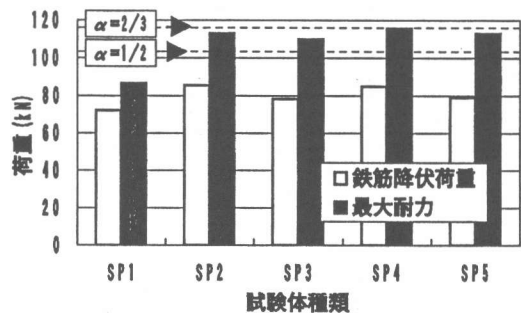


図-4 RC はりの曲げ試験結果

CFRP シートで補強したすべての試験体において、比較用 RC はり試験体と比較して、引張鉄筋降伏荷重が約 8 ~ 18 %, 最大耐力で約 27 ~ 34 % 増加し、その補強効果は確認された。本実験の範囲においては、浮き等の発生方法(あるいは補強方法)による差異は、殆ど確認されなかったが、中央部で CFRP シートが全く附着していない (SP3, SP5) 試験体では鉄筋降伏荷重、最大耐力ともに若干低い結果となり、CFRP シートの浮きが耐力等に及ぼす影響が全くないとはいえない。また、最大耐力の計算値は、実験結果とよく一致している。

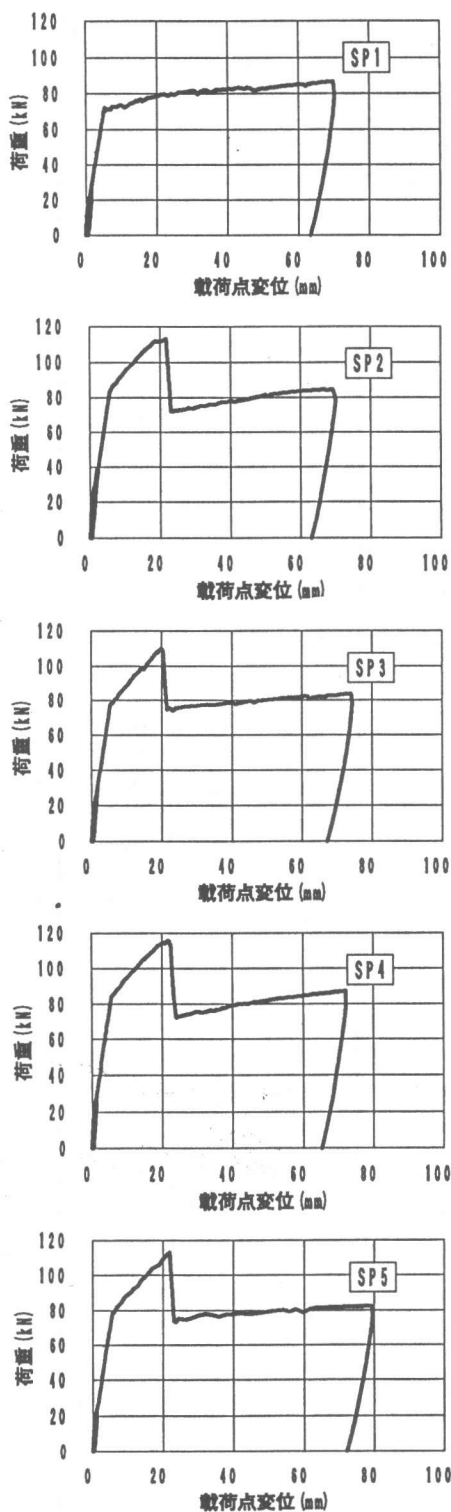


図-5 荷重—載荷点変位関係

### 3.3 変形

図-5 に荷重—載荷点変位関係を示す。最大耐力以降は、中央点変位が 80mm になるまで試験を行った。この図を見るかぎり試験体ごとの耐力やひび割れ後の剛性等に関する差異は確認されなかった。

図-6 にひび割れ幅の変化を示す。ひび割れ幅は、ひび割れ発生後、一度除荷し、曲げスパン内と載荷点下近傍のひび割れ部にパイゲージを貼付して測定した。CFRP シートが付着していない SP3, SP5 では鉄筋降伏荷重から最大耐力に至るまでの間の急激なひび割れの拡大が認められるが、CFRP シートが付着している SP2, SP4 ではひび割れ幅の増大を抑制していることがわかる。

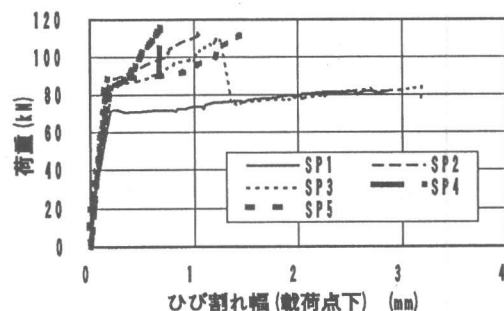


図-6 ひび割れ幅の変化

### 3.4 ひずみ

図-7 に主筋と CFRP シートのひずみの変化を示す。鉄筋降伏荷重近傍までは、引張主筋と CFRP シートのひずみは殆ど同じであり、ほぼ平面保持を保ちながら部材に発生する引張応力を有効に負担していることがわかる。ただし、中央部に浮きがある SP3, SP5 では、引張主筋のひずみは CFRP シートのひずみと比較して若干小さい値となっており、コンクリート下面と CFRP シートとの接触面で滑りが生じていることがわかる。

次に、鉄筋降伏荷重から最大耐力に至るまでは、引張主筋ひずみは殆ど増加せず、CFRP シートのひずみが急増し、引張応力の負担割合が増加し、最大耐力を向上させるのがわかる。こ

これらのことから、強度特性にかなりの異方性がある CFRP シートのような材料では、応力状態が明快な部材や部位にその補強材料の方向性を考慮して使用した場合には、非常に有効であることがわかる。また、最大耐力時の CFRP のシ

ートの最大ひずみはいずれの試験体でも 9000 ~ 10000  $\mu$  であり、素材試験での CFRP シート破断ひずみ (14000 ~ 15000  $\mu$ ) の約 2/3 であった。これは、前述の  $\alpha$  を決める際の根拠ともなっている。

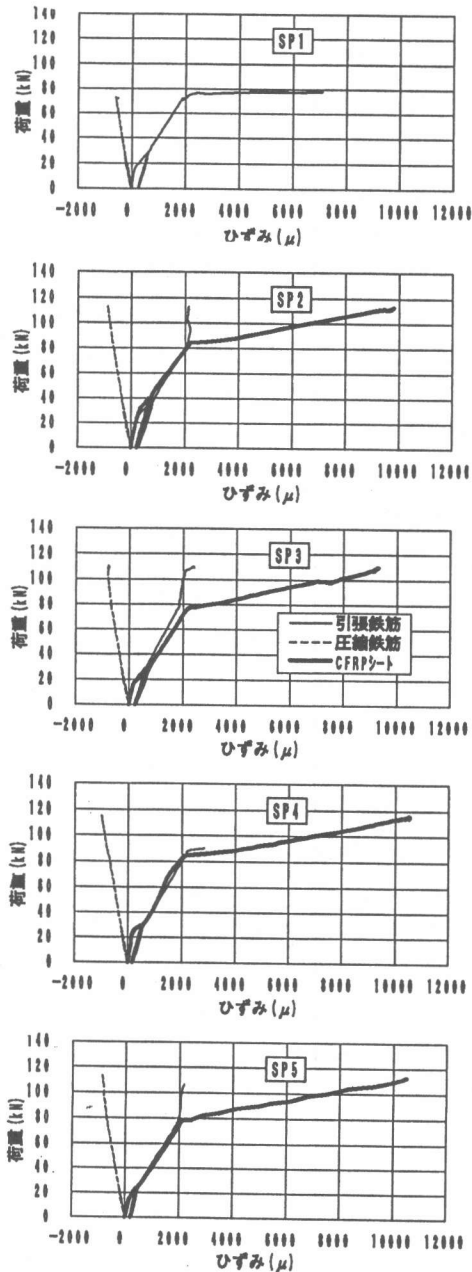


図-7 荷重-ひずみ関係

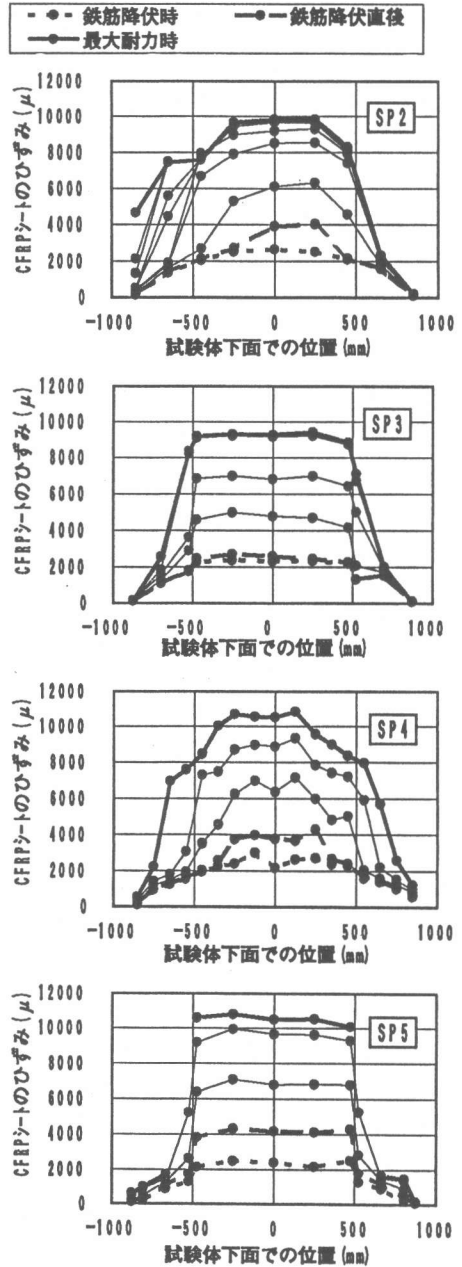


図-8 CFRP シートのひずみ分布

図-8 に試験体下面での CFRP シートのひずみ分布を示す。試験体中央部で CFRP シートの付着がある SP2, SP4 では CFRP シート端部から中央部にかけてのひずみの増加がなめらかであり、鉄筋降伏から最大耐力に至る間に定着部で徐々にひずみが増大し、最後にシートが剥離する。これに対して、中央部で付着のない SP3, SP5 では、浮きの部分でのひずみ分布はほぼ一定、すなわち全断面が均一な引張応力状態にあるが、浮きと定着の境界部分では、ひずみの変化が急激であり、一種の応力集中状態となることがわかる。これは、SP5 で境界部で CFRP シートが破断した原因の一つとして考えられるが、今後の課題となった。

#### 4. まとめ

本研究では、経年劣化や施工不良等により CFRP シートに浮きが生じた場合を想定した RC はりの曲げ試験を行い、浮きの形態や定着箇所の性能が耐力や変形等に及ぼす影響を確認し、以下の結果を得た。

- (1) RC はり試験体に CFRP シートを曲げ補強のために貼付すると、耐力等が向上する。また、耐力は既往の算定式を用いて予測できる。
- (2) 本実験の範囲では、試験体中央部や定着部で CFRP シートに浮きが約 50 % 程度生じた場合でも、浮きが全くない場合と同程度の耐力を示した。
- (3) CFRP シートによる RC はりの曲げ補強では、定着部のコンクリートの力学的特性やコンクリートと CFRP シートとの付着力(接着力)が問題となる。それらを改善して補強効果を向上させようとする場合には、その定着方法も十分に検討する必要があると思われる。
- (4) コンクリートと CFRP シートが接着せずに浮いている場合、ひび割れの進展の抑制に関しては効果がなかった。
- (5) 本研究での曲げ試験は単調載荷としたが、繰返し載荷や動的載荷が及ぼす浮きへの影響を検証する必要がある。

なお、本実験での浮きはモデル化したものであったが、現在、促進試験と暴露試験によって RC はりに同様に貼付した CFRP シートでの浮きの発生を検証しており、その後、CFRP シートの曲げ補強効果について、載荷方法も含めて検証を行う予定である。

#### 謝辞

本研究は、日本建築仕上学会に設置された「炭素繊維シートによる耐久性補修工法に関する研究委員会(委員長: 梶田佳寛宇都宮大学教授)」での研究の一部として行った。試験体の作成、実験の実施において、大日本色材(株)大出努氏、建設省建築研究所第2研究部部外研究員各位に多大なご協力を得ました。また、使用材料等は、三菱化学(株)、大日本色材(株)よりご提供いただきました。ここに記して感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 佐藤裕一・木村耕三・小島克朗: CFRP シートとコンクリートの付着挙動(その 1), 日本建築学会構造系論文集, 第 500 号, pp.75-82, 1997.10
- 2) 鹿毛忠継ほか: 鉄筋が腐食した RC 構造部材の炭素繊維シートによる補強(その 1 ~ 5), 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.343-352, 1996.9
- 3) 鹿毛忠継ほか: 鉄筋が腐食した RC 構造部材の炭素繊維シートによる補強(その 6 ~ 10), 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.401-410, 1997.9
- 4) CFRP ルネサンス協会: 炭素繊維シート工法関連論文集, 1995.4
- 5) リペラーク工法資料: 三菱化学(株)