

## 論文 CFRP 板の定着方法による補強部材の曲げ性状

木村 耕三\*1, 小島 克朗\*2, 平田 亮\*3, 土屋 好男\*4

**要旨:** 炭素繊維を収束・硬化させた炭素繊維強化プラスチック(CFRP)板を表面に貼り付けてコンクリート部材を補強する場合, CFRP板の強度を十分に発揮させるためには, 樹脂による接着だけでなく外部からCFRP板と既存コンクリートを一体化(定着)する必要がある。本論文では, 定着方法をパラメータとした梁部材の曲げ実験を行い, 有効な定着方法の検討と, 定着力を考慮した最大耐力の算定方法を提案し, その妥当性を検討した。

**キーワード:** 炭素繊維強化プラスチック, 定着方法, 面圧力, 最大荷重, 曲げ補強

## 1. はじめに

軽量で高弾性・高強度の炭素繊維(以下, CFと記す)を既存RC柱の表面に貼り付けてせん断補強する工法は, 阪神・淡路大震災を契機に急速に普及してきている。と同時に, 梁やスラブなどの曲げ補強への適用も行われてきている。CFによる既存RC部材の曲げ補強については, その補強効果は確認されているが, 曲げ補強効果に大きな影響を及ぼすCF補強材と既存コンクリートとの付着・定着性状については, まだ十分に解明されていないのが現状である<sup>1), 2)</sup>。

筆者らは, CFにエポキシ樹脂を含浸・硬化させた炭素繊維強化プラスチック板(以下, CFRP板)およびCFシートを表面に貼り付けて補強したコンクリート部材の曲げ性状の把握と, CFRP板の剥離荷重に対する算定式の提案とその妥当性の検討を行ってきた<sup>3), 4)</sup>。

本研究では, CFシートあるいは鋼板とボルトによるCFRP板の定着および面圧力による定着効果をパラメータとした梁部材での曲げ実験を行ない, 有効な定着方法の検討と面圧力の効果を考慮した最大耐力の算定方法を提案し, その妥当性を検討した。

## 2. 曲げ補強実験

## 2.1 試験体

試験体は図-1および表-1に示す幅20cm×高さ28cm(有効高さ23cm)×長さ220cmのRC部材の下面に, 幅4.8cm×厚さ0.96mmのCFRP板を1枚貼り付けた補強部材9体と無補強部材1体の計10体である。なお, 無補強試験体およびD13-1N, D13-1試験体は既往の試験結果<sup>4)</sup>を引用した。RC部材には, 曲げ補強筋(2-D13)とせん断補強筋(D10@150)を配筋している。

試験体のパラメータは, CFRP板の定着方法(CFシートあるいはアンカーボルトによる定着)とCFRP板の定着力(面圧力)の大きさである。

CFシートによる定着では, 梁の外周にCFシートを巻き付け, 梁の上端(上部)で重ね合わせて定着した。使用したCFシートは単位面積あたり200g/m<sup>2</sup>のCFを一方向に配した製品である。アンカーボルトは, 外径16mm, 長さ120mmの全ねじボルトを2液混合型のエポキシ樹脂接着剤を用いてコンクリートに70mm埋め込んで接着した。

面圧力をパラメータとしたBS-P2, BS-P3, BS-P4およびD13-1試験体では, 梁部材の上下面に鋼板(板厚25mm×幅150mm×長さ250mm)を設置し, 両者を全ねじボルト(M20)で締め付ける方法で

\*1 (株)大林組技術研究所 構造第一研究室 主任研究員 工博(正会員)

\*2 (株)大林組技術研究所 副所長 工博(正会員)

\*3 東レ(株) ACM技術部 次長

\*4 日本シーカ(株) 建材第一本部 マーケティングサービス部 主査

表-1 試験体の一覧

試験体名	CFRP量	主筋 [Pt (%)]	定着方法	締付力 (kN)	面圧力 (MPa)	備考
D13-0	----	2-D13 (0.55%)	----	----	----	既往の結果 4)
D13-1N	48.0mm × 0.96mm		上下鋼板+ ボルト4本	0.00	0.00	既往の結果 4)
BS-P2				20.7	2.87	
BS-P3				33.6	4.67	
BS-P4				40.3	5.60	
D13-1				66.6	9.24	既往の結果 4)
BCF-C0				CFシート(全面)	30cm幅CFシートを全面(全長)に巻き付け	
BCF-DC			CFシート(部分)	中央と両端部に30cm幅CFシートを巻き付け		
BP-B02			アンカーボルト2本	手締め(アンカープレート:長さ15×幅20cm)		
BP-B04			アンカーボルト4本	手締め(アンカープレート:長さ25×幅20cm)		

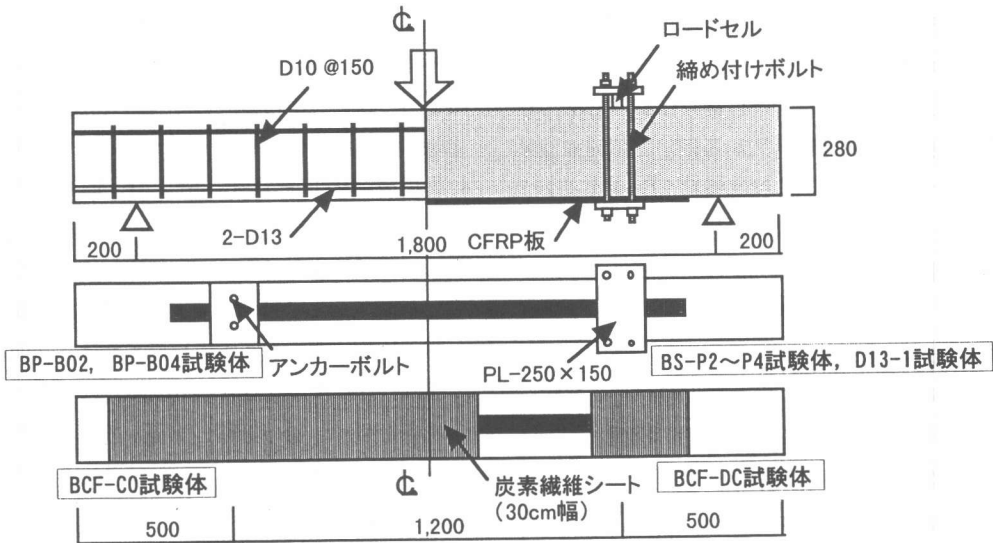


図-1 試験体の形状・寸法

CFRP板に面圧力を加えた。締付力の大きさは、試験体上部の定着板と試験体の上に挿入したロードセルによって把握し、面圧力は締め付け力を定着面積 (CFRP板幅×定着板幅 = 72cm<sup>2</sup>) で除して求めた。なお、定着用の鋼板とCFRP板の間にはCFRP板を傷つけないように緩衝材として硬質のゴムシートを挿入した。

使用材料の特性は表-2に示す通りである。

CFRP板は PAN系のCFをPultrusion法で製造した補強材である。CFRP板は2液性エポキシ樹脂ベースのモルタル接着剤で、CFシートはプライマーを塗布した後、エポキシ樹脂を用いて、既存コンクリートと接着した。いずれの試験体も接着後、室温で約2週間の養生を行った。

## 2.2 試験方法

試験は、図-1に示すスパン180cmの単純支持中央1点集中荷重による1方向繰り返し載荷で行ない、補強材のひずみおよび試験体中央での鉛直方向変位（たわみ）を測定した。

## 2.3 実験結果と考察

### 2.3.1 破壊状況

無補強試験体では鉄筋の降伏後、変位の増大に伴って加力点近傍でコンクリートが圧壊し、終局状態に至った。CFRP板の端部をボルトで定着した試験体では、鉄筋の降伏後、補強材の剥離を生じたが、さらに荷重と変位が増大し、定着部でのCFRP板の滑りと、これに伴うコンクリートの圧壊により終局状態に至った。一方、CFシートをCFRP板と直交方向に巻き付けた試験体では、CFRP板がCFシートを面内方向に引き裂きながら剥離したが、CFシートの梁側面での剥離（浮き）は見られなかった。CFRP板で補強した試験体では、いずれもコンクリートの圧壊による急激な荷重低下は見られなかった。

### 2.3.2 変位性状

CFRP板で補強した試験体のうち、CFシートを全面に巻き付けたBCF-C0試験体、アンカーボルトで定着したBP-B04試験体、面圧力約4.7MPaで定着したBS-P3試験体での試験体中央の鉛直方向変位と荷重の関係を図-2～図-4に示す。なお、図中には、初期剛性、引張側のコンクリートを無視して求めたひび割れ後の剛性の値も併せて示した。図-5～図-8は、各試験体の荷重～変位関係の包絡線を比較したものである。図-7、図-8から、CFRP板で補強した試験体では、定着部での面圧力が大きくなるほど最大荷重および最大荷重時の変位は増大している。また、アンカーボルトによる定着では、ボルト本数（締付力）

表-2 使用材料の特性

材料名	形状寸法 (mm)	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏強度 (MPa)	最大荷重 Tf (kN)	弾性係数 (GPa)
CFRP板	48×0.96×1	0.46	2,659 *2	122.2	155.8
異形鉄筋	D13	1.27	346	66.5	195.0
材料名	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
コンクリート *3	48.0	18.5	36.8	29.4	3.01
	48.0	19.6	39.5	25.7	2.78

\*1 CFRP板の形状寸法は樹脂を含んだ値、\*2 引張(破断)強度を示す  
\*3 下段は既往の試験体の値<sup>4)</sup>

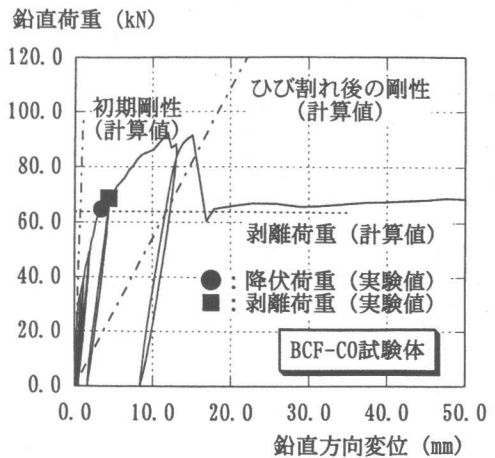


図-2 荷重～変位関係 (BCF-C0試験体)

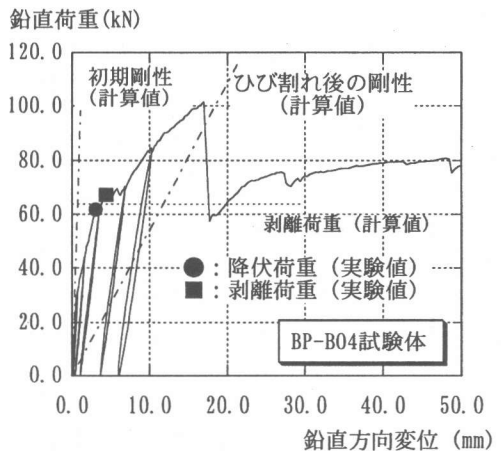


図-3 荷重～変位関係 (BP-B04試験体)

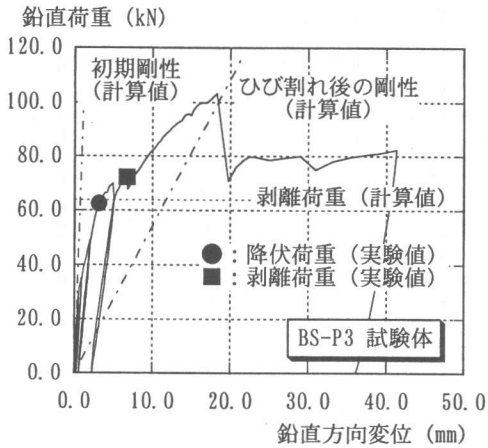


図-4 荷重～変位関係 (BS-P3試験体)

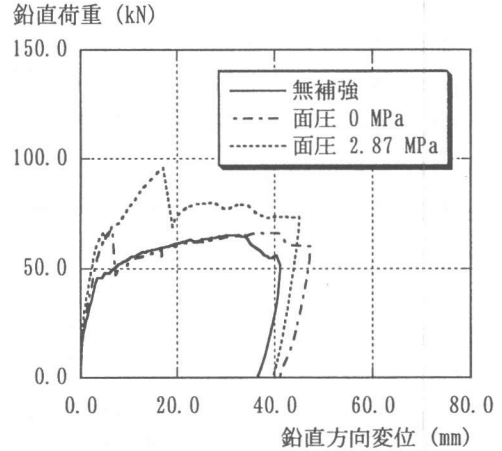


図-7 面圧力による荷重～変位関係の比較

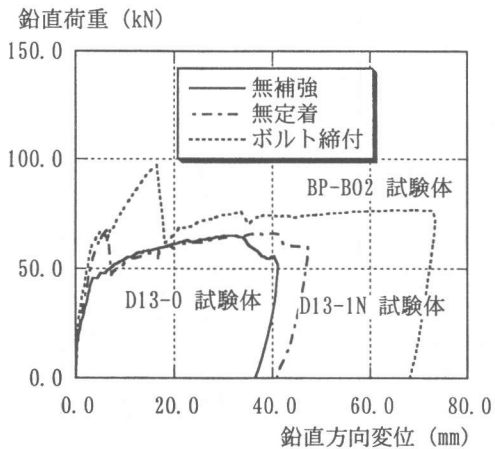


図-5 定着方法による荷重～変位関係の比較

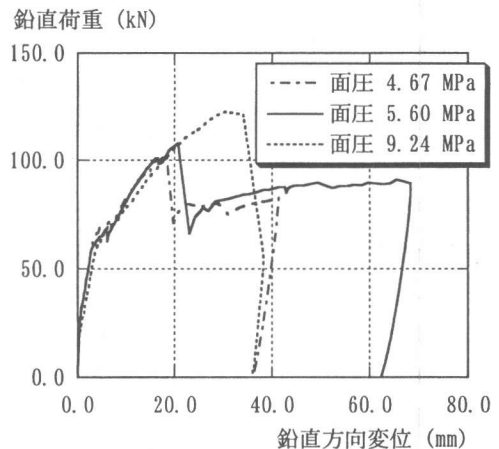


図-8 面圧力による荷重～変位関係の比較

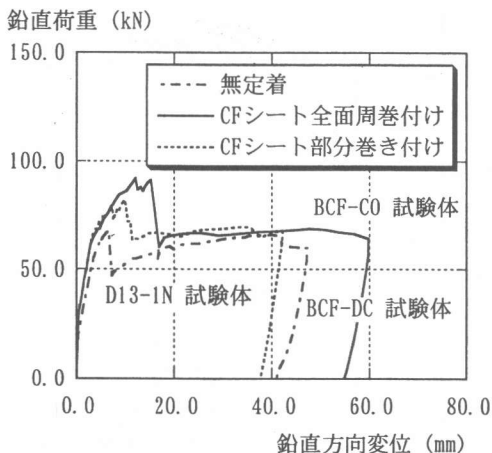


図-6 定着方法による荷重～変位関係の比較

を増すと最大耐力も増大する。図-6から、CFシートで定着する場合、梁全体にシートを巻き付けた方が部分的にシートを巻き付けるよりも最大荷重および最大荷重時の変位は増大する。

### 2.3.3 ひずみ性状

各試験体での面圧力と最大ひずみ比(CFRP板の破断ひずみに対する最大ひずみの比)の関係を図-9に示す。実験の結果、剥離開始荷重時のCFRP板のひずみは、定着方法あるいは面圧力の大きさによって差は見られないが、剥離から最大荷重に至るまでのひずみの増大は面圧力が大

きいほど大きく、CFRP板の最大ひずみ比( $\varepsilon$ )と面圧力( $\sigma$ )の関係は、式(1)で概ね近似できる。

$$\varepsilon = 0.15 + 0.069 \times \sigma \leq 1.0 \quad (1)$$

$$T = (0.15 + 0.069 \times \sigma) \times T_{\max} \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon$  : CFRP板の最大ひずみ比

$\sigma$  : 面圧力 (MPa)

T : CFRP板の引張強さ (有効引張力)

$T_{\max}$  : CFRP板の破断強さ (破断荷重)

CFRPの最大ひずみ比

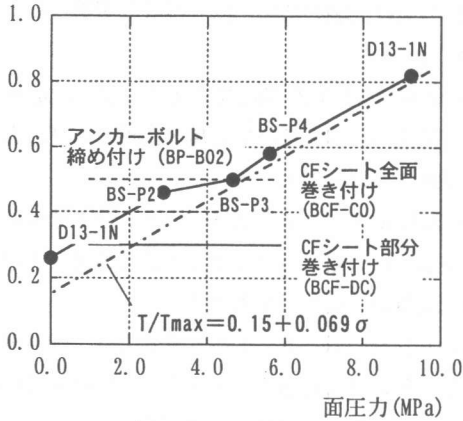


図-9 面圧力とCFRPの最大ひずみ比の関係

### 2.3.4 諸荷重

各試験体の諸荷重の一覧を表-3に、面圧力と諸荷重の関係を図-10に示す。

#### (1) 降伏荷重, 剥離荷重

補強試験体の降伏荷重は無補強試験体の1.18~1.35倍(平均1.28倍)で、CFRP板の定着方法や面圧力の大きさによる影響は見られない。

CFRP板の剥離荷重は、降伏荷重の1.06~1.19倍(平均1.14倍)で、また、筆者らの提案式<sup>3)</sup>

鉛直荷重 (kN)

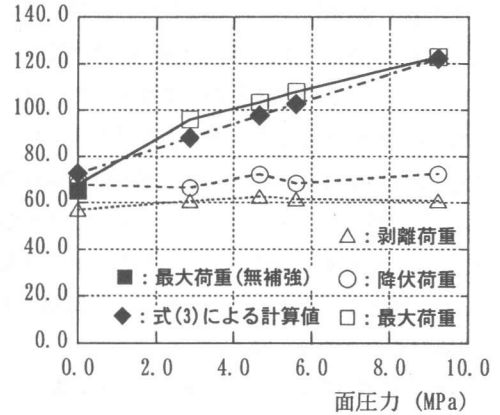


図-10 面圧力と諸荷重の関係

表-3 諸荷重の一覧

試験体名	曲げひび割れ荷重 (kN)	降伏荷重 (kN) (実験値)	剥離荷重 (kN) (実験値) *2	最大荷重 (kN)	
				計算値 *3	実験値 *4
D13-0 *1	17.7	48.1	---	61.5	65.0 (1.06)
D13-1N *1	22.7	56.8	67.9 (1.06)	117.3 (72.6)	67.8 (0.58)
BS-P2	25.3	60.6	66.4 (1.04)	117.0 (88.0)	95.9 (0.82)
BS-P3	25.5	62.6	72.3 (1.13)	117.0 (97.6)	103.3 (0.88)
BS-P4	23.5	61.4	68.4 (1.07)	117.0 (102.6)	108.0 (0.92)
D13-1 *1	21.4	60.7	72.4 (1.13)	117.3 (122.1)	122.8 (1.05)
BCF-CO	31.4	64.7	68.7 (1.08)	117.0	92.3 (0.79)
BCF-DC	31.5	64.7	75.4 (1.18)		82.3 (0.70)
BP-B02	25.6	58.7	64.5 (1.01)		97.3 (0.83)
BP-B04	29.9	61.8	67.2 (1.05)		101.4 (0.87)

\*1 既往の実験結果[文献 4)], \*2 既往の提案式[文献 3)]による計算値(=63.9kN)

\*3 e関数法による計算値, 括弧の値は式(3)による値

\*4 括弧の値はe関数法による計算値に対する実験値の比

による剥離荷重（計算値）の1.01～1.18倍（平均1.08倍）となっている。

## (2) 最大荷重

補強試験体の最大荷重は、CFRP板の定着方法および面圧力の大きさによって異なる。

CFシートによって定着する場合には、部分的な定着よりも全面で定着する方が最大荷重は増大する。CFシート（1層）を全面に巻き付けた時の定着効果は、アンカーボルト2本による定着とほぼ同等と考えられる。また、アンカーボルト2本および4本による定着はそれぞれ面圧力を2.8MPa, 4.6MPa 加えた場合とほぼ同等である。アンカーボルトの本数を増やす場合、アンカープレートも大きくなる（面圧力が低下する）ため、補強効果はボルトの本数に単純に比例しない。したがって、アンカーボルトで定着する場合には、径の太いボルトを用いた方が大きな面圧力の導入が可能となり、より高い定着効果が期待できると考えられる。

最大荷重時には、コンクリートとCFRP板の一体性が損なわれている（剥離している）ことから、補強部材の最大荷重（ $P_{max}$ ）は、鉄筋による曲げ負担荷重（ $P_s$ ）とCFRP板による曲げ負担荷重（ $P_{cf}$ ）の累加から、式(3)で求められる。

$$P_{max} = P_s + P_{cf} \\ = 4 \times (0.9 \times a_t \times f_t \times d + T \times D) / L \quad (3)$$

ここで、 $P_s$ ：鉄筋による曲げ負担荷重

$P_{cf}$ ：CFRP板による曲げ負担荷重

$a_t$ ：引張鉄筋の断面積

$f_t$ ：鉄筋の引張強度

$d$ ：圧縮縁から引張鉄筋までの距離

$T$ ：CFRP硬化板の有効引張力 [式(2)]

$D$ ：コンクリート部材の高さ（=28cm）

$L$ ：スパン（=180cm）

式(3)で求めた各試験体の最大荷重を表-3および図-10に示す。なお、実験での鉄筋の荷重～ひずみ曲線を見ると、最大荷重時には鉄筋のひ

ずみはひずみ硬化域を超えているため、式(3)での $f_t$ の値として鉄筋の引張強度を用いた。この結果、各試験体での実験値は上記提案式による値の0.93倍～1.09倍（平均1.03倍）となっている。なお、D13-1N試験体では、CFRPの剥離荷重が最大荷重となっているため鉄筋コンクリートの負担分を大きく評価した結果となっている。

## 3. まとめ

既存RC部材の下面にCFRP板を貼り付けた補強部材の曲げ実験の結果、以下のことが明らかになった。

(1) 鋼板でCFRP板の端部を定着する場合、定着力（面圧力）が大きいほど最大荷重および最大荷重時の変位は増大する。

(2) 炭素繊維シートを部材の全面に巻き付ける方が部分的に巻き付けるよりも最大荷重および最大荷重時の変位は増大する。

(3) アンカーボルトによる定着効果は、炭素繊維シートによる定着よりも大きく、2.8～4.6MPaの面圧力を加えた場合と同等である。

(4) CFRP板で補強した部材の最大荷重は、定着力（面圧力）を考慮した式(3)で求められる。

## 参考文献

- 1) 木村耕三, 小島克朗, 大野了:炭素繊維シートとコンクリートとの付着・定着性状に関する研究, 構造工学論文集 Vol.41B, pp.527-536, 1995.
- 2) 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), 建築学会構造系論文集, 第500号, p.75-p.82, 1997.10
- 3) 木村耕三, 小島克朗, 平田亮, 土屋好男: CFRP板によるRC補強部材の曲げ挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, p.267-p.272, 1997
- 4) 木村耕三, 小島克朗, 平田亮, 土屋好男: CFRP板による既存RCはりの曲げ補強, 第40回日本学術会議材料連合講演会講演前刷集, p.216-p.217, 1996.9