

## 論文

炭素繊維シートによる鉄筋コンクリート梁の  
曲げ補強に関する研究村上 聖<sup>\*1</sup>・三井 宜之<sup>\*2</sup>・武田 浩二<sup>\*3</sup>  
古市 憲司<sup>\*4</sup>・坂井 廣道<sup>\*5</sup>Study on Flexural Strengthening of Reinforced Concrete  
Beam with Carbon Fiber SheetKiyoshi MURAKAMI, Yoshiyuki MITSUI, Koji TAKEDA,  
Kenji FURUICHI and Hiromichi SAKAI

## 1. はじめに

最近では、社会資本としての恒久的コンクリート構造物の整備が重要な課題となっており、中性化・塩害による鉄筋腐食、アルカリ骨材反応、ケミカルアタック、凍害などで劣化したコンクリート構造物の補修・補強工法の技術開発が進められている。補強工法としては、コンクリートの増し打ち、打ち換え、鋼板接着工法、プレストレス導入工法などがあるが、新素材繊維による長繊維巻き付け工法や繊維シート貼付工法などが、軽量、高耐食性及び簡易施工の面から、注目されており、1995年の阪神大震災において被害を生じたコンクリート構造物の有効な補強工法としても、その用途が増加している。本論文では、高強度・高耐食性の炭素繊維(以下、CFと略記)シートによる鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)梁の曲げ補強効果について実験的検討を行った結果について報告する。

平成8年12月20日受付

<sup>\*1</sup> 助教授, 工博 環境システム工学科<sup>\*2</sup> 教授, 工博 環境システム工学科<sup>\*3</sup> 大学院生, 工修 自然科学研究科<sup>\*4</sup> 大学院生, 工学研究科建築学専攻<sup>\*5</sup> 三菱化学黒崎事業所, 工博

## 2. 実験方法

## 2.1 CFシートの付着性状

CFシートの補強工法の確立のためには、補強されたRC部材の耐力が設計可能であることが要求される。ところで、CFシートによるRC梁の曲げ補強に関する既往の研究において、シートの破断に先行してシートの付着剝離が生じることが示されている。CFシートは、破断に至るまでほぼ線形弾性的に挙動するために、シートの破断により終局的破壊が生じる場合、その耐力計算は、比較的容易である。しかし、シートの付着耐力や、シートの付着剝離が先行する状態での終局耐力の計算には、シートの付着性状の把握が必要になる。現状では、CFシートの付着性状を調べるための一般的に容認された試験方法がなく、鉄筋で用いられている両引き試験や、壁用ボード類接着剤の接着強さ試験方法を準用した切欠き梁の曲げ試験などが便宜的に行われている<sup>1)</sup>。ここで、両引き試験の場合には、偏心荷重を避けるための載荷治具の工夫や、切欠き梁の曲げ試験の場合には、測定される荷重からシートの引張力を換算する際の計算上の仮定が問題になっている。そこで、本実験では、2つのコンクリート角柱を中央で突き合わせ、その面をまたぐようにCFシートを貼り付けた梁の曲げ試験をシートの付着試験法として適用し、その適用性やシートの付着性状について検

表1 使用したレディーミクストコンクリートの仕様

コンクリート種類	呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	セメント種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
普通	21	18	20	N	13.0	2.9	280	254000	20.4	48.5

表2 使用したCFシートの仕様

炭素繊維	引張強度	35000kgf/cm <sup>2</sup>
	引張弾性率	2.4×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>
炭素繊維シート (Vf=60%)	単位面積当たりの質量	300g/m <sup>2</sup>
	シート厚さ	0.28mm
	樹脂含有率	10%
	引張強度	21000kgf/cm <sup>2</sup>
	引張弾性率	1.44×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>

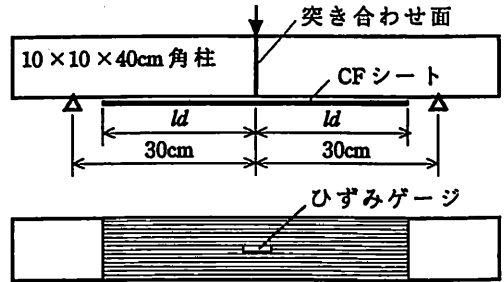


図1 CFシートの付着試験方法

耐した。この試験では、切欠き梁と異なり、突き合わせ中央のコンクリート断面は、力学的に絶縁されているので、引張側はシートの引張力のみが作用し、後述の解析方法に示すように、荷重とシート引張力の関係やシートの付着応力などが簡単な解析で求められる。

(1) シート接着長さが付着性状に及ぼす影響

コンクリートには、表1に示す仕様のレディーミクストコンクリートを使用した。なお、表中にはコンクリートのスランプ、空気量、強度等の測定値を併記している。強度試験は、JISに準拠し、圧縮及び引張試験にはφ10×20cmの円柱供試体を、曲げ試験には10×10×40cmの角柱供試体を用い、供試体は、それぞれ3個ずつ作製し、材齢28日まで20℃水中養生後、試験時まで気中養生を行った。ここで、コンクリートの養生・材齢は、本実験シリーズにおいて同一である。また、表2には、使用したCFシートの仕様を示す。なお、CFシートは、すべての実験シリーズにおいて同一のものをを用いた。

CFシートの付着試験には、図1に示すように、10×10×40cmのコンクリート角柱供試体を用い、その端面を研磨仕上げした後、2つの角柱を突き合わせ、その面をまたぐように幅100mmのCFシートをエポキシ樹脂により貼り付けた。なお、シート貼付前に、プライマー

によりコンクリート表面の下地処理を行った。シート貼付方法は、厚さ0.28mmの1枚のCFシートを片面の接着長さ ( $l_d$ ) が50, 100, 150, 200, 250, 300mmの6種類で変えて貼り付けた。また、 $l_d = 300$ mmについては、3枚のCFシートを積層貼付し、シート貼付数が付着性状に及ぼす影響についても検討した。梁の載荷形式は、スパン長さが60cmの中央3点曲げとし、荷重-載荷点変位曲線とスパン中央のシートひずみを測定した。

(2) コンクリート表面下地処理の違いが付着性状に及ぼす影響

コンクリートには、表3に示す仕様のレディーミクストコンクリートを使用した。なお、表中には、コンクリートのスランプ、空気量、強度等の測定値を併記している。CFシートの付着試験は、前述のとおりであるが、コンクリート表面の下地処理を無処理、プライマー塗布、表面研磨後プライマー塗布の3種類で変え、1枚のCFシートを  $l_d = 300$ mm で貼り付けた。また、シートのひずみ分布を調べるために、スパン中央と中央から50mm間隔でひずみゲージを貼り付けた。

2.2 CFシートによるRC梁の曲げ補強効果

(1) 使用材料

コンクリートには、表4に示す仕様のレディーミク

表3 使用したレディーミクストコンクリートの仕様

コンクリート種類	呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	セメント種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
普通	40	18	20	H	21.3	2.7	469	272000	28.3	-

表4 使用したレディーミクストコンクリートの仕様

コンクリート種類	呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	セメント種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
普通	21	15	20	N	18.7	4.3	240	219000	20.3	37.6

表5 使用した鉄筋の引張試験結果

種類	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
主筋 SD345, D10	3792	5481	15.4
あばら筋 φ5	6662	6952	—

表6 試験条件

試験体番号	シート貼付数	載荷形式	備考
No. 1	なし	4点曲げ	比較用
No. 2	2枚	4点曲げ	曲げひび割れ導入後、シート貼付
No. 3	1枚	3点曲げ	
No. 4	1枚	4点曲げ	
No. 5	2枚	4点曲げ	
No. 6	3枚	4点曲げ	

ストコンクリートを使用した。なお、表中には、コンクリートのスランプ、空気量、強度等の測定値を併記している。ここで、コンクリートは、材齢21日まで現場シート養生後、試験時まで気中養生を行った。主筋には、SD345, D10を、あばら筋には、φ5mmのみがき棒鋼を使用した。主筋及びあばら筋の引張試験結果を表5に示す。

(2) RC梁の曲げ試験

RC梁の外形状は、幅15cm×高さ25cm×長さ240cmで、配筋は、図2に示すように、圧縮鉄筋3-D10、引張鉄筋2-D10、あばら筋□φ5@100mmとした。RC梁は、同時に計6体作製し、表6に示す試験条件で、図3に示すようにCFシートを貼り付けた。シート貼付方法は、コンクリート表面をサンダー仕上げした後、プライマー塗布により下地処理を行い、エポキシ樹脂を各層ごとに重ね塗りし、シートを1枚ずつ貼り付けた。梁の載荷形式は、スパン長さ200cm、

載荷点間隔30cmの4点曲げを基準とし、載荷形式の影響を調べるために試験体No.3については、スパン長さ200cmの中央3点曲げとした。試験体No.2については、ひび割れ有無がシートの曲げ補強効果に及ぼす影響を調べるために、シート貼付前に、降伏荷重の約2/3の荷重まで載荷し、曲げひび割れを導入した後、シートを貼り付けた。試験体No.4, 5, 6は、シート貼付数がシートの曲げ補強効果に及ぼす影響を調べるために、それぞれ1, 2, 3枚のシートを積層貼付した。測定は、荷重、スパン中央断面の主筋ひず

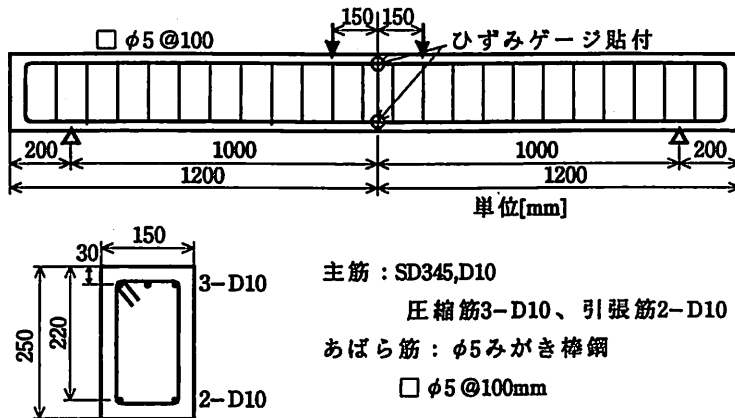


図2 RC梁の形状寸法及び配筋

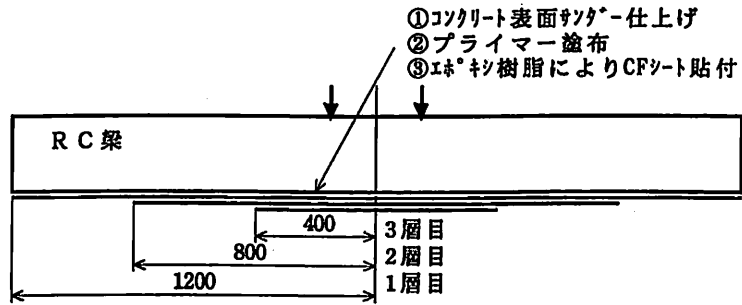


図3 RC梁のCFシート貼付方法

み、スパン中央及び載荷点の変位をデータロガーにより計測し、モニターとして、荷重-スパン中央変位曲線をX-Yレコーダにより記録した。

### 3. 解析方法

#### 3.1 CFシートの付着解析

図4に示すように、載荷点に仮想変位  $\delta u$  を与えたとき、両角柱が載荷点を中心に剛体回転するものと仮定すれば、変形後の幾何学的関係により、次式が得られる。

$$\delta w = d \cdot \delta \theta, \delta u = (l/4)\delta \theta \quad (1)$$

ここに、 $w$ ：突き合わせ面の肩口開口変位

$d$ ：梁せい

$\theta$ ：回転角

$u$ ：載荷点変位

$l$ ：スパン長さ

また、仮想仕事の原理により、

$$P \cdot \delta u = T \cdot \delta w \quad \therefore T = (l/4d)P \quad (2)$$

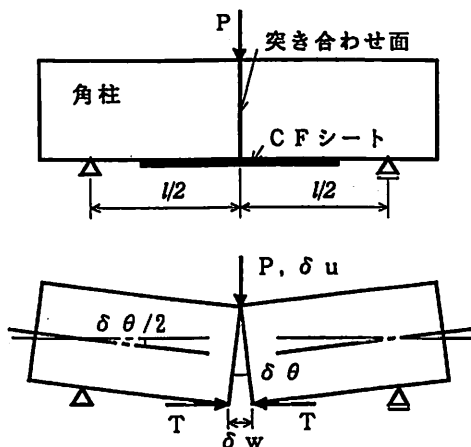


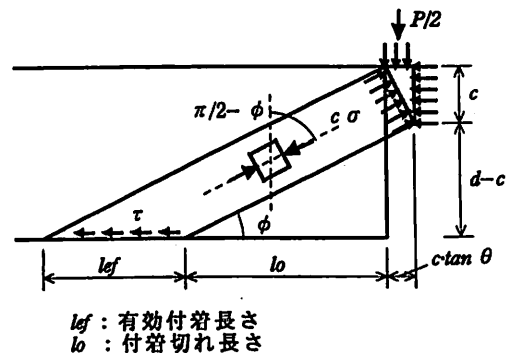
図4 シート付着試験における変形後の幾何学的関係

ここに、 $P$ ：荷重

$T$ ：シート引張力

式(2)より、測定される荷重からシート引張力が求められる。また、試験体自重による補正は、自重のなす仕事を考慮すれば、容易に得られるが、本実験の試験体寸法では、無視できる程度である。

以上の解析は、荷重とシート引張力の関係を与えるが、シート界面の付着応力分布や、実験で観察されるシートの付着切れを表現できない。そこで、図5に示すマクロモデルを想定し、両解析の対応について検討する。本モデルは、文献<sup>2)</sup>の塑性解析に基づくトラス及びアーチ機構によるRC部材の終局せん断耐力算定法に準じたものである。従って、本モデルは、付着性状の経過を解析することはできず、図に示す付着の終局状態の解析にその適用範囲が限定されることに注意する必要がある。図は、スパン中央から付着切れが生じ、有効付着長さ上で付着応力が均等に作用している状態を示し、材軸に対して角度  $\phi$  をもつ斜め方向のコンクリート圧縮束の圧縮応力を介して、シート界面に付着応力と面圧が生じている。シート界面の付着応力と面圧は、図6に示すMohrの応力円により、次式で与えられる。



$l_{ef}$ ：有効付着長さ  
 $l_o$ ：付着切れ長さ

図5 CFシート付着解析のためのマクロモデル

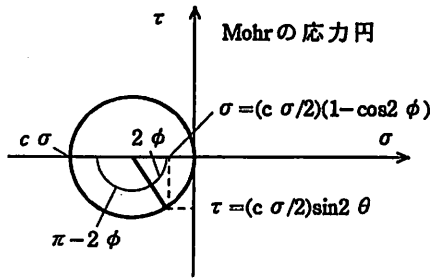


図6 Mohrの応力円による付着応力、面圧の算定

$$\tau = \frac{c\sigma}{2} \sin 2\phi, \quad \sigma = \frac{c\sigma}{2} (1 - \cos 2\phi) \quad (3)$$

ここに、 $\tau$  : 付着応力

$c\sigma$  : 圧縮束応力

$\sigma$  : 面圧

鉛直方向の力のつり合いより、有効付着長さ上の面圧の合力とせん断力 ( $P/2$ ) は等しいので、

$$\frac{P}{2} = \frac{c\sigma}{2} (1 - \cos 2\phi) b \cdot l_{ef} \quad (4)$$

ここに、 $b$  : 梁幅

$l_{ef}$  : 有効付着長さ

また、突き合わせ断面におけるコンクリートの圧縮応力の作用領域長さを  $c$  とすると、図に示す幾何学的関係により、

$$l_{ef} = \frac{c}{\sin \phi \cdot \cos \phi} \quad (5)$$

$$\therefore \frac{P}{2} = \frac{c\sigma}{2} b \cdot c \frac{(1 - \cos 2\phi)}{\sin \phi \cdot \cos \phi} = b \cdot c \cdot c\sigma \cdot \tan \phi \quad (6)$$

また、

$$\tan \phi = \frac{d - c}{l_0 + c \cdot \tan \phi}$$

ここに、 $l_0$  : 付着切れ長さ

$$\therefore \tan \phi = \frac{1}{2} \left[ -\frac{l_0}{c} + \sqrt{\left(\frac{l_0}{c}\right)^2 + \frac{4(d - c)}{c}} \right] \quad (7)$$

ここで、塑性解析における下界定理により、式(6)において  $P$  が最大となるときの  $c$  を求めると、 $c = d/2$  となる。

$$\therefore \tan \phi = \sqrt{\left(\frac{l_0}{d}\right)^2 + 1} - \frac{l_0}{d} \quad (8)$$

$$l_{ef} = \frac{1 + \tan^2 \phi}{\tan \phi} \cdot \frac{d}{2} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{c\sigma}{2} \sin 2\phi = \frac{1}{1 + \tan^2 \phi} \cdot \frac{P}{b \cdot d} \quad (10)$$

$$T = b \cdot l_{ef} \cdot \tau = \frac{P}{2 \tan \phi} \quad (11)$$

以上の式(8)~(11)より、付着耐力時点での付着切れ長さ、有効付着長さ、付着応力、荷重とシート引張力の関係が求められる。なお、 $\tan \phi$  の範囲は、幾何学的関係により、次式で与えられる。

$$\frac{2d}{l} \leq \tan \phi \leq 1 \quad (12)$$

ここで、式(11)において、 $\tan \phi = 2d/l$  のときに、式(2)の荷重とシート引張力の関係に一致することが分かる。

### 3.2 RC梁の曲げ解析

RC梁の曲げ解析は、平面保持を仮定した断面解析に基づいている。解析の仮定は、次のとおりである。

①平面保持の仮定が成り立つ。

②コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係には、測定値との一致が良い、次のPopovics式を用いる。

$$\frac{\sigma}{F_c} = \frac{n(\epsilon/\epsilon_{co})}{n - 1 + (\epsilon/\epsilon_{co})^n} \quad (13)$$

ここに、 $\sigma$  : 圧縮応力

$\epsilon$  : 圧縮ひずみ

$F_c$  : 圧縮強度

$\epsilon_{co}$  : 圧縮強度時のひずみ

$n$  : 実験定数

ここで、実験定数  $n$  は、圧縮応力-ひずみ曲線の測定値を上式に当てはめて、非線形回帰により求めた。

③コンクリートの引張強度は無視する。

④鉄筋の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性とし、降伏強度には測定値を用いた。

⑤CFシートは、破断に至るまで線形弾性とみなす。

なお、シートが付着耐力に達した後は、一定の引張力を保持するものとする。

解析方法は、次のとおりである。

#### ①中立軸位置の計算

中立軸高さ ( $x_n$ ) は、軸方向の力のつり合いより、圧縮合力 ( $C$ ) と引張合力 ( $T$ ) が許容誤差の範囲内で一致するまで、反復計算により求めた。ここで、 $C$ 、 $T$  は、次式で与えられる。

$$C = \frac{b}{\phi} \int_0^{c\epsilon_c} \sigma d\epsilon + a_c \cdot s\sigma_c \quad (14)$$

$$T = a_t \cdot s\sigma_t \quad (15)$$

ここに、 $b$  : 梁幅

$D$  : 梁せい

$d$  : 有効せい

$d_c$  : 圧縮縁・圧縮鉄筋間距離

$\phi$  : 曲率 [=  $c\epsilon_c/x_n$ ]

$c\epsilon_c$  : 圧縮縁コンクリートひずみ

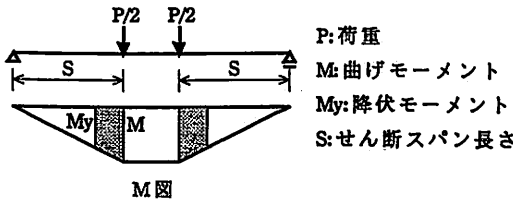


図7 シート付着応力算定領域

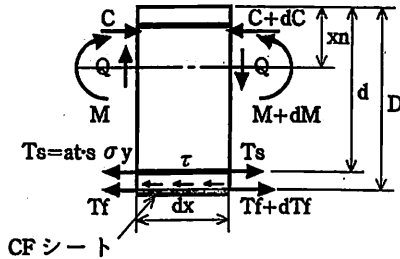


図8 断面の力のつり合い状態

$a_c$  : 圧縮鉄筋断面積

$a_t$  : 引張鉄筋断面積

$s\sigma_c$  : 圧縮鉄筋応力

$s\sigma_t$  : 引張鉄筋応力

ここで、鉄筋応力 ( $s\sigma$ ) は、次式で与えられる。

$$s\sigma = \begin{cases} E_s \cdot s\epsilon & (s\epsilon < s\epsilon_y) \\ s\sigma_y & (s\epsilon \geq s\epsilon_y) \end{cases}$$

$E_s$  : 鉄筋のヤング係数

$s\sigma_y$  : 鉄筋降伏強度

$s\epsilon_y$  : 鉄筋降伏ひずみ

$s\epsilon_c$  : 圧縮鉄筋ひずみ [ $= \phi(x_n - d_c)$ ]

$s\epsilon_t$  : 引張鉄筋ひずみ [ $= \phi(d - x_n)$ ]

$a_f$  : CFシート断面積

$f\sigma_t$  : CFシート引張応力 [ $= E_f \cdot f\epsilon_t$ ]

$E_f$  : CFシートのヤング係数

$f\epsilon_t$  : CFシートの引張ひずみ [ $= \phi(D - x_n)$ ]

② 曲げモーメントの計算

曲げモーメント ( $M$ ) は、中立軸に関するモーメントのつり合いより、次式で与えられる。

$$M = \frac{b}{\phi^2} \int_0^{c\epsilon_c} \sigma \cdot \epsilon d\epsilon + a_c \cdot s\sigma_c(x_n - d_c) + a_t \cdot s\sigma_t(d - x_n) + a_f \cdot f\sigma_t(D - x_n) \quad (16)$$

③シート界面の付着応力の計算

既往の研究では、CFシートの付着剝離は、引張鉄筋降伏以降に生じることから、図7に示すM図における薄墨の領域について力のつり合いを考える。また、図8は、薄墨領域内の微小長さ  $dx$  における断面の力のつり合い状態を示す。引張鉄筋はすでに降伏してい

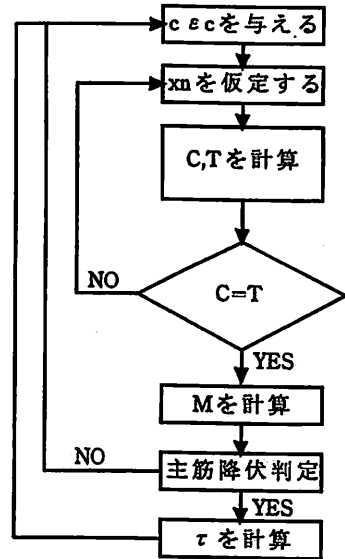


図9 解析のフローチャート

るので、両断面で引張鉄筋の引張力 ( $T_s$ ) は一定となっている。

中立軸に関するモーメントのつり合いより、

$$M = T_s(d - x_n) + T_f(D - x_n)$$

$$M + dM = T_s(d - x_n) + (T_f + dT_f)(D - x_n)$$

$$\therefore dM = dT_f(D - x_n)$$

$$dM/dx = Q = (dT_f/dx)(D - x_n)$$

ここで、 $dT_f = b \cdot dx \cdot \tau \therefore dT_f/dx = b \cdot \tau$ だから、

$$Q = b(D - x_n)\tau$$

$$M = Q \cdot S = b \cdot S(D - x_n)\tau$$

$$\therefore \tau = \frac{M}{b \cdot S(D - x_n)}$$

ここに、 $T_f$ : CFシートの引張力

$Q$ : せん断力

$S$ : せん断スパン長さ

$\tau$ : シート界面の付着応力

以上の解析のフローチャートを図9に示す。

4. 実験結果及び考察

4.1 CFシートの付着性状

(1) シート接合長さが付着強度に及ぼす影響

図10に、シート付着試験におけるひび割れ及び破壊性状を示す。 $l_d = 50, 100\text{mm}$ では、片側シート端で

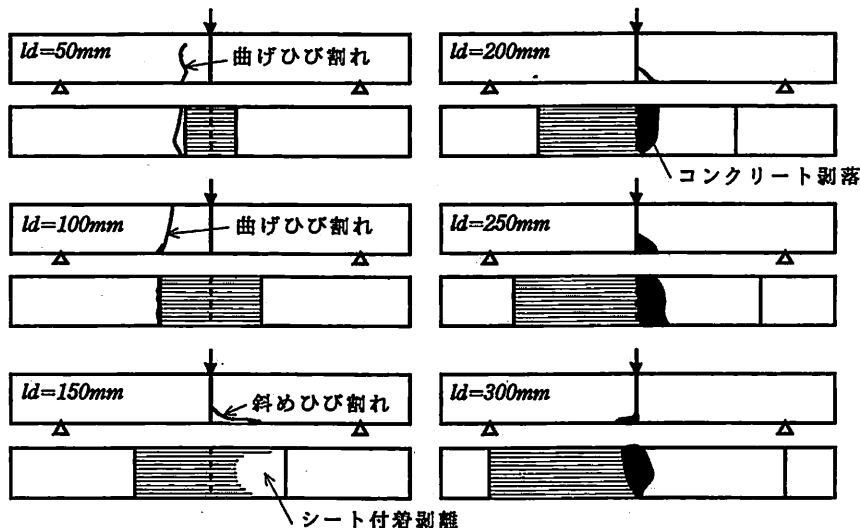


図10 シート付着試験におけるひび割れ及び破壊性状

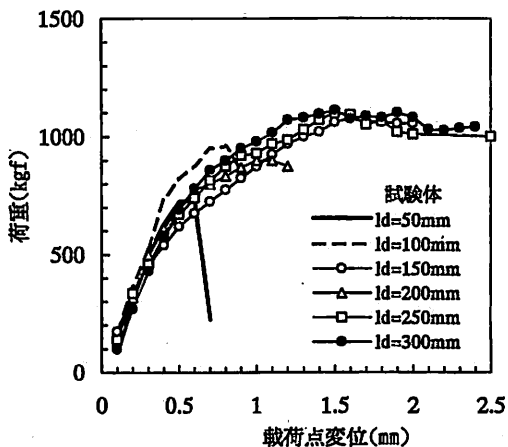


図11 CFシート付着試験における荷重-載荷点変位曲線

コンクリートに曲げひび割れが生じて破壊し、シートの付着剥離は見られなかった。一方、 $l_d = 150\text{mm}$ 以上では、中央断面の引張側に斜めひび割れが生じ、それがシート界面につながる形で片側シートの付着剥離を起こした。図11に、荷重-載荷点変位曲線を示す。 $l_d = 50, 100\text{mm}$ では、コンクリートがシート端で曲げ破壊したために、最大荷重が小さく、破壊も脆性的である。一方、 $l_d = 150\text{mm}$ 以上では、接着長さによらず、ほぼ一定の最大荷重を示し、変形形状もほぼ同様の延性的挙動を呈している。このことは、シートの付着剥離が一気に進行するのではなく、シートの付着切れを伴いながら、次第にシート全体の付着耐力が失われていくことを示しているものと考えられる。

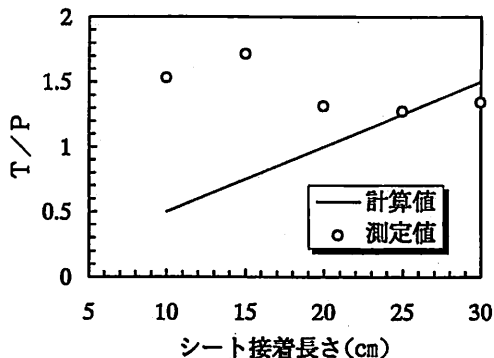


図12 シート接着長さに対するT/Pの変化

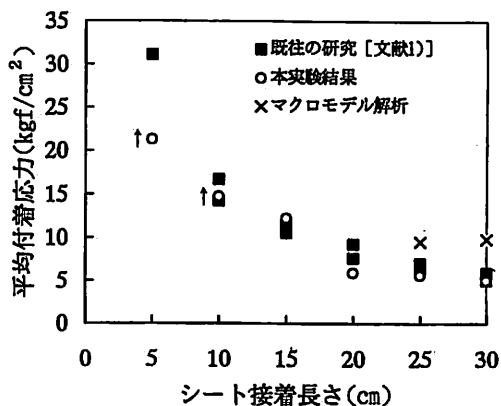


図13 シート接着長さに対する平均付着応力の変化

表7に本試験結果を示す。式(2)による荷重とシート引張力の関係は、本実験では、 $T = 1.5P$ となるが、最

表7 CFシートの付着試験結果

af (cm <sup>2</sup> )	l <sub>d</sub> (mm)	P <sub>max</sub> (kgf)	T <sub>P</sub> (kgf)	fε <sub>t</sub> (μ)	T <sub>ε</sub> (kgf)	T <sub>ε</sub> /T <sub>P</sub>	T <sub>ε</sub> /P <sub>max</sub>	破壊性状
0.28	50	775	1163	2640	1064	0.92	1.37	曲げ破壊
	100	960	1440	3640	1468	1.02	1.53	曲げ破壊
	150	1075	1613	4550	1835	1.14	1.71	シート付着剥離
	200	900	1350	2930	1181	0.87	1.31	シート付着剥離
	250	1100	1650	3460	1395	0.85	1.27	シート付着剥離
	300	1120	1680	3720	1500	0.89	1.34	シート付着剥離
0.84	300	2165	3248	2460	2976	0.92	1.37	シート付着剥離

\* a<sub>f</sub>: シート断面積, l<sub>d</sub>: シート接着長さ, P<sub>max</sub>: 最大荷重, T<sub>P</sub>: 式(2)より, 荷重から算定されたシート引張力, fε<sub>t</sub>: 最大荷重時のシートひずみ, T<sub>ε</sub>: シートひずみから線形弾性を仮定して求められたシート引張力

表8 マクロモデル解析によるシート付着応力算定値

af (cm <sup>2</sup> )	l <sub>d</sub> (mm)	T <sub>ε</sub> /P <sub>max</sub>	tan φ 下限値	l <sub>0</sub> +l <sub>ef</sub> l <sub>d</sub> (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	l <sub>ef</sub> (mm)	τ (kgf/cm <sup>2</sup> )	σ (kgf/cm <sup>2</sup> )
0.28	50	1.37	0.365 > 0.333 OK	274 > 50 不可				
	100	1.53	0.327 < 0.333 不可					
	150	1.71	0.292 < 0.333 不可					
	200	1.31	0.382 > 0.333 OK	262 > 200 不可				
	250	1.27	0.394 > 0.333 OK	254 ≈ 250 OK	107	147	9.52	3.75
	300	1.34	0.373 > 0.333 OK	268 < 300 OK	115	153	9.83	3.67
0.84	300	1.37	0.365 > 0.333 OK	274 < 300 OK	119	155	19.1	6.97

\* tan θは, T<sub>ε</sub>/P<sub>max</sub>の測定値から, 式(11)より算定. l<sub>0</sub>, l<sub>ef</sub>は, 式(9)より算定. τは, P<sub>max</sub>の測定値から, 式(10)より算定. σは, 式(3)より算定.

大荷重より式(2)から算定されたシート引張力と, シートひずみの測定値から線形弾性を仮定して求められたシート引張力の間に良い対応が得られた. また, マク

ロモデル解析との対応を調べるために, 図12に, シート接着長さに対するT/Pの測定値と計算値の比較を示す. なお, 計算値は, l<sub>d</sub> = l<sub>0</sub> + l<sub>ef</sub>として, 式(8)~



表9 コンクリート表面下地処理がシート付着応力に及ぼす影響

af (cm <sup>2</sup> )	l <sub>d</sub> (mm)	下地処理	P <sub>max</sub> (kgf)	T <sub>e</sub> (kgf)	T <sub>e</sub> /P <sub>max</sub>	l <sub>o</sub> (mm)	l <sub>ef</sub> (mm)	τ (kgf/cm <sup>2</sup> )
0.28	300	無処理	1381	2058	1.49	132	166	12.4
		プライマー塗布	1734	2750	1.59	143	175	15.8
		研磨後プライマー塗布	1773	2659	1.50	133	167	16.0

[注] 下地処理がプライマー塗布については、 $l_o + l_{ef}$ が $l_d$ を若干超えているが、測定値のばらつきを考慮し、許容差内とみなした。

(11) により求められた値であり、測定値は、表7中の  $T_e/P_{max}$  の値を示す。図より、 $l_d$ が200mm以下では、 $T/P$ の測定値が計算値を上回り、マクロモデルによる幾何学的関係が満足されないが、 $l_d$ が250mm以上では、満足されることが分かる。また、表8に、マクロモデル解析によるシート付着応力算定値を、図13に、接着長さに対する付着応力の変化を示す。マクロモデルの幾何学的関係が満足されているのは、 $l_d$ が250、300mmの2つだけなので、確かなことは言えないが、付着切れ長さは、約110mm程度で、シート断面積が同じ場合、接着長さによらず、付着応力はほぼ一定となっている。一方、シート引張力を片面接着面積で除して求めた平均付着応力は、付着切れ長さが考慮されていないので、接着長さが大きくなるほど低下している。また、シート断面積が付着応力に及ぼす影響については、シート断面積が大きいほど付着応力は大きくなり、シート断面積が3倍になると、付着応力は約2倍となっている。これは、面圧の増加による摩擦作用が、付着応力を高めているものと予想される。

(2) コンクリート表面下地処理の違いが付着性状に及ぼす影響

表9に、マクロモデル解析によるシート付着応力算定値を示す。また、図14に、シートのひずみ分布の測定値と計算値の比較を示す。計算では、有効付着長さ上で一定の付着応力を仮定しているのので、シートのひずみ分布は台形状となるが、測定値とほぼ妥当な対応を示している。下地処理の影響については、プライマー塗布と研磨後プライマー塗布の間で付着応力にほとんど差はないものの、無処理の場合には、付着応力が約2割程度低下し、下地処理の重要性が分かる。また、表8と表9を比べると、プライマー塗布、シート断面積0.28cm<sup>2</sup>、接着長さ300mmについて、後の方が前者よりも付着応力は約5割程度大きくなっている。これは、使用したコンクリートの圧縮強度が、前者

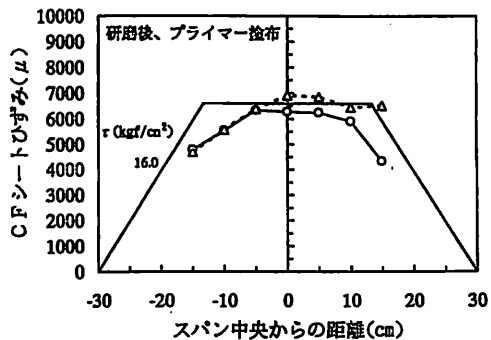
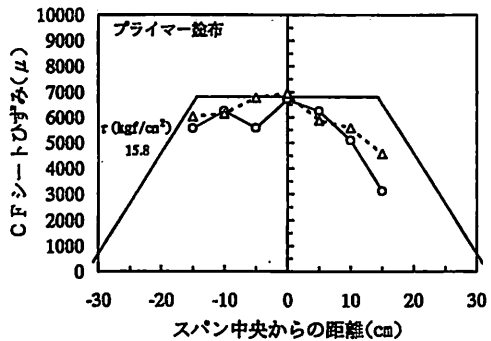
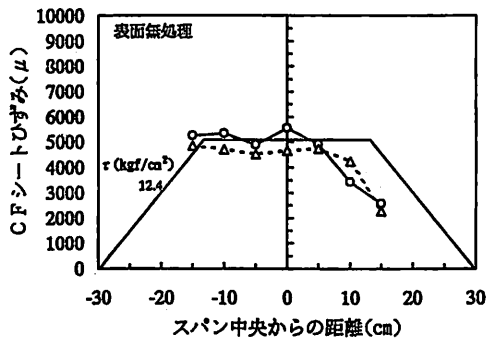


図14 CFシート付着耐力時のひずみ分布の測定値と計算値の比較

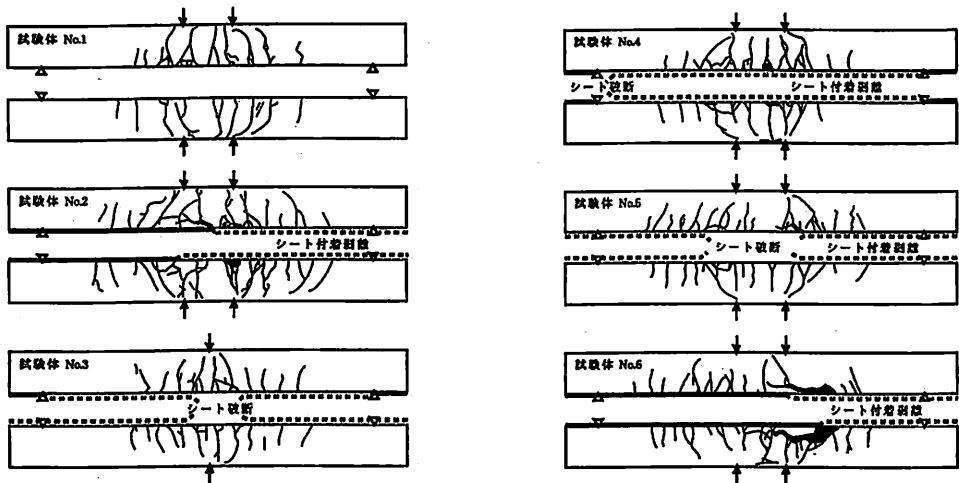


図15 RC梁のひび割れ及び破壊性状

で  $280\text{kgf/cm}^2$ 、後で  $469\text{kgf/cm}^2$  と異なり、付着応力がコンクリート強度に影響を受けることを示しており、コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど、付着応力も大きくなっている。

#### 4.2 CFシートによるRC梁の曲げ補強効果

##### (1) ひび割れ及び破壊性状と変形及び耐荷性状

図15に、各試験体のひび割れ及び破壊性状を、また、図16に、荷重-スパン中央変位曲線を示す。無補強の試験体No.1は、純曲げ区間に複数の曲げひび割れが発生し、引張鉄筋降伏後、圧縮側コンクリートの圧壊により終局的破壊に至った。シート補強したものは、全体的にせん断スパン内にもひび割れが分散し、荷重-変位曲線に見られるように、シートの局部的剝離に起因した数回のポップイン現象を繰り返しながら、シートの全面剝離あるいは破断により終局的破壊に至った。特にシート貼付数が3枚の試験体No.6については、シート接着面のコンクリートが層状に剝落し、コンクリートの損傷が顕著であった。シート貼付数の違いで見ると(試験体No.4, 5, 6)、貼付数が多いものほど、曲げ剛性及び耐力ともに大きくなっているが、変形能力は小さくなるのが分かる。また、貼付数が多くなると、1回のポップイン現象の規模が大きくなり、その回数が少なくなる傾向が見られる。シート補強前のひび割れ有無の影響は(試験体No.2, 5)、曲げ剛性、耐力、変形能力、ポップイン現象の規模や回数などについてほとんどないものと考えられる。載荷形式の違いの影響については(試験体No.3, 4)、載荷形式により曲げモーメント分布が異なり、荷重-変位曲線で単純に比較することができないので、その考察は後述する。

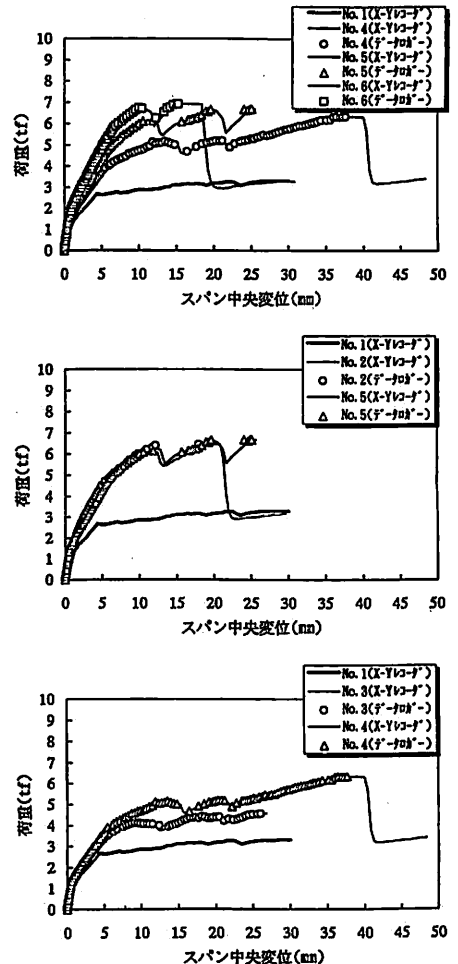


図16 荷重-スパン中央変位曲線

表10 CFシート補強RC梁の曲げ耐力の測定値と計算値

試験体番号	ひび割れモーメント (tf・m)		降伏モーメント (tf・m)		剥離開始モーメント (tf・m)	終局モーメント (tf・m)	
	測定値	計算値*1	測定値	計算値*2	測定値	測定値	計算値*3
No. 1	0.43	0.49	1.02	1.10	—	1.22	1.17
No. 2	—	—	1.83	1.65	2.71	2.74	4.30
No. 3	0.65	0.51	1.40	1.36	2.05	2.27	3.10
No. 4	0.51	0.51	1.40	1.36	2.18	2.69	3.10
No. 5	0.64	0.52	1.66	1.65	2.62	2.84	4.30
No. 6	0.55	0.53	1.96	1.93	2.86	2.94	5.01

\*1 等価断面による計算値。ただし、 $n = E_s/E_c = 6.58$ ,  $c\sigma_t = 1.8\sqrt{F_c}$ とした。

\*2 断面解析による計算値。ただし、 $\epsilon_{co} = 2.13 \times 10^{-3}$ ,  $n = 2.00$ とした。

\*3 断面解析による計算値。ただし、 $\epsilon_{cu} = 0.003$ , シートは完全付着とした。

(2) シートの曲げ補強効果

表10に、CFシート補強RC梁の曲げ耐力の測定値と計算値を示す。なお、ひび割れモーメントの計算値は、RC構造計算規程・同解説に基づき、ひび割れ発生時の引張縁コンクリート応力を $1.8\sqrt{F_c}$ とした。また、降伏及び終局モーメントの計算値は、前述の断面解析による値であり、CFシートは、終局時まで完全付着と仮定した。ここで、シート貼付数が1枚については、CFシートの破断で、2枚以上については、コンクリートの終局ひずみ( $\epsilon_{cu}$ )を0.003とした場合、曲げ圧縮破壊により終局的破壊に至った。表より、載荷形式の違いの影響については(試験体No.3, 4)、降伏モーメントはほぼ同じであるが、終局モーメントは、3点曲げの方が4点曲げの場合よりもやや小さくなっている。これが一般的傾向かどうかは本実験の範囲内では明確なことは言えないが、コンクリートの終局せん断強度がせん断スパン比に影響されることに起因して、せん断スパン比のより小さい4点曲げの方が、コンクリートの終局せん断強度が大きくなり、シートの付着耐力が増したことも一つの要因として考えられる。また、図17に、試験体No.4, 5, 6についてシート貼付数に対する曲げ耐力の比較を示す。ひび割れ及び降伏モーメントについては、測定値と計算値の間に良い対応が得られ、ひび割れモーメントの増加はわずかであるが、降伏モーメントは、シート貼付数にほぼ比例して増加している。また、終局モーメントについては、シートが終局時まで完全付着と仮定すれば、計算

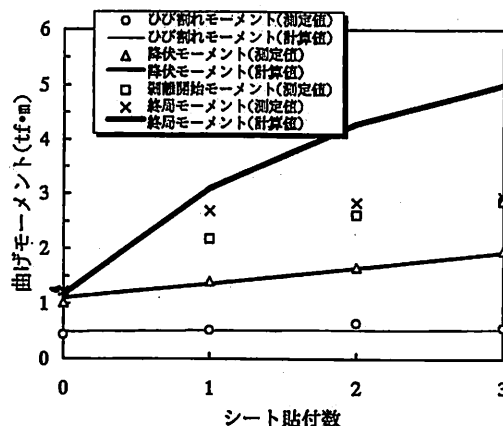


図17 シート貼付数が曲げ耐力に及ぼす影響

では非常に大きな曲げ耐力の増加がみられるが、実際には、シートの付着剥離が先行するために、終局モーメントの増加は頭打となっている。このことから、シート補強されたRC部材の耐力算定には、シートの付着耐力をいかに評価するかが重要なポイントになることが分かる。

(3) シート付着耐力の試算

図18に、曲げモーメント—主筋ひずみ関係の測定値と計算値の比較を示す。上2つの図は、軸のスケールを同一にし、測定値と計算値の比較が容易になるようにした。また、一番下の図は、計算値の全体を示す。計算では、コンクリートの引張強度を無視しているの

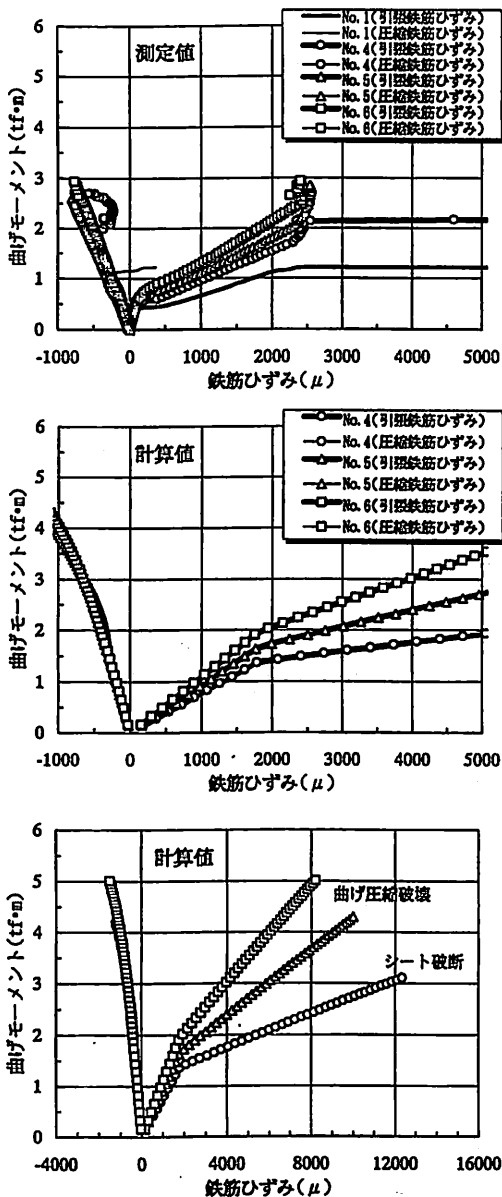


図18 曲げモーメント-主筋ひずみ関係の測定値と計算値

引張鉄筋降伏時点を分岐とする、ほぼバイリニアアの曲げモーメント-引張鉄筋ひずみ関係となっているが、ひび割れ発生点近傍を除けば、降伏時点まで測定値と計算値の間に良い対応が得られている。降伏点以降、引張鉄筋ひずみについて測定値と計算値の間にずれを生じているが、これは、ひずみゲージを貼り付けたスパン中央断面と、シートの付着剝離が進行する載荷点近

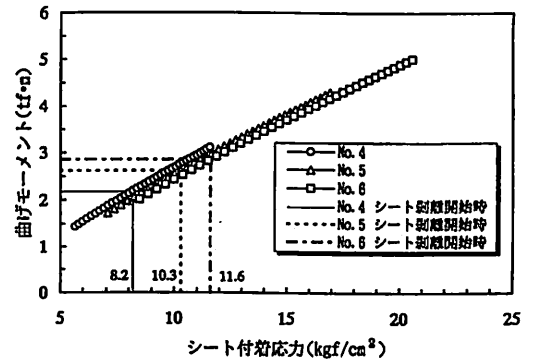


図19 曲げモーメントに対するシート付着応力の変化

傍のせん断スパン内との位置的ずれに起因し、スパン中央断面の引張鉄筋が局部的に除荷を生じたためと考えられる。

図19は、前述の解析方法による引張鉄筋降伏以降のシート付着応力の計算結果を示す。曲げモーメントの増加により、シート付着応力も増加し、シート貼付数によらず、曲げモーメントに対するシート付着応力の変化は、ほぼ同様の関係となっている。また、図中には、表10に示す剝離開始モーメントにおけるシート付着応力の値を併記しているが、シート貼付数が多くなるほど、剝離開始時のシート付着応力が増加している。これは、シートの付着試験結果と対応し、シート貼付数が多くなるほど、シートの面圧の増加により付着応力が増加するためと考えられる。現時点で、シートの付着試験とRC梁に用いたコンクリートが異なることや試験体寸法の影響などを考慮すると、本実験のシートの付着試験結果をそのままRC梁のシート付着耐力算定に利用することはできないが、RC梁に用いたコンクリートの圧縮強度(240kgf/cm<sup>2</sup>)がシート付着試験に用いたコンクリートの圧縮強度(280, 469kgf/cm<sup>2</sup>)よりも低いことやRC梁の試験体寸法が大きいことを考えると、シートの付着試験から算定された付着応力に対してRC梁のシート剝離開始時の付着応力算定値は、ほぼ妥当な範囲にあるものと考えられる。

### 5. まとめ

本研究では、CFシートの付着性状を把握するための付着試験法とその解析、RC梁に対するCFシートの曲げ補強効果について検討し、次のような知見が得られた。

- (1) CFシートの付着試験法として、2つのコンクリート角柱を中央で突き合わせ、その面をまたぐように

シートを貼り付けた梁の曲げ試験を提案し、シート付着耐力時のマクロモデル解析により、シートの付着切れ長さ、有効付着長さ、荷重とシート引張力の関係、付着応力の算定を試み、付着試験結果との対応からその適用妥当性を示した。本試験の範囲では、シート接着長さが250mm以上について、付着切れ長さは約110~150mm程度で、シート付着応力は、シート断面積が大きくなるほど面圧の増加による摩擦作用により大きくなること、またコンクリートの圧縮強度が大きくなるほど大きくなること分かった。

- (2) RC梁に対するCFシートの曲げ補強効果については、シート貼付数が多くなるほど、降伏モーメントは、ほぼ比例的に増加するが、終局モーメントは、シートの付着剝離が先行するために、シートを完全付着と仮定して求められた計算値よりも測定値が下回り、シート貼付数の増加に対する終局モーメントの増加は頭打ちの傾向を示す。また、RC梁のシート付着耐力時について算定された付

着応力は、コンクリート強度や試験体寸法の影響を考慮すれば、シートの付着試験結果とほぼ妥当な対応を示し、RC梁に対するシート付着耐力算定の可能性が確かめられた。

## 謝 辞

本実験にあたって、熊本大学工学部甲斐定夫技官をはじめ、建築材料施工研究室の大学院生及び卒業生の皆様に協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 木村耕三：炭素繊維によるコンクリートの補強に関する実験的研究，大阪市立大学学位請求論文，1994. 11
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針（案）・同解説，1988. 10