

論文 極厚 CFRP プレートを用いた既存 RC 梁の曲げ補強効果に関する実験的研究

久部 修弘^{*1}・山内 征一郎^{*2}・村上 聖^{*3}・武田 浩二^{*3}

要旨：既往の研究では，CFRP プレート（厚さ 2mm まで）の付着長さや補強量等をパラメータとした RC 梁の静的曲げ載荷試験が行われ，CFRP プレートの剥離時最大ひずみとその有効付着長さや貼付長さとの比で表されることが確認されている。本研究では，これまで研究事例がほとんどない厚さ 4mm の極厚・高弾性 CFRP プレートを用いたコンクリート梁の曲げ補強効果について実験的検討を行い，その補強効果とこの既往の知見が成り立つことを確認した。さらに，このプレートを用いた場合の RC 梁の破壊性状の特徴から，CFRP プレート最大ひずみの算定式を提案した。

キーワード：CFRP プレート，曲げ補強，RC 梁，付着長さ，補強効果，剥離破壊

1. はじめに

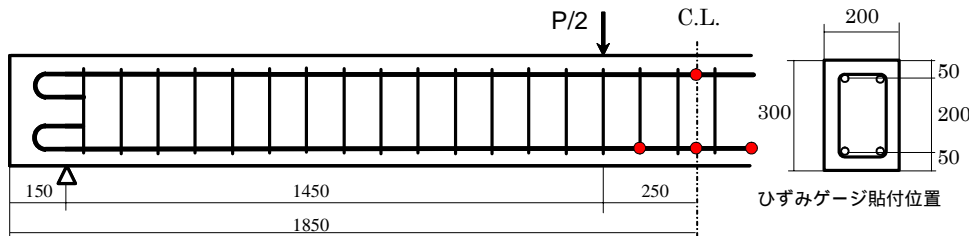
既存コンクリート部材において，供用時の鉄筋応力の低減等を目的とした曲げ補強を行う際，補強量が多く必要なケースがある。近年，このような場合の補強工法の一つとして CFRP プレートによる曲げ補強工法が注目されている（写真 - 1）。この工法は引抜き成型法によって炭素繊維を一方向に配し，エポキシ樹脂を含浸・硬化させた CFRP プレートをパテ状のエポキシ樹脂を用いてコンクリート表面に接着，補強するものであり，含浸脱泡作業のある炭素繊維シート工法に比べて，品質の安定，施工性の向上，工期短縮等の特長を有している。

このように CFRP プレート補強工法は一度に多くの補強を行うことが可能となる反面，その補強量の上限について研究された事例はほとんどない。これまでコンクリート部材において炭素繊維による曲げ補強効果が確認されている補強量は，炭素繊維シートで 10 層（300g 目付）まで¹⁾であり，これを CFRP プレートに換算すると厚さ 2mm 品とほぼ同等の炭素繊維量となる。この CFRP



写真 - 1 CFRP プレートによる曲げ補強事例

プレート 2mm 品の補強効果についてはこれまで研究報告²⁾³⁾がなされているが，それ以上の厚さの CFRP プレートを用いた場合の補強効果については研究事例がほとんどないのが現状である。しかしながら，CFRP プレート 2mm 品以上の補強量が必要とされる事例も数多くあり，それ以上の補強を行った場合の補強効果の確認が望まれている。



- ・コンクリート：レディミクストコンクリート，呼び強度=24N/mm²
- ・主鉄筋：SD295A，D13，圧縮鉄筋 2-D13，引張鉄筋 2-D13
- ・せん断補強筋：SD295A，D10，@100mm

図 - 1 試験体形状寸法および配筋

*1 三菱樹脂（株） 環境資材事業部 博士（工学）（正会員）

*2 三菱樹脂（株） 関西支社 環境資材営業部

*3 熊本大学 工学部 建築学科 工博（正会員）

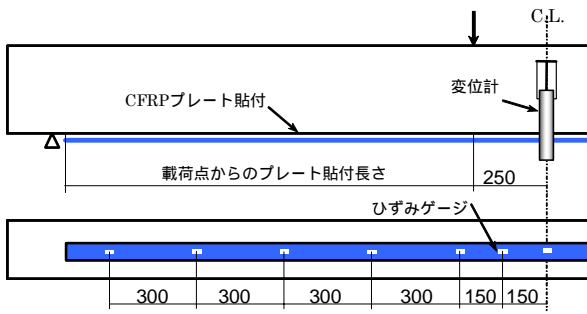


図 - 2 CFRP プレート配置

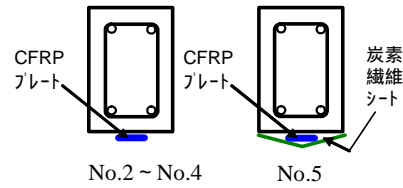


図 - 3 補強断面

表 - 1 試験体種類

| No. | 補強 | CFRP プレート補強仕様 | | | |
|------|----|---------------|-------|--------------------|-------------------------|
| | | 幅 | 厚さ | 貼付長さ ^{*1} | 定着補強 |
| No.1 | 無 | - | - | - | - |
| No.2 | 有 | 50mm | 4.0mm | 1400mm | - |
| No.3 | | 100mm | 2.0mm | 1400mm | - |
| No.4 | | 50mm | 4.0mm | 1000mm | - |
| No.5 | | 50mm | 4.0mm | 1000mm | 炭素繊維シート定着 ^{*2} |

*1 荷重点からの片面貼付長さ（以下、貼付長さと呼ぶ）

*2 炭素繊維シート（目付量 300g/m²、高強度タイプ）

そこで本研究では、鋼材の約 2.3 倍の弾性率を有し、高い鉄筋の応力低減効果が期待できると考えられる高弾性タイプ（ヤング係数 450kN/mm²）で、かつ極厚（厚さ 4mm）の CFRP プレートをを用いて行った曲げ荷重実験結果を基に、CFRP プレートの曲げ補強効果と、既往の研究³⁾で示されている有効付着長さとの比で剥離時最大ひずみが表されることを確認した。さらに、このプレートをを用いた場合の RC 梁の破壊性状の特徴から、プレート最大ひずみの算定式を誘導した。

2. 実験方法

2.1 試験体

(1) 試験体の形状寸法

試験体の形状寸法・配筋およびスパンを図 - 1 に示す。試験体の断面寸法は既往の研究³⁾で用いた試験体と同様とし、CFRP プレートの十分な付着長さを確保するために、試験体長さを 3700mm とした。また、曲げ補強を行うことを考慮して、せん断補強筋比は 0.71% とした。

(2) 試験体種類

本研究では、表 - 1 に示すように高弾性タイプの CFRP プレート（4.0mm 品、2.0mm 品）を使用した。CFRP プレートの貼付長さは既往の研究³⁾を参考とし、4.0mm 品で必要と考えられる定着長さの 1,400mm と、それより短い 1,000mm の 2 種類とした（No.2、No.4 試験体）。ここで、本研究では、CFRP プレート貼付長さは荷重点から CFRP プレート端部までの距離としている。No.3 試験

表 - 2 コンクリート

| | |
|-------|------------------------|
| ヤング係数 | 27.2kN/mm ² |
| 圧縮強度 | 27.7N/mm ² |

表 - 3 CFRP プレート

| 種類 | 高弾性タイプ |
|-------|------------------------|
| ヤング係数 | 469kN/mm ² |
| 引張強度 | 1,330N/mm ² |

表 - 4 エポキシ樹脂接着剤

| | |
|---------|------------------------|
| 引張強度 | 23.6N/mm ² |
| 引張せん断強度 | 15.2N/mm ² |
| 圧縮強度 | 95.4N/mm ² |
| 圧縮弾性率 | 5,116N/mm ² |

体は、No.2 試験体と同等の補強材断面剛性（CFRP ヤング係数 × 断面積）を有し、付着面積が大きく確保されている（50mm 幅 100mm 幅）ものである。また、CFRP プレート貼付長さの短い No.5 試験体は、図 - 3 に示すように、CFRP プレート貼付後に炭素繊維シートを部材軸直角方向の梁底面のみに貼付した。

(3) 使用材料

実験に供したコンクリートの強度試験結果を表 - 2 に示す。主鉄筋、せん断補強筋共に SD295A を用いた。CFRP プレートの素材試験結果を表 - 3 に示す。また、

CFRP プレートの接着に用いたエポキシ樹脂接着剤の試験結果を表 - 4 に示す。接着剤はこれまでの研究で用いているものと同様のものである。

(4) CFRP プレート貼付方法

コンクリート強度の低い面を CFRP プレートで補強することで、安全側の評価となると考え、コンクリート打設時のコテ仕上げ面を補強面とした。補強するコンクリート表面をディスクサンダー（ダイヤモンドカップ使用）でケレンし、エポキシ樹脂接着剤をコンクリート表面および CFRP プレート上に塗布（50mm 幅での合計塗布量 0.5kg/m）後、CFRP プレートをコンクリート表面に圧着した。

2.2 荷重方法

荷重は図 - 4 に示すように、試験体両端をピン・ローラーで支持し、中央部 2 点に鉛直荷重を加えて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れおよび破壊性状

RC 梁の終局のひび割れおよび破壊性状を図 - 4 に示す。No.1 の無補強試験体については、引張鉄筋降伏先行の典型的な曲げ圧縮破壊を生じた。No.2 ~ No.5 の CFRP プレート補強試験体については、すべて CFRP プレートの剥離によって終局的破壊を生じた。No.2、No.4 については、RC 梁底面においてプレート接着界面近傍のコンクリートが片面で引き剥がされることに起因する CFRP プレートの剥離によって破壊に至った。また、No.3、No.5 については、引張鉄筋の付着割裂破壊を伴って、かぶりコンクリートが RC 梁底面側から引き剥がされて終局的破壊を生じた。

3.2 曲げ耐力および変形状

図 - 5 に各試験体の荷重 - スパン中央変位曲線を示す。図中の凡例内に各試験体の最大耐力も併記している。CFRP プレート接着補強により RC 梁の曲げ耐力は顕著に増加し、無補強に比べて、終局曲げ耐力は約 1.7 ~ 2.6 倍ほど増加している。No.2 および No.3 の比較では、コンクリートとの接着面積が 2 倍と大きい幅 100mm × 厚 2mm のプレートを用いた No.3 試験体の方が、幅 50mm × 厚 4mm のプレートを用いた No.2 試験体よりも終局曲げ耐力は約 7% 大きいものの、接着面積の違いから予想されるほど大きな曲げ耐力の差異はみられない。両試験体の CFRP プレートひずみ分布を示す図 - 6 では、破壊までのひずみ分布も両試験体とも同様の傾向を示している。しかしながら、両試験体の破壊性状が異なる原因として、No.2 試験体は CFRP プレート付着面積が小さいためプレート接着面での破壊が先行したのに対し、No.3 試験体では、付着面積が大きく、プレート接着面での剥離よりも、かぶりコンクリートを引き剥がすす力、すなわ

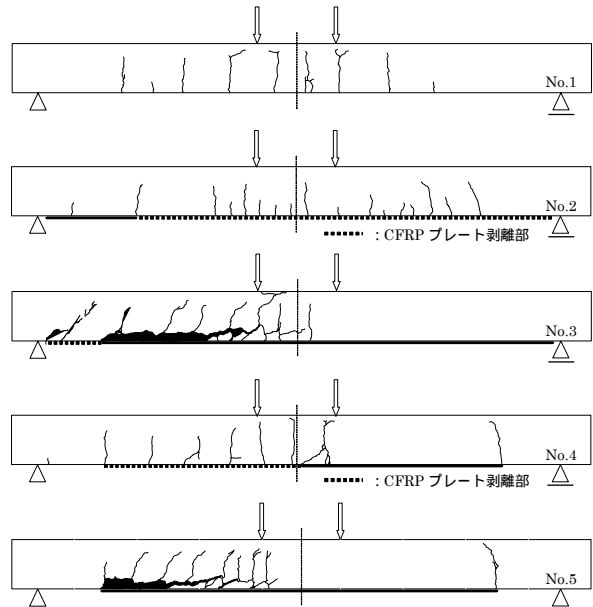
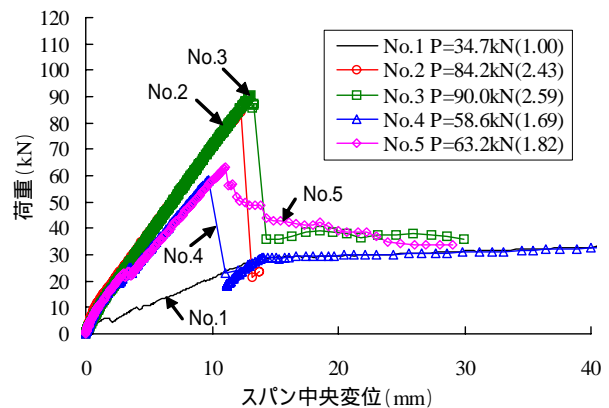


図 - 4 ひび割れおよび破壊性状

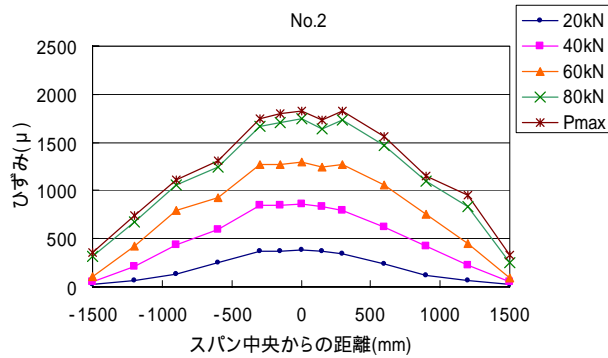


凡例内に各試験体の最大耐力を示す
()内の数値は無補強に対する耐力比

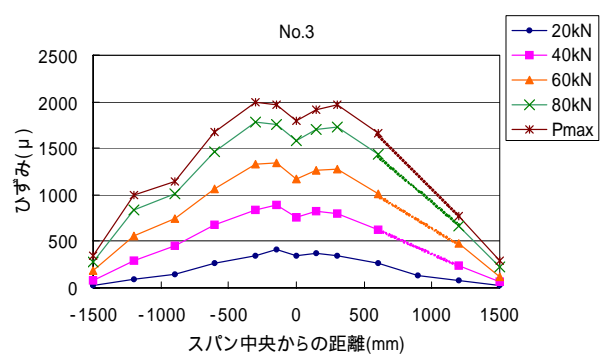
図 - 5 荷重 - 変形関係

ち引張鉄筋の付着割裂破壊を伴うかぶりコンクリートの剥離が先行したためと考えられる。

一方、No.2 および No.4 の比較で、荷重点からの片面貼付長さ（CFRP プレート貼付長さ）が 1400mm と大きい No.2 試験体の方が、付着長さが 1000mm と短い No.4 試験体よりも、終局曲げ耐力は約 44% ほど大きくなっており、付着長さが曲げ耐力に及ぼす影響はかなり大きいことが分かる。また、付着長さが No.4 試験体と同一で、底面を炭素繊維シートで定着補強を施した No.5 試験体の終局曲げ耐力は、No.4 試験体に比べて、約 8% ほど大きくなっているが、引張鉄筋の付着割裂破壊を伴うかぶりコンクリートの剥離が先行したために、それほど大きな改善は認められなかった。



(No.2 試験体：CFRP 厚さ 4.0mm)



(No.3 試験体：CFRP 厚さ 2.0mm)

図 - 6 CFRP プレートひずみ分布

尚, No.4, No.5 試験体の試験体曲げ剛性が No.2, No.3 試験体と比較して若干小さいのは, 載荷荷重 20 ~ 30kN 時に発生した CFRP プレート端部に発生したコンクリートの曲げひび割れによる影響と考えられる。

3.3 CFRP プレート補強効果の評価

図 - 7 に荷重 - 引張鉄筋ひずみ曲線の測定値と計算値との比較を示す。また, 図 - 8 に荷重 - CFRP プレートひずみ曲線の測定値と計算値との比較を示す。なお, 計算結果は, 平面保持を仮定した断面解析によるものであり, コンクリートの圧縮応力 - ひずみ関係には Popovics 式を用い(コンクリートの引張強度は無視), 鉄筋および CFRP プレートの応力 - ひずみ関係は, それぞれ完全弾塑性および線形弾性を仮定した。計算値は, CFRP プレートが破断するまでの結果を示しているが, プレートが剥離する時点まで計算結果と実験結果との間に良い対応が得られており, 厚さ 4.0mm の CFRP プレートをを用いた場合でも既往の RC 断面算定方法と同様の計算手法で評価可能であることを窺わせる。また, 試験体間でのプレート剥離時点のプレート最大ひずみの相違は, 前述の終局曲げ耐力と同様に付着長さの違いによる影響が特に大きいことが分かる。

3.4 CFRP プレート有効最大ひずみの算定

前述の通り, CFRP プレートで補強された試験体は, 曲げ剛性, 曲げ耐力の大幅な改善がみられるものの, CFRP プレートが破断ひずみに達する前に, CFRP プレートの剥離, もしくはかぶりコンクリート部の剥離破壊によって最大耐力が決定している。本研究では, この破壊時における CFRP プレート有効最大ひずみについて, 下記に示す 2 手法による算定を行った。

(1) CFRP プレート有効付着長さに基づく算定

既往の研究報告³⁾では, 曲げもしくは曲げせん断型で剥離破壊したときの CFRP プレート最大ひずみは CFRP プレートの有効付着長さを用いた (1) ~ (4) 式で表されるとされている。

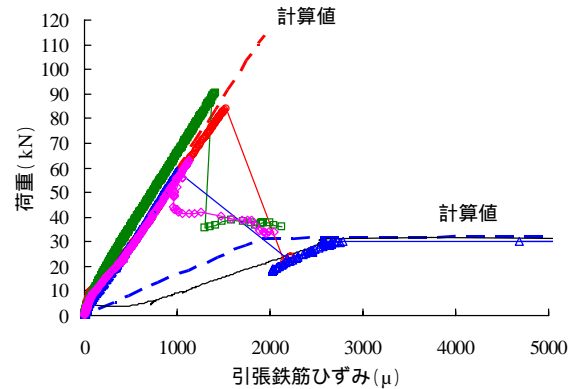


図 - 7 荷重 - 鉄筋ひずみ関係

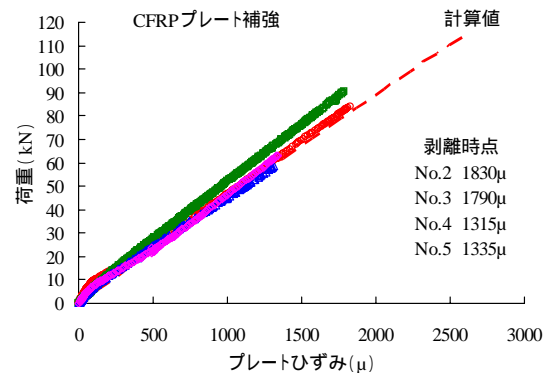


図 - 8 荷重 - CFRP プレートひずみ関係

$$\varepsilon_{cf, \max} = 940 \cdot \frac{l_{cf}}{l_e} \quad (1)$$

(高弾性 CFRP プレート $\varepsilon_{cf, \max}$ 2,000)

(高強度 CFRP プレート $\varepsilon_{cf, \max}$ 4,000)

$$l_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot s_e}{k_e}} \quad (2)$$

$$\lambda_f = \frac{E_f \cdot t_f}{\tau_{b,max}} \quad (3)$$

$$b_{max} = 2.5 \cdot B^{0.23} \quad (4)$$

ここで、

$\epsilon_{cf,max}$: CFRP プレート最大ひずみ (μ)

l_{cf} : CFRP プレート貼付長さ (mm) (荷点から CFRP プレート端部までの距離)

l_e : CFRP プレートをを用いた 2 面せん断試験による有効付着長さ⁴⁾⁵⁾で、(2) 式による (mm)

s_e : 有効付着域の局所すべり量 (= 0.234mm)

k_e : 等価付着ストレスブロック応力係数 (= 0.428)

f : CFRP プレートの付着指標で、(3) 式による

E_f : CFRP プレートのヤング係数 (N/mm²)

t_f : CFRP プレートの厚さ (mm)

b_{max} : 局所最大付着応力 (N/mm²) で、(4) 式による

B : コンクリート強度 (N/mm²)

本算定方法は、まず (3) 式を用いてコンクリート強度や CFRP 断面剛性によって構成されている CFRP プレート付着指標を算出し、次にこの CFRP プレートの 2 面せん断試験結果と付着指標から、(2) 式に示す CFRP プレート有効付着長さ⁴⁾⁵⁾を導いている。この有効付着長さは 2 面せん断試験結果に基づくものであり、RC 梁の曲げ試験とは条件が異なっているため、有効付着長さ (l_e) と曲げ試験における加力点からの CFRP プレート貼付長さ (l_{cf}) との比 (l_{cf}/l_e : CFRP プレート貼付長さ比) を用いて、(1) 式に示すように CFRP プレート最大ひずみを表している。

図 - 9 に CFRP プレート最大ひずみと貼付長さ比 (l_{cf}/l_e) の関係を示す。データは既往の研究報告³⁾の高弾性、高強度 CFRP プレートをを用いたものと本研究の試験結果を併記している。本算定結果より、厚さ 4mm の高弾性 CFRP プレートをを用いた場合でも、2,000 μ を上限とした CFRP プレート貼付長さ比を用いた算定式で最大ひずみを評価することが可能であると考えられる。

(2) かぶりコンクリート強度と CFRP プレート引張力・付着長さからの算定

CFRP プレートの剥離メカニズムとプレート最大ひずみに及ぼす影響因子を考察することにより、本実験結果および既往の研究報告³⁾のデータを用いて、CFRP プレート最大ひずみの算定式を誘導する。

図 - 10 に示すように、曲げ引張縁での CFRP プレート接着補強によりかぶりコンクリート部にせん断応力が生じるために、斜張力による斜めひび割れの発生が起点となって CFRP プレートあるいはかぶりコンクリートの

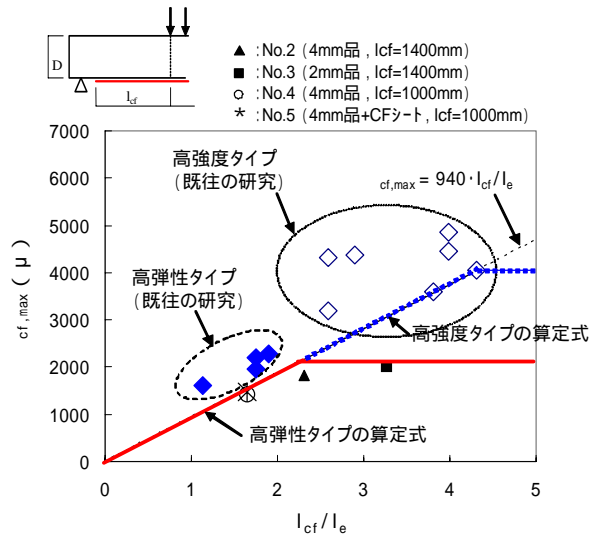


図 - 9 CFRP プレート貼付長さ比と最大ひずみとの関係 (既往のデータ³⁾と本試験結果)

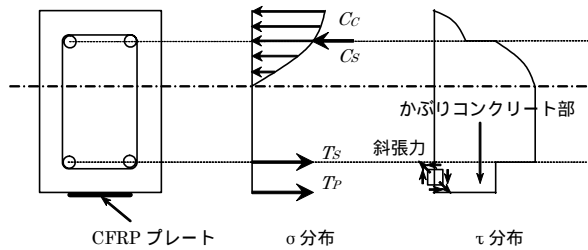


図 - 10 CFRP プレート剥離 (かぶり) 破壊メカニズム

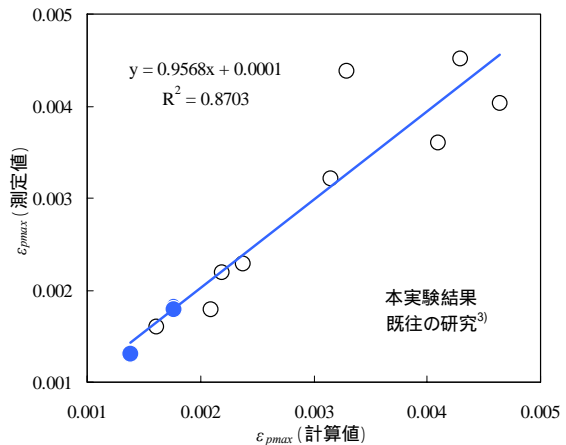


図 - 11 CFRP プレート剥離破壊時における最大ひずみの測定値と計算値の相関

剥離が生じるものと考えられる。従って、プレート剥離時最大ひずみには、プレート引張力、かぶりコンクリート部のせん断ひび割れ強度、プレート付着長さが影響し、CFRP プレート引張力 (CFRP プレート軸方向剛性) が大きくなるほど、かぶりコンクリート部のせん断応力が増大し、またせん断ひび割れ強度や付着長さが小さくなる

ほど、CFRP プレート最大ひずみは小さくなることが予想される。そこで、CFRP プレート最大ひずみ算定式として(5)式に示す上記因子の相乗作用式を仮定し、測定値をその式に当てはめて重回帰分析を行うことにより、回帰式を定めた。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{p\max} &= A(E_p A_p)^\alpha \tau_c^\beta (l_d/L)^\gamma \\ &= 1.79(E_p A_p)^{-0.383} \tau_c^{0.236} (l_d/L)^{0.715}\end{aligned}\quad (5)$$

ここで、

$\varepsilon_{p\max}$: プレート最大ひずみ

A, α, β, γ : 回帰係数

E_p : プレートヤング係数 (N/mm²)

A_p : プレート断面積 (mm²)

$E_p A_p$: プレート軸方向剛性 (N)

τ_c : コンクリートせん断ひび割れ強度 (N/mm²)

l_d : プレート付着長さ (載荷点からの片面貼付長さ) (mm)

L : せん断スパン長さ (mm)

尚、 τ_c としては、(6)式に示す靱性保証型耐震設計指針⁶⁾のせん断ひび割れ強度式を用いた。

$$\tau_c = 0.33\sqrt{F_c}\quad (6)$$

ここで、

F_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

図-11 にプレート最大ひずみの測定値と計算値の対応を示す。計算値に対する測定値の比の平均値は0.999、変動係数は12.8%となり、平均的に精度の良い算定式が得られたものと考えられる。尚、本式は、高弾性及び高強度 CFRP プレートをを用いた場合で、プレート軸方向剛性 ($E_p A_p$) が、 $78 \times 10^5 \sim 938 \times 10^5$ N の範囲内で評価したものである。

上式より、CFRP プレート軸方向剛性が大きくなるほど、CFRP プレート最大ひずみは小さくなるが、CFRP プレート剥離時のプレート引張力 ($T_{p\max}$) は、(7)式に示すように軸方向剛性が大きくなるほど増加し、終局曲げ耐力の増加には有効であることが分かる。

$$\begin{aligned}T_{p\max} &= E_p A_p \varepsilon_{p\max} \\ &= 1.79(E_p A_p)^{0.617} \tau_c^{0.236} (l_d/L)^{0.715}\end{aligned}\quad (7)$$

尚、これらの評価方法は特定のせん断スパン比によるものであり、今後はせん断スパン比が変化する際の影響についても検討を加える必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、厚さ 4.0mm の高弾性 CFRP プレートをを用いてコンクリート梁の曲げ補強に関する実験的検討を行った。ここで得られた知見を以下に示す。

- (1) CFRP プレートで曲げ補強されたコンクリート梁の破壊は、CFRP プレートの剥離、もしくはかぶりコンクリートの剥離破壊によって決定した。
- (2) CFRP プレートの補強量 (断面剛性) と付着長さが等しい場合、本研究の範囲内では、破壊モードは異なるものの、試験体の曲げ剛性および最大耐力は、ほとんど変わらない結果となった。
- (3) CFRP プレート付着長さは、終局曲げ耐力に特に大きな影響を及ぼし、終局曲げ耐力の向上には、十分な付着長さの確保が必要と考えられる。
- (4) 本研究で使用した極厚の CFRP プレートをを用いた場合でも、CFRP プレート有効付着長さをを用いた貼付け長さ比の算定式で CFRP プレートの最大ひずみを評価することが可能であると考えられる。
- (5) CFRP プレートの剥離破壊メカニズムより、精度の良い CFRP プレート最大ひずみの算定式を提案した。その式より、特定のせん断スパン比での CFRP プレート最大ひずみは、プレート軸方向剛性、かぶりコンクリート部のせん断ひび割れ強度、プレート付着長さが相互に影響することが分かった。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室, 炭素繊維補修・補強工法技術研究会: コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(III)-炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)-, 1999.12
- 2) 久部修弘, 諸橋克敏, 大塚浩司: 高弾性 CFRP プレートの継手性能と RC はりにおける曲げ補強効果及び疲労耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, 2007
- 3) 久部修弘, 矢野努, 横山剛, 益尾潔: CFRP 成型板を用いた既存 RC 梁の曲げ補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.3, 2008
- 4) 矢野他: CFRP 板とコンクリートの付着性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.113~116, 2007.8
- 5) 金久保利之, 古田智基, 福山洋: 等価付着スリブ・ロックによる連続繊維シートとコンクリートの付着強度算定式, コンクリート工学年次論文報告集, 第12巻, 第3号, pp.27~37, 2001.9
- 6) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説(第2版), (社)日本建築学会, 1999