

論文 付着割裂破壊する既存鉄筋コンクリート造柱部材の L 型 CFRP 板による補強効果に関する実験的研究

杉本 訓祥*1・増田 安彦*2・木村 耕三*2・勝俣 英雄*1

要旨：既存鉄筋コンクリート造柱部材の耐震補強では、従来から炭素繊維シート巻き付けによる補強工法が用いられてきた。この従来工法にかわり L 型に加工した炭素繊維強化プラスチック板を用いる手法を新たに考案した。本工法は、従来工法に比べ、補強に要する面積を小さくできることや、樹脂の含浸による従来工法に比べ施工性を向上できること、といった利点がある。そこで、本工法による補強性能確認を目的として、付着性状に劣る柱部材を対象として構造実験を実施した。実験の結果、本工法による補強効果は確認されたものの、シート巻き付けに比べ、付着割裂破壊に対する補強効果が乏しいことが確認された。

キーワード：リニューアル, 既存柱, 炭素繊維強化プラスチック板, 付着割裂破壊

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート造柱(以下, 既存 RC 造)部材のせん断補強方法として, 炭素繊維シート巻き付けによる方法がよく用いられる¹⁾。この工法では, シート状に加工された炭素繊維に, エポキシ樹脂を含浸させながら, 部材に巻き付けて定着させる。一方, 同様な炭素繊維による補強用材料として, 炭素繊維強化プラスチック板(以下, CFRP 板と呼ぶ)が開発され, 既存 RC 部材に接着することで曲げ補強可能であることが確認されている^{2),3)}。さらに, これを L 型に加工した材料(以下, L 型 CFRP 板と呼ぶ)を用い, 梁部材のせん断補強に用いる手法も提案されている^{4),5)}。この材料を用いると, エポキシ樹脂系接着剤を用いてより簡単に施工可能であり, 耐震補強の短工期化が可能であると期待される。

以上の背景から, この材料を用いて既存 RC 造部材の耐震補強が可能であるか検討を行った。本報では, CFRP 板の素材の性能を確認するために行った材料試験結果と, 付着割裂破壊を想定した既存 RC 造柱部材を対象として補強を施した場合の構造性能確認を目的として行った実験結果について述べる。

2. 工法概要

L 型 CFRP 板を用いた既存 RC 造柱部材の補強工法の概要について述べる。L 型 CFRP 板の形状を写真-1 に, また, 補強概念図を図-1 に示す。写真に示す L 型 CFRP 板を 4 枚を一組とし, エポキシ樹脂系接着剤を用いて, 柱外周に巻きつけるように貼り付ける。このとき, CFRP 板同士は一定長さ以上のラップを設ける。従って, RC 柱部材に巻きつけた場合の構造性能の確認に加え, CFRP 板同士の接着性状の確認が必要となる。

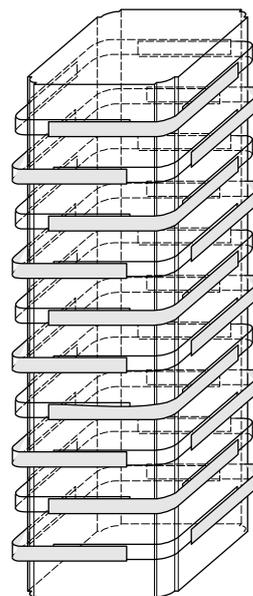


図-1 補強概念図



写真-1 L 型 CFRP 板

*1 (株) 大林組 技術研究所 工博 (正会員)

*2 (株) 大林組 技術研究所 (正会員)

3. 材料特性

3.1 素材の材料特性

各材料の引張強度試験結果を表-1に、応力度-歪度関係の例を図-2(a)に示す。L型CFRP板は、炭素繊維シートに比べ、ヤング係数、引張強度とも6割程度である。L型CFRP板の製品の組成は、炭素繊維混入量56%（体積比）以上と規定しており、その影響によると推測される。

3.2 CFRP板接着時の材料特性

L型CFRP板同士を接着した状態の強度を確認するために、接着した試験片の引張試験を行った。試験片の概念図を図-3に示す。図に示すように、2枚の板をエポキシ樹脂系接着剤により接着し、両端部に厚さ調整用のアルミ板を張り付け、引張試験を行った。重ね部分の長さは、100mm、200mmの2種とした。

試験結果を表-2に、応力度-歪度関係の例を図-2(b)に示す。いずれの試験片も、接着面の剥離が生じた。また、そのときの荷重は、母材の強度の1/7~1/6程度であった。

表-1 材料試験結果[N/mm²](各6本の平均値)

材料	引張強度	ヤング係数
炭素繊維(JIS K 7073による)	4300	2.44×10 ⁵
L型CFRP板 ^{*)}	2530	1.37×10 ⁵

*) 断面積は、t1.4mm×w40mm=56mm²

表-2 接着試験片の結果[N/mm²](各6本の平均値)

ラップ長	最大強度 ^{**)}	1層部 ^{***)} 剛性	2層部 ^{***)} 剛性
100mm	365	1.29×10 ⁵	1.36×10 ⁵
200mm	361	1.31×10 ⁵	1.40×10 ⁵

) 1層断面積(56mm²)あたりの応力度, (*) 図-3参照

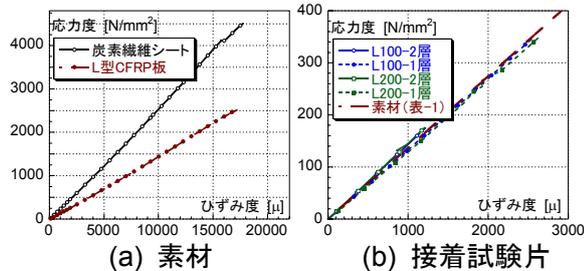


図-2 引張試験結果例

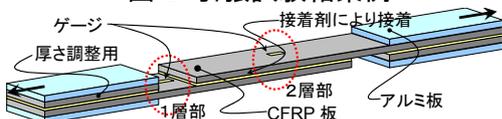


図-3 接着試験片

4. 既存RC柱部材の補強性能確認実験

4.1 実験概要

試験体一覧を表-3に、試験体の配筋詳細を図-4に、加力装置図を図-5に示す。構造実験では、付着割裂破壊すると想定されるRC造柱部材試験体を4体製作し、その内2体をL型CFRP板により補強し、他の1体を既往の補強方法である炭素繊維シート巻き付けにより補強した。L型CFRP板の重ね部分の長さは200mmとした。

表-3 試験体一覧

C-O	C-CR	C-LL	C-LH
補強無し	200g/m ² *2層 p _{w(CF)} =0.11%	CFRP板6段 p _{w(CF)} =0.11% 間隔252mm	CFRP板10段 p _{w(CF)} =0.22% 間隔126mm
共通			
断面 : 400×400 [mm×mm] ^{**)}			
内法高 : 1375 [mm]			
主筋 : 18-D13, p _g =1.43%			
帯筋 : □-4φ@125, p _w =0.052%			
**) 補強試験体の軸力 : N=640kN			
角は面取りを施す σ _B , E _c : 19.7N/mm ² , 19300N/mm ²			

表-4 材料特性(鉄筋:[N/mm²])

鉄筋径	降伏強度	引張強度	ヤング係数
φ4(帯筋)	543	587	2.05×10 ⁵
D13(主筋)	360	521	1.95×10 ⁵

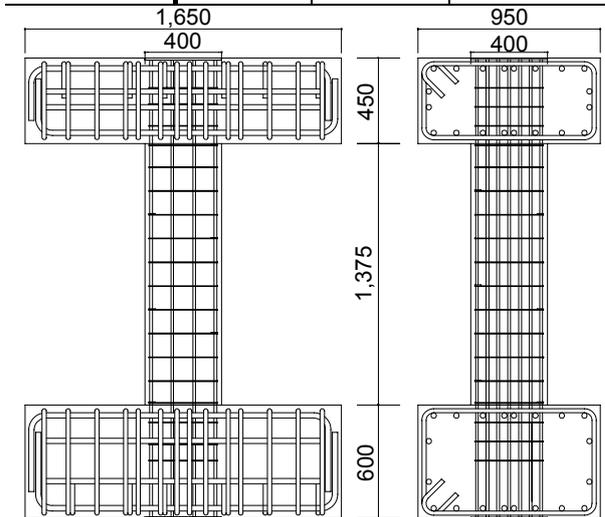


図-4 試験体の形状・寸法

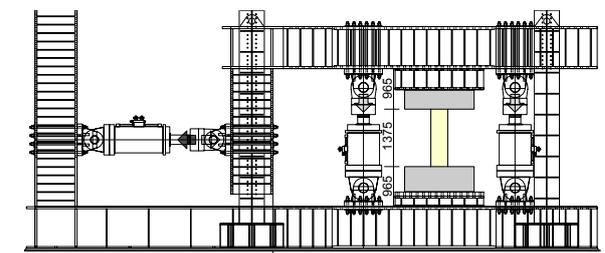


図-5 加力装置図

加力は、一定軸力（ $N=640kN$ ）を載荷した状態で、上下スタブを平行に保ちながら、柱部分に逆対称曲げせん断力を加える、静的正負交番繰り返し載荷とした。上下スタブ間の相対水平変位を測定し、部材内法高さに対する相対水平変形角（部材角） $R=1/1000, 1/500, 1/250, 1/150, 1/100, 1/50, 1/33$ をそれぞれ正負2回ずつ繰り返した後、正方向 $R=1/20$ の大変形まで加力する載荷ルールとした。

4.2 実験結果概要

(1) 破壊性状および荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形関係を図-6 に、最終破壊状況を写真-2 に示す。試験体 C-CR は、炭素繊維シートをはがした状態も併せて示した。

試験体 C-O は、部材角 $R=1/150$ 時に付着割裂ひびわれが発生するとともに急激に耐力低下が生じ付着割裂破壊した。その後の繰り返し載荷時の負担せん断力は最大耐力の6割程度以下となり、 $R=1/33$ の繰り返し載荷途中で軸力が保持できず崩壊した。

試験体 C-CR は、 $R=1/150\sim 1/100$ にかけて主筋の圧縮・引張降伏が生じ、負担せん断力は一定となったのち、 $R=1/50$ 以降で徐々に耐力低下するとともに、荷重変形関係上スリップが生じ始めた。加力後にシートをはがした結果から、曲げ降伏後の付着割裂破壊と判断した。

L型CFRP板による補強試験体 C-LL および C-LH は、 $R=1/150$ 付近で主筋の圧縮降伏が確認され、負担せん断力はほぼ一定となった。また、付着割裂ひびわれも $R=1/150$ 付近で確認され、補強量の少ない試験体 C-LL では $R=1/100$ 、C-LH は $R=1/50$ の加力中に徐々に耐力低下した。また、C-LL、C-LH とともに $R=1/50$ の加力中に、一部のCFRP板の接着部の剥離とともに一時的に急激な耐力低下が起きた。接着部の剥離後、 $R=1/20$ までは、試験体 C-O と同様にスリップが顕著となり、また、負担せん断力は小さくなったが、軸力は保持し、崩壊には至らなかった。



*カラーマジックは、コンクリート躯体からの剥離部分を示す
写真-2 最終破壊状況写真

(2) 最大耐力の評価

実験結果一覧を表-5 に示す。ここでは、せん断耐力を荒川式に基づく次式(1)を用いた評価(Q_{S荒})⁶⁾と、曲げ耐力略算値(Q_{M略})⁶⁾について検討する。付着に対する検討は次項(3)で行う。

$$Q_{S荒} = \left\{ \frac{0.068 p_i^{0.23} \cdot (Fc + 18)}{M/Qd + 0.12} + 0.85 \sqrt{\sum (p_w \cdot \sigma_{wy})} + 0.1 \sigma_o \right\} \cdot b \cdot j \quad (1)$$

ただし、*p_i*:引張鉄筋比、*Fc*:コンクリート圧縮強度、*M/Qd*:せん断スパン比、*σ_o*:軸応力度、*b*:断面幅、*j*:応力中心間距離で 7/8*d* とする、*d*:有効せい、 $\sum(p_w \cdot \sigma_{wy})$:補強量の総和で以下による

$$\sum (p_w \cdot \sigma_{wy}) = p_{w(S)} \cdot \sigma_{wy(S)} + p_{w(CF)} \cdot \sigma_{wy(CF)} \quad (2)$$

ただし、*p_{w(S)}*:既存の帯筋によるせん断補強筋比、*σ_{wy(S)}*:既存の帯筋の降伏点強度、*p_{w(CF)}*:炭素繊維補強量、*σ_{wy(CF)}*:補強材料のせん断設計用強度で、炭素繊維シートの場合、歪度 0.8%時応力度 = 1750N/mm²、CFRP 板の場合、接着面剥離時の応力度 = 365N/mm² とする (3.2 節参照)。

強度の計算値と実験値を比較して、図-7 に示す。正負の最大耐力それぞれに対して比較して示す。試験体 C-LL を除き、ほぼ耐力を評価できている。試験体 C-LL は、正方向加力時に圧縮降伏が生じた後、付着割裂破壊を生じたためと考えられる。また、負方向加力時の最大耐力は正側に比べ小さい結果となっており、曲げ降伏と付着割裂破壊が複合的に生じている。これは、曲げ降伏を生じ、その後付着割裂破壊を生じた C-CR とは異なる破壊モードであり、従来工法とは異なる点として、詳細な検討を要する。

表-5 実験結果一覧 [kN]

	C-O	C-CR	C-LL	C-LH
最大耐力 QMax	+272/-273	+324/-319	+321/-274	+313/-323
引張降伏	—/—	+300/-293	—/—	—/-296
圧縮降伏	+259/—	+302/-281	+306/-269	+303/-301
計算	Q _{S荒}	257	361	289
	Q _{M略}	319		

Q_{S荒}:せん断強度(式(1)), Q_{M略}:略算による曲げ耐力時せん断力

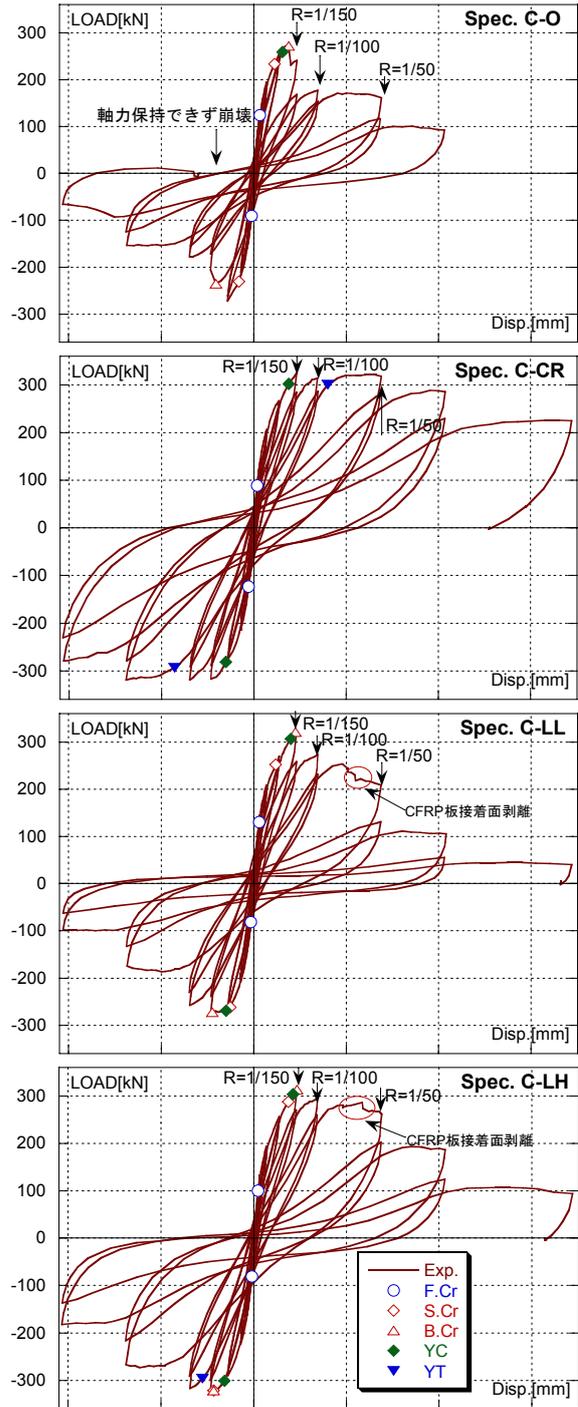


図-6 各試験体の荷重-変形関係

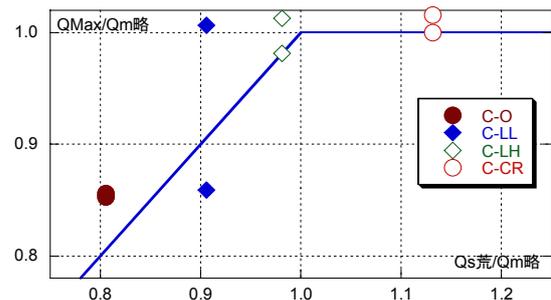


図-7 実験値と計算値の比較

(3) 付着強度の検討

各試験体主筋の付着応力度分布を図-8に示す。主筋の歪度は、柱頭柱脚のほかスパン内2点の合計4点で計測した。各測定点間の付着応力度を一定と仮定して、3区間の付着応力度分布を図示した。なお、いずれの試験体も、正方向載荷時で、最大耐力を發揮した時（R=1/150程度以前：QMax時と表示）、R=1/100時について示している。試験体C-LHおよびC-CRでは、最大耐力後に付着応力度が最大となった時（R=1/50程度以前：τMax時と表示）についても示した。また、代表例として、正方向加力時に柱脚引張となる、断面内隅角部および幅方向中央位置の主筋について示した。図には、曲げ降伏時付着応力度（式(3)）および、付着割裂強度計算値（式(4)、(5)）⁶⁾も示した。補強効果を考慮した計算は、試験体C-CRについて示した。

曲げ降伏時付着応力度 τ_F

$$\tau_F = \frac{2 \cdot \sigma_y \cdot a_{ST}}{\phi \cdot (L - D)} \quad (3)$$

ここで、 σ_y ：主筋降伏強度、 a_{ST} ：主筋断面積、 ϕ ：主筋の周長、 L ：柱内法高さ、 D ：柱断面せい

付着割裂強度 τ_{BU}

$b_{ci} < b_{si}$ のとき、 $b_i = b_{ci}$

$$\tau_{BU} = (0.5 + 0.4b_i + 25 \sum p_w' \cdot (b/d_b)) \cdot \sqrt{\sigma_B \cdot \gamma} \quad (4)$$

$b_{si} < b_{ci}$ のとき、 $b_i = b_{si}$

$$\tau_{BU} = (0.17 + 0.38b_i + 32 \sum p_w' \cdot (b/\Sigma d_b)) \cdot \sqrt{\sigma_B \cdot \gamma} \quad (5)$$

$$\text{ここで、} \quad b_{ci} = \frac{2\sqrt{2}d_c - d_b}{d_b}, \quad b_{si} = \frac{b - \Sigma d_b}{\Sigma d_b}$$

γ ：SI単位系への換算係数=0.0980665、 σ_B ：コンクリート圧縮強度[N/mm²]、 $\Sigma p_w' = p_{w(S)'} + 3p_{w(CF)'}$ 、 $p_{w(S)'}$ ：既存帯筋で断面外周に配筋された帯筋のせん断補強筋比、 $p_{w(CF)'}$ ：CFRPによるせん断補強筋比（ $\leq 0.24\%$ ）

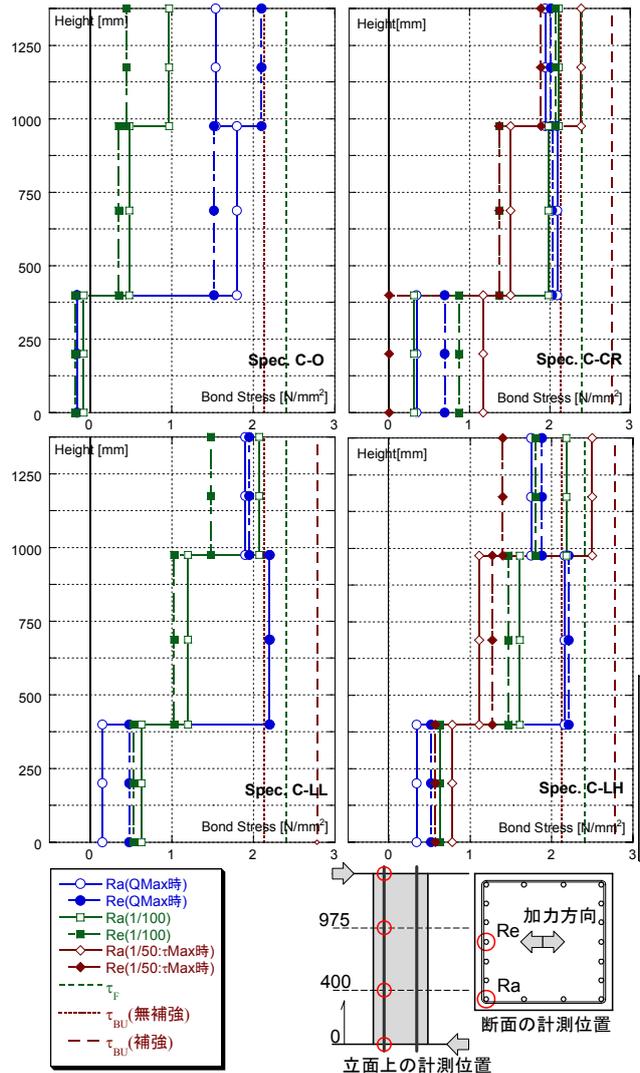


図-8 付着応力度分布

図より、無補強試験体C-Oおよび補強量の少ない試験体C-LLでは、最大耐力を發揮した時点で無補強時の付着割裂強度（ τ_{BU} (無補強)）程度の値であり、付着割裂破壊している状況と対応している。従って、試験体C-LL程度の補強量では、付着割裂強度を高める効果は表れていないと考えることができる。一方、炭素繊維シート巻き付けによる補強試験体C-CR、および補強量の多い試験体C-LHでは、最大耐力時以降も付着応力度の低下は少なく、R=1/50で付着応力度が最大となった時には、曲げ降伏時付着応力度程度となっている。また、特に補強効果の表れた試験体C-LH、C-CRでは、スパン中央部領域の付着応力度は変形が進むにつれて低下しているが、柱頭部（圧縮領域）の付着応力度は低下は少なく、R=1/50では最大となっている。これは、

炭素繊維シートによる補強の結果、付着割裂強度を向上するというより、圧縮側のコンクリートの拘束とそれにより付着性状が改善された効果であると見ることができる。

計測された最大付着応力度と計算値を比較して、表-6 および図-9 に示す。C-LL および C-LH の補強効果を考慮した付着強度の計算では、式(4)(5)における $p_{w(CF)}$ は、式(6)に示すように、L型CFRP板の補強量に素材の体積比(=56%)を乗じた値とした。図および表より、補強量の少ない試験体 C-LL では対応がよくないものの、C-LH および C-CR では、計算結果は概ね実験結果と対応している。

$$p_{w(CF)} = (2 \cdot t_w \cdot b / s \cdot B) \times 0.56 \quad (6)$$

ここで、 t_w : 板厚(1.4mm)、 b : 板幅(40mm)、 s : 板の補強間隔、 B : 部材断面幅(400mm)

炭素繊維補強量は、試験体 C-CR に対し、C-LL は同量、C-LH は2倍である。つまり、本実験の範囲では、L型CFRP板を用いる場合は、従来工法である炭素繊維シート貼り付けの場合の2倍以上の補強量により、同等の補強効果が得られている。これは、素材の組成の影響によると思われるが、付着割裂強度の向上効果の定量的な評価については今後の検討課題である。

表-6 付着強度の実験値と計算値の比較[N/mm²]

	C-O	C-LL	C-LH	C-CR
最大値(実験値)	2.12	2.26	2.62	2.55
τ_F	2.40			
τ_{BU} (無補強)	2.13			
τ_{BU} (補強)	—	2.50	2.86	2.78

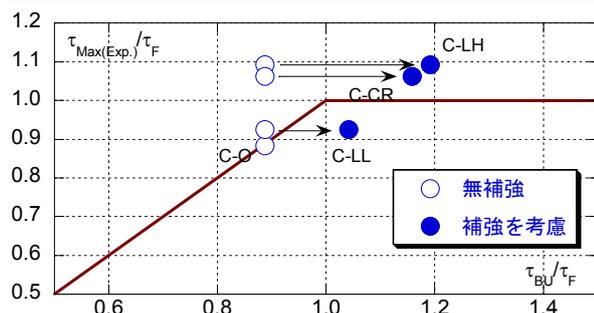


図-9 付着強度の実験結果と計算結果の比較

5. まとめ

炭素繊維シートを板状にした上 L 型に加工した L 型 CFRP 板を用いた既存鉄筋コンクリート造柱部材の補強効果を確認するための部材実験を行った。実験の結果、以下の知見が得られた。

- (1) L 型 CFRP 板により補強した試験体は、無補強試験体に対して性能が改善されており、補強効果があることがわかった。
- (2) 付着割裂破壊型部材の補強効果は、主として圧縮領域に現れていた。
- (3) 付着割裂破壊型とした RC 造柱部材では、L 型 CFRP 板による付着性能向上の効果は、炭素繊維シートによる補強より劣り、炭素繊維シートの2倍程度の補強量により、ほぼ同等の補強効果が得られた。

謝辞:L型CFRP板による補強実験では、日本シーカ(株)より材料を提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 萩尾浩也, 勝俣英雄, 小島克朗: 炭素繊維ストランドによる既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強(その3, その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.669-672, 1997
- 2) 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, pp.267-272, 1997
- 3) 木村耕三, 小島克朗, 平田亮, 土屋好男: CFRP板の定着方法による補強部材の曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.527-532, 1998
- 4) fib BULLETIN 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, July 2001
- 5) 白井和貴, 勝俣英雄, 古屋則之, 関松太郎: 既存鉄筋コンクリート梁の新設貫通孔補強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.27, pp.361-366, 2005
- 6) 大林組, 東レ, 日鉄コンポジット, 三菱化学産産: CRS-CL工法設計施工指針, 2003