

論文 炭素繊維シートによる RC 柱部材のねじり補強に関する研究

大塚 久哲^{*1}・宇山 友理^{*2}・箴島 隆司^{*3}・陶 媛媛^{*4}

要旨：本研究は、ねじりを受ける RC 柱部材の耐震補強工法として、CFRP 工法の補強効果を実験的研究により確認した。まず、無補強供試体と CFRP 補強供試体の実験結果から、CFRP 補強することにより大幅に耐力と靱性が向上することを確認した。また、CFRP の帯状巻きと全面巻きの 2 種の補強実験より、巻き方による力学特性に大きな差異はなく、さらに、損傷を有する RC 柱部材への補強実験より帯鉄筋降伏程度の損傷（前載荷で 3 y まで）を有していても補強可能であることがわかった。これらの結果より、CFRP による RC 柱部材の補強は、ねじり補強工法として有効であるといえる。

キーワード：CFRP, RC 柱部材, ねじり, 耐震補強

1. はじめに

近年、都市部などの狭隘な空間において、橋軸直角方向に偏心した逆 L 字型の RC 橋脚を有する高架橋、さらには、橋梁の長大化に伴い RC アーチ橋などが目立つようになってきた。これらの構造物が地震力を受けた場合、部材には、曲げモーメントのみならずねじりモーメントが生じることになるため、ねじりモーメントの影響を適切に考慮しなければならない。そこで、著者はこれまで、ねじりを受ける RC 柱部材の力学特性を実験および解析の両面から解明してきた¹⁾²⁾³⁾。

また一方で、コンクリート構造物の補修・補強方法として、強靱かつ軽量であり、そして優れた施工性を有する炭素繊維シート（以下、CFRP と記す）工法が着目されている。CFRP で補強されたコンクリート部材の曲げやせん断に関する補強効果の確認は数多く報告されているが、ねじりに関する実験的研究は非常に少なく⁴⁾、その知見は未だ十分ではなく、設計指針類にも記されていない⁵⁾。

本研究では CFRP による補強を施した RC 柱部材にねじり載荷試験を行い、無補強供試体と比較することで、ねじりに対する CFRP の耐震補強効果を確認した。また、損傷を有する供試体への補修・補強効果を把握するために、前載荷により損傷を与え CFRP 工法を実施した供試体を用意し、同様の載荷試験を行い、損傷を有する部材への CFRP の補強効果を確認した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 供試体形状

実験に用いた供試体の外形寸法を図 - 1 に示す。断面は 400 × 400mm の充実矩形断面形で、柱部分の部材長は

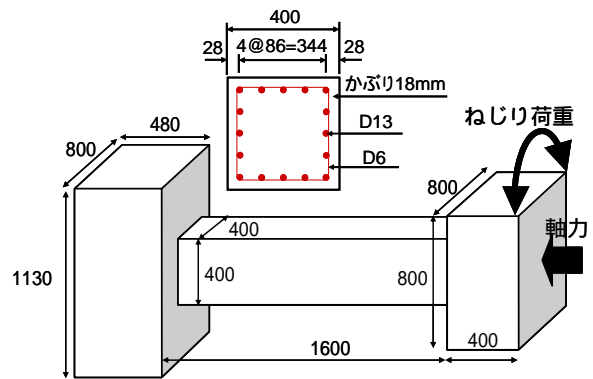


図 - 1 供試体外形図 (mm)

1600mm である。局部破壊を避けるために、柱上下端にはフーチングを設けている。帯鉄筋は 30mm 間隔と 60mm 間隔の 2 パターンとし（以下、帯鉄筋間隔 30,60mm を ctc30,60 と記す）、ctc30 は十分に帯鉄筋が配置されたケース（帯鉄筋比 1.16%）、ctc60 は帯鉄筋が少ないケース（帯鉄筋比 0.58%）であり CFRP 補強の対象となる。

(2) 検討ケース

本研究における検討ケースを表 - 1 に示す。まず、CFRP 工法により補強される供試体が 3 体ある。3 体の比較内容としては、巻き方による比較として、CFRP を帯状に巻いた No.1 と全面に巻いた No.2、さらに損傷の有無の比較として、損傷のない No.1 と損傷のある No.3 である。No.3 の損傷としては中央断面における帯鉄筋が降伏するまでねじり繰返し載荷を行い、帯鉄筋降伏の後、変形量をゼロに戻し、残留変形のない状態で補修・補強を実施した。次に、CFRP 補強の効果を確認するために、無補強の ctc60 (No.5)、ctc30 (No.6) の 2 体に対する既往実験結果を用いた¹⁾。CFRP を帯状および全面に巻き立て補強した供試体および No.3 の補修前のひびわれ損傷状況を図 - 2 に示す。

なお、全面巻きは炭素繊維を柱本体部分全体に積層数

*1 九州大学大学院 工学研究科建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*2 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻修士課程学生 (非会員)

*3 九州大学 工学部地球環境工学科学部生 (非会員)

*4 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻研究生 (非会員)

表 - 1 検討ケース

No.	ctc(mm)	ρ_s (%)	CFRPの巻き方	ρ'_{cf} (%)	備考
No.1	60	0.58	带状配置	1.25	
No.2	60	0.58	全面配置	1.25	
No.3	60	0.58	带状配置	1.25	前载荷により、中央断面付近の帯鉄筋降伏
No.4	60	0.58	-	-	
No.5	30	1.16	-	-	

表 - 2 コンクリート材料試験結果

No.	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)
No.1	52.9	4.0	3.53×10^4
No.2	55.4	4.6	3.46×10^4
No.3	51.9	4.0	3.47×10^4
No.4	45.7	4.2	2.73×10^4
No.5	35.3	4.1	2.39×10^4

表 - 3 鉄筋引張試験結果

鉄筋径	降伏応力 (N/mm ²)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ヤング率 (N/mm ²)
D6	322.0	1823	1.77×10^5
D13	340.4	1885	1.80×10^5

表 - 4 CFRP 引張試験結果

	引張強度 (N/mm ²)	破断ひずみ (%)	ヤング率 (N/mm ²)
CFRP	4,037	1.67	2.42×10^5

1層で巻き、带状は30mm間隔で30mm幅で2層巻きしたものであり、両者で巻き付け量は等しい。また、表中の換算帯鉄筋比は、下記に記す式(1),(2)により算出したものである⁶⁾。

$$\rho'_{cf} = \rho_{cf} \times \frac{\sigma_f}{\sigma_{sy}} \quad (1)$$

$$\rho_{cf} = \frac{4A_{CF}}{b \times a'} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 ρ'_{cf} : 換算帯鉄筋比 (%)

ρ_{cf} : CFRP 帯鉄筋比 (%)

σ_f : CFRP の設計引張強度 (N/mm²)

σ_{sy} : 帯鉄筋の降伏引張強度 (N/mm²)

A_{CF} : CFRP 巻付け量 (mm²)

b : 部材幅 (mm)

a' : CFRP の中心間隔 (mm)

(3) 使用材料

コンクリートは設計基準強度 40N/mm²で配合し、鉄筋はSD295を使用した。なお、主鉄筋にはD13を、帯鉄筋にはD6を使用した。また、補修・補強に用いる炭素



図 - 2 CFRP 補強後供試体 (左: No.1, 中: No.2) と補修前のひび割れ発生状況 (右: No.3)

繊維は、一般的な製品である繊維目付 200g/m²を使用した。また、損傷を有する供試体については、補修の際に、エポキシ樹脂注入によるひびわれ補修を実施した。なお、エポキシ樹脂は JIS A 6024 適合製品を用いた。

表 - 2,3,4 に材料試験結果を示す。

2.2 载荷方法

载荷方法は、一回繰返しのねじり漸増载荷である。载荷ステップとしては、まずコンクリート圧縮強度の10%相当となる軸力 640kN (4 N/mm²) を供試体に加え、軸力を保ちつつ、ねじりの繰返载荷を行う。ねじり载荷の刻みは、No.3 の前载荷におけるねじり部材降伏角 (剛性が急変する点) である $\theta_y = 0.005 \text{ rad}$ を基準変位として、 $\pm 1 \theta_y, \pm 2 \theta_y, \pm 3 \theta_y \dots$ と正負交番の整数倍で変位制御により载荷を行った。なお、No.3 の前载荷においては、1ループ目はひび割れ発生、2ループ目は部材降伏角、3ループ目以降を基準変位の整数倍とし、供試体中央部分の帯鉄筋が降伏したループで前载荷を終了することとした。

3. 実験結果

3.1 荷重 - 変位曲線

図 - 3~7 に荷重 - 変位曲線を示す。また、ねじりひびわれ耐力および降伏耐力はコンクリート強度に大きく依存し、本試験におけるコンクリート強度のパラつきを考慮するため、部材降伏時 θ_y のねじりモーメントで除し無次元化した包絡線を図 - 8 に示す。

まず、CFRP の巻き方による比較 (No.1 と No.2) では、

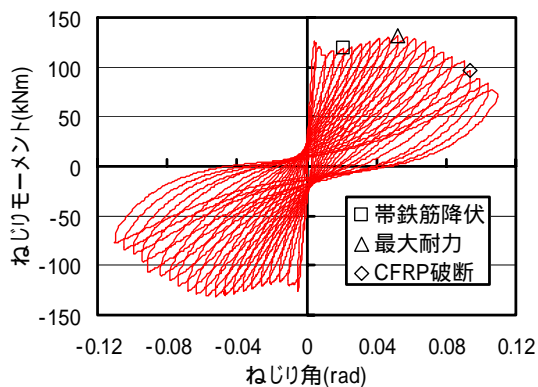


図 - 3 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.1)

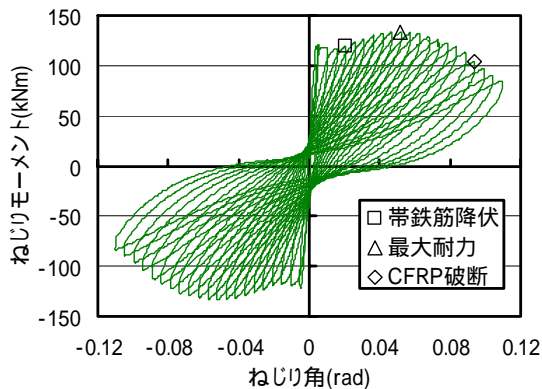


図 - 4 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.2)

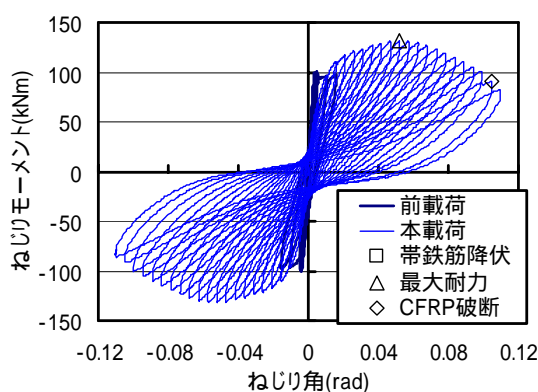


図 - 5 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.3)

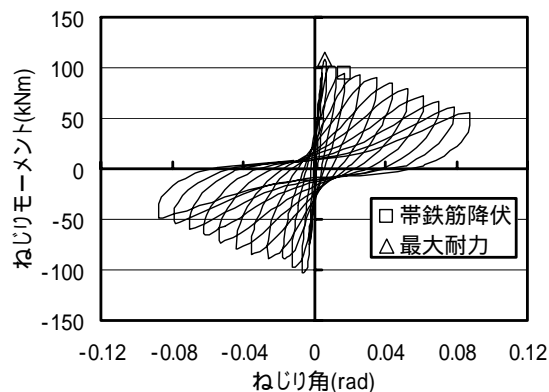


図 - 6 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.4)

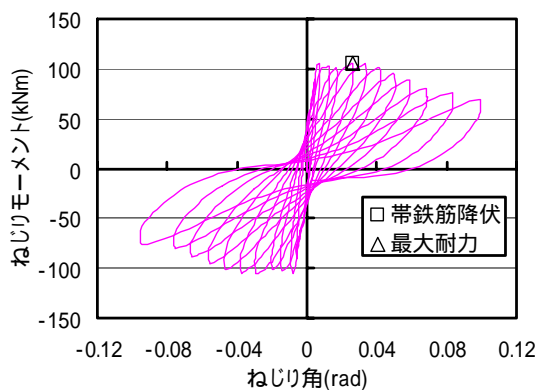


図 - 7 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.5)

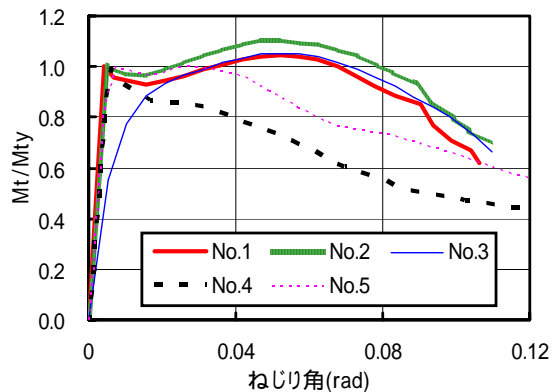


図 - 8 包絡線

両者に初期剛性の差はなく、各イベント（帯鉄筋降伏やCFRP 破断など）発生時期にも大きな差異は見られなかった。また図 - 8 より、最大ねじりモーメントについては、2%ほど No.2 が上回るが、CFRP 幅：無補強幅=1：1である帯状配置でもねじり補強効果が認められる。

次に、損傷の有無の影響（No.1 と No.3）では、損傷を有する供試体 No.3 は、前載荷で載荷した範囲内においては、損傷のない供試体 No.1 に比べ初期剛性は低下するが、前載荷における最大ねじり角（ $\approx 0.015\text{rad}$ ）に達した後は、No.1 と同じ履歴ループ・包絡線を描いた。

補強効果に関しては、図 - 8 より補強供試体（No.1～3）と無補強の No.4 を比較すると、No.4 は降伏後、耐力が低下し始めるのに対し、補強供試体は耐力が増加し、ねじり補強材として CFRP の有効性は明らかである。また No.5 と比較しても、補強供試体は最大耐力の上昇と靱性の改善が認められる。

3.2 剛性比の低下と等価減衰定数

図 - 9, 10 に各供試体の剛性比の低下と等価減衰定数を比較した結果を示す。ここで、 GK/GK_0 は、ねじりの初期剛性に対する履歴ループ毎の等価剛性の比であり、

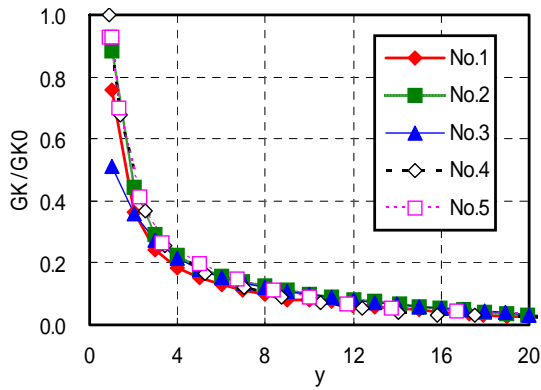


図 - 9 剛性比の低下

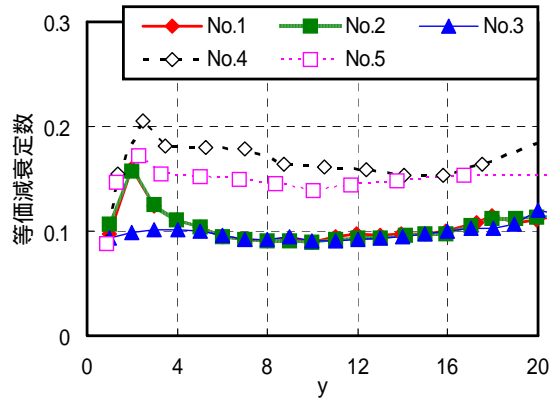


図 - 10 等価減衰定数

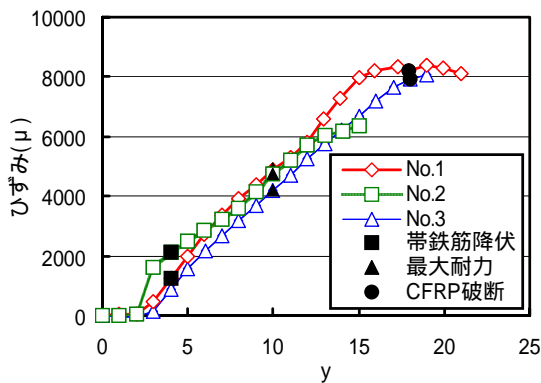


図 - 11 表面ひずみ

等価減衰定数は各履歴ループで吸収されるエネルギーと弾性エネルギーの比より算出した。なお、No.3の剛性比は前荷の初期剛性と本荷の各ループのねじり剛性の比として算出した。

剛性比の低下に関しては(図-9), No.3のみ前荷の範囲内において小さい剛性比を示すが、各ケースにおけるねじり剛性比の低下に大きな差異は見られなかった。

等価減衰定数に関しては(図-10), いずれの供試体も $y \sim 2 y$ 間で一時上昇するが、その後は緩やかな下降

もしくは一定値を示し、No.1~3は10%程度、No.4, 5は15%程度である。CFRP破断後(18 y 前後)は、等価減衰定数は上昇する。

3.3 表面ひずみ

図-11に柱部材の中心断面で計測した部材軸直角方向(CFRPの伸び方向)のひずみを示す。なお、ひずみゲージは樹脂表面に添付した。

図より、CFRPは初期段階ではひずみが発生せず、帯鉄筋の降伏と同時にひずみが増大し始め、CFRPの拘束効果が得られることがわかる。

また既往の研究³⁾より、コアコンクリートにひび割れが達することで部材降伏に至り、それまではコンクリートがねじり耐力を負担し、その後、帯鉄筋がねじり耐力を負担し、帯鉄筋が十分に配置されているケース(No.5)では耐力は向上するが、帯鉄筋が不足する場合(No.4)には耐力低下域となることがわかっている。さらに本試験結果から、コアコンクリートへのひび割れ進展や帯鉄筋の降伏による断面膨張に対し、CFRPの拘束効果が発揮され、ねじり耐力を負担するものと考えられる。

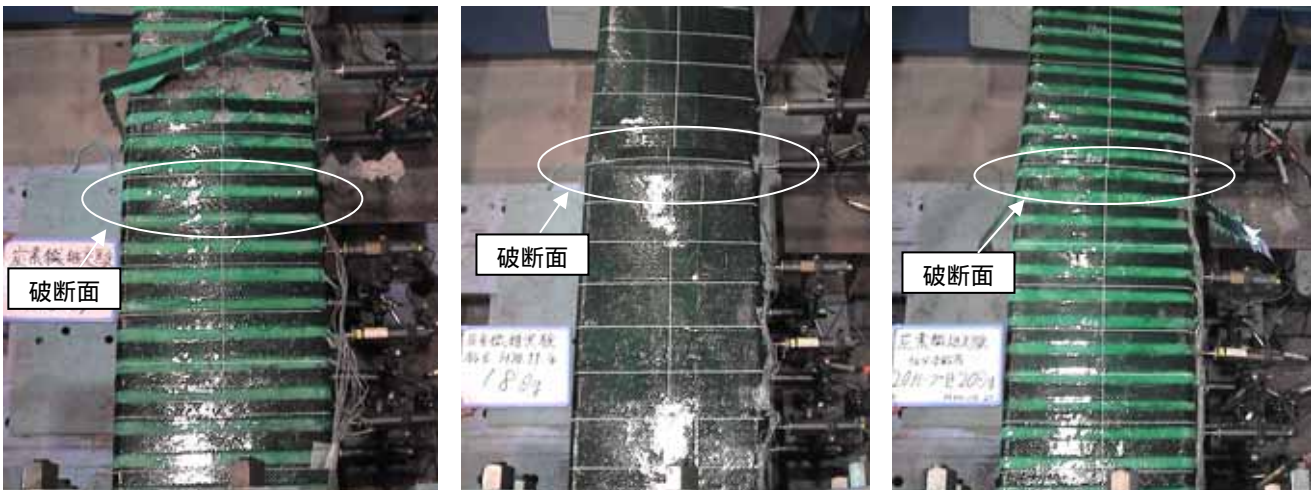


図 - 12 CFRP 破断状況 (左: No.1, 中: No.2, 右: No.3)

3.4 損傷状況

図 - 12 に CFRP の破断状況を示す。いずれの供試体も柱の中央断面付近の CFRP が破断する結果となった。CFRP の破断の差異としては、全面に巻いた No.2 は破断の前に、まず中央断面付近の CFRP に部材軸直角方向の亀裂が数本入り、亀裂間の CFRP が破断した。

また CFRP 破断後も載荷を続けると、破断位置を塑性ヒンジとしてねじり回転が集中することとなった。

4. CFRP 補強供試体の最大耐力算定

現在、RC 柱部材の最大ねじり耐力算定方法として、立体トラス理論と斜め曲げ理論が一般的に用いられる。

前者は、ねじりひび割れが発生したコンクリート部材を一種の立体的なトラスと仮定し、圧縮理論を適用するものである。後者は、ひび割れ面とそれに連なる圧縮面で部材を切断し、各部材片について断面力と外力のつり合いから最大耐力を求める方法である⁷⁾。

ここでは、表 - 1 に示したように、CFRP を帯鉄筋に換算した換算帯鉄筋量より、精度のよいねじり最大耐力値を得ることが出来るかを検討する。なお、CFRP 補強供試体の帯鉄筋比 1.83% は、本試験の無補強供試体における配筋では、帯鉄筋間隔 20mm に相当する。

4.1 立体トラス理論

立体トラス理論に基づく理論式として、式 (3) に示す立体トラス類似理論式を用いた⁸⁾。

$$M_{tu} = 2 \cdot A_m \sqrt{\frac{A_{tw} f_{wy}}{s} \cdot \frac{\sum A_{tl} f_{ly}}{P_0}} \quad (3)$$

ここで、 A_m ：ねじり有効断面積 (mm²)
 A_{tw} ：帯鉄筋の断面積 (mm²)
 A_{tl} ：主鉄筋の全断面積 (mm²)
 f_{ly}, f_{wy} ：帯鉄筋、主鉄筋の降伏応力 (N/mm²)
 s ：帯鉄筋間隔 (mm)
 P_0 ：せん断流の通路の周長 (mm)

4.2 斜め曲げ理論

本研究で用いた斜め曲げ理論を式 (4) (5) に示す⁹⁾¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} M_{tu} &= M_{tuc} + M_{tus} \\ &= 0.8 \cdot b^2 d \sqrt{f'_c} + \sqrt{m} \frac{f_{ly}}{f_{wy}} (1 + 0.2 \frac{b'}{d'}) \frac{b' d' A_{tw} f_{wy}}{s} \end{aligned} \quad (4)$$

$$m = \frac{2 \sum A_{tl} s}{2 A_{tw} (b' + d')} \quad (5)$$

ここで、 b, a ：ねじり有効断面積 (inch)
 f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (psi)
 f_{ly}, f_{wy} ：帯鉄筋、主鉄筋の降伏応力 (psi)
 b', d' ：コンクリートの圧縮強度 (inch)

A_{tw} ：ねじり有効断面積 (in.²)
 s ：コンクリートの圧縮強度 (inch)
 A_{tl} ：主鉄筋の全断面積 (in.²)

なお、上式の単位換算を行う際、それぞれ 1in=0.0254m、1psi=0.0069Mpa=0.0069N/mm² である。

4.3 理論値と実験値の比較結果

立体トラス理論および斜め曲げ理論より算出した各供試体のねじり最大耐力と実験結果を表 - 5 に示す。なお、各理論式では軸圧縮応力を考慮していないため、式 (6) に示すコンクリート標準示方書の軸圧縮力に関する係数をそれぞれの式に乗ずることで軸力の影響を考慮することとした¹¹⁾。

$$\beta_{nt} = \sqrt{1 + \frac{\sigma'_n}{1.5 f'_c}} \quad (6)$$

ここで、 σ'_n ：作用軸圧縮応力度 (N/mm²)
 f'_c ：コンクリートの引張強度 (N/mm²)

表 - 5 より、No.4 の低帯鉄筋の無補強供試体を除いて両理論は実験結果を若干上回っているが、数%程度であり、いずれの理論値であっても CFRP を帯鉄筋に換算し、簡易的にねじり最大耐力を算定することは可能であるといえる。

5. まとめ

CFRP 補強した RC 柱部材のねじり載荷試験より得られた知見を以下に記す。

- (1) CFRP による RC 柱部材の補強は、ねじり耐力と靱性をともに大幅に向上させることができ、ねじり補強工法として有効であることがわかった。
- (2) 同等量の CFRP を巻くのであれば、CFRP の巻き方によるねじり荷重 - 変位曲線や剛性低下といった諸力学特性に大きな差異はなく、CFRP 幅：無補強幅=1：1 程度での带状配置は有効である。
- (3) 損傷を有する RC 柱部材は、中央断面の帯鉄筋が降伏している程度の損傷 (3_y) ならば、CFRP による耐震補強が可能である。前載荷で与えられた最大ねじり角以降は、無損傷の補強供試体と同じ履歴曲線を描く。
- (4) CFRP で補修・補強した RC 柱部材のねじり等価減衰定数は、ほぼ一定して 10% 程度の値を示す。
- (5) CFRP は初期段階ではひずみが発生せず、コアコンクリートへのひび割れ進展や帯鉄筋降伏を経て、CFRP の拘束効果が発揮され、ねじり荷重を負担する。
- (6) CFRP の破断は柱部材の中央断面で生じ、それ以後は破断断面を塑性ヒンジとしてねじり変形が集中する。
- (7) CFRP 補強供試体のねじり最大耐力は、CFRP を帯鉄筋に換算することで、立体トラス理論と斜め曲げ理

論のいずれによっても算出することが可能である。

今後の課題として、炭素繊維シートによる RC 柱部材の補強工法としての有用性を明らかにするために、CFRP の破壊メカニズムの解明や実橋梁への補強工法の適用など、更なる実験的検討を行う所存である。また、現時点では換算帯鉄筋など暫定的な手法を用いているため、CFRP ねじり補強における設計手法の確立を課題とする。

参考文献

- 1) 大塚久哲, 王堯, 高田豊輔, 吉村徹: 純ねじりを受ける RC 部材の履歴特性に影響を及ぼすパラメータに関する実験的研究, 土木学会論文集, No.739 / -60, pp93-104, 2003.
- 2) 大塚久哲, 王堯, 石原 眞一, 吉村徹: 純ねじりを受ける RC 部材の復元力特性の定式化, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1027-1032, 2003.
- 3) 大塚久哲, 秦逸平, 宇山友理: 純ねじり荷重を受ける RC 部材の三次元非線形有限要素解析, 構造工学論文集, Vol.55, 投稿中
- 4) Haiming HE, Osamu KIYOMIYA: STUDY ON PROPERTIES OF CARBON FIBER SHEET STRENGTHENED PC MEMBER WITH ZEBRA-SHAPED, Doboku Gakkai Ronbunshuu, Vol.64, No.2, pp.273-287, 2008.4
- 5) 建設用先端複合材技術協会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物設計・施工マニュアル(案)(5訂版), 2003.10
- 6) (旧)日本道路公団試験製作所 橋梁研究室: 炭素繊維による鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領, 1995.2
- 7) 泉 満明著: ねじりを受けるコンクリート部材の設計法, 技法堂, 1972
- 8) 泉満明: コンクリート部材の終局ねじり強度の算定と設計法に関する研究, 土木学会論文報告集, No.305, pp.111-124, 1981
- 9) Thomas T.C.Hsu, Y.L.Mo: Softening of Concrete in Torsional Members - Theory and Tests, Journal of the American Concrete Institute, Vol.82, No.3, pp.290-303, 1985
- 10) Adam Csikos, Istvan Hegedus: TORSION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS, 2nd Int.Ph.D Symposium in Civil Engineering, 1998
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002