

論文 炭素繊維シート補強された RC 柱のねじりに関する耐震性能向上に関する研究

大塚 久哲^{*1}・陶 媛媛^{*2}・笈島 隆司^{*3}・山崎 智彦^{*4}

要旨：本研究は，RC 柱部材のねじりに対する耐震補強として，炭素繊維シート(CFRP)補強工法の有用性を実験により確認したものである。まず純ねじりに対しては，CFRP 補強工法は大幅に耐力と靱性を向上させることを確認した。次に程度の異なる損傷を有する供試体への補強実験より，損傷を有しても補強可能であるが，損傷が大きいと，ねじり耐力が無損傷部材より低下することを示した。さらに，CFRP の帯状巻きと全面巻きの補強効果の差異は殆どないことも明らかにした。最後に曲げ・ねじりの複合載荷実験より，CFRP 補強工法はねじりに対しては純ねじり時より補強効果が低減するが，曲げに対する補強効果も有することを示した。

キーワード：CFRP，RC 柱部材，ねじり，耐震補強

1. はじめに

近年，立地条件の制約や長大橋梁の増加に伴い，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，長大 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，曲げモーメントに加えて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作用が無視できない。そこで，著者らはこれまで，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，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⁾⁶⁾。

本研究室では，ねじりに対する CFRP 補強効果を明らかにするため，CFRP 補強した RC 柱部材を対象に，一定軸力の作用下で純ねじりの交番荷重を与える実験を行ってきた。文献 6) では，純ねじりの交番荷重を与える実験より，CFRP の補強効果を検討した。

本研究では，文献 6) に，損傷程度および載荷タイプの実験パラメータを追加し，CFRP 工法によるねじりに対する補強効果を詳細に検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 供試体形状

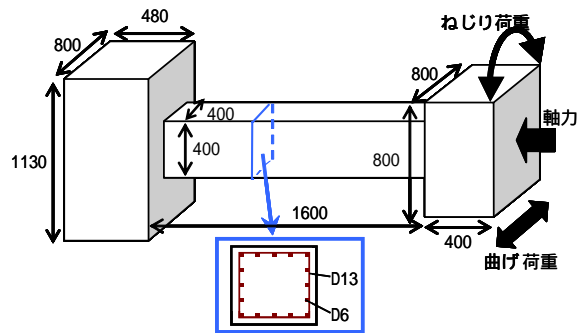


図 - 1 供試体外形図 (mm)

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，柱部分の部材長さは 1600mm である。載荷とアンカー，および荷重伝達を確実にするため，柱上下端にはフーチングを設けている。帯鉄筋は 20mm 間隔 (ctc20)，30mm 間隔 (ctc30) および 60mm 間隔 (ctc60) の 3 パターンとし，ctc20 (帯鉄筋比 1.74%) および ctc30 (帯鉄筋比 1.16%) は十分に帯鉄筋が配置されたケースであり，ctc60 (帯鉄筋比 0.58%) は帯鉄筋が少ないケースで，CFRP 補強の対象とした。

(2) 検討ケース

検討ケースは表 - 1 に示す 10 体の供試体であり，帯鉄筋間隔(ctc)，補強の有無，損傷の有無，損傷の程度，CFRP の巻き方，載荷タイプをパラメータとした。まず，CFRP の補強効果を確認するために，無補強の ctc20(No.1)，ctc30(No.2)，ctc60(No.3)および CFRP 補強の ctc60(No.4)の 4 体を比較した。次に，損傷の有無の影響を確認するために，無損傷の No.4，損傷程度が異なる供試体 No.5 と No.6 を比較した。ここで，No.5 は 30_y まで，No.6 は 70_y まで純ねじり前載荷により異なる程度

*1 九州大学大学院 工学研究院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 (正会員)

*3 九州大学 工学部地球環境工学科学部生 (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門技術職員 (非会員)

表 - 1 検討ケース

ケース No.	帯鉄筋間隔 (mm)	CFRP の配置	帯鉄筋比 (%)	CFRP 帯鉄筋換算比 (%)	総鉄筋換算比 (%)	目標載荷比率		軸力	実験年度
						ϕ	載荷タイプ		
1	20	無補強	1.74	0	1.74	90°	純ねじり	4.0	H21
2	30	無補強	1.16	0	1.16	90°			H13
3	60	無補強	0.58	0	0.58	90°			H13
4	60	帯状(2層)	0.58	1.25	1.83	90°			H20
5(前) 30 _y まで	60	無補強	0.58	0	0.58	90°			H20
5(本)	60	帯状(2層)	0.58	1.25	1.83	90°			H20
6(前) 70 _y まで	60	無補強	0.58	0	0.58	90°			H21
6(本)	60	帯状(2層)	0.58	1.25	1.83	90°			H21
7	60	全面(1層)	0.58	1.25	1.83	90°			H20
8	30	無補強	1.16	0	1.16	63°			複合載荷(中間型)
9	60	無補強	0.58	0	0.58	65°	H14		
10	60	帯状(2層)	0.58	1.25	1.83	58°	H21		

表 - 2 コンクリート材料試験結果

ケース No.	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)
1	23	52.3	4.4	3.43E+04
2	11	35.3	4.1	2.39E+04
3	15	45.7	4.2	2.73E+04
4	31	52.9	4.0	3.53E+04
5(前)	25	51.9	4.0	3.47E+04
5(本)	39			
6(前)	12	51.7		3.14E+04
6(本)	24	54.9	4.4	3.24E+04
7	28	55.4	4.6	3.46E+04
8	33	50.4	4.0	3.55E+04
9	27	35.2	3.4	3.00E+04
10	21	53.3	4.2	3.37E+04

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	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)
D16	322.0	1.82E-03	479	1.77E+05
D13	340.4	1.86E-03	489	1.80E+05

表 - 4 CFRP 引張試験結果

	引張強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ	ヤング率 (N/mm ²)
CFRP	4037	1.67E-02	2.42E+05

の損傷を与えた供試体であり、図 - 2 の(a), (b)に 2 体の供試体の損傷状況を示す。30_y は部材の中央部の帯鉄筋が初降伏した状態であり、70_y は最大荷重を維持できている状態である。また、CFRP の巻き方の影響を確認するために、帯状 2 層巻きの No.4, No.5, No.6 と全面 1 層巻きの No.7 を比較した。(図 - 2 の(c), (d)) これら 4 体の巻き付け量は等しい。また、表 - 1 中の換算帯鉄筋比は、下記に記す式(1)により算出したものである⁶⁾。

$$\rho_{cf} = \frac{4A_{cf}}{ba'} \cdot \frac{f_{cf}}{f_{wy}} \times 100 \quad (1)$$

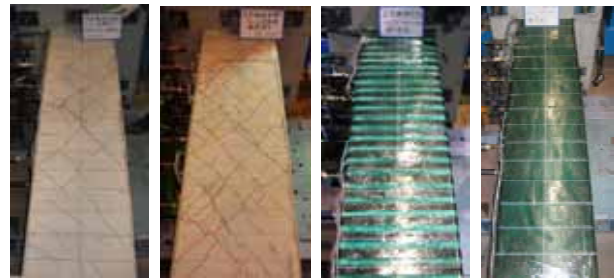


図 - 2 補修前のひび割れ発生状況 (a : No.5, b : No.6) と CFRP 補強後供試体 (c : No.4, d : No.7)

ここで、 ρ_{cf} : CFRP 換算帯鉄筋比 (%)

f_{cf} : CFRP の設計引張強度 (N/mm²)

(表 - 4 の値を用いた)

f_{wy} : 帯鉄筋の降伏引張強度 (N/mm²)

A_{cf} : CFRP の断面 (mm²)

b : 部材幅 (mm)

a' : CFRP の中心間隔 (mm)

帯状 2 層巻きの場合、 $A_{cf} = 6 \text{ mm}^2$, $a' = 60 \text{ mm}$, $b = 400 \text{ mm}$ とした。

さらに、複合載荷を受ける部材に対する CFRP 補強効果を確認するために、同一載荷比率である無補強の ctc30(No.8), ctc60(No.9)および CFRP 補強の ctc60(No.10) の 3 体を比較した。

表 - 1 の載荷比率 は下記の式(2)より算出したものである。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{M_t / M_{ty0}}{M_b / M_{by0}} \right) \quad (2)$$

ここで、 M_t : ねじりモーメント(kN・m)

M_{ty0} : 純ねじり時のねじり降伏モーメント(kN・m)

M_b : 曲げモーメント(kN・m)

M_{by0} : 純曲げ時の曲げ降伏モーメント(kN・m)

(3) 使用材料

表 - 2, 3, 4 に材料試験結果を示す。コンクリートは設計基準強度 40N/mm^2 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・補強に用いる炭素繊維は、一般的な製品である繊維目付 200g/m^2 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。

2.2 載荷方法

供試体の載荷方法は、一定軸力 640kN の作用下で一回繰返しの漸増載荷であり、繰返し荷重は供試体の荷重タイプにより、純ねじりもしくはねじりと曲げの複合荷重を与える。

なお、前載荷はすべて純ねじりの繰返し載荷である。載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 (4N/mm^2) を供試体に加えて、軸力を保ちつつ、ねじりの繰返し載荷を行う。部材降伏

角が概ね 0.005rad で生じることから、 $\theta_y=0.005\text{rad}$ を基準変位として、 $\pm 10_y$, $\pm 20_y$, $\pm 30_y$... と正負交番の整数倍で変位制御により載荷を行った。

No.5 と No.6 の前載荷も一回繰返しのねじり漸増載荷により行い、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 θ_y の整数倍とする。なお、No.5 は 30_y まで、No.6 は 70_y までの前載荷を行った。

No.10 の複合載荷については、既往の無補強部材に対する複合載荷試験 No.8, No.9 と載荷比率が一致するように、目標の載荷比率を 63° とした。弾性範囲内でその載荷比率を満足する θ_y に対応する水平変位 δ_y を算出し、純ねじりと同様の載荷ステップで θ_y を正負交番の整数倍で載荷すると同時に、対応する δ_y を同時に載荷した。

3. 実験結果

3.1 帯鉄筋間隔および CFRP 補強の有無の影響

図 - 3, 図 - 4 に No.1 ~ No.4 の履歴曲線および包絡線

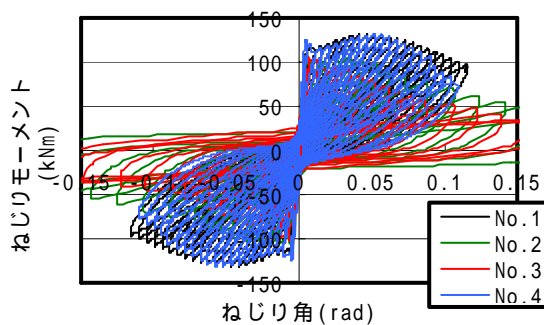


図 - 3 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.1 ~ No.4)

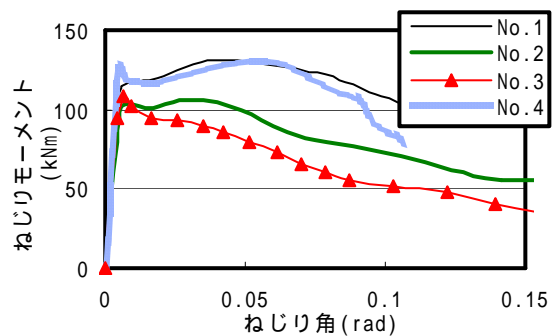


図 - 4 ねじり包絡線 (No.1 ~ No.4)

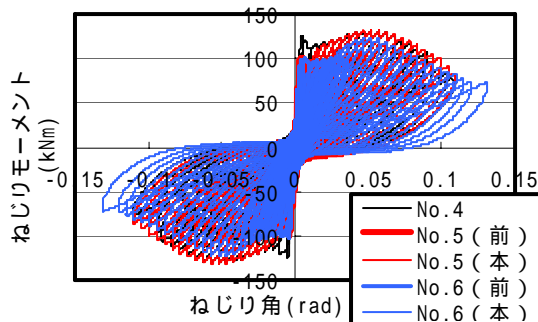


図 - 5 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.4 ~ No.6)

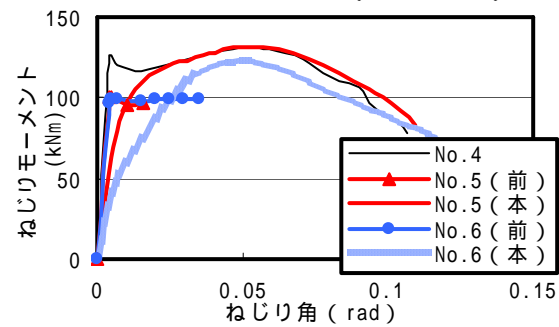


図 - 6 ねじり包絡線 (No.4 ~ No.6)

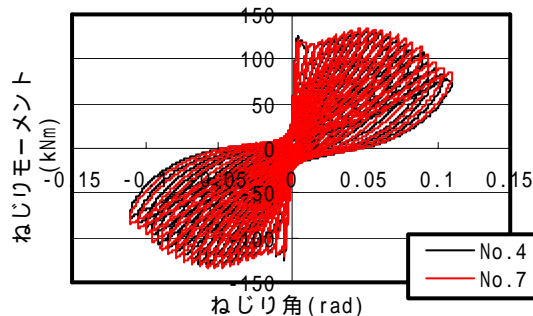


図 - 7 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.4 と No.7)

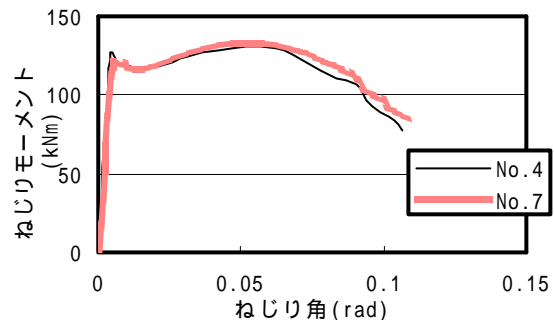


図 - 8 ねじり包絡線 (No.4 と No.7)

を示す。No.1～No.3は帯鉄筋間隔が異なる無補強の供試体であり、No.4は帯鉄筋間隔60mmの供試体をCFRP補強したものである。これらの比較により、帯鉄筋間隔とCFRP補強の効果を確認した。No.1～No.3の比較より、帯鉄筋間隔は初期剛性に影響を与えないが、部材降伏後は帯鉄筋間隔が小さいほど最大耐力が向上することが分かる。一般的に、部材降伏まではコンクリートがねじり荷重の大部分を負担することが知られており、部材降伏耐力の差は、コンクリート強度の差が原因であると考えられる。一方、部材降伏後は帯鉄筋の影響が大きく、帯鉄筋間隔が小さいほど靱性に富んだ挙動を示す。

No.3とNo.4の比較より、CFRP補強した帯鉄筋間隔60mmの部材は無補強の部材に比べ最大耐力が20%ほど向上し、換算帯鉄筋量のほぼ等しい帯鉄筋間隔20mm相当の耐力となった。しかし、最大耐力後の荷重の減少は帯鉄筋間隔20mmの部材(No.1)と比べて急であり、補強効果をより確実にするためには、補強シートの材質(カーボンと高強度ポリエチレンの組み合わせなど)の選択が重要である。

3.2 損傷の有無および損傷程度の影響

図-5、図-6にNo.4～No.6の履歴曲線および包絡線を示す。No.4～No.6はCFRPを帯状2層巻き立て補強した供試体である。No.4は損傷無し、No.5およびNo.6は異なる損傷程度を有する。No.5は 30_y までの前載荷による小さな損傷を有し、No.6は 70_y までの前載荷による大きな損傷を有する。これらの比較により、損傷の有無および損傷程度の影響を確認した。

No.5とNo.6の結果から、前載荷で載荷した範囲内に

おいては、損傷を有すると、損傷のない場合に比べて剛性が低下し、損傷の程度が大きいほどその低下が大きい。前載荷における最大ねじり角以降は、損傷が小さいと、損傷がない場合の挙動とほぼ同じであるが、損傷が大きいと、損傷のない場合に比べ、最大耐力が低下する。最大耐力以後の下り勾配はほぼ同じである。本載荷時の部材剛性の低下は明らかであり、エポキシ樹脂の注入による剛性の上昇は期待できない。損傷程度による初期剛性の低下割合や到達最大耐力に関する考察については、実験供試体の数が不十分であるため、今後の課題とする。

3.3 CFRP巻き方の影響

図-7、図-8にNo.4とNo.7の履歴曲線および包絡線を示す。両者の巻き付け量は等しく、これらの比較により、CFRP巻き方の影響を確認した。

両者には初期剛性、履歴曲線また包絡線に大きな差異は見られず、巻き付け量が等しい場合、巻き方による影響は殆どないといえる。

3.4 複合載荷に対するCFRP補強の有無の影響

図-9～図-12にNo.8～No.10のねじりと曲げの履歴曲線および包絡線を示す。No.8～No.10はねじりと曲げの複合載荷を行った。No.8とNo.9は帯鉄筋間隔が異なる無補強の供試体であり、No.10は帯鉄筋間隔60mmの供試体をCFRP補強した供試体である。これらの比較により、複合載荷に対するCFRPのねじり補強効果を確認した。

既往の複合荷重交番載荷実験より無補強の部材が複合載荷を受けると、純荷重時に比べ、耐力と変形性能が低下することが明らかになっている⁷⁾。

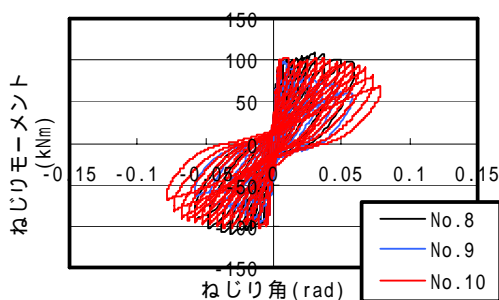


図-9 ねじり荷重 - 変位曲線 (No.8～No.10)

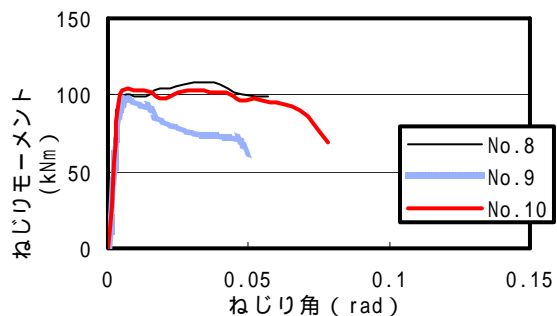


図-10 ねじり包絡線 (No.8～No.10)

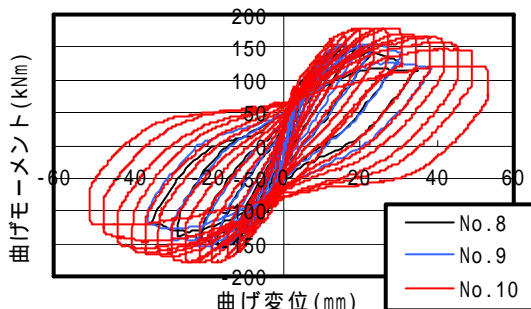


図-11 曲げ荷重 - 変位曲線 (No.8～No.10)

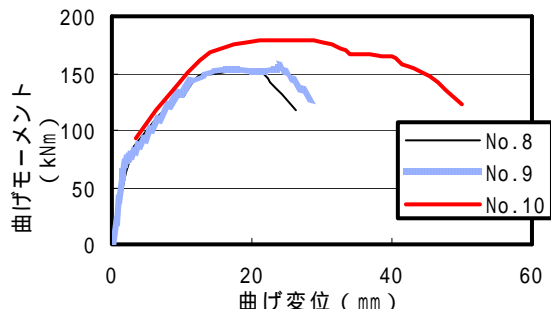


図-12 曲げ包絡線 (No.8～No.10)

表 - 5 理論値と実験値の比較

ケース No.	帯鉄筋間隔 (mm)	CFRP の配置	最大ねじり耐力 (kN・m)			目標載荷比率	
			実験結果	立体トラス理論	斜め曲げ理論	立体トラス理論	斜め曲げ理論
1	20	無補強	131.5	139.8	135.2	1.06	1.03
2	30	無補強	106.1	112.3	110.5	1.06	1.04
3	60	無補強	94.2	82.3	89.0	0.87	0.95
4	60	帯状(2層)	131.5	147.7	124.1	1.12	0.94
5(前)	60	無補強		82.8	90.9		
5(本)	60	帯状(2層)	131.4	174.5	123.8	1.12	0.94
6(前)	60	無補強		82.8	90.8		
6(本)	60	帯状(2層)	123.9	148.1	124.7	1.20	1.01
7	60	全面(1層)	134.0	148.2	124.8	1.11	0.93

まず、ねじりに対する補強効果を確認する。No.8 ~ No.10 より、複合載荷に対し、帯鉄筋間隔および CFRP 補強の有無は初期剛性に影響を与えない。No.9 と No.10 より、CFRP 補強した帯鉄筋間隔 60mm の部材は無補強の部材に比べ、最大ねじり耐力が向上するが、帯鉄筋間隔 30mm 無補強の No.8 に比べ、最大耐力が若干小さい。帯鉄筋比としては、帯鉄筋間隔 20mm と同等であることを考えれば、複合載荷時の CFRP 補強は曲げ荷重の存在によりその効果が減じられることが分かる。

次に曲げに対する補強効果を確認する。No.8 と No.9 より、帯鉄筋間隔は初期剛性および曲げ耐力に影響を与えない。No.8 と No.9 の比較により、帯鉄筋間隔 30mm と 20mm の包絡線はほぼ同等であるが、No.10 の CFRP 補強した部材は無補強の部材に比べ、最大曲げ耐力と共に靱性も向上する。これは、巻き付けた CFRP シートが圧縮側のコンクリートを拘束し、かぶり剥落を抑制することにより、有効断面が保持されるためであると考えられる。

以上より、複合載荷においては、ねじりに対する CFRP の有効性は若干落ちるものの、曲げモーメントに対しては最大耐力と靱性がともに向上することが分かった。

4. CFRP 補強供試体の最大ねじり耐力算定

現在、純ねじりに対する 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。

立体トラス理論は、らせん状のひび割れが形成された状態を立体トラスにモデル化し、斜めひび割れ間のコンクリートを圧縮弦材と考え、ねじり耐力を求める方法である。斜め曲げ理論は、部材軸に対して、斜交した破壊面を仮定し、破壊面に作用する圧縮力の釣合いから、終局ねじり耐力を算定する方法である。

4.1 立体トラス理論

立体トラス理論⁸⁾に基づき、CFRP により補強された部材のねじり耐力算出式として、式(3)を提案式する。

$$M_{tu} = 2 \cdot A_m \sqrt{(q_w + q_{cf}) \cdot q_l}$$

$$= 2 \cdot A_m \sqrt{\left(\frac{A_w f_{wy}}{s} + \frac{A_{cf} f_{cf}}{a'}\right) \cdot \frac{\sum A_l f_{ly}}{P_0}} \quad (3)$$

ここで、 A_m ：ねじり有効断面積 (mm²)

q_w, q_{cf}, q_l ：帯鉄筋・CFRP・主鉄筋のせん断力 (N/mm)

A_w, A_{cf} ：帯鉄筋、CFRP の断面積 (mm²)

A_l ：主鉄筋の全断面積 (mm²)

f_{wy}, f_{ly} ：帯鉄筋、主鉄筋の降伏応力 (N/mm²)

f_{cf} ：CFRP の設計引張強度 (N/mm²)

s ：帯鉄筋間隔 (mm)

a' ：CFRP の中心間隔 (mm)

P_0 ：せん断の作用中心軸の周長 (mm)

4.2 斜め曲げ理論

斜め曲げ理論^{9) 10)}に基づき、CFRP により補強された部材のねじり耐力算出式として、式(4)(5)を提案式する。

$$M_{tu} = M_{tuc} + M_{tus} + M_{tucf}$$

$$= 0.8b^2d \sqrt{\frac{f_{cd}}{145} + \sqrt{m} \frac{f_{ly}}{f_{wy}} (1 + 0.2 \frac{b_0}{d_0})} \frac{b_0 d_0 A_w f_{wy}}{s}$$

$$+ \sqrt{m'} \frac{f_{ly}}{f_{cf}} (1 + 0.2 \frac{b}{d}) \frac{bd A_{cf} f_{cf}}{a'} \quad (4)$$

$$m = \frac{2 \sum A_l s}{2A_w (b_0 + d_0)} \quad , \quad m' = \frac{2 \sum A_l a'}{2A_{cf} (b + d)} \quad (5)$$

ここで、 f_{cd} ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

b, d ：断面の短辺・長辺の長さ (mm)

b_0, d_0 ：断面の短辺・長辺に対応する帯鉄筋の辺の長さ (mm)

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最大ねじり耐力値と実験結果を表 - 5 に示す。

表 - 5 より、CFRP 補強の部材に関しては、斜め曲げ理論の方が精度はよく、式(3)では CFRP の補強効果を過大に評価することになるといえる。

5. まとめ

本稿で取り上げた 10 体の供試体の比較考察により得られた知見を以下に記す。

- (1) 帯鉄筋間隔は初期剛性に影響を与えないが、部材降伏後は帯鉄筋間隔が小さいほど最大耐力が向上する。
- (2) CFRP による RC 柱部材の補強は、ねじり耐力と靱性をとも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。
- (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 (30_y) ならば、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。しかしながら、損傷程度が大き (70_y) と最大耐力が減少する。
- (4) 同等量の CFRP を巻くのであれば、CFRP の巻き方 (連続か帯状) 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い。
- (5) 複合載荷においては、ねじりに対する CFRP の有効性が落ちることに注意が必要である。曲げモーメントに対しては最大耐力と靱性がともに向上することが分かった。
- (6) CFRP 補強供試体の最大ねじり耐力は、立体トラス理論より斜め曲げ理論によって CFRP を帯鉄筋換算した方が精度よく求められる。

本稿により、純ねじり時のみならずねじりおよび曲げの複合載荷における CFRP のねじり補強効果についてもある程度定性的には明らかにできたが、今後、損傷程度と剛性および最大耐力の減少程度、曲げとねじりの載荷比率の違いによるねじり補強効果の低減、などを定量的に把握できるような実験の追加が必要である。

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, pp.93-104, 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.55A, pp.1048-1057, 2009.03
- 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, 2008.04
- 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) 大塚久哲, 宇山友理, 筈島隆司, 陶媛媛: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.739-744, 2009
- 7) 大塚久哲, 竹下永造, 浦川洋介: 軸力, 曲げ/せん断, およびねじりの複合荷重を同時に受ける RC 部材の耐震性能と相関特性, 土木学会論文集, No.801/ -73, pp.123-139, 2005.10
- 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