

論文 炭素繊維で補強された PC 部材のねじり力学特性に関する実験的研究

何 海明^{*1}・清宮 理^{*2}

要旨：PC 部材を、帯鉄筋或いは帯鉄筋の $A \cdot E$ (面積 $\times$ ヤング率) と同程度の炭素繊維シートを用いて補強し、軸力および載荷方法をパラメータとした静的ねじり載荷実験を行った。実験結果から、供試体の変形、ひび割れ、破壊等の基礎的な力学性状を把握した。炭素繊維で補強された PC 部材は、無補強 PC 部材および帯鉄筋で補強した PC 部材と比べて、最大耐力、終局耐力が大幅に増加することに加え、ひび割れの幅が小さくなり、じん性等も優れていることがわかった。

キーワード：ねじり、炭素繊維シート補強、PC 部材、交番載荷実験、軸力

1. はじめに

単純ねじりを受けるプレストレストコンクリート (以下 PC) 部材の力学挙動は、ひび割れ発生時までにについては鉄筋コンクリート (以下 RC) 部材と同様にかなりの精度で推定できる。一方、ひび割れ発生後から破壊に至るまでの挙動についてはいまだ十分明らかでない。また、地震、風、波浪等による交番ねじりモーメントを受ける PC 部材の力学挙動については、研究の歴史が浅く、ひび割れ、破壊状況等の力学性状を検討する必要がある。

既設 RC、PC 構造物への補強工法として、RC 巻立て工法や鋼板巻立て工法が一般的に採用されている。しかしながら、RC 巻立て工法は躯体重量の増加により上部構造と基礎の再検討を行う必要がある場合がある。鋼板巻立て工法は施工が一般的に複雑であり、施工性にやや劣る等の問題点がある。一方、炭素繊維シートは高い引張強度を有し、軽量で施工しやすく、必要とされる補強の程度に応じた補強量の調整も容易であり、錆を伴う腐食を起こさないため耐久性にも優れている。また、クレーン等の重機が配置できない土木構造物や、供用中のオフィスビル等でも、施工性に優れている炭素繊維シート工法が応用できることから、近年は実績も増え、いくつかの設計・施工指針 (案)¹⁾等も作成されている。

そこで、本研究では、以前実施した帯鉄筋で補

強された PC 部材の実験結果²⁾を踏まえ、炭素繊維で補強された PC 部材の補強効果、力学性状等を検討することを目的とし、載荷実験を行った。本論文は、その実験結果を報告するものである。

2. 実験概要

本研究で対象とした供試体は無補強供試体 1 体、帯鉄筋で補強された供試体 1 体、炭素繊維で補強された供試体 4 体と以前実施した帯鉄筋で補強した供試体 3 体の実験結果²⁾を引用し、計 9 体とした。炭素繊維で補強された供試体については全てゼブラ型の補強方法とした。その理由は、筆者らが以前実施した実験結果³⁾では、同じ量の炭素繊維を用いて、全面補強とゼブラ型を比較したところ、供試体への横拘束効果は全面補強のほうが大きく、耐力がゼブラ型より 1 割程度高くなったものの、じん性等といった力学性状については両者にそれほど差異はみられなかった。また、ゼブラ型補強の場合、補強した後でも構造物の損傷の程度がすぐ判断できるという利点がある。

2.1 供試体

表-1 に供試体に与えた軸力、載荷方法、補強方法など供試体の一覧表を示す。供試体のねじり補強はコンクリート標準示方書⁴⁾に従った。このとき、無補強供試体のねじり耐力は $7.78 \text{ kN} \cdot \text{m}$ で、鉄筋

*1 早稲田大学大学院 理工学術院建設工学研究科 (正会員)

*2 早稲田大学 理工学部社会環境工学科教授 工博 (正会員)

で補強された供試体のねじり耐力は $9.16 \text{ kN} \cdot \text{m}$ である。炭素繊維補強材には降伏現象がないため、補強量はねじり抵抗機構により、鉄筋で補強された供試体の帯鉄筋の $A \cdot E$ (面積 $\times$ ヤング率) と同程度にした。载荷軸力については、供試体の設計終局軸力の 25%, 50% とした。载荷実験は 3 グループに分かれる。グループ 1 は一方向ねじり载荷実験で、無補強供試体 Co-1, 帯鉄筋で補強した供試体 Re-1, そして炭素繊維で補強された供試体 CFS-1 で構成され、軸力は 0 である。グループ 2 は炭素繊維で補強された供試体の交番ねじり载荷実験で、導入軸力が 0 の供試体 CFS-N0, 導入軸力が 300kN の供試体 CFS-N300 と導入軸力が 600kN の供試体 CFS-N600 で構成されている。グループ 3 は前述した既往実験の結果である。図-1, 図-2, 図-3 にそれぞれ無補強供試体, 帯鉄筋で補強した供試体そして炭素繊維で補強された供試体の詳細図を示す。いずれの供試体も基本寸法は、断面が $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ の充実正方形であり、部材長さは 1300mm である。導入プレストレスは 200kN (コンクリートへのプレストレス導入量は $5\text{N}/\text{mm}^2$) で、载荷実験の直前に導入する。载荷位置での局所的な破壊を防ぐために両端を鉄板で補強した。プレストレスを導入する PC 鋼棒は SBPR の $\phi 19\text{mm}$ B 種 1 号を供試体断面の中央に 1 本配置する。コンクリートは呼び強度 $30\text{N}/\text{mm}^2$ の普通コンクリートを用い、载荷実験時に強度実験を実施しており、平均圧縮強度は $39.4 \text{ N}/\text{mm}^2$, 平均引張強度は $3.24 \text{ N}/\text{mm}^2$ となっている。帯鉄筋で補強した供試体は軸方向鉄筋 D13 を 4 本、帯鉄筋 D10 を 100mm の間隔で 7 本を配置し、使用鉄筋材料は SD295 である。炭素繊維で補強された供試体は軸方向に SD295 の鉄筋 D13 を 4 本配置し、軸直角方向に炭素繊維シートを 100mm の間隔で配置する。図-3 に示すように、1 本につき幅 53.5 mm の炭素繊維シート 4 層を用いる。炭素繊維シートの材料特性一覧を表-2 に示す。

2.2 载荷方法および測定項目

(1) 载荷方法

実験に使用した载荷装置は参考文献²⁾に使用した载荷装置と同じである。詳細については参考文

表-1 供試体のケース数

グループ	供試体 No.	軸力 (kN)	载荷方法	補強方法
1	Co-1	0	一方向	なし
	Re-1			鉄筋
	CFS-1			CFS
2	CFS-N0	0	交番	CFS
	CFS-N300	300		
	CFS-N600	600		
3	Re-N0	0		鉄筋
	Re-N300	300		
	Re-N600	600		

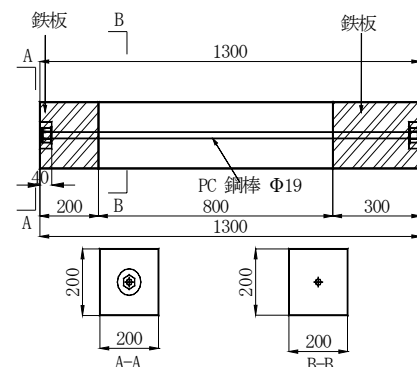


図-1 無補強供試体 (単位 mm)

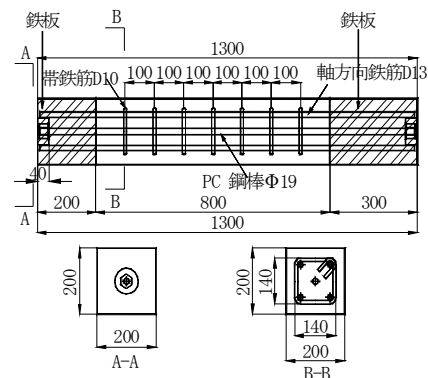


図-2 帯鉄筋で補強された供試体 (単位 mm)

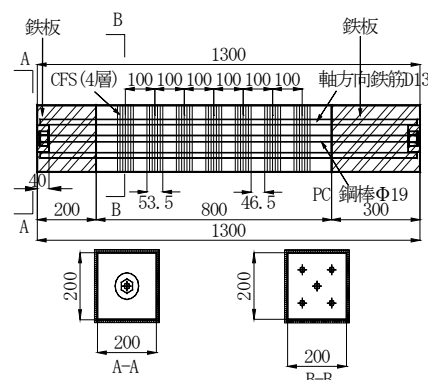


図-3 炭素繊維で補強された供試体 (単位 mm)

表-2 炭素繊維シートの材料特性

繊維 目付 g/m ²	設計 厚さ mm	引張 強度 N/mm ²	引張 弾性率 N/mm ²
600	0.333	3400	2.30×10 ⁵

献²⁾に示す。グループ 2 供試体の交番載荷方法は、1 ループ目については、まず正負方向に供試体にひび割れが観測されるまで荷重制御で載荷を行い、そのときのねじり率 θ を記録する。2 ループ目以降はねじり率で載荷実験を制御し、正負方向についてはねじり率がそれぞれ 2 倍、4 倍、8 倍に達するまで 4 ループの交番載荷を行う。ただし、4 層の炭素繊維シートを貼り付けたコンクリート部分のひび割れの観測は困難であることから、今回は露出したコンクリート部分のひび割れを対象とした。CFS-N0 供試体については、一方向載荷の CFS-1 供試体と比較検討を行うため、4 ループ目の載荷が終わった後、正負に大変形をさせる。

(2) 測定項目

実験の主な測定項目は、ねじりモーメント、ねじり率、主鉄筋ひずみ、帯鉄筋ひずみ、炭素繊維シートのひずみ、コンクリートのひずみである。ねじり率の測定方法の詳細は参考文献²⁾に示されている。

3. 実験結果

3.1 グループ 1 供試体

表-3 にグループ 1 供試体のひび割れ発生荷重およびひび割れ発生時ねじり率を示す。グループ 1 供試体は同程度のねじりモーメントでひび割れが発生し、また、ひび割れ発生時のねじり率も同程度であった。それはねじりを受ける PC 部材のひび割れ発生荷重は軸方向力による影響が大きいものの、配筋（鉄筋、炭素繊維など）による影響は今回ないと考える。

(1)ねじりモーメントとねじり率

図-4 にグループ 1 供試体のねじりモーメントとねじり率の関係図を示す。いずれの供試体もねじりモーメントとねじり率の関係はひび割れが発生

表-3 グループ 1 供試体の実験結果

供試体	ひび割れ発生 荷重 (kN・m)	ひび割れ発生時 ねじり率(rad/m)
Co-1	10.56	0.00382
Re-1	10.14	0.00352
CFS-1	10.06	0.00347

するまではおよそ比例の関係を保ちながら増加した。ひび割れが発生した直後から曲線が大きく曲がったポイント P (Co-1 供試体は 11.80, 0.00547, Re-1 供試体は 11.80, 0.00574, CFS-1 供試体は 14.13, 0.00675) までは傾きがやや緩やかになりつつも増加した。その後、ねじりモーメントとねじり率の関係は供試体により大きく異なった。CFS-1 供試体の傾きが緩やかになり、Co-1 と Re-1 供試体は負の勾配となった。Co-1 供試体は P 点を境にねじりモーメントは急激に減少し、ひび割れの伸展と伴って、耐力を急激に失った。Re-1 供試体は P 点を越すと、鉄筋の働きで、ねじりモーメントが緩やかに減少し、ねじり率が 0.06 を越しても最大ねじりモーメントの 7 割程度を保ち、一定の残存耐力を持つことがわかった。一方、CFS-1 供試体は P 点を越しても、ねじりモーメントが増加し続け、ねじり率が P 点のねじり率の 10 倍を超えてもねじりモーメントは低下する傾向を示さなかった。Co-1 供試体と Re-1 供試体の最大耐力は 11.80kN・m で、それぞれ設計耐力の 1.52, 1.29 倍となった。これに対して、CFS-1 供試体は約 2 倍の 23.61 kN・m となり、かなりの補強効果を得た。

(2) ひび割れおよび破壊状況

図-5 にグループ 1 供試体のひび割れ図を示す。

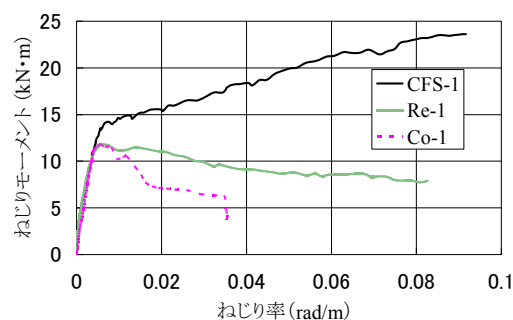


図-4 グループ 1 供試体の荷重－変位関係

Co-1 供試体と Re-1 供試体は最大荷重付近にひび割れが発生し、位置は供試体の中央より若干下の部分であった。Co-1 供試体のひび割れは急激に発生し、観測された時点にひび割れの長さが 100mm 程度であった。その後、荷重に伴ってひび割れが進展し、最後は試験体の 4 面につながって、破壊に至った。Re-1 供試体は最初のひび割れが発生した後、荷重に伴い、試験体の 4 面にわたって数多くの新たなひび割れが発生した。荷重に伴って、各ひび割れも進展し、最後に試験体の 4 面に貫いたひび割れを形成し、終局を迎えた。CFS-1 供試体は炭素繊維シートが貼り付けてないコンクリート部分しか観察できず、全体のひび割れの進展については予測するしかない。露出したコンクリート部分については、荷重終了した時点で、ひび割れは Re-1 供試体より分散し、数が多く、ひび割れ幅も小さかった。破壊状況については、荷重終了した時点で(1)に記述したように、ねじりモーメントは落ちる傾向がなく、供試体にも大きな損傷が見られないが、ねじりモーメントを与えるジャッキのストローク量が最大になり、これ以上荷重できなかったため、いったん除荷し、盛り替えを行い、供試体を破壊させた。写真-1 に CFS-1 供試体の破壊状況を示す。破壊の位置は供試体の下端面から 200mm～273.25mm の間、ちょうど下端の補強鉄板と一番下の炭素繊維シートの間に露出したコンクリート部分であった。コンクリートのひび割れが大きく伸展し、さらに剥落して破壊した。原因としては、その露出したコンクリートの幅(73.25mm)は炭素繊維シートと炭素繊維シートの間に露出し

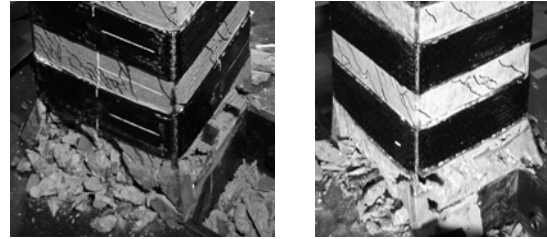


写真-1 CFS-1 供試体の破壊状況

たコンクリートの幅(46.5mm)より広いため、ねじりモーメントに対して炭素繊維による抵抗が弱く、破壊に至ったと考える。

3.2 グループ 2 供試体

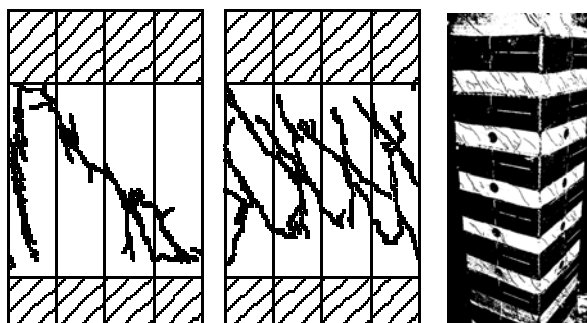
表-4 にグループ 2 供試体の各ループの除荷点のねじりモーメントとねじり率を示す。各ループの除荷点のねじりモーメントはほとんど各ループの最大荷重である。最大荷重でない除荷点のねじりモーメントも最大荷重との差が $1\text{kN}\cdot\text{m}$ 以下である。

(1) ねじりモーメントとねじり率

図-6 にグループ 2 供試体のねじりモーメントとねじり率の関係図を示す。各供試体の 1 ループ目(荷重部分の曲線)のねじりモーメントとねじり率の関係は前述した CFS-1 供試体とほぼ同じであった。2 ループ目以降は、ねじり剛性が減りつつもねじりモーメントは増加し続けた。ひび割れが観測された時のねじりモーメントは、軸力の増加につれて、ひび割れ発生ねじりモーメントも増加する傾向となったが、増加の程度は軸力レベルの増加に対して減少した。また、負方向のねじりによるひび割れ発生モーメントは正方向のひび割れ発生モーメントより低下した。

(2) ひび割れおよび破壊状況

グループ 2 供試体のひび割れの記述については CFS-1 供試体と同様に、炭素繊維シートが貼り付けてないコンクリート部分を対象とした。荷重終了した時点で、ひび割れは供試体の 4 面にわたり数多く観測された。ただし、ひび割れの幅が小さく、完全な破壊には至ってない。写真-2 に CFS-N0 供試体と CFS-N600 供試体のひび割れ状況を示す。写真に示すように、CFS-N600 供試体のひび割れ角度(軸方向との角度)は CFS-N0 供試体より小さくなっていることがわかった。これは軸力の増加と



Co-1 Re-1 CFS-1

図-5 グループ 1 供試体のひび割れ図

に伴い、ねじりモーメントと軸力による生じた供試体の引張主応力方向が変化し、軸方向との角度が大きくなったためである。

表-4 グループ2 供試体の実験結果

供試体	ル プ	ねじりモーメント(kN・m)		ねじり率 (rad/m)	
		正	負	正	負
CFS N0	1	12.22	11.05	0.00538	0.00368
	2	13.88	12.32	0.01091	0.00732
	3	14.55	13.17	0.02202	0.01469
	4	17.46	15.20	0.0460	0.02843
CFS N300	1	17.46	13.51	0.01338	0.00484
	2	18.45	16.13	0.02732	0.01000
	3	20.87	18.67	0.05332	0.01970
	4	24.11	20.07	0.10762	0.04250
CFS N600	1	19.95	19.18	0.00770	0.00594
	2	24.02	20.49	0.01513	0.01184
	3	25.44	24.30	0.03026	0.02394
	4	27.68	26.88	0.06144	0.04799

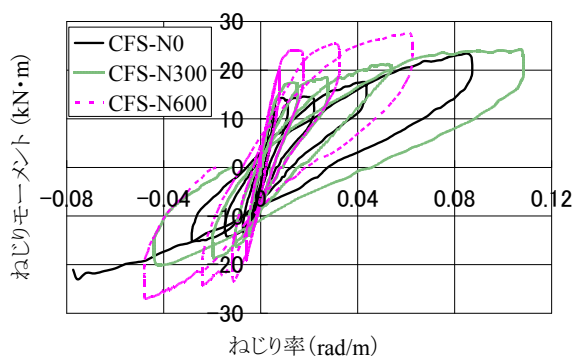


図-6 グループ2 供試体の荷重-変位関係

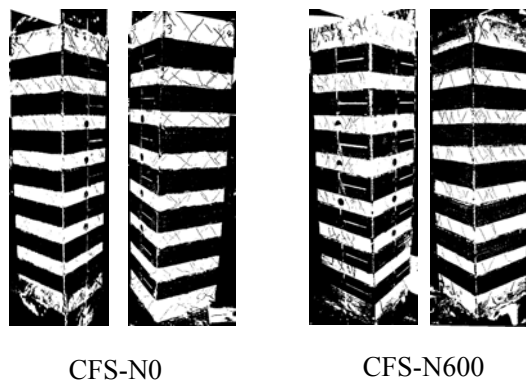


写真-2 グループ2 供試体の破壊状況

3.3 グループ3 供試体

グループ3 供試体の実験結果（ねじりモーメントとねじり率の関係、ひび割れおよび破壊状況など）は参考文献²⁾に示されている。

4. 実験結果の比較検討

一方方向荷重と交番荷重との実験結果の比較検討の対象供試体は(Re-1, Re-N0)と(CFS-1, CFS-N0)である。交番荷重供試体のねじり剛性など実験結果についての比較検討の対象供試体はグループ2とグループ3 供試体である。補強効果についての検討、対象供試体は全供試体である。

4.1 荷重方法の違いによる実験結果検討

図-7に鉄筋で補強された供試体(Re-1, Re-N0)と炭素繊維で補強された供試体(CFS-1, CFS-N0)の一方方向荷重および交番荷重のねじりモーメントとねじり率の関係図を示す。全体的に交番荷重供試体は、同じねじり率におけるねじりモーメントは一方方向荷重より低下していた。各ループ除荷点のねじりモーメントの低下率について、Re-N0 供試体はそれぞれ0.893, 0.852, 0.903であり、CFS-N0は0.931, 0.944, 0.912, 0.934, 0.996であった。炭素繊維で補強された供試体と比べて、鉄筋で補強された供試体のねじりモーメントの低下が顕著であった。

4.2 交番荷重供試体のねじり剛性の検討

交番荷重供試体の各ループのねじり剛性は、各ループのねじりモーメントが0のところと最大ねじりモーメント（負方向の場合は絶対値とする）の3分の1に相当するところをとり、その区域のねじりモーメントとねじり率の関係から、荷重ステップごとに傾きを求め、平均値をねじり剛性として定義する。ねじり剛性比は、ひび割れ発生前のねじり剛性（初期ねじり剛性： GK_0 ）に対する各

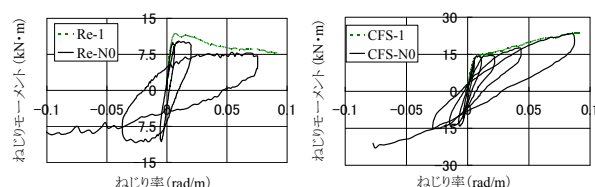


図-7 ねじりモーメントとねじり率の関係

ループの加力時のねじり剛性 (GK_i) の比として定義する。図-8 にねじり剛性比とループ数の関係を示す。炭素繊維で補強された供試体のねじり剛性比の低下は鉄筋で補強された供試体より小さかった。また、鉄筋で補強された供試体は軸力の増加に伴い、ねじり剛性の低下が小さくなるが、炭素繊維で補強された供試体はこの傾向が見られなかった。

4.3 補強効果についての検討

交番载荷供試体の補強効果について、図-9 に各供試体の荷重-変位曲線を示す。軸力なし場合、初期状態から終局状態まで、炭素繊維で補強された供試体は鉄筋で補強された供試体より高い耐力を示した。軸力ありの場合、1, 2 ループ目は鉄筋で補強された供試体とほぼ同じ力学的挙動を示したが、3 ループ目以降鉄筋で補強された供試体の耐力が低下したに対して、炭素繊維で補強された供試体は耐力が低下することなく、鉄筋で補強された供試体より高い耐力、じん性そして回復力が得られた。

5. まとめ

本研究は、既往の実験結果を踏まえ、軸力、交番ねじりを同時に受ける炭素繊維で補強された PC 部材のねじり力学特性、補強効果を調べるために行った実験について述べている。限られた実験データから、得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 無補強供試体と比べて、鉄筋で補強された供試体は最大耐力が上がらないものの、ひび割れ後の耐力とじん性が高かった。炭素繊維で補強された供試体は最大耐力、じん性等の力学的性状がより優れており、鉄筋で補強された供試体よりかなりの補強効果を得ることができた。
- (2) 軸力の増加とともに、供試体のひび割れ荷重、そして最大耐力が増加した。
- (3) 交番载荷を行うと、一方向载荷に比べて、供試体の耐力が低下するが、炭素繊維で補強された供試体の耐力の低下率は鉄筋で補強された供試体より小さくなり、一方向载荷供試体の 9 割強程度の耐力を持つことが分かった。また、炭素繊維で

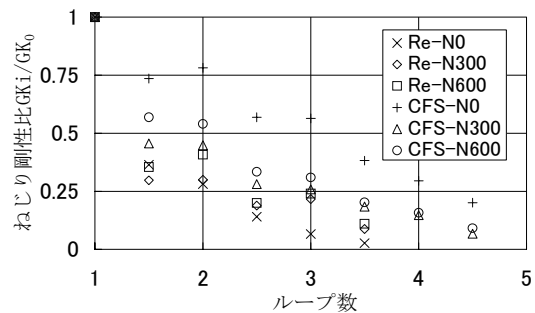


図-8 ねじり剛性比とループ数

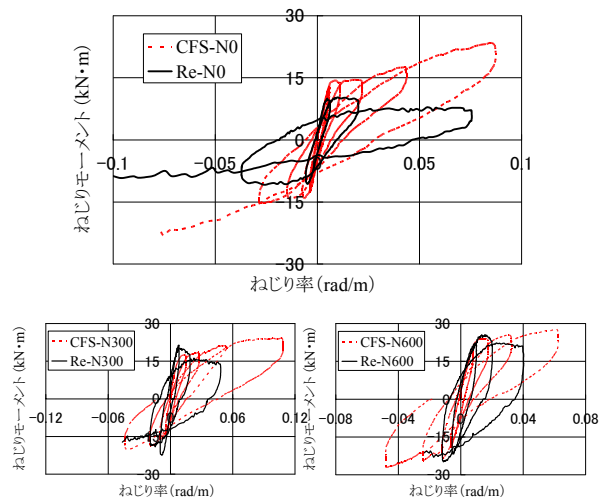


図-9 交番载荷供試体の荷重-変位関係

補強された供試体のねじり剛性の低下は鉄筋で補強された供試体より少なくなり、高い回復力を得られた。

今回は実験結果を中心に述べたが、設計計算式との比較や有限要素法による数値解析を実施して、現象の解明と補強効果の算定式を検討していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案），2002.1
- 2) 何海明，清宮理：軸力と交番ねじりを同時に受ける PC 部材の力学性状に関する研究，土木学会構造工学論文集 Vol.52A, pp.1009-1016, 2006.3
- 3) Haiming HE, Osamu KIYOMIYA : Experiment Study on Torsion Behavior of PC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets, Proceeding of the JCI, Vol. 26. No. 2, pp.1627-1632, 2004
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，平成 8 年