

論文 炭素繊維フレキシブル筋を用いたコンクリート橋脚の変形特性について

大久保 征一郎^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・ローシャン・トゥラダー^{*3}・小林 朗^{*4}

要旨:炭素繊維フレキシブル筋（以下 CFFR）をせん断補強筋として用いたコンクリート橋脚模型の一方向繰返し載荷、正負交番繰返し載荷を行い、その変形特性について実験的に検討した。CFFR は、本実験のような大変形を起こす供試体においてその効果を十分に発揮し、補強部材の変形性能を大きく向上させ得ることが明らかとなった。また繊維のひずみは折り曲げ部を超えて生ずるが、その伝達率はひずみが増加するにつれ、既往の U 字型引張試験で得られた値に収束する傾向があった。

キーワード:炭素繊維フレキシブル筋、コンクリート橋脚、変形性能、ひずみの伝達率

1. はじめに

新設コンクリート構造物の耐震性を向上させるためには、帯鉄筋や中間帯鉄筋を密に配筋する必要があるが、施工が困難である。炭素繊維フレキシブル筋（以下「CFFR」）は従来の連続繊維補強材と異なり、現場で施工でき、また柔軟な状態で配筋できるため、鉄筋等を密に配置する場合に比べ施工性に優れている。

CFFR は極めて新しい材料であるため、その補強効果の検証実験が著しく欠如している。そこで、本研究では橋脚縮小モデルにせん断補強筋として CFFR を用いた場合の変形特性を実験的に検討する。

2. CFFR について

本研究で用いた CFFR は炭素繊維強化繊維束をプラスチックチューブで覆ったもの (Fig.1) であり、柔軟な状態で主鉄筋などに巻きつけたあとチューブ内に樹脂を注入して硬化させるため、施工性に優れるという特徴をもっている。繊維には高強度炭素繊維を使用し、注入樹脂にはビニルエステルを使用している。チューブの材質はポリ塩化ビニルであり、チューブ厚は 1mm である。CFFR の材料特性を Table 1 に示す。

Table 1 Mechanical properties of reinforcement used

Type		Cross sectional area (mm ²)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Yield strain (μ)	Tensile strength (MPa)
Steel	D10	71.3	183	364	1891	357
	D25	506.7	173	367	2121	551
CFFR		16.89*	265	-	-	4133

*Cross-sectional area of carbon fiber only

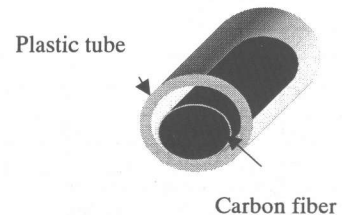


Fig.1 CFFR

*1 清水建設(株)

東京支店

修士 (工学) (正会員)

*2 北海道大学大学院工学研究科助手

社会基盤工学専攻

博士 (工学) (正会員)

*3 北海道大学大学院工学研究科

社会基盤工学専攻

工修 (正会員)

*4 日鉄コンポジット(株)

工修 (正会員)

3. 実験概要

3.1 実験供試体

本研究では、全部で5体の供試体を作製した (Table 2 参照)。供試体 S1 と S2 は CFRP により補強されていない基準供試体であり、供試体 S3 から S5 は、CFRP により補強されている。鉄筋は全ての供試体で同じ配筋とし、軸方向鉄筋に D25 を計 8 本 (主筋比 2.0%)、帯鉄筋に D10 を 19cm ピッチ (帯筋比 0.21%) で配置した (Fig.2 参照)。なお、せん断スパン比 a/d は 3.28 である。

Fig.3 は供試体 S3、S4 における CFRP の巻きつけ方法、Fig.4 は供試体 S5 における CFRP の巻きつけ方法を示す。S5 の補強量は S3 と S4 の 2 倍となっている。

CFRP の端部はコンクリート打設前にチューブをはがし、長さ 300mm、内径 18mm の鋼管を通し、管内部に破砕材を注入することで定着させ、コンクリート打設後にボルトにより橋脚の上部に固定された。

コンクリートには早強ポルトランドセメントを用い、試験日と同日に圧縮強度試験を行った。

Table 2 Condition of specimens

Specimen	CFRP ratio P_{CFRS} (%)	Type of loading ¹⁾	Compressive Strength of concrete f'_c (MPa)
S1	-	A	44.7
S2	-	B	40.0
S3	0.1016	A	40.3
S4	0.1016	B	35.1
S5	0.2032	B	35.4

1) A: One-way cyclic loading

B: Reversed cyclic loading

3.2 載荷方法および測定方法

本研究では、300t 万能試験機と油圧ジャッキを用いて実験を行った。300t 万能試験機のベッドに供試体を横向きに寝かせ、標準径 32mm の PC 鋼棒 4 本を用いて基部とベッドを固定し、左右のバランスをとるために反対側に供試体とほぼ同じ重量のコンクリートブロックを設置した

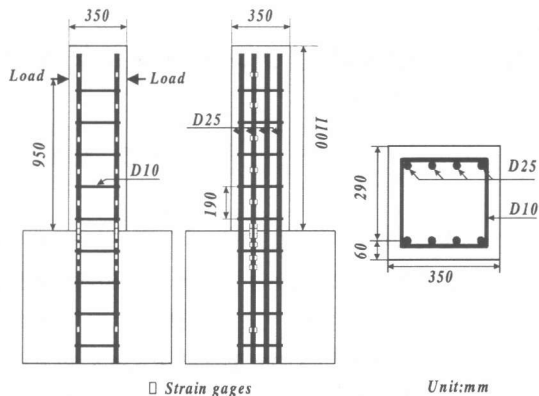


Fig.2 Steel arrangement

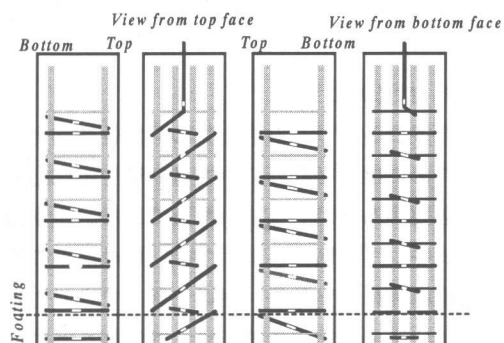


Fig.3 CFRP arrangement in S3 and S4

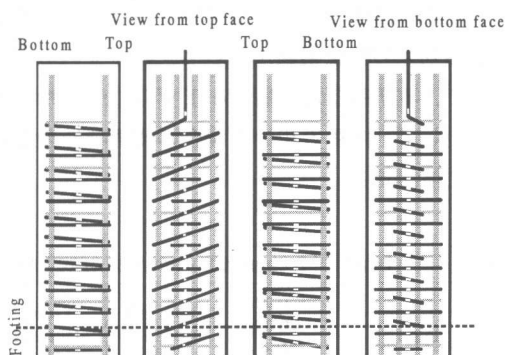


Fig.4 CFRP arrangement in S5

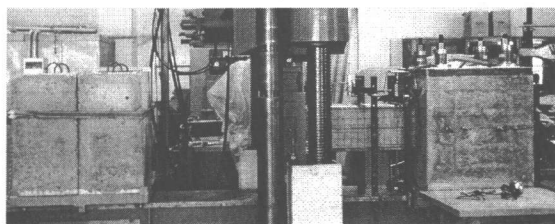


Fig.5 Loading system

(Fig.5). 上方向からの荷重は万能試験機により、下方向からの載荷は、ベッドと供試体との間に設置した油圧ジャッキにより、ベッドから供試体を押し上げるようにして載荷した。

本実験では、柱部と基部の境界付近での主鉄筋のひずみが降伏ひずみに達したときの変位を δ_y と定義し、その整数倍の変位に達した時に除荷を行うことにより供試体に複数回の繰返し履歴を与え、荷重が降伏荷重の 80% を下回るまで載荷した。なお、供試体 S1 と S3 は一方方向繰返し載荷、供試体 S2、S4 および S5 は正負交番繰返し載荷とした。

試験機と供試体の接合部には、水平方向の変位を拘束しないようにヒンジを介した。なお、本実験では軸力を作用させていない。

載荷部の変位および主筋、帯鉄筋、CFFR のひずみを測定した。また載荷に伴い、供試体基部に回転が生じることが予想されたため、基部の変位も測定し、載荷部の変位の補正に用いた。

4. 実験結果および考察

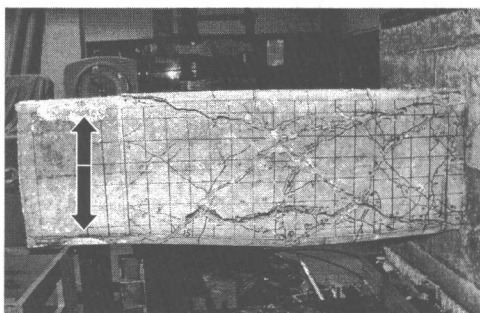
4.1 破壊形状について

全ての供試体は軸方向鉄筋の降伏後、せん断破壊を起こした。CFFR で補強された供試体は基部から 10~20cm 位置で CFFR が破断し、急激に荷重が低下した。破断個所はいずれも折り曲げ部であった。既往の研究²⁾から CFFR 折り曲げ部では直線部の 2~2.5 倍程度の応力集中がおこることが知られており、そのために折り曲げ部での破断が生じたものと考えられる。

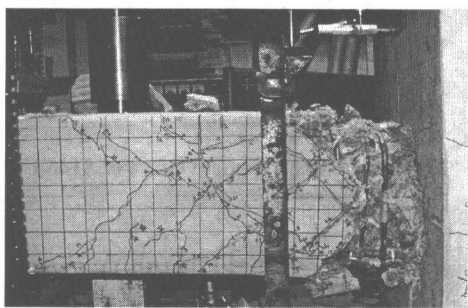
Fig.6 に交番載荷を行った S2 と S5 の破壊状況を示す。CFFR で補強されていない S2 の供試体では破壊に支配的と思われるせん断ひび割れが柱軸方向に広域に渡って生じているが、CFFR で補強された S5 ではせん断ひび割れが基部に比較的近い範囲で生じた。他の CFFR で補強された供試体においても同様のことが言える。

4.2 荷重変位曲線について

Fig.7 に一方方向繰返し載荷を行った CFFR を持たない供試体 S1 と CFFR により補強された供



(a) Specimen S2



(b) Specimen S5

Fig.6 Crack pattern after failure

試体 S2 の荷重-変位曲線を示す。 $4\delta_y$ までは荷重変位曲線に大きな差は見られないが、CFFR で補強されていない S1 は $4\delta_y$ 以降荷重が低下しはじめるのに対し、CFFR で補強されている S3 は $4\delta_y$ 以降も荷重が上がり続け、 $7\delta_y$ に到達する手前で CFFR の破断により荷重が急激に減少している。

Fig.8 に正負交番繰返し載荷を行った供試体 S2、S4、S5 の荷重-変位曲線を示す。CFFR で補強されていない供試体 S2 は、 $2\delta_y$ 終了後荷重が急激に低下したのに対し、S4、S5 は $6\delta_y$ まではほぼ同じ勾配で荷重が増加している。S4 は $6\delta_y$ で CFFR の破断により荷重が急激に低下している。それに対し S5 は、 $6\delta_y$ 以降荷重が徐々に低下し、 $8\delta_y$ で CFFR の破断により荷重が急激に落ちている。これは S5 のせん断補強鉄筋に囲まれている内部コンクリートの劣化の程度

が S4 と比べ著しく大きかったことから、内部コンクリートの圧縮軟化が $6\delta y$ 以降荷重低下を引き起こし、CFFR を破断に至らしめたものと思われる。つまり、CFFR の補強量が異なる供試体 S4 と S5 とでは破壊形式が異なる。

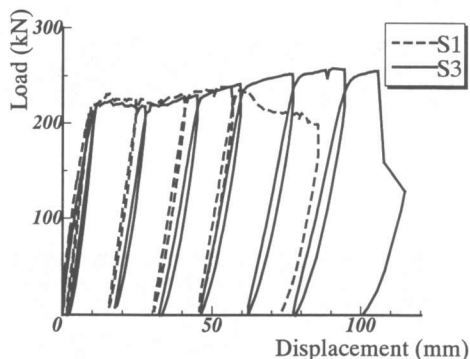
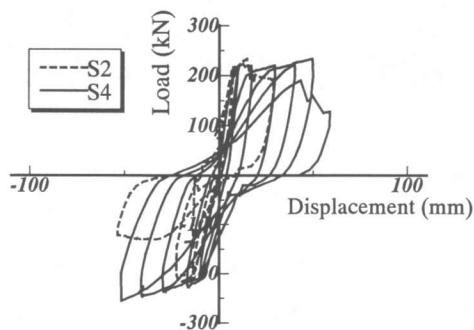
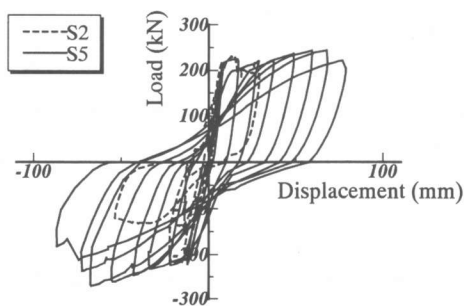


Fig.7 Load-Displacement curve of S1 and S3



(a) S4 and S2



(b) S5 and S2

Fig.8 Load-Displacement curves

最大荷重は CFFR 無補強の供試体と比べ、S3 で 8%、S4 で 9%、S5 で 16% の増加があった。これに対し、最大変位は CFFR 無補強の供試体と比べ、S3 で 1.6 倍、S4 で 3.6 倍、S5 で 4.3 倍と飛躍的に増加した。CFFR はチューブと繊維の間の付着力が小さく、繊維がチューブ内を滑るため、ひび割れ部での応力集中が起こりづらく、ひずみがより分散されることによって繊維が破断ひずみに到達するのが遅れ、大変形下でもなお補強効果を発揮できたと考えられる。

なお、ここで用いる全ての変位は、載荷時に生じる基部の回転による影響を考慮し、補正したものである。

4.3 CFFR のひずみ分布

Fig.9、Fig.10、Fig.11 に CFFR で補強された供試体 S3、S4、S5 の斜めひび割れが生じる面の CFFR のひずみ分布を示す。なお、横軸は供試体基部からの距離である。

供試体 S3 を除き、基部から 20cm までの範囲で大きなひずみが発生している。これは、基部に比較的近いところでのひび割れが大きく、またその周辺で CFFR が破断していた事実と一致する。なお、供試体 S3 は、基部付近のひずみゲージが実験途中で破損し、大きなひずみを計測できなかったため、他と異なるように見える。

CFFR はチューブと繊維の間の付着力が小さいため、繊維がチューブ内をすべることを先に述べた。既往の研究において¹⁾²⁾、引張力はある一定の割合で低減されながら折り曲げ部を超えて伝達されることが示されている。本実験でも、柱全体に渡り一様なひずみが発生するのではなく、斜めひび割れが卓越する位置でのひずみが大きくなり、そこから離れるに従いひずみが小さくなっている。このことから、付着力が小さくても曲げ部で引張力の低減（定着効果）が期待できる。

4.4 CFFR の折り曲げ部におけるひずみの伝達

ここで、伝達率、すなわち、橋脚上面の CFFR のひずみ ε_v と橋脚側面の CFFR のひずみ ε_h と

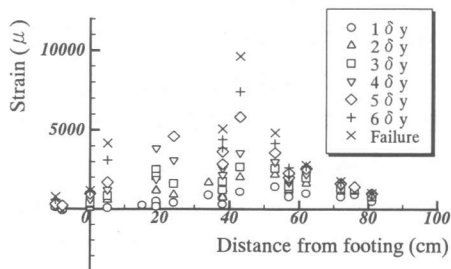


Fig.9 Strain in CFRP (S3)

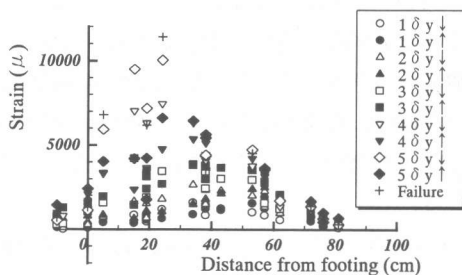


Fig.10 Strain in CFRP (S4)

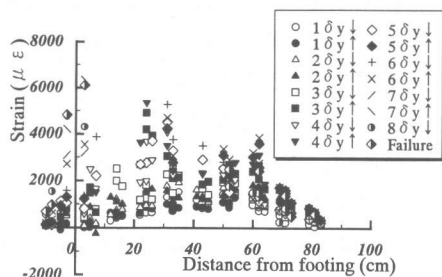


Fig.11 Strain in CFRP (S5)

の比に関して考察する。縦軸に各供試体のひずみの伝達率、横軸に ε_v を示した図を Fig.12 で示す。ここでは、せん断ひび割れを跨いだ位置の CFRP のひずみを用いている。

既往の CFRP の U 字型引張試験²⁾ から、チューブ厚 1mm の CFRP は伝達率が 0.8~0.9 とされている。本実験も伝達率は ε_v が増加するにつれ、それとほぼ一致する値に収束する傾向があった。なお、ひずみが小さい範囲で伝達率が小さいのは、折り曲げ部の内側にあるチューブがつぶれたため、ひずみの伝達が鈍ったものと考えられる。

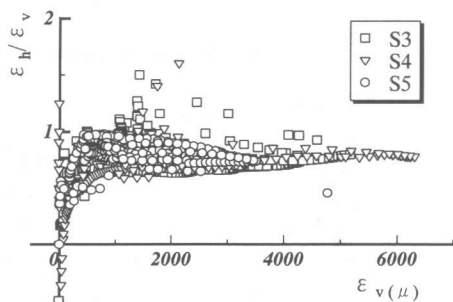


Fig.12 Transmission ratio

4.5 帯鉄筋と CFRP の分担するせん断力の変化

CFRP で補強した供試体における、帯鉄筋および CFRP それぞれ 1 本あたりの受け持つ引張力 T_s 、 T_{CFRP} を、基部に近い範囲で測定した各々のひずみから計算し、その結果を Fig.13、Fig.14 に示す。なお、横軸は載荷部の変位である。S5 の T_s はひずみゲージが測定不能だったため、グラフには載っていない。

Fig.13 より、正負交番載荷で行った S4 と一方向載荷で行った S3 とでは、 T_s の挙動はほぼ等しいが、 T_{CFRP} のそれは大きく異なる。すなわち、正負交番載荷における T_{CFRP} の方が、一方向載荷のそれよりも増加の勾配が大きく、小さな変位でより大きな引張力を分担している。

一方、正負交番繰返し載荷を行った供試体の比較を行っている Fig.14 より、CFRP 補強量の多い S5 の T_{CFRP} は補強量の少ない S4 のそれらと比べ増加の勾配が小さい。すなわち、CFRP の補強量が異なることで、CFRP とともに鉄筋の引張力の変化が異なる結果が得られた。また、 T_{CFRP} は T_s と比べ、載荷部の変位が小さい範囲ではあまり上昇しないが、帯鉄筋の降伏後、増加の勾配が大きくなる傾向がある。CFRP は鋼材と異なり、ひび割れ部での応力集中が起こりにくいため、変形が小さい範囲では T_{CFRP} の増加が T_s と比べ緩やかになる。しかし、鉄筋が降伏しひび割れ幅が大きくなると、材料が弾性体のためひび割れの開きに応じて T_{CFRP} が増加する。つまり、CFRP は大変形下でその補強効果

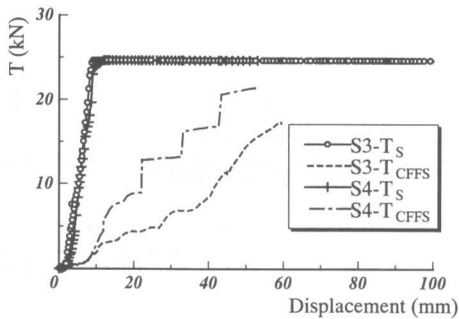


Fig.13 Comparison of T_S and T_{CFFR} in S3,S4

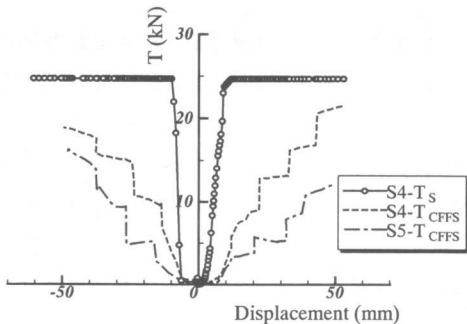


Fig.14 Comparison of T_S and T_{CFFR} in S4,S5

Table 4 Experimental results

Specimen	Type of loading	P_y (kN)	δ_y (mm)	δ_{limit} (mm)	μ_{fd}
S1	One-way	210	8.58	80.81	9.42
S3	Cyclic	212.52	10.42	105.57	10.13
S2 ↑ *	Reversed Cyclic	196.52	16.47	27.64	1.68
S2 ↓ **		218.4	11.01	17.30	1.57
S4 ↑		209.09	13.45	60.49	4.50
S4 ↓		217.72	11.84	53.13	4.49
S5 ↑		220.27	15.38	77.14	5.02
S5 ↓		211.84	11.43	78.65	6.88

*Load was applied upward

**Load was applied downward

を十分に発揮することになる。

4.6 じん性率について

本研究で扱うじん性率 μ_{fd} は、降伏点の耐力 P_y (軸方向引張鉄筋が降伏したときの荷重) を保持できる限界変位 δ_{limit} を降伏変位 δ_y (軸方向引張鉄筋が降伏したときの載荷部の変位) で除

したものとした。Table 4 に各供試体の降伏点の耐力、限界変位、降伏変位、じん性率を示す。一方荷重では CFFR を補強することによるじん性率の増加は 1 割未満と小さいが、正負交番荷重では S4 で 2.8 倍、S5 で 3.7 倍と明確な増加が見られた。今後、荷重の方法でなぜ補強効果が異なるのかを明らかにする必要がある。

5. まとめ

CFFR で補強されたコンクリート橋脚の変形特性を実験的に明らかにするため、CFFR の補強量をパラメーターとした CFFR 補強橋脚の一方荷重および正負交番繰返し荷重を行った。本実験から得られた結果は以下の通りである。

- (1) CFFR はチューブと炭素繊維の付着抵抗が小さく繊維が滑るため、ひび割れ部での応力集中が起こりづらい。従って繊維が破断ひずみに達するのが遅く、大変形下で補強効果を発揮することができ、変形性能を大きく向上させることが可能である。
- (2) CFFR はひずみが折り曲げ部を超えて分散されるが、その伝達率はひずみが増加するにつれ、0.8~0.9 の値に収束する傾向がある。これは既往の U 字型引張試験から得られた値とほぼ一致する。

今後は、炭素繊維フレキシブル筋の特徴である施工のし易さを損なうことなく、より大きな変形性能を与え得る巻き付け方法や補強量を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) Kobayashi, A., Tomita, S., et al.: Study on Shear Strengthening of Beams Using Continuous Fiber Flexible Reinforcement, Proc. of FRPRCS-4, SP-188, pp.195-208, 1999
- 2) Sugiyama, T., Tomita, S., et al.: Development of Continuous Fiber Flexible Reinforcement, Proc. of FRPRCS-4, SP-188, pp.13-22, 1999