

炭素繊維フレキシブル筋を用いたコンクリート橋脚の補強効果について

Reinforcing effect of concrete pier reinforced with carbon fiber flexible reinforcement

北海道大学大学院
北海道大学大学院
北海道大学大学院
㈱日鉄コンポジット

○学生員
正会員
学生員
正会員

大久保 征一郎 (Seiichiro Okubo)
佐藤 靖彦 (Yasuhiko Sato)
ローシャン・トゥラダー (Roshan Tuladhar)
小林 朗 (Akira Kobayashi)

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。新素材である炭素繊維フレキシブル筋は、強化繊維束を柔軟なプラスチックチューブで覆い、主鉄筋などに巻きつけた後、樹脂を注入して硬化させるというもので、現場で施工でき、また柔軟な状態で配筋できるため、鉄筋を密に配置する場合に比べ、施工性に優れている。本研究では橋脚縮小モデルに帯鉄筋として炭素繊維フレキシブル筋を用いた場合の変形特性を明らかにすることを目的とする。

2.炭素繊維フレキシブル筋の材料特性

本研究では、日鉄コンポジット㈱で開発された連続繊維フレキシブル筋(以下 CFRF)を使用した。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。CFRF の材料特性は、Table 1 に後述する。

3.実験概要

3-1.実験供試体

Table 2 に全ての供試体の諸元を、また Fig.1 に供試体の配筋図を示す。なお、CFRF のせん断補強筋比は次式により求めた。

$$p_{CFRS} = \frac{A_{CFRF} \cdot n}{s \cdot B}$$

(1)

A_{CFRF} :CFRF の繊維断面積

s :帯鉄筋の配置間隔

B :部材幅

n :帯鉄筋の配置間隔中に配筋される CFRF の本数

Table 1 Mechanical properties of reinforcement used

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

*Cross-sectional area of carbon fiber only

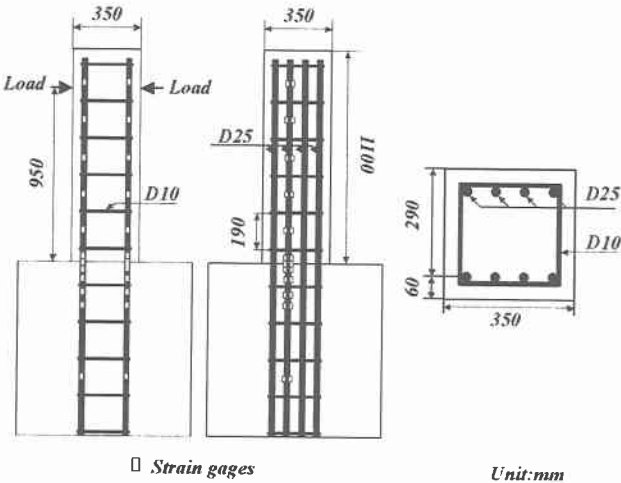


Fig.1 Specimen

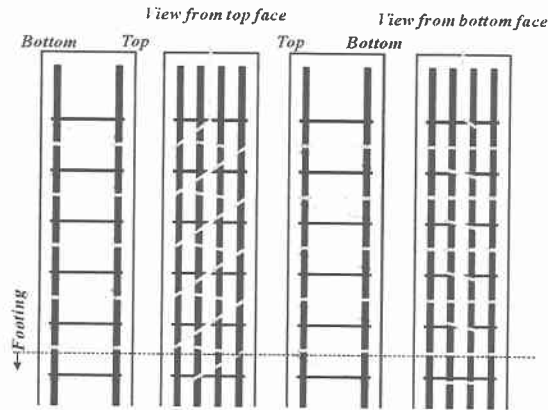


Fig.2 CFRF arrangement in S3 and S4

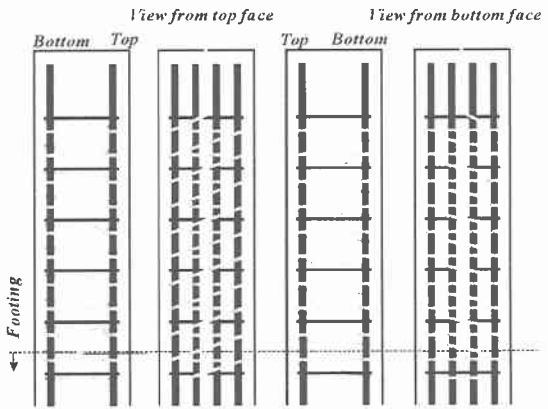


Fig.3 CFRF arrangement in S5

コンクリート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。鉄筋は軸方向鉄筋にD25を計8本、帯鉄筋にD10を19cmピッチで用いた。なお、全ての供試体のせん断スパン比 $a/d=3.28$ 、主筋比2.0%、せん断補強筋比0.21%である。フレキシブル筋の配筋図を Fig.2、Fig.3 に示す。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で固定した。S3、S4 は同じ配筋を有し、S5 は S3、S4 の2倍の配筋量を有する。使用した補強筋の力学的特性値は Table 1 に示されている。

Table 2 Condition of specimens

Specimen	CFFR ratio P_{CFFS} (%)	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 荷重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 万能試験機は梁部材用であるため、本研究では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.4)。下方向からの荷重は油圧ジャッキをベッドと供試体との間に設置し、ベッドから押し上げるようにして荷重した。荷重パターン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 δy と定義し、その後 $\pm 2\delta y$ 、 $\pm 3\delta y$ …の変位を1回ずつ与えた。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。

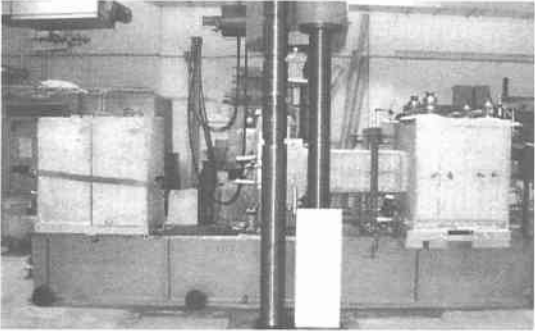


Fig.4 Loading system

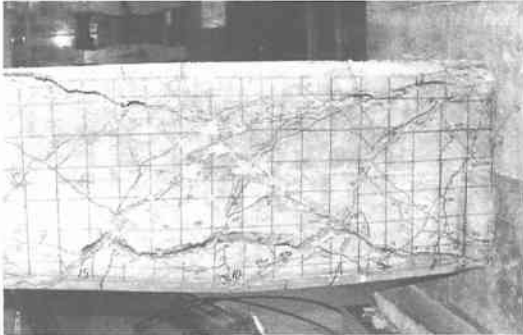
荷重部の変位および主筋、帯鉄筋、CFFR のひずみを測定した。また荷重に伴い、供試体基部に回転が生じることが予想されたため、基部の変位も測定し、荷重部の変位の補正に用いた。

4.実験結果および考察

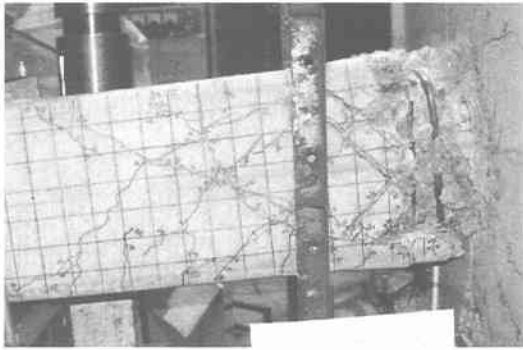
4-1 破壊形状について

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。破断箇所はいずれも折り曲げ部であった。既往の研究¹⁾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と考えられる。

Fig.5 に交番荷重を行った 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も基部付近でのひび割れが多く生じた。



(a) Specimen S2



(b) Specimen S3

Fig.5 Crack pattern after failure

4-2 荷重変位曲線について

Fig.6 に繰返し荷重で行った供試体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 $4\delta y$ 以降も荷重があがりつづけ、 $7\delta y$ 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.7 に交番荷重で行った供試体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 のせん断補強筋に囲まれている内部コンクリートが S4 と比べ劣化が激しくなっていることが観察できたことから、内部コンクリートが 6δy 以降荷重を受け持てなくなったことが原因の一つと考えられる。

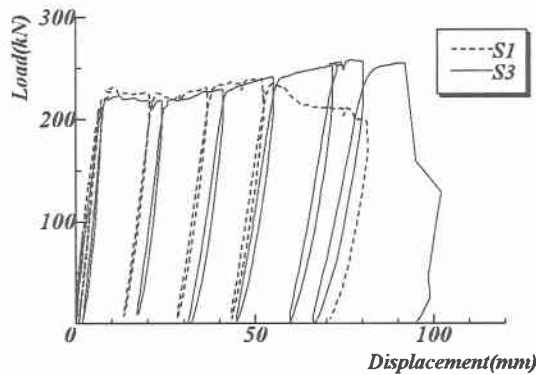
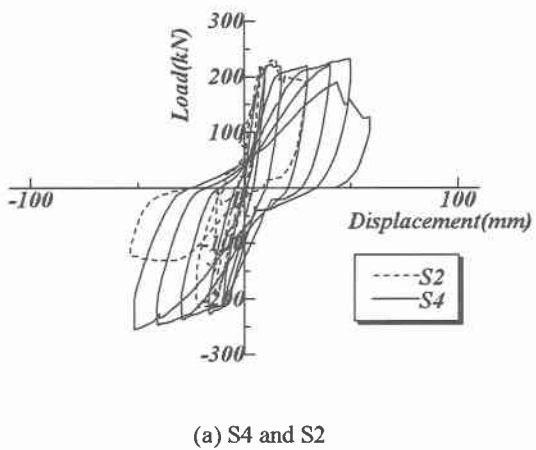
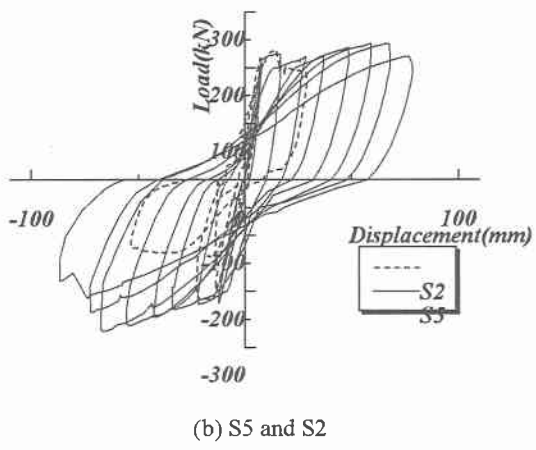


Fig. 6 Load-displacement curve of S1 and S3



(a) S4 and S2



(b) S5 and S2

Fig. 7 Load-Displacement curve

最大荷重は無補強の供試体と比べ、S3 で 8%、S4 で 9%、S5 で 15% の増加があった。これに対し、最大荷重変位は無補強の供試体と比べ、単調載荷で行った S3 で 1.5 倍、S3 と同量の CFRP 補強で交番載荷を行った S4 で 3.5 倍、S4 の 2 倍の CFRP 補強量である S5 で 4.6 倍と飛躍的に

増加した。このことに関する考察は後述する。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、および主鉄筋が基部から抜け出したことによる影響を考慮し、補正したものである。

4.3 CFRP のひずみ分布について

Fig. 8、Fig. 9、Fig. 10 に CFRP で補強された供試体 S3、S4、S5 の載荷方向に平行に配筋された CFRP のひずみ分布を示す。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おり、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 CFRP が破断していた事実と一致する。なお、供試体 S3 は、基部から 20cm 付近のひずみゲージが破損し、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。

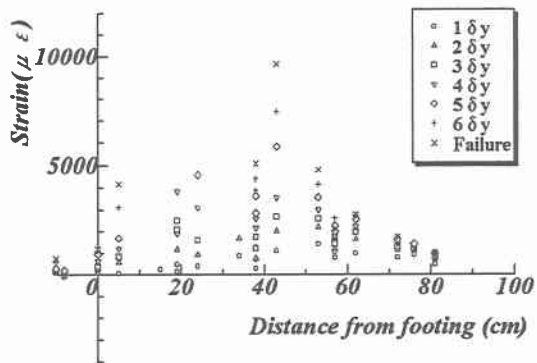


Fig. 8 Strain in CFRP (S3)

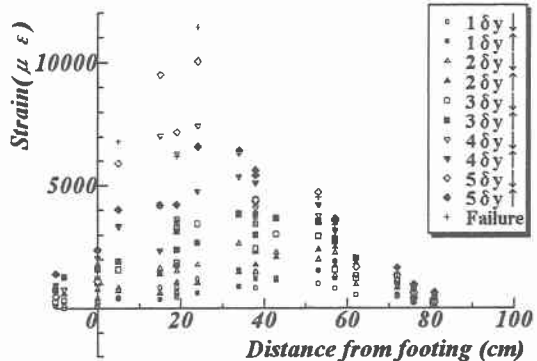


Fig. 9 Strain in CFRP (S4)

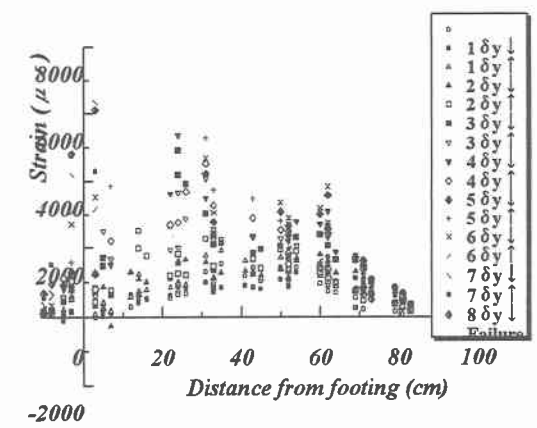


Fig. 10 Strain in CFRP (S5)

既往の研究¹⁾から、CFFR はチューブとその内部の炭素繊維との表面の付着抵抗が小さく繊維が滑るため、応力がひび割れ部に集中せず、ひずみが折り曲げ部を超えて伝達することが知られている。また、折り曲げ部ではある一定の割合でひずみが低減されることも示されている。今回の実験結果でも、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る。すなわち、付着力が小さくても、曲げ部で引張力の低減が期待できる。

4-4 靱性率評価式とその比較

本研究で扱う靱性率 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 3 に各供試体の降伏点の耐力、限界変位、降伏変位、靱性率を示す。単調載荷では CFRR を補強することによる靱性率の増加は小さいが、交番載荷では明確な増加が見られた。また、CFRR の補強量を2倍にすることで靱性率が1.4倍程度の増加があった。このことから CFRR の補強は靱性能の向上に有効であるといえる。

Table 3 Experimental results

Specimen	Type of loading	P_y (kN)	δ_{limit} (mm)	δ_y (mm)	μ_{fd}
S1	One-way	210	6.40	76.63	11.98
S3	cyclic	212.52	7.25	91.90	12.68
S2-Up*	Reversed cyclic	196.52	14.03	22.55	1.61
S2-Down**		218.4	7.34	14.63	1.99
S4-Up		209.09	9.91	51.60	5.21
S4-Down		217.72	8.19	49.47	6.04
S5-Up		220.27	12.21	72.22	5.92
S5-Down		211.84	7.90	76.70	9.71

*Load was applied upward

**Load was applied downward

Fig.11 に土木学会で提案されている靱性率評価式 (式2) から得られた計算値と正負交番で行った供試体 S2、S4、S5 の靱性率を比較する。この靱性率評価式は鉄筋コンクリート部材に対するもので、コンクリートの分担せん断力 V_c 、帯鉄筋の分担せん断力 V_s と曲げ耐力 V_{mu} との耐力比の関数で示されている。また、この式は既往の研究の実験結果から得られた予測式で、靱性率にして実験値との比で約 0.5~1.5 倍のばらつきが生じている。Fig.11 では、ばらつきの範囲の境界線を破線で示している。詳細は参考文献²⁾を参照されたい。計算値はせん断補強鉄筋比 p_w 以外を全て同じ値とし、 p_w を変数として求めた。つまり、CFRR と同量の補強を帯鉄筋で行った場合の靱性率を計算し、実験値と比較するものである。

$$\mu_o = 12 \left(\frac{0.5V_c + V_s}{V_{mu}} \right) - 3 \tag{2}$$

CFRR での補強を行っていない S2 では、実験値が計算値の 36% と大幅に下回ったが、CFRR で補強した S4、S5 では、S4 で計算値の 82%、S5 で計算値の 90% の靱性率を得た。また、S2 は下限値の破線を下回る結果を得たが S4、S5 はの範囲内であり、S2 を基準に考えると同量の帯鉄筋を補強する場合より大きい靱性率が期待できる可能性がある。

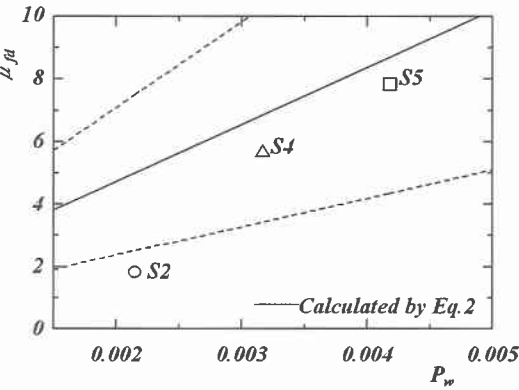


Fig.11 Ductility and shear reinforcement ratio

5. まとめ

CFRR 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、CFRR の補強量をパラメータとした CFRR 補強橋脚の単調および交番載荷を行った。本実験から得られた結果は以下の通りである。

- (1) CFRR を補強することで、最大荷重および最大荷重変位を増加することが出来た。
- (2) CFRR で補強されていない供試体は破壊に支配的な斜めひび割れが広域に渡って生じたが、CFRR で補強された供試体は基部に比較的近い範囲で多くのひび割れが生じた。
- (3) CFRR を補強することで、靱性率を大幅に増加させる結果を得た。
- (4) 既往の研究より CFRR は、チューブとその内部の炭素繊維との表面の付着抵抗が小さく繊維が滑るため、ひずみが分散されることが知られているが、本実験では、付着力が小さくても、曲げ部で引張力の低減が期待できる結果を得た。
- (5) CFRR を補強することで、CFRR と同量の帯鉄筋を補強した場合に比べ、大きい靱性率が期待できる可能性がある。

謝辞:本研究を進めるにあたり、(株)日鉄コンポジットの杉山哲也氏、北海道工業大学の今野克幸助教授ならびに同研究室の学生の方々には多大なる御協力を頂きました。ここに記し、謝辞とさせていただきます。

参考文献

1) 富田早季:連続繊維フレキシブル筋のせん断補強効果に関する研究、北海道大学大学院修士論文 1999.3
2) 土木学会:阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式、コンクリート技術シリーズ、No.12、pp.63-69、1996