CFS 補強した応力履歴 RC はりの力学特性に関する実験研究

日大生産工(院)	村田	賢佑	日大生産工	木田	哲量
日大生産工	阿部	忠	日大生産工	澤野	利章

1.はじめに

道路橋 RC 床版のひび割れ損傷に対する補強工法として,施工性および工期短縮などの面で利点を有する炭素繊維シ ート(Carbon Fiber Sheet: CFS)接着工法があり,その施工 実績も年々増加している。また、各研究機関においても CFS 接着工法の研究がなされ, CFS の補強効果や破壊メカニズ ムなどが報告されている。

一方で,実構造物にCFS 接着工法を施す場合には,応力 履歴を有し,ひび割れなどの損傷が生じている場合が多い と考えられる。しかし,これまでの研究で用いられている 供試体は,未損傷 RC 部材が多い。そのため,応力履歴を 有する RC 部材の CFS 補強効果および力学特性について解 明に至っていないのが現状である。

そこで本研究では,応力履歴を有する RC はりにひび割 れ補修およびCFS 補強を施した場合の静的耐力を明確にす るとともに,理論耐力と併せて評価した。

2.供試体の材料および寸法

2.1 使用材料

供試体のコンクリートには,普通ポルトランドセメント と最大寸法 20mm の粗骨材(密度 2.63g/cm³)を使用し,鉄 筋は SD295A, D16を使用した。また,CFS には高強度連 続カーボンシートを用い,表面処理材にはエポキシ系のプ ライマー,接着材にはエポキシ系の含浸接着樹脂を用いた。 コンクリートおよび鉄筋の力学特性値を表1,CFS の力学 特性値を表2に示す。なお,表1,2より鉄筋の降伏ひずみ および CFS の公称破断ひずみを算出すると,それぞれ1880 ×10⁶,18000×10⁶である。

2.2 供試体寸法および鉄筋配置

供試体は断面寸法の異なる 3 タイプの RC はりとする。 なお,未損傷供試体は RC はり, RC はりに CFS 補強を施 した供試体を未損傷 CFS 補強 RC はりとする。また,変動 荷重による応力履歴を有する RC はりに CFS 補強を施した 供試体を応力履歴 CFS 補強 RC はりとする。

支間は全ての供試体で200cmとして,張出し部は鉄筋

表1 コンクリートおよび鉄筋の力学特性値

	コンクリート	鉄筋(SD295A,D16)			
供試体	圧縮強度	降伏点	引張強度	ヤング係数	
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	
タイプ	38.5	268	568	106	
タイプ	41.5	508	508	190	
タイプ	30.0	373	544	200	

表2 CFS の力学特性値

シート名	目付量	設計厚さ	引張強度	弾性係数
	(g/m ²)	(mm)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
高強度CFS	202	0.111	4420	235



図1 供試体寸法および鉄筋配置

D16 を使用することから 40cm とし, 全長 280cm とした。 また,鉄筋配置は引張側に3本,圧縮側に2本配置した。 断面寸法はタイプ は幅 30cm,高さ 21cm,タイプ は幅 30cm,高さ 25cm,タイプ は幅 20cm,高さ 25cm である。

なお,本実験に用いる供試体にはせん断補強筋は配置し ないこととし,タイプ,の供試体は RC はり,未損傷 CFS 補強 RC はり,応力履歴 CFS 補強 RC はりの各供試体 において S1,S2(表3参照)の2体ずつ実験を行い,タイ プの供試体は RC はり,未損傷 CFS 補強 RC はりにおい て各1体ずつ実験を行った。また,CFS は供試体底面の支 間方向に1層貼り付けとする。供試体寸法および鉄筋配置 を図1に示す。

3.応力履歴RCはりの作製

本実験における応力履歴を与える方法は,大型自動車が

Experimental Study on Mechanical Property of Damaged RC Beam Strengthening with CFS by Kensuke MURATA, Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE and Toshiaki SAWANO



図2 静荷重曲げ実験

伸縮継手や路面の凹凸を通過する際に生じる荷重変動を想定した変動荷重載荷法とした。変動荷重載荷は,実橋床版では荷重変動が最大±48%発生しているが,平均的な荷重振幅が±20~30%であることから,車輪の基準荷重に対して±20%,±30%の振幅を周期2Hzの正弦波形として作用させた。また,走行速度は1往復を18secで走行する平均22cm/secとし,荷重は5kNずつ段階的に増加させた。なお,本実験で用いたタイプ,の断面寸法では,たわみが20mmでひび割れが生じ,鉄筋は降伏しているが耐力を維持している状態である。よって,変動荷重は,変位制御によりたわみが20mmとなった所で除荷した。

4. ひび割れ補修およびCFS補強

4.1 ひび割れ補修

ひび割れ補修は,応力履歴時のひび割れ幅,深さを考慮 し,自動式低圧注入工法とした。まず初めにひび割れに沿 って表面処理を行い,表面処理後のひび割れに沿ってシー ル材を塗る。これと同時に,注入用ゴムチューブ取り付け パイプをシール材により取り付ける。シール材の硬化養生 を1日行った後に,専用のゴムチューブにエポキシ系の注 入材を充填し,取り付けパイプに取り付け,注入を開始す る。注入材の強度が出るまで1週間養生し,最後にディス クサンダーにより注入用ゴムチューブ取り付けパイプおよ びシール材を取り除き,表面処理を行った。

4.2 CFS補強

本実験における CFS 補強は,曲げ引張応力が作用する供 試体底面の支間方向に1層貼り付けるものとする。CFS の 貼り付け方法は,まずコンクリート表面の不陸をコンクリ ートサンダーによりケレンし平滑に仕上げる。また,CFS の付着向上のためにエポキシ系のプライマーをローラーに より塗布する。プライマーを24時間以上養生させ,指触乾 燥した後 CFS をエポキシ系の含浸接着樹脂により接着し, 硬化するまで1週間の養生を行った。

5.実験方法

本実験は,最大曲げ応力が生じる支間中央に荷重を載荷 させる静荷重曲げ実験とする。荷重は0.0kNから5.0kNず つ段階的に増加させ,供試体が破壊に至るまで実験を行う。 静荷重曲げ実験を図2に示す。

6.実験耐力および破壊モード

本実験における実験耐力および破壊モードを表3に示す。

表3 実験耐力および破壊モード

供試体	実験耐力 (kN)	平均耐力 (kN)	耐力比	破壊モード	
N-S1	80.9	82.0		曲げ破壊	
N-S2	85.1	85.0		曲げ破壊	
-NCS-S1	120.9	120.2	NCS/N- 1.45	は〈離 曲げ破壊	
-NCS-S2	119.7	120.5	NCS/N= 1.45	は〈離 曲げ破壊	
-DCS-S1	109.4	107.6	DCS/N=1.30	せん断破壊	
-DCS-S2	105.7	107.0	DCS/NCS=0.89	せん断破壊	
-N-S1	105.6	102.0		曲げ破壊	
-N-S2	100.1	102.9		曲げ破壊	
-NCS-S1	139.8	127.5	NCCAL 1.24	は〈離 曲げ破壊	
-NCS-S2	135.1	157.5	INCS/IN=1.54	は〈離 曲げ破壊	
-DCS-S1	130.0	127.5	DCS/N=1.24	せん断破壊	
-DCS-S2	125.0	127.5	DCS/NCS=0.93	せん断破壊	
-N-S	95.3	95.3	NCS/N-1 15	曲げ破壊	

, 、:供試体タイプ、N:未損傷、D:応力履歴,
CS:CFS補強、S:静荷重による曲げ実験、1,2:供試体番号

(1) R C はり

RC はりの実験平均耐力は,タイプ で 83.0kN,タイプ で 102.9kN,タイプ で 95.3kN となった。また破壊モードは,全ての供試体で曲げ破壊となった。

(2) 未損傷CFS補強RCはり

未損傷 CFS 補強 RC はりの実験平均耐力は,タイプ で 120.3kN,タイプ で137.5kN,タイプ で109.5kN となっ た。ここで,RC はりと未損傷 CFS 補強 RC はりの実験平 均耐力を比較(NCS/S)すると,タイプ では1.45 倍,タ イプ では 1.34 倍となり,大幅な耐力の向上がみられた。 しかし,タイプ の未損傷 CFS 補強 RC はりはせん断破壊 となったことから,1.15 倍となり,タイプ , に比して 大幅な補強効果がみられなかった。

(3)応力履歴CFS補強RCはり

応力履歴 CFS 補強 RC はりの実験平均耐力は,タイプ で107.6kN,タイプ で127.5kN となった。ここで,RC は りと応力履歴 CFS 補強 RC はりの実験平均耐力を比較 (DCS/S)すると,タイプ では1.30 倍,タイプ では1.24 倍の耐力の向上がみられた。しかし,未損傷 CFS 補強 RC はりの場合に比して,補強効果は10%程度低下している。 なお,破壊モードは終局時に斜めひび割れによりせん断破 壊に至ったが,曲げひび割れは上縁付近まで伸展し,延性 的な破壊となった。

7.CFSひずみ

支間中央における荷重とCFS ひずみの関係を図3に示す。 (1) 未損傷CFS補強RCはり

未損傷 CFS 補強 RC はりでは,タイプ , ともに引張 鉄筋の降伏荷重(タイプ :約85kN,タイプ :約90kN, タイプ :約75kN)後にひずみの増加率が増えるものの, 荷重増加に対応した急激な増加はみられず,タイプ , では終局時に20000×10⁶まで達している。しかし,公称破 断ひずみを超えているが,CFS の破断はみられなかった。 また,一般にCFS のはく離ひずみは6000×10⁶といわれて



図3 荷重とCFSひずみの関係

いるが,本実験でははく離ひずみ後の荷重増加でも急激な 増加はみられない。

(2)応力履歴CFS補強RCはり

未損傷 CFS 補強 RC はりと比較すると応力履歴 CFS 補強 RC はりの CFS ひずみの増加が大きい。しかし,残留ひず みを加えた引張鉄筋の降伏荷重(タイプ:40kN,タイプ

:約40kN)後の荷重増加に対してもひずみの増加傾向は 増すものの、急激な増加はみられず、耐力を維持している。 また,この場合の終局時の CFS ひずみをみると,未損傷 CFS 補強RC はりと比較しても、タイプ では12500×10⁶、 タイプ では10500×10⁶とほぼ近似しており、同様な補強 効果が得られた。

8.理論曲げ耐力¹⁾

8.1 複鉄筋長方形断面の終局曲げ耐力

CFS 補強 RC はりの終局曲げ耐力は,はりの健全度(未 損傷,応力履歴)により耐力が異なる結果が得られた。こ の要因の1つには,応力履歴を有する供試体では鉄筋が降 伏していることが考えられる。したがって,本実験では, 終局限界状態設計法における複鉄筋長方形断面の耐力式に 鉄筋引張強度係数 kpを乗じた式(1)として与え,実験値 の整合性を高めた。

$$M_{us} = \left\{ k_p \left(A_s \cdot f_{yd} \right) \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \right\} + A_s' \cdot s' \left(d' - \frac{a}{2} \right)$$
(1)

ここで, k_p:鉄筋引張強度係数(未損傷:1.13²⁾, 応力履 歴:1.00), A_s:引張鉄筋の断面積, f_{yd}:鉄筋の降伏強度, d:有効高さ, a:等価応力プロックの大きさ, A_s':圧縮鉄 筋の断面積, _s':圧縮鉄筋の応力度, d':圧縮縁から圧縮 鉄筋図心位置までの距離

8.2 寸法効果によるCFSの補強効果係数

表3より, RC はりに対する未損傷 CFS 補強 RC はりお よび応力履歴 CFS 補強 RC はりの補金効果が異なっている。 また,図3より,荷重と CFS ひずみの関係は各タイプごと に, ひずみの増加が顕著となる前の最大ひずみ値が異なっ ている。したがって,部材寸法比によって CFS の補強効果 が異なると考えられる。そこで, CFS のひずみ増加が顕著 となる前の最大ひずみ(______」と CFS の破断ひずみ(_____) との比を,補強効果係数 ______(と定義し,式(2)として与 え,その結果を表4に示す。また,補強効果係数と部材寸 法比の関係を図4に示す。これより,応力履歴 CFS 補強 RC はりの補強効果係数も未損傷 CFS 補強 RC はりの補強 効果係数とほぼ同じ値が得られたことから,補強効果係数 と部材寸法比の関係は式(3)で与えられる。

$$_{cf} = \frac{y \cdot cf}{y}$$
(2)

$$_{cf} = 0.57 \cdot \left(\frac{b_w}{h}\right) - 0.15 \quad 0.70 \tag{3}$$

ここで , _{y-d} : CFS の最大ひずみ , _y : CFS の破断ひず み , b_w : はり幅 , h : はり高さ

8.3 CFS補強RCはりの理論曲げ耐力

CFS 補強 RC はりの終局曲げ耐力は,複鉄筋長方形断面 の式(1)に部材寸法比による補強効果係数 g を適用し た CFS 補強曲げ耐力式を加えることにより算出される。し たがって CFS 補強 RC はりの終局曲げ耐力は式(4)とし て与えられ,理論曲げ耐力は式(5)より与えられる。

表4 補助課係数(_{cf})

供試体	y•cf	_{y·cf} (平均)	у	cf
-NCS-S1	11767×10^{-6}	12268×10^{-6}		0.653
-NCS-S2	$12768 \times 10^{\text{-}6}$	12268 × 10		0.055
-DCS-S1	12716×10^{-6}	12005×10^{-6}		0.639
-DCS-S2	11294×10^{-6}	12005 x 10		0.037
-NCS-S1	$10697 \times 10^{\text{-}6}$	10424×10^{-6}	$18800 \times 10^{\text{-}6}$	0.555
-NCS-S2	10171×10^{-6}	10434 × 10		0.555
-DCS-S1	10247×10^{-6}	10266×10^{-6}		0.551
-DCS-S2	10484×10^{-6}	10300 × 10		0.551
-NCS-S	5821 × 10 ⁻⁶	5821×10 ⁻⁶		0.310



図4 補強効果係数と断面寸法比の関係

$$M_{uc} = \left\{ k_p \cdot \left(A_s \cdot f_{yd} \right) \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \right\} + A_s' \cdot s' \left(d' - \frac{a}{2} \right) + \left\{ 0.90 \cdot A_{cs} \cdot f_{y \cdot cf} \cdot s_{cf} \left(h - \frac{x}{2} \right) \right\}$$
(4)

$$P_u = \frac{4 \times M_{uc}}{L} \tag{5}$$

ここで, A_{cs}: CFS の断面積, f_{y-cf}: CFS の引張強度, x:中立軸の位置, L:支間

8.4 実験値と理論値の比較

式(4),(5)により算出した理論曲げ耐力および表3 に示す実験耐力との比較を表5に示す。表5より,鉄筋引 張強度係数kpを1.13とした場合の理論曲げ耐力は,タイプ

で117.1kN,タイプ で135.6kN,タイプ で109.5kN で ある。また,鉄筋引張強度係数kpを1.00とした場合の理論 曲げ耐力は,タイプ で107.9kN,タイプ で124.1kN,タ イプ で98.4kN である。

(1) 未損傷CFS補強RCはり

実験耐力と理論曲げ耐力を比較(実験耐力/理論曲げ耐力)すると,鉄筋引張強度係数kpを1.13とした場合,タイプで1.03,タイプ1.02,タイプで1.00となり,理論曲げ耐力と実験耐力がほぼ近似する結果が得られた。kpを1.00とした場合は,タイプで約1.12,タイプで約1.11,タイプで1.11となり実験耐力と理論曲げ耐力に差が生じた。したがって未損傷の場合は鉄筋引張強度係数kpを1.13として算出することで的確な理論曲げ耐力が得られた。

(2)応力履歴CFS補強RCはり

実験耐力と理論曲げ耐力を比較(実験耐力/理論曲げ耐力)すると,鉄筋引張強度係数kpを1.13とした場合,タイプでは約0.92,タイプでは約0.94となり危険側を示した。また,鉄筋引張強度係数kpを1.00とした場合,タイプでは約1.00,タイプでは約1.03となり,実験耐力と理

表5 実験耐力および理論曲げ耐力

供試体	理論耐	力(kN)	実験耐力/理論耐力	
	k _p =1.13	k _p =1.00	k _p =1.13	k _p =1.00
-NCS-S1	117 1	107.9	1.03	1.12
-NCS-S2	117.1		1.02	1.11
-NCS-S1	125.6	124.1	1.03	1.13
-NCS-S2	155.0		1.00	1.09
-NCS-S	109.5	98.4	1.00	1.11
-DCS-S1	117 1	107.9	0.93	1.01
-DCS-S2	11/.1		0.90	0.98
-DCS-S1	135.6	124.1	0.96	1.05
-DCS-S2			0.92	1.01

論曲げ耐力がほぼ近似する結果が得られた。

なお,応力履歴を有する場合は,鉄筋の損傷度合いにより鉄筋引張強度係数 kp の値が異なると考えられる。また, CFS 補強 RC はりの限界状態設計法における終局曲げ耐力 の算出には,材料係数や部材係数などを適用することで, より経済的な設計法が確立できるものと考えられる。

9.まとめ

 RC はりの実験曲げ耐力に比して,未損傷 CFS 補強 RC はりの場合,タイプ で45%,タイプ で34%,タイプ で15%耐力が向上した。また応力履歴 CFS 補強 RC はりの 場合,タイプ で30%,タイプ で24%耐力が向上した。
CFS 補強 RC はりの理論曲げ耐力は,鉄筋引張強度係 数 kp および補強効果係数 cf を適用することで,実験耐力 と近似する結果が得られた。

3) 応力履歴を有する場合は,損傷度合いにより耐力が異 なる場合があると考えられる。したがって,応力履歴を有 する場合は,損傷度合いに応じた鉄筋引張強度係数kpの値 を明確にする必要があると考えられる。

10.謝辞

本研究を行うにあたり,試料のご提供とご指導を頂きましたショーボンド建設(株)補修工学研究材料試験室,日 鉄コンポジット(株)に厚くお礼申し上げ,ここに付記して,謝意を表します。

「参考文献」

1) 阿部忠,木田哲量,澤野利章,水口和彦,加藤清志: 静荷重・走行荷重を受ける CFS 補強 RC はりの補強効果お よび力学性状に関する研究,日本大学生産工学部研究報告 A,2004 年 6 月第 37 巻第 1 号

2) Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Toshiaki SAWANO, Masaaki HOSHINO and Kiyoshi KATO; Flexural Load-Carrying Capacity and Failure Mechanism of RC Beams wth Low Effective Depth under Running Wheel-Load, MSRI,Vol.7,No. 3, pp. 186-193,2001.