

炭素繊維シートを用いたRC橋脚補強の実験的検討

佐々木協一¹・袴田文雄²・前川順道³・星隈順一⁴

¹正会員 八千代エンジニアリング(株) 東京事業部構造部

²正会員 工修 阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課

³正会員 阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課

⁴正会員 工修 建設省土木研究所 耐震技術研究センター耐震研究室

既設RC橋脚の耐震補強に炭素繊維シート(CFRP)を用いる工法の耐力、変形性能に関する性能を確認することを目的として、1/5縮尺模型を用いた正負交番載荷実験を行った。試験体は矩形、円形の2種でせん断、じん性および曲げ補強を施した。結果は、せん断耐力、変形性能の向上にCFRPによる補強が有効であることが確認された。矩形橋脚では、基部を円形に成形し巻立てることが変形性能の向上に有効であることが確認された。曲げ耐力向上に関しては想定した性能が得られず課題を残したが、問題点が明らかとなったので、これを解決し実設計に適用するための資料が得られた。

Key Words : CFRP sheets, Seismic Retrofit, RC Column, Shear Retrofit
Flexural Ductility, Flexural Retrofit

1. はじめに

兵庫県南部地震では既存道路橋脚に甚大な被害が発生し、その耐震補強が急務となっている。阪神高速道路公団では、鋼板巻立てによる補強方法を主としたRC橋脚の耐震補強工を進めている。しかし高速道路の路下には様々な制約条件があって、重機の搬入、溶接を伴う鋼板補強工法の採用ができない橋脚が存在する。この様な鋼板による橋脚補強工に著しい制約を伴い施工が困難な場合には、炭素繊維補強プラスチック(以降CFRPとする)による補強工法が有力な工法となることが予想される。CFRPは既に日本道路公団を中心に、主として段落としを有する単柱のRC橋脚の耐震補強材料として検討され、平成6年度に設計・施工マニュアル¹⁾が整備されている。

この後平成7年1月の兵庫県南部地震の後、「復旧

仕様」²⁾が提示され、以降橋脚の耐震補強に関しては「復旧仕様」に拠らざるを得ないことが現状となっている。ここにCFRPを橋脚の耐震補強に採用する場合を考え、繰り返し大変形時の挙動を実験的に検証し、設計事例作成のための基礎資料を得ることを目的として実験を行い検討を行った。

着目点は、既存橋脚構造性能、CFRPによるせん断・じん性補強効果および曲げ耐力補強に加えじん性補強した効果の把握である。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体の諸元を表-1に示す。試験体は、柱断面が矩形(S)と円形(C)の2種類である。基準試験体である既存型(S-00, C-00)、じん性補強型(S-21, S-2

表-1 試験体の諸元

試験体 No.	断面 形状	軸方向 鉄筋 (p)	曲 げ 補 強		帯鉄筋 (Pw) [ρs]	じ ん 性 補 強	
			基部(換算p)	上部(換算p)		基部[ρs]	上部[ρs]
S-00	□ 70x 70cm	48-D16 (1.9%)	—	—	D6@12cm (0.08%) [0.17%]	—	—
S-21			—	—		TS-4層[3.1%]	TS-1層[0.9%]
S-21M			PL-2.3(2.8%)	TS-2層(3.2%)		TS-2層[1.7%]	TS-1層[0.9%]
S-21K			—	—		TS-2層[1.7%]	TS-1層[0.9%]
C-00	○ φ70 cm	36-D13 (1.2%)	—	—	D6@12cm (0.08%) [0.17%]	—	—
C-21			—	—		TS-2層[1.7%]	TS-1層[0.9%]
C-21M			PL-1.6(1.9%)	TS-1層(1.9%)		TS-2層[1.7%]	TS-1層[0.9%]

PL:鋼板 TS:炭素繊維シート p:軸鉄筋比 pw:帯鉄筋比 ρs:横拘束筋体積比

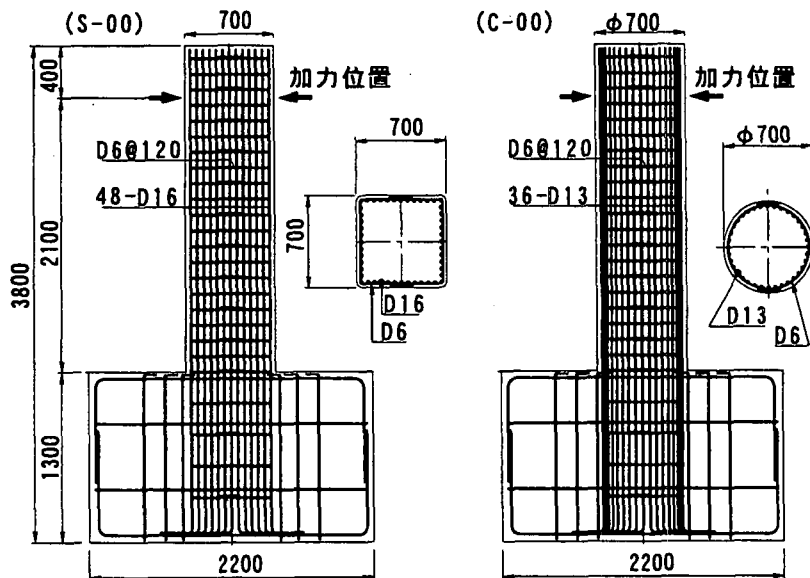


図-1 既存供試体 (S-00, C-00)

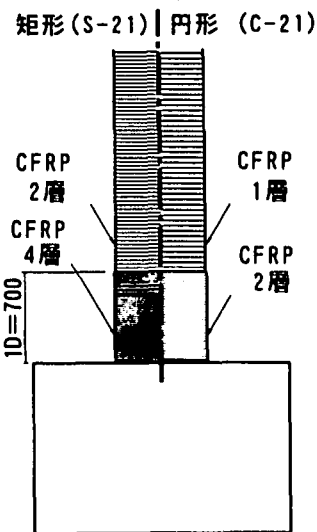


図-2 じん性補強要領

1K, C-21)および、じん性+曲げ強度補強型 (S-21M, C-21M) の合計7体である。試験体は実橋脚を模した片持はり形式の柱型試験体で、1/5の縮尺とし、引張鉄筋比と帯鉄筋比を実橋脚と合わせてある。せん断スパン比は3とした。

じん性補強型は、基準試験体 (図-1) にCFRPを水平方向に巻き付けた。巻き厚は矩形のS-21が基部1D区間4層、上部1層、円形のC-21では基部2層、上部1層とした (図-2)。基部の1D区間は良好な塑性ヒンジを形成するように横拘束を目的として層厚が決定される。1Dより上部はせん断補強を目的としてCFRPを巻付けるので、基部よりも層厚が少なく済む。この様にCFRPでは層厚を必要に応じて簡単に換え得る。

S-21KはS-21に5δyまで載荷した後、損傷を補修し基部にコンクリートを円形に打ち直しCFRPシートを巻き付けて補強したものである (図-3)。

曲げ強度補強型 (S-21M, C-21M) は、基準試験体にCFRPを鉛直方向に貼付け、鋼板を介してアンカー筋で基礎部に定着して曲げ耐力を増加させ、さらに水平方向にCFRPを巻付けてにじん性とせん断耐力を向上させることを図った。基部に鋼板を用いたのは、CFRPでは1.5%程度の伸びしか期待できないので、上部はCFRPで曲げ強度を向上させ、基部は鋼板の大きな伸びに期待したものである (図-4)。

(2) 使用材料

実験に使用した主な材料は、コンクリート: $f'_{ck} = 26.5 \text{ MPa}$ 、鉄筋: SD295、鋼板: SPHC、CFRPシート: FTS-C1-30 (引張り強度: 3481 MPa 、目付 300 g/m^2)、である。実材料特性を表-2に示す。

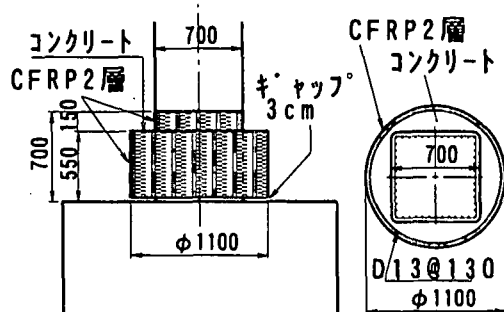


図-3 基部円形巻立て要領

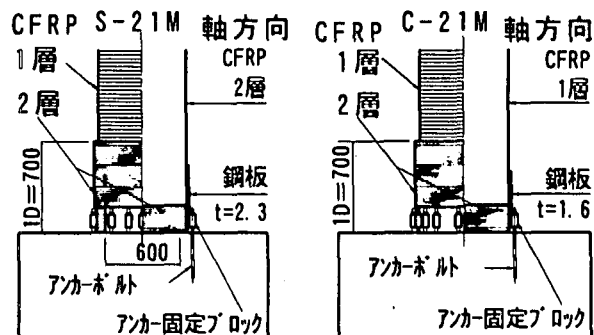


図-4 曲げ補強要領

表-2 使用材料の強度特性

コンクリート圧縮強度 (MPa)		鉄筋・鋼板降伏点 (MPa)	
S-00, S-21K	28.9	D16	363
S-21	26.3	D13	367
S-21M	26.1	D6	331
C-00	33.0	PL-2.3	222
C-21	28.8	PL-1.6	255
C-21M	31.8		
炭素繊維シート引張り強度 (MPa)			4383

(3) 実験方法

実験は水平交番載荷試験である。試験体は、軸力

載荷装置の位置に合うように柱を水平に据え付けた。
 フーチング部は実験施設の反力壁に固定した。試験
 体と載荷装置を図-5に示す。図のように軸力と交
 番水平力をアクチュエータにより柱頭部に加力した。
 軸力用ジャッキは柱頭部が水平に変位しても、追従
 し常に軸力が一定になるよう自動制御される。軸力
 は実橋脚と同じ軸応力度となるように定めた。矩形
 断面試験体：1104kN(2.26MPa, 23kgf/cm²)、円形断面
 試験体：816kN(1.67MPa, 17kgf/cm²)。

実験はRC断面計算で求めた部材降伏荷重を加え、
 その時の変位を降伏変位(δ_y)として、それ以降は変
 位制御で降伏変位の整数倍の変位で3回の正負交番
 載荷を行った。入力波形は正弦波、速度は一定で
 3cm/sとした。

3. 実験結果

(1) 履歴曲線と損傷状況

図-7に水平荷重-載荷点変位履歴曲線を示す。
 また既存橋脚S-00, C-00の破壊状況を図-6に示す。
 せん断耐力比が0.74のS-00は3 δ_y でせん断破壊を生
 じた。せん断耐力比が1.05のC-00は曲げ型の破壊モ
 ードであった。じん性補強を施したS-21は4 δ_y で鉄筋
 の座屈が生じ耐力の低下が始まったので5 δ_y で実験
 を中止して補修し、基部を円形に成形・CFRP巻立て
 補強を施してS-21K試験体とした。S-21Kは6 δ_y で横
 方向CFRPが一部破断した。破壊モードは、軸鉄筋が
 座屈し繰り返し曲げを受けたことによる「疲労破断」
 である。

この試験体は実験開始前に既に塑性域に入るひず
 み履歴を10数回受けていたことも原因の一つである。

C-21は12 δ_y でCFRPが破断するまでは、大きな損傷、
 耐力の低下は見られなかった。13 δ_y で鉄筋が破断し
 した。破壊モードは、横拘束が失われたことによる軸
 鉄筋の座屈と破断である。鋼板を用いたS-21Mは、
 1 δ_y 載荷時から鋼板の付着切れが生じた。4 δ_y で鋼
 板のエッジにより横方向のCFRPシートが破断し始め、
 5 δ_y で基部の横方向CFRPシートは全て破断した。C-
 21Mでも、予備載荷の時から鋼板の付着切れが始まり、
 2 δ_y で全て付着が切れた。C-21Mでは鉄筋が座屈す
 ることなく、14 δ_y で鉄筋が破断し始めるまで、変状は
 見られなかった。

(2) 耐力および変形性能

表-3に実験結果の荷重、変位を示す。ここで、
 終局はP- δ 包絡線上で荷重が最大荷重の80%に低下し
 た点とした。図-8を見ると矩形断面試験体では、
 曲げ補強を施したS-21Mは、S-00, S-21よりも降伏荷

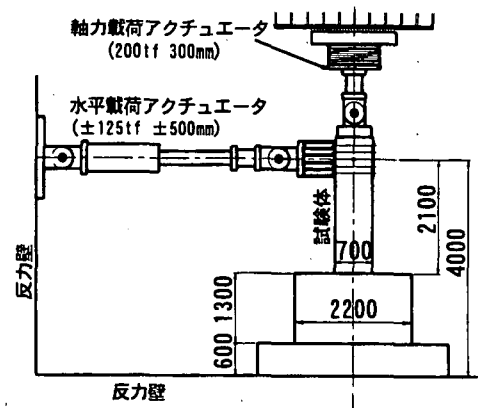


図-5 実験装置

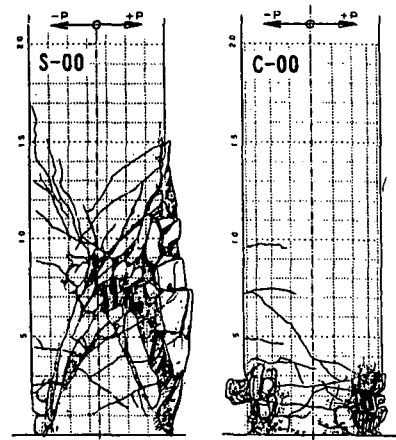


図-6 既存橋脚試験体破壊状況

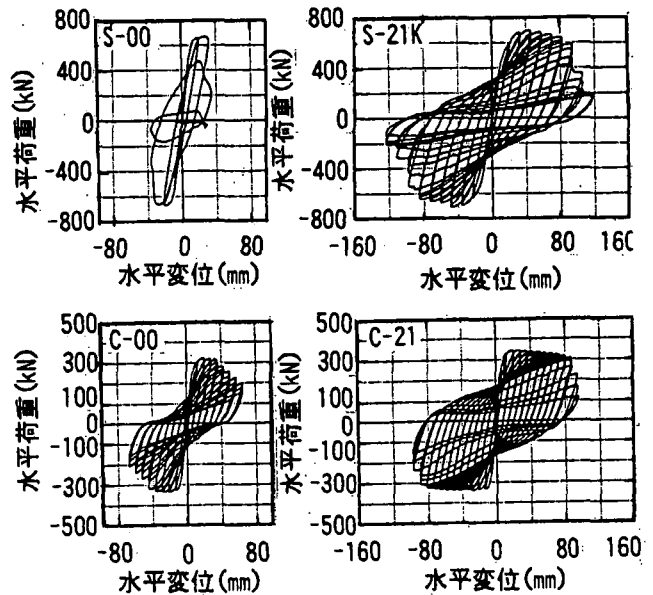


図-7 水平荷重-変位履歴曲線

重で17%、最大耐力では11%大きく、鋼板が早期に剥
 離をしたが補強の効果は見られた。S-21Kの主鉄筋は
 既に曲げ変形を生じていたために、初期剛性が小さ
 い。変形性能を δ_u/δ_y で表すと無補強のS-00が3.8
 に対しS-21が8.4(途中で実験を中止したので推定値)、
 S-21Mが6.7、基部を円形に巻いたS-21Kが10.2と向上

している。このことは、せん断補強効果を発揮できていたことを示す。S-21M は剥離した鋼板のエッジでCFRPが早期に破断したためにじん性の伸びは小さかった。円形断面試験体では、曲げ補強を施したC-21Mは、C-00、C-21よりも降伏荷重で13%、最大耐力では17%大きく、鋼板が剥離し最大荷重は直ぐに下がったが、補強の効果が見られた。変形性能を $\delta u / \delta y$ で表すと無補強のC-00が8.7に対しC-21が15.9、C-21Mが17.3と大幅に向上している。

(3) ひずみ性状

図-9は水平変位-帯鉄筋・CFRPのひずみ関係を示したものである。S-21では $4\delta y$ までは帯鉄筋とCFRPに差がない、 $4\delta y$ 以降帯鉄筋は降伏した。CFRPのひずみは増加し $5\delta y$ で約3000 μ であった。

C-21では $4\delta y$ で帯鉄筋が降伏した。CFRPのひずみは増加し続け、終局では約3500 μ であった。これらのことからCFRPは有効に働いていたものと思われる。最大ひずみは5000 μ (応力度で1260MPa)程度が設計用値の約50%であった。

4. まとめ

以上の実験結果と考察の結果から、CFRPシートによる補強に関しまとめると次のようになる。

- ① 矩形断面の無補強試験体S-00はせん断破壊したが、CFRP巻立てを施した試験体ではせん断破壊したものはなく、せん断補強効果は十分であったと思われる。
- ② CFRP巻立てで横拘束したものは、明らかに変形性能が向上し、補強の効果が見られた。特に円形断面試験体、基部を円形に巻立てたS-21Kは著しくじん性が向上した。矩形橋脚の基部を円形に巻き立て補強することが、より有効であることが証明された。
- ③ 鋼板と併用で曲げ耐力の増加を図ったが、鋼板とCFRP間の付着切れにより、想定した曲げ耐力までは、向上できなかった。鋼板とCFRP間の剥離防止策を工夫し施すことで、耐力向上は十分可能であると思われる。アンカボルトを用いた鋼板の「はがれ」を抑える方法などは有効ではないかと思われる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、試験体の製作、実験に関して多大な協力を頂きました「炭素繊維シートによる既設橋脚耐震補強法研究推進会」各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本道路公団試験研究所：炭素繊維による鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案)
- 2) 建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様、1995年2月

表-3 実験結果

試験体 No.	実験結果					
	δy (mm)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	P_u (kN)	δu (mm)	$\frac{\delta u}{\delta y}$
S-00	8.6	487	666	533	32.8	3.8
S-21	8.7	503	677	542	73.3	8.4
S-21M	9.7	579	743	594	64.9	6.7
S-21K	9.7	410	703	562	98.5	10.2
C-00	6.0	226	329	263	51.9	8.7
C-21	5.9	244	342	274	93.7	15.9
C-21M	8.0	265	391	313	138.5	17.3

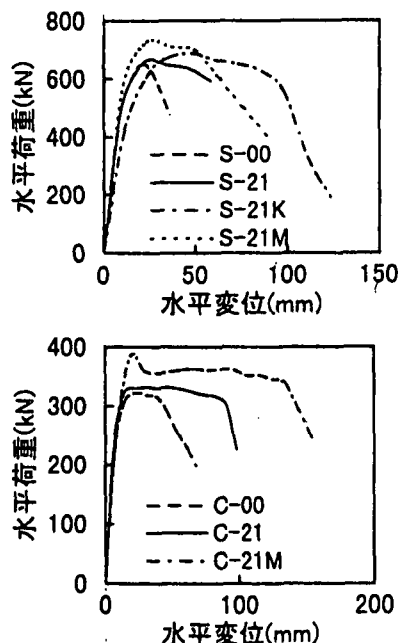


図-8 荷重-変位包絡線

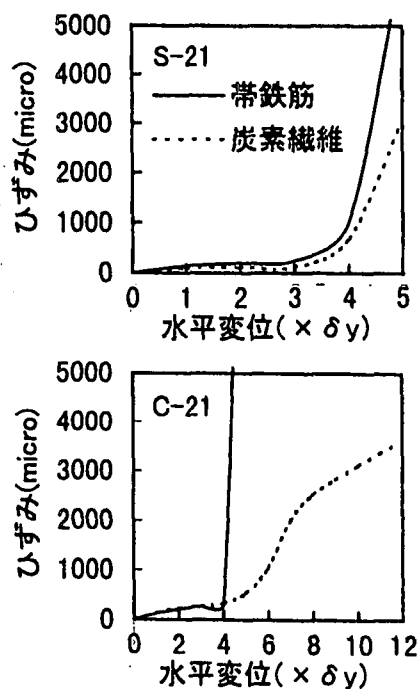


図-9 ひずみ性状