

## アラミド繊維による既設RC壁式橋脚の耐震補強に関する研究

Seismic retrofit method for RC wall type pier using aramid fiber

住友建設(株) 技術部 ○正員 安藤直文 (Naofumi Ando)  
 住友建設(株) 北海道支店 田端智也 (Tomoya Tabata)  
 北海道開発局 開発土木研究所 正員 池田憲二 (Kenji Ikeda)  
 北海道開発局 開発土木研究所 正員 三田村浩 (Hiroshi Mitamura)

## 1. まえがき

段落しを有するRC壁式橋脚の耐震補強工法として、アラミド繊維シート補強と貫通鉄筋による横拘束を併用する工法の補強効果は実験的に確認されている。<sup>1)</sup> また、中間貫通材としてアラミドFRPロッドにプレストレスを導入して用いることにより、壁式橋脚のせん断およびじん性を向上させる工法も開発されている。<sup>2)</sup> 本研究ではこれらの研究成果をもとに、段落しを有する壁式橋脚の耐震補強工法としてアラミド繊維シートとアラミドFRPロッドのプレストレスによる横拘束を併用する工法を提案し、載荷試験により補強効果を検証した。

## 2. 載荷試験

## 2.1. 試験体

昭和55年道路橋示方書耐震設計編に準拠して設計されたものを基準試験体S55Nとする。試験体は一般的なRC壁式橋脚をモデル化したものであり、橋脚形状は躯体高4.0m、断面寸法0.8×2.5m、フーチングの形状は2.5×3.5×1.0mである。橋脚主筋は基部から1.5mの位置で半数の段落しをしている。

一方、平成8年道示に示された耐震性能を確保できるように、アラミド繊維シートとアラミドFRPロッドによる補強を施したものを補強試験体S55S-1、S55S-2とする。アラミド繊維による補強効果を比較するため両者の補強量に差をつけ、S55S-1に比べてS55S-2は周方向アラミド繊維シート量を低減し、アラミドFRPロッドも水平方向間隔を粗く配置した。図-1に試験体概要図(S55S)を、写真-1に試験状況を示す。

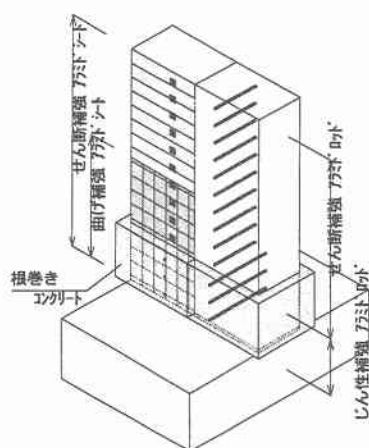


図-1 試験体概要図(S55S)

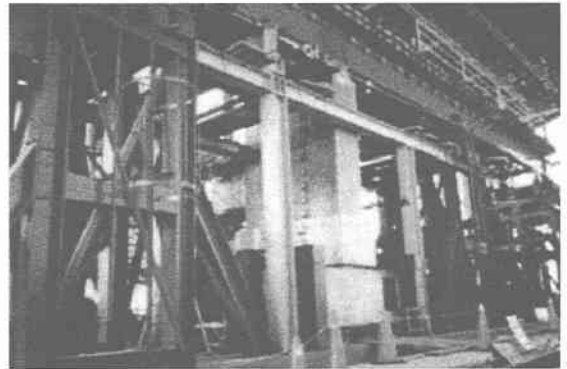


写真-1 試験状況

## 2.2. 補強設計

基準試験体S55Nを平成8年道示に基づいて耐震性を照査した結果、段落し部の曲げ、せん断耐力不足により耐震性がないと判断された。

これに対しS55S-1、2では段落し部の耐力向上とじん性能改善を目的に、破壊位置が段落し部から基部破壊に移行するように、段落し部にアラミド繊維シートとアラミドFRPロッドを導入したプレストレスによる中間拘束を併用する補強を施した。

中間拘束材へのプレストレス導入効果は、軸方向鉄筋のはらみ出しを防止し、内部コンクリートの拘束効果を高め、じん性能を大幅に改善することであり、同時にせん断補強にもなる。中間拘束材に導入した有効プレストレス量は中間拘束材の断面積の増加として評価し、式-1により体積比を算出した。

$$\rho = \frac{4 \cdot Ah \cdot \frac{f_y}{f_{sy}}}{s \cdot d} + \frac{4 \cdot Ah \cdot \frac{f_{pe}}{f_{sy}}}{s \cdot d} \quad (\text{式-1})$$

$\rho$  : 体積比  
 $Ah$  : 横拘束筋の断面積  
 $f_y$  : 横拘束筋の降伏応力  
 $f_{sy}$  : 鉄筋の降伏応力  
 $f_{pe}$  : 横拘束筋の有効緊張応力  
 $s$  : 横拘束筋の鉛直方向間隔  
 $d$  : 横拘束筋の横方向間隔

S55S-1は段落し部の曲げ補強としてアラミド繊維シート400kN級1層、せん断補強として600kN級を2層接着した。さらにじん性補強として、アラミドFRPロッド3φ7.4を中間拘束材として鉛直方向間隔0.5d(300mm)、水平方向間隔1d(880mm)で配置した。

一方S55S-2は、①フーチングの損傷を軽減 ②中間拘束材へのプレストレス導入効果を把握し補強の経済性を追求すること、を目的にアラミド繊維による補強量を低減した。段落し部の曲げ補強としてアラミド繊維シー

ト 400kN 級 1 層、せん断補強として橋脚下方部は 600kN 級を 1 層、上部には 400kN 級 1 層接着した。じん性補強としてアラミド FRP ロッド 3φ7.4 を鉛直方向間隔 0.5d(300mm)、水平方向間隔 1.5d(1150mm)で配置した。図-2 に試験体一般図、表-1 に補強総括、表-2 に試験体諸元、表-3 にアラミド繊維の材料特性を示す。

表-3 アラミド繊維の材料特性

アラミド繊維シート				
		400kN 級 アラミド'1	400kN 級 アラミド'2	600kN 級 アラミド'2
繊維目付量	g/mm <sup>2</sup>	280	235	350
1 層厚さ	mm		0.169	0.252
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	2058	2352	2352
引張弾性率	"	1.18E+05	7.84E+04	7.84E+04
破断伸度	%	1.8	3.0	3.0
保証耐力	kN/m	400	400	600

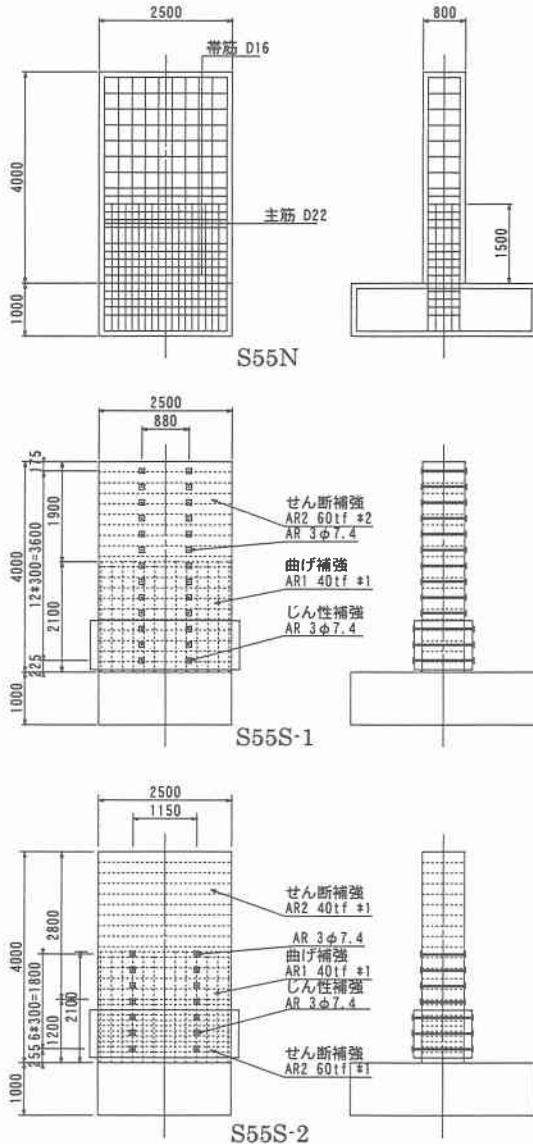


図-2 試験体一般図

表-1 補強総括

			S55N	S55S-1	S55S-2
躯体	コンクリート	$\sigma_{ck}=20.58\text{MP}$	20.4MP	23.0MP	23.0MP
	鉄筋	SD345	390MP	379MP	381MP
補強内容	段落部曲補強	アラミド繊維シート	—	400kN×1	400kN×1
	せん断補強			600kN×2	上400kN×1 下600kN×1
	じん性補強	アラミド FRP ロッド	—	3φ7.4 (880*300)	3φ7.4 (1150*300)

表-2 試験体諸元

主鉄筋	鉄筋比 %	帯鉄筋	中間帯鉄筋	帯鉄筋比 %
D22-19~10	0.85~0.43	D16@150~300	—	0.51

アラミド FRP ロッド			
		φ7.4	3φ7.4
有効断面積	mm <sup>2</sup>	42.4	127.2
公称断面積	"	48.8	146.4
保証耐力	kN	81.4	224.0
弾性係数(Ae)	kN/mm <sup>2</sup>	53.0	53.0

### 2.3. 載荷試験

載荷試験には図-3 に示す試験装置を用いた。橋長 30m、幅員 3m、総重量 1058kN の H 型鋼製連続桁、桁を支える橋台、支承、および架台からなる。支承条件は試験体上の中間支点をピン、桁両端部はローラーとした。この上下部工をモデル化した試験装置により上部工による橋脚天端の回転、変位の拘束を実構造物に忠実に再現した。荷重の載荷は実上部工の死荷重に相当する 662kN を鉛直力として作用させた状態で水平荷重を交番載荷した。載荷荷重はロードセルで、橋脚の変位は変位計にて計測した。

水平交番載荷は橋脚の主鉄筋に貼付けたひずみゲージの計測結果を基に主鉄筋が降伏ひずみに達したときの変位を降伏変位  $\delta_y$ 、そのときの荷重を降伏荷重  $P_y$  として、載荷荷重が低下するまで、 $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、...  $n\delta_y$  と変位振幅を漸増させ繰返し載荷した。繰返し回数は各振幅ごとに 5 回とし、1 回目の正負いずれかの載荷荷重が  $P_y$  を下回った時点を終局と定義した。また、5 回の内の 3 回目の結果を各変位振幅の代表としてデータ整理した。

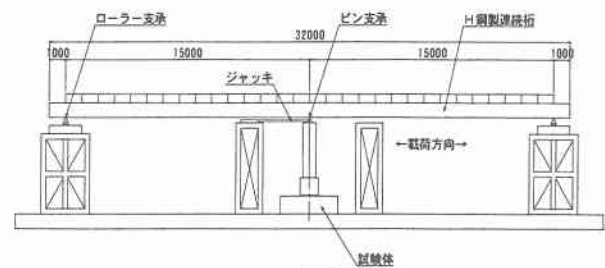


図-3 試験装置

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1. 荷重-変位関係

表-4 に荷重-変位の試験結果を、図-4 に荷重-変位曲線を示す。S55N では段落し部のせん断破壊を生じたため終局荷重が大きく低下している。

一方、補強を施した S55S-1、2 では終局時まで高いレベルの載荷荷重を保持している。また水平荷重の最大値が S55N に比べて大きくなっているが、プレストレスによる横拘束の影響によりコンクリートの圧縮強度が増加

したためと考えられる。終局時の変位、塑性率もかなり大きくなっており、大幅な変形性能の改善がなされたことが判る。試験結果は計算結果とも良く一致しており、理論とおりの補強効果が得られていることが判る。

S55S-1 について、主筋が初期降伏ひずみに達した時の載荷荷重は 370kN、変位量は正負平均で 19mm である。載荷荷重は  $2\delta_y$  から  $10\delta_y$  までの間で 530 から 580kN でほぼ一定である。 $2\delta_y$  で主筋段落し部のアラミド繊維シート樹脂部に微細な曲げひびわれが生じ、 $8\delta_y$  で曲げ補強区間のアラミド繊維シートの剥離が観察された。 $10\delta_y$  の 5 回目載荷時に最大荷重と同時に橋脚基部で主筋の一部が破断した。 $11\delta_y$  の 1 回目載荷時に橋脚主筋がほぼ全数破断した。

一方アラミド繊維による補強量を低減した S55S-2 も S55S-1 と同等の履歴曲線を描く。 $2\delta_y$  で主筋段落し部のアラミド繊維シート樹脂部に微細な曲げひびわれが生じ、 $2\delta_y$  で剥離が観察された。以降アラミド繊維シートの剥離は増大し、 $9\delta_y$  の 4 回目載荷時に段落し部が曲げ破壊して主筋の一部が破断した。

S55S-1、2 はプレストレス導入による横拘束の効果により柱主筋の座屈、はらみ出しが効果的に抑えられ、さらに S55N で生じた段落し部の損傷がアラミド繊維シート補強により抑えられたため、橋脚基部の塑性ヒンジ形成によりじん性能が向上したものと考えられる。

S55S-1 と 2 で履歴曲線に大差ないことから、配置間隔 1.5d 以下の範囲では横拘束筋に導入したプレストレスの効果は同程度であると考えられる。

図-5 に荷重-変位量の包絡線を示す。S55S-1、2 はほとんど同一の包絡線を描き、補強により包絡線領域が拡大し、変形性能の向上が明らかである。

表-4 試験結果

	変位 (mm)		荷重 (kN)			終局時	塑性率 $\delta u / \delta_y$
	降伏	終局	降伏	最大	終局		
S55N	21.4 (17.6)	138.5 (28.1)	373 (440)	521 (485)	360 (485)	6 $\delta_y$	6.5 (1.6)
S55S-1	19.1 (21.0)	190.1 (188.3)	370 (450)	583 (550)	546 (550)	10 $\delta_y$	10.0 (9.0)
S55S-2	24.6 (20.7)	193.2 (175.2)	448 (461)	577 (548)	532 (548)	9 $\delta_y$	7.9 (8.5)

( )内は計算結果

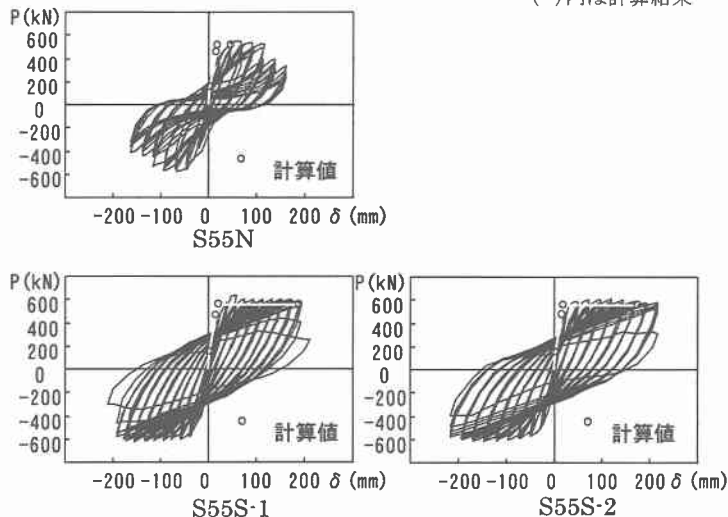


図-4 荷重-変位関係

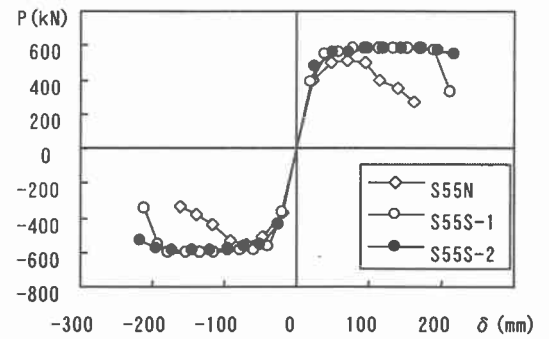


図-5 荷重-変位包絡線

### 3.2. エネルギー吸収能

図-6 に変位量と吸収エネルギーの関係を示す。横軸は各変位振幅での最大変位量、縦軸は 1 回の変位振幅の吸収エネルギーを示す。補強した S55S-1、2 は変位量の増加と共に吸収エネルギーは線形に増加しており、安定した履歴性状であり終局時まで安定したエネルギー吸収性能を保持していることが判る。

S55S-1、2 は同様の曲線を描き、S55N と比べて変位と吸収エネルギー量のなす勾配が急であり、終局時の吸収エネルギーは 3 倍以上大きくなっている。S55N は段落し部の主筋の破断により  $6\delta_y$  以降で吸収エネルギーが低下している。

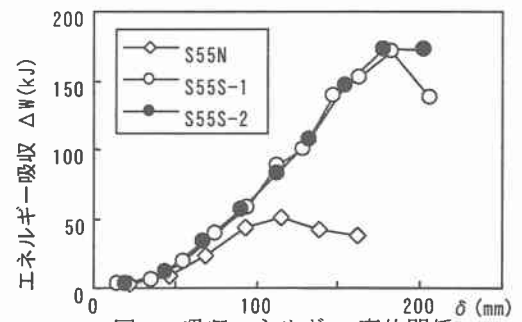


図-6 吸収エネルギー-変位関係

### 3.3. 等価減衰定数

図-7 に変位量と等価減衰定数の関係を示す。S55S-1、2 と S55N を比較すると、 $1\delta_y$  においては等価減衰定数の差は見られないが、変位が大きくなるにつれてその差は大きくなっている。また S55S-1、2 は同様の曲線を描き終局時まで線形的に増加しており、終局時まで安定してエネルギー吸収性能を保持していることが判る。

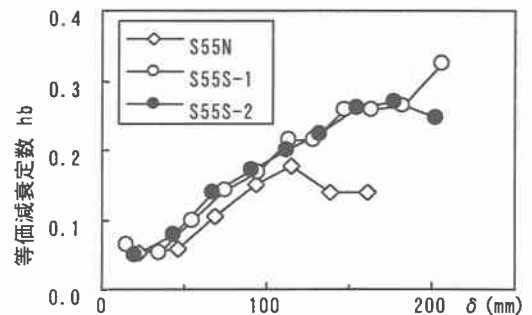


図-7 等価減衰定数-変位関係

### 3.4. 等価剛性

図-8 に変位量と等価剛性の関係を示す。等価剛性は変位振幅の増加に伴って指数関数的に減少している。初期等価剛性の差は曲げ補強の有無の影響であるが、終局まで同等の差を保っている。S55S-1、2 では鋼板巻立てやコンクリート巻立て工法のように極端に橋脚の曲げ剛性を増加させることなくじん性を改善できたことを示しており、アラミド繊維シート補強による橋脚剛性の増加が変形性能の低下をもたらしておらず、所定のじん性能を有していることが判る。

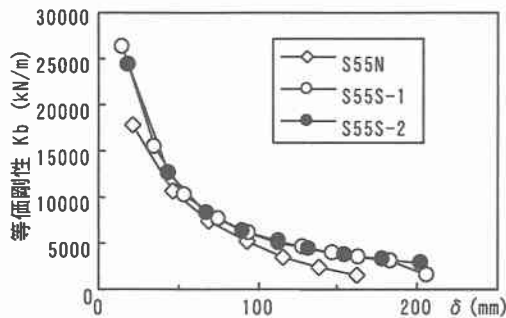


図-8 等価剛性-変位関係

### 3.5. アラミド FRP ロッドのひずみ

図-9 に S55S-1、2 における各変位振幅とアラミド FRP ロッドのひずみ関係を示す。増加ひずみ量は 2000  $\mu$  以下で、プレストレス導入によるひずみ 16000  $\mu$  と加算してもアラミド FRP ロッドの終局ひずみ 33333  $\mu$  に対して十分に余裕がある。

S55S-1 では 1~5  $\delta y$  ではひずみ増加はほとんどない。プレストレス力がはらみだし力よりも卓越しているため、アラミド FRP ロッドに張力増加が生じなかったものと考えられる。ひずみが漸増する 6  $\delta y$  以降で、はらみだし力がプレストレスを上回ったものと考えられる。

これに対しアラミド FRP ロッド配置間隔を粗くし補強量を低減した S55S-2 では載荷初期からひずみ増加が見られる。

以上よりアラミド FRP ロッドにプレストレスを導入することにより、主筋の座屈、かぶりコンクリートの剥落やはらみだしの発生を効果的に抑制し、橋脚の変形性能を向上させていることが判る。

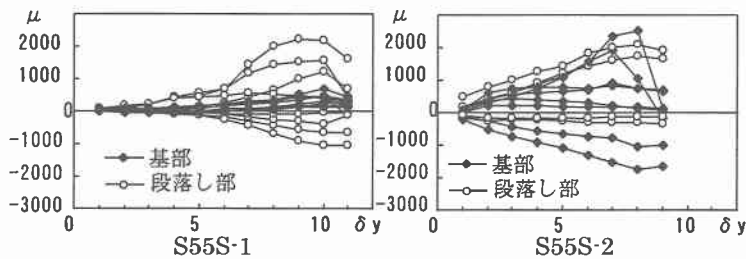


図-9 アラミド FRP ロッドのひずみ

### 3.6. 橋脚の変位

図-10 に変位量と橋脚の変形量との関係を示す。S55N では段落し部がせん断破壊したため、橋脚基部より 1000~2000mm の区間で曲率が変化し、主に段落し部より上

方で変形が進行した。これに対し S55S-1 ではいずれの時期においても変位と位置の関係はほぼ線形性を保ち、段落し位置(H=1500mm)で大きな橋脚中折れはなさそうである。また S55S-2 では段落し部の曲げ破壊に起因して終局を迎え、橋脚の中折れは最終振幅時のみ認められる。

補強を施した S55S-1、2 では橋脚基部に塑性ヒンジが形成され、塑性ヒンジの回転のみで橋脚の変形を支配していることを示している。

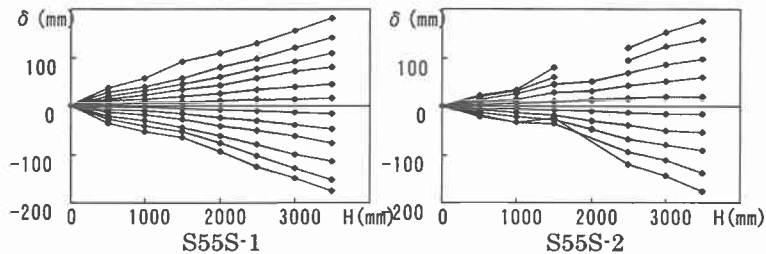


図-10 橋脚の変形 H: 橋脚高

### 4. まとめ

段落しを有する RC 壁式橋脚の耐震補強工法としてアラミド繊維シートと中間拘束材として用いたアラミド FRP ロッドのプレストレスによる横拘束を併用し、耐震性能を大きく改善する工法を提案し、その補強効果を実験的に検証した。試験の結果、補強によりエネルギー吸収性能が大きく向上し、終局まで安定して載荷荷重を支持でき、じん性が大きく改善できることが確認された。また段落し部の損傷を効果的に抑制できることが明らかになった。

本研究によって得られた知見は以下の通りである。

- ① 段落しを有する RC 壁式橋脚の耐震補強工法としてアラミド繊維シートとアラミド FRP ロッドのプレストレスによる横拘束を併用する工法は、コンクリートの内部拘束を高め、主筋の座屈を抑えることにより、じん性の向上とせん断補強に対して有効である。
- ② 中間拘束材にプレストレスを導入する効果は、中間拘束材の断面積の増大と見なせ、中間拘束材の体積比に有効プレストレス量を鉄筋換算したものを加算できる。
- ③ 中間拘束材にプレストレスを導入する場合、その水平方向間隔が橋脚厚の 1.5 倍程度以下の範囲ではプレストレスの効果が有効である。

### 参考文献

- 1) 連続繊維により補強した RC 橋脚の荷重-変位に関する実験 土木学会北海道支部 論文報告集第 55 号 I -69 佐藤ほか
- 2) プレストレスを導入した壁式橋脚耐震補強工法の設計・施工要領(案) 平成 10 年 3 月 日本道路公団 東京第一建設局