

# 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

住友建設株式会社	正会員	安藤直文
”		田端智也
北海道開発局開発土木研究所	正会員	池田憲二
”	正会員	三田村浩

## 1. はじめに

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. 試験概要

### 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基準試験体(S55N)に対し、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)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 であり、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。図-1 に試験体概要図(S55S)を、写真-1 に試験全景を示す。

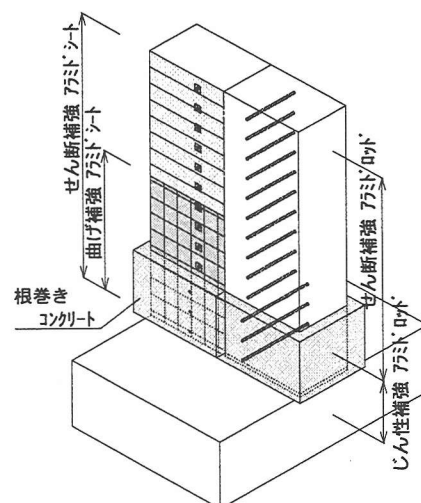


図-1 試験体概要図 (S55S)

試験体のコンクリートの設計基準強度は 20.58MPa、試験時の材令における平均圧縮強度は 23.0MPa である。鉄筋は SD345 を用い、降伏点は 379MPa である。表-1 に補強試験体の使用材料一覧、表-2 に試験体諸元一覧、図-2 に基準試験体(S55N)、補強試験体(S55S)の一般図を示す。

### 2. 2. 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

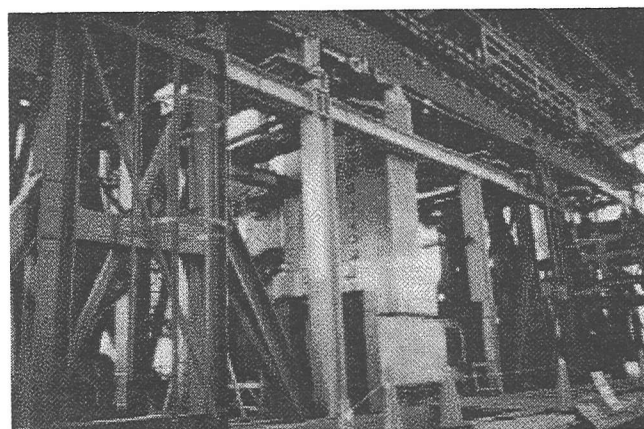


写真-1 試験全景

キーワード：耐震補強、壁式橋脚、アラミド繊維シート、アラミド FRP ロッド

連絡先：〒160-8577 東京都新宿区荒木町 13 番地の 4 Tel.03-3225-5134 Fax.03-3353-6656

表-1 使用材料一覧

使用材料		
コンクリート	$\sigma_{ck}=20.58\text{MPa}$	(23.0MPa)
鉄筋	SD345	(379MPa)
アラミド繊維シート	段落し部曲げ補強 段落し部せん断補強	400kN級×1層 600kN級×2層
アラミドFRPロッド	段落し部せん断補強 基部じん性補強	3φ7.4 〃

アラミド繊維シートの材料特性

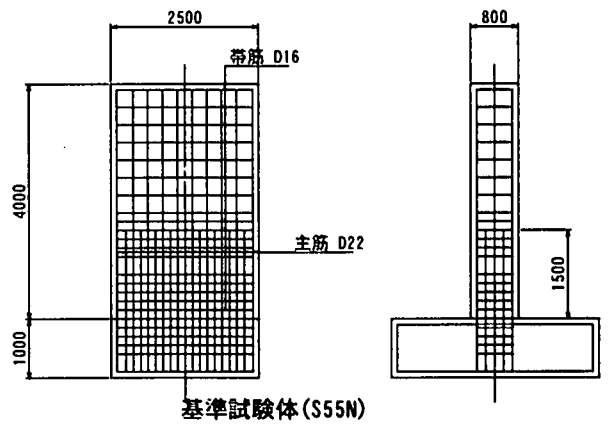
		400kN級 アラミド'1		600kN級 アラミド'2	
繊維目付量	$\text{g/m}^2$	280	350		
1層厚さ	mm	0.193	0.252		
引張強度	$\text{N/mm}^2$	2058	2352		
引張弾性率	〃	1.18E+05	7.84E+04		
破断伸度	%	1.8	3.0		
保証耐力	$\text{kN/m}$	392	588		

アラミドFRPロッドの材料特性

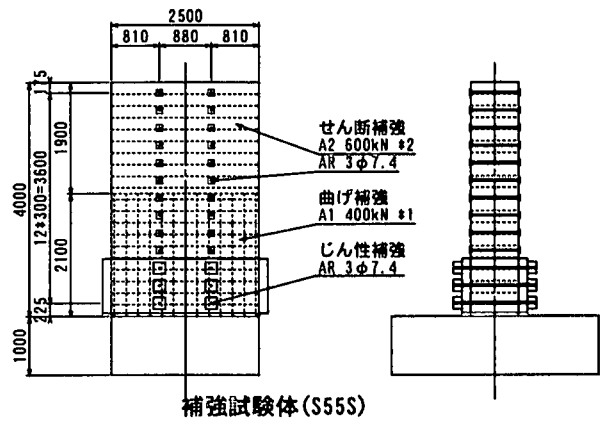
		φ7.4		3φ7.4	
有効断面積	$\text{mm}^2$	42.4	127.2		
公称断面積	〃	48.8	146.4		
保証耐力	kN	81.4	224.0		
弾性係数(Ae)	$\text{kN/mm}^2$	53.0	53.0		

表-2 試験体諸元一覧

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



基準試験体 (S55N)



補強試験体 (S55S)

図-2 試験体一般図

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。

水平交番載荷は柱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、 $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $\dots$ 、 $n\delta_y$  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。

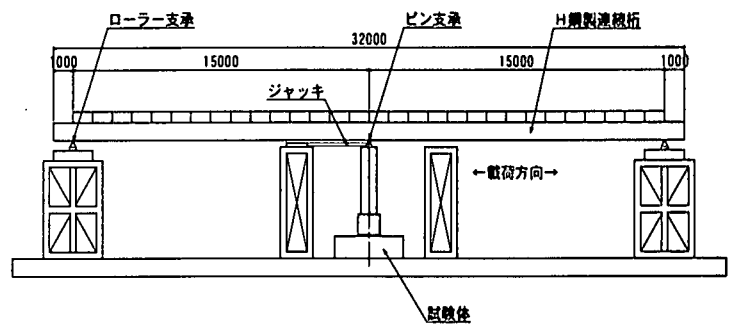


図-3 試験装置

### 3. 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 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

表-3 計算結果総括

	単位	基準試験体 S55N		補強試験体 S55S		
		タイプ I	タイプ II	タイプ I	タイプ II	
地震動		タイプ I	タイプ II	タイプ I	タイプ II	
せん断耐力	$P_s$	kN	605	713	1919	2028
コンクリート	$S_c$	kN	328	437	328	437
既設鉄筋	$S_s$	kN	276	276	276	276
AFシート	$S_{af}$	kN	-----	-----	859	859
AFRPロッド	$S_f$	kN	-----	-----	456	456
終局水平耐力	$P_u$	kN	496	499	549	550
破壊形態			曲破壊型 段落し	曲破壊型 段落し	曲破壊型 基部	曲破壊型 基部
地震時保有水平耐力	$P_a$	kN	496	499	549	550
残留変位	$\delta_R$	m	0.009	0.112	0.007	0.105

プレストレスによる中間拘束を併用する補強を施した。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300mmピッチで2列配置しプレストレスを導入した。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。表-3に計算結果一覧、図-4に補強前後の耐力比較を示す。

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。

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

ρ：体積比  
 Ah：横拘束筋の断面積  
 fy：横拘束筋の降伏応力  
 fsy：鉄筋の降伏応力  
 fpe：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

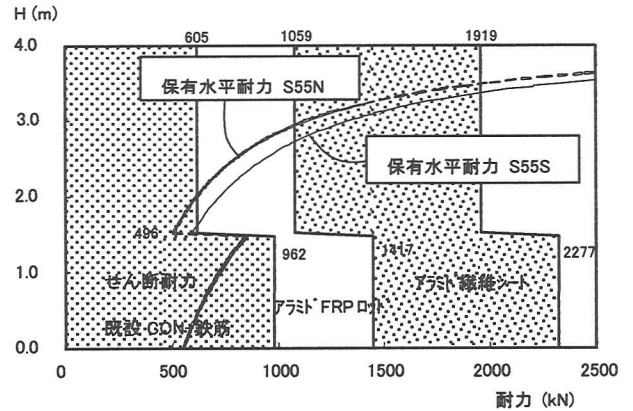


図-4 耐力比較 H:橋脚基部からの距離

#### 4. 試験結果および考察

##### 4. 1. 荷重-変位関係

表-4に荷重-変位の試験結果を、図-5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、S55Sでは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。また終局時の変位が大きく、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。S55Sの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2δyから10δyまでの間で530kNから580kNでほぼ一定である。2δy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、8δy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。10δy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。11δyの1回目載荷時に橋脚主筋がほぼ全数破断し荷重強度が降伏荷重を下回った。最終変位量は正負平均で190mm じん性率は10.0であった。荷重-変位曲線は終局時まで紡錘型の安定したループを描き、終局時まで安定した変形性能を有していることが判る。

表-4 試験結果

	変位 (mm)		荷重 (kN)			終局時	塑性率 δu/δy
	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)	6σy	6.5 (1.6)
S55S	19.1 (21.0)	189.8 (188.3)	370 (460)	583 (549)	545 (549)	10σy	10.0 (9.0)

( )内は計算結果

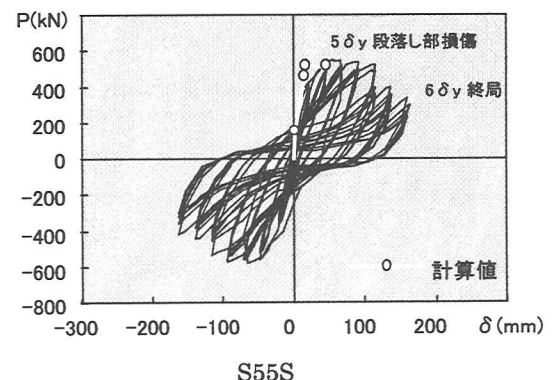
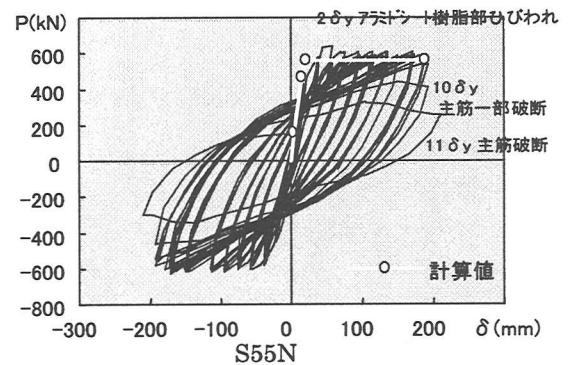


図-5 荷重-変位関係

図-6 に荷重-変位量の包絡線を示す。S55S では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。

#### 4. 2. エネルギー吸収能

図-7 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 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。

また S55S は最大変位と吸収エネルギー量のなす勾配が急であり、S55N と比べて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。

#### 4. 3. 等価減衰定数

図-8 に変位量と等価減衰定数の関係を示す。横軸は各変位振幅での最大変位量、縦軸は1回の変位振幅の等価減衰定数を示す。S55S 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 は終局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。

#### 4. 4. 等価剛性

図-9 に変位量と等価剛性の関係を示す。横軸は各変位振幅での最大変位量、縦軸は1回の変位振幅の等価剛性を示す。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 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。

#### 4. 5. 破壊性状

図-10 に S55S における終局時の破壊性状を示す。曲げ補強用のアラミド繊維シート樹脂部にひびわれが見られ、ほぼ全域に剥離が生じている。外観では主筋段落し位置における極端な破壊は見られない。橋脚基部のコンクリートは圧壊しているものの、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、はらみ出しは観察されなかった。フーチング部は、柱主筋の引抜きによりかぶり部が剥離している。補強により S55N で生じた段落し部の損傷が抑えられ、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。

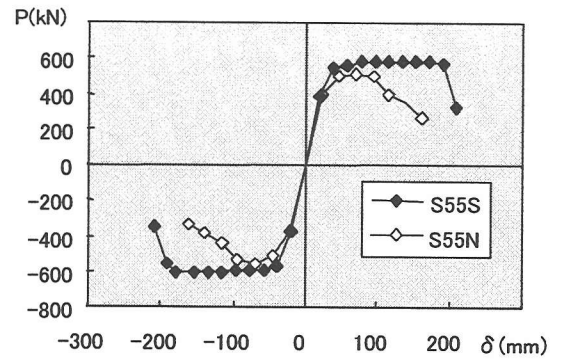


図-6 荷重-変位 包絡線

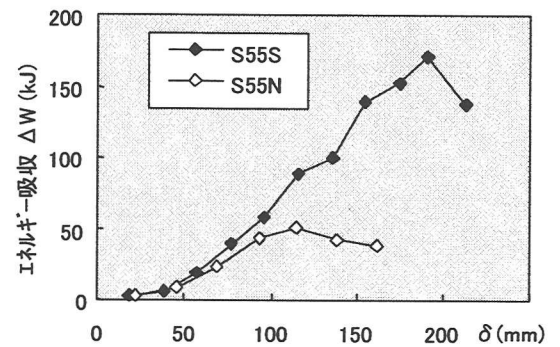


図-7 吸収エネルギー-変位

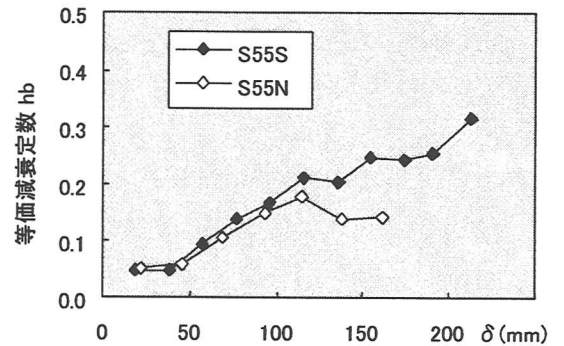


図-8 等価減衰定数-変位

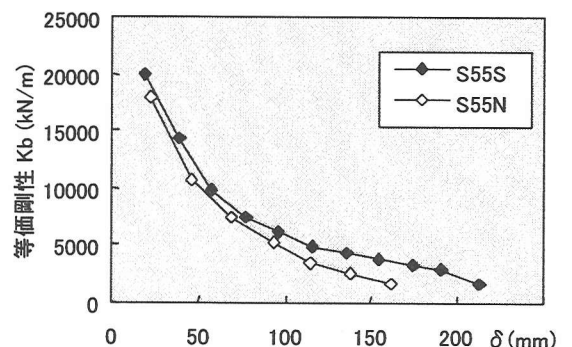


図-9 等価剛性-変位

#### 4. 6. 鉄筋のひずみ

図-11にS55Nにおける鉄筋ひずみと変位振幅の関係を示す。主筋ひずみは変位振幅の増加に伴い基部と段落し部で増加している。基部では $3\delta y$ 以降ひずみ量がほぼ定常状態となるのに対し、段落し部ではさらにひずみが増加し終局に至る。基部と段落し部の耐力の大小関係より、段落し部が基部よりも先行して損傷し塑性ヒンジ状態となり、これ以降、荷重荷重による橋脚の水平変位は、主に段落し部で受け持つことになり、基部の主筋ひずみは増加しなくなったと考えられる。

前面帯筋のひずみは段落し部において $5\delta y$ 時に急激に増大している。このとき主筋の座屈、はらみ出しが生じたものと考えられる。一方、基部では終局までほとんど増加しない。主筋ひずみがある程度以上増加しなかったことを考え合わせると、基部では主筋の座屈、はらみ出しが生じなかったものと考えられる。側面帯筋のひずみも段落し部位置で大きく増加しており、せん断耐力不足によるこの位置での損傷を裏付けている。

試験の観察結果より、 $1\delta y$ 時に基部近傍に約20cmピッチでひびわれが生じ、 $2\delta y$ 時に損傷は段落し部に移行した。その後損傷は段落し部に集中し、 $5\delta y$ の2~3回目で段落し部の損傷が著しくなり、 $6\delta y$ の1回目で急激に荷重が低下した。終局時には、主筋の座屈、破断とともに、かぶりコンクリートの剥落およびせん断ひびわれが発生した。

主筋、前面帯筋のひずみは破壊の観察結果とも一致し、段落し部先行型の破壊形態を裏付けるものである。計算結果からもS55Nは段落し部の曲げ破壊型であり、理論とおりの破壊形態である。

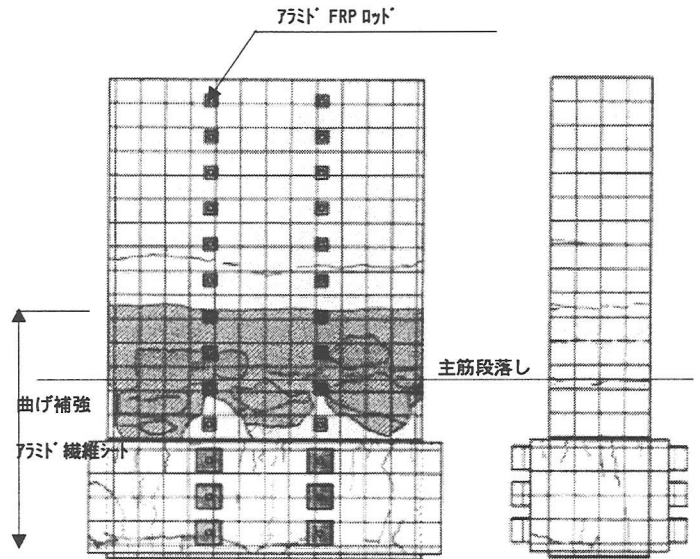


図-10 破壊性状 (S55S)

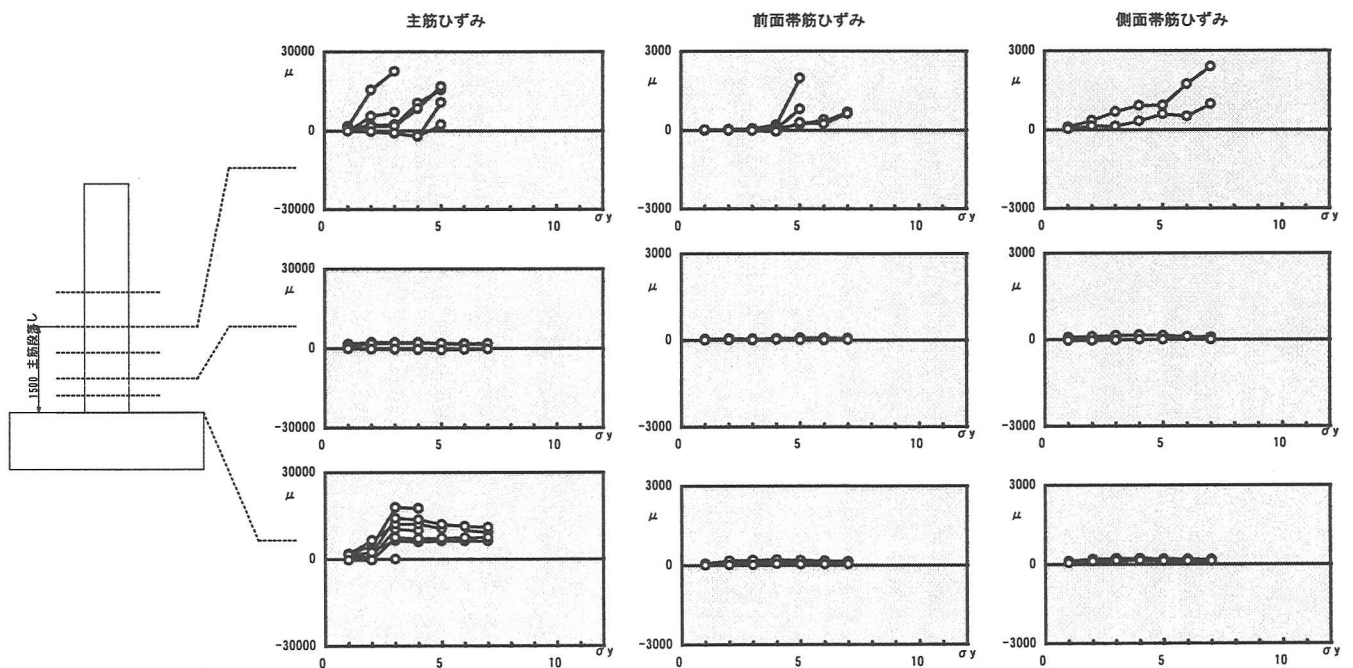


図-11 鉄筋ひずみ (S55N)

図-12にS55Sにおける鉄筋ひずみと変位振幅の関係を示す。主筋ひずみは先ず $3\delta y$ 時に基部で増加し、少し遅れて段落し部が増加する。これ以外の位置ではほとんど増加しない。アラミド繊維シートによる曲げ補強により段落し部の主筋ひずみが抑えられたためと考えられる。また、塑性化領域は基部から $0.5d$ 程度と推察され、アラミドFRPロッドにより導入したプレストレスの拘束圧による塑性ヒンジ領域の狭小化はなさそうである。

前面帯筋のひずみは基部のみで緩やかに増大している。アラミドFRPロッドにより導入したプレストレスにより、主筋の座屈、はらみ出しが抑制されたためと考えられる。基部以外の断面ではひずみ増加は僅かであり、はらみだしはほとんど生じていない。

側面帯筋のひずみは基部と段落し部で増加しているものの、その量は $500\mu$ 以下と微少である。S55SはアラミドFRPロッドとアラミド繊維シートによる補強によりせん断耐力が大幅に向上しており、帯筋のひずみはさほど増加しなかったものと思われる。

主筋と帯筋の計測結果から、補強により段落し部の損傷が抑えられ、基部に塑性ヒンジが形成され、基部先行型の破壊形態となっていることは明らかである。S55Sにおける段落し部の補強が理論通り有効であると考えられる。

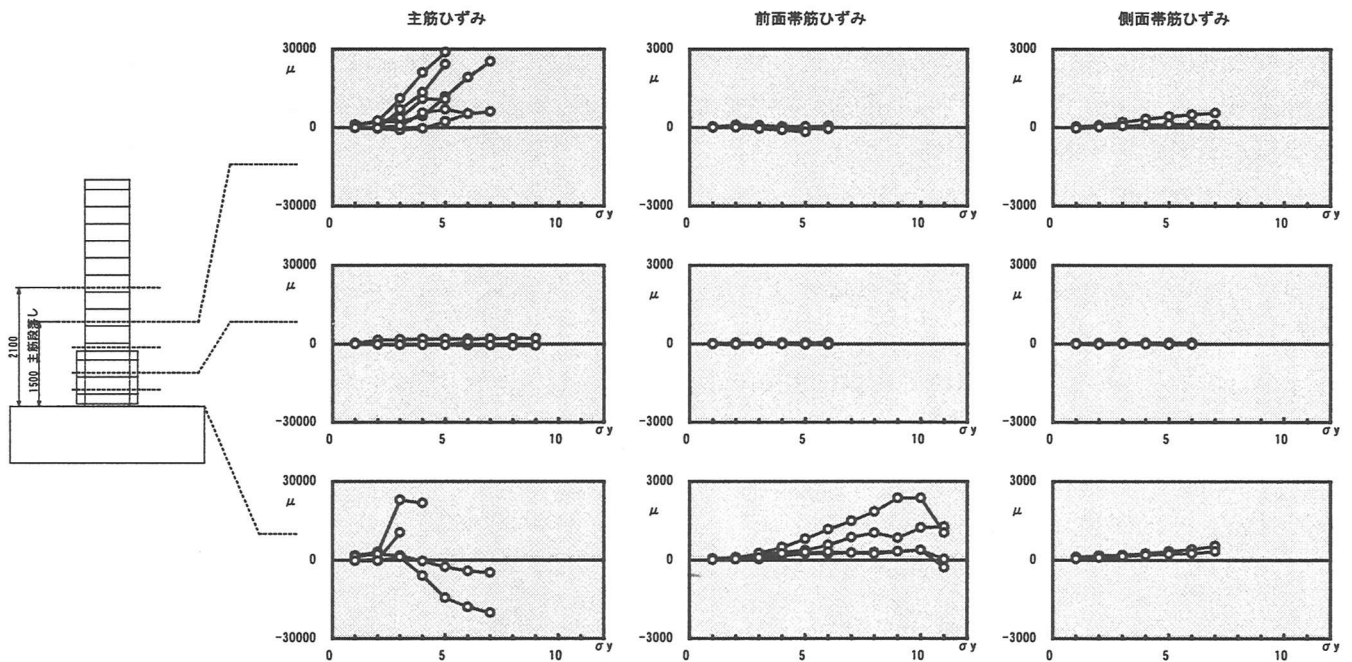
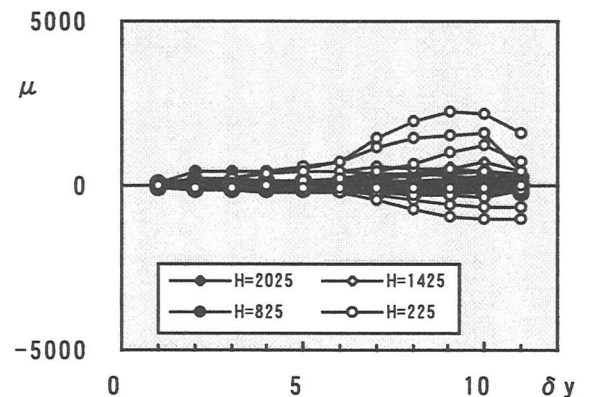


図-12 鉄筋ひずみ (S55S)

#### 4. 8. アラミドFRPロッドのひずみ

図-13にS55S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。測定位置Hはフーチング天端からの距離を示す。増加ひずみ量は $3000\mu$ 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。1~ $5\delta y$ ではひずみ増加はほとんどない。プレストレス力の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力を上回ったものと考えられる。10 $\delta y$ 以降ではひず



H: 計測位置 橋脚基部からの距離

図-13 アラミドFRPロッドのひずみ (S55S)

みが減少している。これは主筋の破断によりアラミド FRP ロッドに生じる張力が減少したためであり、アラミド FRP ロッドが弾性範囲内で挙動し、終局時まで補強効果を保持していることを示している。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。

#### 4. 9. アラミド繊維シートのひずみ

図-14 に S55S におけるアラミド繊維シート（水平方向前面、水平方向側面、鉛直方向前面）のひずみ関係を示す。水平方向のひずみほとんど増加していない。計測位置が段落し部とずれており最大ひずみを得られていない可能性があるが、アラミド FRP ロッドとアラミド繊維シートによるせん断補強によりせん断耐力が大幅に向上しているためと思われる

水平方向に比べて鉛直方向ひずみはやや多い。段落し部の主筋ひずみが増加する  $3\delta y$  以降増加しており、橋脚の曲げ負担が主筋からアラミド繊維シートに移行したことを裏付けている。

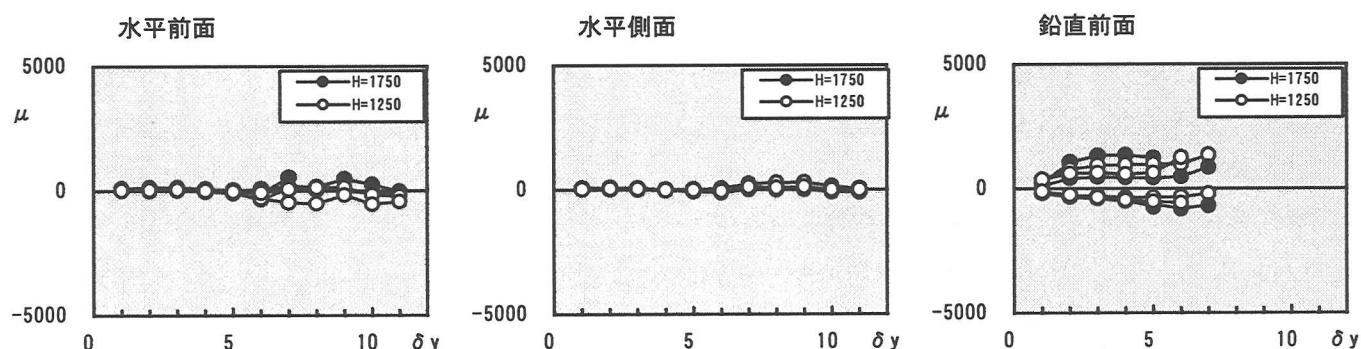


図-14 アラミド繊維シートのひずみ (S55S) H:計測位置 橋脚基部からの距離

#### 4. 10. 橋脚の変位

図-15 に変形量と橋脚の計測位置との関係を示す。S55S 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=1500)で大きな橋脚中折れはなさそうである。S55N では基部から 1000~2000mm の区間で曲率に変化し、主に段落し部より上方で変形が進んでいるものと考えられる。

図-16 は橋脚の変位量について、区間変位量を区間長で除したものと橋脚の計測位置との関係を示す。すなわち縦軸は各区間における橋脚の傾斜角の変化量を表す。S55S では基部において傾斜の変化量が大きく、基部以外の領域では大きな変形はない。これは基部に塑性ヒンジが形成され、塑性ヒンジの回転変形のみで橋脚変形を支配していることを示している。基部以外の断面では各変位振幅ごとの差が小さいことより、終局時まで大きな損傷なく安定した変形性能を有していることが判る。

一方 S55N は  $1\sim 3\delta y$  では基部の変形量が大きく段落し部の値は小さい。 $4\delta y$  以降逆転し段落し部の値が大きくなる。段落し部の損傷進行により橋脚の変形が基部から段落し部に移行したのと考えられる。

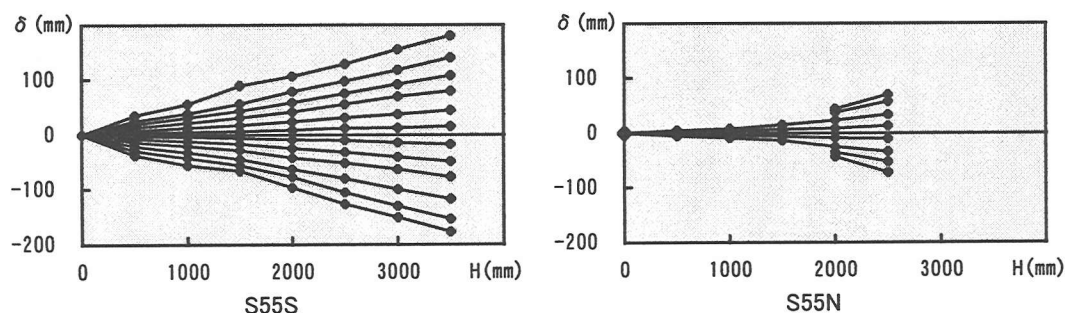


図-15 橋脚の変位 H:計測位置 橋脚基部からの距離

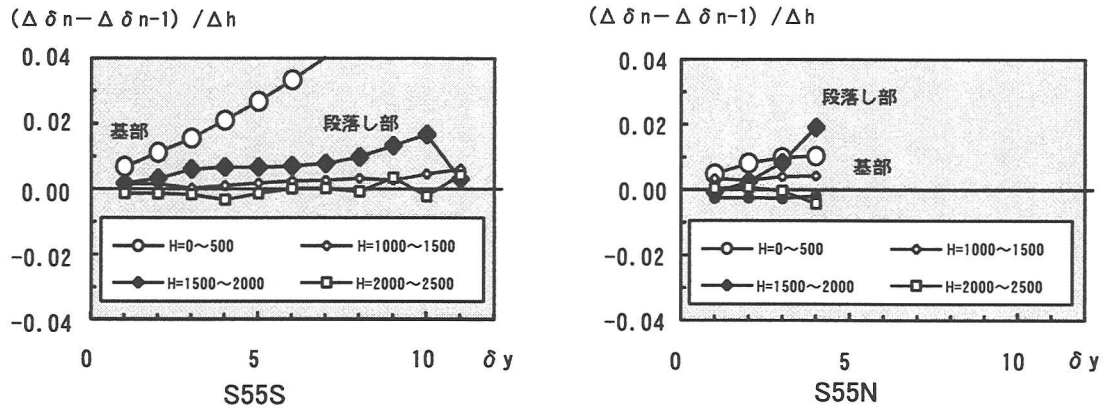


図-16 橋脚の変位変化量 H:計測位置 橋脚基部からの距離

## 5. 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。

## 6. おわりに

中間拘束材にプレストレスを導入することにより、中間拘束材の体積比を増加し配置本数を減少することができる。既設橋脚の耐震補強においては、中間拘束材の削孔数を減らすことが可能で、構造物の健全性確保と施工性の点で有利となる。

本稿では主筋のはらみだしに対する抵抗として、中間拘束材のプレストレスによる拘束効果を考えた。今後、根巻きコンクリートを抵抗部材としてを評価することにより中間拘束材の配置本数をさらに減じ、より経済的で作業性に優れた補強工法を検討すること、橋脚基部の塑性ヒンジを再評価しフーチングへの影響を最小限とすることが今後の課題である。

### [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