

## 既存RC橋脚の新しい耐震補強工法

鹿島 古市 耕輔\*、増川 淳二\*\*  
鹿島 天野 玲子\*\*、村山八洲雄\*\*

既に建設され供用されている橋梁や高架橋の鉄筋コンクリート製橋脚のうち、旧基準で設計された耐震性の低いものについては、耐震補強することが急がれている。そこで、今回RC巻き立てを対象とした、かぶりコンクリートを除去しない合理的で施工性の良い3つの工法、(1)壁式橋脚を対象にしたウォータージェットによるスリットを用いて中間帯鉄筋を配置する工法、(2)円柱橋脚を対象にしたPC鋼より線巻き付け工法、(3)高強度鉄筋を用いたRC巻き立て工法、を開発し、それぞれの方法について補強前・補強後の模型試験体を制作し、交番加力実験を行いその効果を確認した。

### 1. はじめに

阪神・淡路大震災は、家屋だけではなく鉄道や道路構造物にも大きな被害をもたらした。特に、橋梁や高架橋の鉄筋コンクリート（以下RC）橋脚の脆性的な崩壊に伴う被害は甚大であった。これらの被災した構造物の中でも、昭和40年前後の旧基準で設計されたものの被害率が大きいと報告されている。

RC橋脚の旧基準は、現行の基準と較べて、設計震度が低い、段落し部の定着長の余裕（部材高さ分）が無い、許容せん断応力度が現行の約1.5倍、最小帯筋量の規定が無い等の相違点がある。その結果、基部の曲げ破壊の他に、段落し部などでのせん断破壊で壊れた橋脚が多数見られた。

したがって、旧基準で設計された耐震性の低いRC橋脚については、現在の耐震基準レベルもしくは、場合によってはそれ以上の耐震基準レベルまで耐震補強する必要がある。

耐震性能を向上させる方法としては、横方向鉄筋等を増やして、部材のもつ粘りを大きくして地震エネルギーを吸収するための「部材の変形性能を向上させる方法」と、断面耐力を大きくして、力により地震力に抵抗する「部材の耐荷力を向上させる方

法」がある。現在、計画や工事が進められている耐震補強工法としては、RC巻き立て工法、鋼板巻き立て工法及び炭素繊維などの新素材巻き立て工法等が挙げられる。この中でRC巻き立て工法は、建築限界が厳しいところでは適用が困難なものの、工費が安価で補強効果が高いため、より合理的な工法が望まれていた。また、壁式橋脚については、必ずしも有効な補強工法が無かった。

そこで、今回はRC巻き立て工法を対象にした合理的かつ施工性の良い、次に示す3つの工法を考案し、それぞれの方法について補強前・後の模型試験体を製作し、交番加力実験を実施した。

### 2. 工法の概要

#### (1) スリットを用いて中間帯筋を配置する工法

これは、「部材の変形性能を向上させる方法」で、特に壁式橋脚を対象とした工法である。

壁式橋脚は断面が細長い長方形であるため、中間帯鉄筋が無い橋脚では、帯鉄筋によるコンクリートの拘束効果が少なく、しかも段落しがあると脆性的な破壊を示す可能性がある。そこで、中間帯鉄筋を配置することで、コンクリートの拘束効果を高め、せん断耐力も増加させられるため、耐震性を向上させることが期待できる。しかし、従来の方法で既存の橋脚に中間帯鉄筋を配置する場合、各中間帯鉄筋を配置する位置に各々削岩機等によりあなを開け、

キーワード：阪神・淡路大震災、橋脚、耐震補強

\* 鹿島関東支店, 0489-62-7078

\*\* 鹿島技術研究所第一研究部, 0424-89-7076

表-1 各試験体の諸元

	試験体No	壁式橋脚		円柱橋脚		耐荷力向上シリーズ		
		補強前	補強後	補強前	補強後	補強前	普通強度鉄筋補強	高強度鉄筋補強
		a	b	c	d	e	f	g
柱筋比	基部 (%)	3.47	2.71	1.55	1.08	1.59	1.62	1.62
	段落し部 (%)	1.13	0.88					
帯筋比 (%)		0	0.88	0.051	0.302	0.068 (一般部)	0.106 (一般部)	0.137 (一般部)
						0.136 (基部)	0.212 (基部)	0.274 (基部)
せん断スパン比		4.7	3.9	3.6	3.0	5.0	4.3	4.3
軸応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )		7.4	5.78	18	12.5	15.3	11.5	11.5
せん断耐力 曲げ終局耐力		0.87	3.60	1.19	2.98	1.39 (一般部)	1.38 (一般部)	1.35 (一般部)
		(段落し部)				1.66 (基部)	1.75 (基部)	1.79 (基部)

鉄筋を配置後にグラウトを行うことになる。この場合、中間帯鉄筋の定着のためのフックの施工や、鉄筋の配置された小径の横穴へのグラウト作業などの施工性・確実性及び作業現場周辺への環境問題など様々な問題があった。そこで、壁式橋脚にウォータージェットを用いて既存の鉄筋を残したままスリットを設け、そこに中間帯鉄筋を配置することとした。

(2) PC鋼より線巻き付け工法

これも、「部材の変形性能を向上させる方法」で、特に円柱橋脚を対象とした工法である。

円柱橋脚については、帯鉄筋にあたるフープ筋がしっかりと定着されており、その配置間隔が密であれば十分な粘りのある構造となることから、施工性を考えて、PC鋼より線を直接柱表面に巻き付け、その上を防食のためにコンクリートで被覆する方法を対象とした。本工法では、従来柱鉄筋に直接巻き付けることで効果があるとされていた拘束鋼材(フープ筋、スパイラル筋)を、かぶりコンクリートを除去せず、目粗しのみを施したコンクリート柱表面に巻き付けるもので、耐震補強を考えた場合、コンクリートの増し厚が少なくすみ、施工性も改善される。

(3) 高強度鉄筋を用いたRC巻き立て工法

これは、「部材の耐荷力を向上させる方法」として、RC巻き立て部の柱鉄筋に高強度鉄筋を用いることにより、後施工の鉄筋量を増加させずに断面耐力を向上させる方法である。現在の普通鉄筋を用いたRC巻き立てでは、断面をあまり大きくせずに耐力を大幅に大きくする場合には、鉄筋量が大きく柱筋を

基礎に定着するための後施工アンカーの本数が多くなるため、定着の間隔が狭くなり定着効率が落ちるほか、施工に非常な手間がかかり問題となっていた。そこで、柱筋に高強度鉄筋を用い施工性の向上を図ることとした。

3. 実験概要

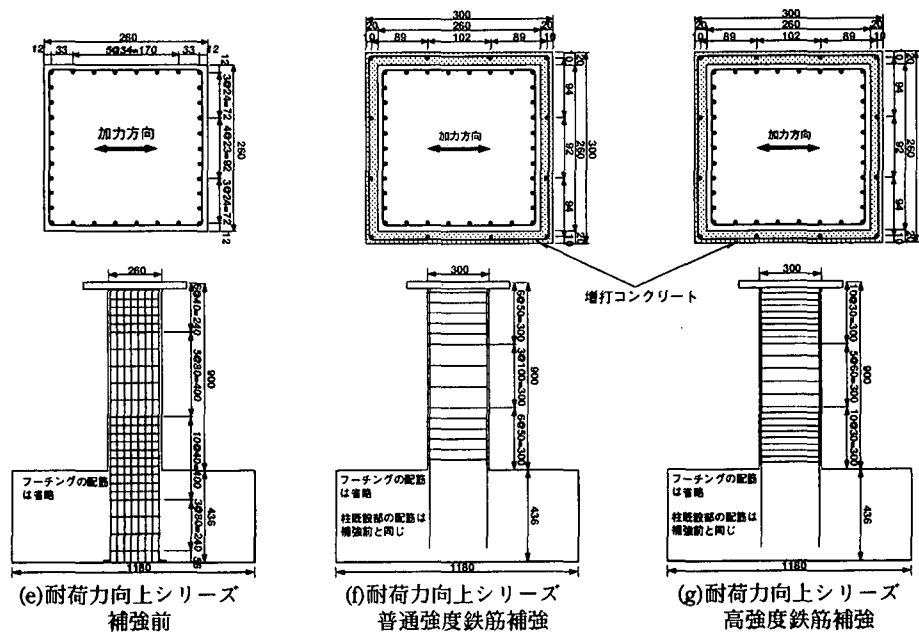
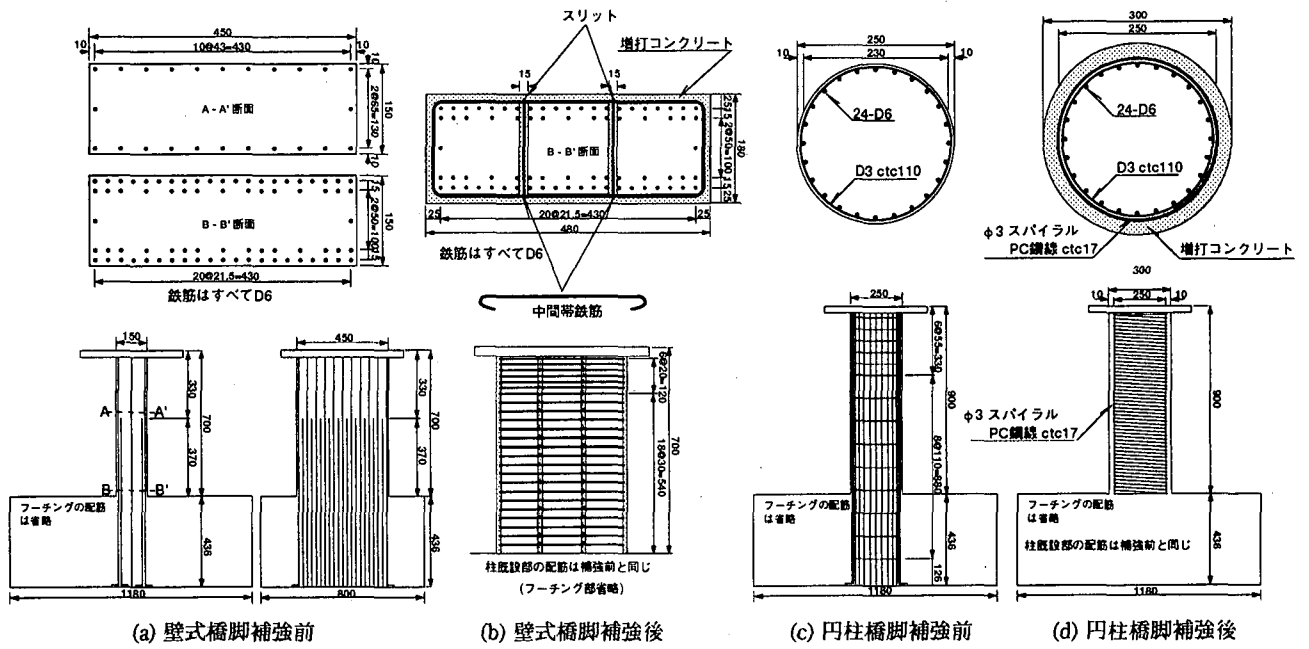
以上の3つの工法が有効であることを確認するために、部材模型を用いた交番水平加力実験を実施した。

(1) 試験体諸元

各試験体は、加力装置の容量から、想定した実橋脚を1/10~1/15程度に縮小したものとした。これらの諸元を表-1に示す。

変形性能向上を目的とした壁式橋脚・円柱橋脚は、それぞれ補強前と今回対象とした補強工法により補強した試験体の2体づつを用意した。壁式橋脚については、段落し部でのせん断破壊防止への中間帯鉄筋の効果を確認するために、段落しのある試験体とした。円柱橋脚については、補強後の柱筋座屈抑制効果を確認するために、補強前試験体は実橋で見られたように広範囲で座屈が生じるよう、柱筋比・帯筋比を実橋と同程度とした。

また、高強度鉄筋を柱鉄筋に用いたRC巻き立ての場合には、従来の普通鉄筋を用いたRC巻き立てと鉄筋の降伏する順序や破断時のひずみなどが異なることにより、部材としての挙動が従来のRC巻き立てとは異なる可能性があった。そこで、断面耐力を向上する工法についての実験では、補強前の試験体、普通強度鉄筋を用いたRC巻き立て補強試験体、高強度鉄筋を柱鉄筋に用いた補強試験体の3体を用意し、



図一 各試験体の寸法・配筋図

また、耐力の増加に応じて帯鉄筋量も増やした。

ただし、縮小試験体では、寸法効果によりせん断耐力の曲げ耐力に対する比が実橋に比べ大きくなるため、相似率を合わせた断面では、実橋と同様な破壊モードが再現できない。そこで、壁式橋脚については、計算によるせん断耐力と曲げ耐力の比が実橋と同様になるように試験体の断面を設計した。

また、フーチング部はこの部分で破壊しないように十分に補強した。

各試験体の形状寸法・鉄筋配置を図一に示す。

(2) 使用材料・製作

模型試験体に使用したコンクリート及び鉄筋の材料特性を表-2、3に示す。

既存RC部のコンクリートには、すべての試験体で最大骨材寸法が10mmのマイクロコンクリートを用いた。また、円柱橋脚以外の補修断面については、充填性を考慮して高流動性モルタルを使用した。

高強度鉄筋を用いたRC巻き立て工法の試験体に用いる高強度鉄筋は、縮小模型であるため市販の高強度鉄筋が使用できないため、普通強度鉄筋を降伏棚がはっきりとあるように熱処理して高強度鉄筋を

表-2 使用コンクリート (Gmax=10mm)

試験体No	圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	弾性係数 kgf/cm <sup>2</sup>
a	287	23.8	2.48×10 <sup>5</sup>
b	309	24.5	2.55×10 <sup>5</sup>
c	331	22.8	2.48×10 <sup>5</sup>
d	370	25.9	2.43×10 <sup>5</sup>
e	331	25.0	2.41×10 <sup>5</sup>
f	337	22.7	2.41×10 <sup>5</sup>
g	338	23.7	2.41×10 <sup>5</sup>

(増打部の高流動性モルタルは省略)

表-3 使用鋼材

試験体No	鋼材の種類	降伏強度	引張強度
		kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>
a~d	D6	3581	4930
e~g	普通強度 D6	2952	4615
	高強度 D6	4316	5646
c~g	異形3mm	3159	3820
d	φ 2.9 PC鋼線	17457	19228

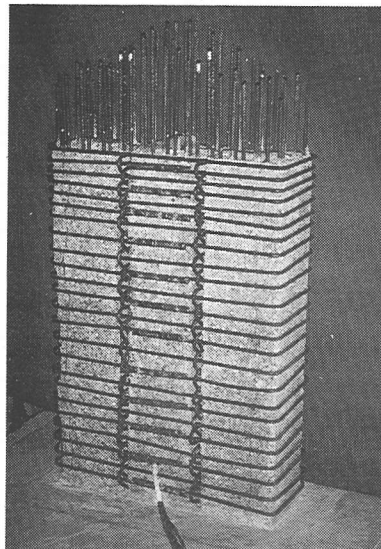
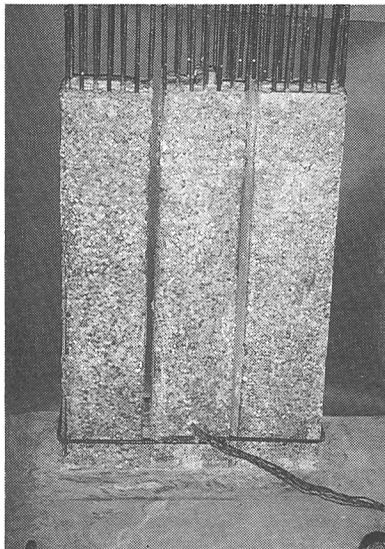


写真-1 中間帯鉄筋配筋前 (左) 配筋後 (右)

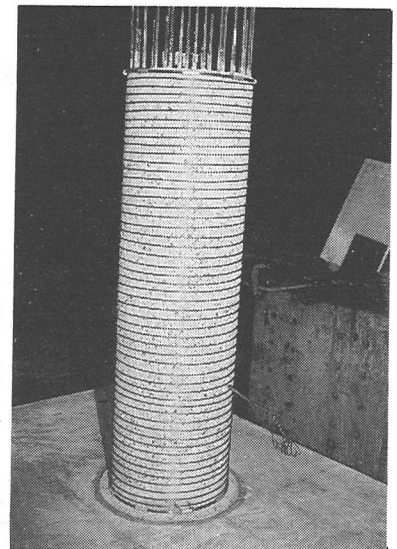


写真-2 PC鋼線配筋後

製造した (降伏比 0.76、降伏棚長さ約 20000 μ)。

また、後施工の柱筋のフーチングへの定着には、樹脂アンカーを用いた。樹脂アンカーは、細径で強度の高い柱筋を定着するために長い定着長さが必要となるが、今まで実績がないため、新たに細径で流動性のよい樹脂カプセルを特別に制作し、定着試験により高強度鉄筋の破断強度まで十分に定着できることを確認した。

試験体は、まずフーチングを打設後、既存の柱部を構築し、その後かぶりコンクリートを除去せず目粗しのみを施して、補強工法による部分を施工した。ただし、壁式橋脚のスリットに関しては、今回の実験は中間帯鉄筋の効果を確認する実験であるため、ウォータージェットを使用せず、予めスリット位置に発砲スチロールを配置して既存柱部のコンクリートを打設し、脱型後に発砲スチロールをはつり出しスリットを製作した。

壁式橋脚の補強状況を写真-1 に、円柱橋脚の補

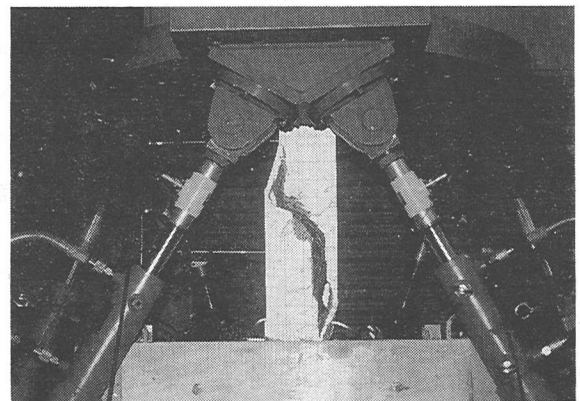


写真-3 加力実験状況

強状況を写真-2 に示す。

### (3) 加力・計測項目

油圧ジャッキ6本を用いた6自由度加力装置により、試験体に正負交番荷重を加えた。写真-3に壁式橋脚(補強前)の実験状況を示す。制御は、柱筋の降伏後は、降伏時の変位の整数倍の変位で3回づつ繰り返す変形制御を行った。実験は、新たな変位に

入った最初のサイクルにおけるピーク荷重が降伏時荷重を下回ったときに終了した。

計測は、作用している荷重、柱筋の降伏を判定するための鉄筋ひずみ、基部  $1.5d$  区間 ( $d$  は断面高さ) の平均曲率、水平変位とした。壁式橋脚については、補強前試験体はせん断破壊を起こし靱性率が 1 未満であるため、柱頭部付近 (基部から  $60\text{cm}$ ) の水平変位で、その他については、基部  $1.5d$  区間の平均曲率で降伏荷重以降の変形制御を行った。

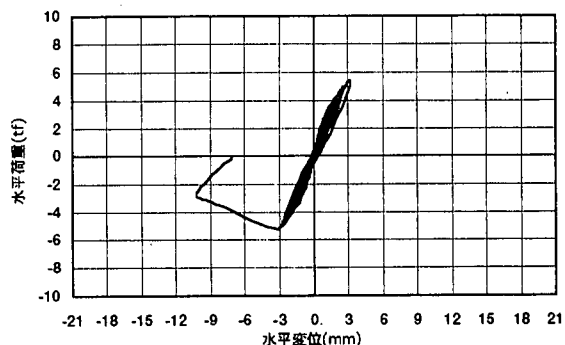
#### (4) 実験結果

各試験体の実験結果については、図-2に、実験終了後の状況を写真-4~8に示す。

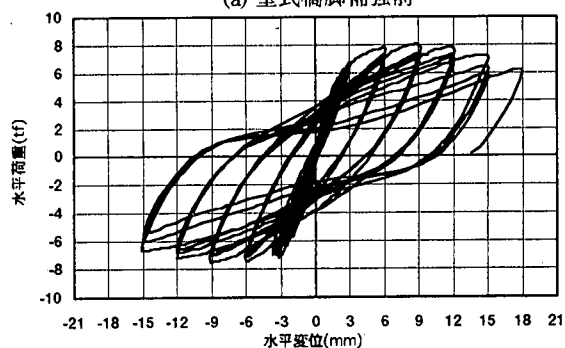
a) 壁式橋脚の変形性能を向上させる工法については、写真-4、5に見られるように、補強前には柱鉄筋の段落とし部での曲げひび割れをきっかけとして、せん断破壊していたものが、今回の補強工法により同一部分における曲げ破壊に移行している。また、このときの不部材変形性能は、図-2に見られるように、補強前が水平変位  $3\text{mm}$  のときに、段落とし部の柱鉄筋の降伏とともに破壊して、靱性率が 1 であったものが、補強後は、柱鉄筋の降伏後も後施工の帯鉄筋の効果によりせん断破壊は生じず、水平変位  $12\text{mm}$  で最大荷重を示し、その後徐々に荷重が低下して水平変位  $18\text{mm}$  の時に降伏荷重と同じ荷重になり、このときの靱性率は 6 となった。

b) 円柱橋脚の変形性能を向上させる工法については、補強前の破壊範囲が写真-6で見られるように柱鉄筋の座屈を伴い広い範囲で生じているものが、補強後には写真-7のように破壊範囲が非常に狭い範囲に限定されている。変形性能については、補強前の靱性率が 9 であったものが、今回の補強により 1.3 となり十分な補強効果が確認された。このとき、補強前の橋脚の断面は、先述の通り実橋脚と鉄筋比をほぼ同じにしたが、寸法効果によるせん断耐力の増加、実構造で見られた鉄筋の圧接部の破断までを模型試験体では再現できないことや、段落しがないことなどから、その変形性能が今回被災した実橋脚より優れた結果となった。また、PC 鋼材の防食のための被覆コンクリートによる強度増加も付加的に実現できることが確認できた。

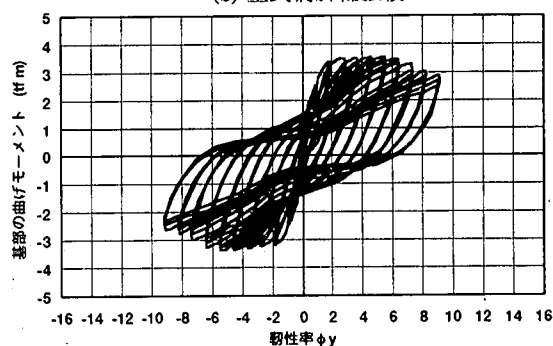
c) RC 巻立てにより断面の耐荷力を向上させる実



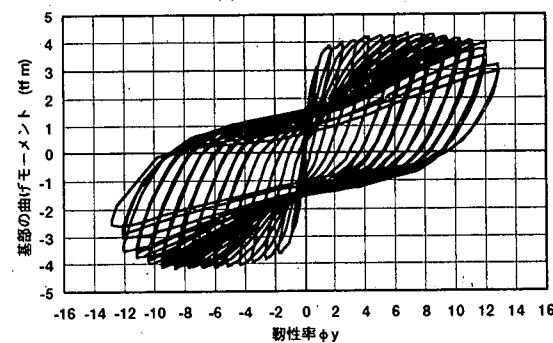
(a) 壁式橋脚補強前



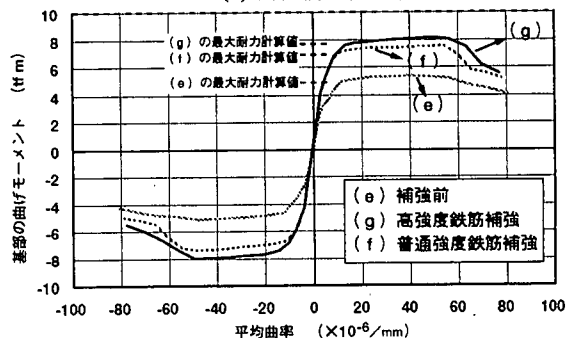
(b) 壁式橋脚補強後



(c) 円柱橋脚補強前



(d) 円柱橋脚補強後



(e)~(g) 耐荷力向上シリーズ

図-2 各試験体の実験結果

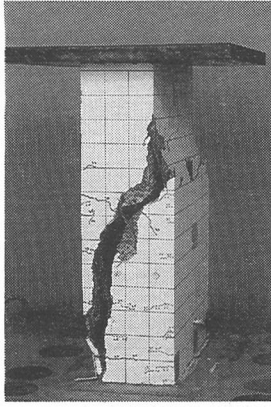


写真-4 壁式橋脚補強前

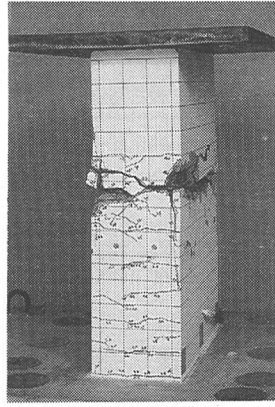


写真-5 壁式橋脚補強後

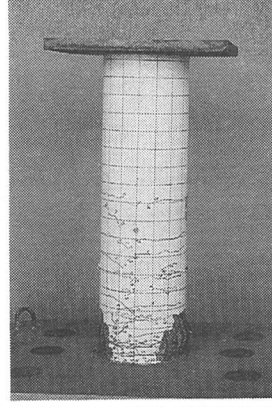


写真-6 円柱橋脚補強前

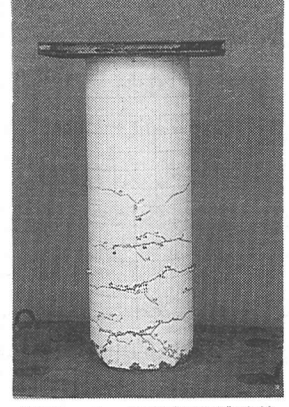


写真-7 円柱橋脚補強後

験シリーズでは、事前の計算通りに結果が出て、後施工する柱鉄筋の材料及び配置によっては、十分有効であることがわかった。また、高強度鉄筋を用いたものについては、曲げ耐力増加に見合うだけの帯鉄筋を追加して配置する事により、靱性についても、普通強度の場合と同等の結果が得られることが確認できた。

#### 5. まとめ

縮小模型を用いた水平加力実験により、今回考案したかぶりコンクリートを除去しなくても良い3工法（壁式橋脚を対象としたスリットによる中間帯鉄筋付加工法、円形橋脚を対象としたPC鋼より線巻き付け工法、高強度鉄筋を柱筋に用いたRC巻立て工法）による耐震補強効果が十分にあることが確認された。現在これを受けて、実施工にむけて、施工機械の開発、実証実験を進めている。

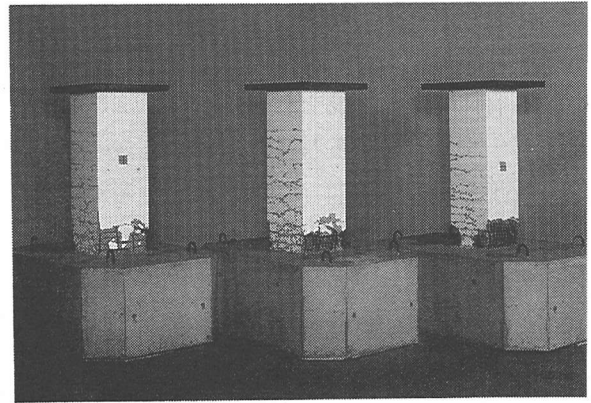


写真-8 耐荷力向上シリーズ

(右から補強前、普通強度鉄筋補強、高強度鉄筋補強)

## New Retrofit Methods of Existing Reinforced Concrete Piers For Enhanced Seismic Performance

Kousuke Furuichi, Junji Masukawa

Reiko Amano, Yasuo Murayama

Collapse or severe damage of a number of bridges in the Hanshin-Awaji earthquake has led the need to develop effective retrofit methods for enhancing the flexural strength and ductility, and shear strength, of bridge columns designed by the past seismic design code. So we have developed three new retrofit methods for existing reinforced concrete piers to enhance seismic performance. All methods do not require removing cover concrete. The effectiveness of these methods will be checked by loading tests for small scale specimens.