

論文 PC 鋼棒によるプレストレスで横補強した RC 柱の耐震補強実験

鴨川 茂義*¹ 山川 哲雄*² 倉重 正義*³

要旨: 本研究では, 1971 年以前の旧基準で設計された学校建築物の RC 柱を 1/2.4 縮小モデルにし, PC 鋼棒を柱の外から帯筋又はブレース状に用いてプレストレスを導入し, せん断スパン比 1.0 の極短柱と 1.5 の短柱に関する耐震補強実験を行った。その結果, せん断破壊する柱を靱性に富んだ曲げ破壊する柱に改善できる見通しが得られた。

キーワード: RC 柱, 耐震補強, 能動的拘束, PC 鋼棒, プレストレス, ブレース

1. 序

PC 鋼棒にプレストレスを導入した本耐震補強法は, 受動的拘束効果を利用した鋼板や連続繊維シートを用いた従来の巻き立て工法と異なり, 能動的拘束効果の積極的な利用に特色がある。本研究の目的は PC 鋼棒を用いて, 柱の外から帯筋又はブレース状にプレストレスを導入する工法が, 耐震性能に劣る既存 RC 柱の新しい耐震補強法として期待できるかどうかの日処に耐震加力実験で検証することにある。

なお, 本研究の出発点は著者らによる正方形鋼管と PC 鋼棒にプレストレスを導入した合成 RC 柱の実験的研究¹⁾にある。

2. 実験計画

250mm 正方形断面を有するせん断スパン比 1.0 の極短柱 4 体と, 1.5 の短柱 4 体の加力実験を計画する。柱試験体における耐震補強の詳細を Fig.1 に, その一覧表を Table 1 に示し, 使用材料の力学特性値などを Table 2 に示す。いずれ

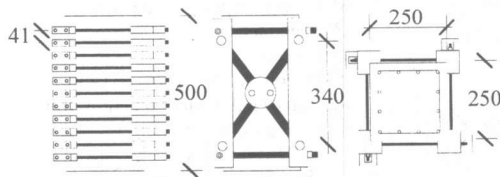


Fig.1 Details of seismic retrofit for RC column

の柱も 1971 年以前の旧基準 (せん断補強筋が 250mm 間隔) で設計された学校建築物の RC 柱 (約 600x600mm 正方形断面を想定) を 1/2.4 縮小

Table 1 Column specimens

	R98S series			
	P0	PB	P41	P41'
Specimen				
M VD=1.0	500			
PC bar	—	9.2φ	3.8φ @41	W:5.4φ F:3.8φ @41
			prestress	
Concrete	Cylinder strength : $\sigma_n = 31.6$ MPa			
	R98M series			
	P0	P105	P65N	P65
Specimen				
M VD=1.5	750			
PC bar	—	3.8φ @105	3.8φ @65	
		prestress		prestress
Concrete	Cylinder strength : $\sigma_n = 27.4$ MPa			
Common details	Longitudinal reinforcement :			
	12-D10, $P_g = 1.36\%$			
	Transverse reinforcement :			
	3.7φ-@105, $P_w = 0.07\%$			
	PC bars : Hoops 3.8φ (Prestress 490 MPa) Hoops 5.4φ (Prestress 490 MPa) Brace 9.2φ (Non prestress) Hoops 9.2φ (Prestress 880 MPa)			

Notes: W: Web side, F: Flange side, Units: mm

*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

*2 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

*3 高周波熱錬(株) 製品事業部 営業部 次長

Table 2 Properties of steel bars and PC bars

Type		A(cm ²)	f _y (MPa)	ε _y (%)	E _s (GPa)
Steel bar	D10	0.71	360	0.19	189.6
	φ3.7	0.11	333	0.17	200
PC bar	φ3.8	0.11	1245	0.60	201
	φ5.4	0.23	1245	0.60	
	φ9.2	0.66	1259	0.62	

Notes: A is cross section area, f_y is yield strength of steel, ε_y is yield strain of steel, E_s is modulus of elasticity.

モデルにして、P C 鋼棒による耐震補強実験を行った。耐震補強前の R C 柱試験体はいずれも脆性的なせん断破壊する試験体である。軸圧縮力比は長期軸力のみ考慮してすべて0.2とする。なお、本実験で用いる工法（ブレースタイプ、外帯筋タイプ）はいずれも靱性型耐震補強である。

せん断スパン比1.0の極短柱に関しては9.2 φ の P C 鋼棒をブレース状に架け、かつブレースの支点位置で同じ9.2 φ の P C 鋼棒を帯筋のように配置し、かつプレストレスを導入した場合の加力実験も行う。プレストレスレベルは、トルクレンチなどを用いて手動で降伏点ひずみの約70%の4200-4400 μ (880MPa) 前後の緊張ひずみを導入した。9.2 φ の P C 鋼棒は、実柱寸法で22 φ の P C 鋼棒に相当する。なお、ブレースはそれ自身の座屈を防止するために引っ張り時のみ有効で、圧縮時には効かないディテールを採用した (Fig.1 参照)。

一方、P C 鋼棒を利用した外帯筋タイプの方法は柱四隅に配置したコーナブロックを介して3.8 φ の P C 鋼棒を同一平面上に外周帯筋のように配置した上で、その P C 鋼棒にプレストレスを導入して柱を高横拘束する耐震補強法である。3.8 φ の P C 鋼棒は、実際の施工で現在流通している最小径の P C 鋼棒9.2 φ に相当する。これは窓枠などが直接柱に接していても容易に施工可能な P C 鋼棒用の孔 (径が12-15 φ) が確保できるように意図したからである。拘束力はコーナブロックによる支圧力として柱に導入されることになる。

次に導入するプレストレスのレベルは P C 鋼棒がコンクリートに拘束効果を期待する側面と、せん断補強筋としてせん断力を負担する側面の2面から検討する必要がある。いづれにしても、せん断強度を大幅に引き上げ、靱性に富んだ曲げ破壊先行を確保することが重要である。さらにプレストレスの導入とその管理が現場作業として簡便であることが求められる。特に今回の実験ではプレストレスの導入と維持管理の観点から、帯筋のように R C 柱の外周筋として巻く3.8 φ の P C 鋼棒にあつては、9.2 φ の P C 鋼棒と同様に手動で降伏点ひずみ (約6000 μ) の約1/3 強の2450 μ 前後 (490MPa) を採用した。

載荷方法は一定軸圧縮力比0.2のもとで、正負繰り返し水平加力実験を行った。加力装置は建

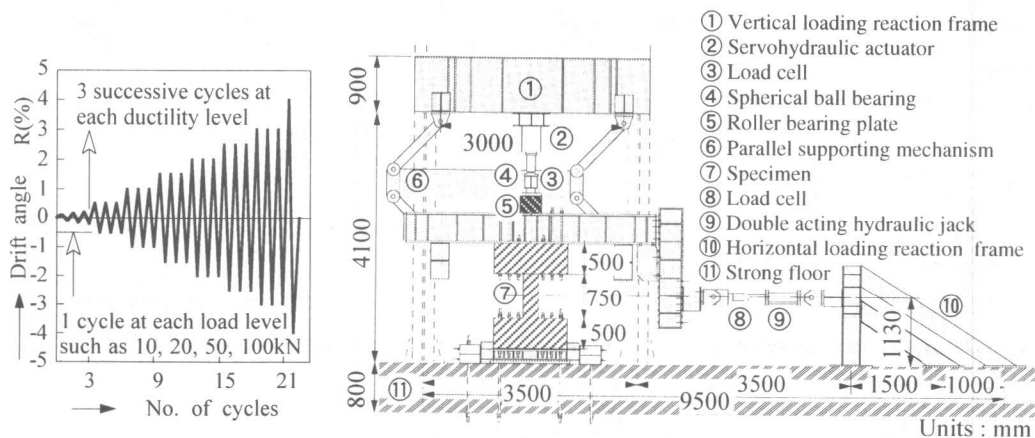


Fig.2 Detail of test setup and loading program

研式加力装置 (Fig.2 参照) を用い、加力プログラムを Fig.2 に示す。Fig.2 に示すように部材角 3 % まで 0.5% づつ増分させながら、各部材角で 3 回づつ繰り返す。部材角 3 % までいたっても、最大水平耐力の 80 % 以上を維持している状態であれば部材角 4 % で正負 1 回繰り返す、耐震性能の確認を行った。

3. 実験結果と考察

柱試験体で観察されたひび割れを Fig.3 に示す。不適格既存 R C 柱に相当する基準 R C 柱試験体はせん断補強筋の不足 ($p_w=0.07\%$) に加え、せん断スパン比が小さいので、せん断ひび割れが顕著に生じている。P C 鋼棒を用いてブレースや外帯筋タイプで耐震補強することにより、曲げ破壊先行とその後の靱性を確実に確保でき

た柱試験体は柱頭、柱脚の曲げひび割れが顕著に生じているが、せん断ひび割れも少なくない。ただし、これらのせん断ひび割れの幅は小さい。

柱試験体のせん断力 V と部材角 R 、および柱軸の平均鉛直ひずみ ϵ_v と部材角 R の関係に関する実験結果を Fig.4 に示す。Fig.5 に P C 鋼棒のひずみ測定結果を示した位置を明示し、Fig.6 にこれらのひずみ測定結果を示す。Fig.4 より、耐震補強前のせん断スパン比 1.0 の極短柱試験体 R98S-P0 は、押し引きともに 0.25 % 時に柱中央にせん断ひび割れが生じた。そのため耐力が上昇せず、1.0 % で繰り返すによる耐力低下が著しくなり破壊に至った。しかし、ブレースで補強した R98S-PB は、同じ 9.2φ の P C 鋼棒をブレース支点の柱頭と柱脚に一周させて、かつプレストレスを与え、柱の両端部を高横拘束して

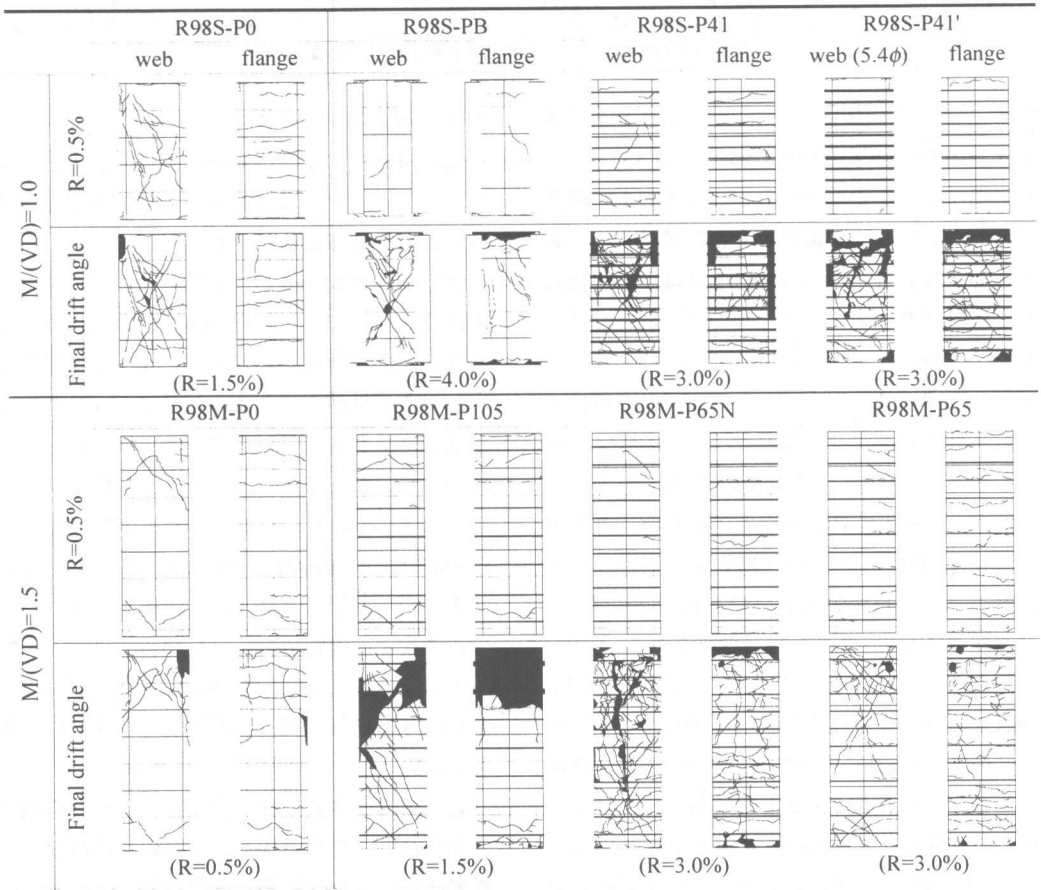


Fig.3 Observed cracking pattern

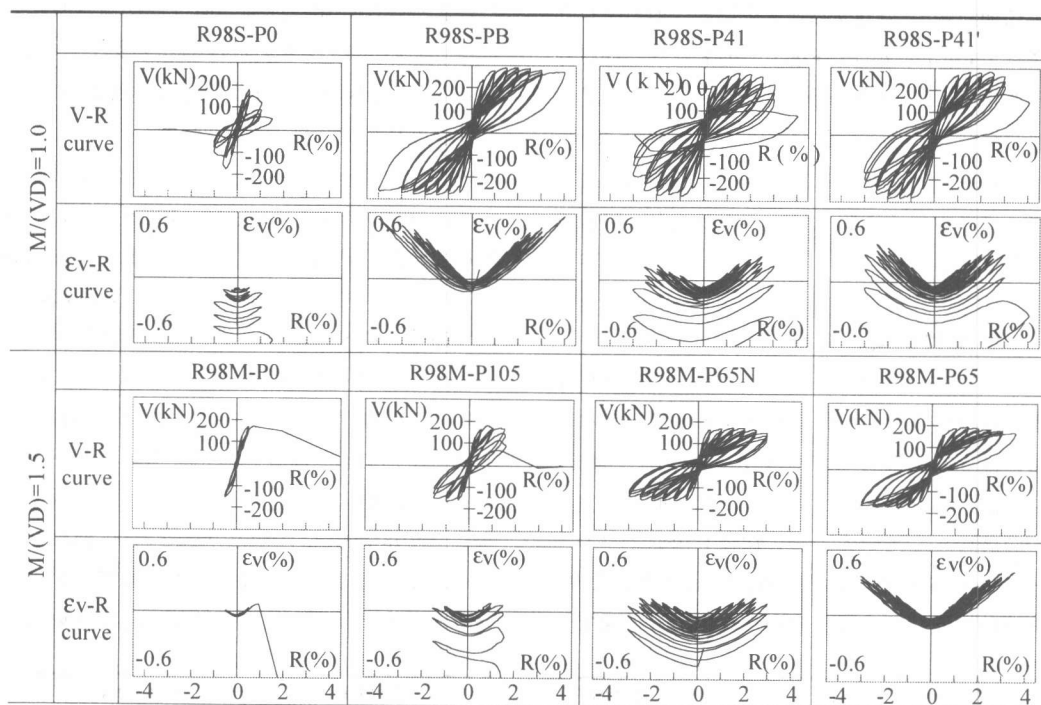


Fig.4 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

いるので3.0%以降までひび割れの発生が外帯筋タイプのR98S-P41, R98S-P41' に比べ少なく、耐力低下もほとんど見られず安定した曲げ性状を示している。P C 鋼棒でせん断補強したせん断スパン比1.0の試験体R98S-P41は、0.5%時にせん断ひび割れが生じたものの耐力低下は見られず最大耐力は1.5%時に生じた。2.0%までは安定した曲げ性状を示したが、2.5%を越えてから試験体上部がひび割れと圧縮応力により膨張しだし、繰り返しによる耐力低下が大きくなった。Web面のP C 鋼棒の径を5.4φに置き換えたR98S-P41' は、1.0%時にせん断ひび割れが生じ、それ以降顕著にひび割れが生じたが、耐力低下はR98S-P41 に比べ改善された。

一方、せん断スパン比1.5の短柱試験体R98M-P0は、0.4%時に曲げせん断ひび割れが柱頭に生じ、1.0%の加力に移行する途中0.9%時に破壊に至った。材端部の主筋が引っ張り降伏しない前の脆性的なせん断破壊であった。またR98M-P105は0.5%時に曲げせん断ひび割れが生じたが、プレストレスが導入されていたにもかかわらず、

補強量が足りなかったため（P C 鋼棒が105mm 間隔）、ひび割れが進行し、耐力低下が生じた。そして2.0%に移行する時にP C 鋼棒の破断と共に柱頭が破壊した。

P C 鋼棒を65mm 間隔で配置し、プレストレスが導入されていないR98M-P65Nは0.5%で曲げせん断ひび割れが生じたが、3.0%まではほぼ安定した曲げ性状を示した。ただし、3.0%時の繰り返しサイクルは若干S字型ループ性状を示し、1回目のピーク荷重に比べて耐力の低下が生じた。この試験体にプレストレスを導入したR98M-P65は、R98M-P65Nに比べひび割れを抑さえ、繰り返しサイクルによる耐力低下とコアコンクリートの膨張を防いでいる。このことは、Fig.4に示した ϵ_v -R 関係からも明白であり、R98S-PBと同様に部材角が増加しても、柱材軸上では引っ張りひずみが生じている。

耐震補強前のR C 柱試験体はいずれも材端部の主筋が引っ張り降伏しない前の脆性的なせん断破壊であった。しかし、P C 鋼棒でブレースや外周帯筋のようにせん断補強すると、主筋が

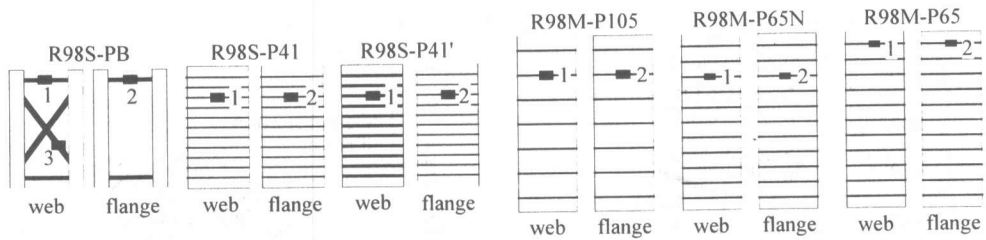


Fig.5 Locations of measured strain of PC bar for column specimen

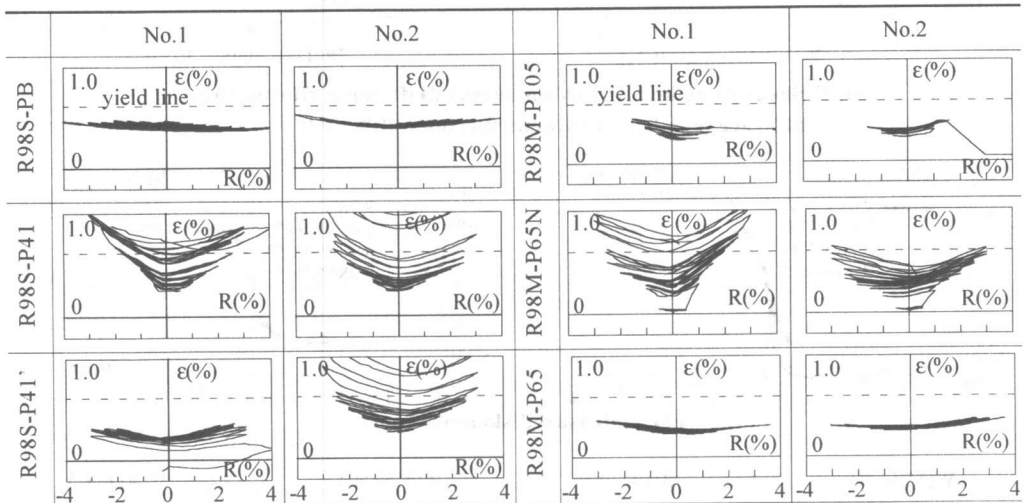


Fig.6 Measured strain of PC bar for column specimens

降伏強度に達し、耐震性能がかなり改善されていることがわかる。特に、ブレース補強はせん断スパン比が1.0と小さく、極短柱にもかかわらず柱の部材角を4%まで増大させても水平耐力が低下していない (Fig.4 参照)。しかし、実験によると主筋は完全に降伏しているが、Figs.6, 7に示すようにP C鋼棒は一切降伏していない。また、そのひずみの増加もブレース部材 (Fig.7 参照)を除いて小さい。このことはFig.4の柱材軸上の平均伸縮ひずみ ϵ_v と部材角Rの関係からも明白である。軸圧縮力が比で0.2常時作用しているにもかかわらず、部材角の増大とともに柱材軸上の平均引っ張りひずみが増大し、柱の耐震性能が劣化していないことを意味している。

Fig.7にR98S-PBにおけるブレースの負担せん断力と柱のせん断耐力の関係を示す。次いで、柱の部材角に占めるヒンジ部の回転による変形とブレースのせん断型変形、すなわち柱自身のせん断型変形の割合を示す。これらはすべて測

定されたブレースの引っ張りひずみから逆算したものである。Fig.7によれば、部材角に占めるヒンジの回転による変形量が多く、その割合は柱の部材角のいかににかかわらずほぼ3/4前後である。このことはブレースで補強された柱部分は、その部材角の3/4が曲げ降伏ヒンジの回転による剛体回転角であり、残りの1/4がせん断型変形角であることを意味している。すなわち、材端部の曲げ降伏ヒンジにともなうせん断力で柱の最大せん断力が支配され、ブレースと支持点のP C鋼棒は柱の靱性を維持する役割を主に becoming ことになる。

一方、P C鋼棒で外帯筋のように耐震補強した方法はFig.6のようにP C鋼棒が一部降伏している。せん断スパン比が1.0の極短柱では41mm (実柱では約100mm ピッチ相当) あれば、脆性的なせん断破壊を免れ、部材角が2%まではP C鋼棒が降伏することもなく、十分な靱性を確保していることがわかる。しかし、2.5%を

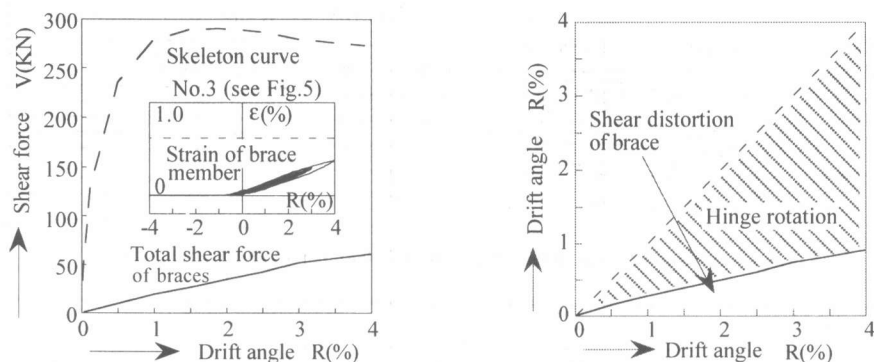


Fig.7 Shear force and distortion versus drift angle relationships of brace member of column specimen R98S-PB

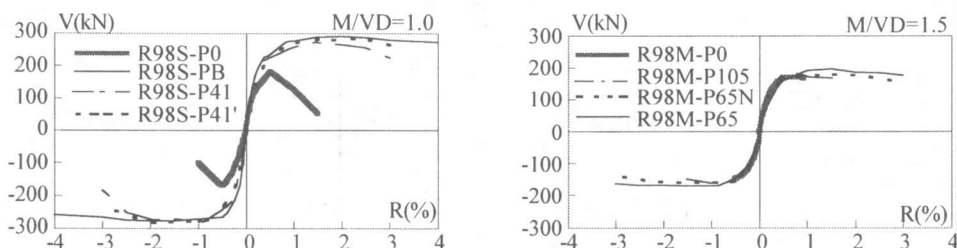


Fig.8 Measured skeleton curves

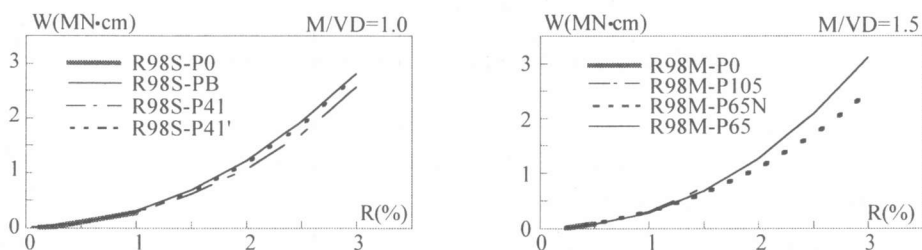


Fig.9 Accumulated absorbed energy

超えるあたりから材端部のP C鋼棒が降伏を始め、その影響が柱の耐力低下となって現れてくる。P C鋼棒が降伏していない柱試験体は耐震性能が大幅に改善されているが、P C鋼棒が一部降伏してくると耐震性能の改善が若干低下する。したがって、耐震補強にあたってはいかなるP C鋼棒も降伏しないように設計した方が望ましい。

Fig.8にスケルトンカーブとFig.9に累積エネルギー吸収量に関する実験結果の比較をそれぞれ示す。せん断スパン比1.0の極短柱試験体ではブレース補強による耐震性能の改善が最もよく、次いでR98S-P41'が良い。せん断スパン比1.5の試験体では、R98M-P65が最も良い。次いで、

R98M-P65Nの耐震性能がよい。このことからプレストレスの導入が望ましいと言える。

4. 結論

P C鋼棒を用い、プレストレスを導入するR C柱の耐震補強法に関する加力実験の結果、せん断破壊する極短柱及び短柱を、靱性に富んだ曲げ破壊する柱に改善できる見通しが得られた。

参考文献：

- 1) 山川哲雄, 村中圭介, 倉重正義: 鋼管とプレストレスで高横拘束した短柱の耐震性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1437-1442, 1997.7