

論文 PC鋼棒によりプレストレスを導入した極短柱の応急補強法に関する実験的研究

山川 哲雄^{*1}・李 文聰^{*2}・倉重 正義^{*3}

要旨: 著者らがすでに発表した靱性型耐震補強法(外横補強材としてのPC鋼棒にプレストレスを導入し,高横拘束する方法)が,重機を必要としない簡便なドライ工法であることに注目して,地震でせん断破壊した極短柱に応急補強を施すことによって,鉛直荷重支持能力のみならず,靱性能を回復できるかどうかを実験的に明らかにしようとする試みである。

キーワード: 損傷柱, 極短柱, PC鋼棒, プレストレス, 応急補強, 鉛直荷重支持能力

1. 序

著者らは外横補強材としてのPC鋼棒にプレストレスを導入し,高横拘束した既存RC柱の靱性型耐震補強法を提案した¹⁾。本耐震補強法の特徴を整理すると,下記ようになる。

- (1) 本耐震補強法は外横補強材にプレストレスを導入するので,従来のせん断補強効果と受動的横拘束効果のほかに,新たに能動的横拘束効果が加わるので,大きな補強効果を期待できる。
- (2) 本補強法は既存RC柱の靱性型補強法であると共に,RC柱としての鉛直荷重支持能力を増大させる補強法でもある。
- (3) 重機を必要とせず,騒音も粉塵も少なく,環境にやさしい簡便なドライ補強工法である。
- (4) 柱に壁やサッシが取付いていても,小孔を開けるのみでPC鋼棒を容易に貫通できる。
- (5) プレストレスの導入も簡単で容易である。

上記のような特色を有することから,恒久的な耐震補強のみならず,地震被災直後の応急補強にも本補強法は有効に利用できることがわかってきた。すなわち,地震で損傷したRC柱の鉛直荷重支持能力と靱性能を回復できることがプレストレスの導入により,確実なものになったからである。本論文では,極短柱の応急補強の耐震加力実験結果に関して述べる。

2. 実験計画

本実験計画は以下の観点から立案した。

- (1) 柱は水平抵抗材として主要な耐震要素であるほかに,重要な鉛直支持部材でもある。地震でせん断破壊して損傷した柱に応急補強を施すことにより,鉛直支持能力を回復させ,かつ靱性能を維持することが可能か否か。
- (2) 応急補強を施す場合に,応急補強可能な柱の損傷限界をどのように考えるか。
- (3) 応急補強といっても現実には被災後直ぐに施工できるものではないので残留変形を放置し,かつ長期軸力相当分を載荷したまま時間を置いて応急補強を施した場合どうなるか。
- (4) プレストレス導入に伴う能動的横拘束効果は,応急補強では一段と重要になると思われる。
- (5) 応急補強後の柱の耐力レベルはいくらか。

以上の観点から,250×250mmの正方形断面で柱高さ500mmの極短柱による,一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を建研式加力装置で行った。軸力比は0.2で行い,部材角 $R=0.5\%$ から 0.5% の増分で3回ずつ繰り返し,3.0%まで強制変形を与え,それでも靱性能が期待できる場合には $R=4.0\%$ と 5.0% を1回ずつ正負繰り返した。柱試験体総数は6体である。そのうち,2体は1999年度に行われた実験結果である。これ

*1 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

*2 琉球大学大学院 理工学研究科博士後期課程生産エネルギー工学専攻 工修 (正会員)

*3 高周波熱錬(株) 製品事業部 開発企画部 部長

Table 1 Properties of reinforcement

Reinforcement	a(cm ²)	f _y (MPa)	ε _y (%)	E _s (GPa)	
Rebar	D10	0.71	371	0.20	186
Hoop*	φ3.7	0.11	333	0.17	196
Hoop**	φ3.7	0.11	391	0.19	205
PC bar	φ5.4	0.23	1202	0.61	200

Note : * : Hoop of R99 series, ** : Hoop of ER01 series,
 a=cross section area, f_y=yield strength of steel,
 ε_y=yield strain of steel, E_s=modulus of elasticity.

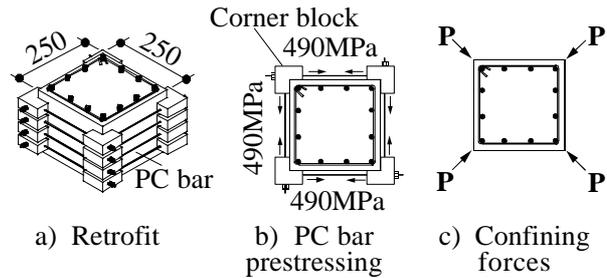


Fig. 1 Detail of retrofit by PC bar prestressing and confining forces

Table 2 Column specimens

	Seismic retrofit		Emergency retrofit			
	R99S-P0	R99S-P41'	ER01S-P65N	ER01S-P65	ER01S-P41	ER01S-P41*
Specimen						
PC bar	—	5.4φ-@41	5.4φ-@65	5.4φ-@65	5.4φ-@41	5.4φ-@41
Prestress	—	490MPa	Non	490MPa	490MPa	490MPa
σ _B	20.7MPa		19.5MPa			
Common details	Rebar : 12-D10 (p _g =1.36%), Hoop : 3.7φ-@105 (p _w =0.08%) N/(bDσ _B)=0.2					
	Units : mm					

らの力学的材料定数を主筋や帯筋も含めてTable 1に示す。P C 鋼棒の配置図, プレストレス導入とそれによる拘束力をFig. 1に示す。プレストレスは降伏点ひずみの約 1/3 強の 2450μ で, P C 鋼棒 (5.4φ) 1 本当たり 11.3kN である。試験体一覧表を Table 2 に示す。

3 . 実験結果及び考察

3 . 1 基準 R C 極短柱と耐震補強実験結果

柱試験体 R99S-P0 と R99S-P41' の最終破壊状態のひび割れ状況を Fig. 2 の一部に示し, その 2 体に関するせん断力 V と部材角 R の関係, 柱材軸上の平均ひずみ ε_v と部材角 R の関係, 及び代表的な位置の帯筋と P C 鋼棒のひずみ変化を Fig. 3 に示す²⁾。Fig. 3 の V-R 曲線図に破線で示した直線は, 多段配筋柱の曲げ強度略算値である。

耐震補強していない基準柱試験体 R99S-P0 に関して一定軸圧縮力比 0.2 のもとで, 正負繰り返し水平加力実験を行った。主筋量が主筋比にして p_g=1.36% (12-D10) と少なめであるが, せん断スパン比が 1.0 の極短柱に加えて, せん断補強筋

比が p_w=0.08% (3.7φ-@105) と極めて少ないので, Fig. 3 に示すように柱の部材角が R=0.5% に達する前に脆性的なせん断破壊を起こした (Figs. 2, 3 参照)。帯筋も降伏ひずみレベルに達していることがわかる。

一方, これと同じ柱基準試験体に恒久的補強として 5.4φ の P C 鋼棒を 41mm 間隔で配置し, プレストレスを導入した柱試験体 R99S-P41' は若干の付着劣化を生じているが, 水平耐力実験値は多段配筋柱の曲げ強度略算値に到達し, かつ十分な靱性を保有している。P C 鋼棒のひずみも部材角が小さい範囲では, 初期プレストレス時のひずみより低下するが, 部材角が大きくなるとそれに応じてひずみも若干大きくなる。

3 . 2 R C 極短柱の応急補強実験

耐震補強前の R C 極短柱をせん断破壊させ, その後に応急補強を施すことにより, 鉛直支持能力と靱性能を回復できるかどうかを検証するための応急補強実験を行った。応急補強は損傷した柱四隅にコーナブロックを配置し, その

	Seismic retrofit				Before emergency retrofit							
	R99S-P0		R99S-P41'		ER01S-P65N		ER01S-P65		ER01S-P41		ER01S-P41*	
	Depth	Width	Depth	Width	Depth	Width	Depth	Width	Depth	Width	Depth	Width
Final crack pattern												
Max crack width	5.0mm	—	1.3mm	3.0mm	2.5mm	—	2.0mm	—	4.0mm	—	3.0mm	—
Max drift angle	R=1.0%		R=5.0%		R=0.5%		R=0.5%		R=1.0%		R=1.0%	

Fig. 2 Observed cracking patterns

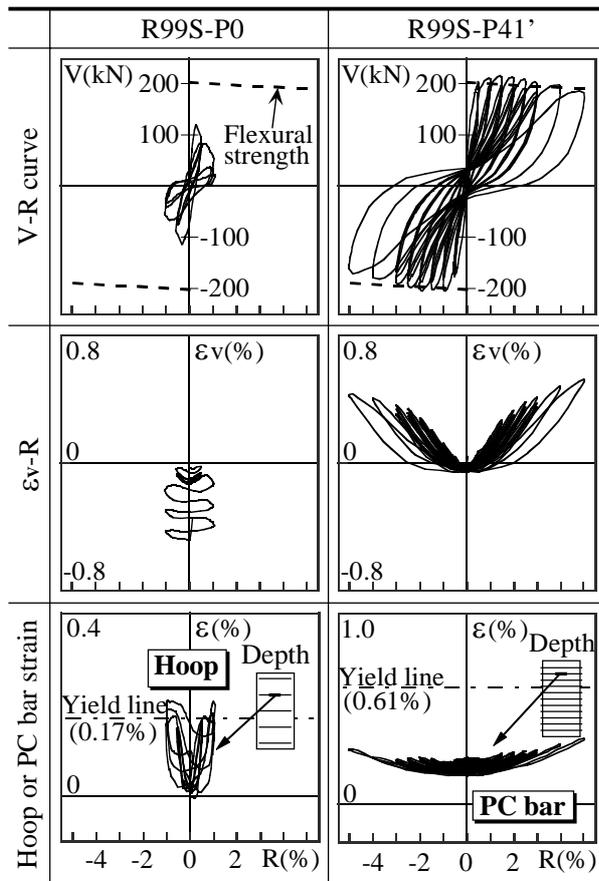


Fig. 3 Experimental results of R99S series

間に 5.4mm 直径の P C 鋼棒を架け渡し、トルクレンチで所定のプレストレスを導入した。その管理はすべての P C 鋼棒に貼付したひずみゲージで行った。その際に応急補強可能な損傷限界も大きな課題であるが、本実験では部材角 R=0.5% を 3 回繰り返して応急補強を施した場合と、その後さらに R=1.0% を 1 回繰り返して、水平耐力も最大値の 30 ~ 40% 近く低下した後に応急補強を施した場合の二通りについて、一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行った。

補強前の加力実験で得られた柱のひび割れ状況を Fig. 2 に示す。せん断スパン比が 1.0 の極短柱で帯筋量が少ない上に耐震補強が施されていないので、4 体ともすべてせん断破壊し、大きなひび割れが柱せい面、すなわちウエブ相当面に生じている。しかも、部材角が R=1.0% まで正負繰り返しした柱試験体のひび割れ幅が大きく、最大ひび割れ幅は 4mm にも達している。

このように補強前の R C 柱が大きなせん断ひび割れを伴った損傷後に、応急補強を施した。ただし、応急補強は現実の状況を考えた場合、地震被災後すぐに対応できるものではないので、地震で損傷が生じた後応急補強の実施まで時間を要する。しかし、その間にも損傷した柱は残留変形を生じたまま自重と積載荷重からなる鉛直荷重を重力の作用下では常に受けている。したがって、柱試験体 ER01S-P41* のみはせん断破壊で損傷後も残留変形を生じさせたまま、長期軸力比に相当する 0.2 の軸圧縮力をほぼ 2 日間 (42 時間) 作用させ、その後に応急補強を施した場合について加力実験を行った。本応急補強実験で採用したせん断スパン比が 1.0 の極短柱試験体は試験体 R99S-P0 や R99S-41' と同一配筋を有し、かつコンクリート強度もほぼ同じ試験体である。

応急補強の実験結果、Fig. 4 からわかることは下記のことである。

(1) 応急補強としてプレストレス導入の有無 (柱試験体 ER01S-P65N と ER01S-P65 の比較) は応急補強後の耐震性能に顕著な差異を生じる。プレストレスを導入しないとせん断ひび割れも

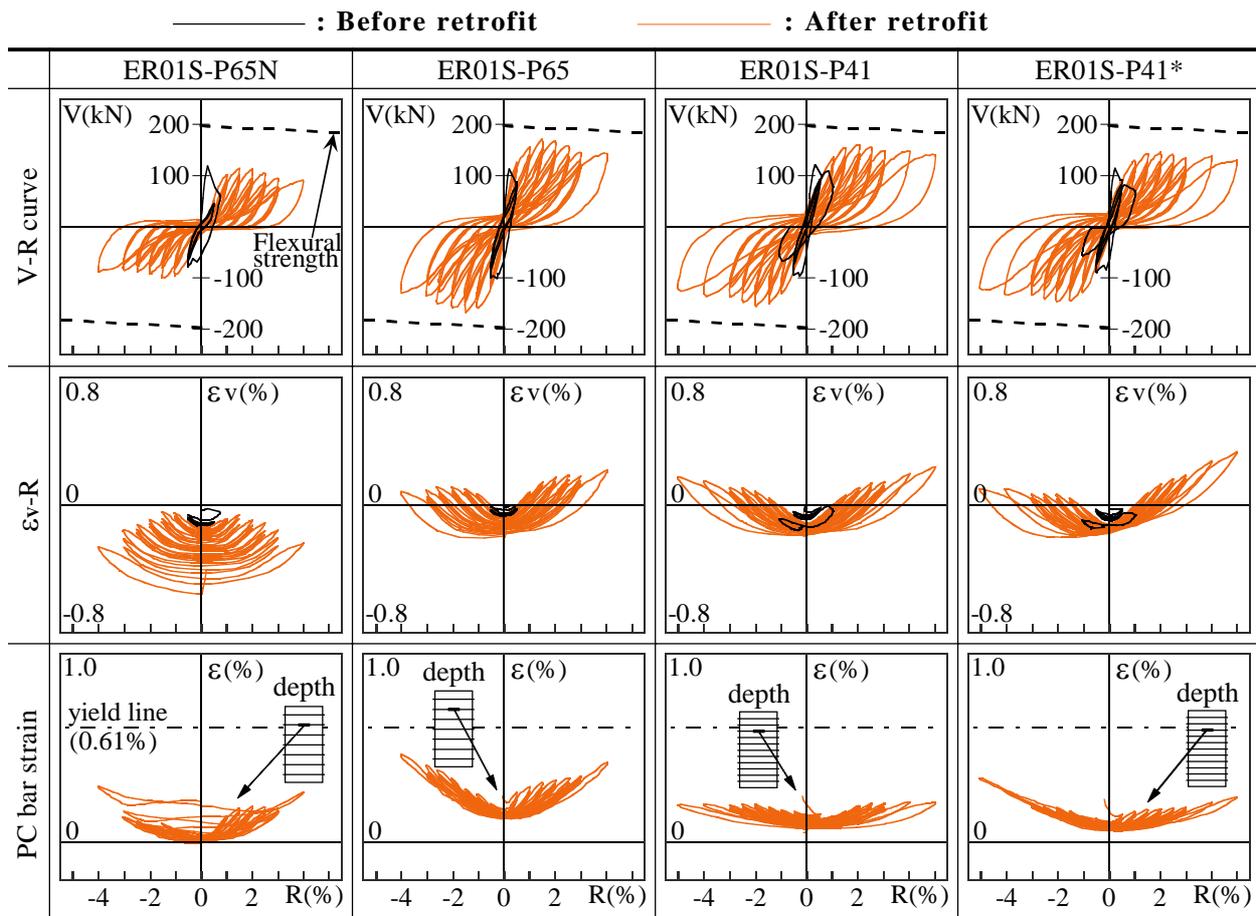


Fig. 4 V-R , ϵ_v -R and PC bar strain of emergency retrofit column specimens

閉じないし、耐力の回復も望めないし、柱中心軸上の平均伸縮ひずみも圧縮ひずみとして縮み続けている。しかし、せん断補強効果と受動的拘束効果により、低い耐力のもとで靱性はかろうじて維持されている。

一方、プレストレスを導入すると耐力もせん断破壊以前の耐力より大きく増大し、靱性も維持され、しかも柱中心軸上の平均伸縮ひずみも部材角が大きくなると伸びひずみが見られ、せん断破壊で損傷した柱が耐震性能を回復したようにすら観察される。また、Fig. 5に示している累積エネルギー吸収能力の差異から、プレストレスを導入する効果も明らかである。しかし、補強前のせん断破壊によりコアコンクリートを含め、コンクリートの損傷が進展しているため、ひび割れを修復することなくいくら補強しても、健全なコンクリートとして計算した曲げ強度略算値までの耐力の回復は困難である。このことは、

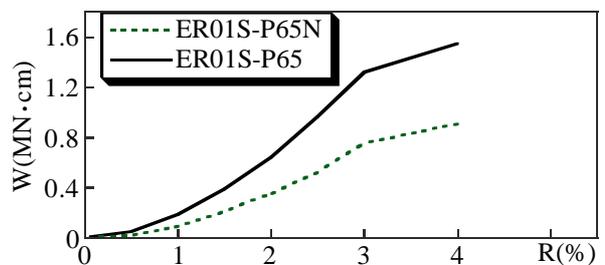


Fig. 5 Accumulated absorbed energy of ER01S-P65N and ER01S-P65

Fig. 4に示した応急補強柱試験体 ER01S-P41 と、Fig. 3に示した恒久補強柱試験体 R99S-P41'を比較すれば明白である。

(2) 柱試験体 ER01S-P41 と ER01S-P41* は同じ応急補強であるが、応急補強のタイムラグ、すなわち応急補強までの時間差を検証した試験体である。両試験体の1サイクル目の水平耐力 V_1 を最大水平耐力 V_{max} で除した耐力低下率を Fig. 6に示す。損傷発生後すぐに応急補強を施した場合

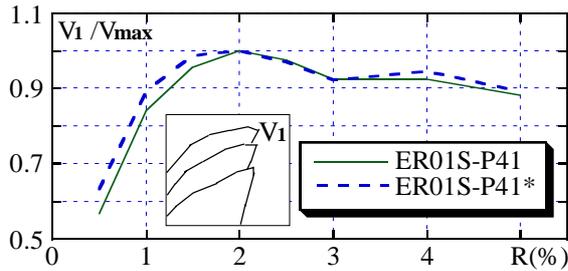


Fig. 6 Decreasing ratio of shear force for ER01S-P41 and ER01S-P41*

合（柱試験体 ER01S-P41）と、約 2 日間の時間をおいて応急補強を施した場合（柱試験体 ER01S-P41*）である。加力実験の結果、応急補強までの約 2 日間という時間差は V_{max} に若干の影響を与えているが、耐力低下率 V_1/V_{max} には Fig. 6 に示すようにほとんど影響を与えていない。ちなみに、約 2 日間の間に残留水平変形がわずかに 0.008% 、柱の中心軸上の圧縮ひずみが -5μ から -10μ 程度それぞれ進行した程度である。軸力と残留変形が生じたままの柱に PC 鋼棒を外帯筋状に配置し、プレストレスを導入すると -0.67% 前後の残留変形が -0.18% 前後に減少することがわかる（Fig. 4 の柱試験体 ER01S-P41* 参照）。すなわち、せん断ひび割れがプレストレスの導入により閉じて、ある程度の弾性能を回復するからではないかと推定される。

(3) Fig. 4 に示した PC 鋼棒のひずみ-部材角関係より、応急補強前の RC 柱の損傷が大きいと、PC 鋼棒にプレストレスを導入しても、その後の加力で PC 鋼棒がいったん緩む傾向がある。また、部材角が増大しても PC 鋼棒のひずみが減少するようであれば、応急補強の効果は期待できないと判断できそうである。すなわち、このことは応急補強が適用可能な損傷限界をオーバーしていることを意味する。

以上の実験結果、及び考察より本補強法は応急補強にも十分利用できることがわかった。しかも、プレストレスの導入は損傷レベルが極度に大きくない限り応急補強においては、特に効果的であることも明らかになった。ただし、応急補強が適用可能な損傷限界レベルに関してはま

だ十分な検討が必要であり、今後の重要な研究課題でもある。また、ひび割れ面をエポキシ樹脂等で修復後に、本耐震補強を施せば健全なコンクリートレベルまで耐力の回復が可能かどうかとも今後の検討課題である。

4. 解析的検討

せん断スパン比が 1.0 の極短柱で、しかもせん断補強筋比が 0.08% と少ないので、脆性的なせん断破壊を起こした。その後、コーナブロックを柱の四隅に配置し、これらを介して PC 鋼棒を外帯筋状に周回させ、耐震補強を施して再度一定軸力下の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、プレストレスを導入しなかった応急補強柱試験体 ER01-P65N を除いて、各応急補強柱試験体の主筋はほぼ降伏強度レベルに到達していた。しかし、Fig. 4 に示すようにせん断破壊する前のコンクリートシリンダー強度と、それに基づいた軸力比 0.2 で計算した曲げ強度略算値には、応急補強柱試験体の水平耐力実験値が到達していない。しかし、プレストレスを導入した応急補強柱試験体の水平耐力実験値は、補強前のせん断破壊時の水平耐力実験値を大きく上回っている。

この主な原因は、応急補強を施す際に、大きなせん断ひび割れをエポキシ樹脂等で補修することなく、せん断ひび割れをそのまま残した状態で補強したことにありと考えられる。すなわち、コンクリート強度が初期のシリンダー強度より、見かけ上低下したと考えることも可能である。そこで、プレストレスを導入しなかったため付着劣化を起こしたと推定される応急補強柱試験体 ER01-P65N の実験結果に合致するように、コンクリート強度を低減して小谷・前田の付着強度式³⁾を適用する。付着強度式を適用するにあたっては、プレストレスの導入による能動的横拘束効果を Richart の提案式である $4.1\sigma_r$ で考慮し、その分コンクリート強度に加算し、PC 鋼棒は通常の帯筋比として柱の帯筋比に加算した。なお、計算法の詳細に関しては文献 4) を参照さ

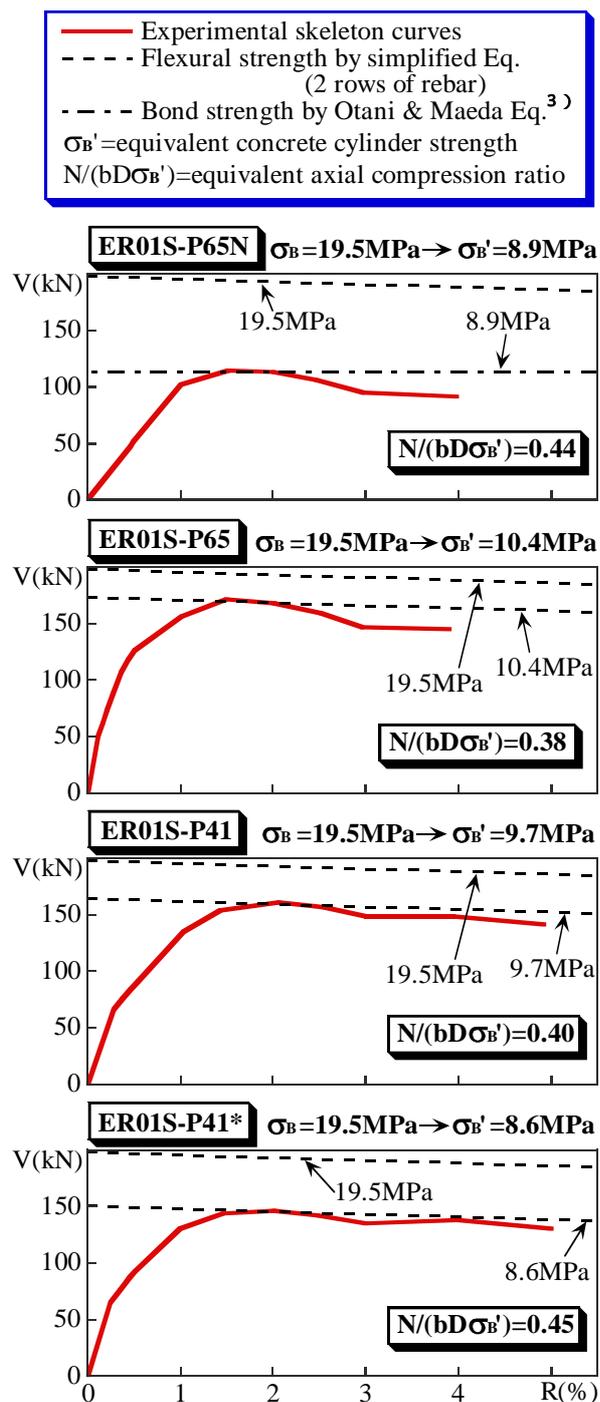


Fig. 7 Experimental skeleton curves and calculated results

りたい。一方、曲げ強度レベルに到達したと推定される残りの3体の応急補強柱試験体には、多段配筋柱の曲げ強度略算式を実験結果に合致するように、コンクリート強度を低減した。

以上の計算結果を実験で得られたスケルトンカーブと一緒に Fig. 7 に示す。Fig. 7 よりコンクリート強度が見かけ上約半分程度低下している。

その結果、軸力比は0.2の2倍前後大きくなった。特に、42時間後に応急補強した試験体 ER01S-P41* の水平耐力はER01S-P41 より小さい。この主な原因は前述のように、応急補強以前に生じた大きなせん断ひび割れを一切修復することなく、約42時間にわたって鉛直荷重を載荷し続けたからと考えられる。これらのひび割れをエポキシ樹脂で修復した後耐震補強を施せば、最初の曲げ強度レベル (Fig. 7 の破線の中で高い方) まで水平耐力を回復可能かどうかは、今後の検討課題である。また、損傷回復限界や応急補強適用限界など今後究明すべき課題も多い。

5. 結論

- (1) 本耐震補強法は恒久的な補強のみならず、応急的な補強法として十分に利用できる。ただし、応急補強が適用可能な損傷限界レベルなどに関してはさらなる検討や研究が必要である。
- (2) プレストレスの導入は恒久補強にも、応急補強にも共に有効であるが、ひび割れなど損傷した柱の応急補強には特に効果的である。
- (3) 損傷ひび割れ面にエポキシ樹脂等を注入し、修復後に本補強を施せば恒久的な耐震補強と見なせるのかも今後の検討課題である。

謝辞：本研究に平成13年度の琉球大学「大学教育研究重点化経費」を受けた。

参考文献：

- 1) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: プレストレスを導入したP C 鋼棒で外帯筋状に横補強したR C 柱の耐震補強法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 526, pp. 141-145, 1999.
- 2) 田川利郎, 山川哲雄, 鴨川茂義, 飯干福馬: P C 鋼棒にプレストレスを導入したR C 極短柱の耐震補強実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 1639-1644, 2000.
- 3) 小谷俊介, 前田匡樹: 異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着割裂強度式 (その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 pp. 655-658, 1994.
- 4) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: P C 鋼棒にプレストレスを導入して外帯筋状に横補強したR C 柱の性能と設計, 日本建築学会構造系論文集, No. 537, pp. 107-113, 2000. 11.