

論文 緊張 PC 鋼棒で応急補強した損傷柱の残存軸耐力と弾塑性挙動

我謝 美千代<sup>\*1</sup>・山川 哲雄<sup>\*2</sup>・宮城 敏明<sup>\*3</sup>・森下 陽一<sup>\*4</sup>

要旨: 極脆性柱をせん断破壊させた後, PC 鋼棒に加えて鋼板やアングルを用いて応急補強を施した柱の残存軸耐力と修復軸耐力および曲げせん断挙動を実験と解析の両面から検討した。その結果, 修復軸耐力の測定により最大曲げ耐力をほぼ予測できることがわかった。また, コンファインドコンクリートに関する既存の構成則の検討も行ったが, 損傷柱にこの構成則を適用するには, 更なる検討が必要であることがわかった。

キーワード: 応急補強, RC 柱, PC 鋼棒, プレストレス, 残存軸耐力, 鋼板, アングル

1. 序

山川・倉重らが提案した緊張 PC 鋼棒を利用した RC 柱の耐震補強法は, 簡便で, 重機を必要としない乾式工法であることに注目すれば, 地震被災直後の応急補強や復旧工事にも活用可能だと考えられる。地震被災直後であっても長期荷重としての鉛直荷重を支えうる余力があれば, 多少の残留変形が生じていても応急補強が有効であることが先の一定軸力下の正負繰り返し水平加力実験(以下, 水平加力実験とする)で明らかにされている<sup>1)</sup>。特に, PC 鋼棒の緊張力を利用して, 損傷した柱の4面に薄い鋼板を圧着すれば, 損傷した柱の耐震性能が大きく改善されることもわかっている<sup>2)</sup>。しかしながら, 損傷した RC 柱の軸耐力(以下, 残存軸耐力とする)や, 応急補強後の修復した軸耐力(以下, 修復軸耐力とする)に関してはまだ未解明である

ので, 一定軸力下の水平加力実験において, 鉛直荷重用のサーボアクチュエータ(2台

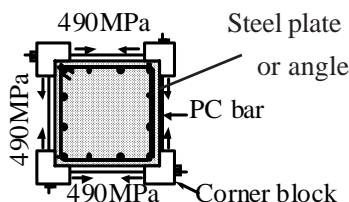


Fig. 1 Detail of retrofit

で最大2000kNの容量)を利用した鉛直荷重実験により, これらの軸耐力を計測した。

こうして実験的に求められた, または推定された軸耐力と, 一定軸力下の水平加力実験による履歴曲線の関係を明らかにすることに本研究の目的がある。

2. 試験体と実験計画

柱試験体の寸法は250 × 250 × 500mmである。せん断スパン比が1.0で, 主筋比(D10 × 12

Table 1 Mechanical properties of materials

Rebar, hoop, PC bar	a(cm <sup>2</sup> )	f <sub>y</sub> (MPa)	ε <sub>y</sub> (%)	E <sub>s</sub> (GPa)
Rebar D10	0.71	372	0.2	186
Hoop 3.7φ	0.11	390	0.19	205
PC bar 5.4φ	0.23	1220	0.61	200
Steel plate 3.2mm	0.76	276	0.13	212

Notes: a=cross section area, f<sub>y</sub>=yield strength of steel, ε<sub>y</sub>=yield strain of steel, E<sub>s</sub>=Young's modulus of elasticity.

Table 2 Column specimens

	ER03S-P41S	ER03S-P41SN	ER03S-P65A
Specimen M/(VD)=1.0			
Pretension strain	2450μ	Non	2450μ
Max. crack width	6.0mm (Medium)	0.8mm (Small)	1.6mm (Small)
PC bar	5.4φ-@41mm		5.4φ-@65mm
Axial force ratio	0.2		
σ <sub>B</sub>	28.3MPa		
Retrofit detail	Steel plate (240 × 470 × 3.2mm)		Steel angle (L-50 × 50 × 6-@65)

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 (正会員)

\*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

\*3 東急建設九州支店・琉球大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 (正会員)

\*4 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 工博 (正会員)

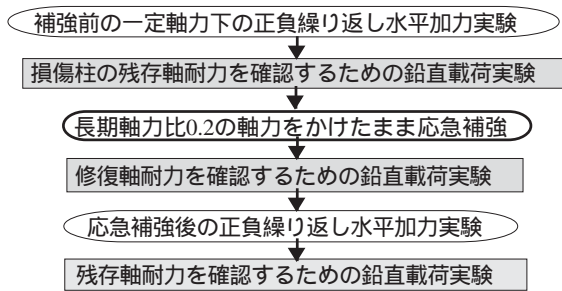


Fig. 2 Flow of loading test

本)は  $p_g=1.36\%$  , 帯筋比 ( $3.7\phi-@105\text{mm}$ ) は  $p_w=0.08\%$  と非常に小さい極脆性柱である。耐震補強を施さなければ既存 RC 柱として本試験体は、脆性的なせん断破壊を容易に起こす試験体である。試験体に水平加力実験により損傷を与えた後, Fig. 1 に示す応急補強を行った。試験体 ER03S-P41S と ER03S-P41SN は損傷した柱の4面に  $240 \times 470 \times 3.2\text{mm}$  の鋼板をあてた上で, コーナーブロックを介して柱の外周に PC 鋼棒を架け渡し, 応急補強した試験体である。ただし, プレストレスの効果を検証するために試験体 ER03S-P41S は所定の緊張力を導入し, 試験体 ER03S-P41SN は緊張力を導入していない。試験体 ER03S-P65A は鋼板に代って柱の外周にアングルを  $65\text{mm}$  間隔で配置し, その上から PC 鋼棒に導入した緊張力を利用してアングルを圧着した。アングルを利用した理由は, 鋼板より面外曲げ剛性が大きいと考えたからである。また, 柱の損傷レベルは試験体 ER03S-P41S が Medium (最大ひび割れ幅が  $5 \sim 6\text{mm}$ ) でひび割れ幅は大きい。他の2体は損傷レベル Small (同  $1 \sim 2\text{mm}$ ) である (Table 2 参照)。

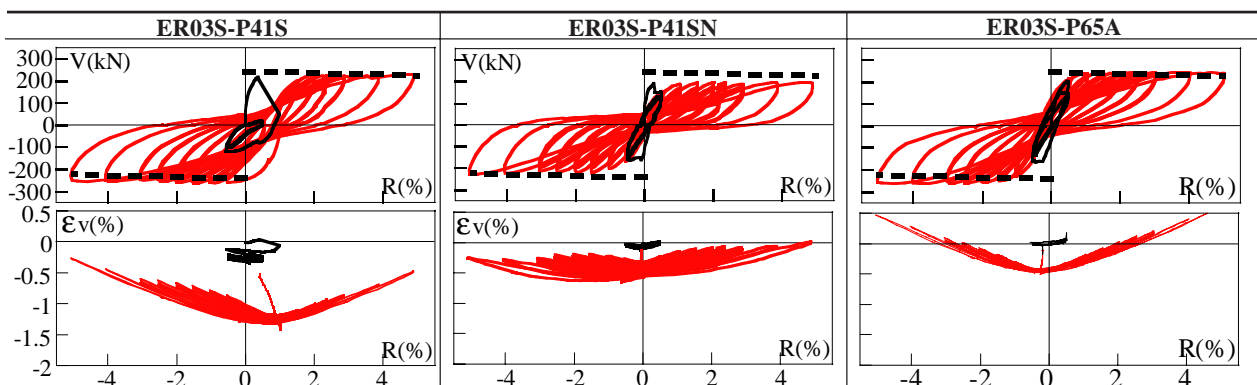
加力実験に関する流れを Fig. 2 に示す。正負繰

り返し水平加力実験を2回と, 鉛直載荷実験を3回行った。水平加力実験は建研式加力装置を用い, 軸耐力計測時を除き, 一定軸力下 (軸力比  $0.2$ ) で行った。加力は部材角  $R$  を  $0.5\%$  ずつ増加させ, 同一振幅で3サイクルずつ繰り返し,  $R=3\%$  を目標に行った。さらに, 変形能力が期待できるようであれば,  $R=4\%$  および  $5\%$  で正負1回繰り返し加力を行った。鉛直載荷実験では, サーボアクチュエータを利用して鉛直荷重をかけ軸耐力を測定した。なお, 応急補強前の鉛直載荷実験において, 軸力を最大耐力時まで作用させると, 損傷柱が圧縮破壊を起し, 応急補強が不可能になる恐れがある為, ここで示す残存軸耐力は, 最大耐力に至る前の多少控えめな値となっている。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 試験体 ER03S-P41S

無補強での水平加力実験において,  $R=0.4\%$  時に大きなせん断ひび割れが発生し, 水平変位が一気に  $R=1\%$  近くまで進行した (Fig. 3 参照)。すなわち, せん断破壊が発生した。その時のせん断ひび割れ幅は  $4 \sim 5\text{mm}$  程度である。その後, 損傷をさらに拡大させるために,  $R=0.5\%$  で合計3回の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果, ひび割れ幅が  $6\text{mm}$  まで拡大した (Fig. 4 参照)。水平荷重を零に戻した時の残留変位は  $R=0.09\%$  であった。この状態で, 鉛直載荷実験により残存軸耐力の確認を行ったところ, Fig. 5 に示すようにコンクリートシリ



Notes: — Before emergency retrofit, — After emergency retrofit, - - - Flexural strength by the simplified Eq.

Fig. 3 Measured V-R and  $\epsilon_v$ -R relationships

ER03S-P41S	ER03S-P41SN	ER03S-P65A
R=0.5% → 3 cycles (6.0mm)	R=0.5% → 3 cycles (0.8mm)	R=0.5% → 3 cycles (1.6mm)

( )=max. crack width

Fig. 4 Observed cracking patterns before retrofit

ダー強度比（以下、 $N/(bD\sigma_B)$ とする）は0.3程度であった。なお、 $N$ は鉄筋の負担分も含めたRC柱として計測された鉛直荷重値である。この鉛直載荷実験でひび割れ幅が6.5～9mmにさらに拡大した。この状態で、軸力比を0.2まで戻し、鋼板とPC鋼棒を用いた応急補強を施し、緊張力を導入した後に再度、鉛直載荷実験を行い、修復軸耐力を計測した。その結果、 $N/(bD\sigma_B)$ は約0.9まで回復していることが確認できた。この後、0.2の軸力比を維持したまま水平加力実験を行った。その結果、Fig. 3に示すように、せん断破壊が防止され曲げの弾塑性挙動に移行しているが、正負で水平耐力が若干異なり、かつ軸圧縮ひずみも増大していることが確認できる。なお、Fig. 3に示す破線は、 $\sigma_B$ を用いて算出したAIJによる曲げ強度略算値である。

### 3.2 試験体 ER03S-P41SN

無補強での水平加力実験において、初期せん断ひび割れが $R=0.3\%$ で発生し、 $R=0.5\%$ を3回正負繰り返した後のひび割れは0.95mm程度まで拡大した。その後の鉛直載荷実験で、 $N/(bD\sigma_B)$ が約0.4であることを確認した。その後緊張力を導入しない応急補強を施し、2回目の鉛直載荷実験を行い、 $N/(bD\sigma_B)$ が約0.8に回復していることを確認した（Fig. 5参照）。さらに、2回目の水平加力実験を行った。PC鋼棒に

緊張力が導入されていないので、水平耐力はPC鋼棒に緊張力を導入した試験体ER03S-P41Sに比較して、18%程度低く、また曲げ強度略算値より正側で約20%程度低いことがわかった（Fig. 3参照）。

### 3.3 試験体 ER03S-P41A

無補強での水平加力実験において、 $R=0.4\%$ でせん断ひび割れが発生し、 $R=0.5\%$ のサイクルを繰り返すたびに、せん断ひび割れ幅が拡大し、最終の3回目終了時には、1.6mmのせん断ひび割れ幅になった。その後、水平力を零にもどし、残存軸耐力を確認した。Fig. 5に示すように $N/(bD\sigma_B)$ の0.5をやや超えるところまで鉛直荷重を載荷した。そして、アングルとPC鋼棒を用いて応急補強を施し、再度鉛直荷重をかけ修復軸耐力を確認した（Fig. 5参照）。次に、一定軸力下（軸力比0.2）の水平加力実験を行った。試験体ER03S-P65Aの損傷レベルは試験体ER03S-P41SNとほぼ同程度であるが、PC鋼棒の配置間隔が65mm、と大きいにもかかわらず、Fig. 3に示すようにV-R履歴曲線は好ましい形状を呈している。アングルによる横拘束効果が大きいことによると考えられる。また、柱の平均軸ひずみ $\epsilon_v$ と部材角 $R$ の関係を表す曲線において、部材角の増加に伴い引張ひずみが生じている。さらにFig. 5に示すように、補強後の軸耐力は鉄筋も含めて $N/(bD\sigma_B)$ が約1.0に回復していることがわかる。

### 3.4 補強材ひずみ

柱頭近傍の水平加力方向と平行面のPC鋼棒のひずみをFig. 6に示す。また、柱せい面における鋼板およびアングルの水平加力方向のひずみをFig. 7に示す。試験体ER03S-P41SのPC鋼棒のひずみは、初期緊張時のひずみと部材角が

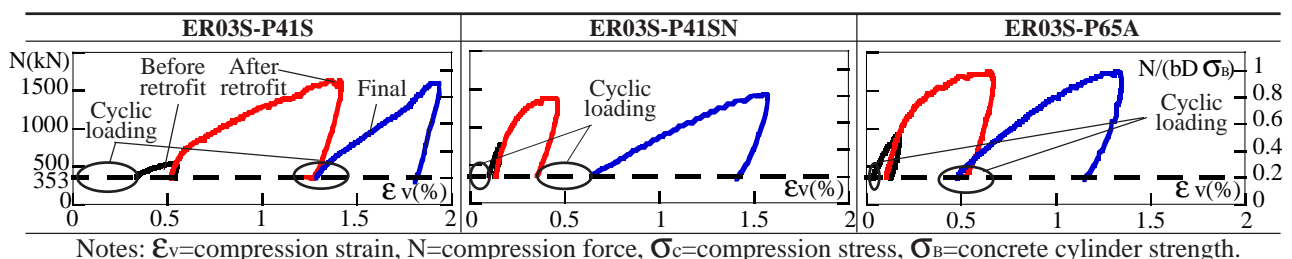


Fig. 5 Measured axial force vs. axial compression strain

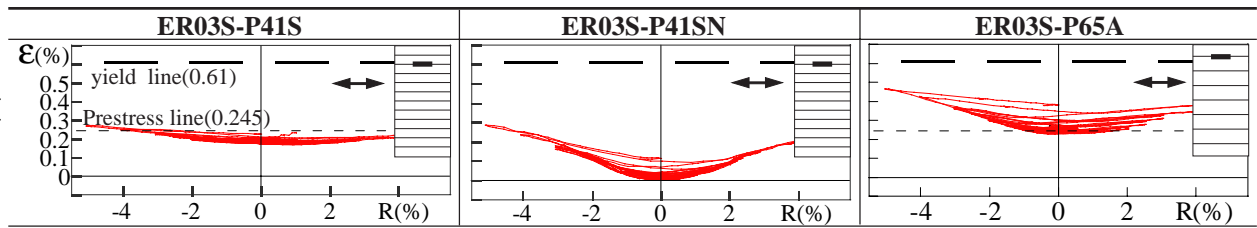


Fig. 6 Measured strain of PC bar (depth side)

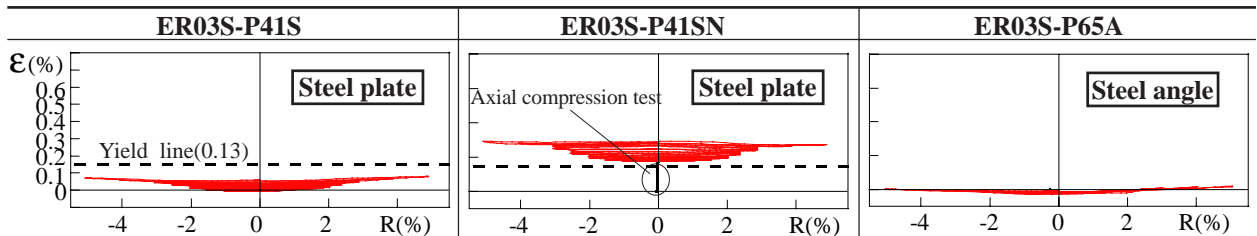


Fig. 7 Measured strain of steel plate and steel angle (depth side)

大きい段階とでは大きく変動していない。一方、試験体ER03S-P41SNのPC鋼棒のひずみは部材角が大きくなるに伴いひずみも大きくなっている。同様に試験体ER03S-P65Aは部材角が大きくなるに伴い、PC鋼棒のひずみも大きくなっている。ただし、いずれの試験体においてもPC鋼棒の降伏ひずみを下回っている。

鋼板の周方向ひずみが最も大きく発生しているのは、PC鋼棒に緊張力を導入しなかった試験体ER03S-P41SNである。PC鋼棒のひずみと同様部材角が大きくなるに伴いひずみは大きくなり、降伏ひずみを大きく上回っている。試験体ER03S-P41Sは、部材角が大きくなるに伴い、鋼板ひずみも大きくなっているが、降伏ひずみには達していない。試験体ER03S-P65Aのアン

グルのひずみはほとんど発生していない。

#### 4. 解析的検討

##### 4.1 軸耐力と曲げ耐力

Fig. 5に示す各試験体の最大残存軸耐力値から、主筋が負担する軸力を差し引いた値をTable 3に示す。その算出方法は、平面保持が成り立つと仮定し、補強前後のコンクリート強度を算出した。つまり、試験体ER03S-P41Sにおいては、補強前のコンクリート強度は3.7MPaで、補強後のコンクリート強度は21.2MPaに上昇していることを表す。

次に、そのコンクリート強度を用い、曲げ強度略算式およびせん断強度式により算出した設計値と、水平加力実験のスケルトンカーブとの

Table 3 Axial capacity and compressive concrete strength

Test specimen	ER03S-P41S			ER03S-P41SN			ER03S-P65A		
	RC (kN)	Concrete (kN)	Concrete strength (MPa)	RC (kN)	Concrete (kN)	Concrete strength (MPa)	RC (kN)	Concrete (kN)	Concrete strength (MPa)
Before retrofit	542	225	3.7	765	613	9.9	916	731	11.9
After retrofit	1623	1306	21.2	1373	1056	17.1	1743	1426	23.1

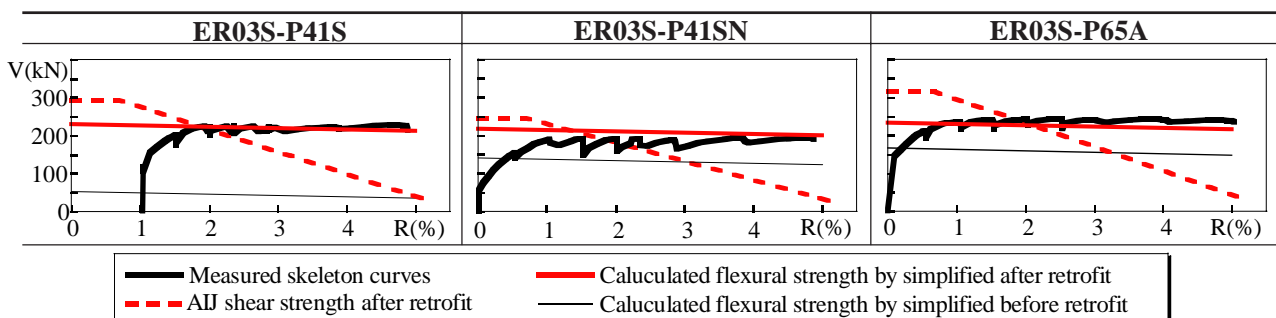


Fig. 8 Measured skeleton curves and calculated strength

比較を Fig. 8 に示す。なお、試験体 ER03S-P41S は損傷が大きいため、スケルトンカーブの始まりは部材角 1% からとなっている。また、せん断強度式に用いる PC 鋼棒の降伏点強度は、プレストレスの有無に関係なく計算上 800MPa を用いた<sup>6)</sup>。Fig. 8 より、いずれの試験体においても水平加力実験のスケルトンカーブと、鉛直載荷実験から求めた曲げ強度略算式のラインがほぼ一致している。よって、軸耐力の測定は曲げ耐力値を予測するのに、有効だと考えられる。

#### 4.2 受動的および能動的拘束効果の算定

補強材を配置することによる補強効果として、せん断補強、コンクリートの横拘束効果および主筋の座屈防止が挙げられる。ここでは、主にコンクリートへの横拘束効果について記述する。

Mander 式<sup>3)</sup>と崎野・孫式<sup>4)</sup>を用いて補強材を配置することによる横拘束効果(以下、受動的横拘束効果という)によるコンクリート強度を算定する。Mander 式は、横補強筋による横拘束効果を考慮した応力 - ひずみ関係を定式化したもので、帯筋がテンション材として機能するモデルである。一方、崎野・孫式は、横補強材で拘束されたコンクリートの応力 - ひずみ関係を定式化したものである。つまり、テンション材の帯筋から、面外曲げ材の鋼板までを横補強材として連続的に取り扱ったモデルである。

PC 鋼棒に緊張力を導入することによる横拘束効果(以下、能動的横拘束効果とする)は、Richart ら<sup>5)</sup>の評価式に  $k_e$  を乗じた式(1)のように定義する。

$$\sigma_{ac} = 4.1 \times \sigma_r \times k_e \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_r$  は PC 鋼棒による側圧を表し、 $k_e$  は Mander 式の有効側圧係数を示す。 $k_e$  を求める際のアーチ作用角 ( $\theta$ ) は一般に  $45^\circ$  を用いるが、鋼板補強の場合は  $\theta=30^\circ$  とし、アングル補強の場合は  $\theta=0^\circ$  と仮定した。すなわち、下地材の面外曲げ剛性が大きくなるにつれて横拘束効果が高まり、有効な拘束領域が広がると考えられることから、 $k_e$  が大きくなるような角度とした。各試験体の  $k_e$  の値を Table 4 に示す。な

お、鋼板補強の場合の  $\theta=30^\circ$  という角度が妥当か否かについては、さらに検討する必要がある。なお、PC 鋼棒の降伏点強度は 800MPa を用い、プレストレスを導入した PC 鋼棒の場合は、1220MPa からプレストレス分を差し引いた強度とした。ただし、上限値は 800MPa とした<sup>6)</sup>。

Mander 式により求める受動的横拘束効果によるコンクリート強度 ( $\sigma_{pc}$ ) は、Table 3 による応急補強前のコンクリート強度 ( $\sigma_B'$ ) に、式(1)で求まる能動的横拘束効果によるコンクリート強度 ( $\sigma_{ac}$ ) を加算し、それを初期強度として求める。鋼板やアングルなどの下地材が PC 鋼棒による受動的横拘束に寄与する効果は、能動的横拘束効果の算出の場合と同じ  $k_e$  を用い、それ以上は特に考慮することはしない。

一方、崎野・孫式による受動的横拘束効果による  $\sigma_{pc}$  では、能動的横拘束効果に用いた  $k_e$  を無視し、鋼板またはアングルが曲げ部材として機能すると仮定し、直接考慮することとした。鋼板は鋼管と見なし、一方アングルは PC 鋼棒に置き換え、その時の PC 鋼棒の径はアングルと PC 鋼棒の断面二次モーメントが一致するように設定した。いずれの構成則においても、最終的に求めるコンクリート強度 ( $\sigma_{cc}$ ) は式(2)に示すように、算出した各々のコンクリート強度を累加することで算出する。

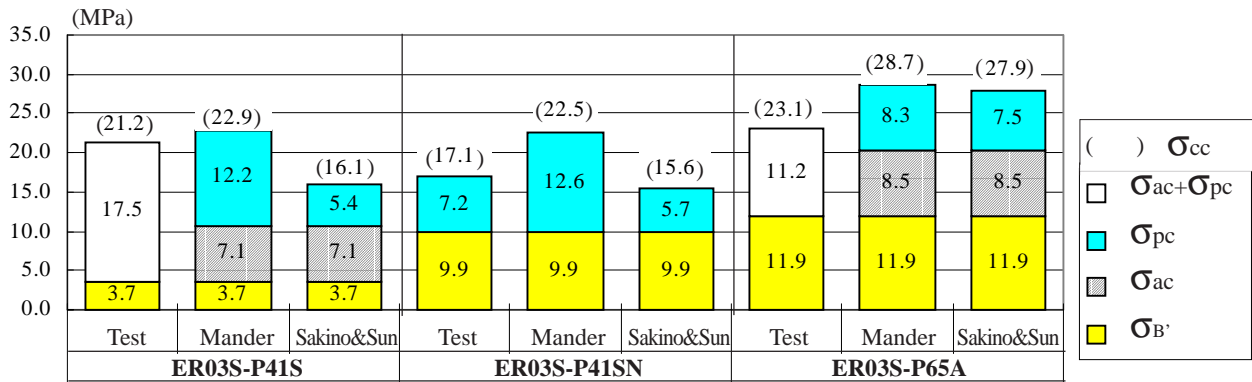
$$\sigma_{cc} = \sigma_B' + \sigma_{ac} + \sigma_{pc} \quad (2)$$

これらの仮定に基づく解析結果と鉛直載荷実験から求まる結果を、Fig. 9 に示す。

プレストレスを導入した試験体 ER03S-P41S において、Mander 式で算定した  $\sigma_{cc}$  と実験値はほぼ一致している。今回の解析方法により、Mander 式を用いて能動的および受動的横拘束効果によるコンクリート上昇強度を算定できると考えられる。一方、崎野・孫式で算定した  $\sigma_{pc}$  は Mander 式より小さめの値となっている。

Table 4 Confinement effectiveness coefficient

	ER03S-P41S	ER03S-P41SN	ER03S-P41A
Arching action	30 °		0 °
ke	0.78		1.0



$\sigma_{cc} = \sigma_{B'} + \sigma_{ac} + \sigma_{pc}$ ,  $\sigma_{pc}$ =passive confinement,  $\sigma_{ac}$ =active confinement,  $\sigma_{B'}$ =damaged concrete strength.

Fig. 9 Concrete strength of damaged/emergency retrofitted columns

プレストレスを導入していない試験体 ER03S-P41SNにおいて、Mander式による $\sigma_{cc}$ は実験値よりかなり大きくなっている。一方、崎野・孫式による $\sigma_{cc}$ は実験値より少し小さめであるが、ほぼ一致している。プレストレスを導入しない場合、Mander式での受動的横拘束効果は過大評価となることが考えられる。

アングルを用いた試験体ER03S-P65Aにおいて、Mander式および崎野・孫式による $\sigma_{cc}$ とも実験値より高めの値となっている。これはアングルの効果を過大評価しているからと思われる。と同時に、鉛直載荷実験がいずれの試験体においても、加力実験の継続性を考慮して控えめに終了しているため、実験による軸耐力が小さめに評価される傾向がある。Mander式や崎野・孫式などの既存の構成則と実験結果を組み合わせ、実験上の軸耐力をより正確に求めることも必要であろう。

## 5. 結論

- 1) 今回の鉛直載荷実験において、極脆性柱はせん断破壊したとしても、その柱の損傷レベルにも依存するが、残存軸耐力は $N/(bD\sigma_B)$ で0.3 ~ 0.6程度を維持していることが確認できた。
- 2) 損傷した柱に鋼板やアングルを下地材にPC鋼棒で応急補強し、かつ緊張力を導入することで修復軸耐力は $N/(bD\sigma_B)$ で1.0近くまで回復できると考える。一方、緊張力を導入しない場合の修復軸耐力は、 $N/(bD\sigma_B)$ で0.8程度に留まる。
- 3) 軸耐力の測定結果から推定したコンクリート

強度は、最大曲げ耐力を予測するのに有効である。

- 4) 補強により回復するコンクリート強度をMander式および崎野・孫式の構成則を用いて算出を試みた。いずれの構成則においても、実験値と解析結果はほぼ一致するものの、十分にコンクリート強度の上昇分を説明できなかった。今後、損傷レベル、補強量およびプレストレスレベルをパラメータとした実験的研究により、PC鋼棒による能動的および受動的横拘束効果を考慮した構成則の確立が必要である。

**謝辞**：本研究は平成14年度科学研究費補助金・基盤研究(B)(一般14350306, 研究代表者：山川哲雄)を受けた。PC鋼棒は高周波熱錬(株)から提供を受けた。

- 引用文献**：1) 山川哲雄, 李文聰, 倉重正義：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，コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 24, No. 2, pp.1219-1224, 2002.
- 2) 宮城敏明, 山川哲雄, 李文聰, 木村一洋：緊張PC鋼棒と鋼板を用いた損傷極脆性柱の応急補強実験と解析，コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 25, No. 2, pp.1519-1524, 2003.
- 3) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No. 8, Aug. 1988, pp.1804-1826.
- 4) 崎野健治, 孫玉平：直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集, No.461, pp. 95-104, 1994.7.
- 5) Richart, F.E. et al: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Bulletin, No.185, 1928.
- 6) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義：PC鋼棒にプレストレスを導入して外帯筋状に耐震補強したRC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.