

# 論文 緊張PC鋼棒と鋼板で横補強した短柱の高軸力下での実験と解析

森下 陽一<sup>\*1</sup>・山川 哲雄<sup>\*2</sup>・仲田 傑<sup>\*3</sup>・李 文聰<sup>\*4</sup>

**要旨:**高軸力下(軸力比0.6)の短柱(せん断スパン比1.5)にPC鋼棒によりプレストレスを導入し,さらにPC鋼棒の緊張力を利用して曲げ剛性の高いアングルを座屈の生じやすい柱端部四面に,局所的に圧着して高横拘束する耐震補強法を提案する。この弾塑性挙動を実験と解析の両面から検討した結果,十分な横拘束力を柱端部に与えれば短柱であっても,高軸力下で耐力・靱性の向上に加え,軸縮みの進行も改善されることが明らかになった。

**キーワード:**高軸力,せん断柱,PC鋼棒,プレストレス,アングル,耐震補強

## 1. 序

山川・倉重らが提案したPC鋼棒によりプレストレスを導入した耐震補強法<sup>1)</sup>は,帯筋のように主筋を直接拘束していないので,高軸力が作用するとコーナブロックで圧着される隅筋を除いて中間主筋が座屈しやすい。中間主筋が座屈すると耐震性能が極度に劣化する恐れがある。2002年度に行った加力実験では,この主筋の座屈を抑えるために,鋼板を柱の周辺に四面ともあて,柱隅角部のコーナブロックではさみ,PC鋼棒に緊張力を導入し,鋼板を柱に圧着する耐震補強法を検討し,高軸力下のRC柱にも有効に利用できることがわかった<sup>2)</sup>。ただし,ある程度の軸縮みは高軸力であるゆえに避けられない。そこで,主筋の座屈を抑え軸縮みを少なくできれば,高軸力を受けても高い耐震性能を維持できることは可能であると思われる。

本研究では,せん断スパン比1.5の短柱が高軸力比0.6を受けた場合の弾塑性挙動を検討する。さらに,鋼板よりも曲げ剛性の高いL形鋼(以下アングル)を,PC鋼棒に導入する緊張力を利用して,柱端部に局所的に圧着することで高い耐震性能を確保するとともに,軸縮みの進展を抑えようとする耐震補強法も合わせて検討する。

## 2. 実験計画

250×250mmの正方形断面で柱高さ750mmの柱による,一定軸圧縮力下(軸力比=0.6)の正負繰返し水平加力実験を建研式加力装置で行った。部材角R=0.5%から0.5%の増分で3回づつ繰返し,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回づつ正負繰返しした。柱試験体総数は4体である。これらの力学的材料定数を主筋や帯筋も含めてTable 1に,柱試験体における耐震補強の詳細をFig. 1(補強法は上下対称なので上半分のみ示す)に,試験体一覧表をTable 2に各々示す。

試験体R03M-P41ShとR03M-P41AhはPC鋼棒を41mm間隔で配置し,緊張力を導入することによってR03M-P41Shには柱四面に鋼板を,R03M-

Table 1 Mechanical properties of material

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	371	0.20	186
Hoop	3.7φ	0.11	391	0.19	205
PC bar	5.4φ	0.23	1202	0.61	200
Steel plate	2.3	2.5*	302	0.14	216
Steel angle	L-50×50×6	250**	-	200	

Note : 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, \*thickness(mm), \*\*assumed values .

\*1 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 工博 (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 琉球大学 理工学研究科環境建設工学専攻 修士課程

\*4 琉球大学 理工学研究科生産エネルギー工学専攻 工修 (正会員)

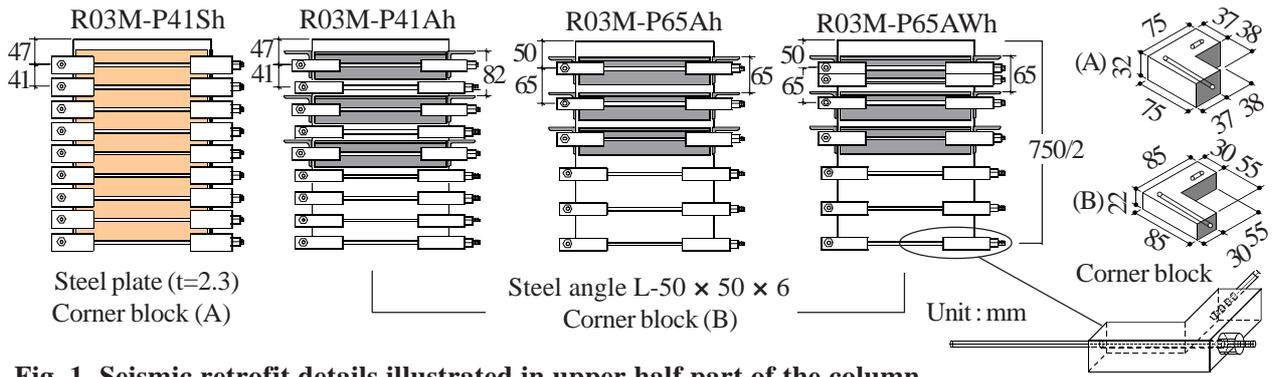


Fig. 1 Seismic retrofit details illustrated in upper half part of the column

Table 2 Retrofitted column specimens

	R03M-P41Sh	R03M-P41Ah	R03M-P65Ah	R03M-P65AWh
Specimen				
PC bar	5.4φ-@41		5.4φ-@65	5.4φ-@65*
Prestress	490MPa			
Plate or Angle	Plate (710×240×2.3)	Angle-@82 (3sets × 2)	Angle-@65 (3sets × 2)	Angle-@65 (3sets × 2)
Common details	N/(bDσ <sub>B</sub> )=0.6, Hoop : 3.7φ-@105 (p <sub>w</sub> =0.08%), σ <sub>B</sub> =20.2MPa, Rebar : 12-D10 (p <sub>g</sub> =1.36%). Unit : mm			

\*=Double PC bars were placed on the top and bottom angles only.

P41Ahにはアングルを柱端部に82mm間隔で三段圧着して補強した。ただし、P C鋼棒は41mm間隔で配置した。試験体 R03M-P65Ah と R03M-P65AWh は P C鋼棒を全段 65mm 間隔、アングルを上下三段に 65mm 間隔で配置し、さらに R03M-P65AWh の最端部のアングルには P C鋼棒をダブル(二本)で配置している。

Table 2 について、全ての試験体は柱を縦置きで同時にコンクリートの打設を行い、加力実験も 4 体を約 1 週間で行った。

プレストレスを導入する際は、あらかじめ手締めで所定の間隔に P C鋼棒を配置し、降伏点強度の約 1/3 強の 490MPa (約 2450μ) を四隅から同時に導入した。

### 3 . 実験結果及び考察

実験終了後の各柱試験体のひび割れ状況 (鋼板及びアングル取り外し後の状況) を Fig. 2 に

示す。損傷が柱頭部に集中しているのは、試験体を縦置きでコンクリートを打設しているため、ブリージングの影響で柱頭部のコンクリートが低くなっていることが考えられる。

柱試験体のせん断力 V と部材角 R、及び柱材軸上の平均ひずみ  $\epsilon_s$  と部材角 R の関係に関する実験結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 の

V-R 曲線図に破線で示した直線は、横拘束効果を見捨てた多段配筋柱の曲げ強度略算値である。全ての P C鋼棒についてひずみを測定したが、その中で Fig. 4 に示した位置の P C鋼棒に関するひずみ測定結果を Fig. 5 に示す。

試験体 R03M-41Sh は P C鋼棒を 41mm 間隔で配置して緊張力を導入し、さらにコーナブロックの圧着作用を利用して柱四面に厚さ 2.3mm の鋼板をあてる補強を行った。本試験体は R=0.5% で柱脚に曲げひび割れが生じ、柱頭の最外縁及び中段主筋が圧縮降伏した。水平耐力も多段配筋柱の曲げ強度略算値 (横拘束効果は見捨て) よりもかなり高めの値が得られ、R=2.0% で最大耐力を迎え、R=5.0% まで耐力を維持し、曲げ破壊挙動を示している。しかし、部材角が大きくなるにつれ、厚さ 2.3mm の鋼板ではカバーコンクリートのはらみだし及びコーナブロックで圧着されていない中間主筋の座屈を抑えきれ

ず、圧縮ひずみは2.0%を超えている。そのためPC鋼棒にははらみだしたカバーコンクリートの分布横荷重が鋼板を介して加わるため、柱頭部には曲げによって降伏するPC鋼棒がみられた。本補強法で耐力、靱性は確保できるが、中間主筋のある程度の座屈は不可避であった。

この実験結果を受け、試験体R03M-P41AhとR03M-P65AhはPC鋼棒による補強に加え、主筋の座屈を抑えるために、鋼板よりも曲げ剛性の高いL-50×50×6のアンクルを柱端部に、局所的に圧着する補強も合わせて行った。試験体R03M-41Ahは上記のサイズのアンクルを使用し、PC鋼棒を41mm間隔で配置するため、アンクルは柱端部から一段置きに82mm間隔で三段配置した。そのため、PC鋼棒は比較的密に配置されているが主筋の座屈防止材であるアンクルの間隔が広がっている。試験体R03M-P41Ahは水

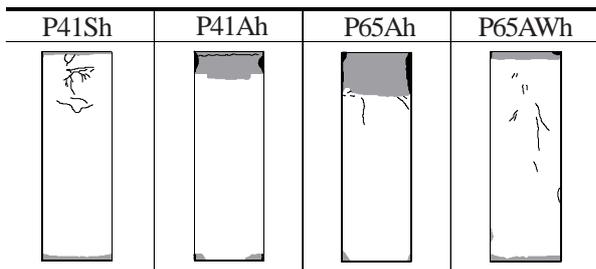


Fig. 2 Observed cracking patterns of R03M series after cyclic loading test (Depth side)

平耐力が曲げ強度略算値に到達し、 $R=2.5\%$ まで耐力は増大したが、 $R=3.0\%$ で柱頭一段目のPC鋼棒が引張り破断し、その直後から耐力の低下と圧縮ひずみの進行が著しくなった。

一方、アンクルを柱端部から65mm間隔で三段配置し、かつPC鋼棒も65mm間隔で配置した試験体R03M-P65Ahにおいても同様に最大耐力を迎えた後、柱頭一段目のPC鋼棒の破断により耐震性能が劣化した。両試験体は最大耐力、靱性能に差異はあるものの破壊モードはともに柱頭のPC鋼棒破断後の曲げ圧縮破壊であると推測される。また、鋼板を圧着した試験体R03M-P41Shの柱断面のはらみだしが中間主筋部分に集中して生じていたのに対し、鋼板より曲げ剛性の高いアンクルを圧着した両試験体の柱は正方形断面を保ったまま膨張していると考えられる。そのためPC鋼棒には大きな引張応力が働き、引張破断に至ったと考えられるが、破断したのは断面の小さくなっているネジ部分で、PC鋼棒中央のひずみは降伏点に達していないことがわかった。なお、PC鋼棒は径6mmの原棒にネジ部を加工し、PC鋼棒として使用する部分の径は5.4mmに削り加工を施してある。

このことから、PC鋼棒の破断を防止するため、試験体R03M-P65AWhはR03M-P65Ahと同様

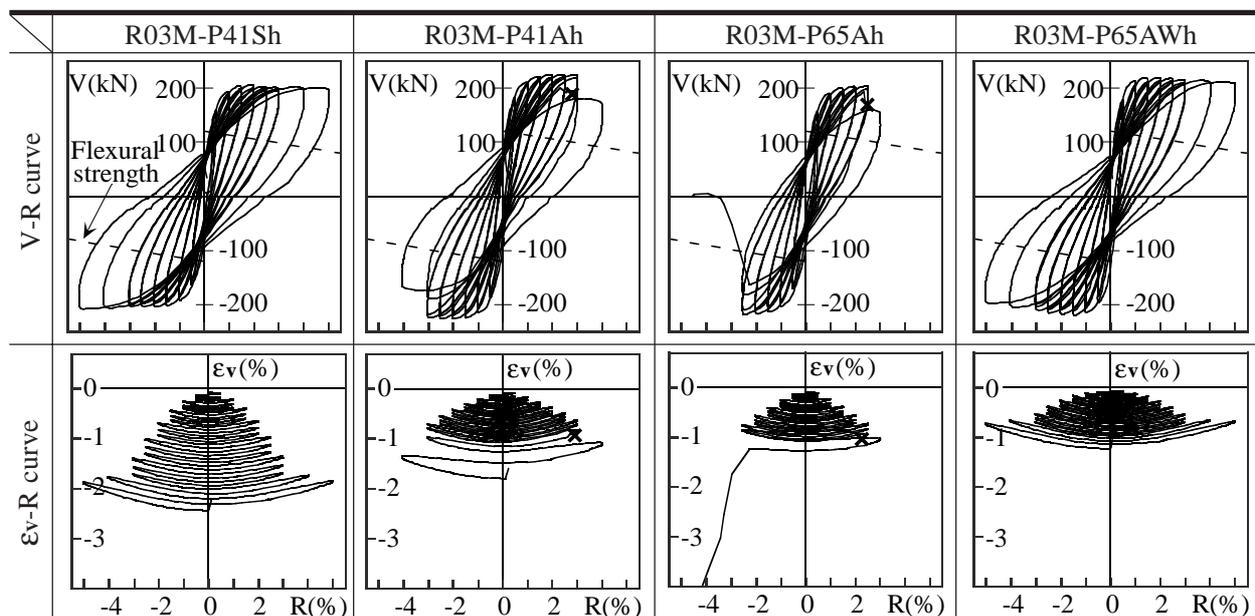


Fig. 3 Measured V-R and  $\epsilon_v$ -R relationships (x: PC bar broken)

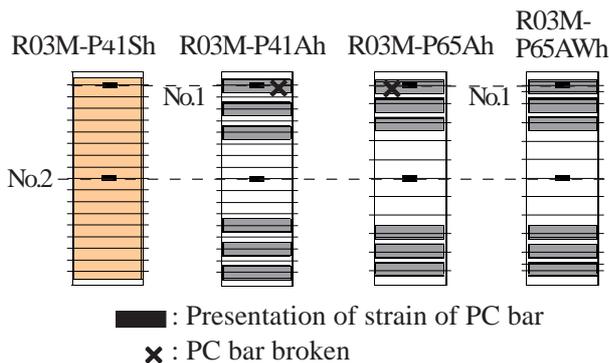


Fig. 4 Presentation of measured strain of PC bars (Depth side)

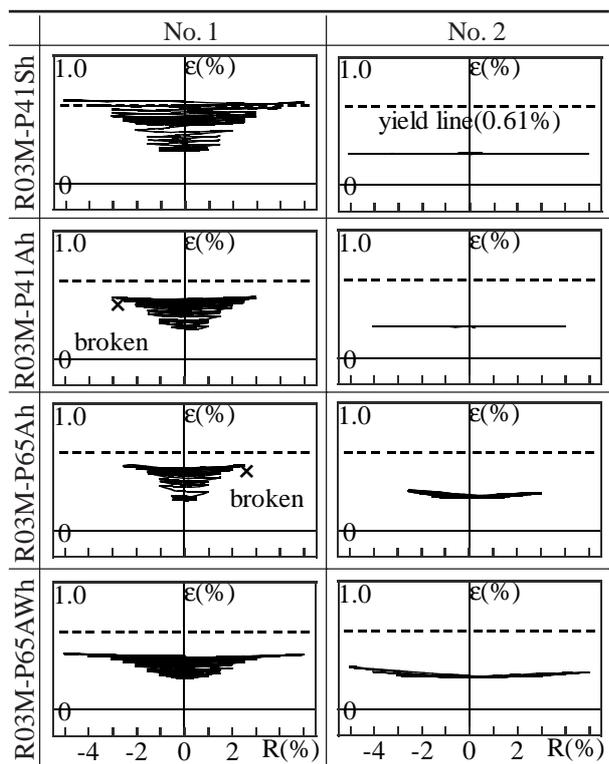


Fig. 5 Measured strain of PC bars (Depth side)

の補強に加え、さらに最も損傷を受けやすい柱端部一段目のアングルのみ二本のPC鋼棒で高横補強し、実験を行った。本試験体は $R=2.0\%$ で最大耐力となり $R=5.0\%$ に至ってもほぼ耐力を維持し続け、望ましい曲げ挙動を示した。鋼板を使用したR03M-P41Shと比較すると耐力は僅かに向上した程度だが、圧縮ひずみの進行は著しく改善されているのが $\epsilon_v$ - $R$ 曲線からわかる。また、柱の膨張によってPC鋼棒に生じる引張応力も二本のPC鋼棒により分担されており、柱頭部一段目のPC鋼棒の引張ひずみの進行も他の試験体に比べやや小さくなっており、ネジ部分も

破断には至っていない。

#### 4. 解析的検討

横補強材により拘束されたコンファインドコンクリートの構成則を、Mander式<sup>3)</sup>と崎野・孫式<sup>4)</sup>で計算した結果をFig. 6に示す。横拘束効果として、能動的横拘束効果(PC鋼棒の緊張力導入に伴う拘束力)と受動的横拘束効果(コンクリートの膨張による拘束反力)に分けて、拘束力によるコンクリート強度の加算を行った。能動的横拘束効果については両式共通して、文献5)によった。能動的横拘束効果を $4.1k_e \cdot \sigma_r$ として、Mander式はプレーンコンクリート強度(本試験体の場合、シリンダー強度の89%<sup>6)</sup>)に、崎野・孫式はシリンダー強度にそれぞれ加算し、同時にせん断補強効果としても考慮する。但し、有効拘束係数 $k_e$ は鋼板及びアングルを用いた場合には、それぞれの曲げ剛性が拘束に及ぼす影響を考慮して拘束応力を $30^\circ$ 及び $0^\circ$ として $k_e$ を評価した。受動的横拘束効果に関して、Mander式で計算する場合は帯筋とPC鋼棒は横補強筋として考慮し、鋼板とアングルについては、PC鋼棒の能動的及び受動的横拘束力の有効拘束係数 $k_e$ の増大にのみ寄与する補助材として考える。また、両式に共通して、PC鋼棒の受動的横拘束効果については降伏点強度からプレストレス導入分を差し引いた強度を用いるが、アングルを圧着した場合はネジ部が約 $5000\mu$ 強で引張破断したため、破断時の強度(約 $1000\text{MPa}$ )からプレストレス導入分を差し引いて用いる。崎野・孫式において、柱四面に鋼板を圧着した試験体R03M-P41Shについては鋼管として扱い、アングルの効果については、PC鋼棒の面外曲げ剛性についてのみ反映され、PC鋼棒の径をアングルと等価な断面二次モーメントを有する大きさに置き換えた。すなわち、面外曲げ剛性の高いPC鋼棒が柱試験体を直接拘束していると考えた。

Fig. 6に示したコンクリートの構成則を利用してファイバーモデルで曲げ強度 $V_f$ を計算した。その際、柱断面で補強量が異なる場合の横拘束

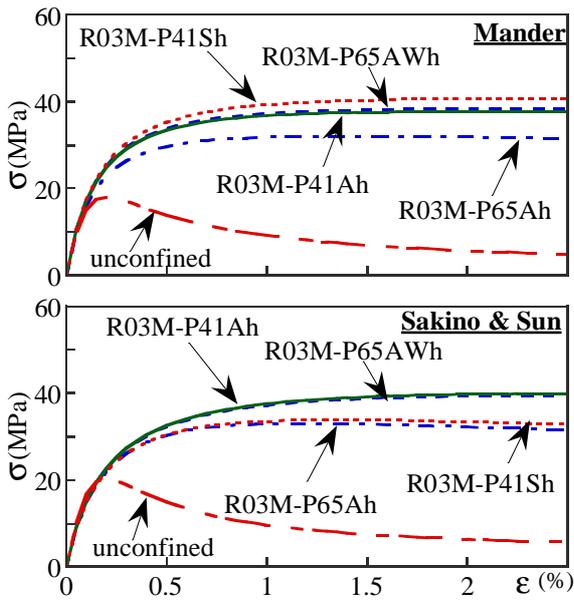


Fig. 6  $\sigma$ - $\epsilon$  curves for concrete by Mander and Sakino & Sun

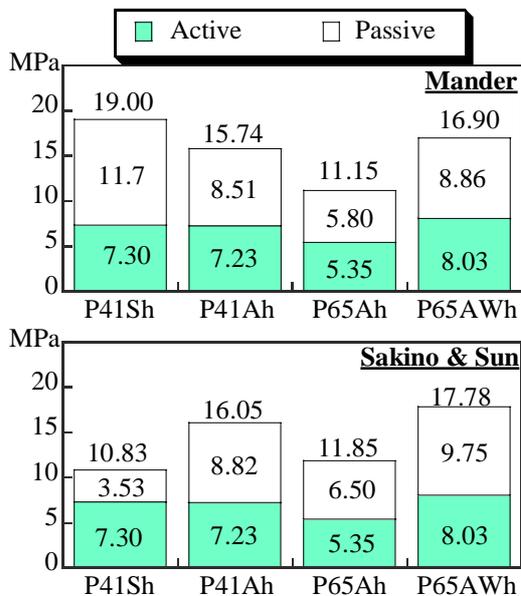


Fig. 7 Increment of concrete strength

効果については、各異なる断面で計算し、平均した有効側圧を用いた。有効側圧によるシリンダー強度からのコンクリート強度の上昇量を図示して Fig. 7 に示す。

せん断強度式には、せん断強度に関する AIJ 靱性指針式  $V_u^{(7)}$  を用い、柱端部と柱中央部で補強法が異なる場合は、それぞれの断面で計算した。  $V_u$  を計算する時には、能動的横拘束効果による強度上昇分のみを考慮したコンクリート強度を用い、PC 鋼棒は降伏点強度のかわりに緊張力の有無に関わらず 800MPa を上限として帯筋比に算

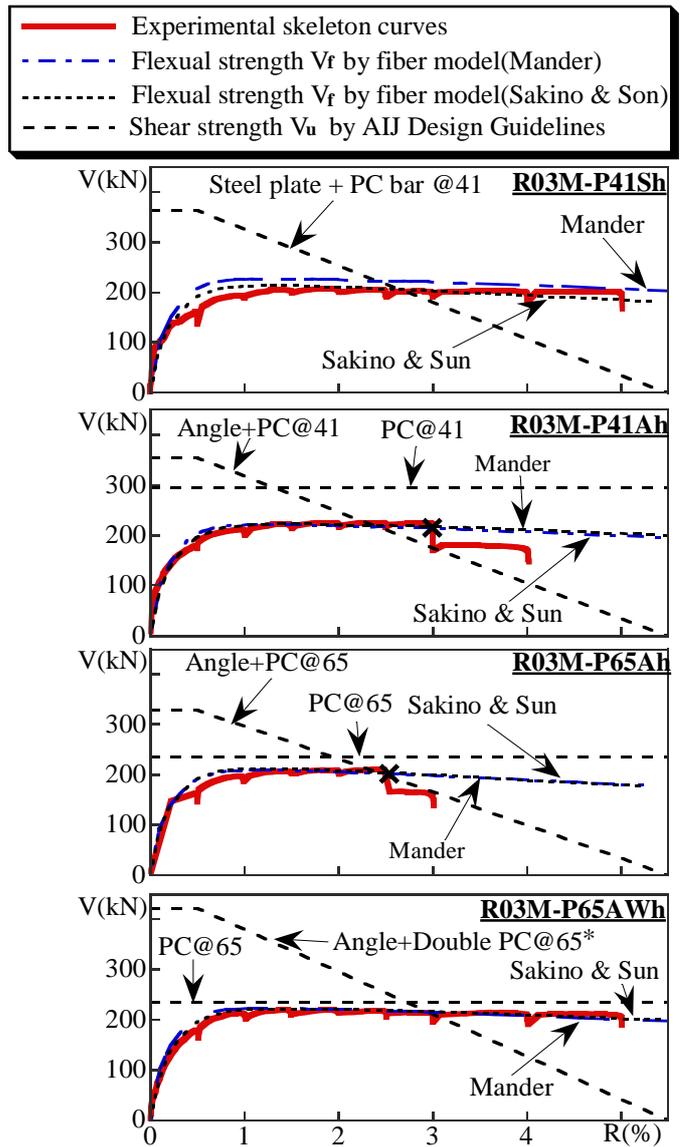


Fig. 8 Calculated and experimental results

入した。この根拠は高強度鉄筋を帯筋に用いた研究成果<sup>8)</sup>を参考にした。PC 鋼棒に緊張力を導入し、鋼板又はアングルを柱に圧着した場合は、コンクリートの圧壊によりせん断強度が決まると仮定して AIJ 靱性指針<sup>7)</sup>のせん断強度式のうち (6.4.3) 式を適用した。

以上の曲げ強度とせん断強度の計算結果と実験で得られたスケルトンカーブとの比較を Fig. 8 に示す。全ての試験体において、柱中央のせん断強度が曲げ強度よりも高い値となっており、せん断破壊を回避しているのがわかる。AIJ 靱性指針のせん断強度式は塑性ヒンジ角が 5.0% に達すると必然的にせん断耐力が零になるため、実際のせん断強度よりも安全側の評価を与える傾向

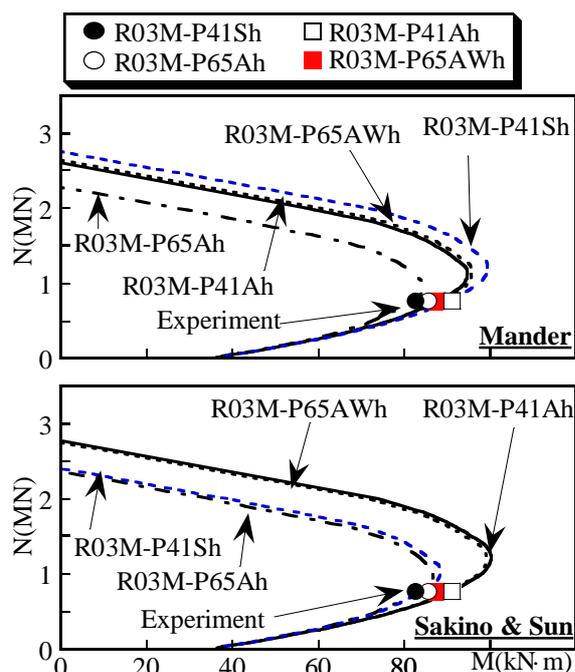


Fig. 9 Calculated N-M interaction and test results

があると考えられる。P C 鋼棒による拘束効果が大きいので、ヒンジ部分のせん断強度の低下が小さく、これが通常の R C 柱を前提にした AII 靱性指針式では十分配慮されていない。そのため、実際のせん断耐力は常に曲げ耐力を上回り、せん断破壊していないと考えられる。Fig. 7 のコンクリート強度上昇量より、試験体 R03M-P41Sh で鋼板を鋼管として取り扱い、面外曲げ剛性を考慮している崎野・孫式と、Mander 式との差異が顕著に現れているが、ファイバーモデルによる曲げ強度の差異は小さい。その他の試験体における曲げ強度は、Mander 式、崎野・孫式共にほぼ等しい評価を与えており、しかも実験値をとらえている。アングルを圧着した試験体3体を比較すると、P C 鋼棒を柱端部一段目のアングルにダブルで配置し、高横拘束した試験体 R03M-P65AWh が最もコンクリート強度上昇量が大きく、望ましい曲げ挙動を示している。

一方、柱端部のアングルを P C 鋼棒一本で横拘束した R03M-P41Ah と R03M-P65Ah は、P C 鋼棒の引張破断により、曲げ圧縮破壊を起こしている。このことは、柱端部のアングルが試験体から受ける膨張圧を一本の P C 鋼棒の引張応力のみで横拘束することは困難であることを示唆し

ている。鋼板を圧着した R03M-P41Sh は、鋼板が変形することで P C 鋼棒の引張破断を防止し、圧縮軸ひずみの進行を伴いながらも耐力・靱性は確保している。

Fig. 6 の構成則を利用して、N-M 曲線をファイバーモデルで計算し、その結果を Fig. 9 に示す。横拘束効果により、全ての試験体で実験値が釣り合い軸力比以下にある。実験値どうしで比較すると、鋼板で柱四面全体を補強するより、アングルで柱端部を局部的に補強するほうが大きい曲げ耐力を有していることがわかる。

## 5. 結論

- (1) コーナーブロックとプレストレスを導入した P C 鋼棒を利用して、柱四面に鋼板を圧着すると、高軸力比 0.6 においても耐力、靱性は確保できるが、中間主筋にある程度の座屈が生じ、軸縮みの進行を完全に抑制することができない。
- (2) L 形鋼を柱端部に局部的に圧着する耐震補強法では、最も横拘束力を必要とする一段目の P C 鋼棒の破断を防止した場合、高軸力下でも高い靱性能が期待できることがわかった。また、軸縮みの進行も著しく改善される。

**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。

### 参考文献：

- 1) 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耐震補強した 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
- 2) 飯干福馬, 山川哲雄, 李文聰, 仲田傑: 高軸力下のせん断柱に緊張 P C 鋼棒を用いた耐震補強実験と解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No.2, pp. 1531-1536, 2003.7
- 3) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 144, No. 8, pp. 1804-1826, Aug. 1988.
- 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) 山川哲雄, 李文聰: 緊張力を導入した P C 鋼棒と鋼板を用いた腰壁付き R C 柱の耐震補強設計法, 日本建築学会構造系論文集, No. 577, pp. 93-100, 2004.3
- 6) 中原浩之, 崎野健治: 高強度材料を用いたコンクリートの充填角形鋼管柱の単調曲げ性状, 日本建築学会構造系論文集, No. 567, pp. 181-188, 2003.5
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1999.8
- 8) 高周波熱錬株式会社: 鉄筋コンクリート造はり、柱のせん断補強筋として P C 鋼棒ウルボンを使用する工法設計指針・同解説, 高周波熱錬株式会社, 1995.12