

論文 鋼管とPC鋼棒のプレストレスで高横拘束したRC柱の実験

小川克幸^{*1}・山川哲雄^{*2}・倉重正義^{*3}

要旨：RC柱を横補強材で拘束すれば耐震性能の向上が期待できる。このような観点から、正方形鋼管とPC鋼棒によるプレストレスを併用した合成RC柱の研究開発を著者らは行ってきた結果、柱の部材角が最大3%まで正負繰返し水平加力を与えても、正方形鋼管による受動的横拘束効果と、プレストレスによる能動的横拘束効果により、太径の主筋を多量に配筋しても付着滑り、せん断破壊や曲げ圧壊などが生じず、耐震性能が飛躍的に向上することが分かってきた。そこで、本論ではこのような合成RC柱の設計式を提案すべく、その基礎的なデータを積み重ねるための加力実験を行い、有効性と弾塑性挙動を検討した。

キーワード：付着滑り、高横拘束、高強度コンクリート、プレストレス、正方形鋼管

1. はじめに

打込み型枠兼横補強材として正方形鋼管を用いた合成RC柱は、主筋量が多くなると横拘束効果が不足し、付着滑りが生じはじめ、曲げ強度が発揮されにくくなる。そこで山川らは帯筋を配筋し、鋼管と二重に横補強した合成RC柱の提案を行い、耐震性能の改善を明らかにした¹⁾。次いで、これらの受動的横拘束効果（パッシブコンファインメント）に加えて、PC鋼棒を利用した能動的横拘束効果（アクティブコンファインメント）を併用した合成RC柱を提案した²⁾。

1997年に提案した方法によると、帯筋を用いなくても正方形鋼管を介してこれに十字型PC鋼棒を貫通させ、プレストレスを導入することにより、多量な主筋に対しても付着滑りを生じさせず、靱性に富んだ曲げ降伏に持ち込むことができ、耐震性能を大幅に改善することができた。しかし、プレテンションタイプの中空PC鋼棒を採用したため、その外径が23mmもあり、鋼管に径が約42mm前後の開口を設けた。そのために、鋼管の開口部が欠損断面積となり、横拘束効果を減少させた傾向にあることが実験と解

析から示唆された³⁾。

そこで今回、この要因をできるだけ小さく抑えけるとともに、正方形鋼管とPC鋼棒による横拘束効果をさらに高めるためにPC鋼棒配置を十字型から井の字型にし、鋼管の板厚を6mmから3.2mmに薄くし、かつ鋼管の開口径を42mmから12mmに狭め、9.2φアンボンドPC鋼棒を用いてポストテンションを採用した。したがって、本研究目的は本方法の有効性と弾塑性挙動を検討することにある。

2. 試験体

試験体の形状、寸法及び配筋図を Fig. 1 に示

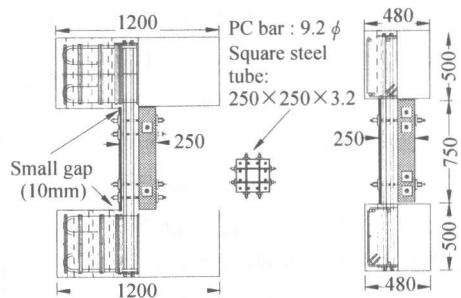


Fig. 1 Detail of the specimen (unit:mm)

*1 琉球大学大学院 大学院生（正会員）

*2 琉球大学 教授 工博（正会員）

*3 高周波熱錬（株） 製品事業部営業部 次長

す。試験体の寸法は $250 \times 250 \times 750\text{mm}$ である(Fig. 1参照)。試験体のせん断スパン比 $M/(VD)$ は1.5であり、かつRC柱としてはせん断破壊とも言うべき付着割裂破壊先行の試験体である。試験体は在来のRC柱1体、鋼管のみで横補強した合成RC柱1体、鋼管と帯筋で二重に横補強した合成RC柱1体、鋼管で横補強した上に柱頭、柱脚にアンボンドPC鋼棒を串刺しにしてプレストレスを導入した合成RC柱1体の合計4体である(Table 1参照)。

コンクリート打設時にポストテンションのアンボンドPC鋼棒を埋設し、加力実験直前にジャッキにより緊張し、1本当たり55.8kN(降伏力の約67%)を確保した。今回、コンクリートとPC鋼棒の付着を確実に切るため 9.2ϕ のアンボンドPC鋼棒を用いた。鋼管の板厚は3.2mmで、鋼管には直接軸圧縮力が伝達しないように柱頭、柱脚部に10mm程度のクリアランスを設けている。主筋は12-D19(SD345)を配筋し、その主筋比(主筋全断面積の柱全断面積に対する比)は $p_g=5.5\%$ である。コンクリート、鋼管及び鉄筋の力学的性質をTable 1,2にそれぞれ示す。文献2),3)と異なるのは、PC鋼棒の種類及び径、配置形式、プレストレスの導入法と正方形鋼管の板厚(今回は6mm)である。

3. 実験結果

載荷はFig. 2に示す建研式水平加力装置を用いて、一定軸圧縮応力($\sigma_B/3$)のもとで正負繰り返し水平力を与えた。基準RC柱試験体(H98M-S0)の部材角 $R=0.5, 3.0\%$ 時で、かつ3サイクル終了後のひび割れ状況と合成RC柱試験体3体の加力実験終了後のそれをそれぞれFig. 3に示す。基準試験体は曲げせん断ひび割れ先行の付着割裂破壊とも言うべきせん断破壊を示している。しかし、中子筋付帯筋による横拘束効果が大きいいため、かぶりコンクリートが剥落しつ

つも柱の部材角 R が3%まで水平加力が可能であった(Fig. 3参照)。

正負繰り返し水平加力によって得られたV-R、および ϵ_v -R関係の履歴曲線をFig. 4に示す。基

Table 1 Column specimens

	H98M-S0	H98M-S33	H98M-S33h'	H98M-S33P
Elevation				
Column section				
σ_B	48.8MPa			
Reinforcement	Wall thickness of the steel tube : $t = 3.2\text{mm}$ Longitudinal reinforcement : 12-D19, $p_g = 5.51\%$ Transverse and sub-transverse reinforcement: D6-@40, $p_w = 1.28\%$			

Table 2 Properties of steel tube and reinforcement

Type	B/t	$f_y(\text{MPa})$	$\epsilon_y(\text{MPa})$	$E_s(\text{GPa})$
Steel tube (250 × 250 × 3.2)	78	286	0.19	180.8
Longitudinal reinforcement	D19	2.87*	380	0.22
Transverse reinforcement	D6	0.32*	388	0.22
PC bar	9.2 ϕ	0.66*	1259	0.66

Note: The symbol* denotes the nominal cross-sectional area of the deformed steel bars (cm^2). t =thickness of steel tube. B =width of steel tube. f_y =yield strength of steel. ϵ_y =yield strain of steel. E_s =modulus of elasticity for steel.

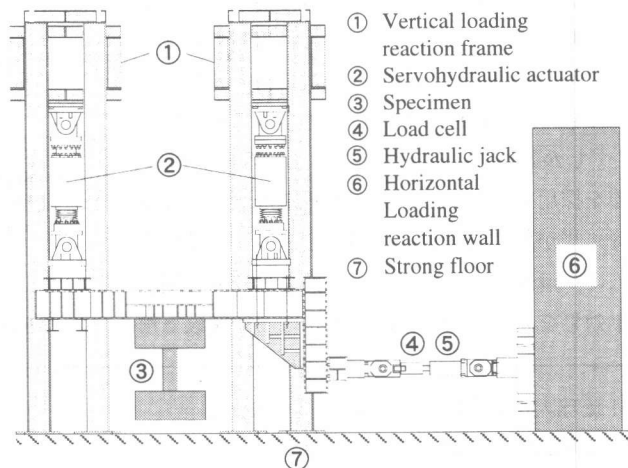


Fig. 2 Test set up

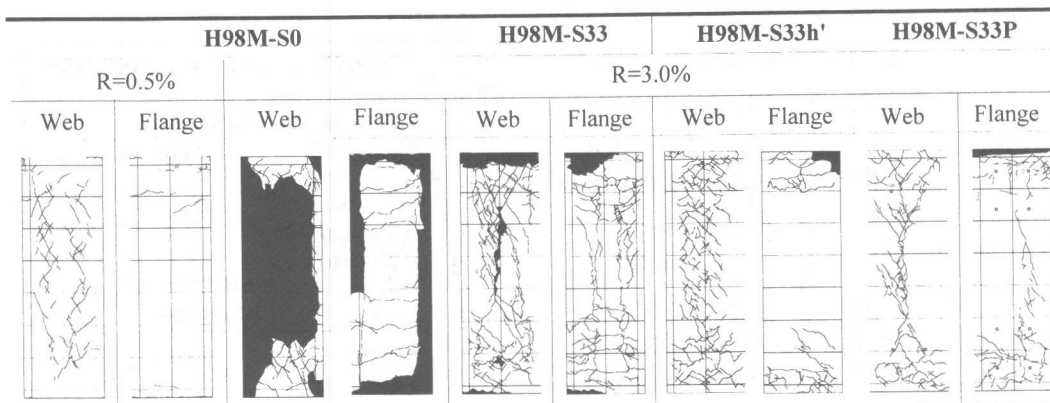


Fig. 3 Observed cracking patterns

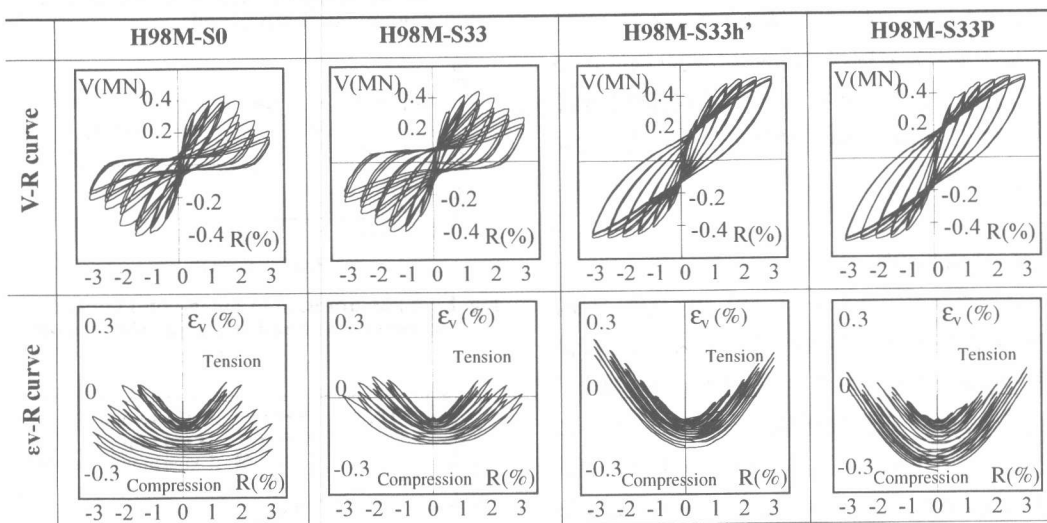


Fig. 4 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

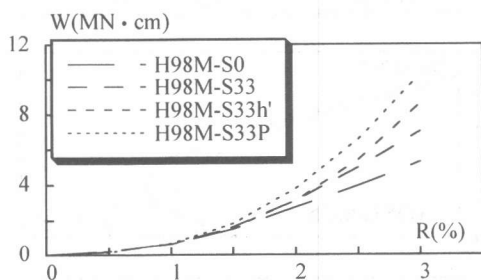


Fig. 5 Accumulated absorbed energy

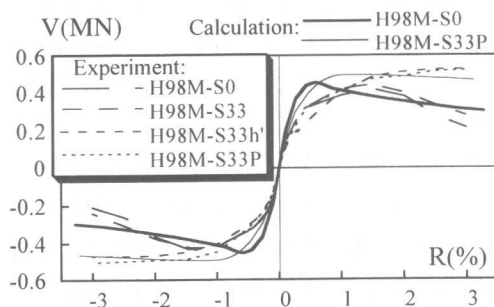


Fig. 6 Calculated and measured skeleton curves

準試験体である RC 柱 H98M-S0、鋼管のみで横補強した試験体 H98M-S33 は付着滑りの影響が見られ、あまり耐震性能が期待できない状況を示している。鋼管と帯筋で二重に横拘束した試験体 H98M-S33h'、鋼管とプレストレスを併用し

て高横拘束した試験体 H98M-S33P については、付着滑りの影響もほとんど無く、耐震性能がかなり改善されている。この耐震性能がいかに優れているかは、鋼管のみで全面的に横補強した試験体 H98M-S33 と比較すれば明白である。

Fig. 5,6に示すエネルギー吸収能力, スケルトンカーブからも横拘束効果が増大するにつれ, 順に優れた耐震性能が期待できることが分かる。V-R 曲線, エネルギー吸収能力を見る限りは鋼管とプレストレスで高横拘束した試験体が, 鋼管と帯筋で二重に横拘束した試験体よりも優れた結果を示している。しかし, ϵ_v -R 曲線でこの二つの試験体を比較すると, 鋼管と帯筋で二重に横拘束した試験体の方が優れた性状を示している。この原因については, 鋼管と帯筋で二重に横補強した試験体の最大ひび割れ幅が 0.04 mm であるのに対して, 鋼管とプレストレスで高横拘束した試験体の最大ひび割れ幅は 0.15 mm と大きいことから, 十分に耐震性能を発揮した結果, ϵ_v -R 曲線に影響が出たものと推測する。

4. 理論的検討

コンファインドコンクリートの構成則には崎野・孫式³⁾を採用する。鋼管とプレストレスで高横拘束されたコアコンクリートには PC 鋼棒が支点になり, 鋼管の横拘束スパンが短くなることを考慮した崎野・孫式にプレストレスによる能動的横拘束圧として Richart らの静水圧によるコンクリート強度の増大効果⁹⁾を適用した。これらの構成則を用いて計算した応力とひずみの関係を Fig. 7 に示す。付着滑りの構成則は Fig. 8 に示す。計算の詳細については文献 1), 2) を参照されたい。

これらの構成則をふまえ, ファイバーモデルを用いて付着滑りを考慮した場合と, 無視した場合の曲げ強度計算を行った^{1), 2)}。Fig. 9 に N-M 相関曲線を示す。鋼管のみで横補強した試験体 H98M-S33 では付着すべりの影響が大きい, 実験値はそれを上回っている。鋼管と帯筋で二重に横拘束した試験体 H98M-S33h' では鋼管のみのものと比較しても付着滑りの影響が改善されており, 実験結果はそれ以上になっている。鋼管とプレストレスを導入した試験体 H98M-S33P は付着すべりの影響が無視できるほど小さ

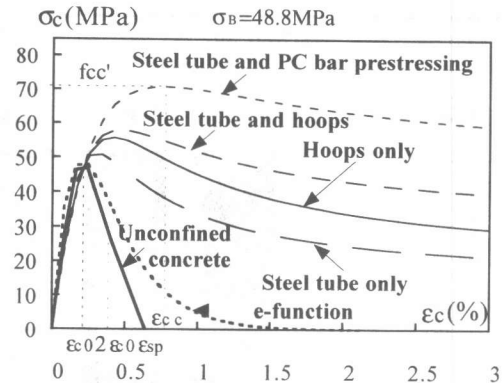


Fig. 7 Calculated stress-strain curves for monotonic loading of confined and unconfined concrete in compression

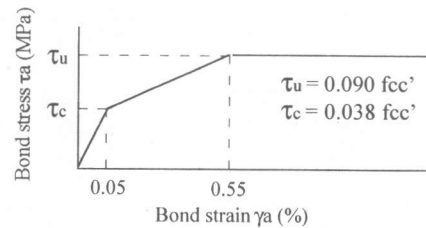


Fig. 8 An assumption of mean bond stress τ_a versus mean bond strain γ_a relationship

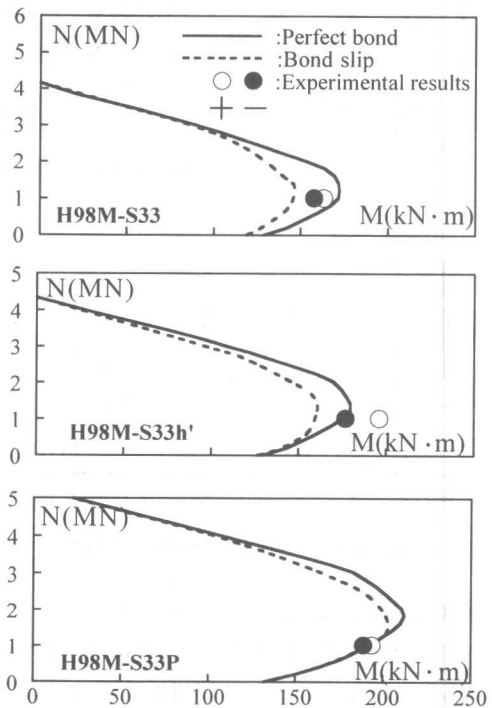


Fig. 9 Calculated N-M interaction diagrams and experimental results

くなっており、実験結果と計算結果はほぼ一致している。文献3)において、付着滑りが実験で確認されなかったにもかかわらず、実験結果が解析結果を下回った。しかし、今回の実験ではFig. 9より解析結果に実験結果がほぼ一致していることが分かる。

Table 1,2 に示す鋼管、主筋、帯筋と同じ鋼材、同じ配筋等（主筋については、主筋の径は変数とし、力学的性質、配筋のみ同じ）を利用し、かつ同じ軸力比($\sigma_B/3$)を前提に、Fig. 10,11 中の①の曲線は正方形鋼管のみで横拘束した場合、②の曲線は正方形鋼管と帯筋で二重に横拘束した場合、そして③の曲線が同じ正方形鋼管とプレストレス (9.2ϕ のアンボンドPC鋼棒の井の字型配置) を併用し、高横拘束した場合である。

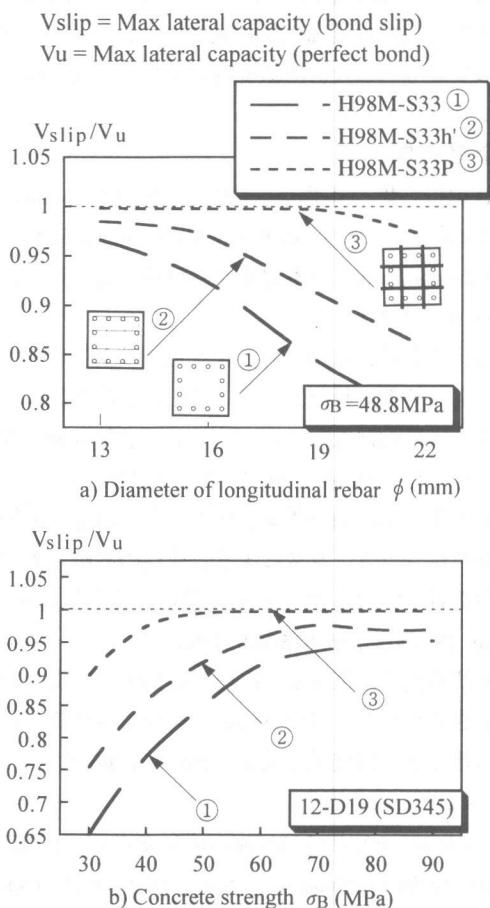


Fig. 10 Calculated lateral capacity including bond slip or perfect bond

主筋を12本配筋した場合の付着滑りと主筋径の関係を図. 10 a)に、付着滑りとコンクリート強度の関係（この場合は12-D19）を図. 10b)に、計算により求めて示す。Fig. 10の縦軸は付着滑りを考慮した最大曲げ耐力の計算値 V_{slip} を、付着滑りを無視した最大曲げ耐力の計算値 V_u で除した値である。従って、この値が1.0のところでは付着滑りを生じないことを意味する。

Fig. 10 a)から、①の鋼管のみによる横拘束効果ではコンクリート強度が48.8MPaでも、主筋の径が大きくなるにつれ付着強度の劣化が進んでいることが分かる。②から鋼管と帯筋で二重に横拘束することで付着強度は改善されている。しかし、①と同様に、付着強度の劣化が若干見られる。プレストレスによる高い横拘束効果を

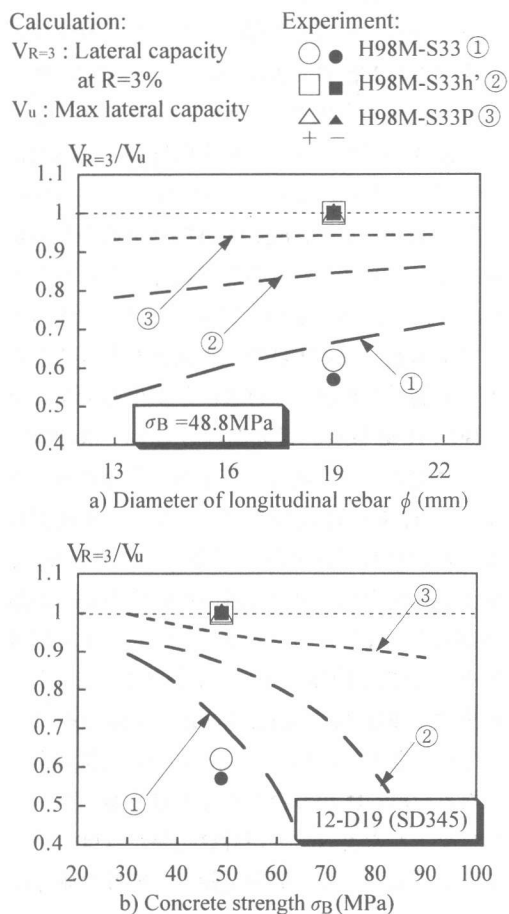


Fig. 11 Calculated ductility and experimental results

与えることにより、主筋の径の大小に関わらず付着滑りを防止できることが③から分かる。

Fig. 10 b)から、①の鋼管のみによる横拘束効果では、主筋が滑らないためには90MPa以上のコンクリート強度が必要であることが分かる。②から鋼管と帯筋で二重に横拘束することで、鋼管のみによる横拘束と比較して付着強度は改善されていることがわかる。プレストレスによる高い横拘束力を与えることにより、コンクリート強度の大小に関わらず確実に付着滑りを防止できることが③から分かる。Fig. 10からわかることは、高い横拘束力を与えることが付着強度の改善に大きく寄与するということである。

付着滑りを考慮した曲げ解析を行った場合の最大曲げ耐力 V_u で、柱の部材角が3%時の曲げ耐力 $V_{R=3}$ を除いた値を縦軸にとり、主筋の径とコンクリート強度を横軸にとりそれぞれ実験結果とともにFig. 11 a),b)に示す。ここでは、柱の靱性を示す参考値として $V_{R=3}/V_u$ を定義した。

Fig. 11 a)ではコンクリート強度と主筋本数が一定で、主筋径が大きくなるにつれて $V_{R=3}/V_u$ が次第に大きくなり、Fig. 11 b)では主筋の配筋が同一で、コンクリート強度が増加するにつれて $V_{R=3}/V_u$ が減少する傾向にある。一見矛盾するようであるが、Fig. 11 a)では主筋径が大きくなると、主筋量も増加し、付着滑りが生じやすくなり(Fig. 10 a)参照)、最大曲げ耐力 V_u と $R=3\%$ 時の曲げ耐力 $V_{R=3}$ の間に差が小さくなるからである。一方、Fig. 11 b)ではコンクリート強度が高くなるにつれて付着滑りが発生しにくくなり、最大曲げ耐力 V_u と $R=3\%$ 時の曲げ耐力 $V_{R=3}$ の落差が大きくなるからである。しかし、正方形鋼管を介してPC鋼棒でプレストレスを与え、高横拘束する(Fig. 11の③)と主筋径、主筋量やコンクリート強度に関係なく V_u と $V_{R=3}$ の差異が小さくなる。Fig. 11から分かることは、参考までにプロットした実験結果が計算結果にほぼ一致していることと、高い横拘束効果が靱性の確保に必要であるということである。

5. 結論

主筋量にして5.51%の多量な太径の主筋を配筋し、かつせん断スパン比が1.5という付着割裂破壊しやすいRC柱を鋼管と帯筋または、鋼管とプレストレスで高横拘束することにより優れた耐震性能を発揮させることが分かった。欠損断面面積の問題については、PC鋼棒に9.2φアンボンドPC鋼棒を用い、配置を十字型から井の字型にすることで改善できた。今後の課題はこれらの設計試案を示すことである。

謝辞：本研究は笹川科学研究助成金（申請者：村中圭介，引継者：小川克幸）、鋼材倶楽部「鋼構造研究奨励金制度」（申請者：小川克幸）によった。また、高周波熱錬（株）、東京鉄鋼（株）、金秀建設（株）等多くの関係者各位に多大な協力を頂いた。また、琉球大学工学部付属工作工場の比嘉寛文部技官にも多大な協力を頂いた。本加力実験は琉球大学地域共同センター内の施設で執り行った。関係者各位に厚くお礼を申し上げます。

参考文献：

- 1) 山川哲雄，郝洪涛，村中圭介：Elastoplastic Behavior of Doubly Confined R/C Columns in Steel Tube and Hoops, 日本建築学会構造系論文集, pp. 83-90, 1997. 10
- 2) 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RC柱の耐震性能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. 19, No.2, pp. 1437-1442, 1997. 6
- 3) 小川克幸，山川哲雄，村中圭介：鋼管と帯筋またはプレストレスによる合成柱の高軸力下の耐震性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 3, pp. 835-840, 1998. 7
- 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