

論文 正方形鋼管と帯筋又はプレストレスで高横拘束した短柱の耐震性能

村中圭介*1・山川哲雄*2

要旨：鋼管と帯筋またはプレストレスで高横拘束したRC柱の耐震性能を検討するために、せん断スパン比が1.0で断面形状と高さが250×250×500mmのRC柱に、正方形鋼管と帯筋又は正方形鋼管とプレストレスで高横拘束した4体の合成RC柱試験体を用いて、一定軸圧縮力下（軸力比0.33）の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、プレストレスなどにより高い横拘束力を柱に付与すれば、軸力比0.33のもとでせん断スパン比が1.0で主筋量が5.51%というせん断破壊しやすいRC短柱といえども、優れた耐震性能を発揮させることが可能であることがわかった。

キーワード：高横拘束，せん断スパン比，短柱，プレストレス，正方形鋼管

1. 序

力学的に横拘束されたコンクリートはコンファインドコンクリートとして、強度と靱性が改善されることはよく知られている。と同時にコンクリートと鋼材のお互いの弱点を相補い、長所をそれ以上に生かすために、コンクリートと鋼材を併用した新しい合成構造や混合構造が、社会に最近急速に広まりつつある。そういう中において、1990年に正方形鋼管と帯筋で二重に横補強した合成RC柱を提案し、正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、高強度コンクリート（約40MPa）を利用し、正方形鋼管と帯筋で二重に横補強すれば耐震性能（水平耐力、靱性、エネルギー吸収能）を飛躍的に向上させることが判明したり。この研究成果をもとに従来のパッシブコンファインド（受動的横拘束）としての帯筋や正方形鋼管にアクティブコンファインド（能動的横拘束）としてのプレストレスを加え、高横拘束したRC柱を1997年に新たに提案した²⁾。この新しい方法では帯筋を取り去り、正方形鋼管のはみ出しによるパッシブコンファインドを改善し、かつプレストレスが正方形鋼管を通して能動的側圧としてアクティブコンファインドの役割を果たすことになる。

本論の目的は、 $M/(VD)=1.0$ で高軸力下のRC短柱でさえも正方形鋼管と帯筋、または正方形鋼管とプレストレスで高横拘束すれば、せん断破壊から曲げ破壊に破壊モードの移行が確実に発生し、しかも耐震性能の大幅な改善が期待できるかどうかを実験的に検証することにある。

2. 試験体

試験体の形状、寸法及び配筋図をFig.1に示す。試験体の寸法は250×250×500mmである（Fig.1参照）。試験体のせん断スパン比（ M/VD ）

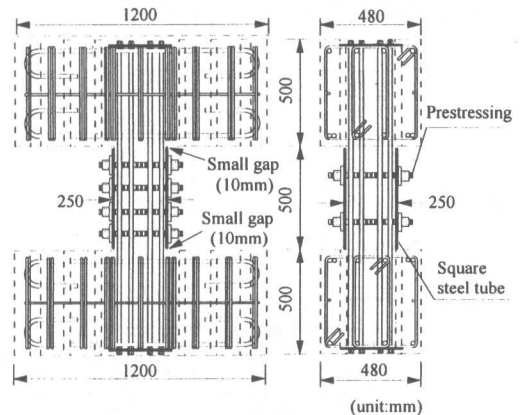


Fig. 1 Detail of the specimen

*1 清水建設（株）（元琉球大学大学院学生）工修（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）

は1.0であり、かつRC柱としてはせん断破壊先行の試験体である。試験体は在来のRC柱1体、

Table 1 Column specimens

Specimen	CC97H-RS ₁	CC97H-SS ₁	CC97H-DS ₁	CP97H-SS ₁
Elevation				
Cross column section				
σ_B (MPa)	48.3	46.1	46.1	48.3
Arrangement of reinforcement	Wall thickness of the steel tube : $t=6\text{mm}$ Longitudinal reinforcement : 12-D19, $P_g=5.51\%$ Transverse and Sub-transverse reinforcement : D6-@40, $P_w=1.28\%$ σ_B : Cylinder strength			

Table 2 Properties of steel tubes and reinforcement

Type	B/t	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	E_s (GPa)
Steel tube (250×250×6)	42	320	0.17	197.5
Longitudinal reinforcement D19	2.87 *	380	0.22	189.2
Transverse reinforcement D6	0.32 *	388	0.22	184.1

Note : The symbol * denotes the nominal cross-sectional area of the deformed steel bars (cm²). t is thickness of steel tubes, B is width of steel tubes, f_y is yield strength of steel, E_s is modulus of elasticity of steel, ϵ_y is yield strain of steel.

鋼管のみで横補強したRC柱1体、鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱1体、鋼管のみで横補強した試験体にプレストレスを導入したRC柱1体の合計4体である (Table 1 参照)。PC鋼棒は外径23mm、内径15.8mm、肉厚3.6mm、断面積219.4mm²の中空鋼棒であり、降伏点強度は931MPaでそのときの降伏ひずみは0.475%である。ヤング係数196.1GPaである。コンクリート打設前にプレテンション (プレストレス1本当たり147.1kN) のPC鋼棒として埋設したが、加力実験直前にリラクゼーションによるプレストレスの減少を補うために、ジャッキにより再緊張し、所定の147.1kN (降伏力の約72%) を確保した。その時点でPC鋼棒とコンクリートの付着は切れたことを確認している。鋼管の板厚は6mm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、その主筋比は $P_g=5.51\%$ である。鋼管及び鉄筋の力学的性質を Table 2 に示す。

3. 測定及び載荷方法

主筋、帯筋及び鋼管などにはひずみゲージを貼付し、試験体の水平 (曲げせん断変形) 変位と鉛直 (伸縮変形) 変位には変位計を用いてそれぞれ測定した。載荷は Fig. 2 のような建研式水平加力装置を用いて、軸圧縮力は実験計画で定

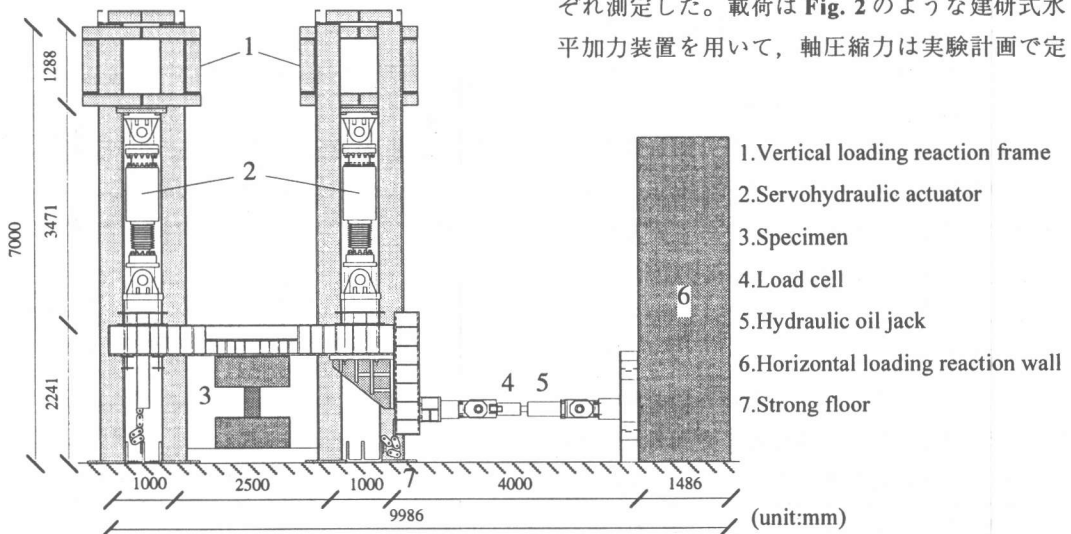


Fig. 2 Test setup

めた軸力比 ($N / (Ag\sigma_u) = 0.33$, Ag : 柱の断面積で本試験体の場合は $Ag = 250 \times 250\text{mm}^2$) に応じた値を各試験体ごとに採用した。加力の制御は、一定軸圧縮応力 ($\sigma_u/3$) のもとで、柱の部材角を 0.5% ずつ増分させながら、同一振幅で 3 サイクルずつの正負繰り返し水平加力を行った。

4. 実験結果

正負繰り返し水平加力によって得られた V-R、及び ϵ_v -R 関係の履歴曲線を Fig. 3、累積エネルギー吸収量の比較を Fig. 4、スケルトンカーブを Fig. 5、主筋の材軸方向ひずみ、及び鋼管の横ひずみと部材角の関係を Fig. 6 にそれぞれ示す。なお、V はせん断力、R は部材角、 ϵ_v は柱材軸上の

平均伸縮ひずみを表す。基準試験体である RC 短柱 CC97H-RS₁ は部材角 1% でせん断破壊したが、鋼管で横補強すれば脆性的なせん断破壊をひとまず防げることが Fig. 3 からわかる。しかし、鋼管のみの横補強では付着すべりが生じており、Fig. 4、5 が示すようにエネルギー吸収能力や靱性が十分に発揮されていない。このことは、Fig. 6 の主筋のひずみからも理解できる。さらに、鋼管と帯筋で二重に横補強すれば試験体 CC97H-SS₁ に比較して CC97H-DS₁ の V-R 曲線がかなり改善されている (Fig. 3 参照)。しかし、付着すべりが若干生じ、主筋も完全に降伏するまでに至っていない。鋼管の横ひずみの方も降伏レベルに達しておらず、まだ十分に余裕がある。一方、プレストレスと鋼管で高横拘束した試験体 CP97H-SS₁ は、付着すべりはほとんど見られず、Fig. 6 からわかるように唯一主筋が降伏しており、耐力、靱性、エネルギー吸収能力ともに優れた耐震性能を示している。

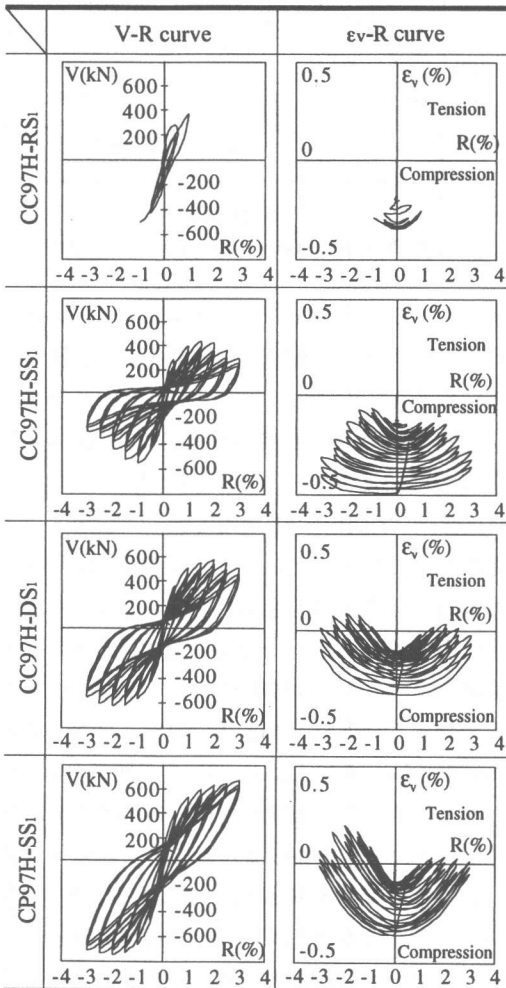


Fig. 3 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

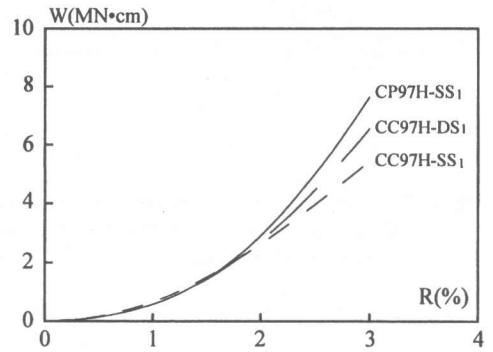


Fig. 4 Absorbed energy obtained from measured hysteresis loop

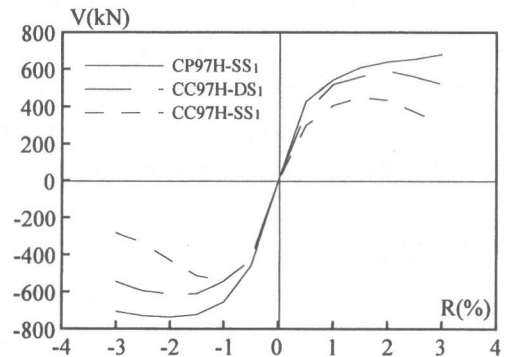


Fig. 5 Measured skeleton curves

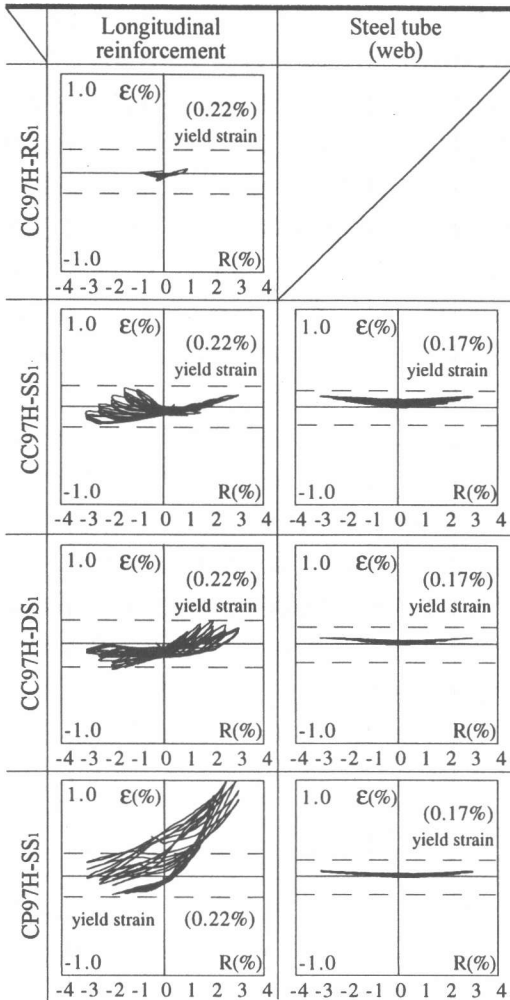


Fig. 6 Measured strain of longitudinal and steel tube at the top of column versus drift angle R relationships

以上のことから、せん断スパン比が1.0で、高強度コンクリート（40MPa以上）を使用し、主筋量が5.51%という多量な配筋下でも付着すべりを防止し、耐力、靱性などの耐震性能を十分に発揮させるためにはCP97H-SS₁のように高い横拘束力を付与すればよいことがわかった。つまり、高軸圧縮力と高せん断力を同時に受ける柱には横拘束力がきわめて重要である。

5. 理論的検討

RC柱のカバーコンクリートにはManderらのプレーンコンクリートの構成則を、鋼管または帯筋で横拘束されたコアコンクリートには、

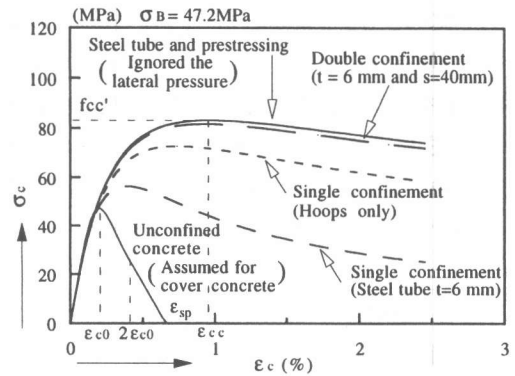


Fig. 7 Numerically calculated stress-strain curves for monotonic loading

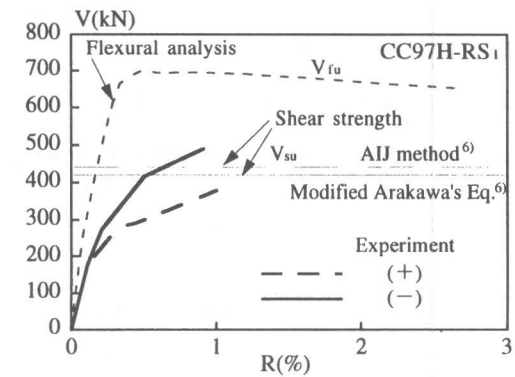


Fig. 8 Comparison on shear strength

各々松村らとManderらのコンファインドコンクリートの構成則を適用して計算した³⁾⁴⁾。鋼管と帯筋で二重に横補強されたコアコンクリートの構成則はそれぞれの横拘束効果によるコンクリートの強度上昇分を単純累加し、その上でManderらの構成則³⁾を適用した。プレストレスを導入したコアコンクリートの構成則は松村らの鋼管に関する横拘束効果⁴⁾、Richartらの静水圧によるコンクリート強度の増大効果⁵⁾などを適用した。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。なお、計算の詳細に関しては文献1), 2)を参照されたい。

基準試験体CC97H-RS₁の曲げ破壊時のせん断力と、せん断破壊時のせん断力の実験結果と計算結果⁶⁾の比較をFig. 8に示す。この図からわかるように計算結果は V_{fu} より V_{su} が下回っていることからせん断破壊を示しており、実験結果と整合している。

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すべ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。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CC97H-SS₁では付着すべりの影響が大きく、実験値もその近傍にある。しかし、鋼管と帯筋で二重に横補強した試験体CC97H-DS₁では付着すべりの影響が計算上かなり小さくなるが、実験値はそれ以下になっている (Fig. 9:CC97H-DS₁参照)。プレストレスと鋼管で高横拘束した試験体CP97H-SS₁は優れた耐震性能を示しているが、実験値は計算によって示された曲げ強度に達していない。これは、プレストレスを導入する為に鋼管に開けた穴 (約42mm) が大きく、断

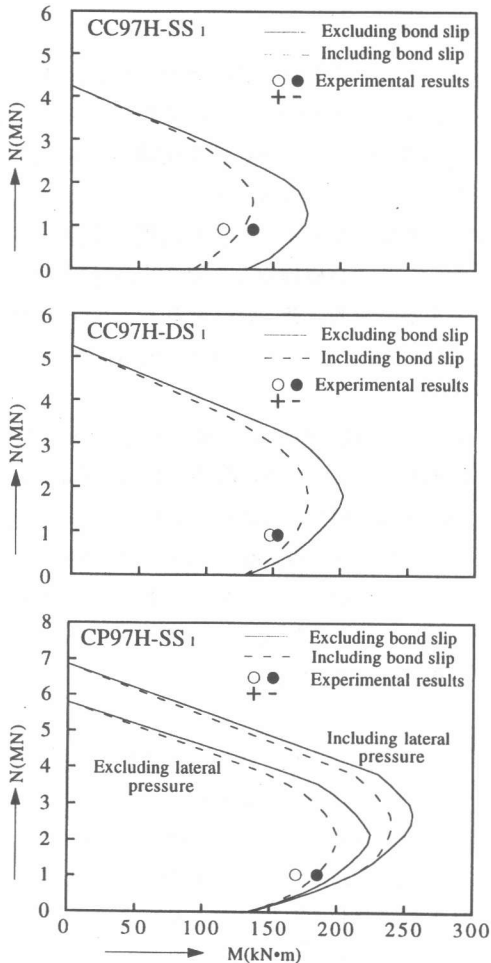


Fig. 9 Calculated N - M interaction diagrams and experimental results

面欠損を生じた為ではないかと考えられる。しかし、水平耐力に関する実験結果は横拘束効果が大きくなるにつれて確実に上昇している。

Fig. 10に計算で求めたコンクリート強度と付着すべりによる耐力低下の関係を示す。この図からわかるように、横拘束効果が高ければ高いほど付着すべりによる耐力低下を防ぐことができるが、CC97H-SS₁のように横拘束効果が低いと、せん断スパン比1.0で主筋量が5.51%という厳しい状況下ではコンクリート強度を上げてても付着すべりを完全に防ぐことはできないということが計算上わかった。

次に、各試験体の靱性について検討するためにせん断スパン比と軸力比をパラメータとした耐力低下率の計算を行った。耐力低下率 $V_{R=3}/V_u$ は部材角3%時の水平耐力 $V_{R=3}$ を最大水平耐力 V_u で除して定義する。このように比を求める計算には付着すべりの有無による影響を無視できるので、付着すべりを無視した計算値を採用した。Fig. 11に耐力低下率とせん断スパン比の関係を、Fig. 12に耐力低下率と軸力比の関係を示す。Fig. 11より、鋼管と帯筋またはプレストレスで高横拘束すればせん断スパン比の如何にかかわらず耐力の低下は抑えられ、優れた靱性が得られるということを計算結果は示している。また、軸力比との関係を見ても、鋼管と帯筋またはプレストレスで二重に高横拘束した場合は軸力比が増大しても耐力を維持し、靱性に富ん

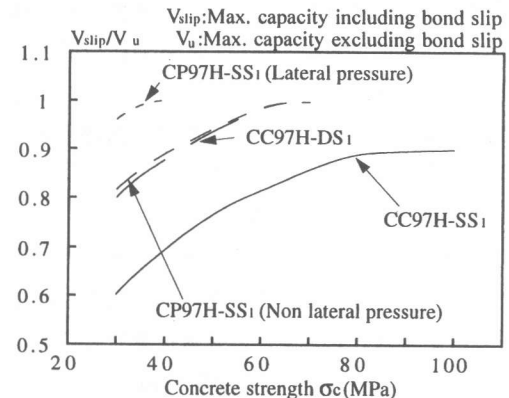


Fig. 10 Calculated bond slip and concrete strength relationship

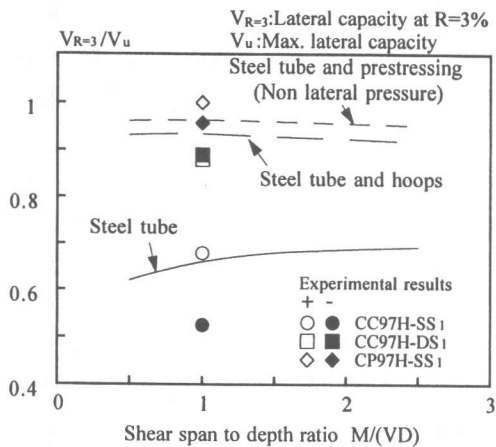


Fig. 11 Calculated capacity decrease and shear span to depth ratio relationship

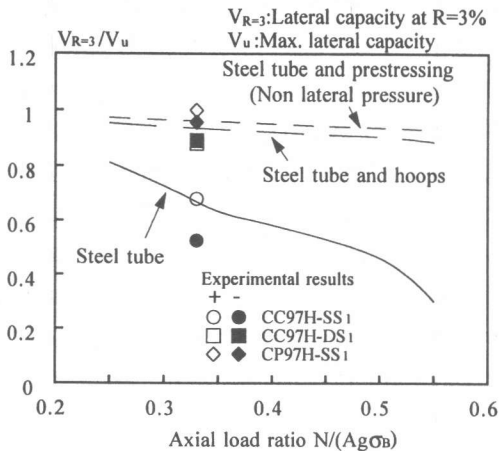


Fig. 12 Calculated capacity decrease and axial load ratio relationship

だ耐震性能が得られる。しかし、鋼管のみの横補強では横拘束効果が不足し、軸力比の増大にともない、耐力の低下が著しい (Fig. 12 参照)。Fig. 11 と Fig. 12 から、計算結果は実験結果をほぼとらえていることがわかる。

これらのことから、太径で多量の主筋 (12-D19, $P_g=5.51\%$) を使用するという厳しい状況下でも、優れた靱性を得るためには鋼管と帯筋またはプレストレスなどの高横拘束力を必要とし、これはまたきわめて重要であることがわかった。

6. 結論

プレストレスなどにより高い横拘束力を柱に付与すれば、高軸力下 ($\sigma_B/3$) のもとでせん断スパン比が 1.0 で主筋量が 5.51% というせん断破壊しやすい RC 短柱といえども、優れた耐震性能を発揮させることが可能である。

謝辞：

本研究は平成 8 年度 (財) 鹿島学術振興財団及び平成 9 年度笹川科学研究助成金によった。ネツレン、東京鉄鋼 (株)、鷲宮製作所、金秀建設 (株) など多くの関係者に多大な協力をいただいた。また、本加力実験は琉球大学地域共同研究センター内の施設でとり行った。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) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Eng., Vol.114, No.8, pp.1804-1826, Aug. 1988.
- 4) 松村弘道, 伊藤茂樹: 角型鋼管に充填されたコンクリートの圧縮強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C (熊本), pp.1627-1628, 1989.10.
- 5) Richart, F.E. et al.: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, Univ. of Illinois Eng. Experimental Station, Bulletin No.185, 1928.
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, pp.104-141, 1990.11.