

# 論文 鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱の弾塑性挙動に関する実験的研究

郝 洪濤<sup>\*1</sup> · 山川哲雄<sup>\*2</sup>

**要旨：**鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱の弾塑性挙動を検討するために、せん断スパン比( $M/QD$ )が1.5で断面形状と高さが $250 \times 250 \times 750\text{mm}$ の柱試験体(計4体)を用いて、一定軸圧縮応力( $0.35\sigma_B$ ,  $\sigma_B$ : シリンダー強度)下の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱の耐力及び累積ひずみエネルギー吸収量が、鋼管のみで横補強した試験体より大きいことがわかった。しかし、いづれの試験体も付着すべり等の影響で主筋や鋼管の強度を十分に発揮させることができなかった。

**キーワード：**RC柱, コンファインドコンクリート, 鋼管, 二重横補強, 付着強度

## 1. はじめに

主筋を多量に配筋（主筋比 $P_g=4.38\%$ ）してもせん断破壊が防止され、曲げ破壊先行のもとで大きな水平耐力とともに、韌性とエネルギー吸収能力に富んだ粘りのあるRC柱を提案するために、山川は正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横補強したコンクリートの圧縮性状に関する実験的研究を行ってきた。その結果、主に次のことを明らかにした[1][2]。

- 1) 鋼管と帯筋で二重に横補強したコンファインドコンクリートの圧縮強度は、既存の計算式[3-5]の単純累加で近似的に評価できる。
- 2) 同じ横補強鋼材量であれば鋼管と帯筋で二重に横補強した方が、鋼管のみより圧縮強度もねばりもともにより向上することがわかった。

以上のことから、鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱が一定軸圧縮応力( $0.35\sigma_B$ )下で、正負繰り返し水平力を受けた場合の弾塑性挙動に関しては上記の2点が適用できるか否かを検討するために、1体のRC柱を含む4体の合成柱に関する実験を行った。なお、これらの試験体は低強度シリーズとして設計基準強度 $F_c=210\text{kgf/cm}^2$ を採用したが、次回計画予定の実験では同じ試験体で高強度シリーズとして設計基準強度 $F_c=390\text{kgf/cm}^2$ を採用する。

## 2. 試験体

試験体の形状、寸法及び配筋図を図-1に示す。試験体のせん断スパン比( $M/QD$ )は1.5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、鋼管のみで横補強したRC柱1体、鋼管と帯筋(配筋形式が2種類)で二重に横補強したRC柱2体の合計4体である(表-1参照)。これらの試験体は鋼製型枠を用いて、同一バッチで高さ方向に4体同時に打設した。鋼管の板厚は6mmと3.2mmで、しかも鋼管に直接軸圧縮力が伝達しないように柱頭、柱脚部にそれぞれ5~6mm程度のクリアランスを設けるとともに、付着によっても軸圧縮力ができるだけ伝達しないように鋼管の内側にグリースを塗布した。板厚の大きい鋼管( $t=6\text{mm}$ )のみで横補強した試験体RCC-T6-1の横補強鋼材量を参考にして、体積比ができるだけ近づくように板厚の小さい鋼管( $t=3.2\text{mm}$ )と施工可能なピッチの帯筋で二重に横補強した試験体(RCC-T3-1,RCC-T3c-1)を用意した(表-1参照)。主筋はどの試験体も共通し、その主筋比(主筋全断面積の柱断面積に対する比)は $P_g=4.38\%$ となる。日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準では最大主筋比を定めていないが、中国の鉄筋コンクリート構造計算規準(GBJ 10-89)では $P_g$ を5%以下としている。実験で採用した $P_g=4.38\%$ はこの最大主筋比に近い値となっている。コンクリートの粗骨材の最大寸法は

\*1 琉球大学大学院 工学研究科 建設工学専攻(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)

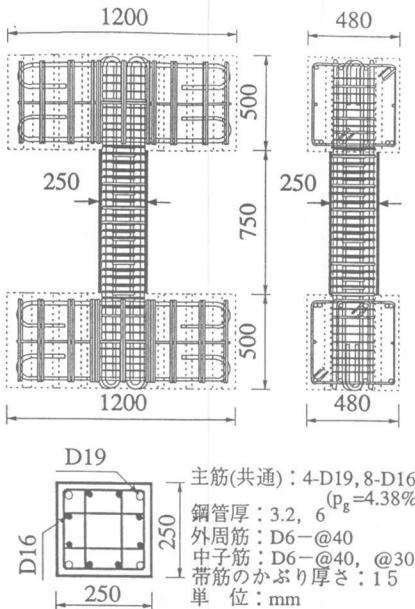


図-1 試験体の形状、寸法、配筋図

表-1 柱の試験体一覧表

試験体名	RCC - NN - 4	RCC - T6 - 1	RCC - T3c - 1	RCC - T3 - 1
試験体				
断面形				
钢管厚	钢管なし	6	3.2	3.2
配 筋	主筋 4-D19 外周筋 8-D16 中子筋 D6-@40 帯筋なし	主筋 4-D19 外周筋 8-D16 中子筋 D6-@40 帯筋なし	主筋 4-D19 外周筋 8-D16 中子筋 D6-@30	主筋 4-D19 外周筋 8-D16 中子筋 D6-@40
帯筋比 $p_w(\%)$	1.28	0	0.85	1.28
带筋の体積比 $\rho_s(\%)$	3.43	0	2.81	3.43
横補強材の体積比 $\Sigma \rho_s(\%)$	3.43	9.36	7.93	8.55

表-2 コンクリートの力学的性質とスランプ

試験体名	$c\sigma_B(MPa)$	$c\varepsilon_1(\%)$	$cE(GPa)$	スランプ(cm)	備 考
RCC-NN-4	21.9	0.182	21.98	19	$c\sigma_B$ : シリンダー強度
RCC-T6 - 1	25.3	0.248	23.03		$c\varepsilon_1$ : シリンダー強度時のひずみ
RCC-T3c-1	23.8	0.202	23.83		$cE$ : ヤング係数
RCC-T3 - 1	23.1	0.191	23.11		

表-3 鋼管及び鉄筋の力学的性質

種類	$B/t$	$s\sigma_y(MPa)$	$s\varepsilon_y(\%)$	$sE(GPa)$	備考
钢管 (250×250×3.2)	78	288.3	0.20	144.2	$B$ : 正方形钢管の幅
钢管 (250×250×6)	42	330.4	0.18	181.4	$t$ : 正方形钢管の厚さ
主筋	D19	—	363.9	197.4	$s\varepsilon_y$ : 降伏点ひずみ
	D16	—	332.6	196.2	$s\sigma_y$ : 降伏点応力
帶筋	D6	—	412.7	201.1	$sE$ : ヤング係数

13mmで、空気量は7.2%である。コンクリート、钢管及び鉄筋の力学的性質を表-2, 3に示す。

### 3. 測定及び載荷方法

変位計で水平(曲げせん断変形)と鉛直(伸縮変形)変位を測定した。ひずみゲージは主筋の柱頭、柱脚部と柱中央部にある帶筋と中子筋に貼付した。钢管の外表面中央の横、縦両方向にも貼付した。載荷は建研式水平加力装置を用いて一定軸圧縮応力( $0.35c\sigma_B$ )と正負繰り返し水平力を与えた。水平加力は初期剛性を得るために荷重制御により小さい水平力で2~3回正負繰り返した後、柱の部材角Rを0.5%づつ同一振幅で3サイクルづつ正負繰り返しの変形制御で3%まで行った。

### 4. 実験結果と考察

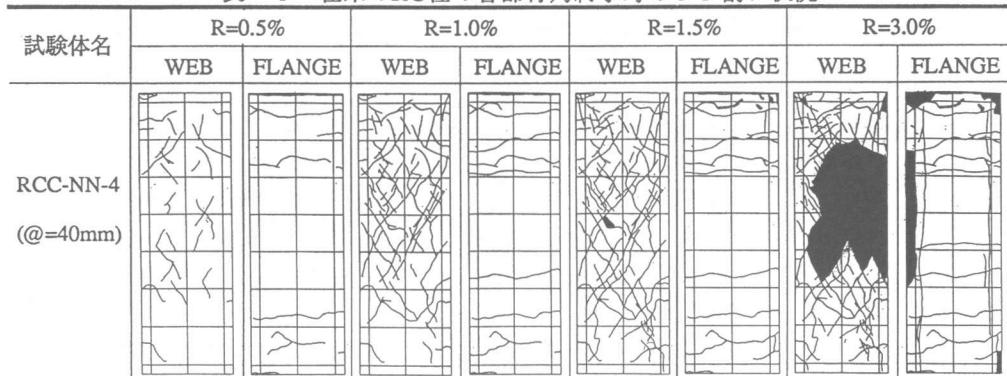
在來のRC柱(RCC-NN-4)の部材角R=0.5, 1, 1.5, 3%時で、かつ3サイクル終了後のひび割れ状況を表-4に示す。この試験体は曲げせん断ひび割れ先行の付着割裂破壊ともいべきせん断破壊

を示している。しかし、中子筋付き帶筋の横拘束効果が大きいので、表-5に示す履歴曲線のように柱の部材角Rが3%まで正負繰り返し水平加力が可能であった。表-5に柱のせん断力Qと部材角Rの関係である履歴曲線と、柱全長の平均伸縮ひずみ $\varepsilon_v$ と部材角Rの関係を示す。

図-2に各試験体のスケルトンカーブに関する比較、及び図-3に累積ひずみエネルギーに関する比較をそれぞれ実験結果として整理する。表-6、7には各試験体の鉄筋と鋼管に関してひずみゲージによる測定結果を示す。これらの図表より、主筋と横補強材としての鋼管がそれ自身の持てる能力を十分発揮していないようである。この原因として、試験体のコンクリート強度がシリンダー強度として平均で23.5MPaと低い上に、主筋量が多く( $P_g=4.38\%$ )、かつせん断スパン比が付着割裂破壊しやすい1.5であること、さらに鋼管内でのコンクリートの収縮等が考えられる。

以上の理由から、特に鋼管のみで横補強した試験体RCC-T6-1には主筋の付着すべりが比較的大きく生じたものと思われる。そういう中にあっても、鋼管と帶筋で二重に横補強した試験体RCC-T3-1、RCC-T3c-1の耐力及び累積ひずみエネルギー吸収量が、鋼管のみで横補強した試験体RCC-T6-1より大きい(図-2、3参照)。しかも、表-1に示すように横補強鋼材量が若干少ないにもかかわらずこのような実験結果を得たことは、中心圧縮実験結果[1][2]と同様に同じ横補強鋼材量であれば二重横補強法がより好ましいことを示唆している。しかしながら、この二重横補強法がその能力を十分発揮していないことも前述したように、表-5の履歴曲線や表-6,7のひずみゲージの

表-4 在来のRC柱の各部材角終了時のひび割れ状況



注) WEB: 水平加力方向 FLANGE: 水平加力と直交方向

表-5 各試験体のQ-R曲線、材軸方向伸縮ひずみ $\varepsilon_v$ -R曲線 (実験結果)

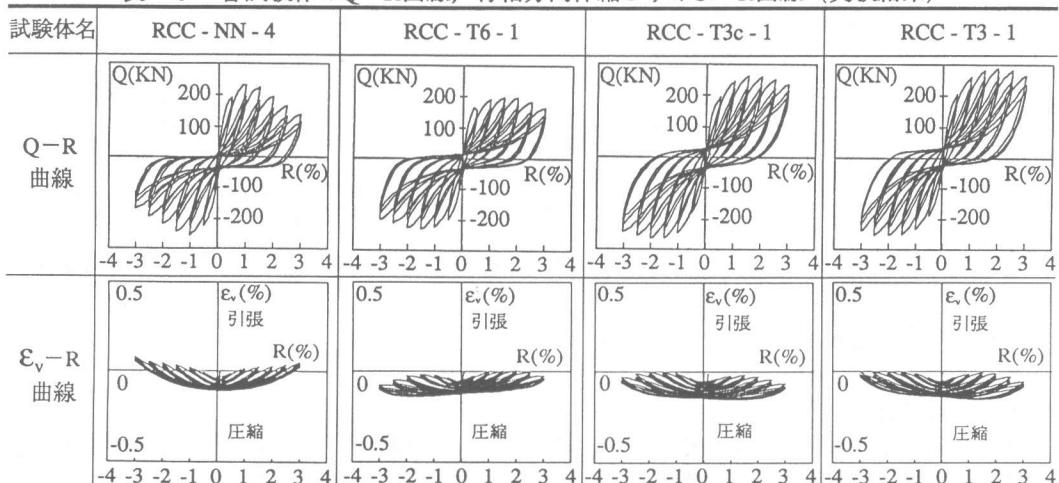


表-6 ひずみゲージによる鉄筋のひずみと部材角の関係

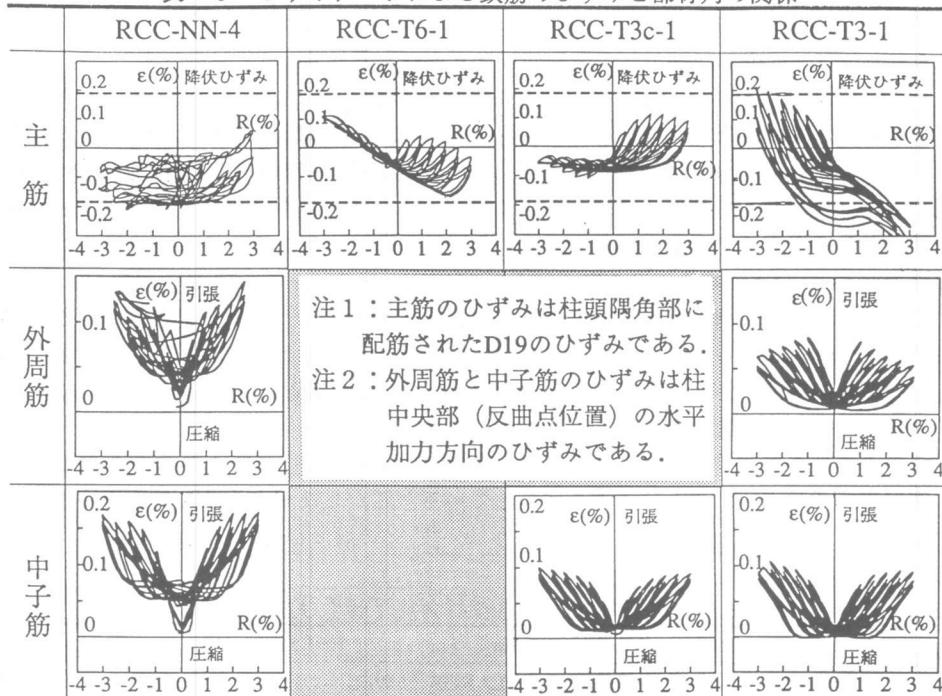
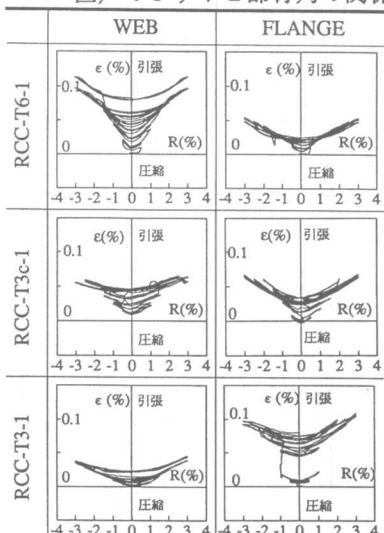


表-7 鋼管の柱中央部（反曲点位置）のひずみと部材角の関係



注) WEB: 水平加力方向  
FLANGE: 水平加力と直交方向

値からある程度推測される。

## 5. 理論解析

実験結果の分析から、鋼管と帶筋で二重に横拘束した試験体の主筋とコンクリートの間には程度の差はある、付着すべりが一部生じたものと考えられるので、山川らによってすでに試みられ

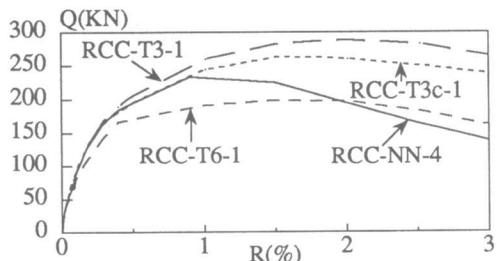


図-2 各試験体のスケルトンカーブ(実験結果)

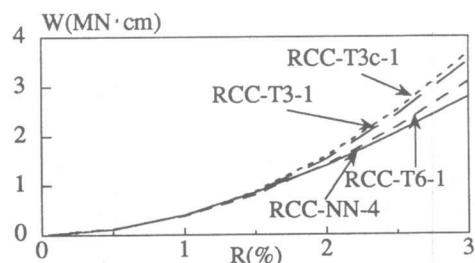


図-3 各試験体の累積ひずみエネルギー(実験結果)

ている付着すべりを考慮したRC柱の曲げ強度解析を行う[6]。

山川らは鋼管で被覆されたコンクリートと異形鉄筋の付着性状に関する森下らの研究結果[7]を参考にし、平均的な付着応力とすべりによる見かけのひずみ(付着ひずみ)の関係を図-4に示すように仮定している。この付着に関する構成則の特色は通常のRC断面柱におけるそれと異なり、钢管で被覆されているので、付着ひずみが増加しても付着強度を一定に保つことである。図-4に基づく付着強度を用いて、主筋の降伏強度とその付着強度との大小関係を検討し、付着を考慮した合成柱の曲げ強度解析を行う。

一方、RC柱を含む合成柱のコンクリート応力-ひずみ関係に関しては、カバーコンクリートにManderらのプレーンコンクリートの構成則を、そして钢管または帯筋で横拘束されたコアコンクリートには松村らまたはManderらのコンファインドコンクリートの構成則を適用した[3,4]。しかも、钢管と帯筋で二重に横拘束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ファインドコンクリートの強度上昇分を単純累加し[1,2]、Manderらの構成則[3]を適用した(図-5参照)。表-2, 3のコンクリート、鉄筋及び钢管の各力学的性質と図-4, 5の仮定を適用して、fiberモデルによるN-M相関曲線に関する計算結果を図-6に示す。付着すべりが生じないものと仮定した場合は試験体RCC-T3-1について、付着すべりを考慮した場合は試験体RCC-T6-1について、それぞれのN-M相関曲線を図-6に示した。これらの曲線は、シリンダー強度の差異は若干あるものの変化する軸圧縮力下の最大及び最小曲げ耐力曲線をそれぞれ表していることになる。せん断破壊した在来のRC柱試験体RCC-NN-4を除き、いづれの実験結果も最大曲げ耐力曲線まで至っていないことが図-6よりわかる。山川らがRC柱に関して仮定している曲率分布(表-8参照)を利用して[6]、計算したQ-R曲線を図-7に示す。せん断破壊の一種である付着割裂したRC柱試験体RCC-NN-4には参考までに、せん断強度に関する各提案式による計算結果と曲

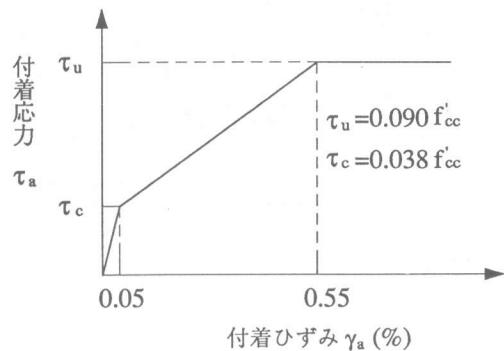


図-4 付着応力  $\tau_a$  と付着ひずみ  $\gamma_a$  に関する仮定

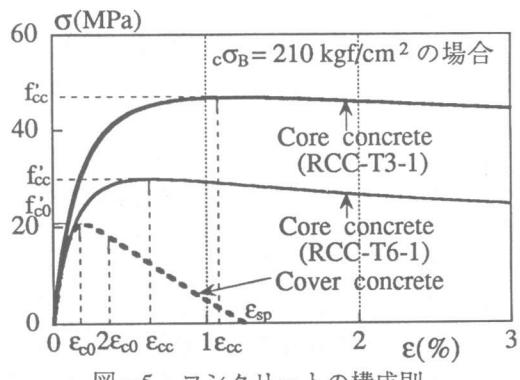


図-5 コンクリートの構成則

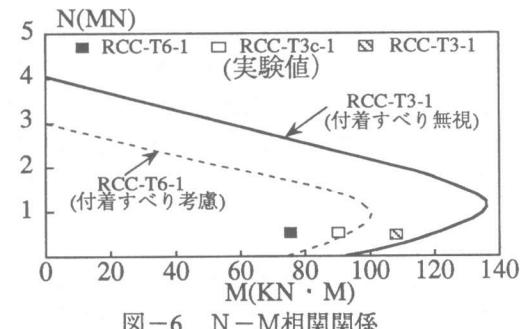
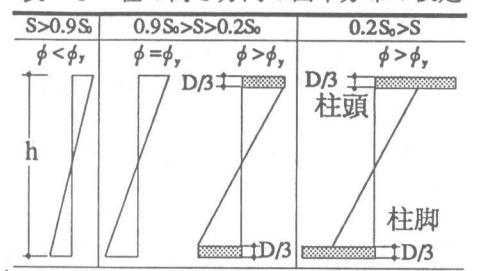


図-6 N-M相関関係

表-8 柱の高さ方向の曲率分布の仮定



注)  $M-\phi \cdot d$ 曲線の勾配を  $S$  とし、その初期勾配を  $S_0$  とする。  
注) D: 柱の全せい、h: 柱の高さ、 $\phi$ : 曲率、 $\phi_y$ : 降伏曲率

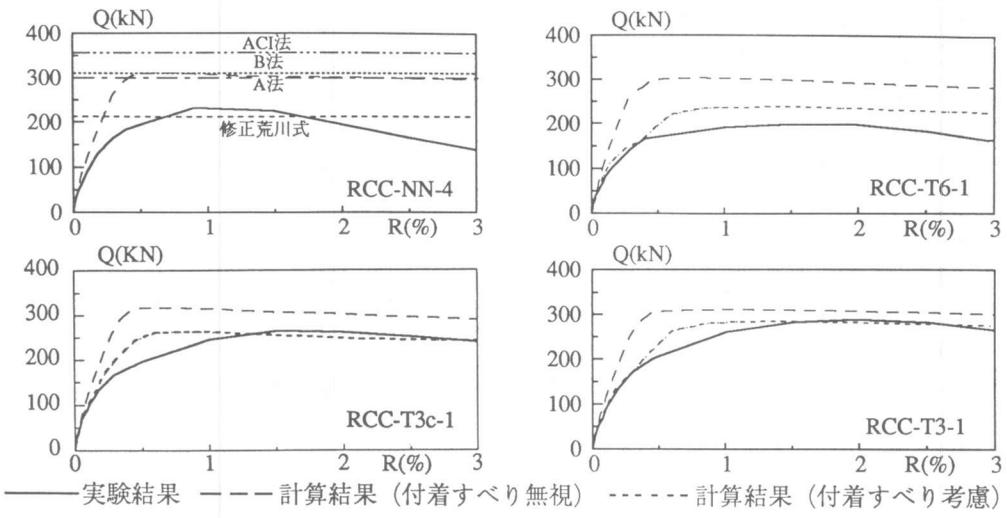


図-7 各試験体のスケルトンカープに関する計算結果と実験結果の比較

げ強度に基づくQ-R曲線も合わせて示した。これらの計算結果より、いづれの試験体のQ-R曲線も付着すべりが生じない曲げ耐力曲線まで至っていないことがわかる。

## 6. 結論

主筋量が $P_g=4.38\%$ と比較的多く、せん断スパン比が $M/QD=1.5$ で付着割裂破壊しやすく、しかも軸圧縮応力が $0.35\sigma_B$ と比較的高く、コンクリートの圧縮強度が平均で $23.5\text{ MPa}$ と比較的低い条件で、鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱の弾塑性挙動を実験的に検討した。その結果鋼管で横補強することにより、韌性の確保はどうにかできたものの、主筋も横補強材としての鋼管もその能力を十分発揮することができず、合成柱としての剛性、耐力、ひずみエネルギー吸収能力を十分高めることができなかった。確かに、鋼管と帯筋で二重に横補強することにより耐力もひずみエネルギー吸収能力も相対的に増大したが、履歴曲線やひずみゲージの測定結果を見る限り主筋に付着すべりの傾向が見られる。計算結果もこの傾向を示唆しており、まだ横拘束効果が十分発揮されているとはいえない。これらは今後の研究課題である。

## 参考文献：

- 1)山川哲雄：正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横拘束したコンクリートの圧縮性状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.15, No.2, pp.537-542, 1993.6
- 2)山川哲雄：An Experimental Study on Axial Compression Behavior of Concrete Doubly Confined in Steel Tube and Hoops, Proc. of 4-ICCS, pp.131-134, June 1994
- 3)J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park : 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：角形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)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, 第461号, pp.95-104, 1994.7
- 6)山川哲雄, 山田義智：鋼管と帯筋で二重に横拘束したRC短柱の弾塑性性状に関する研究(その2)付着を考慮したRC短柱の弾塑性解析、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.233-234, 1991.9
- 7)Y.Morishita, M.Tomii and K.Sakino: Experimental Studies on Bond Behavior Between Deformed Reinforcing Bars and Concrete Confined in Square Steel Tube, Transactions of the JCI, Vol.9, pp.335-342, 1987