

# 論文 正方形鋼管と帶筋で二重に横補強したRC柱の耐震性能に関する実験的研究

村中圭介<sup>\*1</sup>・山川哲雄<sup>\*2</sup>

**要旨:**鋼管と帶筋で二重に全面または局部的に横補強したRC柱の耐震性能を検討するために、せん断スパン比が1.5で断面形状と高さが250×250×750mmの柱試験体を用いて、一定軸圧縮応力下（軸応力度 $fc'/3$ ）の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を用い、柱全体を正方形鋼管と帶筋で二重に横補強すれば、太径の主筋を多量（12-D19,  $p_g=5.51\%$ ）に配筋しても付着強度の劣化は観察されず、耐力、韌性、エネルギー吸収能力などの耐震性能が飛躍的に向上することがわかった。

**キーワード:**帶筋、合成RC柱、正方形鋼管、耐震性能、二重横補強法、付着すべり

## 1. 序

高強度コンクリート（約40MPa）を利用し、正方形鋼管と帶筋で二重に横補強すればRC柱の耐震性能（水平耐力、韌性、エネルギー吸収能）を飛躍的に向上させることができることが判明した[1]。そこでこれらの実験結果を再検証するために、新たに太径（D19）でしかも多量の高強度鉄筋（SD490相当品）と高強度コンクリート（約46 MPa）を用い、鋼管と帶筋で二重に横補強したRC柱、および厳しい応力状態に通常おかれている柱頭、柱脚部のみを鋼管と帶筋で二重に横補強したRC柱など5体の試験体を製作し、これらの一定軸圧縮力（比較的高い軸応力度である $fc'/3$ ）以下の正負繰り返し水平加力実験を行った。

本実験の目的は鋼管と帶筋で二重に全面または局部的に横補強したせん断スパン比1.5のRC柱に関して、主に次の2点が成立するかどうかを検証するために行ったものである。

1) 主筋比にして $p_g=5.51\%$ という多量で、しかもD19の太径の高強度鉄筋を主筋として配筋しても、正方形鋼管と帶筋で二重に横補強すれば、付着割裂破壊をはじめせん断破壊を防止し、耐震性能に富んだRC柱に体質改善できるかどうかを実験で検証する。

2) 上記の二重横補強法を応力が厳しい柱頭、柱脚にのみ適用し、柱の中間部分は帶筋のみか、鋼管のみの単純横補強でも耐震性能を確保できるかどうかを実験で検証する。

## 2. 試験体について

試験体の配筋図を図-1に示し、その寸法は250×250×750mmであり、試験体のせん断スパン比( $M/Vd$ )は1.5である。かつRC柱としては付着割裂破壊というせん断破壊先行の試験体である（図-2,3,9参照）。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、鋼管と帶筋で二重に横補強したRC柱3体（うち2体は柱頭、柱脚のみ二重横補強し、その局部補強長さは10mm程度のクリアランスも含めほぼ柱せいに等しい260mm）の合計5体である（表-1参照）。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を配筋し、その主筋比は $p_g=5.51\%$ である。コンクリート、鋼

\*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）

表-1 柱の試験体一覧

試験体名	CC96H-RS	CC96H-SS	CC96H-S2	CC96H-S3	CC96H-DS
試験体					
柱頭・ 断 面 図					
	柱頭・ 柱脚部				
	中央部				
配筋	鋼管 : t=6mm 主筋 : 12-D19, p g=5.51%	主筋 : 12-D19, p g=5.51%			
	帶筋 : D6-@40, p w=1.28%				

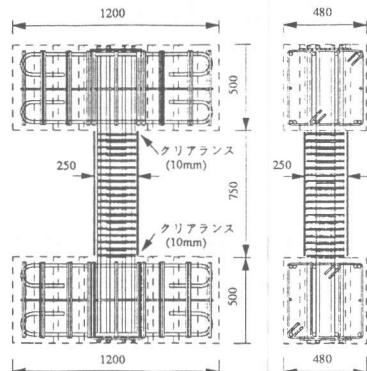


図-1 試験体の配筋図

管及び鉄筋の力学的性質を表-2, 3にそれぞれ示す。

### 3. 測定及び載荷方法

試験体の水平（曲げせん断変形）と鉛直（伸縮変形）変位は変位計を用いて測定し、主筋、帯筋及び鋼管にはひずみゲージを貼付した。載荷は建研式水平加力装置を用いて、一定軸圧縮応力 ( $f_c'/3$ ) のもとで正負繰り返し水平力を与えた。加力の制御は、初期剛性を得るために最初は荷重制御により行い、それ以降は柱の部材角を0.5%ずつ同一振幅で、3サイクルずつの変形制御で3%まで行った。

### 4. 実験結果と考察

標準試験体と、中央部が帯筋のみで横補強された試験体(CC96H-RSとCC96H-S2)の部材角R=0.5, 1.5, 3.0%時で、かつ3サイクル終了後のひび割れ状況を図-2に示す。これら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いくべきせん断破壊を示している。しかし、中

表-2 コンクリートの力学的性質とスランプ

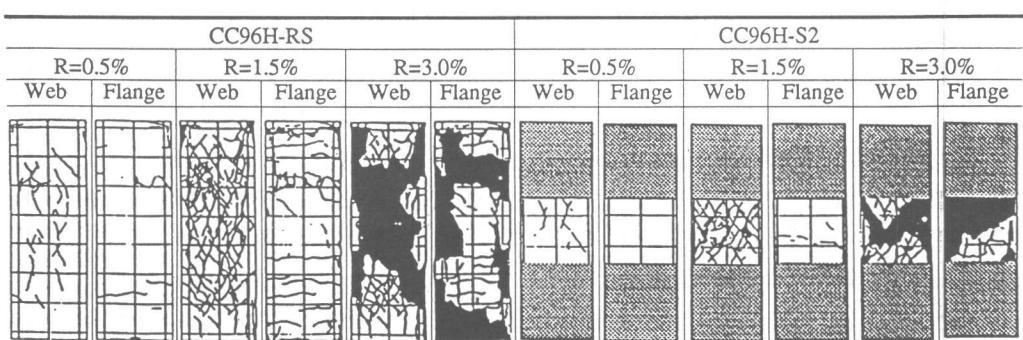
試験体名	$f_c'$ (MPa)	$\varepsilon_{eo}$ (%)	$E_c$ (GPa)	スランプ(cm)
CC96H-RS	46.0	0.18	35.0	11
CC96H-SS	45.3	0.23	30.6	14
CC96H-S2	44.7	0.20	32.3	10
CC96H-S3	46.7	0.21	32.7	11
CC96H-DS	47.3	0.24	30.6	11

注)  $f_c'$ : シリンダー強度  $\varepsilon_{eo}$ : シリンダー強度時のひずみ  
 $E_c$ : ヤング係数

表-3 鋼管及び鉄筋の力学的性質

種類	$B/t$	$f_y$ (MPa)	$\varepsilon_y$ (%)	$E_s$ (GPa)
鋼管(250×250×6)	42	320	0.17	197.5
主筋	D19	2.87*	490	0.26
帯筋	D6	0.32*	388	0.22

注)  $B$ : 鋼管の幅  $t$ : 鋼管の厚さ  $f_y$ : 降伏点応力  
 $\varepsilon_y$ : 降伏点ひずみ  $E_s$ : ヤング係数  
\* は断面積を示す。



注) Web: 水平加力方向 Flange: 水平加力と直交方向

図-2 各部材角終了時のひび割れ状況

子筋付き帯筋の横拘束効果が大きいので、図-3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。図-3に柱のせん断力 $V$ と部材角 $R$ の関係である履歴曲線と、柱の平均伸縮ひずみ $\varepsilon_v$ と部材角 $R$ の関係を示す。図-4に累積エネルギー吸収量の比較を、図-5に耐力低下率の比較をそれぞれ示す。図-3からわかるように柱試験体CC96H-RS, CC96H-SS, CC96H-S2の $V$ - $R$ 関係は紡錐形にならず、付着すべりが生じエネルギー吸収能力の貧しい形になっている。また、変形が進むにつれ耐力の低下が目立ち、韌性もあまり期待できないことがわかる。

しかし、钢管のみで横補強した柱試験体CC96H-SSに、厳しい応力状態における柱頭、柱脚部をさらに中子筋付き帯筋で柱せい(250mm)にはほぼ等しい260mm程度二重に横補強すれば、耐力、韌性、ひずみエネルギー吸収量などの耐震性能が改善されることが柱試験体CC96H-S3より確認できる。さらに、柱頭から柱脚にわたって钢管と帯筋で二重に横補強した柱試験体CC96H-DSが耐力、韌性、エネルギー吸収能力ともに、最も優れた耐震性能を示している。図-6に柱頭部における主筋と帯筋のひずみを示す。試験体CC96H-RS, CC96H-SS, CC96H-S2の3体の主筋は実験結果から降伏していないことがわかる。帯筋の方は全て

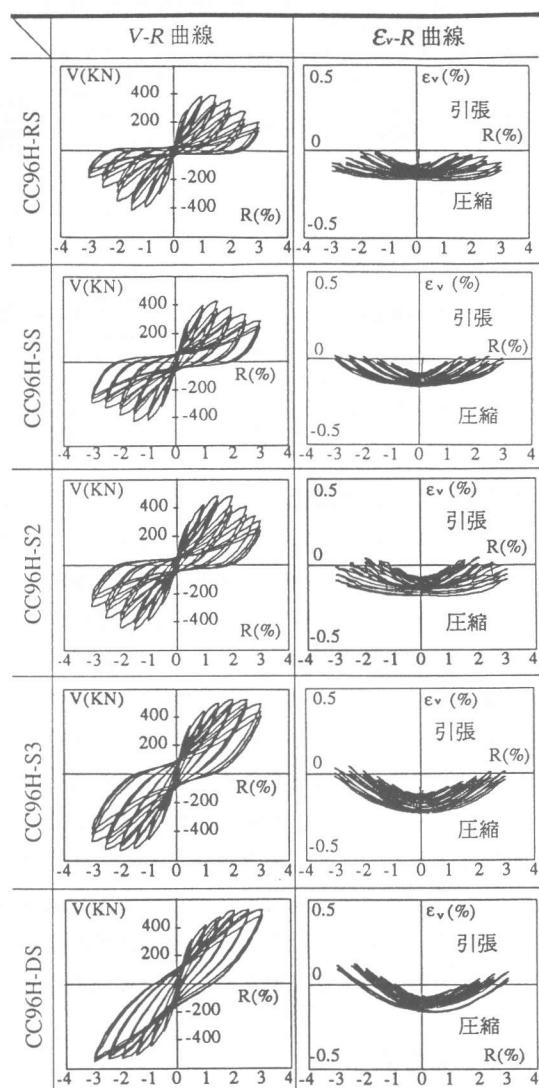


図-3 各試験体の $V$ - $R$ と $\varepsilon_v$ - $R$ 曲線（実験結果）

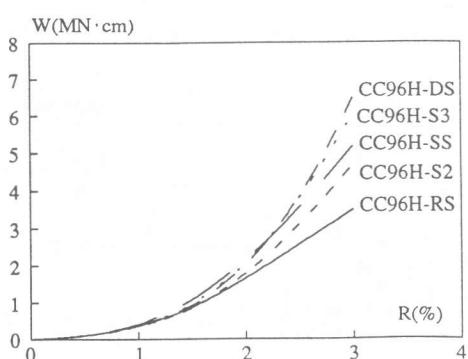


図-4 各試験体の累積エネルギー吸収量（実験結果）

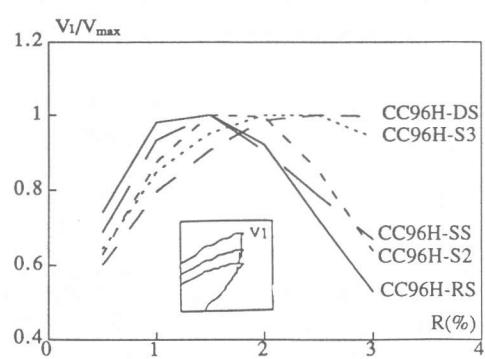


図-5 各試験体の耐力低下率（実験結果）

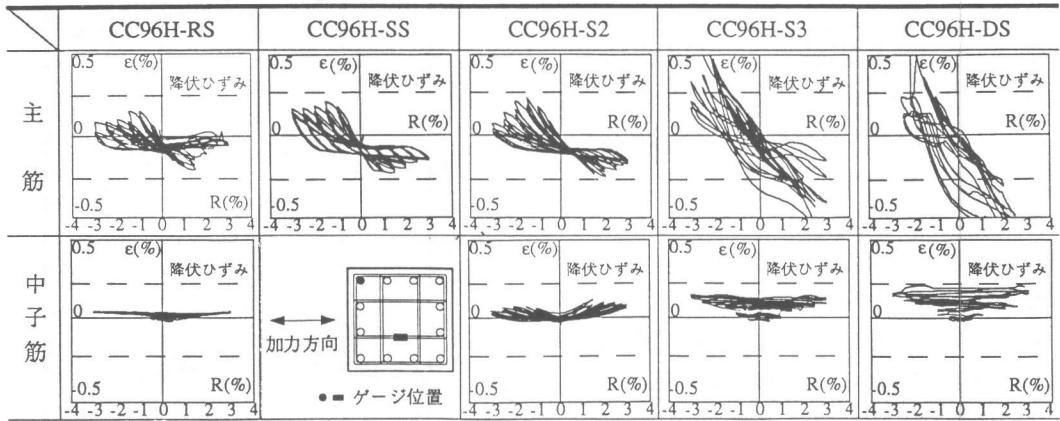


図-6 柱頭隅角部の主筋と柱頭部の中子筋(帯筋)の各ひずみと部材角の関係

の試験体において降伏まで至っていないが、二重横拘束効果が大きくなるにつれて、これらのひずみレベルは増大し、帯筋も横補強材としてその能力を十分発揮する傾向にある。一方、鋼管のフープ方向のひずみ(柱頭部)に関する測定結果によると、そのひずみは全試験体とも帶筋のひずみより小さく、鋼管にはまだ十分余裕があることがわかっている。柱頭と柱脚のみ二重に横補強した柱試験体CC96H-S2とCC96H-S3を比較すれば、柱の中央部を帶筋のみで横補強するよりも鋼管のみで横補強した方が、耐震性能が向上していることがわかった。帶筋のみの横補強ではかぶりコンクリートの剥離、剥落と、それにともなう付着強度の劣化を防止できないが、鋼管であれば付着強度の低下をある程度抑えることが可能である。しかし、CC96H-S3をCC96H-DSと比較すると、図-3, 4, 5から柱中央部の帶筋の有無が付着強度にある程度影響を与えてることは明白である。これらの実験結果から、柱頭から柱脚にわたり鋼管と帶筋で二重に横補強すれば耐震性能が飛躍的に向上するが、柱頭、柱脚のみの二重横補強では、柱中央部での付着強度の低下が影響し、大幅な耐震性能の改善は望めないことがわかった。ただし、これらにはコンクリート強度、主筋量やせん断スパン比などが影響するものと思われる。

## 5. 理論解析

コンクリートの構成則に関しては、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、鋼管または帶筋で横拘束されたコアコンクリートには、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た[2, 3]。しかも、鋼管と帶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

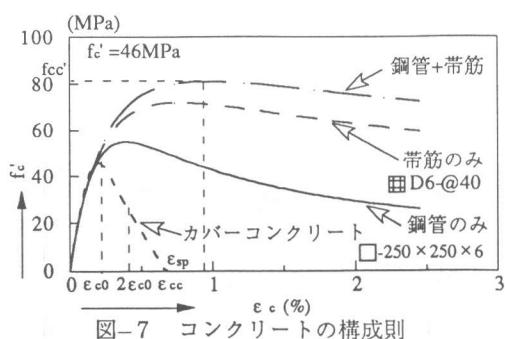


図-7 コンクリートの構成則

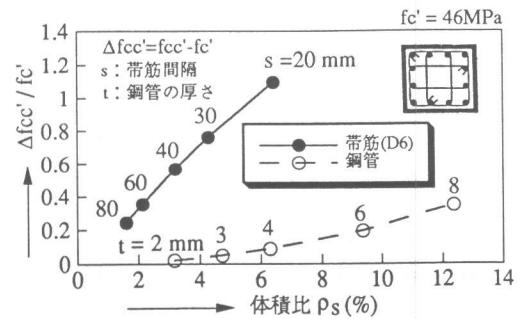


図-8 横補強材による拘束効果の比較

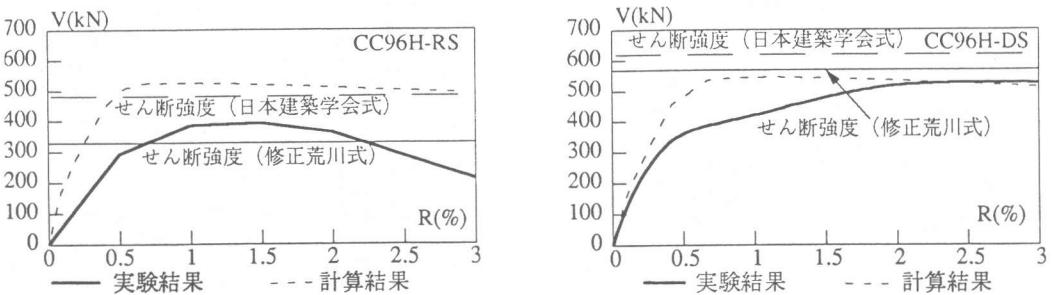


図-9 スケルトンカーブに関する実験結果と計算結果の比較

上昇分を単純累加し、その上で Mander らの構成則 [2] 適用した。以上の構成則に従って計算した結果を図-7 に示す。図-8 に横補強材による拘束効果の比較をそれぞれ示す。図-8 から分かるように同じ体積比の場合、中子筋付き帯筋の横拘束効果は鋼管のそれよりかなり大きいことが分かる。図-9 にスケルトンカーブに関する実験結果と計算結果の比較を示す。ただし、曲げ強度により  $V$ - $R$  曲線の計算にあたっては平面保持仮定のファイバーモデルを用い、かつ材軸方向に曲率分布を仮定するとともに [4]、図-7 に示したコンファインドコンクリートの構成則を利用した。

一方、鋼管と帯筋で二重に横補強した試験体 CC96H-DS のせん断強度の計算にあたっては、アーチ機構には横拘束効果を考慮したコンクリート強度を用い、トラス機構には鋼管を板厚の直径で、板厚間隔の帯筋とみなし、帯筋比に反映させた [5]。ただし、修正荒川式 [6, 7] では帯筋比に  $p_w = 1.2\%$  の上限値を適用しないが、日本建築学会式には文献 [8] に従って、 $v f_c / 2 f_y$  の上限値を適用することにより、 $p_w = 5.24\%$  を  $p_w = 3.00\%$  にとどめた。その結果、実験結果と計算結果の間に整合性を見いだすことができた（図-9 参照）。すなわち、正方形鋼管と帯筋で二重に横補強することにより、せん断破壊先行の RC 柱を韌性に富んだ曲げ破壊に移行させることができた。

実験で観察された付着すべりに関しては、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成果 [9] を参照し、主筋の平均的な付着応力と付着すべりによる見かけのひずみ（付着すべり量を材長で除し、無次元化した値を付着ひずみと仮称）の関係を図-10 に示す。この付着に関する構成則は通常の RC 断面柱と異なり、鋼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がある。付着すべりは曲げモーメント勾配によるせん断力にしたがって、図-10 の関係を適用し、主筋の応力を緩和することによりファイバーモデルを用いて簡便的に考慮する。ただし、付着すべりを無視する場合は主筋の応力を緩和することなく、通常の平面保持仮定によるファイバーモデルを用いた計算を行う。図-11 にコンクリート強度を変数に用いて計算した  $N$ - $M$  相関曲線を示す。これららの図から付着すべりはコンクリート強度にかなり影響されることがわかる。特に鋼管のみで横補強した場合にはその影響が顕著である。図-12 に柱試験体 CC96H-SS と CC96H-DS の  $N$ - $M$  相関曲線を示す。この計算結果より鋼管のみで横補強した柱試験体 CC96H-SS は付着すべりの影響が大きいことがわかる。

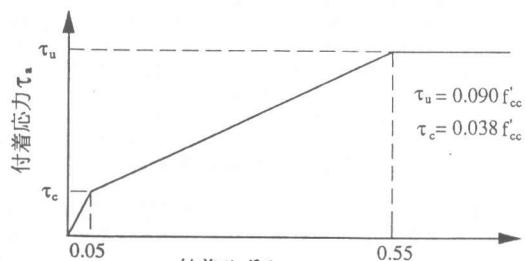


図-10 付着応力  $\tau_a$  と付着ひずみ  $\gamma_a$  の仮定

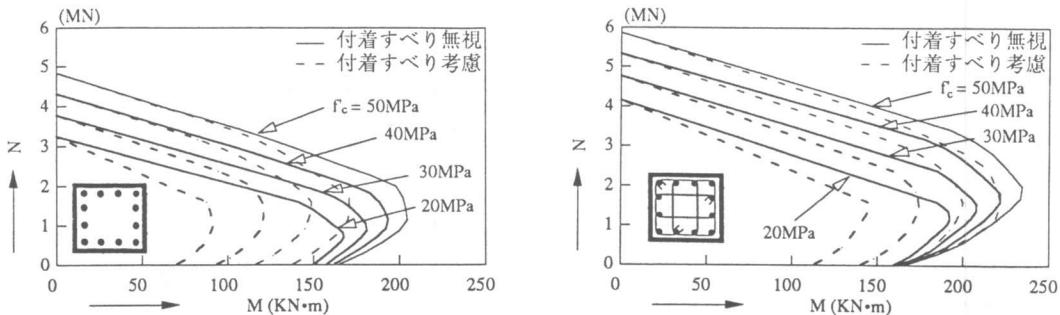


図-11 コンクリート強度を変数に用いて計算したN-M相関曲線

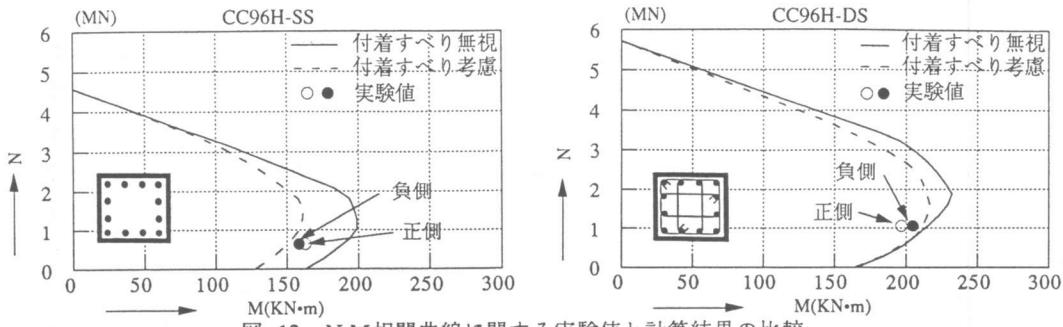


図-12 N-M相関曲線に関する実験値と計算結果の比較

一方、鋼管と帯筋で二重に横補強した柱試験体CC96H-DSは付着すべりの影響はほとんどない。このことは、コンクリート強度が高く横拘束効果が大きくなると、結果的に付着強度が高くなり付着すべりが生じにくくなるが、太径の主筋を多量に配筋したRC柱ではコンクリート強度が高くても横拘束効果が不足すれば、付着強度が低下することを示唆している。

## 6. 結論

高強度（SD490相当品）の太径（D19）で主筋量が多く（ $p_g=5.51\%$ ），かつせん断スパン比が付着割裂しやすい1.5という厳しい状態にあっても、高強度コンクリートを用い、柱全体を正方形鋼管と帯筋で二重に横補強すれば付着強度の劣化は観察されず、耐力、韌性、エネルギー吸収能力などの耐震性能が飛躍的に向上することがわかった。しかし、そのためには柱端部のみならず、柱中央部でも正方形鋼管と帯筋で二重に横補強することが重要である。

**謝 辞：**本研究は平成7年度財団法人鹿島学術振興財団研究助成金によるものであり、高強度鉄筋（SD490相当品）は東京鉄鋼株式会社より提供いただいた。ここに厚くお礼を申し上げます。

### 参考文献：

- 1) 赤洪涛, 山川哲雄, 村中圭介 : An Experimental Study on Seismic Behavior of RC Columns Doubly Confined by Steel Tube and Hoops, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.67-70, 1996.9
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 赤洪涛, 山川哲雄 : 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.387-392, 1995.6
- 5) 益尾清 : RC及びSRC柱の耐震補強実験と設計式の検証, コンクリート工学 Vol.34, No.10, pp.21-30, 1996.10
- 6) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp. 167-192, 1991.4
- 7) 日本建築学会 : 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, pp. 157-165, 1981.6
- 8) 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.104-121, 1990.11
- 9) 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