

論文 拘束高強度 R C 柱の繰返し曲げ性状について

孫 玉平^{*1}・崎野 健治^{*2}・梶原 龍生^{*3}

要旨：幅厚比が 61 の角形鋼管（内幅 250mm）により拘束された高強度鉄筋コンクリート柱（コンクリートの設計強度 100MPa）について，一定軸力下における繰返し曲げ実験を行い，軸力の大きさや内スチフナーの有無などが拘束 R C 柱の繰返し曲げ性状に及ぼす影響を調べた。その結果，軸力比 0.3 までの軸力を受ける高強度 R C 柱に十分な曲げ変形能を確保するには幅厚比 61 の角形鋼管を用いればよいことと，角形鋼管をさらに内スチフナーで補強すれば，軸力比 0.5 の高い軸力を受ける柱に安定的な繰返し曲げ履歴をもたらすことが可能であることなどが明らかになった。

キーワード：角形鋼管，拘束高強度 R C 柱，繰返し曲げ性状，終局曲げ耐力

1. はじめに

高強度コンクリートは高い耐力と優れた耐久性を併せ持つことから近年高層建築物に多く使われるようになってきている¹⁾。一方，高強度コンクリートを地震の多い地域にある構造物に広く活用するには，高強度コンクリート固有の脆い破壊性質を改善するための工法の開発と多様化を図る必要がある。

帯筋や鋼管などのような横拘束材を用いてコンクリートを拘束する工法は，高強度コンクリートの変形能力の改善ないし高強度コンクリートを用いた部材の耐震性能の向上に有効であることが知られている。特に，鋼管を用いた横拘束法は，従来の帯筋やスパイラル筋による横拘束法と比較して，1)大量の横拘束材を施工上無理なく配置できる，2)部材全断面を拘束でき，かぶりコンクリートを造らない，3)鋼管が部材の型枠を兼ねることができ，などの長所があるので，高強度コンクリートを用いた R C 柱の横拘束に適した方法であると言える。

非常に短い柱を別とすれば，鉄筋コンクリート柱（以下 R C 柱と称す）の耐震性能は基本的に柱の曲げ圧縮性状により支配される。

このことを踏まえて，著者らはこれまでに角形鋼管により横拘束された高強度 R C 柱の耐震性能を定量的に評価するための研究の第一歩として，設計強度が 60MPa と 100MPa のコンクリートを用いた柱について，一定軸力下における単調曲げ実験を行い，角形鋼管の板厚や作用軸力の大きさなどが鋼管横拘束高強度 R C 柱の終局曲げ性状（終局曲げ耐力，曲げ耐力時曲率と終局ひずみ等）に及ぼす影響について調べてきた^{2,3)}。一方，繰返し地震荷重を受ける拘束 R C 柱の耐震挙動を究明するには，柱の繰返し曲げ性状を調べ，その特性を明かにしておく必要がある。

そこで，本論は既往の研究の続きとして，角形鋼管により拘束された 100MPa 級の高強度 R C 柱について，一定軸力下における繰返し曲げ実験を行った。本研究の主な目的は，角形鋼管の拘束効果を向上させるために考案された内スチフナーを取りつける補強法の有効性の確認と，軸力の大きさおよび繰返し載荷が拘束 R C 柱の終局曲げ性状と大変形時の変形能に及ぼす影響を定量的に評価するための実験データを得ることである。また，100MPa 級の超高強度コンクリートを用いた

*1 九州大学助教授 大学院人間環境学府 工博（正会員）

*2 九州大学教授 大学院人間環境学府 工博（正会員）

*3 九州大学大学院生 大学院人間環境学研究院 工修（正会員）

柱に適用でき、かつ鋼管による拘束効果が考慮できる、角形鋼管横拘束RC柱の繰り返し曲げ性状を解析的に評価するための手法を提案し、その妥当性の検討も行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

計6体の試験体はすべて内幅250mmで板厚4.2mm(幅厚比 $B/t=61$)の角形鋼管により拘束された、高さ750mmの正方形断面柱である。各試験体には12本のD13異形鉄筋を断面周辺に沿って均等に配置し、主筋比は2.44%となっている。コンクリートの圧縮強度(設計強度 $f_c=100\text{MPa}$)および主筋の降伏強度($F_{ys}=342\text{MPa}$)を一定とした。試験体の断面配筋詳細および概要をそれぞれFig.1とTable 1に示す。鉄筋のエンドプレートへの定着方法については文献3を参照されたい。

実験変数は、軸力の大きさ、内スチフナーの有無および載荷形式の3つである。軸力比で表した軸力の大きさは0.3, 0.5と0.7の3種類である。角形鋼管の面外剛性を強め、鋼管の拘束効率を向上させるための方法として考案された、鋼管内部に十字型スチフナーを取りつける方法の有効性を検証するために、高い軸力を受ける2体の試験体に内スチフナーで補強された角形鋼管を用いた。また、載荷形式の曲げ挙動への影響を調べるために、2体の試験体に単調曲げモーメントを加えた。

横拘束用鋼管は実験室で製作したもので、その製作過程は次の通りである。まず目標板厚を有する平板から鉄板を切り出して、それを内幅250mmのL型に成形した後、継ぎ目を溶接して製作した。平板の降伏点応力をTable 1に示す。なお、内スチフナーには厚さ2.3mmの鉄板($F_y=338\text{MPa}$)を用いた。鋼管には曲げおよび軸力による軸方向応力を直接負担させないため、試験体上下部のエンドプレートと鋼管の間および試験体中央部における鋼管の間に10mmのクリアランスを設けた。

Table 1 Outlines of the specimens

試験体名	鋼管		軸力	
	D/t	f_{yt} (MPa)	N (kN)	N/Acfc
BST45F100M30	61	337	1763	0.3
BST45F100C30			1763	0.3
BST45F100M50			2938	0.5
BST45F100C50			2938	0.5
BST45F100S50			2938	0.5
BST45F100S70			4113	0.7

試験体名凡例: B: 荷重種類 (B: 曲げ, C: 圧縮)
 B S T12 F60 M 20 S: 断面形状 (S: 正方形, etc)
 T23: 公称板厚 (T23: $t=2.3\text{mm}$, etc)
 F100: コンクリート設計強度 (F100, 100MPa)
 M: 載荷形式 (M: 単調, C: 繰り返し, S: 内スチフナーあり繰り返し)
 30: 軸力比 (30: 0.3, etc)

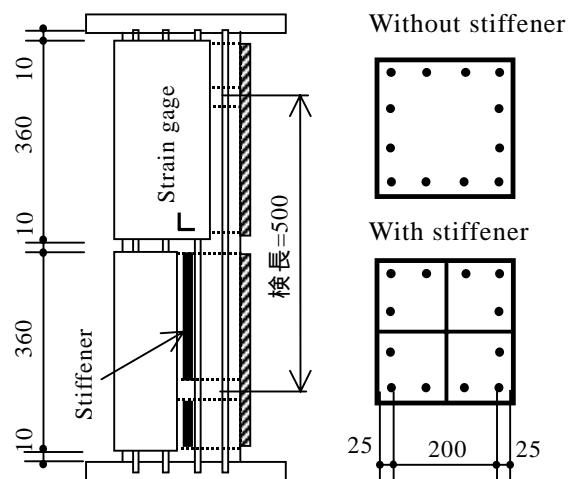


Fig. 1 Details of test specimens

コンクリートは設計強度100MPaの高強度レディミックスコンクリートを使用した。コンクリートに使用したセメントは普通ポルランドセメントで、粗骨材には最大粒径13mmの砕石を、混和材にはシリカフュームを使用した。実験材令時でのコンクリートシリンダー強度を主な実験および計算結果と合わせてTable 2に示す。

2.2 加力および測定方法

一定軸力下における繰り返し曲げモーメントはコンクリート断面せいDで無次元化した

曲率 ϕD により制御され、文献2で述べた方法を用いて行った。すなわち、5MNの油圧試験機により所定軸力を加えてから、試験体上下に取り付けられた加力ビームを油圧ジャッキで押し引きによって曲げモーメントを载荷した。Fig.2には载荷プログラムを示す。

試験体中央部分(検長500mm)の平均曲率は、試験体に埋め込んだボルトに固定した測定用フレームに取り付けられた2個の変位計により測定した。また、主筋および鋼管表面のひずみをひずみゲージにより測定した。

3. 実験結果

3.1 主な実験結果

各試験体の終局曲げ耐力、および曲げ耐力時における曲率検長間の断面圧縮縁平均ひずみ(以下、終局ひずみと称す)の実験結果をTable 2に示す。Table 2中の計算結果の算定方法については第4節を参照されたい。

Table 2より分かるように、同じ軸力を受ける試験体は、载荷形式の違いは柱の終局曲げ耐力と終局ひずみに殆ど影響を及ぼさない。終局ひずみ ϵ_{cm} に関しては、いずれの試験体においてもその実験値がACI規準で推奨されている0.3%という一定値を上回った。これは角形鋼管の拘束効果によるものと思われる。また、終局ひずみ ϵ_{cm} と軸力の大きさとの間に有意義な相関が認められなかった。

3.2 曲げモーメント-曲率関係の実験結果

Fig.3とFig.4にはそれぞれ载荷形式および内スチフナーの有無が柱の曲げモーメント-曲率関係性状に及ぼす影響について示している。図中の曲率は柱断面の内法せいDで無次元化されたものである。

試験体BST45F100M30とBST45F100C30の実験結果を比較すると分かるように、軸力比0.3の軸力を受ける試験体はいずれも大変位まで安定した曲げ挙動を示しており、繰り返し载荷を受ける試験体の曲げモーメント-曲

Table 2 Primary results

試験体名	f'_c	実験結果		計算結果	
		M_{exp}	ϵ_{cm}	M_{cal}	ratio
BST45F100M30	91.6	195	0.32	191	1.02
BST45F100C30		193	0.32	191	1.01
BST45F100M50		189	0.40	215	0.88
BST45F100C50		187	0.31	215	0.87
BST45F100S50		252	0.55	233	1.08
BST45F100S70		251	0.32	218	1.15

注: f'_c = 実験時材令のコンクリートシリンダー強度

M_{exp} = 最大曲げモーメントの実験結果 (kN-m)

ϵ_{cm} = M_{exp} 時断面圧縮縁のひずみ (%)

M_{cal} = 最大曲げモーメントの計算結果 (kN-m)

ratio = M_{exp} / M_{cal}

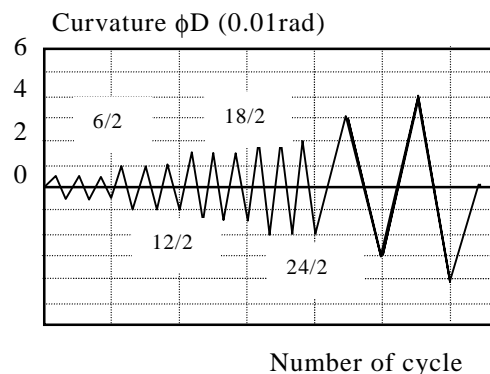


Fig.2 Loading program

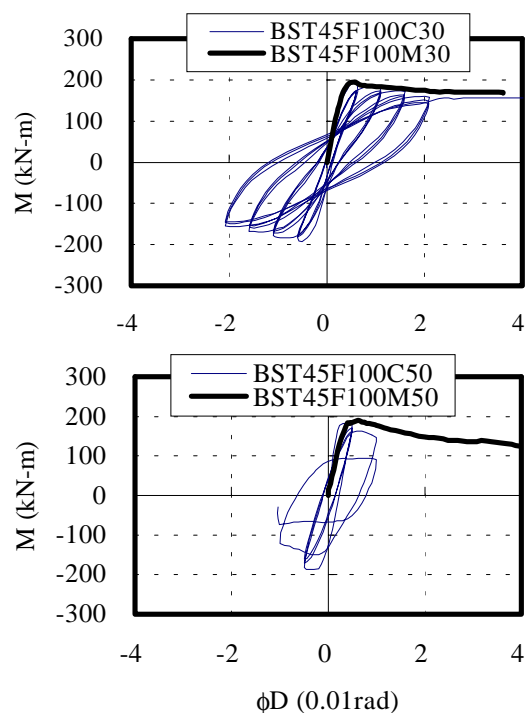


Fig.3 Moment-curvature responses (Effect of loading pattern)

率関係（以下 $M-\phi$ 関係と称す）の包絡線は単調荷試験体の曲線と一致しているほか，終局曲げ耐力や耐力後の下り勾配もほぼ等しく，荷形式の影響が見られなかった。一方，軸力比 0.5 と高い試験体の実験結果を比べれば明らかなように，繰り返し荷を受ける試験体は曲率振幅 $\phi D=0.01\text{rad}$ 以上の領域では軸縮みの累積に伴い急激な耐力低下を生じ， $M-\phi$ 関係の包絡線は，耐力点まで単調荷曲線とよく一致するが，耐力点後の領域では単調荷曲線を大きく下回った。これらのことは，拘束高強度 RC 柱の耐力点での諸特性値が単調荷曲線により評価できるが，耐力点後の変形能力を解析的に評価する際には，軸力の大きさにより繰り返し解析を行う必要があることを示唆している。

また，Fig.4 に示されている実験結果から角形鋼管を内スチフナーで補強する方法の有効性が伺える。試験体 BST45F100S50 は曲げ耐力が試験体 BST45F100C50 のそれよりも約 3 割以上高いのみならず， $M-\phi$ 関係が大変位域まで安定しており，耐力後の変形能力が飛躍的に上昇している。一方，軸力比 0.7 と非常に高い軸力を受ける試験体については，幅厚比 61 程度の薄肉鋼管を内スチフナーで補強しても，大変位領域での安定した曲げ挙動を確保できなかった。このような極めて高い軸力を受ける高強度 RC 柱に十分な曲げ変形能をもたらすに必要な鋼管幅厚比については今後さらなる実験検討が待たれる。

3.3 鋼管表面のひずみ状況

Fig.5 には，試験体中央における，鋼管初期圧縮フランジ表面のひずみの測定例を示す。図中の太い実線と細い実線はそれぞれ鋼管表面のフープ方向ひずみと軸方向ひずみを表す。なお，鋼管表面のひずみは引張を正とする。

Fig.5 より分かるように，内スチフナーなしの鋼管では表面におけるフープ方向ひずみは軸方向ひずみよりはるかに大きく，フープ方

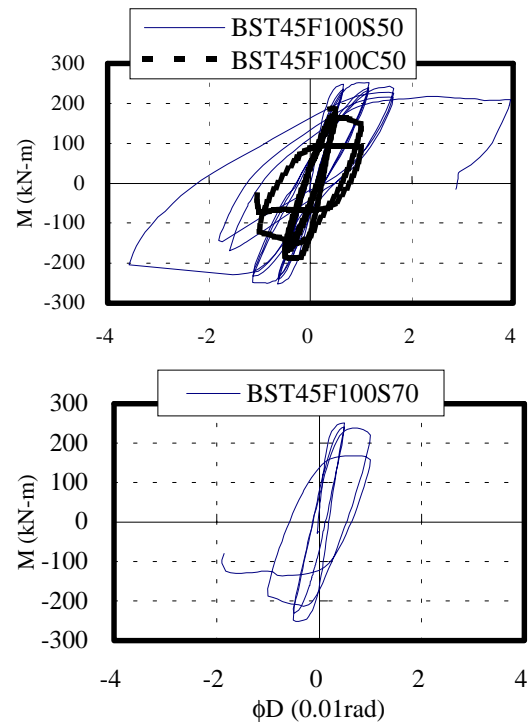


Fig.4 Moment-curvature responses (Effect of inner stiffener)

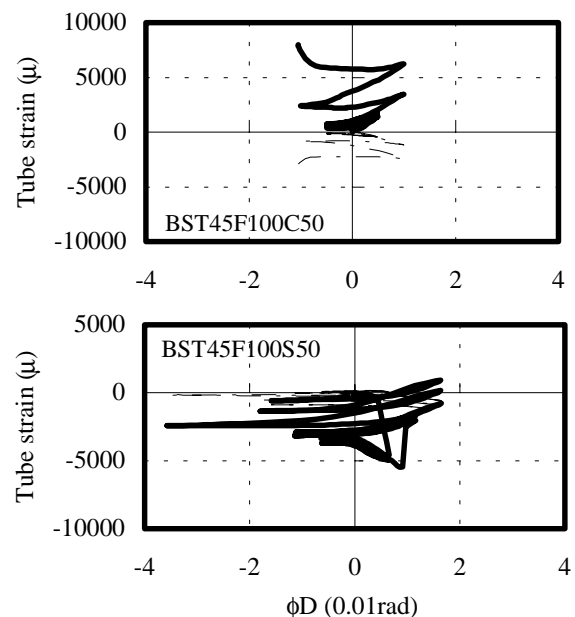


Fig. 5 Measured tube strains

向ひずみと軸方向ひずみの比率の絶対値は凡そ 2.5 ~ 4.0 の間にある。このことは角形鋼管が主に横拘束材として働いていたことを示唆している。一方，内スチフナーで補強された鋼管の表面では，フープ方向ひずみは圧縮ひ

ずみとなっている。これはひずみゲージが貼付された鋼管表面の裏側に内スチフナーが溶接固定されていたことに起因するものと思われる。断面圧縮域のコンクリートが横方向へ膨らむ時に鋼管周辺を面外へ押し曲げようとするが、内スチフナーで止められた鋼管部分は面外変形が止められ、内スチフナー溶接箇所では鋼管板が断面内へ変形しようとする働きにより、鋼管の外表面においてはフープ方向に圧縮ひずみを引き起こしたと考えられる。この現象は、内スチフナーが期待通りに鋼管周辺板の面外変形を止める働きをしていたことを意味している。

4. 繰り返し曲げ性状の解析

拘束高強度RC柱の繰り返し曲げ性状は断面分割法で求めることとする。解析にあたって設けた仮定が以下のとおりである。1)平面保持の仮定、2)コンクリートは引張応力を負担しない、3)主筋の応力ひずみ関係式の包絡線はManderら⁴⁾の提案式に従い、繰り返し載荷時の除負荷曲線式にはMenegotto-Pintoモデル⁵⁾を用いる。4)コンクリートの応力ひずみ関係はFig.6に示すものに従う。

Fig.6に示すコンクリートの応力ひずみ関係は田⁵⁾により通常の帯筋で拘束された普通強度RC柱の解析のために提案されたものを準用しているが、除荷と再負荷曲線部分は2種類の定義について検討する。ケース1の除荷と再負荷曲線は田が提案したもので、詳細については文献5を参照されたい。ケース2の除負荷曲線は本論で提案するもので、除荷点から残留塑性ひずみを結ぶ直線となっている。なお、残留塑性ひずみは除荷点ひずみの0.92倍を取った⁵⁾。

Fig.7とFig.8にはそれぞれM-φ関係および柱の平均軸ひずみ(圧縮を正とする)の実験曲線と計算結果との比較例を示す。図より分かるように、ケース1の解析曲線は実験M-φ関係の包絡線をよく捉えているものの、除荷

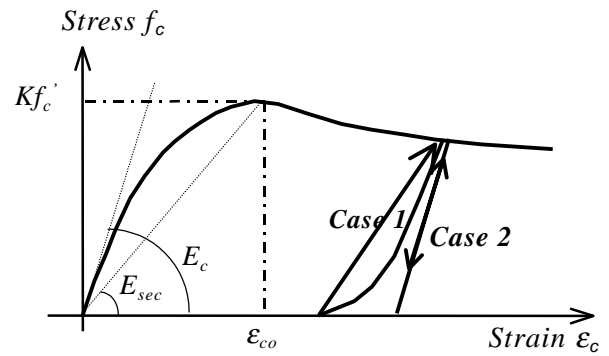


Fig.6 Stress-strain curve of concrete

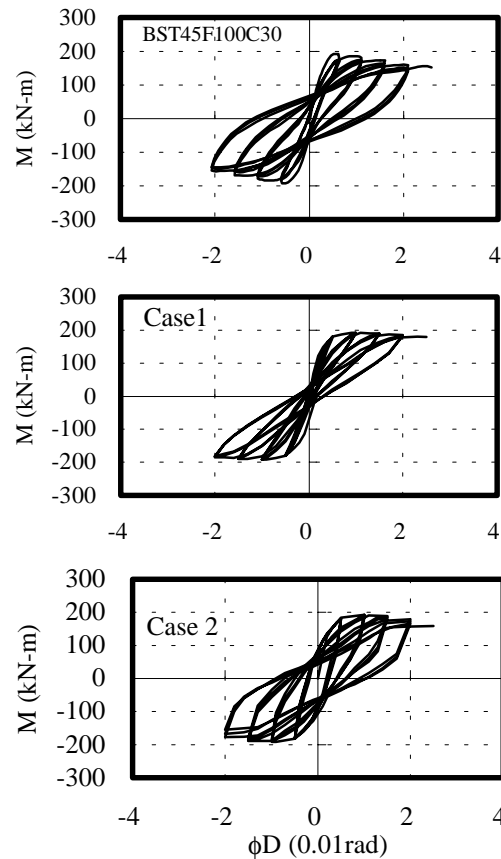


Fig.7 Comparison of M-φ curves

および再負荷部分で顕著な違いが見られた。それに対してケース2の計算曲線は実験結果の包絡線と除負荷部分のいずれも精度よく評価できている。また、柱の平均軸ひずみに関しては、ケース1の解析結果は実験値を過小評価する傾向にあるが、ケース2の解析結果は実験結果と良好に対応している。

5. 結論

本論で述べた研究により、角形鋼管により

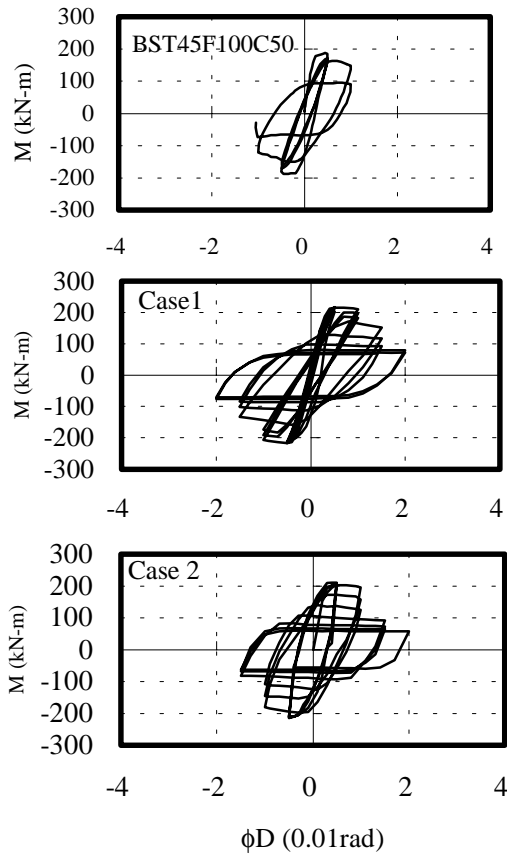


Fig.7 Continue

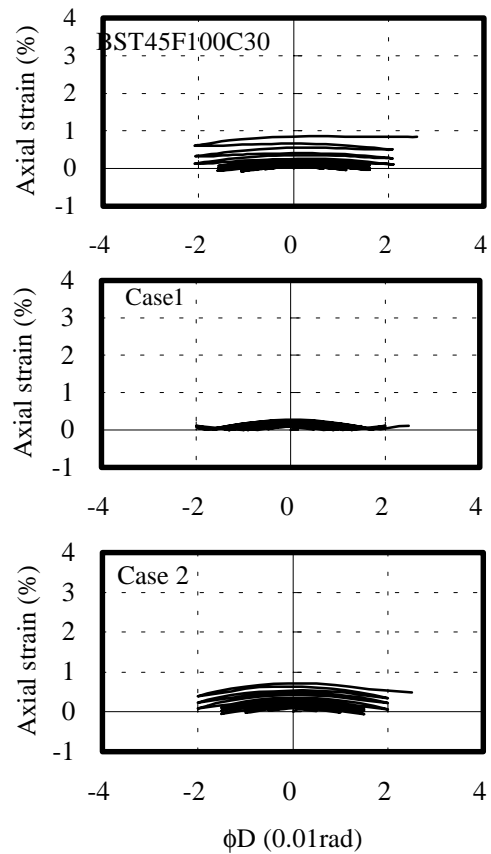


Fig.8 Comparison of average axial strain

横拘束されたFC=100MPa級の超高強度RC柱の繰返し曲げ性状について、以下のことが明らかになった。

- (1) 拘束RC柱の終局曲げ耐力や終局ひずみは載荷形式の影響を殆ど受けないが、耐力後の変形性状が高い軸力下では繰返し載荷の影響を顕著に受ける。
- (2) 角形鋼管内部に内スチフナーを取り付ける方法は鋼管の拘束効率を高めるには極めて有効である。幅厚比 $B/t=61$ 程度の薄肉鋼管を内スチフナーで補強すれば、軸力比 $n=0.5$ と高い軸力を受ける柱に安定した繰返し曲げ性状をもたらすことができる。
- (3) 本論で示した計算方法を用いれば、拘束超高強度RC柱の繰返し曲げ性状を精度よく推定することが可能である。

[謝辞] 本研究で述べた実験の実施にあたっては、九州大学文部技官川口晃氏と松岡直人氏が

ら多大な協力を得た。記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 例えば、木哲ほか：Fc1000kgf/cm²の高強度コンクリートを用いた超高層建築物の施工、コンクリート工学，Vol. 37, No. 3,1999
- 2) Sakino, K., et al. : Ultimate Strain and Strength of RC Columns Retrofitted by Steel Tube, IABSE Conference Report on Composite Construction, Innsbruck, Austria, p. 675-, 1997. 9
- 3) 孫玉平，他：拘束高強度RC柱の終局曲げ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.21, No.3, p.589, 1999
- 4) Mander, J.B.: Seismic Design of Bridge Piers, Research Report (No.84-2), Univ. of Canterbury, 1984
- 5) 田福勝：拘束RC柱の弾塑性性状及び安定限界軸力比に関する研究、九州大学学位論文、1998年3月