Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，2000

論文　角型鋼管横拘束超高強度RC柱の曲げ性状に関する実験的研究

孫　玉平[*1]・崎野健治[*2]

要旨：幅厚比が28～83の角形鋼管（内幅250mm）により横拘束された超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曲げ実験を行い，鋼管の幅厚比が鋼管横拘束ＲＣ柱の終局曲げ性状に及ぼす影響を調べた。その結果，軸力比0.3以上の高軸力を受ける鋼管横拘束超高強度ＲＣ柱に充分な曲げ変形能を確保するには幅厚比43以下の角形鋼管を使用する必要があることと，柱が終局曲げ耐力に達する時の断面圧縮縁コンクリートの終局ひずみは柱に作用している軸力の大きさの影響をあまり受けず，鋼管の拘束度合いにほぼ線形比例して上昇していくことなどが明らかになった。

キーワード：角形鋼管，拘束超高強度コンクリート柱，終局曲げ耐力，終局曲率，終局ひずみ

1．はじめに

非常に短い柱を別とすれば，鉄筋コンクリート柱（以下ＲＣ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。そのため，柱の曲げ性状を究明することは柱の耐震性能を適切に評価するうえで重要な課題である。

著者等はこれまでに，設計強度40MPa以上の高強度コンクリートを用いたＲＣ柱の曲げ変形能力を確保するための方法として，角形鋼管を用いる鋼管横拘束法を考案し，設計強度60MPaの高強度ＲＣ柱について，角形鋼管の板厚が柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響を実験的に調べてきた[1,2]。その結果，以下のことが明らかになった。

1) 設計強度60MPa級の高強度ＲＣ柱に充分な曲げ変形能力をもたらすには，軸力比n=0.3の軸力を受ける場合は幅厚比B/t=82程度の鋼管を用いれば良いが，軸力比n=0.5と高い軸力を受ける場合はB/t=61以下の角形鋼管を使用する必要がある。
2) 角形鋼管横拘束ＲＣ柱の曲げ耐力時における終局ひずみε_{cm}は一定値ではなく，鋼管による拘束度合いにほぼ線形比例して大きくなって行く。また，柱に作用する軸力はε_{cm}にあまり影響を及ぼさない。

本研究では，文献1と2で述べた研究の続きとして，角形鋼管により拘束された100MPa級の超高強度ＲＣ柱について，一定軸力下における曲げ実験を行った。本研究の主な目的は，角形鋼管の幅厚比と拘束超高強度ＲＣ柱の終局曲げ性状（終局曲げ耐力，曲げ耐力時曲率，および終局ひずみなど）との相関関係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柱の終局曲げ性状を簡便に求めるための計算方法を提案し，実験結果との比較により提案手法の妥当性の検討も行う。

2．実験概要

2.1　試験体

試験体は内幅250mm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FC=100MPa）および主筋の降伏強度（Fys=342MPa）を一定とした。試験体の断面詳細および概要をそれぞれFig.1とTable 1に示す。

*1　九州大学助教授　大学院人間環境学研究科　工学博士（正会員）
*2　九州大学教授　大学院人間環境学研究科　工学博士（正会員）

NII-Electronic Library Service

Table 1　Outlines of test columns

試験体名	鋼　管		軸　力	
	D/t	f_{yt} (MPa)	N (kN)	n (N/Acfc)
BST32F100M1	83	304	599	0.1
BST32F100M3	83	304	1799	0.3
BST60F100M3	43	305	1799	0.3
BST90F100M3	28	279	1799	0.3
BST90F100M5	28	279	2850	0.5

試験体名凡例：B: 荷重種類（B:曲げ，C:圧縮）

B S T32 F100 M2　S: 断面形状（S:正方形，etc）

T32: 公称板厚（T32:　t=3.2mm，etc）

F100: ｺﾝｸﾘｰﾄ設計強度（F100: 100MPa）

M3: 軸力比（3：0.3，etc）

Table 2　Mechanical properties of steels

呼名	実測板厚 (mm)	降伏点 f_{yt} (MPa)	降伏点 ε_{yt} (%)	ﾔﾝｸﾞ係数 (GPa)	伸び率 ϕ (%)
T32	3.1	304	0.22	222	39.0
T60	6.1	305	0.16	194	28.7
T90	9.5	279	0.16	190	19.4
D13	－	342	0.17	205	22.3

実験変数は，角形鋼管の幅厚比と柱に作用する軸力の大きさの２つである。鋼管の幅厚比は，28，43 と 83 の３種類である。軸力比で表した軸力の大きさは，0.1，0.3 と 0.5 の３種類である。また，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。平板の力学的性質を主筋のそれと合わせて Table2 に示す。

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に 10mm のクリアランスを設けた。また，著者らの既往の研究[1]において明らかになった，曲げ変形が大きくなるにつれ横拘束材としての鋼管が柱の中央部において直接曲げ応力を負担するようになる現象を避けるために，本実験では，試験体の中央においても鋼管の間に 10mm の隙間を設けた。

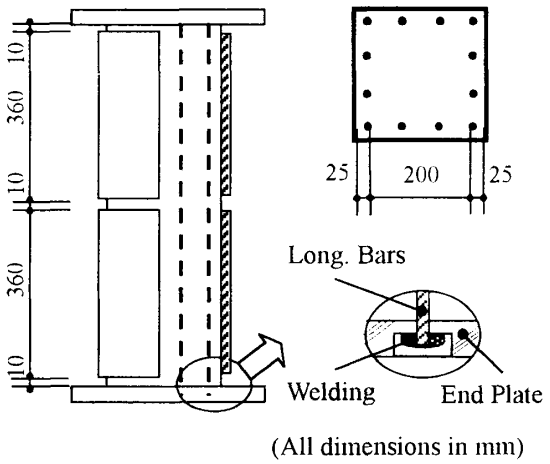

Fig. 1　Details of test specimens

コンクリートは設計強度 100MPa の超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 20mm 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 3 に示す。

2.2　加力および測定方法

加力および測定は参考文献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すことによって単調曲げモーメントを載荷した。曲げモーメントの載荷過程においては，油圧ジャッキによる付加軸力（P）を相殺するため油圧試験機の載荷軸力（Q）を調整して試験体に加わる軸力（N＝Q＋P）が一定になるようにした。

また，軸力の初期偏芯の影響を調べるため，断面内幅で無次元化された曲率 ϕD が 0.0015rad となるまで正負交番の繰り返し曲げモーメント（１サイクルのみ）を加えてから，正方向に油圧ジャッキストロークの容量一杯まで単調曲げモーメントを加えた。

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，一定軸力による付加曲げモーメントを

NII-Electronic Library Service

Table 3　Primary experimental and calculated results

試験体名	f_c' (MPa)	実験結果			計算結果					
		M_{exp}	$\phi D_{m,exp}$	$\varepsilon_{cm,exp}$	M_{cal}	ratio	ϕD_m	ratio	ε_{cm}	ratio
BST32F100M1	95.2	128.0	2.46	0.56	117.9	1.09	2.44	1.01	0.41	1.34
BST32F100M3		182.9	0.77	0.36	194.9	0.94	1.02	0.75	0.41	0.88
BST60F100M3		192.6	1.36	0.54	200.1	0.96	1.46	0.93	0.55	0.98
BST90F100M3		207.7	2.72	0.99	208.9	0.99	2.42	1.12	0.82	1.21
BST90F100M5		234.7	2.76	0.97	251.4	0.94	1.57	1.76	0.82	1.13

注：f_c' = 実験時材令のコンクリートシリンダー強度
$\phi D_{m,exp}$ = M_{exp} 時曲率（0.01rad）
M_{cal} = 最大曲げモーメントの計算結果（kN-m）
M_{exp} = 最大曲げモーメントの実験結果（kN-m）
$\varepsilon_{cm,exp}$ = M_{exp} 時断面圧縮縁のひずみ（%）
ratio = 実験結果 / 計算結果

求めるために必要な，試験体中央断面における蒲鉾形球座の回転中心を結ぶ線からの水平変位を，回転中心を基準点とする測定フレームにより計測した。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，曲げ耐力時曲率（コンクリート断面せいで無次元化されている），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 3 に示す。Table 3 に示されている計算結果の算定方法については第４節で述べる。

Table 3 より分かるように，同じ軸力を受ける試験体においては，柱の終局曲げ耐力と耐力時曲率は角形鋼管の幅厚比が小さくなるにつれて大きくなる。また，曲げ耐力時の終局ひずみ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，Fig.2 から明かなように，終局ひずみε_{cm}の実験結果は，鋼管による拘束度合いを表すパラメーターである拘束コンクリートの強度上昇率 K の値にほぼ線形比例して大きくなっていくが，軸力の変化による影響をあまり受けない。なお，角形鋼管横拘束コンクリートの強度上昇率 K の計算方法については第４節を参照されたい。

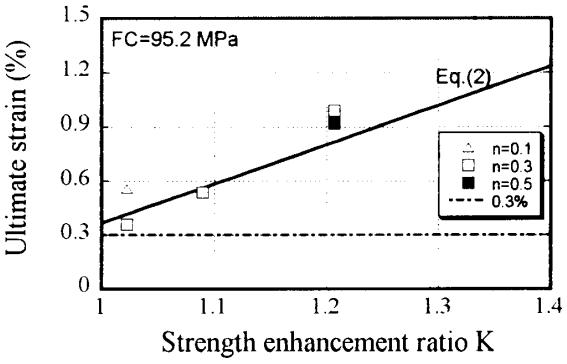

Fig.2　Experimental ultimate strain

3.2　曲げモーメント-曲率関係の実験結果

各試験体の曲げモーメント－曲率関係の実験結果を Fig.3 に示す。Fig.3 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。なお，試験体 BST90F100M5 においては，曲率ϕD が 0.028 rad 前後になった時点で試験体上部検長範囲外の部分がコンクリートのブリージング現象に起因した早期破壊が観察され，検長範囲内での曲率も計測不能になり，この時点で曲げモーメントの載荷を中止した。

Fig.3 より，角形鋼管により横拘束された圧縮強度 100MPa 級のコンクリートを用いたＲＣ柱の曲げ圧縮性状について，以下のことが分かる。

1) 軸力比 n=0.1 と低い軸力を受ける場合は，幅厚比 B/t=83 程度の比較的薄肉の鋼管を用いても，柱に充分な曲げ変形能力が確保できる。
2) 軸力比が 0.3 になると，柱に高い曲げ変形能力をもたらすためには，B/t=43 以下の厚肉角形鋼管の使用が必要となる。

NII-Electronic Library Service

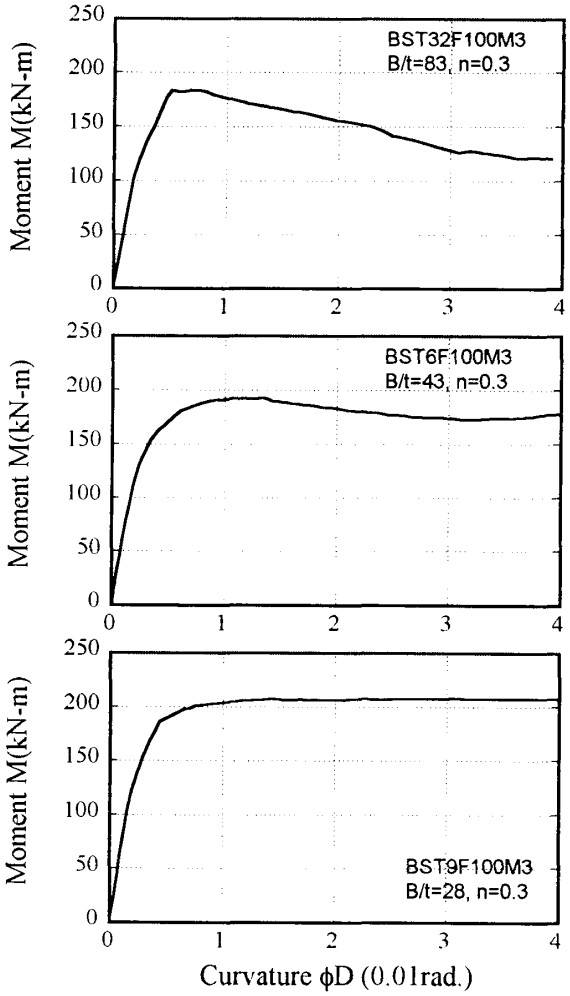

Fig.3 Moment-curvature responses

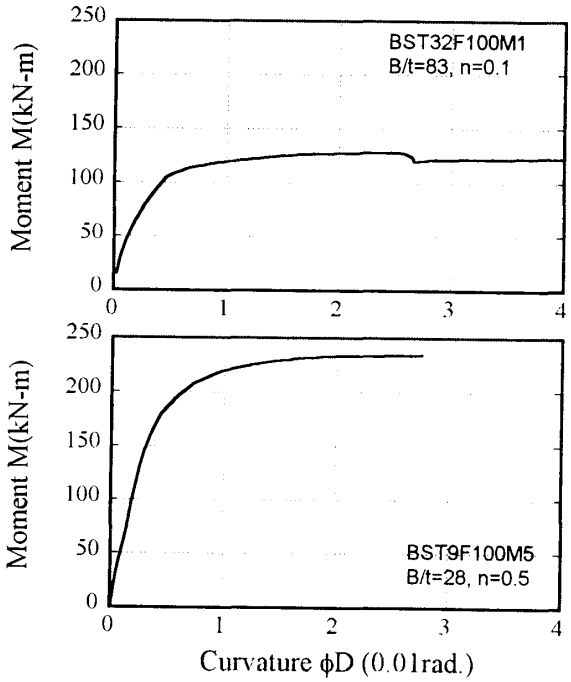

Fig.3 (Continue)

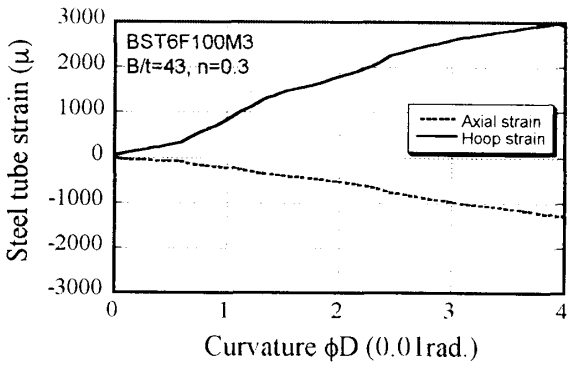

Fig.4 Example of strains on the tube's surface

3.3 鋼管表面のひずみ状況

Fig.4 には、試験体中央における、鋼管圧縮フランジ表面のひずみの測定例を示す。Fig.4 中の実線と一点鎖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している。Fig.4 より分かるように、鋼管表面の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。

4．終局曲げ性状の簡便評価法

ＲＣ柱の終局曲げ性状の算定は一般に柱断面の軸力と終局曲げモーメントとの相関関係および軸力と終局曲率との相関関係（以下 N-M-φ相関関係と略す）の計算に帰結する。本節では、角形鋼管の拘束効果が考慮できる、角形鋼管横拘束高強度ＲＣ柱の終局N-M-φ相関関係を簡便に求めるための方法を提示し、その妥当性を検証する。

4.1 角形鋼管による拘束効果の評価

著者等はこれまでに角形鋼管を含める直線型横拘束材がコンクリートに与える拘束効果を、拘束コンクリートの強度上昇率Ｋ（拘束コンクリート強度 f_{cc}' と無拘束コンクリート強度 f_c' の比）をもって評価してきた[3]。文献 3 によれば、角形鋼管により横拘束されたコンクリートの強度上昇率Ｋは式(1)により求めることができる。

NII-Electronic Library Service

$$K=\frac{f_{cc}'}{f_c'}=1+46\frac{(B/t-1)}{(B/t-2)^2}\left(\frac{t}{C}\right)\frac{f_{yt}}{f_c'} \qquad (1)$$

ここで，B と t はそれぞれ角形鋼管の外幅と板厚，C は鋼管辺の有効横支持長さ（Fig.5 を参照），f_{yt} は鋼管の降伏点応力，f_c'はコンクリートのシリンダー強度である。

Fig.6 は本論で述べた実験の材料定数を式(1)に代入して求めた強度上昇率Kの計算結果を示す。幅厚比 43 以上の角形鋼管は超高強度コンクリートへの拘束効果が非常に低いことと，鋼管内部にスチフナを取りつければ角形鋼管の拘束効果を飛躍的に向上させ得ることなどが分かる。

4. 2 終局 N-M-φ相関関係の計算仮定と手順

角形鋼管横拘束ＲＣ柱の終局 N-M-φ相関関係を以下の仮定に基づき簡便に求めることができる。

1) 平面保持の仮定
2) 鉄筋は完全弾塑性材料とする
3) コンクリートは引張応力を負担しない
4) 断面圧縮側コンクリートが負担する軸力と曲げモーメントは Fig.7 に示す等価応力ブロックにより算定する。

なお，Fig.7 に示されている等価応力ブロックは，著者等が文献４で直線型横拘束材により拘束されたコンクリートを対象に提案したものである。この等価応力ブロックを決めるパラメーターである終局ひずみε_{cm}および形状係数αとβは，次のように求めることができる[4]。

$$\frac{\varepsilon_{cm}}{\varepsilon_{co}}=1.375+0.108K-0.102K^{-4}\left(\frac{f_c'}{42}\right) \qquad (2)$$

$$\alpha=0.724+0.107K-\frac{0.037}{K-0.007}\left(\frac{f_c'}{42}\right) \qquad (3)$$

$$\beta=0.383+0.046K-\frac{0.019}{K+0.387}\left(\frac{f_c'}{42}\right) \qquad (4)$$

ここで，ε_{co}は拘束コンクリートの強度時ひずみであり，式(5)により求まる。

$$\varepsilon_{co}=0.94(f_c')^{1/4}\times10^{-3}\begin{cases}1+4.7(K-1), & K\le1.5\\ 3.35+20(K-1.5), & K>1.5\end{cases} \qquad (5)$$

上記仮定に基づく，角形鋼管横拘束ＲＣ柱の終局N-M-φ相関関係の算定手順は以下の通りである。

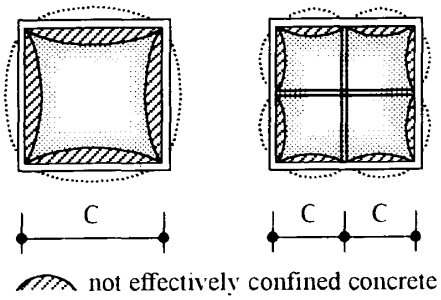

Fig.5 Confinement by square steel tube

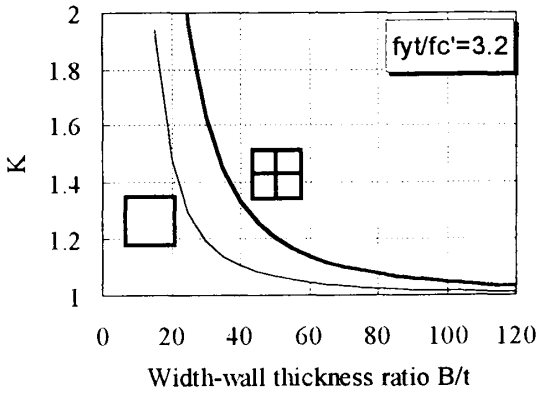

Fig.6 Example of strength enhancement ratio

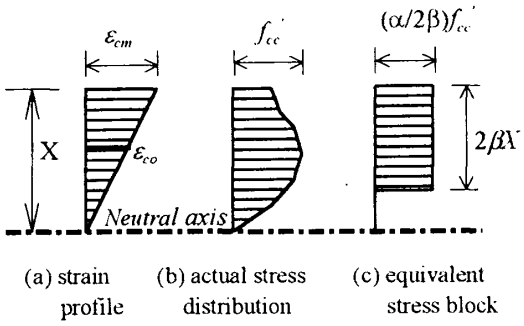

Fig.7 Idealization of the equivalent stress block

1) 鋼管の詳細とコンクリートの圧縮強度を式(1)に代入して拘束コンクリートの強度上昇率Kの値を求めてから，式(2)と式(5)により終局ひずみε_{cm}を計算する。
2) 式(3)と式(4)を用いて等価応力ブロックの形状係数αとβを算定する。
3) 断面中立軸深さXに初期値を与える。
4) 主筋のひずみおよび応力を仮定 1)と 2)により計算する。
5) 与えられたXに対応する軸力N，終局モーメント M_m，および終局曲率$\phi_m D$ を式(6)～式

NII-Electronic Library Service

(8) で計算する。

$$N = \alpha K f_c' BX + \sum_{i=1}^{n_s} f_{si} A_{si} \tag{6}$$

$$M_m = \alpha K f_c' BX\left(\frac{D}{2} - \beta X\right) + \sum_{i=1}^{n_s} f_{si} A_{si}\left(\frac{D}{2} - h_{si}\right) \tag{7}$$

$$\phi_m D = \frac{\varepsilon_{cm} D}{X} \tag{8}$$

ここで，A_{si} と f_{si} はそれぞれ各列鉄筋の断面積と応力，h_{si} は各列鉄筋の重心から断面圧縮縁までの距離，n_s は鉄筋の列数である。

6) 中立軸深さ X をコンクリート断面せい D となるまで漸増させ，step 4)～step 5)の計算を繰り返す。

4.3 実験結果との比較

本論第 3 節で述べた実験結果を用いて，本節で提示した簡便計算法の妥当性を検証した結果を主な実験結果とともに Table 3 に示す。

Table 3 に示す比較結果から分るように，本論で示した簡便計算法は，角形鋼管横拘束超高強度ＲＣ柱の終局曲げ耐力を精度良く評価することができる。終局曲げ耐力の実験値と計算値との比は，0.94～1.08 の間にあり，平均値が 0.98 で，標準偏差が 0.06 となっている。

一方，曲げ耐力時曲率および拘束コンクリートの終局ひずみに関しては，計算結果は実験値を平均でそれぞれ 12%と 13%低く評価しており，実験値と計算値との比のばらつきも曲げ耐力のそれよりも大きいが，終局変形が柱の接線曲げ剛性がゼロになる近傍に位置し，その測定結果にばらつきが生じやすいことを考えると，Table 3 に示す程度のばらつきは許容できるもので，計算値は実験結果の下限値を適切に評価できていると言える。

5．結論

角形鋼管により横拘束された FC=100MPa 級の超高強度ＲＣ柱の一定軸力下における曲げ実験を行い，鋼管の板厚が拘束柱の終局曲げ性状に及ぼす影響について調べた結果，以下のことが分かった。

1) 軸力比 n=0.1 の軸力を受ける柱に充分な曲げ変形能力をもたらすには幅厚比 B/t=83 程度の比較的薄肉の鋼管を用いてもよいが，軸力比 n=0.3 以上になると，B/t=43 程度以下の角形鋼管を使用する必要がある。
2) 拘束コンクリートの終局ひずみは，一定値ではなく，角形鋼管による拘束度合いの上昇にほぼ線形比例して大きくなって行くが，軸力の大きさの影響をあまり受けない。
3) 本論で示した簡便算定法を用いれば，角形鋼管により横拘束された FC=100MPa 級の超高強度ＲＣ柱の終局曲げ性状を適切に評価することができる。

[謝辞] 本研究で述べた実験は平成 11~12 年度文部省科学研究費補助金基盤研究(C)（課題番号 11650588）により行われた。実験の実施にあたっては，九州大学文部技官川口晃氏，松岡直人氏，九州大学大学院生池之野陽一氏，村上和広氏，隈崇芳氏および梶原龍生氏から多大な協力を得た。ここに深く謝意を表します。

[参考文献]

1) 崎野健治，孫玉平，他：Ultimate Strain and Strength of RC Columns Retrofitted by Steel Tube, IABSE Conference Report on Composite Construction, Innsbruck, Austria, pp. 675-680, 1997. 9
2) 孫玉平，崎野健治，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, pp.589-594, 1999
3) 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報告集，第 461 号，pp.95-104, 1994 年 7 月
4) 孫玉平，崎野健治，他：Flexural Behavior of High Strength RC Columns Confined by Rectilinear Reinforcement，日本建築学会構造系論文報告集，第 486 号，pp.95-106, 1996 年 8 月

NII-Electronic Library Service