

論文 鋼管横補強鉄筋コンクリート柱の曲げ圧縮性状

孫 玉平*¹・崎野健治*²・AKLAN Amin*³

要旨： 250x250x6mmの角形鋼管により横補強された鉄筋コンクリート柱について、一定軸力下における曲げ実験を行い、軸力の大きさ等が鋼管横補強柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響を調べた。その結果、角形鋼管で横補強された鉄筋コンクリート柱は、軸力比が0.7と高い軸力を受けた場合でも、安定した曲げ圧縮性状を有することが明らかになった。また、鋼管横補強コンクリート柱断面の曲げ耐力や曲げモーメントと曲率関係を求める手法の提案を行い、この手法の妥当性を実験結果との比較によって実証した。

キーワード： 曲げ性状、曲げ耐力、鋼管、横補強、軸力比

1. はじめに

鉄筋コンクリート梁・柱部材の耐震性能を向上させる方法として鋼管横補強法がある。通常の帯筋等のような鉄筋による横補強と比べ、鋼管横補強法には、大量の横補強材が無理なく配置でき、柱主筋の付着性能の低下及び座屈の原因であるかぶりコンクリートの剥離を防ぐことができるほか、鋼管がコンクリートの型枠を兼ねるといような利点がある。

著者らは、角形鋼管により横補強された鉄筋コンクリート柱（以下鋼管横補強柱と書く）に関しては、主筋量、軸力の大きさ、コンクリート強度等を実験変数とした繰り返し曲げせん断実験により、従来の帯筋横補強では防げないと思われる非常に高い軸力を受けるRC柱の曲げ圧縮破壊や大量の主筋を配筋した柱の付着割裂破壊を鋼管で横補強することにより防ぐことができることを実証してきた [1, 2]。一方、鋼管横補強柱の耐震性能を評価する上で重要な鋼管横補強柱断面の曲げ圧縮性状に関しては、今まで主に曲げせん断を受ける柱について論じてきた。しかしながら、曲げせん断を受ける柱の場合は、モーメント勾配や端部付加拘束等の影響があるため、より正確な曲げ圧縮性状を把握するのが難しい。したがって、よりよく鋼管横補強柱の曲げ圧縮性状を把握するためには、一定軸力下における純曲げ実験を行う必要があると思われる。

本研究では、市販されている 250x250x6mmの角形鋼管により横補強された高強度鉄筋コンクリート（設計強度 $FC=41.2\text{MPa}$ ）柱について、一定軸力下における単調曲げ実験を行い、軸力の大きさと鋼管の補強形式（分断または連続）が鋼管横補強柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響を実験的に調べた。また、著者らが提案した角形鋼管により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係式に基づいて、鋼管横補強柱の曲げ圧縮性状（曲げ耐力や曲げモーメント-曲率関係など）を解析的に求める手法を示し、実験結果との比較によりこの解析手法の妥当性の検討も行った。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体は 250x250x750mmの正方形断面柱である。計5体の試験体の実験変数は軸力の大きさと

*1 九州大学助手 工学部建築学科、工博（正会員）

*2 九州大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 九州大学大学院 工学研究科建築学専攻

鋼管の補強形式の2種類である。コンクリートの圧縮強度（設計基準強度が41.2 MPa）、主筋量（D13異形鉄筋を12本配筋、主筋比が2.69%）、鋼材の降伏強度を一定とした。横補強鋼管には市販されている250x250x6mmの角形鋼管（実測寸法による幅厚比 $B/t=44.4$ ）を用いた。使用した角形鋼管および鉄筋の力学的性質と引張応力-ひずみ関係を図-1に示す。

試験体詳細を図-2に示す。鋼管には曲げおよび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（厚さ32mm）と鋼管の間に10mmのクリアランスを設けた。主筋の両端はエンドプレートに溶接されている。また、曲げ変形が大きくなるにつれて、横補強材として用いた鋼管が試験体の中央部において曲げ変形を生じて直接曲げ応力を負担するようになることが考えられる。このような鋼管の連続性による影響をできるだけ低減させるために、5体の試験体のうちの4体（Sシリーズ）については試験体中央において鋼管を切断して10mmの隙間を設けた。残りの1体（Cシリーズ）では鋼管の連続性の影響を見るために鋼管の切断を行わなかった。

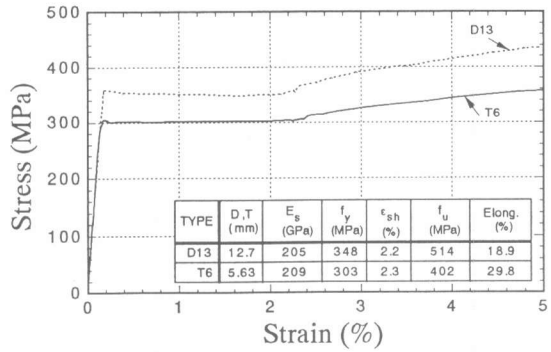


図-1 鋼材の引張試験結果

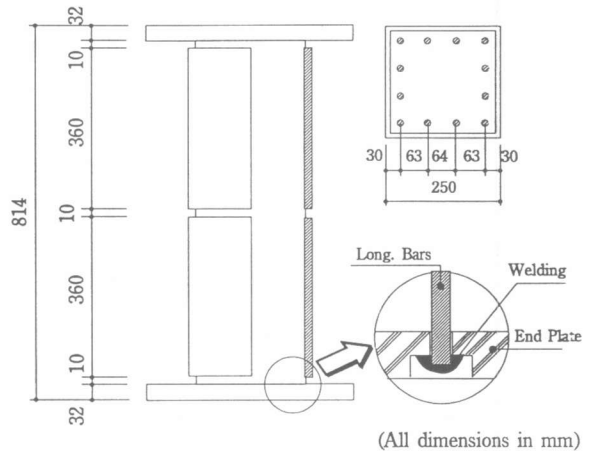


図-2 試験体の断面詳細

表1 試験体概要および実験結果一覧

試験体	コンクリート強度	B/t	軸力		実験結果		計算結果					
			N(kN)	n	Mmax	ϵ_m (%)	Mprop	比率	Maci	比率	Mpark	比率
T6S-00	50.7 (MPa)	44.4	98	0.03	75.9	0.46	63.6	1.19	62.5	1.21	65.0	1.17
T6S-35			986	0.34	123.8	1.48	124.5	0.99	104.9	1.18	135.5	0.91
T6S-50			1462	0.51	132.7	1.12	132.4	1.00	97.1	1.37	155.9	0.85
T6S-70			1972	0.69	117.4	0.68	127.5	0.92	80.2	1.46	169.1	0.69
T6C-50			1462	0.51	144.6	0.61	132.4	1.09	97.1	1.49	155.9	0.93

Mprop: 本論で示した手法で求めた曲げ耐力 (kN-m)

比率 = 実験値 / 計算値

Maci: ACI 規準 [3]で求めた曲げ耐力 (kN-m)

Mpark: 修正Kent・Park式 [4]を準用して求めた曲げ耐力 (kN-m)

試験体名凡例

T 6 S - 7 0

① ② ③

① T 6 : 鋼管の管厚 (6:6mm)

② S : 鋼管の補強形式 (S:Split, C:Continuous)

③ 7 0 : 軸力比 (70:0.70, etc)

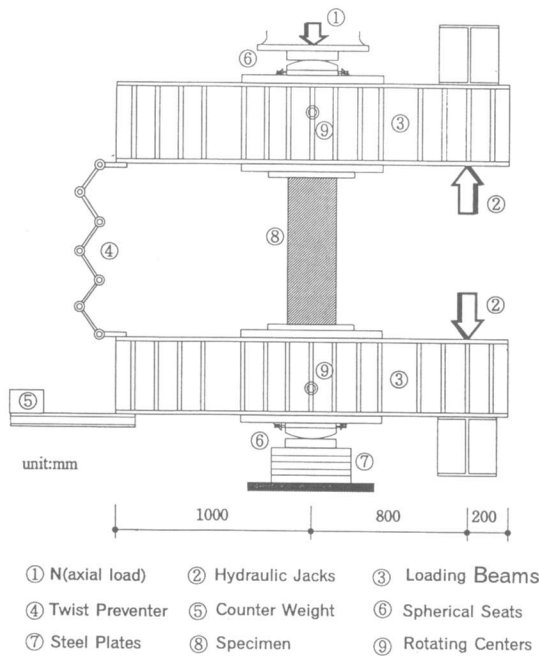


図-3 加力装置

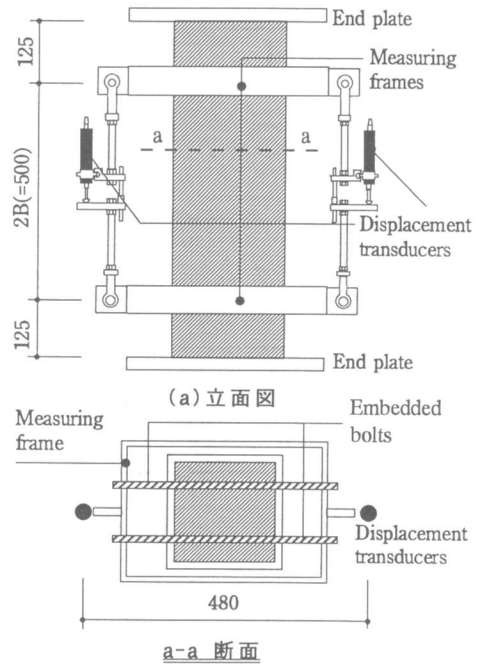


図-4 測定方法

軸力比は、Sシリーズの試験体では、それぞれ0.03、0.35、0.50、0.70の4種類で、Cシリーズの試験体では0.50となっている。試験体概要および実験結果一覧を表-1に示す。

コンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、粗骨材に最大粒径20mmの砕石を用いた。実験時材令でのコンクリートのシリンダー圧縮強度を表-1に記す。

2.2 加力および測定方法

加力は図-3に示す加力装置を用いて行った。曲げモーメントは単調荷重で、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荷重した。一定軸力は5MN油圧試験機により蒲鉾形球座を介して荷重した。ただし、油圧ジャッキによる付加軸力を相殺するため試験機の荷重軸力を調整して試験体に加わる軸力が一定になるようにした。

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（図-4参照）。一定軸力による付加モーメントを求めるため、蒲鉾形球座の回転中心（図-3参照）から試験体までの水平変位を変位計により計測した。また、主筋および鋼管表面のひずみはひずみゲージにより測定した。

3. 実験結果

各試験体の曲げ耐力 M_{max} および曲げ耐力時の圧縮縁ひずみ ϵ_m の実験結果を表-1に、曲げモーメント-曲率関係を図-5に示す。曲げモーメントは一定軸力による付加曲げモーメントを含んだ試験体中央部の曲げモーメントで、曲率は中央検長間の平均曲率である。また、図中に見られる▼点は圧縮側の鋼管がエンドプレートにタッチした時点を表している。なお、表-1中に示す曲げ耐力計算値の算定方法については次節を参照されたい。

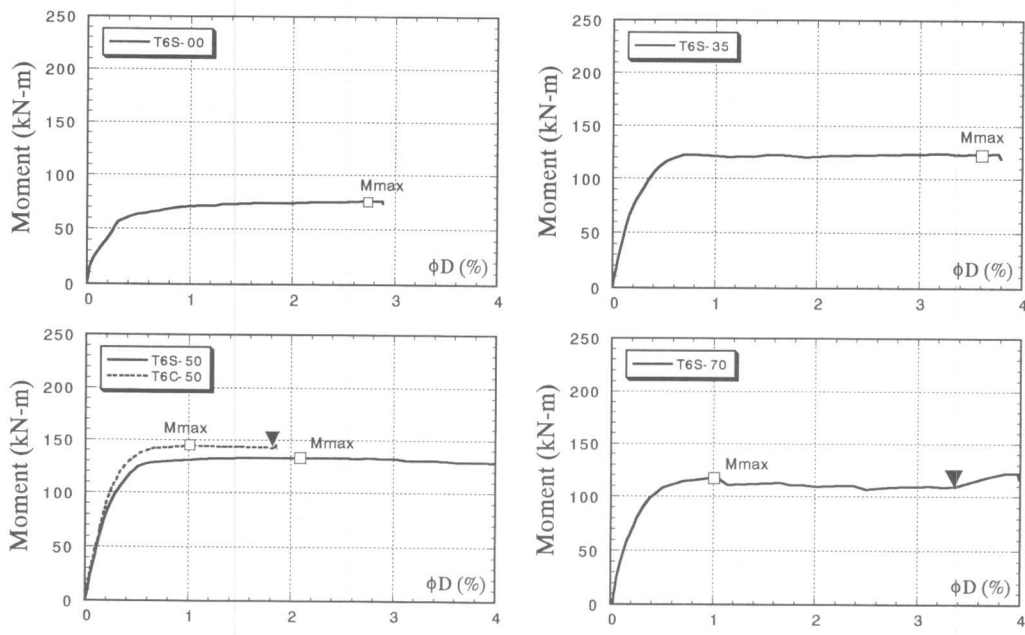


図-5 曲げモーメント-曲率関係の実験結果

図-5より分かるように、鋼管横補強柱は軸力比0.70と高い軸力を受けた場合でも非常に安定した曲げ性状を示し、いずれの試験体においても、曲げ耐力後の耐力低下が小さかった。

また、軸力比が同じ試験体T6S-50と試験体T6C-50の実験結果を見比べると、試験体T6C-50の方が高い曲げ耐力を有することが分かる。その理由として、試験体T6C-50の鋼管には曲げモーメントの増加に伴って曲げ変形が生じ、横補強材としての鋼管が曲げモーメントを直接負担するようになったためと考えられる。

図-6には両試験体の中央部における鋼管圧縮フランジ表面のフープ方向ひずみ ϵ_h および軸方向ひずみ ϵ_z を示す。図-6から分かるように、鋼管が切断された試験体T6S-50では、鋼管表面のフープ方向ひずみ ϵ_h の測定値は軸方向ひずみ ϵ_z のその約3倍となっており、鋼管が主に横補強材として働いていたことが分かる。それに対して、鋼管が切断されていない試験体T6C-50では、鋼管表面の軸方向ひずみがフープ方向ひずみより高く、鋼管が横補強材として働くよりむしろ直接曲げ圧縮応力を負担していることがうかがわれる。以上のことより、鋼管が横補強材として働く鋼管横補強柱の曲げ性状を実験的に調べる際には、鋼管の連続性を切断する必要があると言える。また、表-1より分かるように、各試験体の曲げ耐力時のコンクリートの圧縮縁ひずみ ϵ_m の実測値は軸力の大きさとの間に明確な相関関係が見られなかった。その理由については、本実

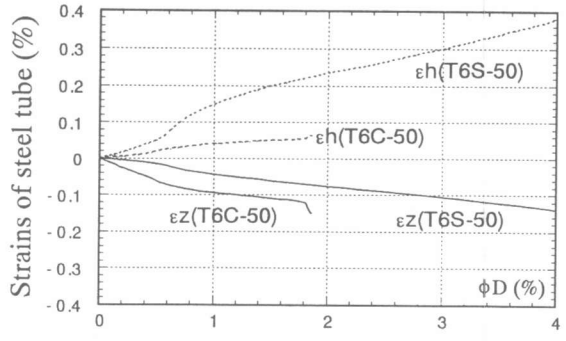
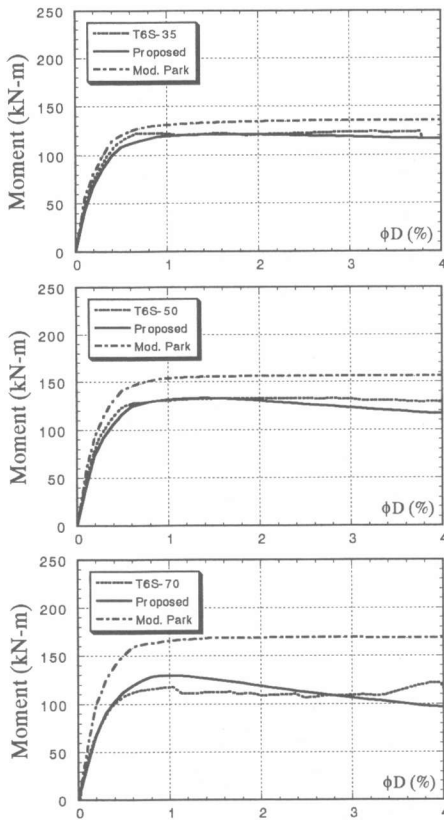
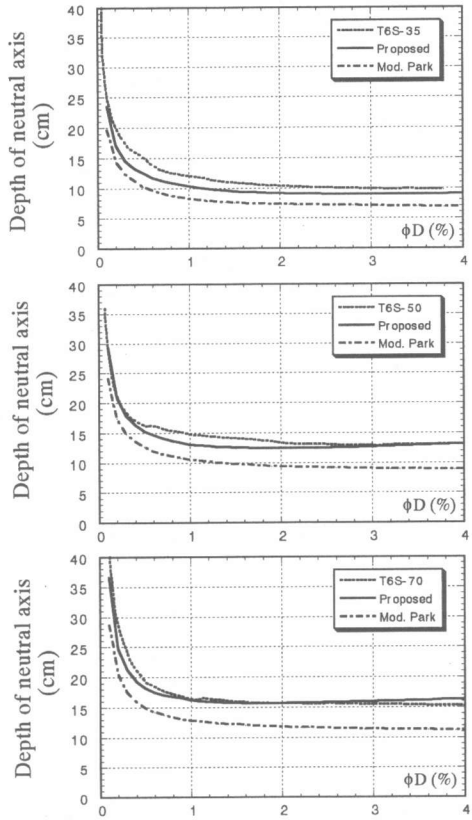


図-6 鋼管表面のひずみ



(a) 曲げモーメントー曲率関係



(b) 中立軸高さー曲率関係

図-7 実験結果と計算結果との比較

験では検討されていない鋼管の管厚等の影響を含めて、今後の課題としたい。

4. 曲げ圧縮性状の評価

本節では鋼管横補強柱の曲げ圧縮性状を解析的に求める手法について述べる

鋼管横補強柱断面の曲げモーメントー曲率関係の解析は、通常の鉄筋コンクリート柱の解析によく用いられている断面分割法を用いて行う。解析にあたって設けた仮定は次の通りである。1)平面保持の仮定、2)鉄筋を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)コンクリートの応力ーひずみ関係は表-2に示す式で表される。なお、表-2に示す応力ーひずみ関係式は、著者らが提案したコンクリートの応力ーひずみ関係式 [5]で、鋼管による拘束効果が考慮され

表-2 コンクリートの応力ーひずみ関係 [5]

$$Y = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2}$$

where

$$Y = f_c / f'_{cc}, \quad X = \epsilon_c / \epsilon_{co}$$

$$K = f'_{cc} / f'_c = 1 + 11.5 \rho_h f_{yt} \left(\frac{t}{C} \right)$$

$$A = E_c \epsilon_{co} / f'_{cc}, \quad E_c = (0.7 + 0.332 \sqrt{f'_c}) \times 10^4$$

$$\frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_o} = \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 3.35 + 20(K-1.5), & K > 1.5 \end{cases}$$

$$\epsilon_o = 0.94 (f'_c)^{1/4} \times 10^{-3}$$

$$D = 1.5 - 0.017 f'_c + 2.49 \sqrt{(K-1) f'_c / 23}$$

Notation:

- f'_{cc} : Strength of confined concrete (in MPa)
- f'_c : Strength of concrete cylinder (in MPa)
- ϵ_{co} : Strain corresponding to f'_{cc}
- ϵ_o : Strain corresponding to f'_c
- ρ_h : Volumetric ratio of steel tube
- f_{yt} : Yield strength of steel tube
- C: Unsupported length of steel tube (=B-2t)
- t: Wallthickness of steel tube (in mm)
- B: Width of steel tube (in mm)

ている。

図-7には曲げモーメント-曲率関係および中立軸高さ-曲率関係の計算結果と実験結果との比較を示す。また、参考のため鋼管を等量の帯筋に置き換えてParkらにより提案されている帯筋で拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係 [4]を準用して求めた計算結果も併せて図-7に示している。表-1に示している曲げ耐力の計算値は各試験体の曲げモーメント-曲率関係計算値のピーク点の曲げモーメントを表す。図-7より、表-2に示すコンクリートの応力-ひずみ関係式を用いれば、鋼管横補強柱の曲げ圧縮性状を曲率が大きい領域まで精度よく評価することができる。また、ばらつきがあるものの、本論で示した手法で求めた断面の中立軸高さも実験結果とほぼ一致している。さらに、曲げ耐力に関しては、鋼管が曲げモーメントを直接負担していると考えられる試験体T6C-50を別とすれば、本論で述べた手法で求めた計算結果は実験結果と良好な対応を示している。曲げ耐力の実験値と計算値との比は0.92~1.17となっている。一方、鋼管の拘束効果を見放したACI規準の方法で求めた計算値の場合は、実験値と計算値との比が1.18~1.49と実験結果を過小評価する傾向にあり、Parkらの応力-ひずみ関係で求めた曲げ耐力の計算結果は、実験結果を過大評価する傾向が見られた。

5. まとめ

幅厚比44.4の角形鋼管により横補強された鉄筋コンクリート柱の一定軸力下における純曲げ実験を行い、鋼管横補強柱の曲げ圧縮性状について、以下の結論を得た。

1) 市販されている角形鋼管(幅厚比=44.4)で横補強した高強度鉄筋コンクリート柱は、軸力比が0.70と高い軸力を受けた場合でも非常に安定した曲げ圧縮性状を有する。

2) 著者らが既に提案したコンクリートの応力-ひずみ関係を用いれば、鋼管横補強柱の曲げモーメント-曲率関係と曲げ耐力を比較的精度良く評価することができる。

3) 曲げ耐力時の圧縮縁ひずみは軸力の大きさと間に明確な相関関係が見られなかった。

上記の結論は幅厚比が一定の鋼管により横補強された試験体の実験結果に基づいたものであり、それらの結論の適用範囲を広げるためには、鋼管の幅厚比や降伏強度等による影響を明らかにする必要があると考える。それらについては現在検討中で、別の論文にて報告する予定である。

[謝辞] 本実験の実施にあたっては、九州大学文部技官川口晃氏を初め多くの方々の多大な協力を得た。ここに深く感謝します。

[参考文献]

- 1) Sun, Y.P. and Sakino, K.: Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined In Square Steel Tube, Proceedings of the Tenth WCEE, Madrid, Spain, Vol. 8, pp. 4365-4370, July 1992
- 2) 崎野健治、孫玉平、川口晃: 大量主筋を配筋した鉄筋コンクリート柱の靱性改善法について - その1、その2、日本建築学会大会梗概集、Vol. 2, pp. 793-796, 1993
- 3) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89), American Concrete Institute, pp. 107-109, 1989
- 4) Park, R., Priestley, M.J.N., and Gill, W.D.: Ductility of Square Confined Concrete Columns, Proceedings, ASCE, Vol. 108, No. ST4, pp. 925-950, 1982
- 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