

論文 拘束高強度鉄筋コンクリート柱の終局曲げ性状に関する 実験的研究

池之野陽一*1・孫 玉平*2・崎野健治*3

要旨：幅厚比が 61～219 と薄い正方形鋼管（内幅 250mm）により横拘束された高強度鉄筋コンクリート（設計強度 60MPa）柱について、一定軸力下における曲げ実験を行い、鋼管の径厚比が鋼管横拘束柱の終局曲げ性状に及ぼす影響を調べた。その結果、鋼管横拘束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線形比例して上昇していくことが明らかになった。

キーワード：正方形鋼管横拘束、拘束高強度コンクリート柱、終局曲げ耐力、終局ひずみ

1. はじめに

高層・大スパン鉄筋コンクリート構造に高強度コンクリートを有効に活用するには、高強度コンクリートの脆い破壊性質を改善し、部材に十分な変形能力を確保する必要がある。RC部材に帯筋や鋼管等のような横拘束材を配置する方法は、圧縮を受けるコンクリートの変形能力を向上させることによって部材の靱性を高めるために有効であることが知られている。特に、横拘束材に鋼管を用いた鋼管横拘束法は、帯筋横拘束法と比べて、大量の横拘束材を施工上無理なく配置できるほか、かぶりコンクリートの剥離を防止できるような利点があることから、高強度鉄筋コンクリート部材の変形性能の確保に適している横拘束方法であると思われる。

著者らは、これまでに正方形鋼管により横拘束された高強度鉄筋コンクリート柱（圧縮強度が 50.7MPa）について、鋼管の幅厚比と軸力の大きさを実験変数とした一定軸力下における曲げ実験を行い、鋼管横拘束柱の耐震性能を評価するうえで非常に重要な柱の曲げ圧縮性状を実験的に調べてきた^{1,2)}。しかしながら、著者らの既往の研究においては、比較的厚肉の鋼管（幅厚比 $B/t=44, 29$ ）しか用いられていなかったため、正方形鋼管の径厚比が鋼管横拘束高強度RC柱の終局曲げ性状に

及ぼす影響に関する定量的評価に必要なデータが十分に得られていなかった。

そこで、本研究は、肉厚のより薄い正方形鋼管により拘束された高強度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、正方形鋼管の径厚比と拘束RC柱の終局曲げ性能（終局曲げ耐力、終局ひずみ及び曲げ耐力後の変形能力など）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を研究の主たる目的とする。また、著者の二人が提案した正方形鋼管横拘束コンクリートの応力—ひずみ関係式に基づいて、正方形鋼管横拘束高強度コンクリート柱の曲げ圧縮性状（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

試験体は内幅 250mm の正方形鋼管により拘束された、高さ 750mm の正方形断面柱である。各試験体柱に 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 $FC=60\text{MPa}$ ）および主筋の降伏強度（ $FY=342\text{MPa}$ ）を一定とした。試験体の断面詳細と概要をそれぞれ Fig.1 と Table.1 に示す。

*1 株式会社三菱重工業（元九州大学大学院生）（正会員）

*2 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）

*3 九州大学教授 大学院人間環境学研究科 工学博士（正会員）

Table 1. Outlines of test columns

試験体名	鋼管		軸力	
	D/t	f_{yt} (MPa)	N (kN)	n (N/Acfc)
BST12F6M2	219	297	684	0.2
BST12F6M3	219	297	1083	0.3
BST32F6M3-1	82	304	1083	0.3
BST32F6M3-2	82	304	1029	0.3
BST45F6M3	61	375	1083	0.3
BST45F6M5	61	375	1804	0.5

注：試験体 BST32F6M3-1 は早期破壊したので、同じ実験条件で試験体 BST32F6M3-2 の加力を行った。

試験体名凡例：B: 荷重種類 (B: 曲げ, C: 圧縮)

B S T12 F6 M2 S: 断面形状 (S: 正方形, etc)

T12: 公称板厚 (T12: $t=1.2\text{mm}$, etc)

F6: コンクリート設計強度 (F6: 60MPa)

M2: 軸力比 (2: 0.2, 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} (%)	ヤング 係数 (GPa)	伸び率 ϕ (%)
T12	1.15	297	0.22	224	38.0
T32	3.1	304	0.22	222	39.0
T45	4.3	375	0.23	225	33.7
D13	—	342	0.21	205	22.3

実験変数は、正方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、61, 82 と 219 の3種類である。軸力比で表した軸力の大きさは、 $n=0.2, 0.3$ 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、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、それを機械で内幅250mmのL型に成形した後、継ぎ目を溶接して製作した。鉄板の力学的性質を主筋のそれと合わせて Table.2 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、

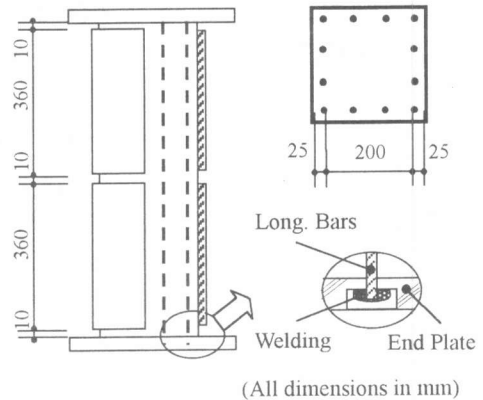


Fig. 1 Details of test specimens

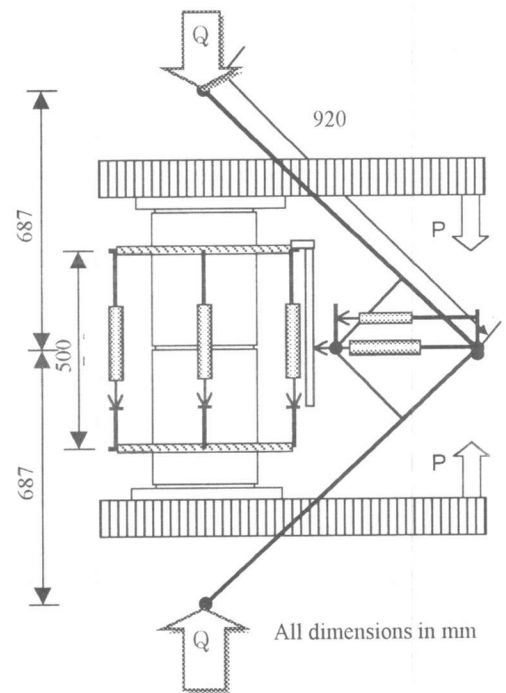


Fig. 2 Test set-up and measurement

試験体の中央においても鋼管の間に10mmの隙間を設けた。

コンクリートは設計強度60MPaの高強度生コンクリートを使用した。実験材令時のコンクリートシリンダー強度は Table.3 に示す。

2.2 加力および測定方法

加力方法および測定方法は Fig. 2 に示す。単調曲げモーメントは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載荷

Table.3 Primary results

試験体名	f'_c (MPa)	実験結果		計算結果	
		M_{exp}	ϵ_{cm}	M_{cal}	ratio
BST12F6M2	55	119	0.46	114	1.04
BST12F6M3	58	129	0.59	134	0.96
BST32F6M3-1	58	142	0.41	137	1.04
BST32F6M3-2	58	135	0.63	134	1.01
BST45F6M3	58	147	0.83	140	1.05
BST45F6M5	58	169	0.77	158	1.08

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}

した。軸力 (Q) は 5MN 油圧試験機により蒲鉾形球座を介して载荷した。ただし、油圧ジャッキによる付加軸力 (P) を相殺するため試験機の载荷軸力 (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。Fig.3 に試験体に作用していた軸力の変動状況の例を示している。Fig.3 より分かるように、油圧ジャッキによる付加軸力は精度良く相殺されており、試験体が受けた軸力は実験中ほぼ一定であった。

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。一定軸力による付加曲げモーメントを求めるため、蒲鉾形球座の回転中心から試験体までの水平変位を、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 終局曲げ耐力及び終局ひずみ

各試験体の終局曲げ耐力および曲げ耐力時における、局率検長間の平均断面圧縮縁ひずみ (以下、

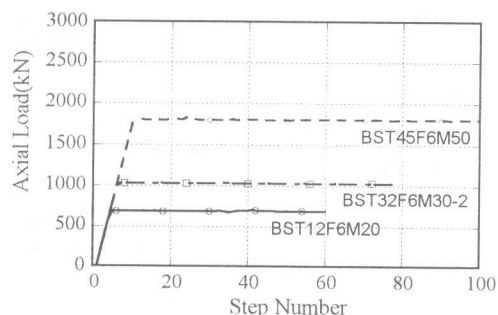


Fig.3 Varying of the applied axial load

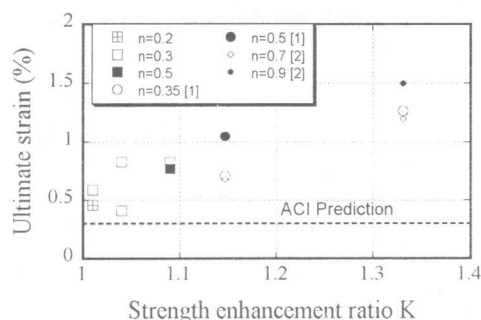


Fig.4 Experimental ultimate strain

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曲げ耐力 M_{cal} 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、柱の終局曲げ耐力は鋼管の幅厚比が小さくなるにつれて大きくなる。また、本論第 4 節で述べる手法で求めた計算曲げ耐力は実験結果と精度よく一致している。終局曲げ耐力の実験値と計算値との比は 0.96~1.08 で、平均値と標準偏差がそれぞれ 1.03 と 0.04 となっている。

曲げ耐力時の終局ひずみ ϵ_{cm} に関しては、鋼管による拘束効果を受け、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。また、Fig.4 から分かるように、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。なお、Fig.4 における横軸は拘束コンクリートの強度上昇率であり、その計算方法については第 4 節を参照されたい。また、円印で示しているのは文

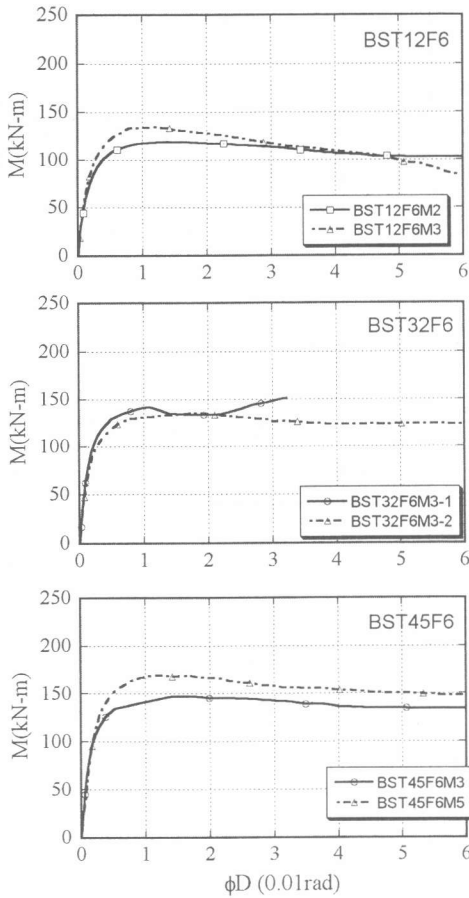


Fig.5 Moment-curvature responses

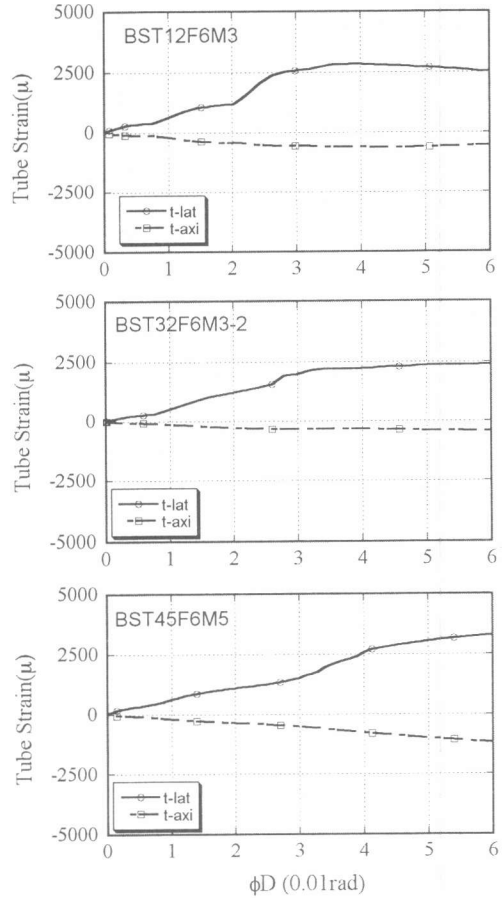


Fig.6 Strains on tube's surface

献 1 と文献 2 で述べた実験結果である。

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.5 に示す。Fig.5 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 BST32F6M3-1 においては、曲率 0.02rad より大きい領域で曲げモーメントの更なる上昇が見られた。これは、試験体上部コンクリートのつまり具合が良くなかったことに起因して、(実験中でも観察されたように)曲率が 0.02rad 前後となる時点から上部鋼管はエンドプレートに接触し始め、直接軸力を負担するようになったためである。

Fig.5 より、薄肉正方形鋼管により横拘束された FC=60MPa 級の高強度鉄筋コンクリート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 $n=0.2$ と低い軸力を受ける場合、幅厚

比 $B/t=219$ の非常に薄肉の正方形鋼管を用いて横拘束すれば、柱に十分な曲げ変形能力をもたらすことができる。

- 2) 軸力比 $n=0.3$ の軸力を受ける柱の場合には、柱に十分な曲げ変形性能を期待するには幅厚比 $B/t=82$ 以下の鋼管を用いる必要がある。
- 3) 幅厚比 $B/t=61$ 程度の比較的薄肉の正方形鋼管で柱を横拘束すれば、軸力比 $n=0.5$ と高い軸力下の柱にも高い変形能力が期待できる。

3.3 鋼管表面のひずみ状況

Fig.6 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結果を示す。Fig.6 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.6 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 3.0~4.5 の間にある。このことは正方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. 曲げ圧縮性状の評価

正方形鋼管横拘束柱の曲げモーメント-曲率関係の解析は、通常の鉄筋コンクリート柱の曲げ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以下の通りである。

- 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) 正方形鋼管により横拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係は式(1)によって与えられる。

$$f_c = Kf_c' \frac{aX + (b-1)X^2}{1 + (a-2)X + bX^2} \quad (1)$$

式(1)において、 K は拘束コンクリートの強度上昇率、 f_c' はコンクリートのシリンダー強度 (MPa)、 $X = \varepsilon_c / \varepsilon_{c0}$ である。

式(1)は崎野・孫により提案された³⁾拘束コンクリートの応力-ひずみ関係式である。式(1)を用いて拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を決めるには、以下に示す4つのパラメーターの値を決める必要がある。それらのパラメーターは拘束コンクリートの強度上昇率 K 、強度時ひずみ ε_{c0} 、応力-ひずみ関係の上昇部分と応力下降部分の形状を制御するパラメーターである a および b である。

崎野・孫の提案に従えば、上記パラメータの算定式は次のように表される。

$$K = \frac{f_{cc}'}{f_c'} = 1 + 46 \frac{(B/t-1) f_{yt}}{(B/t-2)^3 f_c'} \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_o} = \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 3.35 + 20(K-1.5), & K > 1.5 \end{cases} \quad (3)$$

$$a = \frac{E_c}{E_{sec}} = \frac{E_c \varepsilon_{c0}}{Kf_c'} \quad (4)$$

$$b = 1.5 - 0.017f_c' + 2.4 \sqrt{\frac{(K-1)f_c'}{23}} \quad (5)$$

ここで、 ε_o と E_c はそれぞれコンクリートシリンダーの強度時ひずみと初期剛性であり、次のように求められる。

$$\varepsilon_o = 0.94(f_c')^{1/4} 10^{-3} \quad (6)$$

$$E_c = \left(0.69 + 0.332\sqrt{f_c'} \right) \times 10^4 \quad (\text{in MPa}) \quad (7)$$

上記の諸仮定を用いて求めた各試験体の曲げモーメント-曲率関係の計算結果と実験結果との比較を Fig.7 に示す。また、Table.3 に示されている曲げ耐力の計算値は各試験体の曲げモーメント-曲率関係のピーク点での曲げモーメントを表す。

曲げ耐力の計算値と実験値との対応が非常に良好であることは第3節で述べた通りである。一方、解析曲げモーメント-曲率関係と実験結果との対応については、Fig.7 より分かるように、ピーク点になるまで計算結果は実験結果と良好な対応を示している。しかしながら、ピーク点後の曲げモーメント下降領域においては、計算結果は実験結果をやや低めに評価する傾向が見られた。これは、解析に用いられた拘束コンクリートの応力-ひずみ関係モデルが一般的な圧縮変形を受ける中心圧縮試験体の実験結果に基づいて提案されたものであり、曲げ圧縮変形を受けて断面内に生じるひずみ勾配の影響を考慮に入れていないことに起因するものと考えられる。また、このようなひずみ勾配による影響は鋼管の板厚が薄いほどまた軸力比が高いほど顕著となることが Fig.7 より分かる。

ひずみ勾配が曲げ圧縮変形を受けるコンクリートの材質に及ぼす影響をどのように定量評価すべきかについては今後の課題としたい。

5 結論

薄肉正方形鋼管により横拘束された高強度鉄筋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) FC=60MPa 級の高強度コンクリートを用いた柱に十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 $B/t=82$ 程度の鋼管を用いればよいが、軸力比 $n=0.5$ と比較的高い軸力を受ける場合は $B/t=61$ 以下の正方形鋼管を使用する必要がある。
- 2) 曲げ耐力時の終局ひずみ ε_{cm} については、いずれの試験体においてもその実験値が ACI

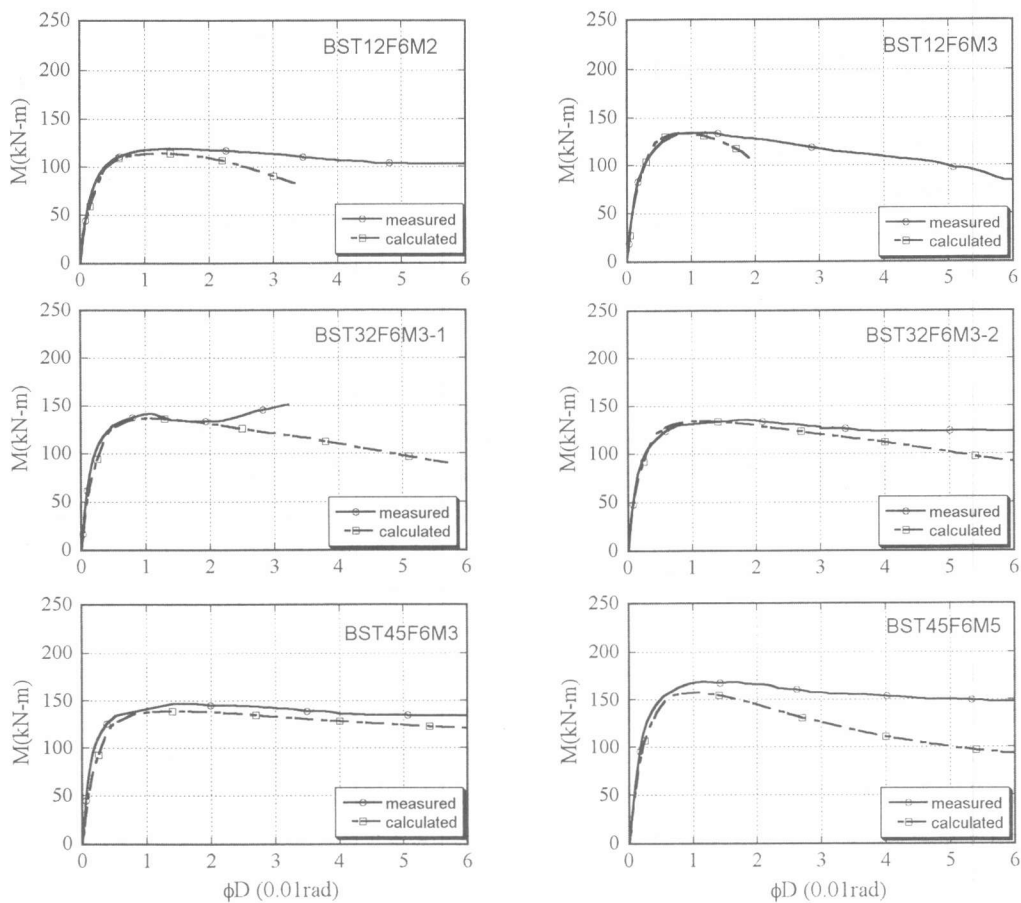


Fig.7 Comparison of the measured and theoretical moment-curvature relationships

規準で推奨されている 0.3% という一定値を上回った。終局ひずみ ϵ_{cm} の実験結果は、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) 崎野・孫により提案された拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を用いれば、正方形鋼管により横拘束された高強度鉄筋RC柱の曲げ圧縮性状を最大耐力まで精度良く追跡できる。しかしながら、ピーク点を過ぎた大変形領域においては、断面内ひずみ勾配の影響を無視したことに起因する、計算結果と実験結果との違いが見られた。

〔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、松岡直人氏、九州大学学部生村上和広氏、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) 孫玉平、崎野健治、AKLAN Amin : 正方形鋼管横補強コンクリート柱の曲げ圧縮性状、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17、No.2、pp.393-398、1995.6
- 2) 崎野健治、孫玉平、AKLAN Amin : Ultimate Strain and Strength of RC Columns Retrofitted by Steel Tubes, IABSE Conference Report on Composite Construction, Innsbruck, Austria, pp. 675-680, 1997. 9
- 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