

(2) 長方形CFT柱の2軸偏心圧縮実験

市川 元気¹・藤永 隆²・孫 玉平³

¹ 神戸大学大学院大学院生 工学研究科建築学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: 174t003t@stu.kobe-u.ac.jp

² 正会員 神戸大学都市安全研究センター准教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: ftaka@kobe-u.ac.jp

³ 正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科建築学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: sunlili@people.kobe-u.ac.jp

近年、平面的な自由度の拡大や構造的な合理性の観点から、4面ボックスの溶接組み立て鋼管による長方形断面のコンクリート充填鋼管（以下、CFTとする）柱が用いられる例が増えてきている。しかし、長方形CFT柱に関する実験的研究は少なく、2軸曲げの実験例は皆無であり、その構造性能の解明は不十分である。

本論では、2軸曲げを受ける長方形CFT柱の基本的な構造性能を明らかにすることを目的とし、載荷角度と軸力比を実験変数として、計10体の偏心圧縮実験を行った。加えて、平面保持を仮定した断面解析を行い、偏心圧縮実験の履歴の追跡を試みた。

Key Words : *Concrete filled steel tube, Eccentric compression, Bi-axial bending, Rectangular section, Axial force ratio, Loading direction*

1. はじめに

コンクリート充填鋼管（以下、CFT とする）は、一般的に正方形断面あるいは円形断面の柱材として用いられる。近年では平面的な自由度の拡大や構造的な合理性の観点から、4 面ボックスの溶接組み立て鋼管による長方形断面の柱材として用いられる例が増えてきている。

耐震設計においては、地震時挙動の複雑さより、建物の2方向（長辺および短辺）に対して耐震安全性の確認を行うことが一般的である。しかし、実際に建築物に作用する地震力は水平2方向および鉛直方向の3次元的な動きであり、柱は2軸曲げを受ける。断面の形状が長方形の場合には断面に弱軸方向が存在するため、2軸曲げ時の挙動は正方形断面のそれよりも複雑となる。

日本建築学会の「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」（以下、CFT 指針とする）¹⁾ では、長方形断面も適用範囲内であるが、その適用に関して明確な記述はなされていない。CFT 指針第1版²⁾には長方形CFT断面にも適用可能な2軸曲げの相関式が示されていたが、フランジとウェブの板厚が等しく、部材のせいや幅に比べて板厚が小さい場合が想定されており、ウェブ側とフランジ側の板厚が異なる場合の検討はなされていない。CFT

指針第2版¹⁾には正方形CFT断面の2軸曲げの相関式が示されているのみであり、長方形CFT断面の2軸曲げの相関式は示されていない。

長方形断面CFTの研究として、藤本らは、長方形CFTの圧縮および曲げ実験を行い、圧縮耐力は、長辺と短辺の平均値を用いて幅厚比を算定することで良好に評価できること、曲げ耐力は長辺を用いた幅厚比の影響が顕著であることを示している³⁾。

2軸曲げに関する研究として、藤本らは、高強度材料を用いた正方形CFT柱の2軸曲げせん断実験を行い、終局曲げ耐力および変形性能は1軸曲げを受ける場合とほぼ同等であることを示している⁴⁾。

著者らは、2軸曲げを受ける長方形CFT断面の終局曲げ耐力の相関関係におけるCFT指針式の適用性の検討を行い、CFT指針第1版²⁾の降伏関数パラメータが、ウェブとフランジの板厚が異なる場合や、断面せいに対して板厚が比較的大きい場合においても、2軸曲げ耐力相関関係性をよく評価することを示している⁵⁾。

本論では2軸曲げを受ける長方形CFT柱の基本的な構造性能を明らかにすることを目的とし、載荷角度、軸力比を実験変数とした長方形CFT柱の2軸偏心圧縮実験を行った。

2. 実験概要

(1) 実験計画

長方形断面のCFT柱試験体に対して2軸偏心圧縮力を載荷する実験を行った。今回の実験では、鋼管のウェブとフランジの板厚は同一のものとした。

載荷角度 θ は0, 22.5, 45, 67.5, 90度の5種類を設定した。偏心量 e は、各載荷角度の断面の一般化累加強度曲線において、軸力と偏心量の積 $N \cdot e$ が、軸力比 $n=0.3$ あ

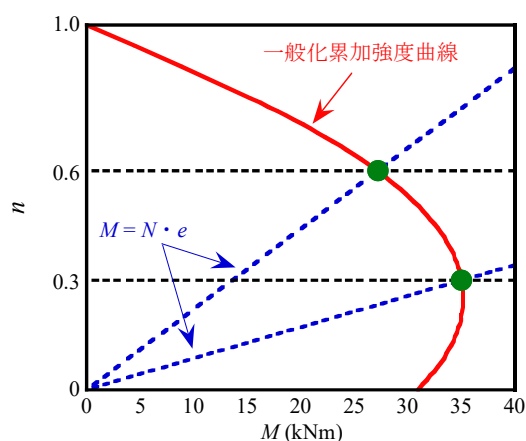


図-1 偏心量算定方法

表-1 中心圧縮試験体一覧

	せい D (mm)	幅 B (mm)	板厚 t (mm)	材長 L (mm)	コンクリート 圧縮強度 $c \sigma_B$ (MPa)
C-225	124.9	75.1	4.26	225 (3B)	75.4
C-250	124.9	75.2	4.25	248 (2D)	
C-375	124.9	75.2	4.24	373 (3D)	

るいは0.6の線との交点を通る偏心量より設定した（図-1参照）。各載荷角度の断面の一般化累加強度曲線の算定において、鋼管せい D ・幅 B は各試験体の実測寸法を、板厚 t は中心圧縮試験体の実測値の平均値を用い、角部の R 部外形寸法は考慮していない。

また、偏心圧縮試験体と同一断面のCFT短柱の中心圧縮試験を行い、その基本的な構造性能の確認を行った。

(2) 試験体

a) 中心圧縮試験体

表-1に中心圧縮試験体一覧を示す。鋼管は□-125x75x4.5 (STKR400)を用い、材長 L を鋼管の短辺方向の断面幅 B の3倍、長辺方向の断面幅 D の2倍、3倍の3種類の試験を行った。試験体の端面は、コンクリート打設面にキャッピングを施し平滑に仕上げた。

表-2 偏心圧縮試験体一覧

	載荷角度 θ	偏心量 e (mm)	コンクリート 圧縮強度 $c \sigma_B$ (MPa)
E-0-0.3	0	92	82.7
E-22.5-0.3	22.5	86	87.6
E-45-0.3	45	74	85.8
E-67.5-0.3	67.5	64	81.1
E-90-0.3	90	61	85.8
E-0-0.6	0	36	85.4
E-22.5-0.6	22.5	34	87.6
E-45-0.6	45	30	87.6
E-67.5-0.6	67.5	25	81.1
E-90-0.6	90	23	81.1

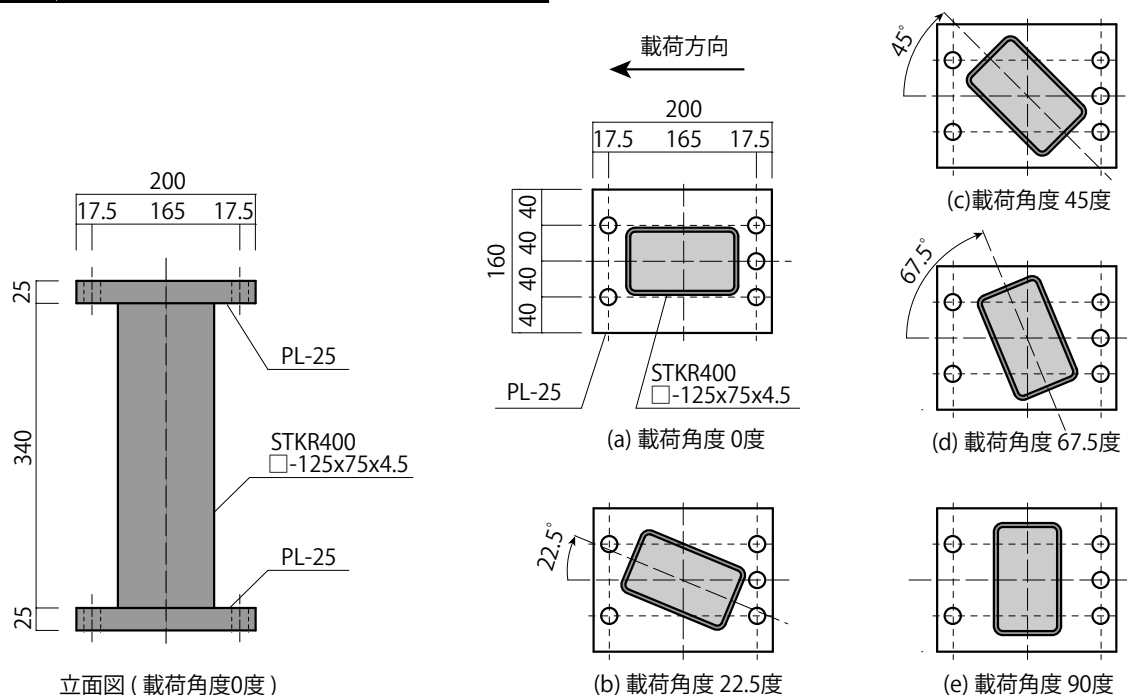


図-2 偏心圧縮試験体形状・寸法

b) 偏心圧縮試験体

表-2 に偏心圧縮試験体一覧を、図-2 に偏心圧縮試験体の断面形状・寸法を示す。鋼管は中心圧縮試験体と同じ□-125x75x4.5 (STKR400) を用い、上下両端部にエンドプレート (PL-25) を溶接した。コンクリート打設は試験体上端に溶接されたエンドプレートに設けられたコンクリート打設用孔より行った。

(3) 材料特性

a) コンクリート

各試験体の実験時材齢の圧縮試験を 3 体、割裂試験を 3 体それぞれ行った。表-3 に試験体に使用したコンクリートの調合表を示す。設計基準強度 $F_c = 55 \text{ MPa}$ (指定強度 63 MPa)，粗骨材の最大寸法 20 mm，水セメント比 32 %で、セメントは普通ポルトランドセメントを、混和剤として高性能 AE 減衰剤を用いた。また、高流動コンクリートであるためスランプフロー値を用いて管理を行い、その実測値は 570×565 mm であった。

b) 鋼材

鋼材の材料特性を調べるため、引張試験と中空鋼管の

表-3 コンクリート調合表

F_c (MPa)	粗骨材 最大寸法 (mm)	W/C (%)	(kg/m ³)				
			W	C	細骨材	粗骨材	混和剤*
55	20	32	175	547	783	837	7.93

*高性能 AE 減衰剤

表-4 鋼材材料試験結果

引張試験				圧縮試験	
降伏点応力 $s\sigma_y$ (MPa)	引張強さ $s\sigma_u$ (MPa)	ヤング係数 sE (GPa)	破断伸び (%)	ヤング係数 sE (GPa)	最大応力 $s\sigma_{\max}$ (MPa)
385	469	200	32.4	209	421

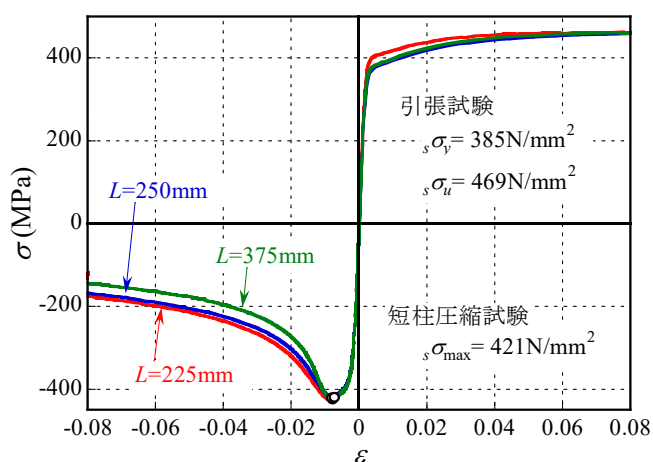


図-3 鋼材の応力—ひずみ関係

短柱圧縮試験を行った。表-4 に鋼材の材料試験結果を、図-3 に応力—ひずみ関係を示す。引張試験は鋼管より切り出した JIS14B 号引張試験片により 3 片を行った。引張試験において、明確な降伏棚が確認できなかったため 0.2 % オフセット法を用いて降伏点応力を求めている。短柱圧縮試験は材長 L を鋼管の短辺方向の断面幅 B の 3 倍、長辺方向の断面幅 D の 2 倍、3 倍の 3 種類の試験を行った。図中の短柱圧縮試験のひずみ ϵ は、最大荷重点 (図中○印) までは鋼管表面に貼付したひずみゲージより得られたひずみを、それ以後は変位計より得られた軸方向変位を材長 L で除した平均軸ひずみをそれぞれ用いている。

(4) 載荷装置

図-4 に偏心圧縮実験の載荷装置図を示す。材両端がピン支持となるように、スライド可能なナイフエッジを設置し、アムスラー試験機によって偏心圧縮荷重を載荷した。試験体両端に固定された治具をスライドさせることによって、所定の偏心量を与えた。

(5) 変位・ひずみ測定

偏心圧縮実験の変位測定位置を図-4 に示す。曲げ変形による付加曲げモーメントを求めるため、試験体高さ中央での水平変位を変位計を用いて計測した。また、試験体の軸方向変位と端部治具の回転量も併せて変位計を用いて計測した。

鋼管表面には試験体軸方向および周方向にひずみゲージを貼付し、各部のひずみを測定した。

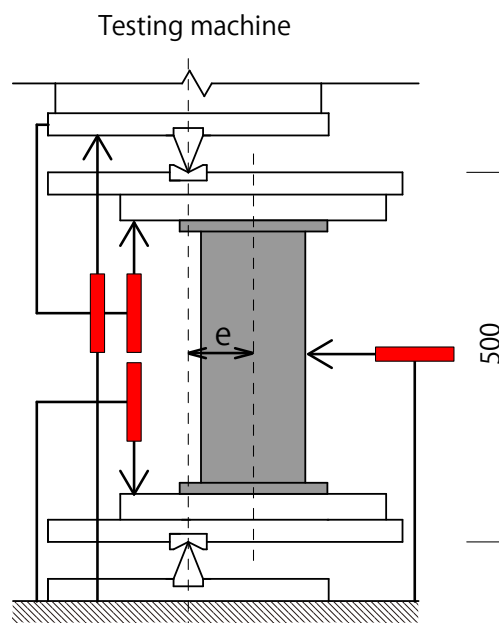


図-4 載荷装置・変位測定位置

3. 実験結果

(1) 中心圧縮試験

表-5 に中心圧縮試験結果を、図-5 に軸力-軸ひずみ関係を示す。縦軸は実験より得られた軸力 N を計算軸耐力 $N_0 = cA \cdot c\sigma_B + sA \cdot s\sigma_y$ (cA : コンクリート断面積, $c\sigma_B$: コンクリート圧縮強度, sA : 鋼管断面積, $s\sigma_y$: 鋼管降伏点応力) で除したものを、横軸は変位計より得られた軸方向変位を材長 L で除した平均軸ひずみ ε を用いている。なお、 N_0 の算定は角部の R 部外形寸法を鋼管板厚 t の2倍として行った。

軸力-軸ひずみ関係は、すべての試験体で最大耐力点までは同様の挙動を示したが、その後は材長 L が最も長い試験体 C-375 の耐力低下が、他の試験体に比べて大きくなった。また、すべての試験体で実験最大軸耐力 eN_u と計算軸耐力 N_0 の比 eN_u/N_0 が1.0を下回った。最大耐力点付近では鋼管の局部座屈は観察されなかった。試験体 C-225, C-375 において、最大耐力に達した後、局部座屈が長辺面で観察された。試験体 C-250 は最大耐力に達した後、局部座屈が短辺面で観察され、その直後に長辺面でも観察された。

表-5 中心圧縮試験結果

	最大軸耐力 eN_u (kN)	計算軸耐力 N_0 (kN)	軸耐力比 eN_u/N_0
C-225	1133	1193	0.95
C-250	1134	1193	0.95
C-375	1134	1191	0.95

表-6 偏心圧縮実験結果

	最大軸耐力 eN_u (kN)	実験曲げ耐力 eM_u^* (kNm)	計算曲げ耐力 $calM_u$ (kNm)	曲げ耐力比 $eM_u/calM_u$
E-0-0.3	340	32.4	34.0	0.95
E-22.5-0.3	346	31.1	32.7	0.95
E-45-0.3	333	25.9	28.0	0.93
E-67.5-0.3	327	22.4	23.6	0.95
E-90-0.3	329	21.0	22.9	0.92
E-0-0.6	636	24.1	26.8	0.90
E-22.5-0.6	631	22.9	25.8	0.88
E-45-0.6	592	19.0	22.7	0.83
E-67.5-0.6	600	17.1	18.6	0.92
E-90-0.6	599	15.4	17.0	0.91

* $eM_u = N_u(e + \delta_u)$, δ_u : N_u 時の横たわみ

(2) 偏心圧縮実験

a) 軸力-横たわみ関係

表-6 に偏心圧縮実験結果を、図-6 に軸力-横たわみ関係を示す。ここで、横たわみ δ は試験体高さ中央の曲げ変形による水平変位、実験曲げ耐力 eM_u は最大軸耐力 eN_u 時の付加曲げモーメントを考慮した値 $eM_u = eN_u(e + \delta_u)$ とした。また、計算曲げ耐力 $calM_u$ は軸力比を考慮した載荷角度方向に対する全塑性耐力である。すべての試験体で実験曲げ耐力 eM_u と計算曲げ耐力 $calM_u$ の比 $eM_u/calM_u$ は1.0を下回った。最大軸耐力 eN_u に達した後には鋼管の局部座屈が観察された。軸力-横たわみ関係は、同じ軸力比の試験体では、載荷角度によらず同様の挙動を示している。なお、軸力比0.3で載荷角度0度の試験体 E-0-0.3 は、治具の不具合により載荷を途中で終了しており、最大軸耐力は観測できたが曲げ耐力の最大を経験したかどうかは不明である。

b) 曲げモーメント-曲率関係

図-7 に各試験体の曲げモーメント-曲率関係を示す。

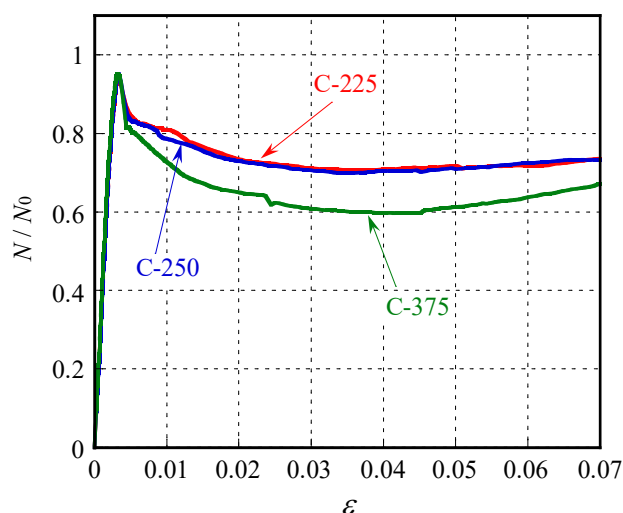


図-5 軸力-軸ひずみ関係 (中心圧縮試験)

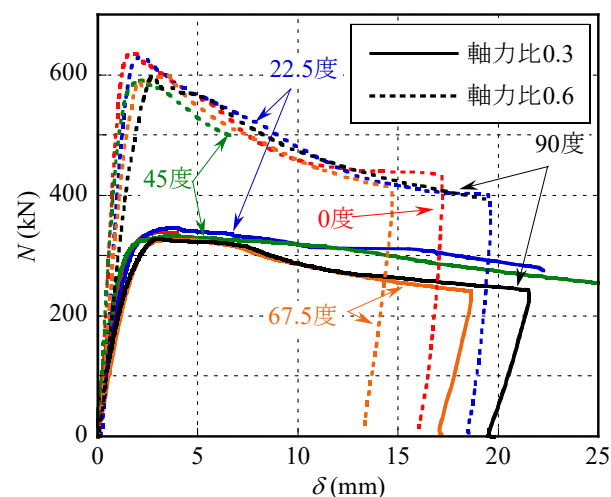


図-6 軸力-横たわみ関係 (偏心圧縮実験)

ここで、縦軸の曲げモーメント M は付加曲げモーメントを考慮した値 $M=N(e+\delta)$ 、横軸の曲率 ϕD は試験体高さ中央の鋼管表面に貼付したひずみゲージより得られた曲率 ϕ に鋼管長辺方向の断面幅 D を乗じた値である。

図-7 より、曲げ耐力、曲げ剛性ともに載荷角度 0 度（強軸曲げ）の試験体が最も大きく、90 度（弱軸曲げ）に近づくにつれて小さくなっている。また、載荷角度が等しい試験体では、軸力比が異なる場合も曲げ剛性が一致している。

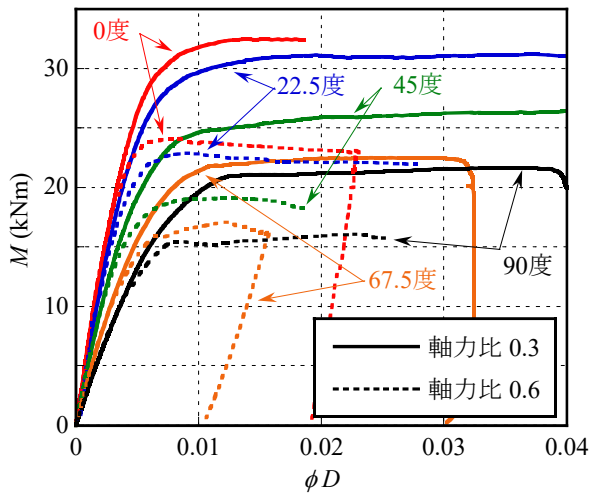


図-7 曲げモーメントー曲率関係

c) 終局曲げ耐力 2 軸相関関係

図-8 に各試験体の実験曲げ耐力の 2 軸相関関係を示す。x 軸周りに作用する曲げを強軸曲げ、y 軸周りに作用する曲げを弱軸曲げとしている。図中の赤線は CFT 指針第 1 版の終局曲げ耐力 2 軸相関式を、緑線は CFT 指針第 2 版の終局曲げ耐力 2 軸相関式を示している。ここで、CFT 指針終局曲げ耐力 2 軸相関式は、それぞれ軸力比ごとに偏心圧縮実験時材令のコンクリート圧縮強度の平均値を用いて計算した。また、図中の●印、■印はそれぞれ軸

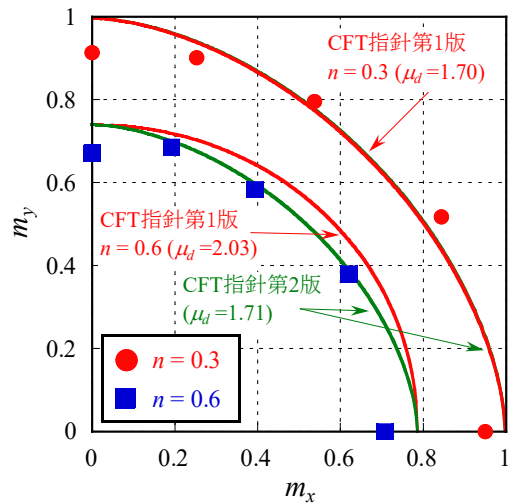
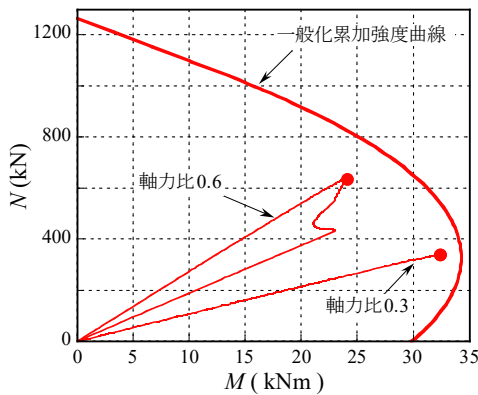
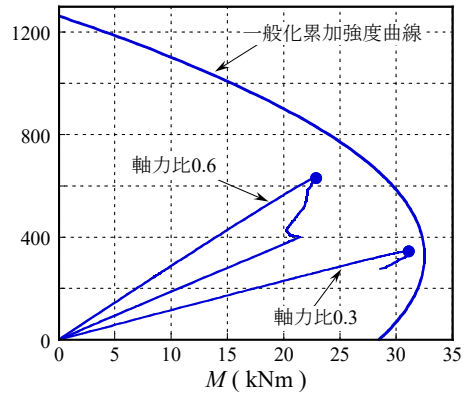


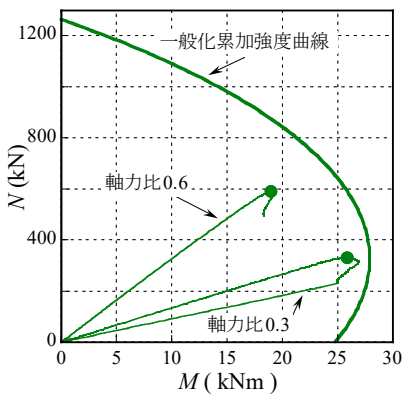
図-8 終局曲げ耐力 2 軸相関関係



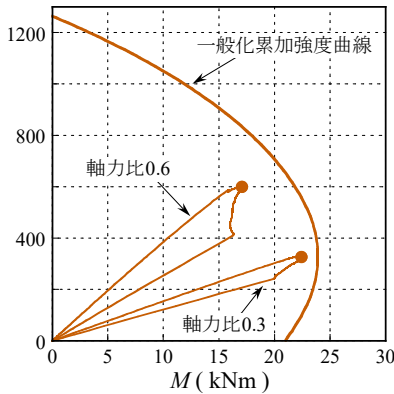
a) 載荷角度 0 度



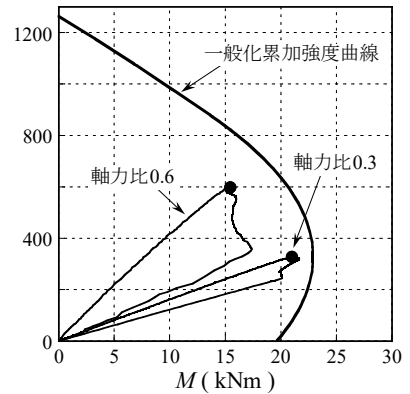
b) 載荷角度 22.5 度



c) 載荷角度 45 度



d) 載荷角度 67.5 度



e) 載荷角度 90 度

図-9 軸力ー曲げモーメント相関関係

力比0.3, 0.6の試験体の実験値である。曲げ耐力は、各軸周りの最大1軸曲げ終局耐力 xM_0 , yM_0 で無次元化している。

軸力比0.3のとき、CFT指針第1版と第2版の終局曲げ耐力2軸相関式はほぼ同一の値を示す。軸力比に関わらず、1軸曲げの試験体の実験曲げ耐力はCFT指針式を下った。軸力比0.3の2軸曲げを受ける試験体の実験曲げ耐力は、CFT指針第1版、第2版の式と対応が良い。軸力比0.6の2軸曲げを受ける試験体の実験曲げ耐力は、CFT指針第2版の式と対応が良いが、2軸相関関係の傾向としては第1版のものに近いことが分かる。

d) 軸力-曲げモーメント相関関係

図-9に軸力-曲げモーメント相関関係を示す。ここで、縦軸 N は実験で得られた軸力、横軸の曲げモーメント M は付加曲げモーメントを考慮した値 $M=N(e+\delta)$ である。図中●印は最大軸耐力点であり、各載荷角度ごとの一般化累加強度曲線を併せて示している。ここで、一般化累加強度曲線の算定には、各載荷角度でのコンクリー

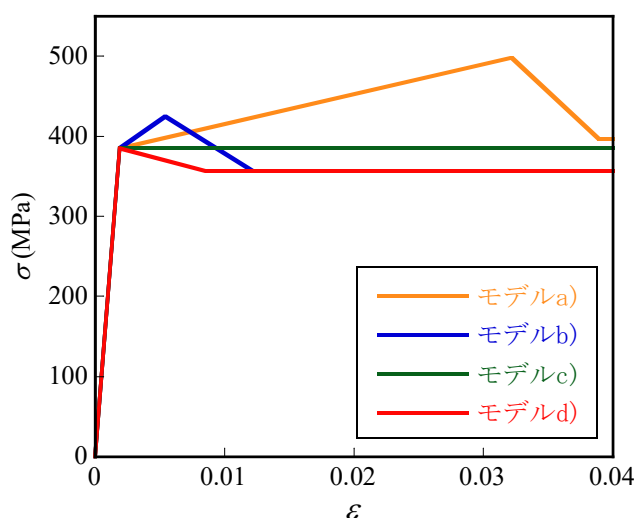


図-10 圧縮側鋼管 応力-ひずみ関係

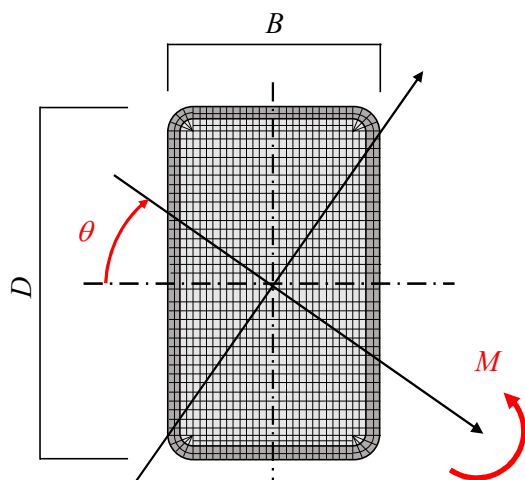


図-11 断面分割図

ト圧縮強度の平均値を用いている。すべての試験体で曲げ耐力は一般化累加強度曲線に達しなかった。

4. 数値解析による検討

(1) 解析方法

長方形 CFT 短柱の中心圧縮性状の追跡を中原らのモデル⁹⁾を用いて行った。中原らのモデルは正方形断面 CFT を対象としているが、今回は長方形断面 CFT に適用するため、充填コンクリートの応力-ひずみ関係の算定には、鋼管の有効側圧の効果が控えめな評価となるよう鋼管の長辺方向の内幅を用いている。また、鋼管の応力-ひずみ関係は、a) 鋼管の短辺方向の幅厚比を用いたもの、b) 鋼管の長辺方向の幅厚比を用いたもの、c) 鋼管の強度上昇を考慮せず安定負担応力の算定時に短辺方向の幅厚比を用いたもの、d) 鋼管の強度上昇を考慮せず安定負担応力の算定時に長辺方向の幅厚比を用いたもの、の4種類（図-10参照）で比較を行った。

次に、平面保持を仮定したファイバー法による断面解析を行い、偏心圧縮実験の履歴の追跡を試みた。図-11に断面の分割図を示す。中心圧縮解析において d) の仮定で実験値との対応が最も良かったため、圧縮側の鋼管のモデルには、同仮定のみを用いた（図-12参照）。鋼管の引張側は完全弾塑性としている。また、充填コンクリートの応力-ひずみ関係は中心圧縮と同様に中原らのモデルを用いたが、断面のひずみ勾配の影響を考慮し、最大圧縮強度以降の下り勾配に関する係数 α を 2.25 として算定した⁷⁾。なお、試験体全長で曲率が一定として横たわみ δ を算出している。

(2) 中心圧縮解析結果

図-12 に中心圧縮実験と a)~d)の各鋼管モデルによる

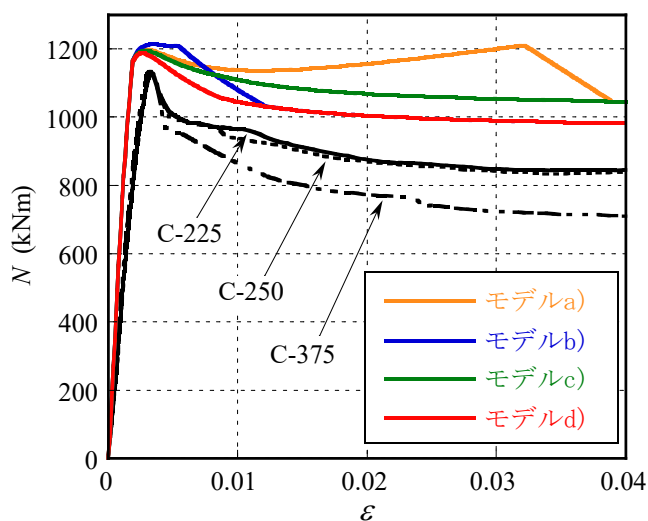


図-12 中心圧縮実験・解析結果比較

解析結果との比較を示す。a)～d)すべてのモデルで最大耐力を過大に評価した。最大耐力以降の挙動に関しては安定負担応力算定時に長辺方向の幅厚比を用いたものの方が、短辺方向の幅厚比を用いたものに比べ実験値との対応が良い。鋼管のモデルに強度上昇を考慮せず安定負担応力算定時に長辺方向の幅厚比を用いた d) のモデルが最も実験結果との対応が良い。

(3) 偏心圧縮解析結果

a) 軸力－横たわみ関係

図-13 に軸力－横たわみ関係について、偏心圧縮実験結果との比較図を示す。すべての試験体で解析による初期剛性が実験値を上回り、解析における最大耐力時の変位は実験値を下回った。しかし、軸力比 0.3 の試験体に関しては、載荷角度によらず最大耐力以降の耐力低下領域での履歴が実験値を精度よく評価できている。また、軸力比 0.6 の試験体に関しては、最大耐力を過大に評価するが、その後の履歴での耐力低下の傾向はある程度追跡できている。

b) 曲げモーメント－曲率関係

図-14 に曲げモーメント－曲率関係について、偏心圧縮実験結果との比較図を示す。すべての試験体で初期剛性は非常に精度良く評価できている。また、軸力比 0.3 の試験体に関しては、曲げ耐力および履歴形状を精度よく評価できた。軸力比 0.6 の試験体に関しては、試験体 E-45-0.6（載荷角度 45 度）を除き、履歴形状をある程度

評価できたが、曲げ耐力は過大に評価する傾向が見られた。

5. まとめ

本論では、軸力比と載荷角度を実験変数とした長方形 CFT 柱の 2 軸偏心圧縮実験を行った。加えて実験の挙動追跡のため数値解析を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 軸力－横たわみ関係は、軸力比が同じであれば載荷角度が異なる場合でも、同様の挙動を示した。
- 2) 終局曲げ耐力 2 軸相関関係について、2 軸曲げを受ける試験体の終局曲げ耐力は CFT 指針第 2 版で示される相関式と良好な対応を示したが、2 軸相関関係の傾向は第 1 版のものに近かった。
- 3) 中原らのモデルで圧縮側鋼管のモデルに鋼管の強度上昇を考慮せず安定負担応力の算定時に長辺方向の幅厚比を用いた場合の数値解析の結果、曲げモーメント－曲率関係に関して、軸力比 0.3 の試験体は精度よく評価できたが、軸力比 0.6 の試験体は曲げ耐力を過大に評価する傾向が見られた。

謝辞： 本実験を行うにあたり神戸大学の金尾優技術職員より多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

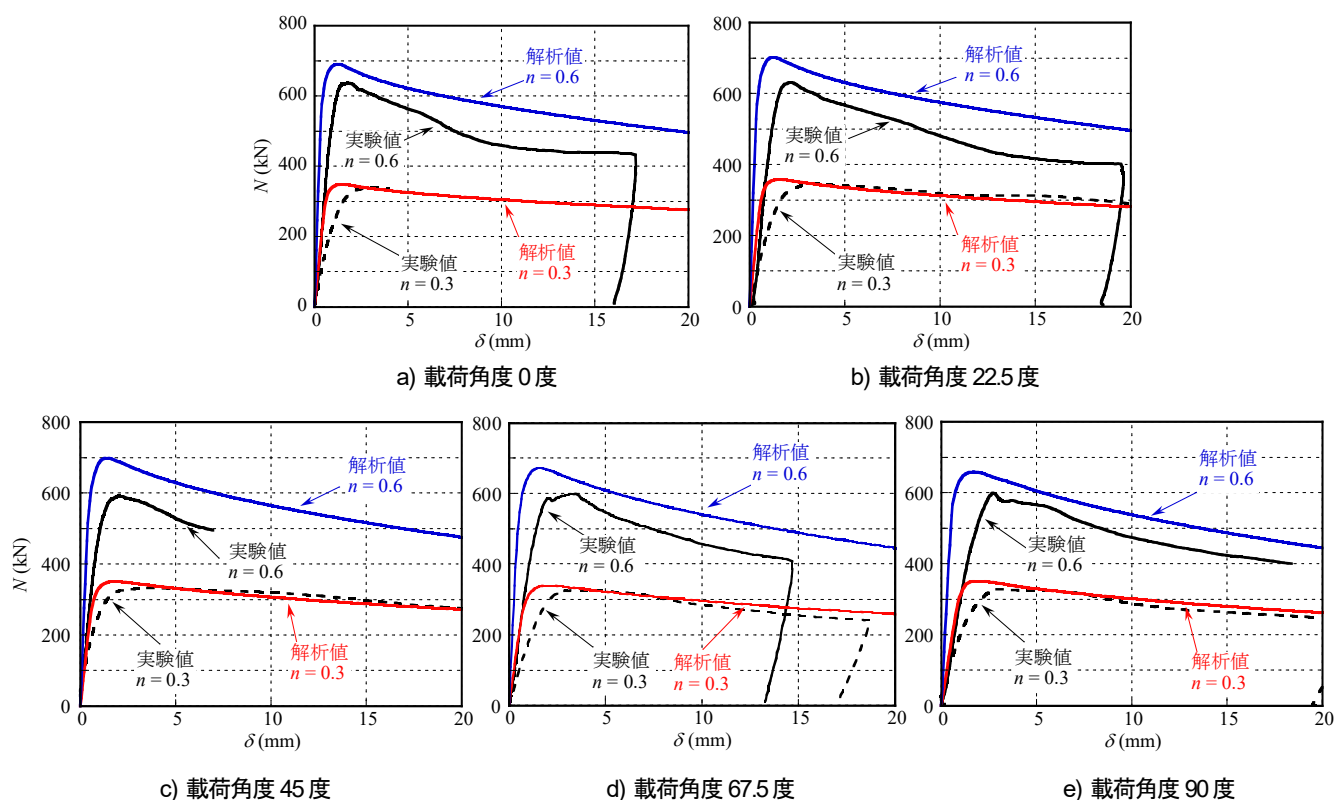


図-13 軸力－横たわみ関係の比較

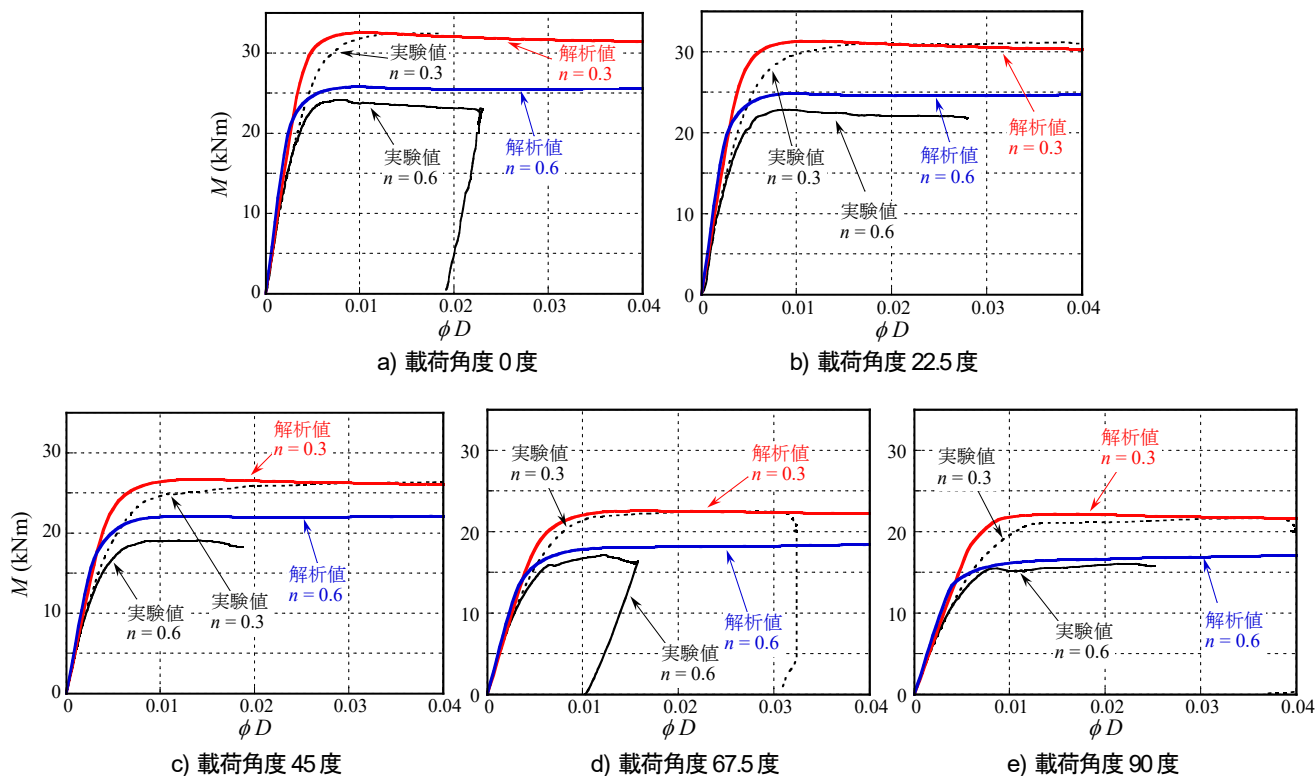


図-14 曲げモーメント-曲率関係の比較

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，第2版，2008.10.
- 2) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，第1版，1997.10.
- 3) 荒井望，長崎透，藤本利昭：コンクリート充填長方形鋼管の構造性能に関する実験的研究，第10回復合・合成構造に関するシンポジウム，2013.
- 4) 藤本利昭，向井昭義，西山功，稲井栄一，甲斐誠，時野谷浩良，馬場武志，福本敏之，森浩二，崎野健治，森野捷輔：高強度材料を用いたコンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状，日本建築学会構造系論文集，第509号，pp.167-174，1998.7.
- 5) 藤永隆，孫玉平：二軸曲げを受ける長方形 CFT 柱の耐力，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1351-1352，2016.8.
- 6) 中原浩之，崎野健治，稲井栄一：コンクリート充填鋼管柱の中心圧縮性状のモデル化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.817-822，1998.6.
- 7) 田福勝，崎野健治，孫玉平：拘束 RC 柱の曲げ圧縮特性状に及ぼす断面ひずみ勾配の影響，構造工学論文集，Vol.43B，pp.191-198，1997.3.

BI-AXIAL ECCENTRICALLY COMPRESSIVE EXPERIMENT OF RECTANGULAR CFT COLUMNS

Genki ICHIKAWA, Takashi FUJINAGA and Yuping SUN

In recent years, rectangular section of concrete filled steel tube (CFT) has been widely used as column in members of high rise buildings. However, experimental study of rectangular CFT column subjected to bi-axial bending hasn't been conducted and the structural performance of rectangular CFT columns subjected to bi-axial bending hasn't been clarified.

In this study, the bi-axial eccentrically compressive experiment of rectangular CFT column was conducted, to evaluate and examine the basic structural performance of rectangular CFT column subjected to bi-axial bending. The experimental parameters are directions of loading and eccentricities.