

コンクリート充填長方形鋼管の構造性能に関する研究

- その6 偏心圧縮実験 -

日大生産工(院) ○長崎 透 日大生産工(院) 岡 修平
日大生産工(院) 荒井 望 日大生産工 藤本 利昭

1. はじめに

前報(その5)¹⁾では長方形 CFT 短柱の圧縮性状について検討を行った。本報では、長方形 CFT 短柱の偏心圧縮実験を行い、断面に軸方向力と曲げモーメントが作用する場合の断面の曲げ方向(強軸曲げおよび弱軸曲げ)が構造性能に及ぼす影響について検討した。更に材料の応力-ひずみ関係を用いた断面曲げ解析²⁾³⁾により、断面内の応力状態について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧を示す。鋼管の断面形状は $150 \times 100 \times 3.2$ とした。実験変数は曲げ方向(強軸曲げ, 弱軸曲げ), 断面図心からの偏心距離 e (0 mm, 25 mm, 50 mm) とし, 試験体の高さ h は, 曲げ方向に対する断面せい D の 3 倍 ($h=3D$) とした。試験体数は, 中空試験体 2 体, CFT 試験体 6 体の合計 8 体である。

表-2 に鋼材の材料試験結果を示す。試験体の鋼管には STKR400 を用いた。鋼材の材料試験片は 5 号試験片とし, 角形鋼管の平板部より切り出して製作した。

表-3 にコンクリートの調合表を, 表-4 にコンクリートの材料試験結果を示す。充填コンクリートは普通コンクリートを使用し, 打設は試験体上端より縦打ちで行った。

2.2 加力および計測

図-1 に加力方法を示す。実験は 2000kN 万能試験機を使用し, 試験体上下にかまぼこ型球座を偏心して取り付けることで行った。変位の測定は, 4 本の変位計により得られる軸方向変位 δ_1 (引張側 2 本の変位計の平均値), δ_2 (圧縮側 2 本の変位計の平均値) から試験体全長 h の平均軸ひずみ $\varepsilon = (\delta_1 + \delta_2)/h$ および平均曲率 $\phi D = (\delta_1 - \delta_2)/(h \times l) \times D$, l : 引張側と圧縮側の変位計間の距離で 150 mm とした) を求めた。また鋼管表面にはひずみゲージを貼付して, 各部のひずみを測

表-1 試験体一覧

| | 幅×せい | 板厚 t[mm] | 幅厚比 B/t (D/t) | 一般化 幅厚比 α | 高さ h[mm] | 偏心 方向 | 偏心 距離 e[mm] |
|------|---------|-------------|---------------------|-----------------|-------------|----------|-------------------|
| CFT | 150×100 | 3.00 | 50.0 (33.3) | 2.18 (1.45) | 450 | 強軸 | 50 |
| | | | | | 450 | 強軸 | 25 |
| | | | | | 300 | 弱軸 | 50 |
| | | | | | 300 | 弱軸 | 25 |
| | | | | | 450 | - | 0 |
| | | | | | 300 | - | 0 |
| 中空鋼管 | 150×100 | 3.00 | 50.0 (33.3) | 2.18 (1.45) | 300 | 弱軸 | 50 |
| | | | | | 450 | 強軸 | 50 |

(): 短辺方向を使用, -S:L=短辺方向の3倍
 $\alpha = D/t \cdot \sqrt{\sigma_y/E_s}$, -L:L=長辺方向の3倍

表-2 材料試験結果(鋼材)

| 幅×せい | 降伏強度 σ_y (N/mm ²) | 引張強度 σ_t (N/mm ²) | ヤング係数 E_s (kN/mm ²) | 破断伸び ε (%) |
|---------|---|---|--------------------------------------|---------------------------|
| 150×100 | 387 | 471 | 204 | 31.6 |

表-3 コンクリートの調合表

| | W/C (%) | 単位質量(kg/m ³) | | | | |
|----------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|
| | | W | C | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 |
| 普通コンクリート | 65 | 183 | 282 | 827 | 979 | 2.82 |

表-4 材料試験結果(コンクリート)

| | 圧縮強度 σ_B (N/mm ²) | 設計基準 強度 F_c (N/mm ²) | ヤング率 E_c (kN/mm ²) | 圧縮強度時 ひずみ度 ε_B (%) |
|----------|---|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 普通コンクリート | 32.9 | 27 | 31.6 | 0.206 |

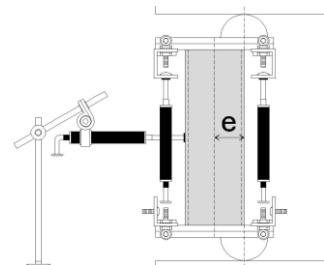


図-1 加力方法

Study on Structural Performance of Concrete Filled Rectangular Steel Tube

- Part.6 Eccentric Compression Test -

Toru NAGASAKI, Shuhei OKA, Nozomu ARAI and Toshiaki FUJIMOTO

定した。

なお、載荷は単調載荷としコンクリート打設面を石膏により平滑にしてから実験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 最大耐力

表-5 に偏心圧縮実験の実験結果一覧を示す。なお、表中の最大軸力 eN_u は、実験時の最大荷重とし、曲げ耐力実験値 eM_u は最大軸力時の付加曲げモーメント（曲げ変形による試験体高さ中央の水平変形 δ_h により生じる値）を考慮した値 $eM_u = eN_u \cdot (e + \delta_h)$ として評価した。また計算耐力 N_u 、 M_u は、正方形断面 CFT の設計式を長方形断面に適用できるように明示した次式⁴⁾によって求めた。

$$N_u = {}_sN_u + {}_cN_u, \quad M_u = {}_sM_u + {}_cM_u \quad \dots\dots\dots (1)$$

$${}_sN_u = 2(2x_n - cD) \cdot t_w \cdot \sigma_y \quad \dots\dots\dots (2)$$

$${}_sM_u = \{B \cdot t_f(D - t_f) + 2t_w(cD - x_n)x_n\} \sigma_y \quad \dots\dots\dots (3)$$

$${}_cN_u = x_n \cdot cB \cdot \sigma_B \quad \dots\dots\dots (4)$$

$${}_cM_u = \frac{1}{2}(cD - x_n)cB \cdot x_n \cdot \sigma_B \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ${}_sN_u$ ：鋼管の終局圧縮耐力、 x_n ：コンクリートの圧縮縁から中立軸までの距離、 cB ：コンクリートの断面幅、 t_w ：鋼管ウェブの板厚、 ${}_sM_u$ ：鋼管の終局曲げ耐力、 t_f ：鋼管フランジの板厚、 cD ：コンクリートの断面せい、 ${}_cN_u$ ：コンクリートの終局圧縮耐力、 ${}_cM_u$ ：コンクリートの終局曲げ耐力である。

各試験体とも最大耐力は圧縮側鋼管の局部座屈により決定し、実験値は計算耐力には僅かに達しなかった。CFT 試験体、中空鋼管試験体共に、計算値に対する実験値の比 (eN_u/N_u 、 eM_u/M_u) は強軸曲げ試験体に比して弱軸曲げ試験体の値が小さい。このことは、弱軸曲げでは圧縮フランジが幅厚比の大きい長辺となっていることが影響しているものと考えられる。

3.2 軸力-軸ひずみ関係

図-2 に全試験体の軸力-軸ひずみ関係を示す。曲げ方向が同じ試験体（図中の $e=25$ mm と $e=50$ mm）を比較すると、偏心距離が大きくなるほど軸圧縮力が小さい値となったが、偏心距離の違いによる軸力-軸ひずみ関係の差異は明確には認められなかった。偏心距離の等しい CFT 試験体と中空鋼管試験体を比較すると、CFT に比べ中空鋼管の軸圧縮力は低く、また、最大軸力以降の耐力低下も若干大きい。

一方、偏心距離が等しく曲げ方向が異なる試験体（図中の-L と-S）を比較すると、いずれの偏心距離においても強軸曲げ試験体の軸圧縮耐力が大きな値を示し、最大軸圧縮力以降の耐力低下は僅かに大きくなっている。この傾向は中空鋼管試験体に関しても同様である。

3.3 曲げモーメント-曲率関係

図-3 に、偏心距離 $e=0$ mm の試験体を除いた全ての試験体について曲げモーメント-曲率関係を示す。なお、図の縦軸 M は付加曲げモーメントを考慮した値 $M = P \cdot (e + \delta_h)$ とし、横軸は試験体全長にわたる平均曲率に断面せい D を乗じた ϕD で示している。なお弱軸曲げで偏心距離 $e=50$ mm の試験体（S- $e=50$ mm）は、他の試験体に比べ剛性低下が早く生じているが、これは試験体上下の加圧板の面外剛性が低く、局部的な面外変形の影響が測定変位に含まれてしまったものと考えられる。曲げ方向が同じ試験体（図中の $e=25$ mm と $e=50$ mm）を比較すると、軸力-軸ひずみ関係とは

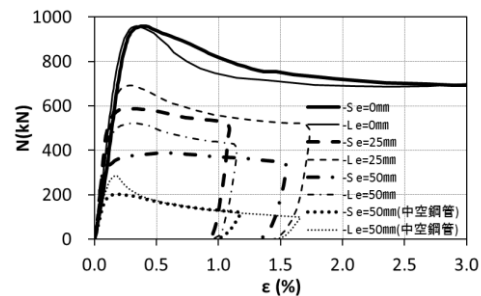


図-2 軸力-軸ひずみ関係

表-5 偏心圧縮実験の実験結果一覧

| | 幅×せい | 高さ L [mm] | A_s [mm ²] | σ_y [N/mm ²] | A_c [mm ²] | σ_c [N/mm ²] | 軸力 | | | 曲げ | | | 曲げ方向 | 偏心距離 e [mm] |
|------|---------|-----------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------|-------------|------------|--------------|---------------|------------|------|-------------|
| | | | | | | | N_u [kN] | eN_u [kN] | eN_u/N_u | M_u [kN·m] | eM_u [kN·m] | eM_u/M_u | | |
| CFT | 150×100 | 450 | 1464 | 387 | 13536 | 32.9 | 588 | 523 | 0.89 | 29.4 | 27.6 | 0.94 | 強軸 | 50 |
| | | 450 | | | | | 773 | 693 | 0.90 | 19.3 | 18.2 | 0.94 | 強軸 | 25 |
| | | 450 | | | | | 1011 | 959 | 0.95 | - | - | - | - | 0 |
| | | 300 | | | | | 486 | 389 | 0.80 | 24.3 | 21.3 | 0.87 | 弱軸 | 50 |
| | | 300 | | | | | 683 | 587 | 0.86 | 17.1 | 15.5 | 0.91 | 弱軸 | 25 |
| | | 300 | | | | | 1011 | 959 | 0.95 | - | - | - | - | 0 |
| 中空鋼管 | 150×100 | 450 | 1464 | 387 | - | - | 337 | 287 | 0.85 | 16.9 | 14.6 | 0.87 | - | 50 |
| | | 300 | - | - | - | - | 279 | 201 | 0.72 | 13.9 | 10.3 | 0.74 | - | 50 |

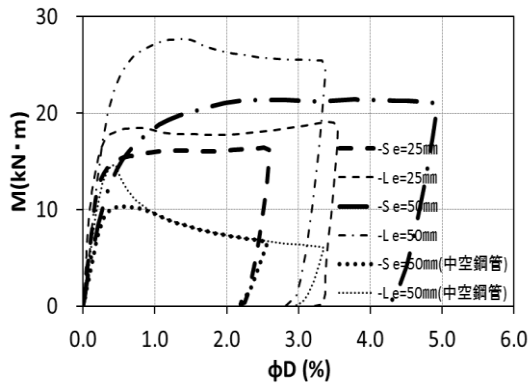


図-3 曲げモーメント-曲率関係

逆に、偏心距離が大きくなるほど曲げモーメントが大きい値となったが、曲げモーメント-曲率関係の差異は明確には認められない。偏心距離の等しい CFT 試験体と中空鋼管試験体を比較すると、CFT に比べ、中空鋼管の曲げモーメントは低く、また、最大曲げモーメント以降の耐力低下も若干大きい。

偏心距離が等しく曲げ方向が異なる試験体(図中の-L と-S)を比較すると、軸力-軸ひずみ関係と同様に、いずれの偏心距離においても強軸曲げ試験体(図中の-L)の曲げモーメントが大きな値を示し、最大曲げモーメント以降の耐力低下は僅かに大きくなっている。この傾向は中空鋼管試験体に関しても同様である。

3.4 断面曲げ解析による検討

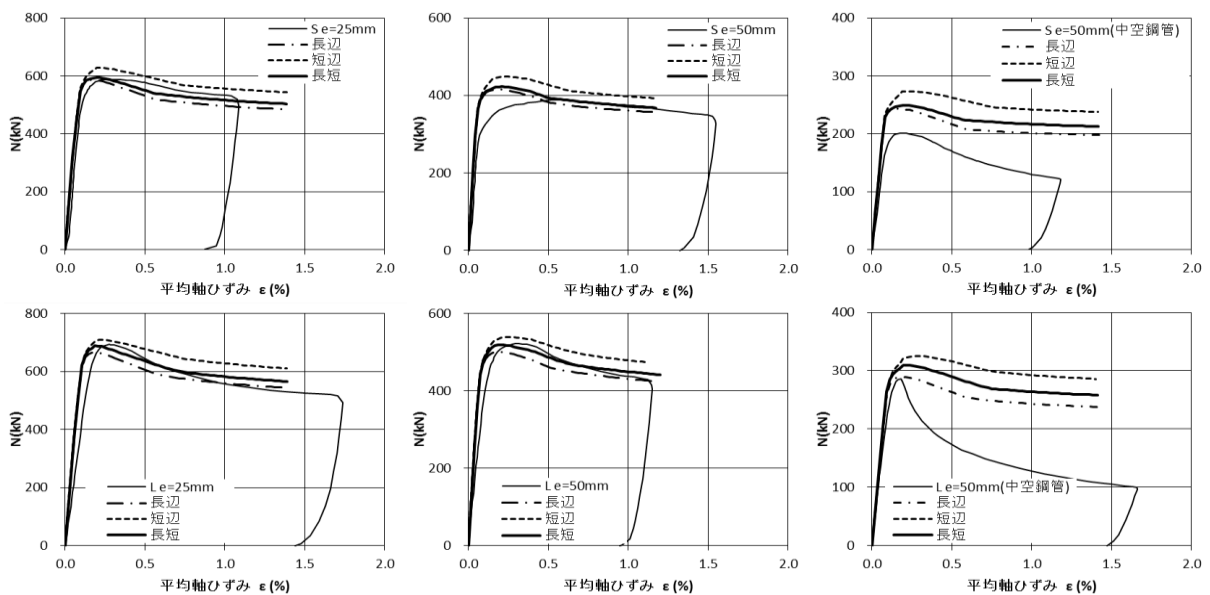
(a) 検討方法

曲げモーメントと軸方向力を受ける長方形 CFT 柱の挙動を検討するため、中原ら²⁾の応力-ひ

ずみ関係モデルを用いた CFT の断面曲げ解析により検証を行った。なお、偏心圧縮を受ける正方形 CFT 短柱の挙動が本応力-ひずみ関係モデルを用いた CFT の断面曲げ解析と良好な対応を示すことが、文献³⁾により報告されている。

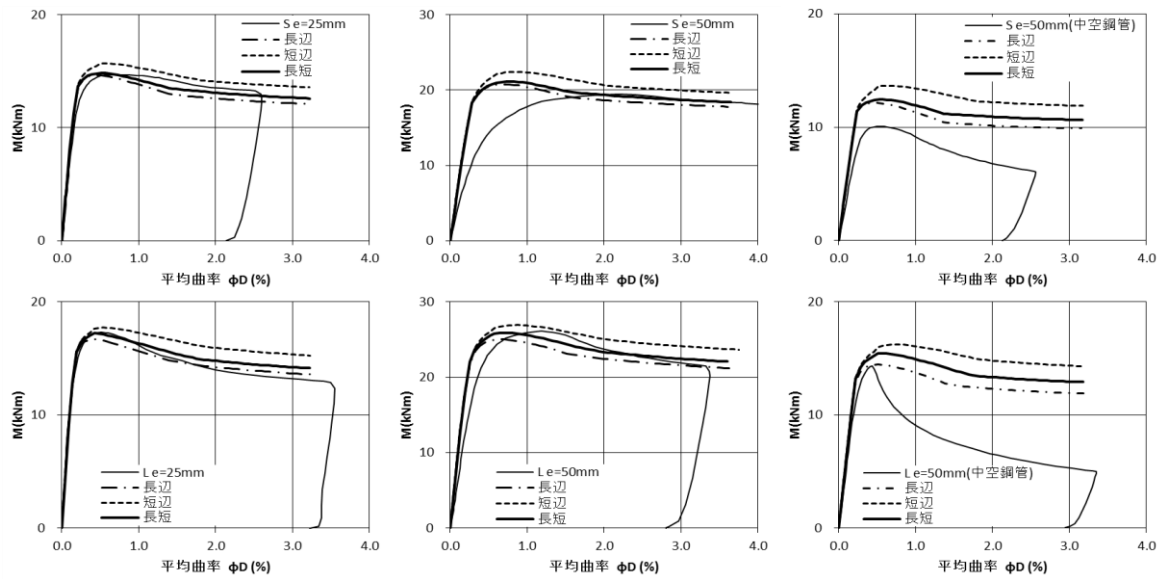
(b) 実験結果と解析モデルとの比較

図-4 に実験結果と解析モデルとの比較を示す。モデル化の際の一般化幅厚比の値については、長辺の値を用いた場合、短辺の値を用いた場合、断面の長辺部分、短辺部分でそれぞれの一般化幅厚比のモデルを適用した場合の 3 ケースについて示している。またコンクリートのモデル化に関しては、断面周方向の力の釣り合いを考慮し、長辺と短辺との平均を用いて評価した。同図(a)に軸力-軸ひずみ関係を、(b)に曲げモーメント-曲率関係を示すが、CFT 試験体に関しては、鋼管のモデル化に際し短辺の値を用いた場合は、軸圧縮耐力、曲げ耐力および変形性状ともに実験結果を過大評価する傾向がある。一方で長辺の値を用いた場合と長辺と短辺の両者を考慮した場合の解析結果は、比較的精度良く実験結果を評価できているが、長辺と短辺の両者を考慮した場合のほうが、差異は僅かであるが実験との対応は良好である。なお、弱軸曲げで偏心距離 $e=50$ mm の試験体は、解析結果に比べ実験での剛性低下が早く生じている。これは、試験体上下の加圧板の局所的な面外変形の影響が変形に含まれてしまったためである。また中空鋼管試験体では、解析モデルに CFT の鋼管のモデルを用いるため、実験結果に対して全ての解析結果が、耐力および変形性能を過大評価する結果となっている。このことか



(a) 軸力-軸ひずみ関係

図-4 実験結果と解析モデルの比較



(b) 曲げモーメントー曲率関係
 図-4 実験結果と解析モデルの比較

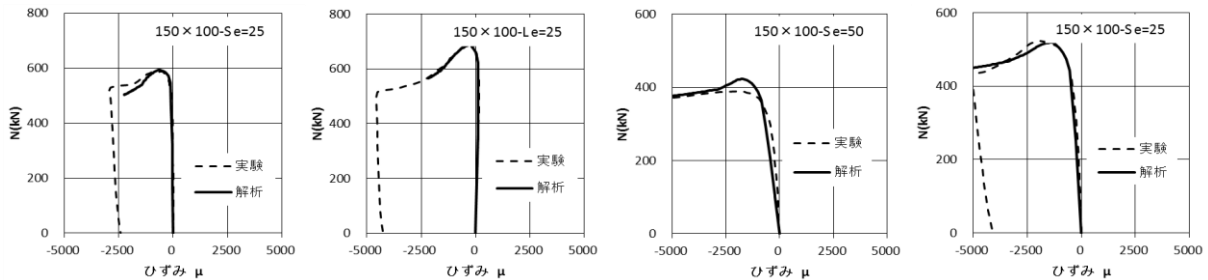


図-5 鋼管圧縮縁ひずみの実験結果と解析結果との比較

らも、CFT における鋼管は充填コンクリートの影響により、中空鋼管に比べ局部座屈による耐力・変形性能が向上していると言える。

図-5 は、軸方向力と鋼管圧縮縁ひずみの関係を実験値と解析値について比較して示したものである。図中の実験値は試験体圧縮側鋼管表面に貼付したゲージにより得られた値であり、解析値は断面の長辺部分、短辺部分でそれぞれそれぞれの一般化幅厚比のモデルを適用した場合の解析結果を示している。図から分かるように実験結果と解析結果との対応は良い。よって本解析モデルによって、圧縮側の鋼管の局部座屈の挙動が、良好に表現できているものと考えられる。この結果は、前報(その 5)¹⁾の中心圧縮実験の場合と同様に CFT 試験体の場合、その耐力および変形性状に関しては、直交する鋼管の拘束の影響は顕著ではないことを表しており、直交する鋼管(板)による連成的な挙動は顕著ではないと考えられる。

4. 結論

コンクリート充填長方形鋼管短柱の偏心圧縮実験及び解析により、以下の知見が得られた。

- ・偏心圧縮を受ける長方形中空鋼管および CF

T 柱の最大耐力および変形性状は、圧縮フランジの幅厚比の影響が大きい。よって曲げ方向によりその挙動は異なる。

- ・正方形 CFT 短柱を対象とした応力ーひずみ関係を用いた解析の結果、鋼管の長辺部分と短辺部分の面積を分けてそれぞれの幅厚比に対応した評価を行うことで、長方形 CFT の曲げ性状を精度良く評価することができる。このことは局部座屈に対して直交する鋼管による拘束の影響が認められないことを示唆している。

参考文献

- 1) 岡修平, 長崎透, 荒井望, 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研究 - その 5 圧縮性状 -, 日本大学生産工学部学術講演会講演概要, 2014.12
- 2) 中原浩之, 崎野健治, 稲井栄一: コンクリート充填角形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, 1998
- 3) Toshiaki Fujimoto, Akiyoshi Mukai, Isao Nishiyama and Kenji Sakino: Behavior of Eccentrically Loaded Concrete-Filled Steel Tubular Columns, American Society of Civil Engineers, Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No.2, pp. 203-212, February 2004.
- 4) 藤本利昭, 田中宏和, 平出亨, 竹中啓之: 断面形状を考慮した角形 CFT 柱の設計式, 日本建築学会技術報告集, Vol.15, No.31, 2009