

# 超高強度材料を用いた CFT 柱の研究開発

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS USING ULTRA-HIGH STRENGTH MATERIALS

石岡 拓\*, 中原理揮\*\*, 菊田 繁美\*\*\*  
 Taku ISHIOKA, Masaki NAKAHARA and Shigemi KIKUTA

The behavior of concrete filled steel tube ( CFT ) columns and CFT columns with built-in reinforcing bars ( SuperCFT ) made from ultra-high strength materials was investigated experimentally. The CFT and SuperCFT specimens were square tubes made from high strength ( 590 or 780 MPa ) steel and were filled with high strength ( 100 or 150 MPa ) concrete. The following conclusions were drawn from experimental results:

- 1) The CFT and SuperCFT specimens had large energy absorption capacity; particularly SuperCFT specimens had a tendency to suppress deterioration in resistance force after the ultimate strength.
- 2) The axial deformation after local buckling of SuperCFT specimens was smaller than that of CFT specimens. From this, it was assumed that the concrete of SuperCFT confined by spiral reinforcing bars suppressed brittle failure.
- 3) Assuming that ultra-high strength materials were full plastic, the ultimate flexural strength was overestimated.
- 4) Although material strength was beyond the scope of application, deformation capacity was able to be evaluated using the calculation formula of Architectural Institute of Japan.

**Keywords:** CFT column, CFT column with built-in reinforcing bars, Ultra-high strength materials, Ultimate flexural strength  
 CFT 柱, 鉄筋内蔵型 CFT 柱, 超高強度材料, 曲げ終局強度

### 1. はじめに

超高層建築物の下層階の柱に適用することを目的として、 $F_c150N/mm^2$  級のコンクリートと  $780N/mm^2$  級の鋼材を用いたコンクリート充填鋼管(以下、CFT)構造および鉄筋内蔵型 CFT 構造の研究開発を行った。

鉄筋内蔵型 CFT 構造は図-1 のとおり CFT 構造の充填コンクリート部分に鉄筋を配筋した構造であり、CFT 構造に対して耐火性と経済性を高めた構造である。当社では 2006 年に「SuperCFT 工法」として第 3 者機関の構造評定を取得し(UHEC 評定-構 17007)、中高層建築物に適用してきた。

$F_c150N/mm^2$  級のコンクリートと  $780N/mm^2$  級の鋼材を用いた CFT 構造は日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針 (以下学会指針)」<sup>1)</sup>や新都市ハウジング協会「CFT 構造技術指針・同解説 (以下 CFT 指針)」<sup>2)</sup>の適用範囲外である。また、当社の取得した「SuperCFT 工法」の構造評定においても適用範囲外である。

既往の研究<sup>3)~5)</sup>には材料が高強度化した場合には従来の全塑性状態を想定した一般化累加強度ではなく、高強度コンクリートの脆性破壊や鋼管の局部座屈を考慮した耐力評価が必要との報告がある。

本報告は  $F_c150N/mm^2$  級のコンクリートと  $780N/mm^2$  級の鋼材を用いた CFT 構造および鉄筋内蔵型 CFT 構造の力学性能を把握するために行った実験についての報告であり、既往指針・文献の耐力・変形性能評価式の適用性を併せて検討した。

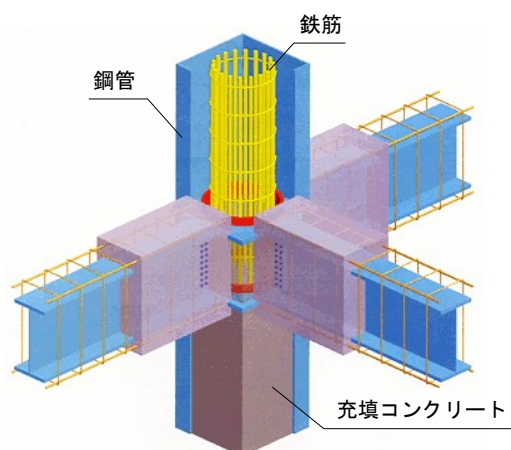


図-1 鉄筋内蔵型 CFT 構造 (SuperCFT)

表-1 試験体一覧

| 試験体名   | 断面<br>B×D<br>(mm) | 板厚<br>t<br>(mm) | 鋼種       | コンクリート<br>F <sub>c</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 主筋                | 補強筋                       |
|--------|-------------------|-----------------|----------|--|-------------------|---------------------------|
| CFT05  | 250<br>×<br>250   | 12              | SA440C-M | 150  | -                 | -                         |
| CFT06  |                   | 9               | H-SA700B | 150  |                   |                           |
| SCFT05 |                   | 9               | SA440C-M | 100  | 15-D13<br>(SD685) | U6.4@30<br>(SBPD<br>1275) |
| SCFT06 |                   | 9               | SA440C-M | 150  |                   |                           |
| SCFT07 |                   | 6               | H-SA700B | 150  |                   |                           |

\* 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

\*\* 戸田建設(株)本社構造設計部 修士(工学)

\*\*\* 戸田建設(株)技術研究所 博士(工学)

Technical Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.  
 Structural Design Dept., TODA CORPORATION, M.Eng.

Technical Research Institute, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

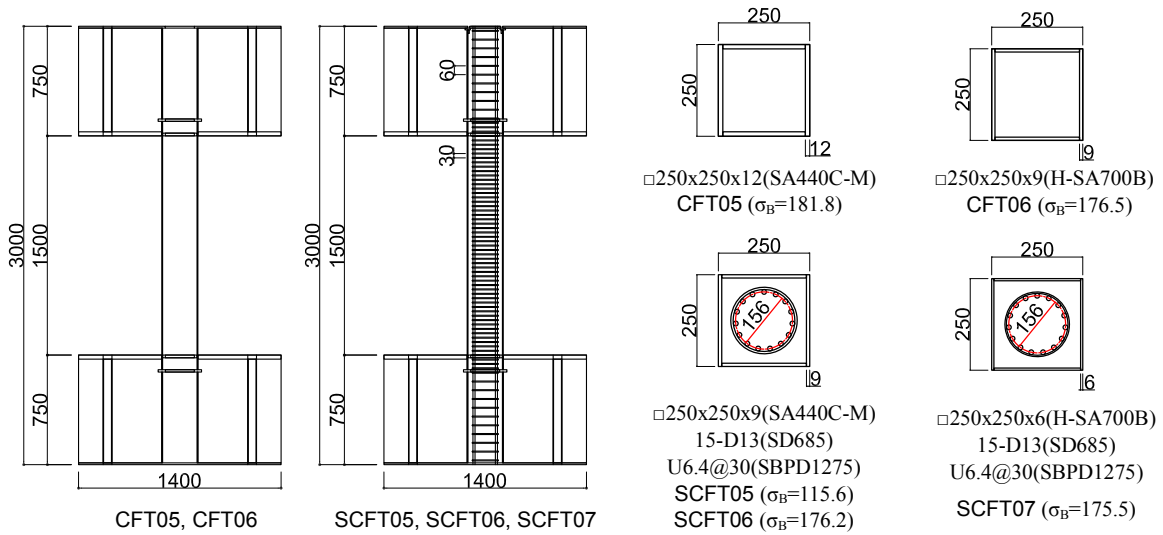


図-2 試験体形状

表-2 材料試験結果

| コンクリート | 割線剛性<br>( $\times 10^4 \text{N/mm}^2$ ) | 圧縮強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 鋼材 (鋼管・鉄筋)      | ヤング係数<br>( $\times 10^4 \text{N/mm}^2$ ) | 降伏強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 使用<br>試験体         |
|--------|---|-----------------------------|-----------------|--|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|
| CFT05  | 4.99                                    | 181.8                       | PL12 (SA440C-M) | 20.9                                     | 486                         | 600                         | CFT05             |
| CFT06  | 5.01                                    | 176.5                       | PL9 (SA440C-M)  | 20.9                                     | 507                         | 610                         | SCFT05,06         |
| SCFT05 | 4.37                                    | 115.6                       | PL9 (H-SA700B)  | 21.2                                     | 847                         | 892                         | CFT06             |
| SCFT06 | 4.92                                    | 176.2                       | PL6 (H-SA700B)  | 21.0                                     | 805                         | 847                         | SCFT07            |
| SCFT07 | 4.90                                    | 175.5                       | D13 (SD685)     | 19.0                                     | 785                         | 997                         | SCFT05,<br>06, 07 |
|        |   |                             | U6.4 (SBPD1275) | 20.3                                     | 1417                        | 1456                        |                   |

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体一覧を表-1に、試験体形状を図-2にそれぞれ示す。試験体は超高層建築物の下層階柱を対象としたCFT柱2体と鉄筋内蔵型CFT柱3体の合計5体である。縮尺は約1/3、座屈長さ $l_k$ を柱せいDで除した値 $l_k/D$ は6である。鋼管には柱幅 $B=250\text{mm}$ 、柱せい $D=250\text{mm}$ の角形鋼管を用いた。

CFT試験体の実験変数は鋼管の鋼種であり、CFT05試験体では建築構造用高性能 $590\text{N/mm}^2$ 鋼材(SA440材)を用い、CFT06試験体では建築構造用高強度 $780\text{N/mm}^2$ 鋼材(H-SA700材)を用いた。板厚はそれぞれ、12mm、9mmとした。コンクリートの設計基準強度は共通で $150\text{N/mm}^2$ とした。

鉄筋内蔵型CFT試験体は鋼管を薄くする代わりに充填コンクリート内に鉄筋を配置することでCFT試験体と鋼材断面積がほぼ同じになるように計画した。鉄筋は主筋15-D13(SD685)とせん断補強スパイラル筋U6.4@30(SBPD1275)で共通とした。

SCFT05、SCFT06試験体はCFT05試験体と同様に鋼管にSA440材を用い、板厚を9mmとした。コンクリートの設計基準強度はSCFT05試験体で $100\text{N/mm}^2$ 、SCFT06試験体で $150\text{N/mm}^2$ とした。

SCFT07試験体はCFT06試験体と同様に鋼管にH-SA700材を用い、板厚を6mmとした。コンクリートの設計基準強度は $150\text{N/mm}^2$ とした。

試験体で使用したコンクリートと鋼材の材料試験結果を表-2に示す。



写真-1 加力状況

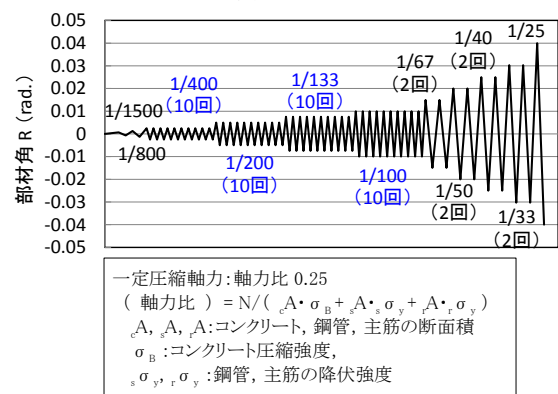


図-3 加力スケジュール



## 2.2 加力方法

加力状況を写真-1 に、加力スケジュールを図-3 にそれぞれ示す。中柱を想定して軸力比 0.25 の一定圧縮軸力を作用させながら、試験体中央部を反曲点とする逆対称曲げモーメントが生じるように水平加力した。加力は試験体の水平変形を内法高さ 1500mm で除した部材角  $R$  で制御する変位制御とし、 $R=\pm 1/1500\text{rad}$  から  $R=\pm 1/25\text{rad}$  まで正負漸増繰り返し加力を行った。長周期地震動による多数回繰り返し振動を想定して  $R=\pm 1/400\text{rad}$  から  $R=\pm 1/100\text{rad}$  までは繰り返し回数を 10 回とし、 $R=\pm 1/67\text{rad}$  以降の大変形では繰り返し回数を 2 回とした。SCFT05 試験体は加力装置の不備により  $R=1/50\text{rad}$  以降は正側のみの一方向単調荷重とした。

## 3. 実験結果

試験体 3 体の最終破壊状況を写真-2 に、全試験体の荷重-変形関係を図-4 にそれぞれ示す。図-4 には後述する平面保持を仮定した断面分割法による最大曲げモーメントを併記した。

CFT 試験体において、SA440 材を用いた CFT05 試験体は  $R=1/200\text{rad}$  に、H-SA700 材を用いた CFT06 は  $R=1/100\text{rad}$  にそれぞれ材端から  $0.6D$  の位置で圧縮側のフランジが圧縮降伏した。鋼管の降伏後も耐力は上昇し、 $R=1/50\text{rad}$  に材端から  $0.3\sim 0.4D$  の位置に充填コンクリートの膨らみによる局部座屈が発生して最大耐力となった。

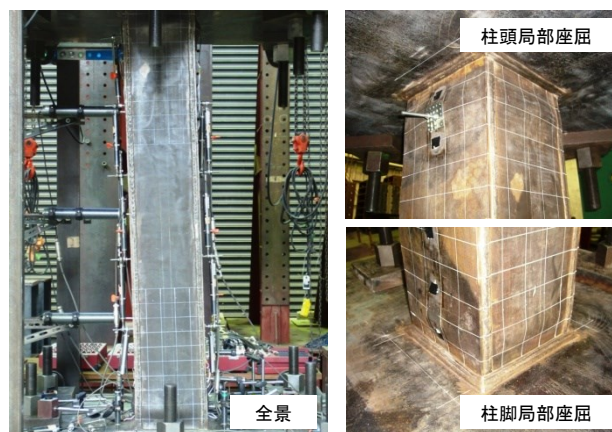
鉄筋内蔵型 CFT 試験体においても CFT 試験体と同様の破壊性状であった。SA440 材を用いた SCFT05、SCFT06 試験体は  $R=1/200\text{rad}$  に、H-SA700 材を用いた SCFT07 は  $R=1/100\text{rad}$  にそれぞれ材端から  $0.6D$  の位置で圧縮側のフランジが圧縮降伏した。鉄筋は  $R=1/67\text{rad}$  で圧縮降伏した。幅厚比の大きい SCFT07 試験体は  $R=1/67\text{rad}$  で局部座屈が確認され、その他の SCFT 試験体は  $R=1/50\text{rad}$  で局部座屈が確認された。局部座屈の発生位置は材端から  $0.3\sim 0.4D$  程度であった。

実験終了後に軸力を除荷して外観を確認したところ、全試験体において材端隅角部に短い亀裂が生じていた。この鋼管端部の亀裂によると見られる急激な耐力低下は荷重変形関係からは確認できず、実験結果に対する影響は小さいと考えられる。

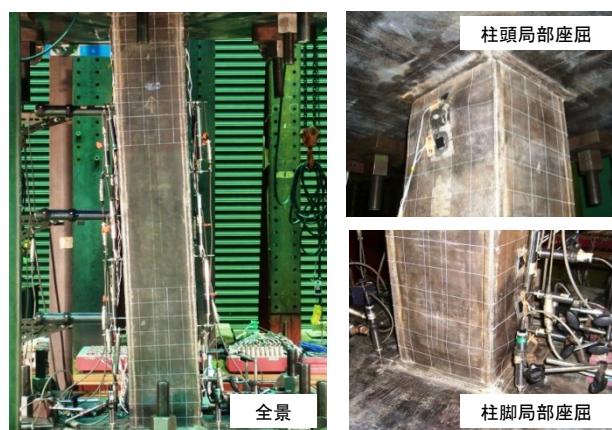
いずれの試験体においてもエネルギー吸収能力に富む紡錘形の履歴となり、特に鉄筋内蔵型 CFT 試験体は最大耐力以降の耐力低下が小さい傾向が見られた。また、鋼管の局部座屈以降は軸変形が累積していくが、鉄筋内蔵型 CFT 試験体では CFT 試験体に比べて各サイクルの軸変形が小さく抑えられていた。これらの鉄筋内蔵型 CFT 試験体の特長は、柱断面中央のコンクリートが鉄筋により拘束されて脆性的な破壊を抑制している効果と考えられる。

## 4. 耐力評価

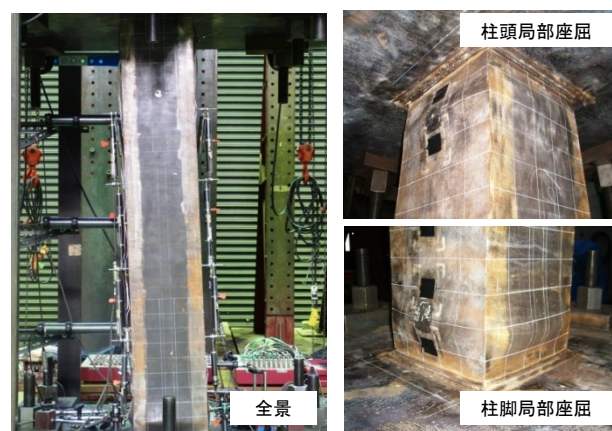
本実験で使用した材料は SA440 材を除いて学会指針や CFT 指針の適用範囲外であるが、耐力算定式の



(a) CFT06 ( $R=-1/33\text{rad}$ . 終了時)



(b) SCFT06 ( $R=-1/25\text{rad}$ . 終了時)



(c) SCFT07 ( $R=-1/25\text{rad}$ . 終了時)

写真-2 最終破壊状況

適用性を検討した。耐力算定には学会指針に示されている全塑性状態を仮定した累加強度 ( $=M_{\text{cal1}}$ ) とそれに CFT 指針のコンファインド効果を考慮した累加強度 ( $=M_{\text{cal2}}$ )、学会指針や文献<sup>3)</sup>に示されているストレスブロックを仮定した累加強度 ( $=M_{\text{cal3}}$ )、平面保持を仮定した断面分割法による強度 ( $=M_{\text{cal4}}$ ) を使用した。鉄筋内蔵型 CFT 試験体の累加強度において鉄筋は等価な断面積を有する円形鋼管に置換して累加した。また、文献<sup>6)</sup>に示されているように本実験のような曲げせん断実験では材端スタブの拘束により柱の危険断面位置が材中央寄りに移動して見かけ上の曲げ耐力が上昇するため、計算値に対して実験値が大きくなる傾向がある。ここでは材端から  $D/2$  ( $D$  :

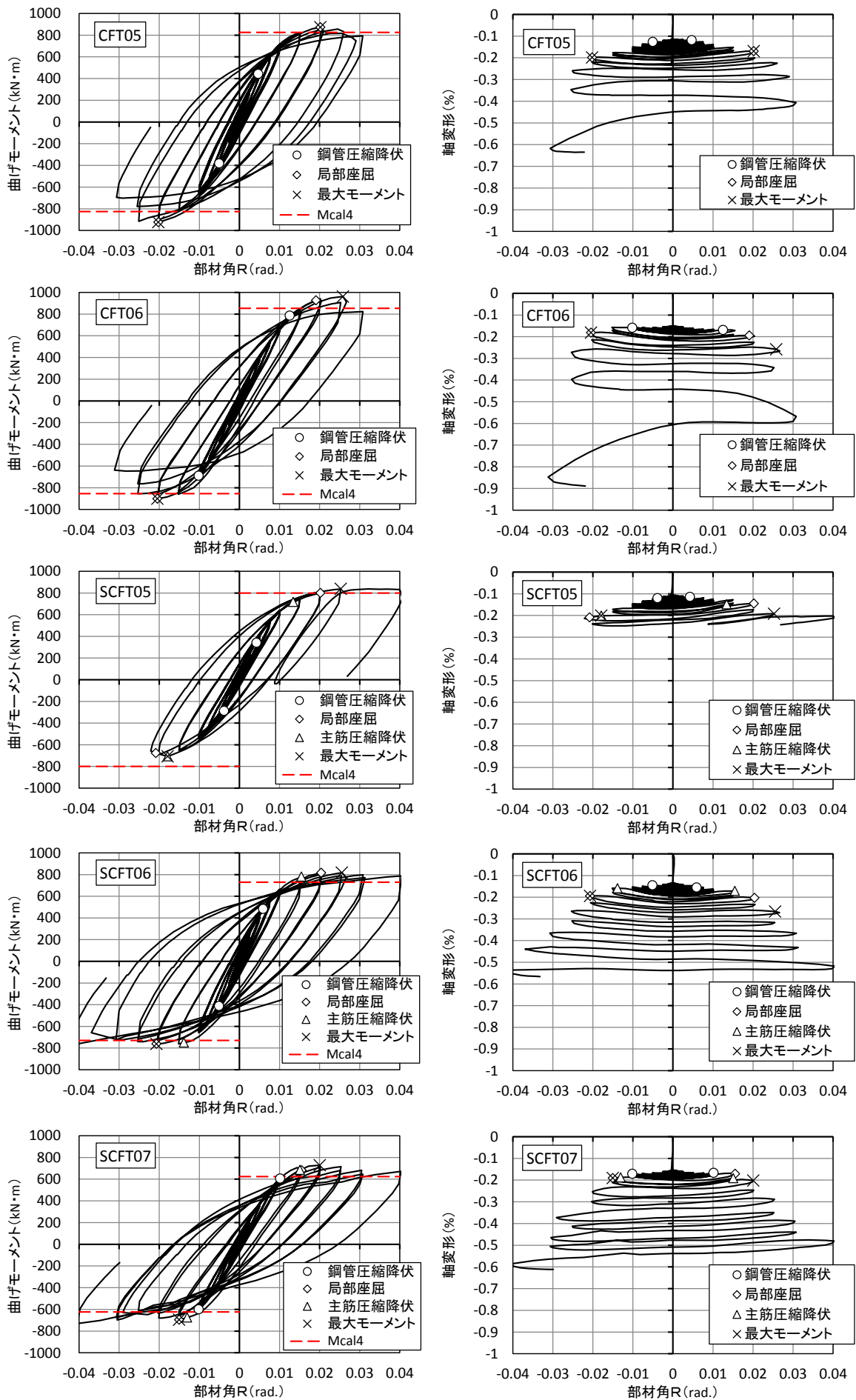


図-4 荷重-変形関係

柱せい) を危険断面位置として仮定し、次式により各計算値を材端の曲げモーメントに変換した。

$$M_{calN} = \frac{L}{L-D} \cdot M_{calN\_original} \quad (1)$$

ここで、 $M_{calN}$ ：材端曲げモーメント計算値  
 $M_{calN\_original}$ ：各算定式による計算値  
 L：柱内法高さ  
 D：柱せい

断面分割法における各材料モデルの応力-ひずみ関係は以下のようにモデル化した。充填コンクリートと鋼管の応力-ひずみ関係を図-5 に示す。

(a) 充填コンクリート

通常強度の CFT 構造では鋼管の拘束効果によりコンクリートの圧縮強度の上昇および最大強度後の耐力低下が緩和される。しかし、文献<sup>4), 5)</sup>によると本実験のような  $F_c 150N/mm^2$  級のコンクリートと  $780N/mm^2$  級の鋼管の組み合わせでは鋼管の拘束効果による圧縮強度の上昇はほとんど見られないこと、最大強度後の耐力低下は円形鋼管では緩やかになるが、角形鋼管では急激に低下することが確認されている。そのため、本実験では SCFT05 試験体を除いて鋼管内の充填コンクリートは脆性的な破壊を模擬するためにプレーンコンクリートとしてモデル化した。また、鉄筋内蔵型 CFT 試験体においてせん断補強スパイラル筋内の充填コンクリートは、スパイラル筋およびその外部のコンクリートに拘束されているため、コンファインドコンクリートとしてモデル化した。両モデル化には文献<sup>4)</sup>で紹介されている六車渡邊モデルの修正式<sup>7)</sup>を用いた。 $F_c 100N/mm^2$  級のコンクリートと  $540N/mm^2$  級の鋼管の組み合わせである SCFT05 試験体の鋼管内の充填コンクリートは NewRC 式<sup>8)</sup>によるコンファインドコンクリートとしてモデル化した。

(b) 鋼管

鋼管のモデル化にはひずみ硬化による耐力上昇と局部座屈による耐力低下を考慮したマルチリニアモデル<sup>9)</sup>を用いた。一般化幅厚比の大きさによって、ひずみ硬化の影響がある領域 (Area-1)、局部座屈の影響がある領域 (Area-3)、その中間の領域 (Area-2) に分類されてそれぞれモデル化される。

(c) 鉄筋

内蔵された主筋のモデル化にはひずみ硬化を考慮したマルチリニアモデルを用いた。

最大耐力の実験値と計算値の比較を表-3 と図-6 に示す。図-6 には既往文献<sup>10)</sup>の実験結果を併記した。全塑性状態を仮定した  $M_{cal1}$ 、 $M_{cal2}$  は、実験値をやや大きく評価している。実験値と計算値の比は SCFT05 試験体で 1.09、SCFT07 試験体で 0.77 となり、鋼管とコンクリートが高強度材料の組合せになるほど実験値を過大評価する傾向がある。これは高強度材料の組合せではコンクリートの脆性的な破壊や鋼管の座屈によって、 $M_{cal1}$ 、 $M_{cal2}$  で仮定している全塑

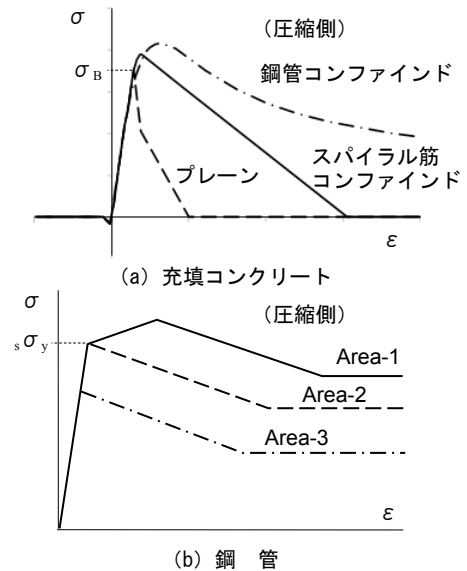


図-5 各種材料の応力-ひずみ関係 (断面分割法)

表-3 実験値と計算値の比較

|        | 実験値<br>(kN・m) | $M_{cal1}$<br>(kN・m) | $M_{cal2}$<br>(kN・m) | $M_{cal3}$<br>(kN・m) | $M_{cal4}$<br>(kN・m) |
|--------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| CFT05  | 873           | 902<br>(0.97)        | 931<br>(0.94)        | 770<br>(1.13)        | 825<br>(1.06)        |
| CFT06  | 962           | 1126<br>(0.85)       | 1161<br>(0.83)       | 975<br>(0.99)        | 854<br>(1.13)        |
| SCFT05 | 838           | 768<br>(1.09)        | 792<br>(1.06)        | 692<br>(1.21)        | 799<br>(1.05)        |
| SCFT06 | 818           | 875<br>(0.93)        | 895<br>(0.91)        | 738<br>(1.11)        | 730<br>(1.12)        |
| SCFT07 | 727           | 940<br>(0.77)        | 956<br>(0.76)        | 740<br>(0.98)        | 624<br>(1.17)        |

$M_{cal1}$ ：「学会指針」に示されている全塑性状態を仮定した累加強度  
 $M_{cal2}$ ：「CFT 指針」のコンファインド効果を考慮した累加強度  
 $M_{cal3}$ ：「学会指針」や文献<sup>3)</sup>に示されているストレスブロックを仮定した累加強度  
 $M_{cal4}$ ：平面保持を仮定した断面分割法による強度

( ) 内の数値は (実験値) / (計算値) である

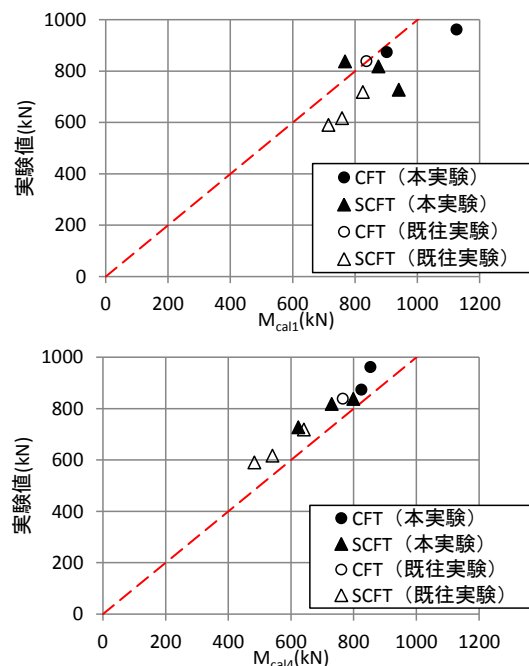


図-6 実験値と計算値の比較



性状とならないためであると考えられる。

一方でコンクリートの応力-ひずみ関係や鋼管の座屈による耐力低下を考慮した  $M_{cal3}$ ,  $M_{cal4}$  は実験値を適切に評価している。実験値と計算値の比の平均はいずれも約 1.1 となるが、断面分割法を用いた  $M_{cal4}$  の方がバラツキは小さく精度よく算定されている。

### 5. 変形性能評価

限界部材角の実験値と計算値の比較を図-7 に示す。実験値はせん断力が最大耐力以降で 5% 低下した点を限界部材角とした。計算値は適用範囲外の材料強度となるが、以下の学会指針式 (2) と CFT 指針式 (3) により算出した。

$$\left. \begin{aligned} A_U R_u &= \frac{1}{0.15 + 3.79 \cdot N/N_0} \cdot \frac{t}{B} \cdot \beta \\ \beta &= 1.0 - \frac{\sigma_B - 40.3}{566} \leq 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{FT} R_u &= \left\{ 3.25 - 5.0 \cdot \left( \frac{N}{N_0} \right) + 800 \cdot \eta \cdot \left( \frac{t}{B} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{325}{s \sigma_y}} \right\} / 100 \\ \eta &= \frac{1}{3} \cdot \left( 4.0 - \frac{F_c}{39} \right) \leq 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

記号の説明は各文献参照とし、ここでは省略する。ただし、本実験のコンクリート強度では CFT 指針式におけるコンクリート強度による低減係数  $\eta$  が負値となる。図-7 (c) に示すように等価幅厚比の逆数と限界部材角実験値の関係から下限値を求めると  $\eta = 0.3$  となるため、 $\eta$  の算定式に以下のように下限値を設定した。

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \left( 4.0 - \frac{F_c}{39} \right), \quad 0.3 \leq \eta \leq 1.0 \quad (4)$$

実験値と計算値の比較により、ばらつきはあるものの限界部材角算定式は実験値を平均的に評価できている。学会指針において実験値と (2) による計算値の比の平均値は 1.21 とされているため、材料強度が適用範囲外であるものの両計算式とも推定精度は同程度と考えられる。

### 6. まとめ

$F_c 150 \text{N/mm}^2$  級のコンクリートと  $780 \text{N/mm}^2$  級の鋼材を用いた CFT 構造および鉄筋内蔵型 CFT 構造の研究開発を行った。柱部材実験により以下の結論を得た。

- 1) 荷重変形関係はエネルギー吸収能力に富む紡錘形の履歴となり、特に鉄筋内蔵型 CFT 試験体は最大耐力以降の耐力低下が小さい傾向が見られた。
- 2) 鉄筋内蔵型 CFT 試験体では CFT 試験体に比べて鋼管の局部座屈以降の軸変形が小さく抑えられており、柱中央に位置するスパイラル筋により拘束されたコンクリートが脆性的な破壊を抑制している効果と考えられる。
- 3) 高強度の鋼管とコンクリートを組合せる場合には全塑性状態を仮定すると最大耐力を過大評価

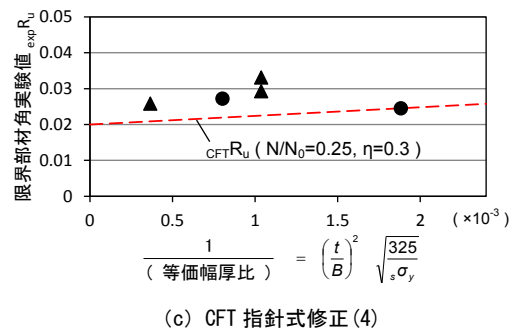
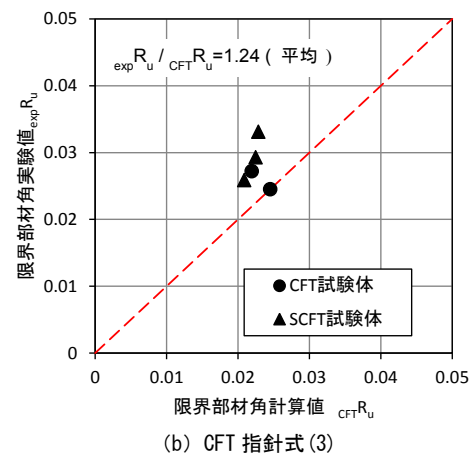
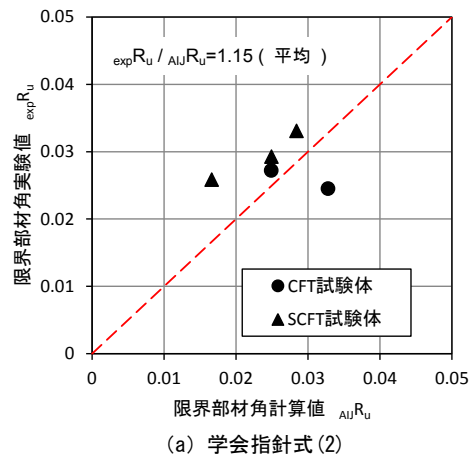


図-7 限界部材角実験値と計算値の比較

するため、コンクリートの脆性的な破壊や鋼管の座屈を考慮した計算によって最大耐力を評価する必要がある。

- 4) 材料強度は適用範囲外となるが、限界部材角実験値は学会指針の算定式で従来強度同様に評価可能である。

### 謝辞

本報告は株式会社駒井ハルテック、JFEスチール株式会社との共同研究で実施された実験の結果をまとめたものである。ここに関係各位に謝意を表する。

### 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」, 2008.10
- 2) 新都市ハウジング協会 「CFT 構造技術指針・同解説」, 2000.8

- 3) 中原浩之, 崎野健治 「高強度材料を用いたコンクリート充填角形鋼管柱の単調曲げ性状」, 日本建築学会構造系論文集, 第 567 号, pp.181-188, 2003.5
- 4) 松本修一他 「超高強度材料を用いた CFT 柱の構造性能 その 2 曲げせん断実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.1219-1220, 2009.8
- 5) 鈴木康正他 「超高強度コンクリート充填鋼管 (CFT) 柱」, 大林組技術研究所報, No.74, 2010
- 6) 佐藤孝典 「円形 CFT 柱の曲げ終局耐力の提案式とその精度検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.775-776, 1995.8
- 7) 小室努他 「100~180N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の圧縮特性」, 日本建築学会構造系論文集, 第 577 号, pp.77-84, 2004.3
- 8) 建設省総合技術開発プロジェクト・コンファインドコンクリート WG 「平成 4 年度 New RC 研究開発概要報告書」, pp.3-2-79 - 3-2-80, 1993.3
- 9) 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, pp.817-822, 1998
- 10) 菊田繁美他 「鉄筋内蔵型鋼管コンクリート構造の研究開発」, 戸田建設技術研究報告, 29 号, 2003