

## 6) ECMセメントを用いたコンクリート充填鉄筋内蔵薄肉円形鋼管柱 (CFT) の力学性状

### 6) Static Performance of Concrete-Filled Steel Thin Tube Column (CFT) Including Reinforcing Steel Bars Using ECM Cement

平出 亨 Tooru Hirade\*<sup>1</sup>

米澤 敏男 Toshio Yonezawa\*<sup>2</sup>

和地 正浩 Masahiro Wachi\*<sup>3</sup>

金子 洋文 Hirofumi Kaneko\*<sup>4</sup>

#### 梗概

CO<sub>2</sub>発生量削減を目的として、高炉スラグ微粉末を多量に含有させた新開発セメントを用いたコンクリート充填円鋼管造柱に対し、軸力曲げせん断実験を実施し、全塑性曲げ耐力、限界部材角、およびせん断耐力を検討した。本実験の範囲内においては普通ポルトランドセメント試験体との有意な差は認められず、耐力、ならびに変形能力は、準用した既往式を設計に用いて評価できることを示した。

**キーワード：**鉄筋内蔵薄肉円形CFT、スパイラル鋼管、全塑性曲げ耐力、せん断耐力

#### Summary

All plasticity bending strength, the limit rotation, and the shear strength were confirmed to the concrete filling steel pipe make pillar where newly developed cement to contain the ground granulated blast furnace slag voluminosely to reduce the CO<sub>2</sub> generation amount had been used by the axial tension bend shearing experiment. The past that was not admitted, and applied correspondingly type gave the proof strength and the transformation ability evaluation on the safety side to a significant difference with the usual portland cement examination body in the range of the actual experiment.

**Keywords:** CFT including Reinforcing Bars, spiral tube, plastic bending moment, shear strength

## 1 はじめに

通常の高炉スラグ微粉末を60%含有する高炉セメントB種を用いたコンクリートの初期強度が低いこと、並びに中性化速度が速いことは、(その1)で指摘しているが、コンクリート充填鋼管(CFT)柱の構造性能に対し、殆んど問題にならない。これはCFT柱の特徴である型枠・支保工の脱型が不要、並びに外部鋼管により内部コンクリートは殆んど大気中のCO<sub>2</sub>から遮蔽されていることが理由である。

本報告においては、同様に高炉スラグ微粉末を60%含有させたECMセメントを鉄筋内蔵薄肉円形CFT造柱に採用し、曲げ耐力と変形能力、およびせん断耐力について、軸力曲げせん断実験により確認した結果を報告する。ここではECMセメントと普通ポルトランドセメントを充填コンクリートに用いたCFT柱の力学性状の相違に着目した。

## 2 実験計画

### 2.1 試験体

Fig.1に試験体を示す。曲げ耐力と変形能力を検討する試験体No.1, 2, 3の鋼管は径厚比102のφ600×5.89, STK400スパイラル管である。なお、この径厚比102は学会CFT指針<sup>1)</sup>が規定する許容最大径厚比150以下であるが、建築基準法が規定する許容最大径厚比50を超えている。下部に載荷装置としてのスタブを有する逆T字形スパン2100mm片持柱試験体(Fig.1a)にて鋼管とスタブとの収まりは「スタブフランジ通し」(SN490B-t32上フランジに

\*1 技術研究所 研究主任 Associate Chief Researcher, Research & Development Institute

\*2 技術研究所 リサーチフェロー Ph.D Research Fellow, Research & Development Institute, Ph.D.

\*3 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute

\*4 技術研究所 主席研究員 工学博士 Senior Chief Researcher, Research and Development Institute, Dr. Eng.

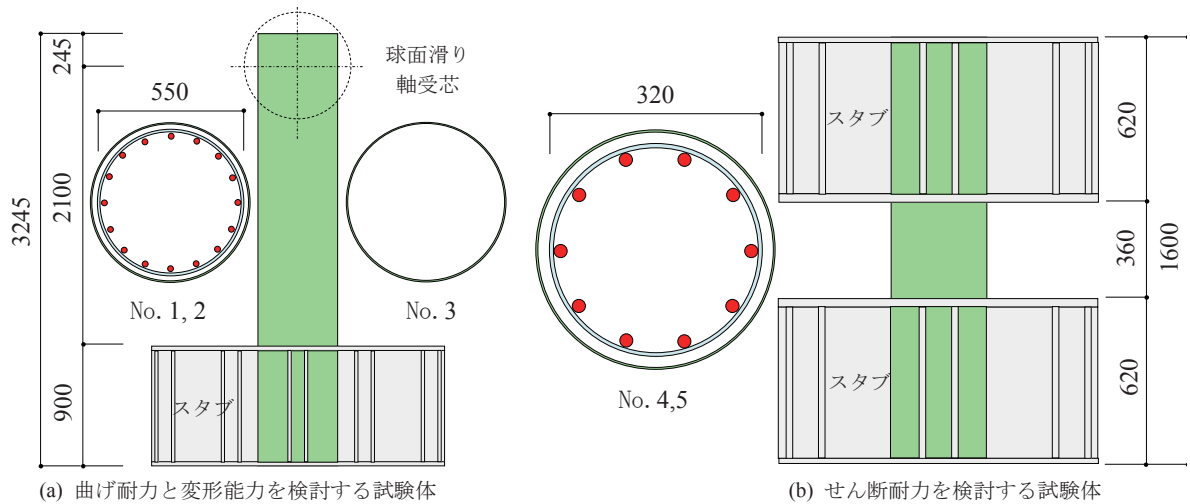


Fig. 1 試験体形状  
Specimen

φ570mm穴明)とし、スタブフランジとスパイラルシーム溶接交差部は最大曲げモーメント断面最外縁に設けられた。

鉄筋を内蔵する主な目的は、軸方向筋をCFT柱の断面の全塑性曲げ耐力に寄与させるため、並びにフープ筋によりCFT柱の部材の限界部材角を大きくさせるためである<sup>2)</sup>。試験体No.1, 2の内蔵軸方向筋比 $p_g = 2.3\%$ 、帯筋比 $p_w = 0.7\%$ は実務設計において想定する標準的な値である。

CFT柱梁接合部仕口を対象とする、せん断耐力を検討するための試験体No.4,5の鋼管は上下スタブ付工形の柱通し形式であり、t3.2平鋼板からφ360mmに1シーム製管(製管後径厚比119)とした。ここに仕口内法高さ $s_b d = 360\text{mm}$ 、 $p_g = 2.9\%$ 、 $p_w = 0.4\%$ 、 $n = 0.6$ である。

全ての試験体の内蔵軸方向筋はSD490スタブ内180°フック定着、帯筋はSD295A溶接閉鎖形である。

Table 1に試験体一覧を示す。落とし込み充填されたF<sub>60</sub>コンクリートのセメントはTable 3に示すECMセメント(ECM-B)、並びに比較検討用の普通セメント(No.2, 4)である。試験体No.1, 2, 3の軸力比(分母に鉄筋除く) $n = 0.4$ は塑性中立軸位置をほぼ断面図心とする値である。

Table 1 試験体一覧  
Specimen list

| 試験体 | 想定破壊形式 | 鋼管          | 鉄筋                  | コンクリート | 軸力比 |
|-----|--------|-------------|---------------------|--------|-----|
| 1   | 曲げ破壊   | φ600 × 5.89 | 16-D22,<br>D10@37.5 | 高炉     | 0.4 |
| 2   |        |             |                     | 普通     |     |
| 3   |        |             | 無筋                  | 高炉     |     |
| 4   | せん断破壊  | φ360 × 3.03 | 10-D19,<br>D6@50    | 高炉     | 0.6 |
| 5   |        |             |                     | 普通     |     |

注) 高炉: 高炉スラグ高含有ECMセメントコンクリート  
普通: 普通ポルトランドセメントコンクリート

Table 2 鋼材の試験結果  
Steel property

|       | $\sigma_y$        | $\sigma_u$ | YR | 伸  |
|-------|-------------------|------------|----|----|
|       | N/mm <sup>2</sup> |            | %  | %  |
| φ 600 | 451               | 533        | 85 | 34 |
| φ 360 | 314               | 466        | 67 | 36 |
| t32   | 380               | 546        | 70 | 29 |
| D22   | 536               | 705        | 76 | 13 |
| D19   | 552               | 732        | 75 | 13 |
| D10   | 375               | 542        | 69 | 19 |
| D6    | 342               | 499        | 69 | 17 |

注) 鋼管のT.P.は軸方向

Table 3 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの調合  
Mixture of concrete with high content of blast-furnace slag

| W/C   | 空気量  | 細骨材率  | 単位量 (kgw/m <sup>3</sup> ) |     |                |                |     |
|-------|------|-------|---------------------------|-----|----------------|----------------|-----|
|       |      |       | W                         | C   | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | G   |
| 31.5% | 4.5% | 44.3% | 165                       | 524 | 566            | 144            | 920 |

注) W: 水, C: 高炉スラグ微粉末(比表面積6000cm<sup>2</sup>/gクラス)を60%含有した新規開発セメント, S<sub>1</sub>: 山砂, S<sub>2</sub>: 石灰砕砂, G: 粗骨材(石灰砕石)

Table 2, 4に材料試験結果を示す。使用材料は、試験体No.1, 2, 3の鋼管はSTK490のスパイラル管、ダイヤフラムはSN490Bである。試験体No.4, 5の鋼管はSS400、鉄筋はSD490、並びにSD295Aである。

## 2.2 加力・計測方法

Fig. 2に加力装置を示す。加力方法は建研式加力装置を用い、定軸力正負交番漸増繰返し载荷するものである。加力装置の梁上軸力ジャッキのスライダの転がり抵抗の計測値は面圧の0.5%である。柱せん断力 $Q$ は载荷水平力からこの転がり抵抗分を減じた値である。

試験体No.1, 2, 3には既往の文献3) が示す载荷パターンを用いた。

建研式梁下・試験体柱頭に設けた球面すべり軸受け<sup>2)</sup>のすべり抵抗値(面圧の0.7%)からFig.2左上に示す[反曲点~スタブフェイス間距離 $H$ ]を求めた。

試験体No.4, 5の载荷パターンは部材角0.2, 0.4, 0.6, 0.8 $\times$ 1/1000において各1回, 1, 2, 3, 4, 5, 6.67, 10 $\times$ 1/1000において各2回である。

Table 4 コンクリートの試験結果  
Concrete property

| 試験体名 | 弾性係数              | 圧縮強度       | $\sigma_B$ 時歪    | ポアソン比 |
|------|-------------------|------------|------------------|-------|
|      | $E_c$             | $\sigma_B$ | $\epsilon_B$     | $\nu$ |
|      | N/mm <sup>2</sup> |            | 10 <sup>-6</sup> | (-)   |
| 1    | 38160             | 68.5       | 2347             | -     |
| 2    | 40370             | 75.8       | 2595             | -     |
| 3    | 37000             | 67.1       | 2374             | -     |
| 4    | 37567             | 65.7       | 2241             | 0.245 |
| 5    | 38700             | 74.1       | 2533             | 0.206 |

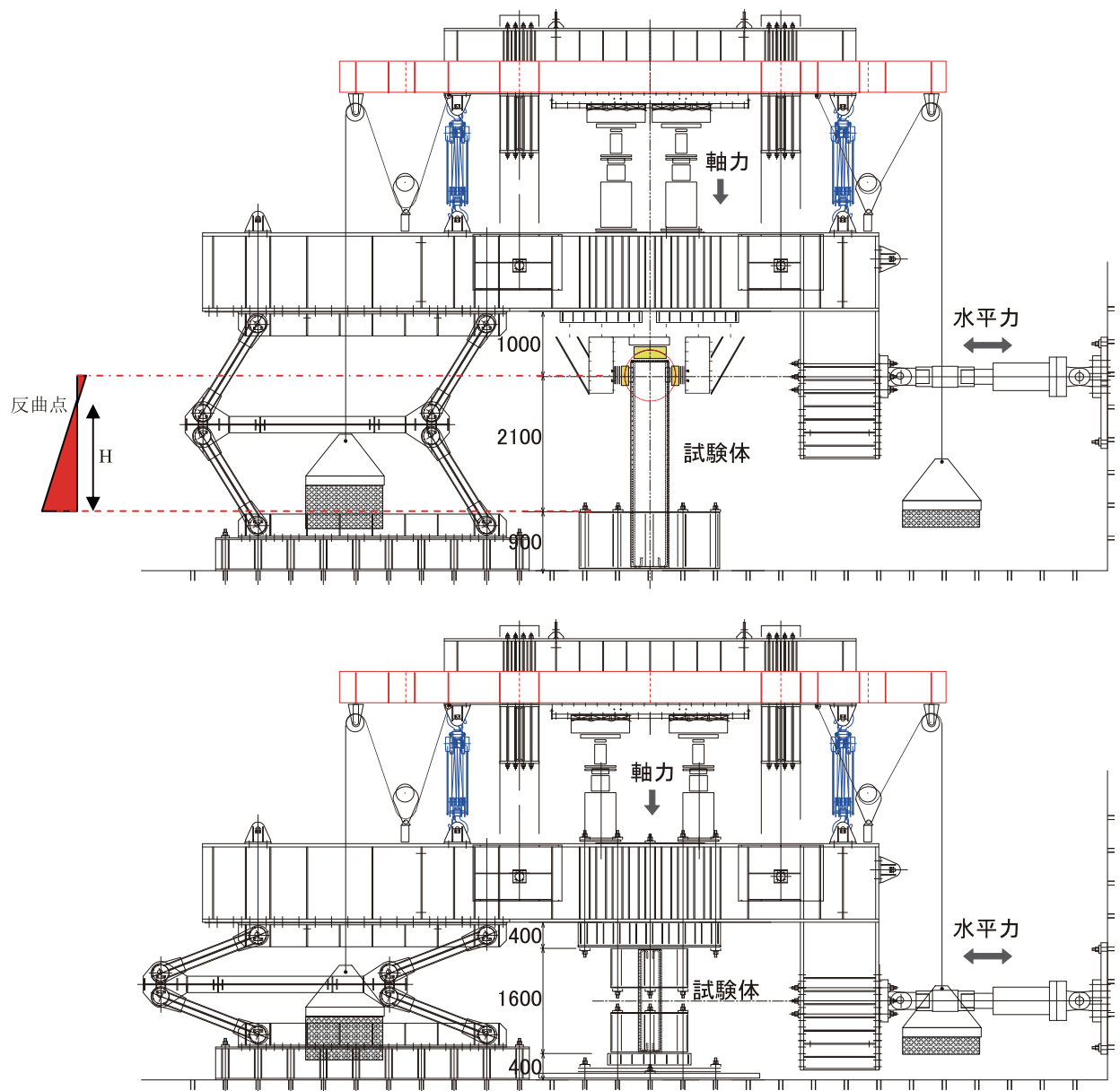
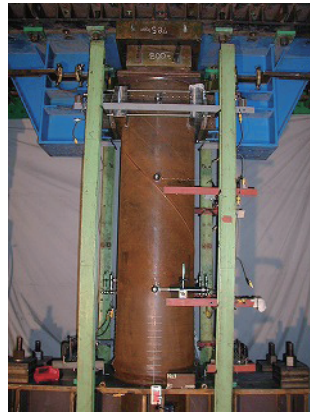


Fig.2 加力方法  
Loading system



(a)曲げ試験体(No.1)



(b)せん断試験体(No.4)

Photo 1 変位計測装置  
Displacement measurement system

Photo 1に変位計測装置を示す。剛体仮定のスタブを基準とした部材角 $R$ を変位計にて計測した。

### 3 実験結果, および考察

#### 3.1 破壊経過

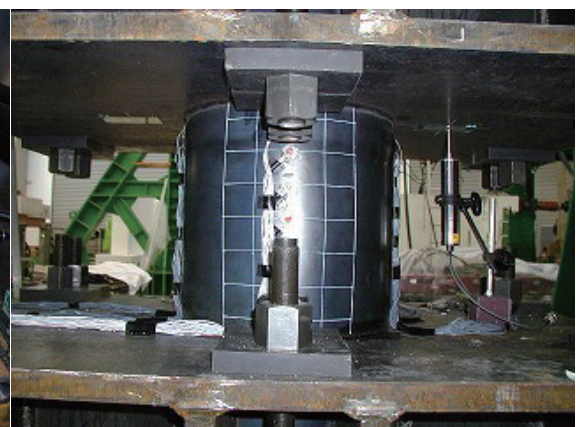
試験体No.1, 2, 3は通常の鉄筋内蔵円形CFTと同様の破壊経過を示した。すなわち鋼管・軸方向鉄筋の降伏後, CFT断面の全塑性耐力にほぼ到達し, 部材の危険断面近傍において鋼管に局部座屈が発生, 概ね全塑性耐力を保持したまま変形が進行する, というものである。Photo 2aに最終破壊状況を示す。

試験体No.4, 5は鋼管がMisesの降伏応力に到達した後, フープ筋が降伏し, 最大せん断耐力実験値が発現, その後存在せん断力が急激に低下した。Photo 2bに最終破壊状況を示す。目視による外観からはせん断破壊の性状は認められないが, 後述する荷重-変形関係から存在せん断力が急激に低下した後の残存せん断力が殆んどないことがわかる。このことは内部コンクリートがせん断破壊していることを示している。

ECMセメントと普通ポルトランドセメントとの間には有意差は認められなかった。



(a)曲げ試験体(No.1)



(b)せん断試験体(No.4)

Photo 2 最終破壊状況  
Ultimate failure mode

#### 3.2 耐力と変形能力

Table 5に実験結果一覧を示す。曲げ破壊用試験体の実験値はスタブフェイスにおける最大曲げモーメント $M_{max}$ , および $M_{max}$ 時の存在圧縮軸力 $N$ である。計算値 $M_p$ は鋼管, コンクリート, および軸方向筋による全塑性曲げモーメントであり, 同評価用のコンクリート強度低減係数 $r_u$ 値に1が, 拘束効果評価用の鋼管の円周方向応力に $0.3\sigma_y$ が, 拘束係数値に4が仮定された。これは通常の円形CFTの全塑性耐力計算値<sup>4)</sup>に軸方向鉄筋の寄与が単純に加算された値である。

Table 5 実験結果一覧  
Experiment result list

| 試験体名 | 加力方向 | 最大曲げモーメント        |       |      |     |      |                |      | 限界部材角       |             |                          |
|------|------|------------------|-------|------|-----|------|----------------|------|-------------|-------------|--------------------------|
|      |      | 実験値              |       |      | 計算値 |      |                |      | 実<br>／<br>計 | 験<br>力<br>向 | 力<br>R <sub>u</sub><br>% |
|      |      | M <sub>max</sub> | N     | H    | 体   | 向    | M <sub>p</sub> |      |             |             |                          |
|      |      | kNm              | kN    | mm   | mm  | kNm  | kNm            |      |             |             |                          |
| 1    | 正    | 2834             | 9438  | 2000 | 306 | 1306 | 2752           | 1.03 | 2.63        | 2.49        | 1.06                     |
|      | 負    | 2933             | 9455  | 1999 | 305 | 1309 | 2752           | 1.07 | 2.81        | 2.49        | 1.13                     |
| 2    | 正    | 3124             | 10280 | 2000 | 307 | 1425 | 2871           | 1.09 | 2.74        | 2.34        | 1.17                     |
|      | 負    | 2996             | 10260 | 1997 | 307 | 1425 | 2871           | 1.04 | 2.78        | 2.35        | 1.19                     |
| 3    | 正    | 2182             | 9273  | 1975 | 310 | 1319 | 2228           | 0.98 | 1.90        | 1.24        | 1.52                     |
|      | 負    | 2166             | 9277  | 1972 | 310 | 1319 | 2228           | 1.00 | 1.91        | 1.24        | 1.54                     |

| 試験体 | 加力方向 | 最大せん断力           |      |                |             |
|-----|------|------------------|------|----------------|-------------|
|     |      | 実験値              |      | 計              | 実<br>／<br>計 |
|     |      | Q <sub>max</sub> | N    | Q <sub>u</sub> |             |
|     |      | kN               | kN   | kN             |             |
| 4   | 正    | 1572             | 4533 | 1325           | 1.19        |
|     | 負    | 1482             | 4524 | 1325           | 1.05        |
| 5   | 正    | 1650             | 5060 | 1385           | 1.19        |
|     | 負    | 1656             | 5072 | 1385           | 1.20        |

注) Q<sub>u</sub>:旧学会指針式<sup>3)</sup>を $\sigma_{sd}$ にて除し $\rho_w \cdot \sigma_y \cdot A$ を加算した式値,  $\sigma_y$ :帯筋の降伏強度, A:コンクリート断面積

注) 拘束効果によるコンクリート強度加算分  $\Delta f_c = 10.8 \text{ N/mm}^2$ ,  $x_n$ :中立軸から圧縮縁までの距離,  
M<sub>p</sub>:M<sub>u</sub>の内コンクリート負担分, M<sub>p</sub>:全塑性耐力, R<sub>u</sub>計算値:No.1, 2に関しては小田島式<sup>2)</sup>値,  
No.3に関しては現学会指針式<sup>6)</sup>値

Table 5によれば  $[M_{\text{max}} \text{実} / M_{\text{p}} \text{計}]$  は0.97~1.09でありセメントの種類・内蔵鉄筋の有無に関わらずほぼ全塑性曲げ耐力の発現が認められた。Fig.3に荷重－変形関係を示す。図中の赤破線が計算値である。

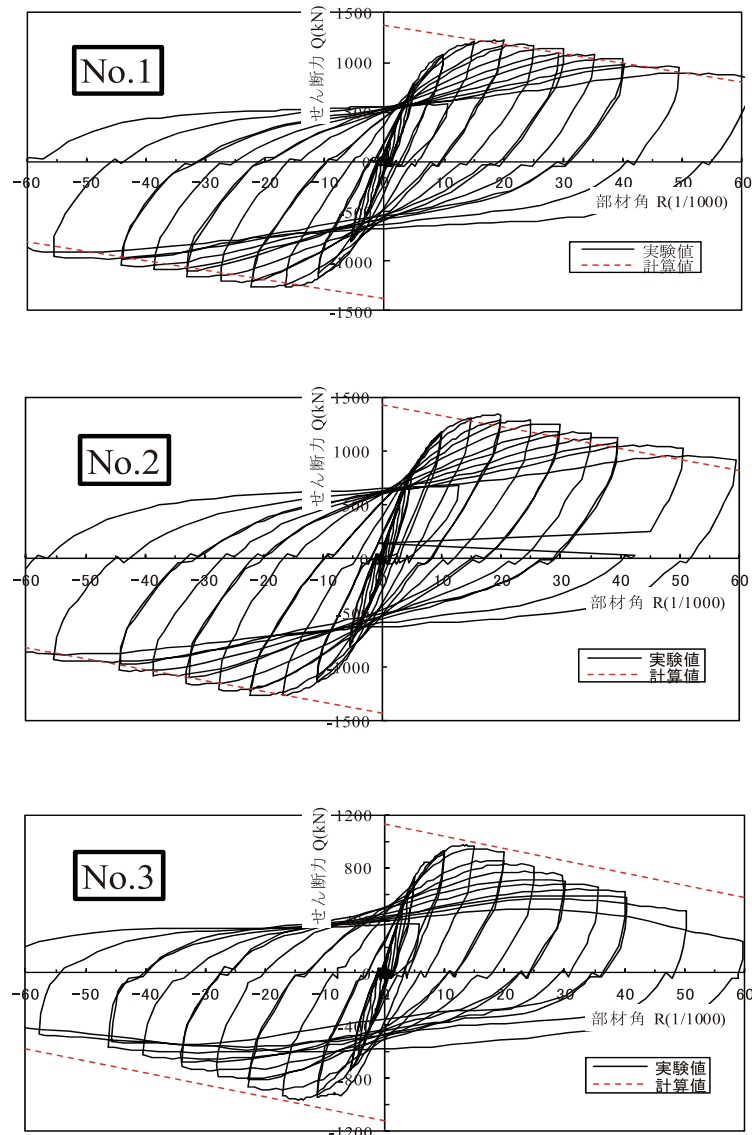


Fig. 3 せん断力－部材角関係 (No.1, 2, 3)  
Shear Force - rotation relation (No.1, 2, 3)

No.1の「実／計」において正側載荷側と負側載荷側の平均値はNo.2値とほぼ一致（差約1.7%）した。Fig.3のQ-R関係にてNo.1, 2の履歴ループは良好な紡錘形， $R = \pm 60/1000$ まで全塑性耐力を保持しておりECMセメントと普通セメントとの間には有意差は無い。

限界部材角 $R_u$ 実験値は $0.95Q_{max}$ 時部材角，No.1, 2の計算値は鉄筋内蔵薄肉円形CFT用の設計式<sup>2)</sup>（付1参照）による値である。Table 5によればNo.1, 2の「 $R_u$ 実／ $R_u$ 計」は1.05～1.19であり，セメントの種類にかかわらず $R_u$ 設計式<sup>2)</sup>は安全側の変形性能評価を与えた。No.1の「 $R_u$ 実／ $R_u$ 計」正負平均値はNo.2値よりも約8.6%小さい。

Fig.4に仕口せん断破壊対応試験体No.4, 5の荷重－変形関係を示す。計算値 $Q_u$ は旧学会CFT指針式<sup>5)</sup>に鉄筋コンクリート仕口の帯筋の影響を累加した式による値である。Table 5によれば「 $Q_{max}$ 実／ $Q_u$ 計」は1.05～1.20であり，セメントの種類にかかわらず準用された既往式は安全側に仕口のせん断耐力を評価している。No.4の「実／計」において正側載荷側と負側載荷側の平均値はNo.5値よりも約9.4%小さいが，No.1, 2の $R_u$ と共にFig.4からは両者の有意差は断定されない。

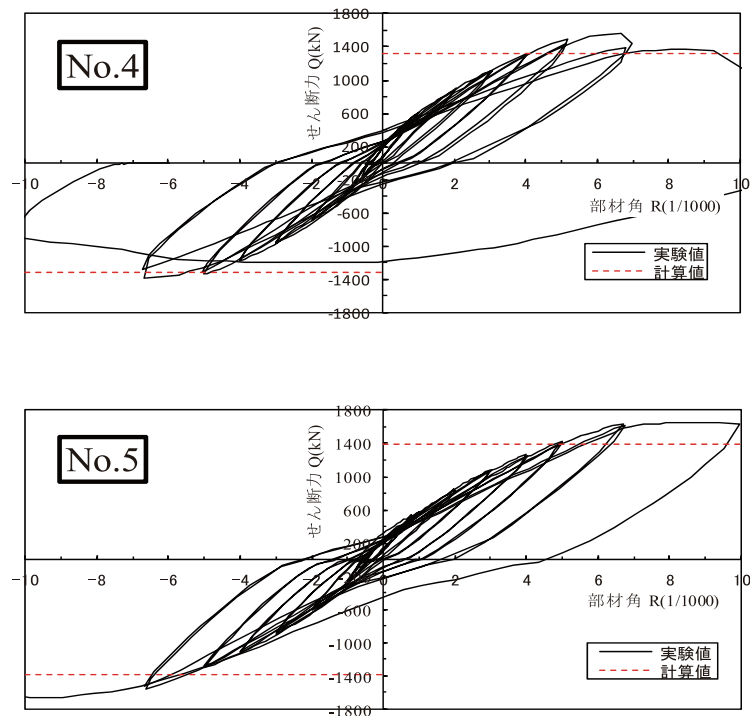


Fig. 3 せん断力－部材角関係 (No.1,2,3)  
Shear Force - rotation relation (No.1,2,3)

No.4, 5の歪計測値は鋼管がMisesの降伏に到った後，帯筋が引張降伏し $Q_{max}$ を迎えたことを示した。内蔵軸方向筋がせん断耐力に与える寄与<sup>7)</sup>に関しては，軸方向筋10本全ての表裏に貼付した3軸歪ゲージによる平均せん断応力最大振幅実験値はNo.4, 5において各々約 $9.1\text{N/mm}^2$ ，および $8.1\text{N/mm}^2$ であった。これらの値は軸方向鉄筋断面が純せん断降伏すると仮定したせん断力の約2%に相当した。

## 4 結論

高炉スラグ微粉末を多量に含有する新開発のECMセメントを用いた鉄筋内蔵薄肉円形CFT造柱の力学性状に関する実験を実施した。本実験の範囲内においては普通ポルトランドセメントとの有意な差は認められず，準用された既往の式は安全側の耐力，ならびに変形能力評価を与えた。

## 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，p.224，2008.10
- 2) 小田島，他：鉄筋を内蔵する円形CFT造柱の力学性状，その6，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.1233-1234，2010.9

- 3) 山口, 他: CFT長柱の構造性能に関する研究, その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1185-1186, 2000.09
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所, 日本建築行政会議, (株) 都市居住評価センター, (社) 新都市ハウジング協会: コンクリート充填鋼管 (CFT) 造 技術基準・同解説の運用及び計算例等, 2008.06
- 5) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造 設計施工指針, pp.127-128, 1997.10
- 6) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造 設計施工指針, pp.41-47, 2008.10
- 7) 片岡, 他: 鉄筋入りコンクリート充填鋼管 (CFT-R) 造の開発, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1229-1230, 2009.08

#### 付1 鉄筋を内蔵する径厚比の大きい円形CFT柱の限界部材角 $R_u$ 設計式<sup>2)</sup>

$$Ru = \left\{ 3.9 \eta - 0.30 \frac{N}{cN_0 + rA \cdot r\sigma_y} \frac{L_k}{D} - 0.0081 \frac{D}{t} + 0.026 \sqrt{p_w \cdot w\sigma_y} \right\} / 100$$

ここで,

$$\eta = 1.0 - \frac{Fc - 39}{206} \leq 1.0$$

$$cN_0 = 0.82 sA \cdot s\sigma_y + cA \cdot cFc$$

$$cFc = Fc + Kc \left[ \frac{2t}{cD} \right] s\sigma_y$$

$$b' = \frac{\sqrt{\pi}}{2} cD$$

$$p_w = \frac{A_w}{b' \cdot x}$$

$$Kc = \alpha \cdot kc$$

$$\alpha = 0.3$$

$$kc = 4$$

$$b' = \frac{\sqrt{\pi}}{2} cD$$

$$p_w = \frac{A_w}{b' \cdot x}$$

$F_c$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$sA$  : 鋼管部分の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$s\sigma_y$  : 鋼管の降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$cA$  : 充填コンクリート部分の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$t$  : 鋼管の板厚 (mm)

$cD$  : 充填コンクリート部分の径 (mm)

$rA$  : 軸方向筋部分の断面積合計 (mm<sup>2</sup>)

$r\sigma_y$  : 軸方向筋の降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$L_k$  : 柱の座屈長さ (mm)

$D$  : 鋼管の外径 (mm)

$A_w$  : 1組の帯筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$x$  : 帯筋のピッチ (mm)

$w\sigma_y$  : 帯筋の降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)