

円形 CFT 柱の変形性能に関する研究

— 柱長さによる検討 —

日大生産工(院) ○堀 紗友梨 日大生産工 藤本 利昭

1. まえがき

鋼管にコンクリートを充填した構造であるコンクリート充填鋼管 (以下, CFTと省略) 構造は, 優れた構造性能を持ち, 施工性の向上にもつながることから高層建築物への適用事例が多い。CFT柱は円形・角形断面が用いられているが, 断面径が等しい場合, 断面性能が優れること, 納まりが良いことから角形断面の採用が一般的であり実験データも多い。しかし, 本研究の対象である円形CFT柱は意匠上の要求がある場合やエントランスの吹き抜け部など比較的細長い柱が用いられることが多いが実験データが少ないのが現状である。

そこで本研究では, 円形CFT柱の実験データの収集を目的に柱長さを実験変数とした一定軸力下の曲げ実験を行い, 実験データと解析に基づき変形性能について検討を行った。またCFT柱の変形性能は軸力比, 鋼管の径厚比, 材料特性が影響されるため, 解析では軸力比, 径厚比, コンクリート強度を解析変数とし, 座屈長さ径比で比較を行った。

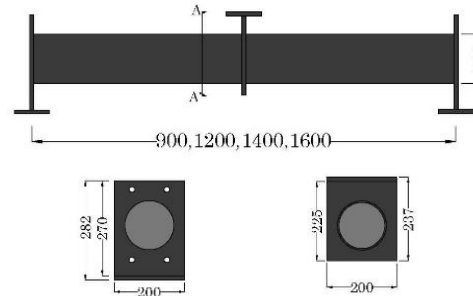
2. 実験概要

表1に試験体概要と材料試験結果, 図1に試験体形状を示す。試験体は断面径を139.8mm, 板厚を4.5mmとし, 柱長さによる比較のため部材長さを900mm, 1200mm, 1400mm, 1600mmの4種類に設定した。試験体の加力点と反力点にはプレートを溶接して試験体を作成した。また, 試験体には一般構造用鋼管STK400材を使用し, コンクリートは $F_c=30(\text{N}/\text{mm}^2)$ の普通コンクリートを用いた。軸力比 N/N_0 (N :軸荷軸力, N_0 :CFT柱の軸圧縮耐力)は0.3に設定した。

図2に実験に用いた载荷装置を示す。加力は軸力载荷用フレームに取り付けた500kN油圧ジャッキにより試験体に所定の軸力を作用させ, 軸力を一定に保った状態で, 5000kN構造物試験機を使用しせん断力と曲げモーメントを作用させた。実験はダイアフラムを模擬した中央加力点のプレートを介して加力を行い, 部材角が6%に達するまで行った。

表1 試験体概要

試験体名称	L (mm)	L_0/D	断面寸法		径厚比	鋼材		コンクリート
			直径 D (mm)	板厚 t (mm)		降伏強度 σ_y (N/mm ²)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	
900	900	6.4	139.8	4.50	31.1	385	29.7	
1200	1200	8.6						
1400	1400	10.0						
1600	1600	11.4						



(a) 側面図 (b) A-A' 断面図

図1 試験体形状

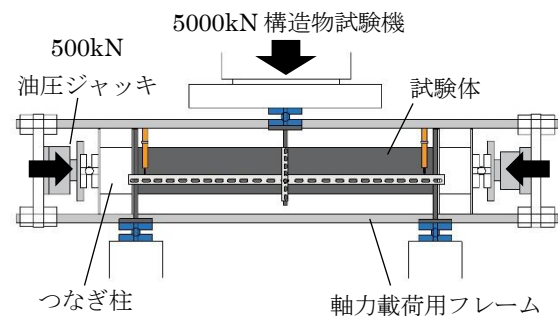


図2 実験载荷装置

3. 実験結果

3.1 限界部材角

表2に実験結果一覧を示す。限界部材角 R_u は, コンクリート充填鋼管設計施工指針¹⁾(以下, CFT指針と省略)に基づき, (1)式を用いて求める。

$$R_u = \gamma_c \cdot \left(8.8 - 6.7 \frac{N}{N_0} - 0.004 \frac{D}{t} - 0.0012 \cdot F_c \right) / 100 \quad \dots(1)$$

ここで, γ_c :円形断面CFT柱の座屈長さ径比による低減係数($L_0/D \leq 10$ の場合1.0, $L_0/D > 10$ の場合0.6)である。

図3に R_u/cR_u 座屈長さ径比関係を文献2)の既往の実験データとともに示す。図中の実線は評価式の低減係数 γ_c を表している。図より $L_d/D > 10$ である1400と1600の R_u/cR_u はそれぞれ0.70, 0.71となり評価式を下回ったが, 低減係数を評価することで評価式を上回り安全側になった。そのため, 低減係数が効果的に機能していることがわかる。 $L_d/D \leq 10$ の900は $R_u/cR_u = 1.18$ となり安全側になったが, 1200は $R_u/cR_u = 0.84$ となり危険側となった。既往の実験結果と比べても同様の結果となった。

3.2 せん断力-部材角関係

図4に縦軸をせん断力 Q , 横軸を部材角 R としたせん断力-部材角関係を示す。図より, 最大せん断力, 限界部材角は部材長さが短いほど大きくなり, 最大せん断力時の部材角は $1200 < 1400 < 1600 < 900$ の順に大きくなった。最大せん断力後は付加曲げにより耐力が低下し, 限界部材角は付加曲げの影響によって決まることがわかった。

表2 実験結果一覧

試験体名	Q_{max} (kN)	M_u (kN·m)	cR_u (%)	R_u (%)
900	98.3	51.5	5.16	6.09
1200	63.5	45.6	5.16	4.37
1400	52.7	45.1	3.10	3.65
1600	43.3	44.6	3.10	3.63

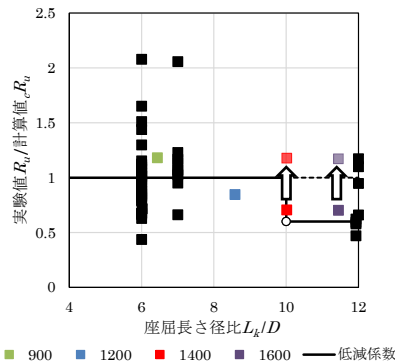


図3 R_u/cR_u 座屈長さ径比関係

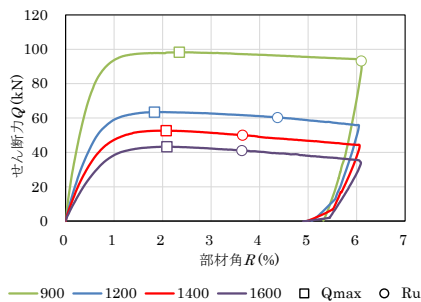


図4 せん断力-部材角関係

4. 解析による検討

4.1 圧縮実験と解析結果の比較

図5に曲げ実験と同じ断面の試験体で行った中心圧縮実験の結果を示す。図中には鋼管とコンクリートに文献3)の応力-ひずみモデルを用いて求めた解析結果を併せて示している。実験ではひずみが約3%で軸力が最大となり, 最大荷重を超えたあたりから座屈がみられたが, 耐力低下はほとんどない。また, 圧縮実験の実験結果と解析結果との対応は良い。

4.2 曲げ実験と解析との比較

柱の変形性能を解析的に追跡するため, CDC(Column Deflection Curve)法を用いて検討した。解析では圧縮実験との対応が良かったことから文献3)の応力-ひずみモデルを用いた。平面保持の仮定により柱断面のモーメント-曲率関係を求め, 図6の解析モデルのように柱材を材長方向に線要素に分割し, 各要素の釣合いを満足させながら材端に作用する水平力と変位を求めた。

表3に最大せん断力と限界部材角の実験値と解析値の一覧を, 図7に実験と解析によるせん断力-部材角関係を示す。実験ではせん断力の増加に伴い弾性的に変形が増加し, 最大せん断力に達した後, 軸力による付加曲げによりせん断力が低下している。解析結果の剛性や耐力低下の挙動は実験結果と良い対応を示したが, 900の試験体は実験結果が解析結果を上回った。これは, 部材長さが短い900の試験体では中央加力点のプレートの拘束による強度の上昇の影響が大きいと考えられる。

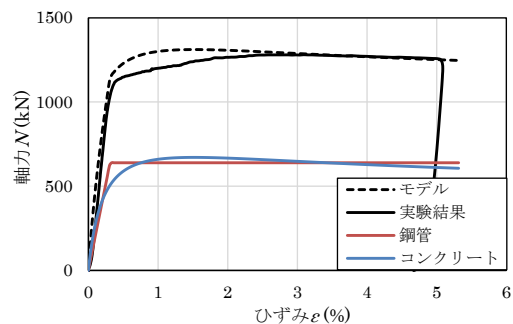


図5 軸力-ひずみモデル

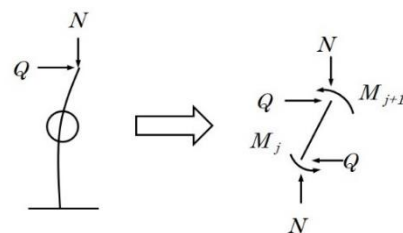


図6 解析モデル

4.3 座屈長さ径比による比較

図8に最大せん断力、限界部材角の実験結果と解析結果との比を座屈長さ径比で比較したものを示す。

図8(a)より、最大せん断力の実験結果と解析結果との比は座屈長さ径比に関わらずすべての試験体で1.0付近となりばらつきがなく、実験結果を概ね評価できていると考えられる。

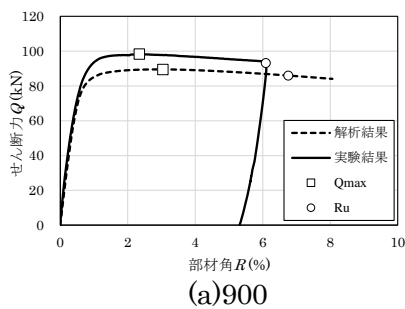
図8(b)より、限界部材角の実験結果と解析結果との比は1600以外の試験体は実験結果が解析結果を下回り、座屈長さ径比が小さくなるほど実験結果と解析結果の差が大きくなったが、円形CFT柱の変形性能をCDC解析によって評価できるものと考えられる。

4.4 解析による検討

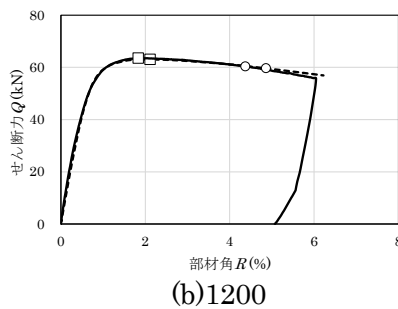
解析が実験結果を良く評価できたことから解析による検討を行った。CFT柱の変形性能は限界部材角 R_u によって評価され、限界部材角は軸力比、鋼管の径厚比、材料強度などに影響される。そのため、解析では軸力比 N/N_0 、径厚比 D/t 、コンクリート強度 F_c を解析変数として解析を行い、座屈長さ径比 $L_k/D=6\sim 18$ で比較を行った。解析変数は軸力比 $N/N_0=0.3, 0.4, 0.6, 0.7$ 、径厚比 $D/t=32, 42, 50, 67$ 、コンクリート強度 $F_c=30, 45, 60, 75\text{N/mm}^2$ と変化させた。

表3 実験結果と解析結果一覧

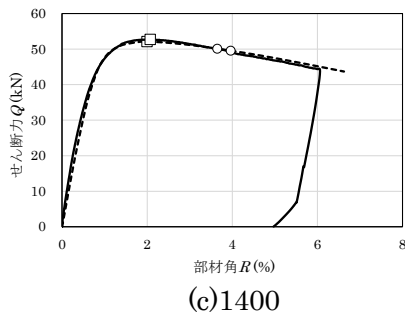
試験体名	$\frac{L_k}{D}$	Q_{max} (kN)		実験値 解析値	R_u (%)		実験値 解析値
		実験値	解析値		実験値	解析値	
900	6.4	98.3	89.5	1.10	6.09	6.76	0.90
1200	8.6	63.5	63.0	1.01	4.37	4.86	0.90
1400	10.0	52.7	52.1	1.01	3.65	3.96	0.92
1600	11.4	43.3	43.9	0.99	3.63	3.56	1.02



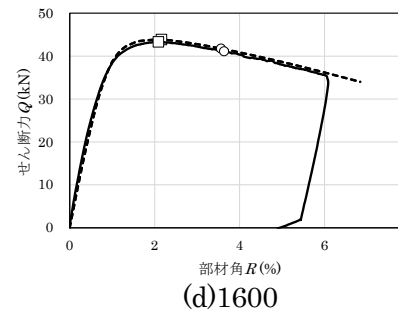
(a)900



(b)1200



(c)1400



(d)1600

図7 せん断力-部材角関係

4.4.1 軸力比 N/N_0 による比較

図9(a)に軸力比を変化させた限界部材角 R_u 座屈長さ径比関係 L_k/D を示す。径厚比 $D/t=32$ 、コンクリート強度 $F_c=30\text{N/mm}^2$ で解析を行った。

図より、軸力比が0.3, 0.4では、 $L_k/D=6\sim 10$ で大きく低下したが $L_k/D=12\sim 18$ での変化はほとんどなかった。軸力比が0.6, 0.7では、 $L_k/D=6\sim 12$ の間でも限界部材角の変化は小さくなった。軸力比を変化させると $L_k/D=12$ で限界部材角は収束しているが $L_k/D=18$ で差が大きくなった。

4.4.2 径厚比 D/t による比較

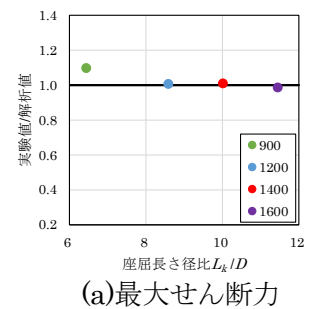
図9(b)に径厚比を変化させた限界部材角 R_u 座屈長さ径比関係 L_k/D を示す。軸力比 $N/N_0=0.3$ 、コンクリート強度 $F_c=30\text{N/mm}^2$ で解析を行った。

図より、径厚比の大きさに関わらず、 $L_k/D=6\sim 10$ の間で限界部材角が大きく低下している。しかし $L_k/D=10\sim 18$ では径厚比を変化させても限界部材角の変化はほとんどなく収束している。軸力比を変化させた場合より $L_k/D=6\sim 8$ での限界部材角の変化は大きくなり、 $L_k/D=8\sim 18$ での変化は小さくなった。

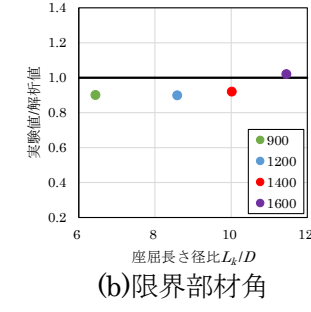
4.4.3 コンクリート強度 F_c による比較

図9(c)にコンクリート強度を変化させた限界部材角 R_u 座屈長さ径比関係 L_k/D を示す。軸力比 $N/N_0=0.3$ 、径厚比 $D/t=32$ で解析を行った。

図より、コンクリート強度を変化させた場合も $L_k/D=6\sim 8$ で限界部材角の変化が大きくなり、



(a)最大せん断力



(b)限界部材角

図8 L_k/D による比較

$L_k/D=8\sim 18$ での変化は小さくなった。径厚比を変化させた場合と同様に L_k/D が大きくなると限界部材角の値が近づき収束している。

図9(a)~(c)より、 $L_k/D=6\sim 8$ で限界部材角が大きく低下している。座屈長さ径比が小さいと軸力比、径厚比、コンクリート強度それぞれの影響が大きくなることがわかった。座屈長さ径比が大きい範囲では限界部材角は収束しているが図8(a)より、軸力比を変化させると限界部材角の値の差が大きくなったため、軸力比の影響が大きい。これは軸力比が大きくなると付加曲げの影響が大きくなるためだと考えられる。

4.5 評価式との比較

図10に4.4で行った限界部材角の解析値とCFT指針の評価式との比を座屈長さ径比 L_k/D で比較したものを示す。

図10(a)~(c)より、 L_k/D が大きい範囲では解析値と評価式の比が1.0付近となり解析値を評価できていると考えられる。これは $L_k/D>10$ では評価式に低減係数が評価されているため、解析値と評価式は良い対応を示した。 $L_k/D=6$ では安全側の評価となるものが多くあったが、評価式を低減されていない $L_k/D=8\sim 10$ では、ほとんどの解析値が評価式を下回り危険側となった。このことから、 $L_k/D\leq 10$ の範囲でも低減係数を評価すればCDC解析で評価することができると考えられる。

5. まとめ

円形CFT柱の一定軸力下の曲げ実験及び解析から得られた知見を以下に示す。

- 部材長さが短いほど耐力は大きくなり、限界部材角も大きくなる。
- 実験結果と解析結果がよい対応を示したことから円形CFT柱の変形性能はCDC解析で概ね評価できると考えられる。
- 解析より L_k/D が小さい範囲では軸力比、径厚比、コンクリート強度の影響が大きい、 L_k/D が大きくなると付加曲げが大きくなり軸力比の影響が大きくなると考えられる。
- $L_k/D=8\sim 10$ ではほとんどの解析値が評価式を下回る結果となったため $L_k/D\leq 10$ でも低減係数を用いて評価式を低減する必要があると考えられる。

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, 第2版, 2008
- 2) 藤本利昭:コンクリート充填鋼管長柱の変形性能評価法, 日本鋼構造論文集, 第11巻第43号, pp.99-105, 2004.9
- 3) Toshiaki Fujimoto, Akiyoshi Mukai, Isao Nishiyama and Kenji Sakino, Behavior of Eccentrically Loaded Concrete Filled Steel Tube Tubular Columns, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING©ASCE, February 2004, pp203-212

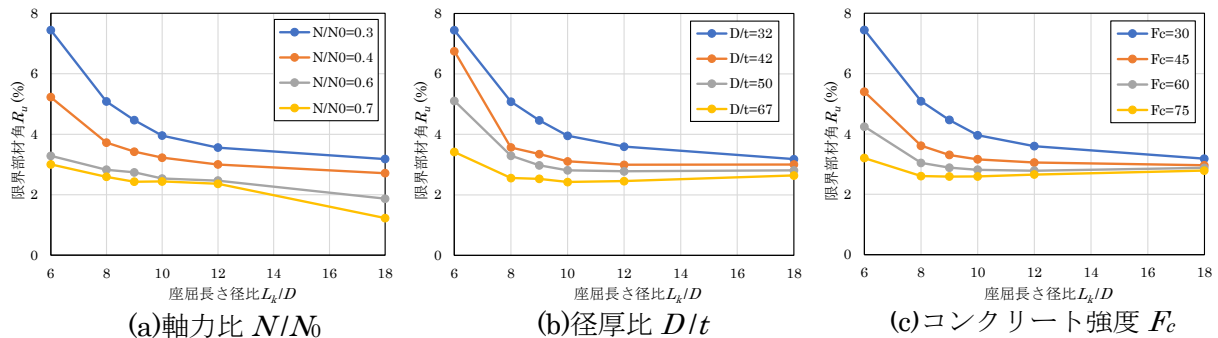


図9 限界部材角 R_u -座屈長さ径比 L_k/D 関係

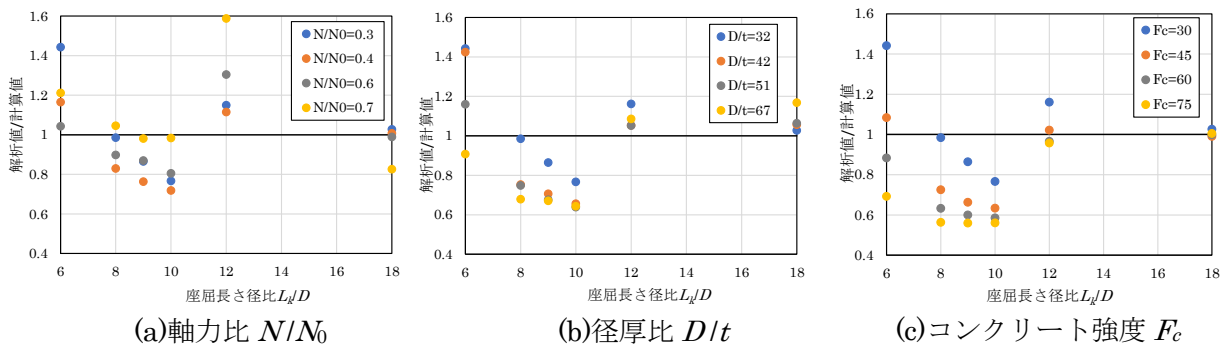


図10 解析値/計算値-座屈長さ径比 L_k/D 関係