

(5) 円形CFT柱の変形性能に関する 解析的研究

堀 紗友梨¹・藤本 利昭²

¹ 正会員 日本大学大学院生産工学研究科 建築工学専攻（〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1 丁目 2-1）
E-mail: cisa22020@g.nihon-u.ac.jp

² 正会員 日本大学生産工学部建築工学科 教授・博士(工学)（〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1 丁目 2-1）
E-mail: fujimoto.toshiaki@nihon-u.ac.jp

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。一方、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は少ない。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った。更に、軸力比、座屈長さ径比、コンクリート強度、径厚比を解析変数とした解析を行い実験結果と解析に基づき変形性能について検討を行った。

Key Words: CFT structure, Deformation Performance, Analysis, Circular cross section, Marginal member angle

1. はじめに

CFT 構造は、鋼管にコンクリートを充填することで鋼管の局部座屈を抑制し、内部コンクリートも鋼管に拘束されるため優れた構造性能を示す¹⁾。また、施工性の向上にもつながることから、実際に「あべのハルカス」²⁾をはじめとした超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、おさ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。一方、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。実際に複雑な形状の高層建築物などに円形 CFT 柱が使用されている事例がある³⁾が、座屈長さ径比 L_k/D が 6 を超える実験データ、解析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、座屈長さ径比 L_k/D が 6~12 と柱長さを実験変数とした一定軸力下の曲げ実験を行った。さらに、軸力比、座屈長さ径比、コンクリート強度、径厚比を解析変数とした解析を行い、実験結果と解析に基づき円形 CFT 柱の

変形性能について検討を行った。

2. 実験概要

(1) 試験体概要

表 1 に試験体一覧、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 種類とした。軸力比 N/N_0 (N : 載荷軸力、 N_0 : CFT 柱の軸圧縮耐力) は 0.3 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。

表 2 に鋼材の機械的性質、表 3 にコンクリートの材料特性を示す。試験体には一般構造用鋼管 STK400 材を使用し、 $F_c=30$ (N/mm²) の普通コンクリートを使用した。

表-1 試験体一覧

試験体名称	部材長さ	座屈長さ径比	断面寸法		幅厚比
	L (mm)	L_k/D	直径 D (mm)	板厚 t (mm)	D/t
900	900	6.4	139.8	4.50	31.1
1200	1200	8.6			
1400	1400	10.0			
1600	1600	11.4			

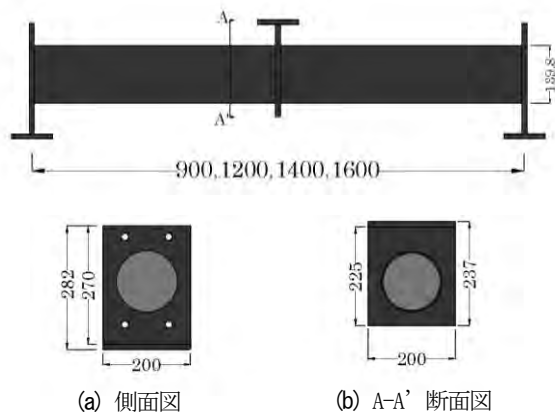


図-1 試験体形状

表-2 鋼材の機械的性質

試験体名称	板厚計測値 t (mm)	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	伸び率 ϵ (%)
STK400	4.39	384.7	419.0	205	26.1

表-3 コンクリートの材料特性

	設計基準強度 F_c (N/mm ²)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	材齢 (日)
普通コンクリート	30	29.7	29.5	57

(2) 実験方法

図2に実験に用いた載荷装置を示す。加力は、軸力載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。測定は試験体の両端に設置した各2本、計4本の変位計で鉛直方向の変位を測定し、材軸方向の変位を測定するため変位計を両側面に設置した。実験は3点曲げとし、試験機に取り付けたエンドプレート部を支点として、試験体中央部のプレートを通じて行い、部材角が6%に達するまで行った(付図1(a)参照)。

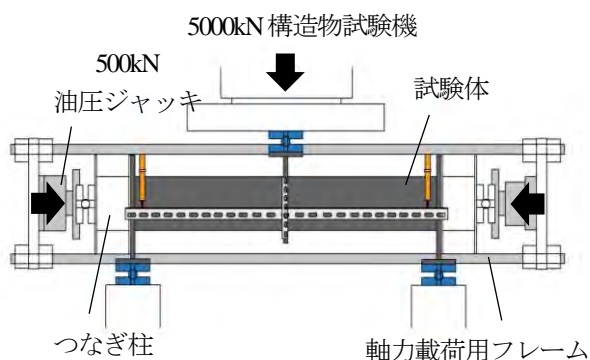


図-2 実験載荷装置

3. 実験結果

(1) 限界部材角

表4に実験結果一覧を、図3に限界部材角の定義を示す。CFT部材の変形能力は、実験における包絡線の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て評価される。限界部材角 R_u は、コンクリート充填鋼管設計施工指針⁴⁾(以下、CFT指針と省略)に基づき、(1)式を用いて求める。

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

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($L_k/D \leq 10$ の場合1.0, $L_k/D > 10$ の場合0.6)である。

図4に R_u/cR_u -座屈長さ径比関係を文献5)の既往の実験データとともに示す。図の R_u は実験から得られた限界部材角、 cR_u は(1)式に示すCFT指針式を用いており、低減係数 γ_c は考慮していない。また、実線は評価式の低減係数 γ_c を表している。図より、 $L_k/D > 10$ である1600と1400の R_u/cR_u はそれぞれ0.70, 0.71となり、指針式を下回ったが低減係数を評価すれば指針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。 $L_k/D \leq 10$ の900は $R_u/cR_u = 1.18$ となり安全側となったが、1200は $R_u/cR_u = 0.84$ となり危険側となった。既往の研究結果と比べても同様の結果となった。

表-4 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

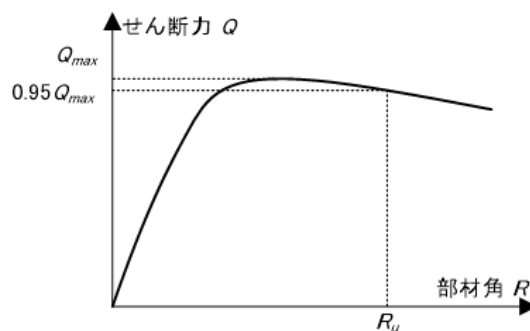


図-3 限界部材角定義図

(2) せん断力-部材角関係

図5に縦軸をせん断力、横軸を部材角としてせん断力-部材角関係を示す。図中の□のプロットはせん断力の最大値 Q_{max} 、○のプロットは限界部材角 R_u の点を表している。図より、最大せん断力時の部材角は $1200 < 1400 < 1600 < 900$ の順に大きくなり、1400と1600はほぼ等しい値となった。限界部材角は、部材長さが短いほど耐力低下が緩やかになったことから $1600 < 1400 < 1200 < 900$ の順に大きくなり、限界部材角も1400と1600はほぼ等しい値になった。

(3) モーメント-部材角関係

図6にモーメント-部材角関係を示す。図の縦軸はモーメント M 、横軸は水平変位 δ から求めた部材角 $R(\delta)$

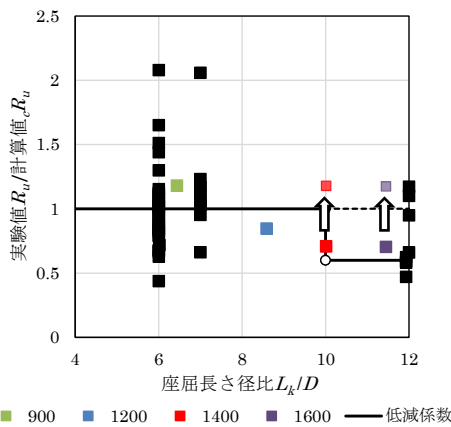


図-4 R_u / R_u -座屈長さ径比関係

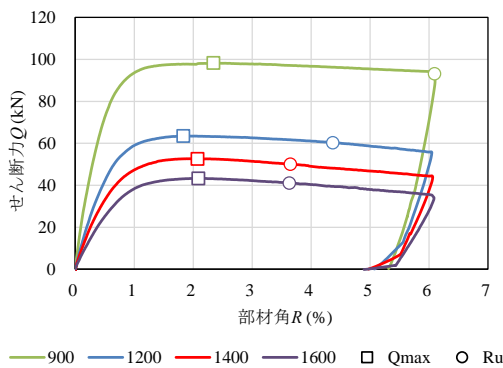


図-5 せん断力-部材角関係

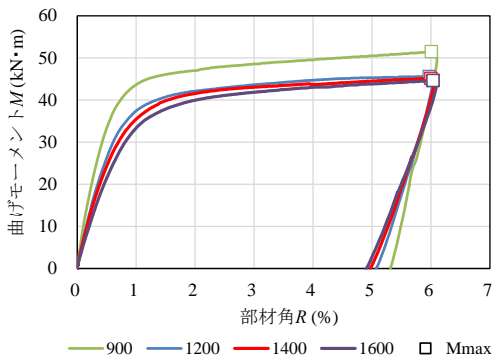


図-6 モーメント-部材角関係

$(L/2)$ としている。図中のモーメントはせん断力 Q より求めた曲げモーメントと軸力 N と変位 δ による付加曲げモーメントを足し合わせている。

図より、最大曲げモーメント M_{max} はすべての試験体で試験終了時が最大となり、 $1600 < 1400 < 1200 < 900$ の順に部材長さが短いほど大きくなった。部材長さが短いほどせん断力によるモーメントの耐力低下が大きくなり、軸力と変位による付加曲げモーメントが大きくなった。また、すべての試験体でせん断力によるモーメントの耐力低下より付加曲げモーメントが大きくなったため、試験終了時が最大曲げモーメントとなった。

4. 解析による検討

(1) 圧縮実験と解析結果の比較

図7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(付図1(b)参照)。図中には鋼管とコンクリートに文献6)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。

(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。解析では文献6)の材料の応力-ひずみモデルを用いて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8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、各要素のつり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。

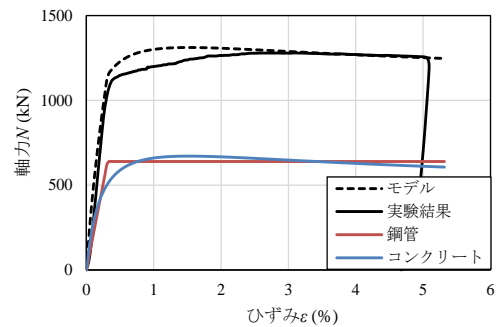


図-7 荷重-ひずみモデル

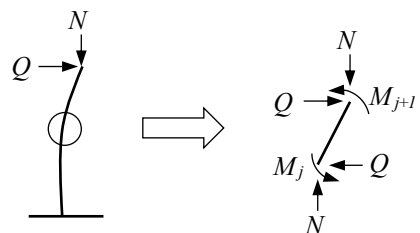


図-8 解析モデル

解析用いた各要素の釣合式を示す。

$$M_j - M_{j+1} - Q \cdot dL - N(y_{j+1} - y_j) = 0 \quad (1)$$

M_j, M_{j+1} : $j, j+1$ 点でのモーメント

N, Q : 軸力およびせん断力

dL : 分割部分の長さ

y_j, y_{j+1} : $j, j+1$ 点での水平変位

各要素のたわみ角, 曲率の関係は以下の式で表される。

$$\theta_{j+1} = \theta_j + \varphi_j \cdot dL \quad (2)$$

$$y_{j+1} = y_j + \theta_j \cdot dL + \frac{1}{2} \varphi_j \cdot dL^2 \quad (3)$$

θ_j, θ_{j+1} : $j, j+1$ 点でのたわみ角

φ_j : j 点での曲率

図9に実験と解析による水平力-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の試験体は実験の耐力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による拘束による強度の上昇の影響が大きいためと考えられる。

(3) 座屈長さ径比による比較

図10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10(a)より, 最大せん断力 Q_{max} 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10(b)より, 限界部材角 R_u の実験結果と解析結果との比は, 1600以外の試験体は実験

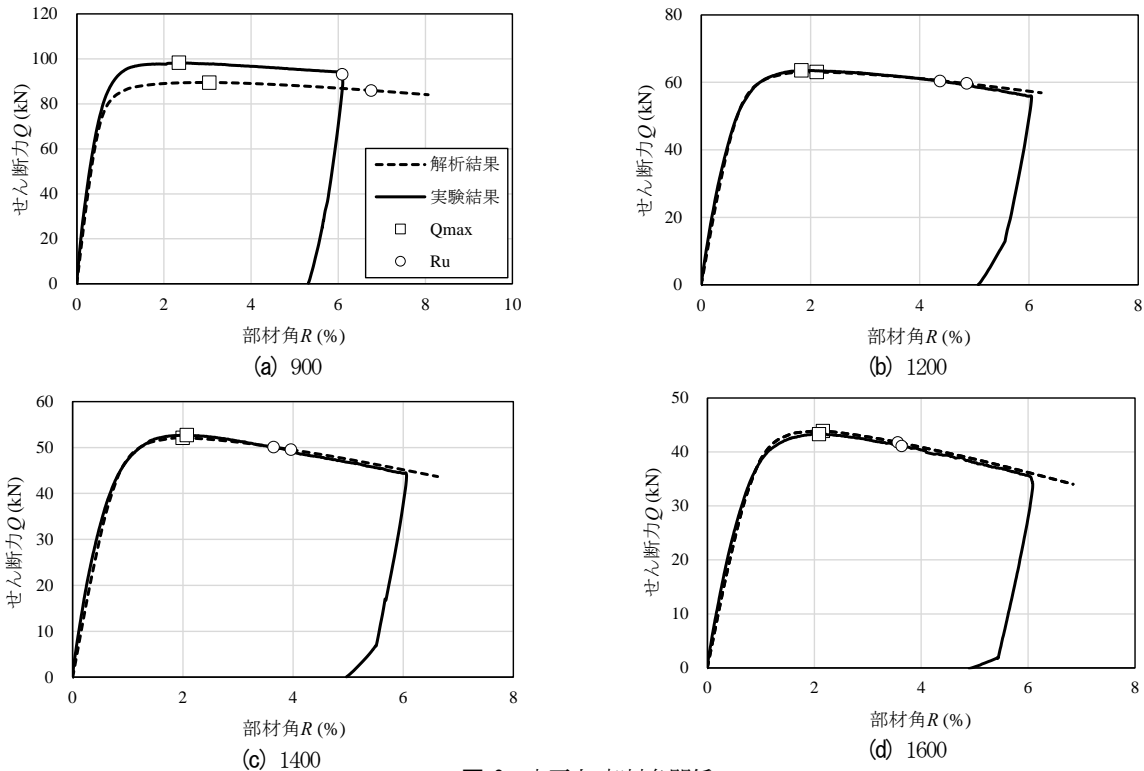


図-9 水平力-部材角関係

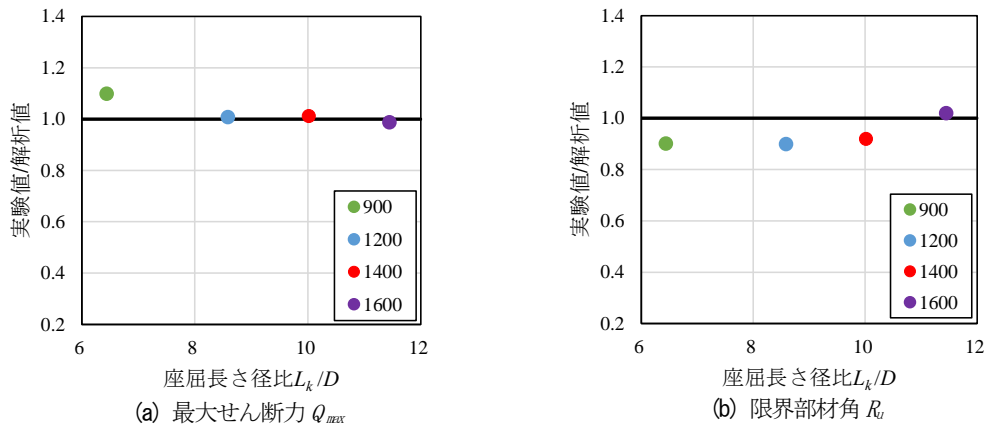


図-10 実験結果と解析結果の比較

結果が解析結果を下回った。また、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り、0.90~1.02 とばらつきがあった。これらのことから座屈長さ径比が比較的大きい範囲では、円柱の変形性能を CDC 解析によって評価できるものと考えられる。

(4) 解析による検討

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 R_u は軸力比、鋼管の径厚比、材料特性などに影響される。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。

a) 軸力比 N/N_0 による比較

図 11(a)に縦軸を解析から得られた限界部材角 R_u 、横軸を座屈長さ径比 L_k/D の限界部材角 R_u -座屈長さ径比 L_k/D 関係を示す。軸力比 $N/N_0=0.3, 0.4, 0.6, 0.7$ と変化させ、鋼管の径厚比 $D/t=32$ 、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 では座屈長さ径比 L_k/D が 6~10 の間で限界部材角が大きく低下したが、 $L_k/D=12\sim 18$ での変化はほとんどなかった。軸力比が 0.6, 0.7 では、座屈長さ径比が 6~12 の間でも限界部材角の変化は小さくなり、ほとんど同じ値となったが、 $L_k/D=18$ では差が大きくなった。軸力比を変化させても $L_k/D=12$ で限界部材角の値が近づいているが $L_k/D=18$ で差が大きくなった。

b) 径厚比 D/t による比較

図 11(b)に径厚比を変化させた場合の限界部材角 R_u -座屈長さ径比 L_k/D 関係を示す。径厚比 $D/t=32, 42, 50, 67$ と変化させ、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座屈長さ径比 $L_k/D=6\sim 8$ で限界部材角の変化が大きくなった。特に $D/t=42$ は 6.75 から 3.57 に大きく低下した。しかし径厚比を変化させても $L_k/D=10\sim 18$ での限界部材角の変化はほとんどなく、 L_k/D が大きくなるほど限界部材角の値が近づき影響が小さくなっている。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。

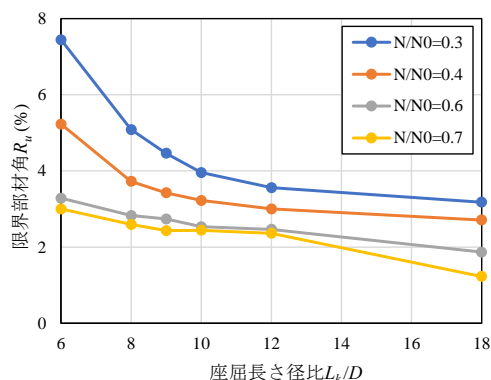
c) コンクリート強度 F_c による比較

図 11(c)にコンクリート強度を変化させた場合の限界部材角 R_u -座屈長さ径比 L_k/D 関係を示す。コンクリート強度 $F_c=30, 45, 60, 75\text{N/mm}^2$ と変化させ、軸力比 $N/N_0=0.3$ 、径厚比 $D/t=32$ で解析を行った。

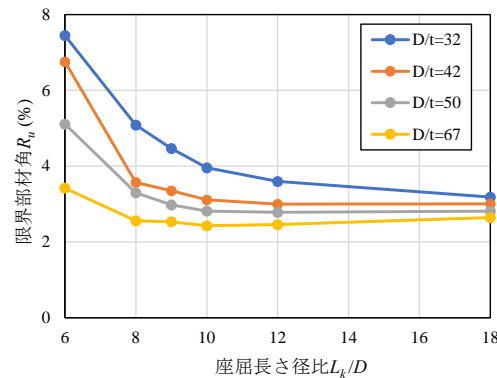
図より、コンクリート強度を変化させた場合も $L_k/D=6\sim 8$ で限界部材角の変化が大きくなり、 $L_k/D=8\sim 18$ での

変化が小さくなった。 $L_k/D=6\sim 8$ で限界部材角の変化は大きくなったが、径厚比を変化させた結果より変化が小さい。径厚比を変化させた結果と同じように L_k/D が大きくなるほど限界部材角の値が近づき同等の値となっている。

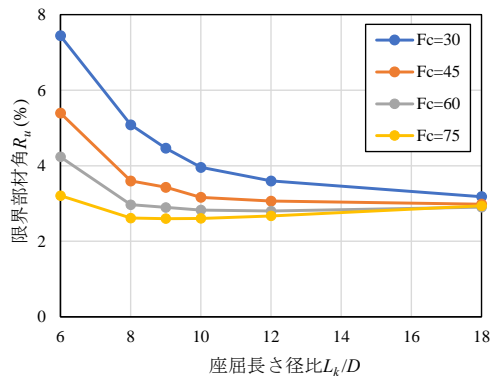
図 11(a)~(c)より、座屈長さ径比が 6~8 で限界部材角が大きく低下している。座屈長さ径比が小さいと軸力比、径厚比、コンクリート強度それぞれの影響が大きくなることがわかった。また、座屈長さ径比が大きい範囲では限界部材角は収束しているが図 11(a)より、軸力比が変化すると限界部材角の値も差が大きくなったため、軸力比の影響が大きい。これは軸力比が大きくなると付加曲げが大きくなるためだと考えられる。



(a) 軸力比 N/N_0 による比較



(b) 径厚比 D/t による比較



(c) コンクリート強度 F_c による比較

図-11 限界部材角 R_u -座屈長さ径比 L_k/D 関係

5. まとめ

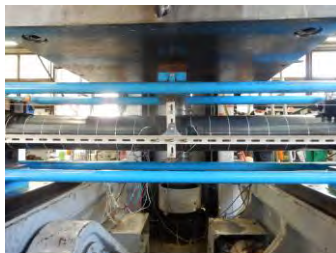
一定軸力下の曲げ実験および解析から得られた知見を以下に示す。

- ・部材長さが短いほどせん断耐力が大きくなり、耐力低下も緩やかになった。
- ・部材長さが短いほど限界部材角は大きくなった。
- ・すべての試験体でせん断力によるモーメントの耐力低下より付加曲げモーメントによる耐力低下が大きくなった。
- ・円形 CFT 柱の変形性能は CDC 解析により概ね評価できると考えられる。
- ・解析より $L_k/D=6\sim 8$ で限界部材角は大きく低下し、 L_k/D が小さい範囲では軸比、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。

付録

付図 1(a), (b)に一定軸力下の曲げ実験、中心圧縮実験の様子を示す。

(Received August 25,2023)



(a)一定軸力下の曲げ実験



(b)中心圧縮実験

付図-1 実験の様子

参考文献

- 1) 公益社団法人 土木学会：コンクリート充填鋼管適用技術と最先端，第1版，2021
- 2) 平川恭章，あべのハルカスの構造設計・施工概要，JSSC，2013，No.12，pp18-21
- 3) JSCA ， 「第 19 回 JSCA 賞」 新人賞 ， https://www.jsca.or.jp/vol5/p3_1_prize/200812/doc02.php，8月1日
- 4) 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
- 5) 藤本利昭：コンクリート充填鋼管長柱の変形性能評価法，日本鋼構造協会，鋼構造論文集，第11巻第43号，pp.99-105，2004
- 6) Toshiaki Fujimoto, Akiyoshi Mukai, Isao Nishiyama and Kenji Sakino, Behavior of Eccentrically Loaded Concrete-Filled Steel Tube Tubular Columns, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING ©ASCE, 2004, pp203-212

ANALYTICAL STUDY ON DEFORMATION PERFORMANCE OF CIRCULAR CFT COLUMNS

Sayuri HORI and Toshiaki FUJIMOTO

Circular and square cross-sections are used for CFT columns, but a square cross-section is generally used, and there is a large amount of experimental data. On the other hand, circular CFT pillars are often used when there is a design requirement or relatively long pillars such as atriums at entrances, but there are few experimental data. Therefore, in this study, bending experiments under constant axial force were conducted with the column length as an experimental variable for the purpose of collecting experi-

mental data on circular CFT columns. Furthermore, analysis is performed, the deformation performance was examined based on the experimental results and analytical results.