

(8) 円形CFT柱材の全塑性耐力を発揮できる 軸力比の上限值

白石 暁¹・城戸 將江²

¹正会員 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)
E-mail: e3mbb012@eng.kitakyu-u.ac.jp

²正会員 北九州市立大学教授 国際環境工学部建築デザイン学科 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)
E-mail: kido-m@kitakyu-u.ac.jp

日本建築学会コンクリート充填鋼管構造設計施工指針には、コンクリート充填鋼管柱 (以後、CFT 柱) の設計式が示されている。座屈長さ・断面せい比が 4,12 を特性値として短柱、中柱、長柱に分け、それぞれに設計式が与えられている。座屈長さ・断面せい比が 4 以下の場合には全塑性耐力として評価できることになっているが、全塑性耐力を発揮できる条件は示されていない。このような背景から、既往の研究で、角形 CFT 柱を対象として全塑性耐力を発揮できる軸力比の上限值を求める評価式を、鋼管部分の基準化細長比、端モーメント比を用いて示している。しかしながら、円形 CFT 柱については全塑性耐力を発揮できる条件は示されていない。本研究の目的は、円形 CFT 柱を対象とし、全塑性耐力を発揮できる条件について検討を行うことである。

Key Words: Strength formula, axial load ratio, nominal slenderness ratio, moment gradient ratio

1. はじめに

軸力と曲げを受けるコンクリート充填鋼管柱材 (以下、CFT 柱材) に関して、コンクリート充填鋼管構造設計施工指針¹⁾ (以下、CFT 指針) に設計式が示されている。CFT 指針では CFT 柱は材の細長さ指標として座屈長さ・断面せい比 l/D を用いており、 l/D の値で 4, 12 を特性値として短柱、中柱、長柱に分類し、柱材の設計式もそれらに応じて異なるものを与えている。しかし、細長さ指標として l/D の値が最も適切なものであるかの検討が必要であるし、より使いやすい設計式も望まれる²⁾。このような状況の下、第2著者らは曲げ座屈する CFT 圧縮材の耐力について終局圧縮耐力、許容圧縮耐力の評価式を提案した³⁾。この評価法の特徴は、現行 CFT 指針の細長さ指標 l/D ではなく、鋼管の基準化細長比 λ_1 ($\equiv \lambda$) を細長さ指標として選んだことである。

次に、軸力と曲げを受ける柱の耐力評価法については、次のような問題点が指摘されていた。1) 細長さ指標の値により短柱、中柱、長柱と分類されているが、特に中柱、長柱の耐力評価は煩雑である。2) 全塑性耐力を期待できる条件が明示されていない。

上記2)の問題点に関して、軸力と曲げモーメントを受ける角形CFT柱に対して、鋼管の応力-ひずみ関係を完全弾塑性型とし、材端曲げモーメント比 κ 、安定性指標 α 、材料強度を解析変数とした解析に基づき、全塑性耐力を期待できる条件を示している⁴⁾。ここで、安定性指標 α は $n_p \lambda^2 / (1 + \kappa)$ で表される指標であり、鋼構造限界状態設計指針⁵⁾では、軸力比 n_p および細長比 λ を α の値により制限しており、 α の値が小さいほど、厳しい制限を与えていることとなる。さらに、文献4)に引き続き、鋼管の応力-ひずみ関係を Menegotto-Pinto 型⁶⁾とし、新たな解析変数として鋼管の幅厚比を追加して解析を行うことにより、全塑性耐力を発揮できる軸力比の上限值を算定するための評価式を、鋼管の降伏応力度が 325N/mm²、440N/mm²、鋼管の幅厚比が 21, 31 に対して、基準化細長比を用いて提示している⁷⁾。しかしながら、円形 CFT 柱に関しては全塑性耐力を発揮できる条件は明らかにされていない。

本研究の目的は、円形CFT柱を対象とし、全塑性耐力を発揮できる条件について検討し、材料強度、端モーメント比の影響について示すことである。

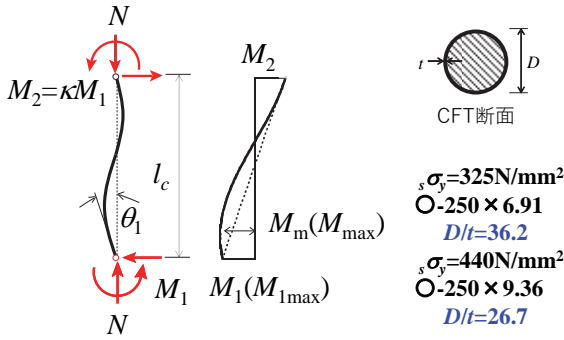


図-1 解析モデル

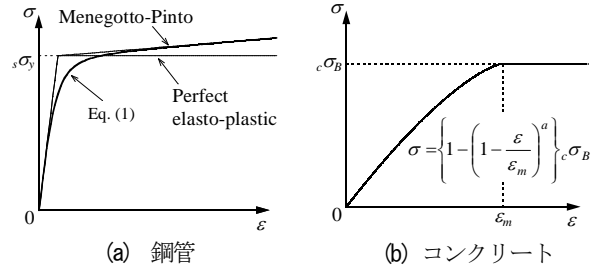


図-2 応力-ひずみ関係

2. 解析

(1) 問題の設定

図-1 に示す材長 l_c で一定な圧縮力 N と端部に単調に増加する曲げモーメント M_1 と M_2 ($M_2 = \kappa M_1$, $|\kappa| \leq 1$) を受ける円形CFT柱を解析モデルとする。解析により曲げモーメント M_1 と M_2 の作用点の回転角 θ_1 の関係を求め最大耐力 M_{1max} を得た。2. (3) 節に示す解析変数で解析を行うことにより、材端曲げモーメント M_1 が軸力を考慮したCFT断面の全塑性モーメント M_{px} に到達できる軸力比の上限値を材料強度、細長比、材端曲げモーメント比を支配因子として提示する。本論文では原則として $M_{1max}/M_{px} \geq 0.98$ となる場合を、全塑性耐力を期待できるとする。また、材料の劣化は2. (2) 節に示すように考慮していないので、解析での抵抗力低下は $P\delta$ モーメントに起因するものである。

(2) 解析の仮定と解析手法

解析仮定として、1) 平面保持、2) 微小変形を仮定した。材料の応力-ひずみ σ - ϵ 関係は、鋼管は図-2(a) に示すように、式(1)で表される Menegotto-Pinto 型⁹⁾の応力-ひずみ関係をもつ非線形弾性体とした。

$$\frac{\sigma}{\sigma^*} = \frac{(1-b) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon^*} \right)}{\left\{ 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon^*} \right)^{R_h} \right\}^{\frac{1}{R_h}}} + b \left(\frac{\epsilon}{\epsilon^*} \right) \quad (1)$$

式(1)右辺の係数 R_h は 2.4, b は 0.01 として算定した。これは、鋼構造限界状態設計指針⁵⁾に示されている曲げ座屈耐力式による耐力と座屈耐力がおおむね対応するように試行錯誤的に決定した係数である。式(1)左辺の σ^* , 右辺の ϵ^* はそれぞれ鋼管の降伏応力度 $s\sigma_y$, 降伏ひずみ ϵ_y ($\epsilon_y = s\sigma_y/E$, E : ヤング係数) の値を用いることとした。

コンクリートの応力-ひずみ関係は式(2)によった(図-2(b)参照)。式(2)の上式は Fafitis & Shah 式⁸⁾である。コンクリート部分の引張強度はないとしている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma}{c\sigma_B} &= 1 - \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_m} \right)^a & (\epsilon \leq \epsilon_m) \\ \frac{\sigma}{c\sigma_B} &= 1 & (\epsilon_m \leq \epsilon) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

上式の $c\sigma_B$ はコンクリートの圧縮強度で、 a および ϵ_m は下式で与えられる。 $c\sigma_B$ の単位は $[N/mm^2]$ である。

$$a = \frac{cE' \times \epsilon_m}{c\sigma_B}, \quad \epsilon_m = 0.93 \times c\sigma_B^{\frac{1}{4}} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式(3)中の cE' は下式で与えられる。

$$cE' = (3.32 \times \sqrt{c\sigma_B} + 6.9) \times 10^3 \quad (4)$$

解析仮定と設定した応力-ひずみ関係より曲げモーメント (M) - 曲率 (ϕ) 関係を算定し、2. (1) 節で示した境界値問題を初期値問題に変換して解析を行う射的法により曲げモーメント-回転角関係を算定した⁹⁾。

(3) 解析変数

解析変数は、材端曲げモーメント比 κ , 後述する安定性指標 α の値、鋼管の降伏応力度 $s\sigma_y$, コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$, を選び、以下に示す値を選んだ(図-1参照)。

- 1) 材端曲げモーメント比 κ : 0, 0.5, 1
- 2) 安定性指標 α : 0.03 ~ 0.3
- 3) 鋼管の降伏応力度 $s\sigma_y$: 325 N/mm^2 , 440 N/mm^2
- 4) コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$: 60 N/mm^2 , 90 N/mm^2

2) の安定性指標 α は下式で定義した。

$$\alpha \equiv \frac{n_y \cdot s\lambda_1^2}{1 + \kappa} \quad (5)$$

上式右辺の n_y は軸力比, $s\lambda_1$ は鋼管の基準化細長比 (以後細長比と称す) であり、それぞれ、式(6), 式(7)で定義する。

$$n_y = \frac{N}{N_0} \quad (N_0 = sA \cdot s\sigma_y + cA \cdot c\sigma_B) \quad (6)$$

$$s\lambda_1 = \sqrt{\frac{sN_y}{N_e}} \quad \left(sN_y = sA \cdot s\sigma_y, \quad N_e = \frac{\pi^2 sE_s I}{l_c^2} \right) \quad (7)$$

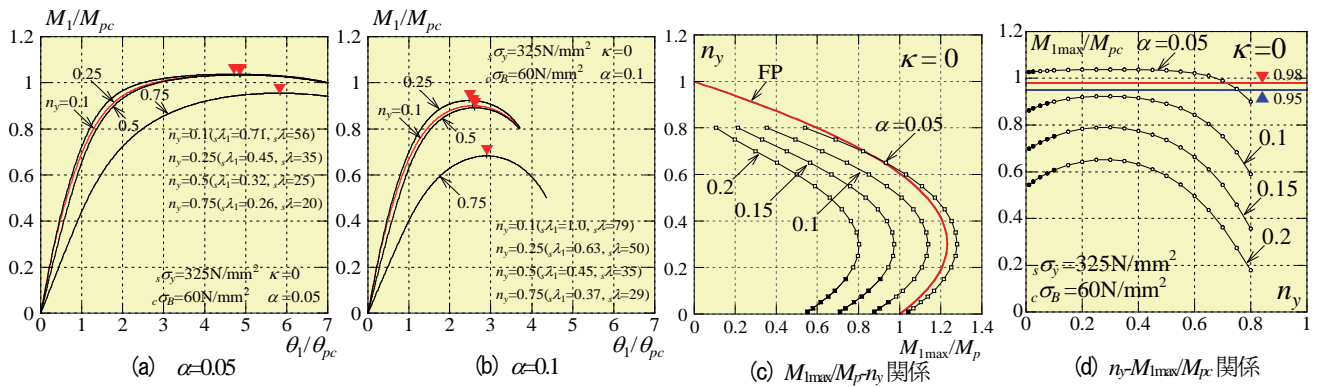


図-3 解析結果の例 ($\kappa=0$, $\sigma_s=325\text{N/mm}^2$, $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$)

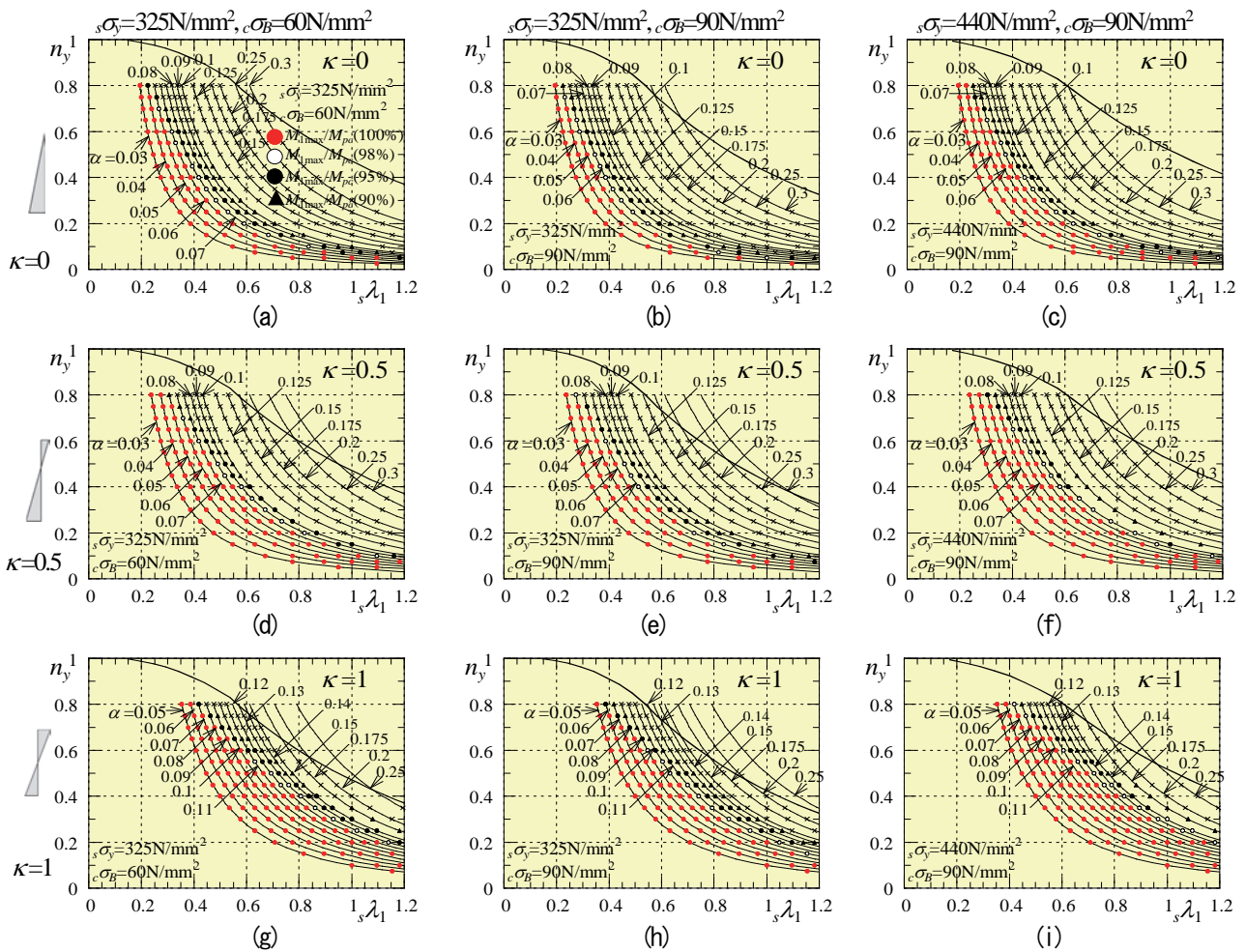


図-4 全塑性モーメントを発揮できる条件

ここに、 A_s 、 A_c はそれぞれ鋼管およびコンクリートの断面積、 I_s は鋼管の断面2次モーメントである。なお、解析で用いた断面は、式(8)で求められる径厚比のランクFAの上限値¹⁰⁾に相当する値とした。

$$D/t = 50 \frac{235}{F} \quad (8)$$

ここで、 F は基準強度で本研究では $F = \sigma_s$ として求めた。鋼管径厚比および板厚は $\sigma_s=325\text{N/mm}^2$ の場合36.2, 69.1mm, $\sigma_s=440\text{N/mm}^2$ の場合26.7, 9.36mmとなる。

3. 解析結果の例

図-3に、材端曲げモーメント比 $\kappa=0$ ・降伏応力度 $\sigma_s=325\text{N/mm}^2$ ・コンクリートの圧縮強度 $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$ の場合の、 $M_1/M_{pc} - \theta_1/\theta_{pc}$ の関係の例を図-3(a), (b)に、 $M_{1max}/M_p - n_y$ 関係の例を図-3(c)に、 $n_y - M_{1max}/M_{pc}$ 関係の例を図-3(d)に示す。ここに、 M_{pc} は軸力を考慮したCFT断面の全塑性モーメント、 θ_{pc} は M_{pc} となる時の弾性回転角、 M_p は軸力の無い場合のCFT断面の全塑性モーメントで

ある。

図-3(a), (b)は安定性指標がそれぞれ $\alpha=0.05$ と 0.1 の場合の $M_1/M_{pc}-\theta/\theta_c$ である。図中には軸力比 n_y が $0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ の場合を示している。図中の括弧内の数値は基準化細長比 λ_1 と細長比 λ である。また、図中では最大耐力点(M_{1max})を赤い三角印(▼)で示している。このように、解析結果より無次元化最大耐力 M_{1max}/M_{pc} を求めた。これらの図より、軸力比が 0.5 までは軸力比が異なってもそれほど無次元化最大耐力の値に差は見られないが、軸力比が 0.75 の場合は、無次元化最大耐力が小さくなっていることが観察される。

図-3(c)は M_{1max}/M_p-n_y 関係である。図中の「FP」で示す曲線は、断面の全塑性耐力である。文献(4,7)にならない、鋼管の細長比 λ_1 の適用範囲を $\lambda_1 \leq 1.2$ とし、図中黒塗りのプロット(■)は細長比が 1.2 を超えていることを表している。図より本条件の場合は、安定性指標 α の値が 0.05 で軸力比 n_y が 0.7 程度まで、ほぼ全塑性耐力に達している。

図-3(d)は n_y-M_{1max}/M_{pc} 関係である。図中には $M_{1max}/M_{pc}=0.98, 0.95$ を赤色実線、青色実線で示している。また、図中黒塗りのプロット(●)は細長比が 1.2 を超えていることを表している。本論文では、原則 $M_{1max}/M_{pc} \geq 0.98$ となる場合を、全塑性耐力を期待できるとしているが、図-3(d)の場合、安定性指標 α の値が 0.05 の場合、軸力比 n_y が 0.7 程度以下では全塑性耐力を期待できる。

4. 全塑性耐力を発揮できる軸力比の上限值

本論文では、原則として材端モーメント M_{1max} がCFT柱の全塑性モーメント M_{pc} の98%以上を発揮できる場合(一部パラメータにおいては M_{1max} が M_{pc} の95%以上を発揮できる場合)に、全塑性耐力(M_{pc})を発揮できるとした。本節では $M_{1max} \geq 0.95M_{pc}$ となる条件を検討する。図-4に鋼管の降伏応力度 $325, 440\text{N/mm}^2$ の λ_1-n_y 関係を示す。各図には、文献(3)で提案したCFT柱の座屈強度曲線を、参考のため太実線で示している。

図-4では赤丸(●)印、白丸(○)印、黒丸(●)印、黒三角(▲)印で、それぞれ $M_{1max} \geq M_{pc}$, $M_{pc} > M_{1max} \geq 0.98M_{pc}$, $0.98M_{pc} > M_{1max} \geq 0.95M_{pc}$, $0.95M_{pc} > M_{1max} \geq 0.90M_{pc}$ となる場合を示している。×印は $M_{1max} < 0.9M_{pc}$ となる場合である。安定性指標 α の値が大きくなるにつれて $M_{1max} \geq M_{pc}$, $M_{1max} \geq 0.98M_{pc}$ となる場合が少なくなる。図-4より式(5)の $\alpha \leq 0.05$ の場合では $n_y \leq 0.65$ の範囲で材端最大モーメント M_{1max} は全塑性モーメント M_{pc} を発揮できることがわかる。

図-4の材料強度の組合せが同じで材端曲げモーメント比 κ が異なる{(a)と(d)と(g)}, {(b)と(e)と(h)}, {(c)

と(f)と(i)}を比較すると、材端曲げモーメント比 κ が大きくなるほど全塑性耐力 M_{pc} を発揮できる領域が大きくなることがわかる。次に、図-4のコンクリート圧縮強度 $c\sigma_B$ と κ が同じで鋼材強度が異なる{(b)と(c)}, {(e)と(f)}, {(h)と(i)}を比較すると、鋼管の降伏応力度 $s\sigma_y$ が大きくなるほど全塑性耐力 M_{pc} を発揮できる領域が大きくなることがわかる。最後に、図-4の $s\sigma_y$ と κ が同じで $c\sigma_B$ の異なる{(a), (b)}, {(d), (e)}, {(g), (h)}をそれぞれ比較すると、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ が小さくなるほど全塑性耐力 M_{pc} を発揮できる領域が大きくなることがわかる。したがって、材端曲げモーメント比 κ 、鋼管の降伏応力度 $s\sigma_y$ が大きいほど、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ が小さいほど全塑性耐力 M_{pc} を発揮しやすい。

本研究では円形CFT柱を対象とし、鋼管の径厚比がランクFAの上限值に相当する値となる場合について検討したが、角形CFT柱を対象としている文献(7)における、鋼管の幅厚比が21の場合と比較すると全塑性耐力を発揮できる条件はほぼ同じであった。

5. まとめ

円形CFT柱の終局耐力評価法に関連して、本論文では $P\delta$ モーメントに起因する耐力低下が生じず全塑性耐力を発揮できる軸力比の上限值を明らかとするために、一定軸力と曲げモーメントが作用する円形CFT柱の解析を行った。応力ひずみ関係を鋼管は式(1)のMenegotto-Pinto式、コンクリートは式(2)のFafitis & Shah式として、材端曲げモーメント比 κ 、安定性指標 α 、材料強度($s\sigma_y, c\sigma_B$)を解析変数として選んだ。鋼管の降伏応力度 $s\sigma_y$ は $325\text{N/mm}^2, 440\text{N/mm}^2$ 、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ は $60\text{N/mm}^2, 90\text{N/mm}^2$ を選び、鋼管の径厚比はFAランクの上限值として計算を行った。

- 1) 材端曲げモーメント比 $\kappa \geq 0$ では、式(5)の $\alpha \leq 0.05$ かつ $n_y \leq 0.65$ の範囲で材端最大モーメント M_{1max} は全塑性モーメント M_{pc} を発揮できる。
- 2) 材端曲げモーメント比 κ 、鋼管の降伏応力度 $s\sigma_y$ が大きいほど、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ が小さいほど全塑性耐力 M_{pc} を発揮しやすい。

今後は解析変数を増やして同様の検討を行い、全塑性耐力を発揮できる軸力比の上限值を定式化する予定である。

謝辞：本研究は令和5年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C)(課題番号22K4415, 研究代表者：城戸将江)の援助を受けた。関係各位に感謝します。

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
- 2) 日本建築学会構造委員会：CFT 構造計算規準化に向けて，2016 年度日本建築学会大会（九州）パネルディスカッション資料，2016
- 3) 城戸將江，津田恵吾，原口将行：曲げ座屈するコンクリート充填鋼管圧縮材の耐力評価，日本建築学会構造系論文集，第 82 巻，第 735 号，pp.753-763，2017
- 4) 城戸將江，津田恵吾，原口将行：コンクリート充填角形鋼管柱材の曲げ耐力について，日本建築学会構造系論文集，第 85 巻，第 769 号，pp.415-425，2020
- 5) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針，2010
- 6) Marco Menegotto, Paolo Emilio Pinto : Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, Proc., IABSE Symposium of Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by well Defined Repeated Loads, IABSE, Lisbon, Portugal, Vol. 13, pp.15-22, 1973
- 7) 城戸將江，津田恵吾：コンクリート充填角形鋼管柱材の全塑性耐力を期待できる軸力比の上限値 $-P\delta$ モーメントに起因する耐力低下の無い場合-，日本建築学会構造系論文集，第 88 巻，第 808 号，pp.1027-1038，2023
- 8) A.Fafitis and S.P.Shah : Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, Journal of American Concrete Institute, Vol. 87, No. 12, pp.213-232, 1985
- 9) 津田恵吾，城戸將江：完全弾塑性型の応力-ひずみ関係よりなる角形鋼管柱の終局耐力評価について，日本建築学会構造系論文集，第 80 巻，第 718 号，pp.1981-1990，2015
- 10) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2020 年版，建築物の構造関係技術基準解説書，2022

(Received August 25, 2023)

AXIAL LOAD RATIO LIMIT FOR ATTAINMENT OF FULL PLASTIC MOMENT OF CIRCULAR CFT BEAM-COLUMNS

Akira SHIRAISHI and Masae KIDO

The design formulae for concrete filled steel tubular beam-columns are shown in AIJ Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures (hereinafter CFT Recommendations). The design formulae are given for short columns, midium length columns and slender columns respectively with the characteristic values of effective length factor-section depth ratio 4 and 12. The flexural strength of the column with the effective length factor-section depth ratio smaller than 4 can be evaluated as the full plastic moment, however, the condition that the CFT columns can attain the full plastic moment had not been presented. From this background, the equations to obtain the upper limit of the axial force ratio for attainment of full plastic moment of square CFT columns were shown in the previous study. The equations were composed with the nominal slenderness ratio of the steel tube and the end moment ratio. However, this condition is not shown for circular CFT columns. The objective of this study is to examine the condition that the circular CFT columns can attain the full plastic moment.