（7）等偏心圧縮力を受ける円形CFT中柱の耐力評価に関する解析的研究

藤永　隆[1]・孫　玉平[2]

[1]正会員　神戸大学 准教授　都市安全研究センター（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
E-mail:ftaka@kobe-u.ac.jp

[2]正会員　神戸大学大学院 教授　工学研究科建築学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
E-mail:sunlili@people.kobe-u.ac.jp

日本建築学会のSRC規準では，鋼とコンクリートの合成構造の耐力は鋼とコンクリートの耐力を累加して算定することになっている．現行の規準では，座屈長さと断面せいの比が4以下の短柱および座屈長さ・断面せい比が12を超える長柱の耐力式は示されているが，短柱の境界から長柱の境界までの中柱域の耐力式が示されていない．改定されたCFT指針に中柱式が追加されたがその精度に関してのパラメトリックな検討がなされていない．本論では，円形CFT中柱に関して，数値解析による精解値とCFT指針の耐力式とのパラメトリックな精度の検討を行っている．

Key Words : *CFT, Slenderness ratio, Diameter to thickness ratio, Yield stress, Strength of concrete*

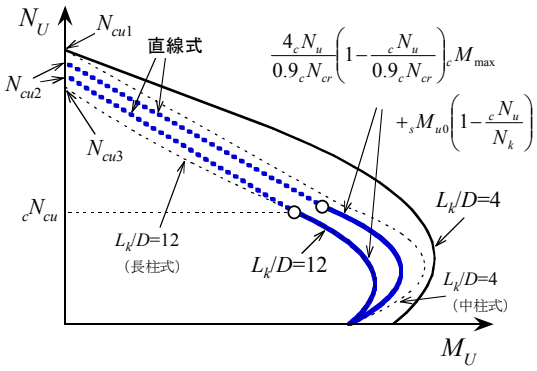
1. はじめに

鋼・コンクリート合成柱の耐力は，鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説[1)]（以下SRC規準）では，鋼柱とRC柱あるいはコンクリート柱の耐力の累加により算定することになっている．軸方向力を受ける柱材では，座屈長さが断面せいの4倍を超え12倍以下の中柱に関しては，座屈長さが断面せいの4倍以下の短柱式と座屈長さが断面せいの12倍を超える長柱式を線形補間して算定することとなっているが，軸方向力と曲げモーメントを同時に受ける柱に関しては中柱の式が規定されておらず，短柱式をそのまま用いて算定することとなっており，現行規準では短柱と長柱の耐力計算は不連続となっている．CFT柱に関しては，2008年10月のコンクリート充填鋼管構造設計施工指針（以下CFT指針）の改定に伴い，新たに軸方向力と曲げモーメントを受ける中柱の設計式が示された[2)]．

既往の研究では，$4<L_k/D\leqq 12$（L_k/D：座屈長さ・断面せい比）の中柱の設計式に関しては，鄭等が$L_k/D=4$の耐力と$L_k/D=12$の耐力を，軸力と曲げ耐力に関して線形補間することにより中柱の耐力を算定する方法を提案しており，数値解析値とよく対応することを示している[3)]．この方法は，考え方は非常に簡単であり，軸力のみを受ける中柱の設計式の考え方とも矛盾することはない．しかし，実際の耐力計算は非常に煩雑となる．城戸等は，低軸力領域はSRC規準の長柱式が中柱にも利用できると仮定して長柱式を使用し，高軸力部分を直線式とする設計式を提案しており，既往の実験値をよく評価することを示している[4)]．改定版のCFT指針ではこの方法が採用されている．しかし，短柱と中柱の境界である$L_k/D=4$と中柱と長柱の境界である$L_k/D=12$において若干の不連続性が残されている．また，提案手法の妥当性については限られた既往の等偏心圧縮実験との比較のみであり，パラメトリックな解析的検討がなされていない．藤永等は文献5においてCFT中柱の耐力算定の際，軸方向力を一定のもとで，曲げ耐力のみに関して線形補間する方法を用いているが，こちらに関しても解析的検討が不足している．

著者らは角形CFT中柱に関して，数値解析による精解値とCFT指針の中柱の終局耐力式および線形補間式との比較検討を行い，指針式と線形補間式ともに精度がよいが，指針式で$L_k/D=4$の時に危険側の評価をすることを示している[6)]．

本論では，等偏心圧縮を受ける円形CFT中柱を対象とし，数値解析により等偏心圧縮を受ける円形CFT中柱の終局耐力の精解値を求め，CFT指針の中柱の耐力評価式とのパラメトリックな精度の検討を行うことを目的とする．



図－1　CFT 指針の中柱耐力式 2)4)

2. CFT指針による中柱の耐力評価式

図－1に示すように，CFT指針では，軸方向力と曲げモーメントを受ける中柱の耐力を，コンクリート柱の軸圧縮耐力より小さい低軸力部分ではL_k/D =12を超える長柱の場合のSRC規準式と同じ式を使用し，高軸力部分では直線式となる耐力式を用いて算定することとしている（式(1)参照，図中の太実線と太点線）2).

$N_u \le {}_cN_{cu}$　または　$M_u \ge {}_sM_{u0}\left(1-\frac{_cN_{cu}}{N_k}\right)$　のとき

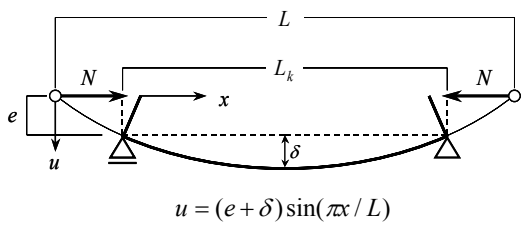
$$M_u = \frac{4N_u}{0.9_cN_{cr}}\left(1-\frac{N_u}{0.9_cN_{cr}}\right)_cM_{\max} + {}_sM_{u0}\left(1-\frac{N_u}{N_k}\right) \tag{1-1}$$

$N_u > {}_cN_{cu}$　または　$M_u < {}_sM_{u0}\left(1-\frac{_cN_{cu}}{N_k}\right)$　のとき

$$M_u = {}_sM_{u0}\left(1-\frac{N_u - {}_cN_{cu}}{N_{cu2} - {}_cN_{cu}}\right)\left(1-\frac{_cN_{cu}}{N_k}\right) \tag{1-2}$$

ここで，　${}_sM_{u0}$：鋼管部分が曲げモーメントのみを受けた場合の終局曲げ耐力，${}_cM_{\max}$：充填コンクリート長柱の最大曲げ耐力，　N_k：柱の座屈耐力，N_{cu2}：軸方向力を受ける中柱の終局耐力

図中，比較のためにL_k/D =12の時に長柱式を用いた場合の耐力線と，L_k/D =4の時に中柱式を用いた場合の耐力線を細破線で示している．



図－2　解析モデル

3. 数値解析によるCFT柱の耐力

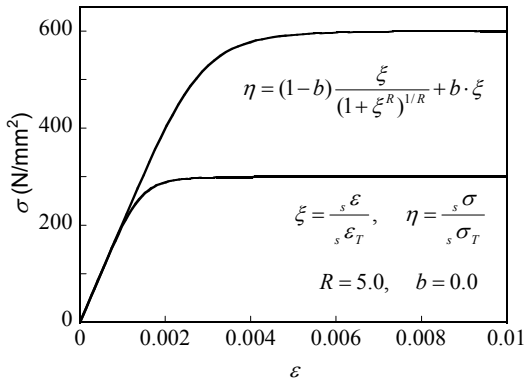
(1) 解析概要

両材端において偏心距離eの位置に圧縮力を受けるCFT柱の解析を行った．解析モデルは材のたわみ形状を正弦半波であると仮定し，材中央でのみ釣合を満足するとして，軸荷重－たわみ関係を求め，最大の軸圧縮耐力を算定した（図－2参照）．解析はファイバー法で行っており，断面の分割数はコンクリート部分が20分割，鋼管部分を28分割としている．

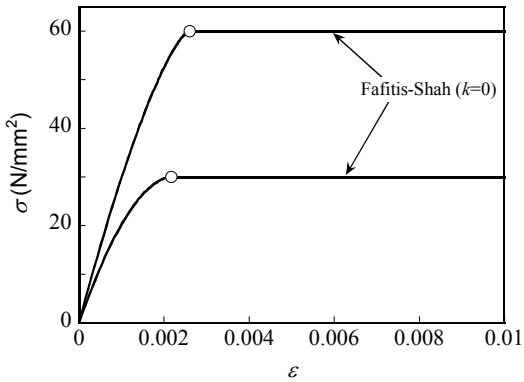
(2) 応力－ひずみ関係

鋼の応力－ひずみ関係はMenegotto-Pintoモデル7)を用いた．ひずみ硬化係数bを0.0とし，曲線の形状を表す変数Rを5.0としている．図－3に鋼の応力－ひずみ関係を示す．

コンクリートの応力－ひずみ関係は，Fafitis-Shahモデル8)を用いた．拘束効果を考慮し，モデル中の係数k=0と



図－3　鋼の応力－ひずみ関係



図－4　コンクリートの応力－ひずみ関係

し，圧縮耐力以降の劣化は考慮していない．また，コンクリートの引張応力は考慮していない．図－4にコンクリートの応力－ひずみ関係を示す．

鋼，コンクリートともに非線形弾性とした．

(3) 実験値との対応

図－5に文献9，10の実験結果と本章の解析による結果の比較を示している．文献10の中心圧縮の試験体で精解値は実験値よりも大きめの評価をする傾向にあるが，実験の耐力が，試験体の不完全性等の理由で小さいことも考えられる．全体としては実験結果との対応が良く，この解析モデルを用いてパラメトリックな解析を行い，耐力式との比較検討を行う．

(4) 解析変数

解析対象断面は円形のCFT断面とした．解析変数として，鋼管の径厚比D/t，鋼材の降伏点応力${}_s\sigma_Y$，コンクリートの圧縮強度${}_c\sigma_B$，座屈長さ・断面せい比L_k/Dをとり，鋼管の径厚比はD/t=30, 50, 70の3種類，鋼管の降伏点応力${}_s\sigma_Y$は300, 600N/mm^{2}の2種類，コンクリートの圧縮強度${}_c\sigma_B$は30, 60N/mm^{2}の2種類，座屈長さ・断面せい比L_k/Dは4, 6, 8, 10, 12の5種類を選んだ．圧縮力の偏心量eは，中心圧縮から曲げのみが作用する状態まで，50種類程度を選定して算定した．

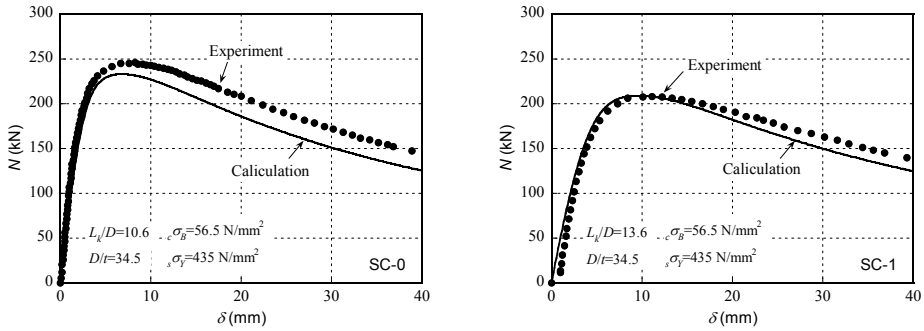
以上の解析変数の組合せに対して，圧縮力N－たわみδ関係を求めた．最大圧縮耐力N_{max}とN_{max}に偏心量eを乗じた値をモーメント－軸力関係へプロットして耐力式の評価を行った．

4. 耐力式と数値解析値の比較

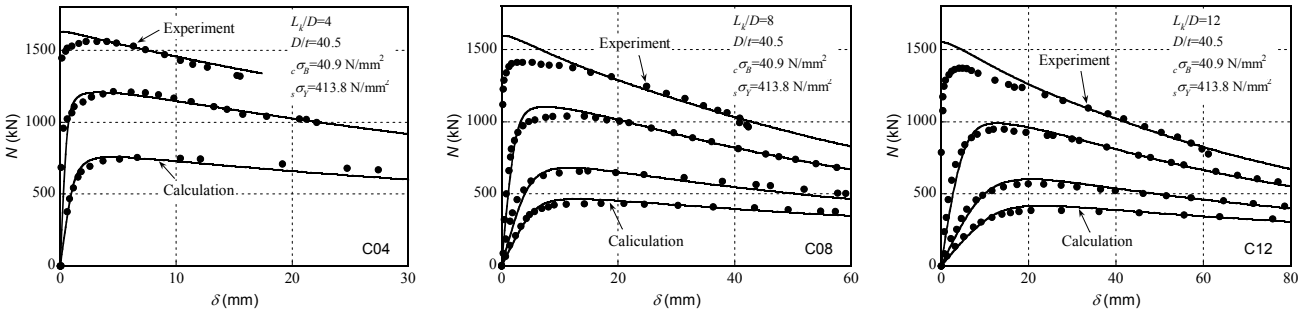
(1) モーメント－軸力比関係の比較

図－6にモーメント－軸力関係の比較を示す．図中で，軸力は鋼の降伏点応力とコンクリートの圧縮強度を用いて算定した軸圧縮耐力（$N_U={}_c\sigma_B\cdot{}_cA+{}_s\sigma_Y\cdot{}_sA$）により無次元化，曲げ耐力は鋼とコンクリートの単純累加による断面の最大曲げ耐力（$M_U={}_c\sigma_B\cdot D^3/8+{}_sM_{t0}$）で無次元化している．図中の太実線および太破線はCFT指針の中柱の耐力算定式による耐力線を表しており，原点に最も近い耐力曲線がL_k/D=12の耐力線であり，L_k/Dが大きくなるほど曲線が大きくなり，最外の耐力線がL_k/D=4のもの（短柱の耐力線）である．図中▲，○，■，△および●印（それぞれL_k/D=4, 6, 8, 10, 12）は，前章の数値解析による精解値を表している．図中の細実線は，L_k/D=4の時に中柱式を用いた場合の耐力線を表しており，参考のために示している．

CFT指針式の耐力線を用いた場合，短柱式の境界値であるL_k/D=4の時に数値解析による精解値よりも大きく，明らかに危険側の耐力評価をしている．L_k/D=4の時に中

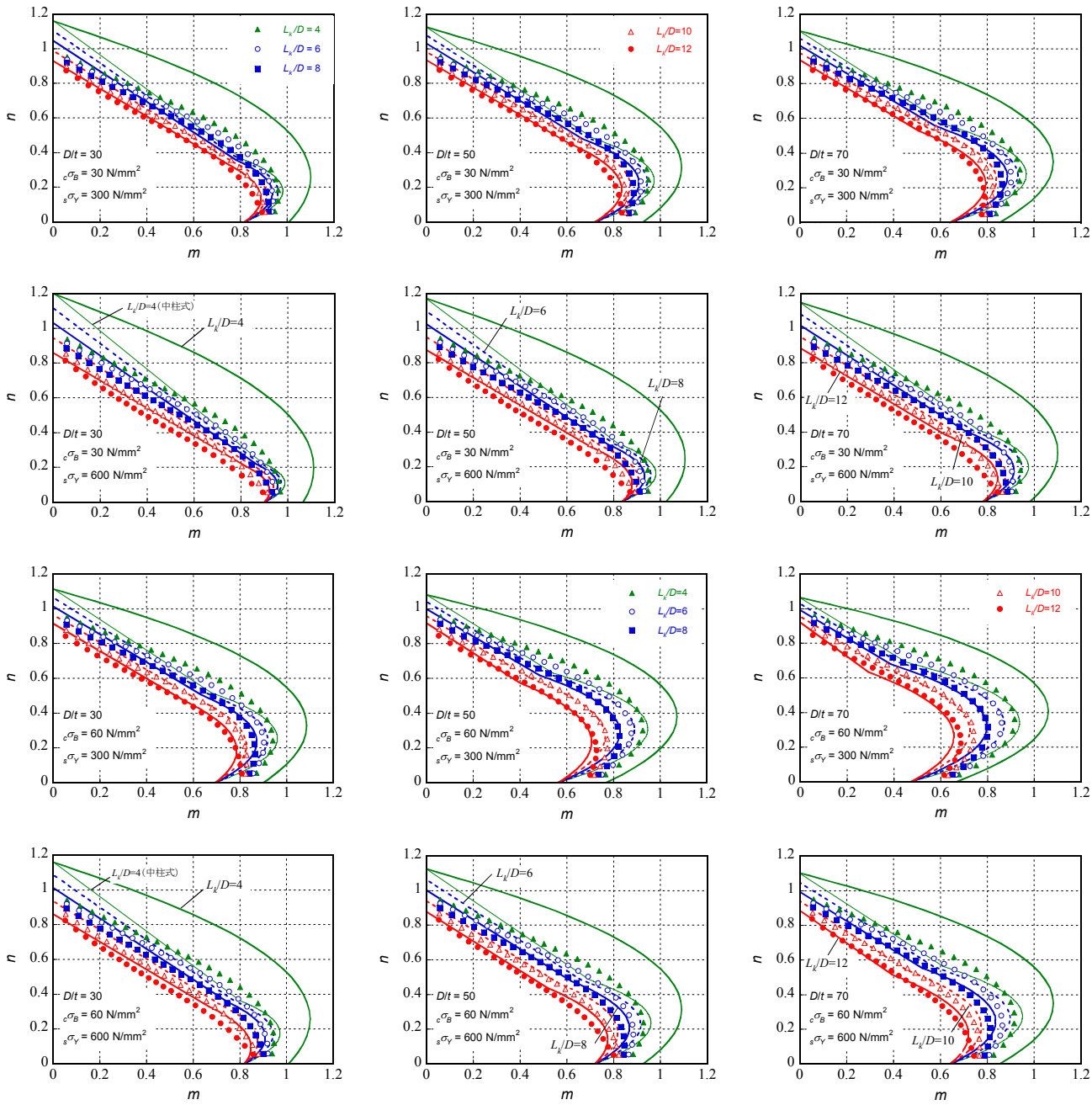


(a) Kilpatrick, Rangan の実験 [9]



(b) 松井，津田等の実験 [10]

図－5　実験値と解析値の挙動比較

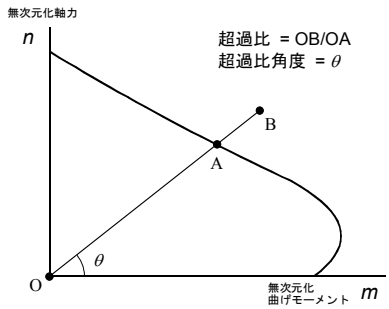


(a) D/t=30　　(b) D/t=50　　(c) D/t=70

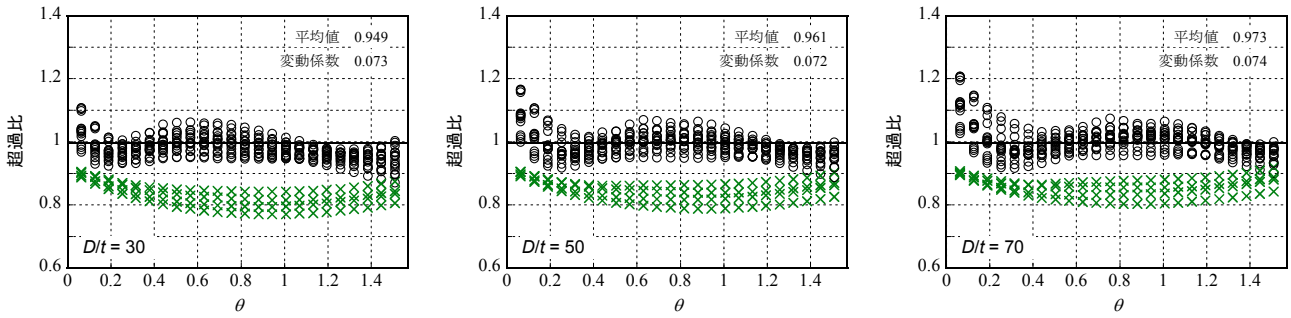
図−6　CFT 指針中柱耐力式と精解値の比較

柱式を用いた場合の耐力線との対応が良い．前章の精解値算定において，拘束効果によるコンクリート強度の上昇は考慮していないが，解析値はL_k/D=4の実験値を概して良く予測している．

コンクリート柱の軸圧縮耐力の前後において，耐力線の形状と精解値の変化傾向が異なり，耐力線と精解値の差が大きくなる傾向にある．特に座屈長さ・断面せい比が小さい（L_k/D=4, 6）時に差が大きい．また，軸力が卓越する領域において誤差が大きいことが分かる．これはCFT指針の短柱式は拘束効果を考慮して強度を増加し

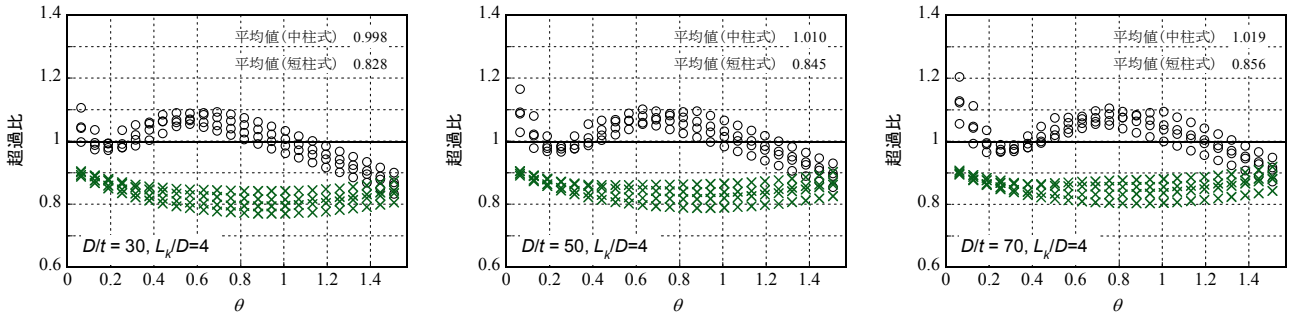


図−7　超過比の定義



(a) D/t=30　　(b) D/t=50　　(c) D/t=70

図－8　CFT 指針式と数値解析値との超過比による精度



(a) D/t=30　　(b) D/t=50　　(c) D/t=70

図－9　CFT 指針中柱式と短柱式による超過比の比較（L_k/D=4）

ており，中柱式は長柱と短柱の線形補間をしているからである．一方，数値解析による精解値は，材料強度の点において拘束効果による強度の上昇は考慮していない．しかし，前章の数値解析において中心圧縮の実験結果との比較においては，実験値より解析値の方が圧縮耐力が大きい結果となっている．

また，${}_s\sigma_Y$ =600N/mm^{2}の時の径厚比制限値は58.8となり，D/t=70に関しては幅厚比制限の観点からは適用範囲外となるが，${}_s\sigma_Y$ =600N/mm^{2}の時でも${}_s\sigma_Y$ =300N/mm^{2}の場合と比較して，精度に大きな差は認められなかった．

(2) 超過比による精度の比較

超過比の観点により，耐力式と数値解析値の精度の比較を行った．図－7に超過比および超過比角度の定義を示す．数値解析値と原点を結ぶ線分の長さと，その直線と耐力線の交点と原点との線分の長さの比を超過比とし，また横軸と直線のなす角度を超過比角度と定義する．図－8に超過比－超過比角度関係を示す．図中○, ×印が各パラメータでの超過比をプロットしたものである．○印はL_k/D =6～12のデータを，×印はL_k/D =4のデータを表している．

CFT指針式と数値解析値の超過比は，D/t=30, 50, 70で平均値がそれぞれ0.949, 0.961, 0.973，変動係数がそれぞれ0.073, 0.072, 0.074と良い対応を示している．L_k/D=4では全てのデータが耐力を小さく危険側に評価しており，D/t=30, 50, 70でL_k/D =4のみの平均値がそれぞれ0.828, 0.845, 0.856であった．L_k/D =4のデータを除いてL_k/D =6～12の範囲で平均値，変動係数を求めると，D/t=30, 50, 70で平均値がそれぞれ0.979, 0.991, 1.002，変動係数がそれぞれ0.036, 0.040, 0.045となり，それ以外の座屈長さ・断面せい比では対応が良いことが解る．

曲げが卓越する領域で安全側の評価をしているが，これは耐力式が単純累加強度なので，この領域で耐力を小さく評価するためである．

図-9に，L_k/D=4の時に中柱式と短柱式の耐力式を用いてそれぞれ算定した超過比の比較を示す．短柱式の場合は全てのプロットで危険側の評価であるが，中柱式を用いると平均的には良い評価をしている．軸力が卓越する領域では中柱式でも危険側の評価をしている．

5. まとめ

軸方向力と曲げモーメントを受ける円形CFT中柱に関して，CFT指針の中柱式と線形補間による中柱耐力算定法の耐力の精度検討を行った．数値解析は以下の変数で行った．鋼管の径厚比(D/t=30, 50, 70)，鋼管の降伏点応力(${}_s\sigma_Y$ =300, 600N/mm^2)，コンクリートの圧縮強度(${}_s\sigma_Y$ =30,

60N/mm^2)，座屈長さ・断面せい比(L_k/D=4, 6, 8, 10, 12).
CFT指針の中柱式，および線形補間法と数値解析による精解値との比較により，以下のことが解った.

(1) CFT指針ではL_k/D=4の柱は短柱式で算定することになっているが，数値解析の精解値と比較すると耐力を過大に危険側の評価をしている．精解値算定の際に拘束効果によるコンクリート強度の上昇は考慮していないが，解析値はL_k/D=4の実験値を良く予測している.

(2) CFT指針の中柱式を用いて算定した耐力と数値解析値を，L_k/D=4～12の範囲で超過比の観点より比較すると対応が良い.

参考文献

1) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2001.1

2) 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

3) 鄭眞安，木村潤一：コンクリート充填鋼管短柱の耐力評価式に関する研究(モーメント勾配がある場合)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1083-1084，2004.8

4) 城戸將江，津田惠吾：軸力と曲げモーメントを受けるコンクリート充填鋼管柱の設計式　座屈長さ・断面せい比l_k/Dが4と12の間の柱，構造工学論文集，Vol.51B，pp.469-474，2005.3

5) 藤永隆，張永吉，三谷勲：CFT長柱の耐力評価に関する一考察，構造工学論文集，Vol.51B，pp.475-476，2005年3月

6) 藤永隆，孫玉平：等偏心圧縮力を受けるCFT中柱の耐力評価に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，pp.1123-1128，2009年7月

7) M.Menegotto and P.E.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. of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, pp.15-22, 1973.

8) A.Fafitis and S.P.Shah: Predictions of Ultimate Behavior of Confined Columns Subjected to Large Deformations, ACI Journal, Vol.82, no.82-35, pp. 423-433, Jul.1985

9) A.E. Kilpatrick, B.V. Rangan : Tests on High-Strength Composite Concrete Columns, Research Report No 1/97, March 1997, School of Civil Engineering, Curtin University of Technology

10) 松井千秋，津田惠吾，尾崎功，石橋靖夫：コンクリート充填鋼管長柱の耐力，日本建築学会構造系論文集，第494号，pp.137-144，1997.4

ANALYTICAL STUDY ON STRENGTH ESTIMATION OF MIDDLE-LENGTH CIRCULAR CFT BEAM-COLUMN SUBJECTED TO ECCENTRICAL COMPRESSION

Takashi FUJINAGA and Yuping SUN

In the SRC Standard of AIJ, the strength of Steel – Concrete Composite Column is caliculated by using superposed method. In the current standard, the boundary of short column is buckling length to diameter ratio (L_k/D) 4, the boundary of slender column is buckling length to diameter ratio (L_k/D) 12. However there are no formulae for middle-length column (L_k/D = 4 - 12). A formula for middle-length column was added to a revised New CFT Recommendations. However parametric numerical analysis was not carried out. In this paper, we conducted a numerical analysis and compared analytical data with the formula of the middle-length columns of CFT Recommendations.