

# 論文 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

藤永 隆\*<sup>1</sup>・孫 玉平\*<sup>2</sup>

**要旨:** 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・断面せいの比が 4 以下の短柱および座屈長さ・断面せいの比が 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、数値解析による精解値と CFT 指針の耐力式、および簡便な線形補間式による耐力とのパラメトリックな精度の検討を行っている。

**キーワード:** コンクリート充填鋼管, 座屈長さ・断面せいの比, 幅厚比, 降伏点応力, コンクリート圧縮強度

## 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<sup>1)</sup> (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<sup>2)</sup>。

既往の研究では、 $4 < L_k/D \leq 12$  ( $L_k/D$ : 座屈長さ・断面せいの比) 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<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>。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。

本論では、数値解析により等偏心圧縮を受ける中柱の耐力の精解値を求め、CFT 指針の中柱の耐力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。また、簡便な線形補間による耐力算定法と精解値との精度の検討も行った。

## 2. CFT 中柱の耐力評価式

### 2.1 CFT 指針式

図-1 に示すように、CFT 指針では、軸方向力と曲げ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)<sup>2)</sup>。

$$N_u \leq_c N_{cu} \quad \text{または} \quad M_u \geq_s M_{u0} \left( 1 - \frac{c N_{cu}}{N_k} \right) \quad \text{のとき}$$

$$M_u = \frac{4N_u}{0.9_c N_{cr}} \left( 1 - \frac{N_u}{0.9_c N_{cr}} \right) M_{\max} +_s M_{u0} \left( 1 - \frac{N_u}{N_k} \right) \quad (1-1)$$

$$N_u >_c N_{cu} \quad \text{または} \quad M_u <_s M_{u0} \left( 1 - \frac{c N_{cu}}{N_k} \right) \quad \text{のとき}$$

$$M_u =_s M_{u0} \left( 1 - \frac{N_u - c N_{cu}}{N_{cu2} - c N_{cu}} \right) \left( 1 - \frac{c N_{cu}}{N_k} \right) \quad (1-2)$$

\*1 神戸大学 都市安全研究センター 准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

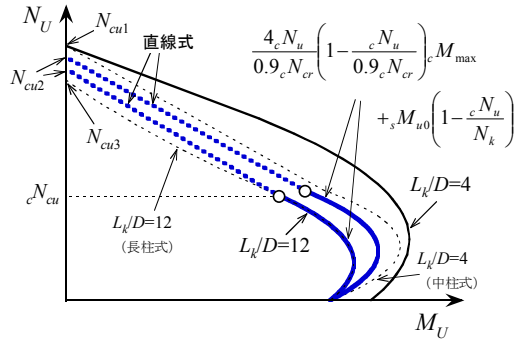


図-1 CFT 指針の中柱耐力式<sup>2),4)</sup>

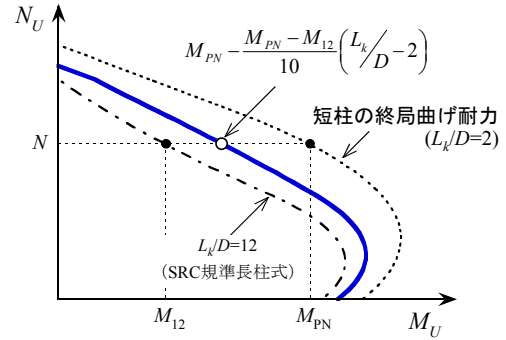


図-2 線形補間耐力算法<sup>5)</sup>

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。

## 2.2 線形補間による中柱の耐力評価

軸方向力を受ける  $4 < L_k/D \leq 12$  の中柱の耐力は、両境界を線形補間することにより比較的簡単に算定ができる。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、文献3において線形補間による中柱の耐力評価法が提案されているが、文献3の方法は軸力と曲げ耐力に関する線形補間であり、考え方は簡単であるが計算は非常に煩雑となり、設計軸力に対応する曲げ耐力を求める際には収束計算が必要となる。一方、図-2に示すように、軸力一定のもとで曲げ耐力に関して線形補間することにより曲げ耐力を算定できる<sup>5)</sup>。こちらは比較的簡単であり、現行規準にも簡単に組み込むことが可能である(式(2)参照)。

$$M_u = M_{PN} - \frac{M_{PN} - M_{12}}{10} \left( \frac{L_k}{D} - 2 \right) \quad (2)$$

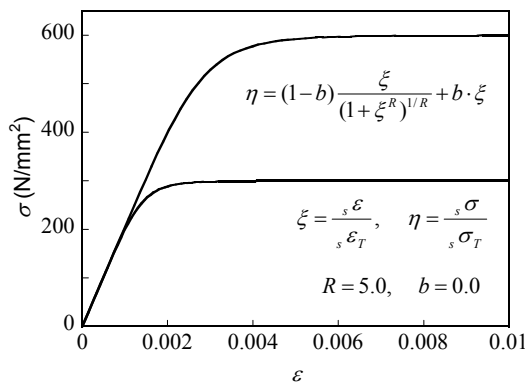


図-4 鋼の応力-ひずみ関係

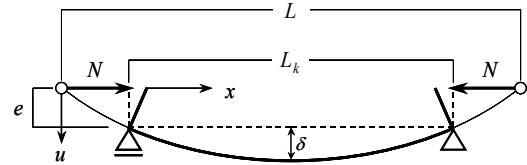


図-3 解析モデル

ここで、 $M_{PN}$ ：設計軸力導入時の全塑性モーメント、 $M_{12}$ ： $L_k/D=12$  のときの終局曲げ耐力

本論では  $4 < L_k/D \leq 12$  の中柱領域の曲げ耐力を、SRC規準式による  $L_k/D=12$  の長柱の終局曲げ耐力(図中一点鎖線)と短柱の終局曲げ耐力(図中点線)を、線形補間することにより算定し、数値解析結果およびCFT指針の耐力式と比較する。なお、文献5において座屈長さ・断面せい比の短柱の境界は  $L_k/D=2$  としており、本論でも同じ値を用いて算定する。

## 3. 数値解析によるCFT柱の耐力

### 3.1 解析概要

材端に等偏心  $e$  の圧縮力を受けるCFT柱の解析を行った。解析は材のたわみ形状を正弦半波で仮定し、材中央でのみ釣合を満足するとして、荷重-変形関係を求め、最大耐力を算定した(図-3参照)。

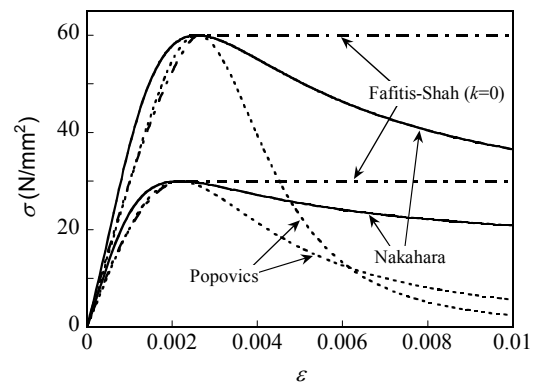


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

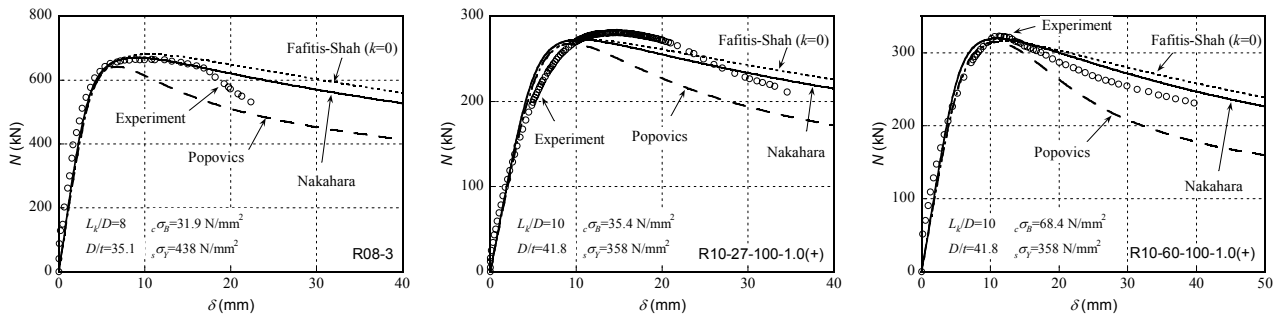


図-6 実験値と解析値の挙動比較<sup>10), 11)</sup>

### 3.2 応力-ひずみ関係

鋼の応力-ひずみ関係は Menegotto-Pinto モデル<sup>6)</sup>を用いた。ひずみ硬化係数は 0.0 とし、曲線の形状を表す変数  $R$  は 5.0 とした。図-4 に鋼の応力-ひずみ関係のグラフを示す。

コンクリートの応力-ひずみ関係は、1) Fafitis-Shah モデル<sup>7)</sup>でピーク後挙動の係数  $k=0$  としたものを、2) Popovics モデル<sup>8)</sup>、3) 中原等のモデル<sup>9)</sup>の 3 種類を仮定した。1) のモデルは拘束効果の大きなものを仮定し、 $k=0$  としている。2) のモデルは拘束効果の小さなものを仮定した。それぞれ非線形弾性とし、コンクリートの引張応力は考慮していない。図-5 にそれぞれのコンクリートの応力-ひずみ関係の比較を示す。

### 3.3 実験値との対応

図-6 に文献<sup>10), 11)</sup>の実験結果と本章の解析による結果の比較の一例を示している。コンクリートの応力-ひずみ関係に中原等のモデルを用いた際に実験結果との対応が最も良く、これ以降の解析では中原等のモデルを用いて算定を行い、耐力式との比較検討を行う。

### 3.4 解析変数

解析対象断面は正方形断面とした。解析変数として、鋼管の幅厚比  $D/t$ 、鋼管の降伏点応力  $\sigma_y$ 、コンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$ 、座屈長さ・断面せい比  $L_k/D$  を選んだ。

鋼管の幅厚比は  $D/t=20, 40, 60$  の 3 種類、鋼管の降伏点応力  $\sigma_y$  は  $300, 600\text{N/mm}^2$  の 2 種類、コンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$  は  $30, 60\text{N/mm}^2$  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。圧縮力の偏心率  $e$  は 50 種類程度算定した。

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

## 4. 耐力式と数値解析値の比較

### 4.1 モーメント-軸力関係の比較

図-7, 8 にモーメント-軸力関係の比較を示す。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 ( $N_U = c\sigma_B \cdot cA + \sigma_y \cdot sA$ ) 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 ( $M_U = c\sigma_B \cdot D^3/8 + sM_{st}$ ) で無次元化している。図中の太実線および太破線は各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。CFT 指針式との比較図の細実線は、 $L_k/D=4$  の時に中柱式を用いた場合の耐力線を示している。線形補間式との比較図の細点線は断面の全塑性耐力 (CFT 指針では短柱式) を示している。

CFT 指針式を用いた場合、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、危険側の耐力評価をしている。 $D/t=20$  の場合では、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、耐力を小さめに安全側の評価をする傾向にある。また、 $\sigma_y=600\text{N/mm}^2$  の高張力鋼を用いた場合に、特に座屈長さ・断面せい比の大きい時、耐力を大きく見積もり、危険側の評価になっている。

線形補間式を用いた場合は、幅厚比が小さい場合は非常に精度良く予測するが、幅厚比が大きくなると精解値との対応が悪くなる。特に  $\sigma_y=600\text{N/mm}^2$  の高張力鋼の場合に精度が悪くなる傾向が見られる。なお、 $\sigma_y=600\text{N/mm}^2$  の時の幅厚比制限値は 44.9 となり、 $D/t=60$  に関しては幅厚比制限の観点からは適用範囲外となる。線形補間による耐力線は、概して曲線形状が精解値の変化傾向を良く予測しているといえる。

### 4.2 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-9 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、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-10, 11 に超過比-超過比角度関係を示す。図中○,

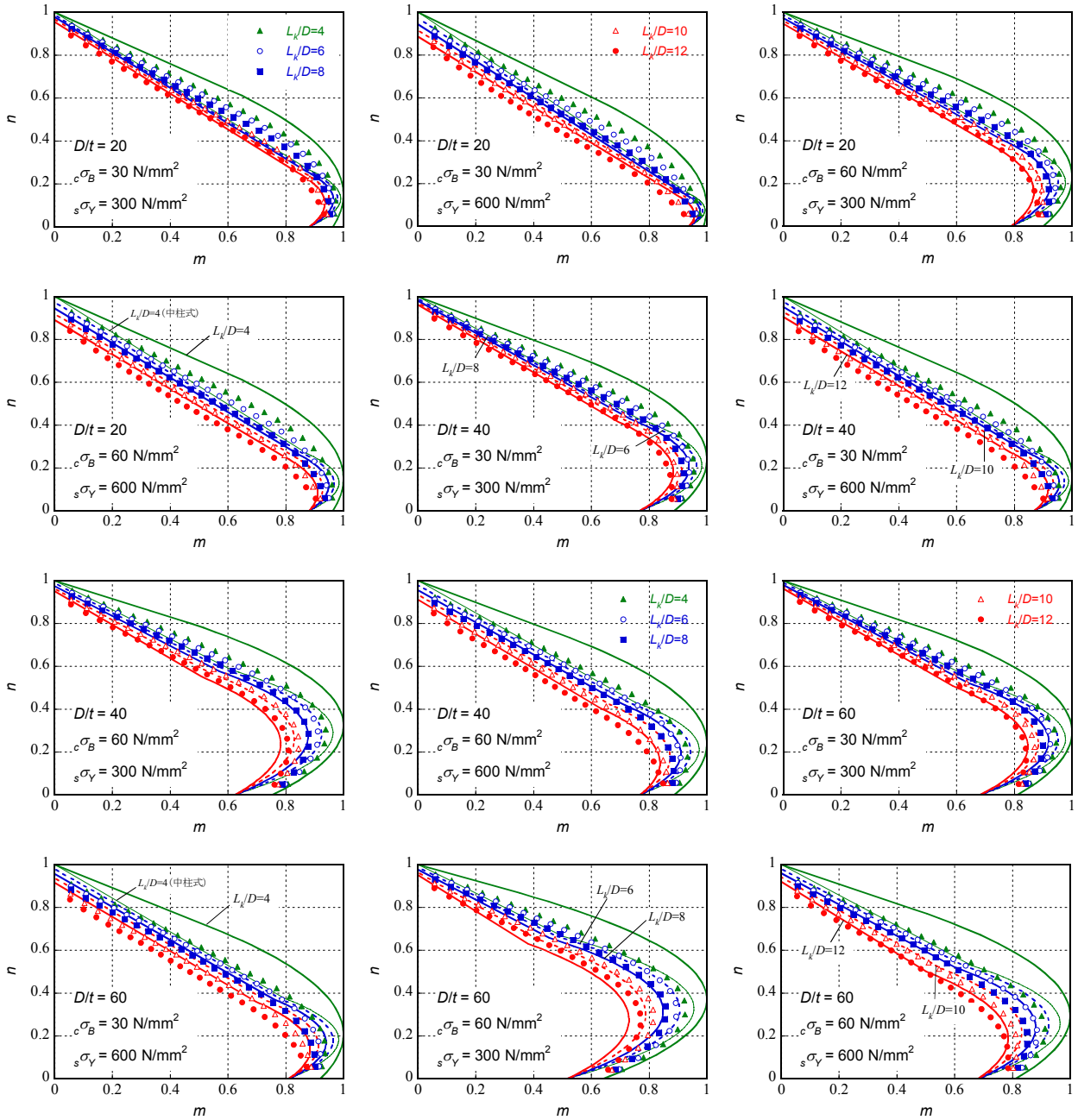


図-7 CFT 指針式と数値解析値との比較

×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。

CFT 指針式と数値解析値の超過比は、 $D/t=20, 40, 60$  で平均値がそれぞれ 0.992, 0.985, 0.985, 変動係数がそれぞれ 0.035, 0.040, 0.048 と良い対応を示している。図中×印は  $L_k/D=4$  のデータであり、全てのデータが耐力を小さく危険側に評価している。 $L_k/D=4$  のデータを除いて  $L_k/D=6 \sim 12$  の範囲で平均値, 変動係数を求めると、 $D/t=20, 40, 60$  で平均値がそれぞれ 1.003, 0.998, 1.001, 変動係数がそれぞれ 0.027, 0.030, 0.037 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。

線形補間式と数値解析値の超過比は、 $D/t=20, 40, 60$  で

平均値がそれぞれ 0.998, 0.991, 0.991, 変動係数がそれぞれ 0.019, 0.028, 0.037 と、 $L_k/D=4$  のデータを含めて良い対応を示している。

## 5. まとめ

軸方向力と曲げモーメントを受ける 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。鋼管の幅厚比 ( $D/t=20, 40, 60$ )、鋼管の降伏点応力 ( $s\sigma_Y=300, 600\text{N/mm}^2$ )、コンクリートの圧縮強度 ( $c\sigma_B=30, 60\text{N/mm}^2$ )、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

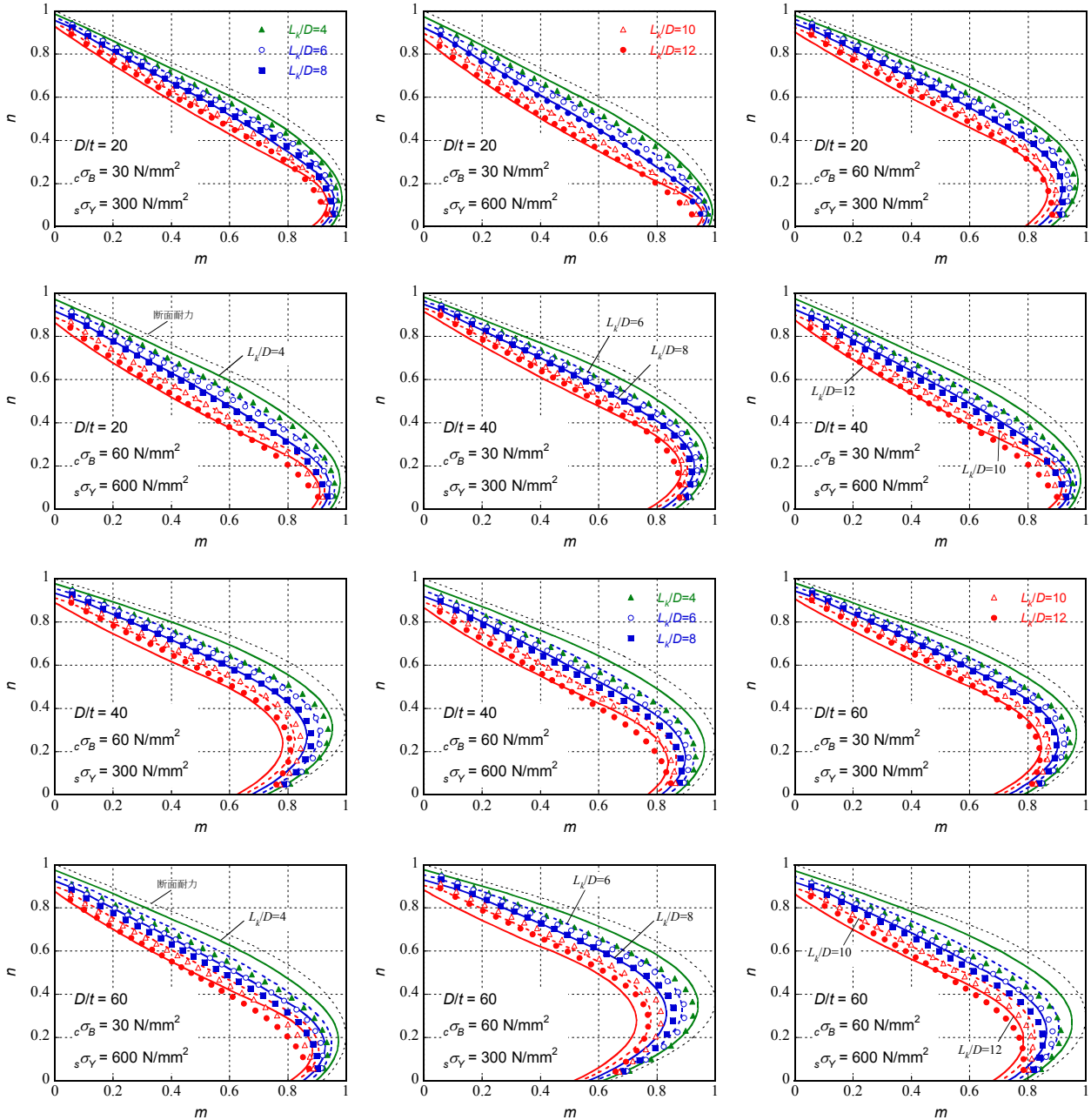


図-8 線形補間式と数値解析値との比較

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。
- (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、 $L_k/D=6\sim 12$  の範囲で超過比の観点より比較すると対応が良い。
- (3) 線形補間式を用いて算定した耐力と数値解析値を比較すると、 $L_k/D=4\sim 12$  の範囲で良い対応を示している。

謝辞

数値解析およびデータ整理に際して、平井祥二郎氏

(当時神戸大学学生)のご協力を得ました。ここに記して深く感謝の意を申し上げます。

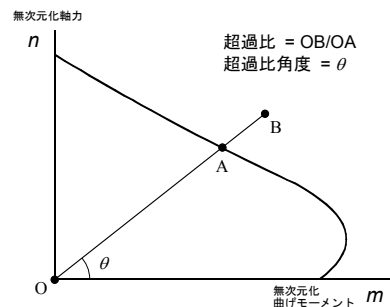


図-9 超過比の定義

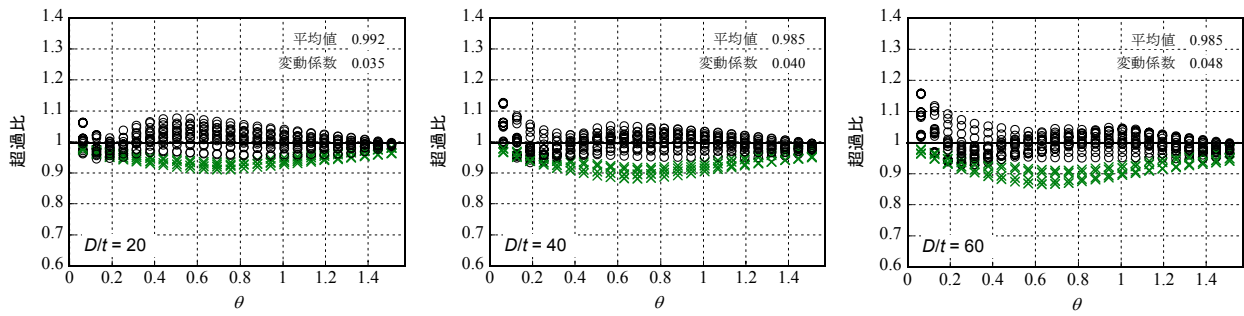


図-10 CFT 指針値と数値解析値との超過比による精度

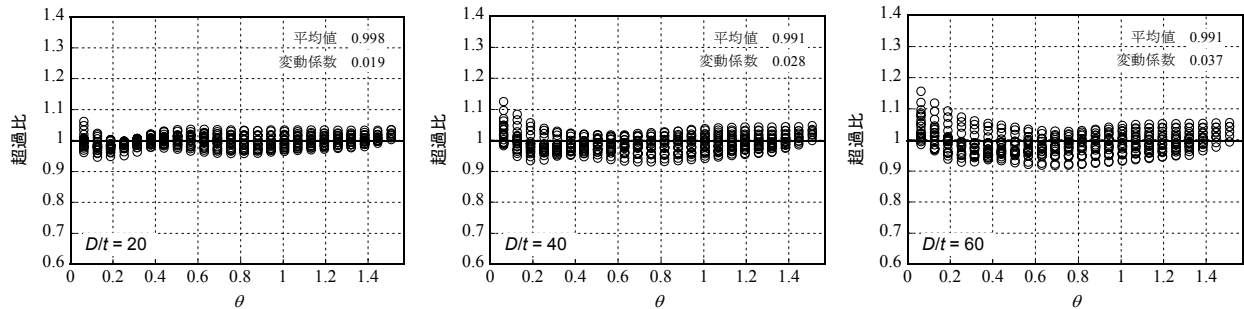


図-11 線形補間式と数値解析値との超過比による精度

#### 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，津田恵吾：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  $I_k/D$  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) 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.
- 7) 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
- 8) S.Popovics: A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve for Concrete, Cement and Concrete Research, 3(5), 1973
- 9) 中原浩之，崎野健治，稲井栄一：コンクリート充填角形鋼管柱の中心圧縮性状のモデル化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.3, 1998
- 10) 松井千秋，津田恵吾，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
- 11) 藤永隆，孫玉平：複曲率曲げを受ける角形 CFT 柱の偏心圧縮実験，構造工学論文集，Vol.54B，pp.17-22，2008.