

単純圧縮を受けるコンクリート充填鋼管短柱の応力度-ひずみ度関係についての解析的検討

Analytical Study of Stress-Strain Behavior of Concrete Filled Tube Short Columns Subject to Simple Compression

2. 構造-12. 鋼・コンクリート合成構造  
 靱性 標準強度 降伏応力度  
 残留応力 径厚比 既往の実験データ

正会員 ○山本 貴正\* YAMAMOTO, Takamasa  
 同 川口 淳\*\* KAWAGUCHI, Jun  
 同 山田 和夫\*\*\* YAMADA, Kazuo

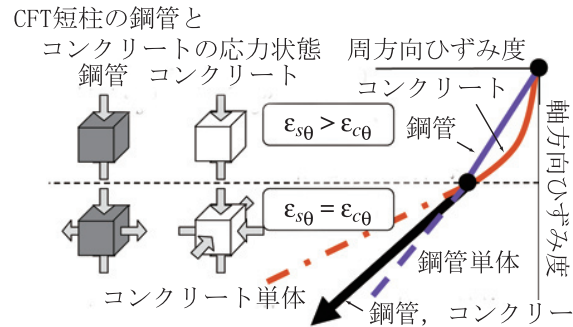
1. はじめに

コンクリート充填鋼管（以下、CFT）柱構造は、鋼管によるコンクリートのコンファインド効果、コンクリートによる鋼管の局部座屈抑制効果などのこれら相互作用（以下、相乗効果）により、優れた耐力・靱性を有していることが、数多くの実験・理論的研究を通じて知られている。これに伴い、建築物の構造形式として、CFT柱構造が多く採用されるようになってきている。しかし、その耐力・靱性に対する鋼管およびコンクリートの合理的な組み合わせについては、簡便な方法で検討している研究が僅かに存在するのみで例えば、1)、未だ、明示されていない。近年、CFT柱構造に超高強度材料が使用されつつあるため例えば、2)、またCFT柱の優れたエネルギー吸収能力を利用するため、CFT柱構造の崩壊機構を従来の梁降伏型のみではなく、柱降伏型とすることも提案されており例えば、3)、この合理的な組み合わせを判別可能な手法を構築することは急務である。

以上のことから、本稿では、CFT柱の耐力・靱性に対する鋼管およびコンクリートの合理的な組み合わせを提示することを目的として、まず、CFT柱構造の耐力・靱性を表す指標として用いられるCFT短柱の単純圧縮下の応力度-ひずみ度関係に及ぼす高強度材料を含む各種要因について、既往の研究成果を活用し解析的に検討することとした。

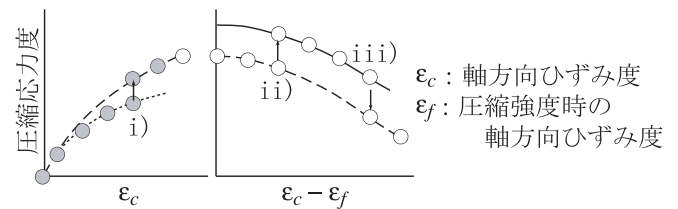
2. 解析概要

単純圧縮を受けるCFT短柱の応力度-ひずみ度関係は、既報<sup>4)</sup>の提案式を用いて算出する（精度については、後掲図3および既報<sup>4)</sup>を参照）。なお、次に示すCFT短柱を対象とする。i) 鋼管とコンクリートを同時に圧縮荷重する。ii) 鋼管内面に突起がない。iii) コンクリートに膨張性混和剤が混入されていない。iv) 充填コンクリートに空洞および鋼材が含まれていない。ii)の条件は、通常の鋼管を用いた場合と比較して、耐力が上昇するため、またiii)の条件は鋼管中と型枠



ε<sub>sθ</sub> : 鋼管の周方向ひずみ度 ε<sub>cθ</sub> : コンクリートの周方向ひずみ度

図1 CFT短柱の鋼管とコンクリートの変形の適合条件<sup>4)</sup>



線: 一定側圧 印: 変動側圧  
 点線(C) < 破線(B) < 実線(A) i): 側圧Cから側圧B(載荷)  
 ii): 側圧Bから側圧A(載荷)  
 iii): 側圧Aから側圧B(除荷)

図2 変動側圧を受ける三軸圧縮下コンクリート<sup>4,6,7)</sup>

中で養生したコンクリートの圧縮強度が異なることがあるため対象外とした。

解析方法の概略を図1および図2に示す。図1の実線に示すように、初期の応力状態では、鋼管とコンクリートのポアソン比の大小関係より、鋼管とコンクリートを軸方向のみの一軸応力状態とする。コンクリートが塑性化して、その周方向ひずみ度が鋼管のそれに達した以降は、コンファインド効果が生じ、鋼管を二軸応力状態およびコンクリートを三軸応力状態とし、また断面における変形の適合条件より、鋼管とコンクリートの周方向ひずみ度を等しくする。なお、ひずみ度に

\* 国立豊田工業高等専門学校建築学科 准教授・博士(工学) Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Toyota National College of Technology, Dr. Eng.  
 \*\* 三重大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学) Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Mie University, Dr. Eng.  
 \*\*\* 愛知工業大学工学部建築学科 教授・工博 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

及ぼす鋼管の局部座屈かつコンクリートの局所的な破壊および膨張による面外方向の変形の影響については、高ひずみ領域においても軸方向と周方向のひずみ度の増分比が安定している実験結果が得られているため(例えば、5)、無視する。三軸応力下コンクリートの軸方向応力度-軸方向ひずみ度-側圧関係は、図2に示すように、畑中ら<sup>6)</sup>および大谷ら<sup>7)</sup>の側圧を途中載荷および途中除荷した三軸圧縮下コンクリートの実験結果を参考に、側圧変動後の軸方向応力度-軸方向ひずみ度と圧縮強度時ひずみ度の差-側圧の関係は、定側圧下のその関係に乗り移るものとする。

各図に示すように、この解析結果には、コンクリートのポアソン比が著しく影響する。このことから、既報の提案式では、コンクリートのポアソン比の計算に用いている長沼式<sup>8)</sup>の変数 $v_{p0}$ および $v_p$ を、定側圧下コンクリートおよび円形CFT短柱の既往の実験データとの対応性から次式に変更している。

$$v_{p0} = 0.34 \sigma_B^{0.25} + v_0 \quad (1)$$

$$v_p = v_0 + (v_{p0} - v_0)(1.0 - R_s)^\kappa$$

$$\kappa = 10.6 \ln \sigma_B - 36.4 \quad (1 \leq \kappa \leq 10) \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_B$ : コンクリート標準供試体の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)(以下、標準強度)、 $v_0$ : 弾性ポアソン比

図3に、高強度材料が用いられている単純圧縮を受けるCFT短柱の軸方向圧縮力と平均軸方向ひずみ度の実験値<sup>2,9)</sup>と解析値の比較を示す。なお、寸法効果によるコンクリート標準強度供試体の圧縮強度(標準強度)の補正は、次式に示すBlanksらの提案式<sup>10)</sup>を用いて行った。

$$R = (D_c / D_0)^{-0.1} \quad (3)$$

ここに、 $R$ :  $D_0$ の圧縮強度に対する断面直径 $D_c$ の圧縮強度の比、 $D_0$ : 標準とする供試体の断面直径、 $D_c$ : 補正の対象とする供試体の断面直径

なお、既往の提案式の詳細は、頁数の都合上省略するため、既報<sup>4)</sup>を参照されたい。

同図に示すように、それぞれの解析値は実験値を追跡することがわかる。

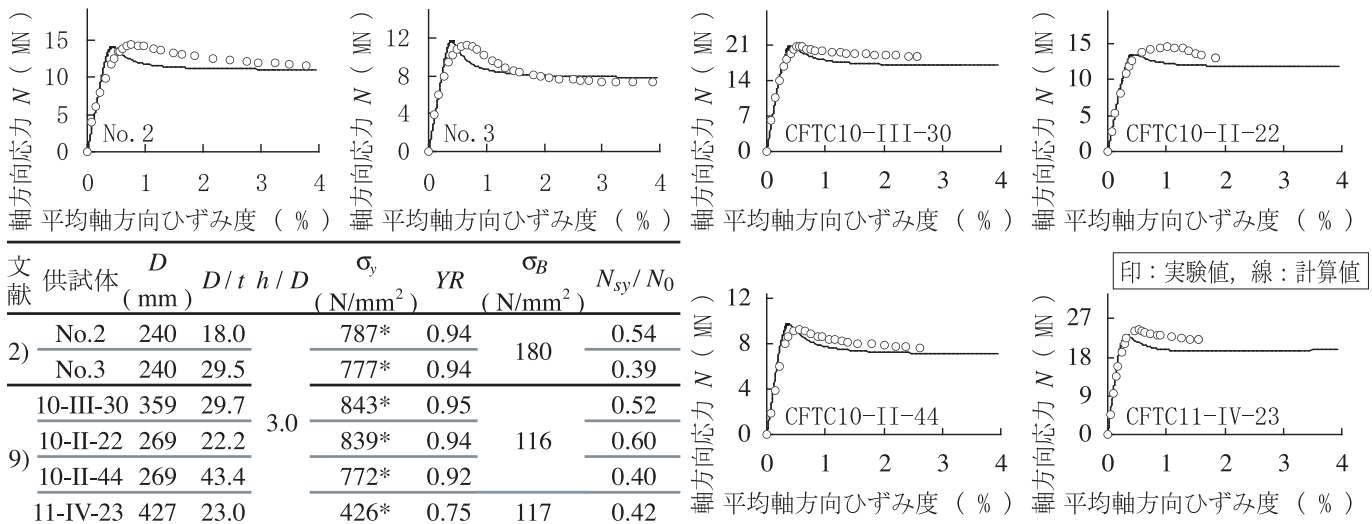
### 3. 解析結果・考察

前述2章の既報の提案式より単純圧縮力下のCFT短柱の応力度-ひずみ度関係を算出し、その関係に及ぼす各種要因について検討した。なお、i) 寸法効果は無視する、ii) 高さ直径比は3、とした。また解析要因の水準は、既往の実験データの使用材料を参考に設定している。

#### 3.1 応力度-ひずみ度関係

図4に、応力度-ひずみ度関係の計算値の例を示す。図の縦軸は、第1象限はCFTの応力度および鋼管の負担応力度を断面力で除した値を、第2象限は側圧を標準強度で除した値を、横軸は、平均軸方向ひずみ度である。

同図(a)-(d)より、残留応力なしでは、各標準応力度および鋼管断面力比ともに、降伏応力度発揮(以下、降伏)後の $N/N_0$ 、 $N_s/N_0$ および $\sigma_r/\sigma_B$ に及ぼす径厚比と降伏応力度の組み合わせ、および降伏比の影響はほとんどないことがわかる。なお、降伏後の最小耐力は、概ねひずみ硬化開始時の耐力になることが認められる。一方、残留応力ありでは、各標準応力度および鋼



$D$ : 鋼管の断面直径、 $t$ : 鋼管の板厚、 $h$ : 鋼管の高さ、 $\sigma_y$ : 鋼管素材の降伏応力度、\*: 0.2%off-set、YR: 降伏比  
 $N_{sy}$ : 鋼管の断面力 (=  $A_s \cdot \sigma_y$ )、 $N_0$ : 断面力 (=  $A_s \cdot \sigma_y + A_c \cdot \sigma_B$ )、 $A_s, A_c$ : 鋼管、コンクリートの原断面積

図3 単純圧縮力下の軸方向応力-平均軸方向ひずみ度関係の実験値と解析値<sup>1)</sup>の比較

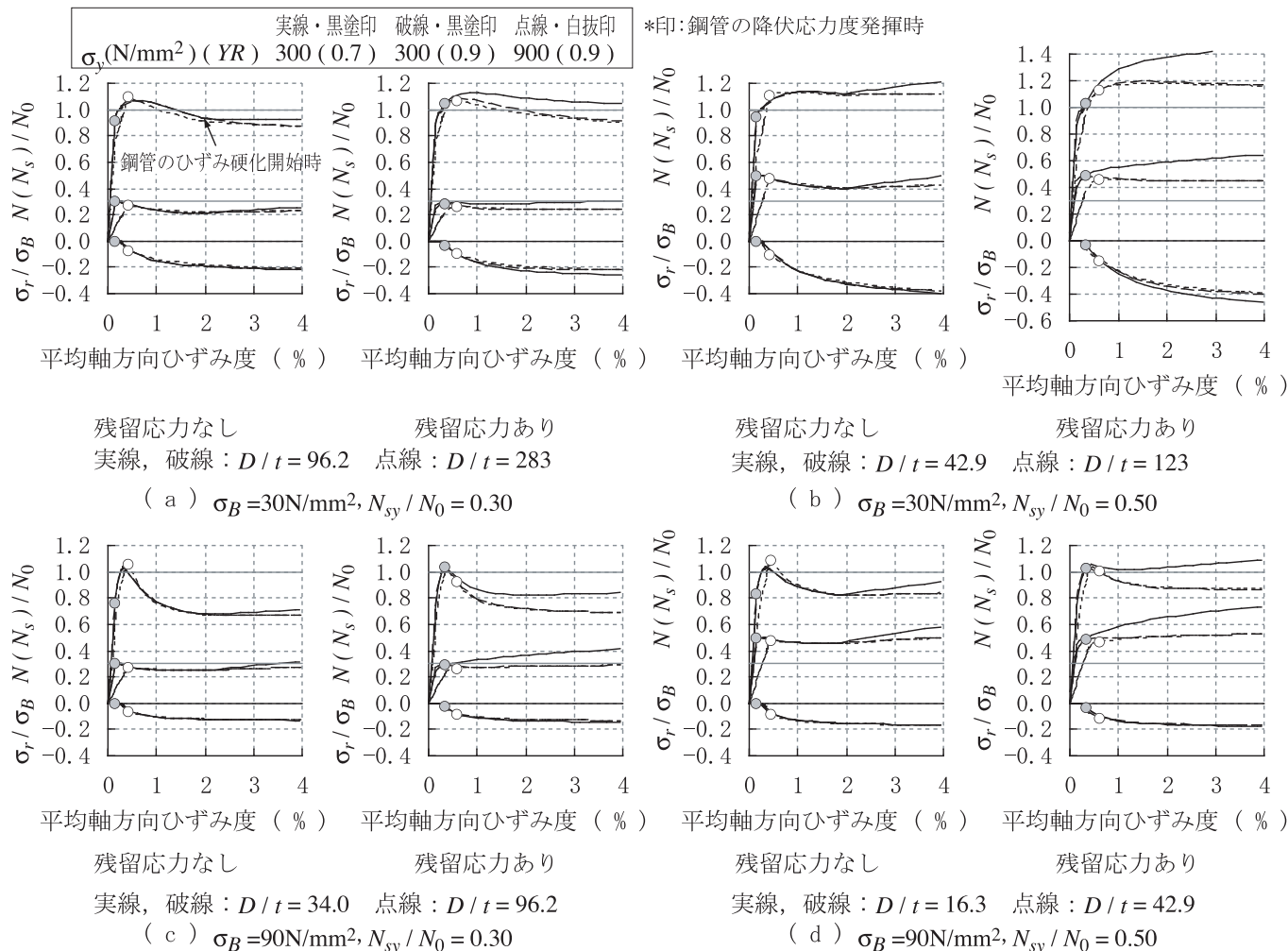


図4 単純圧縮下のCFT短柱の応力度-ひずみ度関係の解析値 ( $N_s$ : 鋼管部の耐力,  $\sigma_r$ : 側圧)

管断面力比とともに, i)  $\sigma_r/\sigma_B$  に及ぼす, 径厚比と降伏応力度の組み合わせおよび降伏比の影響, ii) 降伏後の  $N/N_0$  および  $N_s/N_0$  に及ぼす降伏比の影響, がほとんどないことがわかる。

### 3.2 降伏耐力発揮後の最小耐力

図5に, 残留応力なしの累加耐力に対するひずみ硬化発揮時の耐力 (以下, 最小耐力比 (前述3.1参照)) と鋼管断面力比の関係に及ぼす標準強度の影響の例を示す。なお, 図6には, 標準強度 30, 60 および 180N/mm<sup>2</sup> 程度の最小耐力の解析値と実験値<sup>11-17)</sup> の比較が示してある。標準強度 180N/mm<sup>2</sup> 程度については, 残留応力ありの実験データを対象としている。同図 (a) (b) より, 各標準強度とともに, 解析値は, 実験値を評価していることがわかる。また同図 (c) より, 残留応力ありについても, 降伏比を考慮すれば, 解析値は, 実験値を評価できる可能性があると考えられる。

図5より, i) 標準強度 30N/mm<sup>2</sup> は, 鋼管断面力比 0.4 程度以上では, 最小耐力が, 累加耐力より高いこと, ii)

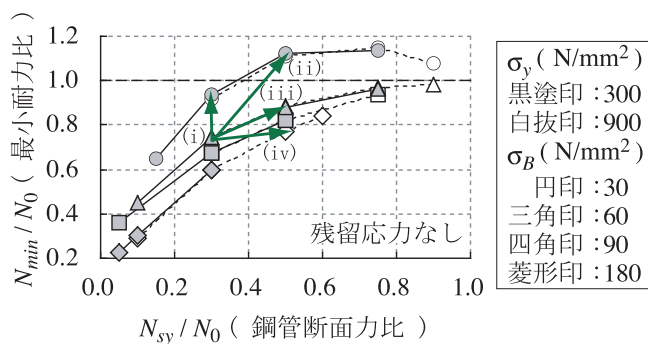


図5 最小耐力に及ぼす標準強度の影響

鋼管断面力比が大きいくほど, 最小耐力比に及ぼす標準強度の影響が小さくなること, が認められる。なお, 最小耐力比を大きくするためには, 同図中の矢印で示す i-iv のケースとなる。鋼管断面力比が高くなるケース ii-iv は, 前述3.1を踏まえ, 残留応力ありでは, ひずみ硬化により, さらに最小耐力比が大きくなることが期待できる。ただし, 断面力を原断面積で除した

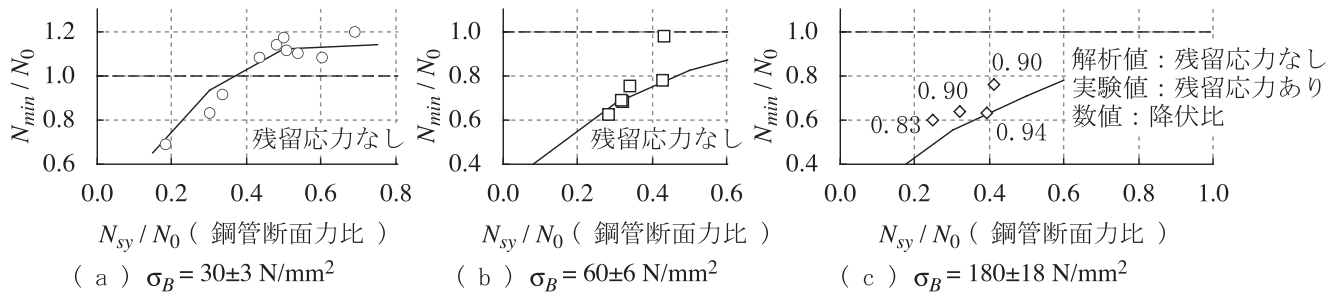


図6 最小耐力の解析値と実験値<sup>11-17)</sup>の比較

単位面積当たりの断面力が一定の条件では、計算上、ケース iv の標準強度を高くして最小耐力比を大きくすることは、成立しない。

#### 4. おわりに

単純圧縮を受ける円形CFT短柱の応力度-ひずみ度関係に及ぼす高強度材料を含む各種要因について、既往の提案式を用いて解析的に検討した。

#### 参考文献

- 1) 崎野健治, 蛭川俊彦, 小松慎二: 中心圧縮力を受けるコンクリート充填円形鋼管短柱の弾塑性解析, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol. 43B, pp. 573-579, 1997. 3
- 2) 鈴木康正, 丹羽博則, 淵田安浩, 時野谷浩良, 山中昌之, 遠藤文明: 超高強度コンクリート充填鋼管(CFT)柱, 大林組技術研究所報, CD-Rom, No. 74, pp. 1-10, 2010
- 3) 徐培蓁, 河野昭彦: 柱降伏を許容したCFTラーメン構造の降伏許容柱に生じる弾塑性性状, 日本建築学会構造系論文集, No. 601, pp. 175-179, 2006. 3
- 4) 山本貴正, 川口淳, 森野捷輔: 寸法効果を考慮した中心圧縮を受けるコンクリート充填円形鋼管短柱の荷重-変形関係に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 592, pp. 193-200, 2006. 6
- 5) Tomii, M., Yoshimura, K. and Morishita, Y.: Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns under Concentric Loading, International Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads, SSRC/ASCE, Washington, D. C., pp. 718-741, 1977. 3
- 6) 小阪義夫, 谷川恭雄, 畑中重光: 低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動, コンクリート工学年次講演会報告集, Vol. 6, pp. 257-260, 1984
- 7) 西野和弥, 村上雅英, 大谷恭弘, 窪田敏行: 低側圧3軸圧縮応力を受けるプレーンコンクリートの最大応力以降の降伏性状に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, pp. 51-56, 1993

- 8) 長沼一洋: 非線形ポアソン効果を考慮した三軸応力下のコンクリートの直交異方性構成モデル, 日本建築学会構造系論文集, No. 485, pp. 109-116, 1996. 7
- 9) 杉本太一, 栗原翔太, 難波隆行, 植木卓也, 加村久哉, 中西三和, 安達洋: 高強度CFT柱の構造特性に関する研究(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 1357-1358, 2012. 9
- 10) Blanks, R. F. and McNamara, C. C.: Mass Concrete Tests in Large Cylinders, Journal of ACI, Vol. 31, No. 3, pp. 280-303, 1935. 1-2
- 11) 山口育雄, 菅野俊介, 長嶋俊雄, 平出亨, 沢田博: 充てん型コンクリート短柱の中心圧縮性状(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 1353-1356, 1988. 10
- 12) 田中清, 狩野芳一, 寺岡勝, 佐々木聡: 高強度コンクリートを用いた合成短柱の中心圧縮性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 2, pp. 83-88, 1990
- 13) 佐藤孝典: 円形断面の充填鋼管コンクリート構造における鋼管とコンクリートの相互作用に関する研究, 大阪大学学位論文, 1995. 8
- 14) 岡本達雄, 福山国夫, 東端泰夫, 土田伸治, 半田健二, 益尾潔: 超高強度コンクリート充填鋼管柱を用いた生田神社拝殿の復旧設計と施工, 鋼構造論文集, 第3巻, 第10号, pp. 7-19, 1996. 6
- 15) 蛭川俊彦, 崎野健治, 小松慎二, 石出一郎: コンクリート充填円形鋼管柱の中心圧縮性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 1307-1312, 1996
- 16) 松井千明, 津田恵吾, 森武史: 被覆形鋼管コンクリート柱材における鋼管の幅厚比・径厚比の制限値, 日本建築学会構造系論文集, No. 503, pp. 157-163, 1998. 1
- 17) Schneider, S. P.: Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes, Journal of Strength Engineering, ASCE, Vol. 124, pp. 1125-1138, 1998. 10