

コンクリート充填鋼管柱の静的耐荷性状に関する弾塑性有限要素解析

Elasto-plastic finite element analysis of static behavior of concrete filled steel tube column

室蘭工業大学大学院 ○学生員 堅田 恭輔 (Kyoussuke Katada)
 室蘭工業大学大学院 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学大学院 正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
 釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitu Kishi)

1. はじめに

コンクリート充填鋼管柱(以後, CFT)は, 鋼管にコンクリートを充填させることにより, 鋼管の拘束効果によるコンクリートの強度や靱性の増大, 充填コンクリートによる鋼管の局部座屈が防止などの特性を有し, 近年広く建築・土木構造物に利用されている。また, さらに, 内部コンクリートの一体化を図り, 剛性を更に高めることを目的として, 内部に鉄筋を配鉄した鉄筋コンクリート充填鋼管柱(RCFT)¹⁾も開発されている。

このような背景を受けて, 本研究では, 鉄筋コンクリート充填鋼管柱の静的耐荷性状に関する基礎的な資料を得ることを目的に, 静的3点曲げ載荷実験を実施した。さらに, 同実験を対象に弾塑性有限要素解析を実施し, 実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検討した。本解析には非線形構造解析システム DIANA を²⁾使用している。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には, 実験に用いた試験体の形状寸法を示している。試験体は, 外径 267.4mm, 板厚 12.7mm の鋼管を用い, 内部に鉄筋を配置したコンクリート充填鋼管柱である。全長は 5.6 m (純スパンは 4.0 m) である。鋼管は STK400, 内部コンクリートの設計基準強度 f'_c は 50 MPa である。また, 内部鉄筋には PC 鋼棒 (SBPR) を 9 本配置した。

2.2 実験方法と測定項目

実験は, 静的3点曲げ載荷実験とし, 柱の支点治具は写真-1に示すように試験体の両支点部の回転を許容するような構造となっている。載荷は容量 1,000 kN の油圧ジャッキと専用の載荷治具を用いて荷重制御で行った。な

お, ジャッキの可動域が少ない(ストロークが短い)ために, 数回に分けて載荷実験を実施した。

本実験における測定項目は, 写真-1のように載荷荷重測定用ロードセルによる載荷荷重, 非接触式レーザ変位計による試験体スパン中央部の鉛直変位, および試験体に貼付したひずみゲージによる各点のひずみである。本研究では, 鋼管に発生するひずみの基礎的な資料を得るために, 図-2に示すように, 多数のひずみゲージを貼付している。具体的には, 底面の軸方向に 23 点, 側面(中立軸)の軸方向に 13 点, さらに載荷点近傍の周方向に等間隔で 13 箇所の位置に軸および周方向に 26 点, 計 60 点のひずみゲージを貼付している。なお, 載荷点近傍に関しては, 載荷治具を避ける位置にひずみゲージを貼付している。

3. 数値解析概要

3.1 解析モデル

図-5には, 本数値解析で用いた試験体および断面モデルの要素分割状況を示している。総節点数および総要素数はそれぞれ約 37,071, 約 34,672 である。

鉄筋にはコンクリート埋め込み要素を用い, コンクリートと鋼管の要素に関しては完全付着を仮定している。その他の鋼管や支点および載荷治具に関しては 8 節点固体

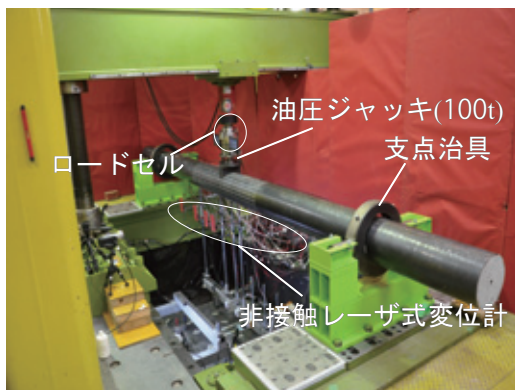


写真-1 全景写真

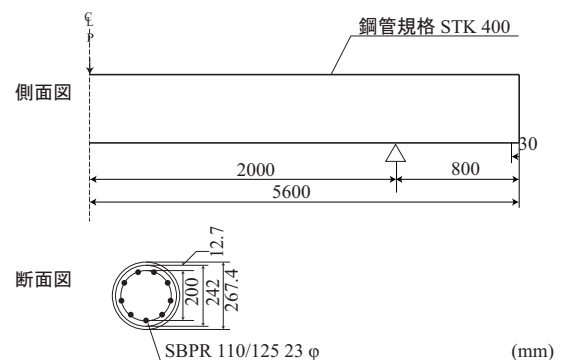


図-1 試験体の形状寸法

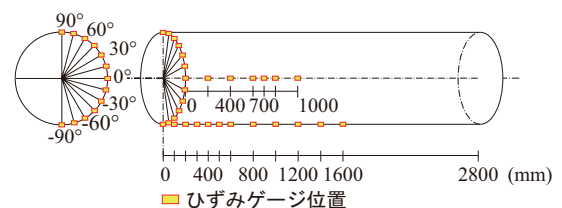


図-2 ひずみゲージ位置

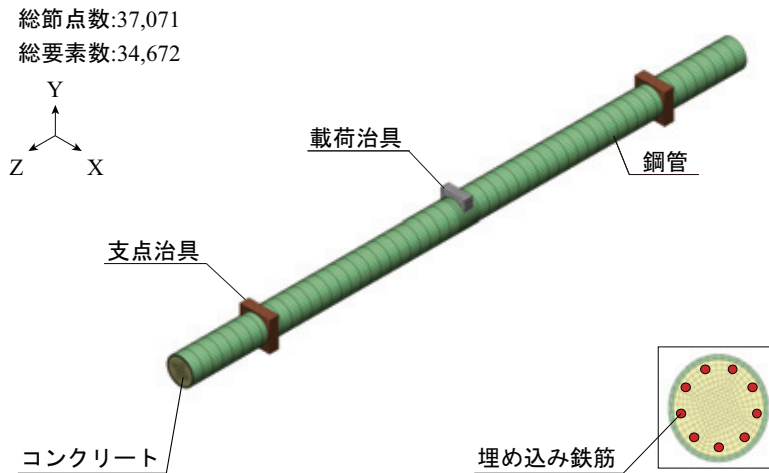
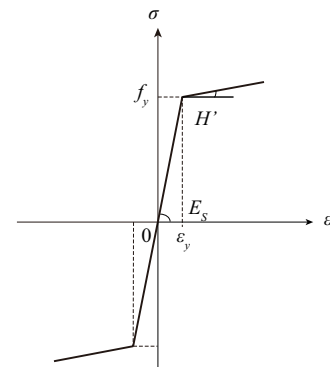


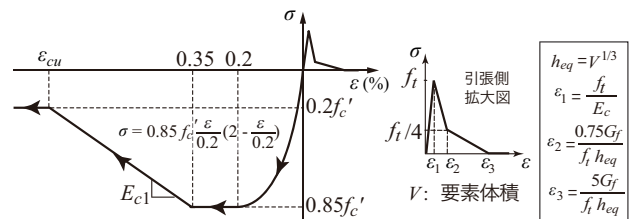
図-3 解析モデル

表-1 鋼材の材料物性値

鋼種	降伏応力 f_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比
STK400	235	200	0.3
SBPR	932		



(a) 鋼管および鉄筋



(b) コンクリート

図-4 材料物性モデル

要素を用いた。なお、支点治具と鋼管の接触面での摩擦を考慮するために支点治具と鋼管の間に厚さが零のインターフェイス要素を導入している。鋼管の境界条件は、実験条件と同様となるように回転を許容するように設定した。また、载荷荷重は、図-5に示す载荷治具に鉛直方向に変位を与える変位制御方式で与えることとした。

3.2 材料構成則

図-4には、本数値解析で用いた鋼管、鉄筋およびコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。

(a) 図には、鋼管および鉄筋に使用した応力-ひずみ関係を示している。ここでは、降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の構成則モデルであり、塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の 0.01 % と仮定した。降伏の判定には、von Mises の降伏条件に従うこととした。降伏応力 f_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s は表-1に示す公称値を用いた。

(b) 図には、コンクリートに関する応力-ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、圧縮強度 $f'_c = 50$ MPa とし、圧縮ひずみが 0.35 % までは土木学会コンクリート標準示方書(以後、示方書)³⁾に基づいて定式化し、0.35 % 以後は初期弾性係数の 0.05 倍で $0.2f'_c$ まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を用い、内部摩擦角は 30° とした。引張側に関しては、示方書による引張軟化曲線を適用した。

なお、支点治具、载荷治具に関しては、実験終了後に変形が確認されていないことより、弾性体(鋼材、 $E_s = 200$ GPa、 $\nu_s = 0.3$)と仮定している。

支点治具および载荷治具と鋼管間には、実験時にめり込み等が確認されていないことから、法線方向の剛性として十分に大きな値を与え、摩擦係数は 0.577 と設定した。

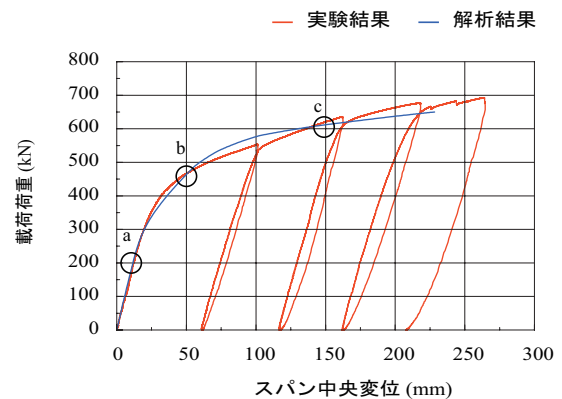
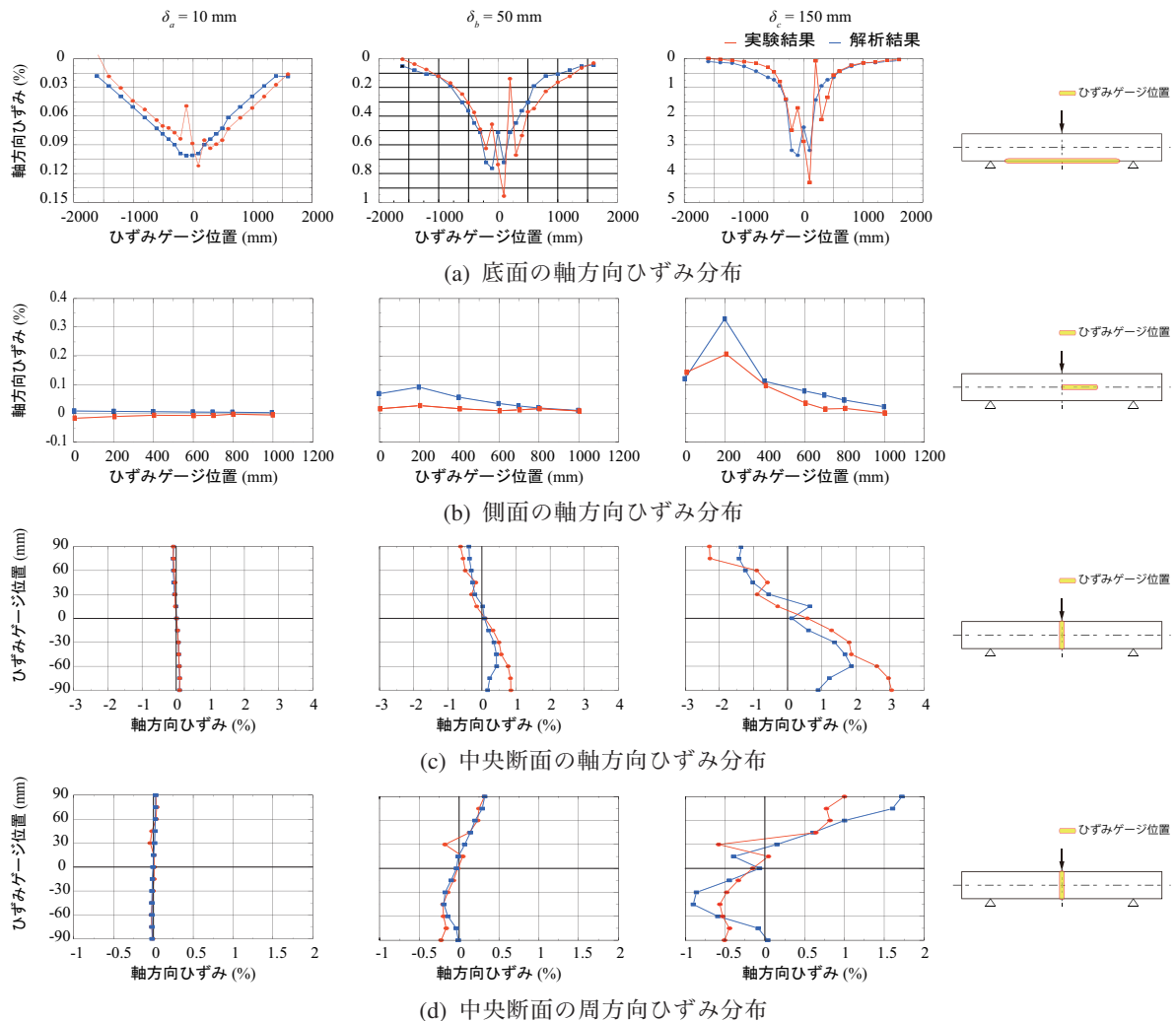


図-5 荷重-変位関係



図－6 ひずみ分布図

4. 数値解析結果および考察

図－5には、載荷荷重とスパン中央変位の関係について、実験結果と解析結果を比較して示している。なお、実験結果は前述の通り油圧ジャッキのストロークの関係で、除荷と再載荷を繰り返して実験を実施していることから複数の曲線となっている。また、数値解析においては、解が収斂せずに変位 230 mm 程度で計算を終えている。図より、実験結果と解析結果の初期勾配は、両者で非常に一致していることが分かる。また、スパン中央変位が 25 mm 程度から鋼管の一部が降伏することによって剛性が徐々に低下している。全体的に実験結果と解析結果の荷重－変位関係を見ると、両者はほぼ一致しているものと考えられる。なお、詳細に両者を比較すると、降伏後の勾配は必ずしも実験結果と一致していない。これは、本解析では 1) 鋼管の降伏応力を公称値、充填コンクリートの圧縮強度を設計基準強度で与えていること、2) 鋼管とコンクリートを完全付着と仮定していること、等の要因によるものと考えられる。

図－6には、(a) 底面ひずみ、(b) 側面ひずみ、(c) 周方向の軸方向ひずみ、(d) 軸直角方向ひずみについて、実験結果と解析結果を比較して示している。なお、着目点は図－5における a 点(弾性域)、b 点(降伏後、変位 50 mm)および c 点(変位 150mm)である、

図－6 (a) に示す底面ひずみ分布に着目すると、弾性域では、支点部から載荷点付近に向けてほぼ線形にひずみが増大していることが分かる。また、実験結果と解析結果のひずみ分布はよく一致している。次に、変位 50 mm の b 点を見ると、載荷点近傍で 0.6% を超えるひずみが発生しており、引張側となる底面では広範囲で降伏していることが分かる。実験結果を解析結果と比較すると、載荷点付近で差異が見られるものの、それ以外の領域では両者よく対応している。さらに変位が増大した c 点では、載荷点中央部のひずみが 3.0 % 以上を示し、また、載荷点を中心に 500 mm 程度の範囲まで、0.5 % 以上の軸ひずみが発生しており、さらに降伏領域が広がっていることが分かる。

次に、(b) 図に示す側面方向のひずみ分布に着目すると、

弾性域では、両者のひずみはほぼ零を示しており、未だ中立軸の移動は見られない。その後、変位が増加するとともに、スパン中央部近傍のひずみが引張側に増大していることから、中立軸が上側に移動している様子が伺える。実験結果と解析結果のひずみ分布を比較すると、両者で若干の差異は見られるものの、定性的には一致しているものと考えられる。

(c) 図には中央断面における軸方向ひずみ分布を示している。図より、変位が増大するとともに各点の軸方向ひずみも増大し、基準軸を境に上部では圧縮ひずみが、下部では引張ひずみが発生する様子が伺える。特に変位 150 mm では軸方向ひずみの零点が上方に移動しており、中立軸が上方に移動していることが分かる。なお、実験結果と解析結果を比較すると、特に最外縁でのひずみに差異が見られる。これは、実験結果では、充填コンクリートにひび割れが発生するとともに、鋼管との付着切れが生じているのに対し、本数値解析では充填コンクリートと鋼管を完全付着と仮定していることが一つの要因と考えられる。

(d) 図には中央断面の周方向ひずみ分布を示している。図より、ポアソン効果によって (c) 図に示す軸方向ひずみと符号が異なる分布性状を示していることが分かる。また、実験結果と解析結果を比較すると、変位 50 mm 程度までは両者よく一致しているものの、変位が増大するにしたがい、差異が生じている。これは、前述の通り、解析では完全付着としていることによるものと考えられる。

5. まとめ

本論文では、鉄筋コンクリート充填鋼管柱の静的耐荷性状に関する基礎的な資料を得ることを目的に、静的3点曲げ載荷実験を実施した。さらに、同実験を対象に弾塑性有限要素解析を実施し、実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検討した。本研究で得られた結果を整

理すると以下のものである。

- 1) 提案の解析手法を適用することにより、実験結果の初期勾配や降伏による剛性勾配の変化を含めた荷重－変位関係をほぼ適切に再現可能である。
- 2) また、解析結果から得られるひずみ分布は、実験結果のひずみ分布と概ね一致する。

参考文献

- 1) 長谷川 明, 塩井 幸武, 工藤 浩, 鈴木 拓也: 鉄筋コンクリート充填鋼管の曲げ耐力試験, 第8回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム
- 2) Diana9 User's Manual: Nonlinear Analysis
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2012 年制定
- 4) 池田 翔哉, 小室 雅人, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の静的耐荷性状に関する数値解析手法の妥当性検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, pp. 1309-1314, 2012
- 5) 梅本 宗宏, 渡邊 秀仁, 大内 一之, 寺井 靖人: 鉄筋を内蔵した CFT 柱の実大施工実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 1213-1218, 2005
- 6) 山本 喜正, 川口 淳, 森野 捷輔, 福井 伸之: CFT 短柱の軸圧縮特性に及ぼす断面形状の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 2, pp. 1297-1302, 2006
- 7) 山口 恭平, 秋山 充良, 内藤 英樹, 鈴木 基行: 一軸圧縮を受ける円形 CFT 柱の力学特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 1327-1332, 2008