



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



鉄筋コンクリート充填鋼管の耐荷性状に関する実験的・解析的研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本鋼構造協会 公開日: 2019-03-04 キーワード (Ja): 鉄筋コンクリート充填鋼管, 耐荷性状, 静載荷実験, 有限要素解析 キーワード (En): reinforced concrete filled steel tube, load-carrying behavior, static loading test, finite element analysis 作成者: 堅田, 恭輔, 小室, 雅人, 栗橋, 祐介, 岸, 徳光 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009710

鉄筋コンクリート充填鋼管の耐荷性状に関する実験的・解析的研究

Experimental and numerical studies on load-carrying behavior of reinforced concrete filled steel tube

○ 堅田 恭輔* 小室 雅人** 栗橋 祐介*** 岸 徳光****
Kyouyusuke KATADA Masato KOMURO Yusuke KURIHASHI Norimitsu KISHI

ABSTRACT: In this study, in order to investigate load-carrying behavior of the reinforced concrete filled steel tube, three-point bending test and 3D elasto-plastic analysis were conducted. An applicability of the proposed numerical analysis method was investigated comparing with the experimental results. The results obtained from this study were as follows: 1) it was observed that the surcharged load was gradually increased until filled concrete was cracked and popped out from the end of tube; 2) since the surcharged load after the concrete being cracked was distributed around 620 kN which is 90 % of maximum load, the high ductility of RCFT was confirmed; and 3) the load-carrying behavior and strain distribution of the RCFT may be better simulated by means of the proposed analysis method.

Keywords: 鉄筋コンクリート充填鋼管, 耐荷性状, 静載荷実験, 有限要素解析
reinforced concrete filled steel tube, load-carrying behavior, static loading test, finite element analysis

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強度の上昇や靱性能の向上, 充填コンクリートによる鋼管の局部座屈防止など, 鋼管とコンクリートの相乗効果によって高い力学特性を有することから, 広く建築・土木構造物に利用されている^{1), 2)}. また, 近年では, 充填コンクリート内に鉄筋を埋設した鉄筋コンクリート充填鋼管(以後, RCFT)^{3), 4)}が開発実用化されている. RCFTは, CFT内部に鉄筋を配筋することによってコンクリートの一体化がより向上することから, CFT以上の性能が期待される. 長谷川ら³⁾は, 鋼管の板厚, コンクリート強度および鉄筋配置を変化させた複数の試験体を対象に静載荷実験を実施し, 内部鉄筋による強度増加率の向上, 充填コンクリートによる鋼管の破断防止, 靱性率の向上などを明らかにしている.

著者らも, このようなRCFTの優れた性能に着目し, 衝撃荷重作用時の変形を抑制する部材への

適用を念頭に, RCFTの基礎的な資料を得ることを目的として静的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, 実験結果をより適切に再現可能な解析手法の検討を試みた. なお, 本解析には非線形構造解析プログラムDIANA⁵⁾を使用している.

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. 試験体には, 外径267.4 mm, 板厚12.7 mmの鋼管を用い, 内部に鉄筋を配筋したコンクリート充填鋼管であり, 全長は5.6 m(純スパン4 m)である. 鋼管にはSTK 400を用い, 充填コンクリートの設計基準強度 f'_c を50 MPaとし, 内部鉄筋にはPC鋼棒(SBPR)を等間隔に9本配置することとした. 内部鉄筋は, 鋼管端部からそれぞれ130 mmと30 mmまで埋設しており, 載荷位置に対して対称とはなっていない. これは, 本試験体

* 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**博(工) 室蘭工業大学 大学院工学研究科 准教授 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) 第2種正会員

***博(工) 室蘭工業大学 大学院工学研究科 講師 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

****工博 釧路工業高等専門学校 校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛 2-32-1) 第2種正会員

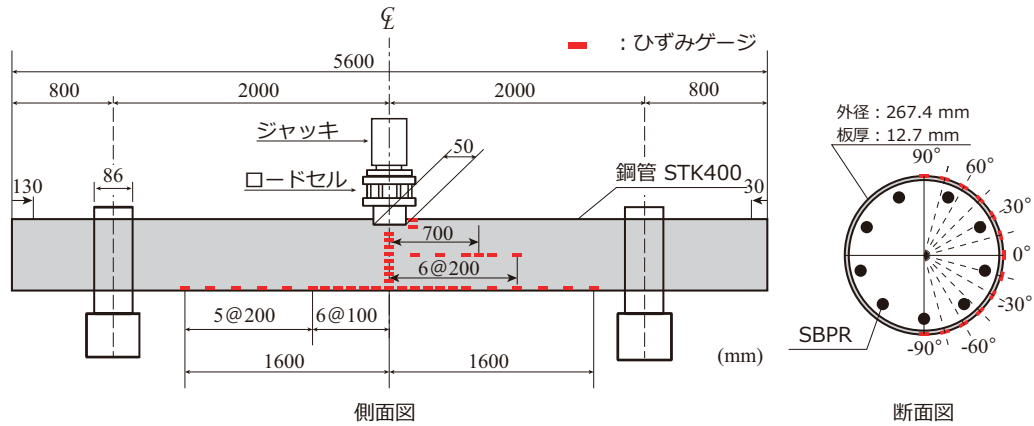


図1 試験体形状およびひずみゲージ位置

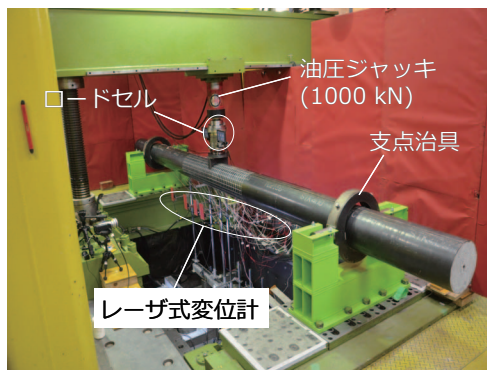


写真1 試験体の設置状況

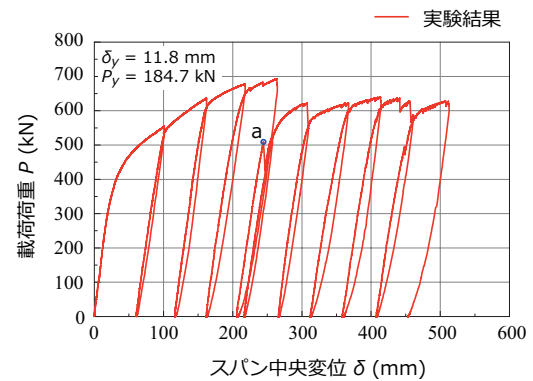


図2 荷重-変位関係

が落石防護柵の支柱を想定しているためである。なお、試験体の形状寸法は実物と同程度のスケールとしている。

2.2 実験方法および測定項目

実験は静的3点曲げ載荷実験とし、試験体の両支点部は写真1に示すように回転を許容するピン支持に近い構造とした。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、ジャッキのストロークが小さいことより盛替えを行い、スパン中央変位が500 mmに至るまで載荷実験を実施した。

測定項目は、ロードセルによる載荷荷重 P 、非接触型レーザ式変位計によるスパン中央部底面の鉛直変位(以後、変位) δ 、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 ε_i である。本研究では、同鋼管の静的耐荷性状に関する基礎的な資料を得るために、図1に示すように鋼管の軸方向および周方向にひずみゲージを貼付してい

る。軸方向ひずみに関しては、試験体底面にスパン中央から600 mmまで100 mm間隔で左右に6点ずつ、600 mm以降は200 mm間隔で5点ずつの計23点、側面(中立軸)には試験体中央から右側に200 mm間隔で6点および700 mmの位置に1点の計7点を貼付した。一方、周方向ひずみに関しては、スパン中央断面において15°間隔で13箇所にひずみゲージを貼付した。また、ほぼ同じ位置の軸方向にもひずみゲージを貼付した。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. 実験結果および考察

図2には、実験結果から得られた載荷荷重 P と変位 δ の関係について示している。また、図中の降伏変位 δ_y および降伏荷重 P_y は軸方向ひずみが降伏ひずみ $\varepsilon_y (= 0.11\%)$ に達した時点の変位および荷重である。なお、降伏ひずみ ε_y は表1に示す降伏応力 f_y と弾性係数 E_s から算出した。

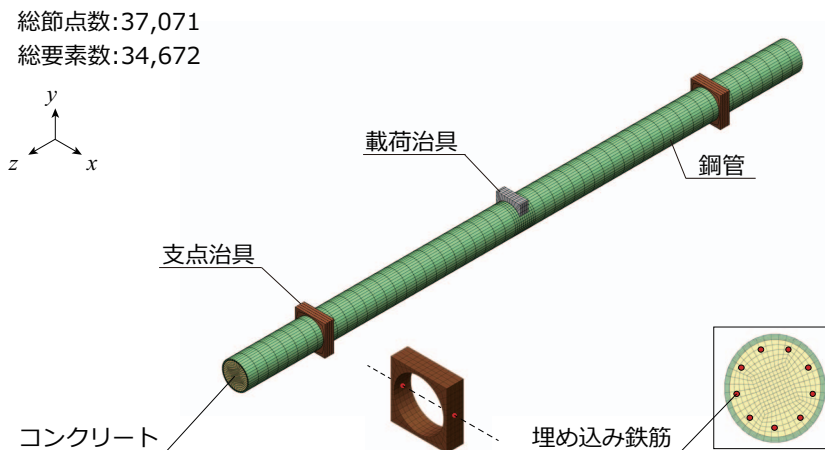


図3 有限要素モデル

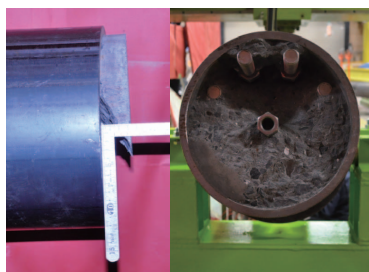


写真2 コンクリートの破壊状況(実験終了後)

図2より、荷重は载荷とともにほぼ線形に増加し、変位が25 mm程度から鋼管の降伏領域の拡大とともに剛性勾配が徐々に低下していることが分かる。また、ジャッキの盛替え時における除荷勾配は初期勾配とほぼ等しい。その後、変位が200 mmを超えたあたりから鋼管と支点治具の局所的なすべりが発生し、それに伴い荷重が小さく変動している。さらに、5サイクル目(4回目の盛替え後)の载荷時において、変位が240 mm程度(図中、a点)で荷重が大きく低下している。これは写真2に示すように、充填コンクリートの端部が破壊し、鋼管端部から滑り出たことによるものである。それ以降、変位の増大とともにコンクリートブロックの突出量も増加するものの、最大荷重の約90%の荷重を保持したまま、変位が500 mm程度で実験を終了した。これより、本試験体は高い靱性能を有することが確認された。

なお、後述の数値解析では、コンクリートの破壊によって荷重が低下した変位240 mmまでを対象として検討を行うこととした。また、試験体各点のひずみについては、後述の数値解析結果と比

較する形で考察を行うものとする。

4. 数値解析概要

4.1 解析モデル

図3には、本数値解析で用いた試験体および断面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37,000および約34,700である。

鉄筋には埋め込み鉄筋要素⁵⁾を用い、その他の鋼管や支点および载荷治具に関しては8節点固体要素を用いた。なお、鋼管と支点治具、鋼管とコンクリート間の接触面での摩擦を考慮するために、両者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。

支点治具の境界条件は、実験条件と同様となるように両支点治具の回転中心に相当する節点に対して、x軸回りの回転を許容し、鉛直および水平(y, z軸)方向の変位を拘束した。(図3参照)

支点治具と鋼管の間のインターフェイス要素には、実験時にめり込み等が確認されていないことから、非常に大きい剛性(法線方向剛性 $k_n = 1.0 \times 10^7 \text{ N/mm}^3$, せん断方向剛性 $k_s = 1.0 \text{ N/mm}^3$)を与えることとし、摩擦に関してはクーロン摩擦を採用した。摩擦係数 μ_s に関しては、事前解析により $\mu_s = 0.5$ と設定した。

4.2 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-

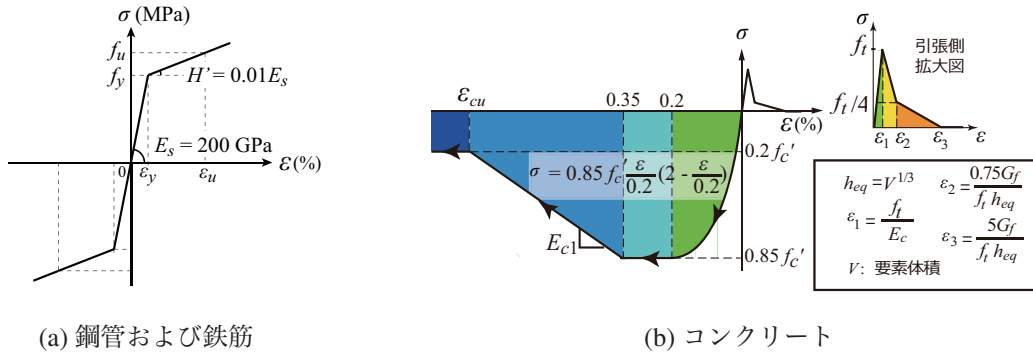


図4 応力-ひずみ関係

表1 鋼材の材料物性値

鋼種	降伏応力 f_y (MPa)	破断強度 f_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
STK400	235	400	200	0.3
SBPR	932	1,180		

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を適用することとし、塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の 1% と仮定した。降伏判定には、von Mises の降伏条件に従うこととし、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ている。

(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、圧縮強度を $f'_c = 50$ 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)⁶⁾ 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 $0.2 f'_c$ 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。ひび割れモデルは分散ひび割れモデルを適用し、引張側についてはコンクリートの破壊エネルギー G_f を考慮した引張軟化曲線を適用している⁷⁾。

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

5. 数値解析結果および考察

5.1 コンクリートと鋼管の境界条件に関する検討

コンクリート充填鋼管は内部の充填コンクリートと鋼管の相互作用によって高い靱性能を発揮

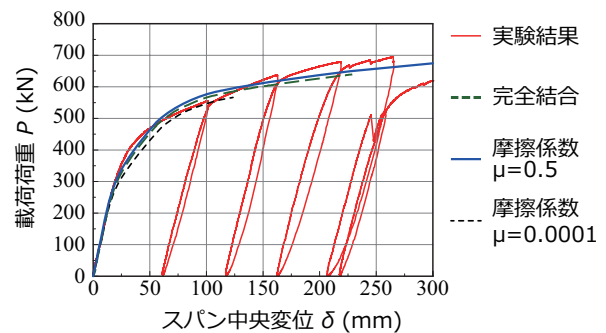


図5 荷重-変位関係における境界条件の比較

することから、それらの境界条件を適切にモデル化することは重要である。本節では、コンクリートと鋼管間の境界条件として、以下の3種類を仮定し数値解析を実施した。すなわち、1) コンクリートと鋼管の節点を共有し完全結合と仮定した場合、2) 界面にインターフェース要素を導入し、その摩擦係数 μ を限りなく小さくした場合 ($\mu = 0.0001$)、および 3) 摩擦係数を両者の中間的な値とした場合 ($\mu = 0.5$) である。

図5には、各解析ケースにおける荷重-変位関係を実験結果と比較して示している。図より、摩擦係数を極端に小さくした場合には、実験結果と比較して荷重が若干小さく評価されるとともに、変位が 125 mm 程度で解が収斂せずに計算を終了した。一方、完全付着や摩擦係数を 0.5 とした場合には、いずれの場合もほぼ実験結果と同様な荷重-変位関係を示しており、良好な結果であることが分かる。しかしながら、完全付着の場合には、摩擦係数が極端に小さい場合と同様に変位が 200 mm を超えたあたりで解が収斂せず計算を終了した。

以上より、本解析では、これらの結果を踏まえ

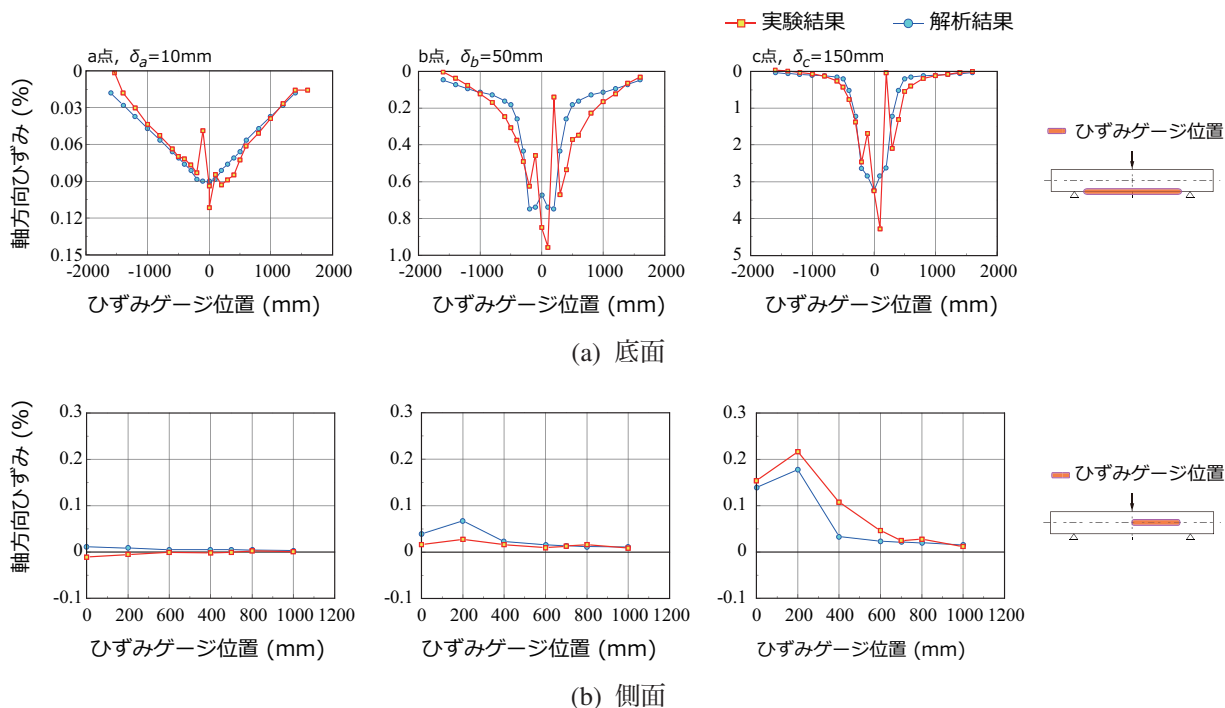


図7 軸ひずみ分布の比較

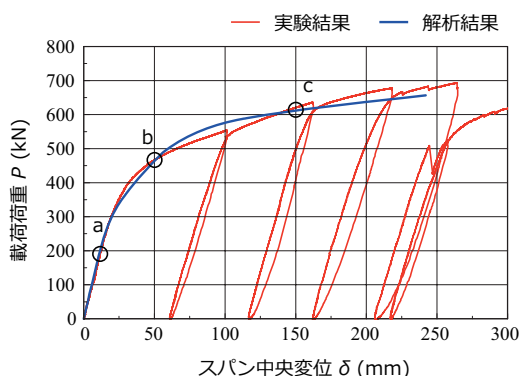


図6 荷重-変位関係の比較

て摩擦係数を $\mu = 0.5$ とする場合について詳細に検討を行うこととした。

5.2 荷重-変位関係

図6には、載荷荷重 P と変位 δ 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、数値解析では充填コンクリートが破壊し、荷重の低下がみられた変位 240 mm までの結果を示している。

図より、実験結果と解析結果を比較すると、初期剛性は両者で非常によく一致していることが分かる。一方、変位が 25 ~ 50 mm では解析結果が実験結果よりも小さく、変位が 50 ~ 150 mm 程度

までは逆に解析結果が実験結果を大きく評価しており、若干の差異が確認される。しかしながら、全体的に見ると、コンクリートが破壊し荷重が低下する変位 240 mm 程度までは、解析結果は実験結果を概ね再現可能であるものと考えられる。なお、実験結果と解析結果に差異が生じた要因としては、鋼管の降伏応力や充填コンクリートの圧縮強度に対して公称値や設計基準強度を与えていることや、鋼管とコンクリート間の界面(付着)特性としてクーロン摩擦のみを仮定していること等が挙げられる。

5.3 底面および側面ひずみ分布

図7には、試験体の底面および側面の軸方向ひずみ分布について、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6における変位 $\delta = 10, 50$ および 150 mm (a, b, c 点) である。

(a) 図に示す底面ひずみに着目すると、変位の小さい弾性域(a 点)では、載荷点直下の実験結果においてひずみに乱れが見られるものの、全体的には支点部から載荷点付近に向けてほぼ線形に増加していることが分かる。また、解析結果のひずみ分布においても実験結果と非常によく一致している。

次に、b 点の実験結果に着目すると、載荷点近

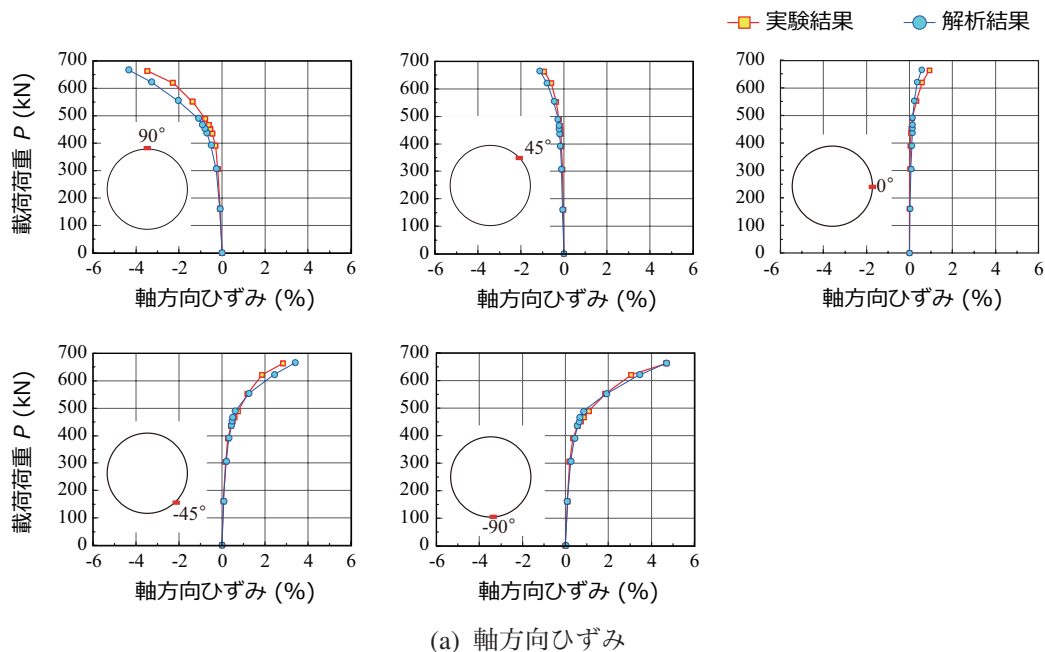


図8 中央断面におけるひずみ分布の比較

傍で0.6%を超えるひずみが発生しており、底面では降伏ひずみ ϵ_y を超えていることから、広範囲で降伏していることが分かる。解析結果は実験結果と比較して中央付近のひずみを大きく評価し、かつ等せん断力区間のひずみは実験結果と比較して小さいことが分かる。これは、本解析ではコンクリートと鋼管の付着特性を摩擦のみとしていることから、実現象を適切に再現できないことを暗示している。

さらに変位が増大したc点では、b点と同様に荷重点近傍で両者に差異が確認されるものの、全体的に見ると解析結果は実験結果を大略再現しているものと考えられる。

(b)図に示す側面方向のひずみ分布に着目する。弾性域(a点)では解析結果および実験結果のひずみは共にほぼ零を示しており、中立軸の移動は見られない。その後、変位が増大する(b, c点)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く様子が窺える。なお、両者を比較すると、若干の差異が見られるものの、定性的にはよく対応しているものと考えられる。

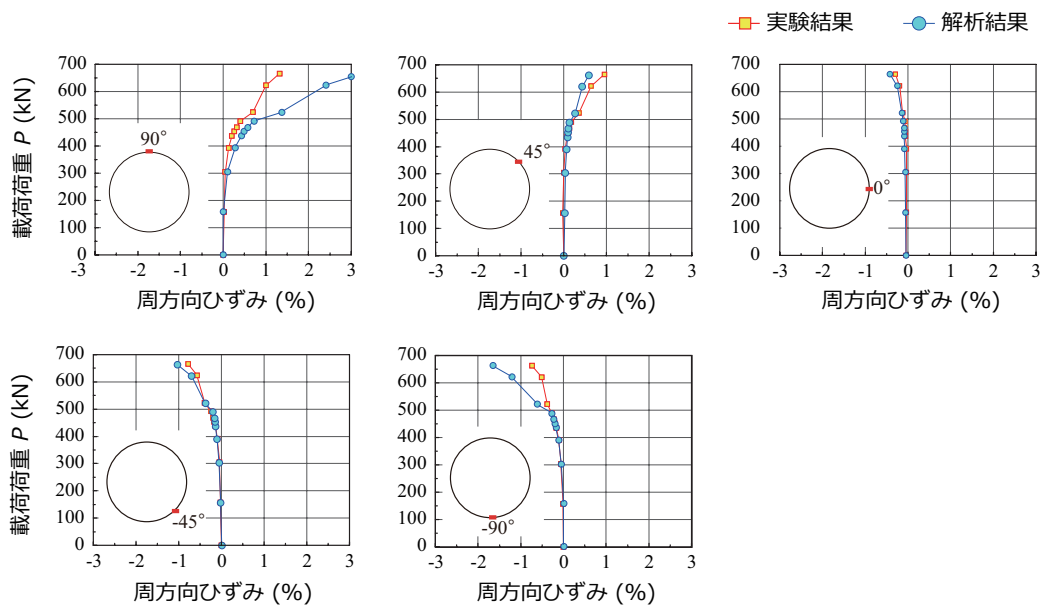
5.4 中央断面の軸および周方向ひずみ分布

図8には、中央断面における荷重-ひずみ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。(a)図は軸方向、(b)図は周方向ひずみである。なお、着目点は上端から時計回りに45°ずつ変化した計5点である。

(a)図に示す軸方向ひずみに着目すると、荷重の増加とともに試験体の上側にあるひずみ($\theta > 45^\circ$)は圧縮側に、下側のひずみ($\theta < -45^\circ$)は引張側に増大していることが分かる。また、中立軸($\theta = 0^\circ$)のひずみは、荷重が400 kN程度まではほぼ0を示しているものの、その後引張側のひずみが発生していることから、中立軸が上方に移動していることが分かる。実験結果と解析結果の荷重-軸方向ひずみを比較すると、荷重が500 kNを超えたあたりから両者に差異が見られるものの、全体的には軸方向ひずみをほぼ再現しているものと考えられる。

(b)図に示す周方向ひずみに着目すると、(a)図に示す軸方向ひずみの場合と同様に、荷重が500 kN程度まではいずれの点においても実験結果と解析結果はよく対応している。一方、荷重が500 kN以降では、解析結果が実験結果と比較して大きなひずみを示す傾向にある。これは、荷重の増大に対応して、実験では充填コンクリートにひび割れが発生すると共に鋼管との付着切れが生じているのに対して、本数値解析ではそのような現象を適切に再現できていないことによるものと考えられる。したがって、精度の高い解析結果を得る



(b) 周方向ひずみ

図8 続き

ためには、コンクリートと鋼管の界面のモデル化などを検討する必要がある。

5.5 コンクリートの軸方向ひずみ分布

図9には、前述の各a, b, c点における充填コンクリートの軸方向ひずみについて、中央断面および側面について示している。なお、図中のコンターレベルは図4(b)に示すひずみと対応している。

(a) 図に示す変位 $\delta = 10$ mm を見ると、中央断面では中立軸を境に上側が圧縮、下側に引張ひずみが発生している。また、側面を見ると、このひずみ分布は支点付近まで達していることが分かる。変位が増加した $\delta = 50$ mm (b点)では、載荷点近傍の上縁コンクリートでは $-3,500 \mu$ を超える圧縮ひずみが発生し、底面では広範囲で $1,700 \mu$ を超える引張ひずみが発生していることが分かる。中央断面を見ると中立軸は若干上側に移動しているものと推察される。変位 $\delta = 150$ mm では、試験体の広範囲で引張ひずみが発生し、その範囲は支点部よりも外側まで広がっている様子が分かる。

6. まとめ

本論文では、衝撃作用時の変形を抑制する部材への適用を念頭に、鉄筋コンクリート充填鋼管柱(RCFT)の基礎的な資料を得ることを目的として静的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、実験結果をより適切に再現可能な解析モデルおよび解析手法について検討を行った。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようなものである。

- 1) 静載荷実験結果より、変位が240 mm程度で充填コンクリートの破壊に伴い、荷重は若干低下するものの、その後実験終了変位の500 mmまでは最大荷重の90%程度の荷重レベル(約620 kN)を保持していることから、本試験体の高い靱性能を確認した。
- 2) 提案の解析手法を適用することにより、コンクリートが破壊し荷重が低下するまでの範囲については、実験結果の初期勾配や荷重-変位関係をほぼ適切に再現可能である。
- 3) また、解析結果から得られるひずみ分布は、実験結果と概ね一致する。

【謝辞】

本研究で使用した試験体は東亜グラウト工業株式会社よりご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 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,

