

# 論文 鋼管の座屈および内部コンクリートへの拘束効果に関する CFT 柱の三次元有限要素解析

松村 寿男<sup>\*1</sup>・水野 英二<sup>\*2</sup>

要旨：本研究では，一定鉛直荷重下で水平方向荷重を受けるコンクリート充填鋼管柱の三次元有限要素解析を通して，鋼管の座屈ならびに内部コンクリートへの拘束効果に関する考察を行った。汎用有限要素解析プログラム DIANA を用いた三次元有限要素解析を行い，ポストピーク挙動を含む変形挙動に及ぼす内部コンクリートの破壊進展状況および鋼管の座屈による拘束効果について考察した。その結果，柱基部にて拘束圧を最も受けること，鋼管の座屈挙動による鋼・コンクリートの相互作用を境界部の付着要素の挙動とともに考察した。

キーワード：三次元有限要素解析，鋼管の座屈，等価拘束圧，付着要素

## 1. はじめに

近年，公共事業の工事費削減が求められている中，異種材料の長所を生かした複合構造物が数多く提案されている。コンクリート充填鋼管構造（以下 CFT と呼ぶ）は，鋼・コンクリートの一体化による高い剛性と鋼がコンクリートを拘束する効果を期待した構造で実構造物<sup>1)</sup>に採用され始めている。ところが，その詳細な損傷メカニズムを三次元有限要素解析によりシミュレートした検討<sup>2,3)</sup>は未だ数少ない。これは，各々の材料非線形および幾何学的非線形を考慮しなければならないこと，その境界部を付着要素<sup>4)</sup>として表現しなければならないこと，さらにその強い非線形性が原因による解追跡の収束性の悪さという側面が，大きな壁となっている。合成断面および鋼断面において，骨組み，ファイバー解析や，個々の部材に安全率を見込むことにより，合成構造物の曲げの影響を考慮する実設計が行われている現在，異種材料の相互作用をより正しく評価した合理的な設計は未だ発展途上段階にあるといえる。

本研究では，これらの点に着目し三次元解析を試みた結果<sup>5),6)</sup>を基に新たな知見を加え，ポストピーク挙動<sup>7),8)</sup>を含む変形挙動に及ぼす内

部コンクリートの破壊進展状況および鋼管の座屈による拘束効果を，筆者らの一人，水野が提案した等価拘束圧<sup>9),10)</sup>という指標を用いて評価することを試みる。さらに鋼管の座屈および付着要素の挙動を積分点レベルで確認する。

## 2. 解析手法

### 2.1 解析対象

対象とした解析モデルおよび使用要素を図 - 1 に示す。試験体の形状・材料に関する諸量を表 - 1 に示す。本研究では，DIANA<sup>11)</sup>を用いて一定鉛直荷重下で水平方向荷重を受けるコンクリート充填鋼管柱の三次元有限要素解析を行った。図 - 2 に示すように，鋼管とコンクリートの境界面は付着要素を用いた。材料構成モデルは，鋼管部分にはマルチリニア型，充填コンクリート部分には Drucker - Prager 型ひずみ軟化構成モデルを用いる。付着要素は接触方向にはコンクリート剛性を，剥がれ方向，すべり方向には強度を持たないものと仮定した。要素分割は，対称性を考慮し，1/2 部分を考え，柱基部の分割長さを短くし，固定端部から離れるに従い長くした。解の収束には，修正 Newton-Raphson 法，Constant Stiffness 法を用いた。

\*1 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻博士後期課程 工修 (正会員)

瀧上工業(株)生産本部技術部設計課 主任

\*2 中部大学 工学部土木工学科 教授 Ph.D. (正会員)

表 - 1 形状，材料の諸元

| 外径<br>D (mm) | 鋼管厚<br>t (mm) | 高さ<br>L (mm) | 材質<br>(鋼材) | 降伏点<br>$y$ (MPa) | 鋼材のヤング係数<br>$E_s$ (MPa) | 一軸<br>圧縮強度<br>$f_c$ (MPa) | コンクリート<br>のヤング係数<br>$E_c$ (MPa) |
|--------------|---------------|--------------|------------|------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 700          | 6.0           | 2,920        | SM490Y     | 431.2            | 205,800                 | 42.73                     | 29,498                          |

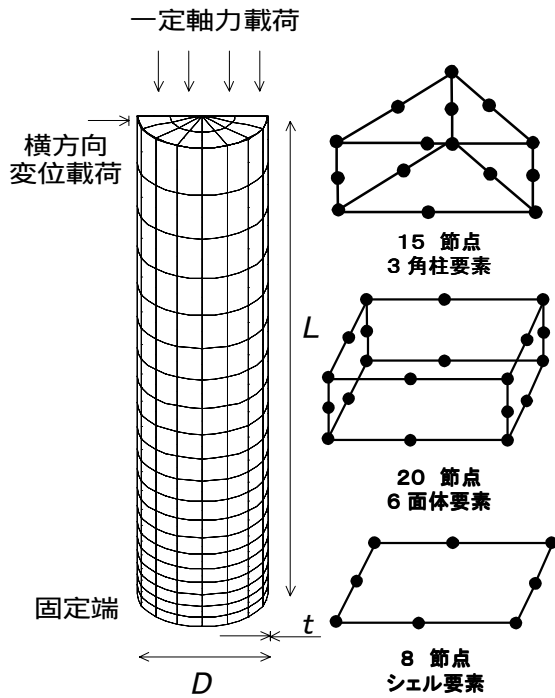


図 - 1 解析モデル

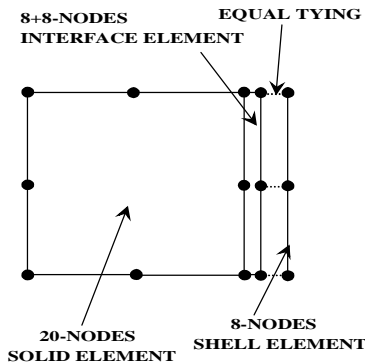


図 - 2 境界部のモデル化

### 3. 解析結果

#### 3.1 荷重 - 変位曲線

CFT 柱の載荷点における降伏荷重 ( $Q_y = 800$  kN) と降伏変位 ( $y = 14$  mm) で無次元化した荷重 - 変位曲線を図 - 3 に示す。

解析結果では，実験値<sup>12)</sup>よりもポストピーク以降は低い挙動を示している。この実験値との差には，コンクリートの構成則，せん断低減係

数，付着要素のすべり強度等，色々な要因が考えられる。本検討では，荷重 - 変位曲線における実験値と解析値の差の要因を追求するのではなく，図 - 3 の解析結果で得られた個々の材料挙動を検討することとした。

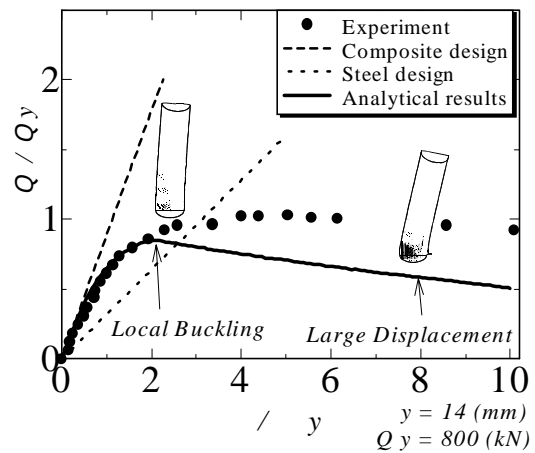


図 - 3 荷重 - 変位曲線

#### 3.2 等価拘束圧の進展

積分点レベルで鋼管の内部コンクリートへの拘束効果について検証を行うために，水野による等価拘束圧の概念<sup>10)</sup>を用いる。なお，等価拘束圧とは，一般状態での応力量を側方応力一定の三軸圧縮経路上の応力量に換算した場合の側方応力のことを意味する。これにより，本研究で扱う曲げ挙動のような，直応力とせん断応力を含めた応力空間における挙動の拘束圧について検証ができる。

図 - 4 に示すように，柱基部から 3 層 (Layer 1 ~ 3) について三角柱および六面体要素の下方の積分点群 (Intpnt1, 3, 5, 7) の平面について，CFT 柱の水平方向変位  $y$  を降伏変位  $y_y$  で割った無次元量と，等価拘束圧  $\sigma_{eq}$  をコンクリートの一軸圧縮強度  $f_c'$  で除した無次元量の関係を図 - 5 に示す。

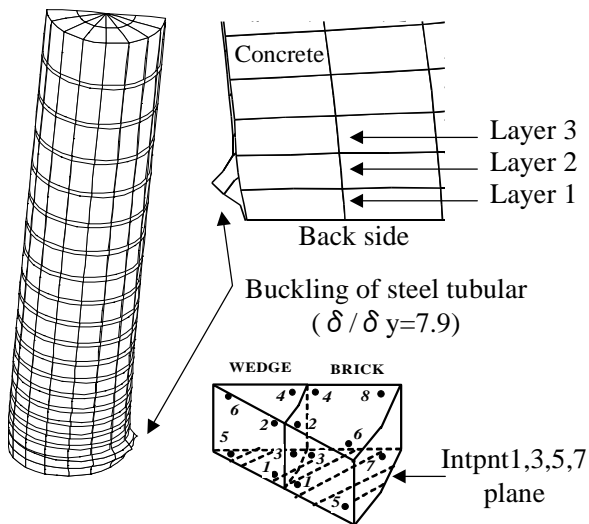


図 - 4 鋼管の座屈位置と積分点

図 - 5 から ,  $\delta / y = 10.0$  における柱基部の Layer1 は一軸圧縮強度程度 ( $\sigma_L / f_c' > 0.9$ ) の拘束圧を受けており, その上の層 Layer2, Layer3 のもの ( $\sigma_L / f_c' < 0.3$ ) よりも 2 倍以上大きい。これは, 曲げにおいて鋼管の拘束が柱基部に集中していることによる。Layer1 において, 拘束圧の進展状況を考えると, 鋼管の座屈が始まる前の  $\delta / y = 1.8$  では, 拘束圧が 0.3 程度であるのに対し,  $\delta / y = 5.0$  では 0.6 以上の値に増加している。これは後に述べる, 鋼管の座屈が載荷変位  $\delta / y = 2.0$  において発生していることにより, その後, 等価拘束圧が急に柱基部に進展したことが原因と考える。

さらに, Layer1 の  $\delta / y = 10.0$  において,  $\sigma_L / f_c' > 0.5$  の等価拘束圧が圧縮側断面の広い領域に分布しているのに対して, Layer2 では矢印(2)付近に集中している。また, 図 - 5 の矢印(1), (2)に示すように, 等価拘束圧の最大値が, 基部層 Layer1 では, 矢印(1)付近に存在するのに対し, Layer2 では, 矢印(2)付近に移動している。これらは, 図 - 6 に示すように座屈による変形が起こっていない Layer1 では鋼管が内部コンクリートを円周方向に全体的に拘束しているのに対し, Layer2 では鋼管の座屈で肌離れを起こすことにより, 円周方向の拘束圧が抜けることが原因と考えられる。

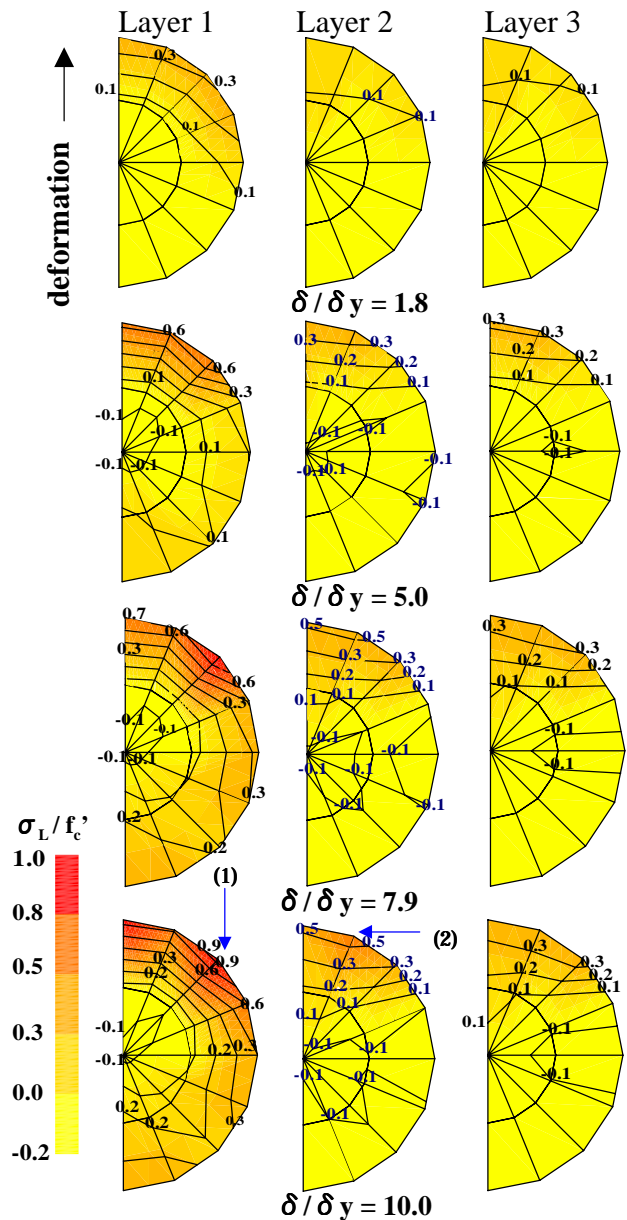


図 - 5 等価拘束圧の進展状況

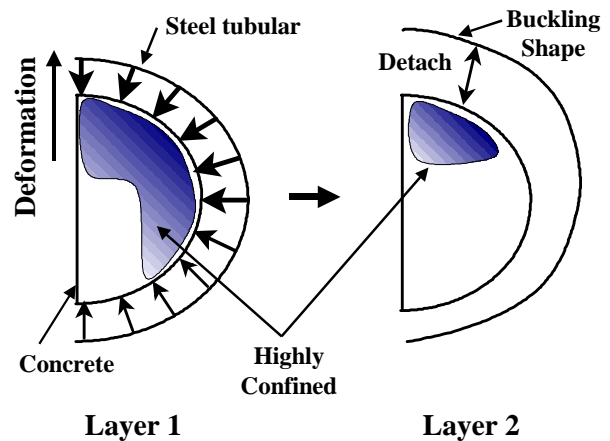


図 - 6 円周方向の拘束圧分布の違い

これにより，Layer2 および Layer3 の拘束圧分布は，内部コンクリートの曲げ圧縮による鉛直応力が支配的であると考えられる。

### 3.3 積分点での等価拘束圧の変動

次に，等価拘束圧の変動と荷重変位との関係を個々の積分点に着目することにより考察する。図 - 7 に示す六面体要素の BR 1~BR 8 を考える。ここでは，拘束圧の比較的大きい Layer1 および Layer2 の積分点(intpnt 7)に着目する。その算出結果である，Layer1 および Layer2 の等価拘束圧と CFT 柱の荷重変位との無次元量の関係を図 - 8 に示す。

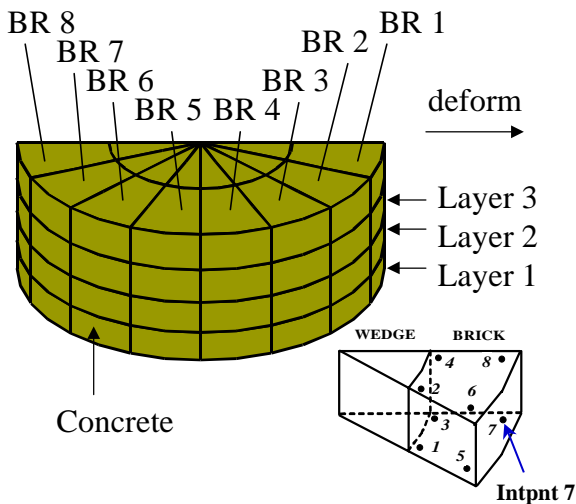


図 - 7 六面体要素と着目積分点

図 - 8 の Layer1 では CFT 柱の変位  $y = 2$  以降，BR 1 から BR 4 要素において，一軸圧縮強度  $f_c'$  の 0.5 倍から 1.1 倍までの範囲の大きな拘束圧を受けているのに対し，Layer 2 では，圧縮側の BR 1 から BR 3 で等価拘束圧を受けるに留まり，その値も Layer1 に比べて小さい傾向にある。その中でも，BR 3 要素は Layer1 において，一軸圧縮強度  $f_c'$  の 1.1 倍の等価拘束圧を受けているにも関わらず，Layer2 では，0.25 倍以下に減少している。これは，鋼管の座屈により，等価拘束圧が円周方向に全体的に分布す

る Layer1 から，曲げ圧縮が支配的な分布の Layer 2 に変化することが原因と考えられる。

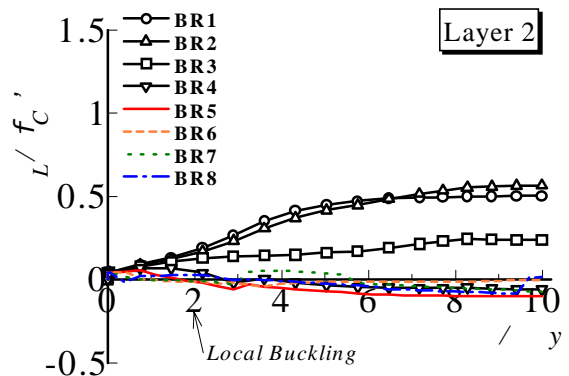
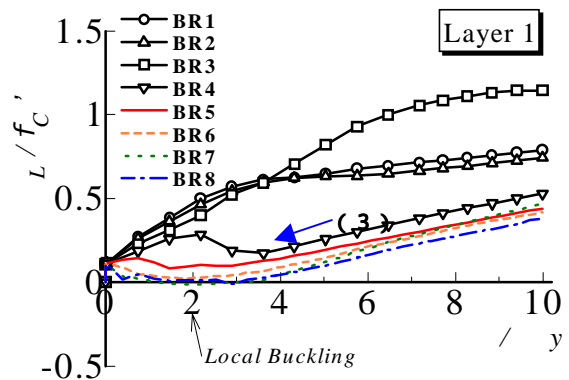


図 - 8 積分点での等価拘束圧の変動

また，図 - 8 内の Layer1 における BR 4 要素は，矢印(3)に示すように  $y = 2.0$  以降，拘束圧が抜ける挙動を示している。これは反対に言えば，鋼管の座屈により，内部コンクリートの拘束圧分布が不安定になり，BR 4 要素の拘束圧の抜けが，隣り合う BR 3 要素に大きな拘束圧の負担を与えてしまうことを示している。以上のことから，内部コンクリートの拘束圧は，柱基部の円周方向の拘束が，座屈位置で抜けるため，柱の曲げ圧縮による拘束の分布性状に変化することに特徴がある。

### 3.4 鋼管の座屈ひずみの進展

次に鋼管の座屈位置におけるひずみ挙動を観察する。図 - 9 に示すように鋼管の座屈している位置 Layer2 の要素 SH 1 から SH 8 のひずみ分布を考える。図 - 10 に積分点 (intpnt 1) における要素鉛直方向のひずみ  $\epsilon_{22}$  を縦軸に、CFT 柱の荷重変位の無次元量を横軸に算出した結果を示す。なお、図 - 9 において、括弧内は後の考察で用いる同位置の付着要素を示す。

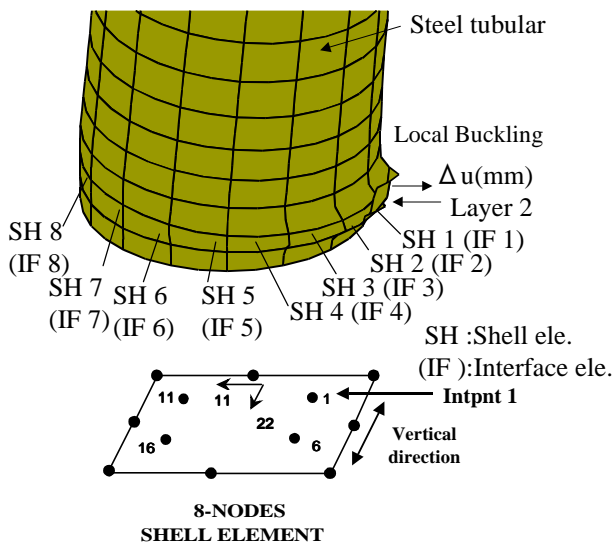


図 - 9 積分点での等価拘束圧の変動

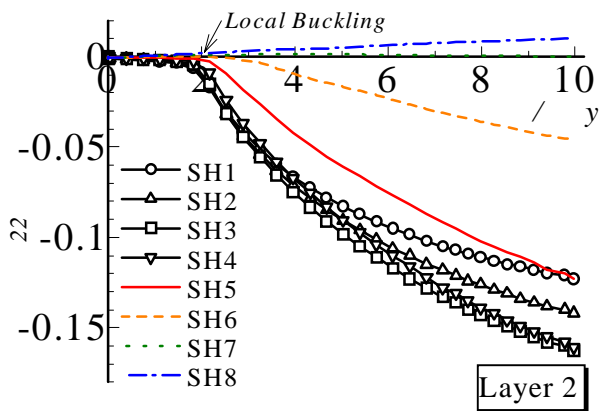


図 - 10 座屈位置の鉛直方向ひずみ  $\epsilon_{22}$

図 - 10 の  $y = 2$  において、鋼管のひずみが急に大きくなっていることから、ここで座屈が始まっている。さらに  $y = 10$  におい

て、ひずみの最大値 (=約 16%) を示す要素が、端部の SH 1 要素ではなく、SH 3, SH 4 要素であることに着目する。これらの要素は、先の 3.3 で考察した等価拘束圧が不安定な性状を示すコンクリート要素 BR 3 と BR 4 上のシェル要素であることから、座屈ひずみが大きい箇所で、拘束圧の不安定現象が起こっている。

また、SH 1 から SH 6 要素までは圧縮ひずみ (負) であるが、SH 7, 8 要素は引張ひずみ (正) を示している。これは、鋼管の座屈波形は SH 1 から SH 6 要素まで凸形状で分布しており、内部コンクリートと外側の鋼管が肌離れを起こしているが、SH 7, 8 要素では板曲げによる引張領域を示し、内部コンクリートと外側の鋼管が接触し応力伝達が行われている。

### 3.5 付着要素の挙動

ここでは、鋼管の座屈現象を内部コンクリートとの肌離れ量、つまり付着要素の変位量  $u$  の挙動に着目し考察を行う。図 - 9 において、括弧内の IF 1 から IF 8 要素が対応する付着要素を示している。鋼管の座屈による内部コンクリートからの肌離れ量を  $u$  (mm) とし、CFT 柱の荷重変位の無次元量との関係を図 - 11 に示す。ここで、 $u=0$  (mm) は、鋼管がコンクリートと幾何学的に接触していることを意味する。

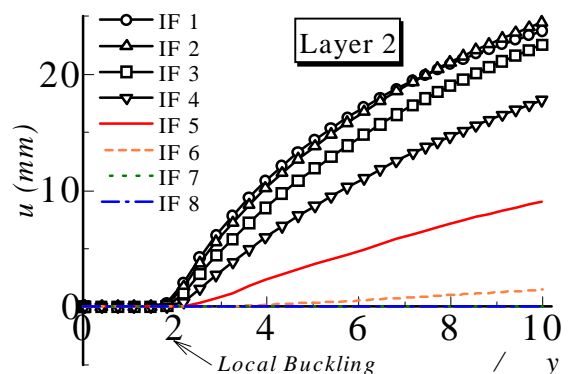


図 - 11 付着要素の肌離れ変位量  $u$

図 - 11 の  $y = 2$  において、急に肌離れ

量が発生していることから，ここで座屈が発生していることが，付着要素からも分かる。また，鋼管座屈で最も波が大きいのは IF 1 要素で，2 次曲線的に肌離れ量が増加する。さらに，IF 7, 8 要素が変位量 ' 0 ' を示していることから，付着要素からも SH 7, 8 要素位置の鋼管が内部コンクリートと接触し，応力伝達が行われていることが確認できる。

#### 4. まとめ

- 1) 内部コンクリートの拘束圧は，柱基部の円周方向の拘束が，座屈位置で抜けるため，柱の曲げ圧縮による拘束の分布性状に変化する。
- 2) 鋼管の座屈ひずみが大きい要素の位置で内部コンクリートへの等価拘束圧の分布が不安定になっている。
- 3) 付着要素の挙動から座屈が発生する変位および鋼管とコンクリートの接触，肌離れを確認できる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり，中部大学奨励研究費（松村），中部大学総合工学研究所補助金（第 6 部門 B），ハイテクリサーチ研究費（文部科学省）ならびに平成 14-15 年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究 C，研究代表者：水野英二）を受けたことを付記し，ここに謝意を表します。

#### 5. 参考文献

- 1) 保坂鐵矢, 松室哲彦, 橋吉宏, 平城弘一 他：充填鋼管とコンクリートとの鉄道複合橋梁 - 北陸新幹線・北陸道架道橋 -, 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集, -A313, pp.626-627, 1999.9
- 2) Schneider, P.S.: Axially loaded concrete filled steel tubes, Journal of Structural Engineering, pp.1125-1138, 1998.
- 3) Shames, M., Saadeghvaziri, M.A. : Nonlinear

Response of Concrete-Filled Steel Tubular Columns under Axial Loading, ACI Structural Journal, pp.1009-1017, 1999

- 4) 大下英吉, 小田朋輝, 河村哲男：鋼・コンクリート接合部における変形挙動のモデル化とその適合性に関する研究, コンクリート工学論文集, vol.12, No3, pp.1-13, 2001.9
- 5) 松村寿男, 水野英二：コンクリート充填鋼管柱の三次元有限変形解析, 鋼構造年次論文報告集, Vol.10, pp.535-542, 2002.
- 6) Matsumura, T., Mizuno, E. : 3-D FEM Deformation Analysis of Concrete-Filled Tubular steel columns, The Second International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics Busan, Korea, pp.131., Aug.2002.
- 7) 堀田久人, 曹昌根：コンクリートの三軸応力 - ひずみ特性を考慮した鉄筋コンクリート部材の三次元有限要素曲げ解析, 日本建築学会構造系論文集, No.530, pp.115-121, 2000.4
- 8) 土屋智史, 津野和宏, 前川宏一：常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断力を複合した RC 柱の非線形三次元有限要素立体解析, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.131-143, 2001.8
- 9) Mizuno, E., Hatanaka, S. : Strain-Space Plasticity Modeling for Compressive Softening Behavior of Concrete Materials, Concrete Research and Technology, vol. 2, No.2, pp.85-95, 1991.
- 10) 水野英二, 森本康介, 畑中重光：中心圧縮力を受けるコンファインドコンクリートの拘束効果に関する三次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vo21, No.3, 1999.
- 11) Diana7 User's Manual: Nonlinear Analysis, 7.1, pp.226-244, 1998.
- 12) 佐伯彰一, 箕作光一, 滝沢晃：コンクリート充填円管の耐荷力（その 3；はり - 柱部材）, 建設省土木研究所資料, 1981.