

曲げ変形を受けるコンクリート充填鋼管柱の合成作用の有無を考慮した 内部性状に関する三次元有限要素解析

3-D FEM analyses on internal state inside the concrete filled steel tubular column
subjected to flexural deformation considering the composite action with and without an adhesive behavior

松村 寿男*・水野 英二**
Toshio Matsumura and Eiji Mizuno

*正会員 博士 (工学) 瀧上工業 (株) 技術設計グループ (〒454-8517 名古屋市中川区清川町 2-1)

**正会員 Ph.D. 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

The present paper deals with the 3-D finite element deformation analyses of concrete filled steel tubular (CFT) column subjected to the lateral loading as well as the constant axial loading. The adhesive behavior between steel tube and filled concrete is modeled by the interface element to investigate the composite action and the confining effect inside the CFT column. By introducing a new index, namely, the equivalent confining pressure, the local stress-strain behavior at the Gaussian point level is investigated to evaluate the confining effect quantitatively. It can be concluded from the present numerical analyses that the adhesion inside CFT column contributes to an increase in the load bearing capacity and also the prevention from the local buckling of steel tube at the range of 0.5D (D : the diameter of column) from the base of column.

Key Words: 3-D FEM deformation analysis, CFT column, composite action, equivalent confining pressure

1. はじめに

鋼・コンクリート複合構造の中で、コンクリート充填鋼管柱¹⁾ (以下 CFT 柱と略す。) は、鋼管・コンクリートの合成作用により、各々の材料の強度を累加したものよりも大きな耐力が期待でき、ポストピーク領域²⁾においても変形能に優れている。CFT 柱の曲げ挙動に着目した場合、鋼管により周囲を囲まれた圧縮域の内部コンクリートが三軸圧縮応力状態となり、一軸圧縮強度以上の強度を期待できることが既往の実験的研究³⁾から分かっている。しかし、実験では内部コンクリートの状態量を計測することは困難であるため、CFT 柱の内部性状は未知な部分が多い。

CFT 柱の簡易設計法には、鋼管と内部コンクリートのひずみの適合性を考慮しない累加強度方式と鋼管と内部コンクリートを一体として考える RC 方式⁴⁾がある。変形を算定できる RC 方式は実設計上有効であるが、鋼管と内部コンクリートの一体性を確保する必要がある。

一方、実現現象においては、CFT 柱は内部コンクリートが周囲の鋼管に囲まれて、拘束効果を受けることにより一軸圧縮強度以上の強度が生じるが、さらに鋼管・コンクリート境界部の付着作用を高めるために鋼管内側にスタッドなどのずれ止めを設けることにより、鋼板の座屈等を抑制

することができる。その結果、CFT 柱の合成作用が高められて、各々の材料強度を累加したものよりも大きな耐力ならびに変形能を有する。

CFT 柱内部への拘束効果に関する既往の研究では、中心軸圧縮による検討^{5,6)}は行われているものの、曲げ変形を受ける三次元 FEM 解析による研究⁷⁾は数少ない。さらに、曲げ変形を受ける CFT 柱に関して、合成作用を考慮した内部性状について、数値解析により検証した研究事例は、筆者らの知る限りでは未だない。

このような CFT 柱内部への拘束効果と合成作用のメカニズムを明らかにできれば、現状の設計法をさらに発展させた、合理的な性能照査型設計法の提案にも結びつけることが可能となる。

本研究では、筆者らが過去に検討した軸圧縮下で曲げ変形を受ける円形 CFT 柱の三次元 FEM 解析⁸⁾をさらに発展させた。ここでは、鋼管と内部コンクリート境界部との合成作用を再現するために、境界要素の導入に際し付着の有無に着目したモデル化を行う。本数値解析を通して、1) 荷重-変形曲線と実験曲線とを比較し、2) 内部コンクリートへの拘束効果を「等価拘束圧」⁹⁾なる指標を用い、鋼管のフープ応力の挙動とともに積分点 (以下、ガウス点と称す。) レベルから捉え、3) 「拘束効率」¹⁰⁾なる指標を

用い、鋼管板厚ならびにコンクリート強度と拘束効果との関係について設計的な評価を試みる。

これらの考察により、鋼管と内部コンクリート境界部の合成作用を考慮した内部性状を数値解析的に把握し、CFT柱内部への拘束効果を性能照査型設計へ応用する際の基礎データを得ることを目的とする。

2. 解析モデルの概要

2.1 対象とした実験供試体

旧建設省土木研究所で行われた実験¹¹⁾を対象とする。表-1に供試体の諸元を示す。なお、鋼管には、SM490Yの鋼材を用いている。図-1に示すように、供試体は軸方向に一定軸力6,860 kN（軸力比 $P/P_y = 0.3$ ）を載荷後、横方向変位により単調載荷している。

供試体形状は、高さ $L = 2,920$ mm、外径 $D = 700$ mm である。

表-1 供試体の諸元

供試体 Type	寸法			鋼管		コンクリート	
	外径 D (mm)	板厚 t (mm)	径厚比 D/t	降伏点 σ_y (MPa)	ヤング 係数 E_s (GPa)	一軸圧縮 強度 f_c' (MPa)	ヤング 係数 E_c (GPa)
A	700	6	116.7	431	205.8	26.56	25.382
B		6	116.7	431		33.42	27.146
C		6	116.7	431		42.73	29.498
D		12	58.3	392		25.57	25.186

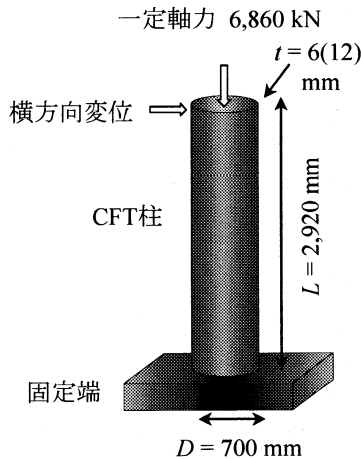


図-1 供試体概念図

2.2 材料特性とモデル形状

解析モデルには、2.5 節に後述する 1) 「付着無しモデル」と、2) 「付着有りのモデル」を各々の供試体に適用した計8ケースを採用した。解析ケースを表-2に示す。実験値の鋼管板厚 t (mm) ならびに鋼・コンクリート境界部の付着特性に着目した解析ケースを選定した。

解析には有限要素法コード DIANA¹²⁾を使用した。鋼管には8節点シェル要素(要素名:CQ40S,以下同様に示す)。

内部コンクリートには20節点(CHX60)6面体ソリッド要素と15節点(CTP45)5面体ソリッド要素、鋼管と内部コンクリートの境界面には8節点(CQ48I)境界要素を用いる。これらは曲げを受ける複雑な変形挙動を表現するのに適している二次要素である。二次要素を用いたソリッド要素は、通常6面体要素では27積分点(以下ガウス点)を有するが、柱基部要素内での応力変動が小さいことから、本研究では8ガウス点に低減させて評価することとした。同様に、5面体ソリッド要素では、12ガウス点を6ガウス点に低減させた。また、シェル要素では、せん断ロック現象を回避するために9ガウス点を4ガウス点に低減させた。境界要素では、シェル要素に合わせ4ガウス点を採用した。軸力を鋼管および内部コンクリートに同時に載荷した後に、横方向に強制変位載荷する単調載荷とし、柱基部内部への拘束効果の評価を試みる。なお、本研究で扱う拘束効果⁹⁾とは、コンクリートを側面から拘束することにより、一軸圧縮強度や圧縮弾性率が向上する効果を意味する。

図-2に示すように、要素分割は、柱の基部の分割長さを細かくし、固定端部から離れるに従い長くする。また、断面を同図に示すように半径方向に4分割した。

表-2 解析ケースの諸条件

解析 ケース	鋼管板厚 t (mm)	供試体 Type	付着
CASE 1-1	6	A	無
CASE 1-2	6	A	有
CASE 2-1	6	B	無
CASE 2-2	6	B	有
CASE 3-1	6	C	無
CASE 3-2	6	C	有
CASE 4-1	12	D	無
CASE 4-2	12	D	有

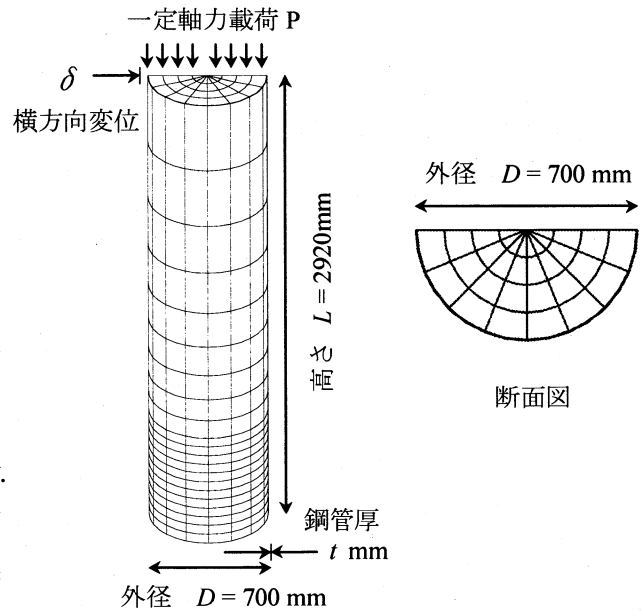


図-2 解析モデル

2.3 コンクリートの材料構成モデル

コンクリートの圧縮挙動の構成モデルには、三次元応力状態を再現するにあたり、汎用性がありかつパラメータが少ないという観点から、水野らのひずみ軟化型構成モデル¹³⁾と同様な一軸圧縮応力-ひずみ関係が再現できる DIANA 既存の *Drucker-Prager* ひずみ軟化型構成モデルを用いた。本モデルの三次元応力空間での負荷曲面を図-3に示す。ここに、構成モデルの各パラメータは、文献9)および13)の一軸圧縮応力-ひずみ関係を再現できるように、初期負荷曲面の勾配 $\alpha = 0.262$ 、初期負荷曲面の切片 $k = 0.315$ を採用している。硬化ならびに軟化の際は、DIANA の中で勾配 α 、切片 k が変化する設定をしている。本モデルは図-4に示す圧縮軟化特性（圧縮軟化型の応力-ひずみ関係）を再現することができる。なお、図-4中の σ_z は軸応力、 ε_{co}^p はピークひずみ、 ε_z は軸ひずみおよび ε_y は側方ひずみを示す。

一方、コンクリートの引張挙動のモデルとしては、スミアドクラックモデル¹⁴⁾を仮定し、テンションカットオフ規準を用いることにより一軸圧縮強度 f_c' の10分の1を引張強度 f_t として定義した。本モデルでは、吉田らの既往の研究成果¹⁵⁾を参考に、引張強度 f_t に達すると引張強度一定の状態でひずみが進行するようなバイリニアモデルを用い、引張軟化特性は考慮していない。引張軟化特性を仮定することは引張挙動による解析に対する精度を向上させるために有効な方法であるが、解の収束性が悪くなるという欠点もある。

引張軟化特性を考慮しなくても、CFT 柱の三次元有限曲げ変形解析において実験結果と良好な解析結果が得られている事例¹⁶⁾もあり、本研究では、ポストピーク挙動に大きく影響すると考えられる圧縮軟化特性のみを考慮することとした。

また、文献11)において、実験における鋼材とコンクリートのヤング係数比について、コンクリートのシリンダー試験から求めた割線ヤング係数と実際に鋼管に充填したコンクリートのヤング係数の相違による影響が大きいことが指摘されている。これは、ヤング係数比をかなり大きくしなければ荷重-変位関係が実験値に近づかないことを示唆したものである。本研究では、文献11)を参考に筆者らが過去に検討⁸⁾している、実験値と解析値の荷重-変位関係が最も近いヤング係数比（Type-C, B: $n = 10$, Type-A, D: $n = 21$ ）を採用する。

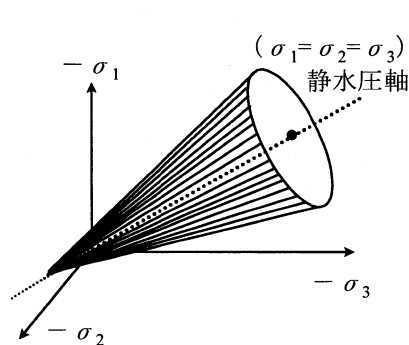


図-3 Drucker-Prager 型構成モデル

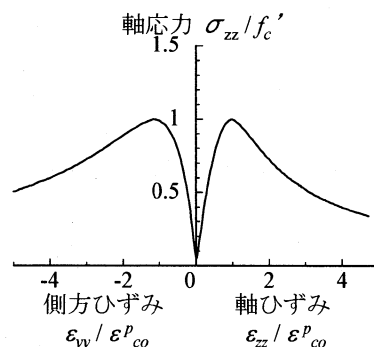


図-4 圧縮域のコンクリート構成モデル

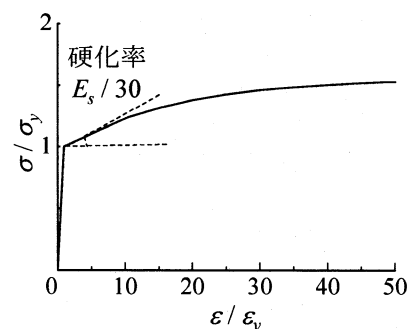


図-5 鋼材の構成モデル

なお、詳細は文献8)を参照されたい。

2.4 鋼管の構成モデル

鋼材の構成モデルは、従来、降伏棚、ひずみ硬化を考慮したバイリニア型モデルが設計基準¹⁷⁾に適用されている。しかし、本研究の鋼管部分には、図-5に示すように、降伏棚が消失しひずみ硬化挙動を仮定したマルチリニア型の構成モデルを考慮する。

これは、円形鋼管の多くは製作過程の中で冷間曲げ加工を行っており、引張材料試験において降伏棚が消失し、弾性限界後すぐにひずみ硬化挙動を示す¹⁸⁾ことに配慮している。なお、ひずみ硬化率には文献¹⁹⁾の応力-ひずみ関係を参考にし、鋼材のヤング係数 E_s の $1/30$ (SM490Y 材) を用いる。なお、硬化則には等方硬化モデルを用いる。

2.5 境界要素の構成モデル

CFT 柱の付着特性と拘束効果のメカニズムを明らかにするために、鋼・コンクリートの境界要素の違いに着目しモデル化することとした。

近年、支圧力を受ける鋼・コンクリート接触面の付着性に関する実験的研究²⁰⁾も行われているが、CFT 柱に関する鋼管・コンクリート境界部の荷重-ずれ変位関係の構成モデルは未だ確立されていないと考えられるため、本研究における付着特性については、簡易的に線形モデルを仮定する。

付着特性の違いは、鋼管・コンクリート境界要素の挙動の違いに置き換えることができるが、本研究では、(a) 鋼管内側にずれ止め等を設けることにより合成作用が高められる「付着有りのモデル」、(b) 鋼管内側にずれ止め等が配置されておらず、コンクリートの乾燥収縮などによりすき間等が生じ、十分な合成作用が期待できない「付着無しモデル」を仮定する。

これら2ケースの境界要素の違いがCFT 柱の内部性状に及ぼす影響を考察する。なお、実験では、ずれ止めを設けていない。

境界要素は、DIANA 既存の *Nonlinear Elasticity* 要素を採用し、図-6に示すように接触・剥がれ方向ならびにずれ方向の2方向について以下に (a) ならびに (b) の2ケースをモデル化する。

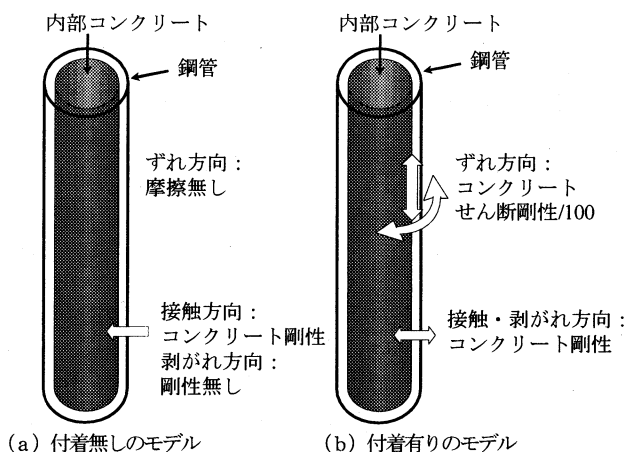


図-6 境界要素の模式図

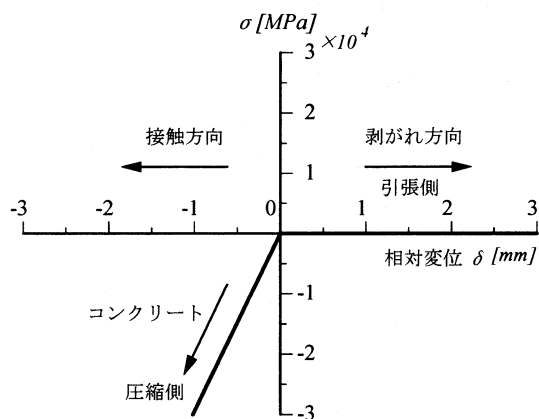


図-7 境界要素(付着無しのモデル)における接触・剥がれに関する構成モデル

表-3 境界要素の諸元

境界要素剛性 (MPa)		付着有りのモデル	付着無しのモデル
1)	接触方向	E_c	E_c
	剥がれ方向	E_c	0
2)	ずれ方向	$G_c/100$	0

但し、コンクリートのせん断剛性を $G_c (= E_c/2(1+\nu))$, $\nu=0.2$ をポアソン比)とする。

(a) 付着無しのモデル

1) 接触・剥がれ方向: 図-7に示す, 接触方向は境界要素を剛体バネと仮定し, その境界要素(剛体バネ)の剛性をコンクリート剛性に換算したものをを用いることにより, 接触方向には抵抗し, 剥がれ方向には抵抗がない非線形モデル。

2) ずれ方向: 剛性がなく, 摩擦が生じない。

(b) 付着有りのモデル

1) 接触・剥がれ方向: 接触方向に加えて, 剥がれ方向に対しても, 上記(a)1)の境界要素を用いた線形モデル。

2) ずれ方向: 境界要素(剛体バネ)の剛性をコンクリートせん断剛性の1/100に換算した剛性で抵抗する線形モデル。

ここに, 「付着有りのモデル」の1) 接触・剥がれ方向には, 実構造物で機械的な付着を確保する「ずれ止め」があるため, 「付着切れ」が発生しない, 2) ずれ方向には, 大規模地震時等の大きなずれ変形が生じるように, 文献21)を参考に, コンクリートのせん断剛性の1/100(例えばType-Aでは110 MPa)を用いた比較的緩い付着状態であると仮定し, せん断剛性のない, 「付着無しのモデル」と区別した。表-3に接触・剥がれ方向ならびにずれ方向における境界要素の諸元を示す。

3. 解析結果の考察

3.1 荷重-変位曲線に関する考察

荷重載荷点における荷重-変位曲線を図-8~11に示す。横軸は載荷変位 δ を降伏変位 δ_y (各図に表示) にて無次元化し, 縦軸は載荷荷重 Q を降伏荷重 Q_y (各図中に表示) にて無次元化している。CFT柱の全断面有効ならびに鋼管のみの理論線も併記する。図中の荷重-変位曲線において, ○印は実験値, 実線は「付着有りのモデル」の解析値, 破線は「付着無しのモデル」の解析値を示す。また, 最終変位における柱基部の鋼管の座屈形状も示す。

解析と実験との比較では, 「付着無しのモデル」は概ね実験値の荷重-変位関係を再現⁹⁾している。各解析ケースにおいて, 「付着無しのモデル」よりも「付着有りのモデル」の方が耐力レベルならびに変形能の向上が見られる。

鋼管の局部座屈形状については, 「付着無しのモデル」であるCASE1-1, CASE2-1ならびにCASE3-1については柱基部高さ0.5Dを頂点とした全体座屈形状(半径方向の膨らみ)が見られるのに対し, CASE4-1については高さ0.2D付近に提灯型の局部座屈形状が見られる。なお, 「付着有りのモデル」CASE1-2, CASE2-2, CASE3-2ならびにCASE4-2において局部座屈を起こしているケースはない。

図-11の「付着なしのモデル」であるCASE4-1については, 他の「付着無しのモデル」に比べ, 荷重-変位曲線における耐力レベルが最終変位付近($\delta/\delta_y=10$)において, 実験値より低い傾向にある。この原因として, 実験¹¹⁾においては, 本解析結果CASE4-1のような提灯型の局部座屈が発生していなかったことが考えられる。

なお, 各解析ケースの「付着有りのモデル」において, 局部座屈形状が見られないことから, 鋼管と内部コンクリート境界部の付着の存在が, 鋼管の局部座屈を抑制しCFT柱の耐力レベルならびに変形能を向上させていると考えられる。このことを検証できれば, 鋼管内部に付着を機械的に期待した構造, 例えば, ずれ止め構造等を採用することにより, 曲げ変形が生じた際に, 鋼管と内部コンクリート境界部の抵抗力が増し, 鋼管の局部座屈が抑制され, CFT柱の耐力レベルならびに変形能が向上することへの数値解析的な裏付けとなる。

このような現象を捉えるためには, 鋼管と内部コンクリート境界部の付着の有無によるコンクリートの内部性状, すなわち内部コンクリートのガウス点レベルでの挙動の違いを検証する必要があるため, 3.2節で詳細に考察する。

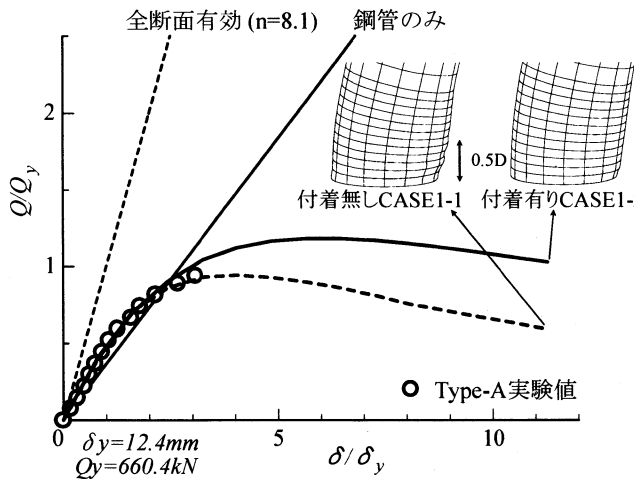


図-8 Type-Aの荷重-変位曲線

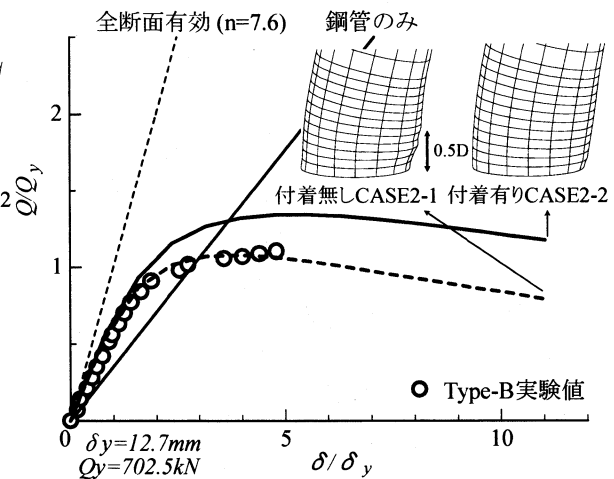


図-9 Type-Bの荷重-変位曲線

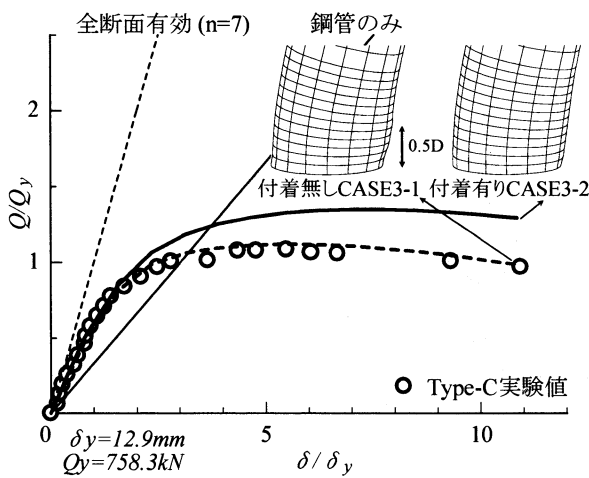


図-10 Type-Cの荷重-変位曲線

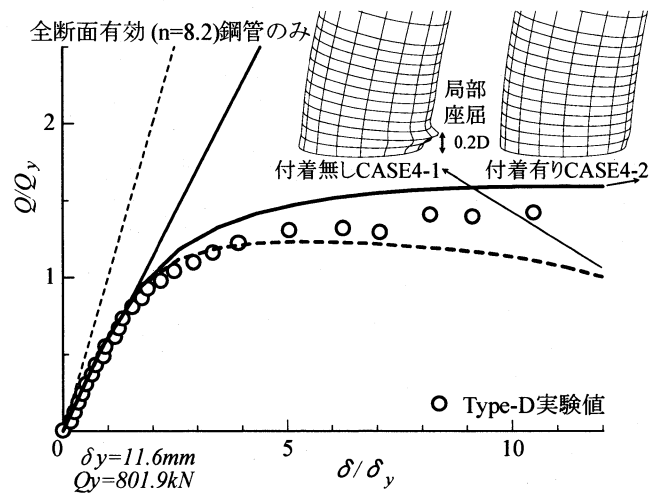


図-11 Type-Dの荷重-変位曲線

3.2 変形挙動ならびにガウス点レベルにおける内部性状に関する考察

(1) 主応力の比較

本解析では、CFT柱は曲げ変形を受けているため、柱基部の内部コンクリートは、直応力とせん断力が混在した複雑な応力状態にあることが予測される。そこで、本節では主応力の挙動を考察することにより、コンクリートの内部性状を把握することを試みる。

図-12にType-C(付着無しモデル)の変形図である、(a)正面図、(b)背面図ならびに(c)内部コンクリートの主応力方向を示す。鋼管の座屈性状が発現しておらず、内部コンクリートの拘束圧が最も高いと思われる柱基部の1層目(0.1D, DはCFT直径を示し、以下同様に表現する。)から5層目(0.5D)の内部コンクリート要素を調べる。三次元応力状態では、3方向の主応力が存在し、主応力の絶対値の大きい順に、柱軸方向の最大主応力 σ_1 、柱円周方向(フープ方向と称す。)の中間主応力 σ_2 ならびに、鋼管の接触・剥がれ方向の最小主応力 σ_3 を示している。また、主ひずみの絶対値の大きい順に、最大主ひずみ ε_1 、中間主ひずみ ε_2 および最小主ひずみ ε_3 を定義した。

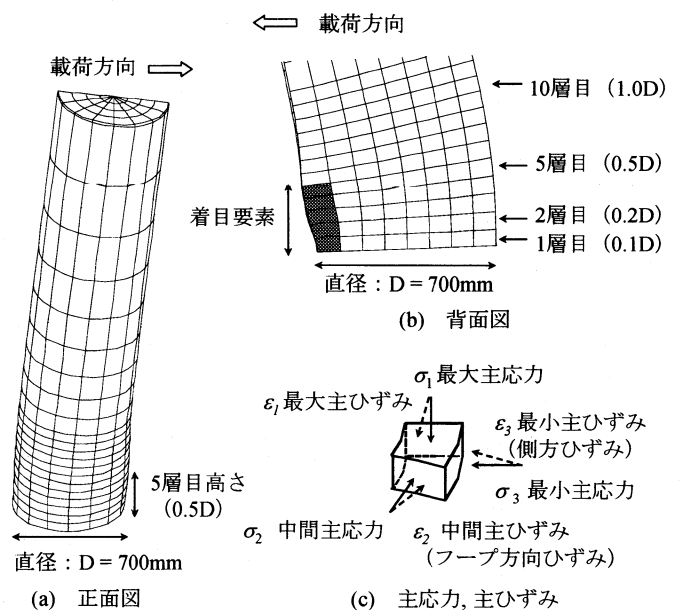


図-12 変形図, 着目要素, 主応力, 主ひずみ

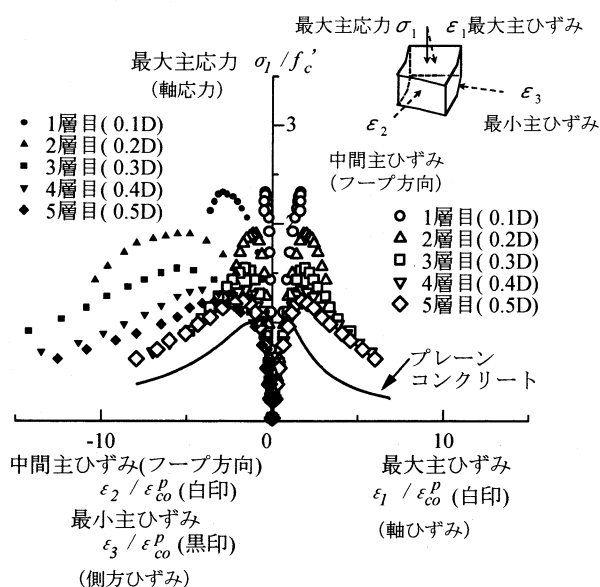


図-13 軸応力-軸ひずみ、側方ひずみ関係（付着無し）

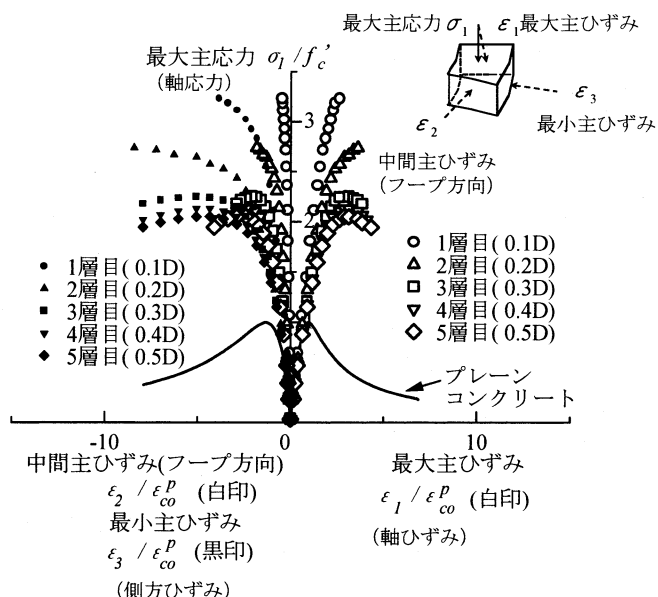


図-14 軸応力-軸ひずみ、側方ひずみ関係（付着有り）

コンクリートの内部性状を把握するため、Type-Cについて一軸圧縮強度 f'_c とピークひずみ ε_{co}^p にて無次元化した、最大主応力-主ひずみ関係を各々、図-13「付着無しモデル」ならびに図-14「付着有りのモデル」に示す。比較のため、拘束を受けていないプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線も図示する。

図-13の「付着無しモデル」において、内部コンクリート1層目（0.1D）は一軸圧縮強度 f'_c の約2.5倍 $\sigma_1/f'_c = 2.3$ もの強い柱軸応力を受けるが、2層目（0.2D）より上層になるにしたがい応力は小さくなり、プレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線に近づいている状況が観察できる。このことから、設定したコンクリートの構成モデルは、鋼管からの拘束を受け、三軸圧縮応力状態を呈し、コンクリート強度が増加する状況を数値解析的に再現していることが考察できる。

一方、図-14の「付着有りのモデル」は「付着無しモデル」に比べて、さらに柱軸応力が1.2倍程度 $\sigma_1/f'_c = 3.2$ 上昇し、ひずみレベルも小さく（ $\varepsilon_1/\varepsilon_{co}^p = \varepsilon_2/\varepsilon_{co}^p = 5$ 程度）、5層目（0.5D）に至っても「付着無しモデル」に比べて軟化挙動が顕著ではない。これは、付着により合成作用が高まり内部コンクリートが強い拘束を受け続ける状態を再現したものと思われる。

また、主ひずみに関して、図-13の「付着無しモデル」の最小主ひずみ ε_3 は、ピークひずみ（ $\varepsilon_{co}^p = 0.29\%$ ）の10倍以上のひずみが発生しているのに対して、図-14の「付着有りのモデル」は、8倍程度である。

これらに加え、3.1節における図-10の柱基部の変形図を考慮すると、1)「付着無しモデル」では、鋼管の局部座屈により、半径方向に膨らんでおり、ひずみが進行し軸応力も減少していることから、拘束圧が抜けた状態であるのに対し、2)「付着有りのモデル」では、鋼管の局部座屈は発生しておらず、鋼管により内部コンクリートが締め付けられ、ひずみが進行していない状態を再現していることが推察できる。

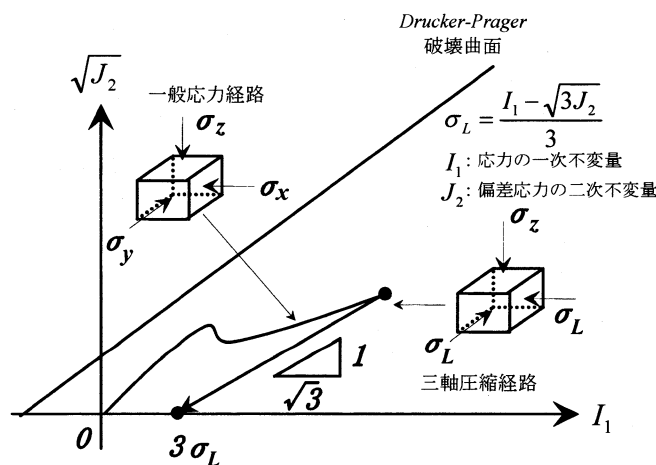


図-15 等価拘束圧の概念

(2) 応力空間での等価拘束圧の定義

等価拘束圧²⁾の概念を説明する。図-15に示すように、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。等価拘束圧により、コンクリートの曲げ挙動のような、直応力とせん断応力を同時に生じる応力状態の拘束圧の定量的な検証が可能となる。

(3) 等価拘束圧分布による内部性状の把握

一例として、Type-C について、付着の有無に着目した柱基部要素の等価拘束圧の等高線分布を変形図とともに図-16に示す。

図-16から分かるように、CFTの横方向載荷（ δ/δ_y ）が進むに従い、「付着無しモデル」と「付着有りのモデル」による等価拘束圧分布の傾向が異なる。すなわち、「付着無しモデル」では、鋼管・コンクリート境界部の等価拘束圧が局所的に高くなっているのに対して、「付着有りのモデル」では、柱基部圧縮側の広い領域に高い等価拘束圧分布が現れている。

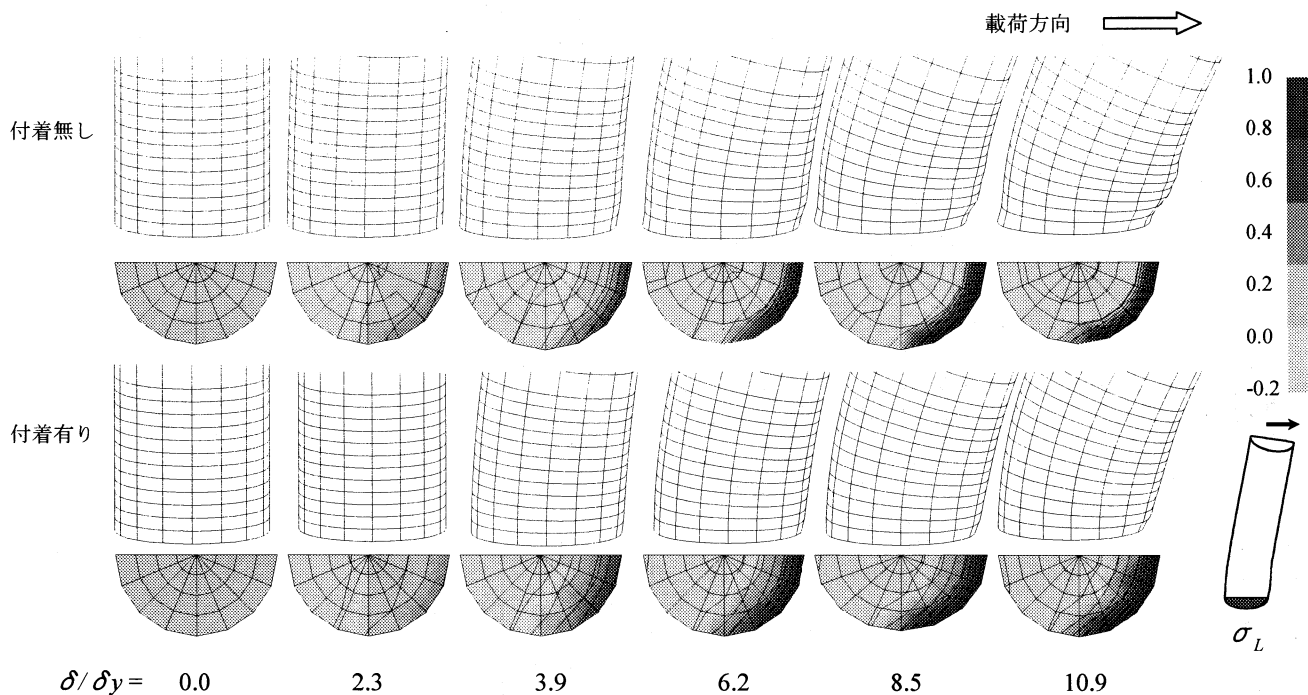


図-16 柱基部の等価拘束圧分布 (Type-C)

このことから、「付着有りのモデル」は内部コンクリートの拘束圧を圧縮域の広い範囲で高める効果があることが確認できる。

(4) 内部コンクリートならびに鋼管の応力状態の把握

本項では、各解析ケースの付着の有無における、内部コンクリートならびに鋼管の応力状態の把握を目的として、図-17に示す柱基部のガウス点レベルの挙動を考察する。ここでは、柱基部1～5層目 (0.1～0.5D) について、鋼管と接するコンクリート要素 (6面体要素) ならびに対応する鋼管要素 (シェル要素) のガウス点の挙動に着目する。なお、1) コンクリート要素においては、CFT変位と対応する等価拘束圧の進展状況を、2) 鋼管要素においては、平面応力の変動を考察する。等価拘束圧の進展状況ならびに平面応力の変動については、Type-Aは図-18、図-19に示し、以下同様に、Type-Bを図-20、図-21、Type-Cを図-22、図-23、Type-Dを図-24、図-25に各々対応させて示す。なお、CFT柱の変位 δ を降伏変位 δ_y 、等価拘束圧 σ_L をコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c 、軸応力 σ_{xx} ならびにフープ応力 σ_{θ} を鋼材の降伏強度 σ_y にて無次元化している。また、図-19、21、23、25において、平面応力の変動を von Mises の降伏曲面とともに示す。

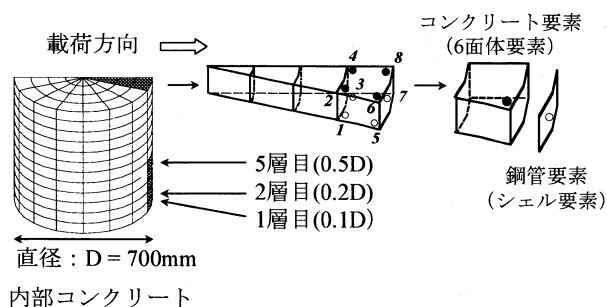


図-17 柱基部要素におけるガウス点の選定

Type-Aについて、図-18から分かるように、最終変位 ($\delta/\delta_y=11.3$) における柱基部1層目 (0.1D) の等価拘束圧 σ_L/f'_c が最大となり、それぞれ、0.7 (付着無しモデル, ●印), 1.4 (付着有りのモデル, ○印) であり、2倍の拘束圧の増加が見られる。5層目 (0.5D) では、0.04 (付着無しモデル, ◆印), 0.5 (付着有りのモデル, ◇印) であり、拘束圧がおおよそ10倍に増加している。さらに、2層目 (0.1D) から5層目 (0.5D) においては、変位 ($\delta/\delta_y=4.0$) 付近より、「付着有りのモデル」の拘束圧が顕著に増加しており、ほとんど拘束圧の生じていない「付着無しモデル」との挙動の違いは明らかである。また、図-19から分かるように、平面応力は、柱軸方向 σ_{xx} に圧縮応力 (－) を受けた後にフープ方向 σ_{θ} に引張応力 (＋) を受ける経路を辿っている。フープ応力 σ_{θ}/σ_y に着目すると、「付着無しモデル」は最大0.8 (4層目: 0.4D, ▼印) に対し、「付着有りのモデル」は1.1 (4層目: 0.4D, ▽印) であり、1.4倍に増加している。加えて、「付着有りのモデル」では2層目 (0.2D) から5層目 (0.5D) において、同程度のフープ応力 $\sigma_{\theta}/\sigma_y=1.1$ が生じており、鋼管が内部コンクリートを締め付けている状態を示していることが推察される。これは、図中の柱基部変形図において、「付着無しモデル」は5層目 (0.5D) を頂点とした局部座屈変形により膨らんでいるが、「付着有りのモデル」は各層において引縮まった形状を呈していることから分かる。

Type-Bについて、上記と同様な視点で考察する。まず、等価拘束圧 σ_L/f'_c は、図-20に示す最終変位 ($\delta/\delta_y=11.0$) において、1層目 (0.1D) で1.0 (付着無しモデル, ●印), 1.7 (付着有りのモデル, ○印) であり、1.7倍の拘束圧の増加が見られる。5層目 (0.5D) では、0.05 (付着無しモデル, ◆印), 0.4 (付着有りのモデル, ◇印) であり、8倍の拘束圧の増加が見られ、Type-Aの拘束圧の

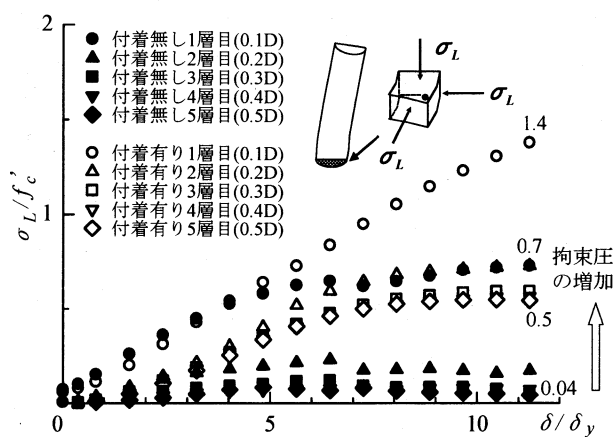


図-18 等価拘束圧の進展挙動 (Type-A)

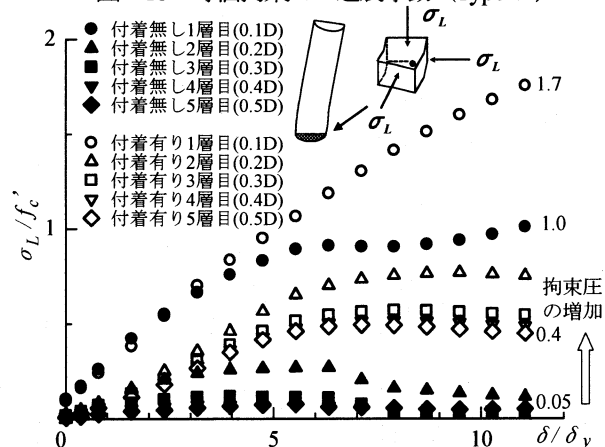


図-20 等価拘束圧の進展挙動 (Type-B)

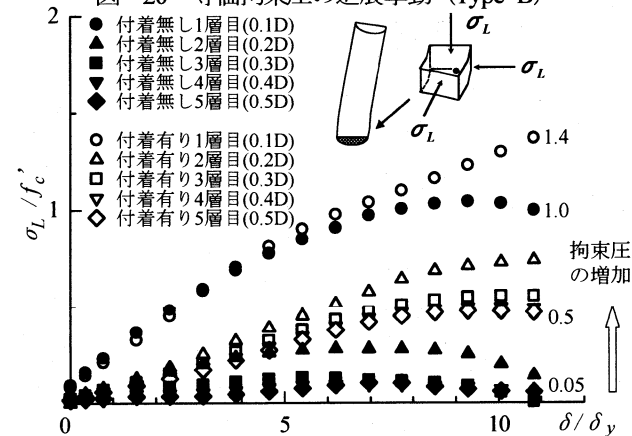


図-22 等価拘束圧の進展挙動 (Type-C)

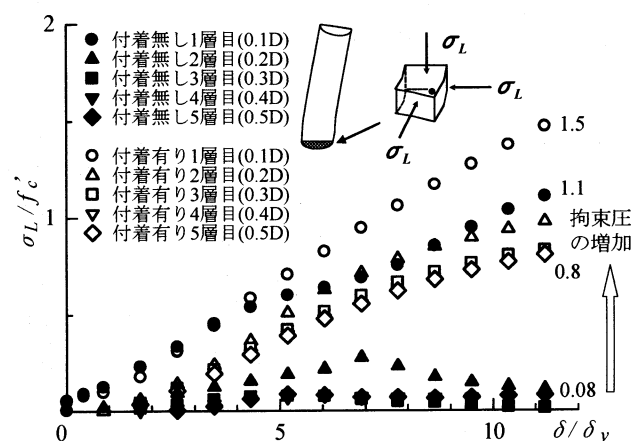


図-24 等価拘束圧の進展挙動 (Type-D)

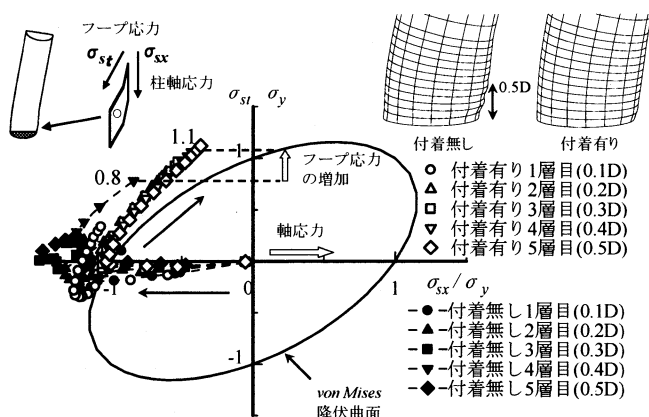


図-19 平面応力の変動 (Type-A)

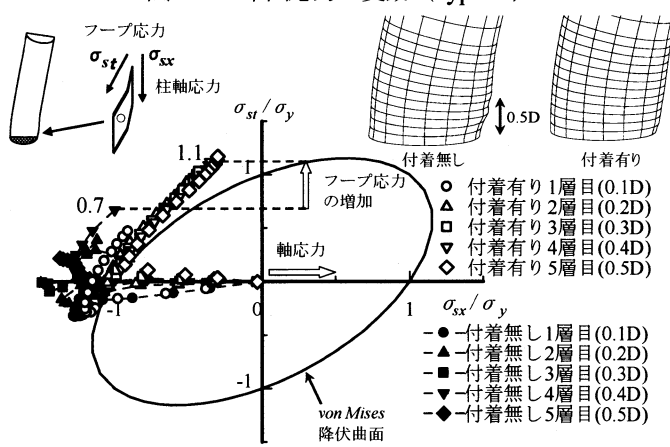


図-21 平面応力の変動 (Type-B)

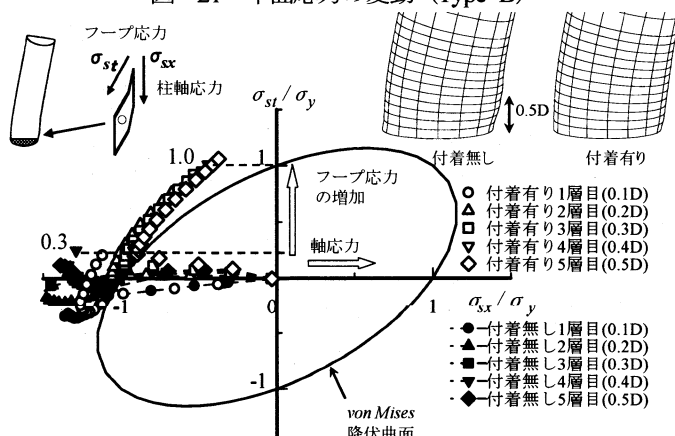


図-23 平面応力の変動 (Type-C)

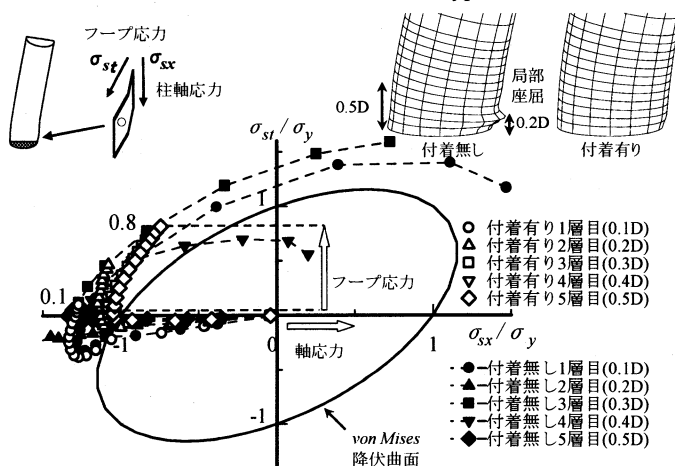


図-25 平面応力の変動 (Type-D)

挙動に類似している。次に、図-21 のフープ応力 σ_s/σ_y に着目すると、「付着無しモデル」は最大0.7 (4層目: 0.4D, ▼印)、「付着有りのモデル」は1.1 (4層目: 0.4D, ▽印)であり、1.6倍である。2層目 (0.2D) から5層目 (0.5D)において、同程度のフープ応力が生じ、図中の柱基部変形図からも鋼管が内部コンクリートを締め付けている状態であり、Type-Aと同様な傾向を示す。

Type-Cも同様に考察すると、図-22に示す最終変位 ($\delta/\delta_y=10.9$)の等価拘束圧 σ_L/f_c' は1層目 (0.1D)で1.0 (付着無しモデル, ●印), 1.4 (付着有りのモデル, ○印)である。次に、図-23に示すフープ応力 σ_s/σ_y は、最大0.3 (付着無し4層目: 0.4D, ▼印), 1.0 (付着有り4層目: 0.4D, ▽印)である。Type-AならびにType-Bに比べて「付着無しモデル」のフープ応力が小さい傾向にある。柱基部変形図については先述したType-AならびにType-Bと同様な傾向を示す。

Type-Dも同様に考察すると、図-24に示す最終変位 ($\delta/\delta_y=11.2$)の等価拘束圧 σ_L/f_c' は1層目 (0.1D)で1.1 (付着無しモデル, ●印), 1.5 (付着有りのモデル, ○印)である。次に、図-25に示す平面応力の変動であるが、Type-A~Type-Cまでの傾向と異なり、「付着無しモデル」の1層目 (0.1D, ●印)ならびに3層目 (0.3D, ■印)の応力点は、降伏曲面 $\sigma_s/\sigma_y=1$ を飛び出して、外側の曲面上を移動している。これは、図中の変形図で、「付着無しモデル」がType-A~Type-Cの局部座屈形状と異なり、柱基部高さ0.2Dにおいて、提灯型の局部座屈形状を呈していることに原因があると推測できる。なお、採用した構成モデルは等方硬化モデルであるために、応力点は初期降伏曲面の外側に移動している。また、5層目 (0.5D)のフープ応力 σ_s/σ_y は、0.1 (付着無し, ◆印), 0.8 (付着有り, ◇印)である。

これらをまとめると表-4になり、以下の1)および2)に示す考察ができる。

表-4 等価拘束圧とフープ応力との比較

解析 ケース	等価拘束圧 (σ_L/f_c')		フープ応力 (σ_s/σ_y)	
	付着無し 0.1D (0.5D)	付着有り 0.1D (0.5D)	付着無し 0.4D	付着有り 0.4D
Type-A	0.7 (0.04)	1.4 (0.5)	0.8	1.1
Type-B	1.0 (0.05)	1.7 (0.4)	0.7	1.1
Type-C	1.0 (0.05)	1.4 (0.5)	0.3	1.0
Type-D	1.1 (0.08)	1.5 (0.8)	0.1*	0.8*

※Type-Dのフープ応力の値は0.5Dを示す。

1) 等価拘束圧について

柱基部1層目 (0.1D)の拘束圧において、「付着無しモデル」 (0.1D, ●印)に比べて「付着有りのモデル」 (0.1D, ○印)の方が、およそ1.4~2.0倍程度大きい。また特記すべきは、「付着無しモデル」ではほとんど拘束圧が生じなかった5層目 (0.5D, ◆印)においても、「付着有り

モデル」 (0.5D, ◇印)では一軸圧縮強度の0.5倍程度の拘束圧を受けることである。本結果は、鋼・コンクリート境界部の付着を高めるために、ずれ止め設置等の配慮をすれば、それらの合成作用が高められ、拘束圧が上昇することを数値解析的に裏付けている。

2) 平面応力の変動について

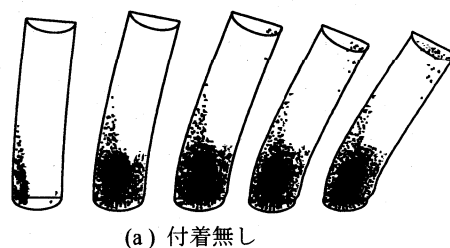
「付着有りのモデル」 (0.4D, ▽印)において、鋼管要素の応力点は、柱軸方向 σ_x に圧縮応力 (－)を受けた後に、フープ方向 σ_s に引張応力 (＋)を受ける経路を辿る。一方、「付着無しモデル」 (0.4D, ▼印)は、柱軸方向 σ_x に圧縮応力を受けるものの、フープ応力 σ_s は小さい傾向にある。すなわち、「付着有りのモデル」は、鋼管の局部座屈が抑制され、フープ応力が増加することにより、内部コンクリートの拘束効果が高まることを示唆している。

以上の考察は、付着による合成作用が高まり、鋼管による内部コンクリートへの拘束効果が得られることにより、3.1節の図-8~図-11の荷重-変位関係に示したCFT柱の耐力レベルならびに変形能が向上するという挙動を、数値解析により捉えている点で意義があるといえる。

(5) ひび割れ性状に関する考察

ここでは、内部コンクリートのひび割れ性状を考察する。図-26に示すひび割れ性状の分布図 (Type-C)は、初期ひび割れの発生する引張応力に達した要素のガウス点箇所を黒印 (●)にて表示している。

「付着有りのモデル」のひび割れ性状から、黒印 (●)は、引張域の高さ方向の広い範囲に分布しており、CFT柱の最終変位 ($\delta/\delta_y=10.9$)においても、圧縮側の内部コンクリートの圧壊領域が小さい。一方、「付着無しモデル」のひび割れ性状から、黒印 (●)は柱基部に集中する傾向があり、圧縮域にも生じている。「付着有りのモデル」では、鋼管が変形するとともにその変形にコンクリートが追随しようとして、部材高さ方向にひび割れ性状が分布するが、「付着無しモデル」では、鋼・コンクリート境界部にすべりが生じて柱基部に圧壊領域が集中する傾向にある。



(a) 付着無し



(b) 付着有り

$\delta/\delta_y = 2.3 \quad 3.9 \quad 6.2 \quad 8.5 \quad 10.9$

図-26 柱基部のひび割れ性状 (Type-C)

(6) コンクリートの内部性状に関する考察

上述の(1)～(5)項の検討結果より得られた知見から、柱基部のコンクリートの内部性状に関する考察をする。

図-27の拘束圧分布の模式図に示すように、「付着有りのモデル」に比較し、「付着無しモデル」は鋼管とコンクリート面に接触作用が支配的でフープ作用が小さい。一方、「付着有りのモデル」は、接触作用に加えて、付着により鋼管が内部コンクリートをフープ力により締め付け、鋼管とコンクリートの合成作用が高められるメカニズムが確認できる。この柱基部内部への拘束効果がCFT柱の耐力向上に寄与していることを解析結果は示唆している。CFT柱の荷重-変位関係において、「付着無しモデル」の方が、より実験値に近い挙動を示すことから、本研究で仮定した「付着有りのモデル」は、実験の現象を再現しているのではない。

本研究で得られた知見は、鋼とコンクリートとの境界面の付着を期待すれば、拘束効果が高められることを示唆している。すなわち、実構造物において、鋼管内部に機械的な付着を期待した構造である、ずれ止め等を配置することにより境界部の抵抗力が増し、内部コンクリートへの拘束効果が向上することを数値解析により明らかにした。本結果は、実構造物において、合成作用を期待した設計にコンクリートの拘束効果を取り入れる基礎データとなり得る。

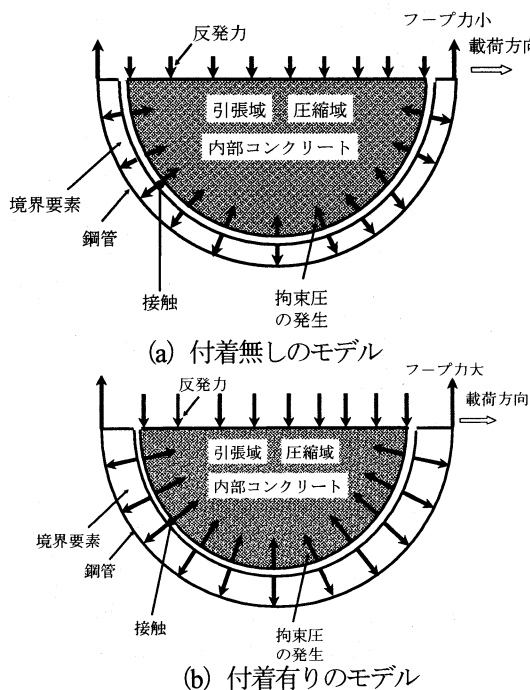


図-27 柱基部の拘束圧分布の模式図

3.3 拘束効率を用いた設計評価

本節では、コンファインドコンクリート等の補強効率の評価に用いられる、「拘束効率」¹⁰⁾なる指標を取り入れることにより、鋼管の内部コンクリートへの拘束効果の定量的な評価を試みる。

(1) 解析結果の評価

等価拘束圧 σ_L を用いて、式(1)に示す拘束効率を定義する。

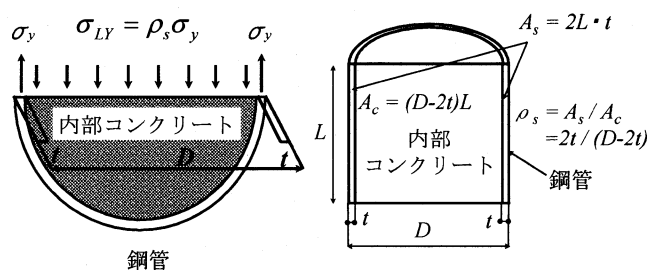
$$R = \frac{\sigma_L}{\sigma_{LY}} \quad (1)$$

ここで、 σ_{LY} ：全鋼材降伏時に円形断面に働く図-28(a)に示す計算上の側圧で、「計算側圧」と呼ぶこととし、式(2)より与えられる。

$$\sigma_{LY} = \rho_s \sigma_y \quad (2)$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{A_c} = \frac{2t}{D-2t} \quad (3)$$

ここに、 ρ_s は式(3)に示す鋼管とCFT柱の側面の面積比、 σ_y は鋼材の降伏強度を示す。 ρ_s は図-28(b)に示すCFT柱を側方方向から見た鋼材(板厚 t mm)の面積 A_s を、内部コンクリート(幅： $D-2t$ mm)の側面積 A_c にて除した値である。



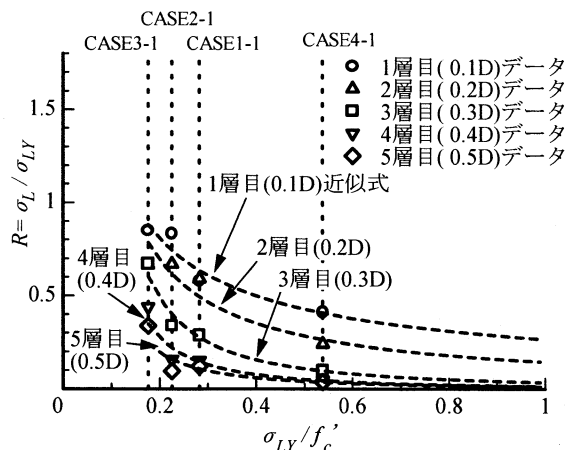
(a) 計算側圧 σ_{LY} (b) CFT柱の側面積
図-28 フープ作用を示す計算側圧 σ_{LY} と側面積

拘束効率 R が大きいほど、計算側圧に比べて大きな拘束圧が載荷されていることを意味する。本節では付着の有無に着目するため、鋼・コンクリート境界部要素の平均値を算出する。図-29に拘束効率 R の算出結果を示す。

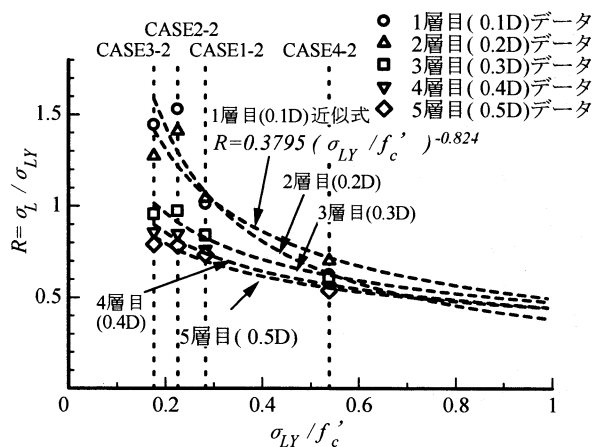
図-29に示す拘束効率 R の傾向として、図-29(a)「付着無しモデル」は一番大きい1層目(0.1D)においても $R=1$ であるのに対し、図-29(b)「付着有りのモデル」では $R=1.5$ となり0.5倍の増加となっている。

さらに、図-29(b)「付着有りのモデル」では、2層目～5層目(0.2D～0.5D)のような柱基至上層部分に関しても、 $R=0.5\sim1.0$ 付近で分布し、 σ_{LY}/f'_c が大きくなるに従い拘束効率 R の分布曲線も近づいている。これは、2層目～5層目(0.2D～0.5D)の上層部分も1層目(0.1D)に近い、強い拘束効果を受けていることを示す。また、鋼管板厚の厚いCASE4-2($t=12$ mm)は、他のケースよりも拘束効率が $R=0.7$ 程度と小さいこと、鋼管板厚の薄いCASE1-2～CASE3-2($f'_c=26.56$ MPa)の拘束効率が大きい傾向にある。

これらの結果を用いれば、CFT柱断面を決定する際に、径厚比 D/t とコンクリート強度 f'_c のバランスを考慮することで拘束効率を向上させた経済的な設計が可能となる。すなわち、拘束効率 R を用いることにより、鋼とコンクリートとの付着の有無を考慮した、経済的に優れたCFT柱断面の設計が可能となり、またCFT柱内部への拘束効果における定量的な評価も可能になる。



(a) 付着無しモデル



(b) 付着有りのモデル

図-29 拘束効率 R の変動

(2) 試算例

鋼管の局部座屈ならびに拘束圧を考慮した本研究の数値解析結果から得られた近似式を用い、文献22)の例題を参考に、(1)項において定義した拘束効率 R を基にCFT柱断面の試算を行う。なお、CFT柱外径 $D=800\text{ mm}$ 、鋼管板厚 $t=14\text{ mm}$ 、鋼材降伏強度 $\sigma_y=320\text{ N/mm}^2$ 、コンクリート強度 $f'_c=27\text{ N/mm}^2$ 、柱高さ $L=2,662.5\text{ mm}$ 、とする。ここでは、図-29 (b)の付着有りのモデルの柱基部1層目(0.1D)の近似式($R=0.3795(\sigma_{LY}/f'_c)^{-0.824}$)を用いた拘束効率が「1」を満たすような条件を、1)コンクリート強度を一定 $f'_c=27\text{ N/mm}^2$ にした場合と、2)鋼管板厚を一定 $t=14\text{ mm}$ にした場合とを考察する。この算出結果を図-30に示す。

図から分かるように、拘束効果が経済的に見込める、すなわち、拘束効率 $R=1$ 以上を満たすためには、コンクリート強度を一定にした場合に鋼管板厚 $t=11\text{ mm}$ 、鋼管板厚を一定にした場合にコンクリート強度 $f'_c=38\text{ N/mm}^2$ が必要である。拘束効率 R のみに着目すれば、本例題の鋼管板厚 $t=14\text{ mm}$ を $t=11\text{ mm}$ へ減らした経済的な断面が提案できる。コンクリート強度については、 $f'_c=27\text{ N/mm}^2$ から $f'_c=38\text{ N/mm}^2$ に増え、提案するには不経済になる。なお、本試算例は「付着有りのモデル」の条件下であるため、鋼管内にずれ止め構造等の配置が前提になるが、拘束効率を用いた拘束効果に関する断面設計照査の提案をすることは、充分可能であると考えられる。

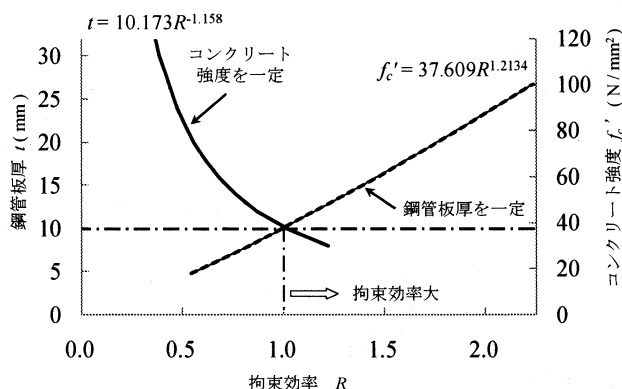


図-30 拘束効率と鋼管板厚、コンクリート強度の関係

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 荷重-変位曲線の算出結果より、各解析ケースにおいて、「付着無しモデル」よりも「付着有りのモデル」の方が耐力レベルの向上がみられる。本結果は、鋼・コンクリート境界部の付着の有無によりCFT柱の耐力、変形能が向上する現象を三次元解析的に捉えている。このことは、実構造物において、鋼管内部に機械的な付着を期待した構造、すなわち、ずれ止め等を配置することにより境界部の抵抗が増し、CFT柱の耐力、変形能が向上することを示唆している(第3章、3.1節)。
- (2) 鋼管の局部座屈形状について、「付着無しモデル」は柱基部全体に座屈形状が見られるのに対し、「付着有りのモデル」で局部座屈を起こしているケースはない(第3章、3.1節)。
- (3) 主応力の算出結果より、鋼管により内部コンクリートが三次元的に拘束されることにより、一軸圧縮強度以上の強度を発現することを数値解析的に示した。加えて、「付着無しモデル」では、鋼管の局部座屈により拘束圧が抜けた状態であるのに対し、「付着有りのモデル」では、鋼管の局部座屈は発生しておらず、鋼管により内部コンクリートが締め付けられ、ひずみが進行していない状態を再現していることが推察できる(第3章、3.2節(1))。
- (4) 等価拘束圧分布の算出結果から、「付着無しモデル」では、鋼管・コンクリート境界部の等価拘束圧が局所的に高くなるのに対し、「付着有りのモデル」では、柱基部の圧縮域全体に高い等価拘束圧分布を示している。このことから、「付着有りのモデル」が内部コンクリートの拘束圧を高める内部性状を数値解析により捉えている(第3章、3.2節(3))。
- (5) 等価拘束圧の進展挙動を考察した結果、「付着無しモデル」では、ほとんど拘束圧が生じなかった柱基板上層にまで「付着有りのモデル」は拘束圧を受けている。すなわち、鋼・コンクリート境界部の付着性能を高めるために、ずれ止めを設置する等の配慮をすれば、合成効果を高められ、拘束圧が上昇することを数値解析により示したことになる。この挙動は、コンクリートの拘束効果がCFT柱の耐力レベルが向上した要因の一つであることを示唆している(第3章、3.2節(4))。

(6) 平面応力の変動より、鋼管要素において、「付着無しモデル」に比べ、「付着有りのモデル」のフープ応力が増加している。すなわち、「付着有りのモデル」は、付着により鋼管の局部座屈が抑制され、フープ応力が増加することにより、内部コンクリートの拘束効果が高まることを示唆している(第3章, 3.2節(4))。

(7) ひび割れ性状の分布から、「付着有りのモデル」はCFT柱の最終変位においても、内部コンクリート圧壊領域が小さいが、「付着無しモデル」は圧壊領域が柱基部に集中する傾向にある。これは、付着による境界部の抵抗により合成作用が高まり、鋼管の内部コンクリートへの拘束効果の向上とともに、圧壊領域が抑制されていると考えられる(第3章, 3.2節(5))。

(8) 拘束効率 R の評価より、鋼管板厚の厚いケースは、他のケースよりも拘束効率が小さいこと、鋼管板厚の薄いケースではコンクリート強度が低いケースの拘束効率が大きい傾向にある。この傾向を用いれば、CFT柱断面を決定する際に、径厚比 D/t とコンクリート強度 f_c のバランスを考えることで拘束効率を向上させ経済的になる。拘束効率 R を用いることにより、CFT柱断面の経済性、すなわち、断面設計について、拘束効果における定量評価が可能となる(第3章, 3.3節)。

謝辞 本研究費の一部は、中部大学 総合工学研究所 研究費の助成(研究代表者:水野英二)によった。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会: 土木分野におけるコンクリート充填鋼管構造の現状と今後の課題(JSSC テクニカルレポート No.44), 日本鋼構造協会, 1998.
- 2) 中村光, 野口博, 田辺忠顕: 委員会報告「コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会報告」, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.33-40, 2003.
- 3) 例えば, 北田俊行, 吉田康樹, 中井博: コンクリートを充填した鋼管短柱の弾塑性挙動に関する基礎的研究, 土木学会 構造工学論文集, Vol.34A, pp.255-263, 1988.
- 4) 合成柱研究会: 合成橋脚とその計算例・解説—コンクリート充填方式合成柱の応用, 現代理工学出版, 1993.
- 5) 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コンファインド効果のメカニズムとそのモデル化, 日本建築学会構造系論文報告集, 第452号, pp.149-158, 1993.
- 6) Stephen P. Schneider: Axially loaded concrete-filled steel tubes, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.1125-1138, 1998.
- 7) Hu Hsuan-Teh, Chen Zhi-Liang, Huang Chiung-Shiann: Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination, Journal of Construction Steel Research, Elsevier, vol.61, No.12, pp.1692-1712, 2005.
- 8) 松村寿男, 水野英二: 軸圧縮下で曲げ変形を受けるコンクリート充填鋼管柱の内部性状に関する三次元FEM解析, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1057-1068, 2007.
- 9) 水野英二, 畑中重光: 塑性理論によるコンクリートの経路依存型圧縮軟化特性のモデル化, コンクリート工学論文集, Vol.3(2), pp.1-13, 1992.
- 10) 畑中重光, 服部宏己, 吉田徳雄, 谷川恭雄: コンファインドコンクリート高強度コンクリートの圧縮靱性とその評価, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, pp.1-20, 1990.
- 11) 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), 日米天然会議, 耐風耐震構造専門部会第16回合同部会ワシントン(米国) 5.14~5.17, pp.1-17, 1984.
- 12) Diana7 User's Manual: Nonlinear Analysis, 7.1, pp.226-244, 1998.
- 13) 水野英二, 畑中重光: コンクリートのひずみ軟化型構成モデルの開発とコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.185-197, 1997.
- 14) 例えば, Rots, J.G. Computational Modeling of Concrete Fracture, PhD Thesis, Delft University of Technology, pp.4-19, 1988.
- 15) 吉田幸夫, 水野英二, 畑中重光: プリーティング層を導入した寸法の異なる円形ブレースコンクリートの三次元FEM解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.55-60, 2003.
- 16) 藤井堅, 藤井崇文, 臺博幸: 繰り返し水平力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の有限要素解析, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1041-1050, 2003.
- 17) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説書(V 耐震設計編), 丸善, 2003.
- 18) 保坂鐵矢, 西海健二, 中村俊一: 圧縮強度およびヤング係数の異なるコンクリート系材料を充填した鋼管の曲げ性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1565-1573, 1998.
- 19) 鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化(社)土木学会鋼構造委員会, 鋼構造物の耐震検討小委員会, pp.93-200, 1999.
- 20) 猪股勇希, 中島章典, 斉木功, 大江浩一: 支圧力を受ける鋼・コンクリート接触面の静的・疲労付着性状, 第6回複合構造の活用に関するシンポジウム, pp.21.1-21.8, 2005.
- 21) 保坂鐵矢: コンクリート充填鋼管とコンクリート床版との複合桁の実用化に関する基礎的研究, 武蔵工業大学学位論文, pp.48-65, 2001.
- 22) 土木学会: 複合構造物の性能照査例—複合構造物の性能照査指針(案)に基づく—, 丸善, 2006.

(2008年4月14日 受付)