

コンクリート充填式二重鋼管柱の軸圧縮耐力について

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE COLUMN ENCASED BY DOUBLE STEEL TUBES

今野克幸^{*}、上田多門^{**}、角田與史雄^{***}、大平雅司^{****}
Katsuyuki KONNO, Tamon UEDA, Yoshio KAKUTA, Masaji OHIRA

工修 北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
工博 北海道大学 助教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
工博 北海道大学 教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
ドーピー建設工業株式会社 (〒060 札幌市中央区北1条西6丁目2番地)

Experimental and analytical studies were carried out to investigate the compressive strength of concrete columns encased by double steel tubes and the confinement effect of steel tubes and outer concrete to inner concrete. The parameter in the study is thickness of inner and outer steel tubes. In the analysis the nonlinear finite element program WCOMR¹⁾ was used. Three dimensional elasto-plastic and fracture model³⁾⁴⁾⁵⁾ was introduced in WCOMR for axisymmetric problem²⁾. The experiment of concrete column encased by single tube was also conducted to evaluate the influence of grease coating on the inner surface of the inner steel tube, and to verify the applicability of the FEM program.

Key Word : steel-concrete composite column, double steel tubes, nonlinear finite element analysis, confinement effect, compressive strength

1. はじめに

本研究で提案するコンクリート充填式二重鋼管柱は、内側コンクリートが同心円状に配置された二重の鋼管とその隙間に充填された外側コンクリートに拘束されており、さらに内側コンクリートにはプレストレスが導入された合成構造である。コンクリート充填式二重鋼管柱は圧縮力と引張力の両方に抵抗できる部材として考案されたものであり、その用途の一例としてブレース材としての利用を考えている。圧縮力は内側コンクリートにのみ与えられる。内側コンクリートは鋼管の拘束によって大きな強度増加を見込むことができ、さらには、外側コンクリートがあるために内側鋼管は座屈に対して有利である。

また、コンクリート充填式二重鋼管柱は引張力下において、抵抗する断面が三段階に変化する機械的な仕組みを端部にもつことによって図-1に示すようなトリリニアな剛性を示し、しかも、除荷経路が載荷経路にほぼ一致する弾性的な挙動を示す⁶⁾。引張力に対して抵抗する断面は、プレストレスが解放されるまでの剛性の第一段階目ではPC鋼棒と内側コンクリート、第二段階目ではPC鋼棒のみで、第三段階目ではPC鋼棒と外側鋼管となる。一方、圧縮力下においては、終局時にコンクリートの圧縮ひずみが約50%に達する大きなエネルギー吸収能力を示す⁷⁾。このような特性を持ったブレース材を図-2に示すような1層1スパンの鉄骨骨組にK型に配置した場合を考えると、正

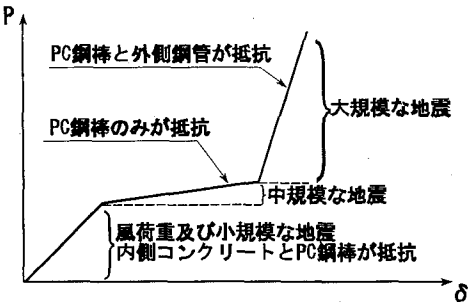


図-1 コンクリート充填式二重鋼管柱の引張特性⁶⁾

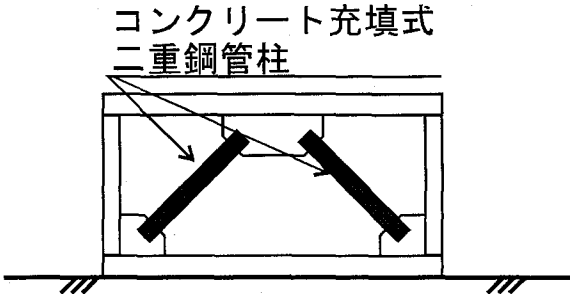
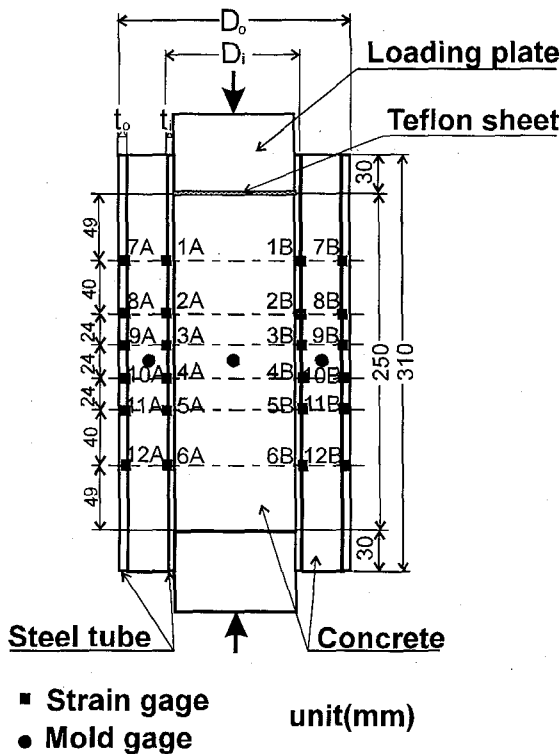


図-2 K型ブレース架構

表一 供試体の断面諸元

供試体	$D_i^{1)}$ cm	$t_i^{2)}$ cm	$D_o^{1)}$ cm	$t_o^{2)}$ cm	$A_{ci}^{3)}$ cm ²	$A_{co}^{3)}$ cm ²
WSC01	7.63	0.26	13.98	0.33	39.7	93.6
WSC03	7.63	0.26	13.98	0.62	39.7	91.8
WSC05	7.63	0.40	13.98	0.33	36.6	93.6
SSCN SSCB	7.63	0.26	—	—	39.7	—

- 1) D_i , D_o : それぞれ内側鋼管と外側鋼管の外径
 2) t_i , t_o : それぞれ内側鋼管と外側鋼管の肉厚
 3) A_{ci} , A_{co} : それぞれ内側モルタルと外側モルタルの断面積



図一3 供試体シリーズWSC

負交番荷重に対してブレース材は引張力と圧縮力の両方に抵抗する。このように、コンクリート充填式二重鋼管柱を主要な耐震要素であるブレース材として有効に用いるためには、その軸圧縮力及び軸引張力に抵抗する機構及び耐力が明らかにされなければならない。本研究では、鋼管の肉厚をパラメータとしたコンクリート充填式二重鋼管柱の実験結果および非線形有限要素解析結果に基づいたコンクリート充填式二重鋼管柱の軸圧縮耐力に対する抵抗機構及び耐力の評価方法に関して考察を行った。

2. 実験概要

本研究では、静的圧縮荷重試験に用いられた4種類のコンクリート充填式二重鋼管柱の供試体(シリーズWSC)⁷⁾のうち、鋼管の肉厚をパラメータとした供試体WSC01、WSC03、WSC05について考察した。いずれの供試体にお

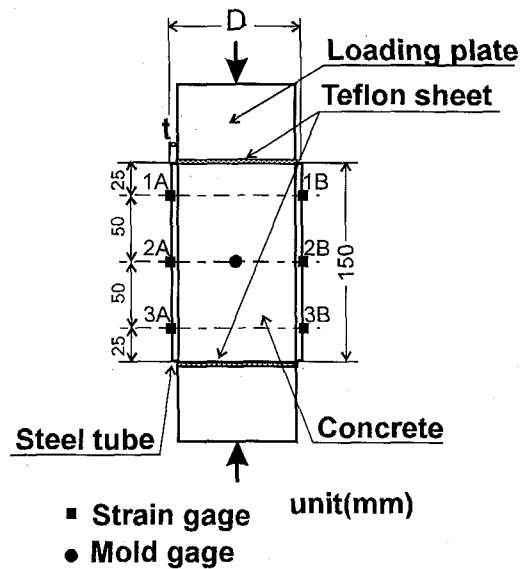
表二 供試体の材料特性値

供試体	内側鋼管				外側鋼管				モルタル	
	f_y MPa	E_s GPa	ν	E_t GPa	f_y MPa	E_s GPa	ν	E_t GPa	f'_c MPa	E_c GPa
WSC01	338	153	0.27	2.20	363	179	0.28	2.58	19.9	17.1
WSC03	297	159	0.26	4.15	429	183	0.28	1.79	18.8	17.1
WSC05	370	154	0.29	2.08	363	179	0.28	2.58	21.0	20.5
SSCN SSCB	338	153	0.27	2.20	—	—	—	—	16.9	14.3

f_y : 鋼材の降伏応力, E_s : 鋼材のヤング係数,
 ν : 鋼材のポアソン比, f'_c : モルタルの一軸圧縮強度,
 E_c : モルタルのヤング係数,

E_t : 鋼材降伏後の応力-ひずみ曲線の傾き(図一7参照)

*供試体WSC01とWSC05は文献7)で示された実験後、再度実験を行ったもので、モルタルの材料特性値のみ文献7)と異なっている



図一4 供試体シリーズSSC

いてもセメントは普通ポルトランドセメントを用い、供試体断面が小さいことからコンクリートの代わりにモルタルを使用した。シリーズWSCの断面寸法及び形状は表一と図一3に、材料特性値は表二に示されるとおりで、シリーズWSCの内側鋼管内面には、鋼管とモルタルとの間の付着力を減ずるために分離材として二硫化モリブデン入りグリースが塗布された。WSCの上側支圧板とモルタルの間には厚さ1mmのテフロン板を2枚重ねて設置し支圧板が内側モルタルの横方向の変形を摩擦力によって拘束する効果を低減させており、下側支圧板とモルタルは直接接している。測定項目と測定方法は、WSCは内側鋼管と外側鋼管の対称となる位置に軸方向に6点ずつ設置した二軸のひずみゲージと、内側と外側のモルタルの中心部分に設置した単軸の埋込型ゲージによって、それぞれ鋼管表面のひずみとモル

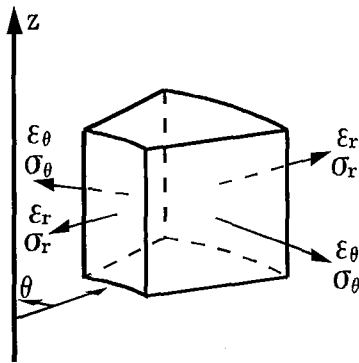


図-5 外側コンクリートの応力とひずみ

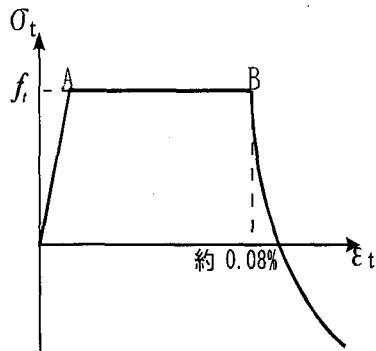


図-6 外側コンクリートの周方向の
応力-ひずみ関係

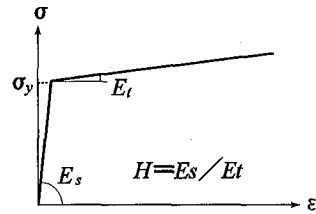


図-7 FEM解析に用いた鋼材の
応力-ひずみ関係

タル内部の軸方向のひずみを測定した。さらに、変位計を用いて供試体全体の軸方向の変位を測定した。軸圧縮力は、支圧板を介して偏心がないように内側のモルタルにのみ単調に載荷された。

また、コンクリート充填式単鋼管柱の静的圧縮載荷試験には2種類(シリーズSSC)の供試体が用いられ、供試体シリーズSSCの断面寸法及び形状を表-1と図-4に示す。材料特性値は、表-2に示すとおりである。シリーズSSCのうち供試体SSCNには鋼管内面に二硫化モリブデン入りグリースが塗布されており、供試体SSCBには塗布されていない。鋼管内面の処理の仕方の違いが、供試体シリーズSSCの実験パラメータとなっている。シリーズSSCにおいても、支圧板の摩擦による拘束効果を低減するために上下の支圧板ともにモルタルとの間には厚さ0.1mmのテフロンシートを2枚設置し、2枚のテフロンシートの間にはグリースを塗布した。鋼管の両側3カ所づつ二軸ゲージを設置し、モルタルの中心部分に単軸の埋込型ゲージを設置することによりそれぞれ鋼管とモルタルのひずみを測定した。また、シリーズWSCと同様に変位計を用いて供試体の軸方向の変位を測定した。軸圧縮力は、支圧板を介して偏心がないようにモルタルにのみ単調に載荷された。

3. 解析の概要

3.1 解析プログラム

本研究では、鉄筋コンクリート用二次元非線形有限要素解析プログラムWCOMR¹⁾を、軸対称問題用に修正したプログラム²⁾に三次元弾塑性破壊モデル³⁾⁴⁾を導入し、これを用いた。

3.2 コンクリートの構成則

コンクリートの構成則には、三次元弾塑性破壊モデルが用いられており、内側コンクリートに適用された。周方向に引張力が生じていると考えられる外側コンクリートに対して弾塑性破壊モデルを適用する際には修正が加えられた。コンクリート充填式二重鋼管柱の軸圧縮実験では外側コンクリートには周方向に鋼管同様数万 μ の大きな引張ひずみ ε_θ と半径方向にコンクリートの一軸圧縮強度の数倍の大

きな圧縮応力 σ_r (は圧縮を表す)が生じている⁷⁾(図-5参照)が、実験後の供試体からは半径方向に放射状に伸展するひび割れは観察されなかった。よって、図-6に示されるように、外側コンクリートの周方向応力 σ_θ がコンクリートの引張強度に達してもひび割れは発生しないこととした。その結果、解析上外側コンクリートの周方向には引張ひずみが約0.08%となるまで塑性棚に相当する領域(図-6の線分AB)が現れ、その後引張応力は低下し圧縮応力が生じた。これは、塑性と破壊の進展によってコンクリートのポアソン比が増加し、その値が鋼材のポアソン比よりも大きくなったためであると考えられる。弾性域において通常のコンクリートのポアソン比は鋼材のポアソン比の約2/3程度であり、コンクリート充填式二重鋼管柱において軸圧縮力レベルが低い段階では、内側コンクリートの内圧による鋼管の周方向ひずみの増加は外側コンクリートの周方向ひずみの増加よりも大きく外側コンクリートの周方向には引張力が生じる。しかし、圧縮力のレベルが高くなりコンクリートの見かけ上のポアソン比が鋼材のポアソン比よりも大きくなると外側コンクリートの周方向への膨張を二重鋼管が拘束し、その結果外側コンクリートではひび割れが生じず、応力は圧縮となると考えられる(図-6参照)。

3.3 鋼材の構成則

三次元弾塑性破壊モデルは古典的塑性論に基づいているため、鋼材要素もコンクリート要素同様に増分形で応力が求められており、降伏条件は、Von-Misesの降伏条件が用いられている。鋼材の材料特性は、ポアソン比及び、試験片の引張試験の結果より得られた応力-ひずみ関係を図-7に示すようにバイリニアに仮定したものが用いられている。降伏後の鋼材の応力計算においては、バイリニアに仮定した応力-ひずみ関係から得られる硬化指数 $H = E_s / E_t$ を用いることによって、三次元応力空間における降伏局面の拡大を表している。なお、 E_t の値は鋼材試験片の引張試験結果から得た応力-ひずみ曲線において降伏点とひずみが10000~20000 μ の間の点を結んだ傾きとして求められた(表-2参照)。

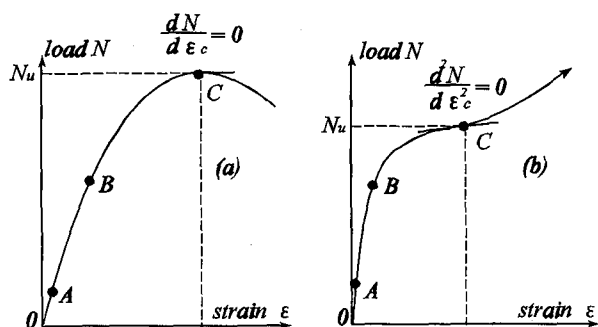


図-8 コンクリート充填式鋼管柱の荷重-ひずみ関係⁸⁾

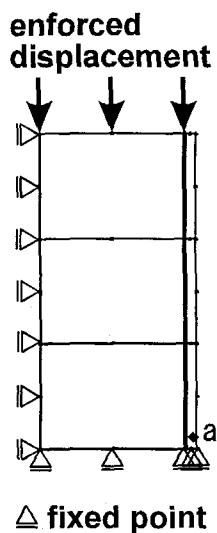


図-10 シリーズSSCの要素分割

4. 耐力について

コンクリート充填式単鋼管柱シリーズSSCの実験結果の荷重-変位曲線は、図-8(a)のように荷重がピークに達した後には軟化するのではなく、図-8(b)に示すように剛性が一度低下した後、再び上昇する変曲点が存在した。このような現象は鋼管で拘束されたコンクリートの単柱において、特に鋼管の肉厚が厚い場合に観察され、図-8(b)のように変曲点が現れた時点を経済上終局状態と考えている研究者もいる⁹⁾。

コンクリート充填式二重鋼管柱(シリーズWSC)では外側鋼管降伏後、図-9の点Bのように剛性が急激に低下した。また、シリーズSSCと同様に荷重-変位曲線において図-9に示す点Cのように変曲点が現れることが観察された。本研究では軸圧縮剛性が再上昇することを数値解析的に予測することが不可能であり、また、その理由が明らかではないので、外側鋼管降伏荷重を終局耐力として考察を行う。

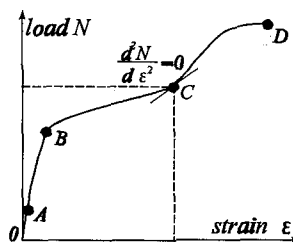


図-9 コンクリート充填式二重鋼管柱の典型的な荷重-ひずみ関係

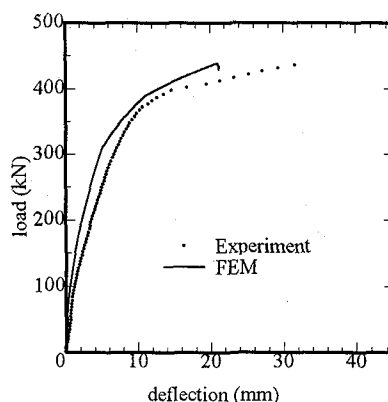


図-11 供試体SSCN荷重-変位曲線

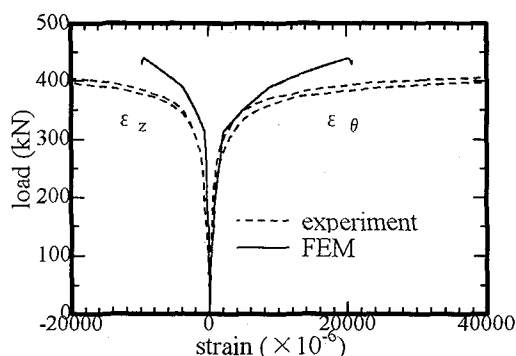


図-12 供試体SSCN荷重-鋼管ひずみ

5. 単鋼管解析結果

コンクリート充填単鋼管柱の有限要素解析には供試体の1/4を図-10に示すように要素を分割して用い、荷重は図中に示すように強制変位として与えた。コンクリートと鋼管の間の垂直方向応力とせん断応力の伝達を考慮するために図中に太線で示されている接合要素を用いた。接合要素について、鋼管に二硫化モリブデン入りグリースを塗布している供試体SSCNには鋼管とコンクリート間の摩擦係数を $\mu=0.1$ とし、二硫化モリブデン入りグリースを塗布していない供試体SSCBでは $\mu=0.4$ とした⁹⁾。供試体SSCNの荷重-変位曲線と鋼管表面のひずみの関係は、それぞれ図-11と図-12に示されており、解析結果は実験値と良い対応を示している。なお、鋼管のひずみは実験値が図-4の測定点

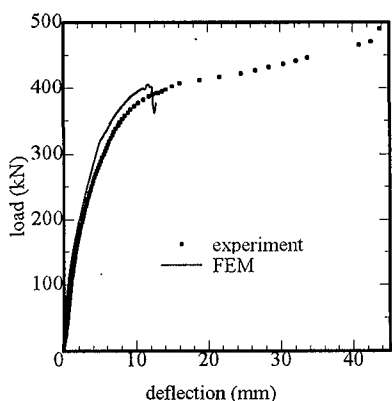


図-13 供試体SSCB荷重-変位曲線

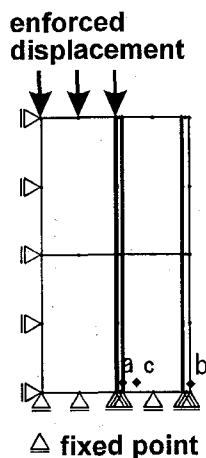


図-15 シリーズWSC要素分割

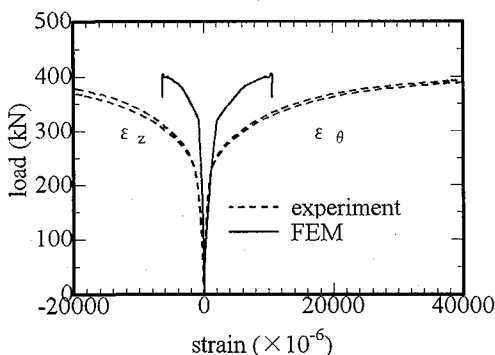


図-14 供試体SSCB荷重-鋼管ひずみ

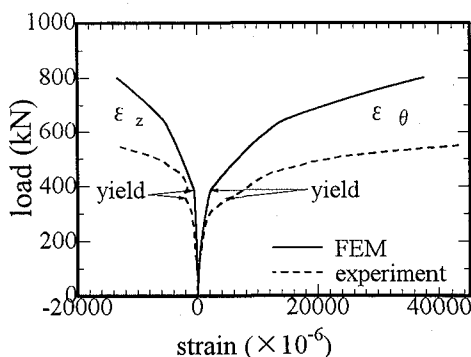


図-16(a) 供試体WSC01の内側鋼管ひずみ

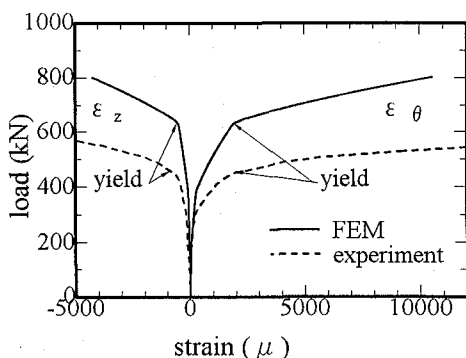


図-16(b) 供試体WSC01の外側鋼管ひずみ

2Aと2Bで解析値が図-10の点aの値を示している。供試体SSCBの荷重-変位曲線と鋼管表面のひずみの関係は、それぞれ図-13と図-14に示されており、鋼管降伏時まで、鋼管内面にグリースを塗布していない供試体SSCBの軸圧縮剛性はSSCNの剛性より大きいという実験結果が解析においても表されている。コンクリート充填式二重鋼管柱の解析においても、鋼管に二硫化モリブデン入りグリースを塗布している部分では鋼管とコンクリート間の摩擦係数を $\mu=0.1$ とし、二硫化モリブデン入りグリースを塗布していない部分では $\mu=0.4$ とする。

6. コンクリート充填式二重鋼管柱の解析結果

6.1 鋼管表面のひずみについて

コンクリート充填式二重鋼管柱の有限要素解析においても供試体の1/4を図-15に示すように要素を分割して用い、荷重は、強制変位として与えた。図中の太線は接合要素を表している。

図-16に供試体WSC01の荷重と鋼管ひずみの関係が示されている。実験値、解析値ともに鋼管の降伏はVon-Misesの降伏条件にしたがっている。内側鋼管降伏荷重は、実験値が360kN、解析値が389kNで、外側鋼管降伏荷重は実験値が461kN、解析値が633kNである。内側鋼管降伏時には実験値と解析値の差は29kNと小さいのに対し

て、外側鋼管降伏時には172kNと差が大きくなっている。この理由の一つとして、3.3節で述べたように鋼材の応力-ひずみ曲線をバイリニアに仮定する際に、降伏後の傾き E_t は降伏点からひずみが約10000~20000 μ の点を結んだ直線の傾きとして求められたが、実際には10000~20000 μ 以降の応力-ひずみ曲線の傾きはさらに小さくなるので、解析において外側鋼管降伏時には内側鋼管の周方向応力が大きめに見積もられているためだと考えられる。

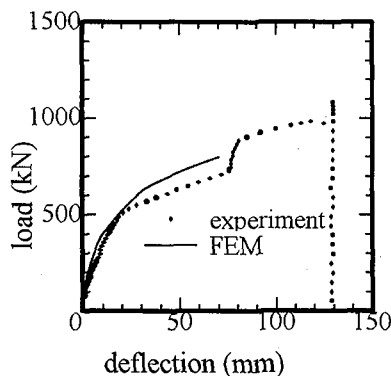


図-17 供試体WSC01荷重-変位曲線

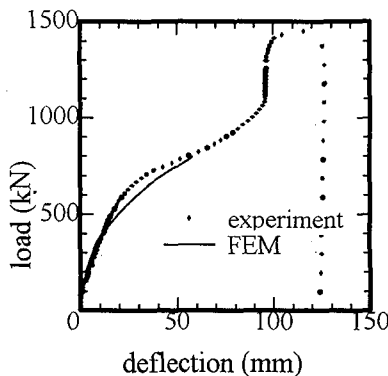


図-18 供試体WSC03荷重-変位曲線

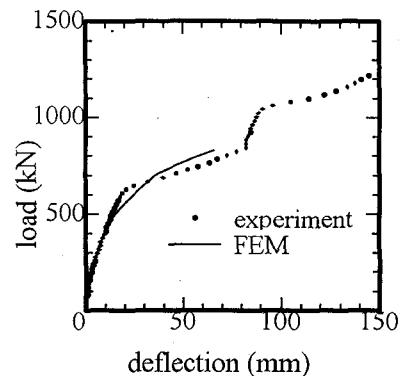


図-19 供試体WSC05荷重-変位曲線

6. 2 荷重-変位曲線について

図-17と図-19はそれぞれ、供試体WSC01とWSC05の荷重-変位曲線を示している。供試体WSC01とWSC05の内側鋼管の破断強度はそれぞれ457MPa、449MPaであり、供試体WSC01とWSC05の解析結果の最大荷重は内側鋼管の周方向応力が鋼管の破断強度に達した点として図に示した。鋼材の応力-ひずみ曲線はバイリニアに仮定されているが、3.3節と6.1節で述べたとおり、鋼材のひずみが約20000 μ 以上であるときには、その応力が大きく計算されたために内側鋼管の周方向応力が実際よりも小さな荷重で破断強度に達したと考えられる。また、供試体WSC03では解析上、外側鋼管降伏前に外側コンクリートの柱軸に垂直な平面内にひび割れが生じた。軸圧縮荷試験においては、そのようなひび割れは確認されていないので、図-18の荷重-変位曲線の最大荷重をひび割れ発生時とした。供試体WSC01、WSC05ともに実験結果は、外側鋼管の降伏後に軸圧縮剛性が低下し、解析結果も同様の傾向を示している。また、WSC03は他の供試体に比べて剛性低下が緩やかで解析結果も同様である。

6. 3 二重鋼管および外側コンクリートの拘束効果

内側コンクリートが内側鋼管と外側鋼管にのみ拘束されていると仮定した場合の外側鋼管降伏時の荷重を式(1)で示されるCEBの拘束コンクリートの強度増加推定式¹⁰⁾を用いて求める。まず、図-20に示す鋼管の周方向引張応力にはそれぞれの供試体の内側鋼管降伏応力と外側鋼管降伏応力を用いて、これを式(1)に代入し内側コンクリートへの拘束応力を求める。式(1)は、二重鋼管の周方向引張力と内側モルタルの内圧との釣合式である。式(1)によって得られた拘束応力は、式(2)に代入されコンクリートの強度が求められ、さらに内側コンクリートの断面積を掛けることによって外側鋼管降伏時の荷重が求められる。それぞれの値を表-3に示す。なお、WSC03は解析における最終値を外側鋼管の引張応力として用いたので表中では括弧を付けており、解析結果とCEB式による結果を直接比較すること

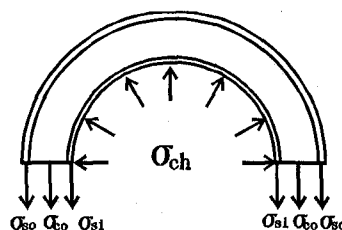


図-20 鋼管と外側コンクリートの周方向引張力と内側コンクリートの内圧との釣合

はできないが、参考として示す。いずれの供試体もCEB式を用いて求めた値は解析値よりもやや大きい。WSC01の外側鋼管降伏荷重を1として表し、コンクリートの強度増加の比率に着目すると解析結果はCEB式に非常に近い値を示している。式(2)は、コンクリートの一軸圧縮強度を一定とすればコンクリートの強度増加は、拘束応力と線形な関係にあることを示している。一方、FEM解析の結果からも、コンクリート充填式二重鋼管柱のコンクリートの強度増加は二重の鋼管による拘束力とほぼ線形な関係にあるといえ、コンクリート充填式二重鋼管柱の外側鋼管降伏荷重はCEB式によるコンクリートの強度増加の推定方法と同様に評価することができるといえる。なお、式(1)の σ_{ch} と式(2)の σ_2 は等しい。

$$\sigma_{ch} = \frac{2(\sigma_{sti} + \sigma_{sto})}{D_i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} f_{ck,cf} &= f_{ck}(1.000 + 5.0\sigma_2/f_{ck}) \quad \text{for } \sigma_2 < 0.05f_{ck} \\ f_{ck,cf} &= f_{ck}(1.125 + 2.50\sigma_2/f_{ck}) \quad \text{for } \sigma_2 > 0.05f_{ck} \end{aligned} \quad (2)$$

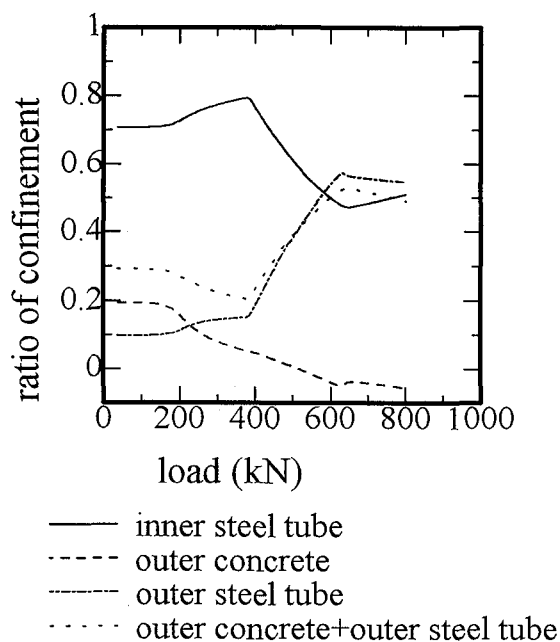
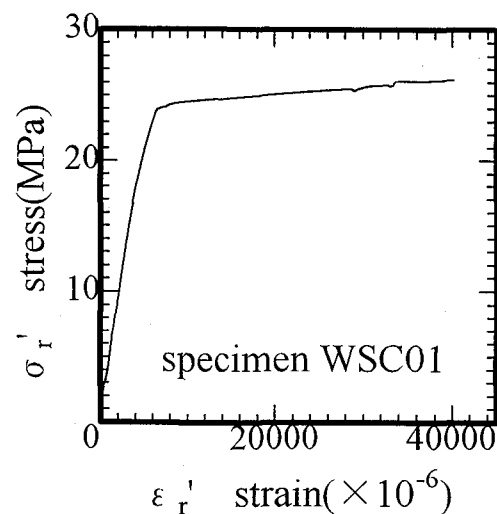


図-21 供試体WSC01拘束力の分担率



'は圧縮を表す

図-22 外側コンクリート半径方向の応力状態

表-3 外側鋼管降伏時の荷重

供試体	CEB式		解析結果	
	荷重(kN)	WSC01の値に対する比	荷重(kN)	WSC01の値に対する比
WSC01	657	1	630	1
WSC03	1093	1.66	(800)	(1.27)
WSC05	779	1.18	700	1.11

また、図-21には供試体WSC01の解析結果における両鋼管と外側コンクリートの内側コンクリートへの拘束力を分担率として表している。鋼管とコンクリートの周方向引張力は、内側コンクリートの内圧と釣り合っているため、内側コンクリートに対する拘束力と考えることができる。図-21において外側コンクリートの拘束力の分担率が負の値となっている部分は、外側コンクリートの周方向応力が圧縮応力であることを意味している。外側コンクリートも載荷初期では、約20%の拘束力を分担しており、その後、外側コンクリートが受け持つ拘束力は次第に低下するがその代わりに外側鋼管の拘束力が増加している。図-22には供試体WSC01の図-15の点cにおける半径方向応力 σ_r を示しているが、解析においても一軸圧縮強度以上の大きな圧縮応力を出している。コンクリート充填式二重鋼管柱における外側コンクリートは1章で述べたように軸圧縮力を受ける場合に内側鋼管の座屈を抑え良好な圧縮抵抗特性を得るために存在しており、拘束効果を積極的に求めるもので

はない。外側コンクリートが外側鋼管に力を伝えられず外側鋼管の拘束力が発揮されないまま終局状態に至ることがなければよいと言い換えることもできる。結果として、内側鋼管の座屈も抑え、外側鋼管に十分に力を伝えるということが確認された。

7. おわりに

本研究は、鋼管の肉厚をパラメータとし、コンクリートの強度はほぼ一定という条件で行われた。その結果得られた成果を以下に示す。

- 1) 実験的事実に基づき、外側コンクリートのモデル化において周方向に引張応力がコンクリートの引張強度に達してもひび割れは発生しないと仮定した。その結果、周方向に数万マイクロという大きな引張ひずみが生じて周方向に圧縮応力が生じ、半径方向に一軸圧縮強度以上の応力を伝えることがFEMの結果からも明らかになった。
- 2) 外側コンクリート自体の拘束効果は荷重レベルが小さい

間は多少はあるが終局時にはあまり重要なものとはなっていないことが示された。

- 3) コンクリート充填式単鋼管柱の場合は鋼管降伏時まで、コンクリート充填式二重鋼管柱の場合は内側鋼管降伏時まで、FEM解析結果は実験結果を良好に推定できた。その後は、降伏後の剛性を実際より大きく仮定したことなどが理由となり、解析結果のひずみ増加の方が小さくなった。解析によって鋼管降伏後においても実験をより精度良く再現しようとするためには検討の余地が残った。
- 4) 内側鋼管及び外側鋼管の肉厚が変化しても両鋼管の拘束力をたし合わせた値がコンクリートの強度増加と線形な関係にあり、CEB式を用いて内側コンクリートの強度増加をおおよそ推測できると考えられる。

本研究では、コンクリート充填式二重鋼管柱をブレース材として利用することを想定して比較的小さな断面の供試体を用いて検討が行われた。本研究では曲げを受ける場合についての検討を行っておらず、断面が大きくなる場合の寸法効果等の影響についても検討を行っていない。橋脚のように断面が大きく、曲げを受ける構造物への適用に関しては、今後の研究課題である。

参考文献

- 1) Pantaratorn, N., : Finite element analysis on shear resisting mechanism of RC beam. Doctor dissertation, Department of Civil Engineering The Graduate School of The University of Tokyo, March 1991.
- 2) 風野裕明：非線形有限要素解析を用いたRCスラブの押し抜きせん断強度に関する研究、(北海道大学修士論文)、1993年3月
- 3) Maekawa, K. , Takemura, J. , Irawan, P. , and Irie, M. , : Continuum fracture in concrete nonlinearity under triaxial confinement, Proc.of JSCE No.460/V-18, pp.113—122., February 1993.
- 4) Maekawa, K. , Takemura, J. , Irawan, P. , and Irie, M. , : Plasticity in concrete nonlinearity under triaxial confinement, Proc.of JSCE No.460/V-18, pp.123—130, February 1993.
- 5) Maekawa, K. , Takemura, J. , Irawan, P. , and Irie, M. , : Triaxial elasto-plastic and fracture model for concrete, Proc.of JSCE No.460/V-18, pp.131—138, February 1993.
- 6) 荒木敏光、今野克幸、上田多門、角田與史雄、大平雅司：引張力を受けるコンクリート充填式二重鋼管構造の変形特性について、土木学会北海道支部論文集、第51号(A), pp.516—519, 1995年2月
- 7) 今野克幸、上田多門、角田與史雄、大平雅司：コンクリート充填式二重鋼管柱の圧縮特性の実験的評価、コンクリート工学年次論文報告集、第16巻第2号、pp.1229—1234, 1994年6月
- 8) Cai, S. H. : Ultimate strength of concrete-filled tube columns, Composite Construction in Steel and Concrete, ASCE, pp.773—785, 1988
- 9) 正木孝治、今野克幸、浅沼芳雄、古内仁：拘束圧を考慮した鋼材とコンクリート間の付着すべり関係に関する研究、土木学会北海道支部論文集、第51号(A), pp.524—527, 1995年2月
- 10) CEB-FIP Model Code 1990, pp.101—106, May 1993
(1995年9月18日受付)