

論文 ひずみ軟化型コンクリート構成モデルを用いたコンクリート充填鋼管柱の三次元有限要素解析

前田 欣昌^{*1}・畠中 重光^{*2}・水野 英二^{*3}

要旨:本研究では、筆者らにより開発されたコンクリートのひずみ軟化型構成モデルを三次元有限要素解析プログラム(FEAP)に組み込み、コンクリートと鋼管の間の拘束効果をより現実的に再現するため、付着要素を設けてコンクリート充填鋼管柱の三次元有限要素解析を行い、その破壊メカニズムを定量的に解明する。

キーワード:ひずみ軟化型コンクリート構成モデル、拘束圧、付着要素、破壊メカニズム

1. はじめに

近年、高強度で大きな韌性が得られるコンクリート充填鋼管柱が注目されている。しかし、その破壊メカニズムの再現に際しては、コンクリートと鋼管の間に作用する拘束圧の影響を考慮して、不均質でありかつひずみ軟化を伴うコンクリートの耐力特性を適切に評価する必要がある。

本研究では、図-1に示すような引張軟化および圧縮軟化挙動を予測できる筆者らのコンクリート構成モデル[1]を三次元有限要素解析プログラム(FEAP)に組み込み、中心軸圧縮を受けるコンクリート充填鋼管柱の複雑な破壊メカニズムを、損傷度および等価拘束圧[2,3]という指標から定量的に考察することを目的とする。

2. 中心軸圧縮を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の三次元有限要素解析

2. 1 解析手法

(1) 解析モデル 解析対象とするコンクリート充填円形鋼管柱の形状・材料に関する各諸量[4]を表-1に示す。

表-1 コンクリート充填円形鋼管柱の形状・材料データ[4]

D(mm)	H(mm)	t(mm)	D/t	σ_{sy} (MPa)	E_s (GPa)	ν_s	f_c' (MPa)	E_c (GPa)	ν_c
150	450	2.0	75	235.2	206	0.3	16.8	23.1	0.2

D:内径 H:鋼管柱高さ t:板厚 D/t:幅厚比 σ_{sy} :鋼の降伏応力 E_s :鋼のヤング率
 ν_s :鋼のポアソン比 f_c' :コンクリートの一軸圧縮強度 E_c :コンクリートのヤング率
 ν_c :コンクリートのポアソン比

(2) メッシュ図 有限要素解析に用いた供試体の要素分割図を図-2に示す。解析モデルは、軸対称、上下対称を仮定し1/8モデルを用いた。また、付着要素厚は厚さが解析結果に影響を与えないように極力薄くし、鋼管の板厚の1/200と設定した(2.2節参照のこと)。

(3) 境界条件 載荷板による供試体の端部拘束を考慮しない場合はX=0、Y=0、Z=0平面でそれぞれX、Y、Z方向を固定し、端部拘束を考慮する場合はさらにZ=H/2平面でX、Y方向を固定した。

(4) 載荷方法 充填柱の上部に変位増分幅 $5 \times 10^{-5}H$ (0.01%軸ひずみに相当)を与えることにより変位制御で行った。

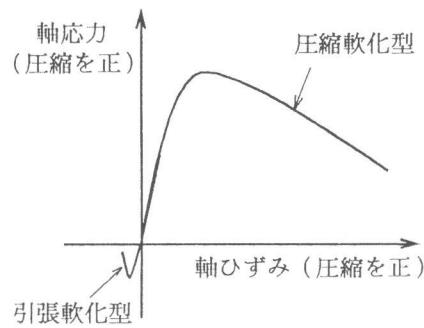


図-1 コンクリートの一軸引張・圧縮軟化

*1 名古屋大学大学院 工学部土木工学科 (正会員)

*2 三重大学助教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

*3 名古屋大学助教授 工学部土木工学科, Ph.D. (正会員)

(5) 構成モデル コンクリート部分に本ひずみ軟化型構成モデル（モデルの概要およびパラメータの詳細は文献[1]を参照のこと）を組み込んだ三次元Solid Elementを、鋼管部分にはvon Mises型の完全弾塑性モデルを組み込んだ三次元Solid Elementを、さらに付着要素としては鋼管とコンクリートの肌離れを再現できる剛性の低い線形弾性三次元Solid Elementを使用した。

2. 2 付着要素のセンシティビティー解析

本研究では、付着要素の材料定数（ヤング率 E_i とボアン比 ν_i 、 i :interface elementの i ）を鋼管の材料定数の 10^{-1} 倍 ($E_i=10^{-1}E_s$)、 10^{-3} 倍 ($E_i=10^{-3}E_s$)、 10^{-5} 倍 ($E_i=10^{-5}E_s$) および、 10^{-7} 倍 ($E_i=10^{-7}E_s$) の四つのパターンを想定した。これら四つの付着要素を用いた三次元有限要素解析結果を図-3に示す。図中の縦軸 P および横軸 ε はそれぞれ軸力および軸ひずみを表す。軸力 P は、有限要素解析より得られる変位制御点の節点力の合計量として、また、軸ひずみ ε は、変位制御点での変位量を充填柱の高さ($H/2$)で除した量として得られる。以後、図中の P は軸力を、 ε は軸ひずみを示すことに注意されたい。

図-3から、付着要素に剛性の低い材料定数を用いた方が全般的に耐力が小さくなることが分かるが、その主な原因は鋼管のコンクリートへの拘束効果の開始時点にある。剛性の低い付着要素の方が、鋼管とコンクリートを繋ぐ力が小さいため、載荷初期段階のコンクリートと鋼管のボアン比（ダイラタンシー）の違いによる肌離れが大きい。また、鋼管からほとんど引張られないでの、コンクリートの降伏時点は一軸圧縮時とほぼ同時である。それに対し、高い剛性の付着要素を用いた場合、コンクリートは鋼管から外側方向に強く引張られながら軸圧縮力を受けるため、およそ軸ひずみ0.07%時点にて降伏しひずみ軟化域に入る。一般に、コンクリートのダイラタンシーは破壊およびその後のひずみ軟化が始まったときに増大する。従って、高い剛性の付着要素を用いた方が、肌離れが小さいことに加え、コンクリートが早い時点でひずみ軟化状態に入り大きなダイラタンシーを生じる。そのため、鋼管とコンクリートとが早い時点で再度密着し拘束効果が得られ、最終的に耐力が大きくなるといえる。また、以上のような付着要素の感度解析から、あまりにも剛性の小さな付着要素($E_i=10^{-7}E_s$)を用いて解析を行っても、実際の実験載荷状態を再現できないことが分かった。

コンクリートと鋼管とが肌離れをする際に、全く力のやりとりもなく離れるのではなく、多少の引張力やせん断力が作用すると考え、以後の解析では、付着要素の材料定数 E_i として $10^{-5}E_s$ を用いることにする。

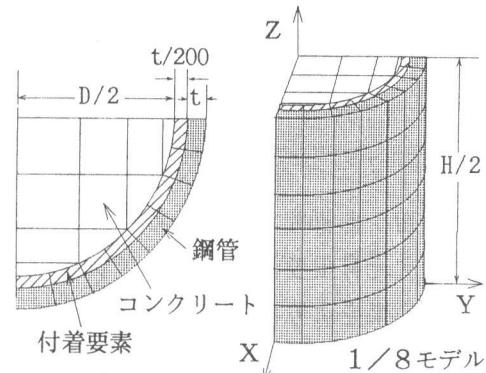


図-2 充填円形鋼管柱の要素分割図

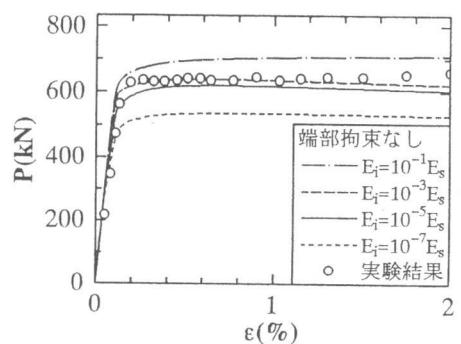


図-3 付着要素の感度解析

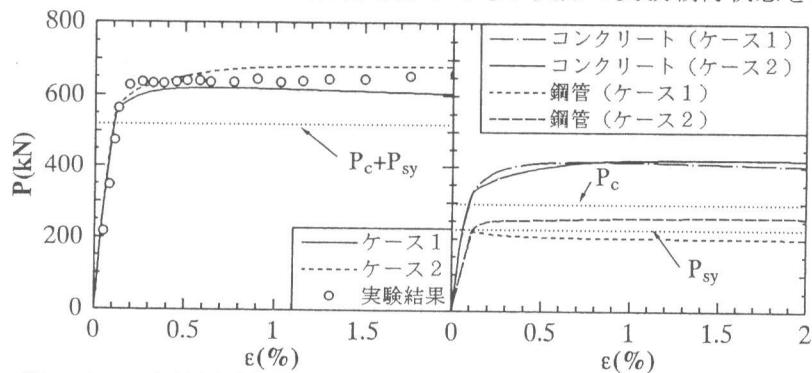


図-4(a) 充填円形鋼管柱の解析結果

図-4(b) 耐力の内分け

2. 3 解析結果

ここでは、供試体の端部拘束を考慮しない場合（ケース1）と考慮する場合（ケース2）との2ケースについて解析を行う。図-4(a)には、有限要素解析結果と実験結果との比較を、図-4(b)には、コンクリートと鋼管の耐力の内分けを示す。また、コンクリート、鋼管および充填柱の一軸圧縮耐力（それぞれ P_c 、 P_{sy} 、 $P_c + P_{sy}$ ）も図中に示した。

図-4(a)によれば、ケース2の解析の方が、ケース1の解析よりも耐力が大きくなっている。端部拘束効果によりコンクリート部分の耐力が増したというよりも、むしろ鋼管が拘束され鋼管部分の耐力が増加したことが図-4(b)より分かる。また、解析結果の最大耐力と充填柱の累積圧縮耐力($P_c + P_{sy}$)とを比較するとケース1では1.19倍、ケース2では1.31倍であった。

2. 4 破壊メカニズムの解明

供試体内部の破壊メカニズムを詳しく考察するために、(a) 損傷度 F_p 、(b) 等価拘束圧 σ_c [1]を紹介する。この場合、ガウス点（1要素あたり8個）でのそれらの情報を使用した。

(1) 損傷度 F_p 図-5に示すようにコンクリート供試体をZ軸方向に切断した断面（斜線で示した部分）における、ケース1およびケース2の損傷度 F_p の変化の様子をそれぞれ図-6(a)および(b)に示す。図中、ガウス点回りの領域をブロックで示し、各ブロックは破壊時 η_1 （破壊曲面では $F_p = \eta_1$ 、詳細は[1]を参照）に対する損傷度 F_p の値(F_p / η_1)で判別した。また、断面変形図はY軸方向の変位を50倍、Z軸方向の変位を5倍に拡大して表してある。ブロックの中心に点(・)が示してあるのはそのブロックがすでに破壊しひずみ軟化状態に入っていることを示す。

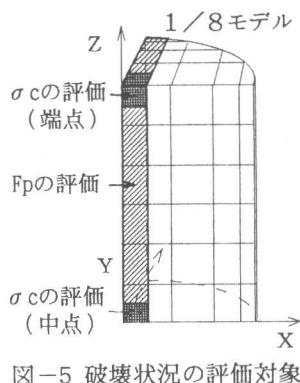


図-5 破壊状況の評価対象

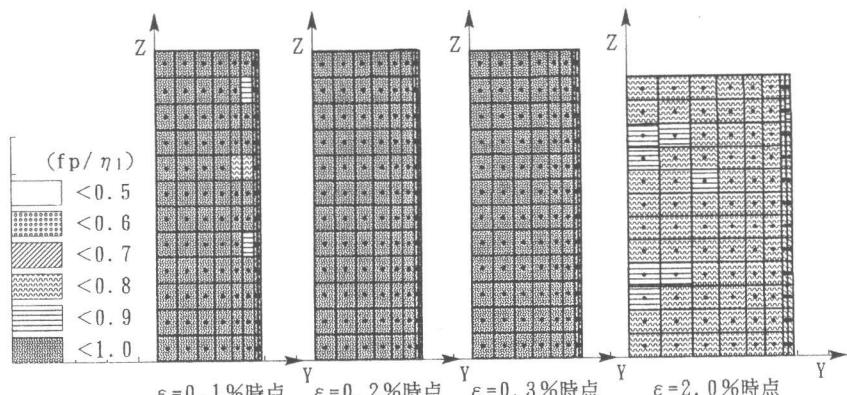


図-6(a) ケース1の損傷度 F_p (Y軸方向の変位は50倍、Z軸方向の変位は5倍)

図-6(a)および(b)より、ケース1では、軸ひずみが0.1%時点ではほぼすべてのブロックが破壊しており、その後軸ひずみの増加に伴いほぼ均等に損傷していることが分かる。一方、ケース2では、上端部は固定されているため鋼管からの拘束効果が大きく損傷が進行せず、軸ひずみ2.0%まで破壊しない。また、中央部($Z=0$)

から、端部に近づくにつれ損傷が遅れていることが分かる。さらに、図-4(b)で、ケース2のコンクリートの耐力がケース1と比較して見かけ上の軟化が遅れるのは、内部に破壊せずひずみ硬化域にあるブロックが存在するためであることが分かった。

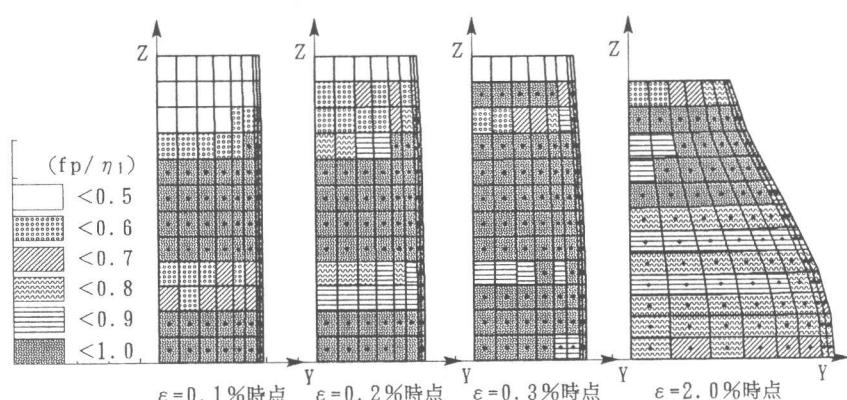


図-6(b) ケース2の損傷度 F_p (Y軸方向の変位は50倍、Z軸方向の変位は5倍)

(2) 等価拘束圧 σ_c 。一例として図-5に網メッシュで示すように、Z軸に沿った柱の端点と中点の2点を選び、ケース1およびケース2の等価拘束圧の変動を図-7に示した。

ケース1の場合、供試体の端部拘束をしていないため、断面内の等価拘束圧の分布はほぼ一様であった。よって、端点と中点は類似しており、一旦は等価拘束圧は負（鋼管に引張られるため）になり、ひずみが0.1%の少し手前から急増している。図-6(a)の $\varepsilon = 0.1\%$ 時点で、ほとんどのブロックがひずみ軟化域に入っているにも拘わらず、図-4(b)で、 $\varepsilon = 0.1\%$ 以降もケース1のコンクリートの耐力が上昇しているのは、鋼管からの拘束効果がこのころから急増することにより、コンクリートが延性的になり、拘束圧により硬くなった分だけ耐力が上昇したからであるといえる。一方、ケース2の場合、端点と中点は全く別の変動をしている。端点は、載荷開始から大きな等価拘束圧が作用しているため、図-6(a)における端部のブロックが軸ひずみ2.0%まで破壊しないままであることが理解できる。また、中央部（図-5におけるZ=0平面）では断面内の等価拘束圧の分布はほぼ均一であったが、端部ほど等価拘束圧の局所化が見られ、端部断面では図-8のような等価拘束圧の分布となった。図-7より、載荷が進むにつれ円周付近と中心付近の格差が大きくなっていくことが分かる。

4. コンクリート充填角形鋼管柱の三次元有限要素解析

4. 1 解析手法

(1) 解析モデル 表-2に、解析対象となったコンクリート充填角形鋼管柱の形状・材料データ[5]を示す。

表-2 コンクリート充填角形鋼管柱の形状・材料データ[5]

b(mm)	B(mm)	L(mm)	t(mm)	b/t	σ_{s_y} (MPa)	E _s (GPa)	ν_s	f_c' (MPa)	E _c (GPa)	ν_c
196	213	592	4.51	43.5	266	197	0.269	39.2	27.9	0.165

b:ウェブ幅 B:フランジ幅 L:鋼管柱高さ t:板厚 b/t:幅厚比 σ_{s_y} :鋼の降伏応力

E_s :鋼のヤング率 ν_s :鋼のポアソン比 f_c' :コンクリートの一軸圧縮強度

E_c :コンクリートのヤング率 ν_c :コンクリートのポアソン比

(2) メッシュ図 円形充填鋼管柱と同様に、1/8モデルで有限要素解析を行う。また、付着要素厚は鋼管の1/200に設定した（図-9）。

(3) 境界条件、載荷方法および構成モデル 境界条件、載荷方法および構成モデルは円形充填鋼管柱の場合と同じである。また、鋼管のZ軸方向の残留応力を図-10のように仮定した。

4. 2 解析結果

次のような3ケースのコンクリート充填角形鋼管柱の三次元有限要素解析を行う。（1）残留応力なし、端部拘束なし。（2）残留応力あり、端部拘束なし。（3）残留応力あり、端部拘束あり。図-11(a)に上記3ケースの解析結果と実験結果、および充填柱の累積圧縮耐力($P_c + P_s$)を、図-11(b)に上記3ケースのコンクリートと鋼管の耐力の内分けおよびコンクリートの一軸耐力

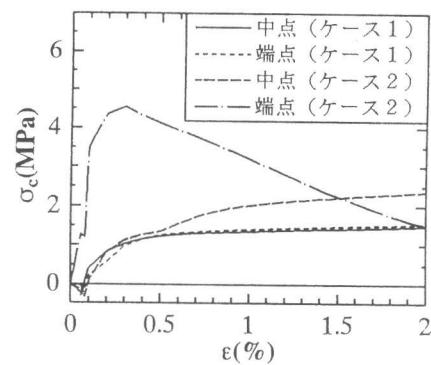


図-7 等価拘束圧の変動

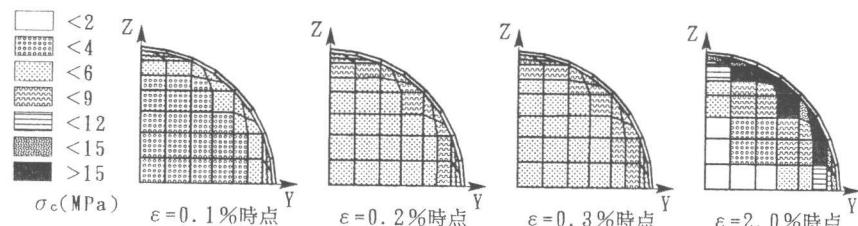


図-8 端部の等価拘束圧 σ_c (X, Y軸方向の変位は50倍)

(P_c)、鋼管の降伏耐力(P_{sy})を示す。

図-11(a)より、供試体全体としては、すべての解析において実験結果より大きな耐力を予測する。しかし、実験結果と充填柱の累積圧縮耐力(P_c+P_{sy})を比較してみると、実験値(1845kN)が累積圧縮耐力(P_c+P_{sy} ; 2405kN)に比べてかなり小さい。この理由として、実験時の載荷状態の不整（例えば、完全な中心軸圧縮状態ではなかった）などが考えられる。

まず、図-11(a)から、残留応力を考慮することにより約0.5%ひずみまでのひずみ硬化域の耐力が若干減少したことが分かる。これは、図-11(b)の耐力の内分けを見れば明らかなように、鋼管の担う耐力が残留応力の影響で減少したためである。また、端部拘束を考慮した解析結果（ケース3）は、端部拘束を考慮しない解析結果（ケース2）よりも、全般的に耐力が高くなっている。また、耐力分担の内分けを見ると、端部を拘束することにより、コンクリートの担う耐力がフープ効果の減少に伴い減少し、逆に端部を固定された鋼管の耐力が増大していることが分かる。これは、円形充填柱の場合と同じ傾向である。また、解析結果の最大耐力と充填柱の累積圧縮耐力(P_c+P_{sy})を比べるとケース1では1.07倍、ケース2も同じく1.07倍、ケース3では1.13倍であり、円形充填柱より耐力の上昇率が小さい。このことから、角形充填柱の方が円形充填柱よりも全体的に作用している拘束圧が小さいと予測される。

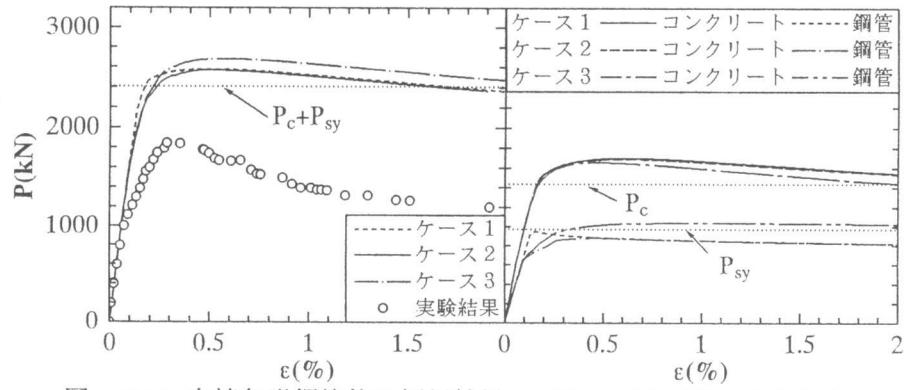


図-11(a) 充填角形鋼管柱の解析結果 図-11(b) 耐力の内分け

4.4 破壊メカニズムの解明

円形断面と同様に、供試体内部の破壊メカニズムをケース3を例にとり損傷度 F_p および等価拘束圧 σ_c の観点より考察する。

(1) 損傷度 F_p 図-12の斜線部（鋼管のすぐ内側）の損傷の進展状況を図-13に示した。なお、中心線に沿った断面（図-12中のYZ平面）については、鋼管が中心軸(Z軸)に対し直角になっているため、円形充填柱と同じ傾向が見られた。図-13より、載荷が進行するにつれ、端部と中央部との間で斜め方向に損傷度が大きいせん断タイプの破壊が生じていることが分かる。この理由については、次節で述べる。

(2) 等価拘束圧 σ_c 図-14(a)および(b)は、ケース3の解析結果における、図-12に示すような端部断面および中央断面の等価拘束圧の分布を示したものである。ここで、図(a)と(b)で、ブロックの塗り潰しに使用する等価拘束圧のスケールが違うことに注意されたい。

図-14(a)から分かるように、端部において、軸ひずみ0.1%時点では隅角部より中心部の方が

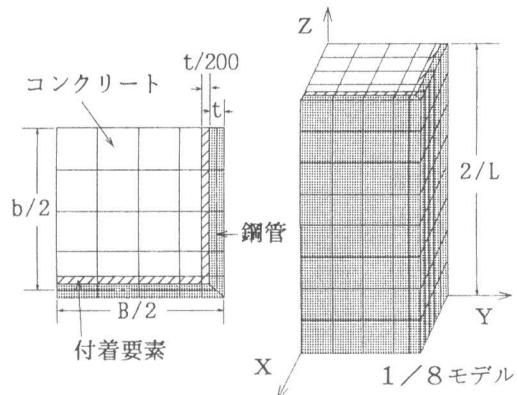


図-9 充填角形鋼管柱の要素分割図

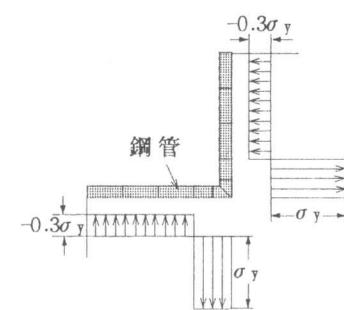


図-10 残留応力の分布(引張を正)

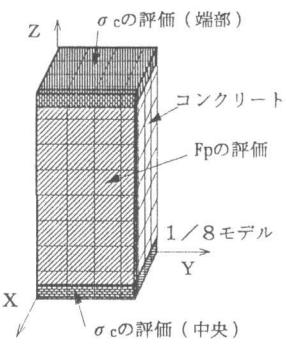


図-12 破壊の評価対象となる断面

拘束効果が現れており、載荷が進むにつれ隅角部ほど等価拘束圧が大きい傾向が見られる。それに対し、中央部は、

図-14(b)か

ら分かるように、軸ひずみ0.1%時点では、鋼管に引張られているため等価拘束圧は負であるが、載荷が進行するにつれ、隅角部より少しフランジ中央側の鋼管要素から拘束圧を受け($\varepsilon = 0.3\%$)、次いで、隅角部から拘束圧を受け($\varepsilon = 0.5\%$)、1%軸ひずみでは鋼管全体から拘束圧を受けるようになることが分かる。

以上を総括すると、載荷初期段階では、端部では中心部に拘束が偏り、中央部では隅角部に拘束効果が現れる傾向にある。図-13で損傷の進行していない部分は、載荷初期段階で大きな等価拘束圧が作用し、損傷が遅れた箇所と一致する。

6.まとめ

- (1) コンクリート充填鋼管柱のシミュレーションにひずみ軟化型コンクリート構成モデルおよび付着要素を導入することにより、コンクリートと鋼管との間の拘束効果を適切に評価することが可能となった。
- (2) 円形ならびに角形充填柱の破壊メカニズムを損傷度と等価拘束圧という指標を用いて定量的に評価できた。
- (3) 筆者らのひずみ軟化型コンクリート構成モデルは、載荷経路依存型モデルであるため、コンクリート充填柱の破壊進行状況を表現できる。

謝辞：コンクリート構成モデルのパラメータ決定に際し、三重大学大学院建築学科の小宮敏明君、名古屋大学土木工学科の栄麻希さんにご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。また、本研究費の一部は、平成6、7年度文部省科学研究費一般研究(C)(畠中、水野)によったことを付記する。

参考文献

- [1]栄 麻希・前田欣昌・畠中重光・水野英二：コンクリート工学年次論文報告集、1996.（投稿中）
- [2]水野英二・畠中重光：コンクリート工学論文集、Vol. 3(2)、pp1-13、1992.
- [3]水野英二・畠中重光：コンクリート工学論文集、Vol. 2(2)、pp. 85-95、1991.
- [4]富井政英・崎野健治・森下陽一：カラム、No. 73、pp. 91-98、1979.
- [5]Ge, H., Usami, T. :G. ASCE, Jurnal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 11, 1992. 11.

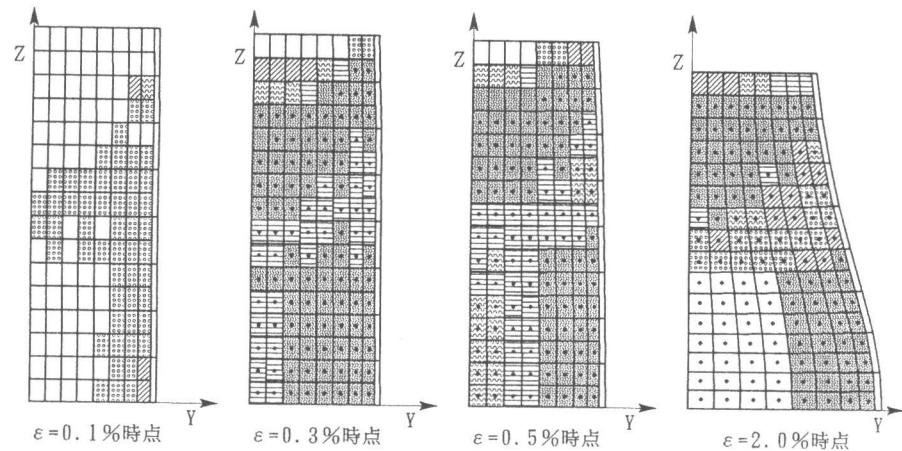


図-13 損傷度 f_p (Y軸方向の変位は25倍、Z軸方向の変位は5倍)

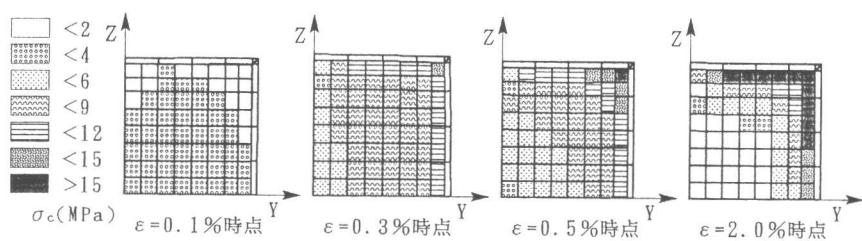


図-14 (a) 端部の等価拘束圧 σ_c (X, Y軸方向の変位は25倍)

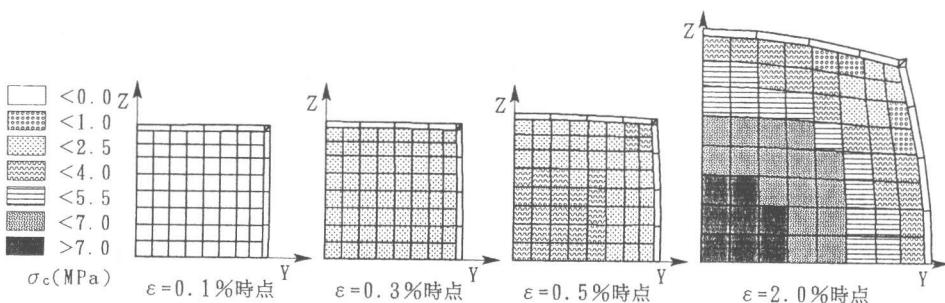


図-14 (b) 中央部の等価拘束圧 σ_c (X, Y軸方向の変位は25倍)