

論文 部材耐力に及ぼすコンクリートの軟化挙動の影響に関する FEM 解析

水野 英二*1・沼田 茂己*2・畑中 重光*3

要旨：本研究では、筆者らにより開発されたひずみ硬化-軟化型コンクリート構成モデルと、既往の弾-完全塑性型構成モデルおよび、ひずみ硬化-完全塑性型構成モデルとの比較を、コンファインドコンクリートおよびコンクリート充填円形鋼管柱の圧縮変形挙動の三次元有限要素解析を通して行う。その結果に基づき、ひずみ軟化挙動を構造部材の耐力評価に考慮することの重要性を確認する。

キーワード：有限要素解析、構成モデル、ひずみ軟化、圧縮

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の非線形挙動解析を行うに際し、種々の理論に基づいた構成モデルの構築が試みられている。特に、弾塑性理論に基づいた構成モデルの初期のものとしては、弾-完全塑性型構成モデル（図-1(a)参照）が挙げられる。この種のモデル（例えば、von Mises 型のモデル）は、ひずみ硬化以前の軟鋼の塑性流れ挙動を予測するには適しているが、完全弾塑性タイプの挙動を示さないコンクリート材料に対しては適用が困難である。一方、硬化-完全塑性型構成モデル（図-1(b)参照）では、硬化域での非線形な挙動の表現が可能となる。

現在では、コンクリート構造物の終局時および終局後における塑性変形挙動や破壊進展挙動を解析するために、コンクリートのひずみ軟化挙動を精度良く表現しうる構成モデルの開発が試みられている。筆者らは、これまでにひずみ軟化挙動を再現できる構成モデル（図-1(c)参照）を開発してきた[1][2][3]。

本研究では、コンクリートのひずみ軟化挙動を構造部材の耐力評価において考慮することの重要性を確認する。そのため、コンファインドコンクリートおよびコンクリ

ート充填円形鋼管柱の圧縮変形挙動の三次元有限要素解析を通して、筆者らのひずみ硬化-軟化型構成モデルによる結果と他の三種類の構成モデルによる結果との比較・考察を行う。

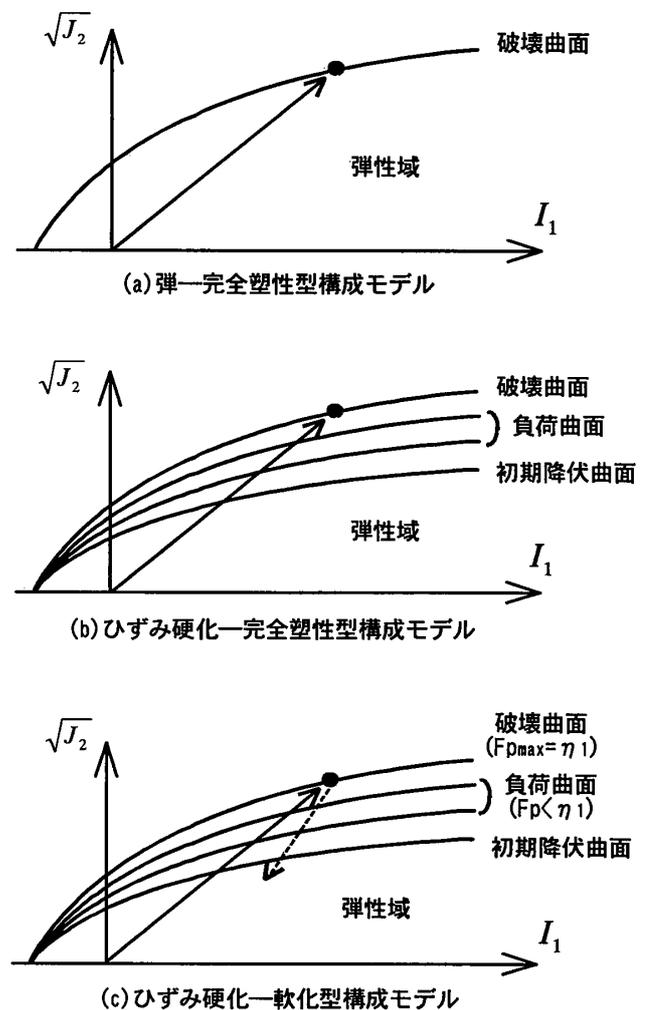


図-1 各種コンクリート構成モデルの概要

* 1 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻助教授 Ph.D.

* 2 三重大学大学院工学研究科博士前期課程建築学専攻

* 3 三重大学工学部建築学科助教授 工学博士

2. 各種構成モデルの概要

本解析では、構成モデルとして、以下の四種類のコンクリート構成モデルを用いる。なお、応力不変量($I_1, \sqrt{J_2}$)空間上での破壊曲面には、筆者らのひずみ硬化-軟化型構成モデルと同じ Lade 型の破壊曲面を使用する。

i) 弾-完全塑性型構成モデル (図-1(a))

破壊曲面上で、関連流れ則を用いる場合 ($k=1$) と、非関連流れ則を用いる場合 (例えば、 $k=\infty$; この場合塑性体積ひずみはゼロとなる) の二種類を考える。なお、 k 値については後述する。

ii) ひずみ硬化-完全塑性型構成モデル (図-1(b))

ひずみ硬化域では、後述するひずみ硬化-軟化型構成モデルと同じ硬化則ならびに非関連流れ則を用いる。また、破壊曲面に達した後は関連流れ則($k=1$)を用いる。

iii) ひずみ硬化-軟化型構成モデル (筆者らの構成モデル) (図-1(c))

ひずみ空間で定義した負荷曲面 F に含まれる強度パラメータ F_p を用いて、ひずみ硬化およびひずみ軟化を表現する。強度パラメータ F_p は、コンクリートの損傷度を表し、ひずみ硬化域では増加し破壊曲面で最大値($F_{pmax} = \eta_1$)となり、軟化に伴い徐々に減少する (損傷は逆に増加する)。また、塑性ポテンシャル曲面には、ひずみ空間で定義した負荷曲面 F の $\sqrt{J_2}$ 値を $1/|k|$ 倍した曲面を用いる (図-2 参照)。ただし、 I_1 および $\sqrt{J_2}$ は、弾性ひずみの一次および二次の不変量を表す。詳細は文献[1][2][3]を参照されたい。

上述の構成モデルによる一軸圧縮状態での応力-ひずみ関係を参考までに図-3 に示す。弾-完全塑性型構成モデル (破線) では最大応力まで線形的に挙動し、その後、最大応力を保ったままひずみが進展する。ひずみ硬化-完全塑性型構成モデル (実線) ではひずみ硬化は表現されるが、最大応力に達した後は、弾-完全塑性型構成モデルと同様の挙動を示す。ひずみ硬化-軟化型構成モデル (点線) は、ひずみ硬化および軟化とも表現されており、コンクリートの挙動が定性的に良く再現される。

3. 中心軸圧縮力を受けるコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析

3.1 解析手法

(1) 解析対象

解析対象とした試験体の一例 (基本試験体 No.1) を図-4 に示す。なお、解析は図中の斜線部にて行った。試験体の形状・材料に関する各諸量を表-1 に示す。

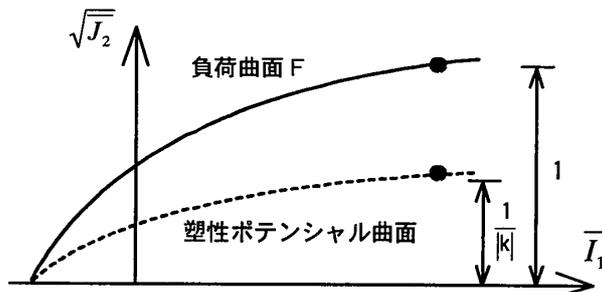


図-2 塑性ポテンシャル曲面の定義

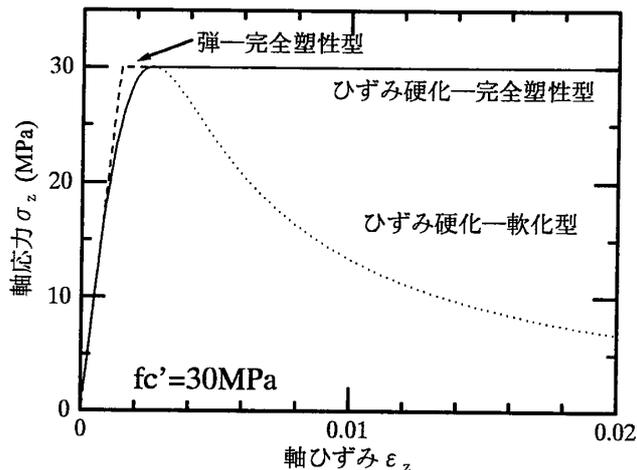


図-3 各種コンクリート構成モデルの $\sigma - \epsilon$ 関係

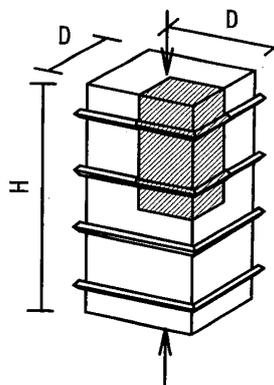


図-4 基本試験体 (全体図)

表-1 コンファインドコンクリートの形状・材料データ

	D (mm)	H (mm)	S (mm)	As (mm ²)	σ_{sy} (MPa)	Es (GPa)	ν_s	fc' (MPa)	Ec (GPa)	ν_c
No.1	400	800	200	400	300	210	0.3	30	21	0.2
No.2			400							

D: 試験体幅 H: 試験体高さ S: ピッチ As: 横補強筋の断面積 σ_{sy} : 横補強筋の降伏応力 Es: 横補強筋のヤング率 ν_s : 横補強筋のポアソン比 fc': コンクリートの一軸圧縮強度 Ec: 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) 要素分割図

有限要素解析に用いた試験体の要素分割図を図-5に示す。ひずみ硬化-軟化型構成モデルの開発に用いた実験データ[4][5][6]がサイズ(10×10×10cm)のコンクリート角柱体を基準としているため、ここでは、便宜上、コンクリート要素の大きさを一辺が10cmの立方体となるように分割した。また、解析モデルは、軸対称・上下対称を仮定し、試験体の1/8部分とした。

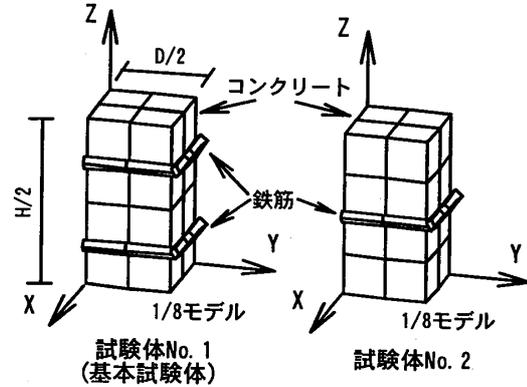


図-5 コンファインドコンクリートの要素分割図

(3) 境界条件

X=0, Y=0, Z=0 平面でそれぞれ X, Y, Z 方向を固定した。端部は無拘束とした。

(4) 解析プログラム

本研究では、8 節点アイソパラメトリック三次元ソリッド要素[7]を組み込んだ有限要素プログラム (FEAP) [8]を使用する。ひずみ軟化領域まで解析するため、試験体(高さH)の上部に $5 \times 10^{-5}H$ (0.01% 軸ひずみに相当)の様な変位増分を与える変位制御とした。

(5) 構成モデル

コンクリート部分には、前述の四種類のコンクリート構成モデルを用い、鉄筋部分には von Mises 型の弾-完全塑性型構成モデルを用いた。

3.2 解析結果

四種類のコンクリート構成モデルを用いて解析した基本試験体 No.1 と試験体 No.2 の軸応力-軸ひずみ関係を、それぞれ図-6 および 図-7 に示す。参考のためにプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線(一点鎖線)も示しておく。なお、図中の軸応力の値は、解析モデルの最上面の節点力の総和を最上面の面積で割ったものである。これらの図によれば、定量的な差はあるものの、コンクリート構成モデルによる応力-ひずみ曲線間の相違(図-3 参照)

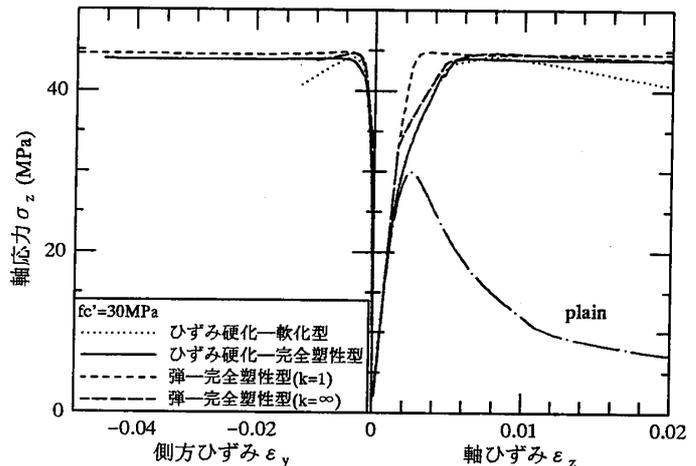


図-6 試験体 No. 1 の軸応力-ひずみ関係

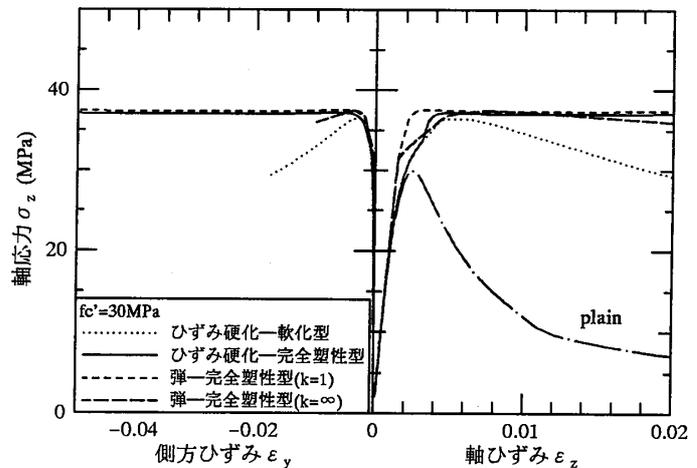


図-7 試験体 No. 2 の軸応力-ひずみ関係

が、コンファインドコンクリート試験体の有限要素解析結果の相違として表れている。以下、これらの図に共通する事項について考察する。

i) 弾-完全塑性型構成モデル

弾-完全塑性型の構成モデルでは、ひずみ硬化を考慮していないため、ほぼコンクリート強度(およそ 32MPa~34MPa)までは試験体がほぼ線形的に挙動する。その後、関連流れ則 ($k=1$) を適用した場合は塑性体積ひずみ(ダイラタンシー)量が著しく増大するため、ほぼ初期剛性を保持しながらコンクリートの軸応力が上昇する。一方、非関連流れ則(ここでは、 $k=\infty$)を適用した場合は塑性体積ひずみがゼロであるため、体積膨張はポアソン効果の寄与分だけとなる。そのため、横補強筋からの拘束圧は、他の構成モデルを用いた場合よりも遅れて発現することになる。

ii) ひずみ硬化-完全塑性型構成モデル

ひずみ硬化-完全塑性型の構成モデルでは、ひずみ硬化を考慮するため、ひずみ硬化域では本構成モデルを用いた場合とほぼ同様な挙動が得られる。しかし、コンクリート要素がピーク(試験体 No.1 ではおよそ 45Mpa、一方、試験体 No.2 ではおよそ 37MPa)に達した後は、関連流れ則 ($k=1$) を用いて得られる塑性体積ひずみ量の増大により横ひずみが急激に増加する。このため、横補強筋から大きな拘束圧が加わり、コンクリートの軸応力が上昇する。

iii) ひずみ硬化-軟化型構成モデル

ひずみ硬化-軟化型の構成モデルは本研究で提案した構成モデルであり、要素レベルでのコンクリート挙動の再現性は確認されている。図-6 および 7 (特に図-7) によれば、コンファインドコンクリートとした解析試験体のレベルでも、ひずみ硬化およびひずみ軟化の挙動が得られる。

最大応力に達した後の挙動は、ひずみ硬化-軟化型の構成モデルを用いた場合を除き、ほぼ最大応力を保ったままひずみが進行している。すなわち、有限要素解析では、ひずみ硬化-軟化型の構成モデルを用いるか、または要素外で特別な取扱いをしない限り、試験体のひずみ軟化挙動を再現することが困難であることが分かる。

4. 中心軸圧縮力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

4.1 解析手法

(1) 解析対象

解析対象の形状・材料に関する各諸量[9]を表-2 に示す。

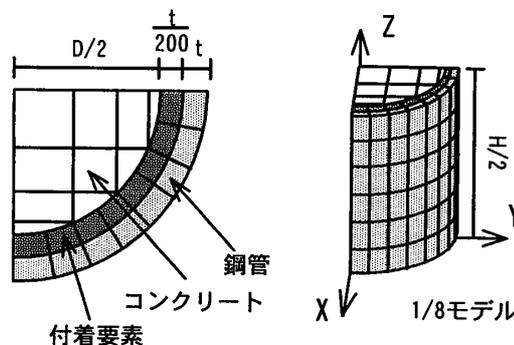


図-8 コンクリート充填円形鋼管柱の要素分割図

表-2 コンクリート充填円形鋼管柱の形状・材料データ [9]

D(mm)	H(mm)	t(mm)	D/t	σ_{sy} (MPa)	E_s (GPa)	ν_s	f_c' (MPa)	E_c (GPa)	ν_c
165.2	496	4.08	40.5	317	206	0.3	33.6	27	0.2

D: 試験体幅 H: 試験体高さ S: ピッチ A_s : 横補強筋の断面積 σ_{sy} : 横補強筋の降伏応力 E_s : 横補強筋のヤング率 ν_s : 横補強筋のポアソン比 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) 要素分割図

有限要素解析に用いた試験体の要素分割図を図-8 に示す。また、解析モデルは、軸対称・上下対称を仮定し、試験体の 1/8 部分とした。また、附着要素は、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[10]。

(3) 境界条件、解析プログラムおよび構成モデル

境界条件、解析プログラム及び構成モデルは、コンファインドコンクリートの場合と同じである。

ただし、鋼管部分の構成モデルには、鉄筋部分と同じ von Mises 型の弾-完全塑性型構成モデルを、また、付着要素に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体（鉄筋のヤング係数およびポアソン比の 10 万分の 1）を用いた。

4.2 解析結果

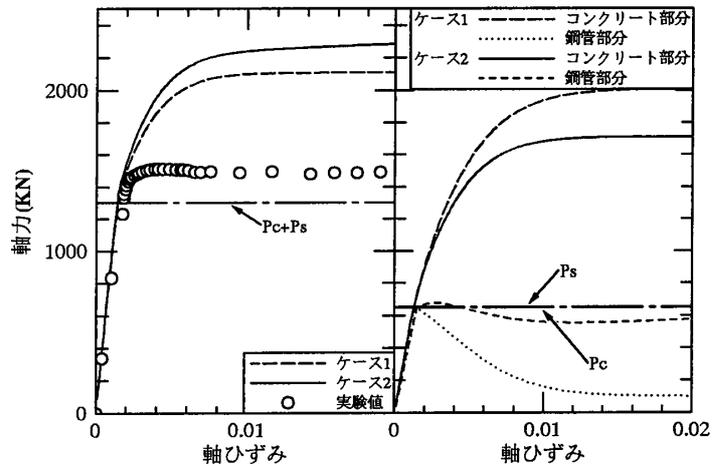
試験体の端部拘束を考慮しない場合（ケース 1）と考慮する場合（ケース 2）の 2 ケースについて、四種類のコンクリート構成モデルを用いて解析した。軸力-軸ひずみ関係と実験結果[9]との比較を図-9 ~ 12 に示す。ただし、(a)図は鋼管柱の軸力-軸ひずみ関係であり、(b)図はコンクリート部分および鋼管部分の軸力-軸ひずみ関係である。また、コンクリート、鋼管の一軸圧縮耐力および一軸圧縮の累加強度（ P_c, P_s および P_c+P_s ）も図中に示した。なお、図中の軸力の値は、解析モデルの最上面の節点力の総和である。

図によれば、ケース 1 およびケース 2 とも、累加強度（ P_c+P_s ）に達する以前の挙動は、用いる構成モデルによってあまり変化は見られないが、累加強度（ P_c+P_s ）に達した後の挙動は、コンクリート構成モデルによる影響を大きく受ける。以下、累加強度（ P_c+P_s ）に達した後の挙動について、各種コンクリート構成モデルごとに考察を行う。

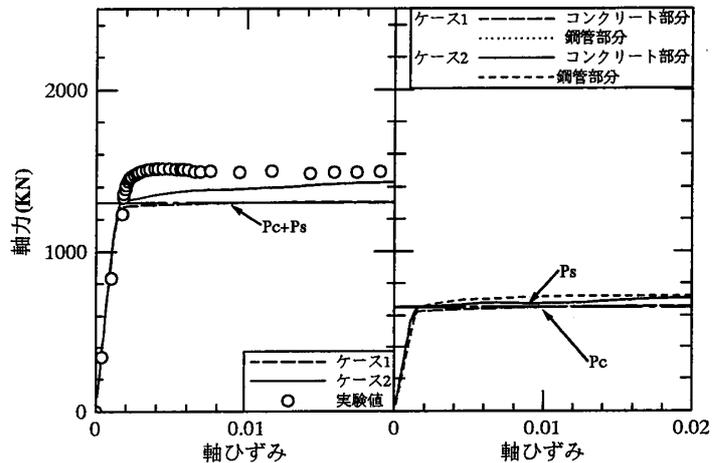
i) 弾-完全塑性型構成モデル

関連流れ則（ $k=1$ ）の場合（図-9 参照）、コンクリートは塑性体積ひずみ量の増大により、横ひずみが急激に増加する。このため、鋼管より大きな拘束圧を受け、コンクリートの軸力が上昇する。逆に、鋼管はコンクリートの横ひずみの増加に伴い、周方向の引張力を受けるため軸力は減少する。また、充填柱としては実験値よりかなり大きな値となった。

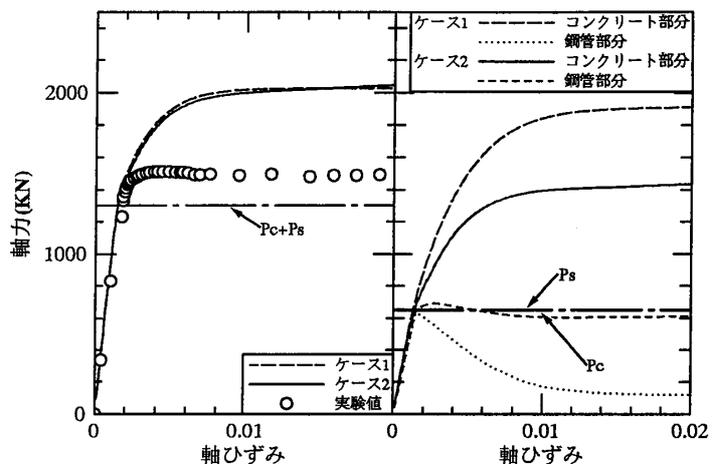
非関連流れ則（ $k=\infty$ ）の場合（図-10 参照）、コンクリートは塑性体積ひずみ量がゼロのため、鋼管から拘束を受けない。よって、コンクリート、鋼管とも構成モデルによる応



(a) 鋼管柱の解析結果 (b) 耐力の内訳
図-9 弾-完全塑性型 ($k=1$) の解析結果



(a) 鋼管柱の解析結果 (b) 耐力の内訳
図-10 弾-完全塑性型 ($k=\infty$) の解析結果



(a) 鋼管柱の解析結果 (b) 耐力の内訳
図-11 ひずみ硬化-完全塑性型の解析結果

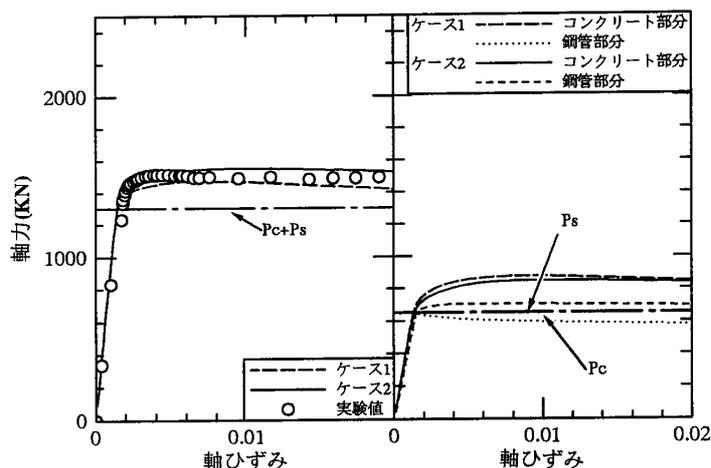
カーひずみ曲線と同様の挙動を示し、充填柱としても、累加強度 (P_c+P_s) の直線上をひずみが進展することになる。

ii) ひずみ硬化-完全塑性型構成モデル

硬化-完全塑性型構成モデル (図-11 参照) は、若干最大耐力に差が生じるものの、弾-完全塑性型構成モデル ($k=1$) とほぼ同様の挙動を示す。よって、コンクリート充填鋼管柱において、ひずみ硬化はあまり影響しないことが分かる。

iii) ひずみ硬化-軟化型構成モデル

ひずみ硬化-軟化型構成モデル (図-12 参照) は本研究で提案した構成モデルである。コンクリート部分は鋼管より拘束圧を受け耐力が上昇する。また、わずかながらひずみ軟化挙動も表現されている。充填柱としては、実験値を精度良く表現できている。



(a) 鋼管柱の解析結果 (b) 耐力の内訳
図-12 ひずみ硬化-軟化型の解析結果

5. まとめ

本研究で行った有限要素解析結果より以下のことが分かった。

1. コンファインドコンクリートの有限要素解析結果によれば、ひずみ硬化-軟化型の構成モデルを用いるか、または構造的な不整や材料的な欠陥を入れない限り、試験体のひずみ軟化挙動を再現することは困難である (図-6,7)。
2. コンクリート充填円形鋼管柱の有限要素解析結果によれば、コンクリートのひずみ硬化は柱全体の挙動にあまり影響を及ぼさないが、ひずみ軟化および塑性体積ひずみ量の影響は極めて大きい。また、ひずみ軟化挙動を正しく入力しないと、コンクリート充填円形鋼管柱の耐力を過大評価するおそれがある (図-9,11,12)。
3. 本構成モデルを用いれば、ひずみ軟化域をも含むコンファインドコンクリート(実験結果との比較は、次報にて報告)およびコンクリート充填円形鋼管柱の圧縮破壊挙動をシミュレートすることができる。

謝辞

本研究費の一部は、平成8,9年度文部相科研費一般研究(c)(畑中・水野)によったことを付記する。

参考文献

- [1]水野英二・畑中重光：塑性理論によるコンクリートの圧縮軟化特性のモデル化，コンクリート工学論文集，Vol.2(2)，1991，pp.85-95.
- [2]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)，1992，pp.1-13.
- [3]柴麻紀・前田欣昌・畑中重光・水野英二：ひずみ軟化を考慮したコンクリート構成モデルの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.18(2)，1996，pp.401-406.
- [4]Chen,W.F.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill(色部・河角・安達監訳：コンクリート構造物の塑性解析)，丸善，1995，498pp.
- [5]Hatanaka,S.・Kosaka,Y.・Tanigawa,Y.：Plastic Deformational Behavior of Axially Loaded Concrete under Low Lateral Pressure-An Evaluation Method for Compressive Toughness of Laterally Confined Concrete(Part I)-, J.Structural and Construction Engineering, (Trans.of AIJ), No.377, 1987, pp.27-40.
- [6]畑中重光・水野英二・小池狭千朗・谷川恭雄：供試体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，Vol.5(1)，1994，pp.65-73.
- [7]Chen,W.F. and Mizuno,E.：Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier, 1990, 661pp.
- [8]Zienkiewicz,O.C.：The Finite Element Method, Third Ed., (吉識・山田監訳：マトリックス有限要素法)，培風館，1984，pp.672-796.
- [9]蜷川利彦・崎野健治・小松慎二・石出一郎：コンクリート充填円形鋼管柱の中心圧縮性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18(2)，1996，pp.1307-1312.
- [10]前田欣昌・畑中重光・水野英二：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18(2)，1996，pp.407-411.