

# 論文 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

蜷川利彦<sup>\*1</sup>・崎野健治<sup>\*2</sup>・小松慎二<sup>\*3</sup>・石出一郎<sup>\*3</sup>

**要旨：**コンクリート充填円形鋼管柱の中心圧縮性状を明らかにすることを目的に、鋼管とコンクリートの相互作用を考慮した中心圧縮柱の弾塑性解析を行った。解析結果を実験結果と比較し、弾塑性性状におよぼす拘束効果や残留応力の影響等について考察を行った。また、得られた知見をもとに簡便な軸力—ひずみ関係の解析方法を提案した。

**キーワード：**コンクリート充填円形鋼管柱、拘束効果、中心圧縮、残留応力除去焼鉄

## 1. はじめに

コンクリート充填鋼管部材は、鋼管とコンクリートの相互拘束効果により耐力、韌性が改善されることは良く知られているが、最も基本的な中心圧縮性状でさえ未だ十分に解明されているとは言えない。拘束効果は角形断面柱より円形断面柱において顕著に現れ、コンクリート充填円形鋼管柱の合理的な設計には相互拘束効果を取り入れる必要がある。本論では、コンクリート充填円形鋼管柱の弾塑性性状を解明することを目的に、既往のコンファインドコンクリートの破壊条件、構成則、塑性流れ則等を用いて拘束効果を考慮した中心圧縮柱の弾塑性解析を行い、実験結果と比較し、考察を行った結果について述べる。

## 2. 中心圧縮実験概要および実験結果

コンクリート充填の有無、残留応力除去焼鉄の有無を実験変数にとり、各2体、計8体の実験を行った。試験体一覧を表1に、試験体形状を図1に示す。鋼管は165.2φ-4.08(径厚比D/t=40.5)で市販のSTK400材を用いた。引張試験における鋼管の機械的性質を表2に示す。コンクリートのシリンドー強度 $c\sigma_B$ は約33MPaである。加力は500ton油圧試験機により行った。測定装置を図2に、鋼管表面のワイヤーストレインゲージの貼付位置を図1に示す。

図3、図4に各試験体の軸力Nと軸方向圧縮ひずみ $\varepsilon_z$ の関係を示す。中空鋼管では局部座屈発生後大きく耐力が低下したが、コンクリート充填鋼管では耐力はほとんど低下せず、韌性に富んだ性状を示している。中空鋼管の場合、焼鉄を施していない試験体の最大耐力は引張試験での降伏応力 $s\sigma_y$ を用いて求めた一軸圧縮耐力 $sN_0 (= s\sigma_y \cdot sA)$

表1 試験体および実験結果一覧

試験体名	焼鉄の有無	$s\sigma_y$ (MPa)	$c\sigma_B$ (MPa)	$N_u$ (kN)	$N_{00}$ (kN)	$N_{00}/N_u$
V M A C	有	317	—	688	655	1.05
V C A C	—	—	—	691	652	1.06
V M N C	無	412	—	843	851	0.99
V C N C	—	—	—	851	851	1.00
C M A C	有	317	33.0	1440	1297	1.11
C C A C	—	—	33.6	1491	1273	1.17
C M N C	無	412	33.0	1692	1486	1.14
C C N C	—	—	33.6	1652	1508	1.10

注)  $s\sigma_y$ :鋼管の降伏応力  $c\sigma_B$ :コンクリートのシリンドー強度  
 $N_u$ :耐力実験値 鋼管の平均軸方向ひずみが引張試験における $\varepsilon_{s1}$ に達したときの軸圧縮力  
 $N_0$ :単純累加強度 =  $s\sigma_y \cdot sA + c\sigma_B \cdot cA$   
 $(sA$ :鋼管の断面積  $cA$ :コンクリートの断面積)

表2 鋼材の引張試験結果

	$s\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\frac{s\sigma_y}{\sigma_u}$	$\phi$ (%)	$\varepsilon_{s1}$ (%)
焼鉄有り	317	429	0.74	25.8	1.56
焼鉄無し	412	483	0.85	16.2	1.50

注)  $\sigma_u$ :引張強さ  $\phi$ :伸び  
 $\varepsilon_{s1}$ :ひずみ硬化開始時ひずみ

\*1 九州大学助手 工学部建築学科、工修(正会員)

\*2 九州大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究科建築学専攻

ここで、 $sA$ は鋼管の断面積)にはほぼ等しいものの、 $N - \varepsilon_z$ 関係に明瞭な降伏現象は現れず、残留応力の影響がみられる。それに対し焼鉈を施した試験体では、 $N - \varepsilon_z$ 関係に明瞭な降伏点と降伏棚があり、軸圧縮(降伏)耐力も  $sNo$ にはほぼ等しく、残留応力はほぼ除去されているといえる。コンクリート充填鋼管の場合、焼鉈の有無に関わらず、軸圧縮耐力は鋼管とコンクリートの単純累加強度  $No (=c\sigma_b \cdot cA + s\sigma_y \cdot sA)$  ここで、 $cA$ はコンクリートの断面積)よりも 1 割ほど大きくなっている。(中空鋼管の圧縮耐力も  $sNo$  を超えているが、コンクリート充填鋼管ではそれ以上の耐力上昇がある。) これは拘束効果によるものと考えられる。焼鉈を施していない試験体の  $N - \varepsilon_z$  関係には中空鋼管の場合と同様の残留応力の影響がみられる。

### 3. 中心圧縮解析概要

解析は、鋼管と充填コンクリートの材軸方向ひずみ  $\varepsilon_z$  は等しいとし、ひずみ増分法により行った。なお、応力およびひずみは圧縮を正とする。柱のモデル化に用いた仮定を以下に示す。

- (1) 鋼管は二軸(平面)応力状態とし、コンクリートは円周方向と半径方向の 2 つの側圧(主応力) $\sigma_r$ が等しい三軸応力状態とする。
- (2) 充填コンクリートと鋼管の間には半径方向の引張力は生じない。
- (3) 鋼管は線形弾性硬化塑性体とする。鋼管の応力  $\sigma$  - ひずみ  $\varepsilon$  関係には、図 5 に示すように引張試験で得られた  $\sigma - \varepsilon$  関係を区分線形近似したものを用いた。降伏条件はミーゼスの条件を用い、またこの条件を塑性ポテンシャル関数とし、塑性ひずみ増分比を求める(関連する流れ則)。ひずみ硬化則は加工硬化則とする。
- (4) コンクリートは等方性非線形弾性完全塑性体とし、弾性範囲のコンクリートの構成則および塑性流れ則(関連しない流れ則)は、八面体応力 - ひずみ関係で表現された肖の提案式[1]を用いる(図 6、図 7 参照)。降伏条件は Richart の研究[2]より次式とする。

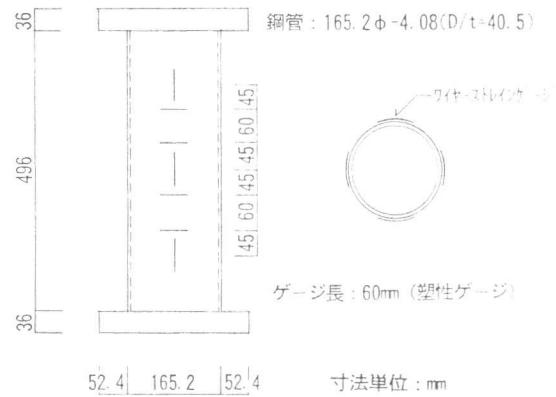


図 1 試験体形状およびひずみゲージの貼付位置

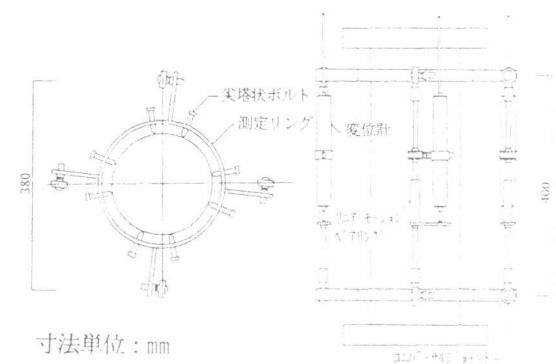


図 2 測定装置

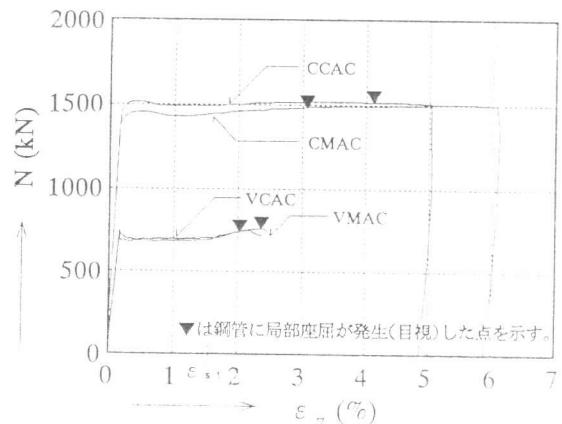


図 3 中心圧縮実験結果(焼鉈を施した試験体)

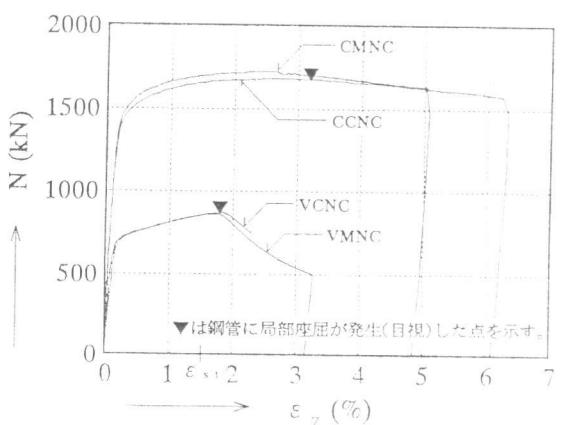


図 4 中心圧縮実験結果(焼鉈を施していない試験体)

$$\tau_{\text{oct}}/c\sigma_B = 0.23 + 0.72 c \sigma_{\text{oct}}/c\sigma_B$$

または、 $c\sigma_{\text{C}_B}/c\sigma_B = 1.0 + k \cdot \sigma_r/c\sigma_B$

ここで、 $c\sigma_{\text{C}_B}$ ：コンファイントコンクリートの圧縮強度  
 $k$ ：拘束係数=4.1       $\sigma_r$ ：拘束応力

#### 4. 中心圧縮性状に関する考察

解析で得られた $N - \varepsilon_z$ 関係および鋼管の軸方向ひずみに対する周方向ひずみの比 $s\varepsilon_\theta/s\varepsilon_z$ と $\varepsilon_z$ の関係を試験体CCACとCCNCについて実験値と合わせて図8、図9に示す。 $s\varepsilon_\theta$ の実験値は各ひずみゲージの測定値の平均値で、 $s\varepsilon_z$ の実験値はゲージの測定値の平均値と変位計の測定値から求めた平均軸方向ひずみの2つの場合について示している。また、中空鋼管の $s\varepsilon_\theta/s\varepsilon_z - \varepsilon_z$ 関係の実験結果も合わせて示している。

焼鉈を施したCCACでは、解析結果は実験における $N - \varepsilon_z$ 関係をほぼ予測しているといえる。降伏点近辺で軸力の実験値が解析値を上回っているのは、中空鋼管の実験結果にもみられる上降伏点の影響と思われる。また、解析では大変形時においても(ひずみ硬化により)耐力が上昇し続けるのに対し、実験では耐力はほぼ一定となっている。これは、実際はコンクリートに劣化による耐力低下が生じたためと考えられる。また、鋼管の局部座屈の影響とも考えられる。

$s\varepsilon_\theta/s\varepsilon_z$ の解析値は実験値より大きくなっているが、実験結果にみられる軸力が単純累加強度に達したあたりでその値が急増する現象や、大変形時に値が安定する現象を解析結果は予測している。また、コンクリート充填鋼管の $s\varepsilon_\theta/s\varepsilon_z$ の値が中空鋼管のそれより大きいのは、鋼管がコンクリートを拘束していることを意味している。 $N - \varepsilon_z$ 関係の図には鋼管とコンクリートそれぞれの負担軸力の解析結果も示している。両者の負担軸力の変化をみると、単純累加強度までは鋼管のポアソン比がコンクリートのそれよりも大きいため、鋼管とコンクリートの相互作用はあまりなく、その後コンクリートが破壊条件に達し膨張することにより相互作用が現れ、鋼管に周方向の引張応力が生じるととも

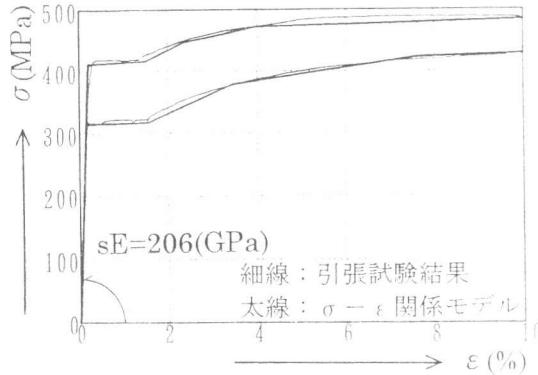
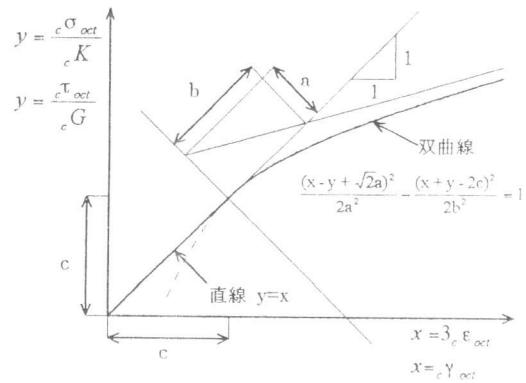


図5 鋼管の応力一ひずみ関係



$$cK = 1.03 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.3}\right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{c\sigma_B}{19.6}} \quad cG = 0.88 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.3}\right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{c\sigma_f}{19.6}}$$

$$c\sigma_{\text{oct}} = \frac{1}{3}(c\sigma_z + 2\sigma_r), \quad c\gamma_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3}(c\sigma_z - \sigma_r)$$

$$c\varepsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{3}(c\varepsilon_z + 2c\varepsilon_r), \quad c\gamma_{\text{oct}} = \frac{2\sqrt{2}}{3}(c\varepsilon_z - c\varepsilon_r)$$

$c\sigma_{\text{oct}} - c\varepsilon_{\text{oct}}$  関係の場合       $c\tau_{\text{oct}} - c\gamma_{\text{oct}}$  関係の場合

$$a = \{14.6 - 3.65(c\sigma_B/35.3)\} \times 10^{-4} \quad a = \{8.19 + 2.03(c\sigma_B/35.3)\} \times 10^{-4}$$

$$b = \{8.27 + 11.6(c\sigma_B/35.3)\} \times 10^{-4} \quad b = \{7.25 + 5.85(c\sigma_B/35.3)\} \times 10^{-4}$$

$$c = \{-1.57 + 5.04(c\sigma_B/35.3)\} \times 10^{-4} \quad c = \{-2.82 + 11.13(c\sigma_B/35.3)\} \times 10^{-4}$$

図6 肖の提案したコンクリートの構成則[1]

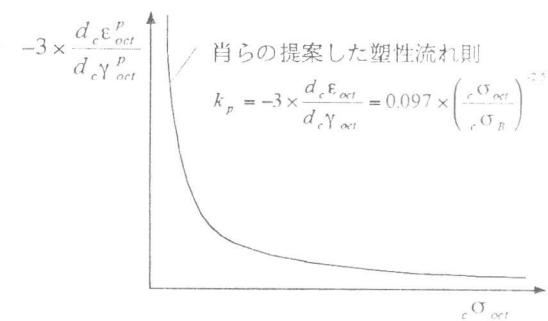
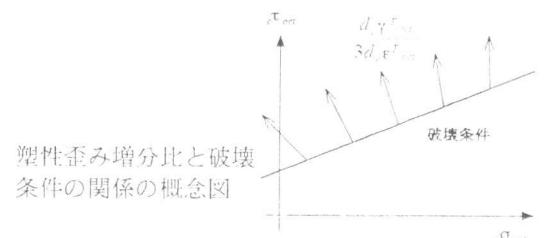
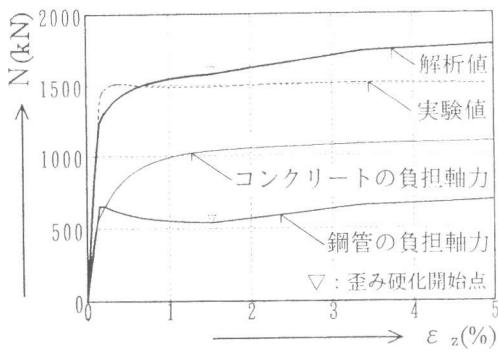
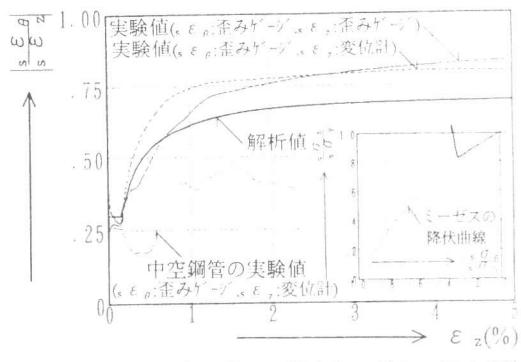


図7 肖の提案したコンクリートの塑性流れ則[1]

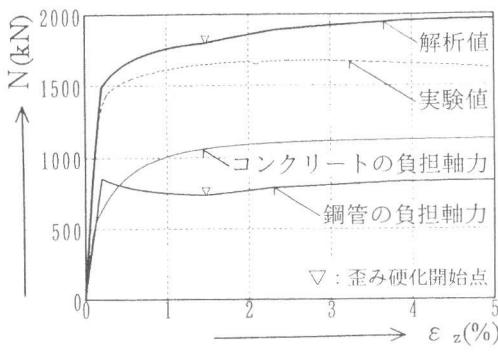


(a)軸力-軸方向ひずみ関係

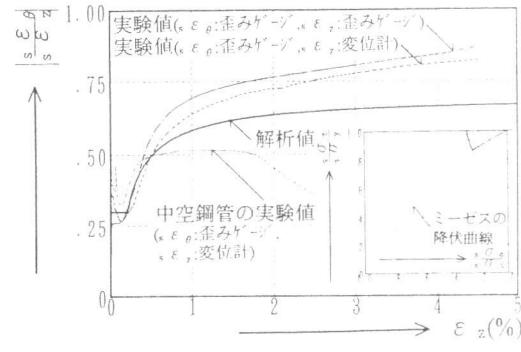


(b)鋼管の周方向ひずみの軸方向ひずみに対する比

図8 焼鈍を施した試験体の解析結果(CCAC)

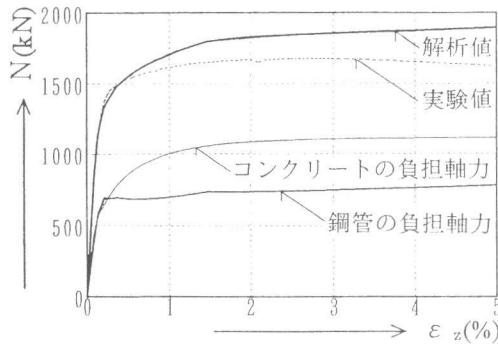


(a)軸力-軸方向ひずみ関係

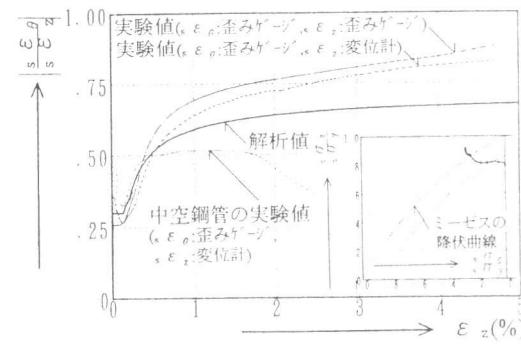


(b)鋼管の周方向ひずみの軸方向ひずみに対する比

図9 焼鈍を施していない試験体の解析結果(CCNC)



(a)軸力-軸方向ひずみ関係



(b)鋼管の周方向ひずみの軸方向ひずみに対する比

図11 中空钢管の圧縮試験結果を用いて行った焼鈍を施していない試験体の解析結果(CCNC)

に钢管の負担軸力は減ってゆくが、拘束効果によりコンクリートの耐力が上昇し、部材としての耐力が上昇してゆく様子が分かる。

焼鈍を施していないCCNCでは、軸力は解析値が常に上回り、解析は耐力を過大評価する傾向がある。これは残留応力の影響で実験では钢管が早く剛性低下を起こすためと考えられる。実際の構造物では、冷間成形钢管をそのまま用いる(残留応力が存在する)ことも多く、これについては注意を要する。参考のため、中空钢管の圧縮試験結果をモデル化した

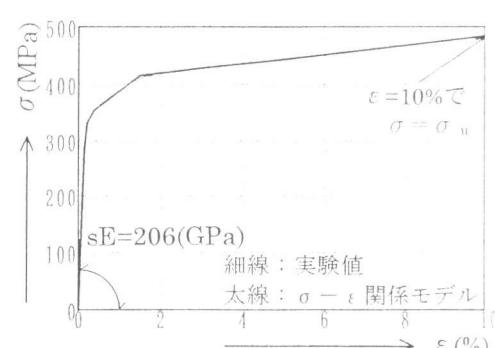


図10 中空钢管の圧縮試験結果をモデル化した钢管の応力-ひずみ関係(WMC)

$\sigma - \varepsilon$  関係(図10参照)を用いた場合の解析結果を図11に示すが、実験結果との対応は良くなる。

また、図8、図9には解析による鋼管の応力状況も示しているが、ひずみ硬化開始時における軸方向応力の降伏応力に対する比 $\beta$ はCCACで0.82、CCNCで0.86となっている。

## 5. 中心圧縮解析の簡便法の提案

前項で述べた解析法は複雑であり、誰もが容易には行えない。また、前項で問題となったコンクリートの劣化を解析に取り入れることは現状では困難である。本項では、前項までの解析および実験で明らかとなつた中心圧縮性状を踏まえ、一軸解析の範囲で行えて簡便で、コンクリートの劣化も考慮できる軸力N-ひずみ $\varepsilon_z$ 関係の解析方法を提案する。モデルは図12に示すもので、鋼管とコンクリートの間に相互作用は一切無いものとして、それぞれのN- $\varepsilon_z$ 関係を単純累加して求めたN- $\varepsilon_z$ 関係(曲線1)と、鋼管の一部が始まから横拘束に働く(図13参照)と仮定して求めたコンファインドコンクリートのN- $\varepsilon_z$ 関係と、横拘束分に応じ軸耐力を低減した鋼管のN- $\varepsilon_z$ 関係を累加して求めたN- $\varepsilon_z$ 関係(曲線2)のうち、耐力の高い方を採用するものである。コンファインドコンクリートの $\sigma - \varepsilon$ 関係には崎野・孫の提案式[3](図14参照)を用い、拘束係数は4.1とした。軸力負担用鋼管の $\sigma - \varepsilon$ 関係は図15に示すモデルで、 $\beta$ の値は前項の解析によって得られたひずみ硬化開始時の値を探った。ひずみ硬化は軸力負担用鋼管のみ考慮する。鋼管の局部座屈は考慮していない。参考のため、ひずみ硬化がないとした場合についても解析を行っている。

図15に焼鉈を施したCCACの解析結果を示す。 $\varepsilon_z = 0.8\%$ 付近では耐力が前項での解析結果より高くなっているが、これはひずみ硬化開始時( $\varepsilon_z = 1.5\%$ )の拘束効果(拘束応力)が始まからあるものとしているためと考えられる。コンクリートの劣化を考慮しているため、前項の解析結果よりも、大変形時における実験結果との対

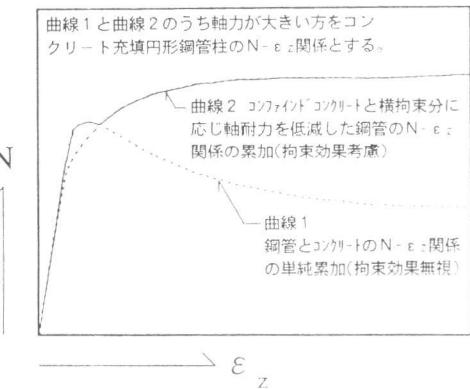


図12 簡便な軸力-軸方向ひずみ関係の解析法

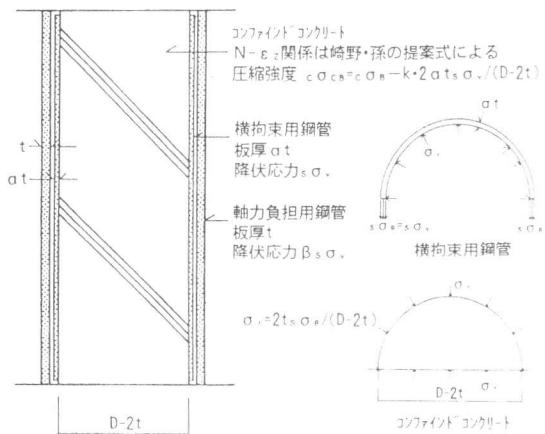
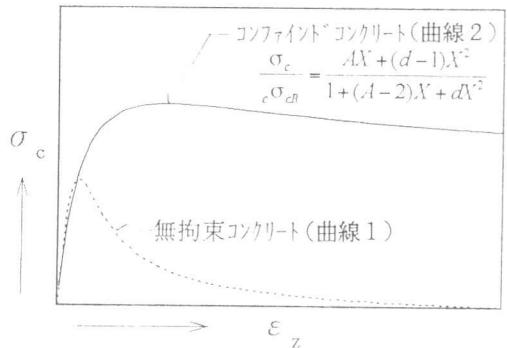


図13 曲線2のモデル



$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{AX + (d-1)X^2}{1 + (A-2)X + dX^2} \\ c\sigma_{cB} &= c\sigma_B + k2\alpha t \sigma_y / (D-2t) \\ X &= \varepsilon_c / \varepsilon_{c0}, \quad A = E_c \varepsilon_{c0} / c\sigma_{cB}, \quad K = c\sigma_{cB} / c\sigma_B \\ E_c &= (0.7 + 0.332 \sqrt{c\sigma_B}) \times 10^4, \quad \varepsilon_0 = 0.94(c\sigma_B)^{1/2} \times 10^{-3} \\ \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_0} &= \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 335 + 20(K-1.5), & K > 1.5 \end{cases} \\ d &= 1.5 - 0.017_c \sigma_B + 2.49 \sqrt{(K-1)_c \sigma_B} / 23 \\ \sigma_c, \varepsilon_c &: \text{コンクリートの軸方向応力およびひずみ} \\ c\sigma_{cB}, \varepsilon_{c0} &: \text{コンファインドコンクリートの強度および強度時のひずみ} \\ c\sigma_B &: \text{コンクリートのシングル強度} \\ \varepsilon_0 &: \text{無拘束コンクリートの強度時のひずみ} \\ E_c &: \text{コンクリートのヤング係数} \quad k: \text{拘束係数}(=4.1) \\ \sigma_y &: \text{鋼管の降伏応力} \quad \alpha t: \text{横拘束用鋼管の板厚} \end{aligned}$$

図14 簡便法に用いるコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係[3]

応は良くなっているが、なお耐力は実験結果を上回っている。ひずみ硬化がないとした場合の解析結果には若干の耐力低下がみられるが、実験結果との対応は良い。径厚比にもよるが、大変形時には鋼管に局部座屈が発生し、鋼管の負担軸力の減少や拘束効果の低下を招くことが考えられる。鋼管の  $\sigma - \varepsilon$  関係にひずみ硬化をどう取り入れるかについては径厚比や降伏比等を考慮に入れた検討が必要となろう。また、単純累加の  $N - \varepsilon_z$  関係(曲線 1)では耐力が大きく低下しており、このことからもコンクリート充填円形鋼管では拘束効果により韌性が大きく向上することが分かる。図17には焼鉈を施していないCCNCの解析結果を示す。CCACの場合と同様のことがいえるが、実験では残留応力の影響で剛性低下が早く始まっており、ひずみが小さい時も曲線 2 のほうが実験結果とよく対応している。鋼管に残留応力がある場合では曲線 2 の解析のみで十分であると言える。また、前項の解析と同様に、耐力は実験結果より高くなっている。

## 6. まとめ

鋼管とコンクリートの相互作用を考慮したコンクリート充填円形鋼管の中心圧縮柱の弾塑性解析を行った。解析により、実験結果をほぼ評価できたが、軸力が単純累加強度に達するまでは相互作用はあまりなく、その後、拘束効果により耐力が上昇してゆくことが分かった。実験結果と解析結果の間には、鋼管の残留応力や局部座屈およびコンクリートの劣化の影響と思われる違いがみられた。また、コンクリートの劣化を考慮した簡便な軸力-ひずみ関係の解析方法を提案し、解析により実験結果をよく評価できることが分かった。ただし、簡便法を用いるにあたっては鋼管の周方向応力(拘束応力)の大きさを決定する必要があり、その値を評価する方法を定式化するのが今後の研究課題である。

[謝辞] この研究を行うに際し、九州大学大学院生松本勝憲君、九州大学4年生石川忠君および九州大学文部技官川口晃氏の協力を頂いた。ここに深く感謝致します。

### [参考文献]

- [1] 肖岩: 円形鋼管で横補強されたコンクリートの三軸圧縮性状に関する実験的研究. 九州大学学位論文, 1989. 1
- [2] Richart et al. : The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression. Bulletin No. 190, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Feb. 1929
- [3] 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係. 日本建築学会構造系論文集 第461号, pp. 95~104. 1994. 7

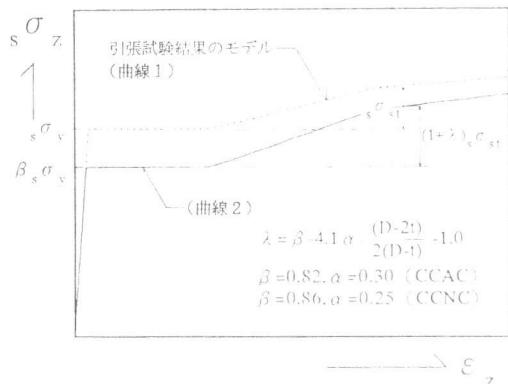


図15 簡便法に用いる鋼管の応力-ひずみ関係

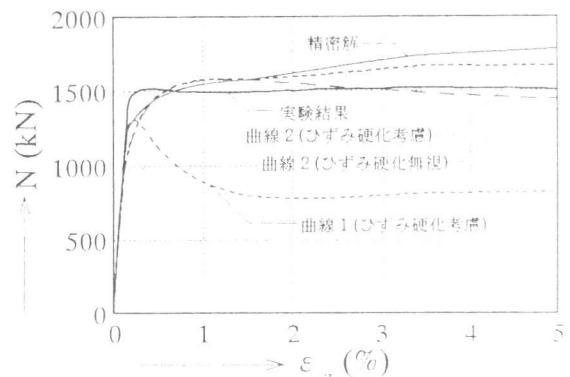


図16 簡便法による焼鉈を施した試験体の軸力-軸方向ひずみ関係(CCAC)

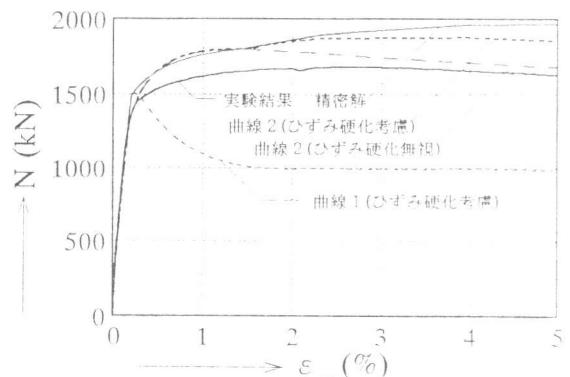


図17 簡便法による焼鉈を施していない試験体の軸力-軸方向ひずみ関係(CCNC)