

論文 横方向鉄筋の拘束効果を考慮に入れたRC柱の軸方向構成則に関する研究

中島 望^{*1}・石川 靖晃^{*2}・田辺 忠顕^{*3}

要旨:本研究は、横方向鉄筋による横方向拘束効果をファイバーモデルに取り入れるために、断面の各位置で異なる軸方向応力-軸方向ひずみ応答を厳密な3次元解析から求めるものである。コンクリート要素内における横方向鉄筋の拘束効果に関する定式化¹⁾を、3次元の無筋コンクリートの力の釣り合い式に導入して柱の3次元有限要素解析を行い、軸方向コンクリートの一軸構成則を求め、得られた数値計算例から横方向鉄筋による拘束効果の影響を考察し、ファイバーモデルに導入するための横方向拘束効果を考慮したコンクリートモデルの検討を行う。

キーワード:横方向拘束効果、一軸コンクリート構成則、ファイバーモデル

1. はじめに

従来、鉄筋コンクリート(RC)フレーム構造物を解析する際には、様々な形で構造物のモデル化がなされてきたが、その中でも特にファイバーモデルは部材の断面剛性の決定に簡便かつ有用で、数多く用いられている。しかし、このファイバーモデルを大断面部材に適用するためには、横方向鉄筋による横方向の拘束効果、特に断面の各位置で異なる横方向拘束の効果を明らかにする必要があるが、必ずしもその方向の研究は行われてこなかった。

そこで、本研究ではファイバーモデルに横方向拘束効果を導入するために、横方向鉄筋による横方向拘束効果の定式化を行い、3次元有限要素解析を行うことで、断面の各位置で異なる横方向拘束効果を考慮した一軸コンクリート構成則を求めるための基礎的な検討を行った。

2. ファイバーモデルへの横方向拘束効果の導入

まず、今回検討を行う横方向拘束効果を考慮した一軸コンクリート構成則を導入したファイ

バーモデルと、通常のファイバーモデルとの比較を図-1に示す。

通常のファイバーモデルで用いる一軸のコンクリート構成則は、横方向拘束効果を厳密に考慮しておらず、この構成則を用いていては実際の横方向拘束効果を十分に評価することはできない。しかし、本研究で検討を行う横方向拘束効果を考慮したコンクリート構成則を、それぞれの要素に取り込むことにより、ファイバーモデルでも横方向拘束効果を十分に評価することが可能となる。

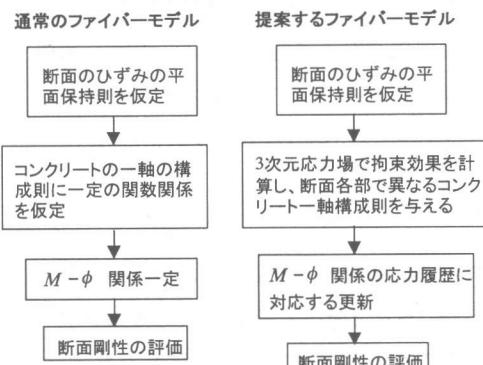


図-1 ファイバーモデルのフローチャート

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 名城大学専任講師 理工学部建設システム工学科 工博（正会員）

*3 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

3. 横方向鉄筋の拘束効果に関する定式化の目的

横方向鉄筋の拘束効果に関する定式化の目的は、2章でも述べたように図-2のような部材の剛性評価をファイバーモデルを用いて行う場合に、部材の任意断面を図-3のように取り出し、拘束効果を受ける現在の応力状態を解析することである。

横方向鉄筋の本数が少ない場合には、横方向鉄筋を直接棒要素で置き換えコンクリート要素を細かく分割すれば、通常のFEMによる解析が可能である。しかし、多数本が存在する場合、あるいは鉄筋とコンクリートとの間にすべりが生じる場合、さらに鉄筋の形状が湾曲している場合などにはそれが必ずしも容易ではない。そこで、参考文献¹⁾に取るような定式化を行い、図-3のようなモデルにおいて、横方向鉄筋の拘束効果を厳密に3次元有限要素法により解析する。

4. RC柱の単調軸載荷に対する数値解析

4.1 解析、実験概要

解析は参考文献¹⁾の定式化を、3次元の無筋コンクリートの力の釣り合い式に導入することにより行った。

コンクリートに対しては、古典塑性理論に基づいた破壊構成則を適用することとした。本研究では簡単のため、コンクリートの降伏関数 F は、次式のようなDrucker-Prager則を用いる。

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (1)$$

ここで、 α 、 k をどう決定するかが問題になってくるが、参考文献²⁾によれば若材令コンクリートに対して、コンクリートの粘着力を σ_0 、内部摩擦角を ϕ としてSaenzの式を用いて α 、 k を定めている。本研究ではその成果を硬化コンクリートにそのまま適用する。その場合、

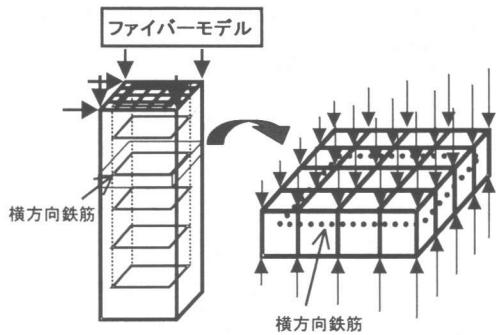


図-2 ファイバーモデル 図-3 考慮するモデル

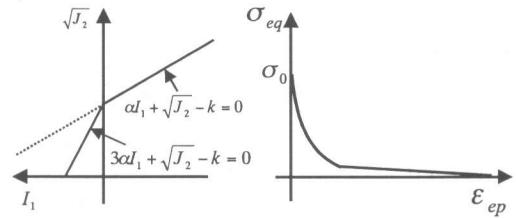


図-4 引張側において修正された
Drucker-Prager 則

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2)$$

$$k = \left(-\alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \left[\frac{\frac{E_0 \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{E_0}{E_1} - 2 \right) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,\max}} + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,\max}} \right)^2} + \sigma_0}{\varepsilon_{c,\max}} \right] \quad (3)$$

となる。ここに、

E_0 ：無応力時の接線弾性係数

$\varepsilon_{c,\max}$ ： f'_c に対するひずみ

$E_1 : f'_c / \varepsilon_{c,\max}$

である。しかし、式(1)はコンクリートの引張破壊を起こりにくくしてしまうことは経験的に知られている。そこで、 $I_1 > 0$ のとき、式(2)において

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (4)$$

とおき、さらに式(1)において $\alpha = 3\alpha$ として、

引張側の降伏を早めるようにした(図-4)。等価一軸応力ひずみ関係については

$$\sigma_{eq} = -\sigma_0 \{1 - \exp(-\mu \varepsilon_{ep})\} \quad (5)$$

で仮定し、急激なひずみ軟化を表現することとした(図-4)。ここで μ はひずみ軟化の程度を表す定数であり、 $\mu = 1.0 \times 10^4$ とした。

また、今回解析する実験データは前川らによるものである³⁾。表-1、図-5に供試体の諸元及び解析モデルを示す。実験は、載荷速度 $3-5 \mu \text{sec}$ で単調軸載荷されており、横方向鉄筋により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係が計測されている。本研究では1ステップの変位は $3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}$ とし、また、今回の解析ではコンクリートと横方向鉄筋は完全に付着していると仮定した。

4.2 解析結果及び考察

図-6に、軸方向応力-軸方向ひずみ関係及び平均拘束応力-軸方向ひずみ関係の、実験値と解析値の比較を示す。平均拘束応力 σ_v は、横方向鉄筋比 p 、横方向鉄筋の平均応力 \bar{f}_s を用いて式(6)により求められる³⁾。

$$\sigma_v = \frac{1}{2} p \bar{f}_s \quad (6)$$

また、図中の破線で示されている曲線は、同じ供試体における無筋コンクリートの場合の軸方向応力-軸方向ひずみ関係である。

図-6を見ると、ピーク時の応力の大きさは実験値と解析値でさほど違いはなかったが、ピーク時の軸ひずみは、実験値に比べ解析値は小さくなっている。これは、平均拘束応力-軸ひずみ関係を見ても分かるように、解析における横方向鉄筋のひずみの進行が実験に比べて早いためであるが、全体として見た場合、とりあえず5章の数値実験を行う意味があると判断した。

5. 横方向拘束効果を考慮したRC柱の3次元応力解析

5.1 解析概要

表-1 供試体諸元 (No. C16-075)

Outer size Sq. (mm)	Height (mm)	Tie outer size sq. (mm)	Tie diameter (mm)	Tie spacing (mm)	Lateral Steel ratio (%)
200	300	197	15.70	75	5.70
Steel		Concrete			
Yield stress (Mpa)	Young's Modulus (Gpa)	Unconfined strength (Mpa)	Initial Tangent Modulus (Gpa)		
333	204	36.9	29.1		

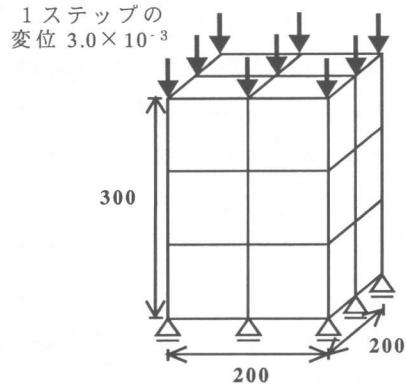


図-5 解析モデル (C16-075)

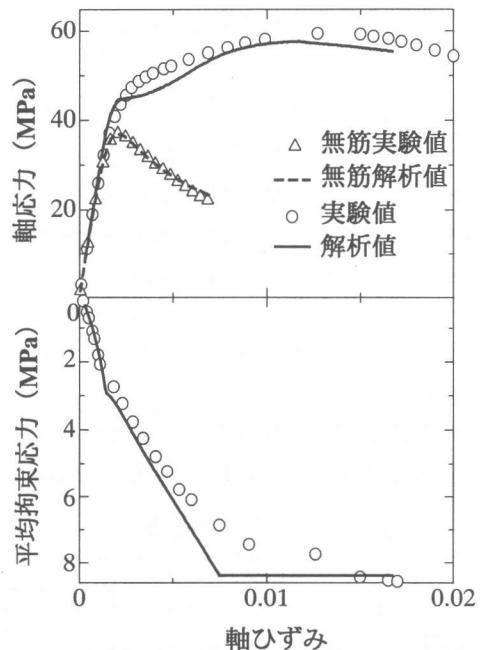


図-6 実験値と解析値の比較 (C16-075)

解析は図-7 及び図-8 に示す柱を、4 章で述べた解析手法により解析した。また、解析に用いた物性値を表-2 に示す。解析は軸方向の変位制御で行い、変位の与え方としては、図-9 に示すように Case.1~3 の 3 ケースで行った。それぞれのケースにつき横方向鉄筋は、D22, D16, 及び D10 の 3 種類ずつ用いた。横方向鉄筋は完全弾塑性体と仮定し、コンクリートと横方向鉄筋は完全に付着していると仮定した。

5.2 横方向拘束効果に関する解析的検討

図-10 に示される断面の各番号の位置における軸方向応力-軸方向ひずみ関係を図-11 に示す。図中の破線で描かれている曲線は、無筋コンクリートの軸方向応力-軸方向ひずみ関係である。また、実線で描かれている曲線は、Priestley らにより提案された式⁴⁾から算出される応力-ひずみ関係であり、×印で描かれている曲線は、道路橋示方書（V耐震設計編）に記載されている式⁵⁾により算出される応力-ひずみ関係である。

図-11において、Case.1 及び Case.2 の結果を見ると、横方向鉄筋の内側の方が外側よりも軸応力が大きく、横方向鉄筋の拘束効果がよく表現されていると言える。横方向鉄筋の内側においては、横方向鉄筋のコーナー部分に近づくに連れて軸応力が大きくなる。これは、参考文献 1) の定式化による影響が、コーナー付近の方が大きいためと考えられる。

また、横方向鉄筋の断面積が大きくなるほど、横方向鉄筋の内側の拘束効果は大きくなるが、

表-2 解析に用いた物性値

コンクリート		
ヤング率 E_c (GPa)	一軸圧縮強度 f'_c (Mpa)	f'_c に対する歪 ϵ_{co}
19.6	29.4	0.002
横方向鉄筋		
公称	鉄筋比 (%)	ヤング率 E_s (GPa)
D22	0.968	205.8
D16	0.497	
D10	0.178	

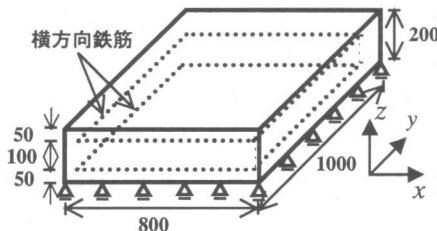
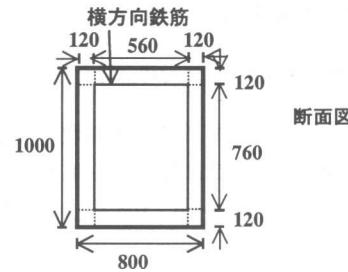


図-7 柱の形状

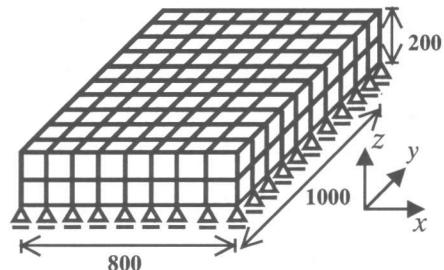


図-8 解析モデル

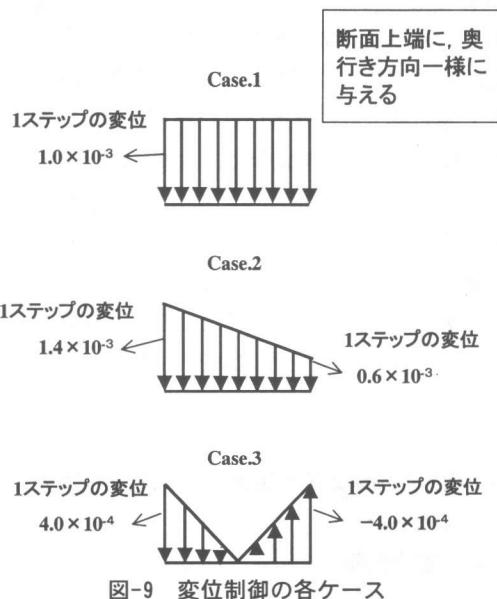


図-9 変位制御の各ケース

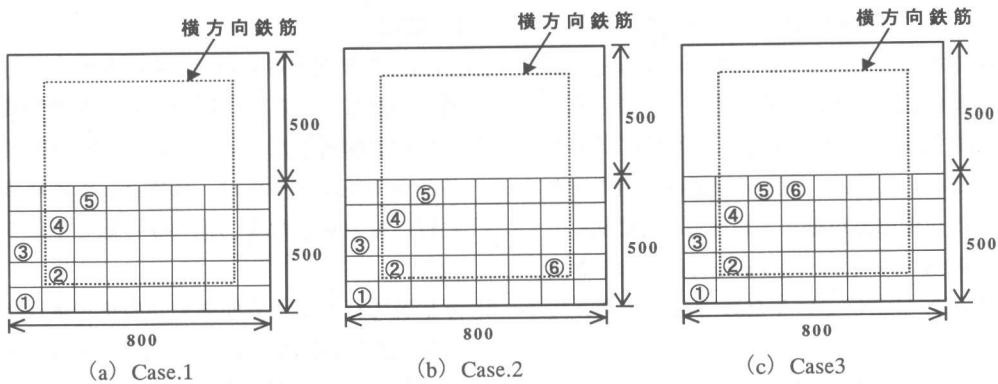


図-10 Case.1~3 の各番号位置

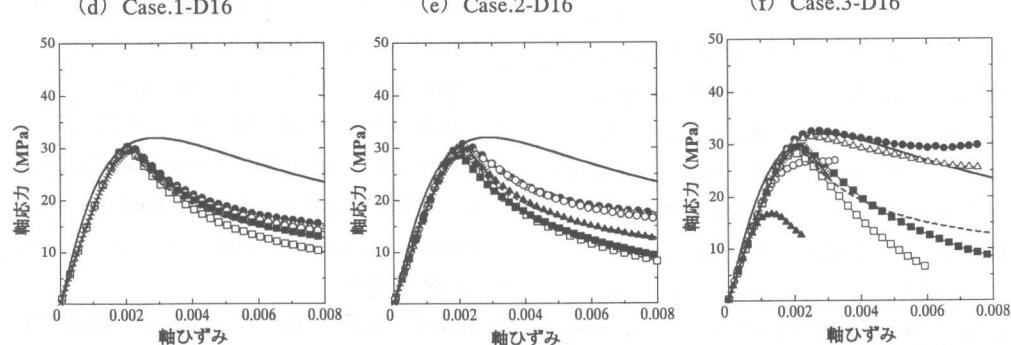
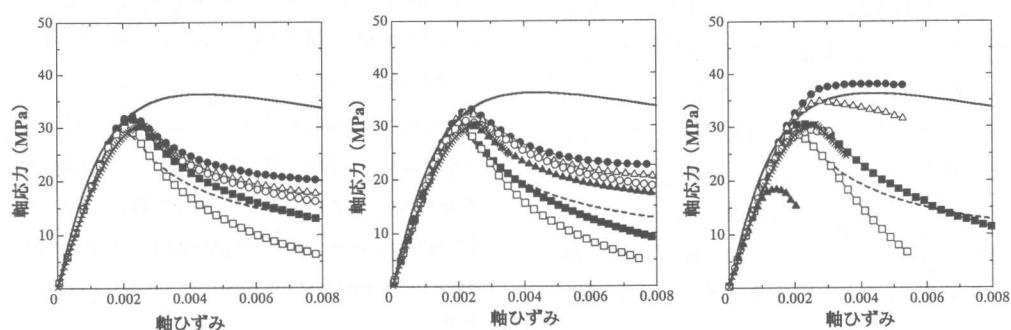
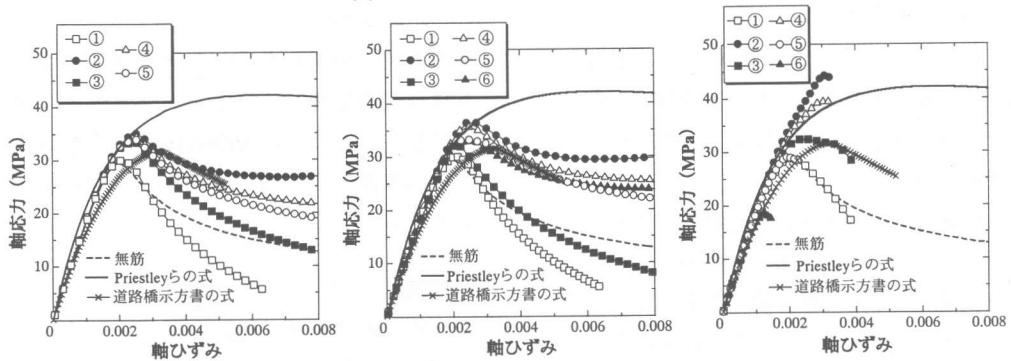


図-11 応力-ひずみ関係 (Case. 1~3)

反対に横方向鉄筋の外側の①の位置においては、横方向鉄筋の断面積が大きくなるほど、ピーク以降の軸応力の減少率が大きくなり、横方向鉄筋の外側と内側の軸応力の差が広がることがわかる。これは、横方向鉄筋の内側では水平方向に圧縮応力が生じており、これに反して横方向鉄筋の外側のかぶり部分では、水平方向に引張応力が生じているためであると考えられる。

Case.3においては、図-10の⑥の位置における軸応力が、無筋コンクリートの軸応力よりも大幅に下がっている。これは、断面の右半分で鉛直引張の変位を与えておりその影響で、⑥の位置では水平方向に引張応力が働くためであると考えられる。

また Priestley らの式及び道路橋示方書の式と今回の解析結果を比較すると、Case.1 と Case.2においては、横方向鉄筋の断面積が大きくなるほど、Priestley らの式は本研究の結果よりも大きめの強度をとっており、道路橋示方書の式については、拘束されたコンクリートのひずみは本研究の結果よりも大きめであるが、強度はやや小さめをとっていることがわかる。

Case.3においては D16 と D10 を用いた時に、横方向鉄筋のコーナー付近で、Priestley らの式と本研究の結果が比較的近い挙動を示したが、D22 を用いた場合には、コーナー付近での水平方向の圧縮応力が非常に大きくなり、Priestley らの式よりも軸応力が大きくなつた。

上に述べてきたように、本研究の解析結果では断面の各位置において軸応力にかなりの変化が見られるが、Priestley らの式や道路橋示方書の式ではこれらの変化を評価していない。いずれにしろ一般的な結論を導くために、より多数の数値実験を行い、横方向拘束効果を考慮した一軸コンクリート構成則を提案し、ファイバーモデルに取り込むことによって、Priestley らの式及び道路橋示方書の式と $M - \phi$ 関係の比較を行う必要がある。

6. 結論

以下に、本研究で得られた結論を挙げる。

- 1) 横方向鉄筋で拘束された RC 柱の単調軸載荷実験を解析したところ、ピーク時のひずみにやや差はあったが、全体として実験値に近い軸方向応力-軸方向ひずみ応答が得られた。
- 2) 本研究で行った横方向拘束効果を考慮した 3 次元応力解析により、断面内の各位置によって軸方向応力-軸方向ひずみ関係が異なることが確認された。
- 3) 横方向拘束効果を考慮した一軸コンクリート構成則を提案し、ファイバーモデルに取り込むことによって、Priestley らの式及び道路橋示方書の式と $M - \phi$ 関係の比較を行う必要がある。

参考文献

- 1) 中島望、石川靖晃、田辺忠顯：ファイバーモデルにおける横方向拘束効果の定式化と軸方向コンクリートの構成則に関する研究、JCI 年次論文報告集、Vol.22, 第 3 号, pp181-186, 2000 年
- 2) Tanabe,T., Ishikawa,Y., and Ando,N. : Visco-Elastic and Visco-Plastic Modeling of Transient Concrete, Proc.of the EURO-C 1998 Conference on Computational of Concrete Structures.Badgastein.Austria, pp441-453,Mar. 1998
- 3) Pallewatta.T.M : Efficiency of Lateral Reinforcement on Capacity of Core Concrete in Compression, 東京大学博士論文, 1993 年
- 4) Mander,J.B., Priestley,M.J.N., and Park,R. : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.114, No.8, August. 1988, pp.1804-1826
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書（V 耐震設計編）・同解説、丸善, pp130-131, 1996 年