

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ファインド コンクリートの三次元有限要素解析

小宮 敏明*¹ 前田 欣昌*² 畑中 重光*³ 水野 英二*⁴

要旨：筆者らが開発したコンクリートの軟化挙動を再現できる構成モデルを三次元有限要素プログラムに組み込み、コンクリートの破壊状況を解析的に調べ、実験値との比較を行うことを目的としている。本研究では、コンファインドコンクリート柱試験体の圧縮破壊挙動に及ぼす材料特性および横補強筋の拘束効果に関するパラメトリックスタディを行う。

キーワード：有限要素法解析、構成則、ひずみ軟化、圧縮、コンファインド、拘束圧

1. はじめに

近年、コンクリートのひび割れが発生した後の高度に非線形な変形挙動も、有限要素法 (FEM) の進歩などにより予測することが可能になってきた。しかし、従来の有限要素法では、コンクリート構造物のせん断破壊などの脆性的な挙動の安定した予測や、構造物の寸法の影響の予測を正しく行うことは難しい。とりわけ、ひずみ軟化挙動に大きく影響される、コンクリート構造物・部材の塑性変形挙動の解析では、ひずみ軟化域での構成モデル[1][2]の導入が必要となる。

筆者らは、別報[3]にて、コンクリートの圧縮軟化型構成モデル[1][2]を引張軟化挙動の予測が可能となるよう拡張し、モデルパラメータの再整理を行った。本研究では、この構成モデル[3]を三次元有限要素プログラム (FEAP) に組み込み、コンクリート試験体に対する横補強筋のコンファインド効果を明らかにするためのパラメトリックスタディを行う。

2. 解析方法と有限要素解析パラメータ

2.1 有限要素解析モデル

(1) 解析モデル

本研究では、**図-1**に示すような高さ80 cm、幅40 cm、奥行き40 cmのコンクリート角柱体を解析対象として、各種横補強筋が存在する場合の有限要素解析を行う。各種横補強筋の諸量については後述する。コンクリート部分の上下左右対称性から解析対象領域として、**図-2**に示すような1/8の領域 (**図-1**に斜線で示す20×20×40 cmの部分)を用い、 $X > 0$ 、 $Y > 0$ 、 $Z > 0$ の範囲で解析を行う。拘束条件は、 XY 、 YZ および ZX 平面上の節点をそれぞれ $Z = 0$ 、 $X = 0$ および $Y = 0$ の位置で固定するものとした。

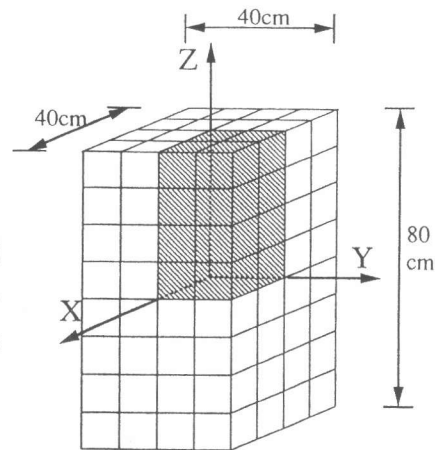


図-1 解析試験体 (1/8)

(2) メッシュサイズ

有限要素の寸法は、コンクリートの構成則を導く際に用いた供試体の寸法と一致させることが

* 1 三重大学大学院 工学部建築学科 (正会員)
 * 2 名古屋大学大学院 工学部土木工学科 (正会員)
 * 3 三重大学助教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)
 * 4 名古屋大学助教授 工学部土木工学科, Ph. D. (正会員)

肝要である。コンクリート構造物の寸法効果解析の際にはこの点に留意することが極めて重要である。軟化型コンクリート構成モデル[3]の開発に用いた実験データ[1][2]がサイズ(10×10×10cm)の角柱体を基準としているため、ここでは、有限要素解析でのコンクリートの大きさを、1辺が10cmの立方体になるように分割する。それゆえ、本解析ではコンクリート要素数は16となる。

(3) 有限要素と各種構成モデル

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[4]を組み込んだ有限要素プログラム(FEAP)[5]を使用する。コンクリートの構成モデルには、筆者らのコンクリート軟化モデル[3]を採用し、横補強筋には完全弾塑性型の von-Misesモデル[6]を用いた。ひずみ軟化領域まで解析するため、負荷は変位制御とする。

(4) 材料定数とモデルパラメータ

コンクリートの弾性諸定数として、ポアソン比 0.2、ヤング係数 210 GPa、一軸圧縮強度 $f_c' = 30$ MPaを、鉄筋の弾性諸定数として、ポアソン比 0.3、ヤング係数 2100 GPa、一軸降伏応力 $\sigma_y = 300$ MPaを用いた。コンクリート構成モデルのパラメータは、一軸圧縮強度を用いることにより決定することができる。詳細については、文献[3]を参照されたい。

2.2 コンファインド効果に関する横補強筋のパラメータ

(1) 横補強筋の配置位置および断面積の決定

図-3に示すように、各種横補強筋はコンクリート要素の境界で接するように配置した。横補強筋からコンクリート部分に加わる横拘束圧は、理想的(横補強筋が供試体に一樣に巻かれ(間隔 $S=0$)、かつすべての横補強筋が同時に降伏したと仮定した場合)には、次式(1)で与えられる。

$$\sigma_{LY} = \frac{2A_s \cdot F_Y}{S \cdot D} = P_s \cdot F_Y = \frac{1}{2} \rho_s \cdot F_Y \quad (1)$$

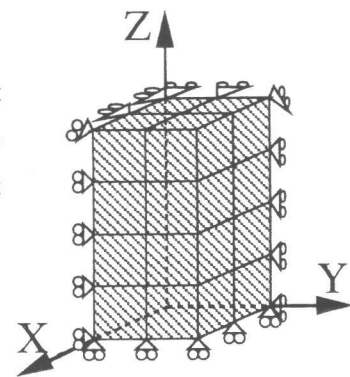
ここで、

σ_{LY} : 拘束圧、 D : 角柱体の1辺、 S : ピッチ、 A_s : 横補強筋の断面積、 F_Y : 横補強筋の降伏強度、 P_s : 横補強筋の断面積比、 ρ_s : 横補強筋の体積比

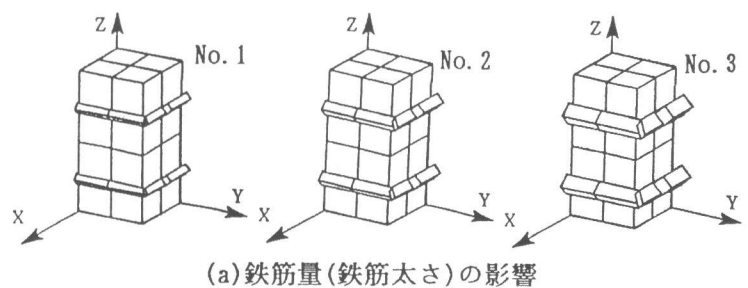
それゆえ、本解析では、式(1)を用いることにより、横補強筋の断面積およびピッチを変化させ、算定拘束圧を1.5 MPa~12 MPaの間で各種変化させるように解析モデルを設定した。

(2) 横補強筋のパラメータ

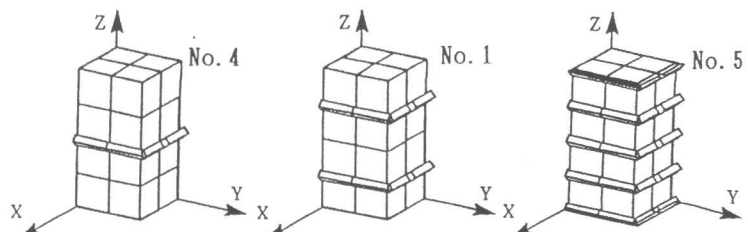
図-3には、横補強筋の配置位置および断面積を変化させた場合の各種解析モデル(No.1~No.5)が示さ



(ローラーは面内を動く)
図-2 解析試験体の境界条件



(a)鉄筋量(鉄筋太さ)の影響



(b)ピッチ(鉄筋間隔)の影響

図-3 解析試験体

れている。図中の解析モデルのうち、基本試験体はNo. 1であり、式(1)による拘束圧 σ_{LY} は3MPaとなる。No. 1~No. 5までの横補強筋の諸量の詳細については、表-1と表-2に記述してある。表中の下線の引いてあるものが基準値であり、各解析において共通である。

3. 解析結果

基本解析モデルNo. 1を対象とした解析結果から得られた損傷度の進展状況を図-4に示す。ここで、損傷度とは、筆者らの軟化型コンクリート構成モデルで用いられている強度パラメータ F_p とその最大値 η_1 との比(F_p/η_1)で定義される。詳細については文献[3]を参照されたい。

図-4(a)~(d)には、それぞれ軸ひずみ ε が 1.5×10^{-3} 、 3.0×10^{-3} 、 4.5×10^{-3} 、 6.0×10^{-3} 時点における試験体内部(各ガウス点)の損傷度の分布を示してある。ここで、各図(a)~(d)において、①~④の図は、ZY平面に平行でこの順に内側から外側へ並ぶ平面(32ガウス点を含むZY平面に平行な平面)内の損傷度である。図-4(とくに④の図を参照のこと)によれば、横補強筋から離れている点は、ひずみが進むにつれて側方へ膨らむとともに、大きな損傷度を示す。また、横補強筋の近傍で拘束力を直接受ける点(特に隅角部)では、損傷度の大きな進展は見られない。ここで解析結果によれば、側方へ膨らむ現象は、これらの点が側方へ引張力を受けているのではなく、横拘束を直接受ける点と比較すると、受ける圧縮力がより小さいために生じていることが分かった。

以下、試験体全体の平均ひずみが1%に至るまでの応力-ひずみ挙動に及ぼす

表-1 鉄筋量(鉄筋太さ)の影響

	S (cm)	A_s (cm ²)	F_y (MPa)	P_s (%)	ρ_s (%)	σ_{LY} (MPa)
No. 1		<u>4</u>		1	2	<u>3</u>
No. 2	20	8	300	2	4	6
No. 3		16		4	8	12

表-2 鉄筋量(鉄筋のピッチ)の影響

	S (cm)	A_s (cm ²)	F_y (MPa)	P_s (%)	ρ_s (%)	σ_{LY} (MPa)
No. 4	40			0.5	1	1.5
No. 1	<u>20</u>	4	300	1	2	<u>3</u>
No. 5	10			2	4	6

S:ピッチ A_s :横補強筋の断面積 F_y :横補強筋の断面積
 σ_{LY} :拘束圧 P_s :横補強筋の断面積比 ρ_s :横補強筋の体積比

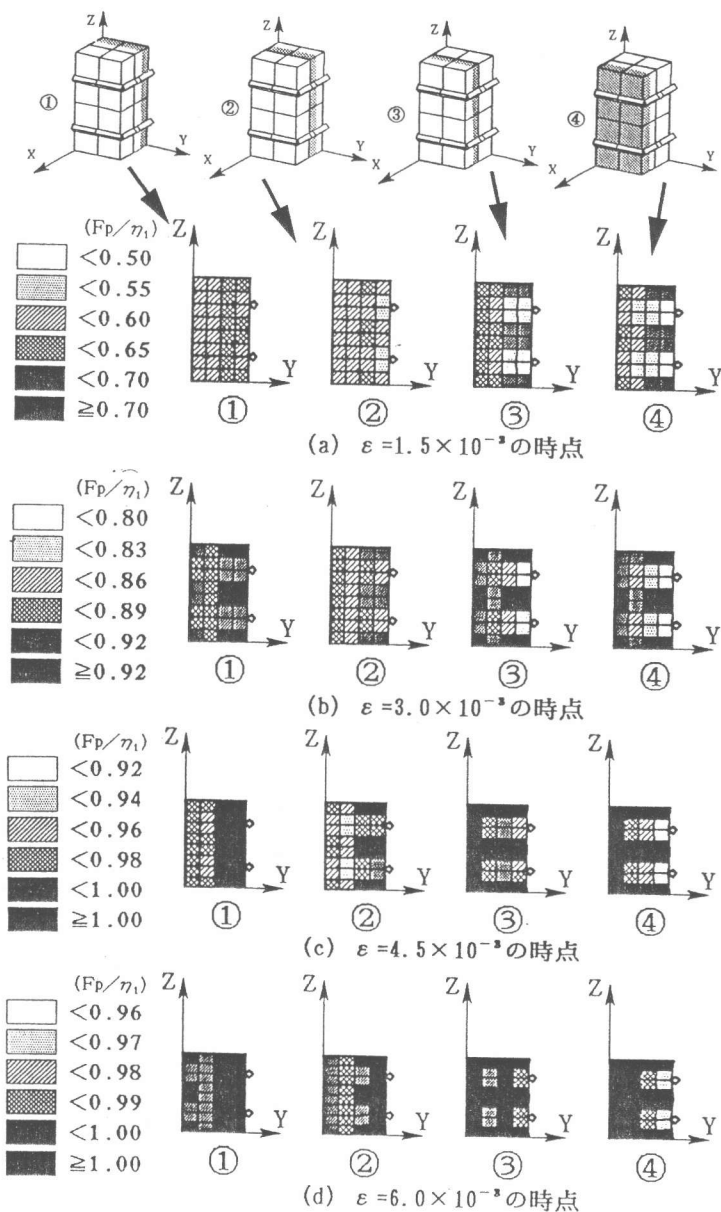


図-4 試験体No. 1の損傷度 F_p/η_1 (変位は50倍)

各要因の影響について考察する。なお、応力-ひずみ曲線の応力の値は、解析モデルの最上面の節点力の和を最上面の面積で割ったものである。

3.1 横補強筋量(鉄筋の断面積)の影響

横補強筋量の影響を示した図-5によれば、鉄筋の断面積を増加させることにより大きな拘束効果が得られることが分かる。図-6(a)および(b)は、試験体No.1およびNo.2について、隅角部の横補強筋降伏後、試験体の Gauss 点に加わる等価拘束圧(詳細は文献[3]参照)の値を示したものである。

なお、本解析では、1/8モデルにおいて上下に対称な等価拘束圧が得られているため試験体の下方半分の Gauss 点の情報を下の層から順に①→④の図に示してある。先に述べた式(1)によれば、理想的には、

試験体No.1は $\sigma_{LY}=3\text{MPa}$ 、試験体No.2は $\sigma_{LY}=6\text{MPa}$ 、の一様な拘束圧を受けると予想される。これらの図から分かるように、鉄筋の断面積が増加する(No.1→No.2)に従って隅角部の横補強筋降伏後の等価拘束圧の値も大きくなる。

図-7は、各試験体の平均ひずみ $\epsilon=3.0 \times 10^{-3}$ 時点での損傷度(No.1は図-4で既出)を示したものである。図によれば横拘束筋の断面積が増大するほど

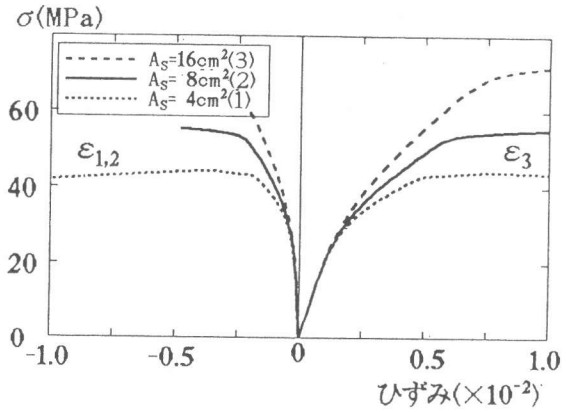


図-5 断面積(A_s)の影響

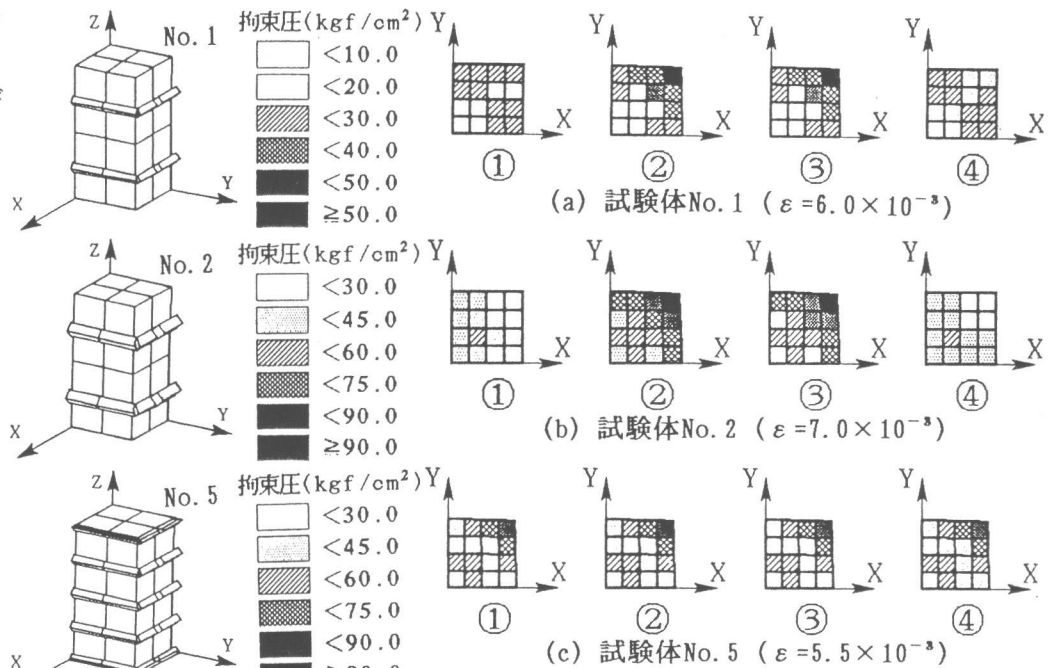


図-6 隅角部の鉄筋降伏時点の等価拘束圧 σ_c

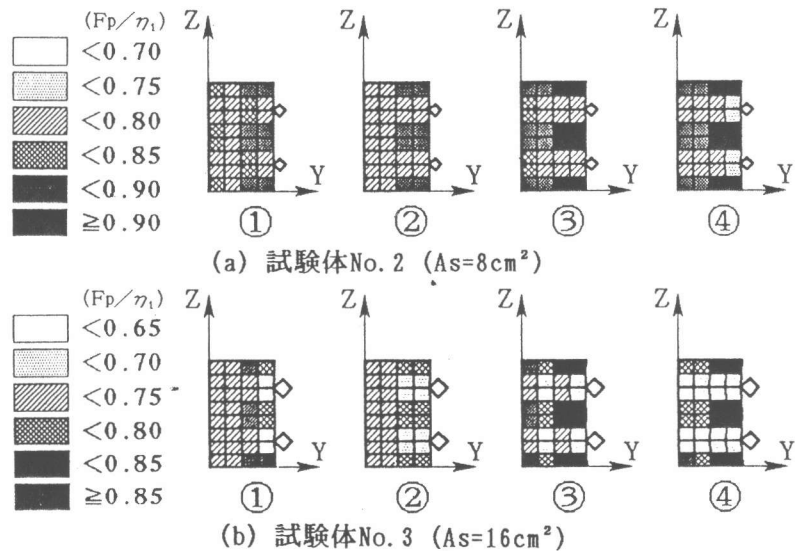


図-7 各試験体の $\epsilon=3.0 \times 10^{-3}$ 時点の損傷度 F_p/η_1

(No. 2→No. 3) 損傷度は小さくなっている。ここで、拘束圧と損傷度の関係を説明した図-8を参照していただきたい。ガウス点の応力状態を調べてみると、一般に図中のベクトルのように変動する場合が多い。この図の中の弱い圧縮、強い圧縮とは、それぞれ横拘束圧の増分が小さい場合、大きい場合に相当する。拘束圧が圧縮で、かつその圧縮力が大きいほどある負荷状態 (F_p) の破壊時の損傷 (η_1) に対する比率 (F_p/η_1) すなわち損傷度は小さくなる。逆に弱い拘束圧の荷経路の方が強度パラメータ F_p の増加してゆく割合が大きいことが分かる。

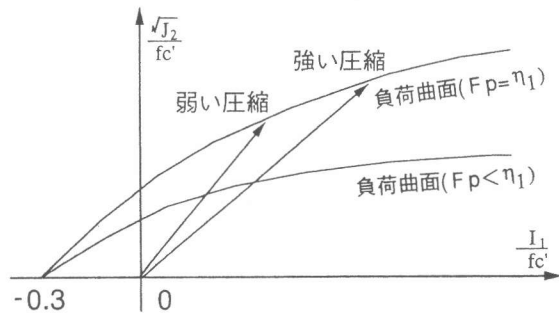


図-8 等価拘束圧の違いによる荷経路の概念図

3.2 横補強筋のピッチ(間隔)の影響

横補強筋のピッチの影響を示した図-9によれば、横補強筋のピッチを小さく(同時に横補強筋量も増大)することにより、大きな拘束効果が得られることが分かる。また、前掲の図-6には、

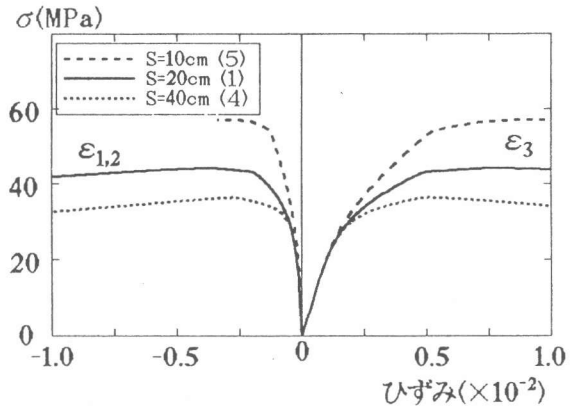


図-9 ピッチ(S)の影響

試験体No. 1およびNo. 5について、隅角部の横補強筋降伏後にガウス点に加わる等価拘束圧の値を示してある。これらの図から分かるように、横補強筋の間隔が狭まる(No. 1→No. 5)につれて等価拘束圧の値も大きくなる。平均ひずみ $\epsilon = 3 \times 10^{-3}$ 時点の試験体の損傷度を示した図-10および前掲の図-4によれば、横拘束筋から離れたガウス点で大きな損傷度に至っていることが分かる。

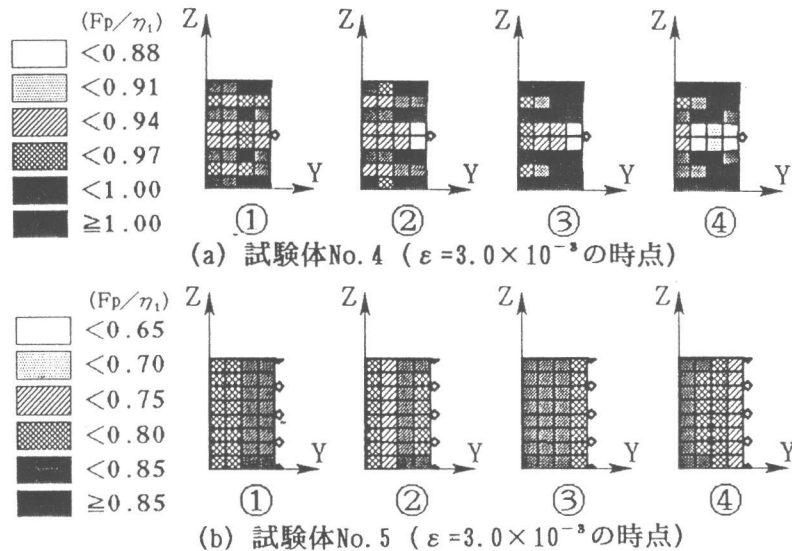


図-10 各試験体の $\epsilon = 3.0 \times 10^{-3}$ 時点の損傷度 F_p/η_1

3.3 拘束圧一定時の比較

式(1)より計算される横拘束圧 σ_L が6MPaである場合について、鉄筋の断面積またはピッチのみを変化させた2つの場合(No. 2およびNo. 5)を比較する。

図-11によれば、鉄筋のピッチを小さくした方が、鉄筋の断面積を増すよりわずかではあるが大きな強度を示した。これは、損傷度の分布を示した図-7(a)および図-10(b)の比較から分かるように、ピッチを細かくして拘束力を伝える方法がコンクリートの変形を抑えるのに極めて有効であるからである。図-7(b)に示した試験体No. 2の場合には、鉄筋の断面積が大きくなってピッチが粗いため、鉄筋によって拘束されていない要素が大きく外へと変形してしまってい

る。これらの効果を数値で比較するため表-3に試験体内すべての Gauss 点の等価拘束圧の平均値 σ_{AVE} を示した。

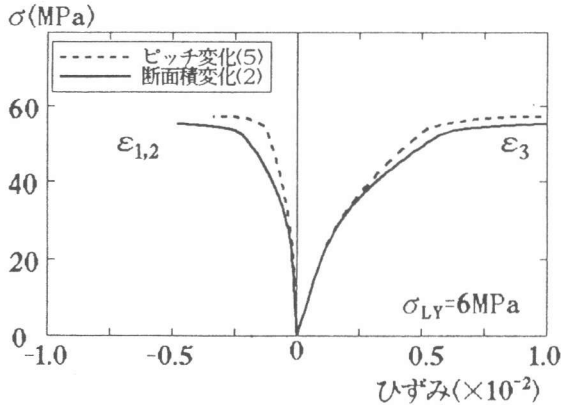


図-11 断面積, ピッチの拘束圧への影響

表-3 横補強筋の等価拘束圧

	σ_{LY} (MPa)	σ_{AVE} (MPa)
No. 1	3	2.42
No. 2	6	4.72
No. 3	12	9.12
No. 4	1.5	1.14
No. 5	6	4.89

σ_{LY} : 式(1)から求めた拘束圧
 σ_{AVE} : Gauss 点の平均の等価拘束圧

3. 4 角形横補強筋の拘束圧について

既往の実験結果によれば、一般に角形コンファインドコンクリートの場合、円形コンファインドコンクリートの2分の1程度の拘束効果しか得られない。しかし、本解析に用いている試験体の要素は、全て隣合う要素と節点を共有しており、滑りを考慮していないため、予想以上の高い拘束圧が得られている(表-3)。

前掲の図-6 (b)および(c)を比べると、Gauss 点での等価拘束圧の最大値は試験体No. 5に比べNo. 2の方が大きい。表-3の σ_{AVE} の値では、逆転していることが分かる。また、図-6に示された等価拘束圧の分布から、鉄筋で2辺を拘束される隅角部が大きな拘束力を受け、その隅角部から離れるに従って拘束力が小さくなること分かる。

4. まとめ

- 1) コンクリートの軟化を含む非線形挙動をシミュレートするには、要素レベルでひずみ軟化を再現できる構成モデルの組み込みが必須である。筆者らの提案し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に組み込めば、ひずみ軟化域をも含むコンファインドコンクリートの圧縮破壊挙動をシミュレートすることができる。
- 2) 有限要素の寸法は、コンクリートの構成則を導く際に用いた供試体の寸法(ここでは10×10×10cm)と一致させることが肝要である。コンクリート構造物の寸法効果解析の際にはこの点に留意することが極めて重要である。
- 3) 本シミュレーションによって得られた傾向、すなわちコンクリートの圧縮破壊挙動に及ぼす横補強筋量および横補強筋ピッチの影響に関する解析結果は、実験結果と定性的に一致するといえる。定量的な評価については今後さらに検討を進めたい。

【謝辞】 本研究に際し、御助力を得た栄麻希さん(名古屋大学)および沼田茂己君(三重大学大学院)に深謝致します。また、本研究費の一部は、平成6,7年度文部省科研費一般研究(C)(畑中・水野)によった。

【引用文献】

- [1] 水野・畑中、「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、第3巻、第2号、pp. 85-95, 1991.
- [2] 水野・畑中、「塑性理論による載荷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、第3巻、第2号、pp. 1-13, 1992.
- [3] 栄・前田・畑中・水野、「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報告集、第18巻、1996
- [4] 伊藤、「形状・寸法効果を考慮したコンクリート構成モデルの開発とそのコンクリート充填鋼管柱有限要素解析への応用」、名古屋大学土木工学科修士論文、平6.
- [5] O. C. Zienkiewicz, 'The Finite Element Method Third Ed.' (吉識・山田監訳「マトリックス有限要素法」), pp. 672-796, 培風館, 1984.
- [6] W. F. Chen, and Mizuno, E., Nonlinear Analysis in Soil Mechanics-Theory and Implementaion-, Elsevier, Amsterdam, 661 pp, 1990