

# 論文 軸圧縮力を受けるコンファインドコンクリートの内部性状に関する解析的研究

伊藤 誠<sup>\*1</sup>・水野 英二<sup>\*2</sup>・畑中 重光<sup>\*3</sup>

要旨：コンクリートの一軸圧縮強度  $f_c'$ ，面積横拘束筋比  $p_s$ ，横拘束筋の降伏強度  $\sigma_y$  をパラメータとして，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を行った。「拘束効率」および「力学的鉄筋比」( $= \sigma_y \times p_s / f_c'$ ) なる指標を用いて解析結果を整理することにより，コンクリートの内部性状を考察した。その結果，力学的鉄筋比が小さい場合は，拘束効果が内部全体に作用しほぼ一様であるのに対し，力学的鉄筋比が大きい場合は，拘束効果は横拘束筋が巻かれている断面の隅角部にのみ大きく作用し，中心部まで拘束効果が作用しないことが分かった。

キーワード：コンファインドコンクリート，力学的鉄筋比，等価拘束圧，拘束効率

## 1. はじめに

角形の横拘束筋で補強されたコンファインドコンクリートでは，円形の横拘束筋で補強されたものと比べて，内部での拘束度合が不均一になることが知られている。しかし，コンファインドコンクリート内部における拘束度合に関する研究はあまり見られない。塩屋ら<sup>1)</sup>は，力学的対称性を利用したコンクリート内部の圧縮応力分布を測定する方法を考案し，実験的な研究を行っている。また，コンファインドコンクリート内部の性状についての解析的な研究は，吉田ら<sup>2)</sup>が円形断面で，宮野ら<sup>3)</sup>が角形断面で検討しているが，内部性状に関する研究はまだ十分ではないといえる。

筆者らは昨年<sup>4)</sup>の報告でコンクリートの一軸圧縮強度，面積横拘束筋比をパラメータとしたコンファインドコンクリートの軸圧縮三次元有限要素解析を行い，面積横拘束筋比がコンクリート全体の拘束効果に及ぼす影響について考察したが，内部性状については十分な検討をしていなかった。

そこで，本研究では，横拘束筋の降伏強度を

パラメータに加え，コンファインドコンクリートの軸圧縮解析を行い，各種パラメータがコンクリートの内部性状に与える影響を，「拘束効率」という指標で評価した。

## 2. 三次元有限要素解析

### 2.1 解析方法および材料構成則

本研究では，三次元 FEM (有限要素法) 解析プログラム DIANA を用いて解析を行う。鉄筋には DIANA 既存の「von Mises の降伏基準」を適用し，Beam 要素でモデル化した。また，コンクリートには水野らが開発した「圧縮軟化型モデル」<sup>5)</sup>をユーザーサブルーチンに導入して適用し，8 節点アイソパラメトリック要素でモデル化した。本解析は軸圧縮解析であるため，コンクリートはポアソン効果によって側方に膨らみ，横拘束筋からの受動拘束圧を受けることになる。しかしながら，鉄筋とコンクリート間には軸方向の滑りがあるとしてもコンクリートに作用する拘束効果にはほとんど影響がないと考えられるので，鉄筋とコンクリートの間については完全付着と仮定した。

\*1 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻 工修 (正会員)

\*2 中部大学 工学部土木工学科教授 Ph.D. (正会員)

\*3 三重大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

表 - 1 解析パラメータおよび材料定数

コンクリート			横拘束筋			
一軸圧縮強度 $f_c'$ (MPa)	ヤング係数 $E_C$ (MPa)	ポアソン比 $\nu$	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	ヤング係数 $E_s$ (MPa)	ポアソン比 $\nu_s$	面積横拘束筋比 $\rho_s$ (%)
24	$2.5 \times 10^4$	0.2	175	$2.1 \times 10^5$	0.3	0.0, 0.1, 0.2,
30	$2.8 \times 10^4$		350			0.5, 1.0,
50	$3.3 \times 10^4$		700			2.0, 4.0,
70	$3.7 \times 10^4$					5.0, 7.5, 10.0

## 2.2 解析モデルおよび解析ケース

解析モデルは図 - 1 (a) に示すような角形鉄筋コンクリート柱を対象として、図 - 1 (b) に示すように 1/4 モデルを考慮した。また、図 - 1 (c) に示すような横拘束筋が巻かれている一部についてもモデル化を行った。両者の解析結果（平均軸方向応力 - 平均軸

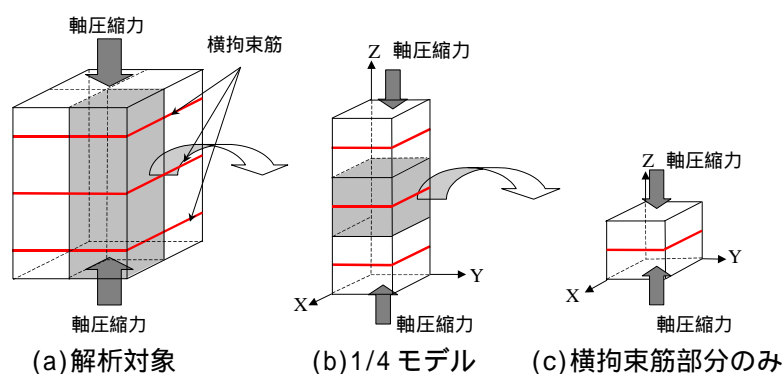


図 - 1 解析モデルの概要

方向ひずみ関係) を比較したところ一致したため、図 - 1 (c) に示すような解析モデルを用いることにした。一連の解析<sup>4)</sup>では、解析モデルの1辺の寸法を 20 cm ~ 80 cm まで変化させて解析を実施しているが、本報では図 - 2 に示すような実橋脚の大きさに近い解析モデルである(X, Y) = (80 cm, 80 cm) を対象とした。また、コンクリートに適用している「圧縮軟化型モデル」は、1辺が 10 cm のコンクリート供試体の三軸圧縮実験結果に基づいていることから、メッシュの基本サイズは 10 cm × 10 cm × 10 cm とした。境界条件は X=0, Y=0, Z=0 の面に対しそれぞれ X 方向, Y 方向, Z 方向の変位を拘束した。解析は変位制御で行った。また、解析ケースは、表 - 1 に示すように、一軸圧縮強度  $f_c'$  を 4 種類、降伏強度  $\sigma_y$  を 3 種類、面積横拘束筋比  $\rho_s$  を 10 種類とし、合計 120 ケース行った。

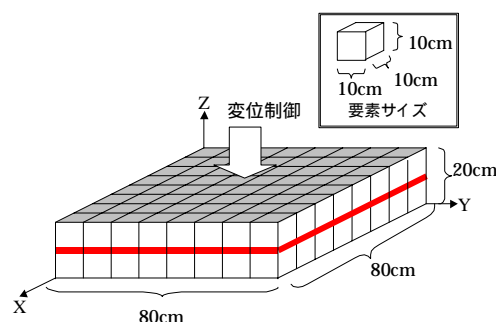


図 - 2 本解析におけるメッシュ分割図

## 3. 解析結果

解析により得られた平均軸方向応力 - 平均軸方向ひずみ関係を、コンクリートの一軸圧縮強度  $f_c' = 24$  MPa および 70 MPa の場合について図 -

3, 図 - 4 に示す。各図において、横軸は平均軸方向ひずみ、縦軸は平均軸方向応力を示している。図をみると、いずれのケースにおいても、面積横拘束筋比が大きくなるにつれて応力 - ひずみ曲線における最大圧縮応力やピークひずみ値は大きくなり、横拘束筋による拘束効果が現れている。しかし、ピーク後の挙動は、コンクリートの一軸圧縮強度が小さい場合、応力 - ひずみ曲線は延性的であるが、コンクリートの一軸圧縮強度が大きい場合、応力 - ひずみ関係は脆性的になっていく傾向にある。また、横拘束筋の降伏強度が大きいほど、最大圧縮応力が大きくなる傾向にあることが分かる。

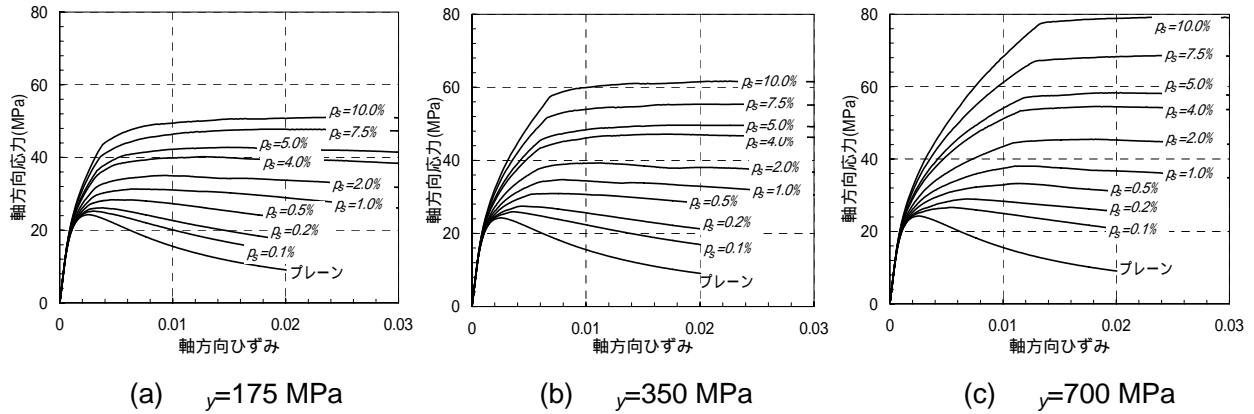


図 - 3  $f'_c=24$  MPa の場合の平均軸方向応力 - 平均軸方向ひずみ関係

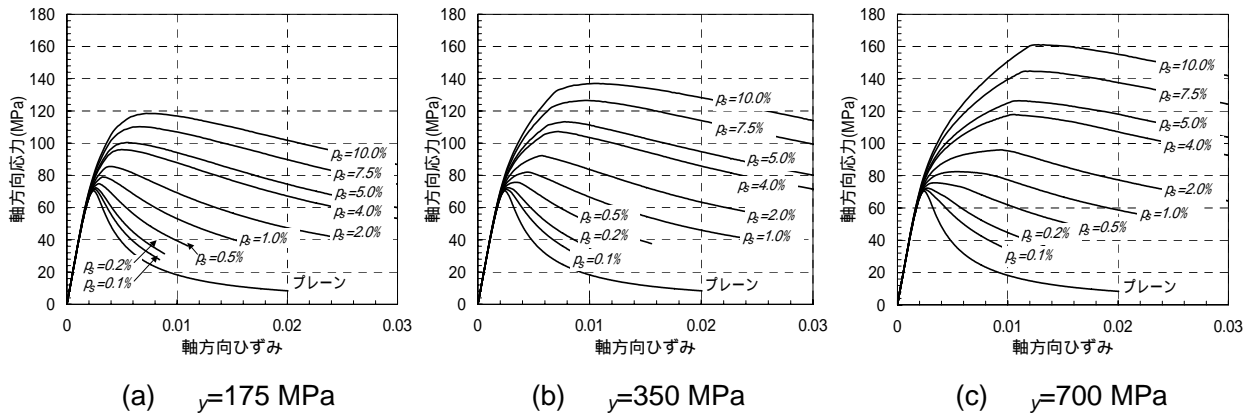


図 - 4  $f'_c=70$  MPa の場合の平均軸方向応力 - 平均軸方向ひずみ関係

#### 4. コンクリートの内部性状に関する考察

##### 4.1 等価拘束圧の定義

等価拘束圧  $L$ <sup>5)</sup>とは、一般応力状態を三軸主応力状態に換算したときの拘束圧である。図 - 5 にその概要図を示す。载荷により応力状態が点 A の時、点 A から静水圧軸 ( $I_1$  軸) に向かって  $1/\sqrt{3}$  の傾きで下るした直線と静水圧軸 ( $I_1$  軸) との交点の値を  $1/3$  したものを等価拘束圧  $L$  とする。

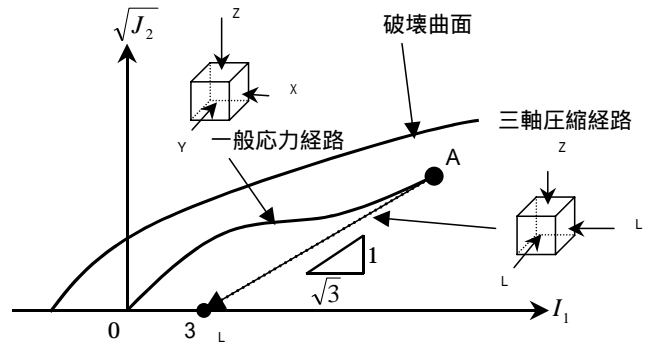


図 - 5 等価拘束圧  $L$  の概要図

##### 4.2 拘束効率 $R$ <sup>4)</sup>

内部コンクリートへの拘束効果を「拘束効率」という指標で評価する。拘束効率  $R$  は次の式により算定する。

$$R = \frac{\sigma_L}{\sigma_{LY}} \quad (1)$$

$$\sigma_{LY} = p_s \cdot \sigma_y \quad (2)$$

ここで  $L$  は 4.1 で定義した等価拘束圧である。また、 $L_Y$  は全鋼材降伏時に円形断面に働く計算

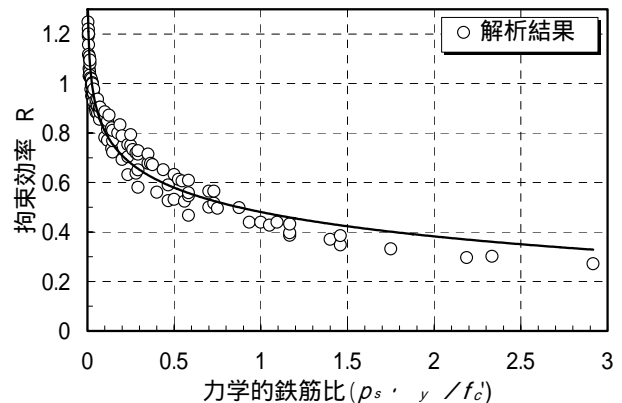


図 - 6 拘束効率と力学的鉄筋比の関係

上の側圧であり、 $p_s$  は面積横拘束筋比、 $\sigma_y$  は横拘束筋の降伏強度である。解析対象は角形断面であるが、式(2)により  $L_Y$  を計算した。

また、コンクリートの一軸圧縮強度、面積横拘束筋比、横拘束筋の降伏強度、の3つのパラメータを用いて力学的鉄筋比 ( $\sigma_y \times p_s / f_c'$ ) を定義した。各解析ケースから求められる力学的鉄筋比と拘束効率  $R$  との関係を図 - 6 に示す。等価拘束圧は解析モデルにおいて各積分点で計算されるが、図 - 6 では各積分点での等価拘束圧をモデル全体で平均した値を用いて拘束効率を算定した。

また、本研究では面積帯鉄筋比の影響を定性的に検討するために、10%までパラメトリックに変化させていること、横拘束筋の降伏強度を高強度 ( $\sigma_y=700$  MPa) としていることから、力学的鉄筋比が一般的な範囲(0~0.3)を超えている解析ケースもあるが、拘束効率の低減傾向を考察するために、図 - 6 では力学的鉄筋比=3.0まで表示している。図より、力学的鉄筋比が大きくなるにつれて、モデル全体に及ぼす拘束効果は小さくなる傾向にあることがわかる。

また、本研究では面積帯鉄筋比の影響を定性的に検討するために、10%までパラメトリックに変化させていること、横拘束筋の降伏強度を高強度 ( $\sigma_y=700$  MPa) としていることから、力学的鉄筋比が一般的な範囲(0~0.3)を超えている解析ケースもあるが、拘束効率の低減傾向を考察するために、図 - 6 では力学的鉄筋比=3.0まで表示している。図より、力学的鉄筋比が大きくなるにつれて、モデル全体に及ぼす拘束効果は小さくなる傾向にあることがわかる。

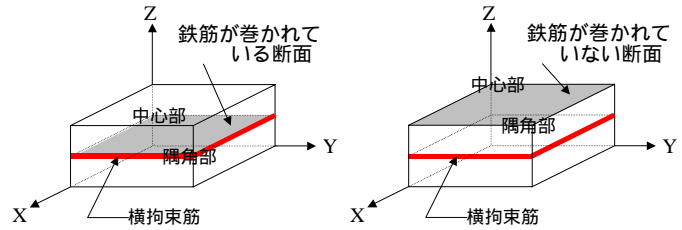


図 - 7 表示断面

#### 4.3 拘束効率の分布

この傾向の原因を検討するために、図 - 7 に示すように、鉄筋が巻かれている断面および鉄筋が巻かれていない断面における拘束効率の分布を調べた。

図 - 8 には力学的鉄筋比が 0.100 ( $\sigma_y=175$  MPa,  $f_c'=70$  MPa,  $p_s=4.0\%$ ) の場合、図 - 9 には力学的鉄筋比 1.167 ( $\sigma_y=700$  MPa,  $f_c'=24$  MPa,  $p_s=4.0\%$ ) の場合を示す。各図において、XY 平面からの高さが拘束効率の大きさを表しており、コンターでは拘束効率 1.0 以上は同色で表示してある。

##### (1) 力学的鉄筋比=0.100 の場合

鉄筋が巻かれていない断面と鉄筋が巻かれている断面の拘束効率分布を比較する。鉄筋が巻かれている断面においては、隅角部で拘束効率

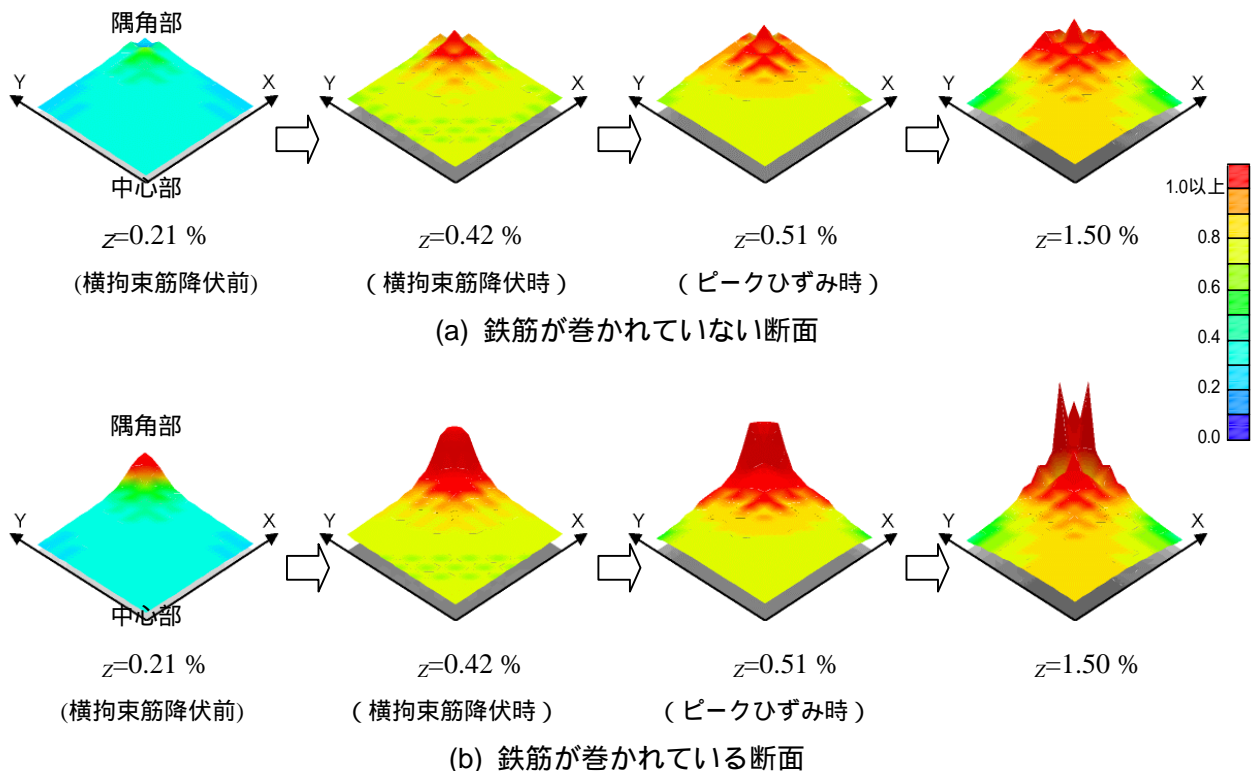


図 - 8 力学的鉄筋比 0.100 の場合における拘束効率分布の進展

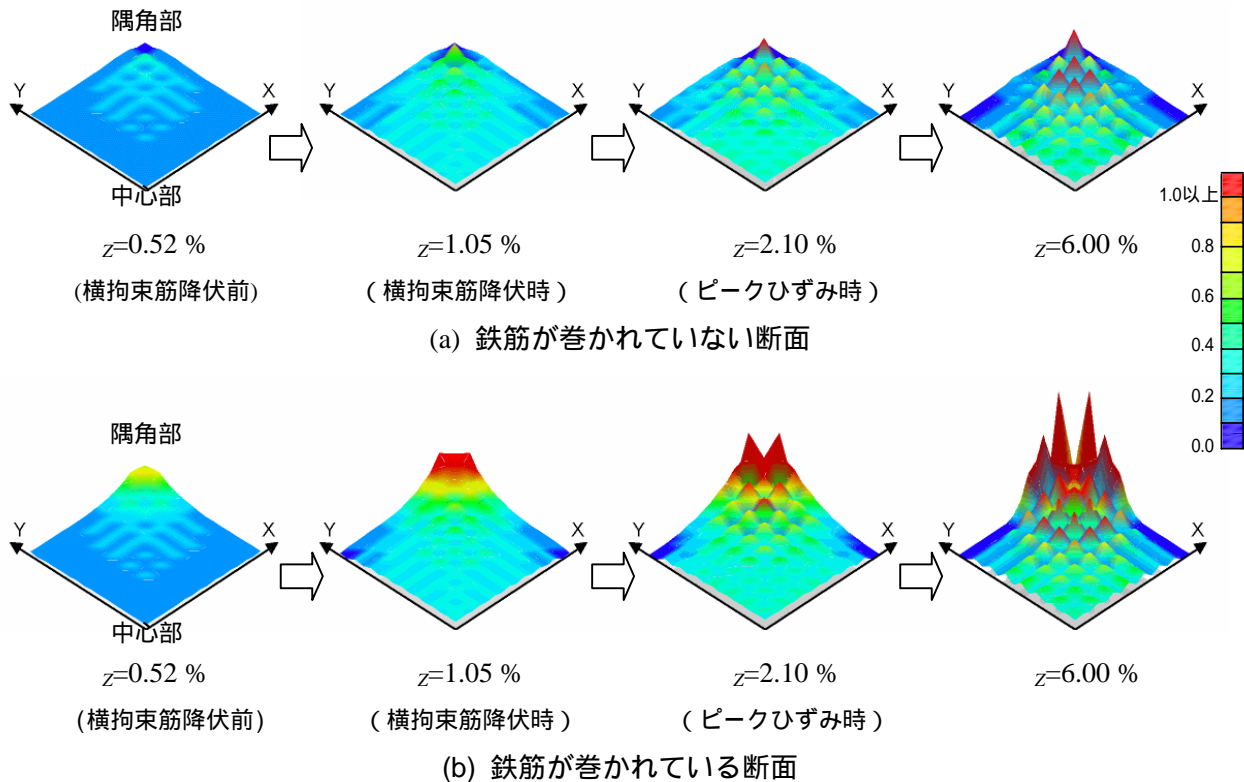


図 - 9 力学的鉄筋比 1.167 の場合における拘束効率分布の進展

が大きいという差が見られるが、両者とも、束効率分布は同様の傾向を示しており、断面内でほぼ一様に大きくなっている。力学的鉄筋比が小さい場合は、拘束効果がモデル全体に大きく作用しているといえる。

次に、拘束効率分布の進展に着目する。鉄筋が巻かれている断面および鉄筋が巻かれていない断面とも、横拘束筋降伏前 ( $z=0.21\%$ ) では、拘束効率は 0.3 程度でほぼ一様に広がっている。横拘束筋降伏時 ( $z=0.42\%$ ) では、横拘束筋からの拘束力が大きく作用し、断面における拘束効率は 0.7 以上となり、中心部までほぼ一様に拘束効果が及んでいることが分かる。その後、軸方向ひずみが増加するにつれて、隅角部付近の拘束効率が大きくなり、それに伴い、中心部でも拘束効率が大きくなっていく。ただし、中心部と横拘束筋近傍では拘束効率に差が生じ、断面内で一様でなくなっていく。

#### (2) 力学的鉄筋比=1.167 の場合

鉄筋が巻かれていない断面と鉄筋が巻かれている断面の拘束効率分布を比較する。鉄筋が巻

かれている断面においては、隅角部で拘束効率が非常に大きくなっているが、鉄筋が巻かれていない断面では、拘束効率が大きい部分はほとんどなく両者には差が見られる。また、中心部での拘束効率は小さく、力学的鉄筋比が大きい場合は、拘束効果が局部的に作用し、モデル全体には作用していないといえる。

次に、鉄筋が巻かれている断面における拘束効率分布の進展に着目すると、横拘束筋降伏前 ( $z=0.52\%$ ) では、拘束効率は 0.1 程度と小さいが、ほぼ一様に広がっている。しかし、横拘束筋降伏時 ( $z=1.05\%$ ) では、隅角部のみ拘束効率が 1.0 以上となり横拘束筋からの拘束力が大きく作用しているが、中心部では拘束効率は 0.3 程度と小さく、拘束効果は一様ではなく内部までは作用していないことが分かる。その後、軸方向ひずみが増加するにつれて、隅角部付近の拘束効率が大きくなっていくが、中心部では拘束効率はあまり変化がない。鉄筋が巻かれていない断面における拘束効率分布は横拘束筋降伏以降、大きな進展はなく拘束効率 0.3 程度と小さい。



#### 4.4 横拘束筋の降伏の違い

横拘束筋の拘束効果は、横拘束筋が降伏することによりその拘束能力が発揮される。そこで、力学的鉄筋比が大きい場合、小さい場合について横拘束筋の降伏状況を調べた。図 - 10 に降伏状況の比較の概要図を示す。

力学的鉄筋比が小さい場合は、隅角部以外の横拘束筋が降伏し始めるが、力学的鉄筋比が大きい場合は、隅角部の横拘束筋のみ降伏するという違いが確認できた。つまり、力学的鉄筋比が小さい場合は、横拘束筋の大部分が拘束能力を発揮できるため、拘束効率が大きくなる。しかし、力学的鉄筋比が大きい場合は、隅角部の横拘束筋が拘束効果を発揮するにとどまるので、拘束効率が大きい部分が隅角部近傍に局所化し、拘束効率は小さくなる。

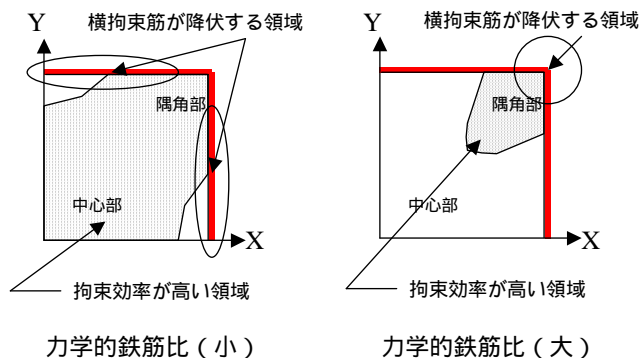


図 - 10 横拘束筋の降伏状況の比較

謝辞：本研究を遂行するにあたり、中部大学奨励研究費（伊藤）、中部大学総合工学研究所補助金（第6部門B）、ハイテクリサーチ研究費（文部科学省）ならびに平成14 - 15年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究C、研究代表者：水野英二）を受けたことを付記し、ここに謝意を表します。

#### 5. まとめ

本研究で得られた結果は以下のようである。

- (1) 力学的鉄筋比 ( $\rho_y \times p_s / f_c'$ ) を定義し、解析結果を整理した。
- (2) 「等価拘束圧」なる指標を定義し、この指標を用いて「拘束効率」を求め、コンクリート内部の拘束効果を評価した。
- (3) モデル全体に対する「拘束効率」は力学的鉄筋比に依存しており、力学的鉄筋比が大きくなるほど、拘束効率は小さくなる傾向にある。
- (4) コンクリート内部の拘束効率分布から、力学的鉄筋比が小さい場合は、鉄筋が巻かれている断面、巻かれていない断面とも拘束効果が大きく、一様に中心部まで及んでいる。これは、大部分の横拘束筋が降伏しており、横拘束筋の拘束効果が発揮されているためである。
- (5) 力学的鉄筋比が大きい場合は、鉄筋が巻かれている断面での隅角部のみに拘束効果が大きく作用し、中心部までは及んでいない。これは、隅角部の横拘束筋だけが降伏しているので、横拘束筋の拘束効果は隅角部のみに限定されているためである。

#### 参考文献

- 1) 塩屋晋一, 黒木康博, 永田健二: 横拘束されたコンクリート柱の圧縮応力分布の測定実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.187-192, 2000.6
- 2) 吉田幸夫, 水野英二, 畑中重光: 円形コンファインドコンクリート内部の応力と損傷状態に関する FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.97-102, 2002.6
- 3) 宮野覚也, 篠原保二, 渡部洋, 林静雄: 横方向プレストレス RC 柱の能動的拘束効果と破壊メカニズム, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.247-252, 2003.7
- 4) 伊藤 誠, 水野英二, 畑中重光: 寸法の異なる角型鉄筋コンクリート柱内部への拘束効果に関する三次元 FEM 圧縮解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.73-78, 2003.7
- 5) 水野英二, 畑中重光: コンクリートのひずみ軟化型モデルの開発とコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.185-197, 1997.8