

# 論文 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

吉田 幸夫<sup>\*1</sup>・水野 英二<sup>\*2</sup>・畑中 重光<sup>\*3</sup>

要旨：鋼管および横補強筋により横拘束された円柱形コンクリートの圧縮性状について，FEM 解析プログラム DIANA を用いてシミュレーション解析を行った。その結果，1) 拘束方法（鋼材に適用する要素タイプ：Shell 要素および Beam 要素）の違いにより，コンクリート内部の等価拘束圧の高さ方向の分布が大きく異なること，2) 横補強筋（Beam 要素）により拘束された水平断面内の損傷度の分布は，最大圧縮応力までは外周部を除く部分が高く，軟化域では断面全体に損傷度の高い部分が分布すること，3) 拘束方法により損傷度に差異を生じ，この傾向は応力上昇域において顕著であること，等が明らかとなった。  
 キーワード：コンファインドコンクリート，三次元 FEM 解析，圧縮，応力 - ひずみ，DIANA

## 1. はじめに

近年，コンクリート構造物に対する耐震補強の必要性から，横補強筋による靱性改善効果が注目されている。筆者らは，これまでに横補強筋により拘束されたコンクリート柱について，一連の一軸圧縮実験および FEM 解析を行ってきた<sup>1)-3)</sup>。

本研究の目的は，以下のようなものである。

1) 有限要素解析プログラム DIANA<sup>4)</sup>を用いた三次元 FEM 解析を通して，横拘束箇所を側

面に一様な状態から離散的に変化させた円形コンファインドコンクリート供試体(図 - 1 に示すような供試体 A~F)の圧縮性状のシミュレーション解析手法について検討する。

2) 一軸圧縮挙動に関するシミュレーション解析を通して，円形コンファインドコンクリートの横拘束効果および破壊メカニズムを等価拘束圧<sup>5)</sup>および損傷度という2つの指標を用いて考察する。

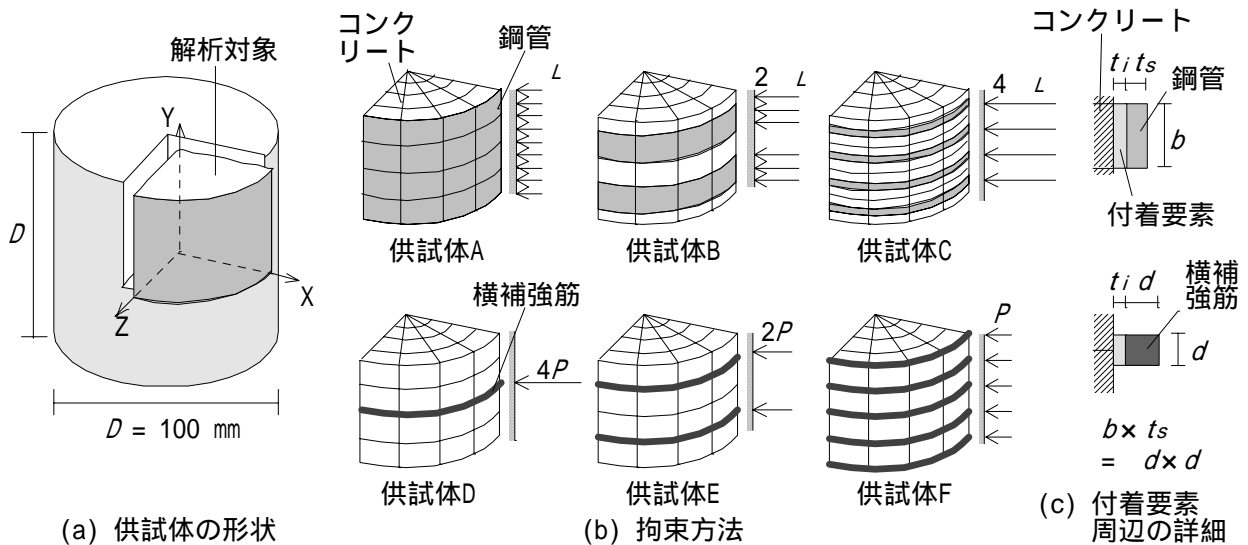


図 - 1 供試体概要図

\* 1 三重大学大学院 工学研究科博士後期課程システム工学専攻 工修 (正会員)

\* 2 中部大学教授 工学部土木工学科 Ph.D. (正会員)

\* 3 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

表 - 1 コンクリートの材料定数

ヤング係数 $E_c$ (MPa)	せん断弾性係数 $G_c$ (MPa)	ポアソン比 $\nu_c$	圧縮強度 $F_c$ (MPa)	引張強度 $F_t$ (MPa)	内部摩擦角 ( $^{\circ}$ )
$2.6 \times 10^4$	$1.1 \times 10^4$	0.2	30	2.4	53

## 2. 解析概要

### 2.1 供試体および解析モデル概要

供試体の概要を図 - 1 に示す。供試体の形状は円柱形（直径 100 mm × 高さ 100 mm）とし、対称性を考慮し、全体の 1/8 の部分をモデル化した。境界条件は、対称面においては直角方向に変位を拘束する。載荷面における横拘束はないものとした。載荷方法は、供試体上面に 0.008 % 刻みの軸圧縮ひずみを与える変位制御とし、2 % の平均軸圧縮ひずみまで載荷を行った。供試体 A（コンクリート充填鋼管柱）の解析では、コンクリート部分のみに強制変位を与えた。

図 - 1 (b)には、併せてメッシングの様子も示した。供試体 B および E については、事前に同図に示した要素サイズを高さ方向に 1/2 倍および 2 倍した場合の検証解析を行った。その結果、要素サイズが解析結果に与える影響は極めて小さいことが分かった。しかし、2 供試体の検討だけであることから、要素サイズの影響に関する解析および考察は十分とは言えず、この点に関しては今後の課題である。

### 2.2 構成モデルおよび要素タイプ

構成モデルとして、コンクリート部分には、DIANA に既存の軟化域までを考慮することができる Drucker-Prager 型モデルを、要素として 20 節点アイソパラメトリック要素（DIANA での要素名：CHX60）を採用する。

鋼材は完全弾塑性体とし、要素は図 - 1 に示す供試体のタイプにより、一様および帯状に巻いた鋼管については Shell 要素（要素名：CQ40S）を、線材として巻いた鋼材には Beam 要素（要素名：CL9BE）を採用した。付着要素（Interface element）は弾性体とし、要素としては鋼材が Shell 要素の場合は面要素（要素名：CQ48I）を、

表 - 2 鋼材の材料定数

ヤング係数 $E_s$ (MPa)	ポアソン比 $\nu_s$	降伏強度 $\sigma_{sy}$ (MPa)
$2.1 \times 10^5$	0.3	297

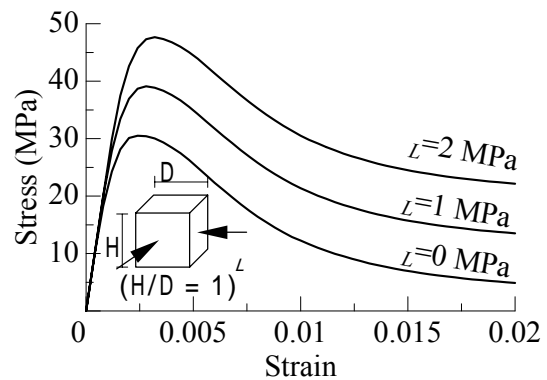


図 - 2 プレーンコンクリートの三軸圧縮応力 - ひずみ曲線（ $H/D = 1$ ）

Beam 要素の場合は線要素（要素名：CL12I）を採用した。付着要素を弾性体とした理由は、筆者らの一連の研究<sup>3), 6)</sup>において、弾性体を使用していることによる。

### 2.3 材料定数

コンクリートと鋼材の材料定数には、それぞれ表 - 1 および表 - 2 に示す値を用いた。

プレーンコンクリートの一軸圧縮応力 - ひずみ関係には、図 - 2 に示す修正 Popovics 式により計算される曲線<sup>2)</sup>に一致するように Drucker-Prager 型モデルでのパラメータ、すなわち粘着力 - 等価塑性ひずみの関係を定めた。併せて、低側圧を作用させた場合の平均軸応力 - ひずみ関係の解析結果も示しておく。

既報<sup>3)</sup>によれば、付着要素の剛性によって、鋼材からの拘束力のかかり方が大きく異なるので、ここでは、以下のように 2 種類の解析を行った。

1) 解析 I: 供試体 A の最大圧縮応力時点で、鋼

管が降伏する時の付着剛性を、全供試体に適用する。

2) 解析 II：供試体 D～F の圧縮強度の解析値を、既往の評価式<sup>7)</sup>による最大圧縮応力に一致するように付着要素の剛性を定める。なお、このときの評価式<sup>7)</sup>による圧縮強度は、供試体 D：32.8，E：35.1，F：36.2 (MPa)である。

表 - 3 に、各供試体の鋼材および付着要素の種類・寸法を示す。各供試体の鋼材量が一定となるよう、鉄筋の面積比  $P_s$  を一定とし、横拘束方法を 6 種類 (図 - 1 (b) に示す 6 供試体) に変化させた。検証解析の結果に基づいて、定めた各供試体の付着要素の剛性を、表 - 4 にコンクリートの剛性に対する比 ( $E_i/E_c, G_i/G_c$ ) とし示した。

### 3. 解析結果と考察

3.1 損傷度 および等価拘束圧  $\sigma_c$  の分布・進展に関する考察を 3.3 節以降で行うが、それに先立ち、以下に損傷度 および等価拘束圧  $\sigma_c$  について説明する。

#### 3.1 損傷度 および等価拘束圧 $\sigma_c$

損傷度  $\beta$  とは、本報では、主にひずみ軟化域での挙動を対象とするため、損傷度  $\beta$  を破壊曲面からの低下の割合として以下のように定義した。図 - 3 に概要図を、式(1)に損傷度  $\beta$  の定義式を示す。

$$\beta = \frac{\sqrt{J_{2fA}} - \sqrt{J_{2A}}}{\sqrt{J_{2fA}}} \quad (1)$$

ここに、 $J_{2A}$ ；ある要素の応力状態である同図 A 点から求められる偏差応力の二次不変量  $J_2$ ， $J_{2fA}$ ；そのときの応力の一次不変量  $I_{1A}$  から導き出される破壊時の偏差応力の二次不変量  $J_2$  である。つまり、破壊曲面上では  $\beta = 0.0$ ，静水圧

表 - 3 各供試体の鋼材および付着要素の種類・寸法

供試体	A	B	C	D	E	F
鋼材要素	Shell 要素			Beam 要素		
付着要素	面要素			線要素		
$t_s$	0.28	0.56	1.12	3.74	2.65	1.87
$b$	50	12.5	3.125			
$s$	-	$D/4$	$D/8$	$D/2$	$D/4$	$D/8$
$t_i$	$t_s/200$			$d/200$		
	0.001	0.003	0.006	0.02	0.01	0.01
$P_s$	0.56					
$L_Y$	1.67					

$t_s$ ：鋼管の厚さ (mm)， $b$ ：鋼管の幅 (mm)， $d$ ：横補強筋の断面一辺の寸法 (mm)， $s$ ：間隔 (mm)， $t_i$ ：付着要素の厚さ (mm)， $P_s$ ：鉄筋の面積比 (%)， $L_Y$ ：計算側圧  $L_Y = P_s \cdot \sigma_y$  (MPa)， $D$ ：供試体直径 100 mm

表 - 4 解析 I および II での付着要素の剛性

供試体	$E_i/E_c, G_i/G_c$	
	解析 I	解析 II
A	$1.0 \times 10^{-6}$	[図]
B		
C		
D		$1.5 \times 10^{-5}$
E		$2.0 \times 10^{-5}$
F		$2.5 \times 10^{-5}$

$E_i, G_i$ ：付着要素のヤング係数，せん断弾性係数

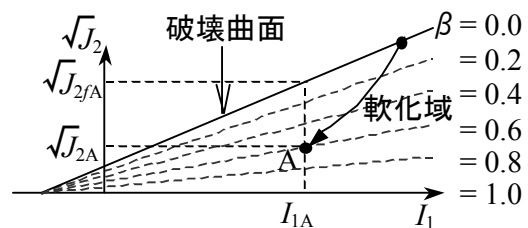


図 - 3 損傷度 (軟化域) の概要図

軸  $I_1$  では  $\beta = 1.0$  となる。同図破線は損傷度の値を示している。

等価拘束圧  $\sigma_c$  とは、一般応力状態を三軸主応力状態に換算した時の拘束圧のことである (文献 5) 参照)。

#### 3.2 平均軸圧縮応力 - ひずみ関係

解析 I で得られた供試体 A～F の平均軸応力

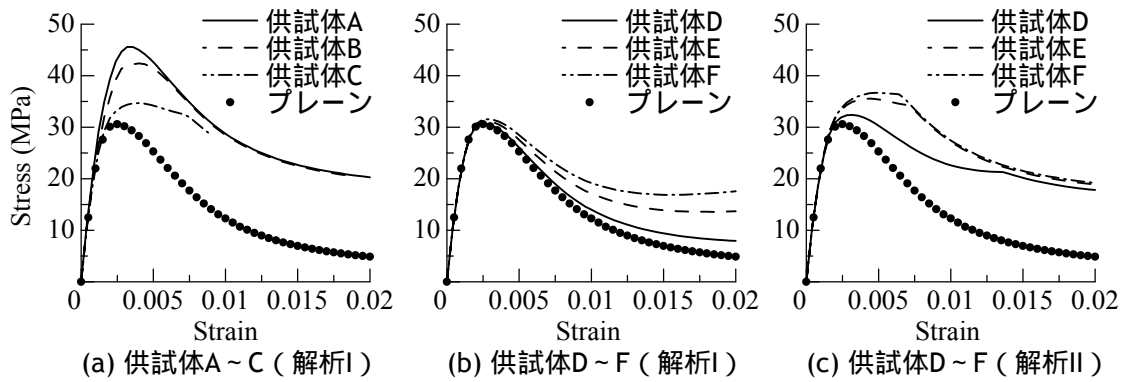


図 - 4 供試体 A~F の平均軸応力 - ひずみ曲線

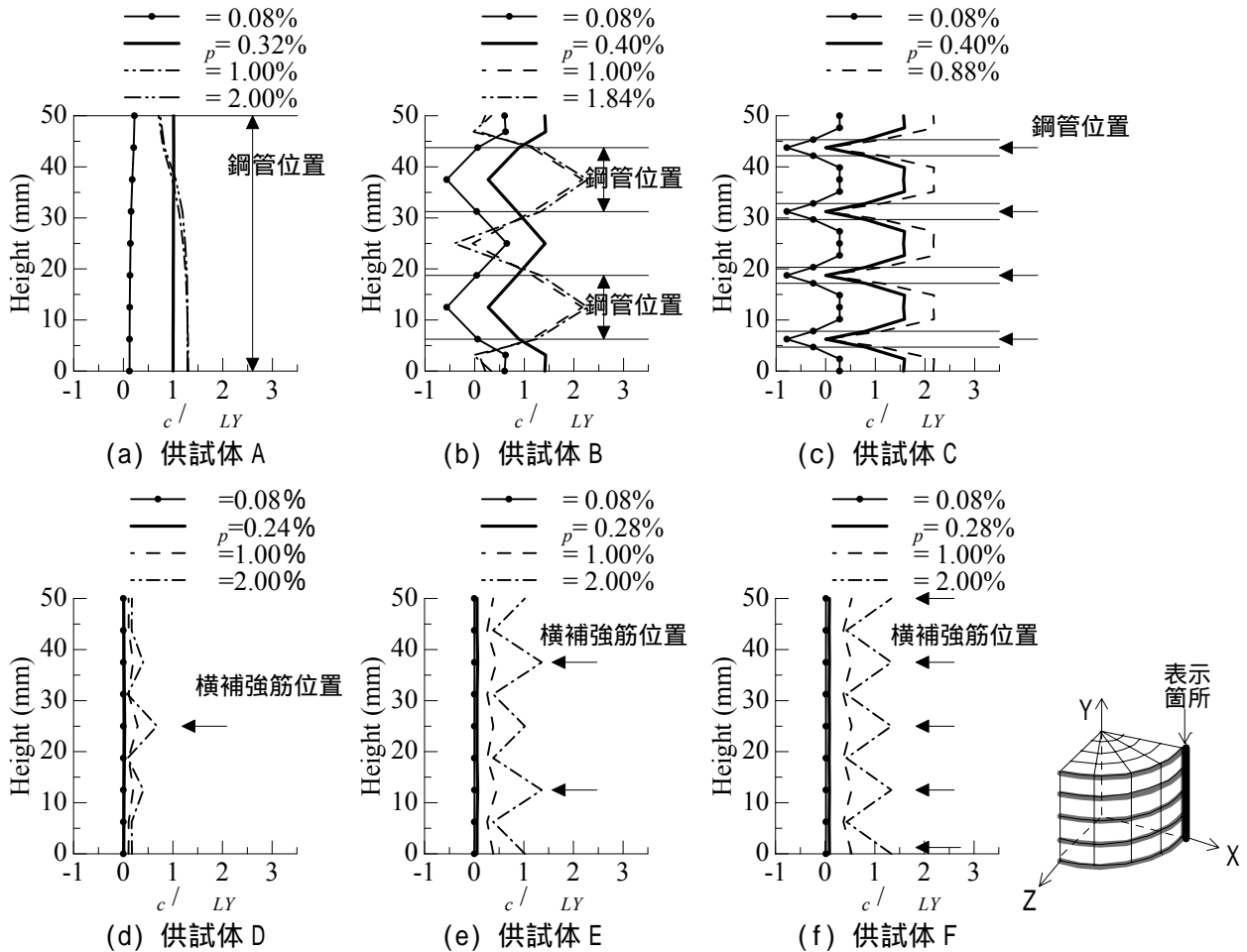


図 - 5 供試体 A~F の X-Y 面近傍における等価拘束圧  $\sigma_c$  の分布 (解析 I)

- ひずみ関係を，図 - 4 (a)および(b)に示す。同図(a)および(b)より，鋼材要素については Shell 要素 (供試体 A~C) より Beam 要素 (供試体 D~F) の方が，また横拘束間隔については，間隔が広くなるにつれて，最大圧縮応力および靱性が低下することが分かる。

同図(b)の供試体 D~F の最大圧縮応力は，いずれも約 30 MPa となり，既往の評価式<sup>7)</sup>により得られる最大圧縮応力より低い。これは，付着

要素の剛性として表 - 4 の値を採用した場合，供試体 D~F に対しては，剛性が低いためと考えられる。

解析 II で得られた供試体 D~F の平均軸応力 - ひずみ関係を図 - 4 (c)に示す。

### 3.3 等価拘束圧 $\sigma_c$ および損傷度

#### (1) 等価拘束圧 $\sigma_c$ の分布

図 - 5 に，解析 I (同図(a)~(f)) および図 - 6 に，解析 II (同図(a)~(c)) で得られた各

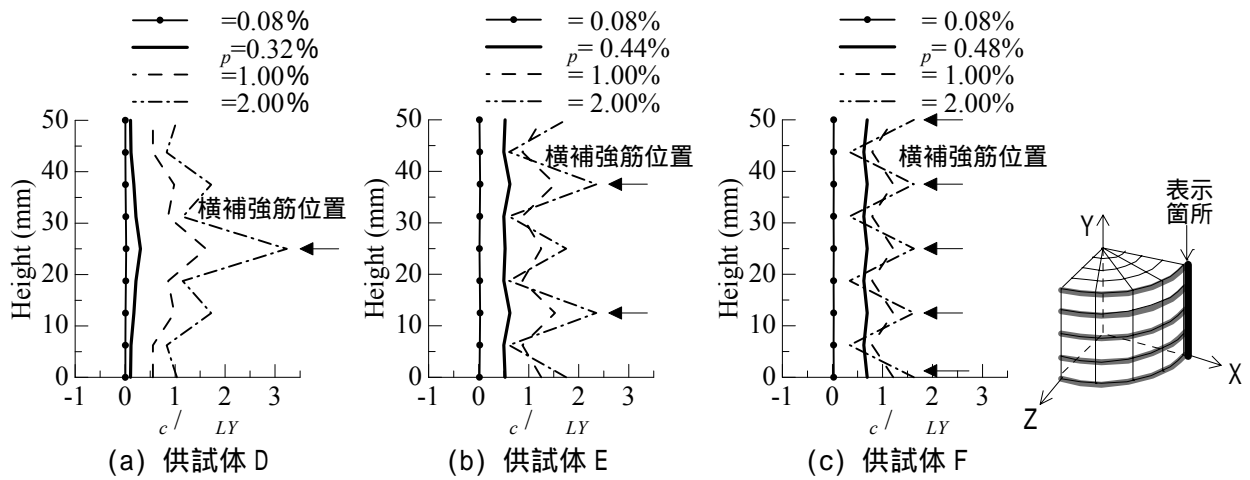


図 - 6 供試体 D~F の X-Y 面近傍における等価拘束圧  $\sigma_c$  の分布 (解析 II)

供試体の外周部 (X-Y 面近傍) における, 高さ方向の等価拘束圧  $\sigma_c$  を示す。凡例中の  $p$  とは, 最大圧縮応力時でのひずみのことである。

図 - 5 (a) の頂部付近において等価拘束圧  $\sigma_c$  が載荷とともに低下している。これは, 載荷方法をコンクリートのみを押しているために, 鋼管とコンクリートの界面で生ずるせん断力が影響した結果である。

図 - 5 (b) および (c) では, 最大圧縮応力時前後において, 拘束されていない部分で等価拘束圧  $\sigma_c$  が高いことが分かる。これは, 炭素繊維シートを扱った文献 (6) でも指摘されている現象と類似している。すなわち, 文献 (6) では, 炭素繊維シートの破断時まで, シートが巻かれていないコンクリート部分の等価拘束圧  $\sigma_c$  が巻かれている部分より高い値を示すと報告されている。本研究では, 横拘束材に鋼材を使用しているため, 厳密な比較はできないが, 同様なメカニズムが生じているものと思われる。

一方, 図 - 5 (d) ~ (f), および図 - 6 では, 横拘束筋位置での等価拘束圧  $\sigma_c$  が, 他の部分より常に高い値を示していることが分かる。これは, Beam 要素を用いると, 拘束力が線状に集中することが原因と考えられる。

#### (2) 損傷度の進展

図 - 7 は, 供試体 B (解析 I) および E (解析 I・II) について, 横拘束されている水平断面, すなわち, 下から  $Y = 12.5 \text{ mm}$  の位置での切断

面における, 過去に経験した最大の損傷度の進展を示したものである。損傷度の進展の様子は, 供試体 B (解析 I) と E (解析 I・II) では, 応力上昇域において異なる傾向を示している。すなわち, 同図 (a) の鋼材要素を Shell 要素とした供試体 B では, 最大圧縮応力時点において外周部のみに損傷度の高い領域が分布している。一方, 同図 (b) および (c) の鋼材要素を Beam 要素とした供試体 E では, 最大圧縮応力時において, 逆に外周部に損傷度の低い領域が分布していることが分かる。

#### 4. まとめ

本解析により, 以下の知見が得られた。

- (1) 拘束方法 (鋼材に適用する要素タイプ) により, コンクリート内部の高さ方向の等価拘束圧の分布は異なる。すなわち, Shell 要素を使い, 鋼材を帯状に巻いたコンクリートでは, 最大平均軸応力前後で, 鋼材が巻かれていない部分の等価拘束圧がもっとも高くなる。一方, Beam 要素を使い, 横補強筋を離散的かつ線状 (正方形断面) に巻いたコンクリートでは, 補強筋位置において, 等価拘束圧が他の部分より常に高い値を示す。
- (2) 横補強筋 (Beam 要素) の配置された水平断面内の損傷度は, 最大圧縮応力までは外周部を除く部分が高く, 軟化域では断面全体に損傷度の高い部分が分布する。

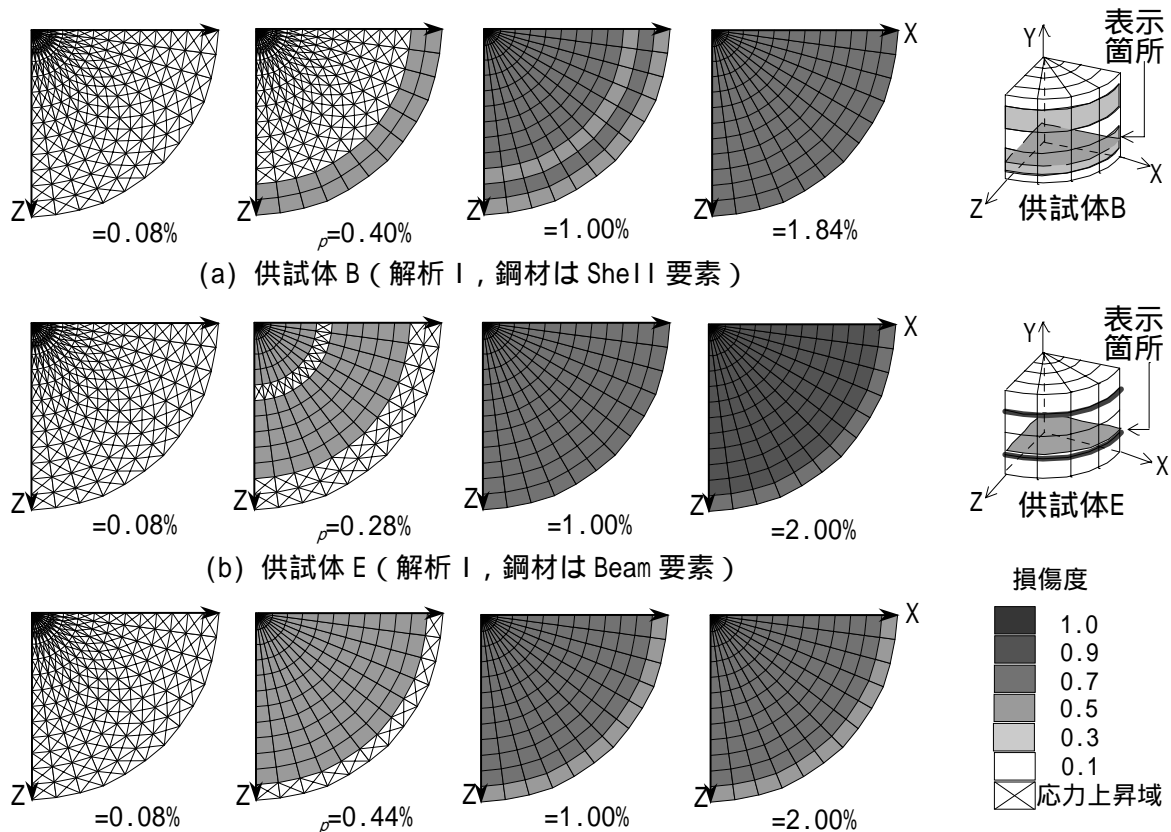


図 - 7 供試体 B および E (解析 I・II) の横拘束位置  $Y = 12.5 \text{ mm}$  での損傷度の進展図

(3) 上記(1)の等価拘束圧と連動して、損傷度は拘束方法により異なり、この傾向は応力上昇域において顕著となる。

謝辞：本論文作成にあたり、ご協力を頂いた三島直生氏（三重大学建築学科助手）に深謝いたします。

#### 引用文献

- 1) 小阪義夫, 谷川恭雄, 畑中重光: 構成モデルに基づく各種横拘束コンクリートの圧縮靱性の統一評価, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.365-368, 1986
- 2) 畑中重光, 服部宏己, 吉田徳雄, 谷川恭雄: コンファインド高強度コンクリートの圧縮靱性とその評価, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, pp.1-20, 1990.5
- 3) 水野英二, 森本康介, 畑中重光: 中心軸圧縮力を受けるコンファインドコンクリートの拘束効果に関する三次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.85-90, 1999
- 4) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research., 1999
- 5) 水野英二, 畑中重光: コンクリートのひずみ軟化型構成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
- 6) 辻誠, 大工綾子, 水野英二, 畑中重光: 炭素繊維シートで横補強したコンクリートの一軸圧縮性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.109-114, 2000
- 7) 中塚信: コンクリートの応力度 - ひずみ度特性とコンクリート曲げ部材の終局域特性に関する基礎的研究, 大阪大学博士論文, pp.50-52, 1988