

論文

[2024] 吸収エネルギーパターンを考慮したコンクリートの圧縮破壊シミュレーション

前田 欣昌\*1・水野 英二\*2・畑中 重光\*3・伊藤 誠\*4

1. はじめに

これまでの筆者らによる一連の「寸法および形状を考慮したコンクリートの圧縮軟化挙動に関する研究」結果によれば、コンクリートの破壊形態が圧壊の場合には、圧縮破壊吸収エネルギーは、初期破壊点近傍では大きく、離れるに従って小さくなってゆくことが確認されている[1][2].

本研究では、まず、これまでの実験結果の考察に基づいて、破壊吸収エネルギーパターンを考察し、そのモデル化を行う。さらに、供試体寸法 (10×10×10cm) のコンクリートの応力-ひずみ曲線を基本曲線とし、寸法・形状の異なるコンクリート供試体の三軸圧縮下での軟化挙動を数値シミュレーションする。

2. コンクリートの圧縮破壊エネルギー吸収能のモデル化

ここでは、寸法の異なるコンクリート供試体の軟化域での塑性吸収エネルギー能 (圧縮破壊吸収エネルギー能) について考察する。筆者らは、中心軸圧縮を受けるコンクリート立方体内の破碎パターンの概念図 (図-1 (a)) を、図-1 (b) に示すような破壊エネルギー吸収パターンの概念に拡張した[1]。この概念によれば、破壊点 (図中では供試体の中心に設定) から離れるに従い、圧縮破壊吸収エネルギー能は徐々に減少してゆく。

本研究では、圧縮破壊吸収エネルギー能の低減状態は等方的であると仮定して、図-1 (a) と図-1 (b) の概念を結び合わせたモデル (図-1 (c)) へと拡張する。図-1 (c) に示すモデル図において、黒い部分はコンクリート立方体内に生じたクラックバンドであり、その面積はエネルギー吸収能の大きさを表している。特に、中心部分の黒い円は破壊点でのエネルギー吸収能を表している。また、同心円状に描かれた破線は圧縮破壊エネルギー量のコンターを示している。

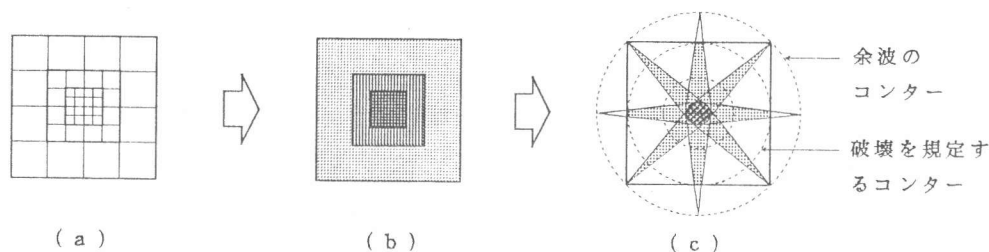


図-1 コンクリート立方体内のエネルギー吸収能の概念図

3. 圧縮破壊シミュレーション手法

3.1 破壊パターン

図-1 (c) のような破壊パターンを想定したコンクリート供試体の圧縮破壊シミュレーション解析を行うにあたって、次のような仮定を設ける。

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

- (I) 初期破壊点は供試体中心に発生する。
- (II) クラックは等方的に進展する。
- (III) クラックが供試体断面を貫通した時点 (図-1 (c) 中, 破線で示したコンターがコンクリート立方体に内接した時点) で破壊が終了する。
- (IV) 破壊の余波がある程度まで未破壊領域 (図中, 内接したコンターよりも外側部分) に同心円状に伝わる。

### 3.2 解析手法

#### (a) 解析モデルと仮定

図-2 に示すように, 三次元座標内  $(X, Y, Z)$  に寸法 (縦 $A \times$ 横 $B \times$ 高さ $C$ ) を有するコンクリート供試体を考え, これを  $(L \times M \times N)$  個の有限要素に分割する。さらに, 図-2 に示すように, 任意の要素  $(i, j, k: i=1 \sim L, j=1 \sim M, k=1 \sim N)$  の中心座標を  $(X_i, Y_j, Z_k)$  とする。要素内の応力およびひずみは均一と仮定した。

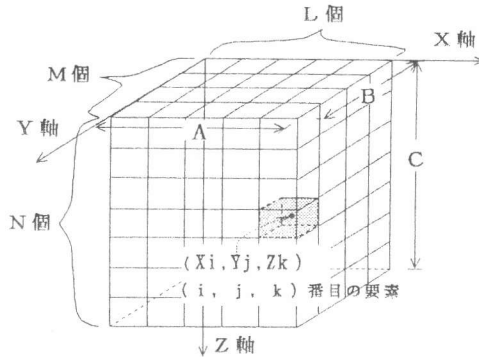


図-2 コンクリート供試体の要素分割図

解析モデルとして, 図-3 に示すような Parallel-Series モデル[3]を用いる。この解析モデルを用いるにあたり, 次のような仮定を用いた。

- (1) 各Parallel要素 (柱状体) 内のSeries要素では応力・ひずみ状態は一軸状態である。
- (2) 剛板 (供試体を一軸圧縮する上下の板) と供試体の上下端部との間には摩擦はない。

#### (b) 各要素のエネルギー吸収能

図-3 に, コンクリート供試体の中心に初期破壊点を設定したときの供試体内の各要素のエネルギー吸収能を模式的に示す。色の濃い要素ほど, 多くのエネルギーを吸収することを意味する。

次に, コンクリート供試体に対するParallel-Series モデル (図-3) の任意のParallel要素内のSeries要素の圧縮破壊エネルギー吸収能を模式的に図-4 (a) に示す。柱部分の各要素のエネルギー吸収能を, 縦軸に応力  $\sigma$ , 横軸に圧縮破壊吸収エネルギー  $W_p (= \int \sigma d\varepsilon^p)$  を用いて示したものが図-4 (b) である。また, 図-4 (c) に, 各要素  $(i, j, k)$  の応力  $\sigma$  - ひずみ  $\varepsilon$  曲線を示す。

#### (c) 平均応力-平均ひずみ曲線の算定

Parallel-Seriesモデルでは,  $(i, j)$  番目のParallel要素を構成する  $N$  個すべてのSeries要素

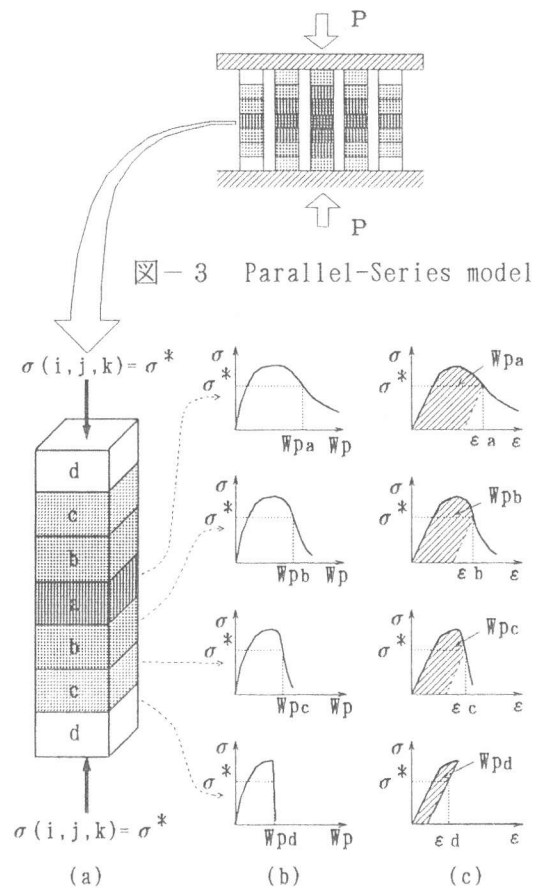


図-3 Parallel-Series model

- (a) 吸収エネルギーの低減
- (b)  $\sigma$ - $W_p$  曲線
- (c)  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲線

図-4 あるParallel要素内の吸収能

(i, j, k = 1~N)において軸応力は等しい。よって、図-4(c)に示される各応力-ひずみ曲線において、ある応力点 $\sigma^*$ に対する各要素のひずみ(例えば、図中の $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ , および $\varepsilon_d$ )に要素高さを乗じた値を合計すれば、応力点 $\sigma^*$ に対する変位 $u^*$ (供試体の軸方向変位)が得られる。以上の操作を繰り返すことにより、(i, j)番目のParallel要素の応力 $\sigma$ -変位 $u$ 曲線が得られる。さらに、(L×M)個のParallel要素の応力-変位曲線を用いて、コンクリート供試体の荷重-変位曲線を算定し、コンクリート供試体の平均応力-平均ひずみ曲線を得ることができる。

#### 4. 寸法効果に関する数値シミュレーション

##### 4.1 実験データ

ここで用いる実験データは、畑中ら[4]が行ったH/D=1の円柱供試体(直径D=10, 15, 20cm; 一軸圧縮強度 $f_c' = 355, 675, 943 \text{ kgf/cm}^2$ )の三軸圧縮

表-1 寸法効果に関する実験データ

コンクリート供試体	D(cm)	$\sigma_c(\text{kgf/cm}^2)$
$f_c' = 355 \text{ kgf/cm}^2$ シリーズ	10, 15, 20	0, 25, 50
$f_c' = 675 \text{ kgf/cm}^2$ シリーズ	10, 15, 20	50
$f_c' = 943 \text{ kgf/cm}^2$ シリーズ	10, 15, 20	50, 100

$f_c'$ : 一軸圧縮強度, D: 直径,  $\sigma_c$ : 側圧

実験結果(18データ)である。この場合、側圧 $\sigma_c$ としては、コンクリート周囲に巻かれた鋼輪による受動型側圧が作用する。解析に用いた実験データの種類および側圧の値を表-1に示す。

##### 4.2 エネルギー吸収能の低減曲線の設定

図-5(a), (b), および(c)には、各コンクリート供試体(一軸圧縮強度 $f_c' = 355, 675, 943 \text{ kgf/cm}^2$ シリーズ)の各種側圧下での吸収エネルギーの低減率の変化を実線で階段状に示してある。ここで、縦軸は吸収エネルギー比Rを、横軸は供試体中心点(初期破壊点)から供試体面への垂線方向距離d(図-6に示すように、A-A'方向の距離)を示している。一方、図-6に示すように、初期破壊点からの距離をA-A'方向の距離で定義した場合の低減状態を、図-5(a), (b), および(c)にそれぞれ破線で示す。

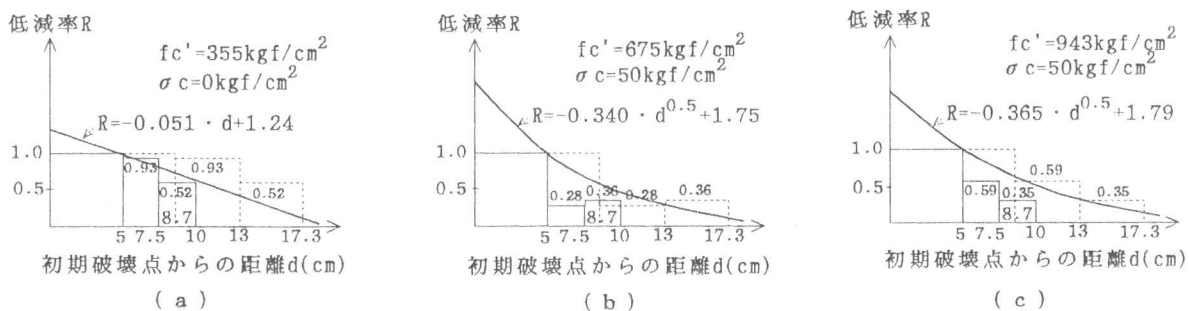


図-5 エネルギー吸収能の低減率(実線: A-A'方向, 破線: A-A''方向)

本解析では、2種類の階段状の低減状態を最小二乗法により曲線で近似した後、曲線の切片(距離 $d = 0$ での吸収エネルギー比)を固定し、傾きを両曲線の間で変化させることにより、基本サイズ(10×10×10cm)

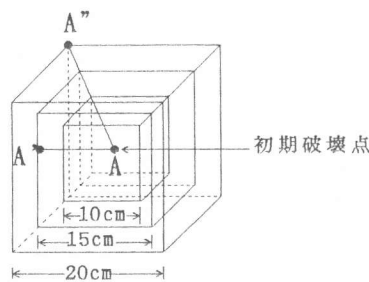


図-6 初期破壊点からの距離

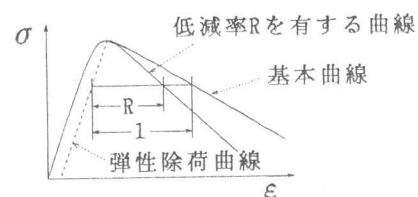


図-7 低減率Rを有する曲線の定義

のコンクリート供試体の実験結果と解析結果とが一致するような低減曲線を模索した。文献1)の結果によれば、エネルギー吸収能の低減状態は各コンクリート供試体シリーズごとに拘束圧に

関係なく、同様の傾向が見られるため、ここでは、便宜上、同一の低減曲線（図中、実線で示す）を設定した。吸収エネルギーの低減率Rに対する応力-ひずみ曲線の定義を、図-7に示す。

#### 4.3 基本となる応力比-エネルギー比曲線

寸法（15×15×15 cm）および（20×20×20 cm）を有するコンクリート供試体に一定側圧が作用する三軸圧縮解析を行うにあたり、各シリーズの低減曲線および一定側圧下での応力-ひずみ曲線（低減率R=1に対する）が必要となる。本研究では、各種拘束圧下での基本サイズ（10×10×10 cm）の応力-ひずみ曲線より求めた強度比-エネルギー比曲線（以下に説明する）を基本として、低減率R=1に対応する応力-ひずみ曲線を算定した。図-8には、基本サイズ（10×10×10 cm）の6種類の応力-ひずみ曲線（表-1）より求めた、強度比-エネルギー比曲線を示す。強度比は応力 $\sigma$ をそれぞれの最大応力 $\sigma_{max}$ で、エネルギー比は塑性吸収エネルギーをピーク応力点までの塑性エネルギー（ $W_{p,peak}$ ）で無次元化した値である。

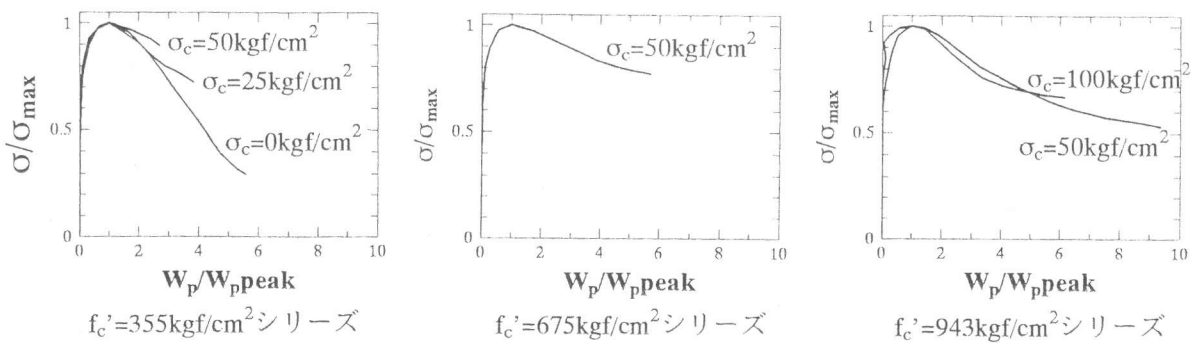


図-8 基本となる塑性エネルギー比曲線

#### 4.4 数値シミュレーション（寸法効果）

D=15および20cmの供試体の数値シミュレーションを行うにあたり、以下の仮定を設けた。

（仮定）エネルギーが吸収される領域を初期破壊点から $L$ （ $=\sqrt{L_{MIN}^2 + L_{MIN}^2 + (\ell_p/2)^2}$ ）までの距離とする。

上記の仮定において、 $L_{MIN}$ は最短破壊距離を示しており、D=10cmの供試体では5cm、D=15cmの供試体では7.5cm、D=20cmの供試体では10cmである。また、 $\ell_p$ は破壊領域長さと呼ばれ、畑中ら[5]によれば側圧 $\sigma_c$ の関数として、 $\ell_p = (\sigma_c/30 + 1) \cdot D$ と近似できる。上記の仮定による破壊の概念を、図-9に示す。図中、供試体の中心に位置する点は

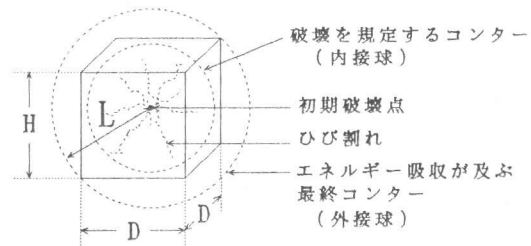


図-9 H/D = 1の破壊領域

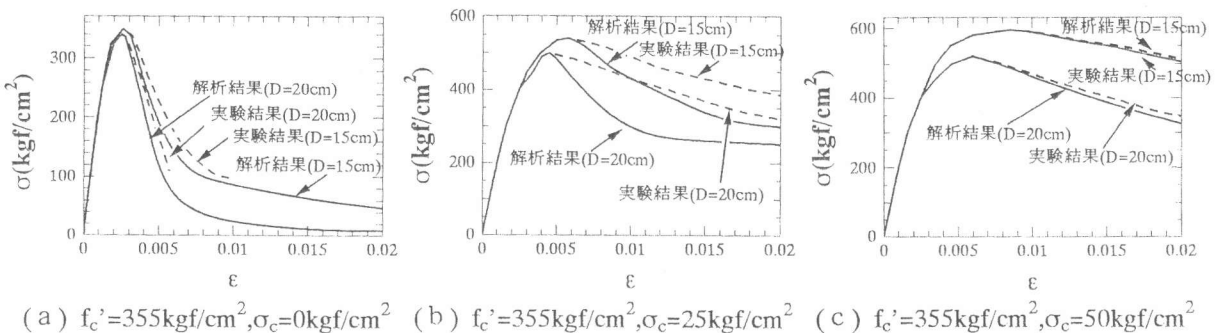


図-10 シミュレーション結果

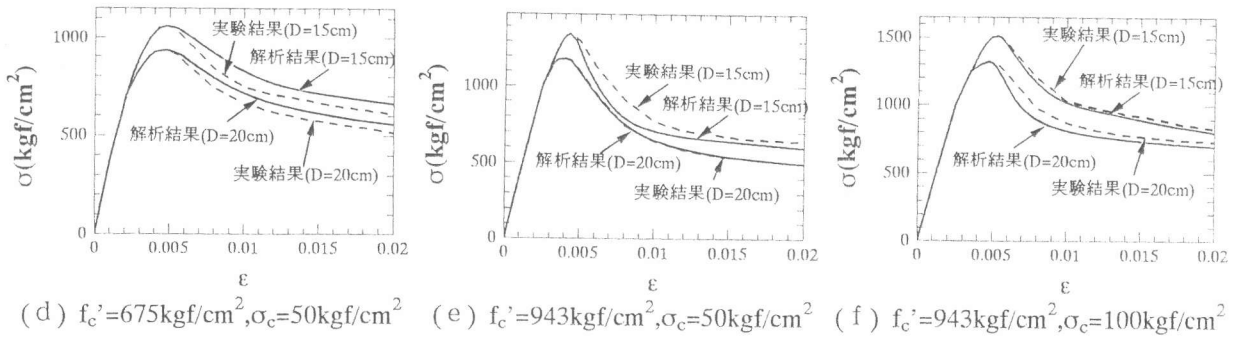


図-10 シミュレーション結果

初期破壊点を表し、点線の円はそれぞれ破壊を規定するコンターおよび余波の最終コンターを表している。図-10(a)~(f)に、解析結果と実験結果との比較を示す。本モデルでは、要素分割数に解析結果は依存しないが、ここでは、全てのケースに対し、要素分割数として、 $(L \times M \times N) = (7 \times 7 \times 7)$ を用いた。各図とも、縦軸は平均応力 $\sigma$ を、横軸は平均ひずみ $\epsilon$ を示している。図中、解析結果を実線で、実験結果を破線で示してある。図-10(b)を除いた全てのケースでは、解析結果と実験結果は比較的良好一致を示している。図-10(b)に示すように、解析結果と実験結果との間に大きな差が見られるのは、基本となる( $R=1$ に対する)応力-ひずみ曲線として、脆性的な曲線を解析に用いたためと思われる。

## 5. 形状効果に関する数値シミュレーション

### 5.1 実験データ

形状効果に関する実験データとして、 $H/D$  (高さ/辺長比) = 1, 2のコンクリート供試体の実験データ[6]を用いた。用いた実験データの種類を表-2に示す。

表-2 形状効果に関する実験データ

コンクリート供試体	W/C	H/D	$\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
$f_c' = 338 \text{ kgf/cm}^2$ シリーズ	0.45	1, 2	0, 1, 3, 6
$f_c' = 273 \text{ kgf/cm}^2$ シリーズ	0.55	1, 2	0, 1, 3, 6
$f_c' = 216 \text{ kgf/cm}^2$ シリーズ	0.70	1, 2	0, 1, 3, 6

W/C:水セメント比

### 5.2 数値シミュレーション (形状効果)

コンクリート供試体の破壊に関して、4.4節の寸法効果の解析と同様な仮定を設けた。最短破壊到達距離 $L_{MIN}$ は、 $H/D = 1, 2$  両供試体とも 5cmである。破壊の概念図を、 $H/D = 2$ の供試体を対象として、図-11に示す。

形状効果に関する各供試体の一軸圧縮強度は、約200~400(kgf/cm<sup>2</sup>)であるので、寸法効果検討用に用いた供試体 $f_c' = 355$  (kgf/cm<sup>2</sup>)シリーズの低減曲線を、

形状効果検討用の低減曲線として採用した。図-12(a)~(f)に、各一軸圧縮強度の各種拘束圧下における $H/D=2$ の供試体の解析結果の一例を示す。寸法効果に関する数値シミュレーションと同様、要素分割数に解析結果は依存しないが、全てのケースに対し、要素分割数として、 $(L \times M \times N) = (9 \times 5 \times 5)$ を用いた。縦軸は平均応力 $\sigma$ を、横軸は平均ひずみ $\epsilon$ を示している。なお、図中、解析結果を実線で、実験結果を破線で示してある。図から分かるように、解析結果による軟化領域の応力は実験結果より大きくなっている。その理由として、図-11の斜線部分での吸収

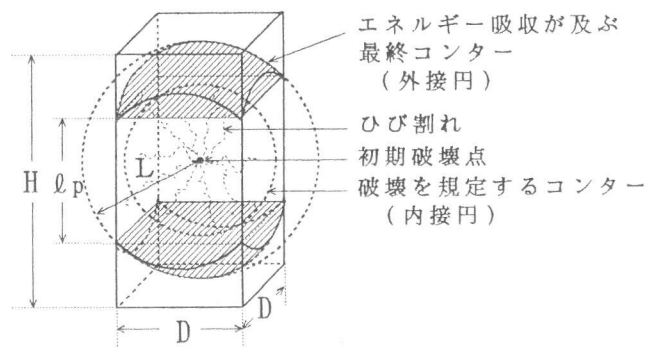


図-11  $H/D = 2$ の供試体の破壊領域

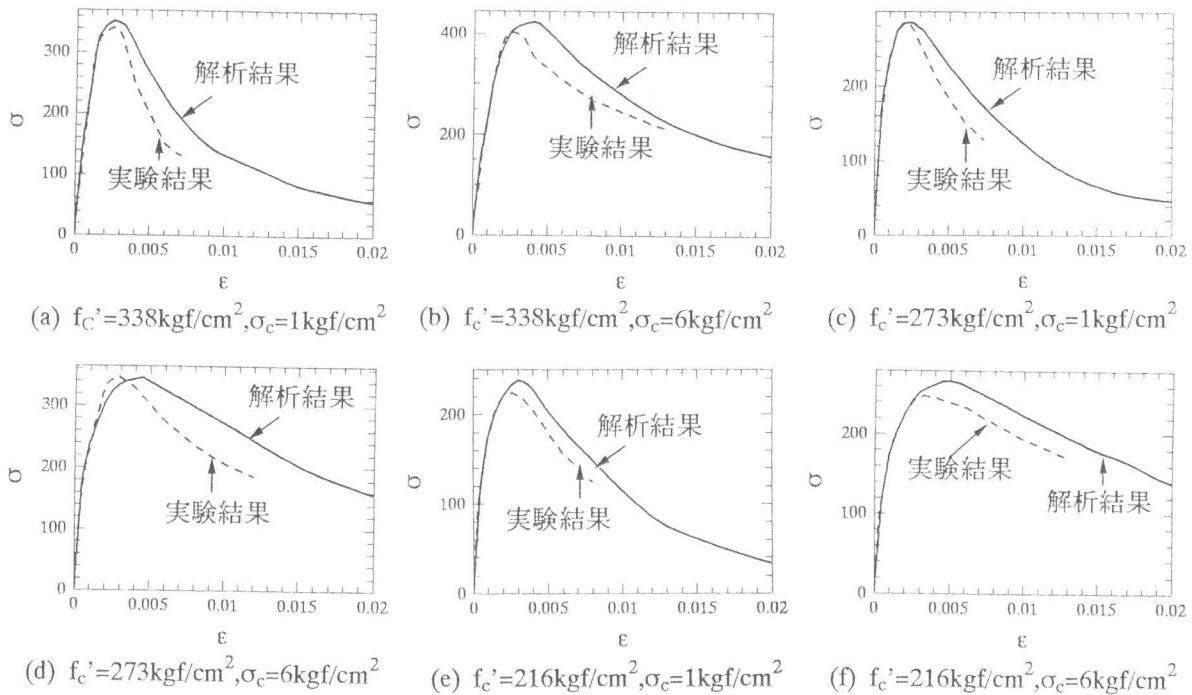


図-1 2 シミュレーション結果

エネルギー量が多く見積もられたことが挙げられる。

## 6. まとめ

本研究をまとめると以下のようである。

- (1) コンクリート供試体内での圧縮破壊エネルギーの吸収パターンをモデル化した。ここでは、コンクリート内の初期破壊点から離れるに従い、エネルギー吸収能は等方的に（三次元的に）低減してゆくと仮定した。
- (2) コンクリート供試体を有限個の要素に分割し、Parallel-Series モデルによる解析手法を紹介した。
- (3) 一軸圧縮強度 ( $f'_c = 355, 675, 943 \text{ kgf/cm}^2$ ) の異なるコンクリート供試体に対するエネルギー吸収能の低減曲線を決定した。さらに、寸法効果及び形状効果の解析に適用できるエネルギー吸収パターンを提案した。
- (4) 上記(3)で得られた結果を基に、基本サイズ ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ ) のコンクリート供試体の応力-ひずみ関係を基本曲線として、圧縮軟化挙動に及ぼす寸法・形状効果の数値シミュレーションを行った。

謝辞：本研究の一部は、財団法人日東学術振興財団によった。ここに感謝致します。

## 《参考文献》

- [1] 水野英二・畑中重光・伊藤 誠：コンクリートの圧縮構成関係に関するエネルギー論的考察とコンクリート充填鋼管柱解析への応用，コンクリート工学論文集，Vol. 5, No. 1, pp. 75-87, 1994. 1
- [2] 畑中重光・水野英二・小池挾千朗・谷川恭雄：供試体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，Vol. 5, No. 1, pp. 65-73, 1994. 1
- [3] 岩瀬裕之・六郷恵哲・小柳 治：コンクリートの破壊における硬化と軟化，セメント技術大会講演集，Vol. 47, pp. 414-419, 1993.
- [4] 近藤洋右・畑中重光・水野英二・谷川恭雄：寸法効果を考慮した三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 2, pp. 33-38, 1993.
- [5] 畑中重光・服部宏己・近藤洋右・谷川恭雄：コンファインド高強度コンクリートの有効側圧と応力-ひずみ関係，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol. 13, pp. 37-42, 1991.
- [6] 小阪義夫・谷川恭雄・畑中重光：多軸拘束効果を考慮した各種コンクリートの圧縮靱性の統一評価に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol. 7, pp. 305-308, 1985.