

論文

[2006] 形状・寸法効果を考慮した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

伊藤 誠<sup>\*1</sup>・水野英二<sup>\*2</sup>・畑中重光<sup>\*3</sup>・谷川恭雄<sup>\*4</sup>

1. まえがき

筆者らは、およそ20 kgf/cm<sup>2</sup>以下の比較的低い側圧下でのコンクリートの圧縮軟化特性および荷経路依存性を理論的に説明するために、ひずみ空間で定義した塑性理論による圧縮軟化構成モデルを開発した<sup>1) 2)</sup>。その際、(10 x10x 10 cm)の寸法を有するコンクリート供試体を基本要素とし、コンクリートの破壊吸収エネルギー（塑性ひずみエネルギー）を定量化した。一般に、形状および寸法の異なるコンクリートの三軸圧縮状態下での破壊吸収エネルギー量は、不均質な材料であるコンクリート内部で生ずる破壊領域の広がり（集中度合）に大きく影響されることが広く知られている。それゆえ、鉄筋コンクリート（RC）構造物などの有限要素解析では、分割要素数に影響されず、かつ、供試体の寸法効果を考慮できる破壊吸収エネルギーモデルを採り入れる必要がある。

本研究では、上記のようなRC構造解析を行う前段階として、供試体の形状ならびに寸法効果を考慮したコンクリートの圧縮破壊吸収エネルギー能に関する考察を図-1に示すような過程で行う。

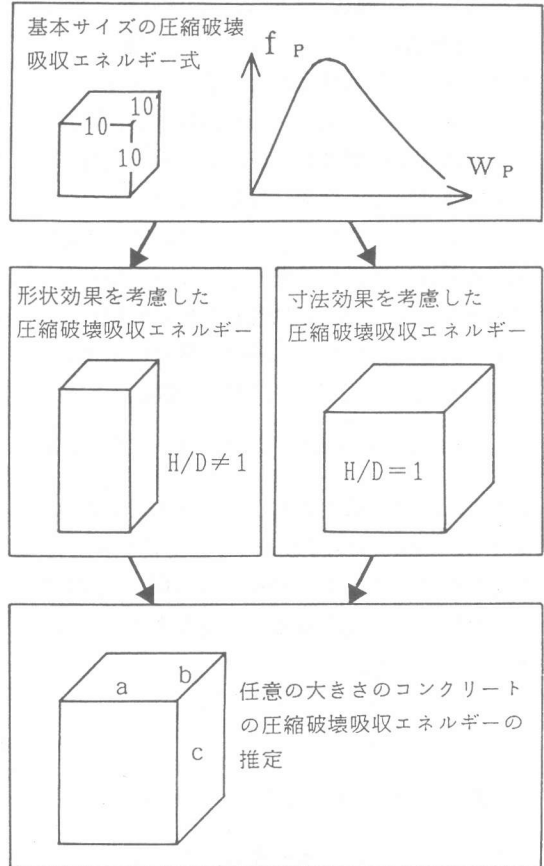


図-1 圧縮破壊吸収エネルギー評価のプロセス

2. 基本サイズの破壊吸収エネルギー

2.1 実験データ

基本サイズの破壊吸収エネルギー式作成のため用いた実験データは、水セメント比 (W/C) が 0.45, 0.55, 0.70のコンクリート供試体 (10 x 10 x 10 cm; 供試体高さ-供試体幅比 H/D = 1) の低側圧 (0 ~ 12 kgf/cm<sup>2</sup>) 下での三軸圧縮実験データ<sup>3)</sup> (13データ)である。なお、破壊曲面の考察に際しては、別報<sup>4)</sup>の円柱供試体 (φ10 x 10 cm) の三軸実験データ (8データ)も用いた。両実験データとも荷重に際しては、荷重板-供試体間の摩擦を減じてある。荷重後の供試体は、ほぼ供試体全域に渡って均等に破壊した。

これら上述した2.1の実験データのピーク荷重点 (破壊点) を無次元応力不変量空間  $I_1/fc' - \sqrt{J_2}/fc'$  にプロットしたものを図-2に示す。ここで、 $I_1$ ,  $J_2$ , および  $fc'$  は、それぞれ応力の一

\*1 名古屋大学学生 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 名古屋大学教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

次、二次の不変量、および一軸圧縮強度である。図中には、無次元応力不変量空間点 ( $I_1/f'_c$ ,  $\sqrt{J_2}/f'_c$ ) の頂点(-0.1, 0), 無次元一軸圧縮強度点(1, 0.58), および実験データの任意の一点を通るように決定されたLade型破壊曲線<sup>1), 2)</sup>の上限および下限曲線をそれぞれ実線で示してある。

## 2.2 破壊吸収エネルギー式

前報<sup>1), 2)</sup>で提案した筆者らの構成モデルでは、破壊吸収エネルギー式として、図-3に示すように、ある荷重点(強度パラメータ $f_p$ )とそれまでにコンクリート供試体の単位体積が受けた塑性仕事量 $W_p$  ( $= \int \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^p$ )との関係式(以下、 $f_p$ - $W_p$ 関係式と呼ぶ)を用いた。ここで、強度パラメータ $f_p$ は、破壊以前は塑性仕事量 $W_p$ が増えるに従って増加し、破壊強度( $f_p = \eta_1$ )に達した後は減少する。強度パラメータ $f_p$ は、一般には塑性仕事量 $W_p$ と側圧 $\sigma_c$ との関数として次式で表現できる。

$$f_p = \alpha \exp(-\beta W_p) (W_p/P_a)^{1/\gamma} \quad (1)$$

ここで、 $P_a$ は大気圧であり、パラメータ $\alpha$ および $\beta$ は、側圧 $\sigma_c$ の関数であるパラメータ $\gamma$ と強度パラメータ $f_p$ の最大値 $\eta_1$ に対応する塑性仕事量 $W_{p,peak}$ との関数として表現することができる。すなわち、

$$\alpha = \eta_1 (e P_a / W_{p,peak})^{1/\gamma} \quad \dots (2)$$

$$\beta = 1 / (\gamma W_{p,peak}) \quad \dots (3)$$

ここに、 $e$ は自然対数の底である。さらに、塑性仕事量 $W_{p,peak}$ および $\gamma$ は側圧 $\sigma_c$ の関数として次式により表される。

$$W_{p,peak} = P (\sigma_c / P_a)^\ell P_a + W_{p,peak}^0 \quad \dots (4) \quad \gamma = \gamma_1 \sigma_c + \gamma_2 \quad \dots (5)$$

ここに、 $P$ ,  $\ell$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ は定数であり、 $W_{p,peak}^0$ は側圧 $\sigma_c$ がゼロの場合の塑性仕事量を示す。

上限および下限破壊曲線(図-2参照)に対するキャリブレーションより得られた $f_p$ - $W_p$ 関係式の各種パラメータ値を表-1に示す。この結果、 $f_p$ の最大値( $\eta_1$ )は側圧 $\sigma_c$ の大きさに拘らず一定であるが、 $\sigma_c$ の増加に伴い、 $W_{p,peak}$ の値は増大し、 $\gamma$ の値はほぼ一定の傾向にあることが分かった。

表-1  $f_p$ - $W_p$ 関係に必要なパラメータ

	$\eta_1$	$\gamma_1$ ( $\text{cm}^2/\text{kgf}$ )	$\gamma_2$	$P$	$\ell$	$W_{p,peak}^0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
上限曲線	1398.9	-0.0344	1.349	0.089	1.036	0.323
下限曲線	1461.7	-0.0126	1.260	0.090	1.029	0.324

注)  $\eta_1$ の値は、文献1)で用いたLade型降伏関数より決定した。

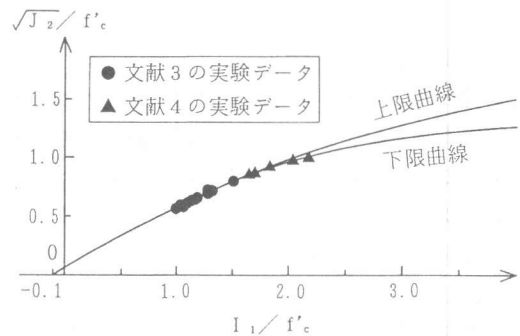


図-2 無次元応力不変量空間での破壊曲線

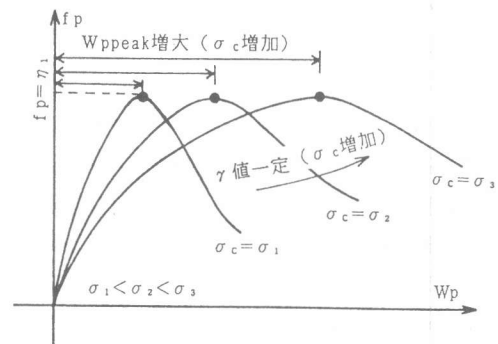


図-3 各種拘束圧下での $f_p$ - $W_p$ 関係

### 3. 形状効果を考慮した破壊吸収エネルギー

#### 3.1 実験データ

基本サイズの実験データとしては、2.1節で示した各種拘束圧下におけるコンクリート供試体 ( $H/D = 1$ ) の実験データを、さらに形状効果を検討するための実験データとしては、 $H/D$  比が 1.3, 2 と異なるコンクリート供試体の実験データ<sup>5)</sup>を用いた。

供試体の破壊状況は  $H/D$  の大きさにより異なり、 $H/D = 1$  および 1.3 の供試体がほぼ全域に渡って破壊したのに対し、 $H/D = 2$  の供試体では破壊が供試体上部に集中し、側圧の大きさにかかわらず、供試体下部のおよそ  $1/3 \sim 2/3$  の部分が未破壊領域として残る傾向がみられた。

$H/D$  (形状) の違いによる一軸圧縮強度  $f_c'$  の変動を図-4 に示す。図中の縦軸は、 $H/D = 1$  における一軸圧縮強度 (図中、●印) を基準としてある。○, △, および□印は、それぞれ  $W/C = 0.45, 0.55, 0.70$  の実験データを示す。載荷板-供試体間の摩擦は減じてあるので、この範囲での形状比では一軸圧縮強度に及ぼす影響は小さいようである。

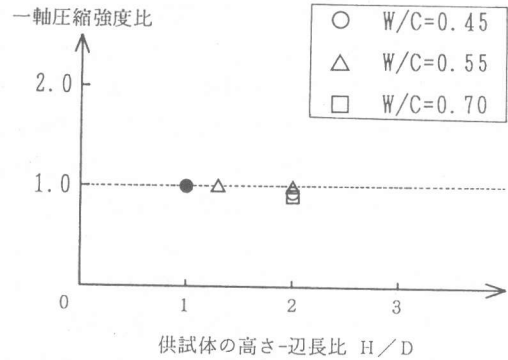


図-4 形状の違いによる一軸圧縮強度比

#### 3.2 破壊領域長さの検討

ここでは、3.1節で述べた実験データを用いて、 $H/D$  の異なるコンクリート供試体の破壊吸収エネルギー性能について考察する。図-5 には、一例として、無拘束圧状態における、 $H/D = 1$  および 2 のコンクリート供試体 ( $W/C = 0.70$ ) のエネルギー吸収能を比較してある。図中、縦軸は軸圧縮応力  $\sigma$  と最大圧縮強度  $\sigma_{max}$  との比、 $\sigma/\sigma_{max}$ 、横軸はコンクリート供試体全体が吸収するエネルギー量  $W_p$  を示す。図から分かるように、最大強度に至るまでに各供試体が吸収した塑性エネルギー  $W_{p1}$  および  $W_{p2}$  は、それぞれ  $309 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ ,  $542 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$  であり、これら数値の比はほぼ供試体体積比と等しい。このことより、この場合、最大強度まで供試体はほぼ均等に塑性変形を受けると仮定することができる。ただし、実

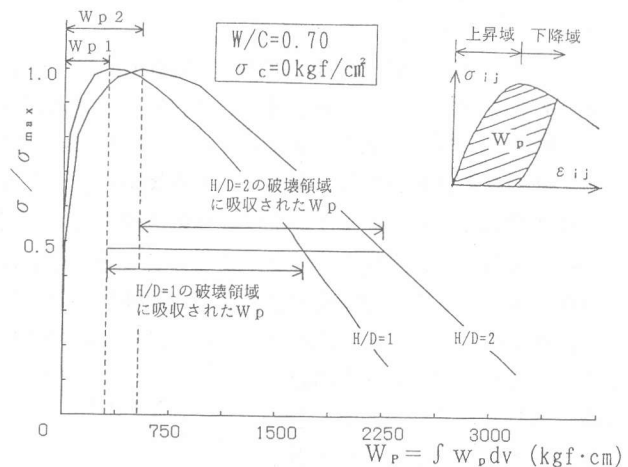


図-5 形状の異なる供試体の破壊エネルギー吸収量

破壊領域長さ  $l_p/D$

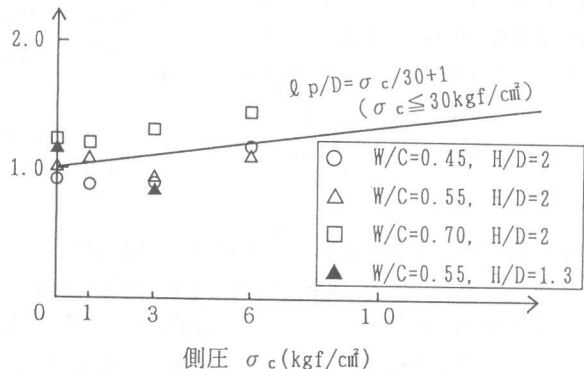


図-6 破壊領域長さに及ぼす拘束圧の影響

験データによっては、側圧の増加に伴って最大強度時の  $W_{p1}$  と  $W_{p2}$  との比が供試体体積比と等しくない傾向も見られた。この点については、今後さらに検討を要する。

もし小阪らの仮想破壊域モデル<sup>6)</sup> および Bazant の Series Coupling Model<sup>7)</sup> が規定するように、最大強度以降、 $H/D = 2$  の供試体内の破壊領域長さ  $l_p$  は  $H/D = 1$  の供試体のそれと同じであるとすれば、最大強度以降の  $\sigma / \sigma_{max} - W_p$  曲線は一致することになる。すなわち、最大強度以降の吸収エネルギーの増加は破壊領域の進展に費やされる量とみなすことができる。例えば、図-5 の下降域でのそれらを比較すると、 $H/D = 2$  の供試体の方が 1.15~1.29 倍だけエネルギー吸収が大きいことが分かる。これは、単位高さ当りの破壊進展に費やされるエネルギーが一定であると仮定すると、 $H/D = 2$  の供試体の破壊領域長さ  $l_p$  は  $H/D = 1$  の供試体のそれに比べ、およそ 1.22 倍だけ広い領域で破壊が起こっているということになる。

3.1 節のすべての実験データに対して、この  $l_p$  の値を求め、 $H/D = 1.3, 2$  の供試体の破壊域長さ  $l_p$  に及ぼす拘束圧  $\sigma_c$  の影響を調べた結果を図-6 に示す。図中、畑中ら<sup>8)</sup> によって実験より求められた推定曲線を実線で示してある。この図から分かるように、各種コンクリートの強度によって違いはあるものの、拘束圧  $\sigma_c$  が増加するに従って破壊領域長さ  $l_p$  は長くなる傾向にある。

#### 4. 寸法効果を考慮した破壊吸収エネルギー

##### 4.1 実験データ

ここで用いた実験データは、別報<sup>4)</sup> で紹介した  $H/D = 1$  の円柱供試体 ( $D = 10, 15, 20$  cm;  $D = 10$  cm の供試体の一軸圧縮強度 = 355, 675, 943 kgf/cm<sup>2</sup>) の三軸実験結果 (24 データ) である。基本サイズの実験データとしては、 $D = 10$  cm の実験データを用いた。横拘束力としては、コンクリート周囲に巻かれた鋼輪による受働型側圧が作用する。

三種類の大きさのコンクリート供試体の破壊状況は、別報<sup>4)</sup> に示すように、破壊片の相対度数-体積分布関係が供試体寸法によらず類似する傾向を示した。

寸法の違いによる一軸圧縮強度  $f_c'$  の変動を図-7 に示す。縦軸は一軸圧縮強度比、横軸は供試体の体積比を示す。なお、図中には、 $D = 10$  cm における一軸圧縮強度 (図中、●印) を基準として、和泉ら<sup>9)</sup> による推定曲線を実線で示してある。○、△、□印は、それぞれ、 $D = 10$  cm の場合の一軸圧縮強度  $f_c'$  が 355, 675, 943 kgf/cm<sup>2</sup> である供試体の実験結果を示す。本実験データは、和泉らによる推定曲線と比較して、 $f_c' = 943$  kgf/cm<sup>2</sup> の場合には、低めの値、 $f_c' = 355$  kgf/cm<sup>2</sup> および 675 kgf/cm<sup>2</sup> の場合には、やや高めの値となっている。

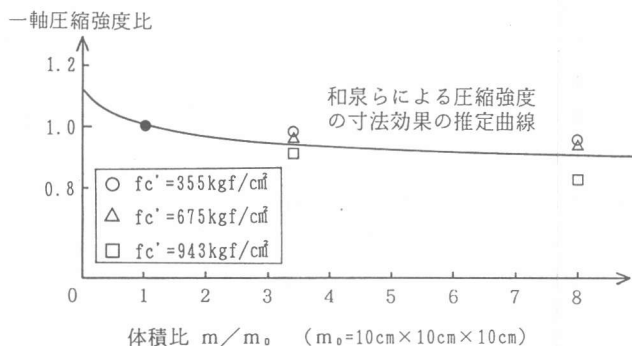


図-7 寸法の違いによる一軸圧縮強度比

##### 4.2 破壊吸収エネルギーにおける寸法効果

別報<sup>4)</sup> の破壊片数-供試体寸法関係および相対度数-体積分布図の結果から、 $D = 15, 20$  cm の供試体の破壊形態は、 $D = 10$  cm の供試体の破壊形態と比較して比例関係 (すなわち、寸法効果なし) および相似関係 (寸法効果あり) にあるのではなく、それらの中間の関係にあることが分かった。それゆえ、別報<sup>4)</sup> の実験的研究で紹介した、中心軸圧縮を受ける  $H/D = 1$  のコンクリート供試体内の破砕パターン概念を、簡便的に、図-8 に示すような供試体内の破壊エネルギー

吸収パターン（ここでは、二次元的に概念図を描いてある）に拡張して考える。この概念図によれば、供試体の中心近くでは単位体積当りの破壊吸収エネルギーは大きく、中心から離れるに従い単位体積当りの破壊吸収エネルギーは減少してゆく。

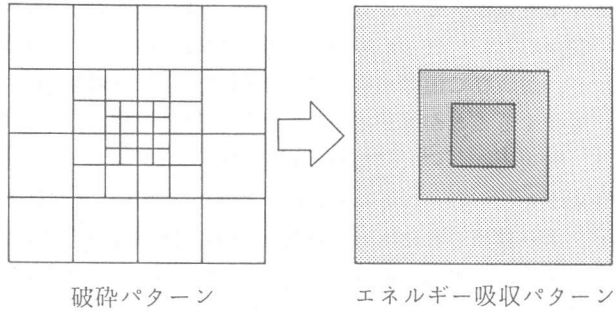


図-8 破碎モデルの破壊吸収エネルギーモデルへの拡張

図-8に示す中心部分（例えば、 $10 \times 10 \times 10$  cmの領域）に吸収される破壊エネルギーが $D = 10$  cmの供試体に吸収される破壊エネルギー（軟化域以降の塑性エネルギー）と等しいと仮定して、さらに外側部分での破壊エネルギー吸収能を $D = 15$  および  $20$  cmの供試体の実験データを基に調べてみた。図-9は、 $D = 10, 15, 20$  cmの各供試体に吸収される破壊エネルギー（ピーク荷重以降の塑性エネルギー）の概略を示す。ここで、縦軸は強度比、横軸は全吸収エネルギー量を示す。図から理解できるように、外側の領域B（供試体中心より $5$  cm ~  $7.5$  cmの領域）および領域C（供試体中心より $7.5$  cm ~  $10$  cmの領域）での破壊吸収

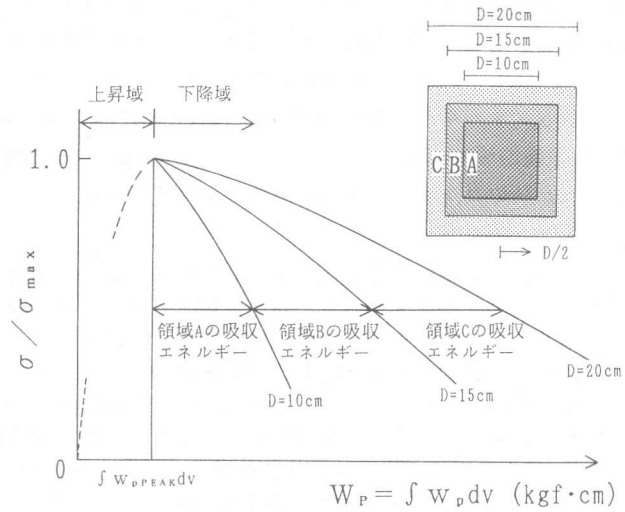


図-9 異なる領域での破壊吸収エネルギー量

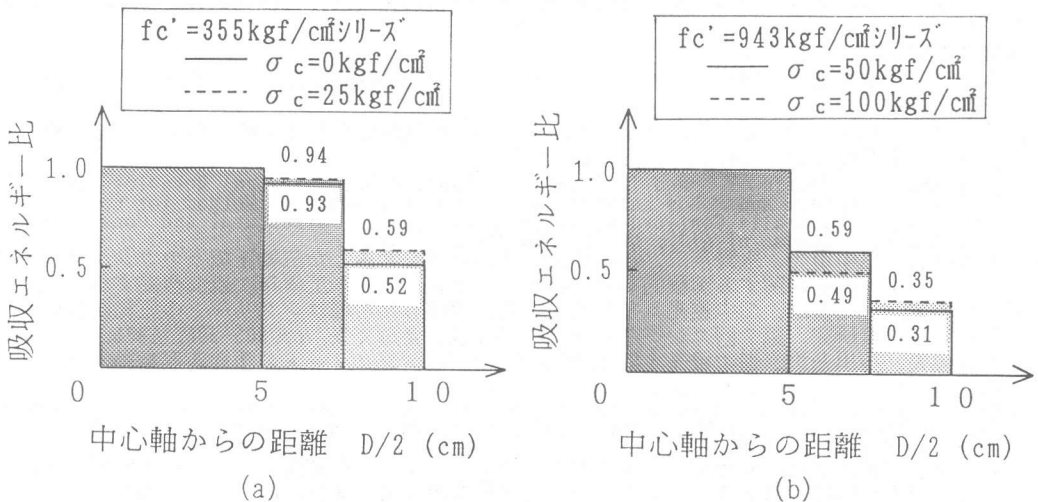


図-10 単位体積当りの破壊吸収エネルギーの低減

エネルギー量は、それぞれ、 $D = 15 \text{ cm}$  と  $D = 10 \text{ cm}$  のエネルギー曲線とのエネルギー差、および  $D = 20 \text{ cm}$  と  $D = 15 \text{ cm}$  のエネルギー曲線とのエネルギー差に等しい。実験データより、これら A, B, および C 領域に吸収される単位体積当りの破壊エネルギーは、供試体中心から離れるに従い減少することが確認された。計算結果の一例を図-10に示す。図10(a), (b)の結果は、拘束圧  $\sigma_c = 0, 25 \text{ kgf/cm}^2$  下でのコンクリート供試体（一軸圧縮強度:  $355 \text{ kgf/cm}^2$ ）および拘束圧  $\sigma_c = 50, 100 \text{ kgf/cm}^2$  下でのコンクリート供試体（一軸圧縮強度:  $943 \text{ kgf/cm}^2$ ）の実験データより求められたものである。なお、縦軸は各領域に吸収される単位体積当りの破壊エネルギーを領域 A に吸収される単位体積当りの破壊エネルギーで無次元化したエネルギー比を、横軸は供試体中心からの距離を示す。図から分かるように、拘束圧に関係なく破壊吸収エネルギーの低減状態は類似の傾向を示している。

### 5. 任意の大きさを有するコンクリート供試体の圧縮破壊吸収エネルギー

図-1に示すような任意の大きさ ( $a < b < c$ ) を有するコンクリート供試体の圧縮破壊吸収エネルギーを推定する場合には、まず、ある大きさ ( $a \times b \times b$ ) を有するコンクリート供試体の破壊吸収エネルギー能を4.2節で述べた破砕モデルにより求める。次に、これを基本として、3.2節の仮想破壊域モデルにより、 $H/D = c/b$  の供試体の破壊吸収エネルギー能を推定し、これを ( $a \times b \times c$ ) のコンクリート供試体のエネルギー吸収能とする。

### 6. まとめ

本研究では、中心軸圧縮を受けるコンクリート供試体の破壊吸収エネルギーに関する供試体の形状および寸法効果を考察した。本研究による結果をまとめると以下のようである。

- 1) 基本サイズのコンクリート供試体の圧縮実験結果（側圧  $100 \text{ kgf/cm}^2$  まで）を用いて、上限および下限破壊曲線を決定し、破壊吸収エネルギー式のパラメータの変動幅を検討した。
- 2) 形状 ( $H/D$ ) の異なる供試体の破壊領域の長さ  $l_p$  は、拘束圧が増加するにつれて ( $0 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$ ) 大きくなることを破壊吸収エネルギーの観点から確認した。
- 3) 寸法 ( $D$ ) の異なる供試体の単位体積当りのエネルギー吸収能は、寸法  $D$  が大きくなるに従い、小さくなることが分かった。これは破砕モデル (図-8) により合理的に説明できた。
- 4) 図-8の破壊吸収エネルギーモデルは、今後、RC構造物などの有限要素解析を行うための基礎資料となるものと期待できる。

謝辞：本研究に際し、貴重な御示唆を賜った JCI 破壊力学の応用研究委員会（委員長：東北大学助教授：三橋博三）・構造設計WG（主査：岐阜大学助教授：六郷恵哲）のメンバーの方々に謝意を表す。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費・総合研究（A）（研究代表者：千葉大学教授：野口博）によったことを付記する。

#### 【参考文献】

- 1) 水野英二，畑中重光：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，Vol. 2(2)，pp. 85-95，1991。
- 2) 水野英二，畑中重光：塑性理論によるコンクリートの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，Vol. 3(2)，pp. 1-13，1992。
- 3) Hatanaka, S., Kosaka, Y., and Tanigawa, Y., 'Plastic Deformational Behavior of Axially Loaded Concrete under Low Lateral Pressure - An Evaluation Method for Compressive Toughness of Laterally Confined Concrete (Part I) -', J. Structural and Construction Engineering, (Trans. of AIJ), No. 377, pp. 27-40, 1987.
- 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実験的研究，第15回コンクリート工学年次講演会論文集，1993。
- 5) 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，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 305-308，1985。
- 6) 小阪義夫，谷川恭雄，畑中重光：低側圧三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動，材料，Vol. 34, No. 376, pp. 19-25, 1985。
- 7) Bazant, Z.P., Identification of Strain-Softening Constitutive Relation from Uniaxial Test by Series Coupling Model for Localization, Cement and Concrete Research, Vol. 19, No. 6, pp. 973-977, 1989。
- 8) 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，第13回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 37-42, 1991。
- 9) 和泉正哲，三橋博三：確率過程理論に基づいたコンクリートの破壊理論，Part III，日本建築学会論文集，第310号，pp. 1-9，1984.12。