

# 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

## EXPERIMENTAL STUDY ON SIZE EFFECT IN CONSTITUTIVE RELATIONSHIP OF COMPRESSIVE CONCRETE

小池 狭千朗<sup>\*1</sup>, 畑中 重光<sup>\*2</sup>, 水野英二<sup>\*3</sup>, 谷川恭雄<sup>\*4</sup>

Sachio KOIKE<sup>\*1</sup>, Sigemitsu HATANAKA<sup>\*2</sup>, Eiji MIZUNO<sup>\*3</sup> and Yasuo TANIGAWA

[Abstract] There are two main purposes in the present study. One is to examine the effect of specimen size on the stress-strain curves of concrete under uniaxial and triaxial compressive stress states. The other is to grasp quantitatively the cracking pattern of specimens from the data analysis of the size distribution of concrete fragments of the tested specimens after failure. It is found that the effect of specimen size on the deformation behavior of concrete under triaxial compression is more remarkable than that under uniaxial compression. Based on the data analysis, a model of compressive cracking pattern is proposed. Discussion is also carried out on the size effect in the compressive deformation behavior of concrete, spotlighting the dissipation energy at cracking.

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート部材や構造物を実大で実験するには大型の載荷設備を必要とし、多額の経費と手間がかかるため、小型供試体を使用することが多い。これらの小型供試体の実験結果を実大構造物や部材に適用するに際しては、実大と小型の相互関係、すなわち寸法効果をあらかじめ確認しておく必要がある<sup>1)~5)</sup>。

コンクリートの圧縮強度の寸法効果は、引張・曲げ・せん断強度の寸法効果に比べて小さく、実大部材の圧縮強度は、通常の供試体(断面 $\phi$  10 cm~15 cm)の圧縮強度のおよそ80~90%と考えられている<sup>6)</sup>が、高強度になるほど寸法効果が大きくなるとの報告<sup>7)~9)</sup>も見られる。また、圧縮下のコンクリートのピーク応力以後の破壊性状は、供試体寸法の増大に伴い、かなり脆性的に

なり、このような寸法効果もまたコンクリート強度に依存して異なるようである<sup>9),10)</sup>。

筆者らは昨年度までの一連の研究により、高強度レベルに至るまでの三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす各種要因の影響を明らかにしてきた<sup>11)~13)</sup>。しかし、用いた供試体は、断面の直径あるいは一辺が10 cmであり、実部材と比べるとかなり小さい。そのため、これまで得た知見を実部材の挙動解析に適用するには供試体寸法の影響をも論じておく必要がある。

本研究では、まず一軸および三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響を実験的に調べる。また、破壊後の供試体の破壊片の大きさを定量的に調べることによって、供試体内部のひび割れパターン<sup>14)</sup>の分析を行う。次にその分析結果および破壊片分布に関する表示式を用いて、破壊の際に単位クラック面で消費されるエネルギー量を概算する。

### 2. 実験方法

表-1に、実験の概要を示す。実験要因としては、供試体の断面寸法( $D$ )、コンクリートの圧縮強度( $F_c$ )、お

\*1 愛知工業大学 建築学科  
\*2 三重大学 建築学科  
\*3 名古屋大学 土木工学科  
\*4 名古屋大学 建築学科

よび横拘束圧の大きさ ( $\sigma_L$ ) を取り上げた。供試体の高さ一直径比 ( $H/D$ ) は 1, 帯筋 (鋼輪) のピッチ ( $S$ ) は  $D/4$  とした。本実験は, 受働型の三軸圧縮実験である。すなわち, 側圧は, コンクリート外周部の鋼輪によって与えられる。側圧が供試体全体にほぼ均等に加わるためには, 供試体全体が一様に膨張する必要がある。そのために, 本実験では, 比較的均等な破壊が期待できる  $H/D=1$  の円柱体を供試体として用いた<sup>11)</sup>。全鋼輪が降伏した場合に供試体にかかる側圧を表-2 に示す。鋼管でコンクリートを横拘束する場合, 周囲の鋼管とコンクリートとの間には付着が存在するため, 鋼管を適当な幅で切断 (鋼輪) しておくことが望ましい。著者らの既往の研究<sup>13)</sup>によれば, 鋼輪のピッチを  $D/4$  以下とすれば (クリアランスは, 表-2 参照) 鋼輪間隔による有効側圧の低下はあまり大きくないものと考えられるが, 3.2 節で述べるようにこの点に関する比較実験も別に行った。

供試体の製作には, 普通ポルトランドセメント, 川砂 (5 mm 未満), 砕石 (5~15 mm), シリカフェーム ( $F_c = 1\,000 \text{ kgf/cm}^2$  シリーズのみ), 高性能 AE 減水剤, および鋼輪を使用した。設計スランプは 20 cm, 調合強度 ( $F_c$ ) は, 400, 700 および 1 000  $\text{kgf/cm}^2$  とした。

供試体は, 材令 1 日目にキャッピング, 2 日目に脱型した後, 養生室内 (温度  $27 \pm 1^\circ\text{C}$ , 相対湿度  $88 \pm 2\%$ ) で空中養生を行った。試験材令は, 約 50 日とし, 供試体の個数は, 各要因毎に 2 個とした。

载荷には, 耐圧試験機 (最大耐力 600 tf) を使用した。また, 载荷面には 2 枚のポリプロピレンシートにシリコングリスを塗布した減摩パッドを挿入した。

軸方向のひずみを測定するため, 供試体の上下端から  $0.05 H$  の位置に, ボルトによって鋼製枠を固定した (すなわち, 軸ひずみの検長は  $0.9 H$  である)。応力上昇域のひずみは, 鋼製枠に取り付けた一対の変位計で, 下降域のひずみは, 鋼製枠を外した後, 载荷板間に取り付けた一対の変位計でそれぞれ測定した。

鋼輪のひずみは, 所定の鋼輪に貼付した一対のワイ

ヤーストレインゲージ (W.S.G.) によって測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 鋼輪のひずみおよび側圧の分布状況

図-1 に, 鋼輪のひずみから計算した供試体の側圧 (計算側圧) の一例を示す。図および他の実験結果によれば, コンクリートの強度に拘らず, 鋼輪による側圧は降伏 ( $\sigma_{LY}$ ) 以前では若干ばらつく傾向があるが, 降伏時の側圧は供試体全体にほぼ一様にかかっている。このことから, 本実験を受働型の三軸圧縮実験と見なすことができる。

表-1 実験概要

$D$ (cm)	$F_c$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	$\sigma_L$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )
10	400	0, 25, 50
15	700	0, 50
20	1 000	0, 50, 100

注)  $D$ : 供試体呼び寸法,  $F_c$ : コンクリート強度の目標値,  $\sigma_L$ : 鋼輪降伏時の側圧の目標値, 高さ一直径比は 1, 鋼輪ピッチは  $D/4$

表-2 鋼輪降伏時の側圧の計算値

$D$ (mm)	$f_y$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	$t$ (mm)	$d$ (c) (mm)	$\sigma_L$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )
95.2	2 560	3.2	3.6 (20.2)	26.3
			7.2 (16.6)	52.6
			14.5 (9.3)	105.2
156.2	2 600	4.5	6.4 (32.7)	24.7
			12.9 (26.2)	49.4
			25.7 (13.4)	98.8
204.4	3 130	5.8	6.9 (44.2)	24.1
			13.9 (37.2)	48.2
			27.8 (23.3)	96.5

注)  $D$ : 供試体寸法 (鋼輪の内径),  $f_y$ : 鋼輪の降伏点,  $t$ : 肉厚,  $d$ : 鋼輪幅,  $c$ : 鋼輪のクリアランス (すなわち,  $S=d+c$ ),  $\sigma_L$ : 鋼輪降伏時の計算側圧,  $\sigma_L = (2 \cdot t \cdot d / S \cdot D) \times f_y$  で算定

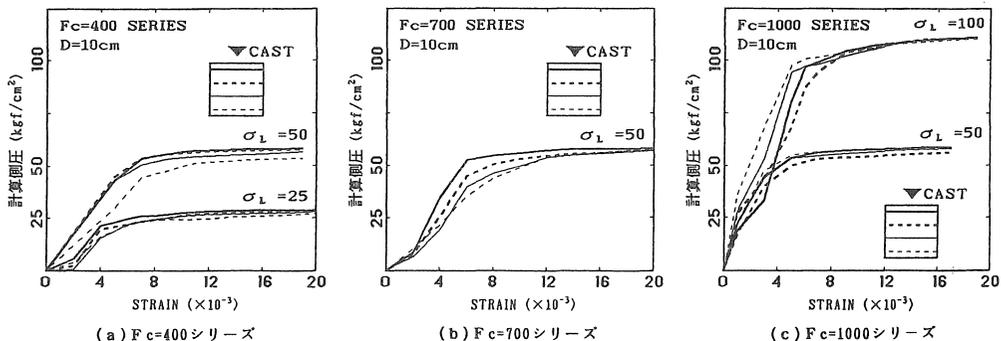


図-1 計算側圧曲線

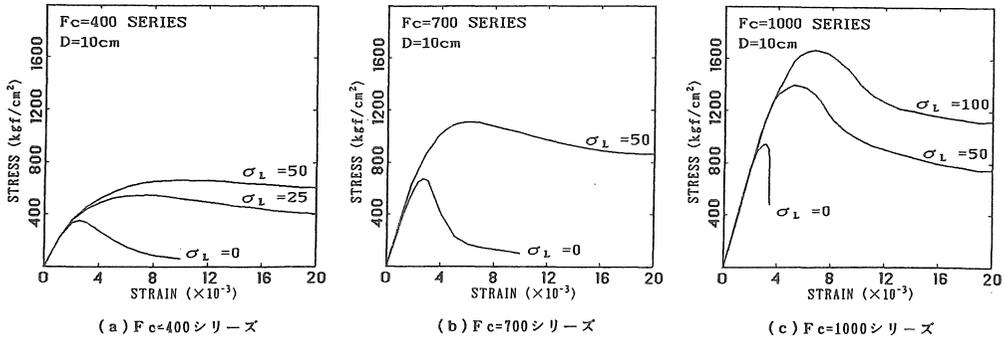


図-2 応力-ひずみ曲線 (側圧の影響)

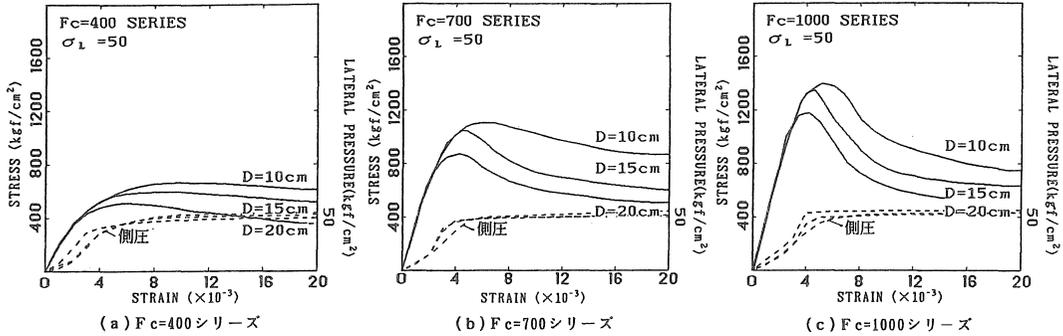


図-3 応力-ひずみ曲線 (供試体寸法の影響)

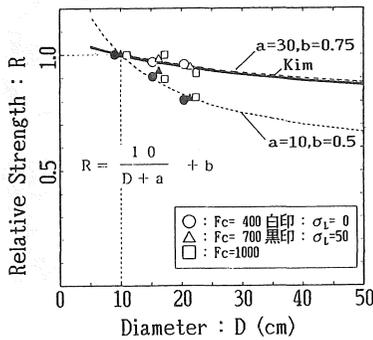


図-4 ピーク応力に及ぼす供試体寸法の影響

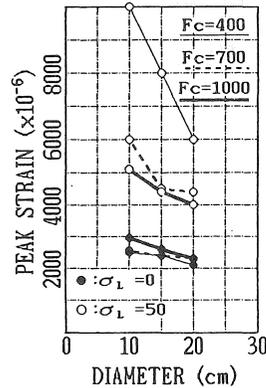


図-5 ピークひずみに及ぼす供試体寸法の影響

3.2 応力-ひずみ曲線

図-2に、縦応力-縦ひずみ曲線に及ぼす側圧の影響を示す。図-3は、縦応力-縦ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響を示したものである。図および他の実験結果によれば、供試体寸法の増大と共に、ピーク応力および圧縮靱性の低下が顕著にみられる。このような寸法効果は、コンクリート素材の力学挙動における寸法効果に加え、鋼輪のクリアランスの絶対量の差異にも依存している可能性がある。そのため F<sub>c</sub>=700 シリーズについて、鋼輪のピッチ S を D/8 とした供試体を作成し同様な実験を行ったが、応力-ひずみ曲線の実測値は、

S=D/4 と D/8 ではほとんど相違しなかった。

3.3 ピーク点に及ぼす供試体寸法の影響

図-4に、D=10 cm の供試体の圧縮強度に対する相対強度を示す。なお、図中の実線は Blanks の実験データ<sup>1)</sup>から求めた Kim らの提案式<sup>14)</sup>を、また破線は、相対強度 R を次式で表示した場合の本実験値に対する上限および下限を示している。

$$R = \frac{10}{D+a} + b$$

ここに、D : 供試体寸法 (cm)

a, b : 実験定数

図によれば側圧が大きいほど，低下率が大きくなる傾向がみられる。なお，図中の破線は，参考のため，本実験の範囲外についても描いてある。ここで上式によれば， $b$  の値は，実大部材の相対強度の概略値（下限値）を与えることになる。

図-5 に，ピーク時のひずみに及ぼす供試体寸法の影響を示す。図によれば，供試体寸法の増大に伴い，ピーク時のひずみは，ほぼ比例的に低下し， $D=20$  cm の供試体のピークひずみは，多くの場合， $D=10$  cm の供試体の約 80 % に低下している。

3.4 一軸圧縮下のコンクリート供試体の破碎状況

一軸圧縮下のコンクリートの破碎状況を写真-1 に示す。破壊片は原則として，径の大きいものから順に右へ並べてある。また，上下方向の位置については，供試体内の元の位置に対応するように配慮した。

(1) コンクリート強度の影響

破壊片の表面状態を見ると， $F_c=400$  シリーズでは，凹凸が顕著であるのに対し， $F_c=1000$  シリーズでは，凹凸が少ない。大径のものについて破壊片の長さを見る

と， $F_c=400$  シリーズでは，供試体高さを 2 または 3 分割する破壊片が多いのに対し， $F_c=1000$  シリーズでは，供試体高さと同じ長さの破壊片の数が多くなる。これは， $F_c=400$  シリーズでは，ひび割れが骨材を迂回して起こるのに対し， $F_c=1000$  シリーズでは，ほとんどの骨材が破壊して，ひび割れが載荷軸方向にほぼ貫通するようになるからである。また，細かい破壊片の量（各写真中の右下の細片群）は，供試体寸法に拘らず，コンクリート強度の増大に伴って減少している。

(2) 供試体寸法の影響

写真-1 は，全ての供試体が同寸法となるように，すなわち，供試体の寸法比で縮小してある。写真において，これらの破壊片のうち比較的大きなものを観視すると，破壊片の大きさは，供試体寸法によってあまり変化せず類似している。すなわち，大径の破壊片は，ほぼ供試体の寸法比に応じた大きさになっているといえる。細径の破壊片も含めた定量的な分析は，次節で行う。

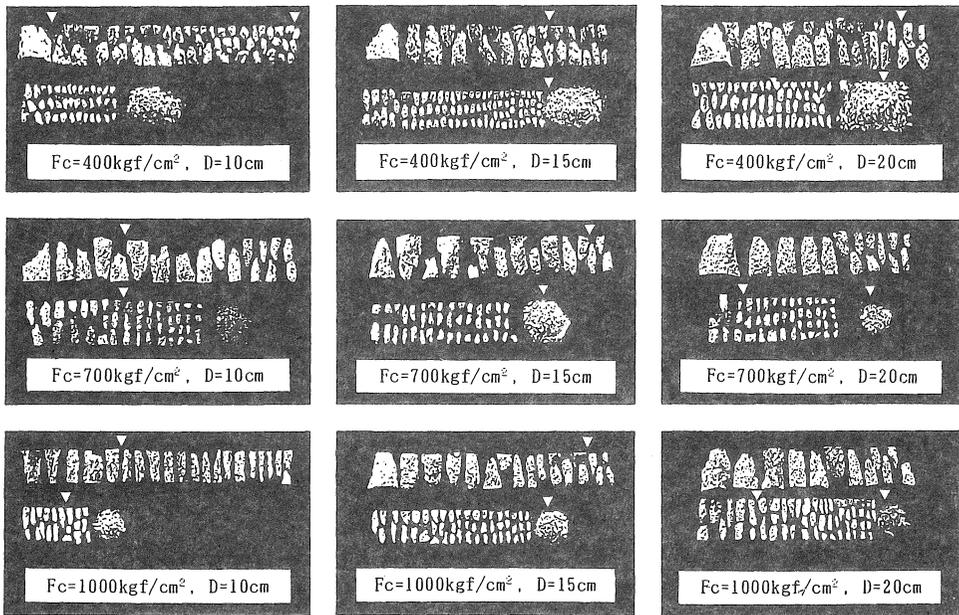


写真-1 一軸圧縮時のコンクリートの破壊状況

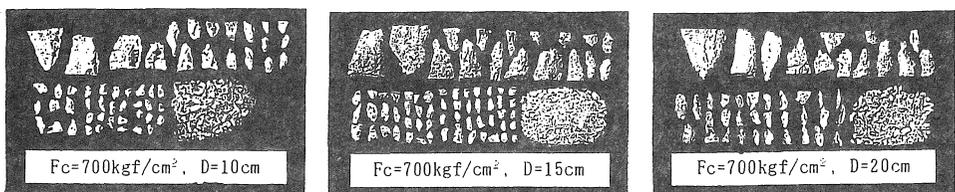


写真-2 三軸圧縮時のコンクリートの破壊状況 ( $\sigma_L=50$ ,  $F_c=700$  シリーズ)

3.5 供試体の破砕状況の分析

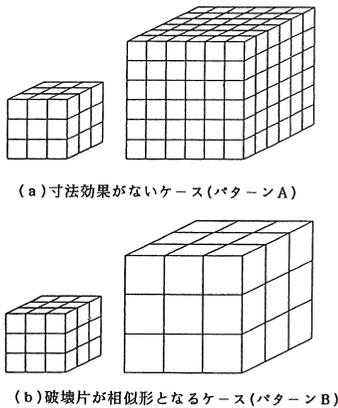
ここでは、側圧  $\sigma_L=0$  および 50 シリーズについて、体積が  $2 \text{ cm}^3$  以上の破壊片の体積分布および度数分布を調べた。 $\sigma_L=50$  シリーズの供試体は、載荷終了後(軸ひずみがおおよそ  $20 \times 10^{-3}$  の時点で載荷を終了)、周囲の鋼輪を切断、除去し、再度一軸圧縮によって破砕した。したがって、支配的なひびわれのパターンは、おおよそ  $\epsilon = 20 \times 10^{-3}$  時点のものと思えることができる。参考のために、 $\sigma_L=50$  シリーズの破壊状況を  $F_c=700$  シリーズについてのみ写真-2 に示しておく。 $\sigma_L=0$  シリーズの場合と比較的類似した破砕状況であることがうかがえる。

(1) 理想的な破壊パターン

図-6 (a) および (b) は、コンクリート供試体の破壊パターン概念図を示したものである。(a) 図は寸法効果がないパターンを、(b) 図は最も明解な寸法効果を示すと思われるパターンで、破壊片が供試体寸法比に応じて拡大、縮小するケースである。本研究では、実際の破壊片の分布をこれらの二つのパターンと対照しながら考察する。

(2) 分析方法

図-7 は、大径(体積  $v=36 \text{ cm}^3$  以上)、中径( $2 \leq v < 36 \text{ cm}^3$ )、および小径( $v=2 \text{ cm}^3$  未満)の破壊片の占有



(a) 寸法効果がないケース(パターンA)

(b) 破壊片が相似形となるケース(パターンB)

図-6 供試体の典型的な破壊パターン

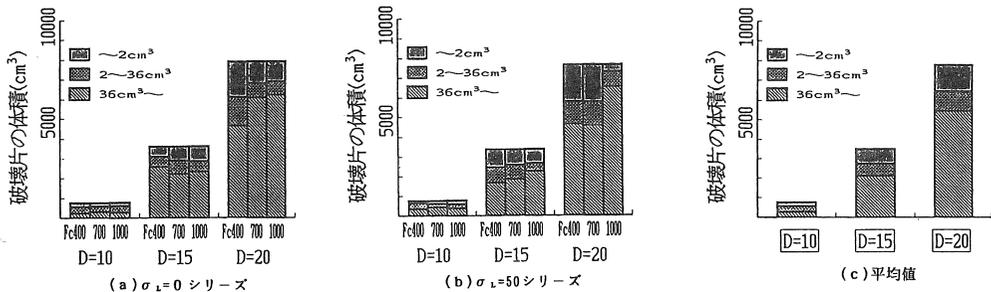


図-7 体積分布図

率を各供試体毎に示したものである。ここで、破壊片の区分けの目安とした値は、2 および  $36 \text{ cm}^3$  である(写真-1 中に▽印で示した)。 $v=2 \text{ cm}^3$  は、最大寸法  $\phi_a=1.5 \text{ cm}$  の粗骨材が球と仮定した場合の体積  $v=4\pi(\phi_a/2)^3/3=1.8 \text{ cm}^3$  にほぼ相当する。一方、 $v=36 \text{ cm}^3$  は、破壊片の度数を増分  $\Delta v=2 \text{ cm}^3$  毎の階級で求めた場合に、各階級の度数が 0 とならないための階級のおよその最大値である(図-9 参照)。また  $v=36 \text{ cm}^3$  は、2.7  $\phi_a$  を直径とする球の体積にほぼ相当する。

(3) 破壊片の体積分布

図-7 (a) および (b) によれば、破壊片の体積分布は、コンクリートの圧縮強度  $F_c$  および側圧  $\sigma_L$  に拘らず供試体寸法毎に比較的類似しており、その平均値を示せば図-7 (c) のようになる。

(4) 破壊片の度数分布

i) 総数：各供試体の  $2 \text{ cm}^3$  以上の破壊片の個数

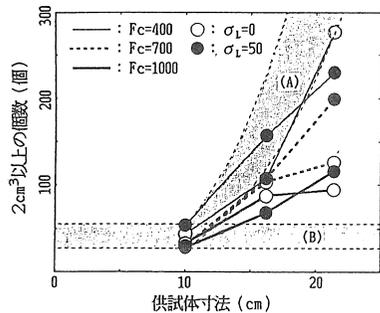


図-8 破壊片の総数

表-3 破壊片の度数分布の表示式 ( $v=2 \text{ cm}^3$  以上)

式(1)	$N = \alpha(D-9) + 25$ ここに、 $\alpha = -0.9\sqrt{F_c} + 35$ $F_c$ : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) $D$ : 供試体寸法 (cm) 個数 $N$ は切上げ
式(2)	$\frac{n}{N} = \frac{2}{(v_m-1)^2}$ ここに、 $v_m = 2m-1$ , $m$ は 2~18 の整数 度数 $n$ は切上げ
式(3)	$n = m, v_m = \frac{V}{3} \cdot 2^{-m} \quad (m=1, 2, \dots)$ ここに、 $v_m \geq 36$ , $V$ : 供試体の体積 (cm <sup>3</sup> )

を図-8に示す。図によれば、破壊片の総数  $N$  は、供試体寸法の増大とともに増加するが、供試体の体積比ほどは増加しない。図中のゾーン (A) および (B) は、それぞれ図-6の破壊パターン (A) および (B) に対応する。図によれば供試体の破壊は、およそ両者の中間に位置していると推測される。破壊片の総数  $N$  の値を供試体寸法  $D$  の一次式で表せば、側圧に拘らずほぼ表-3の式 (1) のようになる。

ii) 中径・大径の破壊片の度数分布：図-9に各階級の体積の破壊片の度数分布を示す。(a) 図は中径の破壊片、(b) 図は大径の破壊片の実測例である。(a) 図の縦軸は相対度数であり、 $N$  は中径の破壊片の総数である。体積  $v$  の階級は、 $v=2 \text{ cm}^3$  を最小値とし、増分  $\Delta v=2 \text{ cm}^3$  を与えて  $v=36 \text{ cm}^3$  までの17階級とした。したがって各階級の中央値  $v_m$  は、 $(2m-1) \text{ cm}^3$  ( $m$  は、2~18の整数) である。図によれば、相対度数  $n/N$  は、破壊片の体積  $v$  の増加とともに急激に減少し、その傾向は供試体寸法に拘らず類似している。この径の破壊片群では、コンクリート強度および側圧に拘らずほぼ同様な関係、すなわち破壊パターン (A) に相当する関係が得られた。これらの関係は、ほぼ表-3中の式 (2) のような関数で表すことができる。

(b) 図の体積  $v$  の階級は、 $v_m=V/3$  (ここに、 $V$  : 供試体体積) を最大値とし、 $v=36 \text{ cm}^3$  程度までを最大値からの0.5倍ピッチで刻んである。この相対体積に対す

る大径の破壊片の個数は、供試体寸法、コンクリート強度および側圧に拘らずほぼ一定の関係にあり、直線式で表せば、表-3中の式 (3) のようになる。このことは、大径の破壊片の分布が図-6に示した破壊パターン (B) (相似形) に相当することを示唆しており、写真-1を概観した際に推測された寸法効果と一致するものである。

3.6 破砕モデル

(1) 理想的な破壊パターンとの関係

本実験で得られたコンクリートの破壊パターンは、既に図-6で示したパターン (A) および (B) の中間にあるようである。すなわち、ひびわれ単位面積当りの破壊吸収エネルギーが供試体寸法に拘らず一定であるとする、供試体全体としての平均的なエネルギー吸収能力には自ずと供試体寸法の影響が現れることになる。

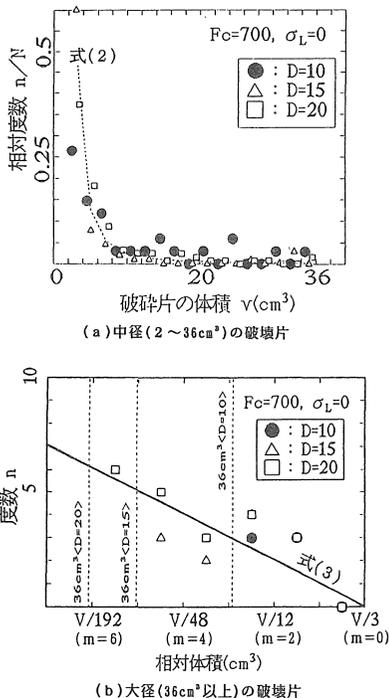


図-9 度数分布図

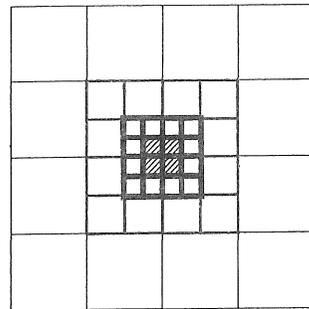


図-10 破壊パターンの概念図

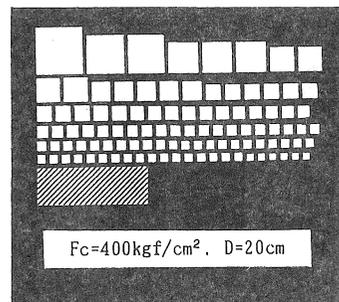
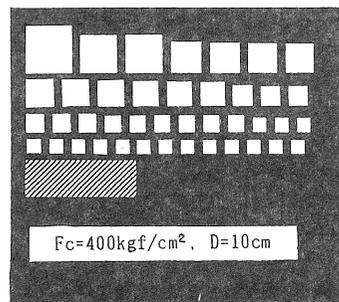


図-11 破壊片の分布の計算例

(2) 破碎モデル

本実験で得られた結果からコンクリートの圧縮破壊パターンの概念図を示せば、図-10 になる。なお、図の中心部の斜線は、非常に細かい破壊片の集合を表している。ここで、各階級(径)の破壊片の比率は、表-3 中の式(1)~(3)で表されたように供試体寸法、およびコンクリート強度によって異なる。

(3) 写真-1 との比較例

3.5 節の分析結果(図-7 (c))に基づき、中径および大径の破壊片の合計体積を供試体体積のおよそ 80 % とし、その内訳を表-3 中の式(1)~(3)を用いて計算した破壊片の分布例を図-11 に示す。また、計算上の仮定を表-4 にまとめて示す。ここでは便宜上、総体積の 20 % を占める小径の破壊片( $v=2 \text{ cm}^3$  未満)をすべて  $v=1 \text{ cm}^3$  の立方体として表した。総体積は必ずしも供試体の原体積と一致はしない(原体積  $\pm 10\%$  以内)が、写真-1 の破壊片と比較してほぼ類似した分布が得られているといえる。

3.7 ひび割れ単位面積の消費エネルギー

本実験では、 $\sigma_L=0$  シリーズでは軸ひずみ( $\epsilon$ )がおよそ  $10 \times 10^{-3}$  の時点で、また  $\sigma_L=50$  シリーズでは、およそ  $20 \times 10^{-3}$  の時点で荷重を終了している。また、 $\sigma_L=50$  シリーズの供試体は、荷重終了後、周囲の鋼輪を切断、除去し、再度一軸圧縮によって破碎した。したがって、支配的なひびわれのパターンは、 $\sigma_L=0$  シリーズではおよそ  $\epsilon=10 \times 10^{-3}$  時点、 $\sigma_L=50$  シリーズでは  $\epsilon=20 \times 10^{-3}$  時点のものを見なすことができる。

ひび割れ単位面積当りの破壊吸収エネルギー  $e$  は、次式で求めることができる。

$$e = \frac{W_P}{A} \quad (4)$$

ここに、 $W_P$ : 塑性仕事量 (kgf·cm)

$$W_P = \int \sigma_i d\epsilon_i^p$$

で算定。ここで、 $\sigma_i$ : 主応力、 $\epsilon_i^p$ : 主応力方向の塑性ひずみ

$A$ : ひび割れ面の表面積の和 ( $\text{cm}^2$ )

$$A = 3\{ \sum (v^{2/3}) - (\sum v)^{2/3} \}$$

表-4 クラックパターンの計算上の仮定

1) 破壊片の形状: 立方体	
2) 破壊片の容積占有率	
小径 ( $v < 2 \text{ cm}^3$ )	20 %
中径 ( $2 \leq v < 36 \text{ cm}^3$ )	} 約 80 %
大径 ( $v \geq 36 \text{ cm}^3$ )	
3) 中径および大径の破壊片の度数	
表-3 中の式(1)~(3)による	
4) 小径の破壊片の大きさ: $v=1 \text{ cm}^3$	

で算定。ここで、 $v$ : 立方体破壊片の体積。

式(4)において、塑性仕事量  $W_P$  は一軸および三軸圧縮実験データにより求める。また、ひび割れ面の表面積の和は、破壊片の形状を便宜上、立方体と仮定することで、前節で得られた破壊片の体積分布の表示式を用いて求めることができる。

図-12 に、上述の荷重終了時点でのひび割れ単位面積当りの破壊吸収エネルギー  $e$  の計算値を示す。但し、 $\sigma_L=0$  シリーズの  $W_P$  の値は、 $\epsilon=10 \times 10^{-3}$  と  $\epsilon=20 \times 10^{-3}$  の時点であり変化しない。ここでは、大径または中径の破壊片を、まず表-3 の式(1)~(3)を用いて求め、総体積の 80 % となるように比例配分した。また、 $v=2 \text{ cm}^3$  未満の小径の破壊片は、平均的に一律  $v=1 \text{ cm}^3$  と仮定した。図によれば、側圧がかかると  $e$  の値が増大し、 $\sigma_L=50$  シリーズでは、 $\sigma_L=0$  シリーズのおよそ 10 倍程度の値が得られている。また、供試体寸法の増大にともない  $e$  の値が若干小さくなる傾向が見られるが、これは、 $2 \text{ cm}^3$  未満の破壊片の体積を供試体寸法に拘らず一律  $1 \text{ cm}^3$  としたこと起因しているものと考えられる。ちなみに、 $\sigma_L=0$  シリーズの  $e$  の値はおよそ  $1 \sim 2 \text{ kgf/cm}$  である。これは引張破壊時のひび割れ単位面積当りの消費エネルギーのおよそ 10 倍に相当する値である。

3.8 小径の破壊片

前節で求めたように各供試体において体積の 80 % は既に破壊パターンが決定している。(表-3 の式(1)~(3)を使用)。前節では、供試体体積の 20 % を占める  $2 \text{ cm}^3$  未満の小径の破壊片の体積を、便宜上、全て  $1 \text{ cm}^3$  であると仮定したが、本節では、ひび割れ単位面積当りの消費エネルギー  $e$  の値が供試体寸法  $D$  やコンクリート強度  $F_c$  に拘らず一定値になる場合について考察する。

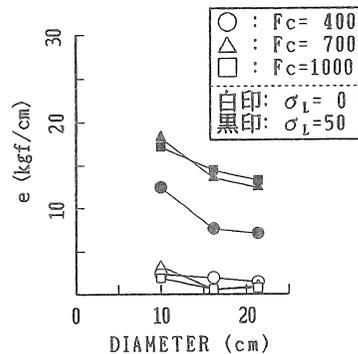


図-12 クラック単位面積当りの消費エネルギー (小径の破壊片:  $v=1 \text{ cm}^3$ )

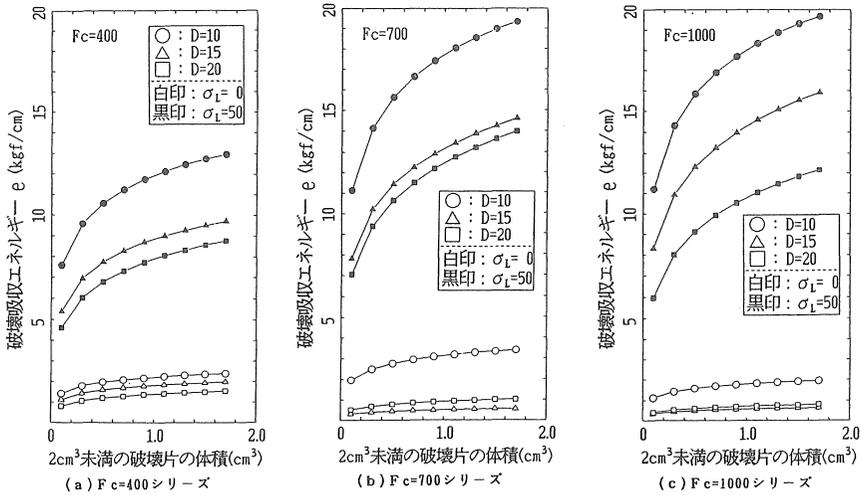


図-13 単位クラック面当りの破壊吸収エネルギー  $e$  に及ぼす  $2\text{ cm}^3$  未満の破壊片の体積  $v$  の影響 (○ :  $\sigma_L=0$ , ● :  $\sigma_L=50$ )

表-5  $e$  の上限値 (kgf/cm)

$F_c$	$\sigma_L=0$	$\sigma_L=50$
400	1.7	9.0
700	0.6	14.3
1 000	0.7	12.3

図-13は、 $2\text{ cm}^3$  未満の破壊片の体積  $v$  を  $0.1\sim 2.0\text{ cm}^3$  の範囲で変化させ、それぞれの場合についてひび割れ総面積  $A$  を求め、式(4)を用いて計算したときの  $e$  の値の変化を示したものである。ここで、塑性仕事量  $W_P$  の値には実測値を用いた。図によれば、 $2\text{ cm}^3$  未満の破壊片の平均体積  $v$  が大きくなると、 $e$  の値は大きくなる。また、 $v$  を一定値とすると、一般に供試体寸法  $D$  が小さいものほど  $e$  の値が大きくなる傾向が見られる。

いま、ひび割れ単位面積当りの消費エネルギー  $e$  が供試体寸法によって相違しないと仮定すると、設定できる  $e$  の上限値は、図-13を参照して、表-5のようになる。これらの値は、各シリーズにおいて、 $v=2\text{ cm}^3$  としたときの最小値として得られたものである。 $e$  の上限値について、横拘束圧  $\sigma_L$  のみをパラメータとして、敢えて概略値を示しておけば、 $\sigma_L=0\text{ kgf/cm}^2$  のとき  $e=1.0\text{ kgf/cm}$ 、 $\sigma_L=50\text{ kgf/cm}^2$  のとき  $e=10\text{ kgf/cm}$  程度と考えることができる。

#### 4. ま と め

本研究では一軸および三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響を実験的に調べた。また、破壊後の供試体の破壊片の大きさを定量的に調べ、供試体内部のひびわれのパターンを分析した。本研究の結果はおよそ次のようにまとめられる。

(1) 三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす供試体寸法の影響は、一軸圧縮下のそれよりも顕著である。実大部材の靱性の予測にはこの点を考慮する必要がある。

(2) コンクリート供試体の破壊片の総数および分布、すなわち供試体の破壊パターンは、供試体寸法によって異なり、図-6に示す典型的なパターンの中に位置する。この破壊パターンは、コンクリート強度の影響を受けるが、側圧の影響はあまり受けないようである。

(3) コンクリート供試体の破壊片の分布結果に基づき、コンクリートの破砕モデルの概念を提示した。本モデルを定量化すれば、圧縮破壊における寸法効果のエネルギー論的取扱いが可能となると考えられる。本報ではその一例を示した。

(4) 立方体群の破砕モデルを本実験結果に対して定量化した結果、軸ひずみが  $20 \times 10^{-3}$  時点におけるひび割れ単位面積当りの圧縮破壊吸収エネルギー量  $e$  の上限値としておよそ次の値が得られた。

$$\sigma_L=0\text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{ のとき } e \approx 1.0\text{ (kgf/cm)}$$

$$\sigma_L=50\text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{ のとき } e \approx 10\text{ (kgf/cm)}$$

なお、本報では、コンクリートの圧縮破壊性状の寸法効果をひび割れ形成時の吸収エネルギーというミクロ的な視点から検討した。供試体全体の荷重-変形関係と破壊吸収エネルギーというマクロ的な関係についての検討は、別に報告する予定である。

〔謝 辞〕 本研究を行うに際し、御助力を得た近藤洋右君 (旭化成工業)、上田英明君 (三重大学大学院)、島崎宗厳君 (三重大学大学院)、および高性能 AE 減水剤を提供して頂いた竹本油脂(株)に感謝致します。筆者らの一部

は、日本コンクリート工学協会・破壊力学の応用研究委員会（委員長：三橋博三 東北大学助教授）にて貴重な示唆を得た。付記して謝意を表します。また、本研究費の一部は、文部省科研費総合研究（A）（代表者：野口 博千葉大学教授）によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) R.F. Blanks and C.C. McNamara : Mass Concrete Tests in Large Cylinders, Jour. of ACI, Vol. 31, No. 3, pp. 280-303, 1935.1-2.
- 2) A.M. Neville : The Influence of Size of Concrete Test Cubes on Mean Strength and Structural Deviation, Mag. of Concrete Res., Vol. 8, No. 23, pp. 101-110, 1956.8.
- 3) C.M. Sangha and R.K. Dhir : Strength and Complete Stress-Strain Relationships for Concrete Tested in Uniaxial Compression under Different Test Conditions, Materiaux et Constructions, Vol. 5, No. 30, pp. 361-370, 1972.
- 4) 谷川恭雄・山田和夫：コンクリートの圧縮強度の寸法効果について，日本建築学会論文報告集，No. 262, pp. 13-21, 1977.12.
- 5) G.M. Sabnis and S.M. Mirza : Size Effect in Model Concrete, Proc. of ASCE, Jour. of ST-Div., Vol. 105, No. ST 6, pp. 1007-1020, 1979.6.
- 6) 塩屋俊幸・長谷川俊昭：コンクリート構造物の寸法効果，コンクリート工学，Vol. 30, No. 8, pp.5-15, 1992.8.

- 7) Department of the Interior : Cement and Concrete Investigations-Mass Concrete Investigations, US Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Project, Final Report, Part VII, Bulletin 4, 1965.
- 8) 香田伸次・田中伸幸・坂口 昇・山崎庸行：中心圧縮力を受ける超高強度コンクリート柱の寸法効果と横拘束効果に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，C分冊（構造II），pp. 751-752, 1989.10.
- 9) 小池狭千朗・畑中重光：コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性の形状・寸法効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14, No. 2, pp. 949-954, 1992.
- 10) 小池狭千朗・畑中重光：横拘束コンクリートの圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 12, No. 2, pp. 707-712, 1990.
- 11) 畑中重光・服部宏己・近藤洋右・谷川恭雄：三軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力-ひずみモデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 2, pp. 31-36, 1991.
- 12) 畑中重光・近藤洋右・谷川恭雄：横補強筋形状の異なるコンファインド高強度コンクリートの有効側圧，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14, No. 2, pp. 967-972, 1992.
- 13) 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論文報告集，Vol. 13, No. 2, pp. 37-42, 1991.
- 14) J.K. Kim and S.H. Eo : Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks, Magazine of Concrete Research, Vol. 42, No. 153, pp. 233-238, 1990.

（受理 平成6年3月20日）