

# 人工軽量コンクリートの三軸圧縮破壊条件

## FAILURE CRITERION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE SUBJECTED TO TRIAXIAL COMPRESSION

丹羽 義次\*・小柳 洽\*\*・小林 昭一\*\*\*  
By Yoshiji Niwa, Wataru Koyanagi, Shoichi Kobayashi

### 1. ま え が き

コンクリートの多軸応力下の破壊条件に関して、従来種々の研究や提案がなされているが<sup>1)</sup>、いずれも特殊な場合または限られた範囲内でしか成立せず、一般的に適用できるものではない。コンクリートは骨材とセメント水和物との結合体であり、微視的には非均質、異方性であるために、その破壊は非常に複雑な様相を示す。コンクリートの最も一般的な破壊条件としては、微視的なひびわれの発生からその伝播を経て破壊に到達するまでの機構をも考慮したものを樹立することが望まれるが、现阶段ではこのような条件を求めることは未だ不可能である。しかしながら、工学的にはコンクリートの骨材寸法効果が現われない程度に広い範囲にわたって一様な応力状態が仮定できる場合が多く、したがって材料はその範囲では巨視的に等方・均質と考えて取り扱うことができる。この点から、巨視的な破壊条件を求めておくことは工学上十分意義のあることである。一般的な巨視的破壊条件は、一般化した応力および一般化したひずみ空間における曲面で表わされる。特に、脆性破壊を生じる範囲においては、この巨視的破壊条件は主三応力空間内の一凸曲面として一義的に定められる。

本研究は、まず一般的な脆性材料の巨視的破壊曲面の特性について検討し、ついで、骨材の形状寸法が一樣で均質度高いと見られる人工軽量コンクリートの三軸圧縮試験を行ない、具体的な巨視的破壊曲面を決定したものである。

### 2. 破壊曲面の基本的性質

#### (1) 破壊曲面

材料およびその系の一般化した応力(力, 応力, 応力勾配等を含む)あるいは一般化したひずみ(変位, ひずみ, ひずみ勾配, ひずみ速度を含む)は、一般化した応力あるいは一般化したひずみ空間の一点に対応させて表示することができる。材料あるいはその系の破壊あるいは崩壊が、一般化した応力およびひずみの関数とし

て表わせるならば、その瞬間の一般化した応力およびひずみは一般化した応力-ひずみ空間内の一点に対応して表示することができ、その点の集合は一つの曲面を形成する。この曲面は、破壊曲面あるいは崩壊曲面と呼ばれる。換言すれば、破壊あるいは崩壊曲面は、材料あるいはその系の破壊時あるいは破壊時における一般化した応力およびひずみのあらゆる組み合わせの集合を表わしている。一般化した応力およびひずみをそれぞれ $\Sigma$ および $\epsilon$ で表わすと、この曲面は

$$f(\Sigma, \epsilon) = 0 \dots\dots\dots(1)$$

と表わせる。破壊曲面は概念的にはこのように表現されるが、一般的な破壊曲面を求めることは非常に困難である。実際には、個々の材料あるいはその系について、想定している条件の下に破壊あるいは崩壊に最も大きい影響をおよぼすと思われる主要因子に注目し、実験的に破壊あるいは崩壊曲面を求めることになる。

#### (2) 等方・均質脆性材料の破壊曲面

以下においては、脆性材料およびその系のみ限定して議論を進める。脆性材料では、静荷重の下における応力-ひずみ関係は近似的には一義的に定まると考えられるから、破壊曲面(以下で簡単のために崩壊曲面をも含むものとする)は、応力のみの関数で与えられると考えてよい。このことを前提として破壊曲面の性質を検討する。

脆性材料あるいはその系の破壊曲面は、Druckerの物質の安定性の解釈に基づいて、応力空間内の凸曲面で表わされる<sup>2)</sup>。破壊曲面の凸性は、安定な材料あるいは系でありさえすれば、連続、不連続を問わず、また線形、非線形にかかわらず成立する最も基本的な性質である。特に対象としている脆性材料が、巨視的に等方・均質であり、破壊強度が荷重履歴に影響されないと仮定できるならば、破壊曲面は応力空間内に固定されたものとなる。この破壊曲面は、主応力空間( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )に表わすと、等方性により静水圧線( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ )を軸とし、主応力間に互換性を有するような凸曲面となる。さらに、Griffith<sup>3)</sup>および修正Griffith理論<sup>4)</sup>を三次元応力状態に拡張して解釈したものを基にして、つぎのような曲面が予想される<sup>5)</sup>。すなわち、圧縮応力を正として、その一組の面は  $\min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = -K$  (一軸引張強度)で表わされ、残りの面は静水圧の増加にともなってほとんど

\* 正会員 工博 京都大学教授 土木工学科

\*\* 正会員 工修 京都大学助教授 土木工学科

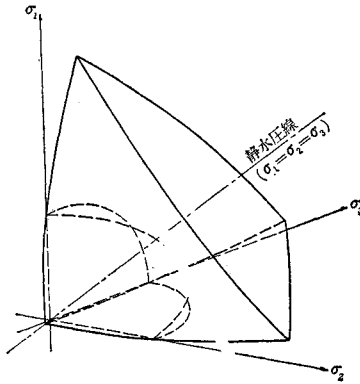
\*\*\* 正会員 工修 京都大学助教授 土木工学科

等方的に膨張する曲面で表わせる。前者と後者は滑らかに連続する。また前者の直截面 ( $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \text{一定}$ の平面による破壊曲面の切口曲線) は正三角形状を、後者の直截面は正三角形よりやや膨らんだ形をしている。

Rendulic の応力曲線 (静水圧線と主応力軸とを含む平面による破壊曲面の切口曲線) は、引張応力一定値を表わす直線と、この値より引張応力が小さい領域あるいは圧縮応力域における放物線ないし直線で近似的に表わせる。

図-1 にこの破壊曲面の概形を

図-1 破壊曲面の概形



示す。図-2 および 図-3 は、それぞれこの破壊曲面の直截面および Rendulic の応力曲線を示したものである。

図-2 直截面の概形

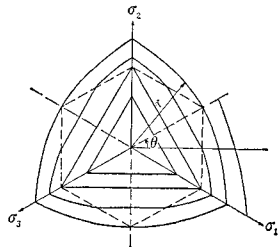
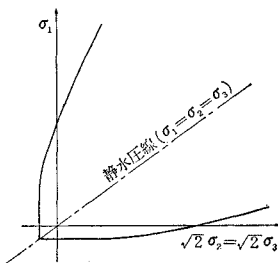


図-3 Rendulic の応力曲線



破壊曲面は、等方・均質材料では、主応力間の交換性を考慮して、図示の  $|\theta| \leq 30^\circ$  範囲のみの破壊時の応力状態 ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3; \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ) がわかれば、つぎのようにして決定される。すなわち、 $I_1 = \text{一定}$  平面上 (直截面を含む平面) において、図-3 のように静水圧線から破壊曲面に到るまでの距離  $r$  およびその方向  $\theta$  は、それぞれ

$$r = \sqrt{\frac{1}{3} \{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}}$$

$$= \sqrt{3} \tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3} (I_1^2 - 3I_2)} \dots \dots \dots (2)$$

および

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる<sup>6)</sup>。Rendulic の応力曲線は応力状態 ( $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3; \sigma_1 = \sigma_2, \sigma_3$ ) から求められる。この両者から破壊曲面は容易に組み立てられる。実際に破壊曲面を求める場合には、前述のように破壊曲面の凸性が保証されているから、代表的な応力状態を求めさえすれば、容易に破壊

曲面の形を決定することができる。

本研究で取り扱う軽量コンクリートは、人工軽量細粗骨材およびセメント水和物の混合した結合体であり、準微視的には等方・均質体ではない。しかしながら、巨視的に見て一様な応力状態が骨材寸法に比してはるかに広い範囲におよんでいると考えられる場合には、寸法効果は現われず、巨視的に等方・均質体として取り扱うことができる。以下の実験は、供試体を等方・均質と考えられる状態において行なったものであり、したがって定性的には上述のような破壊曲面が予想される。

### 3. 実験

#### (1) 使用材料および供試体

本実験で用いたコンクリート材料は、普通ポルトランドセメント (大阪社) および造粒系人工軽量粗骨材 (大阪社ライオナイト) である。骨材の物理的性質は表-1 に、またコンクリートの示方配合を表-2 に示す。コン

表-1 使用骨材の物理的性質 (ライオナイト)

骨材種別	表乾比重	吸水量 (%)	F.M.
粗骨材 (10~15mm)	1.36	3.21	6.00
粗骨材 (5~15mm)	1.58	3.21	5.00
細骨材	1.98	4.41	2.77

表-2 コンクリート示方配合

最大骨材寸法 (mm)	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	水セメント比 (%)	絶対細骨材率 (%)	単位細骨材量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨材量 (kg/m <sup>3</sup> )	
						5~10mm	10~15mm
15	417	187	44.7	41.6	558	398	196

クリートの練り混ぜには、アイリッヒ型パンミキサを使用し、一回の打設量は、10.5×10.5×10.5 cm 立方供試体 16 個、φ10×20 cm 円柱供試体 6 個とした。なお、練り上り温度は 25~27°C、打設時のスランプは 4~6 cm であった。型わくには二層に分けて打設し、各層ごとに十分突き固めを行なった。立方供試体は、打設後約 3 時間を経て磨きガラス板を用いて表面を平滑にした。また、円柱供試体は、材令 1 日でセメントペーストによるキャッピングを行なった。供試体は、打設後 24 時間 (円柱供試体は 48 時間) を経て脱型し、ただちに恒温恒湿室 (温度 20±1°C、相対湿度 90±5%) 内の水中で材令 27 日まで養生したのち、1 日間同室内で空中養生を行なった。試験時材令はすべて 28 日とした。

#### (2) 試験方法

材料の強度試験は、究極的には材料個有の物理的性質を求めるために実施されるものであり、試験装置、供試体の形状・寸法等の諸影響を受けないような実験方法が望まれる。圧縮試験における供試体内の応力分布は、実験装置による偏心、ねじれ等の影響が完全に除かれる場合でも、供試体の形状・寸法ならびに載荷板の状態によって非常に複雑な様相を呈し、これにともなって強度、変形および破壊の形態も異なったものとなる。供試体の

見掛けの形状、寸法効果は、主として供試体端面と載荷板間の摩擦に基づくと考えられ、特に立方供試体のように幅に対する高さの比が小さい場合には、端面摩擦の影響は応力分布に大きく影響し<sup>7)</sup>、見掛けの強度が著しく増大する<sup>9)</sup>。したがって、立方供試体のような比較的太短い供試体を使用する場合には、端面摩擦を減少させるよう特に注意を払う必要がある。

表-3 見かけの摩擦係数

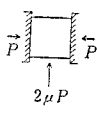
減 摩 剤	見掛けの摩擦係数 ( $\mu$ )	備 考
なし	0.46~0.65	
黒	0.28~0.31	
カップ グリス	0.15~0.24	
テフロンシート (0.05 mm 厚) +シリコングリース	0.018~0.023	
ゴムシート (0.23 mm 厚) +シリコングリース	0.008~0.012	

表-3 は、上述の立方供試体数個について、圧縮荷重を単軸圧縮強度の約 20~95% に変化させて求めた見掛けの摩擦係数の値 ( $\mu$ ) を示したものである。この実験より得られた  $\mu$  の値は、荷重の大きさにはほとんど無関係に一定値を示し、また数個の供試体についてもほぼ一定であった。表からわかるように、両面にシリコングリースを塗布した柔らかいゴムシート (0.23 mm 厚) は著しく端面摩擦を減少させる。その値は、減摩剤を用いない場合の約 2~3% となる。なお、このゴムシート使用の妥当性は、後述するように単軸圧縮強度および破壊の形状からも確認された。したがって、本実験では、立方供試体すべてについて両面にシリコングリースを塗布したゴムシートを使用した。

本実験で用いた載荷板の寸法は、三軸圧縮試験を行なう関係上、立方供試体より若干小さく 10×10 cm であるために供試体は部分載荷される。しかしながら、単軸圧縮強度に関して、この状態での圧縮強度と全面載荷したものとを比較した結果ほとんど差異は認められなかった。これから推定して、他の実験結果もすべて全面載荷のものと考えてよい。

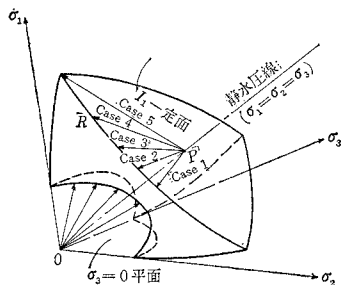
円柱供試体試験は、通常の圧縮および引張り強さ係数、ならびにバッチ間の変動を求める目的で行なった。

立方供試体試験は、島津製リレー型三軸圧縮試験機<sup>9)</sup>を用い、対向面載荷によりつぎの三種の試験を行なった。

a) 単軸圧縮試験 円柱供試体による単純圧縮強度と比較する目的、および以下の試験に対する基準値を求める目的で行なった。載荷速度は、3~4 kg/cm<sup>2</sup>/sec であり、偏心のないよう特に注意を払った。

b) 二軸圧縮試験 二軸主応力 ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) の比を一定 ( $\sigma_1/\sigma_2=1/9, 1/4, 1/2, 3/4, 1$ ) に保ちながら破壊に至るまで荷重を増加せしめるいわゆる比例載荷を主体とした(図-4 参照)。なお、載荷経路の強度におよぼす影響を調べる目的で、図-5 に示す経路による定順序載荷も行

図-4 圧縮試験載荷経路

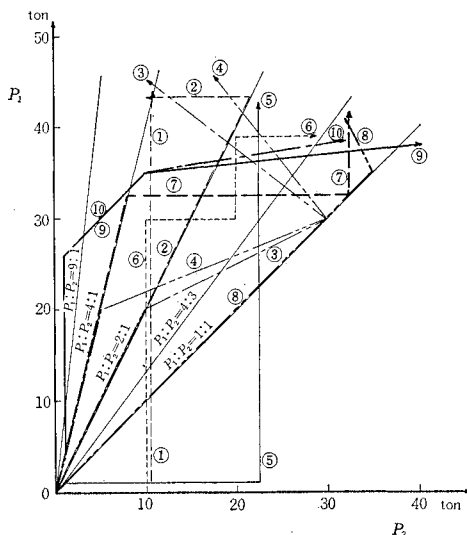


なった。載荷速度は、最大主応力について 3~4 kg/cm<sup>2</sup>/sec である。

c) 三軸圧縮試験 直截面を求めるのに便利のように、主応力  $I_1$  を一定とした圧縮試験を主体とした。すなわち、静水圧を増加(静水圧線に沿う載荷)して所定の主応力  $I_1$  まで達したのち、その主応力  $I_1$  を一定に保持しつつ三主応力を一定比で変化させて破壊に到らしめた。これを図示すると、図-4 において、まず OP に沿って載荷し、P 点から R まで PR に沿って載荷したことになる。実験範囲は、等方・均質の仮定により図示の  $\pi/3$  のみを取れば十分である。載荷経路は、この範囲を  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  (Case 5) から  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$  (Case 1) まで、ほぼ等分するように選んだ。主応力  $I_1$  の値は、破壊曲面を求めるのに必要な断面数と試験機容量との関係から、 $I_1=54, 72, 108, 144, 180$  t および 216 t とした(これらを Series A~F とする)。なお、これらの値は、それぞれ後述する単軸圧縮強度の約 1.5, 2.1, 3.2, 4.3, 5.4 および 6.5 倍となる。

三軸圧縮試験においても、載荷経路の破壊におよぼす影響を調べるために、比例載荷および順次小さい荷重を一定に保持しながら残りの荷重を増加するような定順序載荷も行なった。載荷速度は、静水圧を増加せしめる間は 4~6 kg/cm<sup>2</sup>/sec、その他は最大主応力について約 3 kg/cm<sup>2</sup>/sec である。

図-5 二軸圧縮試験載荷経路



#### 4. 実験結果とその考察

##### (1) 単軸圧縮試験

円柱供試体の単軸圧縮強度は  $316 \text{ kg/cm}^2$  (27 個の平均値, 変動係数 6.3%), 引張り強さ係数は  $29.7 \text{ kg/cm}^2$  (24 個の平均値, 変動係数 8.1%) であった。また, 立方供試体の単軸圧縮強度 ( $\sigma_0$ ) は  $298 \text{ kg/cm}^2$  (16 個の平均値, 変動係数 7.0%) であった。

写真-1 単軸圧縮破壊  
( $\mu \neq 0.5$ )

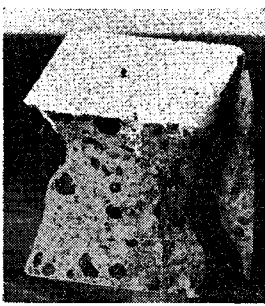
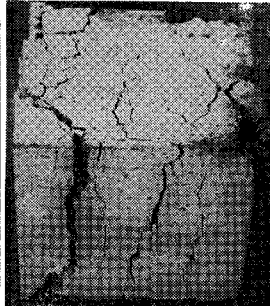


写真-2 単軸圧縮破壊  
( $\mu \neq 0.01$ )



立方供試体の単軸圧縮試験による破壊状態を写真-1 示す。通常の立方供試体の圧縮試験, すなわち, 供試体端面と載荷板間の摩擦を全く除去しない場合 ( $\mu \neq 0.5$ ) には, 端面摩擦により供試体の横方向伸びが拘束されるために, 供試体内部には複雑な三次元応力状態が生じ, 供試体は鼓型に破壊し(写真-1), 見掛けの圧縮強度は大となる。本実験では, 供試体の端面摩擦を極力減少するように配慮している ( $\mu \neq 0.01$ ) ので端面拘束の影響は小さく, 供試体はほぼ一様に圧縮され, 載荷方向に平行な無数の柱状片に瞬間的に分離破壊する(写真-2)。このことから本実験で求めた圧縮強度は, ほとんど純粋な単軸圧縮によるものと考えてよい。また, このことは単軸圧縮強度が円柱供試体の圧縮強度と比較して, 若干小さいが大差はないことから確認される(標準円柱供試体強度は, 真の圧縮強度より若干大きい値を示すといわれている<sup>10)</sup>)。以上のことから, ここで求めた立方供試体の単軸圧縮強度は, 後の実験結果の基準として用いるのに十分な精度で求められたものと考えてよい。なお, 見掛けの摩擦係数を減少させても, 減摩材が厚く, その変形が大きくなれば, 供試体には一様な圧縮応力が生じず, 部分的な破壊(たとえば割裂破壊)を生じて見掛けの圧縮強度は低下する<sup>11)</sup>ことがある。

##### (2) 二軸圧縮試験

二軸圧縮試験結果を, 立方供試体単軸圧縮強度との比として無次元化して図-6 に示す。供試体は, すべて自由面に平行な薄片状に瞬間的に破壊した(写真-3)。図-6 に示すように, 二軸圧縮強度は, 最小主応力  $\sigma_3 = 0$  とした場合,  $\sigma_2$  の増加にともなって  $\sigma_1$  は変化し,  $\sigma_2/\sigma_0 \neq 0.7$  で  $\sigma_1/\sigma_0$  は最大となり約 1.4 に, また,  $\sigma_2 = \sigma_1$  で

写真-3 三軸圧縮破壊  
(a)  $P_1/P_2 = 1/2$  (b)  $P_1/P_2 = 1/1$

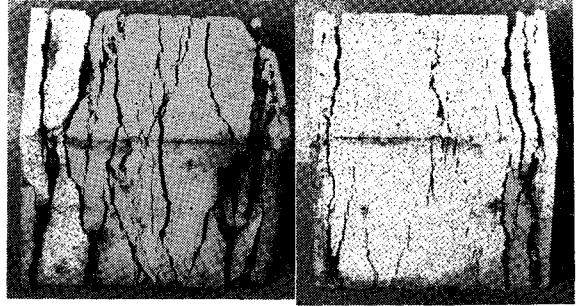
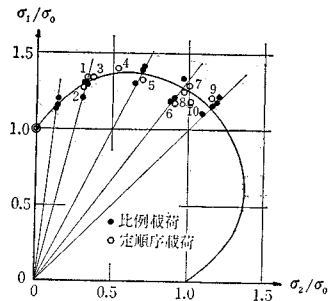


図-6 二軸圧縮試験結果



は  $\sigma_1/\sigma_0 = \sigma_2/\sigma_0 \neq 1.2$  となる。このような図を基にして, コンクリートの破壊強度は中間主応力の影響を受けると一般にいわれているようであるが, 後述するように破壊曲面が一義的に定まるので, 図-

6 は, この曲面と  $\sigma_3 = 0$  を含む平面との交った曲線を示すものであり, 主応力空間内の特別な切口曲線として表わされているにすぎない。このような切口曲線は任意に選び得るので, 二次元的な考えに立つ中間主応力の影響というものをごとさらに導入する必要はない。図-6 の曲線が部分的にも凹にならないことは, 破壊曲面の凸性からも保証されている。なお, 同図には, 図-5 に示した載荷経路による試験結果をも載荷経路番号を添書して示してある。これからわかるように, 二軸圧縮強度は載荷経路の影響を受けないと考えてよい。

##### (3) 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験では, 供試体に自由面が残されていないので, 単軸および二軸圧縮破壊のように瞬間的に破裂飛散する現象は生じない。しかしながら, 三軸圧縮試験においても, ここで行なった実験範囲では, 急激な荷重の変動点があり, この変動点を破壊と考えた。

三軸圧縮試験結果を単軸圧縮強度を用いて無次元化し, 直截面を図-7 に, また Rendulic の応力曲線を図-8 に示す。さらに,  $\sqrt{3} \tau_{\text{oct}}/\sigma_0 = \sqrt{2/3}(I_1^2 - 3I_2)/\sigma_0$  と  $I_1/\sigma_0$  との関係を図-9 に, 無次元化した最大および最小主応力との和  $(\sigma_1 + \sigma_2)/\sigma_0$  と差  $(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_0$  との関係を図-10 に, 主応力和 ( $I_1$ ) と最大主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  との関係を図-11 に示す。また, 代表的な破壊状態を写真-4 および 5 に示す。

図-7 より直截面の形状は正三角形よりやや膨らんだ形であり, この形は主応力和 ( $I_1/\sigma_0$ ) が増加するにつれて増大し, 徐々に丸味を帯びてくる。丸味を帯びてくる

図-7 破壊曲面の直截面

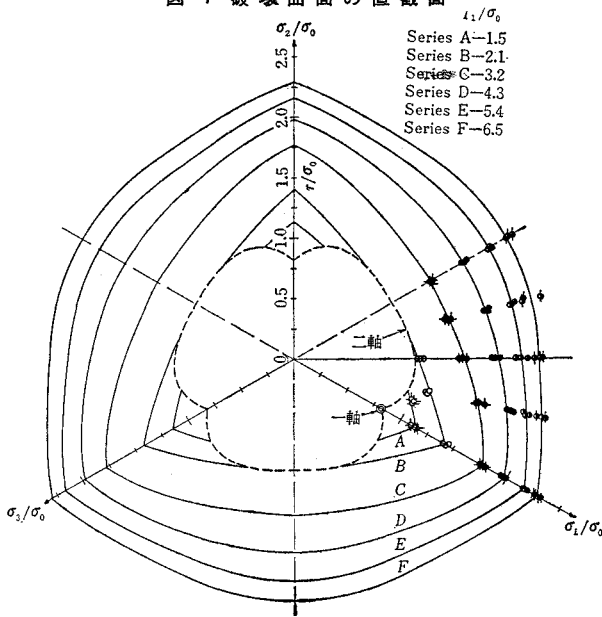


図-8 Rendulic の応力曲線

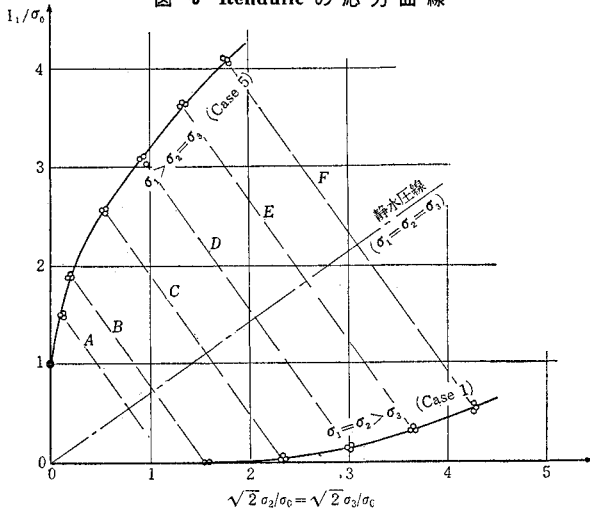
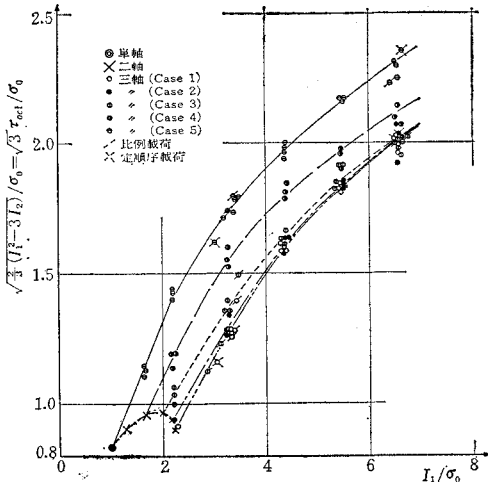


図-9 八面体応力表示



原因は、主応力の増大、すなわち、静水圧の増加につれて、すべりないし流動の影響が現われるためと考えられる。事実、はるかに大きい主応力と ( $I_1/\sigma_0=8.7$ ) の状態で試みた予備実験では、流動が卓越して破壊荷重を的確に判定することができなかった(もちろん、この場合には、上に議論したような応力のみによる破壊曲面を定義することはできず、当然ひずみ速度の影響も考慮しなければならない)。図-7において、Series BからFまで主応力と和の増分は一定に選んであるにもかかわらず曲線の間隔が順次狭くなっている。これは、破壊曲面の膨らみ方が静水圧増加に比例せず、次第にゆるやかになることを示している。このことは、Rendulicの応力曲線からも容易にわかる。

図-7および図-8から破壊曲面が決定でき、これが軽量コンクリートの圧縮域における破壊条件である。なお、図-7の破線は二軸圧縮強度を表わす曲線(図-6)を $\pi$ -平面( $I_1=0$ で表わされる平面)に投影したものである。この曲線より内部の値は、引張りをも含む多軸試験によらなければ決定できない。

図-9の表示は、いわゆる八面体応力表示と同等であるが、直截面を求める関係から、縦距は $\sqrt{3}\tau_{oct}/\sigma_0$ としてある。この図の曲線は、静水圧線を含む平面による破壊曲面の切片曲線を表わしたものに相当している。すなわち、 $I_1$ =一定値に対する縦距 $\sqrt{3}\tau_{oct}/\sigma_0$ が、式(2)により直截面の静水圧線からの距離 $r/\sigma_0$ を表わしている。この値は同じ $I_1/\sigma_0$ 値に対しても一定ではなく、主応力比によって異なる値を取る(Case 1~Case 5を参照)。 $I_1/\sigma_0$ の値が増大するにつれて、 $r/\sigma_0$ の各Caseごとの比が1に近づいてくる。特に、Case 1~Case 3の $r/\sigma_0$ の比は $I_1/\sigma_0=6.5$ で1になる。すなわち、この部分に対応する直截面は円弧を表わしている。

八面体せん断応力説は、 $\tau_{oct}/\sigma_0$ と $I_1/\sigma_0$ とが一義的な関係にあるとしたものであり、したがって、これらの関係を図示すると一本の曲線で表わされることを主張したものである。しかるに図-9からも明らかなように、軽量コンクリートの破壊に関しては、 $\tau_{oct}/\sigma_0$ と $I_1/\sigma_0$ とは一義的ではなく、したがって、コンクリートの巨視的破壊条件として、八面体せん断応力説を適用することは誤りである。

図-10に示した最大および最小主応力の和と差との関係は、若干の変動を示してはいるが、比較的良く一本の曲線で表わされる。図示の関係は、簡単な変換によってMohrの破壊包絡線に表わすることができる。この意味からは、軽量コンクリートの破壊を近似的に表わすに

は Mohr の破壊説を適用できると見られるかも知れないが、破壊そのものは後述するようにせん断応力によるものとは考えられず、また破断面の主応力方向から成す角度も Mohr の破壊説には一致しない（たとえば、単軸圧縮、二軸圧縮破壊を考えれば容易にわかる）ので、Mohr の破壊説が適用されるとはいえない。ここでは、

単に、最大および最小主応力の和と差の間にほぼ一義的な関係があることを示しておく。この関係は、近似的には、軽量コンクリートの破壊条件と考えてよい。なお、この関係は、容易に上に求めた三次元主応力空間内の破壊曲面に変換できる。

静水圧は  $I_1/\sigma_0$  と同等であるから、主応力とと最大主

写真-4 三軸圧縮破壊 (Series C)

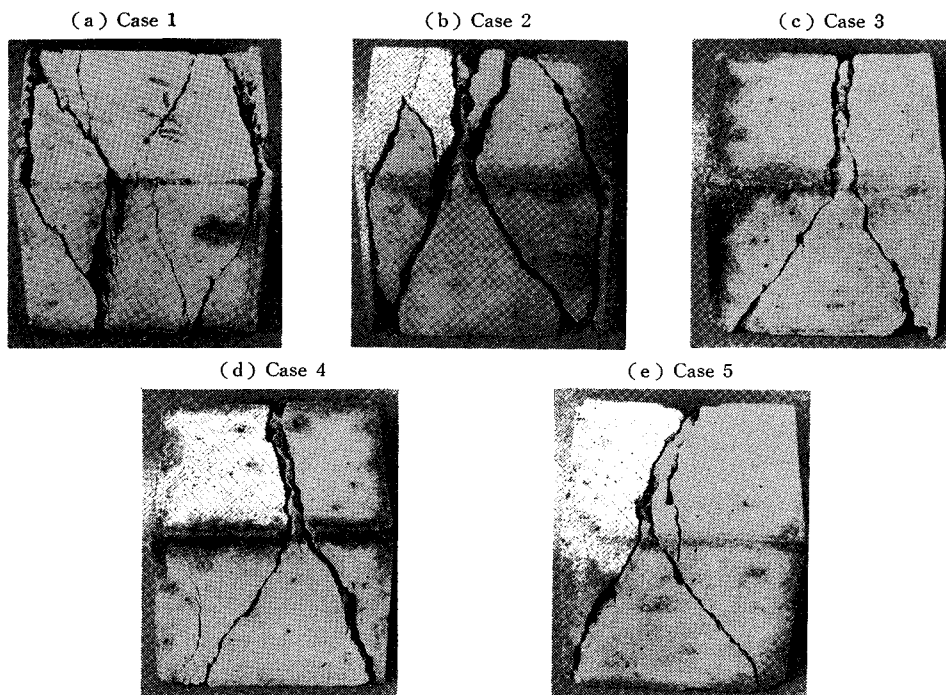


写真-5 三軸圧縮破壊 (Series F)

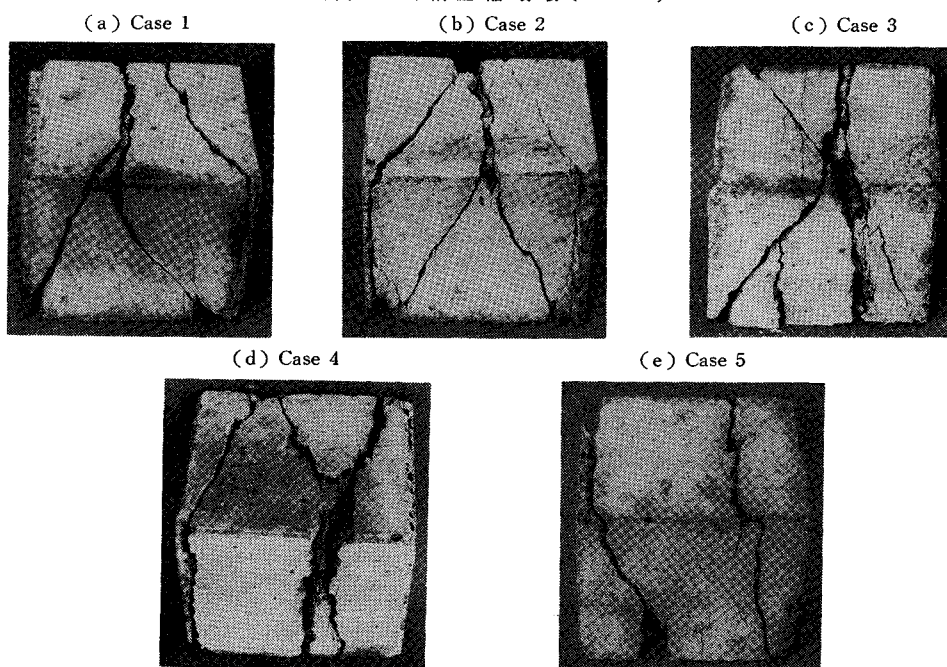


図-10 最大最小主応力の和と差との関係

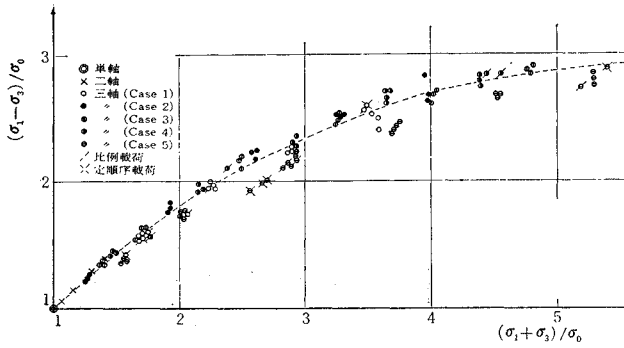
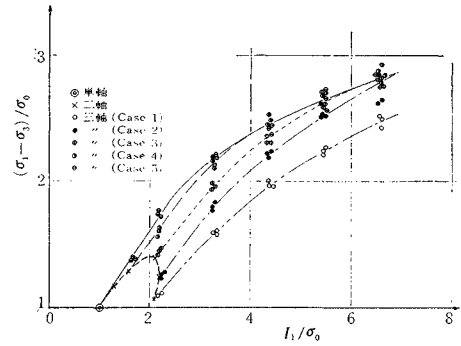


図-11 主応力と最大主応力差との関係



応力差との関係も破壊条件として予想される(図-11)。図から明らかなように、両者の間には一義的な関係は見られない。したがって、主応力と最大主応力差との関係を軽量コンクリートの破壊条件とすることは不適當である。

比例載荷および定順序載荷による結果は、図-9に示してある。両者の結果は、上述の $I_1$ ＝一定面内の載荷によるものとほぼ等しい。したがって、載荷経路による破壊強度の差異は、ここで行った実験範囲では認められない。しかしながら、後者の場合には、載荷経路は破壊曲面に近く幾分不安定な領域を通るために、実験精度が悪く、変動が大きくなる。これに反して、 $I_1$ ＝一定面内の載荷経路によれば、破壊曲面に垂直に近い角度で到達するので不安定な領域は非常に小さくなる。したがって実験精度もよい。以上のことから、脆性材料の破壊曲面は、 $I_1$ ＝一定面内の載荷経路により求めるほうが有利である。

供試体の破壊状態は写真-4および5に示すように、Case 1 および Case 2 では、最小主応力方向に垂直な面からある傾きをもった数個の平面にひびわれが生じ、また、Case 3～Case 5 では、ひびわれは中間主応力を含む二平面に生じている。静水圧、すなわち主応力とが大きくなるにつれて若干不規則とはなるが、上の傾向は保持されると見てよい。Case 1 および Case 2 の破断面の傾きは、最小主応力に垂直な面から約 $20^\circ \sim 27^\circ$ であり、また、Case 3～Case 5 では最大主応力方向から約 $20^\circ \sim 30^\circ$ である。この角度は、主応力とが大きくなるにつれて若干大きくなる傾向が見られる。破断面を詳細に調べると相当数の骨材が破断されており、骨材周辺が回転した形跡も認められないので、おそらくこの破断面は引張りに近い状態で破壊されたあとに強制すべりを受けたものと考えられる。したがって、各 Series について Case ごとの特徴ある共通性が見られるとしても、三軸圧縮を受ける軽量コンクリートの破壊がせん断破壊であるとは考えられず、また、上述の角度が内部摩擦角を表わしているとは考えられない。応力状態と破壊の形

態の間には何らかの関係が存在することは考えられるが、この関係は、種々の試験条件のもとで、種々の試験機を用いて、異なった寸法の供試体について検討しなければならない。

### 5. むすび

本研究は、脆性材料の巨視的な破壊条件は破壊曲面を求めることに帰着するとの前提で、軽量コンクリートの破壊曲面を三次元主応力空間内に決定したものである。本実験より以下のことが結論される。

(i) 破壊曲面は三次元主応力空間内に一義的に決定され、その形状は、静水圧線を軸とし、主応力間に互換性のある凸曲面で表わされる。この曲面は、静水圧の増加につれて膨張する。この曲面の直截面は、正三角形よりやや膨らんだ形状であり、静水圧の増加につれて膨張し、次第に若干丸味を帯びてくる。また、Rendulic の応力曲線は静水圧の増加につれてその増分が減少し、近似的には放物線の一部で表わされる。

(ii) 二軸応力状態では、破壊条件は上の破壊曲面と最小主応力が0である平面との交った曲線で表わされる。この曲線は凸である。

(iii) すべての試験結果は、最大および最小主応力の和と差との関係で示せば、一本の曲線で近似される。したがって、破壊条件は、近似的には、この曲線で表わされる。

(iv) 破壊曲面の概形は、Rendulic の応力曲線から、あるいは、最大および最小主応力の和と差との関係を表わした曲線を三次元に変換することによって、容易に推察できる。

(v) ここに求めた軽量コンクリートの破壊曲面は、ここで行った実験範囲では、載荷経路の影響を受けない。したがって、三軸圧縮試験では実験精度の点から、主応力と一定面内の載荷経路によることが望ましい。

(vi) 軽量コンクリートの破壊の形状からは、いわゆる内部摩擦角は求められなかった。破壊面の角度は、試験条件、特に端面摩擦と供試体寸法に大きく影響される。

(vii) 圧縮試験を行なう際には、特に供試体端面摩擦を減少させるよう配慮しなければならない。端面摩擦が存在すると、破壊強度も破壊の形態も異なったものとなる。

なお、以上、軽量コンクリートに関して得られた結果は、普通コンクリートにも大略適用できるものと考えられる。

#### 謝 辞

本実験に協力を頂いた京大大学院学生 平島健一君に感謝の意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) たとえば、文献調査委員会：“組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度”，土木学会誌，49 卷 2 号，pp. 64~69 (昭.39)
- 2) Drucker, D.C.：“Plasticity” in “Structural Mechanics”，ed. by J.N. Goodier and N.J. Hoff, pp. 407~448, Pergamon (1960)  
Drucker, D.C.：“On the Postulate of Stability of Material in the Mechanics of Continua”，Tech. Rep. No. 34. Div. of Eng., Brown Univ. (1963)  
丹羽義次・小林昭一・平島健一：“三軸圧縮応力状態におけるモルタルの破壊条件”，材料，16 卷，161 号 pp. 108-114 (昭. 42)
- 3) Griffith, A.A.：“The Phenomena of Rupture and Flow in Solids”，Phil. Trans. Roy. Soc., **A221**, pp. 163~198 (1921)  
Griffith, A.A.：“The Theory of Rupture”，Proc. Int. Congr. Appl. Mech., pp. 55~63 (1924)
- 4) McClintock, F.A. and J.B. Walsh：“Friction on Griffith cracks in rock under pressure”，4th U.S. Nat. Congr. Appl. Mech., pp. 1015~1021 (1962)
- 5) 丹羽義次・小林昭一：“脆性材料の破壊条件に関する考察”，材料，16 卷 160 号，pp. 1~7 (昭.42)  
Niwa, Y. and S. Kobayashi：“Failure Criterion of Cement Mortar Under Triaxial Compression”，Memo. of Faculty of Eng., Kyoto Univ., Vol. XXIV, Part 1 (1967)
- 6) 前述，文献 5)
- 7) Niwa, Y. and S. Kobayashi：“Stresses in Rectangular Blocks Compressed Between Rough Plates”，Memo. of Faculty of Eng., Kyoto Univ., Vol. XXVIII, Part 3 (1966)  
Evering, G.：“Das Endflächenproblem beim Druckversuch”，Bergbau Arch., Vol. 22, No. 1, pp. 27~37 (1961)
- 8) たとえば，Newman, K. and L. Lachance：“The Testing of Brittle Materials under Uniform Uniaxial Compressive Stress”，Proc. ASTM Vol. 64, pp. 1044~1067 (1964)  
近藤泰夫・坂静雄編：“コンクリート工学ハンドブック”，第 9 章，朝倉書店 (昭.40)
- 9) 前述，丹羽他，文献 2)
- 10) 前述，Newman, K. et al., 文献 8)
- 11) 前述，Evering, G., 文献 7)  
Gramberg, J.：“Axial Cleavage Fracturing, A significant process in Mining and Geology”，Eng. Geol., Vol. 1, No. 1, pp. 31~72 (1965)

(1966.12.1・受付)