

組合わせ圧縮応力下における和泉砂岩の 破壊機構に関する研究*

STUDY ON THE FAILURE MECHANISM OF A SAND-STONE UNDER COMBINED COMPRESSIVE STRESSES

赤井 浩一**・森 寛昭***
By Koichi Akai and Hiroaki Mori

1. 序

常温・常圧でぜい（脆）性を示す岩石は均一でない物質の結合体ないしは混合体であり、その破壊機構は岩石個々の諸要素に支配されて単純に取り扱えない。この複雑な機構を究明するには、単に岩石や岩盤の強度理論のみならず、それらが破壊にいたるまでの変形の様子や破壊の形態など多方面にわたる巨視的ならびに微視的研究が必要であると考えられる。この研究では、岩質材料のうち最も均質で異方性の影響が少ないとみなされる和泉砂岩を対象として、一軸・二軸および三軸応力下における極限強度と破壊様式について高圧三軸圧縮試験機を用いて実験的に究明し、ぜい性材料の破壊理論の適用性に関する考察を行なった。さらに顕微鏡写真を利用して破壊面の形態を微視的立場から観察し、上記の考察によって得られた結論を検証したので、本文ではそれらの結果を述べる。

2. 組合わせ圧縮応力下における和泉砂岩の強度

(1) 概 説

破壊という述語は固体の破壊理論を研究するうえでしばしば用いられるが、この言葉はそれが使用される立場によって異なった意味をもつ¹⁾。Griffith^{2),3)}は微視的な立場において岩石などのぜい性材料は不連続体であり、破壊が構造敏感性によっていることから、それを内部に長円状クラックを含む連続弾性体とみなし、クラック先端に発生する応力集中によってクラックが成長しはじめるときをもってぜい性材料の破壊とした。Griffithのこの微小割れ目理論が最弱リンク説にもとづいていて、クラックの成長開始およびその伝搬の必要十分条件であることがOrowan⁴⁾によって説明された。

破壊現象の概念の相違によって破壊規準をエネルギー量、応力またはひずみの関数として取り扱うか、またはは

別の観点から材料を巨視的連続体もしくは微視的連続体として取り扱うか、その立場立場によって多種多様な破壊条件式が提案されてきている。本節ではまず代表的な破壊規準について、その条件式の誘導における問題点に触れる。ついで和泉砂岩供試体を用いて組合わせ応力下の圧縮試験を行ない、中間主応力の影響をうけた材料の極限強度がいかなる条件式により表わされ、その破壊面が三次元主応力空間内でどのような形になるかを調べることにする。

(2) 破壊理論または破壊仮説

A. 中間主応力の影響を考慮しないもの

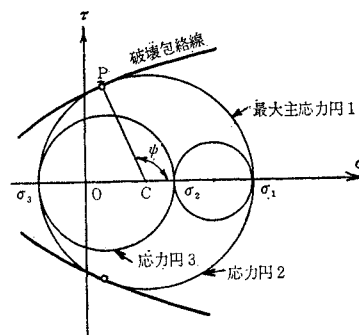
三次元応力下における固体の強度が中間主応力の影響をうけないと仮定して導かれた破壊理論や仮説としては、最大主応力説、最大せん断応力説 (Tresca の理論)、Mohr の理論ならびに Griffith の理論などがあるが、一般に岩質材料の破壊条件を比較的よく表現するものとして後二者が認められているので、これらについて簡単に触れよう。

a) Mohr の破壊理論 Mohr の破壊応力円は垂直応力を σ 、せん断応力を τ として

$$(\sigma - \sigma_m)^2 + \tau^2 = \tau_m^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{ここに } \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2, \tau_m = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \dots\dots\dots(2)$$

図-1 Mohr の応力円と破壊包絡線



によって表わされる(図-1 参照)。式(1)において最大応力円の半径 τ_m と円の中心の座標 σ_m とは、極限においてある関係式

$$\tau_m = F(\sigma_m) \dots\dots\dots(3)$$

を満足しなければならない。式(1)と式(3)より破壊円群の包絡線の方程式

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_m + \tau_m \cdot \tau' \\ \tau &= \tau_m \sqrt{1 - (\tau_m')^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

* 土木学会第 22 回年次学術講演会(昭 42.5.28)において一部を発表【講演番号 III-57】

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

*** 正会員 工修 建設技官 九州地方建設局道路部道路計画課

ここに

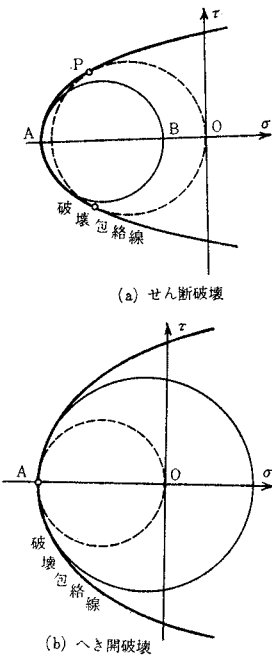
$$\tau_m' = \frac{d\tau_m}{d\sigma_m} = \frac{dF(\sigma_m)}{d\sigma_m} \dots\dots\dots(5)$$

が得られる。式(4)の第2式において τ が実根をもつためには、 $|\tau_m'| \leq 1$ でなければならない。これは $\sigma_m \sim \tau_m$ 座標に描いた破壊包絡線の接線が水平となす角が常に 45° 以下でなければならないことを意味する。

岩質材料の破壊に関して、ある応力範囲でかなり現象を説明しようとされているMohr-Coulombの破壊規準

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \dots\dots\dots(6)$$

図-2 Mohrの破壊理論における破壊の形態



ここに φ :せん断抵抗角, c :材料の粘着力は、2本の直線で表わされる破壊包絡線が σ 軸と交わる付近で実験事実との矛盾を含んでいる⁹⁾。すなわちMohrの包絡線が負の σ 軸と直角に交わり、その交点近傍で定まった曲率をもつ場合にかぎって、この包絡線はその付近で物理的意味をもつ(図-2参照)。包絡線の先端A点での法線は σ 軸と一致し、破断面は最大主応力面に垂直な面内で生ずる。この破壊の形態をへき(劈)開破壊(cleavage failure)とよぶ。A点における包絡線の曲率円の直径がOAより小さい場合(図-2(a))、一軸引張試験における破壊応力円は破壊包絡線と点A以外の点Pで接し、せん断破壊(shear failure)を生ずる。これに反して曲率円の直径がOAより大きい場合(図-2(b))、材料は上述のへき開破壊を起こすことになる。したがって、その先端である曲率半径をもつMohrの破壊包絡線は、材料内で生じる種々の応力状態に対応して、せん断破壊のみならずへき開破壊という形態も含んでいることがわかる。

より小さい場合(図-2(a))、一軸引張試験における破壊応力円は破壊包絡線と点A以外の点Pで接し、せん断破壊(shear failure)を生ずる。これに反して曲率円の直径がOAより大きい場合(図-2(b))、材料は上述のへき開破壊を起こすことになる。したがって、その先端である曲率半径をもつMohrの破壊包絡線は、材料内で生じる種々の応力状態に対応して、せん断破壊のみならずへき開破壊という形態も含んでいることがわかる。

b) Griffithの破壊理論 Griffith^{2),3)}はいわゆる理想的強度と実験値との相違が、材料内に存在する微視的なクラックないし損傷によるものであると考え、簡単のためクラックの長さが $2l$ なるきわめて扁平な長円状クラックをもつ試片をとった。このクラックの長さがわずかに増加した場合に、試片の弾性ひずみエネルギーとクラックの表面エネルギーの増加が、ちょうど外力によるポテンシャルの減少によってまかなわれるときに、ク

ラックは外的応力のもとで不安定となり、材料は非破壊から破壊の状態に移ると考えた。そのときの強度 σ は平面応力の場合

$$\sigma = \sqrt{2\rho E/\pi l} \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 ρ :表面エネルギー、 E :試料のヤング率として与えられる。

その後Griffithは材料に特有な定数を使用しない一般的な破壊条件式として次式を提案した。

1) $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$ のとき: $\sigma_3 = \sigma_t$ (一軸引張強度)

2) $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0$ のとき:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3) = 0 \dots\dots\dots(8)$$

さらにMcClintockとWalsh⁶⁾は、上述のGriffith理論では扁平な長円状クラックが圧縮荷重下で圧着されないこととみなしていることが事実と若干矛盾していると考え、クラックの圧着後その面でせん断抵抗が働いてクラック端部での応力集中を減少させ、結果的には強度が増すという考えのもとに次式を提案した。

$$\mu_f(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)\sqrt{1 + \mu_f} = -4\sigma_t \dots\dots(9)$$

ここに μ_f :クラック圧着後の摩擦係数
この式は一般に修正Griffith式とよばれている。

式(9)とMohrの2次式またはMohr-Coulombの直線式とを比較すると、その間の類似性が明らかである^{7),8)}。しかし後者が巨視的な破壊条件を言及しているのに対し、前者は微視的な破壊条件を述べているという相違に留意する必要がある。

丹羽⁹⁾は微視的にみたクラックの発生から、巨視的な破壊にいたるまでの修正係数 k を導入し、圧縮領域のみにおいてGriffithの理論をつぎのように拡張した。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (1+k)\sigma_c(\sigma_1 + \sigma_3) + 8k\sigma_c^2 = 0 \dots\dots(10)$$

σ_c は一軸圧縮強度であって、 $k=0$ のとき上式はGriffithの式(8)と一致する。彼らが行なったセメントモルタルの実験結果は、 $k=1$ としたものによく合うと報告されている¹⁰⁾。

B. 中間主応力の影響を考慮したもの

a) せん断弾性ひずみエネルギー説(von Misesの理論) 物質のせん断弾性ひずみエネルギー W がある一定値に達したとき破壊が生ずるとする仮説である。 W は物質内に貯えられた全弾性ひずみエネルギーから体積膨張による弾性エネルギーを差し引くことによってつぎのように得られる。

$$W = \frac{1}{6G} \{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\} \dots\dots\dots(11)$$

ここに G :せん断弾性係数

一方、正八面体せん断応力 τ_{oct} は

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \dots\dots\dots(12)$$

として表わされるので、 W が一定という破壊条件は

$$\tau_{oct} = \text{const} \dots \dots \dots (13)$$

と書き改められる。

b) 拡張された Mohr-Coulomb の破壊理論 Bishop¹¹⁾ は数種類の砂を用いた三軸圧縮試験により中間主応力が強度に影響をおよぼすことを認め、その強度変化を Mohr-Coulomb の破壊理論に用いられている強度定数 (c, φ) の変化として表わす実験式を提案した。いま中間主応力 σ_2 が最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の中間のどの位置にあるかを表わすために、パラメーター λ を用いてつぎのように表示する*。

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \lambda \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad (-1 \leq \lambda \leq 1) \dots \dots (14)$$

$\lambda = -1$ のとき $\sigma_2 = \sigma_3$ となり、試験の型は鉛直軸対称圧縮試験 (compression test) を表わし、また $\lambda = 1$ のとき $\sigma_2 = \sigma_1$ となり、鉛直軸対称伸長試験 (extension test) を表わす。この λ を主応力パラメーターとよぶ。

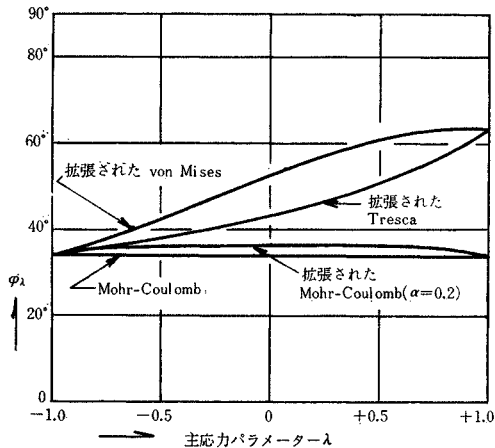
Bishop は圧縮試験 ($\lambda = -1$) と伸長試験 ($\lambda = 1$) のさいの強度が互いに一致するという実験事実から次式を提案した。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \frac{\sin \varphi_0}{1 - \frac{\alpha}{2} \sqrt{1 - \lambda^2}} = \sin \varphi_\lambda \dots \dots \dots (15)$$

ただし φ_0 は $\lambda = -1$ のときのせん断抵抗角、 α は強度におよぼす中間主応力の影響の度合を表わすパラメーター (影響値) である。

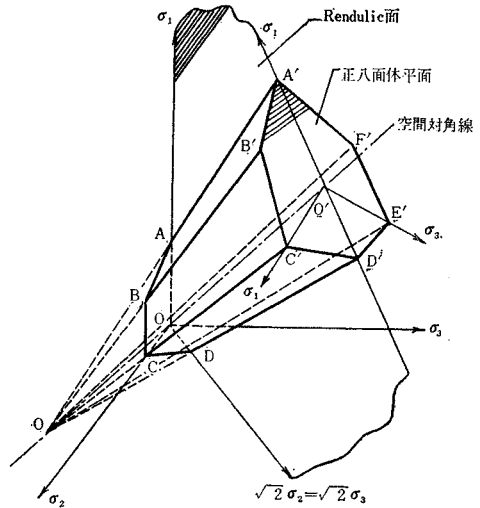
粘着力 c_0 を有する材料の強度が中間主応力の影響をうける場合においても、三次元応力空間内の破壊曲面は 1 点に会するという仮定を設けると、次式が誘導される。

図-3 中間主応力の影響による強度定数 φ_λ の変化



* Bishop の原著ではパラメーター b を用いて $\sigma_2 = b \sigma_1 + (1-b) \sigma_3, \quad (0 \leq b \leq 1) \dots \dots \dots (14)'$ なる式を提案しているが、本文では整理の都合上式 (14) の λ を用いることにする。

図-4 三次元主応力空間内の Mohr-Coulomb の破壊面



$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 c_0 \cot \varphi_0} = \frac{\sin \varphi_0}{1 - \frac{\alpha}{2} \sqrt{1 - \lambda^2}} = \sin \varphi_\lambda \dots \dots \dots (16)$$

$\varphi_0 = 33^\circ 40'$ について φ_λ と λ との関係を表わしたものが 図-3 である。参考のために、拡張された Tresca の理論、拡張された von Mises の理論による結果も記入されている。

図-4 は三次元主応力空間内に Mohr-Coulomb の破壊面を描いたものである。この六角錐をした破壊面は $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 面、すなわち $\sigma_3 = 0$ 面と交わり、その交線は 6 本の直線で表わされる。なお拡張された Mohr-Coulomb の破壊理論では、さきの式 (16) を書き直すと

$$\sigma_1 = N_{\varphi_\lambda} \sigma_3 + \frac{2 \sin \varphi_\lambda}{1 - \sin \varphi_\lambda} \cot \varphi_0 \cdot c_0 \dots \dots \dots (17)$$

ここに

$$N_{\varphi_\lambda} = \frac{1 + \sin \varphi_\lambda}{1 - \sin \varphi_\lambda} = \frac{1 - \frac{\alpha}{2} \sqrt{1 - \lambda^2} + \sin \varphi_0}{1 - \frac{\alpha}{2} \sqrt{1 - \lambda^2} - \sin \varphi_0} \dots \dots (18)$$

となる。

(3) 実験試料

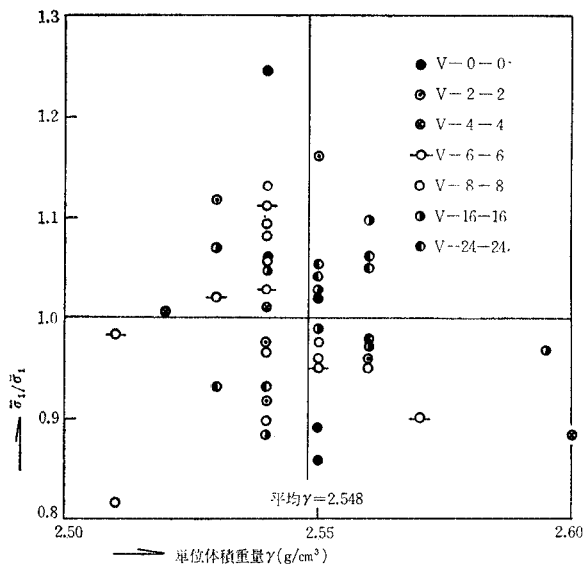
実験試料として巨視的に等方等質材料と考えられる和泉砂岩 (大阪府泉南郡産) を用いた。その物理的性質を表-1 に示す。試料は市販の $30 \times 30 \times 180$ cm の角柱石材を方向性を考慮した上で 1 辺 5.5 cm の立方体

表-1 和泉砂岩の物理的性質

弾性係数	$3.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
ポアソン比	0.28
単位体積重量	2.548 g/cm^3
含水比	1.12%
間げき比	0.03

材を方向性を考慮した上で 1 辺 5.5 cm の立方体に切断し、載荷時の偏心や応力集中を減少させるために、カーボランダム (No. 80) で表面を研磨することによって、対面の平行度や隣面の直交性

図-5 砂岩の単位体積重量と強度のばらつきとの相関関係



ならびに表面の粗度を改善した。供試体は成形後含水比を同一にするため、恒温室(20°C, 湿度 60%)内に数日以上保存した。その後単位体積重量を測定したところ、 $\gamma = 2.51 \sim 2.60 \text{ g/cm}^3$ の間のばらつき(ほぼ正規分布)が認められ、このばらつきがほとんど含水比の変化によるものと考えられた。しかし図-5から単位体積重量と強度の平均値からのばらつきとの相関関係が認められないことがわかる。なお二、三の実験を行なった結果、試料の異方性は見出せなかったが、以下の圧縮試験結果はすべて最大主応力軸に供試体の同一軸が対応するようにセットして得られたものである。山口¹²⁾はかこう岩の強度試験における供試体数については10個以上が望ましいと述べているが、著者らの実験において12個の一軸圧縮強度の変動係数(後掲の表-3参照)は3.9%であり、信頼できる平均値を得るための供試体数は7個程度でよいと考えられる。

(4) 実験装置および実験方法

A. 三軸圧縮試験機

実験に使用した三軸圧縮試験機は、主として岩石、コンクリートまたはモルタルなどの硬質材料の三次元応力下における力学的性質を調べることを目的として製作されたもので、立方体に成形した供試体につき各三軸方向の対面圧縮試験を行なうものである。この装置は各軸方向にそれぞれ独立に加圧または減圧できる3組の負荷装

置と3組の計力機よりなり立っている。写真-1は装置の外観であり、写真-2は水平負荷装置を用いた和泉砂岩供試体の二軸圧縮試験の状態を表わしている。図-6は三軸圧縮試験機構造図として、主として鉛直および水平負荷装置を示している。

この試験機の性能はつぎのとおりである。

- 1) 負荷装置：油圧対向シリンダー方式により負荷するもので、鉛直方向には圧縮ならびに引張りを与えることができるが、水平方向には圧縮のみが可能である。表-2に負荷装置の性能を示す。
- 2) 計力機：油圧の計測には、振子式RH型計力機が用いられている。
- 3) 定荷重装置：試験中圧力を一定に保つ装置であって、クリープ試験や側圧を一定に行なう実験などに用いられる。この装置は、供試体の変形にともなう圧力変化を高周波電流に変換して自動的に油流量を調整し、一定の圧力に保つものであって、各計力機にそれぞれ1個ずつ取り付けられている。また鉛直軸の主計力機に取り付けられている定荷重装置は、他の2つの

写真-1 三軸圧縮試験機

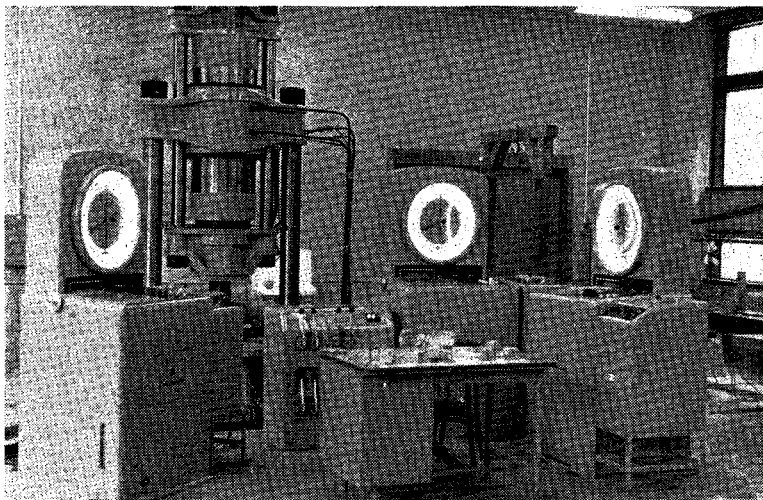


写真-2 水平負荷による二軸圧縮試験

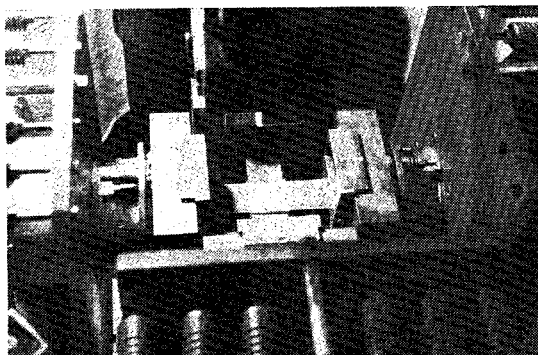


図-6 三軸圧縮試験機構造図

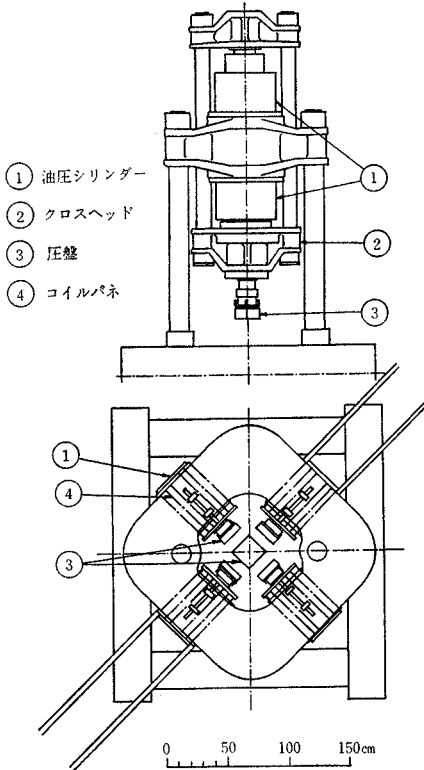


表-2 三軸圧縮試験機の負荷能力

負荷能力	鉛直軸	200, 100, 50, 20, 10 t
	水平軸	100, 50, 25, 10 t
ラムストローク		最大 150 mm
負荷速度		0.1~20 t/min
圧盤寸法		20, 10, 5 cm

負荷装置をそれぞれの圧力比で制御でき、その設定指示板の針を定速で動かすことにより、一定速さの加圧ならびに一定応力比のもとで実験を行なうのに使用される。

立方体供試体を用いるため、この試験機にはなおつぎのような問題がある。

- 1) 圧盤と供試体間の摩擦：この試験機では圧盤を通じて供試体を加圧している関係上、圧盤と供試体間の摩擦力を完全に除去することは不可能であるが、これはできるだけ小さくする必要がある。丹羽ら¹³⁾は各種の減摩剤を圧盤と供試体の間にそう入して摩擦係数を測定した結果、減摩剤としてシリコングリースを塗布した薄くて柔らかいゴムシート(厚さ0.23 mm)を用いると、摩擦が非常に小さくなることを認めた。著者らもこの実験において常にこの減摩剤を使用した。この場合摩擦係数はそれを使用しないときの1/50~1/100に減少し、 $f=0.002\sim 0.004$ なる値が得られた。

- 2) 部分載荷：供試体を二軸または三軸圧縮する場合、圧縮量が大きくなると隣接している圧盤同志が互いに端部で接触するようになるので、供試体寸法は通常圧盤より少し大きくなる。この実験には1辺50 mmの圧盤を使用した。供試体は5 mmの余裕ひずみ量を見込んで1辺55 mmの立方体とした。したがって供試体表面には端部で圧盤に接していない部分が生じ、厳密には部分載荷となる。強度におよぼす部分載荷の影響について、丹羽ら¹³⁾は1辺107 mmのモルタル供試体と1辺100 mmの圧盤を用いて実験した結果、その影響は認められなかったと報じている。著者らも和泉砂岩の変形と強度に関してこの種の実験を行なったが、部分載荷の影響をほとんど認めなかった。

- 3) 寸法効果：端面の摩擦および部分載荷などと同様に、供試体寸法も強度を支配する一つの要素である¹⁴⁾。しかし端面の幅にくらべて長い供試体を用いると、供試体の中央部には端面拘束の影響がおよばないことが知られており¹⁵⁾、このことは著者らの実験においてもいくぶん認められた。

以上の3点は減摩剤を使用することによりほとんど解決される問題であるが、実験結果からそれらの誤差を分離させることができないので、今後これらについて装置に改良を加えねばならないであろう。

B. 実験方法

実験はすべて定荷重速度(8 t/min)でつぎの順序で行なわれた。

- 1) 三軸を等方圧として、最小主応力 σ_3 の値まで載荷する。
- 2) 一軸を σ_3 に保ちながら、他の二軸を中間主応力 σ_2 の値まで載荷する。
- 3) σ_2 と σ_3 を一定に保って、他の一軸 σ_1 を破壊時まで載荷する。
- 4) 破壊後は3), 2), 1)の順序で除荷する。

破壊時の応力状態はすべて $V-H_1-H_2$ という表示を用いている。これは中間軸圧 $H_1(t)$ 、最小軸圧 $H_2(t)$ に保ったまま、最大軸圧 V を増して破壊にいたらしめる試験方法を示しており、たとえば $V-V-8$ は最小軸圧 8 t の伸長試験を表わしている。

(5) 実験結果および考察

一軸圧縮試験は任意の箇所より取り出された供試体について行なわれ、その強度は二軸および三軸圧縮強度を無次元化するための基準とされた。12個の供試体について測った平均一軸圧縮強度は $\sigma_c=1190 \text{ kg/cm}^2$ 、変動係数は前述したように3.9%であった。破壊までの供試体表面のひずみはほぼ直線的であって、塑性流動を生じていないことを示している。二軸・三軸圧縮強度も含めて、各応力状態における強度の平均値、標準偏差およ

び変動係数を表-3に掲げてある。これらはすべて一軸圧縮強度 σ_c で除した無次元の数値として記入されている。

A. $\sigma_1/\sigma_c \sim \sigma_2/\sigma_c$ での表示

図-7 は二軸圧縮試験および三軸圧縮試験における強度を $\sigma_1/\sigma_c \sim \sigma_2/\sigma_c$ 軸で表示したもので、平均値と同時にばらつきの幅を示している。この図からわかるように、二軸圧縮試験と三軸圧縮試験において中間主応力の影響の度が異なっている。これは破壊の形態の相違によって、その影響の度が変わったとも考えられるが確かではない。しかし二軸圧縮試験および一部の三軸圧縮試験において

表-3 和泉砂岩の圧縮試験結果

応力状態	σ_1/σ_c	σ_2/σ_c	σ_3/σ_c	個数	S^*	$S/\sigma_1/\sigma_c^{**}$
V-0-0	1.00	0	0	12	0.04	3.9
V-8-0	1.23	0.23	0	4	0.09	7.2
V-16-0	1.43	0.43	0	4	0.09	6.4
V-24-0	1.34	0.71	0	4	0.17	12.8
V-V-0	0.96	0.96	0	5	0.05	4.9
V-2-2	1.57	0.06	0.06	6	0.19	11.9
V-4-4	1.87	0.12	0.11	5	0.19	10.2
V-6-6	2.16	0.18	0.17	6	0.09	4.0
V-8-8	2.51	0.23	0.23	7	0.23	9.0
V-24-8	2.60	0.69	0.23	7	0.37	14.3
V-48-8	2.67	1.37	0.23	7	0.30	11.1
V-72-8	2.63	2.06	0.23	7	0.18	6.8
V-V-8	2.59	2.57	0.22	7	0.27	10.3
V-16-16	3.36	0.45	0.45	8	0.10	3.0
V-32-16	3.62	0.90	0.45	7	0.16	4.5
V-64-16	3.47	1.82	0.45	7	0.29	8.4
V-96-16	3.71	2.76	0.45	7	0.35	9.4
V-24-24	4.04	0.69	0.67	8	0.17	4.2
V-48-24	4.20	1.39	0.68	7	0.40	9.5
V-72-24	4.27	2.06	0.68	6	0.47	11.0
V-96-24	4.17	2.74	0.67	6	0.29	6.9

* 標準偏差 $S = \sqrt{(\sum \sigma_i^2 - N \bar{\sigma}_i^2)/(N-1)}$
 ** 変動係数 $S/\sigma_1/\sigma_c$ (%)
 $\sigma_c = 1190 \text{ kg/cm}^2$

図-7 σ_1/σ_c と σ_2/σ_c の関係

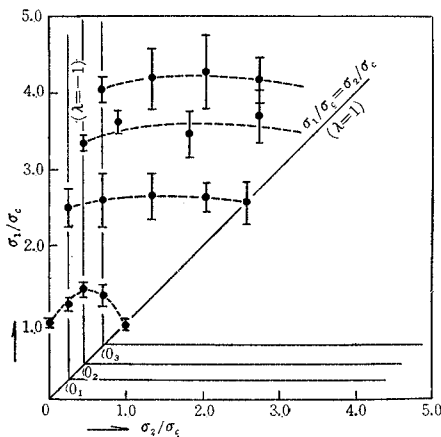
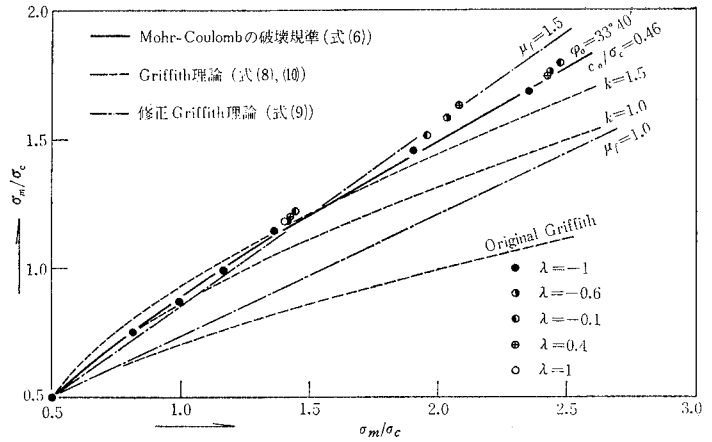


図-8 平均応力間の関係



軸対称圧縮試験 (主応力パラメーター $\lambda = -1$) と伸長試験 ($\lambda = 1$) の強度が一致し、さらに三軸圧縮試験結果の平均値をつらねた曲線を $\lambda = 1$ まで外挿するとほとんど $\lambda = -1$ の場合の結果と一致することは興味深い。

B. $\tau_m/\sigma_c \sim \sigma_m/\sigma_c$ での表示

図-8 は三軸圧縮試験による強度を $\tau_m/\sigma_c \sim \sigma_m/\sigma_c$ で表示したものであり、理論的に説明できるように実験結果は中間主応力の影響によって 45° のこう配で変動している。この変動を主応力パラメーター λ と関連させて考察しよう。 $\lambda = -1$ は常に最低の位置にあり (σ_m, τ_m が最小), λ が増すにつれて実測点は 45° のこう配で上昇し、なおも λ が増加して $\lambda = +1$ に近づくとき、同じ経路をたどってもとの $\lambda = -1$ の位置に戻る傾向がみられる。

これとは別に $\lambda = -1$ のみの実験結果 (●印) をみると、側圧の高い三軸圧縮試験では $\phi_0 = 33^\circ 40'$, $c_0/\sigma_c = 0.46$ なる Mohr-Coulomb の破壊規準に一致することが認められ、他の λ に対してもこの配の異なる直線にのることが確かめられた。以上の傾向は式 (16) で与えられる拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準とよく一致することを示している。しかし側圧が低い場合は、実験結果はこの規準を示す直線よりはずれ、さらに高次の関係となるようである。参考のため図中には Griffith

図-9 強度におよぼす中間主応力の影響

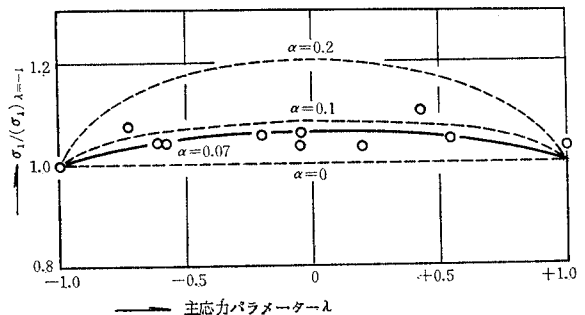
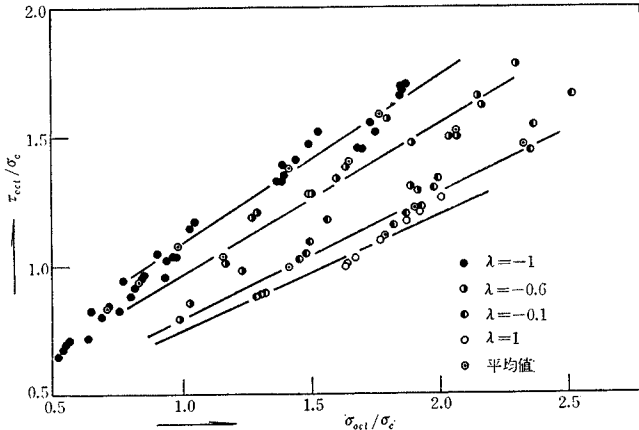


図-10 正八面体応力間の関係



系統の理論曲線も記入されている。

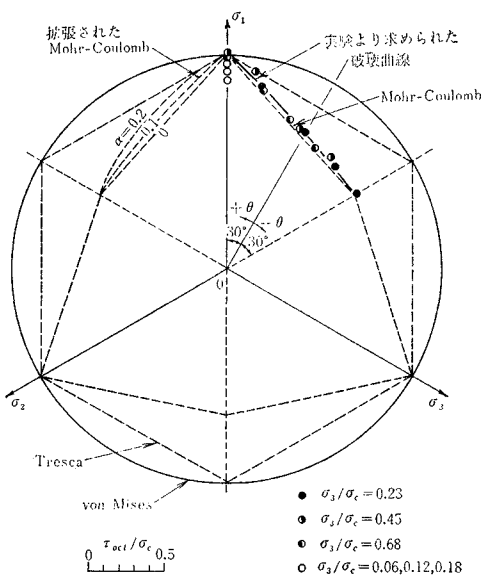
C. $\sigma_1/(\sigma_1)_{\lambda=-1} \sim \lambda$ での表示

拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準における影響値 α (式 (15) 参照) は、実験結果を $\sigma_1/(\sigma_1)_{\lambda=-1} \sim \lambda$ で表示することによって決定される。 $\sigma_1/(\sigma_1)_{\lambda=-1}$ は中間主応力のある応力状態における最大主応力と $\lambda=-1$ (圧縮試験) における最大主応力との比であり、これが中間主応力の影響を表わす。図-9 はこの表示によって強度におよぼす中間主応力の影響を調べたものであって、実線の曲線は実験から得られたもの、破線は $\alpha=0$ (Mohr-Coulomb の破壊規準)、 $\alpha=0.1$ および 0.2 の拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準を示す。この図から和泉砂岩においては、影響値として $\alpha \approx 0.07$ の値を採用することができるものと考えられる。

D. $\tau_{oct}/\sigma_c \sim \sigma_{oct}/\sigma_c$ での表示

拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準 (式 (16) 参

図-11 正八面体平面内での応力表示



照) を提案したい、主応力空間内で破壊曲面が 1 点に会するという仮定を用いたが、これについて検討してみよう。図-10 は $\lambda=-1, -0.6, -0.1, +1$ に相当する実験結果を $\tau_{oct}/\sigma_c \sim \sigma_{oct}/\sigma_c$ 軸で表わしたものである。実験結果の平均値 (●印) はほぼ直線にのり、しかもそれらの直線は $\tau_{oct}=0$ なる横軸上の 1 点で会することがわかる。しかしこの破壊規準は比較的高い側圧の範囲においてのみ適用され、低側圧では実験値はこれらの直線より下側に落ちることに留意しなければならない。

E. 正八面体平面上での表示

図-11 は $\sigma_{oct}/\sigma_c=1.5$ の正八面体平面上に実験結果をプロットしたものである。プロットの方法としては、さきの 図-10 において各実験結果をそれぞれの主応力パラメータ λ に対する直線に沿い $\sigma_{oct}/\sigma_c=1.5$ の基準面まで内挿して τ_{oct}/σ_c を求め、ついで

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-1}{\sqrt{3}} \lambda \dots\dots\dots (19)$$

より角度 θ を算出し、この θ に対して τ_{oct} を描く。

図-11 には参考のため Mohr-Coulomb, 拡張された Mohr-Coulomb ($\alpha=0.1, 0.2$), Tresca, von Mises の各破壊規準を記入してある。実験結果は Mohr-Coulomb の破壊規準を表わすひずんだ等辺六角形より少しふくらんで外側にある。これは B. の $\tau_m/\sigma_c \sim \sigma_m/\sigma_c$ 表示法において $\lambda=-1$ に対する実験結果が 1 本の直線にのることより、そのふくらみの部分だけ中間主応力の影響があることを示している。そのふくらみの形は拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準における定数を $\alpha=0.1$ とおいたものよりいくぶん小さく、先述したように $\alpha \approx 0.07$ をとることができる。

(6) 結 論

- 1) 組合せ圧縮応力下の和泉砂岩供試体の強度は中間主応力の影響をある程度受け、Bishop によって拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準とよく一致した。
- 2) この破壊基準における強度定数 ϕ_λ の増加量は高高 1.5° であり、この程度の強度変化は実験に用いた供試体の成形精度やその内部に含まれている欠陥などによるばらつきの範囲内に入ってしまうので、次節に述べる破壊形態の考察などの特殊な問題を除けば、工学的には無視しうる値であろう。
- 3) 側圧のかなり高い三軸圧縮試験において、実験結果は式 (15) の定数 $\alpha \approx 0.07$ とした拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準に一致するが、低側圧の三軸試験や一軸・二軸圧縮試験結果はその破壊規準線よりはずれている。これは破壊の機構や様式の

相違によるものと思われる。

- 4) 和泉砂岩にかぎらず、一般に三軸圧縮応力下にある岩質材料の極限強度を求める場合、一軸圧縮強度からこれを推定するのが普通であるが、常圧でぜい性を示すような材料が高圧下でそのぜい性を失う場合、一軸圧縮強度から三軸圧縮状態の極限強度を推定することは、かなり困難であるといわねばならない。

3. 組合せ圧縮応力下における和泉砂岩の破壊の形態

(1) 概 説

和泉砂岩の強度に関しては前節で詳述したが、岩質材料の破壊機構を研究する上で強度理論と同程度の重要性をもち、強度理論の妥当性を支配するものとして破壊の形態があげられる。しかしこの種の研究は、ほとんど金属などの延性材料についてなされてきており、岩石などのぜい性材料についてはまだ十分に行なわれていない。

一般に破壊後の材料の形は、その材料の特性のみならず、破壊時までの外的条件に大きく左右される。材料によって破壊時またはそれまでの挙動に差異のあることは興味あることであり、これらの挙動を理解することは材料の力学的性質を知るための圧縮試験結果などを評価するのに非常に役に立つ。したがって破壊の形態または破壊現象を十分把握しなければならない。この方法には巨視的立場と微視的立場があるが、巨視的な現象を微視的解釈によって説明し、総合的な立場から材料の破壊機構について検討を加えねばならない。ここではまず破壊の形態の概念について簡単に述べ、ついで和泉砂岩の場合の巨視的ならびに微視的立場の相互の関連性について考察する。

(2) 従来の研究

A. せん断破壊

せん断破壊の理論は材料の降伏後に起こる塑性流動による破壊の形態を扱っている。したがってこの概念は、破壊前に降伏し塑性変形を起こす材料、つまり金属のような延性材料に適用されてきた。せん断応力は連続体内に生じるものであるから、せん断破壊の概念には材料が連続体であるという仮定が含まれていた。土や岩石などの材料は巨視的には連続体とみなすことができるので、巨視的な意味でせん断破壊の概念を導入することができる。一方このような材料を微視的にみた場合は不連続体である。金属材料においてせん断破壊を微視的に取り扱う方法として転移論が唱えられ、土質力学の分野では粒状体のせん断型破壊という概念が研究されている。

巨視的なせん断破壊の一般的な形として Mohr-Coulomb の破壊規準があるが、これによるとすべり面が最大主応力面となす角は $\theta = 45^\circ + \varphi/2$ となる。Scott¹⁶⁾ は

理想的粒状体として、大きさと粗度の等しい球が最も密に詰め合わさった面心立方構造のモデルを仮定し、個々の球の力のつりあい式を立てると、破壊は層と層の相対的なすべりによって生じ、そのすべり面の最大主応力面となす角が $45^\circ + \varphi/2$ となることを認めた。これは粒状体のような不連続体においても、理論を誘導する上で種種の仮定が含まれているにせよ、せん断破壊の概念を導入しうることを示している。

岩石は粒状体とはその性質が非常に異なっていて、単に結晶鉱物が詰め合わさっているだけでなく、それらの間にはかなり強い結合力が働いている。この結合の特性が材料のぜい性を支配する大きい要素となっている。側圧の高い三軸圧縮試験において岩石は非常に大きく変形することが実験事実として知られている¹⁷⁾。このような場合に岩石は構造変化を起こし、粒状体の構造に近づくすべり、岩石の破壊の形態にせん断破壊の概念を適用することができるであろう。

B. へき開破壊

へき開破壊がせん断破壊と区別して研究されるようになったのは、Prandtl (1908) が粉末のないきれいな面 (clean surface) をもつへき開破壊における強度 (Schubfestigkeit) と、粉末でよごれた面 (dusty surface) をもつせん断破壊における強度 (Scherfestigkeit) との違いを指摘して以来である。Bridgeman はせん断破壊すれば抵抗力を増すと思われる面で引張破壊が存在することを認め、この現象を pinching-off effect とよんだ。Griffith^{2), 3)} は新しい観点からぜい性材料の破壊理論を提案し、上述のへき開破壊の現象を説明した。Granberg¹⁸⁾ は Griffith の理論の欠点、たとえば一軸圧縮試験において最も危険なクラックは最大圧縮応力の方向に 30° 傾いたものであり、破断面は鉛直でなく傾斜したものであることの矛盾を指摘した。そしてぜい性材料の一軸圧縮試験において破壊が一義的に圧縮軸方向に平行に生じることを単結晶物質である岩塩を用いて実証し、この破壊の形態を軸方向へき開破壊 (axial cleavage failure) と名づけた。

(3) 実験試料および実験方法

破壊の形態を調べるために、前節の強度試験を行なったあとの和泉砂岩供試体が使用された。

破壊の形態が載荷方法や載荷速度などに影響される場合がありうるので、強度試験の手順を綿密に行なうと同時に除荷条件にも注意を払った。この種の実験において破壊の形態を観察するためには、破壊が進行してゆく各過程を段階的にでも見る必要があるが、試験装置や実験方法および供試体の数に制約されて不可能であったので、破壊の直前もしくは破壊の瞬間の供試体の形状から破壊の形態を調べた。したがってこの実験で最も大切なことは、供試体の破壊の直前または破壊の瞬間に除荷

し、そのときのままの状態 で供試体を外界に取り出すことである。

破壊の形態を調べるため、破断面の角度と破断面の相対明度の測定、および顕微鏡を用いたクラックの形状と破断面の様相の観察をつぎのようにして行なった。

A. 破断面の角度

強度試験において破壊した供試体を注意深く取り出し、破断面の角度を分度器で測定した。測定にさいしては、端面の摩擦や部分载荷に影響される程度の少ない供試体中央部付近を測定した。

B. 破断面の相対明度

破断面上の白い粉末がせん断破壊のさいの鉱物粒子のすり合わせによって生じたものと考え、その粉末の生じている面積を定量的に測定する目的で破断面の接写撮影を行ない、フィルム面の平均明度を露出計で測定した。

C. 破断面の顕微鏡観察

双眼顕微鏡を使用して、クラックの形状や破断面内に存在する白い粉末などの様相について観察し、あわせて写真撮影を行なった。観察にあたって注意した点は、クラックに沿う相対変位の小さい破断面を選んだことである。

(4) 実験結果および考察

A. 巨視的な破壊の形態

a) 破断面の角度 写真-3 は一軸圧縮試験で破壊した供試体の写真である。写真からもわかるように、供試体は多数の細長い柱状片となって破壊音とともに飛散した。破壊までの応力-ひずみ曲線はほぼ直線的であり、破壊直前に供試体を取り出してクラックの進行を調べることができなかった。しかし細片化した供試体から破断面の角度を調べると、最大主応力面に対してほぼ直角であった。

写真-3 一軸圧縮試験による破壊後の供試体



二軸圧縮試験においても、一軸圧縮試験と同様に供試体は破壊音とともに多数の薄い板状に破壊し、破断面の角度も同様にほぼ 90° であった(写真-4 参照)。

三軸圧縮試験における破壊後の形態を写真-5 に示す。さきの写真-3,4 と比較して、三軸圧縮試験におい

写真-4 二軸圧縮試験による破壊後の供試体

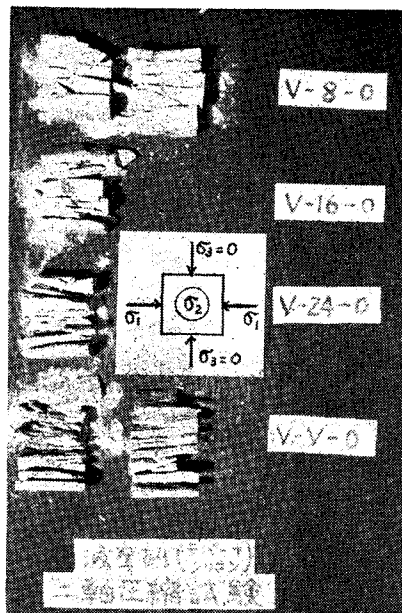
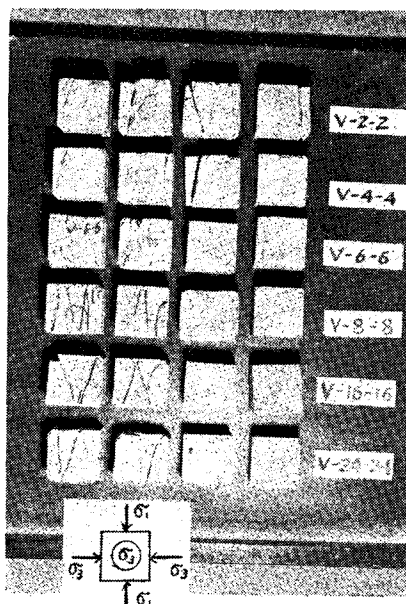


写真-5 三軸圧縮試験(λ=-1)による破壊後の供試体



てはつぎの傾向のあることがわかる。

- 1) 最大主応力面に対して破断面のなす角度は 90° より小さい。
- 2) 破壊後の供試体片の数が少ない。つまりあまり細かく割れることはない。

さらに実験において一軸・二軸圧縮試験では、破壊の瞬間を前もって知ることができなかったが、側圧の高い三軸圧縮試験では、破壊直前に側圧の計力機の針が徐々に上昇しはじめることによって破壊の到達を察知するこ

とができた。写真—5の右2列はこのような知識により破壊直前に取り出した供試体であり、後述する破断面の相対明度および顕微鏡観察にはこれらの供試体内のクラックが用いられた。

表—4は各応力状態における破断面の角度の平均値、測定供試体個数および標準偏差を示している。測定された破断面は供試体全体にわたって連続しているものであった。図—12は破断面の傾斜角 θ と側圧の関係を示したものである。比較のため図中に $\varphi_0=33^\circ 40'$ に対するMohr-Coulombの破壊規準から出したすべり面の角度 $\theta=62^\circ$ が記入されている。この図からわかるように、側圧が増すにつれて破断面の角度は指数的に減少するが、無次元化した側圧(側圧を一軸圧縮強度で除した無次元の値) σ_3/σ_c がほぼ0.4以上になると、角度変化はほとんどなくなる。

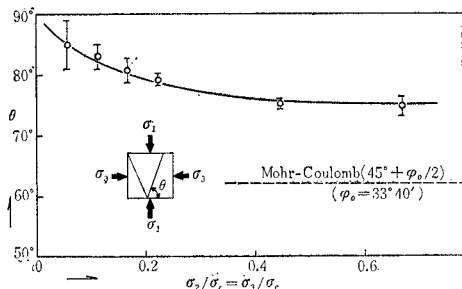
つぎに破断面の角度におよぼす中間主応力の影響につ

表—4 破断面の角度

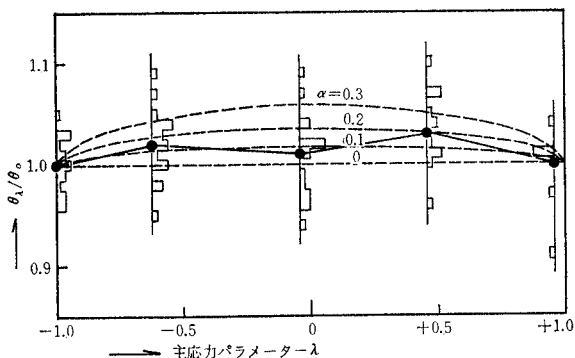
応力状態	$\bar{\theta}$	個数	S^*	応力状態	$\bar{\theta}$	個数	S^*
V-2-2	84.8	6	4.2	V-16-16	75.0	6	0.8
V-4-4	81.0	3	2.0	V-32-16	78.1	7	1.7
V-6-6	80.6	5	2.1	V-64-16	77.8	3	4.5
V-8-8	79.0	6	1.0	V-96-16	79.5	7	2.8
V-24-8	79.7	5	1.1	V-24-24	75.0	5	1.7
V-48-8	77.8	6	2.3	V-48-24	75.9	7	2.6
V-72-8	79.5	6	1.7	V-72-24	76.1	5	1.3
V-V-8	80.0	7	0.9	V-96-24	77.0	5	1.3

* 標準偏差 $S = \sqrt{\sum(\theta - \bar{\theta})^2 / (N-1)}$

図—12 破断面の傾斜角と側圧との関係



図—13 破断面の傾斜角におよぼす中間主応力の影響



いて調べてみよう。図—13は主応力パラメーター λ と θ_1/θ_0 (θ_1 :主応力パラメーターが λ のときの破断面の傾斜角, θ_0 : $\lambda=-1$ (軸対称圧縮試験)のときのもの)との関係を $\lambda=-1, -0.62, -0.04, +0.46, +0.96$ に対してヒストグラム(1山が供試体1個に相当)として表わしたものである。図中●印はそれらの平均値を表わし、破線は拡張されたMohr-Coulombの破壊基準から計算されるすべり面の角度を影響値 α (式(15),(16)参照)をパラメーターとして表わしたものである。これより実験結果の平均値は $\alpha=0.1$ とおいたときの拡張されたMohr-Coulombの破壊規準にかなりよく一致していることが知られる。

以上の結果をまとめて考察するとつぎの結論が得られる。

1) 常温・常圧ではぜい性を示す和泉砂岩は、拘束圧が高くなるにつれてぜい性を失って、しだいに延性を示すようになる。これは一軸・二軸圧縮試験において応力一ひずみ関係が直線に近かったのに対し、側圧の高い三軸圧縮試験では破壊時のひずみが相当大きくなることからもうなずける。

2) 一軸圧縮試験および二軸圧縮試験において、破壊までのひずみと破壊後の形態とを考え合わせると、軸方向へき開破壊が生じていることが予想される。

3) 側圧が相当高くなれば和泉砂岩も延性を示し、せん断によって破壊すると考えられるから、図—12より無次元化された側圧が約0.4以上ではせん断破壊が生じていると考えられる。

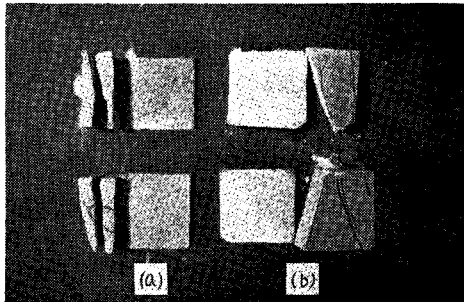
4) 巨視的にせん断破壊が生ずるとみなされる高側圧の領域においてさえ、破断面の角度と強度理論から求めたすべり面の角度との間に大きい差がある。Murrell⁹⁾は直径1in、長さ2inの円筒形に成形された石炭試料について一軸圧縮試験および軸対称三軸圧縮試験を行ない、破壊後の破断面の角度を測定した結果、Mohrの破壊理論によるすべり面の角度とはあまり一致しないことを認め、その原因として供試体の異方性をとり上げている。強度から求められたすべり面の角度は、材料が連続体であるとか、粒状体の場合粗度の等しい等大球が最も密に詰まっているなどの大きい仮定を含んでいる。実際の材料はこの仮定を完全には満足していないであろう。したがって和泉砂岩の破断面の角度が強度から計算されるすべり面の角度と完全に一致せねばならない理由はない。しかしその差は物質が連続体に近く、延性を示す材料ほど小さくなるであろう。

b) 破断面の相対明度 せん断型の破壊とへき開型の破壊とは基本的に破壊面の外観が異なっている。金属の場合、前者は灰色、絹状、せんい状であり、後者は光沢性、結晶状、粒状である¹⁹⁾。岩石のようなぜい性材料においては、(2) B. で述べたよ

うに外観によってこの2つの型に分類できる。しかし同一材料の破断面にしばしば両型式が混在する場合がある。このようなとき、両型式の破断面上に占める割合(面積比)はその混合の割合によって種々の値となるが、破壊の外観はせん断型破壊とへき開型破壊の正確な割合を必ずしも表わしているものではない。しかしどちらの型式が支配的であるかを知ることは、破壊後に破断面が乱されないかぎり可能である。

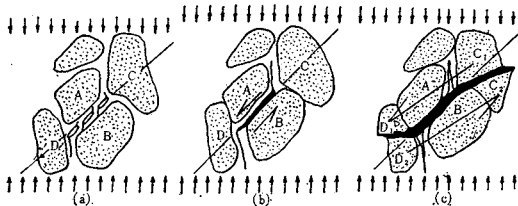
前述の実験を行なうにあたり、肉眼あるいは顕微鏡によって注意深く破断面を観察したところ、つぎの諸点が注目された。すなわち、白い粉末は一軸圧縮試験および二軸圧縮試験における破断面には見られず、高側圧の三軸圧縮試験における破断面のみ見受けられた。写真-6は二軸圧縮試験と側圧の大きい三軸圧縮試験による破断面の写真である。前者の破断面(写真-6(a))には粉末がないので黒っぽい画面として現われるのに対し、後者の破断面(写真-6(b))は白く写っている。この白い粉末は破断面上の柔らかい鉱物粒子が粉碎されたものである。この粉碎された白い粉末がどのような応力下で生じたかを考えることは、岩質材料の破壊の形態を研究する上において非常に重要である。

写真-6 破断面の明るさの比較
(a) 二軸圧縮試験 (b) 三軸圧縮試験



岩石を構成している鉱物粒子の結晶を Hoek と Bieniawski²⁰⁾ が唱えたモデル(図-14)で表わそう。Hoek らは岩石の一軸圧縮試験の結果から破壊の形態をつぎのように説明した。すなわちクラックの発生は図-14(a)の粒子AとBの間に存在する微視的クラックの先端からはじまるが、まだ全体の破壊にはいたらず、さらに主応力差が増すとともにその微視的クラックは粒子AとBとの境界で連続し(図-14(b))、その結果粒子AとBは相

図-14 微視的破壊から巨視的破壊までの過程



対的にすべろうとして、隣接粒子CとDの抵抗力とAB間の摩擦力によってつりあっている。主応力差の増加によってこのつりあい状態が破れ、粒子CとDは2つに分割されてせん断移動が生じる(図-14(c))。このとき D_1AC_1 と D_2BC_2 の境界では、粒子のすべりによって結晶粒子が粉碎されて粉末が生じるはずである。しかし著者らが実施した一軸・二軸圧縮試験ではこの粉末は全然認められず、高側圧の三軸圧縮試験において粉末がいたるところで見受けられた。したがって前者の試験では、Hoek らが唱えるようにクラックの先端から破壊が進行して最終的なすべりによって供試体が破壊するのではなく、Granberg が説明したような軸方向へき開破壊が起こるために粉末の発生をみないと考えられる。高側圧の三軸試験ではクラックの周辺で材料は降伏し、塑性領域が発達してせん断破壊が生ずるので、粉末ができると考えたほうが妥当である。

図-15 破断面の相対明度と側圧との関係

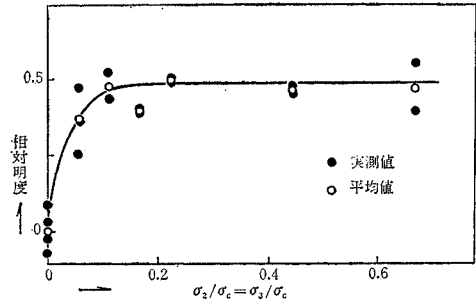
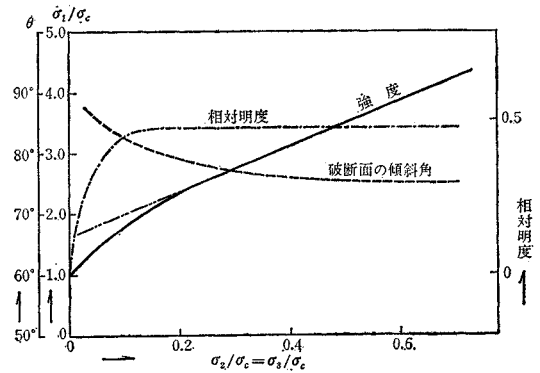


図-16 強度、破断面の傾斜角ならびに相対明度と側圧との関係



破断面の明るさは、一軸圧縮試験における破断面の明るさを基準(=1)として、他の破断面の相対的な明るさを測定した。実際の測定はネガフィルムについて行なったため、破断面が明るいほど露出計に現われる測定値は小さくなるので、図-15において相対明度は1から測定値を差し引いた値を側圧に対してプロットしてある。この図からわかるように、側圧の増加とともに破断面が急激に明るくなっている。これは粉末の生じている面積が多くなり、せん断型の破壊が支配的になってくること

を示している。また図によると、粉末の生じている面積の割合は、無次元化した側圧が約0.2以上になるとほとんど変化しない。

以上の結果を巨視的立場としての破壊強度とともに総合的に考察してみよう。図-16は和泉砂岩の強度、破断面の傾斜角ならびにその相対明度を無次元化した側圧に対して描いたものである。この図によってつぎの考察がなされる。

- 1) 一軸圧縮試験および二軸圧縮試験においては、へき開破壊が生じているとみなされる。
- 2) 無次元化した側圧 $\sigma_3/\sigma_c > 0.2 \sim 0.4$ の領域(高側圧三軸圧縮試験)では、せん断破壊が生じていると考えられる。
- 3) $0 < \sigma_3/\sigma_c < 0.2 \sim 0.4$ の範囲(低側圧三軸圧縮試験)では、和泉砂岩はぜい性から延性への遷移領域にある。

B. 微視的な破壊の形態

A. では破断面の平均的な傾斜角や全体的な明るさなどの巨視的な要素を測定し、これらから全体的な破壊の形態について考察してきた。しかし、破壊の巨視的条件と破断面の巨視的事象とが必然的に一致するとして相互に対応させる考えが危険なものであることは、横堀¹⁹⁾によって指摘されているところである。その関連性を調べるには、微視的な応力条件と巨視的な応力条件や、微視的なクラックの方向と巨視的なクラックの方向などの関係を調べねばならない。ここでは和泉砂岩の破壊の形態

が微視的にどのように説明されるかについて述べることにする。

a) へき開型破壊 写真-7(a)は一軸圧縮試験によって生じたクラックの顕微鏡写真である。この写真ではクラックの方向に沿ったすべりは見受けられず、クラックの方向に垂直な引張力によって破壊しているように思われる。写真-7(b)は写真-7(a)のクラックに対応する破断面の写真である。破断面の表面は凹凸がはげしく、結晶粒子が粒内で引き裂かれて破壊しているあとがいたるところで見られる。この写真で白く写っているのは、石英質の結晶粒子がへき開面で輝いているためであり、粉砕した白い粉末によるものではないことに注意しておく。このへき開型と考えられているクラックが材料の潜在的な欠陥によって発生したかどうかは、全体的な破壊が生じる瞬間を取り扱っているこの研究の範囲外

写真-8 三軸圧縮試験における破断面の形態

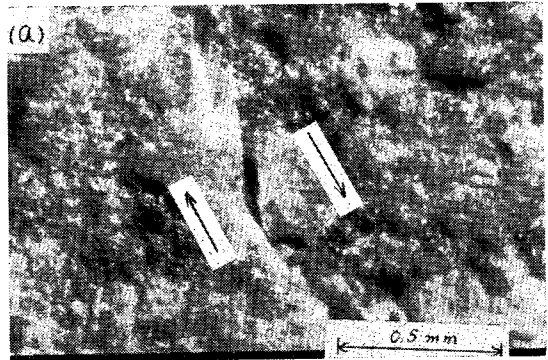
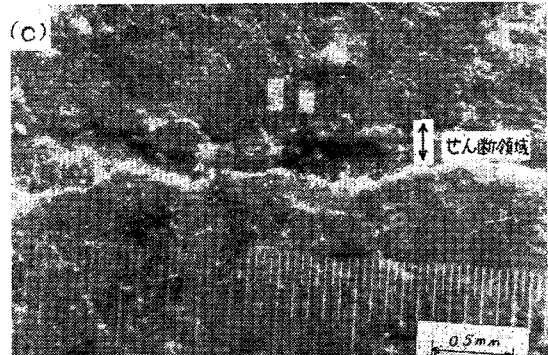
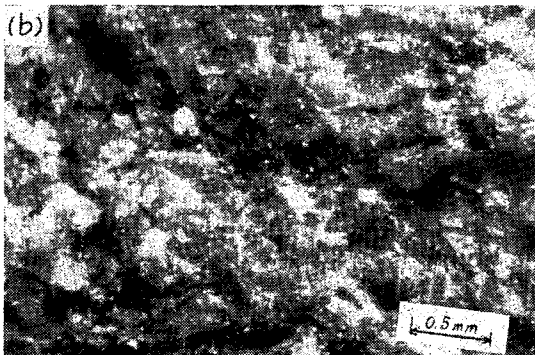
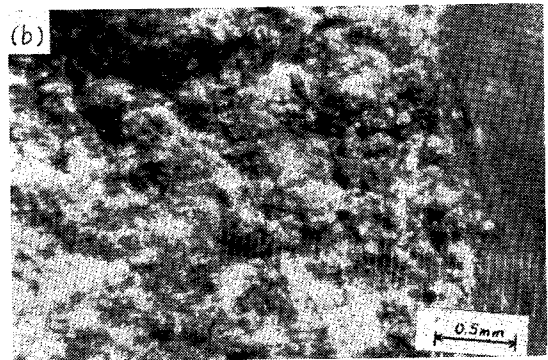
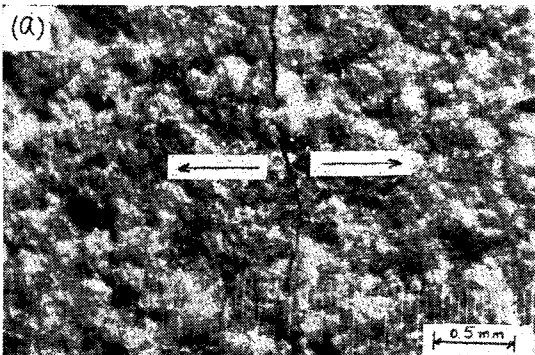


写真-7 一軸圧縮試験における破断面の形態



であって定かではないが、微視的な破壊の方向が最大主応力の方向にほぼ平行であり、破断面に粉末が見られないことは、軸方向へき開破壊が生じていることを意味している。

b) せん断型破壊 供試体がせん断によって破壊したかどうかを外観だけで判断することは非常に困難である。たとえば写真-8 (a) は $\sigma_3/\sigma_c=0.55$ の三軸圧縮試験によって破壊した供試体のクラックであり、巨視的な立場からは先述のようにせん断破壊が生ずるとみなされる応力状態である。写真ではクラックに沿ってすべりが生じており、このクラックの中に白い粉末が見受けられる。さらに破断面の写真(写真-8 (b) 参照)によっても、その面上に白い粉末が認められることからせん断型破壊が生じていると考えられるが、せん断型破壊によってこのようになったのか、へき開型破壊が起こったあとで、そのクラックに沿った変位が生じたものか区別できない。しかしクラックに沿った移動が全然なくても破断面に白い粉末が一面に分布しているので、高側圧状態ではせん断型破壊が卓越するものと解釈できるであろう。写真-8 (c) は $\sigma_3/\sigma_c=0.66$ の場合の破壊の形態であって、せん断面近くにある結晶粒子がせん断力によってその粒界の結合力を失い、土質力学でいうところのせん断領域らしき帯状のものが発生していることを示している。

せん断型破壊の微視的概念は、側圧が高くなるにつれてクラックの周囲には塑性域が発達し、微視的応力集中がほとんど生じなくなり、破壊は局所的な塑性領域でせん断型となり、それがしだいに進行して全体的な破壊にいたるものと考えられる。

c) へき開型破壊とせん断型破壊の遷移領域 巨視的にみたへき開破壊とせん断破壊の遷移領域において顕微鏡観察を行なったところ、a) のへき開型破壊と b) のせん断型破壊とが混合した別の形式で破壊が生じているのではなくて、ある部分ではへき開型破壊が、他の部分ではせん断型破壊がそれぞれ起こっており、その割合が側圧に支配されていることが判明した。

(5) 結論

組合せ圧縮応力下における和泉砂岩の破壊機構を強度および破壊の形態の両面から総合的に考察した結果、つぎのような結論が得られる。

- 1) 側圧が岩質材料の一軸圧縮強度の約 20~40% 以上ある三軸圧縮試験では、試料はぜい性を失ってせん断破壊が生じ、その破壊条件は中間主応力の影響をわずかに含む拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準によく一致する。この場合破壊の形態はせん断型破壊が支配的であることが微視的考察によって確かめられた。
- 2) 一軸圧縮試験と二軸圧縮試験においてはすべてへ

き開破壊が生じ、上述の破壊規準はこの領域の試験結果とは一致しない。これより換言すれば、一般に側方拘束条件下にある岩質材料の強度を推定するさいに一軸圧縮強度にたよることは、破壊の形式が異なるためそれほど有意義とは考えられない。

- 3) 側圧の低い三軸圧縮試験で上の両者の中間の遷移領域にあたるころでは、せん断型破壊とへき開型破壊とが同時に生じ、この場合の破壊条件式は線型でなく高次の式として表わされる。しかしたとえそれが求められたとしても、この式は厳密な意味で破壊の機構を含んだ力学的意味を失い、単に破壊応力の関係式を表わすにとどまるものと考えられる。したがってぜい性材料の破壊理論として Griffith 系統の理論を用い、または延性材料のものとして Mohr 系統の理論を用いる場合、その適用範囲の採択に十分留意する必要がある。

この研究を行なうにあたり種々助言をいただいた京都大学工学部資源工学教室 岡行俊 助教授と実験に協力された交通土木工学科学生小葉竹重機君に深甚な謝意を述べる。また高圧三軸圧縮試験機の使用については土木工学教室丹羽義次教授の配慮に負うところが少なくないので、あわせて感謝の意を表わしておきたい。

参考文献

- 1) Freudenthal, A.M.: The Inelastic Behavior of Engineering Materials and Structures, John Wiley & Sons, 1950.
- 2) Griffith, A.A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans. Roy. Soc., London, A. 221, 1921, pp. 163-198.
- 3) Griffith, A.A.: The Theory of Rupture, 1st Intern. Congr. Appl. Mech., 1924, pp. 55-63.
- 4) Orowan, E.: Energy Criteria of Fracture, Welding Jour. Res. Suppl., 1955, pp. 157-160.
- 5) Nadai, A.: Theory of Flow and Fracture of Solids, Mc-Graw Hill, Vol. 1, 1950, pp. 207-228.
- 6) McClintock, F.A. & Walsh, J.B.: Friction on Griffith Cracks in Rocks under Pressure, U.S. National Congr. Appl. Mech., 1962, pp. 1015-1021.
- 7) Brace, W.F.: An Extension of the Griffith Theory of Fracture to Rocks, Jour. Geoph. Res., Vol. 65, 1960, pp. 3477-3480.
- 8) Murrell, S.A.F.: The Strength of Coal under Triaxial Compression, "Mechanical Properties of Non-metallic Brittle Materials (Edited by W.H. Walton)", Butterworths, 1958, pp. 123-145.
- 9) 丹羽義次・小林昭一: ぜい性材料の破壊条件に関する考察, 材料, Vol. 16, No. 160, 1967, pp. 1-7.
- 10) 丹羽義次・小林昭一・平島健一: 多軸応力状態のもとにおけるモルタルの圧縮破壊に関する研究, 土木学会第 21 回年次学術講演会講演概要, 1-26, 1966.
- 11) Bishop, A.W.: The Strength of Soils as Engineering Materials, Geotech., Vol. 16, No. 2, 1966, pp. 91-103.
- 12) 山口梅太郎: 花崗岩の強度試験における供試体片の数について, 材料, Vol. 16, No. 160, 1967, pp. 52-58.

- 13) 丹羽義次・小村昭一・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，Vol. 16, No. 161, 1967, pp. 108-114.
- 14) 井上正康・大見美知人：岩石の強度試験に関する基礎的研究，日本鉱業会誌，Vol. 82, No. 935, 1966, pp. 1105-1106.
- 15) Niwa, Y. & Kobayashi, S. : Stress in Rectangular Blocks Compressed between Rough Plates, Memo. Fac. of Eng., Kyoto Univ., Vol. 28, 1966, pp. 244-253.
- 16) Scott, R.F. : Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley, 1963, pp. 291-304.
- 17) 西原正夫・平松良雄：岩石の三軸試験，日本鉱業会誌，Vol. 80, No. 908, 1964, pp. 90-94.
- 18) Granberg, J. : Axial Cleavage Fracturing, A Significant Process in Mining and Geology, Eng. Geo., 1(1), 1965, pp. 31-72.
- 19) 横堀武夫：材料強度学，岩波全書，1964, pp. 103-106.
- 20) Hoek, E. & Bieniawski, Z.T. : Fracture Propagation in Hard Rock, Proc. 15th Intern. Congr. Rock Mech., Lisbon, 1966.

(1967.4.4・受付)
