多軸応力下における岩石の破壊条件と中間主応力の影響

古住光正*・杉本文男**

Effect of Intermediate Principal Stress on Failure of Rocks and Failure Condition of Rocks under Multiaxial Stresses

Mitsumasa FURUZUMI and Fumio SUGIMOTO

Abstract

In order to investigate the effect of the intermediate principal stress on failure strength of rock and failure condition of rock under the multiaxial stresses, the true triaxial compression tests are carried out on two kinds of rocks, namely KIMACHI sandstone and OGINO tuff. For this test, a true triaxial compression testing machine using the cubic specimen was designed as shown in Fig. 2 and Photo. 1.

The main results obtained in this study are summarized as follows;

From the experimental results under the various combined triaxial compressive stresses, it becomes clear that the intermediate principal stress has an effect on the failure strength of rock, and the degree of its effect on the failure strength of rock is different for each rock. Also, under the multiaxial stresses including tension to compression stress field, the failure condition of rock can be expressed by Murrell's criterion rather than Drucker-Prager's one.

1. 緒 言

岩盤構造物に対する安全設計の見地より破壊を定義する場合、岩石の最大荷重時における強度は最も興味深いものである。このため、岩石力学の分野においては、種々ある破壊仮説の中で Mohr の破壊説が最もよく用いられている。しかし、この仮説においては、中間主応力の影響が無視されており、岩石の全ての破壊モードに対する応力状態を説明するものとはなっていない。

従来より岩石の破壊強度は、主として最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 (圧縮応力を正として、 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) によって決まることが Karman¹⁾, Boker²⁾ および Griggs³⁾ らによって明らかにされてきた。しかし、近年、一軸、二軸および三軸応力状態下における岩石の破壊に関する研究が活発に行われる中で、 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ の関係が必ずしも直線でないことが指摘され⁴⁾、岩石の破壊強度に及ぼす中間主応力 σ_2 の検討が再び取り上げられてきている。

岩石の破壊強度に対する中間主応力問題を実験的に検討しようとする場合、最も簡便な方法としては、中空円

筒試験片や平板試験片を用いる二軸試験法がある。この方法による従来の研究としては、Hobbs⁵⁾、茂木⁶⁾、岡島⁷⁾、佐藤⁸⁾、Jean-Claude⁹⁾、小林¹⁰⁾のものが見受けられる。しかし、この方法は一つの主応力が常に零となるため、全ての応力状態下の破壊を検討する場合には限界がある。その点、近年活発に行われるようになってきた真三軸試験法は、試験片に三方向から独立な荷重を加えることが出来るため、中間主応力の影響を検討するにあたっては満足すべき試験法といえる。この方法による研究としては、丹羽¹¹⁾、Hojem ら¹²⁾、Bieniawski ら¹³⁾、茂木^{14), 15)}、荻野¹⁶⁾、下谷¹⁷⁾、高橋¹⁸⁾のものが見受けられる。

従来のこれらの研究をみると、その多くは破壊強度に中間主応力が影響することを認めたものである。それゆえ、現在ではこの問題は実験的にもほぼ確立したものと思われる。しかし、その影響の度合や効果については、実験試料や実験方法の相違あるいは実験技術などの問題に関連して種々の見解があり、この点については未だ定見が得られていないのが現状のようである。また、岩石の破壊モードは極めて複雑なため、中間主応力問題を考慮した種々の応力条件下の破壊について統一的に検討し

* 岩手大学工学部資源開発工学科

** 東北大学工学部資源工学科

たものは余り見受けられない。

そこで、本研究では、岩石の破壊強度に及ぼす中間主応力の影響度ならびに多軸応力下における岩石の破壊条件を明らかにすることを目的として、真三軸圧縮試験を行ない、主として強度面から中間主応力の定量的な検討を行なうとともに、多軸応力下における岩石の破壊条件の検討にあたっては、真三軸圧縮試験結果に加えて既報¹⁹⁾二軸試験結果を用い、拡張 von Mises 形式の破壊規準による適合性を判定した。なお、本論文では、圧縮応力を正、引張応力を負とした。

2. 供試岩石

岩石試料としては、通常各種研究で用いられている標準的な岩石試料の中で、比較的均質と思われる島根県八束郡宍道町産の来待砂岩と福島県耶麻郡高郷村産の荻野凝灰岩を用いた。顕微鏡観察によれば、これら岩石試料の鉱物組成は次の通りである。

来待砂岩は、火山岩片および石英を多く含み、少量の長石、輝石、角閃石がみられ、マトリックスは火山灰および沸石である。荻野凝灰岩は、主として細粒火山ガラス片からなり、極少量の石英、斜長石および黒雲母を含んでいる。ガラス片の形はY字状、棒状、板状を呈し、その大部分は沸石化および粘土鉱物化している。

図-1 は、真三軸圧縮試験片および後述する多軸応力下の破壊条件を検討する際に用いた二軸圧縮試験片、圧縮-引張二軸試験片の寸法と形状とを示したものである。なお、真三軸圧縮試験片については面とりを施したが、これは応力集中による岩石試験片の隅角部の影響 (corner effect) を出来るだけ取り除くためである。表-1 は、各種試験における来待砂岩および荻野凝灰岩の一軸

図-1 各岩石試験片の形状と寸法

表-1 来待砂岩および荻野凝灰岩の力学的性質

岩石	試験片	一軸圧縮強度 S_c (kg/cm ²)	一軸引張強度 S_t (kg/cm ²)	粘着力* C (kg/cm ²)	内部摩擦角* ϕ (°)
来待砂岩	真三軸圧縮試験片	45.0	—	—	—
	二軸圧縮試験片	32.0	3.0	4.9	5.6
荻野凝灰岩	真三軸圧縮試験片	67.3	—	—	—
	二軸圧縮試験片	50.0	4.5	7.5	5.7

* 粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ は、 S_c 、 S_t の値を用いて作図により算出した値である。

圧縮強度、一軸引張強度ならびに作図により求めた粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ を示したものである。なお、同表において真三軸圧縮試験片と二軸圧縮試験片との一軸圧縮強度が異なるのは、岩石ブロックならびに試験片の形状などの相違によるものと思われる。

3. 試験装置ならびに試験方法

通常、固体圧により岩石試験片に荷重を加える真三軸圧縮試験においては、6基の油圧ラムを使用する場合が多い^{20)~22)}。しかし、本試作試験機は、比較的操作が簡便でかつ製作費を軽減させるため、3基の油圧ラムで載荷装置を構成した。

図-2 および写真-1 は、試作真三軸圧縮試験装置の概念図と写真を示したものである。図より試験機の各部の名称を述べると、④は軸圧用油圧ラム (100 t)、⑤は軸圧用受圧器、③は球座付圧盤、⑥は固定圧盤、⑦はアンビル、⑧は側圧用受圧器、②は側圧用油圧ラム (36 t) である。

試験片への載荷方法は、次の要領で行った。最初に三方向の荷重を静水圧的に加えていき、最小主応力方向の荷重が所定荷重に達したところでこれを保持させる。次に、残り二方向の荷重を比例載荷し、中間主応力の荷重が所定荷重に達したところでこれも保持させる。そして、最後に最大荷重方向の荷重だけを増加させ試験片を破壊させた。なお、試験中に試験片に加えた二方向の所

図-2 真三軸圧縮試験機概念図

写真-1 真三軸圧縮試験機

定荷重は、増圧器型の定圧装置を介して常に一定となるようにした。各軸方向の荷重の検出は、鋼製受圧器にて取り出し、動的ストレンメータを介して多ペンレコーダに記録させた。

4. 試験結果ならびに考察

図-3 は、種々組み合わせ三軸圧縮応力下における来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊時応力を最小主応力 σ_3 をパラメータとし、縦軸に最大主応力 σ_1 、横軸に中間主応力 σ_2 をとり、一軸圧縮強度 S_c で除し無次元化して示したものである。図より来待砂岩の破壊限界線をみると、いずれの最小主応力下においても、最大主応力（破壊強度）は初め中間主応力の増加に伴って増大していくが、極値を示した後は低下していき、最終的に $\sigma_1 = \sigma_2$ の線上に収束する傾向が認められる。また、各最小主応力下における破壊限界線を比べてみると、最小主応力が大きくなるにつれて破壊限界線は上方に位置し、その勾配も大きくなる傾向が認められる。また、 $\sigma_1 = \sigma_2$ と $\sigma_2 = \sigma_3$ のときの破壊強度を比べてみると、 $\sigma_1 = \sigma_2$ のときの破壊強度は、常に $\sigma_2 = \sigma_3$ のときのそれよりも大きくなっている。

次に、荻野凝灰岩の破壊限界線をみると、荻野凝灰岩においても来待砂岩とほぼ同様な傾向が認められる。すなわち、破壊強度は中間主応力の増加に伴って増大し、極値を示した後に低下している。また、各最小主応力下における破壊限界線は、最小主応力が大きい場合程上方に位置し、 $\sigma_1 = \sigma_2$ のときの破壊強度は、 $\sigma_2 = \sigma_3$ のそれよりも大きくなっている。

このように最小主応力の増加に伴って破壊限界線が上方に位置する傾向は、封圧試験によっても観察される

図-3 組み合わせ三軸圧縮応力下における来待砂岩および荻野凝灰岩の最大主応力 σ_1 （破壊強度）と中間主応力 σ_2 の関係

が, 中間主応力の存在する極値に至る範囲において破壊限界線の勾配が中間主応力の増大とともに大きくなり, また $\sigma_1 = \sigma_2$ のときの破壊強度が $\sigma_2 = \sigma_3$ のそれよりも大きくなることは, 明らかに破壊強度に中間主応力が関与していることを示すものである。しかし, 図からは中間主応力の影響の度合を定量的に知ることは困難である。そこで, 中間主応力の破壊強度に及ぼす効果を定量的に明らかにするために, 赤井²⁸⁾が試みた Lode のパラメータを用いる方法により中間主応力の影響の度合を検討してみた。

中間主応力の位置を定める Lode のパラメータ λ は, (1) 式によって表される。

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

上式において, $\lambda = -1$ のときは $\sigma_2 = \sigma_3$, $\lambda = 1$ のときは $\sigma_1 = \sigma_2$ となり, 前者は軸対称三軸圧縮状態, 後者は軸対称伸張状態を表す。

また, Bishop²⁴⁾ の式を用いて Mohr-Coulomb の破壊規準を三次元的に拡張すると, (2) 式が得られる²⁵⁾。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2C \cot \phi} = \frac{\sin \phi}{1 - \beta \sqrt{1 - \lambda^2/2}} = \sin \phi' \quad (2)$$

上式において, C は粘着力, ϕ は内部摩擦角, β は強度に及ぼす中間主応力の影響の度合を表すパラメータ (影響度), $\sin \phi'$ は Mohr-Coulomb の破壊規準における強度定数である。

(2) 式において, 破壊強度 (最大主応力 σ_1) に中間主応力が依存しない場合においては, σ_1 は σ_2 の大きさのいかに関わらず常に一定となるが, 依存する場合には, 種々の組み合わせ応力下の破壊強度は, $\sigma_2 = \sigma_3$ のときの破壊応力 $(\sigma_1)_{\lambda=-1}$ よりも大きくなる。それゆえ, 上式において, 中間主応力の影響度を表す β 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, 強度が中間主応力に依存しない場合を $\sigma_1/(\sigma_1)_{\lambda=-1} = 1$, すなわち $\beta = 0$ としてその最大増加分が中間主応力の影響度を示すことになる。

図-4 は, 上記表示法によって来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊強度に及ぼす中間主応力の影響度を示したものである。なお, 図における破線は, $\beta = 0$ のときの拡張された Mohr-Coulomb の破壊規準である。図より各岩石の $\sigma_1/(\sigma_1)_{\lambda=-1} \sim \lambda$ の関係をみると, いずれの岩石も λ が $-1 \sim 0$ に近付くにつれて $\sigma_1/(\sigma_1)_{\lambda=-1}$ は大きくなり, ピークを示した後に低下していく傾向が認められる。すなわち, 破壊強度に及ぼす中間主応力の影響は, 軸対称三軸圧縮および軸対称伸張状態付近では小さいが, λ が $0 \sim 0.5$ の値をとる応力状態付近になると大きな影響を

図-4 来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊強度 σ_1 に及ぼす中間主応力 σ_2 の関係

示すことがわかる。そこで, 図におけるピークの値より各岩石の影響度を求めてみると, 来待砂岩では, 最小主応力が 20, 40, 60 kg/cm² の場合, 中間主応力の影響がない場合を 0 としてそれぞれ 0.63, 0.71, 0.83 となり, 最小主応力の増加に伴い中間主応力の影響度は増大する傾向が認められる。一方, 荻野凝灰岩をみると, 最小主応力が 20, 40, 60 kg/cm² の場合には 0.48, 0.49, 0.52 となり, 荻野凝灰岩においても来待砂岩と同様な最小主応力の増加に伴う中間主応力の影響度の増大が認められる。また, 岩種の相違により中間主応力の影響度を比べてみると, 最小主応力が 20~60 kg/cm² となる範囲においては, 来待砂岩は 0.63~0.83, 荻野凝灰岩は 0.48~0.52 となり, 破壊強度に及ぼす中間主応力の効果は岩石の種類によって異なっている。このように, 岩石の種類によって中間主応力の効果に差異が生ずることは, 岩石の圧縮破壊が Mohr の内部摩擦説によって比較的良好に説明されることに関連し, 内部摩擦のような概念が関係しているものと思われる。このような観点に立って表 1 および表 2 の各岩石の内部摩擦角をみると, 僅かではあるが中間主応力の影響度の大きい来待砂岩の方が小さい

表-2 来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊に対する Drucker-Prager および Murrell の条件のあてはめによる各定数値

岩 石	応力条件	Drucker-Prager の条件				Murrell の条件	
		A	B	C (kg/cm ²)	ϕ (°)	K	σ_t (kg/cm ²)
来待砂岩	真三軸圧縮試験	0.401	0.439	251	30.8	0.850	34.7
	真三軸圧縮試験・ 二軸圧縮試験・ 圧縮-引張二軸試験	0.517	0.295	206	42.9	0.841	33.9
	真三軸圧縮試験	0.320	0.477	384	23.7	0.802	46.9
荻野凝灰岩	真三軸圧縮試験	0.320	0.477	384	23.7	0.802	46.9
	真三軸圧縮試験・ 二軸圧縮試験・ 圧縮-引張二軸試験	0.515	0.261	274	42.6	0.775	44.0
	真三軸圧縮試験	0.320	0.477	384	23.7	0.802	46.9

荻野凝灰岩よりも内部摩擦角は大きくなっている。それゆえ、数少ない実験例から中間主応力の効果を大胆に推定してみると、中間主応力の破壊強度に及ぼす効果は、内部摩擦角の大きい岩石程大きくなるものと考えられる。

そこで次に、中間主応力を含む多軸応力下の岩石の破壊条件を検討するために、本実験結果に既報二軸試験結果²⁶⁾を併せて既存破壊規準の適合性を検討した。

従来より岩石材料に対して比較的良好に適用される破壊規準として、Mohr-Coulomb の規準、Drucker-Prager の規準、Griffith の規準を拡張したものが知られている。このうち、中間主応力の影響を考慮した条件としては、土や岩石などポーラスな材料の強度が平均応力 $P=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ に依存するとの考えより、von Mises の条件を修正した (3) 式の拡張 von Mises の条件がよく知られている²⁷⁾。

$$6T_2 \equiv (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = f(P) \quad (3)$$

上式において、 T_2 は応力テンソルの第 2 不変量である。この形式の代表的な条件としては、Drucker-Prager の条件²⁸⁾と Murrell の条件²⁹⁾がある。本研究では、岩石の破壊強度に中間主応力が関与することが判明したので、上記二つの破壊規準を対象としてその適合性を判定した。

Drucker-Prager の条件および Murrell の条件は、それぞれ (4) 式および (5) 式によって表される。

$$\sqrt{T_2(3+\sin^2\phi)}/3 = P \sin \phi + C \cos \phi \quad (4)$$

$$T_2 = 12\sigma_t(P - P_0) \quad (5)$$

上式において、 ϕ は内部摩擦角、 C は粘着力に相当する定数、 σ_t は引張強度、 P_0 は間隙水圧である。

(4) 式、(5) 式を八面体応力 σ_{oct} 、 τ_{oct} で整理すると、 $\sigma_{oct} = P = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 、 $\tau_{oct} = \sqrt{2T_2/3}$ の関係より (6) 式および (7) 式が得られる。

$$\tau_{oct} = \sin \phi \sqrt{2/(3+\sin^2\phi)} \sigma_{oct} + C \cos \phi \sqrt{2/(3+\sin^2\phi)} \quad (6)$$

$$\tau_{oct} = 2\sqrt{2}\sigma_t(\sigma_{oct} - P_0) \quad (7)$$

本実験が乾燥状態の試験片について行われたので、間隙水圧 P_0 を無視すると、(7) 式は (8) 式となる。

$$\tau_{oct} = 2\sqrt{2}\sigma_t\sigma_{oct} \quad (8)$$

また、(6) 式、(8) 式において定数項を整理すると、(9) 式および (10) 式となり、 $\tau_{oct} \sim \sigma_{oct}$ 座標上において Drucker-Prager の条件は直線、Murrell の条件は放物線となる。

$$\tau_{oct} = A\sigma_{oct} + B \quad (9)$$

ここで、 $A = \sin \phi \sqrt{2/(3+\sin^2\phi)}$

$B = C \cos \phi \sqrt{2/(3+\sin^2\phi)}$ である。

$$\tau_{oct} = K\sqrt{\sigma_{oct}} \quad (10)$$

ここで、 $K = 2\sqrt{2}\sigma_t$ である。

図-5 は、種々の組み合わせ三軸圧縮応力下における来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊時応力を一軸圧縮強

図-5 組み合わせ三軸圧縮応力下における来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊に対する Drucker-Prager および Murrell の条件の適合性

度で除して無次元化し、八面体応力で表示したものである。図において実線および破線は、それぞれ最小二乗原理のもとで Marquardt 法で求めた、Drucker-Prager および Murrell の条件である。図より来待砂岩および荻野凝灰岩の三軸圧縮応力下における破壊条件をみると、多少のバラツキはあるが、両岩石試料とも二つの破壊規準に対し比較的よい適合性が認められる。これより両破壊規準を適合させた場合の来待砂岩と荻野凝灰岩の破壊条件式を導いてみると、Drucker-Prager の条件では、来待砂岩は $\tau_{oct}=0.401\sigma_{oct}+0.439S_c$ 、荻野凝灰岩は $\tau_{oct}=0.320\sigma_{oct}+0.477S_c$ となる。また、Murrell の条件では、来待砂岩は $\tau_{oct}=0.850\sqrt{\sigma_{oct}\cdot S_c}$ 、荻野凝灰岩は $\tau_{oct}=0.802\sqrt{\sigma_{oct}\cdot S_c}$ となる。

ところで、図においては、三軸圧縮応力下における岩石の破壊条件を知ることが出来たが、真三軸圧縮試験結果のみでは組み合わせ応力の低い範囲の実験点が得られず、この範囲の破壊に対する破壊規準の適合性は不明である。それゆえ、より広範な多軸応力下における岩石の破壊条件を明らかにするためには、引張応力をも組み合わせた実験結果が必要とされる。そこで、次に真三軸圧縮試験結果に既報の二軸圧縮試験および圧縮-引張二軸試験結果を併せて多軸応力下における岩石の破壊条件について検討を加えてみた。

図-6 は、種々組み合わせ三軸圧縮応力、二軸圧縮応力ならびに圧縮-引張応力下における来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊条件を示したものである。図より多軸応力下の岩石の破壊に対する破壊規準の適合性をみると、Drucker-Prager の条件は、圧縮応力条件下においてはよい適合性を示しているが、引張応力を組み合わせた応力条件下においては適合性が失われている。一方、Murrell の条件は、圧縮応力ならびに引張応力を組み合わせた広範な応力条件下において比較的よい適合性が認められる。これより両破壊規準を適合させた場合の来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊条件を導いてみると、Drucker-Prager の条件では、来待砂岩は $\tau_{oct}=0.512\sigma_{oct}+0.295S_c$ 、荻野凝灰岩は $\tau_{oct}=0.515\sigma_{oct}+0.261S_c$ となり、一方 Murrell の条件では、来待砂岩は $\tau_{oct}=0.841\sqrt{\sigma_{oct}\cdot S_c}$ 、荻野凝灰岩は $\tau_{oct}=0.775\sqrt{\sigma_{oct}\cdot S_c}$ となる。

ところで、ここまでの検討においては、組み合わせ応力条件の相違に基づく各岩石の破壊に対する両破壊規準の適合性を明らかにした。しかし、実際の岩石物性を考慮して真の岩石の破壊に対する破壊規準の適合性を判定するためには、Drucker-Prager および Murrell の条件を当てはめたときの破壊条件式より粘着力 C 、内部摩擦角

図-6 多軸応力下における来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊に対する Drucker-Prager および Murrell の条件の適合性

ϕ および引張強度 σ_t を求め、これらの値と表-1 に示した実際の岩石試験により求めた値との比較検討が必要となる。

表-2 は、各応力条件下における来待砂岩、荻野凝灰岩の Drucker-Prager および Murrell の条件を当てはめたときの定数値を示したものである。なお、表に示す粘着力 C ならびに引張強度 σ_t の計算値は、無次元化による破壊条件式より求めたものであるため、計算にあたっては、表-1 の各応力条件下の試験において求めた一軸圧縮強度の平均値を乗じて算出した。

表より Drucker-Prager の条件を当てはめたときの各岩石の粘着力 C および内部摩擦角 ϕ をみると、 C の値は来待砂岩および荻野凝灰岩とも表-1 に示した実際の岩石の値よりも 2~3 倍程大きくなり、逆に ϕ の値は小

さくなっている。これより Drucker-Prager の条件は、実際の岩石物性を考慮した場合においては不適合と思われる。一方、Murrell の条件を当てはめたときの各岩石の引張強度 σ_t をみると、その値はいずれの岩石とも表-1 の引張試験によって求めた値と極めて近似している。また、当てはめにより求めた σ_t と表-1 の一軸圧縮強度 S_o の関係をみると、来待砂岩では $S_o/\sigma_t=11.1\sim 1.15$ 、荻野凝灰岩では $S_o/\sigma_t=12.5\sim 13.2$ となり、(5) 式の Murrell の条件を変形した (12) 式の関係と比較的よい一致を示している。すなわち、いま間隙水圧を無視して (5) 式を変形すると、(11) 式が得られる。

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 24\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (11)$$

上式において、最大主応力 σ_1 を一軸圧縮強度 S_o とし、 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ とおくと、(11) 式は (12) 式となる。

$$S_o = 12\sigma_t \quad (12)$$

上式の Murrell の条件において、一軸圧縮強度 S_o が引張強度 σ_t の 12 倍となる関係は、来待砂岩および荻野凝灰岩について得られた上述した結果をほぼ満足させるものである。これより引張～圧縮組み合わせ領域における多軸応力下の岩石の破壊については、Drucker-Prager の条件よりも Murrell の条件の方がより適合性を有するものと考えられる。

5. 結 言

本研究では、岩石の破壊強度に及ぼす中間主応力の影響を明らかにするために、来待砂岩および荻野凝灰岩を対象にして真三軸圧縮試験を行い、その定量的な検討を行った。さらに、多軸応力下における岩石の破壊条件を明らかにするために、真三軸圧縮試験結果に加えて、二軸圧縮試験ならびに圧縮-引張試験結果を用いて、拡張 von Mises 形式の破壊規準による破壊条件の適合性を検討した。得られた結果を要約すると次の通りである。

1) 種々組み合わせ真三軸圧縮応力下における岩石の破壊限界線は、いずれの最小主応力下においても、最大主応力(破壊強度)は初め中間主応力の増加に伴って増大していくが、極値を示した後は低下していき、最終的に $\sigma_1 = \sigma_2$ の線上に収束する。中間主応力の増大とともに破壊強度が増大していく傾向は、明らかに破壊強度に中間主応力が関与することを示すものである。

2) Lode のパラメータ λ および三次元に拡張した Mohr-Coulomb の破壊規準より破壊強度に及ぼす中間主応力の影響の度合を定量的に検討したところ、最小主応力が $20\sim 60 \text{ kg/cm}^2$ の範囲においては、影響しない場合

を 0 として来待砂岩では $0.63\sim 0.83$ 、荻野凝灰岩では $0.48\sim 0.52$ となった。また、岩石の相違によりこの度合に差異が認められたが、これには内部摩擦が関係しているものと思われる。

3) 圧縮応力場における岩石の破壊条件は、中間主応力を考慮した拡張 von Mises 形式の Drucker-Prager および Murrell の破壊規準に比較的良好に対応するが、実際の岩石物性から詳細に検討してみると、引張応力を含む多軸応力下の破壊条件については、Drucker-Prager の条件よりも Murrell の条件に比較的良好な適合性が認められた。

終わりに、本研究を遂行するにあたり終始懇切なるご指導を賜った故小林良二先生に深甚なる謝意を表するとともに、実験に協力された岩手大学工学部資源開発工学科阿部正良技官に感謝申し上げる。また、本研究は文部省科学研究費によりその一部が行なわれたことを付記し、ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) von Karman (1911): Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck, Z. Verein Deut. Ingr., Vol. 55, pp. 1749~1757
- 2) R. Boker (1915): Die Mechanik der bleibenden Formänderung in kristallinisch aufgebauten Körpern, Ver. dt. Ing. Mitt. Forsch., Vol. 75, pp. 1~51
- 3) D. T. Griggs (1936): Deformation of rocks under high confining pressures, J. Geol., Vol. 44, No. 5, pp. 541~577
- 4) 茂木清夫 (1968): 岩石破壊における組合せ応力の影響, 材料, Vol. 17, No. 181, pp. 882~887
- 5) D. W. Hobbs (1962): The strength of coal under biaxial compression, Coll. Eng., Vol. 39, pp. 285~290
- 6) K. Mogi (1967): Effect of the intermediate principal stress on rock failure, J. Geophys. Res., Vol. 72, No. 201, pp. 5117~5131
- 7) 岡島達雄 (1971): 複合応力(圧縮・ねじり, 引張・ねじり)を受けるコンクリートの破壊条件, 日本建築学会論文報告集, No. 182, pp. 1~7
- 8) 佐藤和郎 (1973): 均等な二軸応力を受けるぜい性材料の破壊, 日本機械学会論文集(第1部), Vol. 39, No. 320, pp. 1096~1103
- 9) Jean-Claude Maso and Jacques Lerau (1980): Mechanical behaviour of Darney sandstone in biaxial compression, Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 17, pp. 109~115
- 10) 小林良二, 古住光正 (1981): 岩石の二軸試験——圧縮-圧縮, 圧縮-引張組合せ応力下における平板試験片の力学的挙動——日本鉱業会誌, Vol. 97, No. 1116, pp. 77~82

- 11) 丹羽義次, 小林昭一, 平島健一 (1966): 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. 320, pp. 108~114
- 12) J. P. M. Hojem and N. G. W. Cook (1968): The design and construction of a triaxial and polyaxial cell for testing rock specimen, S. African Mech. Eng., Vol. 18, No. 2, pp. 57~61
- 13) Z. T. Bieniawski, H. G. Denkhaus and U. W. Vogler (1969): Failure of fractured rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 6, No. 3, pp. 323~341
- 14) K. Mogi (1971): Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, J. Geophys. Res., Vol. 76, No. 5, pp. 1255~1269
- 15) K. Mogi (1971): Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone, Tectonophysics, Vol. 11, No. 2, pp. 111~127
- 16) 萩野正二, 水田義明, 浦野洋三 (1979): ぜい性材料の破壊応力条件について, 日本鉱業会誌, Vol. 95, No. 1102, pp. 843~849
- 17) 下谷高瀧, 山富二郎, 山口梅太郎 (1980): 多軸応力下における大理石の強度破壊について——eigen ひずみ法による空洞周辺の三次元応力解析——, 日本鉱業会誌, Vol. 96, No. 1110, pp. 529~533
- 18) 高橋 学, 小出 仁, 木下重教 (1983): 堆積岩の真三軸圧縮応力下における強度特性と中間主応力による脆性化について, 応用地質, Vol. 24, No. 4, pp. 150~157
- 19) 前掲 10)
- 20) 前掲 13)
- 21) S. Serata, S. Sakurai and T. Adachi (1972): Theory of aggregate rock behavior based on absolute three-dimensional testing (ATT) of rock salt, Basic and applied rock mechanics, Soc. Min. Eng. ASME, pp. 431~473
- 22) 前掲 16)
- 23) 赤井浩一 (1970): 多軸応力下における等方性および異方性岩石の破壊曲面について, 材料, Vol. 20, No. 209, pp. 16~22
- 24) A. W. Bishop (1966): The strength of soils as engineering materials, Geotechnique, Vol. 16, No. 2, pp. 91~103
- 25) 赤井浩一, 森 寛昭 (1967): 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, 土木学会論文集, Vol. 147, pp. 11~24
- 26) 前掲 10)
- 27) A. Nadai (1950): Theory of flow and fracture of solids, Vol. 1, McGraw-Hill, pp. 176~178
- 28) D. C. Drucker and W. Prager (1952): Soil mechanics and plastic analysis of limit design, Q App. Math., Vol. 10, No. 2, pp. 157~165
- 29) S. A. F. Murrell (1963): Criterion for brittle fracture of rocks and concrete under triaxial stress, and the effect of pore pressure on the criterion, rock mechanics (edited by I. Fairhurst), Pergamon Press, pp. 563~577

(昭和 60 年 12 月 3 日受付, 昭和 61 年 2 月 7 日受理)