



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	封圧下における岩石の力学的挙動に関する実験的研究（そのI）：実験装置および実験結果
Author(s)	木下, 重教; Kinoshita, Shigenori; 山下, 秀 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 76, 1-10
Issue Date	1975-08-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41299
Type	departmental bulletin paper
File Information	76_1-10.pdf



封圧下における岩石の力学的 挙動に関する実験的研究 (その1)

— 実験装置および実験結果 —

木下重教* 山下 秀** 石島洋二*

中村 章* 西原彰夫*

(昭和49年12月25日受理)

An Experimental Study of the Mechanical Behavior of Rocks under Confining Pressure (Part I)

—Triaxial Testing Apparatus and Experimental Results—

Shigenori KINOSHITA Shigeru YAMASHITA Yōji ISHIJIMA
Akira NAKAMURA Akio NISHIHARA

(Received December 25, 1974)

Abstract

A series of triaxial compression experiments were performed to investigate the effect of combined stresses on the strength and deformation characteristics of dry rocks at room temperature and at various confining pressures up to 1500 kg/cm². Most rocks used in this experimental study were coal measure rocks from some collieries in Hokkaido.

In the Part I of this paper, the triaxial testing apparatus employed in the present study and the experimental results were described. The stress-strain curves for each rock sample were shown in Fig. 4-1~Fig. 4-12.

On the basis of the stress-strain curves, fracture or yield strength, residual strength, and deformation characteristics were determined for each rock sample under different confining pressures.

1. 緒 言

石狩炭田の諸炭鉱の採掘現場は、年々深部に移行し、現在最も深いところは、坑口水準下948 mにも達している。

このような切羽の深部化に伴い、多くの炭鉱は運搬距離の増加、坑内温度の上昇、盤圧・ガス圧の増大など、生産および保安上真剣に対処すべき多くの問題をかかえるに至っている。

これらの諸問題のうち運搬距離の増加、坑内温度の上昇等は、あらかじめ予測することができ、現在の技術によって、ある程度までは対策が立てられる問題である。

これに対して盤圧の問題は、量的な予測がむずかしいうえに、盤圧挙動そのものが、地質構

* 北海道大学工学部資源開発工学科岩石力学教室

** 秋田大学鉱山学部採鉱科

造や深度に関係して質的に変化するので、単に従来の経験や知識の延長によって対処できるとは限らないのである。

すなわち、盤圧に対しては、岩盤の力学的挙動についての調査・研究を積重ね、より科学的な資料に基づいて対処することが必要なのである。

北海道諸炭鉱の夾炭層岩石については、いままで数多くの試験や研究がなされているが、その大部分は稼行性 (Workability) を対象にしたもので、単なる強度の比較や、一軸応力状態における脆性挙動に重点を置いたものであった。したがって、深部における岩盤の盤圧挙動を目的とした三軸圧縮試験のようなものは至って少く、これが現在深部における盤圧問題を考える場合の隘路の1つになっている。

幸い当研究室では、1972年に特別研究設備費の供与を受け、封圧最高2000 kg/cm²の三軸圧縮試験装置を設置することができた。爾来今日まで、主として北海道の炭鉱の夾炭層岩石を対象に一連の三軸圧縮試験を行ってきた。これらが直ちに炭鉱が当面している地圧問題の解決に役立つとは思わないが、従来あまり省りみられなかった夾炭層岩石の封圧下における挙動や、封圧の増加に伴う脆性一塑性の遷移過程など、盤圧問題解明の基礎となる資料が得られたので、ここにその一部を報告し、おおかたの批判を仰ぐとともに、特別研究設備費の供与を受けたことに対する義務の一端を果たしたいと思う次第である。

2. 供 試 岩 石

本報告における供試岩石は、幌内砂岩・芦別砂岩・朝日砂岩・夕張頁岩・小平泥岩、荻野凝灰岩および秋吉大理石の7種である。何れも大きなブロックとして入手し、これらのブロックから、実験室においてボーリングによりコアを採取して試験片を作製した。

試験片は、直径30 mm、縦横比2の円柱で、側面および端面はグラインダとカーボランダム(600 #)で研磨し、平行度±1/50 mm以下に保つように仕上げた。

整形の終了した供試体はすべて110°C、24時間の炉乾燥を行なった後試験に供するまでの間デシケータ内に保管した。特に三軸圧縮用の供試体は、炉乾燥後、側面に、エンドピースを含め

表2・1 供 試 岩 石

記 号	名 称	試 料 採 取 場 所
A-SS-1 A-SS-2	幌内粗粒砂岩	幌内炭鉱
B-SS-1 B-SS-2 B-SS-3	芦別中粒砂岩 芦別粗粒砂岩	三井芦別炭鉱2坑-410 m 入気昇
C-SS-1 C-SS-1'	朝日粗粒砂岩	朝日炭鉱坑内立入 (新第三紀滝の上層)
A-sh-1	幌内頁岩	北炭新坑ベルト斜坑
A-mud-1	小平泥岩	留萌郡小平町字達布滝下地区 (上部エソ層群白亜紀層)
A-tuff-1	荻野凝灰岩	福島県高郷村採石所
A-lime-1 A-lime-2	秋吉大理石 (粗粒) 秋吉大理石 (細粒)	山口県美禰市採石所

表 2・2 供試岩石の物理・機械的性質

	Tensile strength (T_0) (kg/cm ²)	Uniaxial com- pressive strength (C_0) (kg/cm ²)	Specific gravity (ρ_t)	Porosity (ϕ) (%)
A-SS-1	33	440	2.62	11.1
A-SS-2	36	680	2.66	12.8
B-SS-1	58	1090	2.68	6.4
B-SS-2	40	950	2.69	6.9
B-SS-3	38	870	2.71	7.2
C-SS-1	31	1030	} 2.66	} 11.2
C-SS-1'	31	970		
A-sh-1	162	1100	2.71	8.5
A-mub-1	29	470	2.63	14.8
A-tuff-1	70	640	2.25	25.8
A-lime-1	33	580	2.72	0.88
A-lime-2	67	920	2.71	0.44

て、市販の生ゴムを数回にわたって塗布し、デシケータに入れた。これは三軸試験を行なう場合、封圧液が試験片内に浸透するのを防止するためである。

整理の都合上、岩石試料には記号を附すことにしたが、これらの記号は表 2・1 のごとくである。

なお参考までに、これらの岩石試料の単軸引張強度 (T_0 ただし圧裂試験法による)、単軸圧縮強度 (C_0)、真比重 (ρ_t) および間隙率 (ϕ) を表 2・2 に示す。

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

本研究に用いた三軸圧縮試験装置は、圧力容器、油圧制御装置、200 t プレスから構成される。Fig. 3・1 は圧力容器を、Fig. 3・2 は圧力容器内に供試体を収納する場合の供試体およびこれに取りつけられた変位測定用の付属装置を示す。

圧力容器は内径 90 mm、深さ 275 mm、肉厚 62 mm の円筒形の本体と上蓋からなる。上蓋

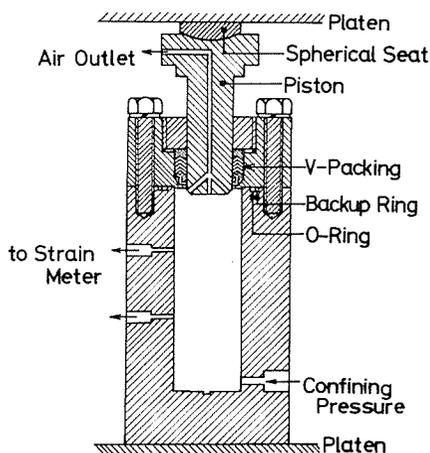
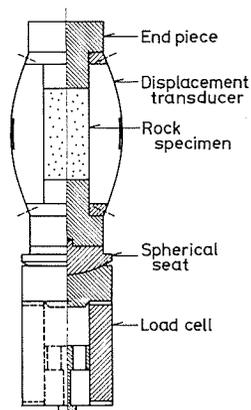
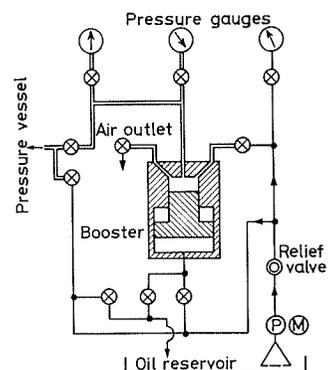


Fig. 3・1. 三軸圧縮試験用圧力容器

Fig. 3・2. 供試体の
変位測定装置Fig. 3・3. 三軸圧縮試験用
油圧制御装置

は供試体を容器内に挿入したのち、8本のボルトで本体に締め付けられる。上蓋にはVパッキンを介してピストンがあり、本体上端面には油の漏洩を防ぐためにOリングおよびバックアップリングが取り付けられている。また本体の側壁には、リード線の取出しや油注入のために10個の孔があげられている。

Fig. 3.3は封圧を付与するための油圧制御装置を示したもので、一次およびブースター回路をもっている。一次圧レンジは0~300 kg/cm²、2次圧(ブースター)レンジは0~2,000 kg/cm²である。ブースター回路の脱気を行なって一次圧回路を閉鎖すると、あとはリリーフ・バルブを操作するだけで任意の二次圧力をうけることができる。

このようにして所定の封圧を圧力容器に供給した後、プレスで上蓋のピストンを加圧し、三軸圧縮試験が行なわれる。

3.2 実験方法

供試体を収納した圧力容器を200 tプレスの下部プラテン上に置き、プレスを運転して、ひとまず上部プラテンと圧力容器のピストンを軽く接触させる。プラテン間の相対変位を大まかに監視するためにダイヤルゲージを設置する。油圧制御装置の二次回路を閉鎖し、一次回路のみを用いて圧力容器内に油を満たし、かつ、脱気する。この時点では、まだピストンと供試体の上部エンドピースとは接触していない。つぎに測定用ひずみ計の調整を行ない、X-Yレコーダおよびダイヤルゲージの動きを監視しながら、ピストンを押しエンドピースと接触させる。ここでダイヤルゲージの零点調整を行なう。

油圧制御装置のブースター回路を使って所定の封圧を加える。この場合封圧によってピストンが押し上げられ、エンドピースから離れるので、プレスで再びピストンを押し、エンドピースと接触させる。接触したかどうかはダイヤルゲージの動きをみているとわかる。この時点で、設定封圧およびひずみ計の再調整を行ない、実験準備が完了する。あとはプレスによって軸方向から加圧し試料を破壊させるだけである。

供試体が破壊した後は、プレスの油圧を若干解放し、ピストンとエンドピースとの間隔を充分確保してから、封圧を大気圧まで減圧し、つづいてプレスの油圧を完全に解放する。

なお、本実験における荷重速度は大凡300 kg/cm²/minの一定値に保持するよう留意した。また圧力容器の容量は充分大きいので、ピストンの進入による封圧変化は無視できる程小さい。

3.3 本試験における試料の載荷経路

前記実験方法から明らかなように、本装置で供試体に与える応力場は、静水圧と一軸圧縮応力を重ね合せて得られる応力場であって、常に $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 (= \text{封圧}) > 0$ の主応力関係が成立する。Fig. 3.4は本試験において試料に付与される応力径路を主応力空間で表示したものであり、B点が封圧 P_c の場合に最初に試料にあたえられる静水圧状態を示し、BCが静水圧状態から、破壊に至るまでの軸圧増加の径路を示す。封圧が異るとき、それぞれの封圧に応じ、OB'C'およびOB''C''の径路となることはいうまでもない。

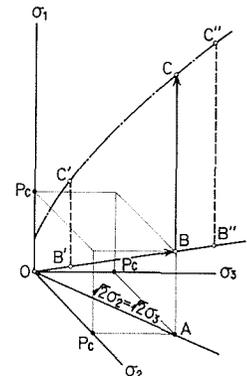


Fig. 3.4. 三軸圧縮試験における試料の載荷経路

4. 実験結果

4.1 差応力一軸ひずみ線図

各岩石試料について、本実験でえられた、差応力一軸ひずみ曲線を示すと Fig. 4.1~Fig. 4.12のごとくである。図中の数値は封圧

[kg/cm²] をあらわしており、数値が 0 の曲線は一軸圧縮試験の結果である。

4.2 封圧下における岩石の変形挙動

上記差応力一軸ひずみ線図をみると、封圧の増加と共に破壊または降伏点が上昇する点は共通しているが、曲線の形は岩種によって、また封圧によってさまざまな形状を呈している。

弾性変形部分は 2~3 の例 (泥岩, 凝灰岩) を除けばほぼ直線的であるので、この部分を除き、主として変曲点 (破壊または降伏点) 以後の曲線の形状から、変形特性を分類してみると、Fig. 4.13 に示すようにつぎの 6 つのタイプに分けられるように思う。

(1) B タイプ あるひずみで差応力が最大値に達し、その後応力低下が、急激あるいは緩慢に生ずるもの。この応力の低下の様相から、つぎの 3 つのタイプに分けられる。

B_a: 最大差応力に達した後、急激に破壊がおり、破壊後の曲線が記録されないもの。主として単軸圧縮試験の場合にみられる。

B_b: 最大差応力に達した後の応力低下は明

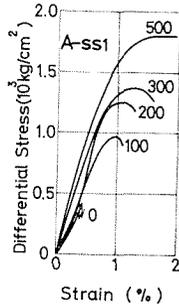


Fig. 4.1. 差応力一ひずみ曲線 (幌内砂岩)

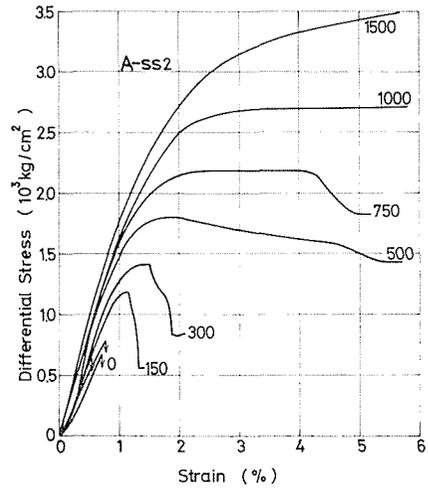


Fig. 4.2. 差応力一ひずみ曲線 (幌内砂岩)

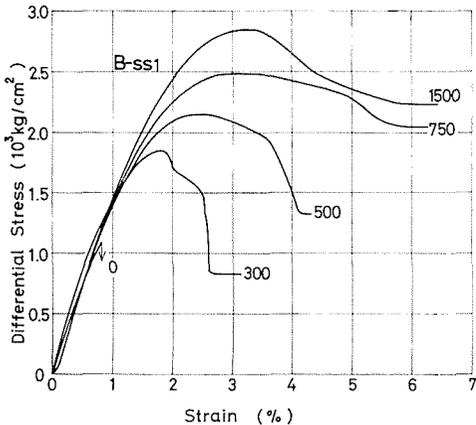


Fig. 4.3. 差応力一ひずみ曲線 (芦別中粒砂岩)

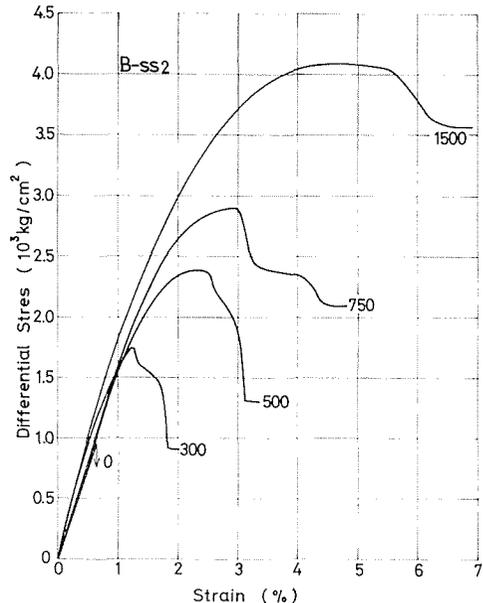


Fig. 4.4. 差応力一ひずみ曲線 (芦別中粒砂岩)

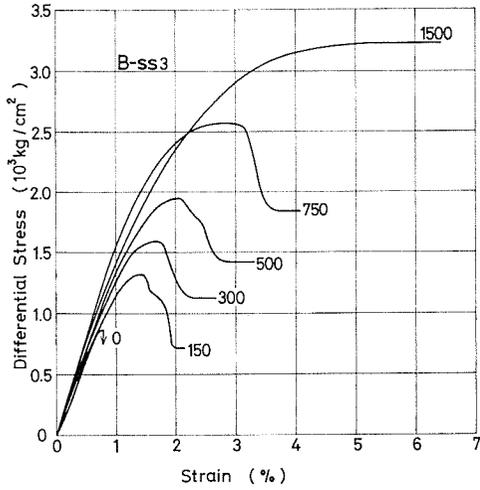


Fig. 4.5. 差応力-ひずみ曲線 (芦別粗粒砂岩)

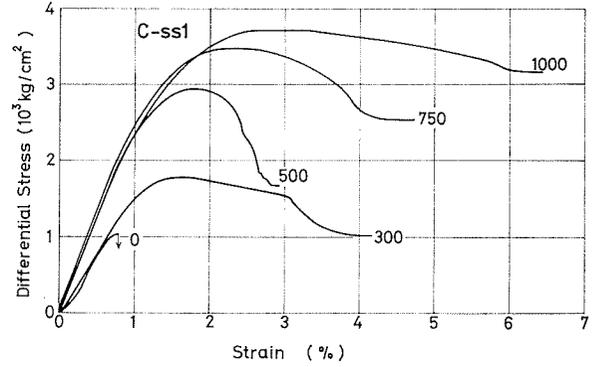


Fig. 4.6. 差応力-ひずみ曲線 (朝日粗粒砂岩)

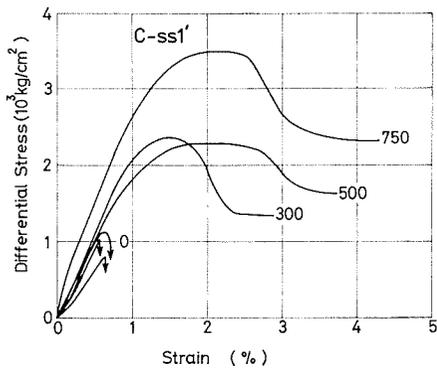


Fig. 4.7. 差応力-ひずみ曲線 (朝日粗粒砂岩)

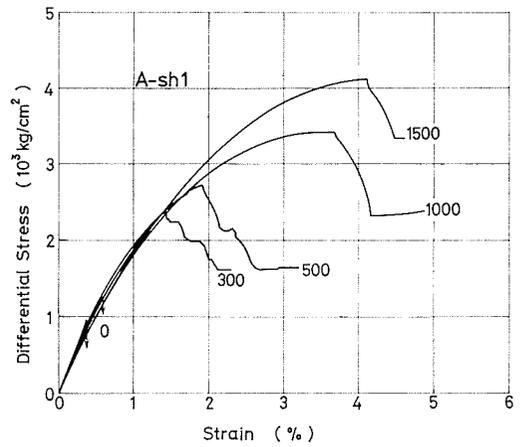


Fig. 4.8. 差応力-ひずみ曲線 (夕張頁岩)

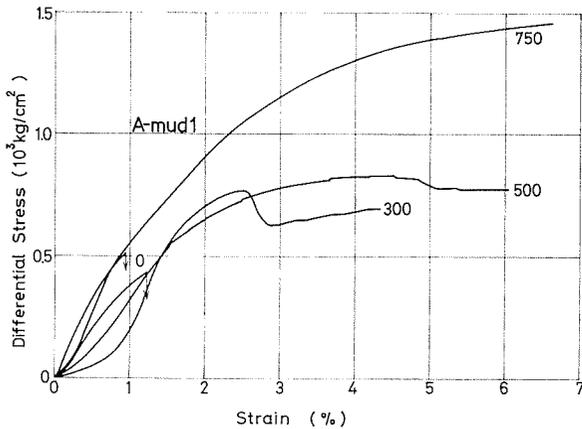


Fig. 4.9. 差応力-ひずみ曲線 (小平泥岩)

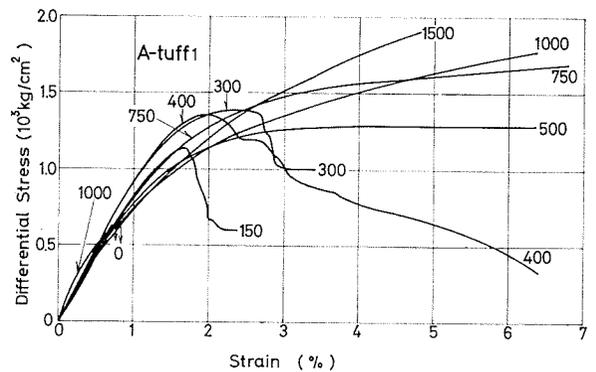


Fig. 4.10. 差応力-ひずみ曲線 (荻野凝灰岩)

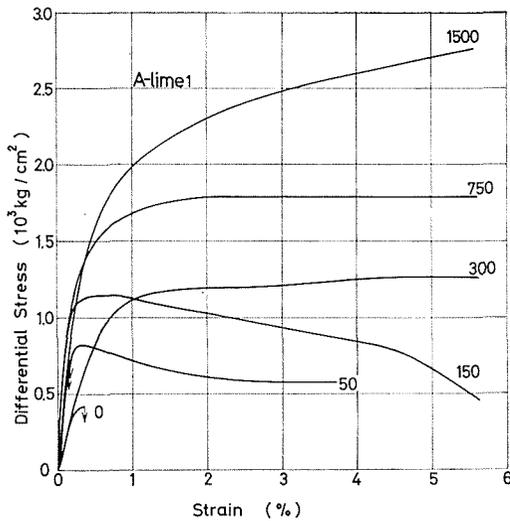


Fig. 4-11. 差応力-ひずみ曲線 (秋吉粗粒大理石)

際に生ずるが、その後はひずみの増加と共に一定差応力を保つもの。

B_c: 応力低下の起き方が緩慢で且つ継続的であるもの。

(2) Tタイプ 応力低下は全くなく、最大差応力に達した後は、そのままの応力レベルで軸変位が進行するもの。これは、いわゆる理想的な延性変形挙動に該当する。

(3) Dタイプ 差応力が軸ひずみの進行と共に曲線をなして漸増してゆくもので、加工硬化 (workhardening) あるいはひずみ硬化を伴う延性変形挙動に該当する。これはさらに、つぎの2つのタイプに分けられる。

D_a: 変曲点までは弾性変形を示し、変曲点以後において上記の曲線形状をとるもの。

D_b: 最初の静水圧の状態以降降伏を起こし、軸応力を加えた段階から、すでに上記の非弾性挙動を示すもの。

これらの変形挙動を供試岩石別にみてもつぎのごとくである。

一般に砂岩はB、特にB_bの挙動をとるものが多いが、中には封圧1000~1500 kg/cm²でTおよびD_aの挙動に移行したものもあった。

頁岩は砂岩と同様、B_bの挙動を示すが、砂岩と比較すると、応力低下が鋭く生ずる点に特徴がみられる。また1500 kg/cm²までの封圧で、TまたはDの挙動を示した例はなかった。

泥岩は封圧0および300 kg/cm²でそれぞれ、B_aおよびB_bの挙動を示し、500 kg/cm²以上ではD_bの挙動を示した。

萩野凝灰岩は封圧500 kg/cm²以下ではB_bの挙動を、これ以上の封圧では、TおよびD_aの挙動に移行する。

大理石は、封圧150~300 kg/cm²以下ではB_cの挙動を、これ以上の封圧ではTおよびD_aの挙動を示す。

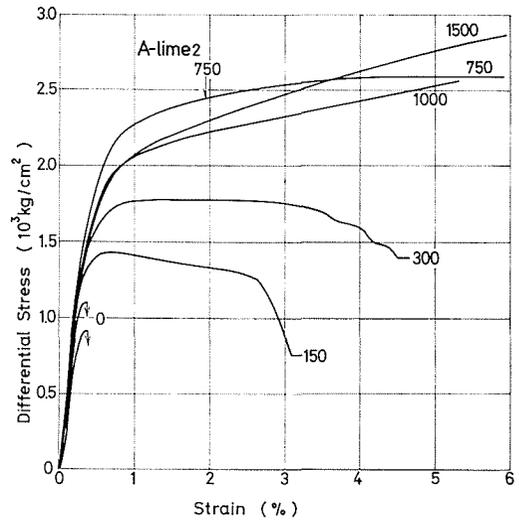


Fig. 4-12. 差応力-ひずみ曲線 (秋吉細粒大理石)

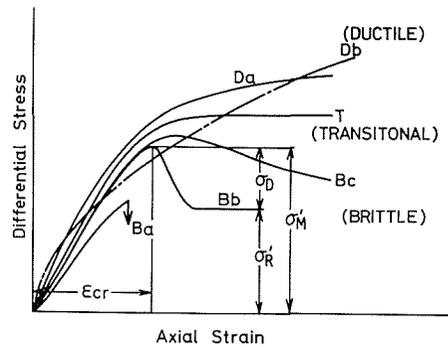


Fig. 4-13. 差応力-軸ひずみ線図の分類

また各変形の挙動の特徴を試験片の破壊状況からみると、B 挙動をとった試験片はすべて斜めの単一剪断面が形成されていて、この面でずり破壊が起きたことを示している。B 挙動の差応力-軸ひずみ曲線における応力低下現象は、このずり破壊によって岩石が部分的に強度（凝集抵抗）を失うために生じたものと考えられる。

これに対して T および D の挙動をとった試験片は、単一剪断面の発生はないが、その代りに多数の微細なすべり線が1つの方向に平行に、あるいは互いに交叉して試料の表面に群集して生ずるのがみられる。しかもこの場合の試料の内部は、部分的または全面的に粉化していて、一種の塑性流動状態を呈していることがわかる。

4.3 各封圧における岩石の破壊または降伏強度

変形曲線が B に属する場合、その曲線上の応力低下がおきる直前の最大差応力は、その封圧における供試岩石の破壊強度をあらわすものと定義して差支えないであろう。もちろん同じ B 挙動でも、弾性変曲後破壊に至るまでの過程は、 B_a , B_b , B_c によって異なり、 $B_a \cdot B_b$ は変曲後すぐ破壊するという点で典型的な脆性破壊挙動であるのに対して、 B_c は変曲後ある流動区間を経て破壊することから延性流動破壊である。したがって同じようにして定義された破壊強度であっても $B_a \cdot B_b$ と B_c とでは内容にちがいがあつたことをあらかじめ断っておきたい。

変形曲線が T, D に属する場合は、B と同じ意味での破壊強度を定義することはできない。この場合は降伏強度とか延性度などの物理量を定義して変形の特徴づける以外に適切な方法がない。しかし何れの物理量をとるにしても、T の場合は曲線が水平に変曲する点で変形の特徴を代表させることができるが、D の場合は変形曲線が常に上昇しており、代表点を定義することはむづかしい。

一般に D の変形挙動の場合の降伏点の求め方については、いろいろの方法が提案されているが、文献上からその主なものを拾ってみるとつぎのごとくである。

(1) E. C. Robertson (1955) の方法¹⁾ 降伏以前の差応力-軸ひずみ曲線が直線性を失う上限の差応力、すなわち比例限界を以て降伏点とする。

(2) Lode の外挿法²⁾ Fig. 4-14 に示すように、変形曲線の降伏前後の直線部分を延長し、その交点の差応力を以て降伏点とする。

(3) 差応力-軸ひずみ曲線から直接求める方法³⁾ これは変形曲線に明瞭に変曲点が見られる場合に限られる。

(4) 軸ひずみ値を指定する方法⁴⁾ 軸ひずみを 1, 2, 3, 5%, あるいは 10% 等の一定値に指定し、この指定ひずみに対応する延性変形曲線上の差応力を以て降伏点とする。

(5) 塑性ひずみを指定する方法⁵⁾ 載荷・除荷の繰返し試験を行なって弾性ひずみと塑性ひずみを分離し、塑性ひずみが指定された値に達した時の除荷点の差応力を以て降伏点とする。

(6) オフセットひずみ法⁶⁾ 延性変形部分における除荷線図は直線で且つその勾配が、弾性変形部分の勾配に等しいということが前提になっている。指定された軸ひずみから、弾性変形直線に平行線をひき、変形曲線との交点を求め、この点の差応力を以て降伏点とする。

(7) 変形曲線の接線の傾きから降伏点を見出す

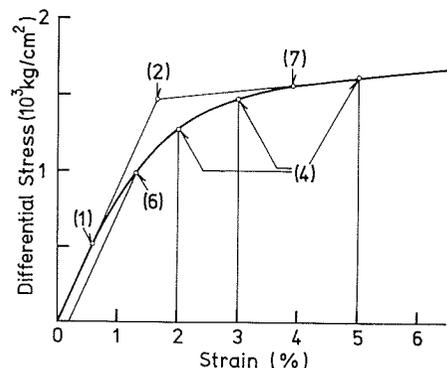


Fig. 4-14. Lode の外挿法

表4・1 実験結果の総括

Rock Samples	Confining pressure	Strength	Residual strength	Modulus of deformation	Critical strain	Fracture angle	Deformation Characteristics
	P (kg/cm ²)	σ_M (kg/cm ²)	σ_R (kg/cm ²)	E (10 ⁵ kg/cm ²)	ε_{cr} (%)	θ (°)	
A-SS-1	0	440		1.06	0.42	30	B
	100	980		1.25	0.90	29	B
	200	1260		1.53	0.98	30	B
	300	1370		1.65	1.15	35	B
	500	1800		1.80	1.62		T
A-SS-2	0	680		1.07	0.68	36	B _a
	150	1160	550	1.07	1.16	27	B _b
	300	1410	830	1.42	1.35	36	B _b
	500	1800	1430	1.57	1.73	36	B _b
	750	2180	1830	1.67	2.19	37	B _b
	1000	2650		1.70	3.35	35	T
B-SS-1	0	1090		1.50	0.83	27	B _a
	300	1850	820	1.15	1.77	29	B _b
	500	2150	1330	1.38	2.31	36	B _b
	750	2490	2050	1.28	2.88	38	B _b
	1500	2850	2240	1.68	3.11	39	B _b
B-SS-2	0	950		1.52	0.64	23	B _a
	300	1750	910	1.25	1.22	26	B _b
	500	2400	1310	1.58	2.24	29	B _b
	750	2890	2090	1.62	2.79	34	B _b
B-SS-3	0	870		1.30	0.71	33	B _a
	150	1320	710	1.18	1.40	38	B _b
	300	1610	1110	1.20	1.56	33	B _b
	500	1940	1410	1.26	1.99	33	B _b
	750	2560	1820	1.56	2.68	35	B _b
C-SS-1	0	1040		1.48	0.77	30	B _a
	300	1770	1010	1.64	1.57	35	B _b
	500	2920	1670	2.51	1.71	35	B _b
	750	3460	2520	2.56	2.20	34	B _b
	1000	3710	3160	2.40	2.62	36	B _b
C-SS-1'	0	970		1.69	0.62	23	B _a
	300	2340	1330	2.33	1.47	36	B _b
	500	2280	1630	2.02	1.85	36	B _b
	750	3480	2310	2.48	2.03	32	B _b
A-sh-1	0	1100		2.25	0.47	—	B _a
	300	2370	1620	2.00	1.42	26	B _b
	500	2710	1620	2.12	1.91	27	B _b
	1000	3400	2300	1.82	3.68	27	B _b
	1500	4110	3330	1.88	4.11	29	B _b
A-mud-1	0	470		0.53	1.09	23	B _a
	300	770	630	0.37	2.48	35	B _b
	500	830		0.42	4.20	40	T
	750	1050		0.58	2.52	36	D _a
A-tuff-1	0	640		0.86	0.80	17	B _a
	150	1140	600	0.88	1.63	24	B _b
	300	1390	1010	0.96	2.35	34	B _b
	400	1360	1200	0.98	2.04	35	B _b
	500	1290		0.92	3.78		T
	750	1560		0.98	3.82		D _a
	1000	1320		1.24	2.80		D _b
A-lime-1	0	580		4.44	0.19	27	B _a
	50	820	580	4.00	0.35	34	B _b
	150	1140		7.80	0.53	36	B _c
	300	1260		1.78	1.70	35	T
	750	1790		6.30	2.08		T
A-lime-2	0	920		3.00	0.42		B _a
	150	1420	750	4.75	0.64	30	B _b
	300	1770	1390	5.60	1.42	34	B _c
	750	2430		5.66	1.88	36	D _a
	1000	2280		5.65	2.55	40	D _a
	1500	2380		4.45	2.48		D _b

表 4・2 指定軸ひずみに対する差応力

Rock samples	Confining pressure (kg/cm ²)	Differential stress at the prescribed strain (kg/cm ²)		
		2%	3%	5%
A-SS-2	1500	2710	3160	3430
A-mud-1	750	900	1150	1370
	750	1280	1480	1610
A-tuff-1	1000	1160	1350	1650
	1500	1200	1510	1940
A-lime-1	1500	2290	2470	2700
	750	2440	2530	2590
A-lime-2	1000	2220	2320	2520
	1500	2290	2470	2760

方法⁷⁾ 変曲点附近およびそれ以後の曲線上の各点における接線の傾き、 $\partial(\sigma_1 - \sigma_3)/\partial\varepsilon$ を求め、これがほぼ一定値に達した点の差応力を以て降伏点とする。曲線の接線の傾きが一定になるということは、変形がこの点で直線に移行することを意味する。したがってこの方法は曲線がほぼ線型をなすと考えられているひずみ硬化部分への推移点を降伏点として求めていることになる。

(8) その他 以上の方法のほかに、差応力-ポアソン比線図から降伏点を定義する方法 (Serata ほか, 1972)⁸⁾、および差応力-体積ひずみ線図と差応力-弾性波速度曲線を比較して降伏点を検討した例 (堀部ほか, 1972, 1973)⁹⁾ もある。

本研究では上記諸方法を検討した結果、(4)と(7)の方法でDタイプの降伏点を求めることにした。なお(4)法における指定軸ひずみは、2%、3%、5%とした。

さて表 4・1 の σ_M の値は、以上のようにして求めた供試岩石の各封圧における破壊強度 (B タイプ) および(7)法で求めた降伏強度 (T・D タイプ) を示す。また表 4・2 は(4)法で求めた3つの指定軸ひずみに対する差応力を示す。

表 4・1 には、このほかに破壊強度および降伏点における軸ひずみ (限界ひずみ ε_{cr}) をはじめ、B 挙動の特徴を示す残留強度 (σ_R) および破断角 (θ) の実測値も併記しておいた。

さらに参考までに、弾性部分の弾性変形係数 (E) を求め表 4・1 に示した。弾性変形部分の差応力-ひずみ曲線は必ずしも直線近似ができない場合もあるが、このような場合は、変形の初期の段階から上向に凸な形状をなすものは、原点におけるこの曲線の接線の勾配から、また初期の段階では下向に凸で、降伏点近くなって上向に凸になる、いわゆる S 字曲線をなすものは、原点から上部の湾曲部に接線をひき、その勾配から算出した。

5. 結 言

以上7種の岩石を供試体に行なった三軸圧縮試験の三軸圧縮試験装置および試験結果について述べたが、実験結果に関する検討および結論は第2報において行なうことにする。なお文献についても第2報に一括掲載したので御了承されたい。