

岩石における真三軸試験法について

高橋 学・小出 仁(環境地質部)・星野 一 男(燃料部)
Manabu TAKAHASHI・Hitoshi KOIDE Kazuo HOSHINO

1. なぜ、岩石の三軸試験が必要か？

水中に没している物体が周囲の水から圧力を受けることは良く知られている。この水圧は水深が増すと共に大きくなり いま仮に水深を h (m) とすれば 水圧 P (MPa) は

$$P(\text{MPa}) = \rho gh / 100 = h / 100$$

(ここで ρ は水の比重 g は重力加速度を示す) となる。言い換えれば 任意の深さにおける点には直上に乗っている水の重量分の水圧がかかることになる。水の様な流体の場合は 水圧がかかることは理解しやすいが 固体である地殻の深部の場合にはどうであろうか？

地下の場合にも 上に乗っている岩石の荷重はすべて下の岩石によって順次支えられている。したがって鉛直方向には 平均すれば 上に乗っている岩石の重さと量(すなわち 単位面積当りで考えれば深さ)に応じた圧力が加わる。鉛直方向の応力を σh とすれば

$$\sigma h(\text{MPa}) = \rho gh / 100$$

(ここで ρ は岩石の比重 h は 地下深さを示す) となる。しかし 地殻の場合は水平方向の応力は必ずしも鉛直方向と同じではない。水平方向の応力がどのくらいになるかは 従来議論があったが 最近応力の実測結果が蓄積されてくると 鉛直方向よりむしろ大きい場合もあることがわかってきた(小出 1976)。地殻応力を測定する技術が確立するにつれ 測定事例の集積が世界的規模でなされているが 地下に存在する岩盤に作用している応力 すなわち 地殻応力は一般には3つの主応力が異なる3次元状態を呈している事が明かとなった。このような状態に置かれた地下岩盤内に坑道や切羽 あるいはトンネルや地下発電所 石油地下備蓄用空洞などの地下構築物を作れば その周囲岩盤にはより複雑な3次元応力状態が誘起されるであろう。

地下における温度と3次元応力状態下に置かれた岩盤の変形・破壊挙動を完全に理解し または予測するためには 多方面からの研究が必要であるが そのうちでも岩石試料を用い それに所定の応力を作用させ そのと

きの挙動を調べる いわゆる 岩石における三軸試験はこれらの研究の基礎をなすものである。更に 三軸試験の目的は地震予知研究の基礎として 岩石破壊現象の解明と破壊に伴うダイレータンス現象や弾性波速度の変化の研究にも役立てられる。また 地下深部の炭鉱等の地圧現象による切羽・坑道等の地下空洞の変形・破壊の解明の基礎資料としての研究も含まれている。炭鉱でいう深部とは 地下約1,000mのオーダーであるから 応力集中を考慮しても 50 MPa 程度以下の最小応力が岩石に作用しているときの挙動を調べれば その目的はほぼ達することができるであろう。道路トンネルや鉄道トンネルや地下発電所もかぶりが約1,000mに達するものも建設されるようになってきている。しかし 地震の多くは数km~十数kmの深さで発生するので 地震研究のためには 10~数 100 MPa 程度の最小主応力が作用している場合を研究する必要があるが 高圧になると試験片サイズが小さくなり 歪測定等の各種測定も困難になる。

岩石供試体に作用させる応力は単軸応力(1方向のみの応力が加えられる)を初めとし 種々の組み合わせが考えられる。しかし 既述のように地下に存在する岩盤は三次元応力状態になっているわけであるから 3つの主応力が相異なる状態が最も実情に近く また 一般性を持っている。ところが 岩石供試体に様な相異なる3つの主応力を作用させる方法—真三軸試験法—は高度の技術を必要とし このために つい最近までこの種の試験は行なわれなかった。また 行ったとしても試験方法が不完全で 信頼度や再現性に乏しい結果しか得られないことが多かった。このため 封圧三軸試験と呼ばれる方法が発達した。封圧三軸試験は次節で説明するように 三つの主応力のうち二つは常に同じという制約があるので 三軸試験法としては完全とはいえないが 応力の加え方に無理がないために 三軸試験といえは通常は 封圧三軸試験を意味するまでに普及した。一方の三軸試験は茂木(1970)らによって最近ようやく盛んになりつつあるが データの蓄積は初まったばかりと言わざるを得ない。

岩石における三軸試験は3次元応力状態下での岩石の変形破壊特性とそれらの機構を明らかにすることを目的

として行われたものである。まず 封圧三軸試験の発達について略述し 次に真の三軸試験法について述べる。

2. 封圧三軸試験法の発達

地下に存在する岩石の力学的挙動を知るためには 地下と同一の環境下で すなわち 3つの主応力が作用した状態下で実験を行う必要がある。材料に3方向から応力が作用する場合には 一方向から作用する場合に比べ異なる挙動を示すことは十分考えられるからである。

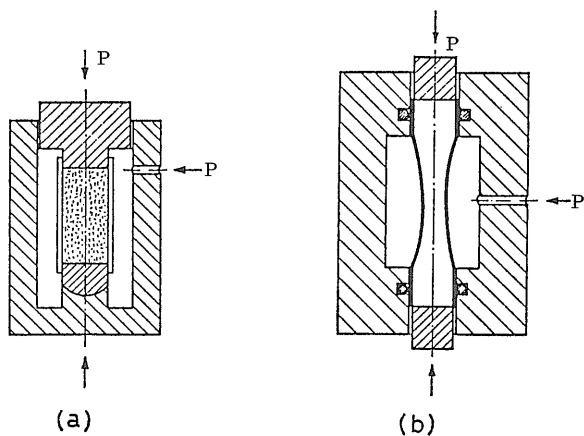
例えば 一般に材料はその横方向を拘束することにより 拘束しない場合よりも圧縮強度が高まり かつより大きな延性を示すことは 定性的にはあるが 既に19世紀にはわかっていた。このような性質に地質学者達は興味を示し 地殻やマントルを構成している岩石が横方向の拘束を受けて圧縮された場合 どのような挙動を示すかを実験的に確かめようとした。

この最初の試みは Becker (1893) によって行われたが これは岩石に組み合わせ応力を負荷させる実験 すなわち三軸実験の発祥といえる。次いで Adams and Nicolson (1901) は岩石試料を鋼鉄性の円筒に入れることで岩石の横方向を拘束しつつ 軸方向から圧縮する方法で破壊強度や延性の増加を確認しようとしたが 定性的な結果を得るに留まった。

本格的な高圧・変形実験は von Karman (1911) によって初めて行われた。すなわち 彼は今日 慣用三軸圧縮試験あるいは封圧試験と称せられている岩石の三軸試験方法を確立したのである。これは圧力容器内に置いた円柱状の供試体に油によって圧力(封圧)を加えて静水圧状態とし 次に固体圧のピストンによって 円柱の軸方向から載荷するという方法(図-1. (a)参照)である。また Boker (1915) は岩石を封圧下で引張る試験(いわゆる extension test 以後伸張試験と称する)方法(図-1. (b)参照)を開発した。

このような封圧下の試験では 軸方向以外はすべて同一圧力の液体で加圧されているので 軸方向以外の応力はすべて同一に保たれている。したがって 三方向の主応力のうち二方向は常に同じという特殊な応力条件しか実現できない。しかし 封圧試験法の開発によって地下における岩石の力学的性質に関する研究は初めて可能になる。

図-2は von Karman (1911) によって得られた実験結果の一部であるが 脆性的な岩石が封圧の増加に伴ない 延性的になり かつ必ずみ硬化係数も大きくなる傾向が認められる。Karman 型の圧力容器では 軸圧の増加に伴い 圧力容器内へのピストンの進入は増え続け

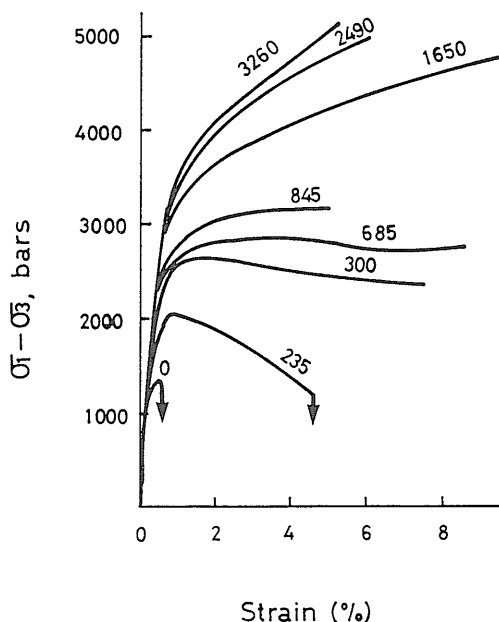


第1図 三軸試験装置

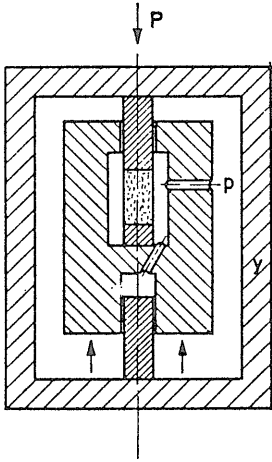
(a) 圧縮試験 ($P > p$)

(b) 伸張試験 ($P < p$)

従って初期の設定封圧は増加する。しかも 供試体の変形量が多い場合 ダイレタンスー (dilatancy) 現象による供試体の体積増加も無視できなくなるであろう。こうした圧力容器内の増圧現象を回避すべく Griggs (1936) は図-3に示される様な工夫をこらした。すなわち 圧力容器底部に上方ピストンと同径のピストンを組み込み 上方ピストンの容器内への進入は 下方ピストンの降下によって相殺し この方法により厳密には封圧一定とはならないが 封圧の急変はさげられ



第2図 種々な封圧下での Carrara 大理石の応力-歪曲線 (Von Karman (1911) より)



第3図
Griggs (1963)による高压
容器の概念図

ば一定封圧を得ることができる様になった。同様な装置は Paterson (1964) によっても考案されている。この装置により Solenhofen 石灰岩を供試岩石として最大10,000気圧までの封圧試験が行われた。ここに至り高封圧下での実験が可能となり岩石の封圧三軸実験はほぼ確立されたと言える。Griggs (1936) が封圧三軸実験で得た知見をまとめると次のようになる。

- 1) 封圧の増加は破壊強度を増加させる。
- 2) 脆性的な岩石でも 封圧の増加と共に延性的な挙動を示す。
- 3) 封圧の増加は延性を増加させる。

この封圧試験法の欠点は圧力媒体として流体を用いるため高強度の耐圧容器が必要になり内部の岩石試料のサイズに比べて試験装置が極めて大きくなることである。さらに圧力容器と可動ピストンの間の摩擦によって実験精度が著しく損なわれることがある。これらの問題は超高圧を実現しようとする時にきわめて大きな障害になる。しかし材料の進歩と経験の蓄積によってこれらは宿命的問題として残ってはいるものかなり克服されてきた。また封圧の一定維持と軸方向応力の定むずみ速度載荷を目的にサーボ制御機構が使われるなど幾つか改良が加えられ現在では完成度の高い試験方法となっている。

日本においても1950年代末から1960年代にかけて封圧三軸試験が導入され主として鉱山・地震・構造地質関係の研究者によって岩石の三軸試験が行われた(堀部・小林 1958; 松島 1959; 林他 1963; 西原・平松 1964; 茂木 1964; 星野 1966a; 小出・星野 1967; 星野他 1970; 木下他 1975a・b)。たとえば構造地質関係では地質調査所で星野 (1966b) が本格的な岩石変形用三軸試験機を制作した。この三軸試験機は米国の Griggin

らのグループによって開発されてきたタイプのもので実験精度や操作性はるかに改善されほぼ十分な精度を持った多数の実験データが出せるようになった。封圧三軸試験機はその後もサーボ制御機構やダミーピストンの採用等若干の改良がされているが基本構造はほぼこの形式が踏襲されている。

封圧試験法が多数の研究者によって使われデータの集積が進むにつれ岩石強度に関し封圧効果と称せられる特性すなわち岩石強度の最小主応力依存性について共通の認識が持たれるようになったわけである。日本産岩石についても封圧三軸試験のデータはかなり蓄積されている(Hoshino et al 1972; 小出他 1971)。

地下深部では圧力の他に温度も高くなることが知られている。高温下では岩石の力学的特性が大きく変わるので高温下の三軸試験が重要になる。また変形速度や試験片サイズによる影響も無視しえない。さらに地下では岩石中の空隙に存在する流体(多くの場合地下水)の影響が大変重要である。このような多様な条件にあわせてさまざまな試験装置や試験法が考案されてきた。例えば超高温超高圧の試験機や大型の試験装置等である。三軸試験の結果あきらかになってきた岩石の変形・破壊挙動については Paterson (1986) 等に詳しく解説されている。

3. 真三軸試験法の発達

封圧三軸試験すなわち従来の三軸試験では最大主応力と最小主応力との間の関係のみが求められるのもう一つの主応力すなわち中間主応力の影響が無視されるのが普通であった。中間主応力はどの程度強度に影響するかすなわち強度の中間主応力依存性の可否については後で改めて述べることにしここではまずはじめに封圧試験方法を上手に用いることによってこの問題がどの程度明らかにされたかについて述べることにしよう。

強度に及ぼす中間主応力効果については von Karman による封圧試験と Boker (1915) による伸張試験におけるモールの破壊包絡線 (Mohr Envelope) を比較するという方法から始められた。すなわち Boker (1915) は von Karman が供試体として用いた Carrara 大理石の圧縮試験と自分が行った伸張試験のモールの包絡線を比較し両者に若干の差が生じた事より強度に及ぼす中間主応力効果は小さいながらも存在すると主張した。同種の実験及び議論は Handin and Hager (1957), Balsley (1964), Brace (1964), Murrell (1965), Mogi (1967), Miller and Cheatham (1972) 等によって精力的に行われた。

しかし 伸張試験では所定の応力状態を正確に作ることが困難なために 測定精度が不足するという欠点があった。この実験精度を向上させるために二つの大きな貢献があった。ひとつは Brace (1964) による供試体形状の改良である。図-4は Brace (1964) が用いた供試体形状と装置を示す概念図である。この実験結果から ドッグボーン (dog-bone) 状の形状をもつ供試体を使用すれば 一様な応力分布状態が得られることがわかった。しかし 岩石を精度良くドッグボーン状に加工することは困難なので 茂木は通常の円柱供試体の両端面とエンドピース (end-piece) との間をエポキシ樹脂で盛り上げて疑似ドッグボーン状にする工夫を試みた Mogi (1966)。もうひとつ重要な進歩は Murrell (1965) や Mogi (1967) による応力測定方法の改良である。軸応力の測定を圧力容器内部で行うことにより 応力測定の精度が向上した。応力を圧力容器内で測定するためには 圧力容器からリード線を取り出さなければならぬため 実験が複雑になり 現在でも 圧力容器外で軸応力を測定する機会が多いが 精密な実験をするためには圧力容器内の応力測定が必要である。

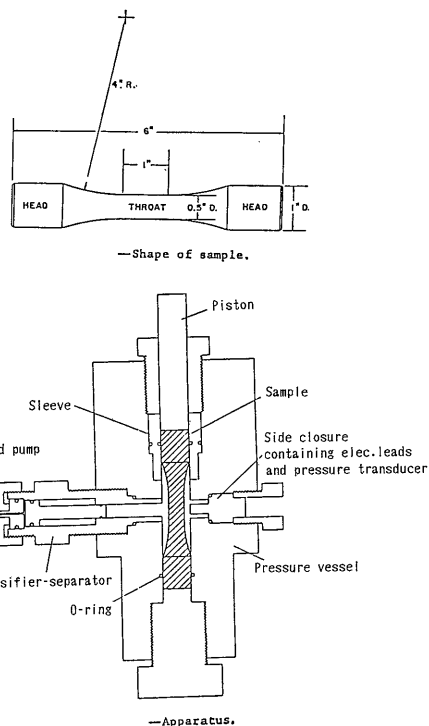
Murrell (1965), Mogi (1967) はこれらの改良された試験方法を用いた実験により 次の様な結果を明らかにした。

- (a)伸張試験 ($\sigma_1 = \sigma_2$) で得た破壊強度は 封圧試験 ($\sigma_2 = \sigma_3$) のそれよりもわずかに大きい (図-5 (a)参照)。
- (b)封圧試験で得た破断角は伸張試験のそれよりも大きい (図-5 (b)参照)。

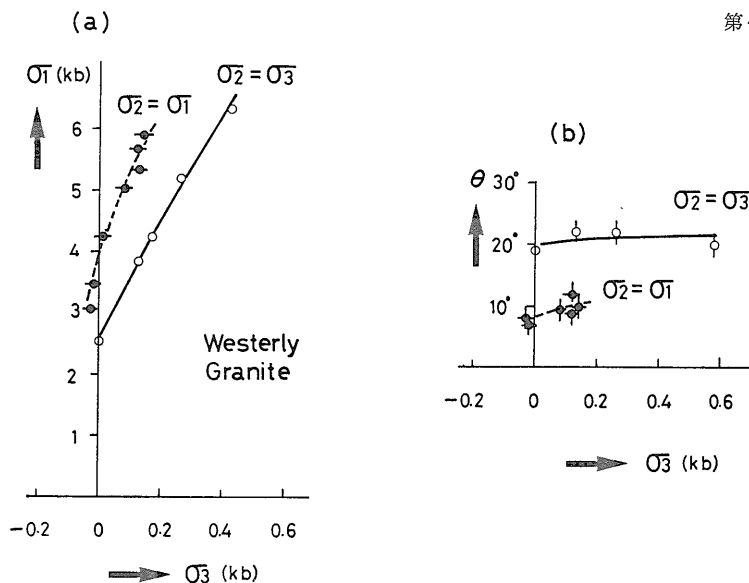
これらの結果は もし 中間主応力が影響しないとすれ

ば 説明が不可能である。

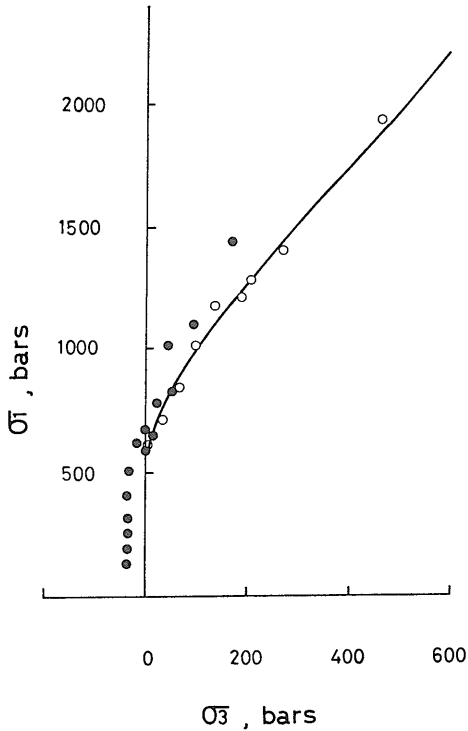
Brace (1964) はやはり封圧・伸張両試験を行ったが結果に差異が現れなかった。そこで中間主応力の影響はないと結論した。しかし たとえ 封圧・伸張両試験の結果が同じであっても 必ずしも 中間主応力の影響が存在しないことにはならない。なぜならば 封圧試験と伸張試験で実現される応力状態にはさまれる範囲の結果については不明だからである。要するに 封圧



第4図 Brace (1964) による供試体形状 (ドッグボーン状) と圧力容器の概念図



第5図 ウェスタリー花崗岩における最小主応力 (σ_3) と破壊強度 (σ_1) 及び 破断角 (θ) との関係。白丸は三軸圧縮。黒丸は伸張試験を示す。(Mogi (1967) より)。



第6図 Gosfold 砂岩における σ_1 と σ_3 との関係. 丸は三軸試験 点線は封圧下での点圧裂試験結果を示す (Robertson (1955) より).

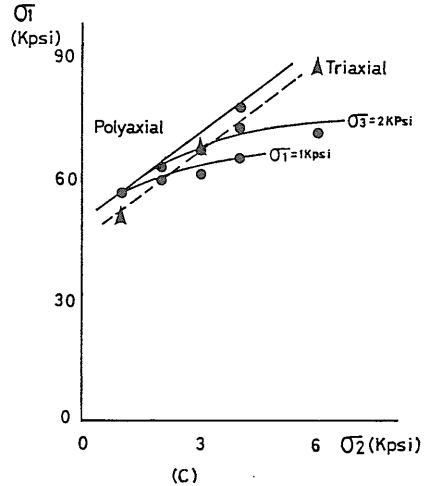
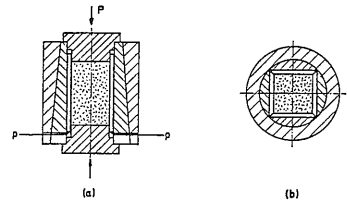
試験においても伸張試験においても実現されるのは2つの主応力が一致しているという特殊な応力状態である.

こういった試験からは強度の中間主応力依存性についてははっきりした結論を得ることは難しい. 結局 この問題を根本的に明らかにするためには 真三軸試験を実施する以外にないことが再認識されるようになった.

そこで 相異なった3主応力を作用させることのできる試験方法の開発に研究者が注目するようになった. この種の試験方法は2つのグループに大別できる.

第一のグループは中空円筒供試体を用い内圧・外圧を荷重した状態に軸方向の圧縮やねじりを同時に荷重したり 同じく封圧下で圧裂または曲げ試験を行い 3つの相異なる主応力状態を供試体中に実現しようとする方法である.

中空円筒供試体を用い 封圧 内圧 そして軸 (鉛直) 方向から荷重し 異なる三主応力条件下で金属の強度を調べる方法は古くから行われていた (Lode 1926; Nadai 1950; Drucker 1962). この種の試験方法は金属のみならず グラファイト (graphite) (Ely 1965) やセラミック (ceramic) (Broutman and Cornish 1965) にも試みられていた. Robertson (1955) は供試岩石に Solenhofen

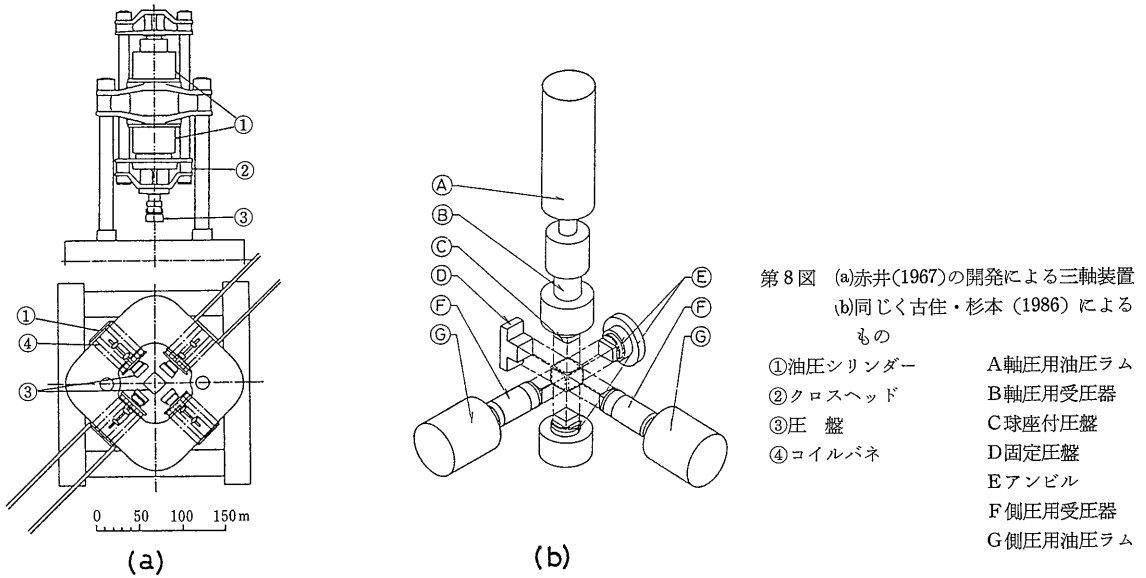


第7図 (a)・(b)Hojem and Cook (1967) による多軸試験用压力容器. (c)同上の装置を用いて得られた Karroo 粗粒玄武岩の試験結果.

石灰岩と Yule 大理石を用い 供試体の内径と外径の比を変え実験を行った. 岩石における同様の試みは 石炭 (Hobbs 1962) 粗粒玄武岩や石灰岩 (Handin et al 1967; Obert and Stephensen 1965) 等に対しても次々と行われた.

更に 中空及び円筒岩石供試体に軸圧及び封圧を荷重し 軸方向からの捩り (torsion) を加える実験が Boker (1915) Handin et al (1960) Handin et al. (1967) 等によって行われた. この場合 供試体内に生じる三主応力は弾性計算によって評価された. その結果 Handin et al. (1960) は次の様に結論した. 「剪断破壊が生じる際の応力値とこの破断角は 中間主応力の影響を受ける」. しかしながら 岩石の様な不均質でかつ非弾性的挙動を示す材料に応力勾配が生じるような試験を行っても 測定結果の信頼性・再現性は乏しい. したがって この種の試験は 最近では 破壊条件式を検討する目的には使われていない.

また 破壊強度に及ぼす中間主応力の影響を調べる為 Jaeger and Hoskins (1966) は封圧下での圧裂引張試験 (Brazilian test) を考案した. 5cm 径で長さ 12.5cm の円柱状供試体を压力容器内にセットし 圧裂試験を行



第8図 (a)赤井(1967)の開発による三軸装置
(b)同じく古住・杉本(1986)によるもの

- | | |
|----------|----------|
| ①油圧シリンダー | A軸用油圧ラム |
| ②クロスヘッド | B軸用受圧器 |
| ③圧盤 | C球座付圧盤 |
| ④コイルパネ | D固定圧盤 |
| | Eアンビル |
| | F側圧用受圧器 |
| | G側圧用油圧ラム |

った。供試体には Bowral 粗面岩 Gosfold 砂岩 Carrara 大理石の三種類を使用した。Gosfold 砂岩の場合の結果を図-6に示す。図中白抜きは封圧試験結果を示す。その結果 彼らは破壊強度に中間主応力が影響すると示唆した。

第2のグループは 供試体に一樣な相異なる主応力状態を作り出す試験方法である。この範疇に属する方法としては 現在までに次の3つが開発されている。

第一の方法は2方向をうすい鋼製のフラットジャッキ (flat-jack, 図-7(b)) により そして 軸方向は供試体断面と同面積の鋼鉄製エンドピース (図-7(a)) をとおして 載荷する方法である。Hojem and Cook (1968) は図-7に示す様な装置を用い 2.54×2.54×7.62cmの角柱型 Karroo 粗粒玄武岩の三軸圧縮試験を行い 強度特性におよぼす中間主応力効果の存在を認めた。同時に この装置を用いる事の再現性と信頼性を得る為に 通常の封圧三軸試験を行い両者を比較した。図-7(c)は彼らによって得られた Karroo 粗粒玄武岩の最大-中間主応力の関係を示したものである。実験結果の中で ラテックス (ゴム) の被覆を施した直径2.54cm 長さ7.62cm の円柱供試体の通常の封圧強度は彼らが考案した多軸型圧力容器を用いて得られた Karroo 粗粒玄武岩の破壊強度よりも若干大きかった。この原因として まず 第1に 封圧媒体の違い (流体油と銅製フラットジャッキ) による (流体圧とほぼ固体圧による) 境界条件の違いが考えられる。更に 稜角部において 隙間が生じない様フラットジャッキの形状を工夫している (図-7(b) 参照) もの この部分における応力集中はさけることは不可

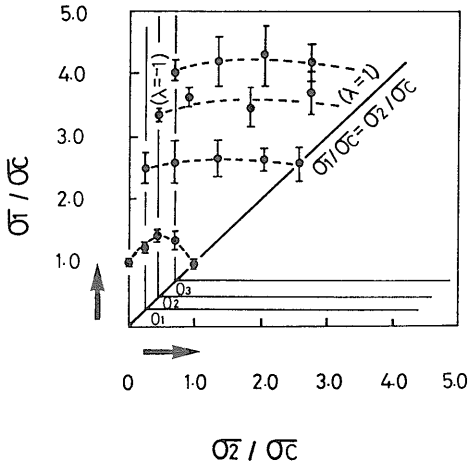
能であり 強度に大きく影響したものと考えられる。

図7-(c)は Solenhofen 石灰岩における強度に及ぼす中間主応力効果を示したものである。同図で見る限りでは 中間主応力の増加に伴い最大主応力も増加している様子が明らかである。この種の試験方法では大型の供試体が使えするという利点はあるものの フラットジャッキの耐圧強度が小さいために高い応力状態が得られていないという弱点も有している。

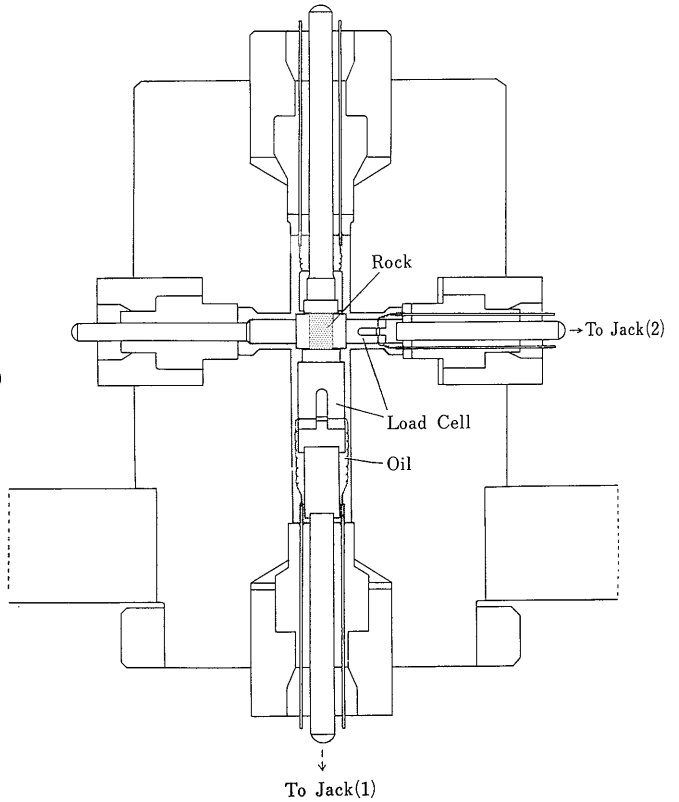
第2の方法は3主応力共 全てピストンによって作り出す方法 (以下 ピストン法と略称する) である。この方法は丹羽ら (1966) 赤井・森 (1967) 富田ら (1970) Serata et al. (1972) 荻野ら (1979) 大沼・青柳 (1980) 西田ら (1983) 古住・杉本 (1986) 等多くの人々により 試みられ 岩石 セメントモルタル コンクリートなどについて試験が実施された。図-8は赤井・森 (1967) 及び古住・杉本 (1986) の三軸試験機概念図を示したものである。いずれの場合においても 試験機の載荷容量や供試体寸法に差異はあるものの 基本的には6基のラムで構成されていることには変りがない。このようなピストン法は高い応力を実現できるものの 次のような欠点も合わせ持っている。

a) 供試体には三主応力が剛体板を介して加えられるので 剛体板と供試体間に減摩剤を入れたとしても 端面拘束を完全に除くことができない。これは結果にかなり影響すると思われる。

b) この種の試験では 機構上剛体板間にすき間が生ずるが そのため載荷が部分的に行われる。その結果 供試体内部の応力分布が一樣でなくなる。



第9図 一軸圧縮強度(σ_c)で正規化した σ_1 , σ_2 関係 (赤井・森 (1967) より).



第10図 Mogi (1971) によって開発された真三軸圧縮装置. 封圧下での二軸圧縮試験と同じ原理である.

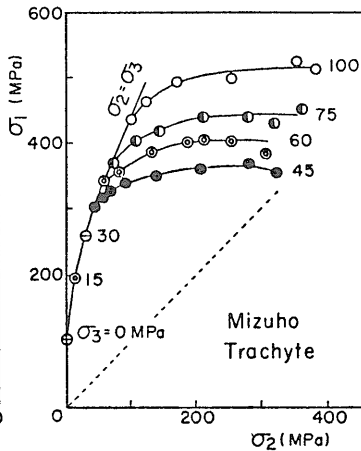
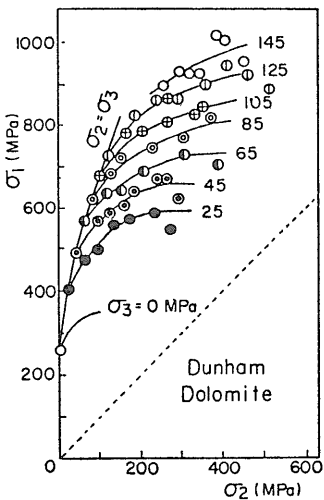
c) 供試体表面の直接測定ができないので 変形や物性測定の精度が落ちる.

図-9はピストン法によって得た結果の一例である. バラツキがかなり大きいのが これは上に述べた理由によるものと思われる.

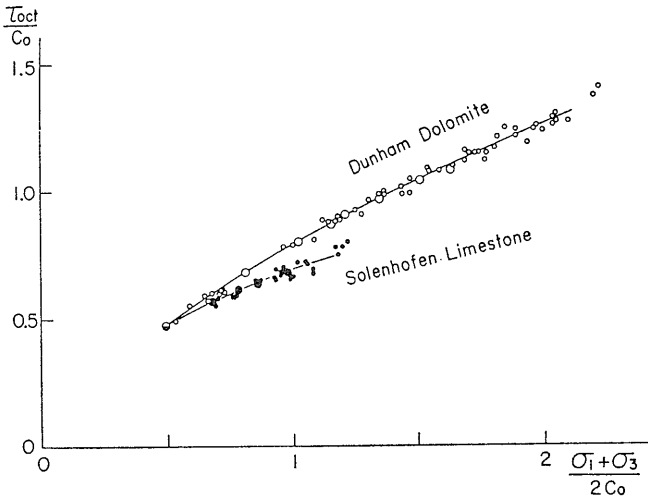
茂木 (1970 1971) は 封圧下で二軸圧縮試験を行う方

法でこのような種々の難点を或る程度取り除くことに成功した.

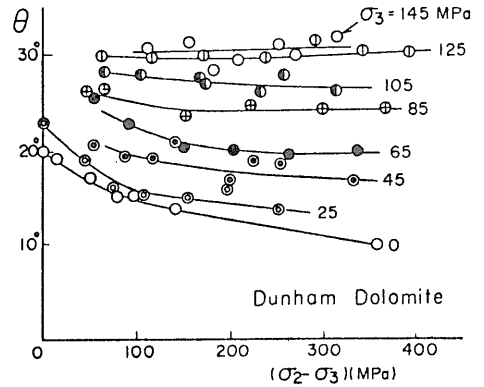
図-10はMogi (1971) の開発した装置を最小主応力面から見た概略図である. 静水圧状態に置かれた供試体は 同図の上下・左右のピストンで負荷され ピストンの先端に設置されたロードセルにて荷重が検出される.



第11図 Dunham 苦灰岩と Mizuho 粗面岩の (σ_1 - σ_2) 関係. 図中の数値は異なる σ_3 の値を MPa 単位で示したものである.



第12図 Dunham 苦灰岩と Solehofen 石灰岩の八面体剪断応力 (τ_{oct}) と平均圧力 ($(\sigma_1+\sigma_3)/2C_0$) との関係。 大円は三軸試験 小円は真三軸試験を示す。 C_0 は一軸圧縮強度。



第13図 Dunham 苦灰岩における破断角 (θ) と σ_2 との関係。 異なるシンボルは σ_3 の値を示す。

つまり 第3の方法では最小主応力が封圧で 中間主応力と最大主応力がピストンで それぞれ負荷されることになる。

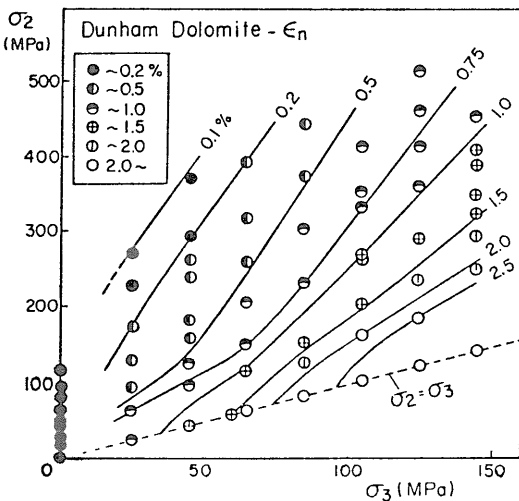
茂木は供試岩石として Dunham 苦灰岩 Mizuho 粗面岩 Solenhofen 石灰岩を用い、数百 MPa の高い封圧領域において実験を行った。 その結果 従来の封圧試験では解明することのできなかった岩石の三軸組み合わせ応力下の変形・破壊特性の主要な部分を明らかにすることに成功した。 得られた知見を整理すると 以下のようなになる。

- ①最小主応力一定のもとでは 破壊強度は中間主応力の増加と共に増すものの ある大きさの中間主応力以上では ほぼ一定の破壊強度を示す (図-11参照)。
- ②破壊・降伏条件は Von Mises 条件の一般形で与えられる (図-12参照)。
 $\tau_{oct} = f_1 (\sigma_1 + \sigma_3)$ …………… (破壊条件)
 $\tau_{oct} = f_2 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ …………… (降伏条件)
 f_1, f_2 は単調増加関数である。
- ③破断角は中間主応力の増加と共に減少するが 最小主応力の増加と共にその割合は減ずる (図-13参照)。
- ④延性度は次式で与えられる (図-14参照)。

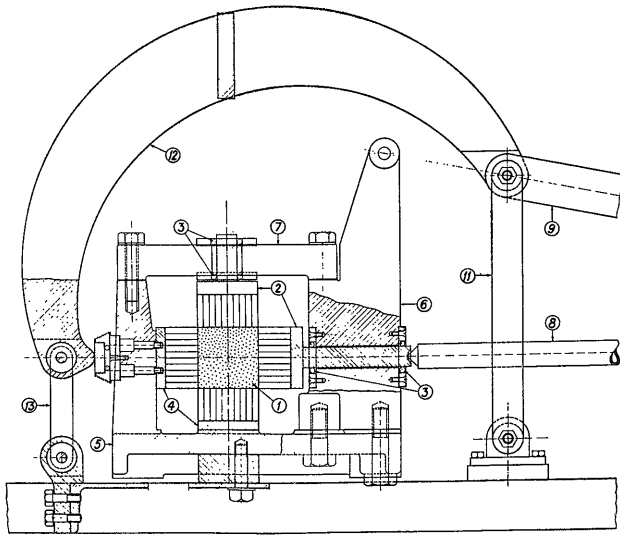
$$\epsilon_n = f (\sigma_3 - \alpha \sigma_2) \quad \alpha: \text{定数}$$

- ⑤中間主応力の増加と共に 中間主応力方向のひずみは著しく減少するが 最小主応力方向のひずみはほとんど影響を受けない (図-15参照)。

以上述べたように 茂木の実験により 変形・破壊特性におよぼす中間主応力の影響が初めて明らかになった。 しかし 実験の目的が地震学の分野にあるため 高い設定封圧下で実験が行われ また 供試岩石は均質で硬い岩石に限定されており 例えば堆積岩に関するデータがほとんどなく 岩質によって中間主応力の影響にどの程度の違いがあるか等 特に工学的問題が多く残されている。 このため 地質調査所においても 茂木型の原理による真三軸試験装置を試作し 各種実験を開始した (小出・高橋 1982 高橋他 1983) が その結果については別の機会にゆずる。



第14図 Dunham 苦灰岩の延性度 (ϵ_n) と σ_2, σ_3 との関係。



- ① Specimen
- ② Steel plunger
- ③ Ball bearings
- ④ Steel reaction plate
- ⑤~⑦ Screw elements
- ⑧ Horizontal pressure bar
- ⑨ Tension bar
- ⑩ Loading water tank
- ⑪~⑬ Link systems

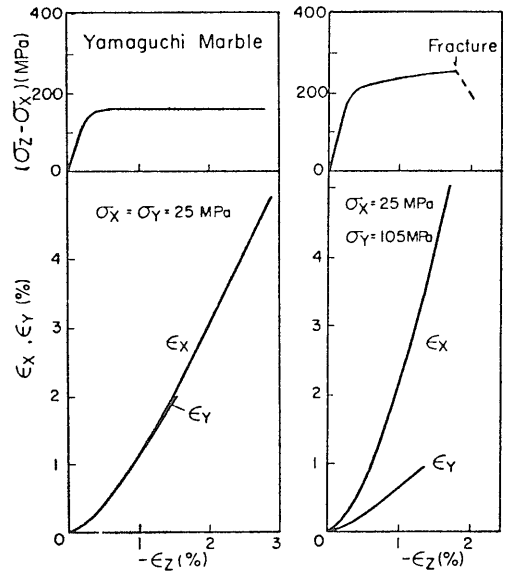
第16図 Kjellman (1936) による三軸装置の概念図。

4. 土質工学における三軸試験法の発達

さて 以上のように岩石における三軸試験の発達及び三次元応力条件下で行う試験方法について述べてきたがこの様な試験方法の変遷は何も岩石だけに限ったものではない。金属や他の材料そして土や砂を主な対象とする土質工学の分野でも盛んに行われた。土質工学における三軸試験方法の変遷特に三次元応力場においては岩石の場合と非常に良く似た経過をたどっている。ここで少し岩石からは離れ横道へそれる感があるが土質工学における三軸試験の変遷を見ておくことも岩石における試験法の変遷を知る上で必要になってくるだろう。岩石分野と土質分野との相互の関連性を明らかにすることは本論文の範囲を越えた問題だが以下では試験方法についてのみ整理してみることにしよう。

相異なる三つの主応力をはじめて土に加えたのは Kjellman (1936) であった。彼は立方供試体をその断面よりわずかに小さな剛体加圧板で三方向から载荷する方法を採用した(図-16参照)。いわゆる岩石分野でピストン法と呼ばれる方法に相当する。前述した様にこの方法では稜角部での応力集中や剛体加圧板との端面拘束はさげられないので Goldscheider and Gudehus (1973) は図-17に示される様な剛体加圧板を交互に組み合わせる工夫を施し供試体全体の载荷及び変形量が大い場合の剛体加圧板間の接触をなくすことに成功した。同様な装置を用いた試験は Pearce (1971) によっても行われた。

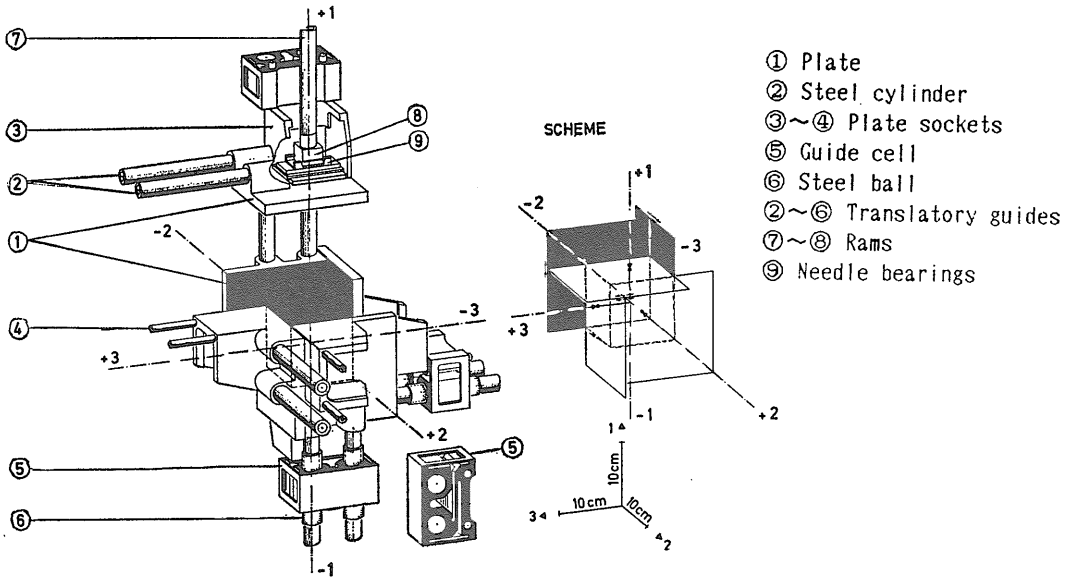
一方 剛体加圧板における変形の拘束を少しでも軽減



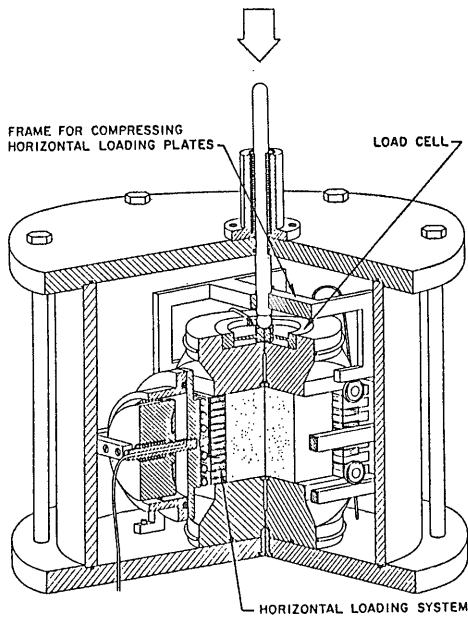
第15図 山口大理石の軸歪—差応力 軸歪—横歪曲線。

する目的で加圧板と供試体の間にゴム等による薄膜状減摩材 (membrane) を使用する試みが Ko and Scott (1967) Lomize and Kryzhanovsky (1967) Bennett (1969) 河上ら (1975) 宮森 (1976) により行われていた。この様な試験法は砂や土等の軟く変形の自由度の大きい材料には適していたが岩石の様な緻密で硬い材料には適さない事は明らかであり岩石分野ではこの種の試験法はまったく見られなかった。

さらに 三軸圧力容器内で直方供試体を用い 最大主応力 (鉛直) 方向は剛体加圧板 最小主応力方向は圧力



第17図 Goldscheider and Gudehus (1973) による三軸装置の概念図。



第18図 Lade and Duncan (1973) による立方供試体三軸装置。

容器の内圧 そして残る 1 方向 (中間主応力) を剛体加圧板によって載荷する方法 (Green 1971; Lade and Duncan 1973) や薄膜状減摩材を用いた軟質な材料によって載荷する方法 (cornforth 1964; Shibata and Karube 1965; Satheuland and Mesdary 1969; Lee 1970; 市原・松沢 1970; 松岡・北村 1974; 石原・山田・北川 1975) があつた。

これは前述した二者の利点を兼ね備えた中間的な方法として発達していた。図-17は Lade and Duncan(1973)の装置を示したものであるが 圧力容器内で二軸圧縮試験を行っている。同様な装置は Mitchell (1973) によつても考案されている。これらは岩石を対象とした Mogi (1971) の装置と同じ原理による試験法である。

以上 土質工学における分野での三軸試験方法について整理してみたが 各々の試験方法は順を追って変遷してきたという性格のものではなく ほぼ1960年代後半から1970年代前半にかけて 各々独自に発達してきた様子が良くわかる。これらの各試験方法と岩石力学におけるものとの相互作用は明らかではないが 試験方法上での何らかの影響は互いに及ぼし合つていたものと考えられる。

5. まとめ

前述のように岩石の封圧三軸試験は 試験方法としてほぼ確立されたと言えるが 更に高温・高圧の実現へ向けての努力がなされてきている。しかし 近年の傾向として顕著なのは 大型化と多様化である。すなわち実現できる圧力や温度は控え目にしても 試験片のサイズを大きくし 間隙圧の制御や歪みの精密測定や弾性波速度等の観測を行いやすくする傾向である。これは 岩石の三軸試験が実用段階に近づいているためとも考えられよう。特に 工学的に問題になるのは地殻最上部に限られているので 圧力・温度はあまり高くなくて良いが 試料の不均質性等が大きな問題になるためであ

る。また地震研究等の分野においても破壊過程の詳細な追跡やダイラテンシーの精密測定 AE(Acoustic Emission) 観測等の細かい研究が要求されるようになってきている。真三軸試験についてもそれ自体がこのような多様化・複雑化の一つの方向とも考えられるがやはりできるだけ高温・高圧を実現しようとする方向と試料サイズの大型化と測定の多様化を図る方向に分化していくものと考えられる。茂木型の真三軸試験装置は特にひずみや A E 等の測定がしやすいので測定の多様化にも向いている。しかし固体ピストン型も高圧・高温が実現しやすいという長所があり併用されていくことになりそうである。真三軸応力下の岩石の変形・破壊特性は茂木の実験によってその基本は明らかにされたがこれによって真三軸試験がはじめて軌道に乗ったばかりとあってよいであろう。封圧三軸試験がそうであったように今後さらに試験法・測定法の改良を進め各岩石の変形特性や破壊のメカニズムを明らかにし地震予知や地下利用の促進へ貢献することが期待される。

参 考 文 献

- Adams, F. D, and Nicolson, J. T., (1901) An experimental investigation into the flow of marble, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, L95, pp. 363-401.
- 赤井浩一・森 寛昭 (1967) “組合せ圧縮圧力上における和泉砂岩の破壊機構に関する研究” 土木学会論文集第147号 p. 11-24.
- Balsley, J. R., (1964) Deformation of marble under tension at high pressure, Am/Geophys. Union. Trans., 22, pp. 519-525.
- Becker, G. F., (1893) Finite homogeneous strain, flow and rupture of rocks, Bull Geol. Soc. Am, 4, pp. 13-90.
- Bennett, D. H. (1969) “Three dimensional stress test,” Proc. 7th ICSMFE, Mexico, vol. 3, pp. 519.
- Boker, R., (1915) Die Mechanik der bleibenden Formänderung in Kristallinisch aufgebauten Körpern, Ver. dt. Ing. Mitt. Forsch., 175, pp. 1-51.
- Brace, W. F., (1964) Brittle fracture of rocks, in State of stress in the Earths Crust, W. R. Judd(Ed.), New York, Elsevire, pp. 111-174.
- Broutman, L.J., and Cornish, R. H. (1965) Effect of polyaxial stress on failure strength of alumina ceramics, J. Am. Ceram. Soc., 48, pp. 519-24.
- Cornforth, D. H. (1964) Some experiment on the influence of strain conditions on the strength of sand, Geotechnique, Vol. 14, No. 2, pp. 143-167.
- Drucker, D. C. (1962) On the role of experiment in the development of theory, Proc. Fourth U. S. National Cong, of Appl. Mech., pp. 15-33.
- Ely, R. E. (1965) Strength of graphite tube specimens under combined stresses. J. Am. Ceram. Soc., 48, pp. 505-8.
- 古住光正・杉本文男 (1968) 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 応用地質 27巻1号 p. 13-20.
- Goldsheider, M and Gudeus, G (1973) “Rectilinear Extension of Dry Sand: Testing Apparatus and Experimental Results,” Proc. 8th ICSMFE, Moscow, vol 1.1, pp. 143-149.
- Green, G. E. (1971) “Strength and deformation of sand measured in an independent stress controll cell, Proc. Roscoe Memorial Symp. On stress-strain behaviour of soils, Cambridge, pp. 330-339.
- Griggs, T., (1936) Deformation of rocks under high confining pressures, J. Geol., 44, pp. 541-577.
- Handin, J., and Hager, R. V JR., (1957) Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: tests at room temperature on dry samples, Bull. Amer. Asso. Petro. Geol., 41, pp. 1-50.
- Handin, J., Higgs, D. V., and o'Brien, J. K. (1960) Torsion of Yule marble under confining pressure, in Rock Deformation, Geol. Soc. Am. Mem. 79, pp. 245-74.
- Handin, J., Heard, H. C., and Magouirk, J. N., (1967) Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite and glass at different temperatures and strain rates, J. Geophys. Res., 72, pp. 611-640.
- 林郁彦・山崎豊彦・中野実 (1963) 岩石の三軸圧縮試験について—実験装置と石灰石の実験— 日本鉱業会誌 Vol. 79, pp. 1012-1015.
- Hobbs, D. W. (1962) The strength of coal under biaxial compression, Colliery Engng, 39, pp. 285-90.
- Hojem, J. P. m. and Cook, N. G. W., (1968) The design and construction of a tiaxial and polyaxial cell for testing rock materials. S. Afr Mech. Engr., Vol. 18, pp. 57-61.
- 堀部富男 小林良二 (1958) 三軸圧縮下における夾炭層岩石の物理的性質 日本鉱業会誌 Vol. 74, pp. 142-146.
- 星野一男 (1966. a) 岩石変形の基礎理論と地質構造要素 地質学雑誌 Vol. 72, pp. 105-116.
- 星野一男 (1966. b) 動き始めた高圧変形試験 機地質ニュース 144号 pp. 30-31
- 星野一男 (1979) 高圧岩石変形機器について 石油技誌 44, pp. 161-165
- 星野一男 (1978) 圧密の進行と機構について 地質学論集 15号 pp. 15-34.
- 星野一男・井波和夫・小出 仁 (1981) 高圧岩石変形実験機について (その2), 石油技誌, 45, pp. 189-193.
- 星野一男・井波和夫・小出仁・岩村茂男・三井忍 (1970) 本邦産第三系堆積岩の高封圧下における変形挙動(1) 地質ニュース 192号 pp. 2-12.
- Hoshino, k., Koide, H., Inami, K., Iwamura, S., & Mitsui, S.,(1972). Mechanical Properties of Japanese Tertiary Sedimentary rocks under high confining pressures

- Grological Survey of Japan, Report. No. 244, 200p.
- 石原研而・山田恭央・北川久雄(1975) 三主応力を変化させた砂のせん断変形特性 第10回土質工学研究発表会発表講演集 pp.161-164.
- 市原松平・松沢 宏(1970) 平面ひずみ状態と軸対象ひずみ状態における乾燥砂のせん断特性 土木学会論文報告集 第173 pp. 47-59.
- Jaeger, J. C., and Hoskins, ER., (1966) Rock failure under the confined Brazilian test, J. Geophys. Res., pp. 2651-2659.
- Karman, T., von (1911) Festigkeites ver suche unter allseitigen Druck., Zeits. ver. Ingenieure, 55, pp. 1749-1757.
- 河上房義・諸戸靖史・及川 研(1975) “立方体供試体のせん断特性” 第10回土質工学研究発表会発表講演集 pp. 165-168.
- 木下重教・山下秀・石島洋二・中村章・西原影夫 1975a 「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)」北大工学部研究報告第76号 pp. 1-10.
- 木下重教・山下秀・石島洋二・中村章・西原影夫 1975b 「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2)」北大工学部研究報告第76号 pp. 11-17.
- Kjellman, W. (1936) “Report on an apparatus for consummate investigation of the mechanical properties of Soils,” Proc. 1st ICSMFE, Cambridge, mass., vol. 2, pp. 16-20.
- Ko, H. Y. and Scott, R. F. (1967) “A new soil testing apparatus,” Geotechnique, vol. 17, No. 1, pp. 40-57.
- 小出仁(1976) 地下の応力を測る 地質ニュース257号 pp. 14-22.
- 小出仁・星野一男(1967) 三軸変形下の岩石中の微小割れ目の発達について(序報) 地震Ⅱ vol. 120, pp. 85-97.
- 小出仁・星野一男・井波和夫・岩村茂男・三井忍(1971) 第三系堆積岩の強度・延性度の年代・地球による差異について 地質学雑誌 vol. 77, pp. 327-334.
- 小出仁・高橋学(1982) 絶対三軸圧縮試験と地震予知のための岩石破壊研究 全国地下資源関係学協会全国大会分科会資料 p. 29-32.
- Lade, P. V. and Duncan, J. M. (1973) “Cubical triaxial test on cohesionless soil,” JSMFD, ASCE, vol. 99, No. SM10, pp. 793-812.
- Lee, K. L (1970) Comparison of plane strain and triaxial tests on sand, JSMFD, ASCE, Vol. 96, No. SM3. pp. 901-923.
- Lode, W. (1926) Proc. Int. Congress appl. Mech. 2nd, Zurich.
- Lomize, G. M. and Kryzhanovsk, A. L. (1967) “On the strength of sand,” proc. Geotechnical Conf.- Oslo. vol. 1, pp. 215-219.
- 松岡 元・北村良介(1974) 多軸試験による土の応力一ひずみ特性について 土木学会第29回年次学術講演会概要集 第3部 pp. 53-54.
- 松島昭吾(1959) 岩石の変形と破壊(その四) 2,000kg/cm²までの高圧下における花崗岩の変形と破壊 地震Ⅱ Vol. 12, pp. 68-74.
- Miller, T. W., and Cheatham, J. B., (1972) A new yield condition and hardening rule for rocks, Int. J. Rock Mech. Sci & Ceomeca. Abstr., 9. pp. 453-474.
- Mitchell, R. J. (1973) “An apparatus for plane strain and true triaxial testing of undisturbed soil samples,” Can. Geotech. J., Vol. 10, No. 3, pp. 520-527.
- 宮森建樹(1976) “多軸応力状態における砂のせん断強さと変形特性” 土木学会論文報告集 Vol. 255, pp. 81-91.
- 茂木清夫(1964) 高封圧下の岩石の変形・破壊(第一報) 震研彙報 Vol. 42, pp. 491-514.
- Mogi, K., (1966) “Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive stress”, Felsmech. Ingenieurgeol., 4(1), 41.
- Mogi, K., (1967) Effect of the intermediate principal stress on rock failure, J. Geophys. Res., Vol. 72, No. 20, pp. 5117-5131.
- 茂木清夫(1970) 最近の岩石破壊実験 地質ニュース192号 pp. 13-16.
- Mogi, K., (1971) Effect of the triaxial system on the failure of dolomite and Limestone, Tectonophysics 11, pp. 111-127.
- Murrell, S. A. F., (1965) The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures, Geophys. J., 10, pp. 231-281.
- Nadai, A. (1950) Theory of flow and fracture of solids, Vol. 1, 2nd edn., New York, McGraw-Hill.
- 西田 正・江崎哲郎・木村 強・今井 寛(1983) ぜい性材料の破壊に関するエネルギー的考察 日鉱会春期大会講演要旨集 pp. 31-32.
- 西原正夫・平松良雄(1964) 岩石の三軸圧縮試験 日本鉱業会誌 Vol. 80, pp. 90-94.
- 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 16巻 16号 pp. 108-114.
- Obert, L., and Stephensen, D. E. (1965) Stress conditions under which core discing occurs, Soc Min. Engrs., Trans., 232, pp. 227-234
- 荻野正二・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 95巻 1102号 pp. 843-849.
- 大沼博志・青柳征夫(1980) 三軸圧縮応力を受けるコンクリートの破壊強度基準について 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集 第5部 pp. 277-278.
- Paterson, M. S., (1964) Triaxial testing of materials at pressures up to 10,000kg/sq. cm., Journ Inst. Engrs. Aust., Jan. -Feb., pp. 23-29.
- バターソン M. S. (荻野正二・水田義明・佐野修訳) (1986) 実験岩石力学 古今書院 242. p
- Pearce, J. A. (1971) “A new true triaxial apparatus,” proc. Roscoe memorial symp. On stress-strain behaviour of soil, Cambridge, pp. 330-339.
- Robertson, E. C., (1955) Experimental study of the strength of rocks, Bull. Geol. Soc. Am., 66, pp. 1275-1314.
- Serata, S., Sakurai, and Adachi T. (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.

Shibata, T. and Karube, D. (1965) Influence of the variation of the intermediate principal effective stress on the mechanical properties of normally consolidated clays, Proc. 6th. ICSMFE, Montreal, Vol. 1, pp. 359-369.

Sutherland, H. B. and Mesdary, M. S. (1969) The influence of the intermediate principal stress on the strength

of sand, Proc. 7th. ICSMFE, Mexico, Vol. 1, pp. 391-399.

高橋 学・小出仁・木下重教(1983) 堆積岩の真三軸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 24巻 4号 pp. 10-17.

富田和政・秋本晶胤・川本眺万(1970) “三軸圧縮応力下におけるモルタルの変形特政” 土木学会論文報告集175号 p. 75-83.

山口梅太郎・西松裕一(1976) 岩石入門(第2) 版東京大学出版会 266p.

最近中国で発見された新鉱床 — 4 —

XVI 桐柏県で一大金鉱床把握

最近 河南省地質鉱産局地質調査第三隊は 桐柏県宋庄郷の銀銅坡で一大金鉱床を探索・把握した。そして同隊の「河南省桐柏県銀銅坡金鉱区東段詳細勘探地質報告」が11月30日に国家鉱量委員会の審査を正式に通過した。この鉱床は 鉛を共生し 銀 亜鉛 カドミウムなどの有用成分を随伴する大型金鉱床である。地表に大量に露出し 採掘しやすい。 姚曉東

(中国地質報 1986. 12. 19)

XVII チベット羅布莎クロム鉄鉱床の鉱石

地質鉱産部の鉱産総合利用研究所が最近行った物質組成の研究と選鉱試験の結果 中国が現在探索・把握している重要な大型クロム鉄鉱床——チベットの羅布莎鉱床は その鉱石の含 Cr_2O_3 品位が51.1-52.8% Cr: Fe比が高くして3.68-3.81に達することがあきらかになった。もしクロム鉄鉱精鉱を年に5万t生産すれば 利益は年間360万元に達し 毎年 国家に外貨を600万ドル節約させることになるだろう。

中国はクロム鉱物資源に乏しく 冶金などの工業が必要とするクロム鉱は長期にわたって輸入に依存してきた。チベットの羅布莎クロム鉄鉱床は 現在中国が発見している数少ない大型クロム鉄鉱床の一つである。地質鉱産部の鉱産総合利用研究所は 現在すでにその鉱物組成 物理的性質 化学的性質 選鉱などの工学的性質を明らかにし さらに当該鉱石の純度が高く 重力選鉱法でクロム鉄鉱が回収でき クロム精鉱の選鉱実収率が90%以上 Cr_2O_3 の回収率が97.7-98.7%にも達し かつ精鉱中の白金族の金属総量の回収率が 93.4-95%に達することを明らかにし これらの研究成果は当該

鉱石の合理的なクロム鉄鉱の工業指標(稼行指標)の制定に役立ち その数値的根拠を与えてくれた。チベットの羅布莎クロム鉄鉱床は 来年正式に開山する。その早期開発・利用は 中国の鉄鋼産業の発展とチベットの経済建設にとって重要な意義を備えている。

劉経世(中国地質報 1986. 9. 12)

XVIII 広東省海康県で珪砂鉱床

広東省地質鉱産局704地質技術開発公司是 最近 海康県西海岸の興大村の西南斜面一帯で優秀な珪砂鉱床を発見した。鉱床の賦存範囲は 延長が27km 幅が大体3km 可採層厚が2m以上である。分析の結果によると この珪砂は SiO_2 が最高99.98% 最低96.8% 平均98.55%である。 張邦耀(中国地質報 1987. 1. 12)

XIX 江西省で巨大な珪灰石鉱床

江西省地質鉱産局贛西地質調査大隊は 新余県・上高県地域の蒙山山脈区域で 現在のところ中国では数少ない 優れた超大型珪灰石鉱床を発見した。

その3年越しの試錐探査は掘進総延長が31,000mに達し その試錐探査によって中型 大型 超大型の3鉱床が把握され 総埋蔵量は2,000万tを越え 鉱石の品質は一級と二級に該当する。

この鉱床田は交通が至便で 露天掘りに適し 新余市は これらの鉱床の開発にとりかかりつつある。

其鴻 西明(中国地質報 1987. 1. 12)

XX 江西省北部で大型金鉱床発見

江西省贛西北地質大隊は 江西省贛州北部の某鉱山で 廢石処理に供されようとしていた鉄ゴッサン群中で大規