

鹿児島大学型岩石用高圧三軸試験機の設計・製作

岩松 暉*・中其 毅**

(1980年9月30日受理)

New Type Triaxial Testing Machine for Rocks
in Kagoshima University

Akira IWAMATSU* and Takeshi NAKASONO**

Abstract

We designed and manufactured a high-pressure triaxial testing machine for rocks. It consists of a triaxial chamber, loading press, confining and pore pressure system, heating apparatus, controller, X-Y recorder and oil pump unit.

Axial load is generated by infusing oil into the servo-actuator of loading press. Maximum load is 50 ton. In case of strain-controlled tests, strain rates can be changed in seven steps of 1×10^{-n} /sec ($n = 1, 2, 3, \dots, 7$) to the longitudinal length of the cylindrical rock specimen (39.0 mm long and 19.5 mm in diameter). The load is measured with a load cell and the displacement of the specimen during deformation is measured with the differential transformer which is fixed between piston and triaxial cell. Stress and strain are calculated in real time with a compensation processor unit using the value of the load and displacement thus measured. Therefore stress-controlled experiments can be made, so that creep tests are easily applied under constant stress. And stress-strain curve is recorded on a chart of the X-Y recorder.

Confining pressure is generated by infusing oil into the triaxial chamber with a servo-actuator. Maximum confining pressure can be obtained up to 4,000 kg/cm². Pore pressure is applied by infusing water into the specimen with a hand-operated pump. Maximum pore pressure is also 4,000 kg/cm².

Temperature can be also controlled by electric band heaters up to 200°C.

はじめに

筆者のひとり岩松は、褶曲の形成機構の解明をテーマとして、とくに野外における小構造解析を中心に研究をすすめてきた(例えば IWAMATSU, 1969, 1975)。それまでの褶曲の研究は、地表地質調査から得られた構造断面図をもとに、その褶曲を作った外力を推定するなど、きわめて定性的な議論を行うか、あるいは地層を弾性板もしくは粘性板と仮定して純理論的な考察を行うか、の両極端の研究が多かった。これらは、結局、褶曲の幾何学的形態をほとんど唯一の根拠としている点では共通している。しかし、単なる外形にとどまらず、褶曲体内部のひずみ像を明らかにし、その褶曲を形成した場を知ることが何よりも重要である。そこで、上記の小構造解析のような手法を用いて、天然の変形状態を詳細に明らかにしようとするのである。同時に、同じ変形の場におかれても、岩石の物性が異なれば、異なった力学的挙動をするこ

* 鹿児島大学理学部地学教室 Institute of Earth Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Kagoshima, Japan.

** (株)圓井製作所 Marui & Co., Ltd., Osaka, Japan.

とは自明であるから、前記の手段で明らかにした褶曲形成の場における岩石の力学的性質を知る必要がある。すなわち、野外における構造地質学的研究と室内における岩石力学的研究を結合し、総合的に考察してこそ、褶曲の形成機構を具体的定量的に解明することができるのである。そこで、高温高圧岩石三軸試験機によって、褶曲形成時の地下深所の温度圧力条件を再現し、そのときの岩石の力学的挙動を解明することが重要になってくる。IWAMATSU and HATTORI (1975) は、軟岩の乾燥試料を用いた常温の三軸試験を行い、同一層準同一岩質の岩石でも、褶曲体内の位置によって力学的性質が異なることを見出し、その褶曲の形成機構を推定した。これが前述のような総合的研究の嚆矢であるといつてよい。しかし、温度や間隙水の影響を考慮していないなど、まだ非常に不十分なものであった。

幸いにして、今回、文部省科学研究費*をえたので、これらの加温試験や間隙水圧試験も行える三軸試験機(マルイ MIS-0235-70-2 型)を新しく設計製作した。従来の試験機にくらべていろいろ改良した点もあり、ここに概要を記載して、今後の開発の参考に供したい。

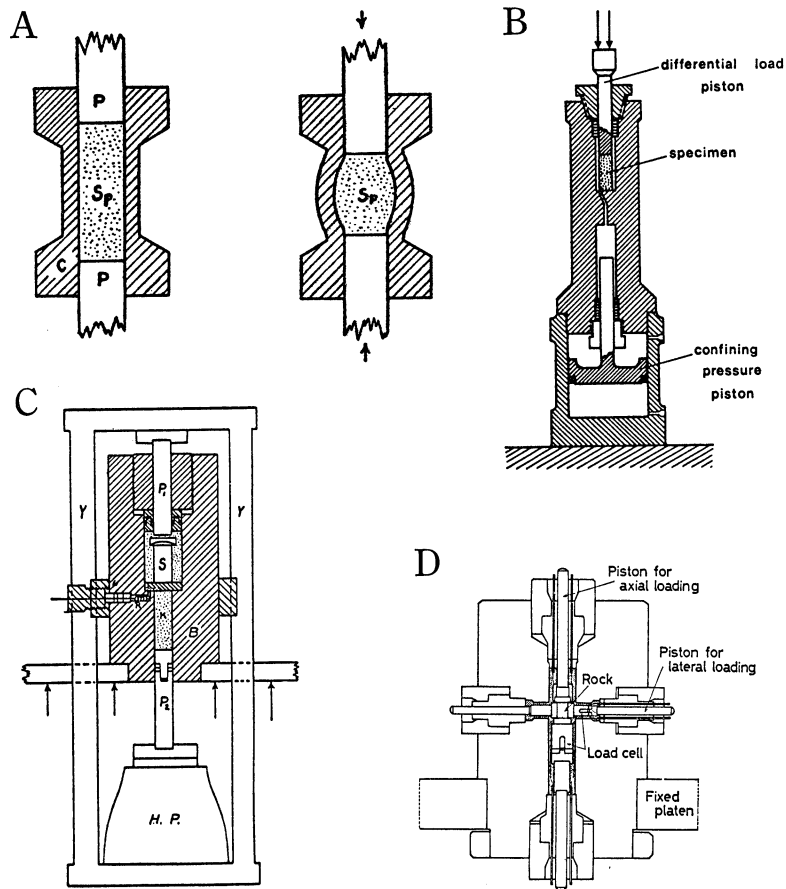
本試験機の設計に当り、地質調査所星野一男博士・新潟大学植村 武教授に有益なご助言をいただいた。また、実際の設計・製作・調整に当っては、北川洋幸・守屋万吉・山村敦人・新垣政宣・若江毅洋・百技和人・藤本 篤の各氏をはじめ、(株)圓井製作所および(株)マルイの多くの方々にお世話になった。厚く感謝の意を表する次第である。

従来の岩石用高圧三軸試験機

ADAMS and NICHOLSON (1901) は、厚い鋼ジャケットで岩石供試体を締めつけて圧縮試験を行い、その封圧効果で岩石が塑性流動することを示した(第1図)。これは、きわめて定性的であったとはいえ、岩石の三軸試験のはじまりであったといつてよいであろう。その後、VON KÁRMÁN (1911) が、流体圧で側圧を加え、円筒状供試体を軸方向から固体ピストンで加圧する方式を開発した(第1図)。その後、GRIGGS (1936) をはじめ、多くの人々によって改良が加えられたが、本質的にはこの方式が現在に至るまで踏襲されている(第1図)。一般に三軸試験という場合には、このような2軸同一型($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$)のものをさすのが普通である。最近になって、角柱の供試体を用い、最小主応力を流体圧で加え、最大および中間主応力を固体ピストンで加える方式の三軸試験機も開発された(茂木, 1971 a; MOGI, 1971 b)(第1図)。このような3軸の異なる方式($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$)の試験を「真の三軸試験」、もしくは三主応力圧縮試験とよび、前者のようなものを「従来の三軸試験」、もしくは軸対称三軸圧縮試験とよんで区別することができる。

わが国の地質関係研究機関では、1966年に地質調査所(HOSHINO *et al.*, 1972; 星野, 1979)にはじめて導入されたのに続いて、東北大学(大槻・他, 1974)・新潟大学(IWAMATSU and HATTORI, 1975)・高知大学(甲藤・他, 1974)にも設置された。したがって、本学のものはわが国では5番目に当ることになる。それぞれの仕様は上記の文献に記載してあるが、いずれも従来方式の2軸同一型試験機で、最大側圧および最大間隙水圧 3,000~5,000 kg/cm², 最大軸圧 50 ton, 最小ひずみ速度 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$ /sec, 最高温度 100~200°C である。また、軸圧制御以外はすべて手動式をとっている。特徴的なことは、供試体の大きさを 19.5 mm ϕ × 39.0 mm に統一していることである。したがって、国内地質関係の試験データは、寸法効果を考慮することなく、ただちに比較することができる利点がある。

* 昭和53年度科学研究費(一般研究A): 課題番号 342016, 研究課題 褶曲の形成機構に関する岩石力学的研究——特に四万十型褶曲と天草型褶曲の比較検討——, 研究代表者 岩松 暉, 研究経費 2,810 万円



第1図 従来の代表的な三軸圧縮試験機

A: ADAMS の装置 (左は試験前, 右が変形後) B: VON KÁRMÁN の装置
 C: GRIGGS の装置 D: 茂木の三主応力圧縮試験機

設計方針

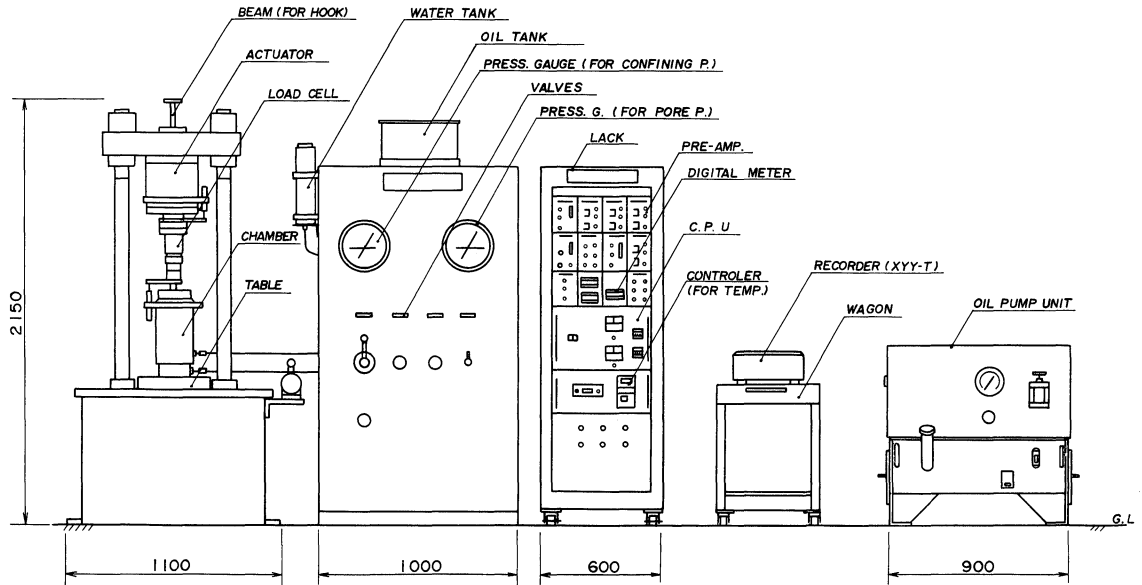
一番新しい高知大学の試験機が製作されてからすでに5年経過しており, その間のエレクトロニクス, マイクロコンピューターなどの技術的進歩にはいちじるしいものがある。これらの進歩をなるべく取り入れて極力自動化をはかり, ひとりで簡便に試験が行えるようにすることを第一の設計方針とした。共同研究者やオペレーターのいない地方大学では, この点がしばしばネックになるからである。次に, 前述のような国内地質関係研究機関のデータの互換性を考慮して, 供試体の大きさを $19.5\text{mm}\phi \times 39.0\text{mm}$ に統一することを設計の前提とした。以下, 設計に際して留意した点, とくに従来の試験機と異なる点を列挙する。

- (1) サーボ弁の精度向上に伴い, 軸圧, 側圧とも電気油圧サーボ負荷制御方式を採用する。
- (2) 三軸室はなるべく短時間に組み立てられるようシンプルに作る。また, 将来, JIS 規格の供試体で試験する場合にそなえて, 異なったサイズのセルと互換できるように, 載荷台に固定しない。
- (3) マイコンを用いた断面補正演算装置 (CPU) を設ける。同時に, ピストンのちぢみなど, 機械自体のもつ特性も消去するようプログラムする。
- (4) 演算の結果は, 直接 XY レコーダーに入力して応力-ひずみ曲線をえがかせる。

(5) 計算された応力は制御のほうにフィードバックし、従来の荷重制御ではなく、真の応力制御を行い、クリープ試験を自動で行えるようにする。

鹿大型三軸試験機の構成

本試験機は、载荷装置・計測盤・制御盤・レコーダー・油圧ユニットの5つの部分から構成



第2図 鹿大型岩石用高压三軸試験機全体組立図
図中の CONTROLLER は CONTROLLER の誤り

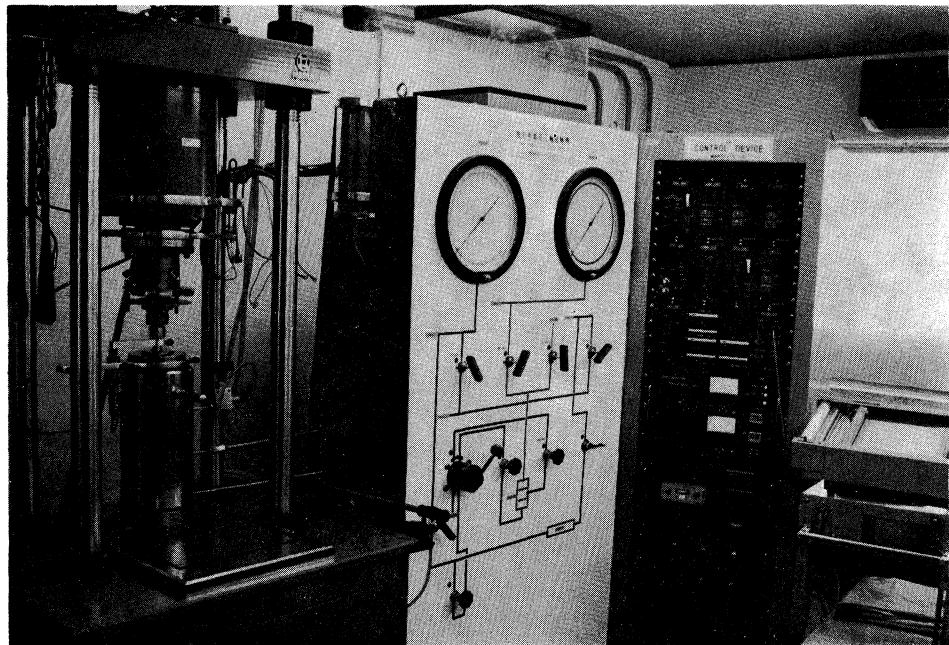
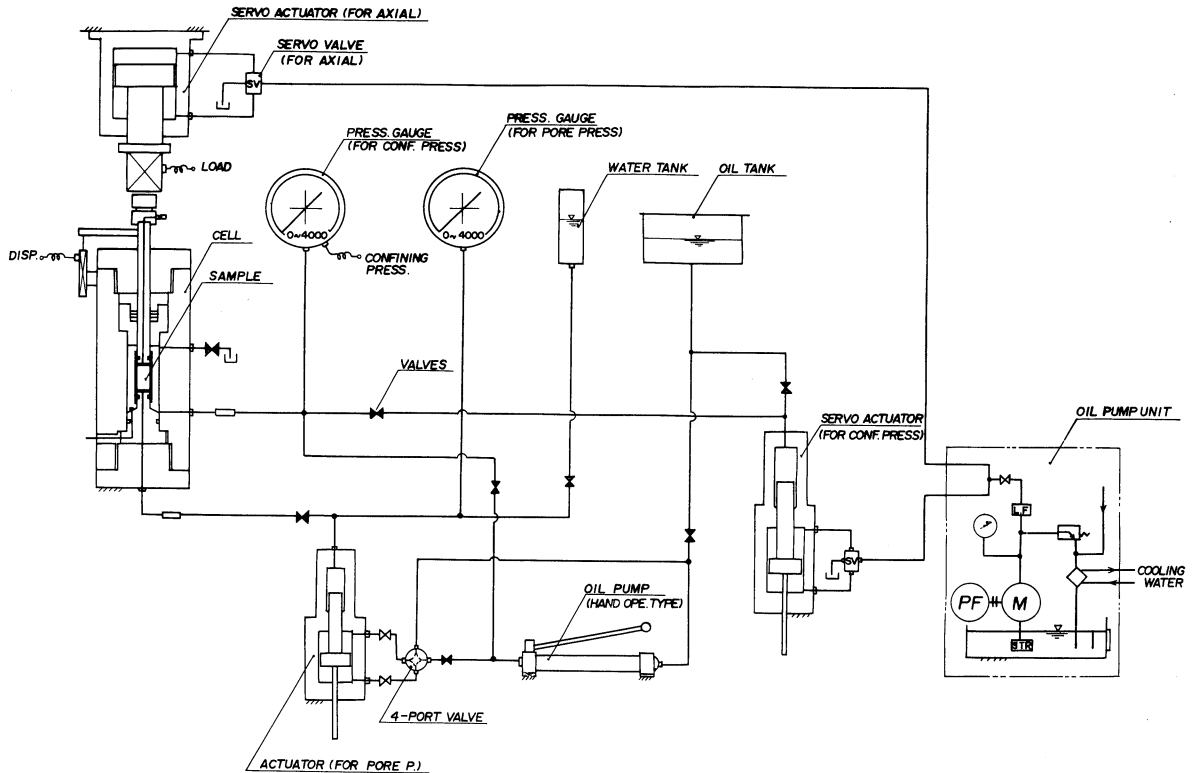
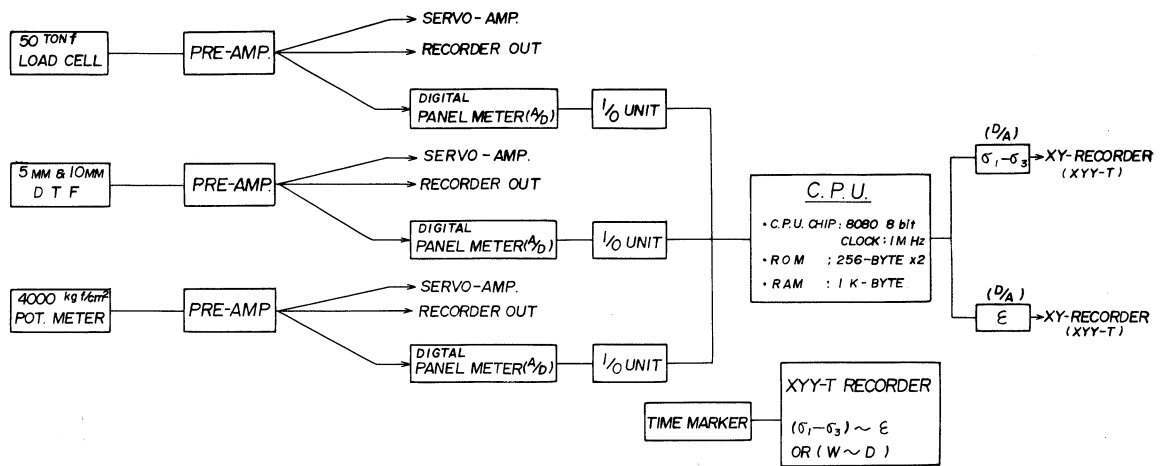


写真1 鹿大型三軸試験機全景
ただし油圧ユニットは屋外に設置してある



第3図 配管系統図



第4図 ブロック図

されており（第2図，写真1），油圧系統は第3図のように配管されている。計測は軸荷重・変位・側圧・間隙水圧の4要素で，間隙水圧以外の3要素は，デジタルパネルメーターに表示されると共に，付設のマイクロコンピューターにより応力とひずみを計算して，XY-Tレコーダーに記録できるようになっている（第4図）。

本試験機の機能

本試験機は以下のような諸機能を有している。

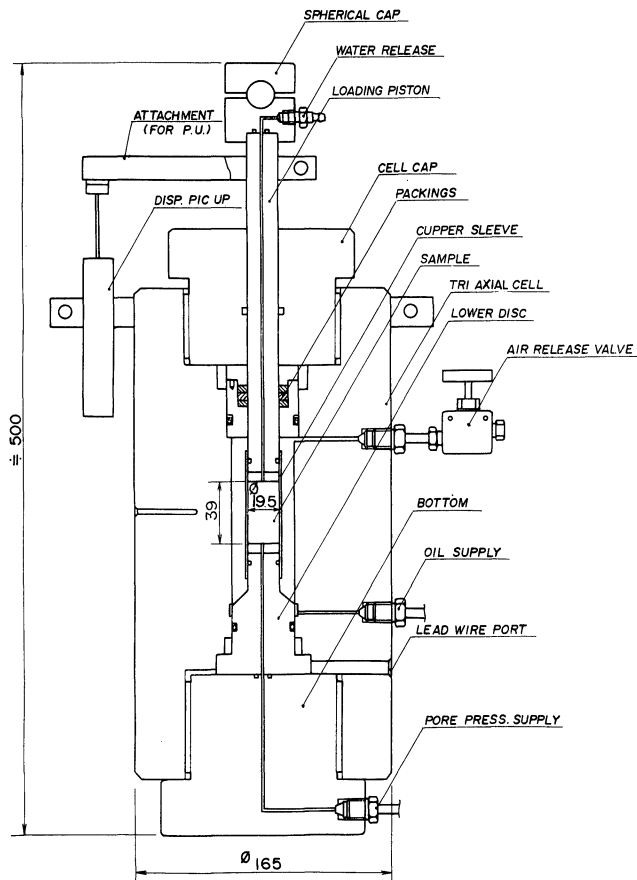
(1) 載荷および制御方式

軸荷重・側圧とも電気油圧サーボ負荷制御方式をとっている。ただし、間隙水圧は小型の手動ポンプにより負荷する。負荷能力は、軸荷重 50 ton, 側圧 4,000 kg/cm², 間隙水圧 4,000 kg/cm² である。サーボ弁は、軸荷重・側圧とも、定格圧力 210 kg/cm² 定格流量 1.2/8 l/min のものを使用している。制御方式は、変位制御・荷重制御・応力制御の3種類ある。変位制御の場合、供試体の長さ 39.0 mm に対して、ひずみ速度が 1×10^{-n} /sec ($n=1, 2, \dots, 7$) になるように発振器がセットしてある。応力制御には、後述の CPU で演算した応力の値を用いる。

このような方式を採用した結果、間隙水圧試験のほかは、常時オペレーターがついている必要がなく、非常に便利になった。すなわち、従来の試験機では、試験中の供試体の体積変化に伴う側圧の変動に対し、常に手で微調整を続けなければならなかった。とくにクリープ試験の場合には、定荷重試験しかできなかったので、供試体の断面積増加に伴う応力の減少を手計算で求め、その分を常時補ってやらなくてはならなかった。そのため、長時間試験では、すくなくとも2人交代の不寝番が必要であったが、本機では、一度セットしておけば、何週間でも無人の試験が可能となった。

(2) 三軸室

常温用(第5図, 写真2)と最高 200°C までの高温用(第6図)が各1基あり、いずれも間隙水圧の負荷が可能である。ピストンおよび下部加圧盤は、高速度鋼製と超鋼製の2種あって、供試体の強度に応じて使いわけるようになっている。また、間隙水圧試験のためには、穴



第5図 常温用三軸室

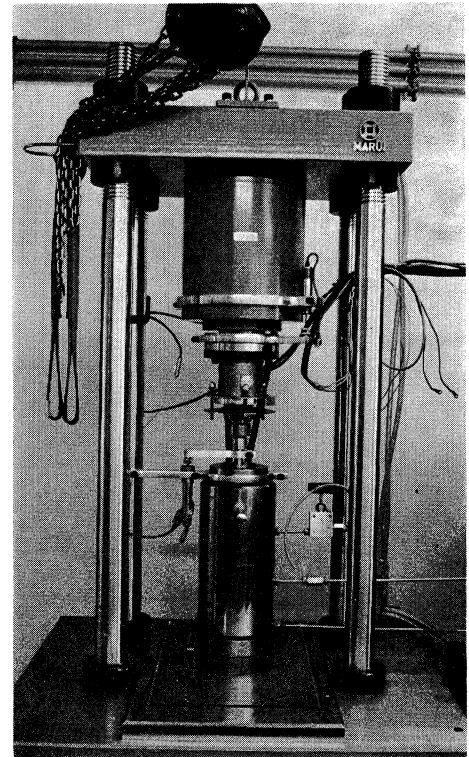
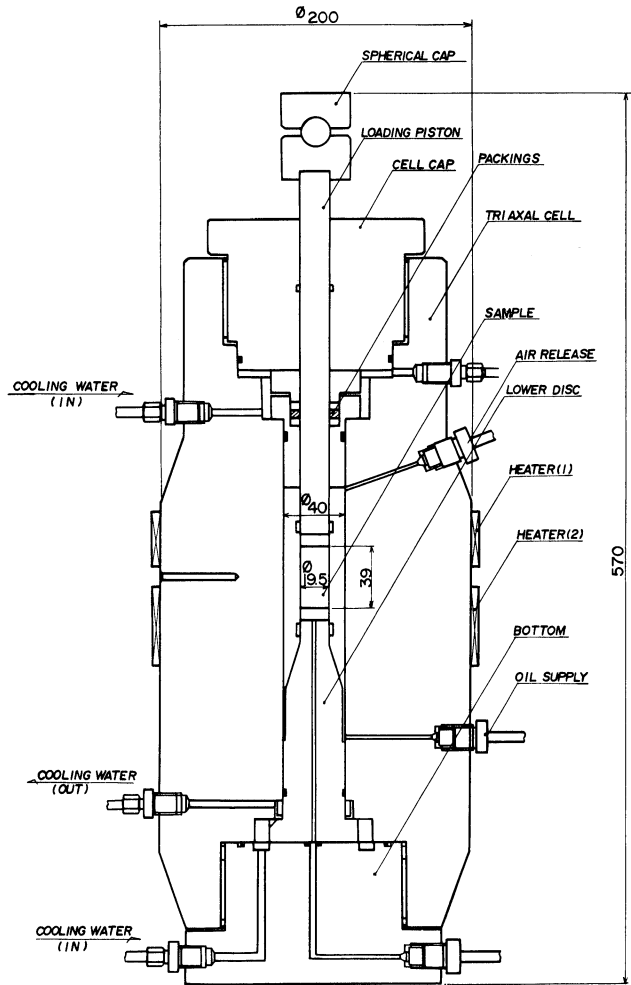


写真2 試験機本体(載荷部)
常温用三軸室使用
なお、ラムにとりつけた変位計は通常使用しない

のあいたピストンと下部加圧盤およびスペーサーが用意されており、水が供試体を通して浸出してきたことが確認されるようになっている。さらに、下部加圧盤には、8本のリード線取出口の付いたテフロン製のもの（写真3）があり、ストレインゲージや弾性波速度測定用ピックアップなどが、端子にハンダづけするだけで簡単に取付られる。側液から供試体をシールするスリーブは、銅を焼きなまし硝酸で薄くしたものか、シリコンゴムの熱収縮チューブ（信越化学製）を用いる。

なお、下部加圧盤の構造が、高知大学を除く他研究機関の試験機と異なっている。例えば、新潟大学の試験機（島津製作所製）の場合には、第7図に示すように、アンビルと圧盤台が切り離されているため、側圧を加えると供試体が縮んだ分だけアンビルから上の部分が油の中に浮き上がる構造になっている。したがって、側圧に断面積を掛けた分だけ軸荷重が記録されることになり、その後、ラムを駆動させても、アンビルが圧盤台に接触して差応



第6図 高温用三軸室

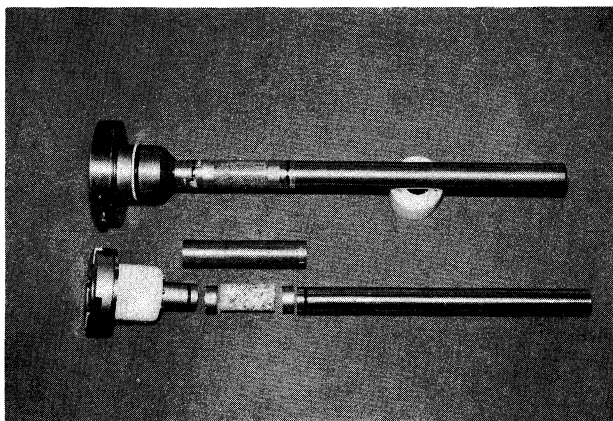
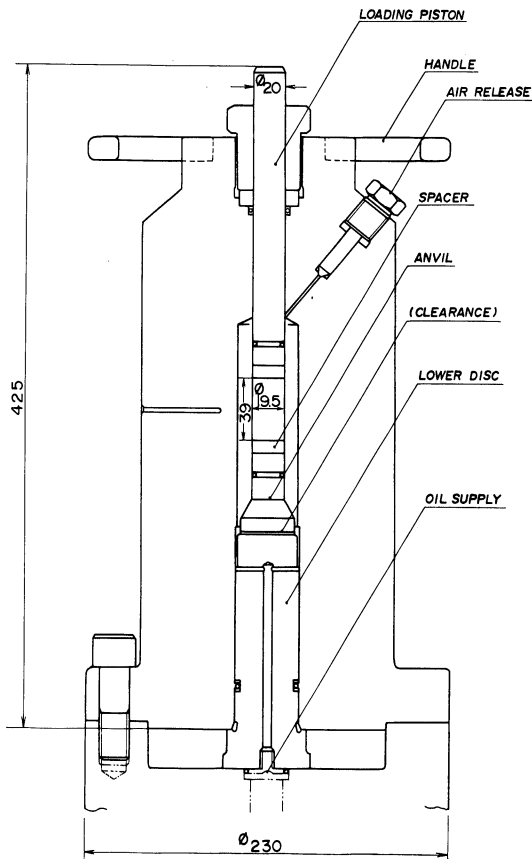


写真3 ピストン部組立図
 上段は透明熱収縮チューブ使用
 中段は銅スリーブ
 下段はリード線取出し用テフロン製下部加圧盤使用

力が発生するまで、軸荷重はしばらくの間一定に保たれる（第8図）。それ故、静水圧下で供試体の縮む量 Δl_0 はレコーダー上で直ちに読み取ることができる。それに対し、本試験機の場合、下部加圧盤が三軸セルの下部に接触して固定されている（第5図、第6図）、すなわち、第7図のアンビルと圧盤台が連結したような構造になっている。そのため、側圧を加えても上

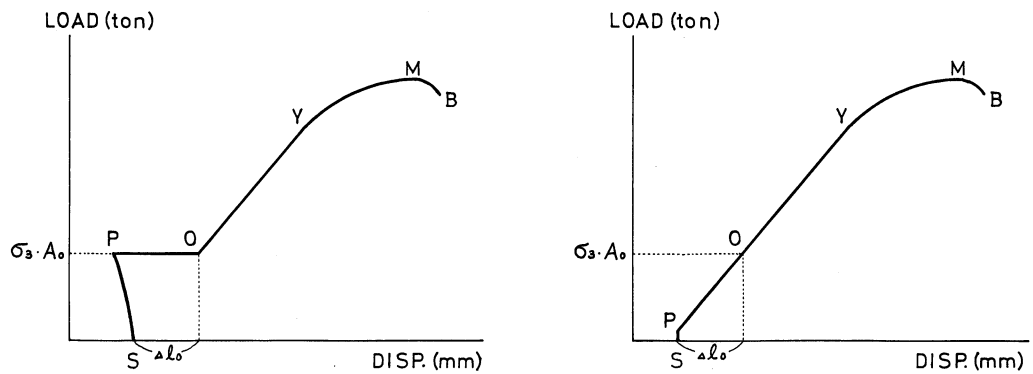


第7図 新潟大学三軸試験機の高圧容器

記のような浮き上がりの現象は見られず、供試体はそのヤング率に応じて伸びようとする分だけ、わずかな軸荷重が発生するだけである(第8図)*。したがって、普通の荷重-変位曲線上では、いつ静水圧に達したかも、上述の Δl_0 も知ることができない。そこで、後述のような CPU を付設して、刻々と変わる断面積に側圧を掛けた値と軸荷重が等しくなる点を求めるようにしたのである。しかし、シールが不完全で油もれが起こると、油が供試体とピストンを押し上げるため、その瞬間に側圧に見合った軸荷重が発生し、試験が失敗したことを知ることができるという利点がある。従来の試験機の場合、油もれのため供試体中に油が浸み込み、実際は有効封圧ゼロの間隙圧試験をやっていたとしても、失敗を知る方法がない。試験終了後、供試体の油による汚染を調べてもわからないのが普通である。試験が成功した場合でも、供試体の破壊に伴ってしばしばスリーブが破れるからである。

(3) 载荷フレーム

直径 60mm の鋼製 4 本柱から成り立って



第8図 荷重-変位曲線の例

左図: 新潟大学三軸試験機の記録 右図: 鹿児島大学三軸試験機の記録 (CPU 未使用)
 いずれも S 点でまず側圧を一気に所定値まで加え、その後軸荷重を負荷する方法をとった場合の記録である。

S: ピストンとロードセルがタッチした点, P: 所定の側圧に達し、軸荷重負荷開始, O: 偏差応力が発生し、せん断開始, Y: 降伏点, M: 最大強度点, B: 破壊点

* すなわち、差応力が発生するまでの間、供試体は引張応力状態におかれることになる。それ故、なるべく軸荷重と側圧が釣り合いを保つようしながら、同時にすこしずつ負荷しなければならない。これに対し、新潟大学の試験機では、常に静水圧状態におかれているので、このような問題は起きないが、引張試験を行うことができない。

いる。供試体の大きさを変えて大型の三軸室を使用する場合にそなえ、ストロークは余裕をとってある。頭部にはチェンブロックが取り付けられるようになっており、これで三軸室をつり上げて、立てたまま組み立てられるようになっている（写真2）。そのため、組立時間を大幅に短縮することができる。

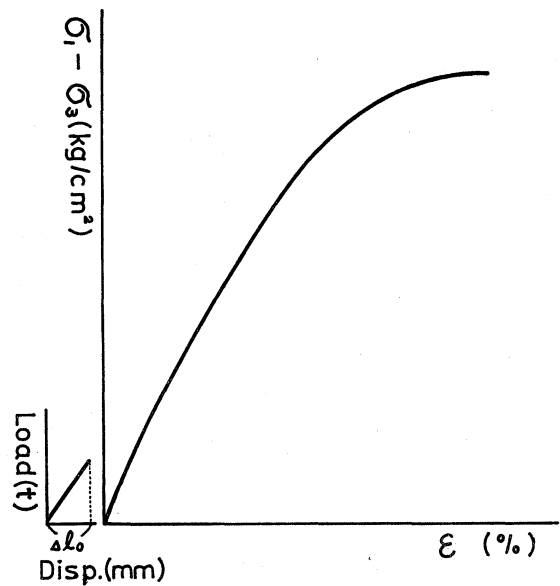
(4) 計測

軸荷重はストレインゲージタイプのロードセルで測定する。精度は $\pm 1\%$ /FS 以内である。レンジはフルスケール 50 ton および 20 ton の 2 段切換えになっている。側圧および間隙水圧は、径 300 mm の高精度型ブルドン管式圧力計 (HEISE 社製) を用いている。変位は差動トランスタイプ変位計 (精度 $\pm 1\%$ /FS) で検出するが、試験の性格に応じて、フルスケール 5 mm のものと 10 mm のものを使いわけする。レンジは 2 段切換え ($\times 1$ および $\times 1/2.5$) になっている。これらのうち、間隙水圧を除く軸荷重・側圧・変位は 199.9 mV ($3^{1/2}$ 桁) のデジタルパネルメーターに表示されるとともに、CPU に接続され、補正演算に用いられる。このように制御盤にデジタル表示されるため、ピストンとロードセルのタッチなど、すべて制御盤の前から動かずに確認できる。

なお、変位計はピストン上部と三軸セルの間に設置し (第 5 図, 写真 2), なるべく供試体に近い部分の変位を検出するようにした。従来の試験機のように、ピストンとフレームあるいはラムと三軸セルの間の変位を測定する方式では、ロードセルの変形をはじめ、さまざまな要素が混入してきて、供試体の変位を正しく示さないおそれがある。試みにラムのさがる速度で変位制御を行いながら供試体の変形を測定すると、岩石が降伏して流動している段階では、ラムのさがる速度とはほぼ同じ速度で供試体もひずんでいるが、それ以前の弾性変形の段階では、普通の花崗岩で 30~40% ひずみ速度が遅くなる。

(5) 補正演算装置 (Compensation Processor Unit: CPU)

断面補正および試験機自体の特性の消去のためにマイクロコンピュータを用いてデジタル演算を行っている (補正式については次章参照)。この装置のマイクロプロセッサはインテル 8080 を用いており、クロックは 1 M Hz である。また、ROM は 256 バイトのチップを 2 個使用しており、RAM は 1 k バイトである。三軸試験の場合、供試体の断面積は、静水圧に達するまでは減少するが、差応力が発生した瞬間から増加に転じる。したがって、静水圧に達した瞬間を知ることが非常に重要であるが、前述したように、本試験機では構造上直接それを知ることができない。そこで、静水圧下では、軸方向の縦ひずみと同じ割合で半径方向も縮むと仮定して断面積を計算し、この断面積に側圧を掛けた値が軸荷重と等しくなった瞬間を求めるようにしてある。すなわち、記録紙上において、静水圧に達するまでは通常の荷重-変位曲線を書かせ、静水圧に達した瞬間に原点を 1 cm 右へずらし



第 9 図 CPU 使用時の記録例
左図: 静水圧に達するまでの荷重-変位曲線
右図: 差応力-ひずみ曲線

て、以後は差応力-ひずみ曲線を書かせるようになっている（第9図）。したがって、静水圧下での縦ひずみ Δl_0 は、前者の荷重-変位曲線において、最終点の X 座標から読み取ることができる。なお、記録紙のレンジは、応力の場合、20cm フルスケールで 20 ton/cm^2 および 5 ton/cm^2 、ひずみの場合、20cm フルスケールで 20% および 5% のそれぞれ 2 段切換えになっている。もちろん、この CPU を通さずに、プリアンプから直接レコーダーに出力させ、荷重-変位曲線を書かせることも可能である。

(6) 自記記録計

自記記録計は 2 ペン式の XYYT レコーダー（横河電機 3036 型）を用いている。タイムマーカーを入れることもでき、その刻みは、0.5, 1, 5, 10 および 30 分の 5 種類ある。また、低速度紙送り装置（横河電機 3089 型）も付属しているため、クリープ試験の場合、ひずみ-時間曲線を書かせることも可能である。送り速度は、毎時 2, 6, 20 および 60cm の 5 段階切換えになっている。

(7) 加熱装置および温度制御方式

温度は、1.25kw のバンドヒーター 2 本によって、三軸セルの外側から加熱する外熱方式をとっている。最高 200°C まで加えることができるが、安全のため加温試験専用的高温用三軸室を用いる（第6図）。温度は、熱電対を三軸セルに差し込んで測定し、デジタル指示電流出力形 PID 調節計（CHINO DD 163 型）を用いて制御する。なお、O-リングや特殊パッキンを熱から保護するため、高温用三軸室では、ピストンブッシュの部分と下部加圧盤の部分に冷却水を流す（5 l/min）しくみになっている。

(8) 油圧ユニット

すべての油圧系統に油を供給する油圧ユニットは、定格圧力 210 kg/cm^2 、吐出量約 7 l/min（60Hz の場合）のものを使用し、これの駆動には 3 相交流 200V, 3.7kw のモーターを用いている。なお、油温の冷却には 15 l/min の冷却水が必要である。

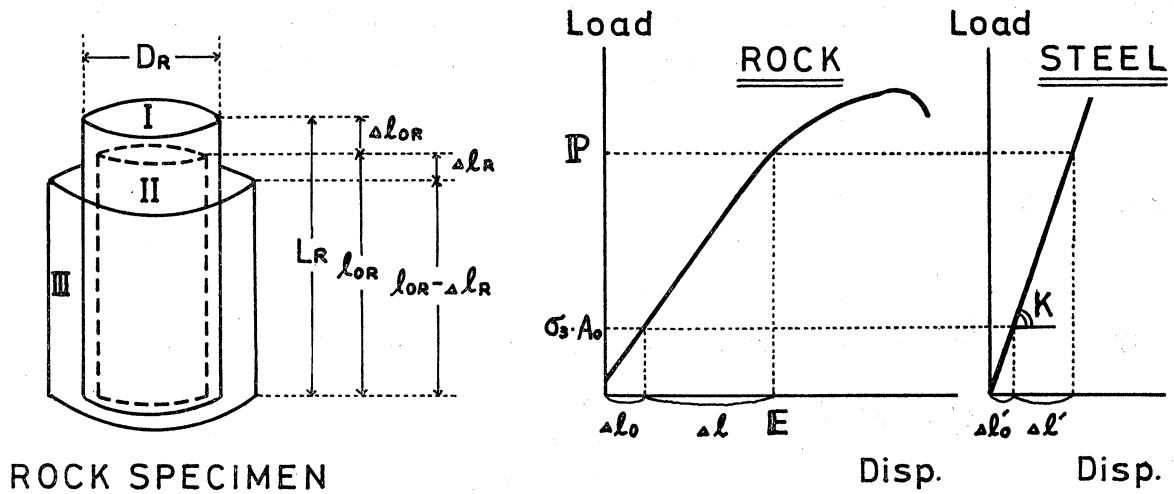
補正計算式

断面補正計算に際し、ひずみを求めるための基準となるデータは、変位計の計測値である。しかし、その値の中には、ピストン・スペーサー 2 個および下部加圧盤（以下、一括してピストン系という）の縮んだ量も当然含まれている。したがって、これを差し引く必要がある。以下、第 10 図および第 1 表に示す記号を用いて説明する。添字の R は岩石供試体、 S はピストンと同質の材料で作られたスチール標準試料、 P はピストン系を示す。

まず、ピストン系の変位を求めるために、岩石供試体の代わりにスチール標準試料を用いて、試験を行ってみる。このとき、標準試料もピストン系も、同じ材質で作られているから、同じ圧力下でのひずみは等しい。

$$\begin{aligned} \therefore \frac{\Delta l_{0S}}{L_S} &= \frac{\Delta l_{0P}}{L_P}, \quad \frac{\Delta l_S}{l_{0S}} = \frac{\Delta l_P}{l_{0P}} \\ \therefore \frac{\Delta l_S}{\Delta l_P} &= \frac{l_{0S}}{l_{0P}} = \frac{L_S - \Delta l_{0S}}{L_P - \Delta l_{0P}} = \frac{L_S}{L_P} \cdot \frac{1 - \frac{\Delta l_{0S}}{L_S}}{1 - \frac{\Delta l_{0P}}{L_P}} = \frac{L_S}{L_P} \end{aligned}$$

ところで、この試験でも、やはり計測値にはピストン系の縮んだ量が含まれているから、



ROCK SPECIMEN

第10図 記号の定義

I: 試験前の岩石供試体 II: 静水圧下 III: 変形中

第1表 記号の定義

〈供試体等の実際の長さ〉	〈記録紙上での読取値〉
L_R : 試験前の岩石供試体の長さ=39.0 mm	P : 軸圧 (デジタルパネルメーターにも表示)
D_R : 試験前の岩石供試体の直径=19.5 mm	σ_3 : 側圧 (デジタルパネルメーターにも表示)
L_S : 試験前のスチール標準試料の長さ=39.0 mm	E : 岩石供試体を用いた試験での軸圧 P における総変位位置 (デジタルパネルメーターにも表示)
L_P : 試験前のピストン系の長さの総計=286 mm	① 岩石供試体を用いた試験の場合
l_{0R} : 静水圧状態での岩石供試体の長さ	Δl_0 : 静水圧状態における変位量= $\Delta l_{0R} + \Delta l_{0P}$
l_{0S} : 静水圧状態でのスチール標準試料の長さ	Δl : 軸圧 P 下における偏差応力による変位量= $\Delta l_R + \Delta l_P$
l_{0P} : 静水圧状態でのピストン系の長さの総計	② スチール標準試料を用いた試験の場合
Δl_{0R} : 静水圧状態での岩石供試体の短縮量= $L_R - l_{0R}$	$\Delta l_0'$: 静水圧状態における変位量= $\Delta l_{0S} + \Delta l_{0P}$
Δl_{0S} : 静水圧状態でのスチール標準試料の短縮量= $L_S - l_{0S}$	$\Delta l'$: 軸圧 P 下における偏差応力による変位量= $\Delta l_S + \Delta l_P$
Δl_{0P} : 静水圧状態でのピストン系の短縮量= $L_P - l_{0P}$	K : 荷重-変位グラフにおける直線の傾き= $(P - \sigma_3 \times A_0) / \Delta l'$
Δl_R : 軸圧 P のときの偏差応力による岩石供試体の短縮量	
Δl_S : 軸圧 P のときの偏差応力によるスチール標準試料の短縮量	
Δl_P : 軸圧 P のときの偏差応力によるピストン系の短縮量	
A_0 : 静水圧状態での岩石供試体の断面積	
A : 軸圧 P のときの岩石供試体の断面積	

$$\Delta l_0' = \Delta l_{0S} + \Delta l_{0P}$$

$$\Delta l' = \Delta l_S + \Delta l_P$$

である。したがって、

$$\Delta l_{0P} = \frac{L_P}{L_S + L_P} \cdot \Delta l_0'$$

$$\Delta l_P = \frac{L_P}{L_S + L_P} \cdot \Delta l'$$

となる。一方、スチール標準試料～ピストン系は完全弾性体と考えてよく、荷重－変位グラフにおいても、差応力発生後はほぼ直線になるから、その傾きを K とすると、

$$\Delta l' = \frac{P - \sigma_3 A_0}{K}$$

となる。故に、

$$\Delta l_P = \frac{L_P}{L_S + L_P} \cdot \frac{P - \sigma_3 A_0}{K}$$

同様にして、岩石供試体の場合も、ピストン系の縮んだ量が含まれているから、

$$\Delta l_{0R} = \Delta l_0 - \Delta l_{0P} = \Delta l_0 - \frac{L_P}{L_S + L_P} \cdot \Delta l_0'$$

$$\Delta l_R = \Delta l - \Delta l_P = \Delta l - \frac{L_P}{L_S + L_P} \cdot \frac{P - \sigma_3 A_0}{K}$$

したがって、求める岩石供試体のひずみ (%) は

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\Delta l_R}{l_{0R}} \times 100 = \frac{\Delta l_R}{L_R - \Delta l_{0R}} \times 100 \\ &= \frac{E - \Delta l_0 - \frac{L_P}{L_S + L_P} \cdot \frac{P - \sigma_3 A_0}{K}}{L_R - \Delta l_0 + \frac{L_P}{L_S + L_P} \cdot \Delta l_0'} \times 100 \end{aligned} \quad (1)$$

次に、断面補正であるが、図にも示されているように、供試体は、試験前の形状にくらべ、静水圧状態では軸方向と半径方向の両方とも縮小する。静水圧下であるから、両者のひずみは等しいと考えてよく、静水圧状態での供試体の断面積 A_0 は、

$$\begin{aligned} A_0 &= \pi \cdot \left\{ \frac{D_R}{2} \cdot \left(1 - \frac{\Delta l_{0R}}{L_R} \right) \right\}^2 \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_R}{L_R} \right)^2 \cdot \left\{ L_R - \Delta l_0 + \frac{L_P}{L_S + L_P} \cdot \Delta l_0' \right\}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

となる。次に、差応力発生後は、供試体の断面積は変位の進行とともに増加する。ここで、岩石のポアソン比を $1/4$ と仮定すると、そのときの断面積 A は、

$$A = A_0 \left(1 + \frac{1}{4} \times \frac{\varepsilon}{100} \right)^2$$

したがって、求める差応力は

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A} - \sigma_3 = \frac{P}{A_0 \left(1 + \frac{\varepsilon}{400} \right)^2} - \sigma_3 \quad (3)$$

となる。よって、①、②、③式を連立させて解けば、差応力とひずみを求めることができる。ここで、 P 、 E および σ_3 は、デジタルパネルメーターに表示されるとともに、プレアンプから刻々入力してくる値であり、 Δl_0 は、前述したように、静水圧に達した瞬間の変位量を CPU

が自動的に読みとるようになっている。また、 D_R , L_R , $\Delta l_0'$, K は試験開始前にデジタルスイッチで置数するしくみになっている。なお、 L_S および L_P は定数で、常温用三軸室を用いた場合には、 $L_S=39.0\text{mm}$, $L_P=286\text{mm}$ (DTF の取付位置を上から約 15mm とする) である。よって、

$$I = \frac{L_P}{L_S + L_P} = \frac{286}{325} = 0.88$$

となる。

ところで、スチール標準試料を用いて実際に試験を行ってみると、 K は σ_3 によらずほぼ一定であり、 $\Delta l_0'$ はほぼ σ_3 に比例することがわかった。そこで、比例定数を J として、 $\Delta l_0' = J\sigma_3$ を①～③式に代入し、書きなおすと、

$$A_0 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_R}{L_R} \right)^2 (L_R - \Delta l_0 + I \cdot J \cdot \sigma_3)^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{E - \Delta l_0 - \frac{I}{K} (P - \sigma_3 A_0)}{L_R - \Delta l_0 + I \cdot J \cdot \sigma_3} \times 100 \quad (5)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A_0 \left(1 + \frac{\varepsilon}{400} \right)^2} - \sigma_3 \quad (6)$$

となる。したがって、④～⑥式を用いると、同じ材質のピストンを使用しているかぎり、 J と K は、一度置数してしまえば、 σ_3 のいかんにかかわらず変更する必要がない。 σ_3 をいろいろ変えて試験する機会が多いから、 $\Delta l_0'$ の置数忘れによって、試験は順調に行われても正しい記録がとれなかったというような失敗を防止することができ、非常に好都合である。そこで、制御盤のパネル前面には、毎回使用する D_R と L_R の2個のデジタルスイッチをおき、 J と K のスイッチは制御盤背面に設置して、誤操作を防ぐようにした。

おわりに

はじめに、本試験機製作の動機が、褶曲の形成機構の解明にあると述べたが、岩石の三軸試験は、断層や地震の研究、あるいは岩盤強度など応用地質学ないし土木工学の研究にとっても非常に重要である。今後、ますますさかんに行われるようになるものと思われる。それに伴って、試験機も一段と進歩していくであろう。小論が、今後の開発の参考になれば幸いである。

引用文献

- ADAMS, F.D. and NICHOLSON, J.T. (1901), An experimental investigation into the flow of marble. *Philos. Trans. Royal Soc. London*, ser. A, vol. 195, p. 363-401.
- GRIGGS, D.T. (1936), Deformation of rocks under high confining pressures. I. Experiments at room temperature. *Jour. Geol.*, vol. 44, p. 541-577.
- 星野一男 (1979), 高圧岩石変形実験機器について. 石油技協誌, vol. 44, p. 161-165.
- HOSHINO, K., KOIDE, H., INAMI, K., IWAMURA, S. and MITSUI, S. (1972), Mechanical properties of Japanese Tertiary sedimentary rocks under high confining pressures. *Geol. Survey Japan, Rept.* 244, p. 1-200.
- IWAMATSU, A. (1969), Structural analysis of the Tsunakizaka syncline, in southern Kitakami mountainous land, northeast Japan. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, vol. 23, p. 227-235.

- (1975), Folding-styles and their tectonic levels in the Kitakami and Abukuma mountainous lands, northeast Japan. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo*, sec. II, vol. 19, p. 95-131.
- and HATTORI, M. (1975), Mechanical properties of rocks within a fold — An example of the Yamanaka anticline, Niigata, Japan —. *Sci. Rep. Niigata Univ.*, ser. E, no. 3, p. 19-40.
- KÁRMÁN, T. VON (1911), Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. *Z. Verein. Dtsch. Ing.*, Bd. 55, S. 1749-1757.
- 甲藤次郎・三井 忍・小出和男 (1974), 室戸半島北東部の徳島県穴喰～高知県野根間の地質 (四万十帯地向斜における地層変形機構の研究——その1). 高知大学学術研究報告, vol. 23, 自然科学, no. 16, p. 123-133.
- 茂木清夫 (1971 a), 岩石の破壊および降伏条件 (新方式の三軸試験法による研究). 材料, vol. 20, p. 143-150.
- MOGI, K. (1971b), Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 76, p. 1255-1269.
- 大槻憲四郎・永広昌之・川上 享・北村 信 (1974), 岩石物性におよぼす孔隙水の影響. 地質雑, vol. 80, p. 391-395.