

地質調査所の高温高压岩石試験装置 —花崗岩での破壊面の形成と軸応力降下過程—

長 秋雄* 川方裕則**

Akio CHO and Hironori KAWAKATA (1997) A high-pressure, high-temperature rock testing apparatus installed at the Geological Survey of Japan —The axial stress drop process in the post-failure region of Westerly granite— *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 48(8), p. 459-468, 11 figs.

Abstract: A high-pressure, high-temperature rock testing apparatus was installed at the GSJ in 1994. The pressure vessel can achieve a confining pressure of up to 500MPa and a temperature of up to 300°C. The vessel has 24 electrical feedthroughs and 2 pore pressure feedthroughs. Specimens 50mm in diameter and 100mm in length can be tested.

Using this apparatus, dry Westerly granite specimens were loaded under a confining pressure of 100MPa, and the fracture process was controlled by maintaining a constant rate of circumferential displacement. The specimens were then unloaded from the post-failure region, and their interiors were observed by an X-ray CT scan.

The axial stress drop process in the post-failure region was composed of three stages. In the first stage, the stress drop rate was very slow (several MPa/min), and many cracks were observed on the specimen's surface. In the second stage, the stress drop rate became ten times faster than in the previous stage. A shear fracture nucleated near the specimen surface and grew stably toward the specimen interior. In the final stage, the fracture penetrated dynamically through the specimen accompanied by a dramatic acceleration of the stress drop.

要 旨

地質調査所の高温高压岩石試験装置は、封圧500MPa・温度300°C・間隙水圧200MPaまでの実験条件が達成可能である。これは地下15kmから20kmの地質環境に相当する。標準供試体の大きさは直径50mm・長さ100mmである。

この装置でウェスタリー花崗岩の破壊実験を、乾燥供試体を用い封圧100MPa・常温状態・周変位速度一定条件で行った。その結果、強度破壊点以降において3段階の軸応力の降下速度（毎分数MPa・毎分数10MPa・動的降下）が観測された。

軸応力降下の各段階で载荷をやめ、供試体を回収し、供試体内部の破壊面をX線CTスキャンで観察した。3段階の応力降下速度はそれぞれ、1)供試体でのクラックの発生による強度低下、2)供試体の表面付近での破壊核の出現と破壊面の供試体内部に向けて安定的な拡大、3)その後の破壊面の動的な拡大、に対応することが判明した。

*地震地質部 (Earthquake Research Department, GSJ)

**京都大学防災研究所地震予知研究センター (Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University; Uji, Kyoto, 611 Japan)

1. はじめに

地質調査所では、地下の温度・圧力環境での岩石の物性の測定、岩石の破壊機構・すべり機構の解明を目的として、高温高压岩石試験装置を平成6年に導入した。この装置の圧力容器は、最大封圧500MPa・最高温度300°Cの高温・高压環境を実現できる。これは地下15-20kmまでの地質環境に相当する。ここでは、本装置の説明と本装置で行ったウェスタリー花崗岩の破壊実験の結果を報告する。

2. 高温高压岩石試験装置

2.1 装置の油圧系統

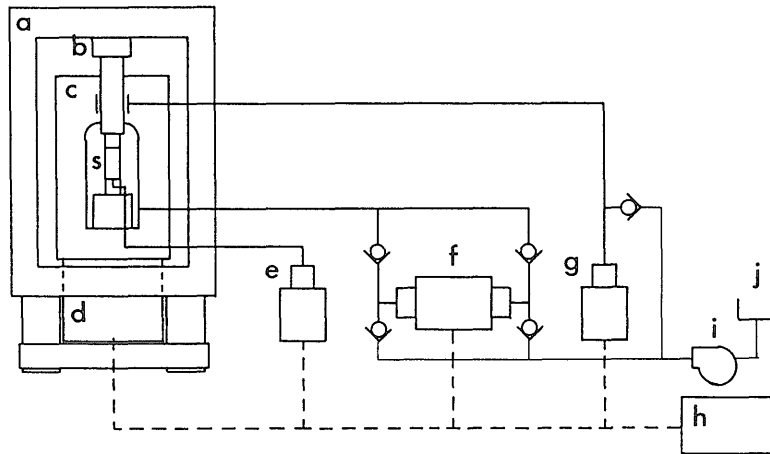
本装置の油圧系統を、第1図に模式的に示す。図中にaからjで示した各構成要素について、以下で説明する。図中の太い実線は高压ラインを、細い実線は低压ラインを、破線は一次圧ラインを示している。

a. 軸荷重载荷フレーム (MTS315.04S)

軸荷重の反力を保持する鉄製の枠。軸アクチュエータと設置架台を含めた全高は3651mmである。

フレーム上板：高さ 583mm・幅1142mm・奥行455mm

Keywords: Triaxial test, High-pressure vessel, Controlled clearance bearing, Granite, Fracture, X-ray CT scan.



第1図 高温高压岩石試験装置の油圧回路の概略図 a:軸加重載荷フレーム, b:ロードセル, c:圧力容器, d:軸アクチュエータ, e:間隙圧増圧器, f:封圧増圧器, g:シール圧増圧器, h:油圧源, i:フィードポンプ, j:オイル溜め, s:供試体, 太実線: 高压ライン, 細実線: 低压ライン, 破線: 一次圧ライン

Fig. 1 A schematic diagram of the hydraulic circuit for the high-pressure, high-temperature rock testing apparatus at GSJ. a: load frame, b: load cell, c: pressure vessel, d: actuator, e: pore pressure intensifier, f: confining pressure intensifier, g: controlled clearance pressure intensifier, h: hydraulic power supply, i: feed pump, j: oil reservoir, s: specimen, thick solid line: high-pressure line, thin solid line: low-pressure line, broken line: hydraulic line.

支柱 (2本): 高さ2005mm・幅 225mm・奥行452mm
 フレーム下板: 高さ 426mm・幅1140mm・奥行787mm
 フレーム剛性: 13000kN/mm (メーカー計算値)

b. 外部ロードセル

軸荷重測定用のロードセル (MIL951-05).

容量5500kN.

c. 圧力容器

最高封圧500MPa, 最高温度300°Cを達成可能。この中に供試体を設置する。圧力容器の概略を第2図に示す。

容器形状: 外径559mm・高さ1353mm

内部空間: 直径178mm・高さ 394mm

試料空間: 直径178mm・高さ 200mm

標準供試体: 直径50mm・高さ 100mm

最高封圧: 500MPa

最高温度: 300°C

加熱方式: 内部ヒーター

封圧オイル: Monoplex DOS (ダイエステル油)

プッシュロッド: 直径76mm・長さ483mm

球座: 直径76mm・高さ76mm

フィードスルー

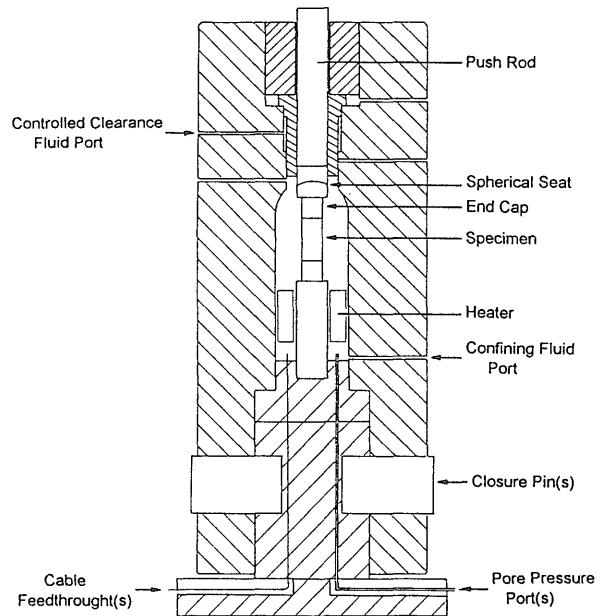
計測用電極: 24本

内部熱電対: 3対

内部ヒーター用電源電極: 1対

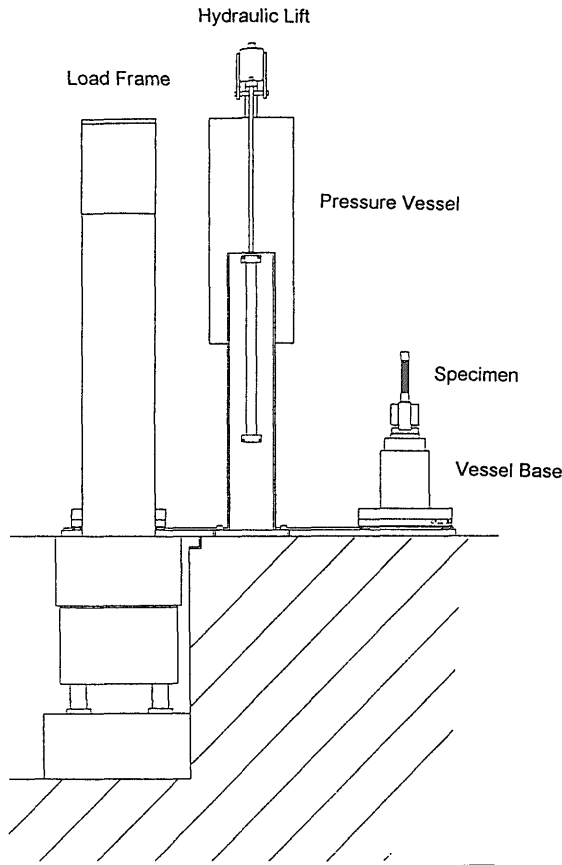
間隙水圧配管: 2本

直径76mmのプッシュロッドを通して圧力容器内の供試体に軸荷重を載荷する。軸アクチュエータの最大荷重は5500kNであり, 最高封圧500MPa状態で軸差荷重を最



第2図 圧力容器の概略図 プッシュロッドとシリンドラーの摺動部のシール方法に間隙調整法を採用。圧力容器の内径は178mm, 供試体の大きさは直径50mm・高さ100mm, 載荷軸の剛性は780kN/mmである。

Fig. 2 Schematic view of the pressure vessel. A controlled clearance bearing is used as a pressure seal. Inner diameter of the pressure vessel is 178mm. The specimen is 50mm in diameter and 100mm in length. The stiffness of the load train is 780kN/mm. The stiffness of the load frame, including a load cell and spacer, is 3400kN/mm.



第3図 装置の外観図
Fig. 3 An illustration of a system assembly.

大3200kN (直径50mmの供試体では差応力1.6GPa相当)まで载荷可能である。圧力容器の内部から外部へ計測用のフィードスルー電極が24本あり、圧力容器内の供試体の周変位・歪み等の物理量の直接測定が可能である。

圧力容器は、耐圧円筒部とベース部に二分可能な構造になっている。耐圧円筒部を油圧昇降機で着脱させ、試料空間を外部に露出することができる(第3図)。これにより、圧力容器内への供試体の取り付け作業を簡便に行うことができる。耐圧円筒部とベース部は4本のシアピンを挿入して結合する。圧力容器はカートに乗せて、軸荷重載荷フレームからの出し入れを行う。

d. 軸アクチュエータ

軸荷重を発生させる油圧アクチュエータ (MTS315.04S)

ピストンロッド直径: 381mm

ピストン直径: 584mm

ストローク長: 100mm

最大圧縮荷重: 5500kN

最大引張荷重: 3190kN

制御方法: クローズドループ式油圧サーボ制御

e. 間隙圧増圧器

供試体の間隙流体圧を最高200MPaまで増圧する。

種別: 単動型増圧器

増圧比: 10.9

ストローク長: 76mm

吐出量: 1ストローク当たり173cm³

使用間隙流体: 水

制御方法: クローズドループ式油圧サーボ制御

f. 封圧増圧器

圧力容器内の封圧を最高500MPaまで増圧する。

種別: 複動式増圧器

増圧比: 51.8

ストローク長: 203mm

吐出量: 1ストローク当たり90.5cm³

封圧オイル補給圧: 0.7MPa以上

封圧オイル: Monoplex DOS

制御方法: クローズドループ式油圧サーボ制御

圧力容器の摺動部シールに間隙調整法(後述)を採用しているため、常に圧力容器へのオイルの供給が必要である。そのため、吐出量に制限のない複動式の増圧器を用いている。第1図に示すように、4つの逆止弁が設けられ、圧力容器への吐出と、フィードポンプからのオイルの補給が行われる。

g. シール圧増圧器

圧力容器で用いている間隙調整法でのシール圧の増圧器。

種別: 単動式増圧器

増圧比: 32.6

ストローク長: 102mm

吐出量: 1ストローク当たり39.5cm³

シール圧オイル: Monoplex DOS

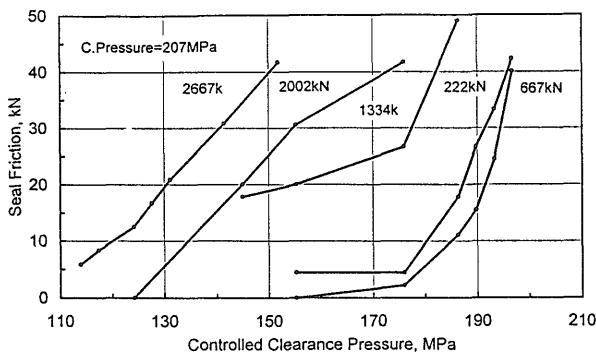
シール圧オイル補給圧: 0.7MPa以上

シール圧調整方法: 圧力制御弁を手動調整

圧力容器のプッシュロッドとシリンダーの摺動部のシール方法として、シール部での摩擦抵抗が少ない間隙調整法(例えば、Griggs *et al.* 1960; 蒔田・黒岩, 1969)を採用している。これは、プッシュロッドとシリンダーの間のすき間をシリンダーの外側の別系統の油圧(シール圧)によって調整し、すき間にわずかなオイルを介在させて、その粘度によって内部の高圧をシールする方法である。シール部よりオイルが漏れるが、サーボ制御により封圧を一定に保持するように封圧増圧器からオイルが常に吐出される。

シール圧とシール部での摩擦抵抗の大きさとの関係の一例を第4図に示す。これは、封圧207MPa・常温状態での結果である。軸差荷重を各曲線に付した数値を中心値として両振幅44.5kN・周期10秒で振動させ、外部ロードセルと内部ロードセルの荷重差からシール部での摩擦抵抗が求められた。同様の摩擦抵抗の測定が封圧69MPa・345MPa・483MPa、温度100°C・200°Cで行われ、シール圧のオペレーションカーブが作成されている。

第4図に示すように、シール圧を減少させるとシール



第4図 間隙調整法でのシール圧とシール部での摩擦抵抗の関係 試験条件は封圧100MPa・常温状態である。各線に付した数値は、軸差荷重の値である。

Fig. 4 Relationship between seal friction and controlled clearance pressure. The test was performed under a confining pressure of 100MPa and at room temperature. The number on each curve shows the value of the deviatoric axial load.

部での摩擦抵抗も減少する。封圧207MPa以上では、軸差荷重の大きさに応じて、シール圧を封圧より30MPaから100MPa小さい値に設定すると、摩擦抵抗ゼロの状態が得られる。しかし、シール圧を下げすぎるとシール部からのオイルの漏れが多くなり、封圧増圧器のピストンが折り返す際の封圧の脈動(後述)が大きくなることに注意しなければならない。

軸荷重が大きくなるとプッシュロッドの周方向の膨らみが無視できなくなり、シール圧の設定に影響する。摩擦抵抗を一定に保つには、軸荷重の増加に応じてシール圧を減少させる(図中での横方向の移動)。シール圧の変更は、シール圧増圧器の一次側の配管の圧力制御弁を手動で調整して行う。

温度100°C・軸差荷重667kNでの摩擦抵抗は、常温状態のそれと同程度である。しかし、温度200°C・軸差荷重667kNでの摩擦抵抗は、常温状態での値よりおよそ50kN大きい。温度200°Cより高い温度では、圧力容器内での荷重測定ができず、摩擦抵抗は測定されていない。

h. 油圧源

軸アクチュエータ・間隙水圧増圧器・封圧増圧器・シール圧増圧器の駆動圧(一次圧)を発生する油圧源(MTS 506.02F)。

吐出量: 毎分19.6リットル

吐出圧: 21MPa

作動油: Mobil DTE 25

冷却方法: 水冷式(所内雑用水配管を接続)

設置場所: 屋外ポンプ室

i. フィードポンプ

封圧増圧機及びシール圧増圧機の二次側シリンダーにオイルを補給するためのポンプ。フィード圧は、圧力調整

弁によって1.7MPaに設定されている。

j. オイル溜め

封圧オイルおよびシール圧オイルの補給用のオイル溜め。

2.2 計測機器

本装置の各種計測機器とその設置位置は、以下の通りである。

(1) 軸荷重

軸荷重載荷フレームのフレーム上板の下に取り付けられたロードセル(容量5500kN, MIL951-05)で計測する。

(2) 封圧

圧力容器の排出側の配管に取り付けた圧力変換器で測定する。

(3) 間隙水圧

間隙水の注入側の圧力と排出側の圧力を、それぞれの配管に取り付けた圧力変換器で測定する。

(4) 軸アクチュエータ変位

軸アクチュエータのピストンロッド上面の変位量を、軸アクチュエータ内部に取り付けた変位変換器(LVDT)で計測する。ここで計測される変位量は、載荷フレームの伸び・ロードセル及び加圧盤の縮み・載荷軸の縮みの総和に相当する。

(5) 軸変位

圧力容器上面とプッシュロッド上面の高さを軸変位計(MTS632.06H-30)で測定する。ここで測定される変位量は、封圧・温度条件が一定で圧力容器の変形がないと仮定すると、供試体を含む載荷軸の変形量に相当する。

この軸変位計を用いて、 10^{-6} mm/sec以上での軸変位速度の制御が可能である。載荷軸の剛性(後述)を考慮すると、この変位速度は供試体において 3×10^{-8} /secに相当する。

(6) 供試体周変位

供試体に周変位計(MTS632.92S)を取り付けて計測する。この周変位計は封圧140MPa・温度175°C(24時間では200°C)の環境まで使用可能である。

(7) 圧力容器内温度

圧力容器内の供試体の上部・中央部・下部での温度を、3つの熱電対により計測する。内一つは温度制御用に用いられる。

(8) 計測用フィードスルー

圧力容器内から24本の計測用フィードスルーがあり、周変位計・ひずみゲージ等の計測に用いる。

2.3 装置の剛性

本装置の軸荷重載荷系は、軸荷重載荷フレーム、ロードセル・加圧盤・載荷軸(プッシュロッド・球座・エンドキャップ・(供試体)・エンドキャップ・圧力容器台座部分)、軸アクチュエータからなり、載荷系の剛性はこれ

ら各要素の剛性に依存する。

供試体に弾性率が既知のスチール供試体を用い、载荷中のアクチュエータ変位量と軸変位計での変位量から装置の剛性を以下の式より求めた。その結果、軸荷重载荷フレームにロードセルと加圧盤を含めた剛性 (K_{frame}) は 3400kN/mm 、载荷軸の剛性 (K_{LT}) は 780kN/mm である。

供試体の軸変形量は、軸変位計の変化量から剛性値から算出される载荷軸の変形量を差し引いて求める。

フレーム剛性値 (K_{frame}): 3400kN/mm

$$1/K_{frame} = 1/K_{LVDT} - 1/K_{O6}$$

载荷軸の剛性値 (K_{LT}): 780kN/mm

$$1/K_{LT} = 1/K_{O6} - 1/K_{steel}$$

ここで、

$$K_{LVDT} = \text{軸荷重変化量} / \text{アクチュエータ変位量}$$

$$K_{O6} = \text{軸荷重変化量} / \text{軸変位量}$$

$$K_{steel} = \text{スチール供試体の剛性}$$

2.4 制御及びデータ収録

本装置の制御は、デジタルコントローラ (MTS TestStar II) により行われる。このデジタルコントローラのチャンネル数は30チャンネルで、データ収録は16ビット、サンプリング 5kHz (最速) で行われる。最大4個までのサーボバルブを同時に動作することができる。その応答速度は最速で 5kHz である。現在は3個 (軸アクチュエータ・封圧増圧器・間隙水圧増圧器) のサーボバルブを用いている。

デジタルコントローラにはコンピュータ (Compaq Deskpro 5/60m) が接続されており、デジタルコントローラの環境設定、試験のプログラム、データの収録等はコンピュータ上のソフトウェア (MTS TestStar II と MTS TestWare) によって行う。このソフトウェアでは、試験での種々の制御モードの組合せや、複数の信号の演算値をフィードバック信号に使うことが可能である。また、ディスプレイ上にリアルタイムで測定値及びグラフを表示することができる。

2.5 圧力容器内の内部軸応力の測定方法

圧力容器内のシール部に摩擦抵抗があるため、外部ロードセルで測定される軸荷重では、圧力容器内での真の軸荷重を測定することができない。圧力容器内にロードセルを置いて荷重を測定することが望ましいが、本装置の最高荷重・最高圧力・最高温度環境まで使用可能なロードセルは存在しない。

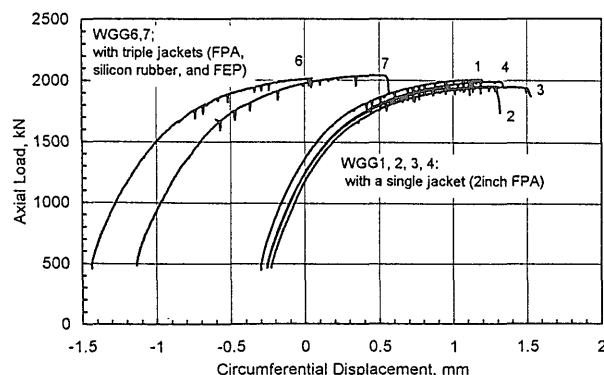
そのため、エンドキャップにひずみゲージを貼り、内部ロードセルの代用としている。測定されるひずみ量にエンドキャップのヤング率と断面積をかけ、内部荷重を求める。高圧・高温環境下でのひずみ測定は、測定に及ぼす圧力と温度の効果があり、正確に行うことは難しい。

しかし、圧力・温度環境が定常状態であれば、測定されるひずみの変化量はエンドキャップでの内部荷重変化量に比例すると考えることができる。また、载荷中の摩擦抵抗が一方方向にのみ働き、軸荷重の増加に伴うシール圧の変更を適正に行えば摩擦抵抗の値は大きく変わらないと考えられるので、载荷中のエンドキャップの応力ひずみ曲線から、その封圧・温度環境でのエンドキャップのヤング率を求めることができる。この方法は、荷重のゼロ点設定ができないが、圧力容器内の軸荷重変化を正しく求めることができる。

2.6 供試体のジャケット方法

圧力容器内の供試体は、封圧媒体のオイルが供試体内部に侵入しないように、表面を被覆する。現在は、テフロン収縮チューブ・シリコンゴム熱収縮チューブ、テフロン熱収縮チューブを3層に重ねて、ジャケットを行っている。それぞれの収縮後の肉厚は 0.5mm 、 2.6mm 、 0.5mm である。エンドキャップのOリングに収縮チューブを被せて、ジャケット端面のシールを行う。1層目のテフロンチューブを収縮させ、供試体と上下のエンドキャップを固定する。2層目に肉厚のシリコンゴム熱収縮チューブを被せることで、供試体が破断した時でも、ジャケット全体の破れを防ぐことができた。3層目のテフロンチューブは、供試体に取り付ける周変位計のチェーンローラーのすべりをよくするためである。現在用いているテフロン熱収縮チューブとシリコン熱収縮チューブの耐熱限界はそれぞれ 200°C 、 250°C である。

この3層ジャケットで被覆された供試体と、テフロン熱収縮チューブ1層のみの供試体の、封圧 100MPa での軸差荷重载荷中の周変位の変化を、第5図に示す。この図に示されるように、双方の曲線の形状に差異は認めら



第5図 3重ジャケットと1重ジャケットとの比較 軸差荷重载荷時においては両者の計測値に差異は見られなかった。実験条件は封圧 100MPa である。

Fig. 5 Comparison of circumferential displacement between a triple jacketed specimen and a single jacketed specimen in a triaxial compression test. Confining pressure was 100MPa .

れず、3層ジャケットであっても、軸差荷重載荷中の供試体本来の周変位を正確に計測できている。

2.7 間隙調整法の問題点

一周変位制御における軸応力の脈動

圧縮試験において供試体の強度破壊点以降の挙動を制御するために、供試体に取り付けた周変位計からの信号をフィードバック信号に用いる。周変位は、強度破壊点(ピーク強度)の前後とともに増加の変化を示すため、制御の不安定を招かない。軸荷重は、強度破壊点を境に増加から減少に転じる。軸変位量は、クラスIIの挙動では、強度破壊点を境に縮みから伸びに転じる。そのため、これらをフィードバック信号に用いた場合、制御不能になる。

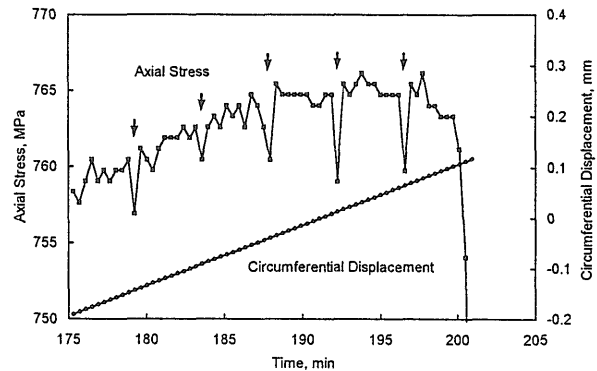
本装置では、圧力容器の摺動部のシールに間隙調整法を用いており、複動式の封圧増圧器のピストンの動きが折り返すときに、封圧が一時的に脈動(設定値からの低下と復帰)する。この脈動の大きさは、シール圧に依存する。周変位速度一定条件で軸荷重を制御している場合、封圧の一時的な脈動に反応して、軸荷重が脈動する。これは、クローズドループ式サーボ制御において、封圧低下に起因する周変位の増加によるプログラム信号からのずれを、軸荷重を減少させてたどそうとするために起こる。

第6図に、圧力容器内での軸応力の脈動を示す。試験条件は、封圧100MPa・常温状態で、供試体に3重ジャケットのウェスタリー花崗岩を用いた。シール圧は45MPaであった。周変位計は、制御プログラム通り速度一定(0.012mm/min)で増加しているが、増圧器のピストンの折り返し時に(図中の矢印)に内部軸応力が5MPa低下した。この時、外部ロードセルでの荷重は、シール部の摩擦抵抗を越えて内部荷重を変化させるために60kNの脈動があった(第7図)。増圧器のピストンはおよそ4分20秒毎に折り返しており、折り返し時に、8秒間で封圧が0.6MPa低下し、そのあと4秒間で設定圧の100MPaに復帰した。第6図と第7図では、強度破壊点付近が示されおり、最後の軸応力と軸荷重の大きな低下は、供試体の破壊にともなうものである。時間軸で190分頃に最大強度に達した後、応力はほぼ8分間一定であった。この間に2回の脈動があるが、それによる供試体が不安定化することはなかった。

3. ウェスタリー花崗岩の三軸破壊試験結果

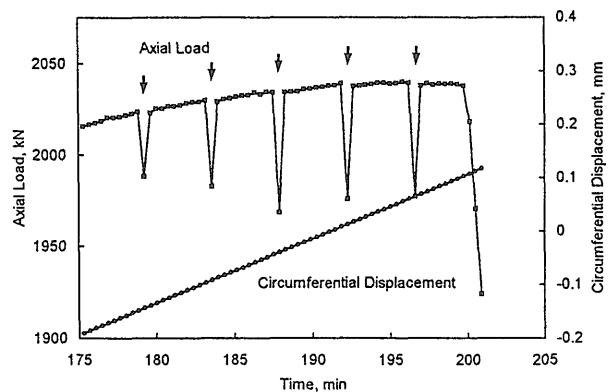
以下では、本装置で行ったウェスタリー花崗岩の破壊実験の結果を報告する。

ウェスタリー花崗岩の完全応力ひずみ曲線(供試体WGG2)を、第8図に示す。試験は乾燥供試体を用いて封圧100MPa・常温状態で行った。供試体の大きさは、



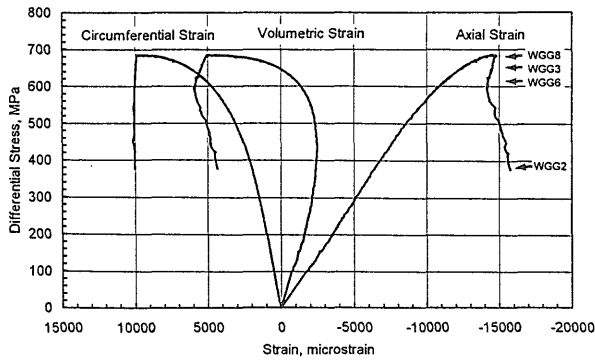
第6図 周変位速度一定実験での複動式封圧増圧器による軸応力の脈動。脈動は複動式封圧増圧機のピストンが折り返し時に生じる(矢印)。実験条件は、封圧100MPa・シール圧45MPaである。

Fig. 6 Axial stress pulse in a triaxial vessel caused by a double-acting confining pressure intensifier during a constant circumferential displacement rate triaxial test. The pulses happened at the end of the stroke. The Controlled clearance method was used to seal the inner high pressure of the triaxial vessel. The confining pressure intensifier acts continuously because a little oil leaks from a controlled clearance bearing. Confining pressure was 100 MPa. Controlled clearance pressure was 45MPa.



第7図 周変位速度一定実験での複動式封圧増圧器による外部軸加重の脈動。脈動は複動式封圧増圧機のピストンが折り返し時に生じる(矢印)。実験条件は、封圧100MPa・シール圧45MPaである。

Fig. 7 Axial load pulse, measured by the outer load cell, caused by a double-acting confining pressure intensifier. The experimental conditions are identical with that of Fig. 6. The 60kN axial load pulse is larger than the 5MPa axial stress pulse due to the seal friction of about 50kN.



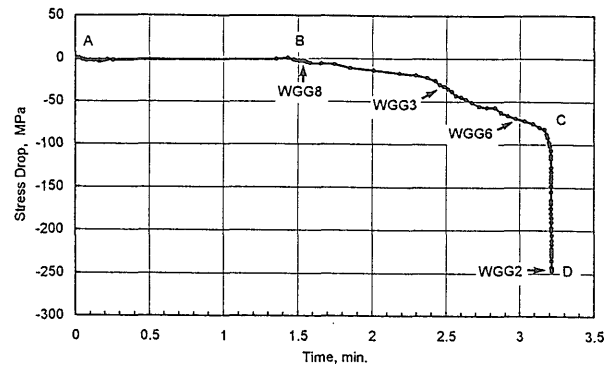
第8図 封圧100MPaでのウェスタリー花崗岩の完全応力ひずみ曲線。4つの供試体 (WGG8, WGG3, WGG6, WGG2) の除荷位置が示されている。

Fig. 8 Stress-strain diagram for Westerly granite under confining pressure of 100MPa, showing unloading points for WGG8, WGG3, WGG6 and WGG2.

直径50mm・高さ100mmであった。軸差応力600MPaまで荷重速度一定で載荷し、それ以降は周変位速度一定 (0.012mm/min) 条件で軸荷重を載荷した。応力ひずみ曲線の最終位置で試験を中断し、軸荷重を除荷した。第8図の応力とひずみはシール部での摩擦と載荷軸の変形量を補正した供試体本体のものである。強度破壊点以降の挙動はクラスIIであった。

Wawersik and Brace(1971)は、高剛性の試験器を用い、強度破壊点以降においてマニュアルによる軸荷重の除荷と載荷を繰り返してウェスタリー花崗岩の完全応力ひずみ曲線を求めている。封圧0-152MPa・常温状態で行われた彼らの結果では、ウェスタリー花崗岩の挙動はクラスIIであった。一方、Wong(1982)による、Wawersik and Brace(1971)と同じマニュアル制御で、封圧250MPa・温度150°C状態での実験結果では、ウェスタリー花崗岩の挙動はクラスIである。Tullis and Yund(1977)が行った封圧150MPa・温度300-750°C状態での軸変位速度一定条件での試験では、ウェスタリー花崗岩の挙動はクラスIである。Lockner *et al.* (1992)によるアコースティック・エミッションの発生レートによる制御試験では、封圧50MPa・常温状態でウェスタリー花崗岩の挙動はクラスIIである。これらの実験結果の相違は、岩石の強度破壊点以降の変形挙動は、封圧・温度条件によって変化する可能性があることを示唆している。

強度破壊点以降での軸応力の降下の時間経過を第9図に示す(供試体WGG2)。他の供試体でも同様な結果が得られた。軸応力降下過程で、3段階の異なる降下速度が観測された。すなわち、毎分MPa以下の非常にゆっくりとした軸応力降下(図中A-B)、軸応力降下速度が毎分10-40MPa程度の中間段階(図中のB-C)、最後に軸応力が急速に降下し供試体の破断に至る段階(図中のC-D)で



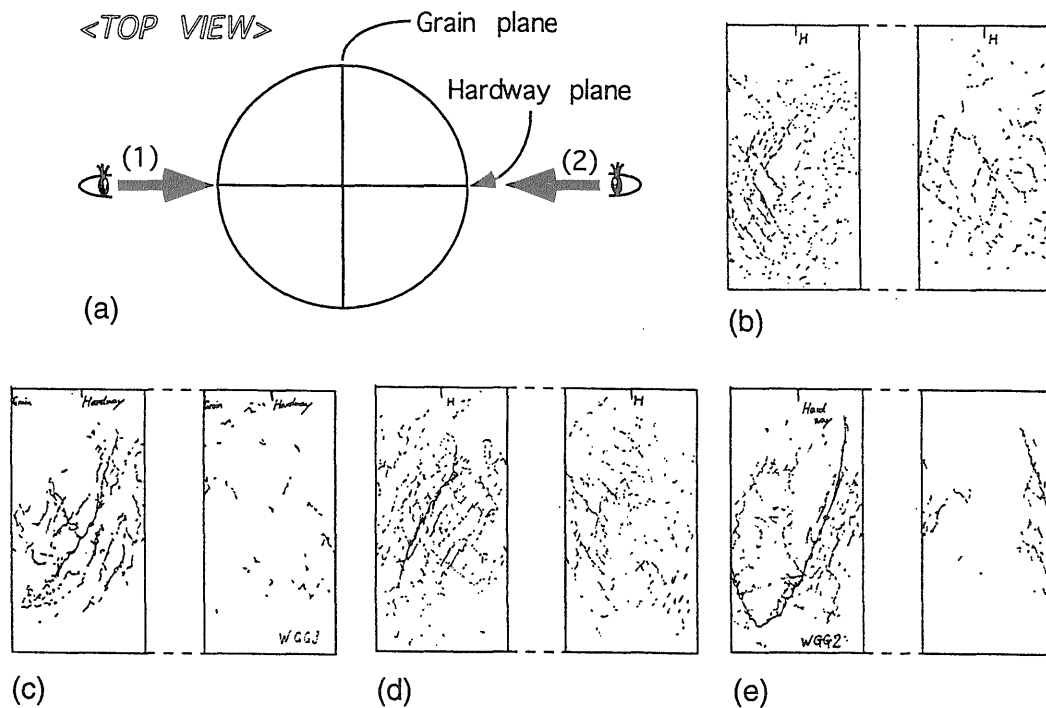
第9図 ウェスタリー花崗岩の強度破壊点以降の軸応力降下の時間変化。3段階(A-B, B-C, C-D)の軸応力降下が観測された。実験条件は、周変位速度0.012mm/min, 封圧100MPaである。4つの供試体 (WGG8, WGG3, WGG6, WGG2) の除荷位置が示されている。

Fig. 9 Axial stress drop after peak strength was measured for WGG2 in a constant circumferential displacement rate (0.012mm/min) triaxial test, showing unloading points for WGG8, WGG3, WGG6 and WGG2. Confining pressure was 100MPa. There were three stages from peak strength to fracture. In the first stage (A-B), the stress drop rate was very slow. The stress drop in the second stage (B-C) was about ten times faster than in the first stage. In the third stage (C-D), axial stress dropped dynamically, followed by fracture.

ある。

軸応力降下の各段階で試験を中断し、軸応力を急速に除荷して供試体を回収し、供試体表面と内部の破壊面の形状を顕微鏡とX線CTスキャンにより観察した(Kawakata *et al.*, 1997)。X線CTスキャン観察には、地質調査所のX線CT装置(池原, 1997)を用いた。供試体の表面を顕微鏡で観察して得られたクラックや破断面のスケッチを第10図に、X線CTスキャンによる供試体内部の観察結果を第11図に示す。各供試体(WGG8, WGG3, WGG6, WGG2)の試験を中断した時の応力状態は、第8図及び第9図に示されている。

第9図のB点付近から回収した供試体WGG8では、供試体表面に多くのクラックが存在したが、破壊面は形成されていなかった(第10図b)。X線CTでも供試体内部に破壊面は観察されなかった(第11図b)。第9図のB-C間から回収した供試体WGG3とWGG6では、供試体の片側表面の中央部に供試体軸と約30度をなす破壊面が存在した(第10図c,d)。X線CT観察により、この破壊面はそれぞれ表面から深さ5mm, 7mmまで達していた(第11図c,d)。第9図のD点から回収した供試体WGG2では、供試体を横切って破壊面が形成されていた(第10図e, 第11図e)。これらの結果から、ウェスタリー花崗岩では破壊面



第10図 強度破壊点以降で除荷・回収した供試体表面のクラック分布。a)は観察した方向を示している。b),c),d),e)は、それぞれ供試体WGG8, WGG3, WGG6, WGG2の観察結果である。供試体を除荷した時の応力状態は第8図と第9図に示されている。
 Fig. 10 Sketched images of surface features. a): Direction in which specimen surfaces were observed. Images of b) WGG8, c) WGG3, d) WGG6 and e) WGG2. The unloading point of each specimen is shown in Fig.8 and Fig.9.

の核が供試体の表面で形成され、それが供試体内部に向けて拡大したことがわかる。Lockner *et al.* (1992)によるウェスタリー花崗岩供試体内部で発生したアコースティック・エミッションのロケーション結果でも、強度破壊点以降において供試体表面での破壊核の形成と供試体内部への拡大が確認されている。

以上の結果をとりまとめると、ウェスタリー花崗岩の周変位速度一定条件下での破壊面の形成とそれに伴う軸応力の降下過程は、次のように説明される。供試体内部でのクラックの発生により、軸応力がゆっくりと低下する(第9図A-B)。破壊面の核が供試体表面に形成され(第9図B点)、この破壊面は安定的に供試体内部に向けて拡大し、これにともない軸応力は一桁大きい速度で降下する(第9図B-C)。その後、破壊面の拡大は不安定になり、供試体内部を急速に拡大し供試体が破断する。この破壊面の急速な拡大にともない軸応力も急激に降下する(第9図C-D)。破壊面が急速に拡大し始める大きさは、WGG6での観測された破壊面の大きさ(長さ60mm・深さ7mm)程度と考えられる。

4. まとめ

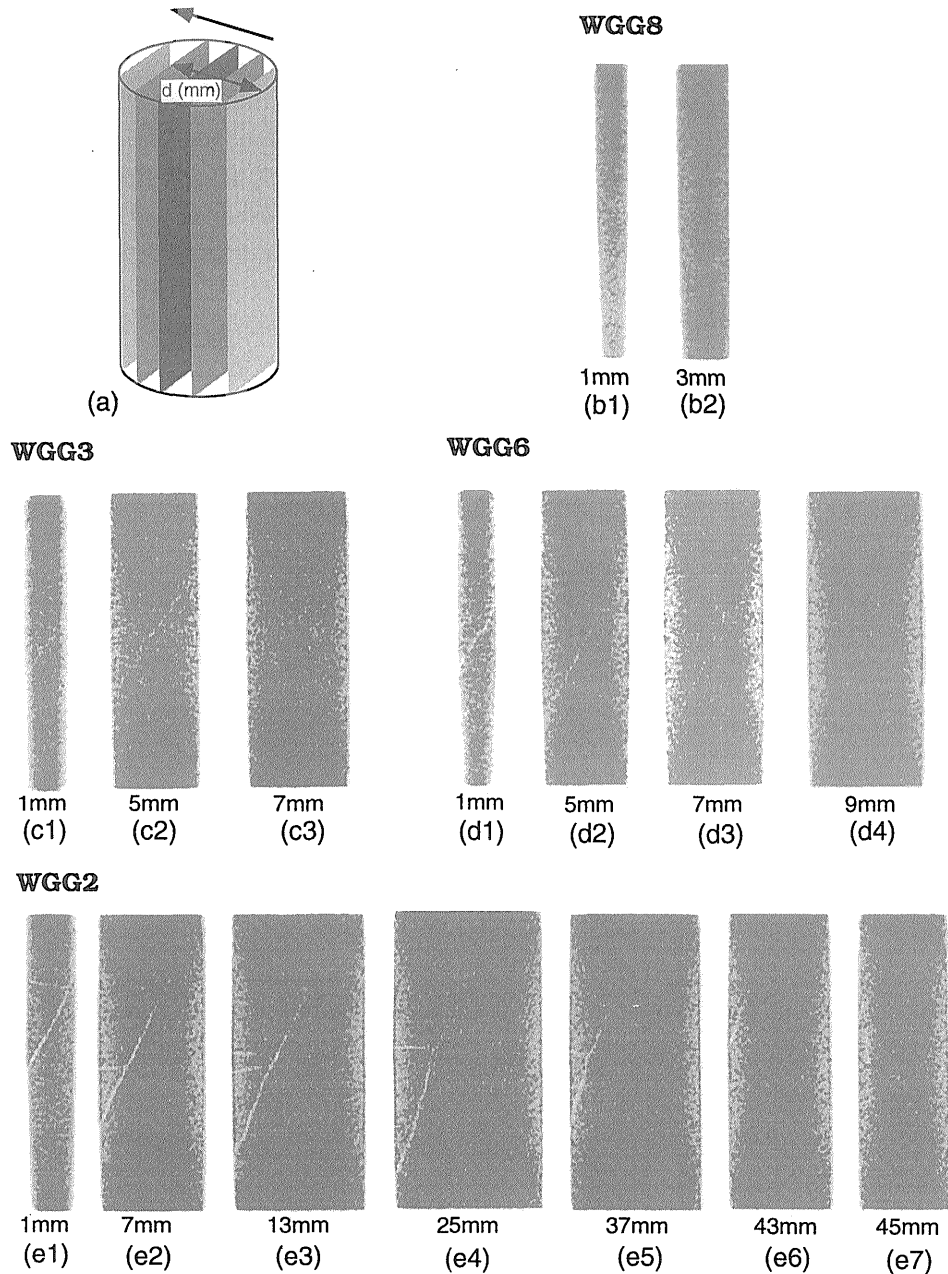
地質調査所に平成6年に導入された高温高压岩石試験

装置は、封圧500MPa・温度300°C・間隙水圧200MPaまでの環境で、岩石試験を行うことができる。これは地下15kmから20kmでの地質環境に相当する。

これまでに本装置を用いて、乾燥供試体・封圧100MPa・常温・周変位速度一定状態でのウェスタリー花崗岩の破壊実験を行い、破壊の核の形成とその拡大過程、その際の3段階の軸応力降下現象をとらえることができた。

本装置は、工業技術院特別研究「大地震の震源核形成過程に関する実験的研究(平成6-10年度)」と、国立機関原子力試験研究「高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する地殻変動及び低確率天然事象の研究(平成6-10年度)」において用いられており、岩石の破壊現象や摩擦すべり現象に及ぼす封圧・温度・間隙水の影響についての研究や高温高压下での岩石物性の測定を行っている。

謝辞 本装置の導入において、地震地質部の楠瀬勤一郎氏、地殻物理部の西澤修氏、京都大学防災研究所地震予知研究センターの島田充彦教授・行竹英夫助教授との議論は大変有意義なものであった。また、X線CT装置の使用とそのデータ処理においては、海洋地質部の池原研氏、地殻物理部の中島善人氏にご指導頂いた。査読者の高橋学氏からは、内容を取りまとめる上で有益なコメントを



第11図 強度破壊点以降で除荷・回収した供試体内部のX線CTイメージ。a)にスキャンの様子を模式的に表す。各イメージ図の下に付した数値は供試体表面からの深さを表す。供試体内部の破壊面はイメージ図で白線で表されている。

Fig. 11 X-ray CT scanning images of WGG8, WGG3, WGG6 and WGG2. a): An illustration of the direction in which scans were carried out, and scanned cross-sections. Images are shown in order of increasing scan depth (d) from left to right. The depth values are given under each image. The white lines in WGG3, WGG6 and WGG2 show a fracture plane inside each specimen.

頂いた。ここに記して、各氏にお礼申し上げる。

文 献

Griggs, D. T., Turner, D. T. and Heard, H. C. (1960) Deformation of rocks at 500°C to 800°C. In Griggs, T. and J. Handin ed., Rock

deformation, Mem. 79, Geological Society of America, 93-104.

池原 研(1997) X線CT装置を用いた地質試料の非破壊観察と測定(1)-X線CT装置の原理・概要と断面観察-, 地質ニュース, 516, 50-61.

Kawakata, H., Cho, A., Yanagidani, T. and Shimada, M. (1997) The observations of

faulting in Westerly granite under triaxial compression by X-ray CT scan, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, **34** (in press).

Lockner, D. A., Byerlee, J. D., Kuksenko, V., Ponomarev, A. and Sidorin, A. (1992) Observations of quasi-static fault growth from acoustic emissions, In Evans, B. and Wong, T.-F. ed., *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*, Academic Press, San Diego, Calif., 3-31.

蒔田 薫・黒岩玲子(1969) 基礎実験技術, 日本材料学会高圧力部門委員会編, 高圧実験技術とそ

の応用, 127-209.

Tullis, J. and Yund, R. A. (1977) Experimental deformation of dry Westerly granite, *J. Geophys. Res.*, **82**, 5705-5718.

Wawersik, W. R. and Brace, W. F. (1971) Post-failure behavior of a granite and diabase, *Rock Mechanics*, **3**, 61-85.

Wong, T.-F. (1982) Micromechanics of faulting in Westerly granite, *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **19**, 49-64.

(受付: 1997年6月30日; 受理: 1997年8月4日)