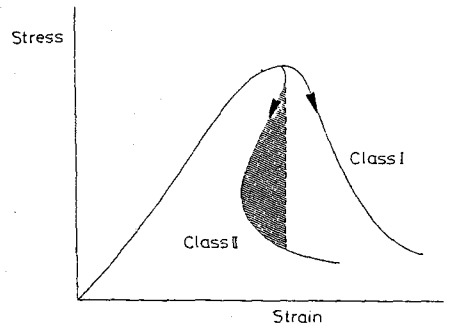


(9) 径方向変形制御による岩石の三軸圧縮試験

京都大学工学部 ○ 斎藤 敏明
京都大学大学院 蓮 香 安 幸
株式会社地質調査事務所 西 井 理

1. 緒 言

岩石の最大耐荷重点を越えた後の変形挙動特性を知ることは、岩盤構造物の安定解析、とくに地下深所での種々の地圧現象解明のためには極めて重要であると考えられる。このため種々の方法によりその剛性を高めた試験機を用いていわゆる破壊後の変形挙動の研究がさかに行なわれてきた。しかし、硬石の破壊後も含めた完全な応力-ひずみ曲線を得ることはなかなか難しく、さらに Wawersik らは最大耐荷重点後の荷重変形曲線が正の勾配をもつ岩石が存在することを示し、これをクラスⅡ型と称し、負の勾配を持つものをクラスⅠ型と分類した。第1図はこれらを模式的に表わしたものであるが、クラスⅠ型の場合最大耐荷重点後の破壊の進行には外部から新たなエネルギーの供給

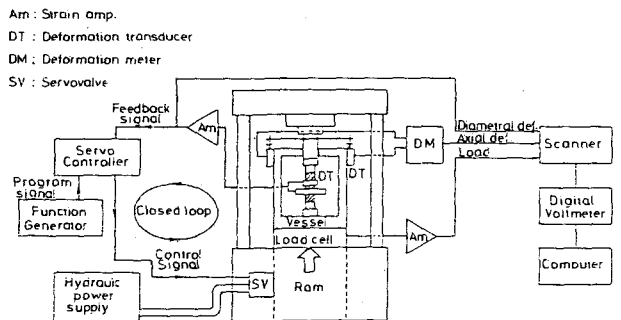


第1図 岩石の破壊後の挙動の分類

を必要とするのに対しクラスⅡ型では新たなエネルギーを必要とせず逆に斜線で示したエネルギー量が過剰となり激しい破壊を引き起こすものと考えられる。したがってクラスⅡ型に属する岩石の破壊後の挙動を安定に制御することは、従来のように試験機の軸方向の変形を制御する以上は剛性をいくら高めても不可能となる。このためサーボコントロールを用いた剛性試験においてコントロール信号として微小破壊の集積に敏感な、軸と直交する方向の変形を用いる方法が提案された。この方法によれば、クラスⅡ型の岩石も含めて、より安定な剛性試験を実施できることになる。そこで、ここでは、これをさらに三軸圧縮試験に適用し、最高耐荷重点後の破壊過程の検討を行なった。

2. 供試体および実験装置

供試体は29mmφ、高さ81mmのたて横比約2.8の円柱形に整形後、デシケータ内で1ヶ月以上乾燥放置したものをを用いた。実験に際して、試料中央にリング形の径方向変位計を互に直交する方向に2つ取り付けた後、両端のエンドピースとともに、シリゴムを表面に塗付し、圧力媒体である鉱物油が試料内に浸透しないようにした。第2図は試験装置の概略を示すが、圧力容器および封圧発生装置は2000 kg/cm²の容量を持つものであり、軸圧は200 t容量のサーボコントロール式圧縮試験機を用いた。実験手順はまず封圧を作用させ所定の静水圧状態に達した後軸圧を作用させた。この時図のように2つの径方向変位計の平均出力をフィードバック信号として軸方向荷重を制御した。なお、今回の実験では径方向変形速度を 5×10^{-3} mm/minとしている。測定は軸および径方向変形ならびに軸荷重の出力をミニコンピュータに記憶させ、軸方向変形はピストン部などの変形を補正している。

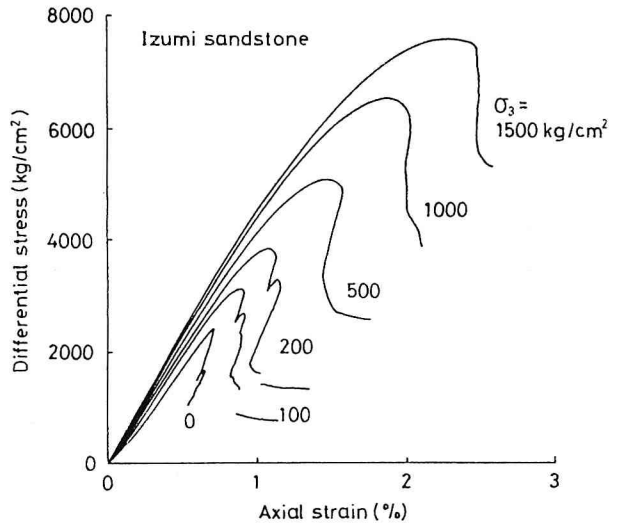


第2図 実験装置の概略

3. 実験結果

第3図は和泉砂岩の実験結果であり σ_3 は封圧の大きさを示し0~1500 kg/cm²の6種類の封圧のもとでの軸差応力とそれに対応する軸ひずみの関係を示したものである。図のように一軸圧縮強度は2400 kg/cm²程度であるが、封圧とともに最高耐荷力が上昇する。この最高耐荷点以後の挙動に注目すれば封圧0~500 kg/cm²で明らかにクラスⅡ型の挙動を示すのがわかる。また、封圧1000 kg/cm²程度になるとその傾向は見られなくなり、クラスⅠ型へ移行していくものと思はれる。さらに、封圧が0~100 kg/cm²よりむしろ200~500 kg/cm²のときの方がクラスⅡ型の傾向を強く示すことがうかがえる。これは、一般に言われているように封圧が上昇するとともにダクタイルに移行するという傾向に反しているが、ある岩種ではある封圧のもとでの三軸試験の破壊時の衝撃が一軸試験時のそれより大きいという経験と一致し興味深い。

写真-1は和泉砂岩の各封圧下での実験後の試料の写真であるが封圧0および100 kg/cm²のもとでは微小なクラックとともに複数の巨視的せん断面が観察され、封圧500 kg/cm²のものは一つの明瞭なせん断面が、封圧1000 kg/cm²では明瞭なせん断面とともに、それと共役な微小なせん断面が観察される。このせん断面の形成の様子とクラスⅡ型の挙動とは深く関連しているものと思われ、一般に明瞭な数少ないせん断面で破壊する場合ほどクラスⅡ型の傾向を示す。第4図は径方向ひずみの進行に伴う軸差応力の変



第3図 和泉砂岩の差応力-ひずみ曲線

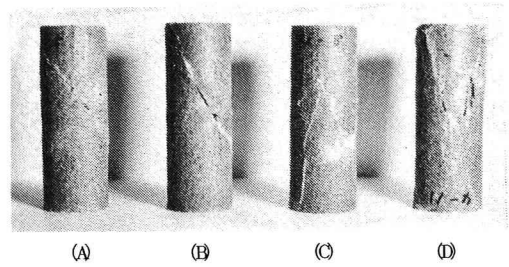
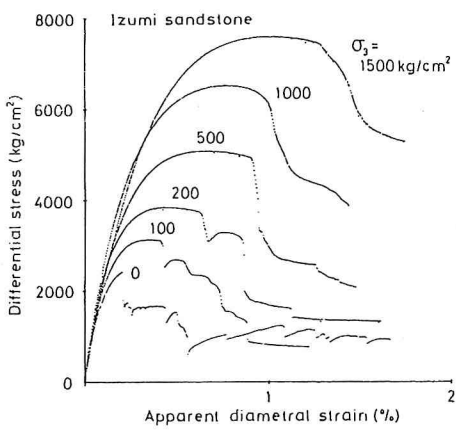
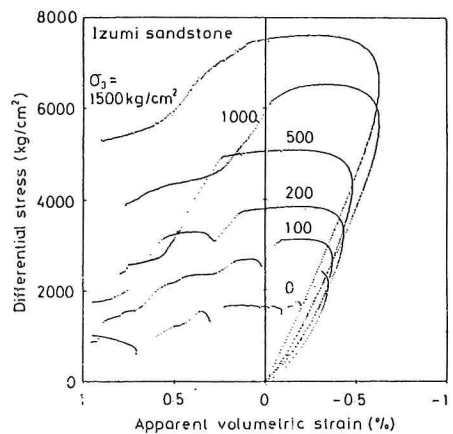


写真-1 和泉砂岩の各封圧下での破壊様相
封圧: (A) 1000 kg/cm², (B) 500 kg/cm²
(C) 100 kg/cm², (D) 0



第4図 軸差応力-径ひずみ曲線

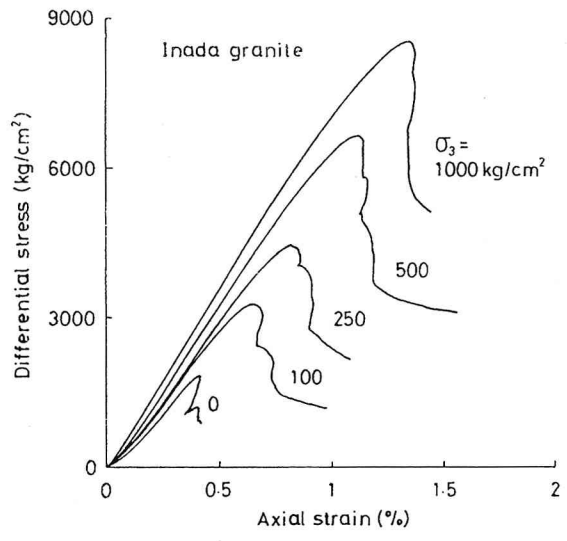


第5図 軸差応力-体積ひずみ曲線

化を示したもので、最高耐荷点近くで大きな径方向変形が生じていることや最高耐荷点より少し低下したところで急激な軸荷重低下が起こり、巨視的なせん断面が形成されたことがうかがえる。また、低封圧のもとではその後も軸荷重の変動が大きく、多くのせん断面の形成が行なわれていると思われる。これに対し封圧 500 kg/cm² のものは変動が少なく、写真のごとく明瞭な一つのせん断面しか形成されていないものと思われる。封圧 1000 kg/cm² 以上になると荷重低下はゆるやかで徐々にせん断面が形成されていくものと考えられる。第 5 図は見掛けの体積ひずみと軸差応力の関係を示したものであるが、封圧 500, 200 kg/cm² の場合は、体積膨張が大きく起こるまで軸荷重の低下がないのが注目される。

第 6 図は稲田花崗岩の結果である。また、写真-2 は各封圧下での実験後の試料の写真である。この場合は図のように低い封圧のもとでもクラスⅡ型の傾向は示さなかったが、封圧の増加とともにダイタイルに移行するという傾向は示さず、むしろ封圧 1000 kg/cm² の高封圧の方が破壊後の傾斜は立つ傾向になった。せん断面の形成も和泉砂岩ほどの明瞭なものではなく微小なものを多く伴っている。

第 7 図(A)および(B)は幌内炭鉱産の砂岩の結果である。(A)、(B)ともに細粒の砂岩で見掛け上それほど違いはないが、(A)は岩石突出といわれる山はねに類似した現象を起こした層より採取したものであり、(B)は同地域の岩石突出を起こさない層より採取したものである。(A)、(B)は一軸



第 6 図 稲田花崗岩の差応力-ひずみ曲線

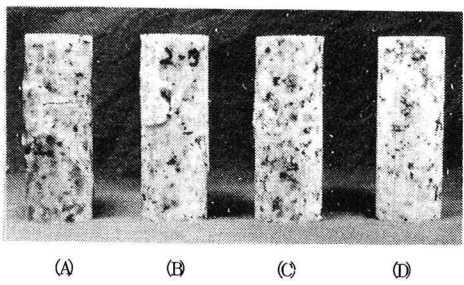
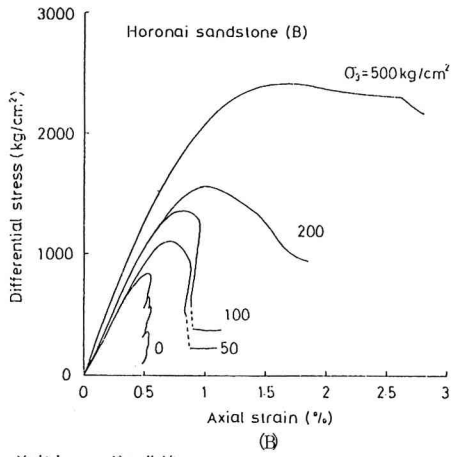
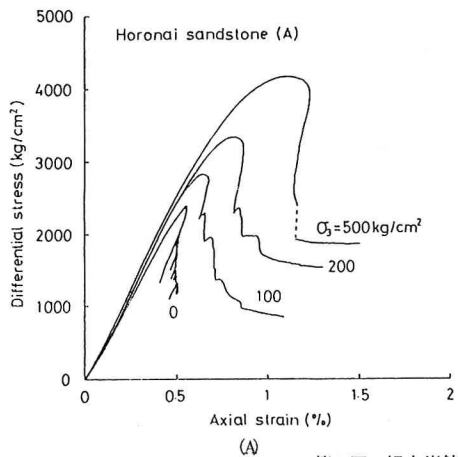


写真-2 稲田花崗岩の各封圧下での破壊様相
封圧：(A) 1000 kg/cm², (B) 500 kg/cm²
(C) 100 kg/cm², (D) 0



第 7 図 幌内炭鉱産砂岩の差応力-ひずみ曲線

強度が大きく異なる他、破壊後の特性も大きく異なり、一軸強度の1/4程度の封圧に相当する(A)の500 kg/cm²の場合には破壊後クラスⅡ型の挙動を示し激しく破壊することが予想されるが、(B)の200 kg/cm²の封圧では既にダクタイルに移行しており緩やかに破壊するものと思われる。これらの結果はその地圧現象の発生機構を考えると重要な資料となるものと思われる。

4. 考 察

以上の結果より、岩種によってまた、作用させた封圧の違いによってクラスⅡ型挙動の出現の様子が異なることがわかる。このような破壊後の挙動特性を持つ場合は他から新たにエネルギーの供給を受けをことなく急激に破壊が進展することになり、山はねなどの地圧現象の機構を考えるうえで重要な要因となろう。すなわち、一般に破壊の激しさは、試験機の剛性あるいはそれに相当する周辺岩盤の剛性と岩盤の破壊後の剛性に関連して決まるが、クラスⅡ型の挙動を示すものでは周辺岩盤の剛性が非常に高くても、破壊する極く近傍に蓄えられていた弾性ひずみエネルギーだけで急激に破壊することになる。

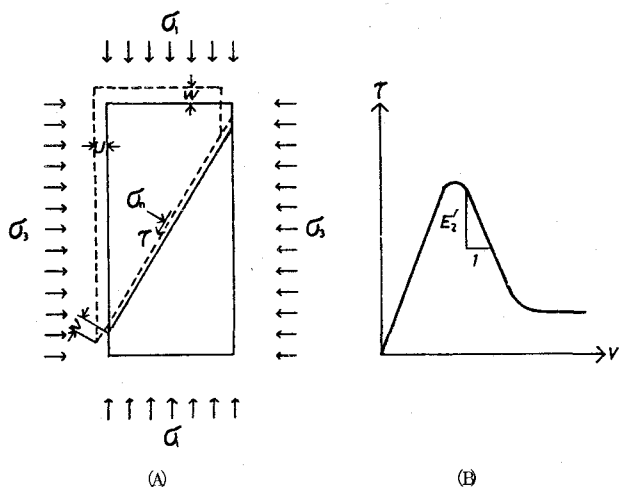
さて、クラスⅡ型挙動の出現に対する理論的な説明としては、グリフィス軌跡と呼ばれるクラック進展後の応力-ひずみ関係により試みられている。しかし、実験結果から、クラスⅡ型の挙動の出現は一個の明瞭なせん断面が形成される場合に多く見られ、その挙動に深く関連するものと思われる。そこで、第8図(A)に示すような不連続面(せん断面)と岩石から成る一つの構造系を考え、せん断面の変形とせん断応力の関係を岩石の一面せん断試験で得られた結果をもとに第8図(B)のようにモデル化する。このモデルを用いて径方向制御の三軸試験をシュミレートすれば、破壊後の変形曲線の勾配は次のように表わされる。

$$\frac{d\sigma_1}{dw} = \frac{2E_1E_2'}{2E_2\ell - E_1\cos\theta\sin 2\theta}$$

したがって、これが正となるクラスⅡ型出現の条件としては次のようになる。

$$E_2' > \frac{E_1\cos\theta\sin 2\theta}{2\ell}$$

ここで、 E_1 は岩石のヤング率、 ℓ は試料長さ、他の記号は第8図に示すようである。上式のようにクラスⅡ型の挙動の出現はせん断面での急激な耐荷力の低下としても解釈できよう。しかし、明瞭なせん断面が形成されるかどうかは材料の破壊特性と深く関連するものである。



第8図 一つのせん断面をもつ供試体モデル

5. 参考文献

- (1) Waweysik, W. R., and C. Fairhurst; A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Comprssion Experiments, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol.7 p561 (1970)
- (2) Wawersik, W. R., and W. F. Brace; Post-Failure Behavior of a Grarite and a Diabase, Rock Mech. vol.3 p61 (1971)
- (3) 佐野 修, 他; 岩石の破壊とアコースティックエミッションについて, 日本鉱業会春季大会講演要旨集 (1977)

(9) Post-Failure Behavior in Triaxial Compression Test
Controlled by Radial Deformation

Toshiaki SAITO*

Yasuyuki HASUKA*

Osamu NISHII**

* Kyoto University

** Oyo Corporation

SUMMARY

Post-failure behavior of rocks is considered to be deeply concerned with the mechanism of rock pressure phenomena, such as rockbursts. However, it is difficult to obtain the complete stress-strain relations of hard rocks, and further, Wawersik et al. (1970) introduced a concept that there exists another kind of rocks which have the load-displacement curves with a positive gradient in the post-failure region and called this type a class II. In case of class II type rocks, any stiff testing machine cannot control the progress of the fracture. Therefore, to control these rapid progress of the fracture, Sano et al. (1975) proposed the servo-controlled compression test using the diametral deformation as a feed-back signal. The authors applied this control method to triaxial compression tests and examined the post-failure behavior on some rocks.

In case of Izumi sandstone, it is found that the behavior of class II type is shown under the confined pressure, 0 - 50 MPa, and this tendency is more intensive under the confined pressure 20 - 50 MPa than 0 - 10 MPa, and under these confined pressure, the single apparent shear plane is observed in the specimen. Inada granite does not show the behavior of class II type, but even under the high confined pressure, 100 MPa, does not show the ductile behavior. In comparison between two types of Horonai sandstone, one of which belongs to the seam where the rockbursts are apt to occur and other does not, the former shows the behavior of class II type.

On the analysis for class II behavior, the structural model of specimens containing the single shear plane are considered and the behavior of shear plane is supposed based on the results of the direct shear tests. Simulating the triaxial test with this model, the condition for the appearance of class II behavior is obtained. But the formation of the single shear plane is concerned with the characteristics of the rock materials.