

(66) 軸差応力の増減に対する岩石の応答の違いについて

大成建設株式会社 正会員 ○ 里 優
正会員 飯星 茂

Mechanical Response of Rock Specimen under Loading and Unloading Conditions

Masaru SATO, Taisei Corporation
Shigeru IIHOSHI, Taisei Corporation

Abstract

The mechanical behavior of Kimachi sandstone under loading and unloading condition is investigated using a conventional triaxial testing machine. Rock deformation, acoustic emission and elastic wave velocities are monitored by strain gauges and piezoelectric transducers stucked on the rock surface. Confining pressure is kept constant during the test.

After loading and unloading, the residual axial strain which is generally interpreted as the plastic deformation is observed. However, the change in propagation velocity of elastic wave suggests that rock deforms elastically in the axial direction.

The concept of damage mechanics, in which inelastic deformation is treated as the result of increasing internal (real) stress caused by decreasing the effective area, is applied to explain this contradiction.

1. はじめに

岩石の三軸圧縮試験装置は、岩石の剛性や強度（最大軸差応力）を求め、岩盤内の構造物の設計に際しての基礎データを供給するために用いることが多い。しかし、近年の計測技術の進歩は、三軸圧縮試験装置を用いて、高圧や高温下での岩石の変形やAE、弾性波速度、間隙水圧変化などを迅速に、かつ精度よく計測することを可能としてきた。現在では、岩盤を構成している岩石について、微視的な見地から変形や破壊メカニズムを検討するに足る、データの量や質が得られるようになってきている。

一方で、高圧流体（圧縮空気、LPG、LNGなど）の岩盤内貯蔵や高レベル放射性廃棄物の地層処分、あるいは未来プロジェクトとして提案されているチューブトレイン構想などでは、施設の安全性や信頼性の一層の向上をめざし、応力や温度変化などに対する岩盤応答の精密な予測や評価が望まれている。

このような背景を踏まえ、筆者らは、三軸試験装置を用いて岩石の微視的な破壊機構についての研究を進め、この成果を岩盤内構造物の安定性向上に結び付けていくことを試みている。本報告は、これらの研究のうち、軸差応力の増減に対する岩石の力学的応答を詳細に調べた結果を示すものである。

2. 実験条件

実験に用いた岩石は、島根県産の来待砂岩である。岩石は $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱状に整形し、重量変化を測定しながら十分に乾燥させた。試料中央部には、クロスゲージ一對と、P波計測用の圧電素子（共振周波数1MHz）一對を表面に直接貼付した。また、同様の圧電素子を埋め込んだ円盤で試料の上下をはさみ、しかる

のシリコンゴムにてシールした(図-1)。試料には、最初に10MPaの等方圧を加え、つぎに軸力のみを増減させて、このときの岩石のひずみ、AE、軸方向および径方向の弾性波速度を計測した。なお、実験は軸差応力が最大値を示した点で終了とした。

3. 岩石の変形について

図-2~5は、ひずみゲージによって計測された岩石のひずみを、軸差応力との関係で示したものである。

軸差応力を加えていくと、各ひずみは軸差応力に対して非線形となるが、軸差応力の減少過程では、これに比べて直線的である。この結果、軸差応力を0に戻すと、試料の軸方向、横方向ともに残留ひずみが観測される。体積ひずみでみると、残留ひずみは圧縮である。再度軸差応力を増加させると、一度経験した軸差応力に達するまでは、各ひずみは軸差応力に対して直線的に増加するが、軸差応力がこれを越えると非線形となる。軸ひずみと横ひずみの関係では、軸差応力を減少させた場合に、軸ひずみに比べ横ひずみの回復が少ないことがわかる。

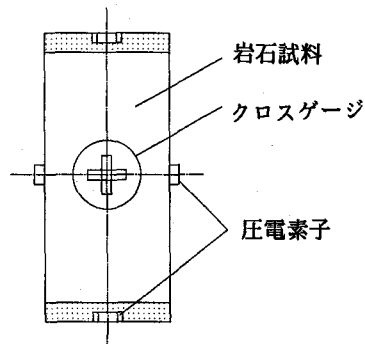


図-1 岩石試料とセンサー

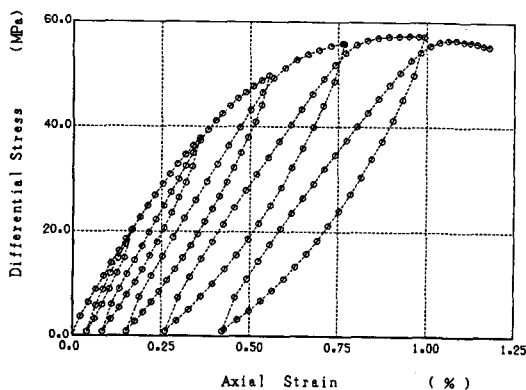


図-2 軸差応力-軸ひずみ関係

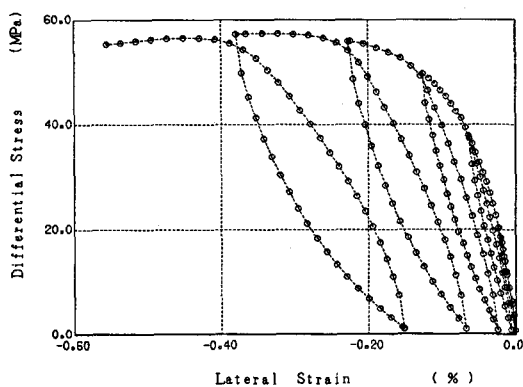


図-3 軸差応力-横ひずみ関係

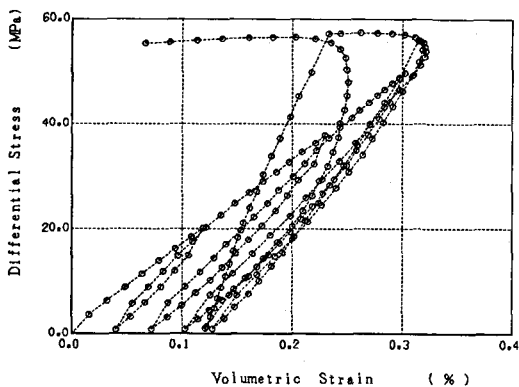


図-4 軸差応力-体積ひずみ関係

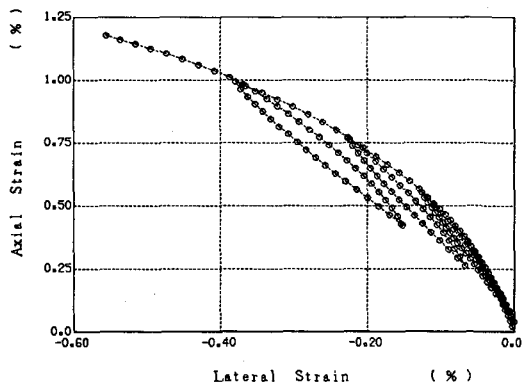


図-5 軸ひずみ-横ひずみ関係

4. AEおよび弾性波速度の変化

軸差応力の増減にともなう、AEと弾性波速度は特徴的な変化を示す。

AEは、軸差応力の増加にともなう観測されるが、軸差応力の減少過程や、一度経験した軸差応力に達するまでの過程ではほとんど観測されない（図-6）。いわゆるカイザー効果が、本実験でも見られている。

軸方向のP波速度は、軸差応力が大きくなると増加し小さくなると減少する。また、その変化は可逆的である（図-7）。P波速度の変化の幅は10%程度であり、また、軸差応力が大きくなると変化しにくくなる傾向にある。

他方、径方向のP波速度はいわば非可逆的である（図-8）。軸差応力の増加にともなうP波速度は減少していくが、軸差応力を減少させていってもP波速度の回復は小さい。したがって、軸差応力を0に戻した場合でも速度の減少が残っている。また、一度経験した軸差応力に達するまでは、軸差応力を増加させてもP波速度の変化は小さく、その後P波速度は急激に減少する。AEでみられるカイザー効果と類似の現象が、径方向のP波速度の変化でみられる。P波速度の変化の幅は25%程度であり、軸方向に比べ大きいことも特徴の一つである。

軸方向と径方向のP波速度変化を比較してみたのが図-9である。同図からは、軸差応力の大きい範囲で軸方向と径方向のP波速度変化が独立して生じていることがわかる。すなわち、軸差応力の増加に対しては、専ら径方向のP波速度の減少が生じ、軸差応力の減少過程や再増加過程では、軸方向のP波速度の増減が主として生ずる。

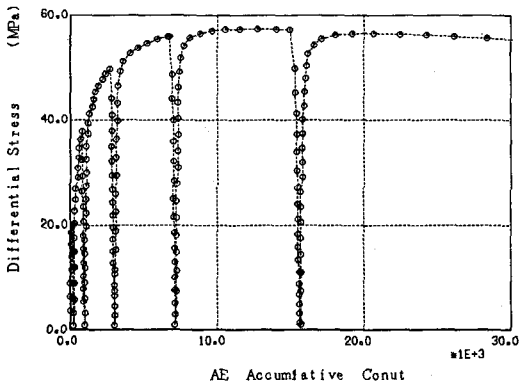


図-6 軸差応力-AE累積関係

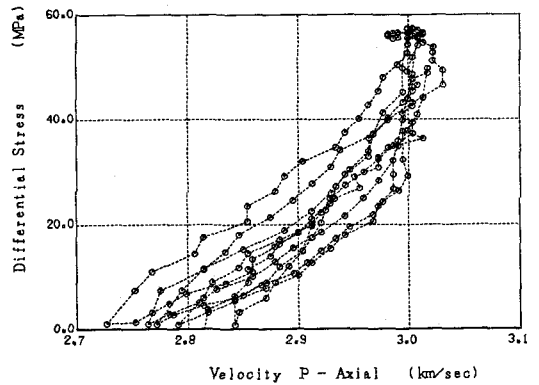


図-7 軸差応力-軸P波速度関係

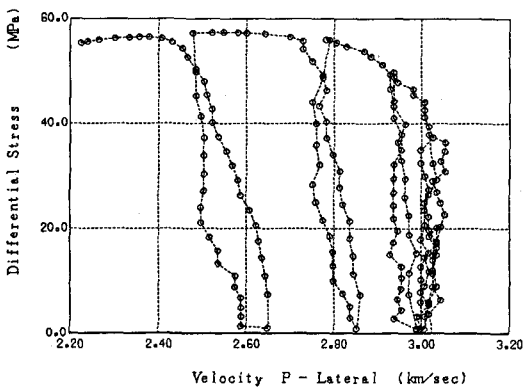


図-8 軸差応力-径P波速度関係

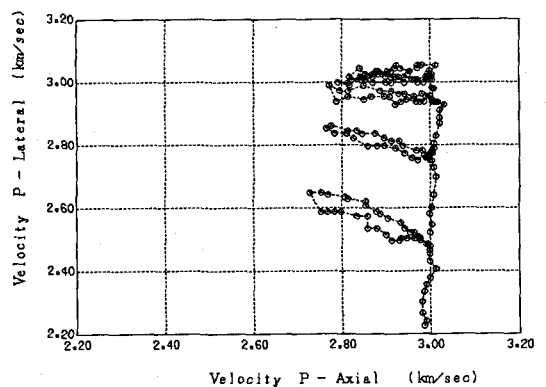


図-9 軸P波速度-径P波速度関係

軸方向と径方向について、それぞれの方向のひずみとP波速度の関係を示したのが図-10、11である。

軸方向では、軸ひずみの増減とP波速度の増減は調和的に生じている。ただし、軸差応力の増減の後には、P波速度の若干の減少が認められる。これに対し径方向では、横ひずみの増加に対して直線的にP波速度が低下する傾向にあり、両者の強い関係を示している。また、横ひずみの減少過程でP波速度の回復が充分見られないことも特徴である。

図-12、13は、観測されたAEとP波速度の関係を示したものである。

軸方向のP波速度は、AEの発生と相関がみられない。すなわち、軸方向のP波速度が変化する過程ではAEがほとんど観測されず、AEが多く観測される過程ではP波速度の変化が小さい。他方、径方向ではこれとは逆に、AEが多く観測される過程でP波速度の減少が生じ、AEと径方向のP波速度が強い相関を持っていることがわかる。

5. 考 察

実験結果を総合すると、軸差応力の増減に対する供試岩石の応答を次のように特徴づけることができる。

- ① 軸差応力の減少過程と一度経験した軸差応力に達するまでの過程では、応力に対するひずみの非線形性、AEの観測個数、P波速度の変化がいずれも小さく、試料は弾性的に挙動していると考えられる。
- ② 軸差応力を0に戻すと、軸方向には圧縮、径方向には引っ張りの残留ひずみが観測される。実験の範囲では、体積の残留ひずみは圧縮である。

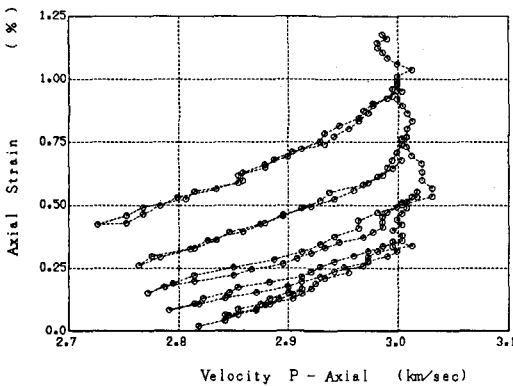


図-10 軸ひずみ-軸P波速度関係

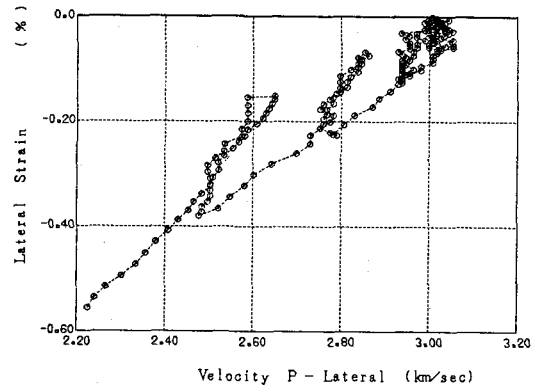


図-11 横ひずみ-径P波速度関係

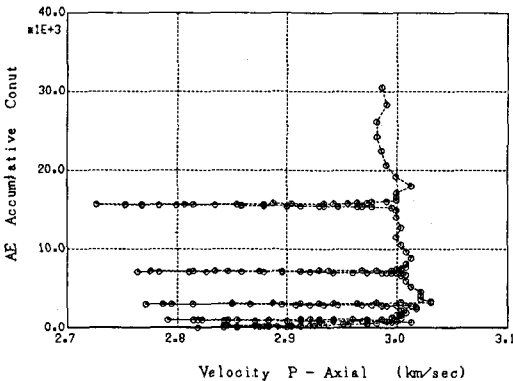


図-12 AE累積-軸P波速度関係

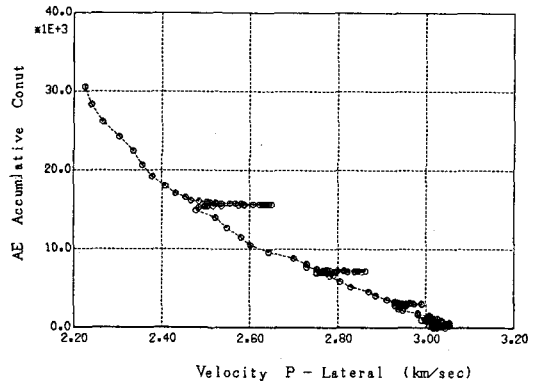


図-13 AE累積-径P波速度関係

③ 軸方向では、P波速度の増減と軸ひずみの増減が調和的に生じており、また、P波速度の変化とAEの観測個数との間には相関が認められない。P波速度の変化とAEの観測個数を見る限りにおいては、試料の軸方向の挙動は可逆的であり、弾性的であるといえる。

④ 径方向では、軸差応力を加えることでP波速度の減少が生じ、この速度減少とAEの観測個数には強い相関がある。また、軸差応力を除いてもP波速度は充分回復しない。したがって、軸差応力を加えていく過程で生じた、径方向のP波速度を減少させるような岩石内部の損傷は、軸差応力を除いても保存されていると考えられる。

これらのうち、②と③に示した特徴は矛盾するように見える。仮に、P波速度と軸ひずみの相関が示すように、軸方向で試料が弾性的（可逆的）に挙動していれば、軸差応力を0に戻しても残留ひずみは観測されないはずである。しかし、実際には圧縮の残留ひずみが観測されている。②と③に示した現象を同時に説明するために、筆者らは次のようなモデルを用いた。

すなわち、「計測している軸差応力と岩石内部の実効的な軸差応力は異なり、軸方向では実効的な軸差応力に対して弾性的な変位が生じている」と考えるのである。類似の仮定は、損傷理論で用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。

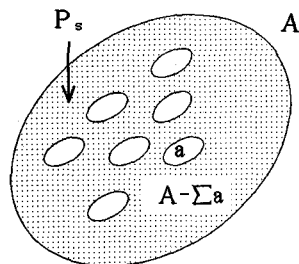


図-14 実効的な軸差応力

計測している軸差応力と実効的な軸差応力の違いは、クラックの破壊などによって軸差応力を負担する断面積が減少するために生ずると考える。図-14を参照しながら、計測している軸差応力 σ_s と実効的な軸差応力 σ_s^* の関係を求めると次のようになる。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A} \quad \dots\dots(1) \quad \sigma_s^* = \frac{P_s}{A - \sum a} \quad \dots\dots(2) \quad \sigma_s = \left\{1 - \frac{\sum a}{A}\right\} \sigma_s^* \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 P_s は任意の断面に作用しているせん断荷重である。 $\sum a$ はクラックの破壊などによって生じた断面積の欠損分であり、軸差応力が大きくなるにつれ増加すると考えられる。実効的な軸差応力と軸ひずみが比例関係にある（比例定数E）と仮定すれば、計測している軸差応力と軸ひずみの関係が(5)式で与えられる。

$$\varepsilon_1 = \sigma_s^* / E \quad \dots\dots(4) \quad \sigma_s = E \left\{1 - \frac{\sum a}{A}\right\} \varepsilon_1 \quad \dots\dots(5)$$

このモデルでは、「軸差応力を減少していく過程では、断面積が初期の状態に回復する」と考える。軸差応力を加えていく過程では、断面積の減少に伴う実効的な応力の増加によって、見かけ上非弾性的な軸ひずみが生ずる。軸差応力を減少していく過程では、岩石全体が弾性的に挙動するために、残留ひずみが生ずると考えるのである。このモデルは、軸方向のP波速度変化を矛盾なく説明する。軸差応力-軸ひずみ関係が見かけ上非弾性的であっても、P波の伝搬経路にあたる部分が弾性的に挙動しているのであれば、P波速度は軸差応力の増減に対して可逆的な応答をするからである。

6. おわりに

本報告では、軸差応力の増減に対する、岩石試料の力学的応答の違いを述べた。また、試料の軸方向で見られた可逆的なP波速度の変化と残留ひずみの発生を同時に説明するため、岩石の変形について新しい解釈を試みた。ここで示した解釈の仕方は、微視的な観点から岩石の破壊機構を考える上で有効であると考えられる。

(参考文献)

- (1) 村上澄男：損傷力学 - 材料の損傷と破壊への連続体力学的アプローチ - 材料 31,1-13(1982)
- (2) 京谷孝史他：岩盤内空洞の力学挙動に与える節理分布の影響に関する考察 第6回岩盤シンポ(1984)