

## (9) 岩石の破壊機構に及ぼす間隙水圧の影響

大成建設 ㈱ 技術研究所

正会員 ○ 青 木 智 幸

㈱ 田治見エンジニアリングサービス

正会員 里 優

大成建設 ㈱ 技術研究所

正会員 亀 村 勝 美

### 1. はじめに

地下の岩石は多くの場合、含水状態で存在し、地下水面下では拘束圧の他に間隙水圧を受けている。水で飽和した岩石の力学的挙動に間隙水圧が大きな影響を及ぼすことは良く知られており、岩盤の挙動を検討するためには含水状態の試料を用いた試験を行なうことが望ましい。

従来の研究では、飽和した岩石の三軸圧縮試験において間隙水圧を加えると強度が低下し、変位速度との関係で比較的透水係数の大きい岩石の力学的挙動は、有効封圧の法則に従うとされている。1)~2)しかし、この法則を議論する際には、排水条件が保たれて試料内部の間隙水圧が一様に分布していることを確認し、様々な封圧と間隙水圧の組合わせの条件で有効封圧の法則の成否を確認しなければならないが、今だに充分な実験結果は提示されていない。また、破断強度についてのみでなく、それ以前に生じる微小破壊機構<sup>3)</sup>についても、有効封圧の法則が適用できるのかも興味深い所である。

以上の様な観点から、様々な封圧と間隙水圧の組合わせの条件で排水三軸圧縮試験を行なったので、その結果について報告する。特に、本報では、強度点以前のダイラタンシー特性や弾性波速度変化に注目し、微小破壊機構について考察した。

### 2. 実験

実験に用いた試料は、島根県産の来待砂岩と福島県産の三城目安山岩の2種類である。有効空隙率は、それぞれ22.6%及び15.2%であった。これらの岩石の透水特性を知るために、三軸試験に先立って透水試験を実施した。試験方法は定水位法で、水圧差5 kg/cm、バックプレッシャー1 kg/cmである。詳しい試験法は文献<sup>4)</sup>を参照されたい。ここでは、結果のみを示す(図-1)。これを見ると、両岩種共、比較的透水係数が小さく、また、封圧が大きくなるほど透水係数が小さくなることがわかる。従って、これらの岩石では、変形に伴う間隙水の移動速度が遅いため、内部の間隙水圧を一様に保つためにはかなり低速で変形を加えなければならない。

次に、排水条件による三軸圧縮試験を行なった。図-2に試験片形状を示す。試験片は高精度旋盤を用いて所定の寸法に研磨整形した。端面の平行度は1/100以上である。これらを充分大気乾燥させた後、下塗り、ペーパー仕上の過程を2度以上施してから、試験片中央部表裏に一對のクロス型ひずみゲージを貼付した。また、これと直角方向に

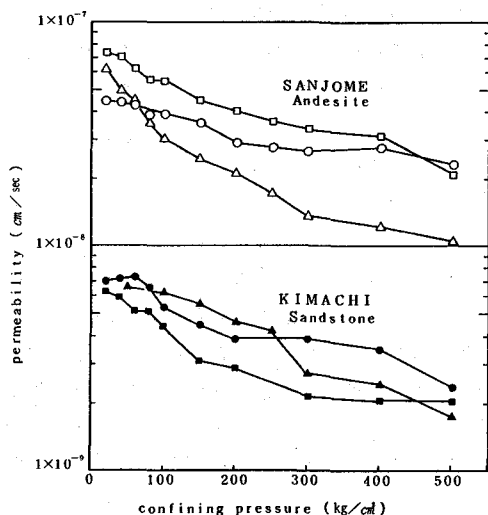
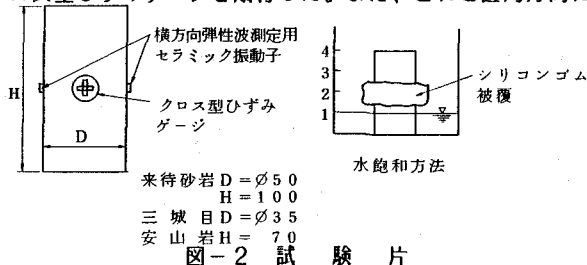


図-1 封圧による透水係数の変化

一対のセラミック振動子を貼付した。これは、一方からパルス波を発信し、他方で受信することにより弾性波速度を測定するのに用いる。<sup>3)</sup> 次に、水で飽和させる過程においてひずみゲージを保護するため、試験片中央部のみを帯状にシリコンゴム塗布により被覆した。水飽和は、試験片の下部より4段階に分けて水浸し、各々の段階で半日以上減圧脱気する方法を採った。使用水はイオン交換水である。以上の様に準備した飽和試料をエンドキャップと共にシリコンゴム塗布により被覆して、三軸圧縮試験に供した。

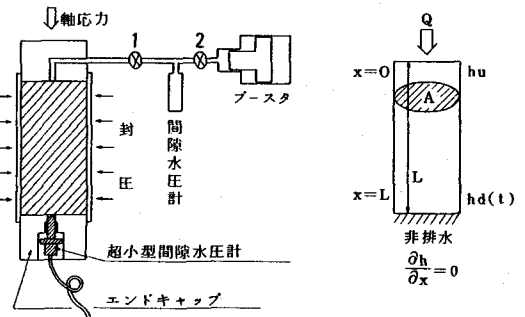


図-3 実験方法の概念図

表-1 試験条件

| 未砕砂岩 |                             |                               |                               | 三城目安山岩 |                             |                               |                               |
|------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| シリーズ | 封圧<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 間隙水圧<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 有効封圧<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | シリーズ   | 封圧<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 間隙水圧<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 有効封圧<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
| —    | —                           | —                             | —                             | A      | 300                         | 250                           | 50                            |
| A    | 100                         | 80                            | 20                            | *      | 300                         | 200                           | 100                           |
| *    | 100                         | 60                            | 40                            | *      | 300                         | 150                           | 150                           |
| *    | 100                         | 40                            | 60                            | *      | 300                         | 100                           | 200                           |
| A/B  | 100                         | 20                            | 80                            | A/B    | 300                         | 50                            | 250                           |
| B    | 80                          | 20                            | 60                            | B      | 250                         | 50                            | 200                           |
| *    | 60                          | 20                            | 40                            | *      | 200                         | 50                            | 150                           |
| *    | 40                          | 20                            | 20                            | *      | 150                         | 50                            | 100                           |
| —    | —                           | —                             | —                             | *      | 100                         | 50                            | 50                            |

図-3に排水三軸圧縮試験の概念図を示す。本装置は周圧型三軸圧縮試験機で、軸力200ton、封圧、間隙水圧それぞれ500 kg/cm<sup>2</sup>の能力を有し、それぞれの外力はすべて閉ループ式の油圧サーボによりパーソナルコンピュータで制御されている。試験手順は、まず排水状態で封圧を加え、次に間隙水圧を加えて試料上端の水圧を一定に保ち、下端の水圧を加えた水圧と同じになった時点で一様な間隙水圧分布となったと判断し、せん断過程に移った。載荷速度は、前述の理由により、本装置の最低速である0.01mm/min(ロッド変位)とした。

表-1に試験条件を示す。飽和状態の有効封圧別の確認を目的としているため、封圧一定で間隙水圧を変化させた場合(シリーズA)と間隙水圧一定で封圧を変化させた場合(シリーズB)との両条件の試験を行った。各々のせん断過程では、縦横のひずみ変化に加えて横方向の弾性波速度を計測した。これらの詳細な計測法は文献<sup>3)</sup>を参照されたい。なお、今回の実験では、破断以前の微小破壊機構及び破断強度に着目したので、試験は強度点までとしている。

### 3. 結果・考察

まず、図-4, 5に三城目安山岩の一軸圧縮試験の結果を示す。一軸試験では間隙水圧を制御する必要がないので、軸方向の弾性波速度も計測した。なお、本報では、以下弾性波速度はせん断力を加える直前の速度からの変化率として示した。図を見ると、軸応力の増加に伴い体積ひずみは初期に弾性挙動をするが、すぐ明瞭なダイラタンシーを示している。軸方向の弾性波速度は初期より単調に増加する一方であるが、横方向はダイラタンシーの開始に伴い急に減少し始める。この現象は、乾燥岩石の場合<sup>3)</sup>と同様に、軸方向では

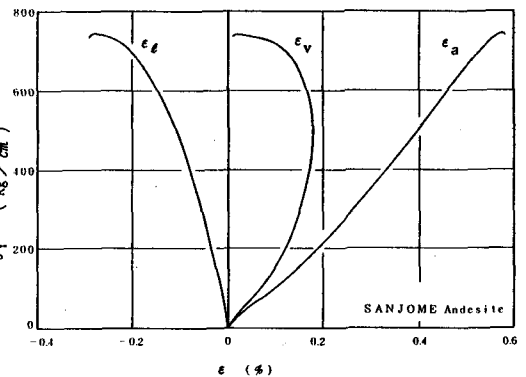


図-4 差応力～ひずみ曲線(三城目安山岩)

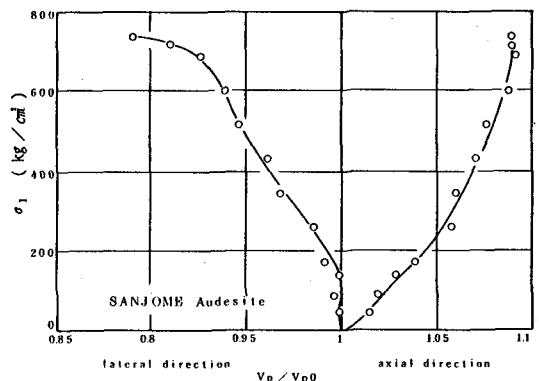


図-5 差応力～弾性波速度変化曲線

(三城目安山岩)

先在するクラックや空隙の閉塞により弾性波速度が増加し、横方向では微小クラックが最大圧縮応力方向に開口しながら進展するために弾性波速度が遅れると理解できる。すなわち、飽和試料でも乾燥材料と同様な微小破壊機構によりダイラタンシーを生じさせているといえる。このダイラタンシーを伴う微小破壊が間隙水圧を大きく変化させ、強度特性に大きく影響すると考えられるため、三軸試験では、横方向のみ弾性波速度を計測した。

図-6, 7に排水三軸試験シリーズAの試験中の非排水端面(図-3参照)の水圧変化を示す。三城目安山岩では、強度点直前の急激な体積膨張により若干水圧が下がるが、試験中の水圧はほとんど一定に保たれており、これにより岩石内部の間隙水圧も一定に保たれていることがわかる。一方、来持砂岩は、 $10^{-3}$  cm/secオーダーの透水係数を持ち、三城目安山岩より1オーダー透水性が悪いが、そのため、本試験の様に低速で変形を加えても非排水端面の水圧は大きく変化する。これは、岩石の体積変化に比べ水の移動が遅れるためであり、特にクラックの開口・進展によるダイラタンシーは端面拘束の影響で試験片中央部で最大と考えられるので試験片内部では更に大きく間隙水圧が変化している可能性がある。この間隙水圧変化は、始め有効封圧を減ずる方向に働き、次に有効封圧を増す方向に働くので、結果として強度を下げるのか上げるのか明らかでない。これは、載荷速度を変えた非排水試験を実施することにより確認できると思われる。

図-8, 9に両岩種の差応力と体積ひずみの関係を示す。三城目安山岩では、シリーズA・Bにかかわらず、有効封圧 $\sigma_3'$ が等しければ、ほぼ類似したダイラタンシー特性を示す。一方、来持砂岩では、有効封圧が同じ場合、間隙水圧の高い方がダイラタンシーを生じ安い傾向が明らかである。これは、試験中の間隙水圧の不均一さや、間隙水圧そのものが、封圧に関係なく直接構造骨格に作用して物性を変化させることによると考えられるが、現在までのデータでは議論できない。また、既往の研究例もなく、今後の研究課題としたい。

図-10は、三城目安山岩の横方向の弾性波速度変化(シリーズA)を示したものである。図-8と対比するとわかる様に、ダイラタンシーが生じると同時に減少を始めている。また、遅れの度合い(急激さ)は、

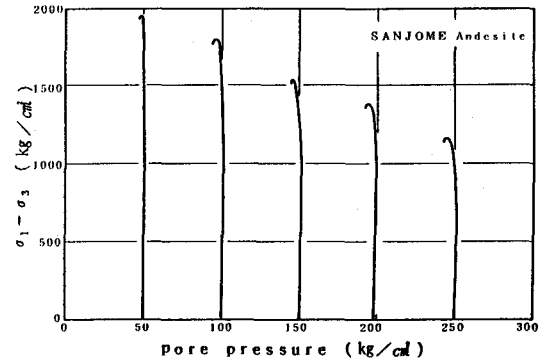


図-6 非排水端面の水圧変化(三城目安山岩)

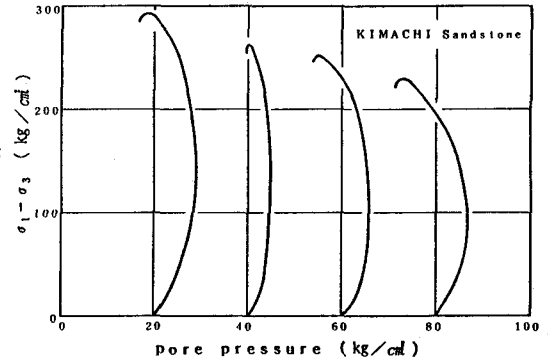


図-7 非排水端面の水圧変化(来持砂岩)

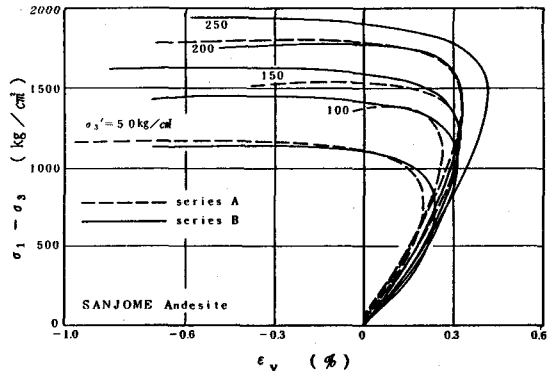


図-8 差応力～体積ひずみ曲線(三城目安山岩)

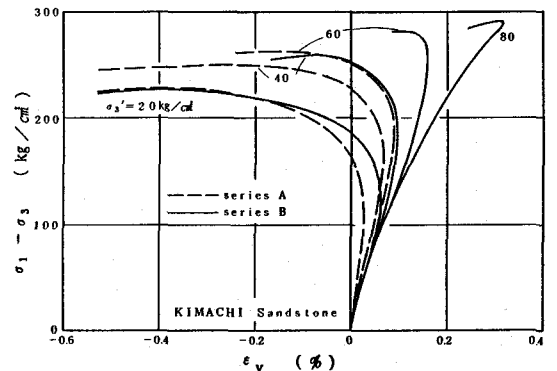


図-9 差応力～体積ひずみ曲線(来持砂岩)

有効封圧が大きいほど小さくなっている。この傾向は、シリーズBでも同様であり、飽和岩石でもダイラタンシーは、最大圧縮応力方向へ微小クラックが開口・進展することにより生じ、有効封圧が大きいほど進展量が小さくとなると理解できる。

図-11, 12は、排水三軸試験による強度と間隙水圧との関係を示したものである。図中の水平の線は、同じ有効封圧の強度の平均値を表している。また、斜めの線は同じ封圧の試験結果を結んだものである。三城目安山岩では、間隙水圧の大きさにかかわらず、同じ有効封圧の場合、強度はばらつきも少なくほぼ等しい。来待砂岩では、有効封圧による強度変化に比べばらつきが大きい、強度特性だけを見れば有効封圧則にほぼ従うと言える範囲である。

#### 4. まとめ

以上の考察により、次の様な結論を得た。

- (1)  $10^{-3}$  cm/secオーダーの透水係数を持つ三城目安山岩に  $0.01$  mm/min ( $2.37 \times 10^{-3}$  /sec) の速度で載荷した所、間隙水圧を一樣に保った排水三軸試験を精度良く行なうことができた。 $10^{-3}$  cm/secオーダーの透水性を持つ来待砂岩では、一樣間隙水圧を保つには、更に低速で載荷する必要がある。
- (2) 弾性波速度の測定より、飽和岩石でも、ダイラタンシーが最大圧縮応力方向へのクラックの進展が原因で生じると説明できた。
- (3) 強度に関して言えば、両岩種共、有効封圧の法則が適用できる様である。一方、強度点以前のダイラタンシー特性を見ても、三城目安山岩は有効封圧則に従うことがわかった。来待砂岩のダイラタンシー挙動については、有効封圧則に従うとは言えず、今後の研究課題である。

飽和岩石の三軸試験に関しては、まだデータも少なく、実験の精度が不明瞭な研究例が多い。今後更により多くの岩石を対象に研究を続ける予定である。

#### 〈参考文献〉

- 1) Brace, W.F., et al ; A Test of The Law of Effective Stress for Crystalline Rocks of Low Porosity, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 5, PP 415-426, 1968
- 2) 後藤, 他 ; 2, 3の本邦岩石に対する間隙水圧効果, Vol. 98, No. 1131, PP 393-398, 1982
- 3) 里, 他 ; 岩石のダイラタンシーとA E・弾性波速度特性について, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, PP 341-345, 1986
- 4) 青木, 他 ; 岩石の透水係数の測定法に関する一考察, 第41回土木学会年次学術講演会概要集, III -188, 1986

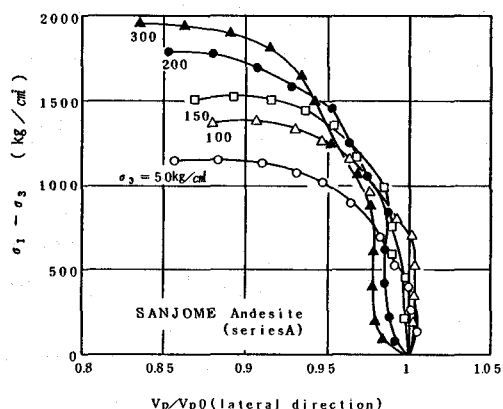


図-10 差応力～横方向弾性波速度変化曲線  
(三城目安山岩)

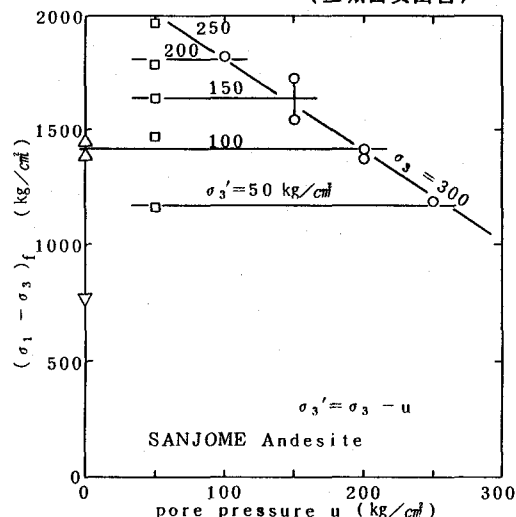


図-11 強度と間隙水圧の関係 (三城目安山岩)

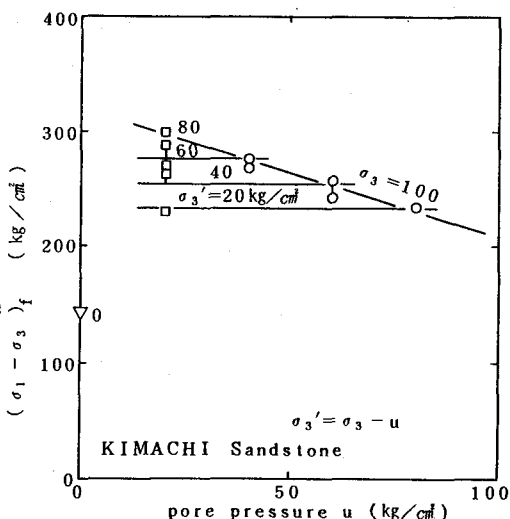


図-12 強度と間隙水圧の関係 (来待砂岩)

## (9) The Effects of Pore Pressure on Fracture Mechanism of Rocks

by

|                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| Tomoyuki AOKI    | (TAISEI Corporation)         |
| Masaru SATO      | (TAJIMI Engineering Service) |
| Katsumi KAMEMURA | (TAISEI Corporation)         |

### Summary

To investigate the effects of pore pressure on mechanical properties of saturated rocks under confining pressure, the tri-axial compression test has been carried out by several researchers under drain and undrain conditions. However, to enable us to discuss the validity of effective confining pressure law, the following points are important :

- (a) To confirm the uniformity and constancy of pore pressure distribution in the rock specimen during shear process of the tests.
- (b) To compare the results of tests under conditions of various combination of confining pressure and pore pressure, since effective confining pressure defines only the difference between confining pressure and pore pressure.

From these points of view, this paper describes the results of tri-axial compression tests under drain conditions with controlled pore pressure. In these tests we paid attention not only on failure strength but also on dilatancy resulting from micro crack propagation which was investigated by elastic wave velocity change during the tests.

Main results are summarized as follows :

- (1) For SANJOME andesite of which permeability is in the order of  $10^{-8}$  cm/sec, uniform pore pressure distribution is established during shear process of tests under the strain rate of  $2.37 \times 10^{-6}$ /sec. For KIMACHI sandstone which has one order lower permeability than SANJOME andesite, the lower strain rate is required to get uniform pore pressure distribution in the rock specimen.
- (2) From the results of elastic wave velocity measurement in saturated rocks, it is suggested that micro crack propagation occurs in the direction parallel to maximum compressive stress.
- (3) The effects of pore pressure on failure strength of both type of rocks under confining pressure can be explained by effective confining pressure law. The observed dilatancy characteristics of SANJOME andesite under the same effective confining pressure are very similar each other, suggesting the validity of effective confining pressure law. However, this is not the case for KIMACHI sandstone.