

軟岩試料の内部構造変化と透水性との関連について

赤井 浩一・大西 有三・李 徳河

THE RELATIONSHIP BETWEEN PERMEABILITY AND INTERNAL STRUCTURE CHANGE OF SOFT ROCK SPECIMEN

By *Koichi AKAI, Yuzo OHNISHI and Der-Ho LEE*

Synopsis

In order to inspect the failure mechanism of a soft rock specimen during a triaxial shear test, a simple testing method has been proposed by measuring the permeability of rock. Since the micro-structures of rock (such as micro crack, void and fault etc.) affected the permeability directly, the "total" change of crack growth or shear band extension in a specimen can indirectly be perceived during shearing test from the change of permeability.

Based on the results obtained from triaxial permeability shear tests, we also attempted to explore the internal structure change of rock under cyclic loading tests.

1. ま え が き

軟岩試料の三軸せん断試験において、内部構造変化を調べるため、様々な手法が用いられている。たとえば、試料の側面にひずみゲージをはって、せん断試験中の試料の横ひずみおよび体積ひずみを直接測定している。また、非排水せん断試験時、間げき水圧の変化を測定したり、排水試験で試料からの排水を測ることによって、試料が圧縮しているか、膨張しているかを間接的に調べている。もっと精密に試料内部の構造変化（たとえばクラックの進展ならびにその発生位置など）を観測できるものに AE 法（すなわち Acoustic Emission 法）がある。しかしながら、横ひずみゲージの手法では試料の局所的な変化しかモニターできない恐れがあり、AE 装置はかなり複雑で、高価であるため、容易に使えないなどの欠点がある。そこで、本研究では、試料内部空隙に強くかかわっている試料の透水性の変化を調べるという簡単な手法を用いて、せん断試験中の試料内部構造の変化をクラック進展の概念を取り入れて究明する。

岩石試料の透水性については、Brace ら¹⁾ がすでに特別な装置を用い、高拘束圧のもとで花崗岩の透水性を測定することに成功している。そして、彼らは透水性が有効拘束圧に深く関連しているとの結果も得ている。一方、Zoback と Byerlee²⁾ は岩石試料の微小クラック、ダイレイタンスーおよび透水性の関係を調べ、透水性と試料体積変化は偏差応力のみ関数でないことを提案した。Kranz ら³⁾ は弱面のある Barre 花崗岩と弱面のない花崗岩の透水性を測定し、弱面の透水性への影響は拘束圧が高ければ高いほど低下することを明らかにした。

本研究は従来の透水性についての研究結果をもとに、三軸せん断中の軟岩試料の内部構造変化とその透水性の変動との関係を検討し、さらに、繰り返し試験中の試料の構造変化の特徴を調査したものである。

2. 軟岩試料、試験装置及び手順

本研究に用いた軟岩試料は船生石とよばれる凝灰岩で、その物理諸量は **Table 1** に示されている。試料をまず直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱形に整形し、水中で 7 日以上飽和させた。その後、試料の側面にゴム系のボンドを塗装して 0.5 mm くらいの防水層を造り出した。

防水層に包まれる軟岩試料を **Fig. 1** に示す装置にセットする。この試験装置は通常の高圧三軸セルとまったく同じものであるが、載荷心棒の中心に 1 つの細い導水孔が設けられているため、せん断透水試験中、外部から高圧水を試料に注入することができる。試料の下部から浸出してくる水はベDESTAL に設けられた排水孔によってセル外のビュレットへ排出することが可能である。試験の手順はまず三軸セルにセットされた軟岩試料に適当な拘束圧をかけて、 2 kgf/cm^2 の空気圧を排水ビュレットにかけ、バックプレッシャとして試料の下部から水を逆圧入する。その後、試料の上方から 7 kgf/cm^2 の高圧水を試料に圧入して、ビュレットで試料を通過した水を等時間間隔で測定する。透水量が定常状態になると、軸ひずみ速度 $0.04\%/min$ の様々なせん断試験を行い、透水量の定時測定も実施する (**Fig. 2** 参照)。

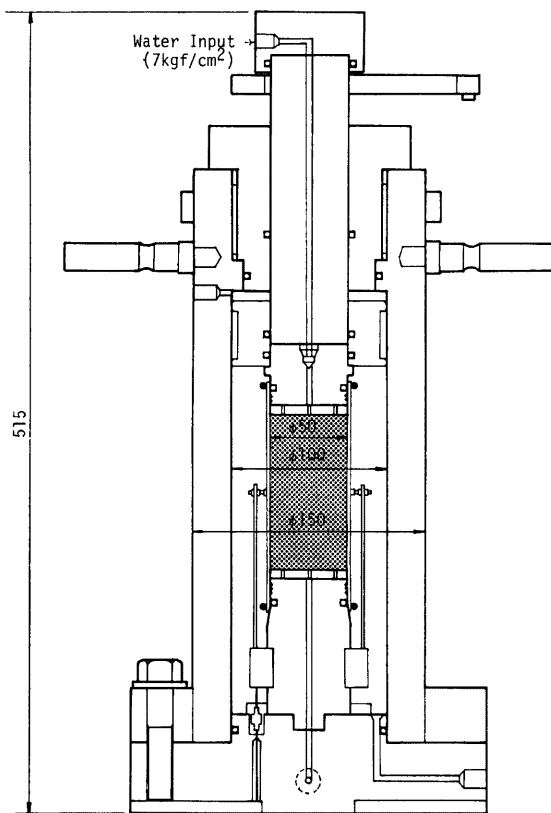


Fig. 1 Triaxial shear cell for permeability test.

Table 1 Physical Properties of Funyu Rock.

Dry density	$\gamma_d = 1.873 \text{ g/cm}^3$
Wet density	$\gamma_t = 2.157 \text{ g/cm}^3$
Void ratio	$e = 0.406$
Porosity	$n = 28.9\%$
Degree of saturation	$S_r = 95.0 \sim 100.0\%$
Water content	$w = 15.3\%$
Specific gravity	$G_s = 2.649$

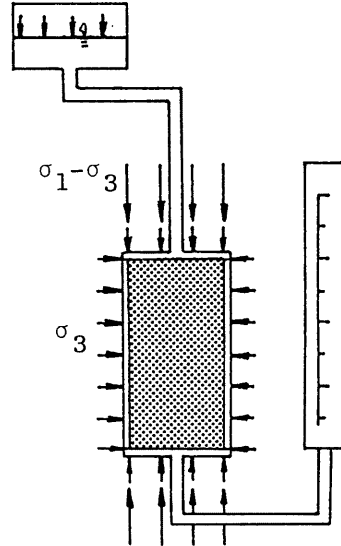


Fig. 2 Experimental arrangement shown schematically.

3. 三軸せん断透水試験

上記の手法を用いて、 40 kgf/cm^2 の拘束圧のもとで船生石試料の残留状態までのせん断透水試験を行った。試験中の試料の偏差応力 (q) と軸ひずみ (ϵ_a) および透水性 (v) と軸ひずみ (ϵ_a) の関係はそれぞれ Fig. 3 (a) と Fig. 3 (b) に示されている。ここでは試料の透水性 (v) を1分間に試料の下部から浸出してくる透水量として定義した。この両関係図を検討するまえに、Fig. 3 (b) に表されているビュレットで測定した透水量の中で、せん断によって試料自身が体積変化する量を明らかにする必要がある。そこで、上述したせん断透水試験と同じ拘束圧とせん断速度を用い、船生石の排水せん断試験を実施した。この試験で得られた試料の偏差応力—軸ひずみの関係は Fig. 3 (a) のものと類似するので、ここでは省略するが、1分間あたりの試料の体積変化は Fig. 4 に示すような変動がある。

Fig. 4 を Fig. 3 (b) と比較するとわかるように、せん断透水過程における1分間あたりの試料の体積変化は透水量の1割程度しかない。しかも、Fig. 4 の体積変化の変動幅は Fig. 3 (b) の透水量の変動幅のたかだか25%くらいである。したがって、せん断による試料の体積変化は Fig. 3 (b) の透水量の結果にあまり大きな影響を与えていないと考えてもよい。そこで、せん断透水試験の透水性 (v) —軸ひずみ (ϵ_a) 関係図をそのまま試料内部の変化を推測するのに用いる。

さて試料内部の構造変化については、Odé⁴⁹の研究によると完全な圧縮力が作用するにもかかわらず、試料内部のクラック表面のある点に引張応力が発生することも可能であることが判明している。また、Brace と Bombolakis⁵⁰ は人工クラックを持つ脆性材料の圧縮試験結果から、“もし載荷応力が材料の引張強度とほぼ同じ程度に達すれば、材料内部の既存のクラックが進展を始め、材料の破壊に影響を与える”と指摘した。同時に、彼らはもう1つの現象、すなわち、クラックの進展はクラックの先端から1つのカーブを描きながら前へ拡大していくことによるものであり、最後にクラックは外部圧縮応力の方向と平行し、一度この

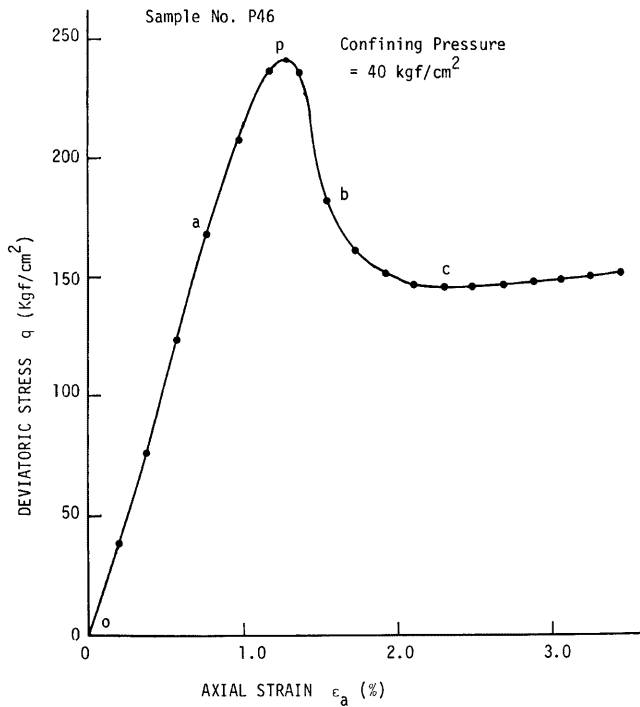


Fig. 3 (a) Deviatoric stress-axial strain curve derived by triaxial shear test.
($\dot{\epsilon}_a = 0.04\%/min$)

方向を向いたクラックをさらに進展させるのは極めて困難である (Fig. 5 と Photo 1 参照) ことを明らかにした。Bieniawski⁶⁾ はガラス材料を用いて、Fig. 5 とよく似た結果を得ている。

したがって、岩石試料にせん断応力を加担させた時、試料内部に新しく生ずるクラック進展は応力増分方向と平行する動きが強くなると共に、クラックの開きも大きくなる。このため、応力増分に平行な方向の透水性もよくなることとなる。次に、上述のような岩石の破壊にともなう内部構造の変化についての研究を透水性と関連づけて考察する。

Fig. 3 (b) に示されている試料の透水性の変化の様子は4段階に分けられる。言いかえれば、せん断試験の過程において、試料は4種類の異なる挙動をすることを意味している。この4段階は図中の記号で“o-a”、“a-b”、“b-c”および“c以後”のように分けられ、それぞれの段階を第1から第4と名付ける。

第1段階の特徴は、Fig. 3 (a), (b) からわかるように、試料が受ける偏差応力の増加に伴って、その透水性が多少よくなることである。Brace と Bombolakis⁹⁾ の研究結果によって、この段階の試料の主な構造変化はクラックの進展であると推察できる。a点を頂点として透水性は低下していく現象があるので、クラックの進展はa点まで続き、偏差応力方向と平行になり、安定状態に達すると考えられる。

安定したクラックをさらに進展させようとすれば、かなり大量のエネルギーが必要となることを Brace ら⁹⁾ はすでに指摘した。したがって、a点以後偏差応力の増加と共に試料内部にはクラックの進展のかわり

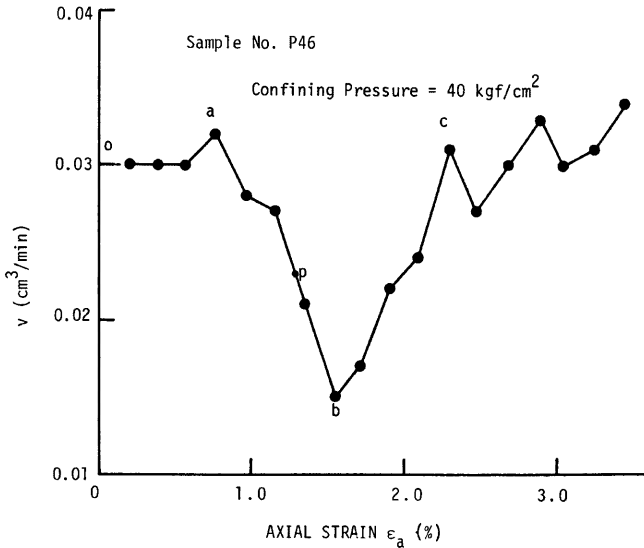


Fig. 3 (b) Permeability-axial strain curve derived by triaxial shear test.

に、所要エネルギーのより少い、別種の構造変化を生み出す可能性が十分あると考えられる。

そこで、第2段階では、試料内部に発生する代表的な構造変化は進展したクラック同志の連結によって、せん断破壊面を形成しようとするものであろうと推論される。ここで、Hallbauer ら⁷⁾のせん断破壊面の形成に関する研究結果に注目する。彼らは三軸試験中、珪岩の破壊の様子を注意深く調べた後、“せん断破壊面はほとんど試料中心部に位置するクラックの群の連結によってスタートし、段々と上下両方へ拡大し、最後には、試料を2つに分割するように成長する”と指摘した。一方、クラックの貫通にともなって、クラック（特にせん断破壊面の近傍のクラック）に蓄積してきた表面エネルギーのほとんどが解放され、開いているクラックも次第に閉じてくる。このため、クラックの開き具合に深く関わっている試料の透水性は低下せざるを得ないと推測できる。これは Fig. 3 (b) に示している a-b 間の透水性の変化と一致するため、第2段階ではクラック同志の連結からせん断破壊面を形成するという変化パターンが試料内部に生じていると判断してよい。また、この段階の始点、終点の a と b は Fig. 3 (a) の q - ϵ_a 曲線のピーク点 p をはさんで

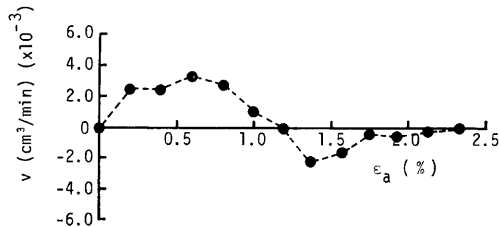


Fig. 4 Volumetric change of Funiyu rock specimen during a drained triaxial shear test.

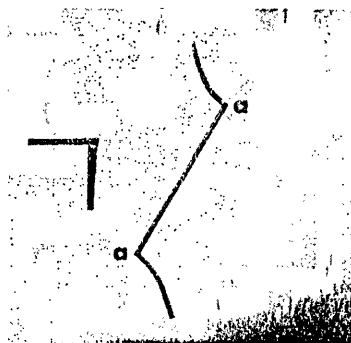


Fig. 5 Result of actual crack growth in photo-elastic plastic. (Ref. 5)

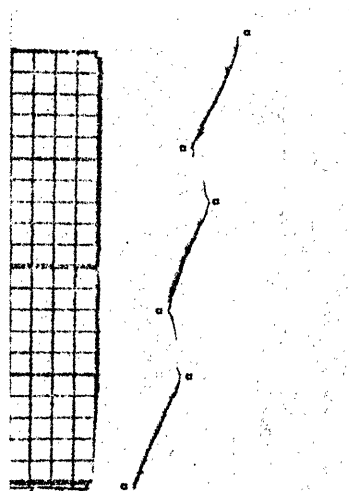


Photo. 1 Growth of an array of cracks in glass. (Ref. 5)

いることによって、拘束圧 40 kgf/cm^2 のせん断試験においては、試料内部のせん断破壊面が完全形成されるのが、試料がピーク強度を示す点 p ではないということもわかる。

次に、第3段階を検討する。せん断破壊面が試料を貫通した b 点を始点に、残留状態に突入する c 点を終点にしたこの第3段階は明らかに1つの過渡段階の性格を持つ。 b 点では、すでにせん断破壊面が形成されているため、 b 点以後、試料に軸ひずみを与えると、試料上下両半部はせん断面に沿って、相対すべりを生ずるはずである。その時、せん断面のかみ合ったところに局部的なせん断破壊が発生したり、凹凸のところでは試料の粒子が剝離したりする。そして、ヘアークラックのような細いせん断面が段々と厚くなり、1つのせん断破壊“層”を造り出す。この破壊“層”は水を通し易い場所であり、しかも、破壊“層”を圧縮する外力は徐々に低下していくため、試料の透水性が次第に上昇するものと推定される。Fig. 3 (b) に示されている $b-c$ 間の透水性の変化を見ると、まさに推測したとおり、せん断試験の進行と共に急激に上昇する。したがって、第3段階での試料内部に発生する主な構造変化はせん断破壊“面”からせん断破壊“層”への変化であると考えてよい。

第4段階 (c 以後) に入ると、試料の抵抗力は最低値に低下し、一定値になる。したがって、せん断“面”に存在したすべての凹凸がせん断されて、最終的なせん断破壊“層”を完成したと考えられる。しかし、この段階では、試料にかかる外力はせん断試験の進行と共に一定値のままにしているのに対して、試料の透水性は低下したり、増加したりする動きを示すことが Fig. 3 (b) に表示されている。これは、破壊“層”が試料上下両半部の相対すべりによって、圧縮されたり、すべったりした後、また圧縮されたりするものと考えられる。すなわち、試料の上下両半部はせん断破壊“層”をはさんで、stick-slip 現象を呈するものと思われる。

4. 繰り返しせん断透水試験

三軸せん断試験中の軟岩試料の内部構造変化とその透水性の変動との関係を論じた前節の結果に基づいて、さらに、同じ拘束圧のもとで繰り返しせん断を受ける試料の内部構造変化を調べた。繰り返し試験に用いる

載荷の振幅が試料内部構造に如何なる影響を与えるかを調べるため、2種類の異なる振幅で繰り返しせん断試験を行なった。1つは最大荷重強度 q_{peak} の80%までの繰り返しせん断試験、他の1つは q_{peak} までのものである。軟岩試料、試験手法は前節に述べたのとはほぼ同じであるが、各サイクルにおいて、荷重が所定のレベルに達すれば、除荷を行う点が異なる。

ここに載荷振幅が q_{peak} の80%を用いた繰り返しせん断試験を Test C, q_{peak} を用いたのを Test A と名づける。

Test C では、 q_{peak} の80%まで載荷-除荷を5回繰り返した後、第6サイクルに入る前、試料を $\sigma_1=40$ kgf/cm², $\sigma_3=40$ kgf/cm² の等方圧密状態で6時間すえ置いた。6サイクル目の試験を終え、すぐ第7サイクルのせん断試験をスタートした。各サイクルにおける軟岩試料の偏差応力 (q)-軸ひずみ (ε_a) の関係ならびに透水性(v) と ε_a との関係が、それぞれ Fig. 6 (a) と Fig. 6 (b) に示されている。

Fig. 6 (b) より、各サイクルの始点 a_i での透水性はサイクル数の増加と共にあまり変化を起さないことがわかるが、 $\sigma_1=\sigma_3=40$ kgf/cm² の状態で6時間すえ置かれた後の a_6 では試料がより低い透水性を示している。これは試料内部のクラックや空隙などが一層圧縮されて水が通りにくくなったと考えられる。しかし、第7サイクルの a_7 では、試料の透水性が再び回復していることも興味深い。次に、各サイクルの $a_i s_i$ 、すなわち3節に論じた第1段階の試料の透水性を検討する。Fig. 6 (b) に示されているように $a_i s_i$ の勾配(透水性の増加率)はサイクル数の増加に伴って、緩やかになる傾向が見られる。試料に荷重を加えたり、除荷したりすることによって、試料内部のクラックも開いたり、閉じたりするに違いない。したがって、繰り返し回数と共に透水性の増加の割合が小さくなるのは、クラックの開閉にともないクラックの弾力性が少しずつ失われていくことを意味する。一方、第6サイクルの $a_6 s_6$ はその前の $a_i s_i$ より急な勾配を有することが Fig. 6 (b) からわかる。これは圧密中に試料内部のクラックの弾力性が一時的に改善されるためと考えられる。

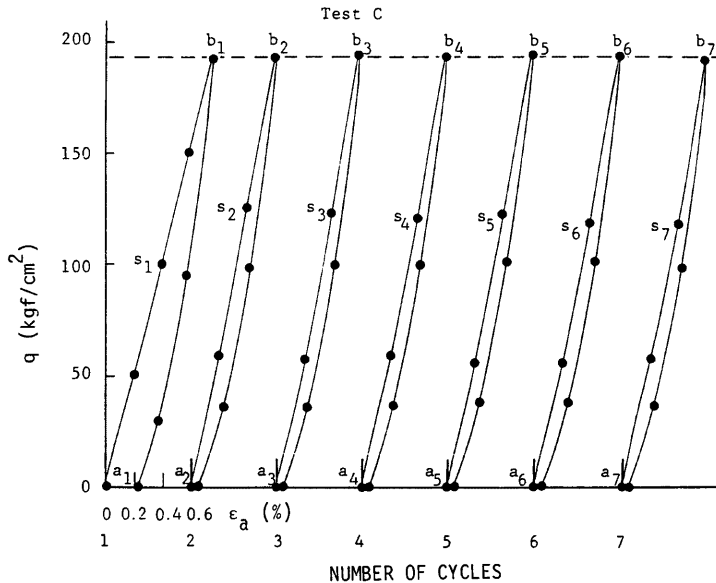


Fig. 6 (a) The relationship between q - ε_a versus number of cycles of Test C.

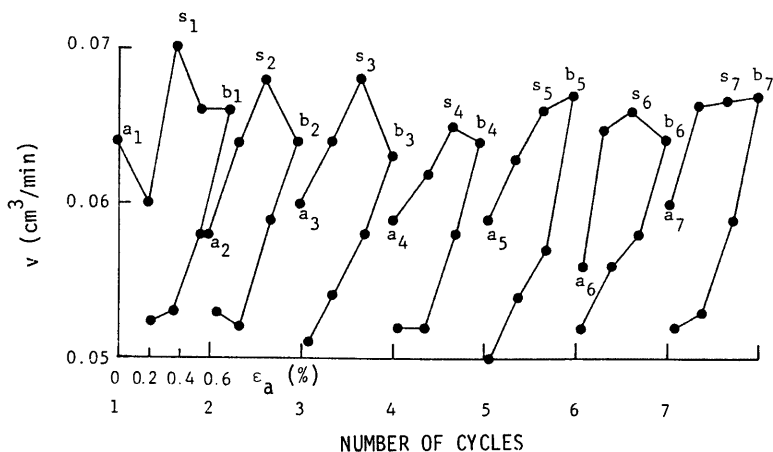


Fig. 6 (b) The permeability against axial strain and number of cycles of Test C. Where, a_i : starting points; b_i : upper stress points; s_i : final points of Range 1.

試料を等方圧密の状態で6時間放置した効果は試料の透水増加率の改善のみならず、試験に消費されたエネルギーにも影響する。Fig. 7 に示しているように、第6サイクルに使用されたエネルギーは第4、5サイクルのものより少々上まわっている。しかも、このエネルギーは試料内部に新しいクラックを進展させるために消費されるものではなく、ほとんどが内部の摩擦抵抗に用いられてしまうのである。これは試料を等方圧密の状態ですえ置いたことにより、クラック表面間の摩擦抵抗力も強くなるという証拠の1つである。

一方、Test A では、船生石軟岩試料を Test C と同じ手順、試験条件でそのピーク強度が出る直前まで繰り返しせん断試験を行いながら、試料の透水性も測定した。試験の結果、Fig. 8 (a) の各サイクルの偏差応

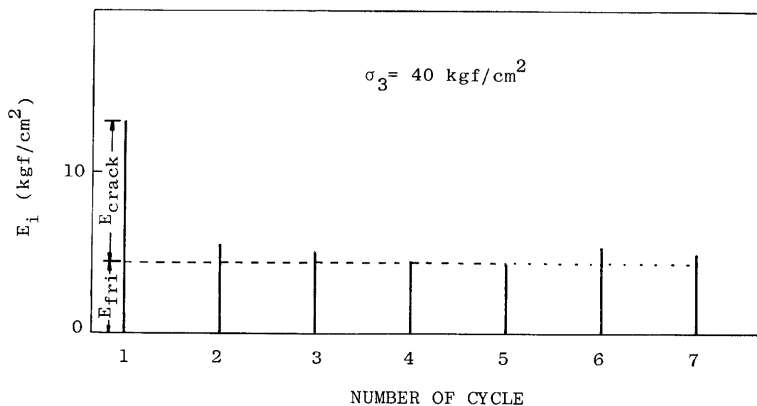


Fig. 7 The irrecoverable energy (E_i) expended in each cycle; E_i can further be divided into two parts— $E_{friction}$ and E_{crack} .

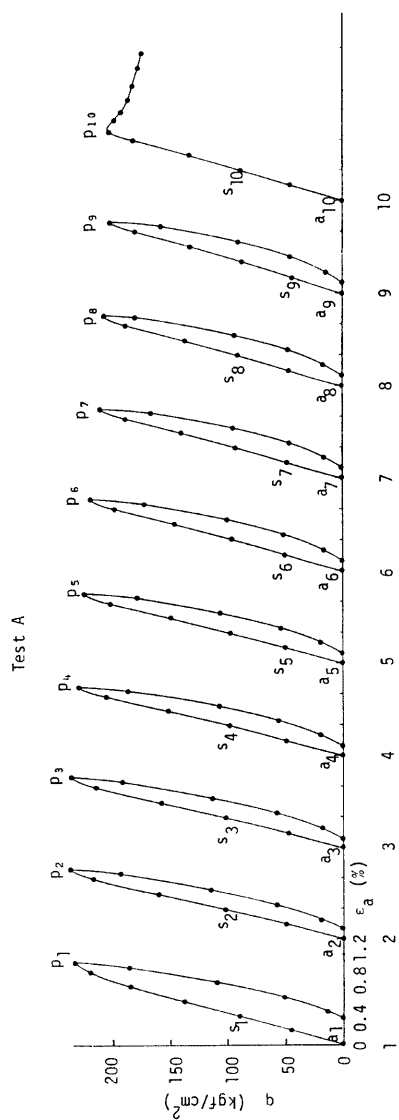


Fig. 8 (a) $q-\epsilon_a$ versus number of cycles of Test A.

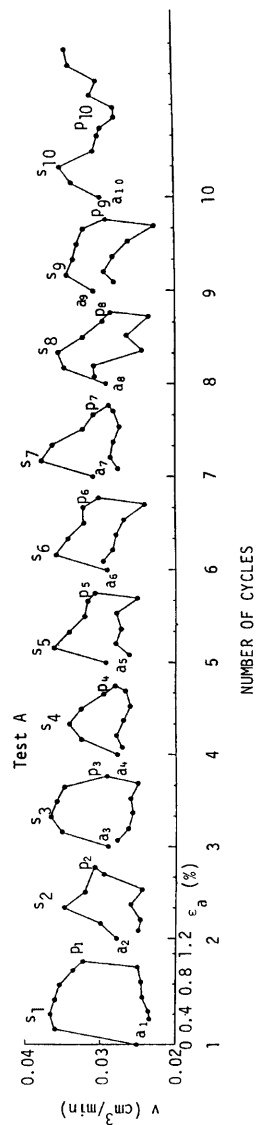


Fig. 8 (b) $v-\epsilon_a$ versus number of cycles of Test A.

力 (q) と軸ひずみ (ϵ_a) の関係の他に, **Fig. 8 (b)** の試料の透水性 (v) - ϵ_a の関係曲線が得られた。

Fig. 8 (b) の結果によると, 各サイクルの始点 a_i での試料の透水性は明らかにサイクル数の増加に伴ってやや上昇すること, および各サイクルの第1段階 (クラックの進展あるいはクラックの再び開く段階) の $a_i s_i$ の勾配もサイクル数が増えるとともに緩くなる傾向が見られる。後者は Test C と同じ現象を示したが, 前者の現象は Test C ではあまり見られない。また, 各サイクルにおける第1段階から第2段階へ切り換わる点, すなわち透水性のピークの点 s_i もサイクル数の増加によって, 早く発生する傾向が見られる。これは **Fig. 3 (b)** について説明したように, s_i 点 (**Fig. 3 (b)** の a 点に相当する) はクラックの進展あるいは再開の段階からせん断破壊面を形成する段階の境であることに注目すると, s_i 点に早く達する現象は, せん断破壊面を形成しようとする動きが試料の載荷-除荷を受ける回数の増加に伴って, 早く始まることを意味している。

Test A では9回の繰り返し載荷試験を終えた後, 10回目のせん断試験で, 一気にピーク強度を越えて, 残留状態までせん断した。この10回目の載荷の透水性の変化の様子は **Fig. 3 (b)** の intact な試料の結果とよく似ていることから, 試料が9回もピーク強度まで繰り返しせん断され, 試料内部に何らかの損傷が発生したと思われるにもかかわらず, 試料内部には決定的な変化 (たとえば, 完全なせん断破壊面形成) が生じなかったものと判断できる。

5. 結 論

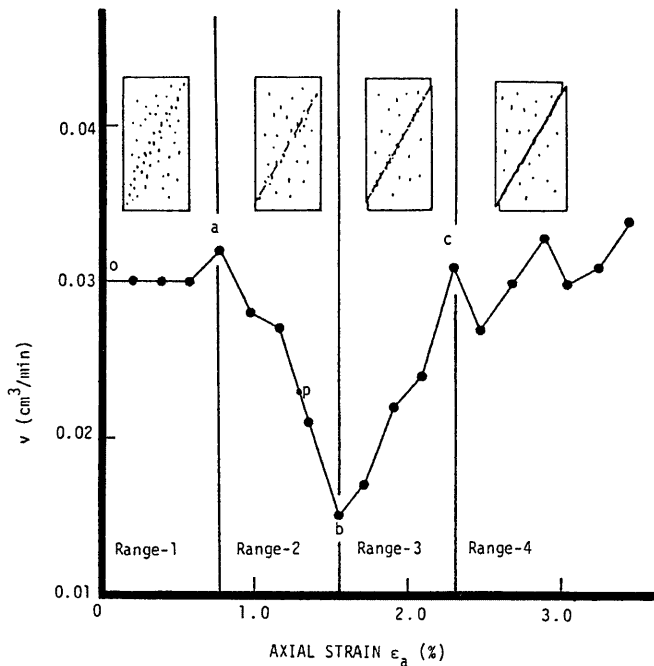


Fig. 9 The relationship between the internal structure change and the variation of permeability of rock specimen. ($\sigma_3=40 \text{ kgf/cm}^2$)

3 節に論じた結果から、せん断試験中試料の透水性の変化を測定することにより、試料内部構造変化および変化の傾向を推測することができ、岩石の力学特性を究明するのに便利な 1 つの手法であることがわかる。

透水性の変化によって、三軸せん断試験中の軟岩試料の構造変化は 4 段階に分けることができると 3 節ですでに明らかにしたが、各段階の試料の代表的な挙動を簡略に表すと Fig. 9 のようになる。

一方、4 節で三軸せん断透水試験に得られた結果を繰り返しせん断透水試験に応用して、異なる載荷振幅が試料に如何なる影響を与えるかを検討し、次のような結論が得られた。

(1) 各サイクルの第 1 段階での透水増加率は、載荷振幅 $q_{peak} \times 0.8$ を用いた Test C, q_{peak} を用いた Test A とともにサイクル数の増加によって、低下する傾向が見られる。すなわち、クラックの開閉を支配するクラックの弾力性が低下することを意味する。

(2) 各サイクルの始点 a_i での透水性の変化について、Test A ではサイクル数の増加に伴って、多少改善されるが、Test C ではこの現象が見られなかったため、 q_{peak} まで試料を繰り返しせん断すると試料内部によりひどい損傷を与えることがわかる。一方、Fig. 8 (a) に示されている試料のピーク強度がサイクル数の増加によって低下する現象も試料内部に損傷が生ずることを示している。

(3) $0.8 \times q_{peak}$ の載荷振幅で 7 回、あるいは q_{peak} で 9 回の程度の繰り返しせん断試験を受けた軟岩試料は完全には破壊されなかった。

参 考 文 献

- 1) Brace, W. F., J. B. Walsh and W. T. Frangos, "Permeability of Granite under High Pressure", Journal of Geophysical Research, Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236, 1968.
- 2) Zoback, M. D. and J. D. Byerlee, "The Effect of Microcrack Dilatancy on the Permeability of Westerly Granite", Journal of Geophysical Research, Vol. 80, No. 5, pp. 752-755, 1975.
- 3) Kranz, R. L., A. D. Frankel, T. Engelder and C. H. Scholz, "The Permeability of Whole and Jointed Barre Granite", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 225-234, 1979.
- 4) Odé, H., "Faulting as A Velocity Discontinuity in Plastic Deformation", Geol. Soc. Am. Mem. 79, pp. 293-321, 1960.
- 5) Brace, W. F. and E. G. Bombolakis, "A Note on Brittle Crack Growth in Compression", Journal of Geophysical Research, Vol. 68, No. 12, pp. 3709-3713, 1963.
- 6) Bieniawski, Z. T., "Mechanism of Brittle Fracture of Rock, Part II Experimental Studies", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 4, pp. 407-423, 1967.
- 7) Hallbauer, D. K., H. Wagner and N. G. W. Cook, "Some Observations Concerning the Microscopic and Mechanical Behaviour of Quartzite Specimens in Stiff, Triaxial Compression Tests", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 10, pp. 713-726, 1973.