

(30) 応力に依存した不連続面の挙動とその透水特性

九州大学生産科学研究所	正会員	○ 江崎哲郎
九州大学工学部		大森一徳
"	正会員	木村 強
九州大学生産科学研究所	正会員	亀田伸裕
"	正会員	西田 正

1. まえがき

岩盤の透水性は、母岩基質部の透水性とその中に存在する不連続面の透水性から決定される。一般には後者の透水性がかなり大きいので、前者は無視して考えることが多い。不連続面の透水性を決定するには、まず単一の不連続面の透水特性に関する知識が必要で、主として実験的な研究が展開されてきた。そして特に、不連続面の応力による変形特性にもとづく透水性の変化が研究されている¹⁻³⁾。しかしながら、これらのほとんどは、かみ合った不連続面を取りあつたものである。一般に不連続面の変形は垂直変形のみならず、せん断変形も生じる。このような変形によって不連続面はかみ合わなくなり、岩の強度に比べて地山応力が小さい範囲ではダイレタンスを生じて不連続面の開口は増加する。本研究は、垂直応力およびせん断応力による不連続面の変形挙動およびそれに起因した透水特性の変化を考慮した地盤応力-透水同時解析法の開発を目的として、その第一ステップとして、単一不連続面の基礎的特性を検討するために、自作したせん断試験機および透水試験機を用いて実験的研究を行ったものである。

2. 供試体

使用した岩石は、韓国南源産花こう岩(比重 2.61, 吸水率 0.37%, 飽水状態での一軸圧縮強度 162 MPa)および長崎県相浦産砂岩(2.68, 12.2%, 36.6 MPa)である。供試体は $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱形(せん断試験は $\phi 5\text{cm} \times 8\text{cm}$)で、両端が平行になるように整形し、真空脱気を72時間施して飽水させた。供試体は、圧裂によって岩石の目(rift plane)の方向に人工的な不連続面を作製した。

3. 不連続面のせん断試験

3. 1 せん断試験の概要

透水試験に先立って、せん断試験を行った。不連続面の透水性はすきま幅によって最も影響される。すきま幅は、不連続面に加わる垂直応力による閉合およびせん断変形にともなうダイレタンスによる開口によって、変化する。透水性を規定するすきま幅を求める方法としてはせん断試験が最も適当であり、著者らの試作したせん断試験機では、せん断変位にともなう垂直変位の変化を正確にとらえることができる⁴⁾。本せん断試験機については、ここでは省略する(詳細は文献4参照)。試験は垂直応力一定(0.2, 0.5, 1, 2, 5 MPa)の条件下で行い、せん断変位 20 mmまでせん断したら逆方向にせん断した。各方向の応力および変位の測定は、垂直方向がロードセル及び2個の変位計で、せん断方向は2個のロードセル及び変位計で行った。

3. 2 試験結果及び考察

各垂直応力下でのせん断応力-せん断変位曲線及び垂直変位-せん断変位曲線をFig. 1に示す。0.5-2 mmのせん断変形でせん断強度がピークを示しており、その後、残留応力を示している。垂直応力が大きくなれば、ピークせん断応力及び残留応力は大きくなる。垂直変位は一般に、せん断開始後、急激に増加する。強度がピークをすぎると、増加の割合は小さくなり、やがてある値に達する。ダイレタンスは垂直応力が小さいほど大きくなる。垂直応力が 5 MPa のときは、コントラクタンスの傾向を示

す。次に、すきま幅の変化を求めるために、初載荷時の垂直応力-垂直変位曲線を求めた (Fig. 2)。かみあった不連続面のすきま幅の変化はせん断変位 0 の点で、かみあわない不連続面のすきま幅の変化はせん断変位 3 mm の点で求めた。測定した垂直変位は、せん断箱及び岩石基質部の変位も含む。従って、インタクトの岩石に垂直応力を加えた時の変位を求め、差し引いた。かみ合った不連続面のすきま幅は、図中の実線で示される。この曲線を双曲線 $\sigma_n = d / (a - b \cdot d)$ として閉合するときの d を求めると 0.29 mm となる。この値は本試験体の無応力時のすき間幅 0.3 mm、およびせん断試験から求めた不連続面の粗さ係数 $JRC = 11.0$ ⁴⁾ から推定されるすき間幅 0.22 mm⁵⁾ から考えて妥当であろう。かみあわない不連続面のすき間幅は、同様に実線で示されるが、垂直剛性は非常に小さくなる。

4. 透水試験

4. 1 試験機および試験方法

かみ合った不連続面及び、かみ合った割れ目面を 3 mm ずらしたかみあわない不連続面をもつ供試体を用いて、応力状態(周圧、入力側圧力、出力側圧力)を変化させて透水試験を行った。

今回、試作した透水試験機の概略を Fig. 3 に示す。試験機の特徴、仕様は以下の通りである。

①バックプレッシャーバルブの使用によって、単一の圧力源にて、任意の圧力、動水勾配を

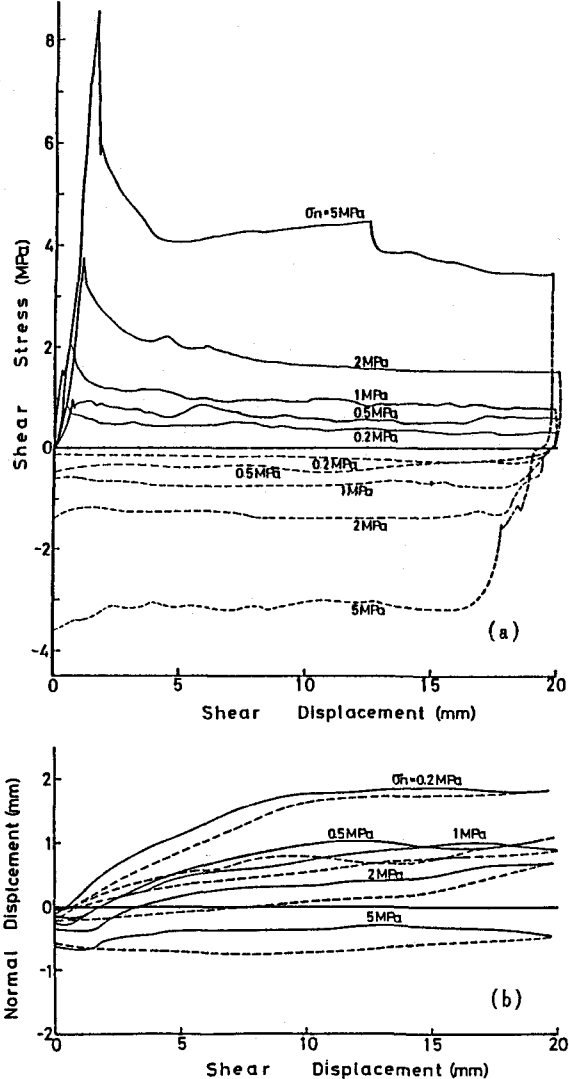


Fig.1 せん断試験結果 (a)せん断応力-せん断変位、(b)垂直変位-せん断変位

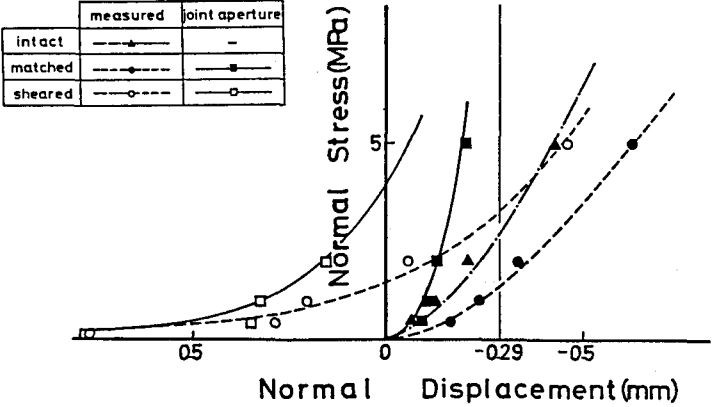


Fig.2 垂直応力-垂直変位の関係

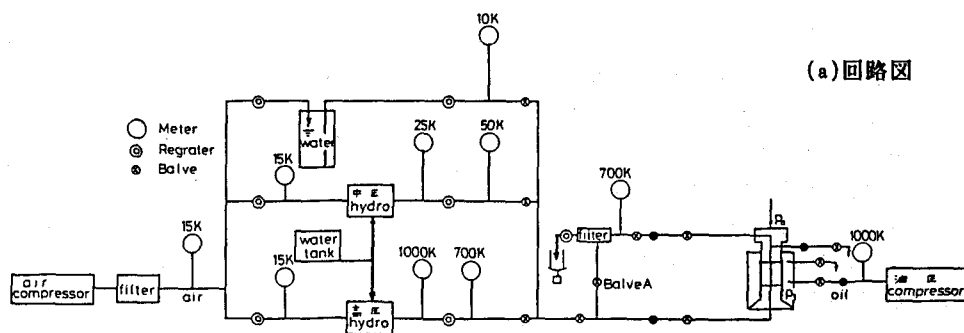


Fig. 3 透水試験機概要

独立して設定することができる。また流量も精度よく計測できる。従来の透水試験機は、供試体の一方に圧力を加えて、その透水量を測定するのが一般的である。供試体の両端に圧力を加える方式でも、圧力源が2個要ることや流量計測の精度に問題があったが、本機においてはこれらが改良された。

② 流量を電子天秤—マイクロコンピュータのシステムで自動計測する。従って瞬間的流量の変化も正しく計測できる。

③ 広範囲の圧力が設定できる。周圧最大100MPa、水压の設定圧力範囲は20KMPa～70MPa

④ 回路の管の抵抗による圧力低下の影響を小さくするために、圧力検出器はなるべく供試体に近いところに設置した。

⑤ 水は脱気水を用い、圧縮空気、水の接触部はゴム膜を介して行なう。

今回の実験は、1～5 MPaの各静水压下で行なった。周圧及び入力側の圧力は、ひずみゲージ式圧力変換器で設定した。入力側圧力及び出力側の圧力は、最大圧力を0.5 MPaとし、入口側圧力および動水勾配をパラメータとして、それぞれいくつかの値について実験を行なった。流量は、所定の圧力値に設定した後、マイクロコンピュータのスクリーンに表示される単位時間の流量がほぼ一定になったことを確認して記録した。

4. 2 実験結果および考察

Fig. 4 (a)に砂岩の場合の透水係数と動水勾配の関係を示す。入力側圧力が一定の場合、周圧の増加によって流量が減少している。また、周圧が一定の場合、入力側圧力の増加、間隙圧の増加によって

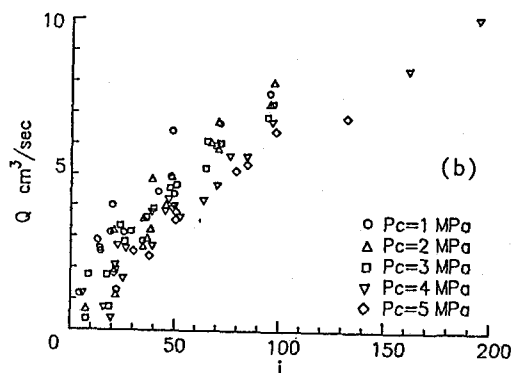
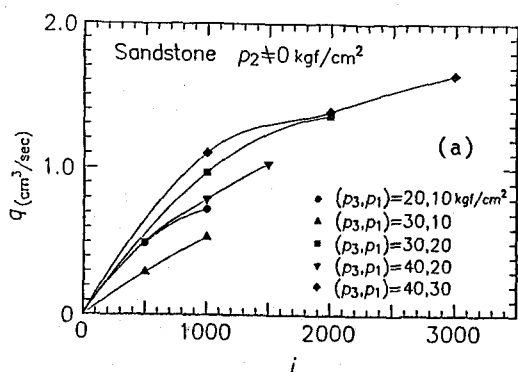
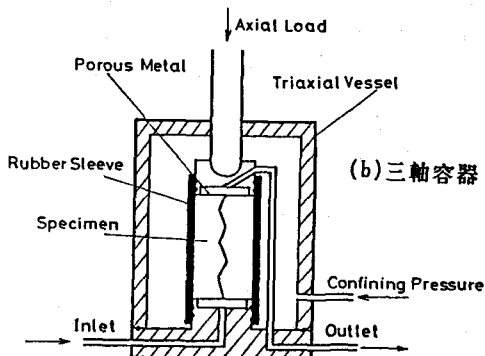


Fig. 4 透水係数と動水勾配の関係

流量が増加している。これは不連続面が周圧によって閉じ、間隙圧によって開くという有効応力の考え方が成立することを意味する。また、動水勾配がおよそ1000以上になると Darcy 則が成り立たなくなる。このような透水係数の場合には、入力側の圧力を過剰に大きくすると異なった結果が得られる。不連続面の幅によって動水勾配を制限しなければならない。(b)は花こう岩の場合を示す。Fig.5は平行平板を仮定して求めた透水係数 k_q と平均間隙圧 P_m の関係を示す。間隙圧の増加にともない透水係数は増加する。同図に前出の方法により求めたすき間幅 d を用いた透水係数 k_d も示した。 k_d は k_q より1オーダー低くなる。しかし、花こう岩のようにすきま幅が大きい場合には、不連続面の粗さの影響が小さくなり、かみ合った不連続面では k_d と k_q は近い値となる。一方、かみ合わない不連続面では、かみ合った場合に比べて、 k_q と k_d との差が大となる。Fig.6には、抵抗係数 f とレイノルズ数 Re の関係を示す。Louis²⁾などによれば、すきま幅が大きくなるほど、 f が小さくなって平行平板の式に近づく。しかし、実験結果は、すきま幅の大きなかみ合わない不連続面の場合が、むしろ f が大きくなる傾向を示す。このことは、 f がすきま幅だけでなく、不連続面の波長、ずれ、部分的な接触、三次元的効果の影響が大きいことを示している。

5. あとがき

不連続面の透水実験はデータのばらつきが大きく、目づまりもあって、計測、解釈が非常に難しい。とくに、かみ合わない不連続面の実験方法は問題があり、現在さらに検討中である。

参考文献

- 1) Iwai, K., Ph. D Thesis, UC, Berkeley (1976)
- 2) Louis, C., Rock Hydraulics, Rock Mechanics, L. Mueller ed., Univ. Karlsruhe (1973) pp. 300-387
- 3) 小島圭二, 日本鉱業会春季大会, pp.265-266 (1982)
- 4) Ndankong A.S., 九州大学学位論文 (1984)
- 5) Barton, N. et al, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 22-3 (1985) pp.121-140
- 6) 江崎哲郎他, 第15回岩盤力学シンポジウム, 41-45 (1983)
- 7) 渡辺邦夫, 埼玉大学地盤水理施設研究報告, No.2 (1983)

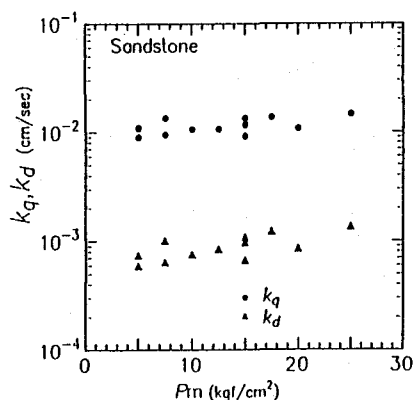


Fig.5 透水係数 k_q および k_d

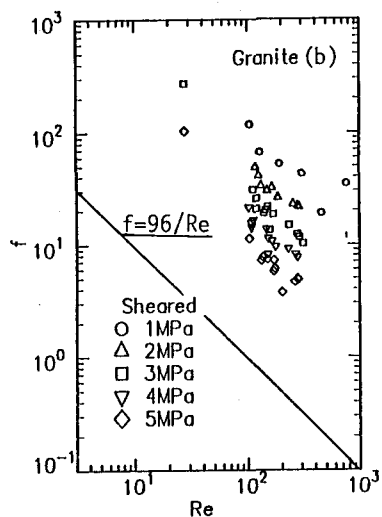
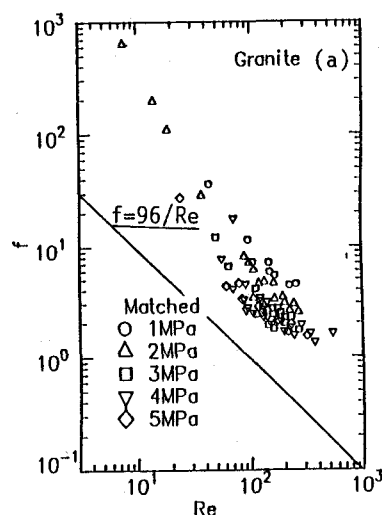


Fig.6 抵抗係数 f と レイノルズ数 Re の関係

(30) The Mechanical Behavior and Permeability of Rock Joints

Dependent on Stress State

by

Tetsuro ESAKI*, Kazunori Omori**, Tsuyoshi KIMURA**,

Nobuhiro KAMEDA* and Tadashi NISHIDA*

* Research Institute of Industrial Science, Kyushu University

** Department of Mining, Kyushu University

ABSTRACT

This paper describes the direct shear tests and permeability tests which were performed to clarify the mechanical behavior and permeability of rock joints depending on the stress state. The used specimens are cylindrical and contain an artificially made joint by splitting. The pressure gradient between both the sides of the specimen is determined only by the inlet pressure in the conventional permeability testing apparatus because the outlet flow through the specimen is released to an atmosphere. This is unsuitable to the rock mass at great depth. Contrarily, the inlet and outlet pressures are independently controlled in the present testing apparatus so that the tests can be carried out also under high outlet pressure.

The tests on the interlocked joints under the various values of confining pressure, inlet and outlet pressures showed that the permeability of such joints depended on effective stress defined by normal stress acting on the joints and pore pressure in them. Since the interlocked joints were considered to change their aperture with shear deformation, the permeability tests were performed also by use of the mismatched joints whose dilatancy characteristics were obtained from the direct shear tests.