

室内実験による岩盤割れ目の応力-浸透関係に関する検討

A study of the relationship between stress and permeability of a rock fracture by laboratory tests.

池川 洋二郎*

Yojiro IKEGAWA

The existence of a low permeable zone to form a concentric circle behind of near field is estimated by a measured result of pore water pressure at the vicinity of a tunnel. In order to consider the mechanism of the behavior, the relationship between stress and permeability of a single rock fracture is studied by laboratory tests. The relationship among normal stress, shear stress and permeability of a fracture is obtained under small and elastic deformation.

Key Words: rock masses, fracture, stress, permeability, the vicinity of tunnel

1. はじめに

深部の地盤は主に岩盤で構成され、一般に不連続面と呼ばれる節理や断層等の割れ目や力学的な弱部が存在し、岩盤の変形、強度、透水性を大きく支配する。そこで、従来より岩盤構造物の安定性評価を目的に岩盤の割れ目の強度・変形物性に関する研究[1]-[5]が行われている。

一方、硬質岩盤の場合、断層などせん断変形が顕著に認められる弱部を除き、応力状態によっては弾性変形で考慮できる。例えば、トンネル近傍は掘削によって応力、浸透性、間隙水圧などが顕著に変化する領域で、応力が増加した領域では岩盤の割れ目に変形し、割れ目の浸透性が低下すると考えられる。ここでは、弾性を示す微小変形における岩盤の割れ目の垂直応力-せん断応力-浸透関係について室内実験により検討を行ったので概要を報告する。

2. 室内実験の概要

図-1はトンネル近傍の応力と浸透の分布模式図を示す。横軸はトンネル中心からの距離 r 、上側の図の縦軸は応力、下側の図の縦軸は透水係数 k_w である。掘削影響領域では接線方向応力 σ_θ 及び法線方向応力 σ_r は低下し、透水係数は大きくなると考えられる。このように掘削部分と掘削影響領域が応力を担わないことによる応力再配分で、掘削影響領域の奥側の同心円状の領域は応力が増加する。この応力増加により、透水係数が低下領域が、間隙水圧と湧水量の実測値を用いた解析的な評価により示した[6],[7]。ここで透水係数は初期状態の1/5程度、幅はトンネル直径の約1/2である。

ここでは、注目する低透水領域が発生したメカニズムの検討を目的とした、岩盤の割れ目の応力-浸透関係を室内実験により求めた。実験条件は深度が数百mにおいてトンネルの掘削による岩盤の割れ目の応力-浸透を想定して実験を行った。試料は、硬質な片麻岩中に建設したトンネル近傍のボーリングコアに含まれた既存の割れ目を用いた。試料形状は円柱で、円柱供試体の軸になるべく直行する単一の既存の割れ

*正会員 Ph.D 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏環境領域

目を含むように作成した。また、ここで用いた岩石コアの一軸圧縮強度は180MPa、割れ目の垂直剛性は2,100GPa/mで、非常に硬い岩盤である。

図-2は応力-浸透試験の模式図を示す。用いた供試体は、図-2右の供試体の模式図に示すように、直径50mm、高さ50mmほどの円柱で、ボーリングコアに含まれた既存の単一割れ目を含む。また、割れ目の中心から放射状に水を浸透させるため、供試体の軸部分に直径6mmの孔をあけた。また、プロトジャコノフ型一面せん断試験機は、供試体に含まれる割れ目に作用する応力方向を変えるために用いた。供試体のセット後、最大応力27MPaで10回の繰り返し载荷を行い、浸透試験の初期状態とした。繰り返し载荷におけるピーク荷重及び除荷時の荷重保持時間は60sec、载荷速度と除荷速度は500N/secとした。

応力-浸透試験時の荷重は10, 13(KN)、浸透圧は0.07, 0.08, 0.09, 0.10(MPa)、割れ目の法線と载荷方向のなす角が0, 20, 30(deg.)の計24通りの応力-浸透関係を求めた。ここで、水の浸透はビュレット内の水に空圧を作用させ、供試体の軸位置の孔を通して上部から行った。また、流量はビュレットの液面位置を差圧計で計測し、浸透圧は図中の圧力計P1で計測した。

3. 実験結果の評価概要

(1) 割れ目に作用する応力の概要

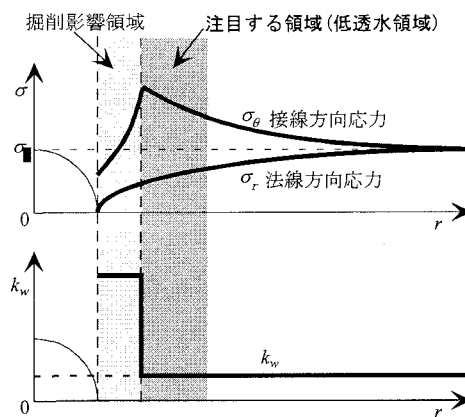


図-1 トンネル近傍の応力と浸透の分布模式図
(破線はトンネル掘削前、実線は掘削後)

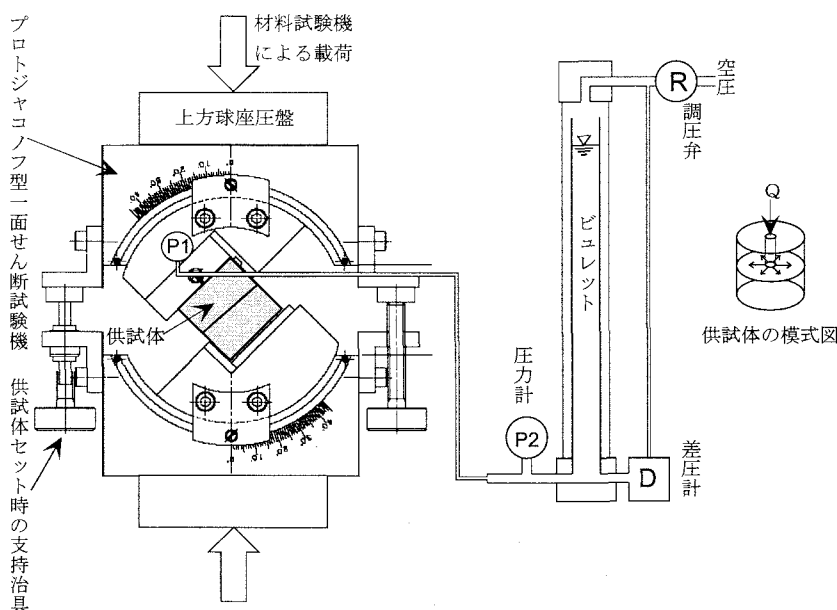


図-2 载荷角度を変えた応力-浸透試験の模式図

2次元の直行座標系においてx面、y面に作用する応力を、それぞれ、 σ_x , σ_y , $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ とし、法線 n を持つ面に作用する応力 σ_n と τ_n を考える。法線 n とx軸およびy軸となす角の余弦をそれぞれ、 l , m とすると、注目する面に作用する応力の成分 X , Y は、力の釣合いより、

$$X = l\sigma_x + m\tau_{xy} \quad Y = m\sigma_y + l\tau_{xy}$$

である。ここで、法線 n とy軸のなす角を α とすると、 $l = \sin\alpha$, $m = \cos\alpha$ より、垂直応力およびせん断応力は幾何学的関係より、次のように求まる。

$$\sigma_n = l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + 2lm\tau = \sigma_x \sin^2\alpha + \sigma_y \cos^2\alpha + 2\tau_{xy} \sin\alpha \cos\alpha \quad (1)$$

$$\tau_n = (l^2 - m^2)\tau_{xy} + lm(\sigma_y - \sigma_x) = \tau_{xy}(\sin^2\alpha - \cos^2\alpha) + (\sigma_y - \sigma_x) \sin\alpha \cos\alpha \quad (2)$$

一軸載荷では、 $\sigma_x = \tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$ より、式(1)、式(2)は次式となる。

$$\sigma_n = \sigma_y \cos^2\theta = \frac{N}{A} \cos^2\theta \quad (3)$$

$$\tau_n = \sigma_y \sin\theta \cos\theta = \frac{N}{A} \sin\theta \cos\theta \quad (4)$$

ここで、 N は一軸圧縮荷重、 A は供試体の断面積である。

割れ目の垂直剛性 k_n 及びせん断剛性 k_s は、それぞれ式(5)、式(6)で定義される。

$$k_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta E_n} \quad (5)$$

$$k_s = \frac{\Delta\tau_n}{\Delta E_s} \quad (6)$$

ここで、 ΔE_n : 垂直変形量、 ΔE_s : せん断変形量、 $\Delta\sigma_n$: 垂直応力の変化量、 $\Delta\tau_n$: せん断応力の変化量である。

(2) ポーラスメディアにおける軸対称の放射流

次に、ポーラスメディアにおける軸対称の放射流[8]の基礎式および解析解の概要を示す。ダルシー則と連続式は、それぞれ式(7)、式(8)で示される。

$$v_r = k_w \frac{\partial h}{\partial r} \quad (7)$$

$$-Q = 2\pi r v_r \quad (8)$$

ここで、 Q : 流量、 v_r : 半径方向の流速、 k_w : 透水係数、 r : 中心からの距離、 h : 全水頭である。式(7)と式(8)より、 $r=r_0$ で $h=h_0$ 、 $r=r_1$ で $h=h_1$ として解くと、流量は式(9)で得られる。

$$Q = 2\pi k \frac{h_1 - h_0}{\ln(r_0/r_1)} \quad (9)$$

また、式(9)より、全水頭は式(10)で与えられる。

$$h = (h_1 - h_0) \frac{\ln(r_0/r)}{\ln(r_0/r_1)} + h_0 \quad (10)$$

(3) 平行平板間における放射流の基礎式および解析解（定常解）

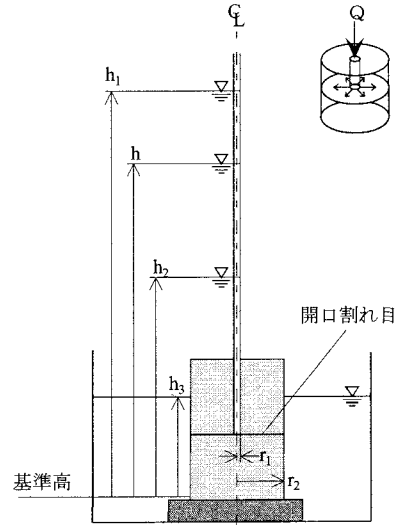


図-3 平行平板間の放射流を対象とした変水位透水試験の模式図

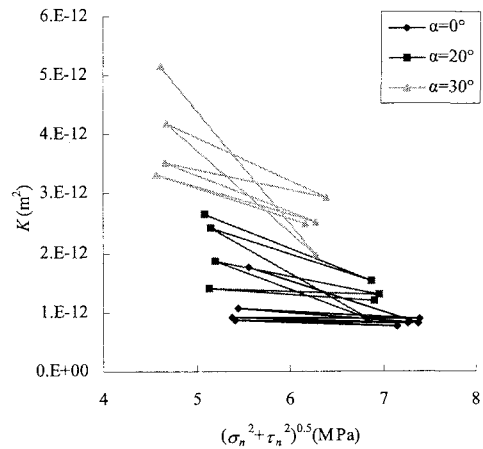


図-4 応力-浸透係数の関係

岩盤の割れ目の浸透は、滑らかな平行平板(parallel plate)間の粘性流体の層流と仮定し、解析解より流量 Q が平行平板の間隔の三乗に比例することから、三乗則(cubic law)と呼ばれ、求まる開口幅を水理学的開口幅 e と呼ぶ。ここで、三乗則は花崗岩、玄武岩、大理石などの硬質岩の引張割れ目を用いた室内実験などでは、成立性が確認[9]されている。

平行平板間の層流の平均流速は、流体の粘性を考慮し、

$$v = \frac{e^2}{12} \frac{\rho g}{\mu} \frac{\partial h}{\partial r} \quad (11)$$

で表される。また、定常状態における流量は、

$$Q = 2\pi \frac{e^3}{12} \frac{\rho g}{\mu} \frac{h_1 - h_0}{\ln(r_0/r_1)} \quad (12)$$

となる。これを水理学的開口幅に関して解くと、

$$e^3 = \frac{6\mu Q}{\pi \rho g} \frac{\ln(r_0/r_1)}{h_1 - h_0} \quad (13)$$

となる。

(4) 平行平板間における水の放射流の基礎式および解析解（変水位法）

図-3は変水位透水試験[10]に基づく、割れ目の浸透に関する模式図を示す。基準高からの液面位置を h とすると、次の連続式が成立つ。

$$A(-dh) = Qdt \quad (14)$$

ここで、 A ：円筒管の断面積である。水理学的解開口幅を用いた式(12)の連続式より、

$$Q = 2\pi \frac{e^3}{12} \frac{\rho g}{\mu} \frac{h_3 - h}{\ln(r_1/r_2)} \quad (15)$$

である。式(14)と式(15)より、次式が得られる。

$$2\pi \frac{e^3}{12} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{\ln(r_1/r_2)} dt = A \frac{1}{h_3 - h} dh \quad (16)$$

さらに、時間 t_1, t_2 のとき、全水頭が h_1, h_2 として積分すると、

$$2\pi \frac{e^3}{12} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{\ln(r_1/r_2)} (t_2 - t_1) = A \ln \left(\frac{h_3 - h_2}{h_3 - h_1} \right) \quad (17)$$

となり、 e^3 について解くと、

$$e^3 = \frac{12}{2\pi} \frac{\mu}{\rho g} \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \frac{1}{t_2 - t_1} A \ln \left(\frac{h_3 - h_2}{h_3 - h_1} \right) \quad (18)$$

となる。ここで透水係数は式(11)より、式(19)のように得られる。

$$k_w = \frac{e^2}{12} \frac{\rho g}{\mu} = \frac{K \rho g}{\mu} \quad (19)$$

ここで、 K ：固有浸透係数で、以下では、簡単に浸透係数と呼ぶ。

4. 結果

図-4は応力－浸透の関係の結果を示す。応力 $(\sigma_n^2 + \tau_n^2)^{0.5}$ は割れ目に作用する垂直応力とせん断応力の合力、固有浸透係数 K は割れ目の浸透係数、 α は割れ目の垂線と載荷方向のなす角である。従い、割れ目に作用する垂直応力とせん断応力の比 $\tan \alpha = \sigma_n / \tau_n$ と応力 $(\sigma_n^2 + \tau_n^2)^{0.5}$ をパラメータとした時の浸透性を示す。ここで垂直応力とせん断応力は、式(3)と式(4)より求まる。

図-5は上から垂直応力－せん断応力の関係 $(\sigma_n - \tau_n)$ 、垂直応力－浸透係数の関係 $(\sigma_n - K)$ 、せん断応力－浸透係数の関係 $(\tau_n - K)$ を示す。

ここで、 σ_n と τ_n は、式(3)と式(4)を用いて求めた割れ目に作用する垂直応力とせん断応力、 K は式(19)より求めた割れ目の浸透係数である。

5. 考察

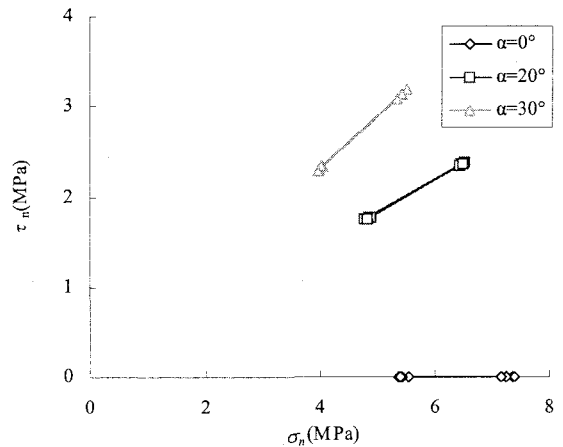
図-4の応力-浸透性の結果より次のことが考察される。応力 $(\sigma_n^2 + \tau_n^2)^{0.5}$ が5～7MPaの範囲では応力増加により、割れ目の浸透性が低下する。また、割れ目の法線と载荷方向のなす角 α が大きくなると、同じ応力増加に対し、浸透性 K は大きく減少し、なす角 α 、すなわち垂直応力とせん断応力の比 $\tan\alpha = \sigma_n/\tau_n$ が大きくなると、浸透性の変化が大きくなる。ここで、 $\tan 0 = 0$ 、 $\tan 20 = 0.364$ 、 $\tan 30 = 0.577$ である(角度の単位はdeg.)。

また、応力値が7MPaに近い場合、なす角が $\alpha = 20$ と $\alpha = 30$ (deg.)の両方の浸透性は、 $\alpha = 0$ (deg.)の浸透性に近づき、垂直応力とせん断応力の比 σ_n/τ_n の依存性が小さくなっていることも分かる。従い、応力の増加に伴い、浸透性のバラツキが小さくなり、収束する。

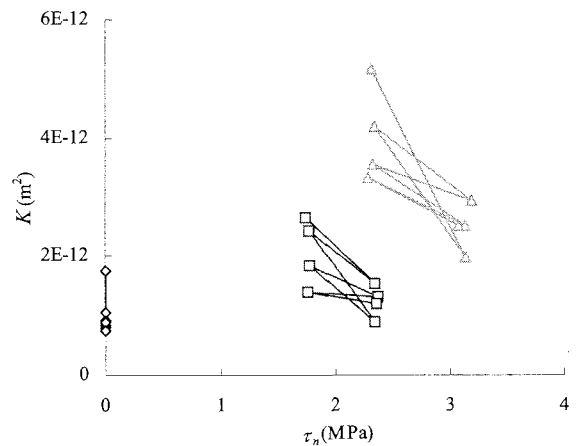
図-5の σ_n - τ_n 関係から垂直応力とせん断応力の比 $\tan\alpha = \sigma_n/\tau_n$ を一定とした実験であることが分かる。また、 σ_n - K の関係は、垂直応力が約6MPa以下において、 α が大きいほど、浸透係数の変化は大きく、せん断応力による割れ目のダイレイタンスーが現れている。一方、 τ_n - K 関係では、せん断応力が増加しているにもかかわらず、浸透係数は低下しており、垂直応力が割れ目を併合させる効果の方が勝っている。従い、応力レンジおよび応力比 σ_n/τ_n が応力-浸透関係を支配すると考える。

また、せん断応力による割れ目の開口(ダイレイタンスー)が垂直応力の増加により抑えられると考えると、ここで示した応力レンジより大きな応力(7MPa以上)の近傍においては、せん断応力が生じない $\alpha = 0$ (deg.)における浸透性に漸近すると思われる。

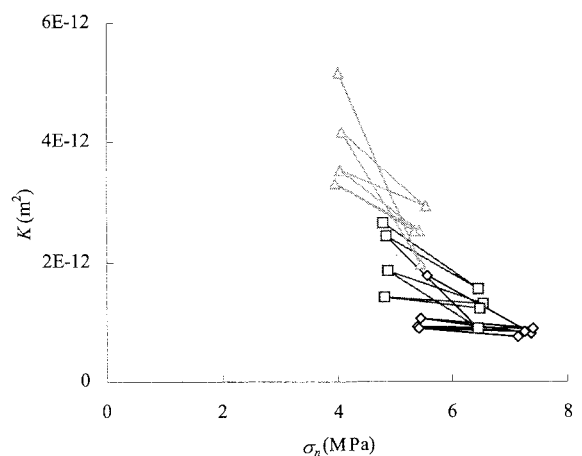
ここでは応力比 σ_n/τ_n が一定のパスにおける割れ目の浸透性に関する実験であるが、例えば、トンネル掘削における近傍の応力変化を考えた場合、接線方向の応力は増加するのに対して、



(a) σ_n - τ_n 関係



(b) τ_n - K 関係



(c) σ_n - K 関係

図-5 応力-固有浸透係数の関係

法線方向の応力は低下し、割れ目に作用する応力比 σ_n/τ_n は一定ではない。このため、対象とする現象における応力パスを詳細に模擬した検討が必要と考える。

以上の図-4および図-5の考察より、次のようにまとめられる。実験に用いた片麻岩の割れ目に関し、片麻岩の割れ目の応力-浸透関係の結果より、割れ目に作用する応力範囲が5～7MPaにおいて、応力の増加に伴い浸透係数は小さくなること、浸透係数のバラツキが小さくなることを示した。また、実験を行った応力レンジより大きな応力(7MPa以上)の近傍では、せん断応力が生じない割れ目の浸透性に漸近すると考えられる。これは、せん断応力で割れ目が開口するダイレイタンシーより、垂直応力で割れ目が併合する方が勝るためと考えられる。

6. まとめ

応力比(垂直応力/せん断応力)一定で、弾性を示す微小変形における片麻岩の割れ目の応力-浸透関係の結果より、割れ目に作用する垂直応力とせん断応力の合力の範囲が5～7MPaにおいて、応力の増加に伴い浸透係数は小さくなること、また、浸透係数のバラツキが小さくなり収束することを示した。また、実験を行った応力レンジより大きな応力(7MPa以上)の近傍では、せん断応力が生じない割れ目の浸透性に漸近すると考えられる。これは応力比が一定でも、せん断応力で割れ目が開口するダイレイタンシーより、垂直応力による割れ目が併合の方が勝るためと考えられる。

参考文献

- [1] Esaki T, Ikusada K, Aikawa A., Kimura T.: Surface roughness and hydraulic properties of sheared rock. Fractured and Jointed Rock Masses, pp93-98, Lake Tahoe, CA, 1995.
- [2] 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 橋村義人: 削れを考慮した岩盤不連続面のせん断挙動解析 土木学会論文集, III-666: III-53, pp.145-158.2000.12.
- [3] R.Olsson, N.Barton: An Improved model for Hydromechanical coupling during shearing of rock Joints, Int. J. Rock Mech. & Mining Science 38, 99317-329, 2001.
- [4] 矢野隆夫, 青木一男, 大西有三, 大津宏康, 西山 哲, 水田潤一: 岩盤不連続面の表面形状を考慮したせん断強度式, 土木学会論文集, III-61, pp. 59-73, 2002.12.
- [5] 矢野隆夫, 青木一男, 大西有三, 大津宏康, 西山 哲, 高木克実: 垂直剛性一定一面せん断時の岩盤不連続面のせん断挙動, 土木学会論文集, 729/ III-62, pp.115-130, 2003.3.
- [6] 池川: 岩盤割れ目の垂直剛性と透水性に着目した深部のトンネル周りに生じた低透水域の評価, 第47回地盤工学シンポジウム論文集, pp335-342, 2002.11.
- [7] 池川, 中川: 小規模空洞を使った水封式による圧縮空気貯蔵実験-残留した圧縮空気の挙動計測-, 土木学会論文集, No.722/ III-61, pp331-344, 2002.12.
- [8] 足立紀尚, 田村武: 高圧湧水化のトンネル工における水抜孔の効果と注入域の適正規模, 土木学会論文集, No.280, pp87-98, 1978.
- [9] P.A.Witherspoon: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. Water resources research, Vol.16, No.6, pp1016-1024, Dec., 1980.
- [10] 赤井浩一: 土質力学, 朝倉書店, pp268.