



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	破壊した岩石を圧密した際の浸透率変化に関する検討
Author(s)	藤井, 義明; 熊倉, 聡; Alam, A. K. M. Badrul
Description	資源・素材2012（秋田）—平成24年度資源・素材関係学協会合同秋季大会—、2012年9月11日～13日、秋田大学 手形キャンパス、秋田市
Citation	資源・素材2012（秋田）企画発表・一般発表(A)(B)(C) 講演資料, 289-292
Issue Date	2012-09-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/50042
Type	conference paper
File Information	MMIJ2012Akita, 289-292.pdf



破壊した岩石を圧密した際の浸透率変化に関する検討

北大工 藤井義明・熊倉聡・Alam, A.K.M. B.

1. はじめに

各種貯蔵空洞周囲には EDZ が生じ、遮蔽性が損なわれる場合があると予想されるが、一方で、破壊に伴い一旦増加した浸透率は支保や膨張性充填材による圧力の下で低下する可能性がある。

筆者らは、実験室レベルで来待砂岩・豊富珪質泥岩・稲田花崗岩について三軸圧縮破壊させた後に圧密を実施し、破壊前の応力状態に戻したときに、浸透率が破壊直後のそれぞれ 0.3～0.6、0.4、0.2 倍になることを示した(熊倉ら、2012)。

来待砂岩と稲田花崗岩の浸透率は、破壊後の圧密に至る応力増加時に低下し、圧密中にはほとんど変化がなく、破壊前の応力状態に戻すときに若干増加した。これに対して、豊富珪質泥岩では破壊後の圧密中にも浸透率は低下し続け、破壊前の応力状態に戻す際にも増加しなかった。

このような、岩石を構成する鉱物の変形・強度特性に起因すると思われる挙動の差異を、定性的ではあるが、表すことができるモデルを開発したので発表する。

2. モデル

透水性を有する岩石を破断面と岩石に分けてモデル化した(Fig. 1)。

破断面は、パネ・ダッシュポット・スライダー・スペーサーを直列に接続した粘弾塑性要素を 10 x 10 本並べた破断面要素で表した(Fig. 2)。破断面形状は四角錐とし(Fig. 3)、各粘弾塑性要素のスペーサーにはその位置に応じた初期間隔を与えた。各粘弾塑性要素は力学的に結合していないので、ポアソン比を 0 と仮定したことになる。

平行平板流れの理論式より

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h^2 - y^2) \\ \bar{u} &= \frac{\int_0^h u dy}{h} = \frac{\partial p}{3\mu} h^2 \\ Q &= 2hb\bar{u} = \frac{2}{3\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^3 b \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 u :流速、 μ :粘性係数、 p :圧力、 x :流れ方向の座標、 h :開口幅の半値、 y :厚み方向の座標、 $\bar{u}$:平均流速、 Q :体積通過速度、 b : z 方向の幅である。一方、浸透率と流量の関係は以下のようなものである。

$$Q = \frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} A \quad (2)$$

(1)式と(2)式を比較し、 $A = bH$ を代入すれば見掛けの浸透率について

$$K = \frac{2}{3} \frac{h^3}{H} \quad (3)$$

が得られる。ここで、 H は破断面の平均間隔で、粘弾塑性要素長の 2 倍とした。(3)式を用いて各粘弾塑性要素の浸透率を算出・平均し破断面の浸透率とした。

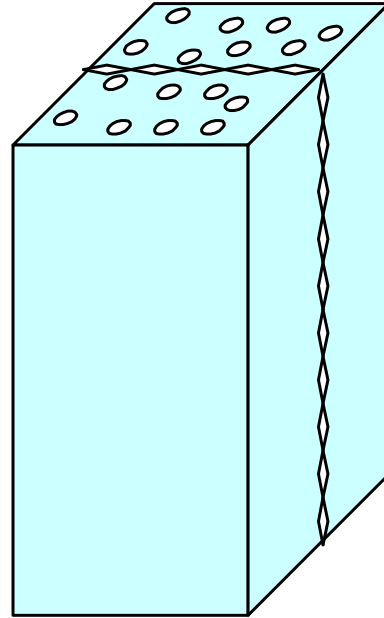


Fig. 1 A rock specimen containing a rupture plane and straight tubes.

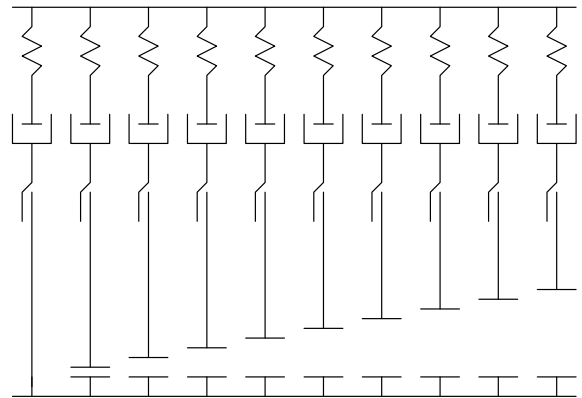


Fig. 2 Rupture plane element

破断面以外の岩石については、透水方向に配向した円管の存在を仮定した。半径 a の円管内の流速 u は、Hagen-Poiseuille 流れ (ファン、1974) より

$$u = \frac{1}{4\mu} (a^2 - r^2) \frac{\partial p}{\partial x}$$

平均流速は、

$$\bar{u} = \frac{\int u dA}{A} = \frac{a^2}{3\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

空隙率を n 、供試体断面積を A_s 、円管数を N とすると

$$n = \frac{N\pi a^2}{A_s}$$
$$a = \sqrt{\frac{nA_s}{N\pi}}$$

であり、流量は

$$Q = N\bar{u}\pi a^2 = n \frac{a^2}{3\mu} \frac{\partial p}{\partial x} A_s$$

であるから、見掛けの浸透率は

$$K = \frac{na^2}{3} \quad (4)$$

となる。

岩石の粘弾性モデルとしてバネとダッシュポットを直列に結合したMaxwell物体を仮定すると、せん断係数 G 、粘性係数 η 、遠方で等方圧 p を受ける物体中の孔の時刻 t における半径縮小量は平面ひずみで

$$u_r = \frac{pa}{2G} + \frac{pa}{2\eta} t$$

となる (Goodman, 1980)。 ν をポアソン比として今回考えている静水圧下における軸圧分補正して、

$$u_r = \frac{pa(1+2\nu^2)}{2G} + \frac{pa}{2\eta} t \quad (5)$$

である。(5)式の縮小量を考慮した半径を(4)式に代入して岩石部の浸透率を算出した。

破断面の浸透率と岩石の浸透率を合計して破断面を含む岩石の浸透率とした。

3. 計算結果

モデルには岩石破壊時の破断面を想定し、所定の応力を与え初期状態とした。次に、一定の速度で圧縮変位を与え、所定の圧密応力に達したらその応力を保つように変位速度を加減した。しばらく後、圧密前の応力まで除荷した。

破断面要素の変形は大略以下ようになる。圧密までの载荷に伴いまず、破断面凸部のバネが収縮し、ダッシュポットも収縮を開始する。破壊後の载荷が進むと、徐々にスペーサーが接触し(破断面の閉口)、応力の伝達は凹部へと拡大していく。凸部の応力が降伏応力に達するとスライダが作動を開始し、その要素の応力はそれ以上増加しない。圧密中にはダッシュポットやスライダが作動する。除荷に伴いスプリングが伸び応力は速やかに減少し、スライダやダッシュポットは当然ながら戻らない。

計算に用いた諸物性値を Table 1 に示す。

来待砂岩を想定したベースケースにおいて、圧密中に変位が若干増加している (Fig. 4a)。浸透率は、载荷に伴う減少、圧密時の緩やかな減少、除荷に伴う载荷前よりは小さい値ま

での増加を示しており、定性的には、実験結果とよく一致している。岩石中の円管は弾性変形と二次クリープにより多少変形するが、今回計算した範囲では、合計しても浸透率の有効数字 4 桁以内に現れない大きさであり、破断面を含む岩石の計算結果にみられる時間依存性挙動は専ら破断面における変形によってもたらされている (Fig. 4b)。

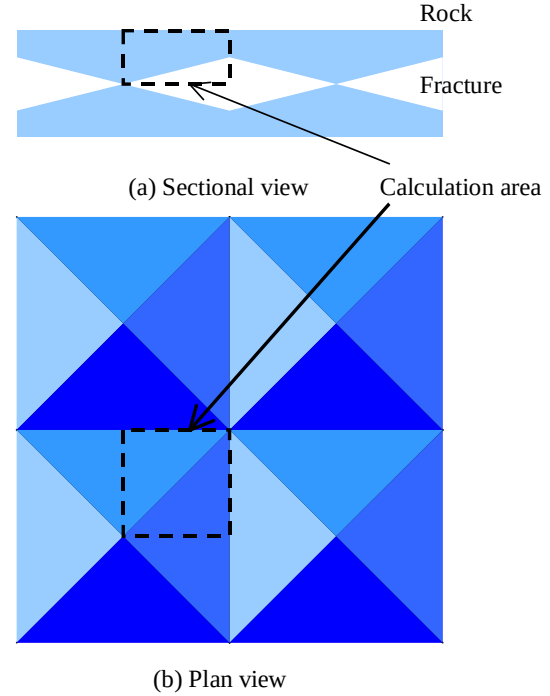


Fig. 3 Sectional and plan views of the model for rupture plane.

Table 1 Parameters used in the calculation.

Properties	Base case	Hard rock	Soft rock
Viscosity of dashpot (Pa·s)	10^{-15}	10^{-14}	10^{-16}
Tangent modulus of spring (GPa)	30	60	15
Yield stress of slider (MPa)	100	=	=
Element length (mm)	15	=	=
Displacement per step for stress increase (nm)	5	=	=
Time step (s)	1	=	=
Initial stress (MPa)	2	=	=
Consolidation stress (MPa)	4	=	=
Initial half aperture (μm)	1	=	=
Porosity	0.01	=	=
Radius of circular channels (μm)	0.01	=	=
Poisson's ratio	0.2	=	=

静粘性係数を大きくすると粘性変形が減少し、小さくすると増える (Fig. 5a)。ヤング率を大きくすると弾性変形が減少し、小さくすると増えるが、ヤング率を小さくした場合は、岩石の浸透率の方が大きくなり、破断面を含む岩石全体としての浸透率はあまり小さくならない (Fig. 5b)。降伏応力を小さくすると、圧密へ至る载荷での塑性変形が増加する (Fig. 5c)。

稲田花崗岩で見られた特徴を再現すべく、静粘性係数を 10 倍、ヤング率を 2 倍にして計算してみると、主に弾性変形のみによる载荷での減少との除荷での増加がみられた (Fig. 5d, Hard)。

豊富珪質泥岩でみられた特徴を再現すべく、静粘性係数を 1/10、ヤング率を 1/2 にして計算してみると、実験と同様、除荷時に浸透率が増加しなかった (Fig. 5d, Soft)。

4. まとめ

破断面を粘弾塑性体、岩石を粘弾性体としたモデルを圧密し、浸透率の変化挙動を計算したところ、三軸破壊させた岩石を破壊後に圧密した際の浸透率の変化挙動が定性的にはある程度再現できた。

スプリングは岩石の弾性変形、スライダーは鉱物粒子の破碎などによる塑性変形、ダッシュポットは応力腐食・圧力溶解・粘

土鉱物の変形などによる粘性変形を表し、後 2 者は不可逆的な浸透率の減少、すなわち、永続的な遮蔽性回復に關与する。

破壊後の圧密時に生じている物理現象を明らかにする一助にすべく、モデルを改良し、実験結果を定量的に再現できるようにしていきたい。

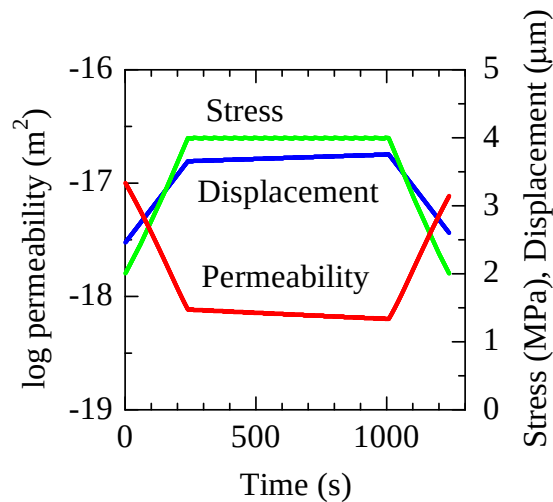
なお、本研究の一部は科研費(22560804)の助成による。

引用文献

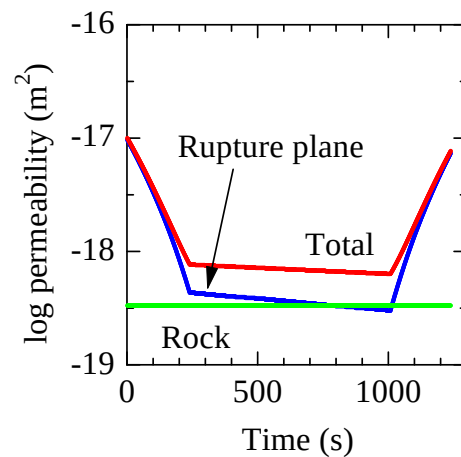
熊倉聡・石島洋二・藤井義明・児玉淳一 (2012)、破壊後の圧密による岩石の透水性変化に関する研究、J. MMIJ, Vol. 128, Nos. 4/5, pp. 163-172

Y.C.ファン (1974)、連続体の力学入門、改訂版、培風館

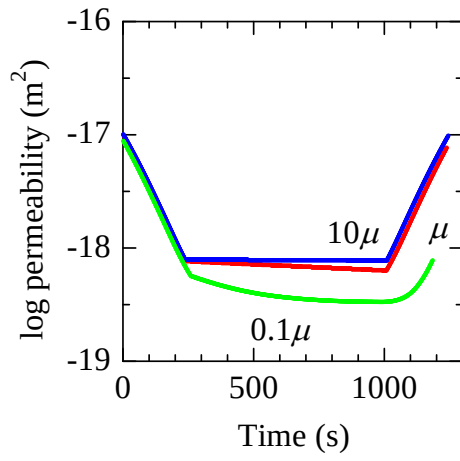
Goodman, R.E. (1980), Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, New York



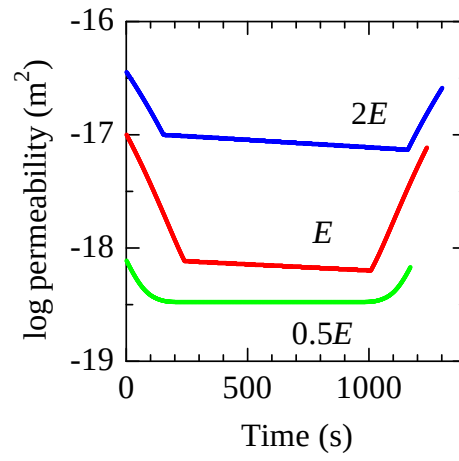
(a) Stress, displacement and total permeability
Fig. 4 Results for the base case.



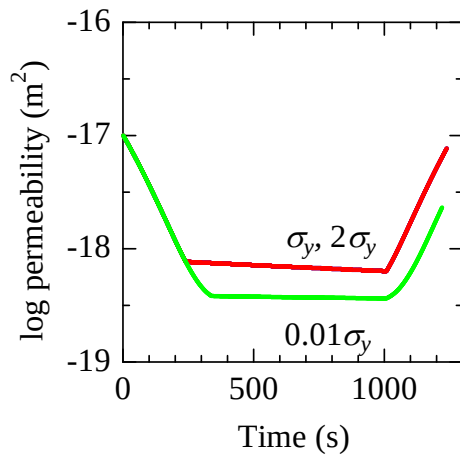
(b) Permeability of rock, rupture plane and rock+rupture plane



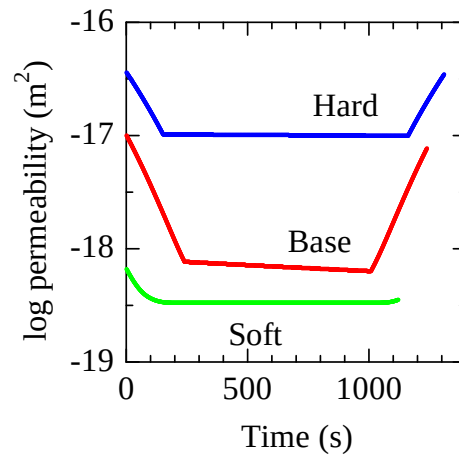
(a) Effects of viscosity



(b) Effects of tangent modulus



(c) Effects of yield stress



(d) Behavior of imaginary hard rock and soft rock

Fig. 5 Effect of consolidation on permeability of a rock with a rupture plane.