

サブクリティカル亀裂進展および圧力溶解を考慮した岩盤不連続面の圧縮挙動評価

安原 英明^{1*}・木下 尚樹¹・中島 伸一郎²・岸田 潔³

¹愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

²京都大学 次世代開拓研究ユニット (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)

³京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

*E-mail: hide@dpc.ehime-u.ac.jp

本研究では、作用応力・温度に依存するサブクリティカル亀裂進展現象および圧力溶解現象を考慮したそれぞれのモデルを用いて、石英で構成される岩盤内の不連続面の圧縮過程の経時変化を定量的に評価した。また、単一不連続面を有する岩石供試体を用いた透水試験結果と2つのモデルによる解析結果との比較検証を実施した。その結果、サブクリティカル亀裂進展現象を考慮したモデルが精度良く実験結果を再現できることが確認された。また、室温条件では、常にサブクリティカル亀裂進展が圧力溶解よりも顕著となることが確認された。

Key Words : subcritical crack growth, pressure solution, rock fracture, permeability

1. はじめに

放射性廃棄物や二酸化炭素等のエネルギー生成後の副産物を深地層下の岩盤内に隔離し、長期に渡り安全を確保・保証するためには、対象となる岩盤の水理学特性を詳細に把握することが必要不可欠である。特に、低透水性岩石を有する不連続性岩盤では、流体の流れは不連続面で支配的となるため、不連続面の透水性を時間的かつ空間的に把握することは非常に重要となる。また、外的要因により不連続面周辺の応力や温度状態が変化する場合、力学および化学作用などの複合的な影響によって不連続面の開口幅は変化し、その結果、透水性は時間の経過とともに変化することが考えられる。しかしながら現在までに、そのような力学—化学の相互作用を考慮した岩盤不連続面の透水性（開口幅）変化を評価した研究は、あまりおこなわれていない。

本研究では、力学—化学の相互作用現象の中でも特に、応力および温度条件に依存するサブクリティカル亀裂進展¹⁾と圧力溶解²⁾に着目し、それぞれの挙動を再現できる2つのモデルを用いて時間依存する岩盤不連続面の圧縮過程を評価する。また、得られる解析結果と既存の透水試験結果^{3,4)}との比較検証を行うことにより、両モデルの有用性を検討する。

2. 不連続面の圧縮機構

ここでは、サブクリティカル亀裂進展現象および圧力溶解現象について言及し、不連続面の圧縮過程を表現するモデルについて説明する。

(1) サブクリティカル亀裂進展モデル

サブクリティカル亀裂進展は、亀裂先端での応力状態が臨界値以下でも亀裂が進展していく現象で、巨視的に見ると岩石のような脆性材料でも延性的な塑性変形を示す。一般に、サブクリティカル亀裂進展速度は非常にゆっくりであるが、長期間に渡り地下岩盤構造物の安全性を確保するためには、その影響を無視することはできない。また、サブクリティカル亀裂進展速度は亀裂先端の応力・温度条件および水分等の環境に大きく依存することが知られており、様々な境界条件での実験的研究が実施されている。特に、Dove⁵⁾は、石英のサブクリティカル亀裂進展について詳細な検討を行っており、亀裂の進展速度 v を次のように定義している。

$$v = A_{\text{H}_2\text{O}} \exp\left(\frac{-\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}}{RT}\right) \exp\left(b_{\text{H}_2\text{O}}^* K_I\right) \left(\theta_{\text{Si-O}}^{\text{H}_2\text{O}}\right) + A_{\text{OH}^-} \exp\left(\frac{-\Delta H_{\text{OH}^-}}{RT}\right) \exp\left(b_{\text{OH}^-}^* K_I\right) \left(\theta_{\text{Si-O}}^{\text{OH}^-}\right) \quad (1)$$

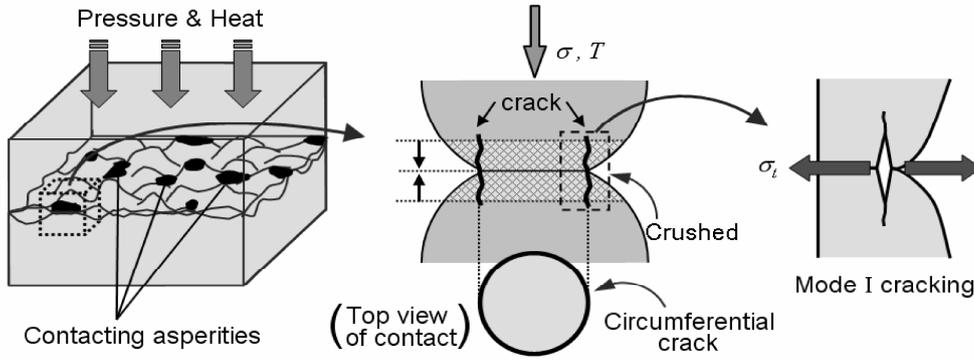


Figure 1. Schematic of compaction at asperity contacts induced by subcritical crack growth.

ここで、 A_i ：水分子および水酸基イオンに関する頻度因子 ($i=\text{H}_2\text{O}$ or OH)， ΔH_i ：活性化エンタルピー ($i=\text{H}_2\text{O}$ or OH)， R ：ガス定数， T ：絶対温度， b_i^* ：亀裂先端の幾何学的形状から実験的に決定される定数， $\theta_{\text{Si-O}}^i$ ：水分子および水酸基イオンと反応する割合で、間隙流体のpHに依存する定数， K_I ：モードIの応力拡大係数を表す。また、応力拡大係数は、亀裂先端の応力状態を考慮して次式で表される¹⁾。

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\sigma_i (2\pi r)^{1/2} \right] \quad (2)$$

ここで、 σ_i ：接触部引張応力， r ：亀裂先端からの微小距離である。

Fig. 1に示すように、不連続面内の1つのアスペリティ接触部を代表要素とし、サブクリティカル亀裂進展速度でそのアスペリティが破壊圧縮されると仮定すると、不連続面開口幅の変化は、一次近似的に次式で表すことができる。

$$\frac{db}{dt} = -(1 - R_c) \cdot v \quad (3)$$

ここで、 b ：不連続面開口幅， R_c ：不連続面内のアスペリティ接触率を表す。上式により、任意の時間における不連続面開口幅の変化率を評価することが可能である。

(2) 圧力溶解モデル

圧力溶解現象は、上部地殻における延性・塑性変形を及ぼす支配的な機構として知られており、様々な研究が行われてきた。圧力溶解は、作用する応力・温度で活性化し、アスペリティ接触部における溶解、接触部から間隙内への溶解物質の拡散、間隙自由面での沈殿現象という一連の過程をたどる。アスペリティ接触部での溶解現象が支配過程である時、不連続面の開口幅変化は次式で表すことができる⁹⁾。

$$\frac{db}{dt} = -\frac{3V_m^2 k_+^0 (1 - R_c) (\sigma_a - \sigma_c)}{RT} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

ここで、 V_m ：モル体積， k_+^0 ：溶解速度定数の頻度因子， σ_a ：接触部圧縮応力， σ_c ：臨界応力， E_a ：活性化エネルギーである。

(3) 圧縮挙動評価

式(3)，(4)より、サブクリティカル亀裂進展および圧力溶解を考慮した両モデルにおいて、アスペリティ接触部に作用する応力がそれぞれの圧縮挙動を支配するパラメータであることがわかる。サブクリティカル亀裂進展あるいは圧力溶解による不連続面の圧縮過程が進行するとき、不連続面の幾何学形状は不可逆的に変化する。その結果、アスペリティ接触部の面積は圧縮に伴い増加し、作用する応力レベルは減少することが考えられる。しかしながら、式(3)，(4)はそのような不可逆性に対応しておらず、現実的な圧縮挙動予測ができない。そこで、次式に示すように不連続面の開口幅と接触率の関係式を定義することにより、圧縮に伴う応力レベルの変化を推定する⁷⁾。

$$\langle b \rangle = b_r + (b_0 - b_r) \exp\left(-(R_c - R_{c0})a\right) \quad (5)$$

ここで、 $\langle b \rangle$ ：不連続面平均開口幅， b_0 ：初期開口幅， b_r ：残留開口幅， R_{c0} ：初期接触率， a ：定数である。式(5)より任意の開口幅における不連続面内アスペリティの接触率 R_c を算定することができるので、接触部に作用する一軸圧縮応力および引張応力が次式で推定できる。

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{eff}}{R_c} \quad (6)$$

$$\sigma_i = \frac{(1 - 2\nu)}{2} \sigma_a \quad (7)$$

ここで、 σ_{eff} ：不連続面全体に作用する圧縮応力， ν ：ポアソン比である。式(6)，(7)より任意の開口幅における接触部の応力レベルが算定されるので、その結果新たな開口幅変化を式(3)，(4)で評価することが可能である。一連の計算過程をFig. 2に示す。

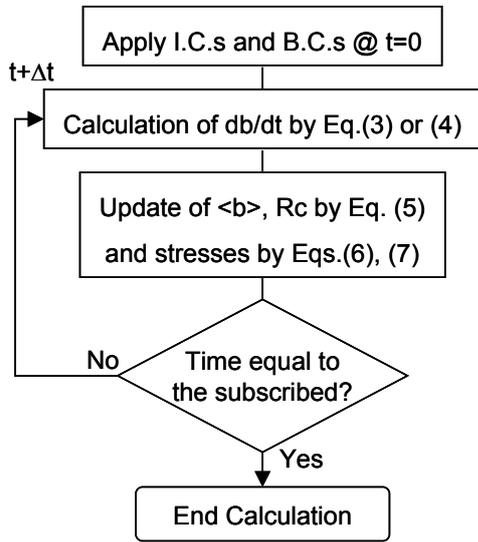


Figure 2. Calculation flow.

3. 実験結果との比較

前章で定義したモデルの妥当性を検討するために実験結果との比較を行う。室内実験では、自然の単一不連続面を有する円柱供試体を用いて透水試験を実施した。岩石供試体は、ほぼ純粋な石英から構成されるノバキュライトを使用し、2.73 MPa (Novaculite I) と 1.38 MPa (Novaculite II) の2種類の拘束圧条件で実験を行った^{3,4)}。なお透水試験は、流量一定の条件で行っており、供試体流入出口の透水差圧より三乗則を用いて不連続面の開口幅を評価している。

サブクリティカル亀裂進展および圧力溶解を考慮したモデルによる不連続面開口幅変化の予測結果と実験結果との比較検証図をFig. 3に示す。また、解析に用いた主な入力パラメータをTable 1に示す。なおサブクリティカル亀裂進展モデルでは、式(2)に示すように拡大係数が \sqrt{r} に比例するため、パラメトリックスタディとして未知数 r を1~5 μm の間で変化させ解析を行った (Fig. 3)。その結果、解析結果に大きな差異は確認されなかった。また、図より明らかなように圧力溶解モデルは実験結果を大きく過小評価しているが、サブクリティカル亀裂進展モデルは精度良く実験結果を再現している。つまり、不連続面の圧縮過程において低温条件では、サブクリティカル亀裂進展が支配的なメカニズムであると考えられる。

Fig. 3より、サブクリティカル亀裂進展に起因する圧縮速度は圧力溶解よりも常時速いことが確認できるが、圧縮過程が進行し応力レベルが十分小さくなる時、サブクリティカル亀裂は進展しないことが知られている。そこで、サブクリティカル亀裂進展および圧力溶解モデル

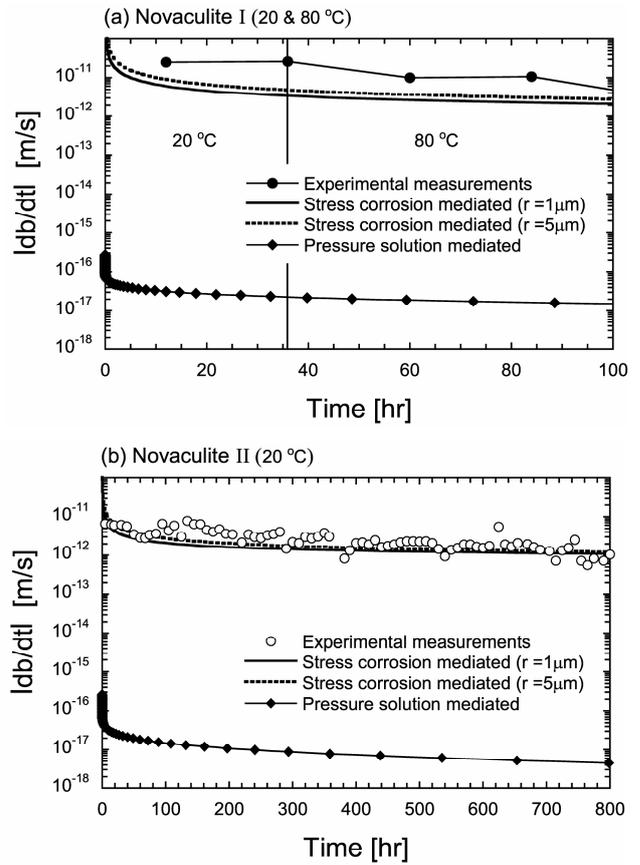


Figure 3. Comparison of db/dt between experiments^{3,4)} and predictions.

Table 1. Parameters used in predictions for Novaculite I at 20 °C⁸⁾.

Parameters	Units	Values
Preexponential factor, $A_{\text{H}_2\text{O}}$	$[\text{m s}^{-1}]$	$1.12 \times 10^4 T$
Preexponential factor, A_{OH}	$[\text{m s}^{-1}]$	$2.51 \times 10^3 T$
Initial aperture, b_0	$[\text{m}]$	1.25×10^5
Residual aperture, b_r	$[\text{m}]$	2.50×10^6
$b_{\text{H}_2\text{O}}^*$	$[\text{N}^{-1} \text{m}^3]$	2.69×10^5
b_{OH}^*	$[\text{N}^{-1} \text{m}^3]$	1.78×10^5
Activation energy, E_a	$[\text{J mol}^{-1}]$	7.00×10^4
Enthalpy for H_2O , $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$	$[\text{J mol}^{-1}]$	6.60×10^4
Enthalpy for OH , ΔH_{OH}	$[\text{J mol}^{-1}]$	8.27×10^4
Molar volume, V_m	$[\text{mol m}^{-3}]$	2.27×10^5
$\theta_{\text{Si-O}}^{\text{H}_2\text{O}}$	$[-]$	0.99921 at pH=7
$\theta_{\text{Si-O}}^{\text{OH}}$	$[-]$	0.00079 at pH=7

を用いて長期予測を行った (Fig. 4)。長期予測では、作用する温度の影響を検討するため20~150 °Cの条件で予測解析を行った。Fig. 4より、すべての応力・温度条件においてサブクリティカル亀裂進展に起因する圧縮速度が、圧力溶解よりも早いことが確認できる。また、サブクリティカル亀裂進展の場合、圧力溶解よりも早く残留開口幅に達することがわかる。つまり、長期間の圧縮過程では比較的短い時間でサブクリティカル亀裂進展が収束し、その後圧力溶解が支配的になると考えられる。さらに、温度の影響に着目すると、圧力溶解は20~

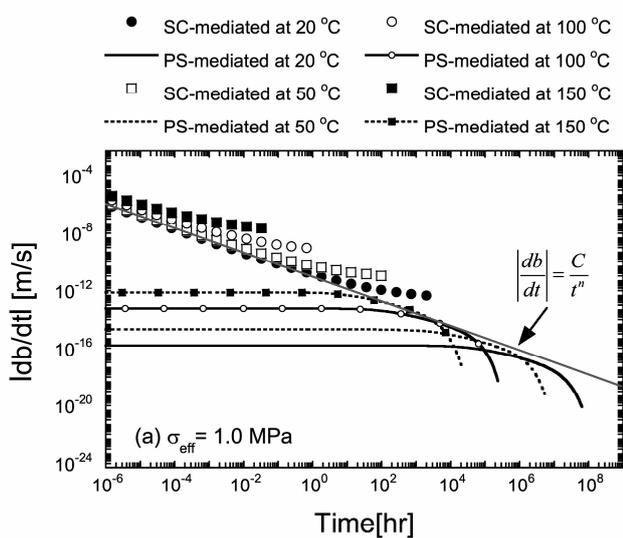


Figure 4. Long-term prediction of aperture evolution (SC: Subcritical crack growth, PS: Pressure solution).

150 °Cで4オーダー程度の大きな変化が確認できるが、対照的にサブクリティカル亀裂進展ではそれほど作用温度の影響を受けないことがわかった。

4. まとめ

本研究では、力学—化学の相互作用現象に着目して、岩盤不連続面の圧縮過程を検討した。特に、作用する温度・応力条件に依存するサブクリティカル亀裂進展と圧力溶解現象を再現するモデルを用いて、解析結果と実験結果の比較検討を行った。得られた比較結果より、低温度条件ではサブクリティカル亀裂進展現象が、圧縮過程における支配的なメカニズムであることが示唆された。また、不連続面圧縮挙動の長期予測結果より、サブクリティカル亀裂進展は比較的短時間で収束し、その後圧力

溶解が支配的になることが予想された。岩盤不連続面の圧縮挙動（透水性）を長期予測することは工学的に非常に重要であるので、今後は様々な境界条件での実験を実施することにより知見を収集し、解析モデルの有用性の確認およびより精度の高いモデルの構築が必要である。

謝辞：本研究は、平成19年度愛媛大学研究開発支援経費の補助により遂行された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Atkinson, B.K. : *Fracture Mechanics of Rock*, p.534, Academic Press, London, 1987.
- 2) Revil, A. : Pervasive pressure-solution transfer: a poro-viscoplastic model, *Geophys. Res. Lett.* 26, pp.255-258, 1999.
- 3) Polak, A., Elsworth, D., Yasuhara, H., Grader, A. and Halleck, P. : Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids, *Geophys. Res. Lett.* 30(20), 2020, doi:10.1029/2003GL017575, 2003
- 4) Yasuhara, H., Polak, A., Mitani, Y., Grader, A., Halleck, P., and Elsworth, D. : Evolution of fracture permeability through fluid-rock reaction under hydrothermal conditions, *Earth Planet. Sci. Lett.* 244, pp.186-200, 2006.
- 5) Dove, P. M. : Geochemical controls on the kinetics of quartz fracture at subcritical tensile stresses, *J. Geophys. Res.* 100(B11), pp.22,349-22,359, 1995.
- 6) Yasuhara, H. and Elsworth, D. : Compaction of a rock fracture moderated by competing roles of stress corrosion and pressure solution, *Earth Planet. Sci. Lett.* pp.35 (under review).
- 7) Yasuhara, H., Elsworth, D., and Polak, A. : A mechanistic model for compaction of granular aggregates moderated by pressure solution, *J. Geophys. Res.*, 108, 2530, doi:10.1029/2003JB002536, 2003.
- 8) Dove, P. M. and Elston, S. F. : Dissolution kinetics of quartz in sodium chloride solutions: Analysis of existing data and a rate model for 25 °C. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 56, pp.4147-4156, 1992.

EVOLUTION OF FRACTURE APERTURE MEDIATED BY SUBCRITICAL CRACK GROWTH AND PRESSURE SOLUTION

Hideaki YASUHARA, Naoki KINOSHITA, Shinichiro NAKASHIMA and Kiyoshi KISHIDA

Unusually rapid closure of stressed fractures is examined using models for subcritical crack growth and pressure solution. The subcritical crack model examines tensile stress concentrations induced at asperity contacts, and mediates fracture growth at tips of the asperities. Conversely, pressure solution is described by the rate-limiting process of dissolution, resulting from the elevated stresses realized at the propping asperity contact. Both models are capable of following the observed compaction of a natural fracture. However predictions from the subcritical crack model better replicate the experimental observations, especially in the short-term and at low temperatures when mechanical effects are anticipated to dominate.