

## 6. 水浸に伴う岩石内間隙空気圧の発生とその等価管路モデルを用いた解釈

Immersion-induced pore air pressure buildup and its interpretation using equivalent channel model

○長田 昌彦, 中原 壮一郎, 武藤 圭佑 (以上, 埼玉大学), 高橋 学 (産総研), 竹村 貴人 (日本大学)

Masahiko Osada, Soichiro Nakahara, Keisuke Muto, Manabu Takahashi, Takato Takemura

### 1. はじめに

多孔質媒体である岩石に, 間隙水が出入りすることによって変形が生じる。これまで, 初期に水で飽和していた間隙から水分が取り去られる現象, すなわち乾燥変形現象について実験的に検討してきた<sup>1)</sup>。

本稿では, 乾燥した岩石の間隙に水が浸入していく現象について考察した結果を報告する。

### 2. 水浸に伴う岩石内間隙空気圧の発生

乾燥した岩石を水浸すると, 体積膨張しながら, 間隙内には空気圧が発生する<sup>2)</sup>。図-1 は, 白浜砂岩を水浸させたときの間隙空気圧発生の一例である。横軸には, 時間の平方根をとっている。このように時間軸をとると, 間隙空気圧の主要な上昇部分 (図中の矢印の区間) は, ほぼ直線的であることがわかる。このことは, 間隙空気圧の主要な上昇メカニズムが, 時間の平方根に比例する現象, すなわち濡れによる水分移動を支配的なメカニズムとして生じていると考えられた。

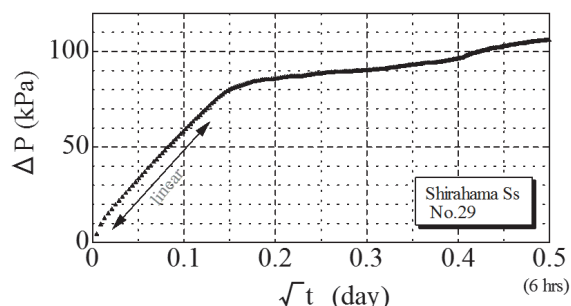


図-1 水浸に伴う間隙空気圧の発生の一例

### 3. 濡れによる水分移動

水と空気では岩石の間隙表面に対する濡れ性が異なるため, 外力が作用しない状態においても, 濡れによって水分が岩石内に浸入する。

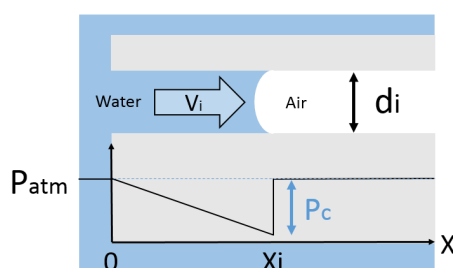


図-2 濡れによる水分移動<sup>3)</sup>

図-2 は, 濡れによる水分移動を模式的に表したものである<sup>3)</sup>。間隙直径  $d_i$  の毛管を考えると, 毛管の端からの距離  $X_i$  のところにある水と空気の境界付近の水圧は, 大気圧 ( $P_{atm}$ ) よりも毛管圧  $P_c$  だけ低くなっていると考えられる。これが水分移動の駆動力となる。図に示すように, 毛管に沿って線形的に変化しているとすれば, 圧力勾配は  $\frac{dP}{dX} \approx \frac{P_c}{X}$  と近似できる。各毛管では間隙直径は変化しないと仮定しているため, 発生する毛管圧は一定である。従って圧力勾配は浸入距離が大きくなると減少し, 単位時間あたりの浸水量は時間とともに減少することになる。

毛管内の水の平均浸入速度  $V_i$  は, ポアズイユの法則に従い, 上記の圧力勾配を駆動力とすれば,

$$V_i = \frac{d_i \gamma \cos \theta}{4 X_i \eta} \quad (1)$$

と書ける。ここに,  $\eta$  は水の粘性係数,  $\gamma$  は水の表面張力,  $\theta$  は水と岩石間の接触角 (以後  $0^\circ$  と仮定) である。この式より, 平均速度は間隙直径  $d_i$  に比例するので, 間隙空気圧が常に大気圧に等しい場合には太い毛管のほうが細い毛管より早く水が浸入することになる。

式 (1) を積分すると,  $t$  を経過時間として,

$$X_i^2 = \frac{d_i \gamma t}{2 \eta} \quad (2)$$

が得られる。岩石内の間隙を平行に分布する間隙径の異なる毛管の集合体と考えた場合, それぞれの間隙における浸入距離  $X_i$  に各毛管の断面積を乗じたものの総和が浸入した水の総体積に相当する。間隙空気側から見れば, 排気が生じなければ, 水が浸入してきた体積分だけ間隙空気圧が上昇することになる。図-1 で観察された時間の平方根に比例する間隙空気圧の上昇は, このようなメカニズムで生じたことを示していると考えられる。

### 4. 等価管路モデルによる間隙空気圧上昇と排気過程の表現

ここまでは間隙空気圧の上昇を陽に取り込んだ水分移動は考慮してこなかった。ここでは, 排気過程までを含んだ間隙空気圧の上昇を表現可能な等価管路モデルを考える。様々な種類の等価管路モデルが提案されている<sup>4)</sup>が, 本稿ではキャピラリーモデルを採用する。

まず岩石内の間隙は, 平行に分布する間隙径の異なる毛管の集合体と考える。また問題設定を簡単にするために, 次の仮定をおく。

- (1) 間隙空気は、理想気体として扱うことができる。
- (2) すべての間隙は岩石内部で繋がっており、唯一の間隙空気圧を持つ。
- (3) 水と空気の間では混和・溶解・蒸発は生じない。
- (4) すべてのプロセスは等温過程で生じる ( $T = \text{const.}$ )。

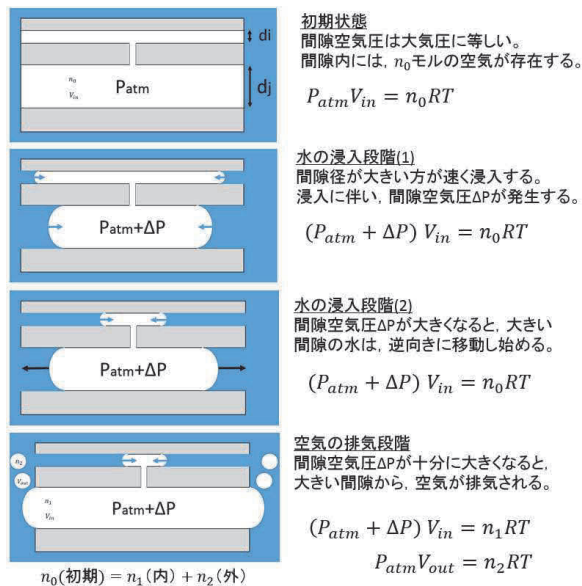


図-3 間隙空気圧の発生と排気の過程 (間隙直径:  $d_i < d_j$ )

間隙直径の異なる2つの毛管の場合 ( $d_i < d_j$ ) を例として、構築したモデルの概要を図-3により説明する。

**初期状態** 間隙内の空気は大気圧状態で  $n_0$  モル存在する。間隙空気の体積を  $V_{in}$  とすると、図中の気体の状態方程式が成り立つ。

**水の浸入段階 (1)** 式 (1) に従い、大きい間隙ほど早く浸入する。水の浸入により空気の体積が圧縮されて、間隙空気圧  $\Delta P$  が発生する。 $\Delta P$  の大きさは水の非圧縮性を仮定し、初期間隙体積から水の浸入量を差し引くことにより  $V_{in}$  を更新し、ボイル・シャルルの法則より算出する。各計算ステップにおいて、前ステップで発生した  $\Delta P$  を毛管圧  $P_c$  から差し引いて、次ステップの浸入距離を計算する。

**水の浸入段階 (2)**  $\Delta P$  が大きくなると、間隙径によっては毛管圧  $P_c$  を上回る。 $P_c$  は大きな間隙直径のものほど小さいので、小さな間隙では水の浸入が継続するが、大きな間隙では水を押し戻す方向に移動する。

**空気の排気段階** 水と空気の初期境界 (原点 0) よりも外側まで水が押し戻されたとき、排気が生じたと判定する。このとき、岩石内部に残ったモル数  $n_1$  と外部に排気されたモル数  $n_2$  に対して、全体量  $n_0$  は不変として、図中の2つの気体の状態方程式に分けて計算する。

## 5. 解析例

白浜砂岩の水銀圧入試験による間隙径分布を用いて、上述の方法で水浸実験の再現を試みた。

図-4 上図は各間隙径区間が時間とともにどのように満たされていくかを示している。図-1 に合わせて、6 時間後までの計算を実施した。大きい間隙は早い段階で水で満たされ、時間とともに小さい間隙が徐々に満たされていく。下図はこのときの間隙空隙圧の上昇と飽和度の時間変化であり、 $\Delta P$  は1 時間後まではほぼ直線的であり、その後停留した後上昇を続ける様子は図-1 と類似しているが、絶対値には課題を残している。飽和度は実験では最終的に 80% 程度まで上昇しているため、解析結果は過小評価となっている。

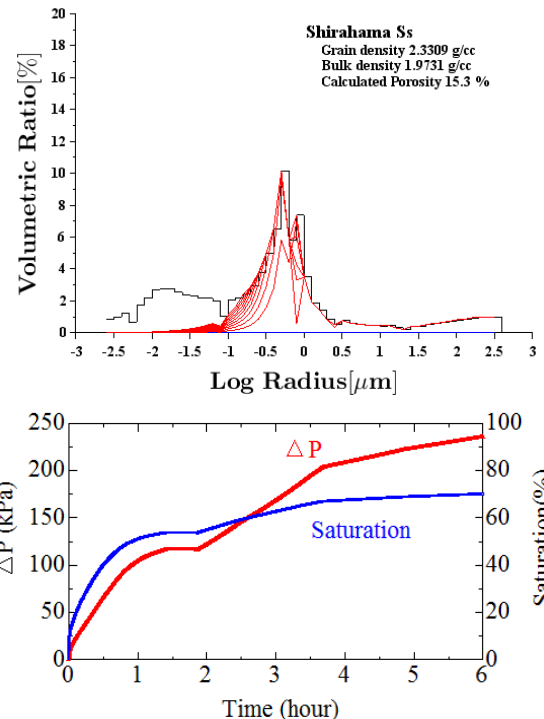


図-4 白浜砂岩に対する解析例。上図は黒線は間隙径分布、赤線は各計算ステップにおける水の浸入量を示す。下図はこのときの間隙空隙圧の上昇と飽和度の時間変化。

## 6. おわりに

乾燥した岩石を水浸すると、間隙内には空気圧が発生する。これを等価管路モデルを用いて再現することを試みた。課題は多いが、ある程度定性的な挙動を表現しうることがわかった。

**謝辞:** 本研究は科学研究費補助金 基盤研究 (B) (課題番号 24360187) 及び SIP 豪雨竜巻 (代表: 高橋暢宏) の研究の一部として実施した。

## 参考文献

- 1) Osada, M.: Drying-induced deformation characteristics of rocks, in *Proc. of 8th Asian Rock Mechanics Sympo.*, pp. FL-01, 2014.
- 2) 長田昌彦, 矢口亮介, 竹村貴人: 白浜砂岩の水浸に伴う内部空隙圧の発生と水質の変化, 第 47 回地盤工学会研究発表会, pp. 729-730, 2012.
- 3) Guéguen, Y. and Palciauskas, V.: 岩石物性入門 (西澤修・金川久一邦訳), Springer, 348 pp., 2008.
- 4) 林為人, 高橋学, 西田薫, 張銘: 透水挙動に関する等価管路モデルおよび堆積岩への適用例, 応用地質, Vol. 39, No. 6, pp. 533-539, 1999.