# 水浸に伴う砂岩と泥岩の間隙空隙圧変化の 比較検討と等価管路モデルを用いた評価

武藤 圭佑1\*・長田 昌彦2

 <sup>1</sup>埼玉大学大学院 大学院理工学研究科環境社会基盤国際コース (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
<sup>2</sup>埼玉大学大学院 理工学研究科 \*E-mail:s14me117@mail.saitama-u.ac.jp

乾燥した岩石を水浸すると、岩石の間隙では濡れによる水分移動が生じ、間隙内の空気は圧縮され正の間隙空隙圧を発生する.本研究では、水浸時に発生する間隙空隙圧を超小型の光ファイバ圧力センサを用いて定量的に計測している.本稿では、水銀圧入試験から得られる間隙径分布が異なる2種類の堆積岩(白浜砂岩と能登珪藻泥岩)に対して比較を試みた.その結果、最大間隙空隙圧は、両岩石ともに100kPa程度となった.しかし、上昇速度は泥岩の方が有意に大きくなる可能性があることがわかった.原因として、泥岩は砂岩に比べて間隙が多く存在するため、濡れによる水分移動が速くなり、空隙圧の上昇速度が大きくなると考えられた.この水分移動の様子を等価管路モデルによって再現し、評価した.

Key words : water immersion, wet, pore air pressure, pore size distribution, equivalent channel model

## 1. はじめに

高レベルの放射性廃棄物の最終処分方法として、日本 では「地層処分」が基本的な方針とされている。日本に 広く分布する堆積岩は新第3紀や第4紀など比較的年代 若く、強度が低いものが多い<sup>10</sup>.このような岩盤で、大 規模な地下施設の建設を行った際、乾燥した空気の流入 により体積収縮やクラックの発生等が起こる。また逆に 埋設による再冠水によって不飽和領域にある岩盤及び乾 燥時に形成されたクラックに空気が封入される。その際 に生じる空気の挙動は定量的に計測できていない。

そこで、再冠水時に生じる空気の挙動を把握するために、様々な堆積岩で水浸時に発生する間隙空隙圧の大きさを超小型の光ファイバ圧力センサを用いて定量的に計測している。また水浸による間隙空気圧発生のメカニズムを把握するために、等価管路モデル<sup>203</sup>を基に水浸時に発生する間隙空気圧の評価モデルを作成した。

本稿では、間隙率が異なる白浜砂岩(以下SSと呼称)と 能登珪藻泥岩(以下Mと呼称)の2種類の堆積岩に対して 水浸時における空隙圧の最大値と上昇速度を比較を行い、 その結果について考察した.また水銀圧入試験から得ら れた間隙径分布より水浸による間隙空隙圧モデルを用い て評価し、実験結果と比較を行う.

## 2. 試料と実験内容

#### (1) 試料

試料は和歌山県白浜町で採取された白浜砂岩と石川 県能登半島で採取された能登珪藻泥岩を使用した.供試 体は円柱状に整形した.供試体の諸量は**表**-1に示す.

供試体の作成手順として,供試体の上面中心に直径 3mm,深さは試料の高さ半分までの穴を空け,110℃に 設定した乾燥炉に入れ24時間乾燥させた.その後,直径 3mmの超小型圧力センサ(SUS管付き)を穴に挿入し, 接着剤を用いて固定した.水浸実験において真空脱泡装 置で脱泡させた純水を水深75mmまで入れた.この容器 の中に供試体を水浸させ砂岩,泥岩の間隙空隙圧の計測

表-1 供試体の諸量

	白浜砂岩	能登珪藻泥岩
<u>土粒子の密度(g/cm<sup>3</sup>)</u>	2.62	2.18
乾燥密度(g/cm³)	2.25	0.66
間隙率(%)	15.3	65.9
ヤング率(GPa)*	9.80	0.42
ポアソン比*	0.10	0.43
体積弾性係数(GPa)*	3.63	1.01
一軸圧縮強さ(MPa)*	62.0	2.89
圧裂引張強さ(MPa)*	2.30	0.46

を行う. この時, 圧力のほかに水温, 気圧の計測も行った. (図 - 1)

また水浸時の飽和度を把握するために、水浸させた 両岩石を各々3個ずつ用意し、一定の時間で取り出し、 電子天秤を用いて質量を計測した.この質量の値から時 間当たりによる水浸時の飽和度を求めた.飽和度は次の 式を用いて算出した.

$$S_{\rm r} = \frac{m - m_{\rm s}}{\rho_{\rm w} \left( V - m_{\rm s} / \rho_{\rm s} \right)} \times 100 \tag{1}$$

ここで、 $S_r$ : 飽和度[%] m:供試体質量[g]  $m_s$ :供試体の土粒子質量[g]  $\rho_w$ :水密度[g/cm<sup>3</sup>] V:供試体体積[cm<sup>3</sup>]  $\rho_s$ :土粒子密度[g/cm<sup>3</sup>]

## 3. 実験結果

#### (1) 白浜砂岩(SS)について

それぞれの供試体で飽和度確認試験と水浸実験より 得た結果を図-2,3に示す.

飽和度は 70%まで直線的に上昇し,緩やかに上昇する. この傾向と水浸直後かた 70~90kPa まで線形的に 上昇し,それから最大値に至るまで緩やかに上昇する空 隙圧変化の傾向は似ているといえる.

#### (2) 能登珪藻泥岩(MM)について

飽和度は 1(h)もかからずに 80±5%まで直線的に上昇 し、その後 90%近くまで上昇.最大空隙圧に関しては 最大 110kPa まで上昇した.しかし、最大値に達した後 20~40kPa ほど落ちて、緩やかに低下した.圧力セン サの温度補正を考えても、20~40kPa の低下は大きい. 空隙圧落下の原因は、供試体から空気が外へ流出し

ていったためだと考えられる.

空隙圧上昇速度に関してみると NM は水浸してすぐ に最大値に達し、その後緩やかに一定の値に収束してい く傾向が見れる.

## (3) SSとMの比較

飽和度に関しては、SS・NM ともには飽和度のばら つきが少なく、SS は 12(h)ほどで 80%に至るが、NM は 1(h)未満で 80%に至った. このような差が出たのは、 NM が SS より小さい間隙を多く有し、その分だけ水が 入りやすかったためである可能性が考えられる.

最大空隙圧に関してはSS, NMともに 100kPa 程度 まで上昇し、全供試体の $\Delta P$  (kPa)は低下した.

空隙圧上昇速度に関してまとめたのが表 - 2 に示す. この表から NM は SS に比べて 6~7 倍ほどの大きさを



有することが確認できた.この傾きから間隙率の影響を 考慮するために傾きを間隙率で除したところ,SSは 2200~2400をとり,NMは,2400~2500の値をとった. ある程度近い数字だと考えられる.

## 4. 間隙径分布に基づく間隙空隙圧モデル

## (1) 表面張力による水の浸入

水浸時における空隙圧の上昇は間隙内に浸入する水 によって空気が圧縮し,正の圧力が発生すると考えられ る.そこで,水が浸入する力となるのは表面張力とし, 次のように仮定する.

図-4 は径 Di の毛管をもつ直方体の供試体の断面図を 示す.水の浸入流量を Qi[m<sup>3</sup>]とすると、Qi[m<sup>3</sup>]はポアズ イユの法則<sup> $\Phi$ </sup>に従うとする.

$$Q_i = \frac{\pi P}{8\mu} \left(\frac{D_i}{2}\right)^4 \tag{2}$$

ここで、**P**: 圧力勾配 μ: 水の粘性係数[m<sup>2</sup>/s] 空気と水の境界面の力の釣合はラプラス式に従う. この時、空気と水の接触角θは限りなく小さいとする.

$$p_g - p_1 = P_c = \frac{2\gamma\cos\theta}{D_i}$$
(3)

ここで、 $p_a$ :気相の圧力[Pa]  $p_l$ :液相の圧力[Pa]

 $P_c$ : 毛管圧[Pa]  $\gamma$ : 液体の表面張力[N/m]

D<sub>i</sub>:各曲率直径[m]

各毛管に浸入した長さを Xi[m], 圧力勾配を dPc/dX[Pa/m]とする.この圧力勾配は,水が毛管を進 むに従い線形的に減少するものとする(図-4).このとき, 毛管内の平均流速 Viはポアズイユの法則(式(2))から

$$V_{i} = \frac{dx}{dt} = \frac{dP_{c}}{dX} \frac{D_{i}^{2}}{2\mu}$$
(4)

式(3)に式(2)とdPc/dX[Pa/m] ≈ Pc/Xを代入. tについて積分すると

$$X_{i} = \sqrt{\frac{D_{i}\gamma}{2\mu}t}$$
(5)

が得られ、Xi[m]は平方根時間 $\sqrt{t}$ に比例する.<sup>5</sup>

本研究では、水の浸入 Xi[m]に伴って、Pc が作用する とともに、空隙圧 ΔP が発生すると仮定する.

## (2) 間隙空隙圧モデル

a) 供試体モデル

#### 表-2 圧力上昇速度に関するまとめ

名称	上昇速度 [kPa/h]	間隙率 [-]	上昇速度/間隙率 [kPa/h]
SS1	356.1	0.1469	2424
SS2	328.0	0.1468	2234
SS3	329.9	0.1468	2247
NM1	1727	0.6792	2542
NM2	1707	0.6977	2446

対称軸



図-4 平均流速 V と圧力勾配 Pの関係



水浸時の間隙空気圧を計算する評価モデルを図-5のような直方体(a×b×c)の供試体をモデルとした.

供試体内部には側面に垂直な方向に並列し,異なる 径を持つ円柱状の毛管が複数存在する.これらの毛管は 極小の径を有する毛管によって全て連結している.全毛 管内部は空気のみ存在し,かつ理想気体であり,また水 と混和しないものと仮定する.

## b) ステップ1

直方体の供試体モデル周辺が全て水に置換したとき,時を断面図で示したのが図-6のステップ1とする.

#### c) ステップ2

供試体モデル周辺の水は濡れを駆動力として毛管内 に浸入し、毛管内の空気を圧縮する.このとき空気は ΔPが発生する.この瞬間をステップ2とする.

## d) ステップ3

水は空隙圧 Patm+ $\Delta P$ と釣り合うまで浸入しようとする.しかし、毛管内の空気は小さい径 diから大きい径 Djの毛管へ極小の毛管を通って移動する.このとき径 Djの毛管内の空気は供試体モデルの外側へ向かう方向 に力が働く.このときをステップ3とする.

#### e) ステップ4

径 di の毛管内の空気が径 Dj の毛管へ移動しつつ, 径 Di の毛管から空気が外へ流出した時をステップ 4 とする. 流出条件は, X が 0以下になったときとする. この とき径 Dj の毛管内は初期状態と同様に空気のみ存在するとし, 水は浸入しないものとする. そして径 di の毛 管内の空気は別の径を有する毛管へ移動する.

ステップ 1~4 で得られた気体の状態方程式(6)~(8), (10), (11)と間隙空気モル量と流出空気モル量の関係式(9) を用いて間隙空隙圧ΔP, 飽和度, 排気量, 水の浸入量 を求めることができる.

モデルの毛管に関しては研究室で過去に行われた水 銀圧入試験で得られた白浜砂岩と能登珪藻泥岩の間隙径 分布を用いる.

等価管路モデルを用いて間隙空隙圧または飽和度の 挙動を推定,また実験結果と比較し,考察する.

#### (3) 実験値とモデルとの比較

モデルで表現した空隙圧-飽和度関係と実験結果から 得た空隙圧-飽和度を図-7に示す.

実験値に比べて、モデルで算出した結果は、空隙圧 は飽和度に対して緩やかに変化している.

また,実験による最大空隙圧時の飽和度は両岩石と もにモデルよりも 20%程大きい値となった.このよう な差が出たのは,以下のことが考えられる.

・間隙率による影響の大きさを考慮しなかったこと

・供試体を水浸させるときに水の流れができ、そのエネ ルギーが水浸入量速度に寄与したため.

等の可能性が考えられる.

# 5. まとめ

本研究では、乾燥させた岩石を水浸させることで間隙 空隙圧が発生することに着目し、間隙率の異なる乾燥さ せた白浜砂岩と能登珪藻泥岩を超小型圧力センサを用い て水浸時の間隙空隙圧の計測を行い、砂岩と泥岩の実験 結果の比較を行った.また水浸時の飽和度を求めるため に供試体を水浸させ一定時間ごとに質量を計測した.

水浸による間隙空隙圧発生のメカニズムを把握する



 $P_{atm} + \Delta P) V_{in} = n_1 R T_{pore} (8) \qquad n_1 = n_2 + n_3 \qquad (9)$  $(P_{atm} + \Delta P) V_{in} = n_2 R T_{pore} (10)$  $P_{atm} V_{out} = n_3 R T_{pore} \qquad (11)$ 

図-6 ステップごとによる断面図と状態方程式



図-7 実験結果とモデルの比較

ために等価管路モデルを用いたモデルで算出し、その結 果と実験結果を比較と考察を行った.

これらにより得られた結果を以下に示す.

・間隙率が異なっても砂岩・泥岩ともに 100kPa 発生することを確認できた.

・空隙圧上昇速度は、間隙率による影響が大きいため砂 岩よりも泥岩の上昇速度は有意に大きくなる可能性があ る.

・モデルによって得た図と実験値を比較すると、モデル の空隙圧は飽和度に対して緩やかに変化する.またモデ ルで得た最大空隙圧時の飽和度と実験値では20%程異な った.

空隙圧の発生メカニズムを把握するためには、より 多くのデータを蓄積する必要である.なので様々な堆積 岩を用いて空隙圧を計測を試みる必要がある.

#### 参考文献

- 真田 祐幸:新第3紀堆積岩を対象とした地層処分場の力 学特性評価に関する研究,北海道大学大学院博士論文, 2010
- 本為人,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
- 林為人,高橋学:高温履歴を有する稲田花崗岩の透水係数 と等価管路モデルに基づく評価,応用地質, Vol.40,No.1,pp.25-35,1999
- 須藤 浩三,長谷川富市,白樫正高:流体の力学,コロナ 社,1994
- 5) Y.ゲガーン著 西沢修,金川久一編:岩石物性入門,シュ プリンガー社,2008

# PORE AIR PRESSURE CHANGE OF SANDSTONE AND MADSTONE WITH WATER IMMERSION AND EVALUATION USING THE EQUIVALENT CHANNEL MODEL

## Keisuke MUTO, Masahiko OSADA

With water immertion dry rock, water moves to the rock's inside by the wet. The air in the rock is compressed by this water and positive pore air pressure occurs. In this study, We measure the pore air pressure to occur, using a microminiature optical fiber pressure sensor quantitatively. In this paper, compared about the maximum pressure and pressure speed for two kinds of sedimentary rocks (ShirahamaSandstone and NotoDiatomMudstone) which varied in the pore size distribution from MIP. As a result, both the maximum pressure became the 100kPa. And we understood that the speed of Mudstone might significantly grow big. Becouse the mudstone have more porosity than the sandstone.