

乾燥過程における白浜砂岩の挙動についての 数値解析的検討

大竹 伸太郎^{1*}・長田 昌彦²

¹埼玉大学理工学研究科環境社会基盤国際コース

²埼玉大学地圏科学研究センター

E-mail: s13me104@mail.saitama-u.ac.jp

放射性廃棄物の地層処分サイトとして堆積岩が選択された場合、地下施設建設時、換気により周囲の岩盤中の水分量が変化し、岩石の物性が変化する。本研究では堆積岩中に地下施設を建設した際、水分量低下がもたらす岩石への影響を把握することを目的とし、乾燥過程における岩石の水分状態・変形について、不飽和浸透を表現するリチャード式と多孔質弾性体の構成式を連成させた数値解析を実施し、既存の白浜砂岩の実験データと比較した。実験に忠実な上面のみ蒸発の条件を与えた場合、実験の変形モードを表現することはできず、すべての面から蒸発が起こる仮想的な条件を与えると実験の変形モードと合致した。これは、乾燥に伴う試料内部の水分分布状態をモデルに取り込んで解析する必要があることを示している。

Key Words : Shirahama sandstone , 1D drying , 3D drying , numerical analysis

1. はじめに

放射性廃棄物の最終処分方法として最も合理的かつ実現可能な方法といわれているのが地層処分である。放射性廃棄物の危険性は長期間にわたるため、放射性廃棄物を人間の生活圏から物理的に遠ざけることが必要であり、地層処分はこの点において有効な方法である。しかし地層処分の候補地として堆積岩が選択された場合、地下施設の建設に伴う換気による坑道への乾燥空気の流入により、周囲の岩盤中の水分量が低下し、岩石の物性が変化する可能性がある。放射性廃棄物の処理という非常にデリケートな問題を扱う上で、処理施設周辺環境について十分に理解しておくことは重要である。水分量変化による周辺岩盤の挙動を把握しておくことは、地層処分の安全性について議論する上で不可欠である。

本研究では堆積岩中に地下施設を建設する際、換気による水分量低下が周辺岩盤に及ぼす影響を把握することを目的としている。本研究では白浜砂岩供試体を対象とし、供試体内部の飽和・不飽和流れについてリチャードの式、供試体の変形の様子を多孔質弾性体の構成式によって表現している。この2つの偏微分方程式を連成することで、乾燥過程における多孔質弾性体の圧力状態やひずみ、質量変化の様子などを表現している。

2. 不飽和流れと変形の連成モデル

今回の解析モデルの定式化にあたり、流体の連続式と多孔質弾性体の構成式を連成し解析を行った。地下水くみ上げによる地盤沈下シミュレーション例を参考とした。

(1) リチャードの式を用いた飽和・不飽和流れの記述

岩石供試体モデルははじめ、水で飽和していると仮定する。岩石供試体内部では、水分の蒸発により飽和度が低下していく。このためモデル内部の水分移動を表現するためには、1つの式で飽和流れ・不飽和流れを記述できることが好ましい。よって、モデル内部の水分移動についてリチャードの式で表す。

$$(C + S_s S_e) \frac{\partial h_p}{\partial t} - \nabla \{ K_s k \nabla (h_p + D) \} = \alpha_b \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、

C : 比水分容量 [1/m]

S_s : 比滞留係数 [1/m]

S_e : 有効飽和 [-]

K_s : 飽和透水係数 [m/s]

k : 不飽和係数 [-]

α_b : Biot-Willis係数 [-]

h_p : 圧力水頭 [m]

D : 位置水頭 [m]

ε : ひずみ [-]

である。右边は多孔質弾性体の変形に伴う貯留の変化に関する項で、また水は非圧縮性とする。

水分蒸発により変化する飽和度、また飽和度に依存するパラメータ（比水分容量・不飽和係数）は以下の van Genuchten式により求められる。

$$S_e = \begin{cases} \frac{1}{(1+|\alpha h_p|^n)^m} & h_p < 0 \\ 1 & h_p \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$C = \begin{cases} \frac{\alpha m}{1-m} (\theta_s - \theta_r) \cdot S_e^{\frac{1}{m}} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m & h_p < 0 \\ 0 & h_p \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$k = \begin{cases} S_e^{0.5} \left\{1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right\}^2 & h_p < 0 \\ 1 & h_p \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、

θ_s : 飽和体積含水率 [-]

θ_r : 残留体積含水率 [-]

α, m, n : van Genuchten定数

である。

(2) 多孔質弾性体の構成式による供試体変形の記述^{3,4)}

モデルとする白浜砂岩供試体に多孔質弾性体の構成式を適用し、乾燥過程における供試体の変形の様子を記述する。

$$\frac{E}{2(1+\nu)} u_{i,jj} + \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk,i} = \alpha_b \rho_w g D (h_p + D) \quad (5)$$

ここで、

E : ヤング率 [N/m^2]

ν : ポアソン比 [-]

ρ_w : 水密度 [kg/m^3]

g : 重力加速度 [m/s^2]

u : 変位 [m]

である。左辺はひずみの項、右辺は圧力に関する項となっている。

3. 解析モデルの設定

まず、今回の解析モデルについて説明する。対象とする堆積岩は白浜砂岩、岩石は等方性であり、供試体のサイズは直径4.91cm、高さ3.14cmとする。図-1に示すように、円柱供試体であるため軸対称モデルとすることで計

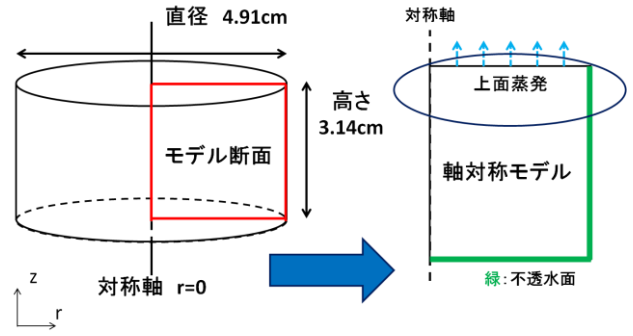


図-1 解析モデル

算を簡略化することができる。供試体の側面・底面はラバーで覆われ、水分蒸発は供試体上面からのみ起こる。モデル内部の間隙分布状態についてはモデル化されておらず、供試体全体としての間隙率・透水係数のみ与えている。

この白浜砂岩供試体モデルを気温20℃、相対湿度50%の条件下で360時間乾燥させる。水の流れに関するリチャードの式と変形についての多孔質弾性体の構成式を連成し、モデル内部の水分状態や圧力状態、変形の様子について考察する。また本研究では蒸発面付近で観測された相対湿度をKelvin則を用いて圧力水頭に変換し、蒸発面での境界条件とすることで、蒸発面からの水分蒸発による排水を表現している。

4. 境界条件の設定

(1) Kelvin則による蒸発面圧力水頭の設定

岩石供試体の上面では水分蒸発により、蒸発量に応じて周辺の相対湿度が上昇する。蒸発面1mm上での相対湿度を測定したデータより、Kelvin則を用いて蒸発面での負圧を表現することを試みた。Kelvin則は以下の通り。

$$h_p = \frac{RT}{gM} \cdot \log(H) \quad (6)$$

ここで、

R : 気体定数 [$J/K \cdot mol$]

T : 気温 [K]

M : 水のモル質量 [kg/mol]

H : 相対湿度 [-]

である。図-2に実験で観測された相対湿度（左図）とKelvin則による蒸発面圧力水頭の値（右図）を示す。この値を蒸発面圧力水頭としてリチャード式における蒸発面境界条件として与える。

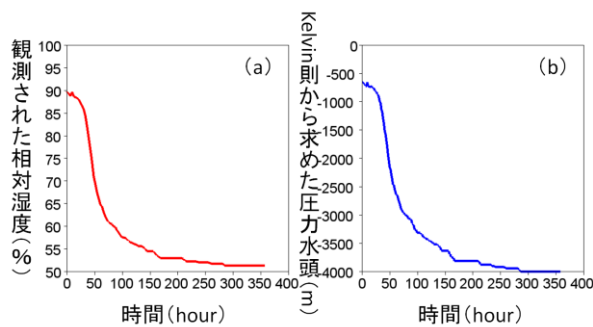


図-2 蒸発面1mm上の相対湿度と蒸発面圧力水頭

(2) 境界条件

1次元蒸発の境界条件は図-3のようになる。岩石供試体からの水分蒸発が起こるのは大気と接している上面境界からのみである。この境界において、前章で述べたKelvin則による圧力水頭を与える。側面・底面境界において水は境界に沿った方向に流れる。多孔質弾性体の変形についての境界条件は、供試体底面の鉛直方向の変形のみ拘束する。

また、今回の解析で使用した白浜砂岩の物性値を表-4に示す。各物性値は白浜砂岩を用いた過去の解析例より引用した。

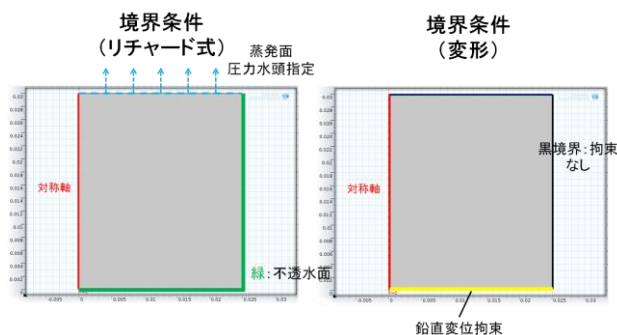


図-3 1次元蒸発の境界条件

表-1 解析で使した物性値

g	9.82[m/s ²]	ν	0.1
ρ_w	1000[kg/m ³]	α	0.03[1/m]
θ_s	0.1786	n	15.91
θ_r	0	m	0.93
K_s	1.2e-10[m/s]	R	8.314[J/K·mol]
S_s	2.6e-9[1/m]	M	0.018[kg/mol]
α_b	1	岩石密度	2170[kg/m ³]
E	5e9[N/m ²]		

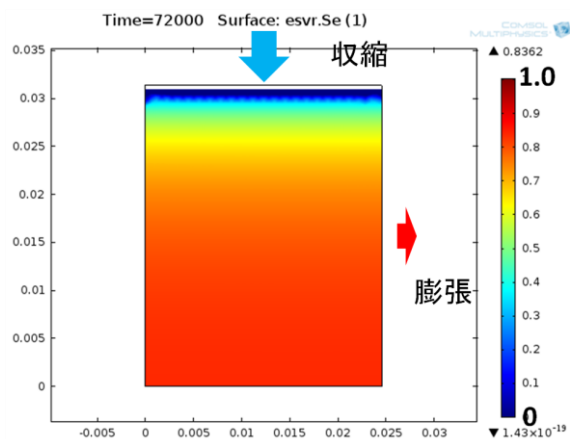


図-4 20時間後の飽和度と変形の様子 (1次元蒸発)

5. 1次元蒸発の乾燥変形シミュレーション

ここまで述べた、本研究の解析モデルによる供試体上面からのみ蒸発が起こる場合 (1次元蒸発) の解析例を図-5に示す。

モデルは最初水で完全に飽和している。乾燥が進行するにつれて、蒸発面に与えられた負圧が徐々に供試体内部へ伝播していく。同様にモデル内の飽和度も蒸発面境界から一様に低下していき、乾燥による水分蒸発で水が抜けていく様子が分かる。このとき本研究のモデルは間隙分布の様子を考慮していないため、モデル内の水分分布は偏りがない。

岩石供試体の変形の様子を見てみると、鉛直方向には収縮しているが、水平方向には若干の膨張がみられた。過去の1次元蒸発の乾燥実験例を見てみると、鉛直・水平方向ともに収縮している様子が観測されている。これは実験と同じ1次元蒸発の境界条件では、実際の現象をうまく表現できないことを示している。

そこで実験と同じ変形モードを再現するためには、仮想的にすべての境界から蒸発が起こる3次元蒸発の境界条件を与え、同様の解析を行う。

6. 3次元蒸発の境界条件

3次元蒸発では、供試体の上面・側面・底面から蒸発が起こると仮定し、これらの境界にKelvin則による蒸発面圧力水頭を与える。また、変形に関する境界条件は1次元蒸発と同じである (図-6)。

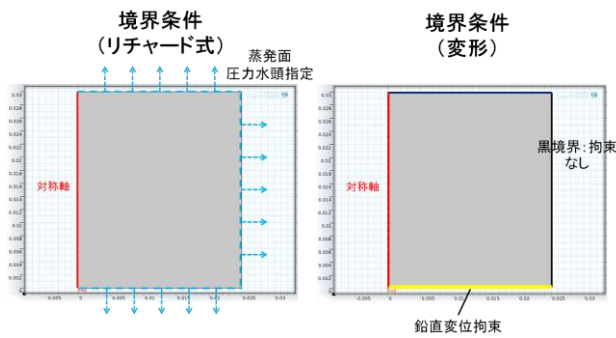


図-5 3次元蒸発の境界条件

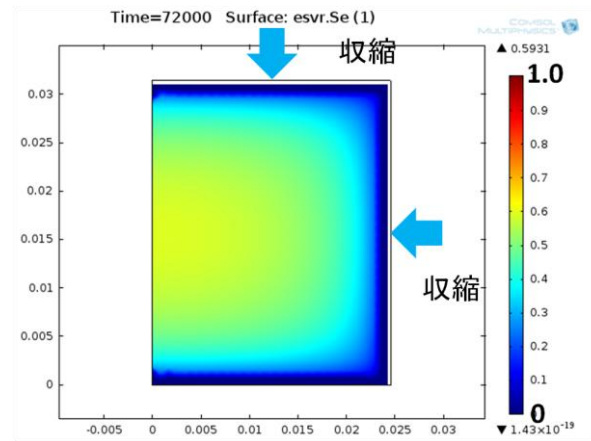


図-6 20時間後の飽和度と変形の様子 (3次元蒸発)

7. 3次元蒸発の乾燥変形シミュレーション

ここまで述べた3次元蒸発の条件での乾燥変形についての解析結果は図-7の通りとなる。

乾燥による飽和度の低下は、1次元蒸発に比べ進行が早いことが分かる。変形に関しては、今回の解析では鉛直・水平方向ともに収縮ひずみが発生しており、実験の変形モードと合致した。今回の解析で、3次元蒸発を仮定した仮想的な境界条件でなければ、実際の現象を再現することができないと分かった。より正確な解析モデルを構築するためには、内部の水分移動や分布について組み込む必要があると考える。

8. 実験データと解析データの比較

次に、実験データとそれぞれの3次元蒸発の解析データとを比較し、解析モデルの有用性を検証する。まず、岩石供試体の質量変化の様子を比較する(図-8)。解析データの傾向はおおむね実験データと一致している。同じ1次元蒸発の条件の解析データと比べると、0~50時間では近い値をとっているが、徐々に2つのデータの間には値に差が見られてくる。これを見ると実験と

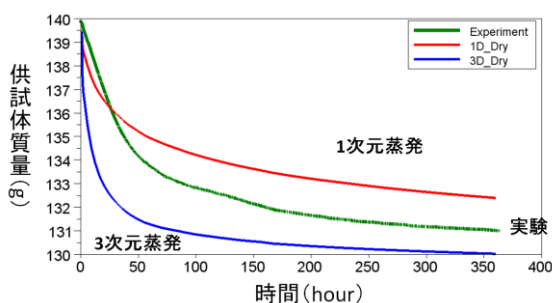


図-7 供試体質量の変化

同じ1次元蒸発でも、仮想的な3次元蒸発でも、乾燥実験の様子をうまく再現できていないと言える。

次に、それぞれの体積ひずみについて比較する(図-9)。こちらも全体的な傾向は実験データと似通っているが、値にはずれがみられる。この原因の1つとしては、今回の解析で用いたヤング率が挙げられる。ヤング率は飽和度によってその値は変化する。今回の解析では湿潤状態でのヤング率を用いているが、飽和度による変化は考慮すべきであると考えられる。

9. 考察

今回の解析をしてモデル内部の間隙分布の状態や内部の水分分布、水分移動の様子について考慮する必要があると感じた。1次元蒸発の場合、供試体内の水分は供試体上面の蒸発面へ向かって鉛直に移動する。実験では供試体内の間隙分布により、水平方向の水分移動も起こり得る。しかし解析では水平方向の水分移動が起これなかったため、仮想的に3次元蒸発を考えなければならなかった。また、岩石を構成する粒子の密度が高く、間隙の経路がせまい部分では流速が遅くなり、水分移動が妨げられることも考えられるため、内部の水分分布状態にも大きくかわってくる事項であると思われる。

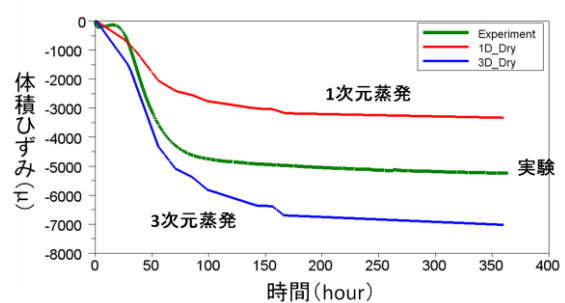


図-8 体積ひずみの変化

また、今回の解析で蒸発面付近の相対湿度から圧力水頭を求め蒸発面境界条件としたが、この方法は蒸発面での水分蒸発をうまく表現できていた。

今回の解析モデルでは岩石供試体内の流体流れについては水の飽和・不飽和流れを考えているが、空気や水蒸気等の気体が乾燥サイクルに影響を与えている可能性も考えられる。気体も考慮した2相流モデルを試みてみるべきであろう。

10. まとめ

本研究では、数値解析的な手法から白浜砂岩岩石供試体の乾燥変形挙動についての解を得ることができた。今後はさらに多くの実験データと解析モデルを比較し、精度を上げていく必要があると考える。供試体蒸発面や内部での実際の圧力状態の様子など、実験により観測す

る必要があると考える。今後は実験を通じ、より実際の状況に近い解析モデルの構築を試みたい。また、岩石供試体内部の間隙分布状態をどう導入し、乾燥過程におけるモデル内の水分分布状態を表現できるか考える必要があるだろう。

参考文献

- 1) P.S.Huyakom., G.F.Pinder., 赤井浩一：地下水解析の基礎と応用（上巻）基礎編，現代工学社，pp.99-178, 1987.
- 2) 笠原英司，清水正之，前田昌信：流体力学の学び方，オーム社，第1版第12刷，pp.33-41, 1995.
- 3) A.Biot : General Theory of Three-Dimensional Consolidation, Vol 12, pp.155-164, 1941.
- 4) 富田佳宏：連続体力学の基礎，養賢堂，訂正第2版，pp.37-99, 1999.

NUMERICAL ANALYSIS ON BEHAVIOR OF SHIRAHAMA SANDSTONE DURING DRYING PROCESS

Shintaro OHTAKE and Masahiko OSADA

Geological disposal has been proposed as a disposal of radioactive waste. When the underground is excavated, relative humidity inside the tunnel is expected to decrease due to the ventilation for construction work. When sedimentary rock is selected as a site for geological disposal, volumetric shrinkage and cracking due to drying must be observed. The goal of this study is to evaluate this phenomenon adequately. The weight loss of the sample due to evaporation could be evaluated quantitatively to some extent, but the deformation mode did not match well for the real condition of evaporation. The real deformation mode was close to that in the virtual 3D drying condition. This result indicates that we need to consider the distribution of the pore water and its pressure inside the sample.