

ベントボールへの球対称水分移動シミュレーション法の検討

○神戸市立高専 正会員 中西 宏

神戸製鋼所 和田隆太郎 山口憲治 竹内靖典

1. はじめに 原子力発電所の使用済燃料再処理施設から発生する高レベル放射性廃棄物を地下深くに埋設処分することが計画されている。高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化体とされ鉄製容器に収められて地下に埋設される。その周りには地下水の流れを遮断する目的でベントナイトが充填される。ベントナイトは施工を合理化する観点から球形の粒子とすることが提案されているが、粒状のベントナイトの水分移動特性および膨張特性など不明な点も多い。本研究では、ベントボールの膨潤を検討するための数値シミュレーション法を検討することを目的に、単一のベントボールを取り上げて、水分移動・膨潤を数値的・実験的に検討する。

2. シミュレーション概要 直径 19mm の高密度のベントボール（密度 2.25g/cm^3 ）の外側より水分が移動する現象を解析する。水分移動では、飽和状態ではダルシー則に基づく水浸透解析を、不飽和状態では低水分領域での水蒸気拡散と高水分領域では液状水の移動が卓越する水分移動の拡散解析を行う（ベントナイト：クニゲル V 1 100%）。また膨潤圧によるベントボール全体の変形解析を行い、ベントボール各部の密度修正を行う。シミュレーションは、空間的には有限要素近似し、時刻ごとに、上記の一連の解析の解を反復計算により求めるものである。

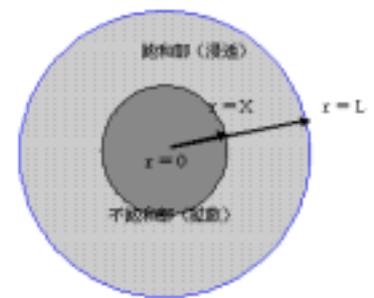


図1 ベントボール解析モデル

3. 飽和浸透解析 飽和浸透解析で対象とする部分は、図1に示す飽和部である。水の流速を u 、透水係数を k 、間隙水圧を p 、体積含有率を v 、体積ひずみを ϵ_v とすると、球対称浸透基礎式および時刻 t での飽和先端部の位置 X^t は、

$$k \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2k}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (1) \quad X^t = X^{t-\Delta t} + \left\{ -k \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=X} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=X} \right\} \Delta t \quad (2)$$

ここに、 $-k \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=X} = -k(p_c - p_1) / \Delta L$ 、 ΔL は FEM 解析における要素長、 p_c はサクシオンであり、次の p_c に逆符号を付したものの、 $\log p_c = 6.035 + 0.02594w - 0.01132w^2 + 4.156 \times 10^{-4} w^3 - 4.531 \times 10^{-6} w^4$ (cmH₂O) (3)

w は含水比、 p_1 は p_c が作用する要素の右側隣接節点の間隙水圧、 $D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=X}$ は飽和先端部での水分拡散の速度で

ある。透水係数 k は、乾燥密度 ρ_e を当初 2.25 g/cm^3 とし、変位による体積変化から ρ_e を求めて次式より計算する。 ρ は水の密度、 μ は水の粘性係数、 g は重力加速度である。

$$k = K \rho g / \mu, \quad K = \exp(-42.1 + 1.1447 \rho_e - 2.1232 \rho_e^2) \quad (\text{m}^2) \quad (4)$$

4. 不飽和浸透解析 粒子を N_e 個の要素に分割し、 $r=0$ の点より順に 1, 2, ..., N_e+1 と節点番号を振る。前述の飽和浸透解析により $r=X$ の位置まで飽和しているとして、その左について不飽和浸透解析により各節点の

$$\text{体積含水率を求める。} D_\theta \text{ は拡散係数}^1) \text{ で、} D_\theta = \frac{a_1(\theta - \theta_s)}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_s)} + \frac{a_2 \theta}{b_2(\theta - b_2)} \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (5)$$

$$a_1 = 1.76 \times 10^{-8} T - 3.04 \times 10^{-7}, \quad a_2 = -1.48 \times 10^{-7} T + 2.98 \times 10^{-6}, \quad b_1 = -3.68 \times 10^{-3}, \quad b_2 = 5.22 \times 10^{-3} T + 2.68 \times 10^{-1}$$

キーワード：ベントボール、水浸透、水分拡散、膨潤、シミュレーション

連絡先：〒651-2194 神戸市西区学園東町 8 - 3 TEL(078)795-3263 FAX(078)795-3314

$\theta_s = 0.333$ である。Tは温度（ ）で、実験中の水温は10~20 であったが、T=20 とした。

5. 膨潤変形解析 応力 ひずみ関係を非線形弾性としてJNC報告書の膨潤実験結果²⁾と本ベントボール密度を考慮し、弾性係数Eは $E = 4.221 + 4.889 \varepsilon^{-2/3}$ (MPa) (6) とする。 ε はひずみ。また、各要素ごとに内

圧としてつぎの膨潤圧 p_{bm} を与える。 S_r は飽和度。 $p_{bm} = S_r \exp(3.8497 \rho_e^2 - 7.3332 \rho_e + 2.0856)$ (MPa)(7)

ポアソン比 は0.4として、球対称系の有限要素解析を行った。

5. 実験とシミュレーション ベントボールを半球に切り、切面を止水処理し、アクリル性容器に置く。その後水を投入し、定期的に切面を写真撮影し膨潤を計測するとともに、これを数値シミュレートした。

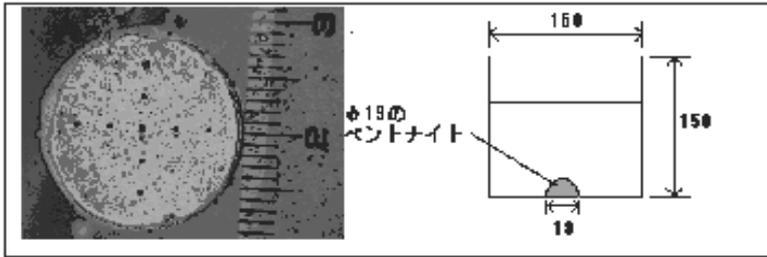


図2 ベントボールの膨潤実験

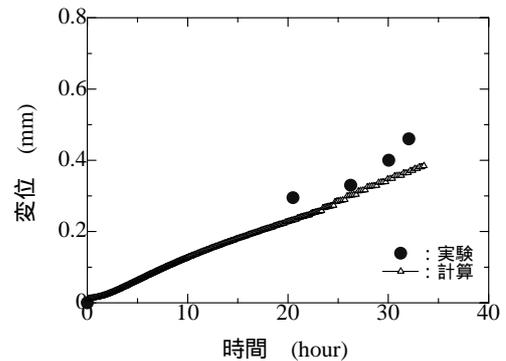


図3 計測点の変位の実験値と計算値の比較

要素数は40。図3に中央部の計測点の変位の実験値と計算値を示す。計算値は実験値より若干小さいが、ほぼ近いものとなっている。

このときの飽和部先端位置、体積含水率の推移、変位分布の推移の計算結果を図4~図6に示す。ベントボール中央までの飽和は計算では30時間強と若干短く、ひずみを若干大きく評価していると思われる。ひずみは外周部で最大13%弱であった。体積含水率は飽和後の増加はない。

6. まとめ 本数値シミュレーションではベントボールの小ひずみレベルの膨潤を試みたが、まだ膨潤実験のデータが少なく、今後の課題として応力 ひずみ関係の一般式や吸水メカニズム、大ひずみレベルの膨潤の検討などが挙げられる。

<参考文献>

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性、平成11年11月
- 2) 核燃料サイクル開発機構：緩衝材の膨潤特性、1999年12月

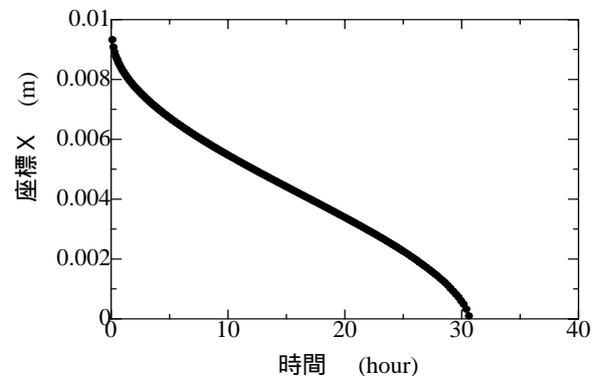


図4 飽和部先端の座標

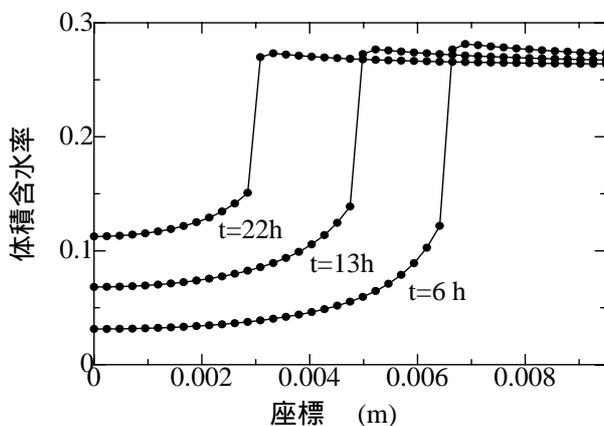


図5 体積含水率分布の推移

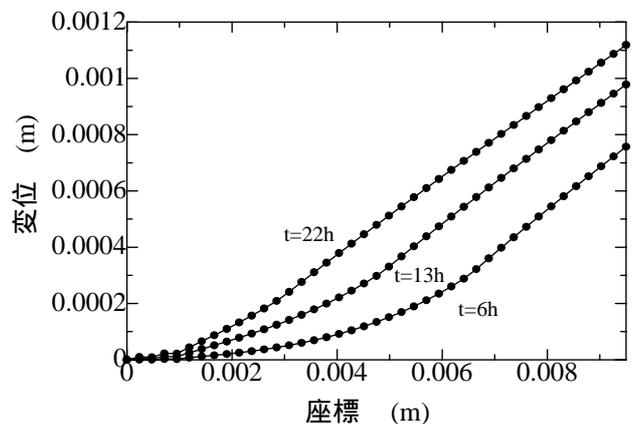


図6 変位分布の推移