

Ⅲ-13

膨潤応力を考慮した熱-水-応力連成解析

動力炉・核燃料開発事業団 千々松正和、藤田朝雄、菅野 毅
 岩手大学農学部 小林 晃
 ハザマ 茂呂吉司

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア内では、廃棄物の発熱による温度変化、岩盤からの地下水の浸入による水分変化、緩衝材の膨潤応力の発生や地圧の作用による応力変化等、熱力学的・力学的・水力学的な現象が相互に作用し合っており、簡単には評価することが難しい上、一つ一つの現象を実験で直接観察することも容易ではない。そこで、現在、熱-水-応力連成解析手法を用いて、緩衝材の環境をシミュレーションし、現象を推定することが試みられている^{1) 2)}。本論では、このような緩衝材の研究の一環として行われた、大型緩衝材試験の解析結果を報告するものである。

2. 連成解析の支配方程式

今回用いる地下水の連続式は以下のようなものである。

$$\left\{ D_{\theta v ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_j - z_j) + \frac{k_{sat ij} K_r}{\mu} h_j \right\}_{,i} + \{ D_T T_{,i} \}_{,i} - \rho_{fo} n S_r \rho_f \beta_P \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_f C(\psi) \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_f S_r \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho_{fo} n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここで、 ρ_f は地下水の密度、 $D_{\theta v ij}$ は水分拡散係数テンソルである。 $\partial \theta / \partial \psi$ は不飽和水分特性から求められる係数で、 θ は体積含水率、 ψ はサクションである。 ρ_{fo} は初期状態の地下水の密度、 n は間隙率、 S_r は飽和度、 β_P は水の圧縮係数、 $C(\psi)$ は $\partial \theta / \partial \psi$ で表される。 β_T は水の熱膨張係数である。 u_i は変位ベクトル、 T は温度、 h は全水頭である。 D_T は温度勾配による水分移動に関する係数であり、今回次式で表されるような温度依存性を考慮した。 D_m は基準となる係数の値、 T_o は初期温度、 α は温度に対する非線形性の度合いを調整するパラメータである。

$$D_T = D_{T_o} \exp\left(\alpha \frac{T - T_o}{T_o}\right) \quad (2)$$

エネルギーの保存則は以下で表される。

$$\left(\rho C_v \right)_m \frac{\partial T}{\partial t} + n s_r \rho_f C_v f_i T_{,i} - K_{Tm} T_{,ii} + \rho_f H D_{\theta v ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_j - z_j) + n s_r T \frac{\beta_T}{\beta_P} \left\{ D_{\theta v ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_j - z_j) \right\}_{,i} + \frac{1}{2} (1-n) \beta_T \frac{\partial}{\partial T} (u_{i,j} + u_{j,i}) = 0 \quad (3)$$

ここで、 $(\rho C_v)_m$ は水と骨格粒子からなる場の比熱、 C_v は流体の比熱、 K_{Tm} は水と骨格粒子からなる場の熱伝導係数である。 H が単位質量あたりの水の蒸発潜熱であり、その量は蒸気の移動量に比例している。

緩衝材として用いられている材料は、ベントナイト70%と砂30%の混合土を湿潤密度 $\rho_t = 1.86 \text{ g/cm}^3$ (乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$) になるように原位置で締め固めたものである。ベントナイト中には50%のモンモリロナイトが存在しており、浸潤により膨潤する。したがって、応力 σ は次式で得られる。

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} - \pi' \delta_{ij} \quad (4)$$

ここで、 C_{ijkl} は弾性係数テンソル、 ϵ_{kl} はひずみテンソル、 δ_{ij} はクロネッカーデルタである。また、 π' は膨潤応力に寄与する膨潤圧であり、初期体積含水率 θ_0 のベントナイトの水分量が増加し、 θ_i ($\theta_i > \theta_0$) に変化したときに発生する $\pi'(\theta_i)$ は次式により表わされると考える。

$$\pi'(\theta_i) = F \pi(\theta_i) = F \{ \psi(\theta_i) - \psi(\theta_0) \} \quad (5)$$

ここで、 π はベントナイトに生じている膨潤圧、 F は膨潤応力に寄与する係数で、別途行った室内試験のキャリブレーションから0.027と求められている³⁾。今回の検討では、このような支配方程式を用い、有限要素法で離散化することにより解析を行なう。

3. 大型緩衝材実験の解析

解析は、ヒータ中心を軸にした軸対称問題として行なう。図-3に解析メッシュ図を示す。発熱は発熱体部分から均一に発生するものとする。緩衝材への注水は注水孔に当たる節点の水圧を固定することにより表現する。注水圧力は 0.5kgf/cm^2 で解析を行ない、緩衝材中の温度分布状況および水分移動状況について実験値と比較検討をする。

図-2に緩衝材中の温度分布の実測値と解析結果の比較を示す。1ヶ月後においても5ヶ月後においても、温度勾配は解析値の方が若干急になっており、値も解析値は実験値より低くなっている。すなわち、解析の方が熱が伝導しにくいといえる。この要因としては、熱伝導係数等のパラメータの設定値、境界条件の設定、異なる熱伝導のメカニズム等が考えられる。図-3に緩衝材中の体積含水率の分布を示す。実験値は5ヶ月後にボーリングによって含水率を測定した結果である。実験値は計算値はよりも少し浸潤が進んだ状態になっている。また、解析値の5ヶ月後のヒータ側の水分が1ヶ月後のそれよりも小さくなっているのは、温度勾配による水分移動の影響である。また、

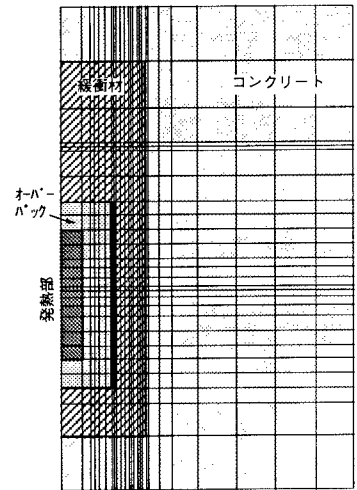


図-1 解析メッシュ図

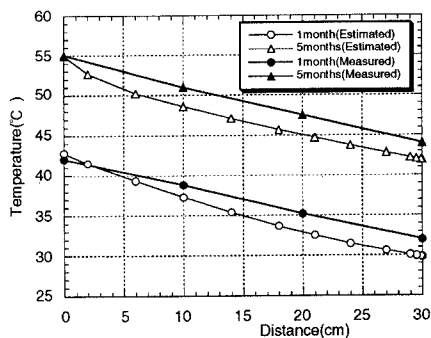


図-2 温度分布の実測値と解析値の比較

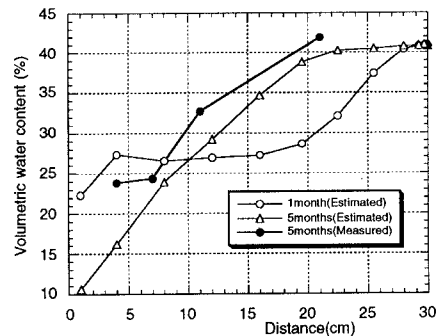


図-3 体積含水率分布の実測値と解析値の比較

図-4に緩衝材とコンクリートの境界部で観測された応力の実測値と解析で得られた膨潤応力に寄与する膨潤圧 π および熱-水-応力連成挙動を考慮した応力 σ の経時変化を示す。膨潤応力に寄与する膨潤圧 π は水の浸潤により初期から発生しており、実測された応力のほぼ定常状態となった値に近い値を示しているものの、熱-水-応力連成解析により求められた応力 σ の値は実測された応力の値より小さくなっている。この原因として、オーバーバックと緩衝材および緩衝材とコンクリート間の境界部の影響が考えられ、現在検討中である。

4. おわりに

今回は温度勾配下における水分移動、浸潤に伴う膨潤応力の発生を考慮した熱-水-応力連成解析を用い、大型緩衝材試験の解析を行なった。今後、膨潤以外の要因による変形メカニズムや各物性値の温度、水分依存性等について検討を進めていく必要があるものと思われる。また、このようなモデルの詳細なメカニズムの検討とともに、膨潤性粘土内の飽和-不飽和浸透挙動の精度を上げることが継続した検討課題である。

最後に、モデル開発に関しては東京大学中野政詩教授に多大なるご指導を得たことに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 藤田他；日本原子力学会「1993年会」、p418、1993。
- 2) 茂呂他；放射性廃棄物研究、Vol.1、No.1、pp.77-84、1994。
- 3) 藤田他；土木学会第50回年次学術講演会（投稿中）、1995。

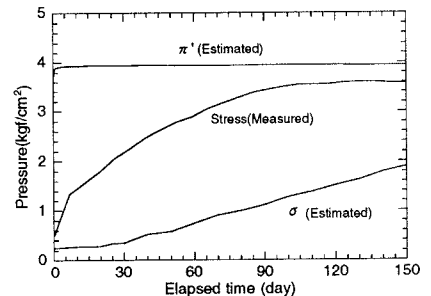


図-4 応力の経時変化