

## 熱-流体連成モデルによる HE-E 原位置ヒーター試験の二相流パラメータの検討

(株)地圏環境テクノロジー 正会員 ○田中 啓, 正会員 田原 康博  
 (株)大林組 正会員 佐藤 伸, 正会員 深谷 正明  
 NAGRA 非会員 Florian Kober

## 1. 緒言

放射性廃棄物処分施設閉鎖後から比較的初期のニアフィールドにおける温度上昇や再冠水挙動の把握を目的として、スイスのモンテリ試験場において原位置ヒーター試験 (HE-E) が行われている。HE-E の対象母岩 Opalinus Clay は流体の透過性が非常に小さく、また掘削時の坑道の換気の影響もあり、閉鎖直後の坑道周囲の岩盤は不飽和状態になっていたと考えられる。複数の機関が、熱-流体連成 (TH 連成) モデルや熱-流体-応力連成 (THM 連成) モデルによる再現解析を試みているものの、上記の挙動を十分に裏付ける再現結果を得るには至っていない<sup>1)</sup>。

筆者らは、ヒーター試験開始までの坑道の状態を概略的にモデルに組み込むことで、初期状態をより詳細に再現し、既往のモデリング研究よりも温度や相対湿度、間隙水圧といった観測値の再現精度を向上させた<sup>2)3)</sup>。しかしながら、間隙水圧の計算値は観測値よりも全体的に高い傾向が見られた。また、二相流パラメータが流動特性の把握に重要であることは判明しているものの、パラメータそれぞれの感度に関する検討は十分ではない。

本研究では、まず人工バリアシステム (EBS: Engineered Barrier System) と岩盤のパラメータの感度分析により、最適化すべきパラメータの選定を行った。次に、逆解析によるパラメータの同定を行い、主要なパラメータが EBS と岩盤内の流体の挙動にどの様に影響するかを考察した。その際、HE-E の初期状態をこれまでと異なるアプローチで推定している。TH 連成解析は、既往の検討と同一の格子モデル (図 1(a)) を用い<sup>2)3)</sup>、TH 連成解析には GETFLOWS<sup>4)</sup>を、逆解析には UCODE\_2014<sup>5)</sup>を使用した。

## 2. 感度分析

初めに、二相流パラメータを中心とした単変量の感度分析を行うことで、逆解析で同定するパラメータの選定を行った。各パラメータの取り得る範囲は、既往の室内実験や 3 次元解析の結果を包含するような範囲で設定した。

感度分析の結果から、EBS については、浸透率、毛管圧 (水分特性曲線)、相対浸透率、岩盤については、浸透率、毛管圧の感度が特に高いことが分かった。逆に、岩盤の相対浸透率、拡散係数、間隙率といったパラメータの感度は相対的に低いという結論を得た。また、岩盤の物性は EBS 内部の流動に直接的に影響する一方、EBS の物性が岩盤内の流動に及ぼす影響は小さい。このことから、逆解析を行う場合には、EBS と岩盤両方の観測値で構成される目的関数を設定することが必要であるという知見が得られた。

## 3. EBS と岩盤のパラメータの逆解析

ヒーター試験系を模擬した一次元モデルを用いた逆解析によって、パラメータの同定を行った。既往の解析では、試験坑道とそれに隣接する Gallery 98 の掘削を模擬した計算を行うことで、初期の間隙水圧、飽和率を設定していた。しかしながら、岩盤の初期状態も二相流パラメータの影響を受けるため、逆解析の初期状態としては必ずしも適当ではない。

そこで本研究では、以下の手順で逆解析の初期状態を設定した。

キーワード 放射性廃棄物処分, EBS, モンテリ試験場, GETFLOWS, 逆解析

連絡先 〒101-0063 東京都千代田区神田淡路町 2-1 NCO 神田淡路町 3F (株)地圏環境テクノロジー TEL03-5297-3811

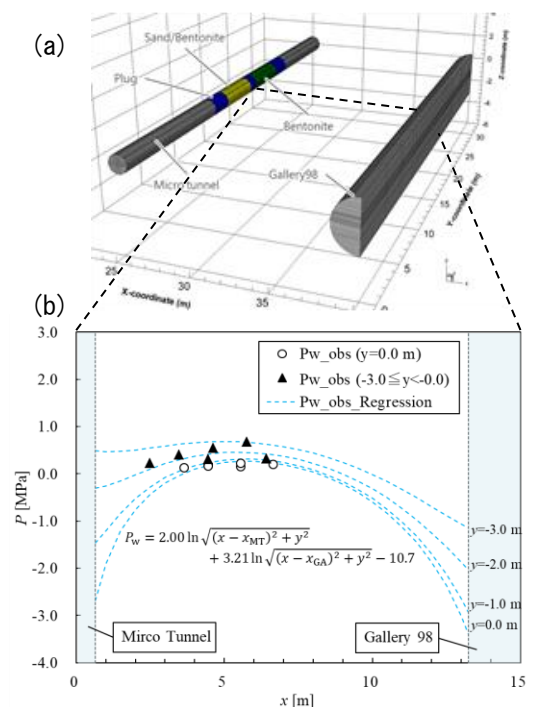


図 1 (a) 3 次元解析モデル<sup>1)</sup>と  
(b) 坑道間の初期間隙水圧分布

1. 間隙水圧  $P_w$  の設定2. 気相圧力  $P_g$  の設定 (飽和:  $P_g = P_w$ , 不飽和:  $P_g = P_{\text{atom}}$ )3. 間隙水圧と気相圧力の差から毛管圧  $P_c$  を設定 ( $P_c = P_w - P_g$ )

4. 毛管圧モデル (van Genuchten モデル) から初期飽和率を設定

上記 1. の間隙水圧の設定においては, 2 つの坑井間の速度ポテンシャル分布を求め, HE-E 試験開始前の間隙水圧分布を推定した. 2 つの生産井があるときの速度ポテンシャルは,  $i$  番目の坑井の中心点の座標を  $(x_i, y_i)$  とおけば, 以下のように表される.

$$\Phi(x, y) = a \ln \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} + b \ln \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} + c$$

上式中の定数  $a, b, c$  は, 観測値と推定値との RMSE が最小となるように決定した. 得られた間隙水圧分布を図 1 (b) に示す.

感度分析の結果から, 最適化する未知変数は, EBS と岩盤の浸透率  $k$ , 毛管圧モデルのパラメータ  $P_0$ , 毛管圧モデルと相対浸透率モデルのパラメータ  $n_w$  とした. 逆解析では, 初めに Markov-Chain Monte Carlo による大域探索を行い, 得られた幾つかのパラメータセットに対して修正 Gauss-Newton 法による局所探索を行った. 各未知変数の定義域は, 既往の研究よりも幅を持つように設定した.

同定されたパラメータを用いた再現解析結果として, EBS をサン

ドベントナイトとした場合の相対湿度と間隙水圧を図 2 に示す. obs と cal はそれぞれ観測値と解析値を表す. 岩盤の間隙水圧が大気圧以下から上昇する傾向は捉えられているものの, ピーク時の値は観測値よりも低い. また, 相対湿度は EBS 内の分布状況を十分には反映できていない. 上記の違いが生じた理由の 1 つとして, 応力による間隙率の変化が未考慮の点が挙げられる.

浸透率は, 流動特性の把握に重要であるが, 特に岩盤の浸透率は, 岩盤だけでなく EBS 内部への水の浸入に大きく影響する. 逆に言えば, 影響が大きい分, 値の同定は他のパラメータよりも比較的容易であると考えられる.

毛管圧については, 初期飽和率の再現により初期値の推定は可能である. 施設閉鎖後, EBS と岩盤の飽和率は, 両者の水理ポテンシャルが等しくなるまで変化する. 従って, EBS 内の相対湿度の変化は, 隣り合う EBS と岩盤の毛管圧モデルの組み合わせに左右される. 逆解析の経過を見ると, 毛管圧に対する目的関数の非線形性は高く, 局所解が選択されやすい傾向があるため, 毛管圧の同定には大域的な解探索アルゴリズムが有効である.

EBS 内部の相対湿度の分布を再現する場合, 不均質な流動特性を考慮した物性が不可欠である. 本研究では飽和率の関数である相対浸透率が挙げられるものの, 水相の相対浸透率は非常に小さく, 既往の解析条件<sup>1)</sup>とは一致しなかった. THM 連成モデルでは, 応力変化による間隙率の変化が加わるため, 相対浸透率の検討には解析モデル間の比較が考えられる. 岩盤内の飽和率は, 不飽和領域であっても飽和状態に非常に近い値となっており, 相対浸透率のパラメータを同定するのは難しい. 原位置試験だけでなく室内試験の結果を踏まえた検討が必要である.

## 4. 結言

HE-E 試験のパラメータの感度分析と逆解析を通じて, 各パラメータと観測値との関係性について考察した. 主要な二相流パラメータを選定し, EBS 近傍の流動に及ぼす影響を考察することで, 逆解析に関する指針を得た. また, 間隙水圧の推定に速度ポテンシャル分布を用いることで, 初期の分布を統一的に設定することが可能となった.

今後は, 効率的な大域探索手法の適用や, 応力変化が流動に及ぼす影響の評価を通じて, EBS や岩盤の不均質性も考慮した検討を加え, ニアフィールドの再冠水挙動の詳細な把握を目指していきたい.

参考文献 1) Garitte, B. et al., *Environmental Earth Sciences*, 76(2), 64, 2017.

2) 佐藤ほか, 計算工学講演会論文集, 23, 2018. 3) 田中ほか, 土木学会第 73 回年次学術講演会要旨集, CS7-027, 2018.

4) Tosaka, H. et al., *Proceedings of International Groundwater Symposium 2010*.

5) Poeter, E. P. et al., UCODE\_2014, IGWMC Report, No. GWMI 2014-02, 2014.

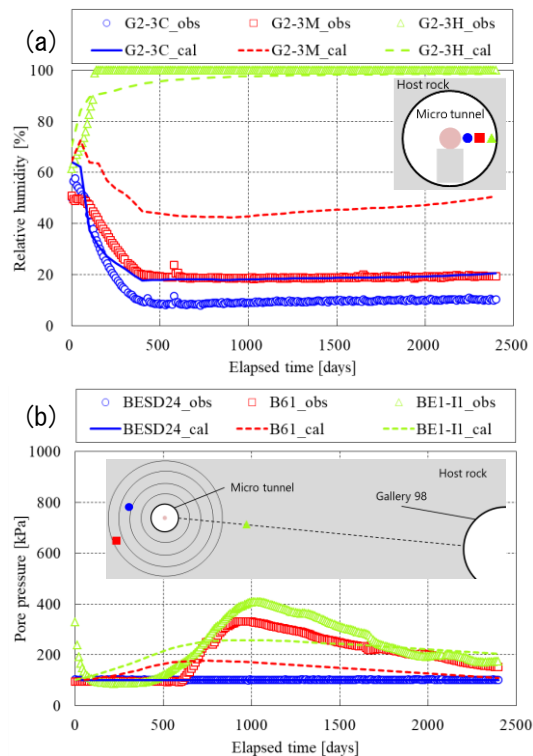


図 2 (a) EBS 内の相対湿度と  
(b) 岩盤内の間隙水圧の時間変化