

熱-流体連成モデルによる HE-E 原位置ヒーター試験の飽和過程の再現解析

(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
 京都大学大学院 正会員 榎 利博
 NAGRA 非会員 Florian Kober

1. 緒言

放射性廃棄物処分施設閉鎖後, 人工バリアシステム (EBS: Engineered Barrier System) 及びその周辺では, 岩盤からの地下水の浸入や, 廃棄体からの発熱に伴う温度上昇及び水蒸気の生成・拡散, 金属腐食や放射線分解によるガス発生・移行等が起これと考えられる. このような複雑な熱及び流体挙動の予測には, 数値シミュレーションが有用である. また, 坑道掘削形状や熱及び流体挙動の影響を考慮した場合, 解析領域が対称系になるとは考えにくいことから, 計算コストの高い3次元モデルによる表現が必要となる. 本研究は, 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に対する, 熱-水連成モデリング手法の適用性検証を目的として, スイスの Mont Terri 試験場で行われている原位置ヒーター試験 (HE-E) を対象とし, 逆解析によるパラメータ同定を組み合わせた熱-流体連成モデルによる3次元再現解析を試みたものである.

HE-E の対象母岩は, スイスの地層処分サイトの対象母岩と同じ Opalinus Clay であり, 流体の透過性が非常に小さいのが特徴である. そのため, 掘削時の坑道周囲からの地下水流入が遅く, 処分施設閉鎖直後の坑道周囲の岩盤は不飽和状態になると考えられる. しかしながら, 既往のモデリング研究ではそのような初期状態の正確な把握が行われているとは言い難い⁽¹⁾. そこで本研究では, 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, ヒーター試験系の再現解析の精度を向上させるとともに, 熱移動, 水蒸気拡散, 地下水移流, 間隙水圧の変化といった現象に対しての考察を行った.

2. 手法

ヒーター試験が行われたマイクロトンネルと, 比較的近傍で掘削の影響圏と考えられる試験坑道 Gallery 98 までをモデル化し, その他の周辺領域については十分広い範囲までを解析対象とした. 格子分割では, マイクロトンネルや EBS 形状を考慮し, 総格子数は 665,650 となった.

初めに, Gallery 98 とマイクロトンネルそれぞれに対して, 掘削後に実測された相対湿度, 温度, 及び大気圧を境界条件として与え, 平衡状態に至るまでの計算を行うことで, 掘削の影響について考慮した. 次に, ヒーター試験系を1次元モデルによって近似した逆解析によ

って, パラメータの同定を行った. その際, 既往のモデリング検討で用いられている水理・熱物性を初期パラメータとし, ヒーター試験開始時までに行われた換気試験を概略的に模擬している. 流体-熱連成解析には GETFLOWS⁽²⁾⁽³⁾ を, 逆解析には UCODE_2014⁽⁴⁾ を適用した. 最後に, 1次元逆解析によって得られたパラメータを用いて, 約6年間の3次元再現解析を行い, 温度, 相対湿度, 間隙水圧の実測データとの比較を通じて, パラメータの微調整を行った.

3. 結果と考察

温度と相対湿度の再現結果をそれぞれ図2と図3に示す. 概ね良好な再現結果が得られている. 試験開始前の換気試験による坑道周辺岩盤の不飽和状態を考慮しない解析では, 間隙水圧を過大に見積もる傾向があったものの,

キーワード 放射性廃棄物処分, EBS, Mont Terri 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

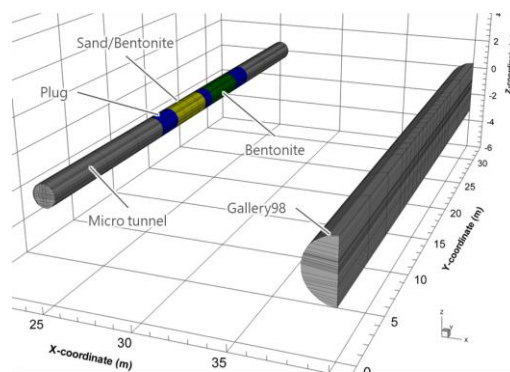


図1 3次元解析モデル

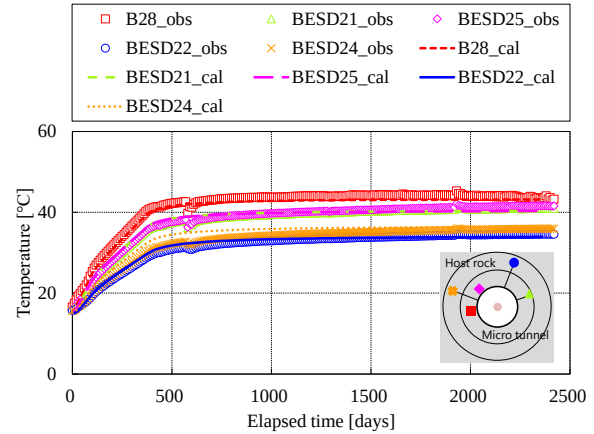
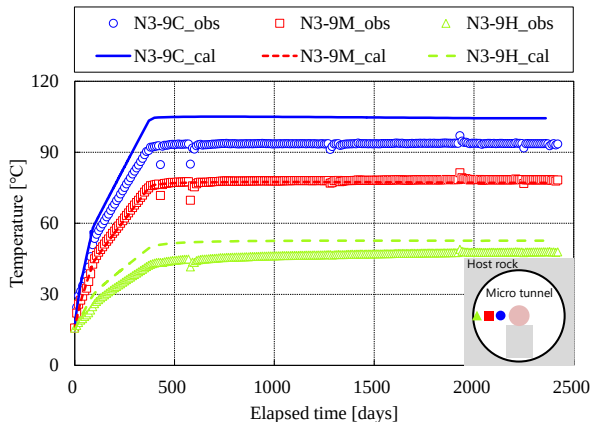


図2 ベントナイト内(左)と坑道壁面から1.0 mまで(右)の温度の時間変化

本研究においては、母岩内の間隙水圧が試験途中から上昇する傾向を捉えられている(図4)。また、坑道壁面から2 m以上離れた点でも間隙水圧の傾向を概ね再現できている。

坑道内部では、ヒーターからの発熱と、発熱による水蒸気生成・拡散によって、坑道周囲の岩盤の温度、及び相対湿度が変化する。また岩盤内では、地下水の移流によって、岩盤周囲が徐々に不飽和から飽和状態になり、それに伴い間隙水圧の上昇が起こっているものと考えられ、解析結果でもこの挙動が示されている。

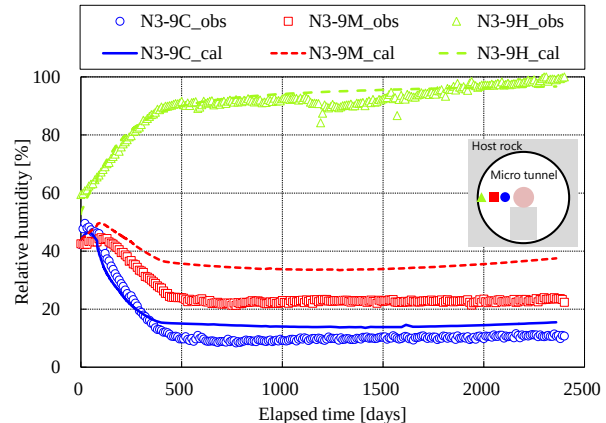


図3 ベントナイト内の相対湿度の時間変化

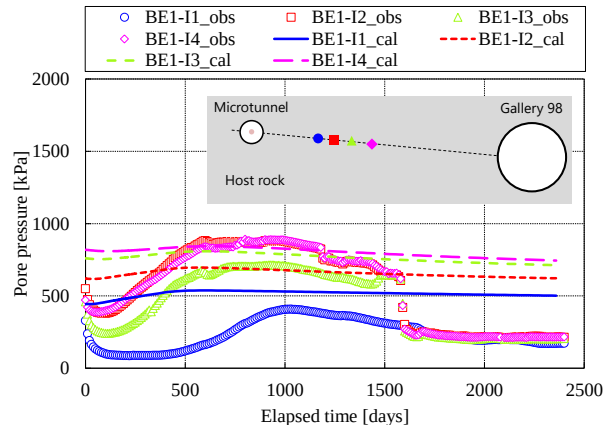
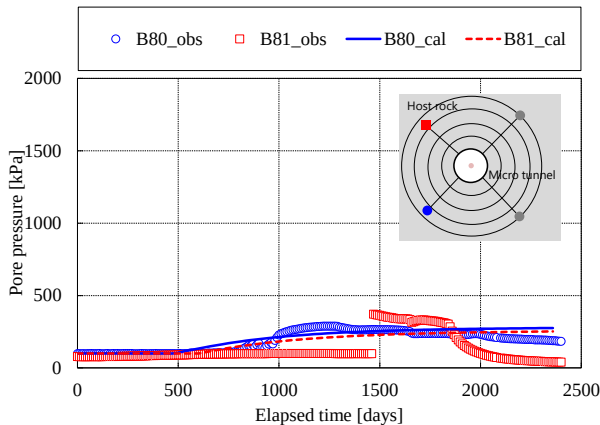


図4 坑道壁面から1.5~2.0 m(左)と3.0~6.0 m(右)の間隙水圧の変化

4. 結言

マイクロトンネルの掘削、換気、埋戻し、及び加熱などの履歴を考慮した原位置ヒーター試験の3次元再現解析を行った。EBS及び坑道周囲の温度、相対湿度の解析結果は観測値との良好な一致を示した。また坑道周辺岩盤の不飽和状態を考慮することで、これまで再現されることが少なかった間隙水圧の上昇傾向を捉えられており、母岩周囲からの地下水の供給が起きていることを計算上でも再現した。

本研究では、主に絶対浸透率と毛細管圧力に着目した逆解析によるパラメータ同定を行っている。今後は、より多くのパラメータを対象とした高次元の逆解析や、各パラメータの感度及び不確実性の幅の定量化も必要と考えられる。EBS内部から坑道周囲への水蒸気拡散、岩盤からの地下水の移流に関する現象の理解を更に進め、地層処分施設閉鎖直後のニアフィールドの予測解析手法の高度化を目指していきたい。

参考文献

- (1) Garitte, B. et al. (2017). *Environmental Earth Sciences*, **76**(2) 1350.
- (2) Tosaka, H. et al. (2010). *Proceedings of International Groundwater Symposium 2010*.
- (3) Mori, K. et al. (2015). *Environmental Modelling & Software*, **72**, 126.
- (4) Poeter, E. P. et al. (2014). UCODE_2014. IGWMC Report, No. GWMI 2014-02.