

熱・流体・応力連成解析による HE-E 試験の再現解析

(株)大林組 正会員 ○佐藤 伸, 山本 修一, 深谷 正明, 志村 友行

(株)地圏環境テクノロジー 正会員 田原 康博, 田中 啓

NAGRA Florian Kober

1. はじめに

放射性廃棄物処分にに関する国際共同研究の一環としてスイス北西部のジュラ州に位置するモンテリ岩盤試験場では 48 種類の原位置試験が実施中である¹⁾。その内の一つに熱・流体・応力連成 (以降, THM 連成) 挙動を把握するために放射性廃棄物処分場の人工バリアを 1/2 スケールで模擬した原位置ヒーター試験 (HE-E 試験) があり, 2011 年 6 月から約 8 年間継続実施中である。本検討では, THM 連成解析による HE-E 試験の再現解析を実施して, モデル化の妥当性, THM 連成挙動の把握及び要素試験で得られた材料パラメータの実大スケールの挙動評価への適用性検証を実施した。

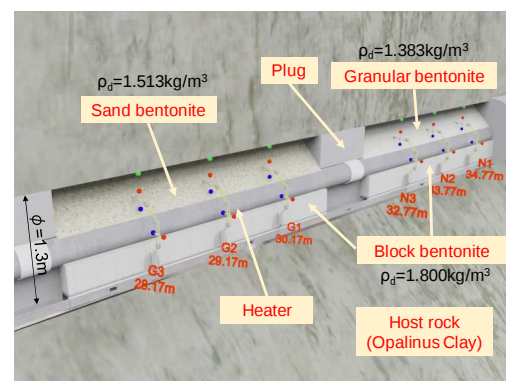


図-1 HE-E試験の概要図

2. 検討概要

HE-E 試験は図-1 に示すように坑道延長約 50m, 直径 ϕ 1.3m の坑道内中央に模擬廃棄体 (ヒーター) を設置し, ヒーター周辺に 100%粒状ベントナイト ($\rho_d=1.383\text{kg/m}^3$, 以降 B ペレット) あるいは粒状ベントナイトを 65%配合させた砂混合土 ($\rho_d=1.513\text{kg/m}^3$, 以降 S/B) で埋め戻されている。本試験の目的は, THM 連成解析の検証に必要な試験データベースの構築と要素試験から得られた材料パラメータをフィールドスケールに Upscaling する妥当性検証である。本検討では THM 連成挙動を考慮する必要があるため, スペインのカタルーニャ工科大で開発された CODE_BRIGHT²⁾を用いた。本コードは間隙水の加熱による水蒸気化 (液相から気相), 間隙空気圧増加による水への溶解 (気相から液相) と言った相変換を考慮できる。さらに, 膨潤性粘土の弾塑性挙動を表現できる Barcelona Basic Model³⁾ (以降 BB モデル) が適用可能である。解析モデルは, 坑道中心を対称軸とする軸対称でモデル化し, 坑道内はプラグコンクリートとベントナイト系埋戻し材をモデル化した。図-2 に解析モデルを示す。適用する材料構成モデルは, ベントナイト系材料は BB モデル, 岩盤は Mohr – Coulomb 破壊基準による弾塑性モデル及びその他は弾性とした。解析に用いる材料物性値は, Gaus I., et al.⁴⁾における各種要素試験から設定された材料パラメータを用いた。解析ステップは THM 連成を行いながら, i) 岩盤の初期状態作成, ii) 坑道掘削による大気圧解放, iii) ベンチレーション試験 (坑道壁面に 2MPa のサクション保持)⁴⁾, iv) 試験体設置, v) ヒーター加熱 (ヒーター表面温度を 365 日で約 140℃ まで上昇させる過程を含む 2500 日間 (約 6.8 年) の加熱) の 5 ステップで実施した。

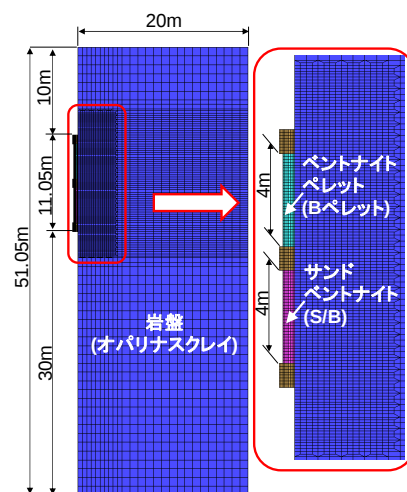


図-2 解析モデル

3. 解析結果

始めに図-3 に示す人工バリア内部センサー配置位置に対応する相対湿度の経時変化として, B ペレット内部, S/B 内部をそれぞれ図-4, 図-5 に示す。ここで, 実験結果に対する解析結果の再現性は良好で, ヒーター側 (青色) では間隙水の温度上昇により水蒸気が発生して相対湿度が低下し, 反対に岩盤側については, 地下水の侵入によって相対湿度が上昇する傾向をとらえている。ヒーター側の相対湿度の低下は水蒸気発生により, 間隙水が液相から気相へ相変換するため, 間隙空気圧の上昇を引き起こす。それにより, ヒーター側と岩盤側で密度差が生じるものと考えられるため, 図-4, 5 に間隙率変化も含めて示した。ヒーター側は間隙が開き, 反対に岩盤側は圧縮されてい

キーワード 原位置試験, 熱・流体・応力連成, 有効応力解析法, 放射性廃棄物処分

るのが分かる。このため、実際の処分場でも廃棄体の発熱によって人工バリア内に密度差が生じることを示唆している。次に、図-6、図-7にBペレット及びS/B内部の温度の経時変化を示す。温度についても実験結果に対して解析結果の再現性は良好であり、要素試験から得られた熱物性適用の妥当性が示された。次に岩盤の水圧の経時変化として、壁面から2m位置を図-8に示し、図-10に示す遠距離の位置については図-9に示す。実験結果と解析結果を比較すると、壁面から2m位置の再現性は良好である。一方、遠距離については、間隙水圧の最大値と発生時刻は再現できていないものの、始めは上昇し、その後消散する傾向はとらえている。これは、人工バリア内の水蒸気発生影響による岩盤の水圧変化と、それに伴い生じる岩盤の体積変化の影響である。以上から、各計測結果に対して解析結果は概ね良好な再現性を示した。本検討は要素試験結果から設定された材料パラメータを使用しているが、要素試験に基づく材料パラメータをフィールドスケールにUpscalingする妥当性が検証された。ただし、解析に用いるパラメータは、原位置における材料のばらつき等を考慮した平均的な値に変更することにより、再現精度の向上が期待できると考える。

4. おわりに

本検討では、THM連成解析を用いて原位置ヒーター試験であるHE-E試験の再現解析を実施した。検討の結果、解析は実験を非常に良く再現しており、要素試験で設定されたパラメータの妥当性が検証された。ただし、若干の改善余地はある。放射性廃棄物処分場におけるTHM連成現象は、廃棄体の発熱により人工バリア内で水蒸気が発生し間隙圧力上昇を引き起こすため、力学的には体積変化（密度分布）が発生し、水理的には透過性に影響を及ぼすことが分かった。今後はTH連成の逆解析により設定されたTH関連の材料パラメータを用いてTHM連成解析を実施し、力学挙動がTHM連成プロセスにどのような影響を及ぼすのか検討を行う予定である。

参考文献 1) <https://www.mont-terri.ch/> 2)UPC: CODE_BRIGHT User's Guide 2018., 3) E. E. Alonso, et. al.: A Constitutive model for partially saturated soils, Geotechnique, 40, No.3, 1990. 4) Gaus, I., et al.: HE-E Experiment: Lay-out, Interpretation and THM Modeling, D2.2-11: Final Report on the HE-E Experiment and Modelling and Interpretation of the HE-E Experiment of the PEBS Project, EURATOM7, 2014.

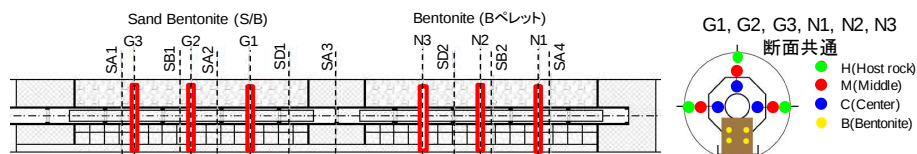


図-3 人工バリア内センサー配置図

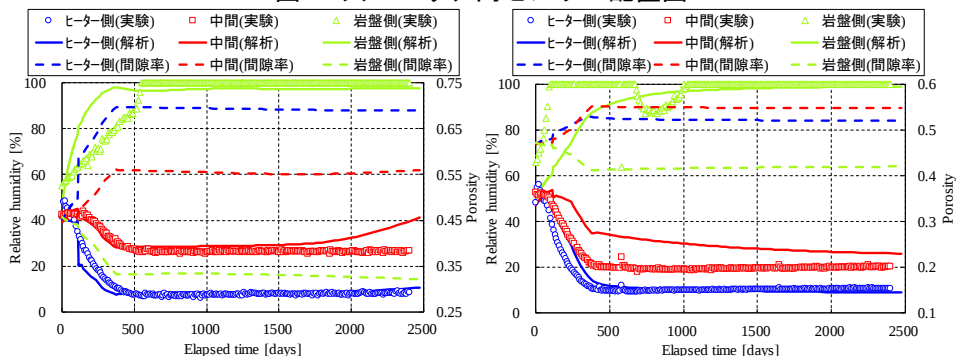


図-4 Bペレット内相対湿度の経時変化

図-5 S/B内相対湿度

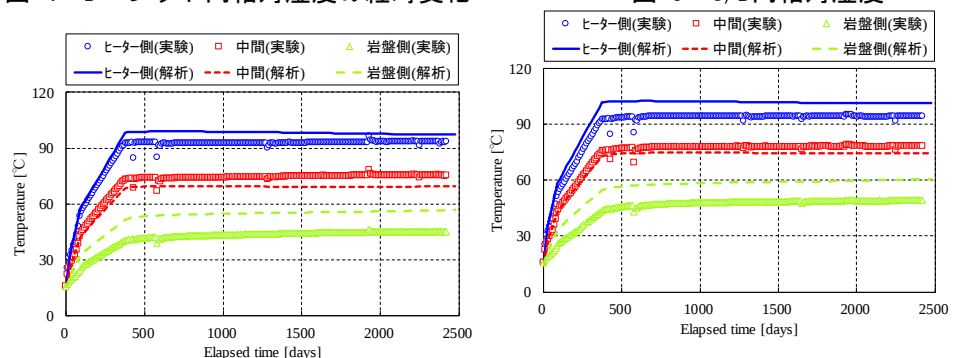


図-6 Bペレット内の温度変化

図-7 S/B内の温度変化

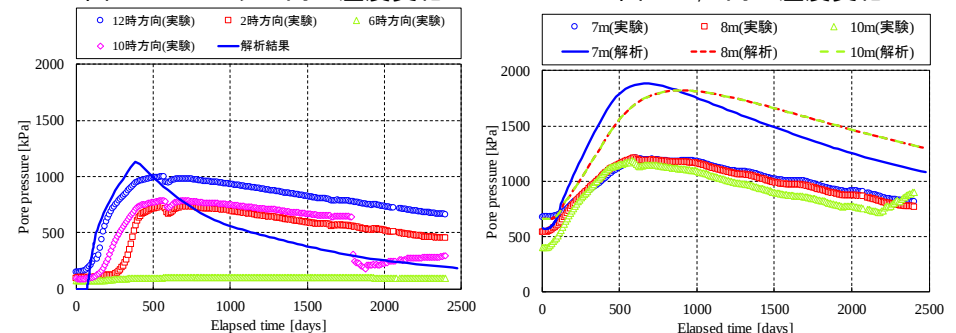


図-8 岩盤部水圧の変化(壁面から2m)

図-9 岩盤部水圧の変化(遠距離)

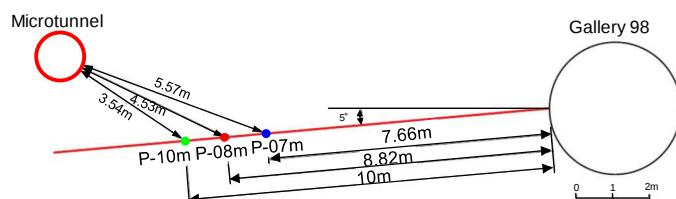


図-10 岩盤水圧計位置図(遠距離)