

人工バリアシステムの熱・水・応力・ガス連成解析

大林組 正会員 ○山本 修一
大林組 正会員 中岡 健一
大林組 正会員 納多 勝
カタルーニャ工科大学 非会員 Eduardo E. Alonso

1. はじめに

放射性廃棄物地層処分における人工バリアシステムは長期にわたってその機能を維持することが求められるが、岩盤からの地下水浸入によるベントナイト系緩衝材の膨潤変形、廃棄体の核種崩壊熱による膨張、乾燥や物性の変化、廃棄体の腐食によるガス圧やガス移行の影響などを同時に受ける。そのため、人工バリアシステム、特に緩衝材の長期挙動の評価には、間隙水の移動、骨格の変形、熱伝達と熱影響、ガス発生・移行現象の連成作用を考慮できる解析が必要となる。本研究は欧米で広く使われている熱・水・応力・ガス連成解析コード Code Bright¹⁾を導入し、我が国の処分問題への適用に向けて、適用性の確認、構成則等のモデルの改良、物性値取得方法の確立、物性値データベース整備など、熱・水・応力・ガス連成挙動のモデル化技術の確立を目指すものである。本稿では、第一報として Code Bright の概要と Code Bright におけるベントナイト緩衝材の水理・力学モデルについて紹介し、ベントナイトの吸水膨潤の要素試験シミュレーションおよび、実際のモデルとして我が国の TRU 廃棄物処分概念を対象に実施した連成挙動の試解析について報告する。

2. Code Bright の特徴

Code Bright はカタルーニャ工科大学（スペイン）で開発された地盤・岩盤など多孔質体の熱・水・応力・ガス連成解析コード（FEM, 2～3次元）で、表-1 に示すように海外では放射性廃棄物地層処分における人工バリア、天然バリアの挙動評価に広く使われている。Code Bright は他の同類のコードと比較して以下の2点に特徴があり、これが海外で広く地層処分分野に適用されている理由でもある。

- 1) 不飽和土（膨潤性粘土を含む）の弾塑性構成モデル²⁾が導入されている。
- 2) 液相のみならず気相（ガス移行）を扱う二相流と力学及び熱の連成解析コードである。

1)により、再冠水時のベントナイトの吸水（不飽和から飽和）に伴う膨潤変形挙動が表現可能であり、1), 2)により、ガス移行時の力学連成挙動が表現可能である。このとき、熱対流や湿潤・乾燥による熱特性の変化も考慮される。

不飽和土（粘土）の弾塑性構成モデルは飽和土に対する修正カム・クレイモデルをベースにサクシオン s の影響が考慮されるよう拡張されたモデルであり、以下の不飽和土（粘土）および不飽和ベントナイトの一般的な特性が表現される。

- 1) サクシオンの変化（飽和度の変化）による体積ひずみの発生（飽和膨潤）（図-1）：平均応力 p の変化による体積変化が圧縮指数 λ 、膨潤指数 κ で規定されるのと同様に、サクシオン s の変化による体積変化が λ_s 、 κ_s で規定される（ベントナイトの膨潤特性は主に κ_s に支配される）。なお、 λ_s 、 κ_s は p, s の関数として扱うこともできる。
- 2) サクシオンの増加（飽和度の低下）による降伏曲面の増大（図-2）：サクシオンの増加（飽和度の低下）により見かけの粘着力、圧密降伏応力の増加が表現される。逆に、これにより不飽和土の特徴である湿潤過程における破壊（いわゆる飽和コラプスなど）も表現される。

表-1 Code Bright の主な適用プロジェクト

略称	実施場所／国	対象	概要
FEDEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment)	Grimsel／スペイン	スペインのHLW処分概念の実物大EBSモデル(100%セラタ)	周辺岩盤を含むベントナイトのTHM連成挙動の評価
GMT (Gas Migration Test)	Grimsel／日本	サイロ型処分施設概念(20%クニゲルV1)	人工バリア、周辺岩盤の力学連成ガス移行挙動評価
TBT (Temperature Buffer Test)	Äspo／スウェーデン	スウェーデンHLW処分概念の実物大EBSモデル(100%MX80)	周辺岩盤を含むベントナイトのTHM連成挙動の評価
Backfill & Plug Test	Äspo／スウェーデン	処分坑道の埋戻し、プラグ(30%MX80)	ベントナイト混合埋戻し材の周辺岩盤を含むHM連成挙動の評価
PRACLAY	Mol／ベルギー	ベルギー処分概念の実物大モデル(100%FoCa clay)	周辺岩盤を含むベントナイトのTHM連成挙動の評価
EB (Engineered Barrier test)	Mt Terri／EU	スイスHLW処分概念の実物大EBSモデル(100%セラタ)	ベントナイト飽和過程の周辺岩盤を含むHM連成挙動評価
DST (Drift Scale Test)	Yucca Mountain／米国	処分坑道、岩盤	処分坑道と岩盤のTHM連成挙動評価

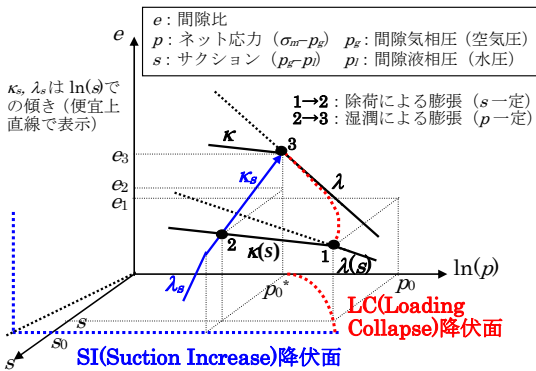


図-1 サクシオン変化による圧縮、膨潤と (e, p, s) 面での降伏曲面

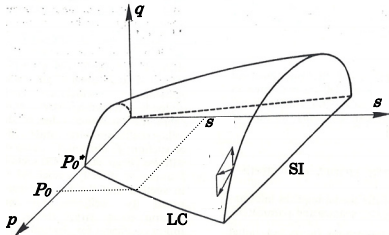


図-2 (p, q, s) 面での降伏曲面²⁾

キーワード 熱・水・応力連成解析, ベントナイト, 不飽和粘土, Code Bright, 要素試験, 放射性廃棄物処分
連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組 土木技術本部 技術第四部 TEL 03-5769-1309

3. ベントナイトの吸水膨潤のシミュレーション

供試体厚さ 20mm のケイ砂混合圧縮ベントナイト (クニゲル V1 混合重量比 70%, 乾燥密度 1.6g/cm^3 , 初期含水比 7%) を体積拘束状態で下部を浸潤させ吸水膨潤する過程をシミュレーション解析した. 不飽和力学物性以外は既存の実験から得られている値³⁾を用いた. この問題においては結果に影響のある不飽和力学物性は κ_s だけであるが, 実験データが無いので, パラメータスタディにより所定の平衡膨潤圧 (約 0.48MPa) を再現する κ_s (一定値と仮定) を同定した. 図-3 は膨潤応力 (モデル内で発生する一様な鉛直応力) および飽和度の変化を示す. また, 図-4 は力学連成結果として現れる膨潤過程 (約 55 時間後) での不均質な間隙率の分布を示す. 飽和の進展, 膨潤応力の発現, 供試体内部の体積変化挙動 (下部は最初膨潤するが, 上部は下部の膨潤圧で反対に圧縮され, 飽和が供試体全体に進展するのに伴って均質化する) など, 妥当な挙動が再現されていることがわかる.

4. 人工バリアシステムの熱・水・応力・ガス連成解析

図-5 は TRU 放射性廃棄物処分検討⁴⁾において考えられている硬岩系岩盤での処分概念の 1 つであり, この断面を対象に, ①処分坑道の掘削, ②処分施設 (廃棄体, コンクリートピット, 緩衝材, 埋戻し材) の構築および廃棄体の発熱, ③施設の浸潤飽和 (再冠水), ④廃棄体の腐食による水素ガス発生・移行を考慮した, 熱・水・応力・ガス連成解析を試みた. 実際は空洞掘削後, 周辺岩盤には不飽和領域が広がると考えられるが, ここでは岩盤は常に地下水で飽和しているものと仮定し, 処分施設設置直後 (10 年後) に施設内へ地下水が浸潤を開始するものとした. 廃棄体からの発熱量は 10W/m^3 一定とし, 腐食ガスは廃棄体層飽和後 (60 年後) に廃棄体層全体から一定速度 (100mol/m/年) で発生するものとした. なお, 緩衝材は前記 3. と同じ物性値を用い, 岩盤及びその他の各構成材料の物性値は適当な値を仮定した.

図-6 はガス発生後はほぼ定常となる 150 年後の温度, ガス圧および飽和度の分布を示している. 図から, 温度は発生源である廃棄体中心部で高く, ガス圧は透気性の低い緩衝材の内側で全体的に高くなる傾向が分かる. 飽和度は岩盤側から徐々に上昇し 60 年後に一旦全域が飽和するが, その後, ガスの発生により廃棄体および緩衝材から間隙水が排水され, 再び不飽和状態となる. また, 図-7 に示すように, 緩衝材および廃棄体層のガス圧 (気相圧) は再冠水の進行に伴って, 本検討で設定した周辺岩盤の地下水圧 (1MPa) に近づき, ガス発生 (60 年後) によってさらに 1MPa 程度上昇する.

その後, 緩衝材の飽和度が低下して透気係数が増加することにより, ガス圧が低下し定常に至ることがわかる. これらの挙動は, 定性的には妥当と判断できるが, 今後は要素試験や模型試験との比較により, 定量的な妥当性の確認を進めるとともに, 処分システムの長期挙動に何がどのような影響を及ぼすかについて解析的な検討を行う予定である.

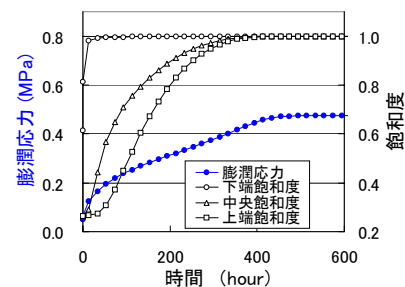


図-3 膨潤応力と飽和度の経時変化

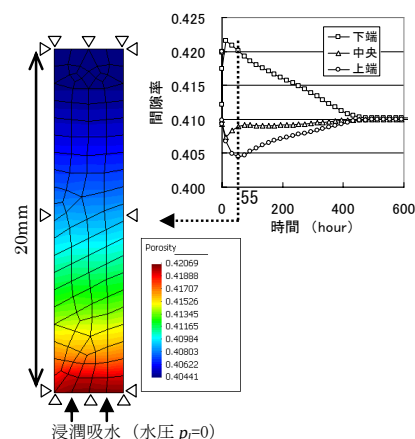


図-4 間隙率の局所分布 (左) と経時変化 (右)

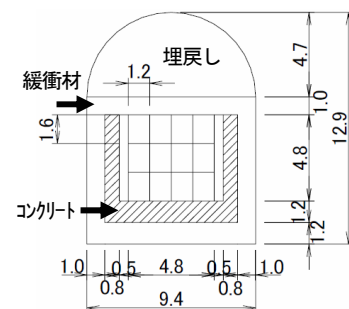


図-5 解析対象とした処分システム概念 (断面)⁴⁾

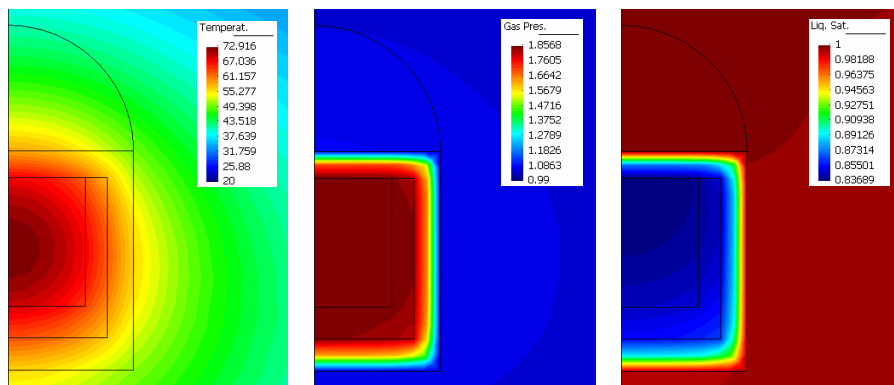


図-6 150 年後の温度 (左), ガス圧 (中), 飽和度 (右) の分布

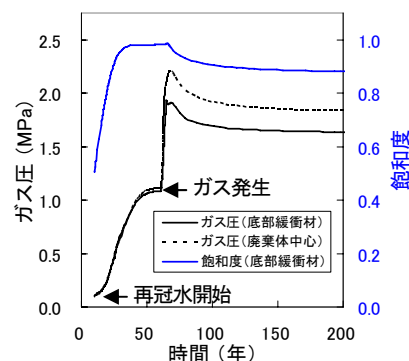


図-7 ガス圧および飽和度の時刻歴

参考文献

- 1) UPC: Technical University of Catalonia : CODE_BRIGHT User's Guide.
- 2) Alonso, E.E., A.GENS and A.JOSA, A. (1990) : A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique* 40, No. 3, 405-430.
- 3) 核燃料サイクル開発機構 (2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ—, JNC TN1400 2005-015.
- 4) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構 (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013.