

水・ガス・応力連成解析によるベントナイト中のガス移行挙動に関する検討

(株)大林組 正会員 志村 友行, 佐藤 伸, 山本 修一
 (株)地圏環境テクノロジー 正会員 田原 康博, 多田 和広, 森 康二
 (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 正会員 朝野 英一, 林 秀郎

1. はじめに

放射性廃棄物処分施設におけるガス移行挙動に対する解析的な検討としては、試験結果の逆解析等から2相流パラメータを設定し、それを用いて施設に対するガス移行挙動の評価が行われている例がある¹⁾。また、ベントナイト中のガス移行挙動に関しては、2相流特性やガス移行特性の把握を目的とした室内試験が実施されてきており、データベースの整備も進められている²⁾。

本検討では、多孔質体の体積変化に依存する透気・透水特性を考慮可能な水・ガス・応力連成解析コード(CODE_BRIGHT³⁾)を用いて、ベントナイトの吸水飽和過程およびガス注入試験の再現解析を実施し、力学影響を考慮することによるガス移行挙動の再現性について考察を行った。なお、再現解析においては新たな物性取得試験や逆解析による物性の同定は行わず、既存のデータや既往の研究成果に基づいて物性パラメータの設定を試みた。

2. 対象とする要素試験

再現解析の対象とする試験は、(公財)原子力環境整備促進・資金管理センターにより平成20年度のTRU廃棄物処分を対象としたガス移行挙動評価⁴⁾で実施されたクニゲルV1に対する飽和およびガス注入試験(カラム試験)とする。試験体は図-1に示すようなステンレス製の体積ひずみ拘束型の装置で、膨潤圧やガス圧を計測するためにモールド下部にロードセルが設置されている。TRU廃棄物処分施設の緩衝材は通常、クニゲルV1、乾燥密度 $\rho_d=1.36\text{Mg/m}^3$ のベントナイトを想定しているが、カラム試験は予備的試験として試験時間の短縮のため供試体の乾燥密度を $\rho_d=1.0\text{Mg/m}^3$ としている。試験供試体の作成条件を表-1に示す。

3. 解析パラメータの設定

本検討では既往の研究成果を用いてどの程度、ガス移行挙動を再現できるのかに主眼を置き、力学パラメータについては山本ら⁵⁾の研究をもとに設定した。以下に2相流パラメータの設定について示す。

3.1 毛管圧曲線

毛管圧曲線は(1)、(2)式に示すVan Genuchtenモデルを用いるものとする。

$$P_c = P_0 \left(S_e^{-1/\lambda} - 1 \right)^{1-\lambda} \quad \dots (1)$$

$$S_e = (S_l - S_{lr}) / (S_{ls} - S_{lr}) \quad \dots (2)$$

ここに、 P_c は毛管圧、 P_0 は毛管排除圧、 S_e は有効間隙率飽和度、 λ は間隙径分布パラメータ、 S_l は間隙水飽和度、 S_{lr} は残留間隙水飽和度、 S_{ls} は完全間隙水飽和度を示す。ここで、 S_{lr} が0.0、 S_{ls} が1.0と仮定すると(1)式で未知数は P_0 となる。 λ は曲線の形状を定義し、 P_0 については数値の大小で毛管圧曲線が上下することからガス侵入時の毛管排除圧の定義を意味する。図-2は粘土質岩の試験から得られた毛管排除圧と絶対透過係数の関係を示しているが、公開されているベントナイトの試験値を重ねてプロットすると粘土質岩と同様の傾向を示すことがわかる。したがって、本検討では図中に破線で示されるDavies⁶⁾によって提案された式(3)がベントナイトに対しても適用できるものと考えた。

$$P_{ae} = 5.6 \cdot 10^{-7} \cdot k^{-0.346} \quad \dots (3)$$

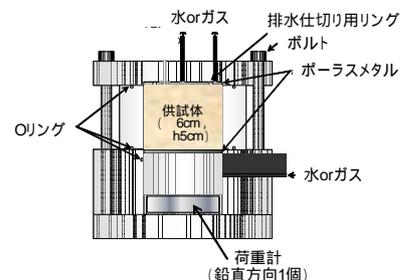


図-1 ベントナイトの飽和およびガス注入試験(カラム試験)概要

表-1 供試体作成条件

項目	仕様
材料	クニゲル V1
土粒子密度 (Mg/m ³)	2.700
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.000
締固め層数	5層締固め
初期飽和度 (%)	52.2
初期含水比 (%)	32.9
湿潤密度 (Mg/m ³)	1.329

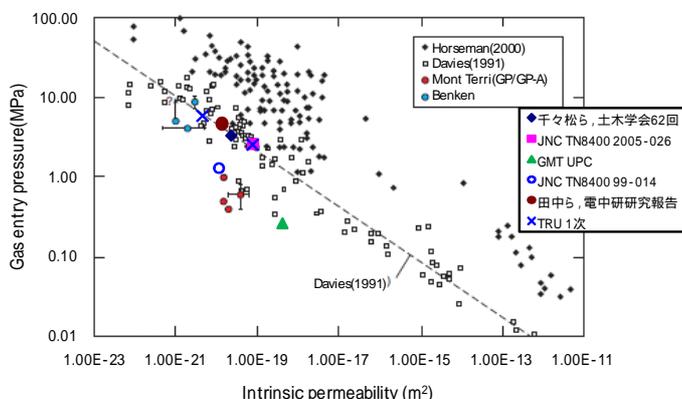


図-2 絶対透過係数と毛管排除圧の関係

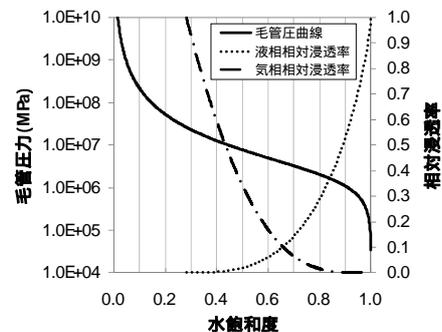


図-3 解析に用いた2相流特性

間隙径分布パラメータについては、竹内ら⁷⁾の試験結果等を参照し、乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg/m}^3$ 以下の場合として $\alpha = 0.333$ を設定した。解析で用いた毛管圧曲線を図-3(実線)に示す。

3.2 相対浸透率および絶対透過係数

相対透過係数の設定は、水相は式(4)に示す Van Genuchten モデルを、気相については式(5)、(6)に示す Borgessonら⁸⁾のモデルを用いた。

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2 \quad \dots (4)$$

$$k_{rg} = AS_{eg}^\lambda \quad \dots (5), \quad S_{eg} = 1 - S_e \quad \dots (6)$$

ここに、 k_{rw} は液相の相対透過係数、 k_{rg} は気相の相対透過係数、 A, λ はモデルパラメータ、 S_{eg} は有効間隙率ガス飽和度を示す。本検討では、図-3中の破線および一点鎖線で示すような田中ら¹⁾による乾燥密度 $\rho_d = 1.4 \text{Mg/m}^3$ での曲線を用いるものとした。絶対透過係数は緩衝材基本特性データベース⁹⁾内の乾燥密度 $\rho_d = 1.0 \text{Mg/m}^3$ の透水係数から算出した(絶対透過係数 $k = 1.00 \times 10^{-19} \text{m}^2$)。

4. 解析結果

前述の解析パラメータを用いて、カラム供試体(60mm x h50mm)を軸対象モデルでモデル化して吸水飽和試験とその後のガス注入試験の再現解析を実施した。境界条件はカラム試験を忠実に再現した。解析結果の一例として、図-4に吸水過程におけるベントナイト下部からの累積注水量、図-5にガス注入試験におけるベントナイト上部からの累積排水・排気量を、それぞれ力学連成を考慮しない場合の結果(点線)と比較して示す。図-4, 5より力学連成を考慮することにより、試験の再現性が向上していることがわかる。吸水飽和過程の累積注水量(図-4)は実験と解析解が非常によく一致している。一方、ガス注入試験における累積排水・排気量(図-5)については段階的昇圧の傾向は捉えられているものの解析解は実験結果と比較して排水・排気量が小さくなる結果となった。これは、解析では吸水時と排水時(ガス注入時)で同一の2相流特性を設定しているが、実現象は飽和過程の膨潤による間隙構造の変化やガス圧の上昇による体積膨張に起因する空隙の拡幅により、排水時の毛管曲線等が変化したことが原因であると考えられる(CODE_BRIGHTでは、毛管圧曲線の体積変化依存性を考慮可能であるが、データがないため本検討では考慮していない)。図-6は、ガス移行時における体積変化の再現性を確認するため、試験終了時の間隙率分布について実験結果と解析値を比較した結果である。図より解析結果は概ね供試体の間隙率分布を再現できていることが分かる。

5. まとめ

水-ガス-応力連成解析コードである CODE_BRIGHT を用いて既存のデータのみから2相流パラメータを推定してカラム試験の再現解析を試みた。解析の結果、今回の2相流パラメータの推定方法により、吸水飽和過程に関しては試験結果に対して十分な再現性が得られ、また、ガス注入試験後のベントナイトの体積変化についても試験結果を概ね再現できた。しかし、ガス注入試験における排出過程の排水・排気量については、排水時の2相流特性の変化に起因して、再現性が低くなる結果となった。今後は2相流特性の力学依存性に関する室内試験等の実施、解析への反映が試験の再現性の更なる向上(ガス移行挙動評価の信頼性向上)に向けた課題であると考えられる。

本報告は経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等 人工バリア長期性能評価技術開発」の成果の一部である。

参考文献

1) 例えば、田中ら:放射性廃棄物処分施設へのガス移行解析コードの適用性に関する研究 気液2相流解析コードの選定と適用 - 研究報告: N09003, 電力中央研究所報告, 平成21年12月, 2) 棚井:緩衝材中ガス移行試験データベース, JAEA-Data/Code, 2009, 3) UPC (Technical University of Catalonia): CODE BRIGHT User's Guide., 4) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: TRU廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発報告書 - ガス移行挙動の評価 -, 平成21年3月, 5) 山本ら:飽和・不飽和ベントナイトの圧密特性とそのモデル化, 土木学会第64回年次学術講演会, 6) Davies, P. B.: Evaluation of the role of threshold pressure in controlling flow of waste-generated gas into bedded salt at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Sandia Rep. SAND90-3246, 1991., 7) 竹内ら:圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態, 地盤工学会論文報告集Vol.35, No.3, pp.129-137, 1995.9, 8) Borgesson et al.: Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite-based buffer material by laboratory tests and numerical back analyses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38, No.1, pp.95-104, 2001., 9) 独立行政法人 日本原子力研究開発機構: 緩衝材基本特性データベース, <http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/index.jsp>

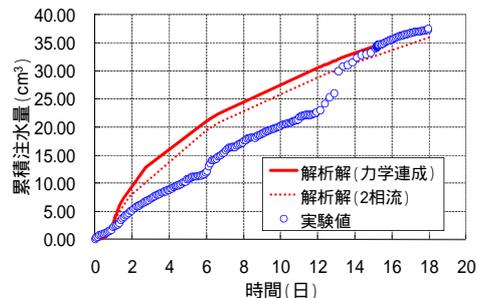


図-4 累積注水量の実験結果と解析結果の比較

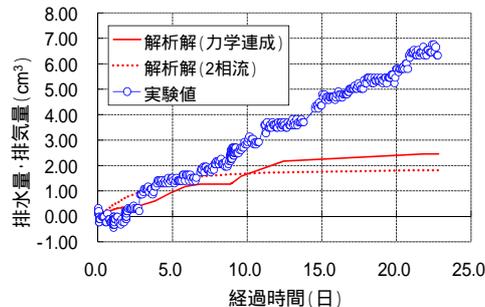


図-5 累積排水・排気量の実験結果と解析結果の比較

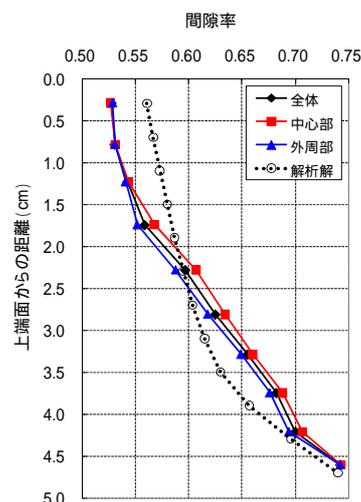


図-6 間隙率分布の実験結果と解析結果の比較