

圧縮ベントナイト（大型供試体）のガス移行時における力学影響検討

(公財) 原環センター 正会員 ○古賀 和正, 大和田 仁
株式会社大林組 正会員 佐藤 伸, 山本 修一, 並木 和人

1. はじめに

放射性廃棄物処分場の長期状態評価のうち、廃棄体容器の還元腐食等によって発生するガスの影響評価が行われており、低透過性材料であるベントナイトを対象にした検討が多く実施されている¹⁾。ベントナイト中のガス移行挙動については応力や変形が強く関連しているものと考えられ、単純化した要素試験を対象にすれば応力連成挙動を把握しやすい。そこで、本検討では力学連成二相流解析を用いて要素試験の再現解析を実施し、ベントナイト中のガス移行挙動に対する力学影響検討を行った。

2. 対象とした試験の概要

再現解析の対象としたガス移行試験は高さ $h=200\text{mm}$ 、直径 $\phi=60\text{mm}$ の供試体（ベントナイト；クニゲル V1）で、乾燥密度 1.36Mg/m^3 に圧縮成型したものである。圧縮成型後の試験体の初期飽和度は 90% で、供試体底面から注水し、飽和の確認後、底面から窒素ガスを圧力注入した。注水過程は全体で 953 日間行った。注水過程終了後、ガス注入経路に切り替えるため、注水圧を一旦大気圧まで解放後、ガス注入過程に移行した。ガス移行過程は 2 日毎に 0.1MPa のステップで昇圧を行って 97 日まで継続し、ガス注入圧が 5.0MPa にて破過が生じない状態で終了した。

3. ガス移行過程試験の解釈

注水とガス注入の操作は下面に設置された注水コックの開閉及びガス注入経路の開閉によるため、ガス注入開始時点では、試験体下面に設定されたポーラスメタルは水で飽和している。よってベントナイト中へのガス侵入はポーラスメタルの間隙体積相当 ($V=3.57\text{cm}^3$) の水が注入された時点と仮定できる。よって、図-1

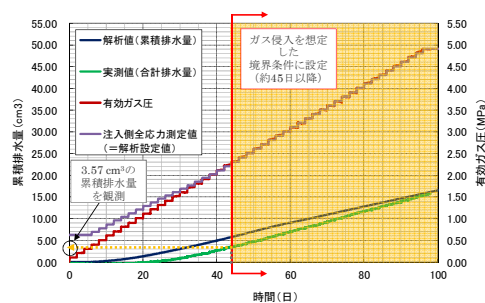


図-1 ガス移行試験結果

にガス移行試験の圧力及び累積排水量の経時変化を示すが、ガス注入開始から 45 日目で累積排水量が 3.57cm^3 となっていること、またガス圧と全応力とがほぼ等しくなっている（供試体中の間隙圧が上昇して有効応力がゼロとなり、ガスが侵入しやすい状態となっている）ことから、着色部がベントナイト中にガスが侵入した時刻と推察できる。

4. 解析モデル及び境界条件

解析モデル及び境界条件を図-2 に示す。ここで、解析モデルは供試体を $2\text{mm} \times 4\text{mm}$ 程度に要素分割した軸対象要素でモデル化した。ガス移行時の変形を表現するため、ガス注入時の底面の境界条件は全応力固定とし、ガス圧による供試体の変形を考慮した。

ただし、注水過程は変位固定としている。その他の境界条件は図-2 のとおりである。

解析は注水過程から模擬し、ガス移行時初期の間隙率分布を表現した。ガス注入はガス移行試験開始後 45 日からとし、それまでは飽和条件（水圧＝ガス圧）で加圧した。

5. 材料物性

ベントナイトに適用した力学構成則は Barcelona Basic モデル²⁾ とした。モデルパラメータについては、山田ら³⁾ の文献をもとに、膨潤指数 ($\kappa=0.061$)、圧縮指数 ($\lambda=0.252$) 及び限界状態応力比 ($M=0.5$) とした。

二相流パラメータの水分特性曲線と相対浸透率については注水過程の累積注水量、ガス移行過程の累積排水量をキーワード 力学連成二相流解析、ガス移行、ベントナイト、圧密変形

連絡先 〒104-0052 東京都中央区月島1丁目15番7号 処分材料調査研究プロジェクト 03-3534-4543

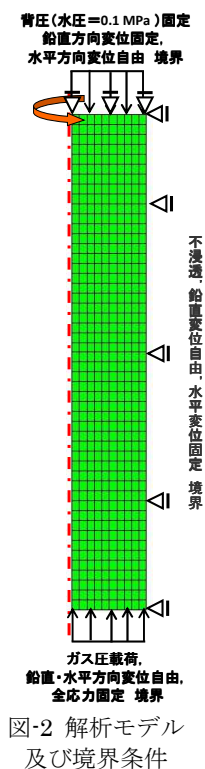


図-2 解析モデル及び境界条件

模擬できるパラメータを再現解析より図-3に示すとおりに同定した。また、絶対浸透率については、注水過程が $K=5.43E-20m^2$ 、ガス移行過程が $K=1.91E-20m^2$ と同定された。

6. 検討結果

図-4に底面鉛直方向の変位と、体積変化量から算定される累積排水量の経時変化を示す。ガス注入開始後45日目にガスが侵入したと仮定しているため、45日まではポーラスメタルからの注水と供試体の圧密による排水挙動となる。圧密により排水される水量は、供試体のガス侵入(45日後)までに約 $0.8cm^3$ 、ガス注入終了までに $7cm^3$ (図-1に示す総排水量 $16cm^3$ の約44%程度)となる。

次にガス移行終了時の飽和度分布を解析結果と解体調査結果と比較した。図-5に解析結果、図-6に解体調査結果の飽和度(平均値)分布を示す。図-6のガス注入面から飽和度が低下している範囲があり、ガス侵入フロントの形成に起因する可能性がある一方で、解析では注入面の飽和度の低下は少なく、ガスが殆ど侵入していない結果となっている。なお、解析は、試験結果と水収支は整合しているが、供試体からの排水挙動としては二相流的移行よりむしろガス注入による底面からの圧密による排水が支配的な結果となった。

図-7に平均有効応力分布を示す。排水側(上部)は注入側からの圧力によって圧密排水され有効応力が上昇していることがわかる。図-8に供試体排出側における $p \sim q$ 面上(p :平均有効応力, q :軸差応力)の Stress Path (応力経路)を示す。図より Stress Path は CSL (Critical State Line: 限界状態線) を下回っていることから、本検討で対象とした破過が生じなかった供試体の力学的な状態としては、圧密が進展して有効応力が増加するのみであり、供試体のせん断破壊等は生じていないことがわかる。

7. おわりに

力学連成二相流解析にてガス移行過程の再現解析を実施した結果、ガス移行過程での試験と解析結果の水収支は整合したが、解析では注入面の飽和度の低下は少なく、ガスが殆ど侵入しない結果となった。したがって、実処分施設においても境界条件によってはベントナイト中へのガス侵入が殆ど生じない可能性があるものの、今後の課題として、ガス侵入挙動を解析で再現するために、ベントナイトの力学パラメータも文献値のみならず適切に取得・同定する必要があると思われる。

なお、本報告は経済産業省から公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが受託した「平成25年度TRU処理・処分技術高度化開発：ガス移行連成挙動評価手法の開発」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成19～24年度地層処分技術調査等事業 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(第2分冊)ーガス移行挙動の評価ー(2008～2013),
- 2) Alonso, E. et al.: A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique*, 40, No.3., 1990.,
- 3) 山田ら：ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験(その4) 静的力学特性に関する検討, 土木学会第64回年次学術講演会

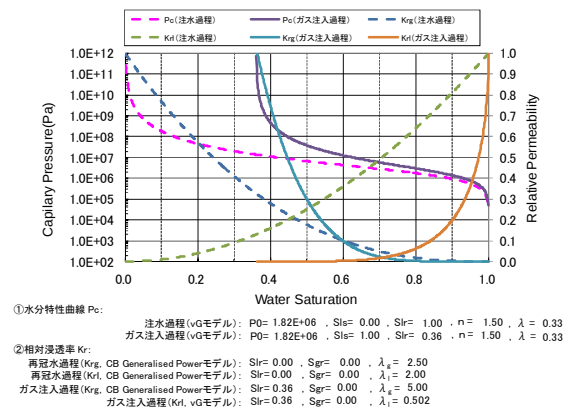


図-3 二相流パラメータ

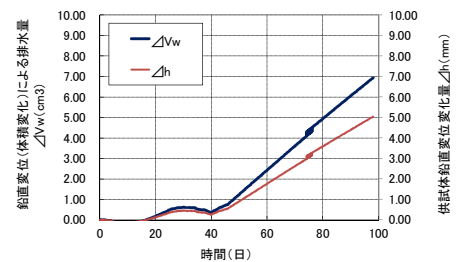


図-4 鉛直方向変位と圧密排水量の経時変化

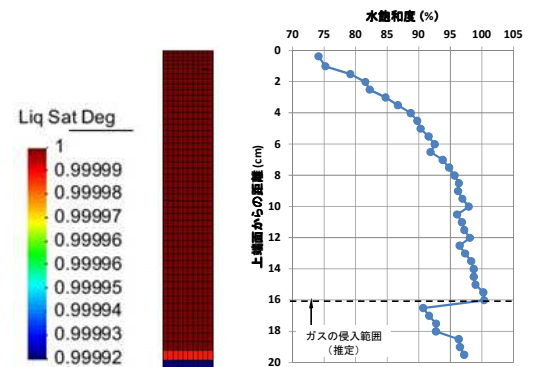


図-5 試験終了後の飽和度分布

図-6 解体調査結果(飽和度分布)

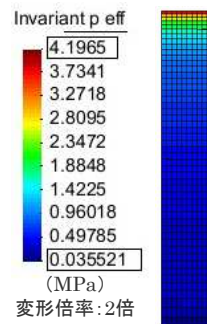


図-7 平均有効応力分布(変形倍率:2倍)

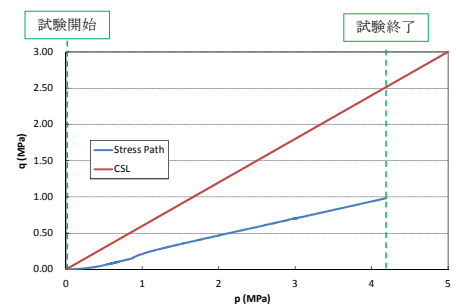


図-8 鉛直方向変位と圧密排水量の経時変化