圧縮ベントナイトのガス移行時における力学影響検討

株式会社大林組 正会員 〇志村 友行,佐藤 伸,山本 修一 (公財)原環センター 正会員 並木 和人 大和田 仁

1. はじめに

放射性廃棄物処分場の長期状態評価のうち,廃棄体が還元腐食す ること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. 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 を用いてカラム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.



ガス圧載荷及び全応力固定

注水過程の底面は 鉛直固定,水平自由

図-2 解析モデル及び境界条件

2. 対象とした試験

対象とした試験は高さh=25mm,直径 φ=60mmの供試体で,乾燥密度1.36Mg/m³ 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,供試体下 面から注水し,飽和の確認後,下面から窒素ガスを圧力注入した.注水過程は全体 で57日間行い,その内,26日目まで0.1MPaで注水を行い,その後,0.2MPaに注 水圧をあげた.ガス移行過程は2日で0.1MPaのステップで昇圧を行い,ガス注入 開始から28日目の1.5MPaに昇圧した時点で破過が生じた.

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=3.57cm³)の水が注入された時点、あるいは飽和供試体であるこ とから上面から排水された時刻と仮定できる.よって、図-1 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20日目で累積排水量が3.57mlとなるため着色部がベント ナイト中をガス移行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

___ Krg(注水過程) Krw(注ガス過程) -Krg(注ガス過程) 1.0E+07 1.0 1.0E+06 0.9 Relative Permiability 1.0E+05 Pressure(MPa 1.0E+04 1.0E+03 1.0E+02 1.0F+01 Capilary 1.0E+00 1.0E-01 1.0E-02 0.1 1.0E-03 0.0 0.0 0.2 1.0 0.8 0.4 0.6 Water Saturation ①毛細管圧力:vGモデル,P0=1.0MPa,λ=0.34,Slr=0.0, Sls=1.0 ②相対浸透率: 再冠水過程(水相):vGモデル,λ=0.92, SIr=0.0, SIs=1.0 #7週7週程(5和):Grantモデル(krg=1-krw) ガス移行過程(2和):Grantモデル(krg=1-krw) ガス移行過程(2和):Grantモデル(krg=1-krw) ガス移行過程(2和):Grantモデル(krg=1-krw) 図-3 二相流パラメータ

毛細管圧力

供試体を 2mm×2mm 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 20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. 材料物性値

ベントナイトに適用した材料構成則は Barcelona Basic モデル¹⁾ とした.モデルパラメータについては、山田ら²⁾ の文献をもとに、膨潤指数(κ =0.176)、圧縮指数(λ =0.252)及び限界状態応力比(M=0.5)とした.

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 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 ㈱大林組原子力環境技術部 TEL03-5769-1309

ただし、膨潤指数については乾燥密度 $1.2 Mg/m^3$ の値と乾燥密 度 $1.6 Mg/m^3$ の値から線形補間した. 不飽和パラメータについ ては山本ら ³⁾の検討を参照し、小峯の膨潤評価式 ⁴⁾と等価にな るように設定した. 先行圧密降伏応力については膨潤圧 $(P_{sw}=0.44 MPa)$ の2倍と仮定し $P_0^*=0.8 MPa$ とした.

二相流パラメータの毛細管圧力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, 絶対透過係数については,注水過程が K=6.0E-20m²,ガス移行 過程が K=2.2E-20m²と同定された.

6. 検討結果

図-4 に底面鉛直方向の変位,注水側全応力及び載荷ガス圧の経時変化 を示す.ガス注入開始後 20 日目にガスが侵入したと仮定しているため, 20 日までは圧密により排水され,以降は圧密とガス侵入により排水され る. 圧密により排水される水量は,ガス侵入 (20 日後)までに 0.440cm³, 破過までに 1.707cm³(総排水量の 28%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で比較した. 図-5 に解析結果,図-6 に解体調査結果の飽和度分布を示す.解体調査結果は 破過後の試験体であるため,排気側の乾燥が進んでいるが,概ね解析結果と 一致する.一方,解析は試験から得られた注排水量を模擬する二相流パラメ ータを同定しており水収支は整合している.よって,二相流的に移行した区 間は供試体底部から数 mm 程度と予測でき,その後ガス圧増加に伴い微視的 な流路拡幅もしくは引張破壊が生じて破過に至ったと理解できる.

図-7 に平均有効応力分布を示す.供試体はガス圧によって圧密されるもの

の,底面付近はガス侵入によって間隙圧が上昇 し有効応力の低下と間隙の増大が起こる.注入 側の有効応力が低下し,ゼロになると微視的な 流路拡幅もしくは引張破壊が生じ破過に至る. 排水側(上部)は注入側からの圧力によって圧密 排水され,間隙が狭まり有効応力が上昇する.



2.5

7. おわりに

力学連成二相流解析を用いてガス移行試験時

の供試体内部の変形状態及び応力状態の推定を行った.検討の結果,ガス移行過程での圧密による排水量は全体の 3 割弱で,変形を考慮した水収支からパラメータを同定する必要があることが示唆された.また,対象とした供試 体は,二相流として移行した部分は底面の一部であり,その後はガス圧の増加に伴い,底面付近の有効応力が低下 し,有効応力がゼロになった箇所で微視的な流路拡幅か引張破壊が生じ破過に至ったものと推察できた.今後は不 均質性を考慮したガス移行解析を実施し,ガス移行経路の推定等を行っていく予定である.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24年度TRU廃棄物処分技術:人工バリア長期 性能評価技術開発 ・ガス移行挙動の評価・」の成果の一部である.

参考文献 1) Alonso, E. et al.: A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3., 1990., 2) 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,3)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,4) Komine, H., et al.: New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, No. 2, pp.460-475, 2003.





図-6 解体調査結果(飽和度分布)