

TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発 (その3)

ー力学連成二相流解析によるガス移行試験の予察的検討ー

(株) 大林組 正会員 ○鳥巢 セダ, 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, 佐伯 亜由美
 (公財) 原環センター 正会員 古賀 和正, 大和田 仁

1. はじめに

前報 (その2) で報告した試験は, これまでに実施してきたような圧縮飽和ベントナイト (クニゲル V1) 供試体内でのガス圧増大によって生じる流路拡幅 (破壊) を伴うガス移行挙動の現象理解を目的とした試験¹⁾とは異なり, 供試体中のガスが主に気液二相流のみによって移行することを想定した低注入圧条件 (ただし, ベントナイト供試体の平衡膨潤圧以下) によるガス透気を試みるもので, 国内外の既往の検討においても例の少ない人工バリア中の破過を伴わないガス移行挙動の現象理解を目的とするものである. 本検討では, 低圧ガス注入試験に対して力学連成二相流解析による予察解析を実施し, 当該現象のモデル化の妥当性について検討を行った. なお, 本検討で用いた解析コードはカタルーニャ工科大学で開発された CODE_BRIGHT²⁾ (力学連成二相流解析コード) である.

2. 試験概要

対象とした試験は高さ $h=25\text{mm}$, 直径 $\phi=60\text{mm}$ の供試体で, クニゲル V1 を乾燥密度 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 100 日間行い, その内, 4 日目まで 0.1MPa で注水を行い, その後, 0.2MPa に注水圧を上げ, ガス移行過程開始前に 0.1MPa に低下させた. 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 4 日目の 0.4MPa に昇圧した時点で一定に保った.

3. 解析モデル概要

解析モデル及び境界条件を図-1 に示す. ここで, 解析モデルは供試体を $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 程度に要素分割した軸対象要素でモデル化した. 本解析は力学連成二相流解析を実施することから, 力学境界条件と流体に関する境界条件を設定する必要がある. 力学に関する境界条件は, 法線方向固定, 接線方向自由とした. 流体に関する境界条件として, モデル上面と下面に水压とガス圧を規定する必要がある. 水及びガスの供給面である底面は試験状況に応じた水压あるいはガス圧を規定する圧力境界とした. この時, 注水時における水压 P_l とガス圧 P_g は同値とした. ガス移行時については, ポーラスメタルの水が排水されてからはガス圧 P_g のみ規定した. 上面の境界条件については大気圧固定とし, 液相については排出境界とした. 側面は不透境界とした. 予察解析の手順としては, まず始めに, 注水過程の再現解析を実施した. 注水過程の再現解析を実施した目的は, 膨潤圧に関するモデルパラメータ, 毛細管圧力に関するパラメータを同定することと, ガス移行時における初期の状態を構築するためであった. その後, ガス注入過程の予察解析を実施した. この時, 注入側のポーラスメタル (供試体下部に設置されており, 全間隙は水で満たされた状態) 内の

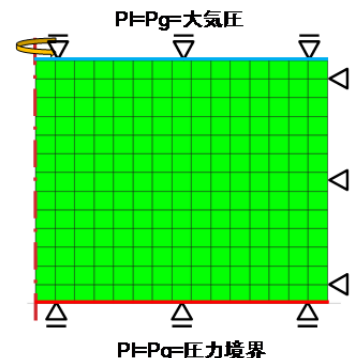


図-1 要素モデルおよび境界条件

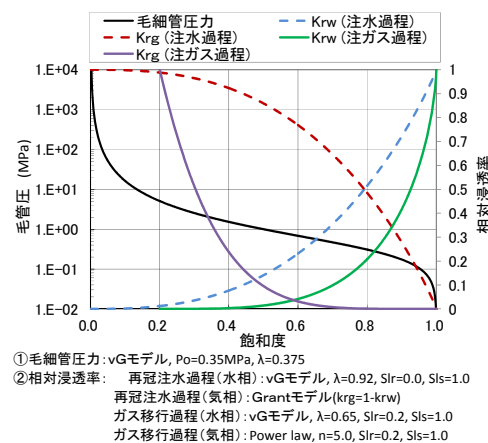


図-2 解析に用いた2相流曲線

表-1 要素モデル力学パラメータ

		設定値
乾燥密度	ρ_d	1.36
間隙比	e_o	0.985
膨潤指数	κ_o	0.176
圧縮指数	λ_o	0.252
モデル パラメータ	κ_s	0.5722
	α	0.000
	α_{sp}	-0.678
限界状態応力比	M	0.500
先行圧密降伏応力	P_o^*	0.67
膨潤圧	P_{sw}	0.44

した. 注水過程の再現解析を実施した目的は, 膨潤圧に関するモデルパラメータ, 毛細管圧力に関するパラメータを同定することと, ガス移行時における初期の状態を構築するためであった. その後, ガス注入過程の予察解析を実施した. この時, 注入側のポーラスメタル (供試体下部に設置されており, 全間隙は水で満たされた状態) 内の

キーワード 力学連成二相流解析, ガス移行, ベントナイト, Code_Bright

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組原子力環境技術部 TEL:03-5769-1309

水(3.57ml)がすべて排水されてからガスが供試体へ注入されるものと仮定した。

4. 料物性値

ベントナイトに適用した材料構成則は BB モデル (Barcelona Basic モデル³⁾、膨潤性粘土を含む不飽和土の弾塑性構成モデル)とした。モデルパラメータについては、山田ら⁴⁾の文献をもとに、膨潤指数 ($\kappa=0.176$)、圧縮指数 ($\lambda=0.252$) 及び限界状態応力比 ($M=0.5$) とした(表-1)。膨潤に係る κ_{so} 、 α_{sp} については、注水過程の試験データから膨潤圧 $P_{sw}=0.44\text{MPa}$ と推定したうえで、山本、小峯⁵⁾の方法に倣い、小峯の膨潤評価式⁶⁾から評価される膨潤ひずみを BB モデルでフィッティングすることにより同定した。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-2 に示すとおりに同定した。また、絶対透過係数については、 $k=6.0\text{E-}20\text{m}$ と同定された。

5. 予察解析結果

対象とした試験のうち、ガス注入開始から 144 日目で解体を行った供試体に対して、試験結果と解析結果を比較し、力学パラメータの影響及び解析結果を評価することで、現象のモデル化の妥当性について検証する。初めに試験体上面から得られた累積排水量の比較を図-3 に示す。解析と供試体はガス注入が開始される時刻は異なるものの、ガスが注入され始めてから 90 日付近までの累積排水量の勾配はほぼ一致する結果となった。よって、力学を考慮した供試体のマクロとしての透水特性は再現できている。

続いて、応力変化について比較を行う。図-4 に底面の有効応力の経時変化の比較を示す。ここで、試験における底面の有効応力については試験結果も解析結果も土圧から有効ガス圧を引いた値を示した。最初の 22 日間は試験と解析結果はほぼ一致し、その後少し離れながらも概ね同様な傾向を示した。ただし、定量的な再現性は得られなかった。

最後に、ガス注入開始から 144 日目に解体した供試体の乾燥密度分布と同時刻における解析から算出された乾燥密度を比較し図-5 に示す。ここで、解析結果は試験結果に対して定性的な再現性を示している。以上の検証から、供試体の体積変化について力学連成二相流解析で再現可能であることや、モデル化の妥当性が確認できた。

6. 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二相流挙動、力学挙動および供試体内部の体積変化の再現性を確認した。検討の結果、累積排水量及び乾燥密度については概ね試験結果を再現できた。底面の応力については傾向としては試験結果を再現できているが、定量的な再現性は得られていない。よって、力学に関する再現性を向上させるため、対象材料の力学パラメータの取得が必要である。なお、本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託で行った平成 26 年度「地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 並木ら：飽和ベントナイトのガス移行試験と寸法効果の検討，土木学会第 66 回年次学術講演会(2011)。
- 2) UPC, Technical University of Catalonia : CODE_BRIGHT User's Guide.
- 3) Alonso, E. et al. : A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3(1990).
- 4) 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(2009)。
- 5) 山本修一，小峯秀雄：THM 連成解析におけるベントナイトの膨潤特性の構成モデルに関する一考察，土木学会第 63 回年次学術講演会(2008)。
- 6) Komine, H. et al. : New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, No. 2, pp.460-475(2003)。

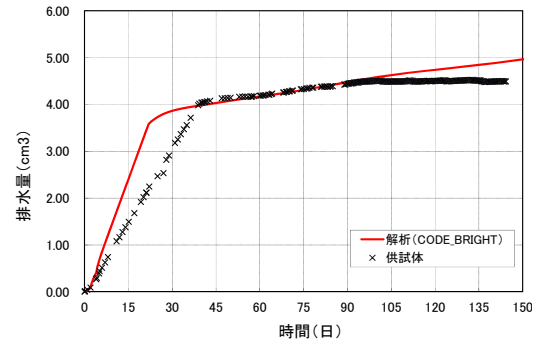


図-3 累積排水量の経時変化比較

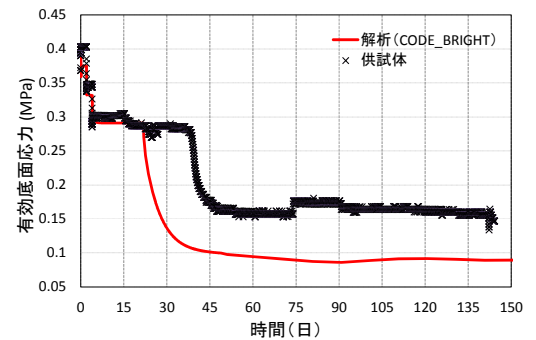


図-4 底面の有効応力の経時変化比較

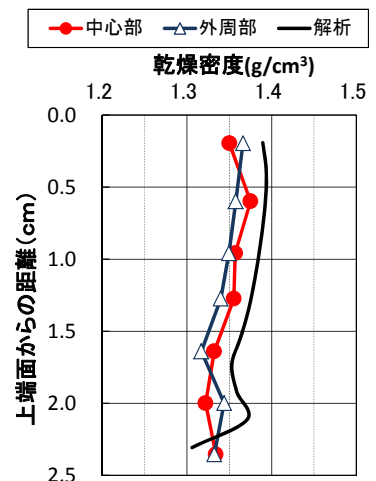


図-5 解体調査結果と解析結果の比較 (ガス注入開始から 144 日目)