

## 圧縮ベントナイトの再冠水・ガス移行挙動に及ぼす力学影響に関する検討

(公・財) 原子力環境整備促進・資金管理センター 朝野 英一, 並木 和人  
 (株) 大林組 正会員 ○佐藤 伸, 志村 友行, 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

### 1. はじめに

TRU 廃棄物処分施設における人工バリアの構成としては、処分坑道内に定置した廃棄体の周りを低透水性の緩衝材(ベントナイト系材料)で覆う概念が考えられている。坑道が埋め戻された後、人工バリアは外部から侵入する地下水によって飽和が進展する一方で、内部から発生するガスによって地下水が押し戻される現象が生じ、緩衝材の含水量は変化するものと考えられる。水あるいはガスが緩衝材中を移行する場合、緩衝材に侵入する部分の間隙を押し広げることによりベントナイトの骨格が変化する。このような骨格の変化は透気・透水特性等の2相流特性に影響を及ぼすことが考えられる。本検討では、上述の観点から圧縮ベントナイトの吸水飽和およびガス注入試験に対して力学連成2相流解析コード CODE\_BRIGHT<sup>1)</sup>を用いた再現解析を行い、ベントナイトの変形が透水あるいは透気性に及ぼす影響について考察を行った。

### 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21年度にTRU 廃棄物処分を対象としたガス移行挙動評価<sup>2)</sup>で実施されたベントナイト(クニゲルV1) 供試体に対する飽和試験及び引き続き行ったガス注入試験(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。供試体の作成条件は表-1に示すとおりで、TRU 廃棄物処分の緩衝材で想定されている乾燥密度( $\rho_d=1.36\text{Mg/m}^3$ )とした。

### 3. 解析条件

解析モデルは図-2に示すとおりで、供試体の半分をモデル化した軸対象モデルを用いた。要素分割は $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ の正方形に分割した。実験ではガス注入時に、下面からポーラスメタル内に残る水を除去せずにガスを注入することから、ポーラスメタルの間隙体積が同等となるようにモデル化した。ベントナイトに適用する構成モデルはBarcelona Basicモデルを適用し、パラメータについては膨潤指数( $\kappa=0.061$ )、圧縮指数( $\lambda=0.252$ )及び限界状態応力比( $M=0.5$ )は山田ら<sup>3)</sup>の検討を基に設定し、その他は山本ら<sup>4)</sup>の方法によって設定した。圧密降伏応力は $P_0^*=1.5\text{MPa}$ と仮定した。

#### 3.1 2相流パラメータの設定

毛管圧曲線はvan Genuchtenモデル(以降vGモデル)を用いた。ここで、用いたモデルパラメータはガス侵入圧 $P_0=1.0\text{MPa}$ 、間隙率分布パラメータ $\lambda=0.5$ 、残留水飽和度 $S_{lr}=0.0$ 及び最大水飽和度 $S_{ls}=1.0$ と仮定した。相対浸透率は液相が飽和過程とガス移行過程で同一の曲線を用い、気相については飽和時とガス移行時で異なる設定とした。これは、飽和時は水とガスの相互干渉が弱いものと仮定し、反対にガス移行時は水とガスの相互干渉が強い機構を想定したことによる。用いた構成式は水相にはvGモデルを、液相に飽和時がGrantモデルを、ガス移行時にはPowerモデルを用いた。この時、相対浸透率の残留水飽和度及び最大水飽和度は毛管圧曲線と同様に $S_{lr}=0.0$ 、 $S_{ls}=1.0$ とした。液相の相対浸透率のモデルパラメータである間隙率分布パラメータは $\lambda=0.4$ とし、ガス移行時の気相の相対浸透率の累乗は $\lambda=2.5$ とした。なお、飽和時の気相の相対浸透率はGrantモデルであることから、液相の相対浸透率を裏返した形である $k_{rg}=1-k_{r1}$ となる。解析に用いた2相流特性を図-3に示す。

#### 3.2 間隙率変化に依存する透過特性

CODE\_BRIGHTにおける透気・透水透性特性は水圧・ガス圧等が载荷されると変形が生じ間隙率変化に伴い透過特性が変更される。間隙率依存の透過性を表す構成式は幾つか提案されているが、本検討ではパラメータの設定によって間隙率依存の

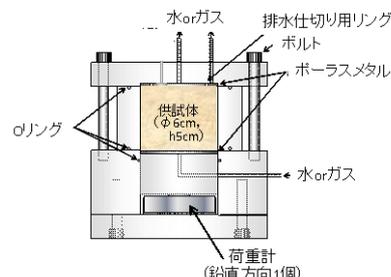


図-1 ベントナイトの飽和およびガス注入試験(カラム試験)概要

表-1 供試体作成条件

項目	仕様	
供試体寸法	$\phi 60\text{mm}\times h50\text{mm}$	
締り層数	5層締り(1cm/層)	
締り方法	静的圧縮(1mm/min)	
初期状態	湿潤密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	1.807
	飽和度 $S_r$ (%)	90.0
	含水比 $w_o$ (%)	32.9
	乾燥密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )	1.360

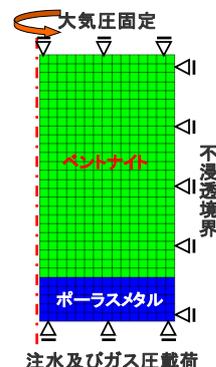


図-2 解析モデル

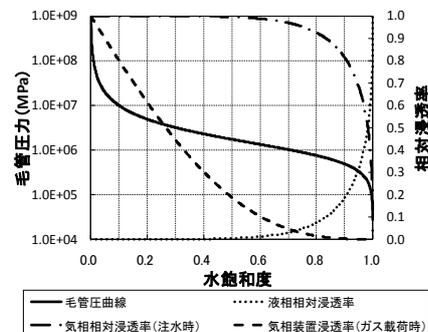


図-3 解析に用いた2相流特性

キーワード TRU 廃棄物処分, ガス移行評価, 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 TEL03-5769-1309

透過性変化に自由度がある (1) 式に示す Davis ら<sup>5)</sup> の式を用いた。

$$k = k_0 \exp \left[ c \times \left( \frac{\phi}{\phi_0} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

ここで、k は絶対透過係数、k<sub>0</sub> は絶対透過係数の初期値、c はモデルパラメータ、φ は間隙率及び φ<sub>0</sub> は間隙率の初期値を示す。対象とするクニゲル V1 に適応する c を設定するため、TRU2 次レポート<sup>6)</sup> のクニゲル V1 における透水係数と乾燥密度の関係式に対してフィッティングを試みた。ベントナイトの土粒子密度を 2.7Mg/m<sup>3</sup> と仮定して間隙率から乾燥密度を算出し、乾燥密度 1.3Mg/m<sup>3</sup>~1.6Mg/m<sup>3</sup> 付近で絶対透過係数が良く一致するようにパラメータを設定すると c=7.5 となる。検討結果を図-4 に示す。なお、比較として Kozeny モデルによる変化もあわせて示す。

4. 検討結果

本検討では、変形依存の透気・透水特性変化を検証するために、力学連成 2 相流解析の比較対象として CODE\_BRIGHT による 2 相流解析も実施した。水注入時の累積注水量の比較を図-5 に、ガス注入時の累積排水量を図-6 に示す。ここで、累積注水量はベントナイト底面、累積排水量はベントナイト上面の値を示している。注水時における供試体が飽和するのに必要な累積注水量は 6.98cm<sup>3</sup> でありそれに至るまで 30 日必要となる。注水時の飽和までの解析結果は、力学連成は実測値を良好に再現しているが、2 相流解析は実測値よりも飽和に至るまで時間がかかる結果となった。これは、注水側から水が注入されると間隙が押し広げられることにより透過性が上昇することに起因するものと考えられる。飽和後 (30 日以降) は力学連成解析と 2 相流解析はほぼ一致する。飽和までの過程では若干の力学連成効果が表れているが、注水過程全般に顕著な相違は見られなかった。ガス注入時も力学連成解析と 2 相流解析に顕著な相違は見られず、両者とも概ね実験値を再現できたが、力学連成解析の方が排出量は若干多くなる。これも、注水時と同様に注入側の間隙が増大することによる影響と考えられる。力学連成解析の結果で 20 日以降に若干累積排水量の勾配が低下する。

これは上部のベントナイトが圧密降伏応力を超えたことにより変形が進み、それによって間隙が小さくなり透過性が低下したことによるものと考えられる。図-7 にガス圧最大時の乾燥密度分布と変形図を示す。ここで、注入側の底面部はガスが注入されることにより間隙が広がり乾燥密度が 1.36 Mg/m<sup>3</sup> から 1.17Mg/m<sup>3</sup> まで低下し、上面では圧縮されることから 1.44 Mg/m<sup>3</sup> まで増加しているのが分かる。対象とした実験は体積拘束型の試験であることから、累積注水・排水量に対しては顕著な相違は見られなかったものの、水あるいはガス等の流体が注入されることにより試験体の間隙が変化し、異なる密度分布となることを力学連成解析では表現できることが分かった。

5. おわりに

圧縮ベントナイトの飽和時及びガス移行時の力学連成効果について、力学連成 2 相流解析を用いて累積注水・排水量に着目して再現解析を行った。検討の結果、累積注水・排水量については顕著な相違は生じなかった。これは、対象とした試験が体積拘束型の試験であることに起因するものと考えられる。よって、今後は応力拘束型の試験を対象とした検討を実施し、再冠水・ガス移行挙動に及ぼす力学影響について明らかにしていきたい。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「TRU 廃棄物処分技術：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) UPC (Technical University of Catalonia) : CODE\_BRIGHT User' s Guide., 2) 公益財団法人 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, 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, pp.237-238, 平成 21 年 9 月, 4) 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, 5) Davis JP et al : Stress - dependent permeability, Characterization and modeling. Society of Petroleum Engineers, SPE Paper no. 56813, 1999, 6) 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 廃棄物処分研究取りまとめ。

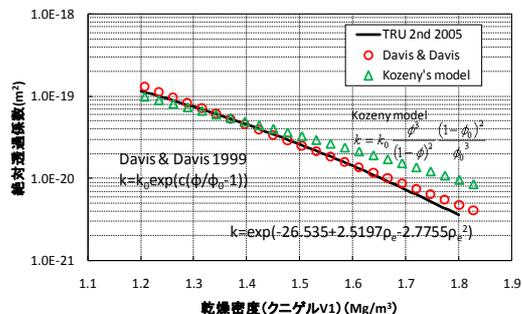


図-4 絶対透過係数と乾燥密度の関係

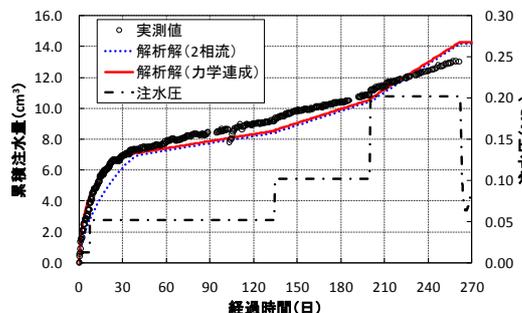


図-5 注水時の累積注水量の比較

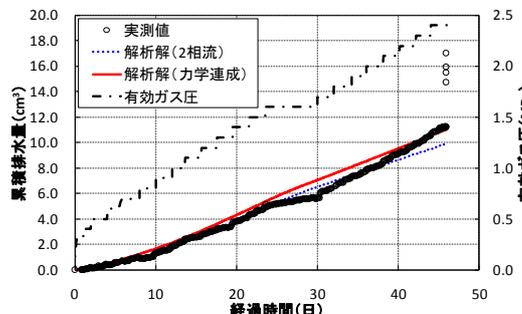


図-6 ガス注入時の累積排水量

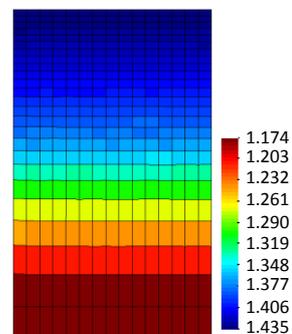


図-7 最大ガス圧時の乾燥密度分布と変形図 (変形倍率：10) (単位：Mg/m<sup>3</sup>)