

# 飽和・不飽和ベントナイトの水分浸透に伴う力学挙動に関するモデル化検討

(株)大林組 正会員 ○佐藤 伸, 森 拓雄, 山本 修一, 志村 友行

## 1. はじめに

放射性廃棄物処分施設の人工バリア材には、低透水性、膨潤による自己修復性及び核種収着遅延性等を期待できるベントナイトが最も有力な材料とされている。著者ら<sup>1)</sup>によって実施された乾燥密度の異なるベントナイトを並列配置した飽和膨潤試験では、初期の密度差は緩和されるものの密度は均一化せず、また、注水側の密度が相対的に低下する傾向が見られた。そこで、本検討では初期密度の変化や注水側の密度低下がどのように起こるのか解析的に考察を行った。

## 2. 水分浸透に伴う力学挙動モデル

本検討では熱・水・応力・ガス連成解析コード CODE\_BRIGHT<sup>2)</sup>を用いた。CODE\_BRIGHTはAlonso et al.<sup>3)</sup>の提案する力学構成則(BBモデル: Barcelona Basic Model)を考慮でき、欧米ではベントナイトの飽和・不飽和挙動あるいはガス移行による力学挙動検討に広く利用されている。BBモデルは、修正Cam-Clayモデルを不飽和粘性土に拡張した弾塑性構成モデルで、ベントナイトのような膨潤性粘土に対しても適用できるように拡張されている。詳細については参考文献を参照されたい。

## 3. 試験及びモデル化概要

モデル化の対象とした試験は、著者ら<sup>1)</sup>が行った乾燥密度の異なるベントナイトを並列に配置した飽和・膨潤試験である。試験装置の概略図を図-1に示す。注水は下面から行い、与えた注水圧は自然水頭から約1週間かけて200kPaまで段階的に上昇させ、その後一定圧を保持した。解析モデルは図-2に示すように供試体の半断面を軸対象モデルでモデル化し、要素分割は2mm×2mmとした。モデルパラメータのうち、2相流パラメータの1つである、毛管圧については、複数の乾燥密度のベントナイトに対して水分特性曲線を取得している竹内ら<sup>4)</sup>の文献をもとに設定した。相対浸透率については林ら<sup>5)</sup>の文献で乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ のクニゲルGXに対する曲線を用いた。ただし、乾燥密度 $\rho_d=1.2\text{Mg/m}^3$ の相対浸透率については既往の文献で設定されていないため乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ と同様とした。用いた2相流曲線を図-3に示す。表-1に力学パラメータを示すが、飽和時のパラメータ( $\kappa_\phi$ ,  $\lambda_\phi$ ,  $M$ )は山田ら<sup>6)</sup>の文献を基に設定した。不飽和パラメータのうち、膨潤に関するパラメータ $\kappa_{sp}$ ,  $\alpha_{sp}$ は山本ら<sup>7)</sup>の方法を参照し、小峯の膨潤評価式を基に設定した。ここで、小峯の膨潤評価式ではモンモリロナイト含有量を57%, 温度20℃として計算を行った。サクシオン依存の圧密特性については山本ら<sup>8)</sup>の方法を参照し、千々松ら<sup>9)</sup>の不飽和時の剛性と等価になるように $\alpha$ を設定した。なお、本検討では圧縮指数についてはサクシオン依存性を考慮していない。

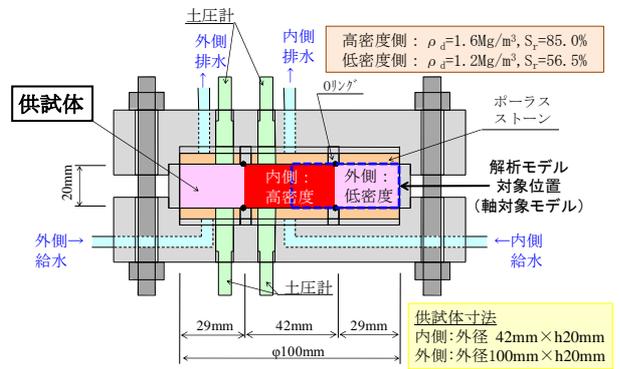


図-1 試験装置概略図

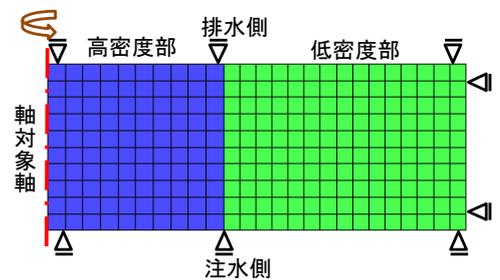
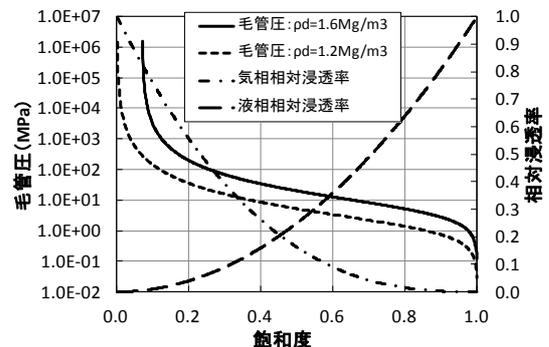


図-2 解析モデル及び境界条件



毛管圧:  $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3: v_G, P_0=5.14\text{MPa}, \lambda=1.54$   
 $\rho_d=1.2\text{Mg/m}^3: v_G, P_0=1.42\text{MPa}, \lambda=1.50$   
 相対浸透率: Power law, 液相 $n=2.0$ , 気相 $n=2.63$   
 絶対浸透率:  $1.3\text{E}-20\text{m}^2$  ( $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ ),  $1.1\text{E}-19\text{m}^2$  ( $\rho_d=1.2\text{Mg/m}^3$ )

図-3 解析に用いた2相流曲線

表-1 力学パラメータ

		高密度	低密度
乾燥密度	$\rho_d$	1.600	1.200
間隙比	$e_0$	0.656	1.208
膨潤指数	$\kappa_0$	0.087	0.265
圧縮指数	$\lambda_0$	0.117	0.391
モデルパラメータ	$\kappa_s$	0.256	0.165
	$\alpha$	-0.165	-0.180
	$\alpha_{sp}$	-0.430	-1.032
限界状態応力比	$M$	0.580	0.338
先行圧密降伏応力	$P_0^*$	2.044	0.528
膨潤圧	$P_{sw}$	1.022	0.264

キーワード 飽和・不飽和, ベントナイト, CODE\_BRIGHT, 連成解析, 膨潤特性, 圧密特性

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

### 4. 検討結果

図-4に土圧の実測値と解析結果との比較を示す。解析結果は実測値に対して0.1MPa程度、低密度側が低く高密度側が高くなっているが、概ね実測値を再現している。高密度側の発生応力が体積拘束時の平衡膨潤圧(1.02MPa)よりも低下し、低密度側の発生応力がそれ(0.26MPa)より増加するのは、平衡膨潤圧の大きい高密度側が膨張し、低密度側は圧縮されることが主因である。注水終了時における乾燥密度分布の比較を図-5に示す。ここで、注水側(下)は密度が低下し、排水側(上)は密度が増加する。実測に対して解析の方が上下方向に密度差が若干少ない結果となっているものの、傾向は一致しているのが分かる。また、実験、解析ともに初期の密度差は吸水膨潤によって縮小されるものの土圧が定常になった注水終了時においても優位に残存するのが分かる。図-6に注水終了時の間隙率分布と変形図を示す。ここで、先に膨潤する注水側の膨潤変形及び間隙率が排水側に比べて大きくなっているのが分かる。これは、注水側のベントナイトの飽和度が上昇するため、膨潤によって高密度側も低密度側も体積膨張する。しかし、高密度側の膨潤圧の方が大きいので低密度側が圧縮される。圧縮された低密度側と高密度の排水側についても水のフロントの進行とともに膨潤圧が上昇し膨潤変形する。ただし、圧縮された全てを押し戻せないことから(これは材料物性と水分、応力履歴に依る)、注水側の方が膨張し、排水側に向けて圧縮された状態のままとなる。高密度側のベントナイトの水平方向の膨張が注水側で特に大きいのは、水のフロントの進行によって一度圧縮された排水側の要素が膨張することによって注水側を押し返し、それによって、水平方向にも変形が生じるが、このとき、低密度の注水側の剛性が最も小さくなるので高密度の注水側はより水平方向へ膨張する。注水終了時の図-6に示す位置の注水側と排水側の水平方向の変形量を比較すると、注水側は解析が2.2mm、実験は3.5mm、排水側は解析が1.9mmで実験が2.0mmとなり解析と実験で同様の傾向を示した。飽和の進展については、底部から注水された水は排水側へ向かって上昇するが、密度が小さく透水性の大きい外側を回り込むように進み、最後に高密度側上部中央部が飽和に至る。

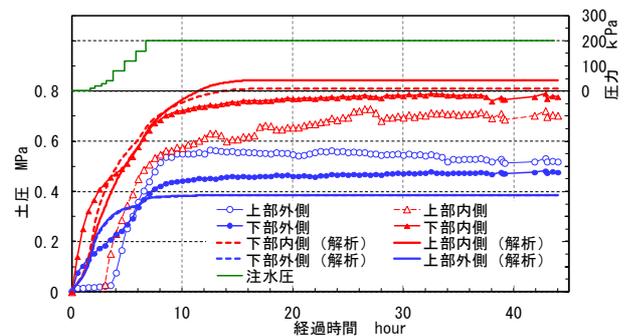


図-4 土圧の実測値と解析との比較

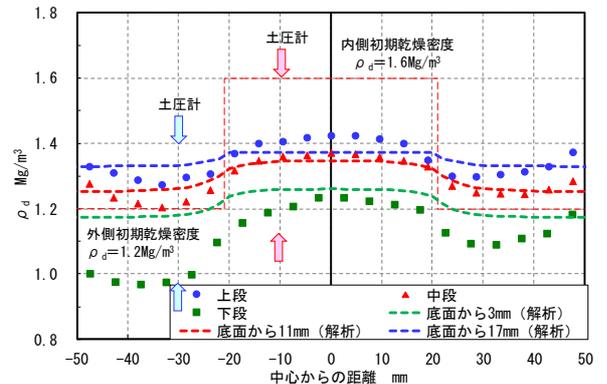


図-5 飽和後の乾燥密度分布比較

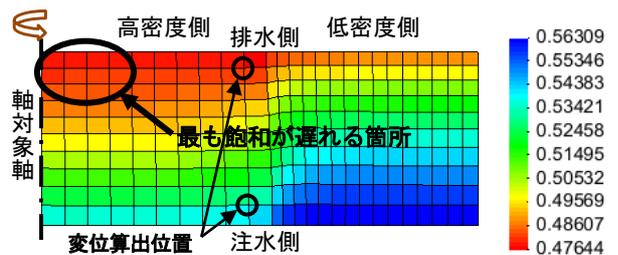


図-6 間隙率分布 (変形倍率: 2.5 倍)

### 5. おわりに

乾燥密度の異なるベントナイトを並列配置した膨潤試験を対象に力学連成二相流解析による再現解析を実施し、既往の文献を基に設定したパラメータで概ね実験を再現できた。対象材料のモデルパラメータをサクシオン制御室内試験などにより取得することによって、より精度の高い再現解析が期待できる。今後は、締め固めた粒状ベントナイトの様な異なる密度が分布した材料の飽和膨潤プロセスの浸潤・力学連成挙動を明らかにしていきたい。

### 参考文献

- 1) 森ら：乾燥密度の異なる粒状が混在する流用ベントナイトの飽和・膨潤特性，土木学会第 66 回年次学術講演会，2011 年，2) UPC(Technical University of Catalonia)：CODE\_BRIGHT User's Guide，3) E. Alonso et al.：A Constitutive model for partially saturated soils，Géotechnique，40，No.3，1990.，4) 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 年，5) 林ら：余裕深度処分施設におけるベントナイト層の飽和期間に関する検討，土木学会第 62 回年次学術講演会，2007 年，6) 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 年，7) 山本ら：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 年，8) 山本ら：力学連成二相流解析におけるクニゲル GX ベントナイトの力学特性検討，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010 年，9) 千々松ら：ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験(その 2) 不飽和支持力に関する検討，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008 年