

粒状ベントナイトの飽和膨潤挙動の解析的評価

株式会社大林組 正会員 ○佐藤 伸, 山本 修一

1. 目的

筆者ら^{1),2)}は、乾燥密度の異なるベントナイトを並置した供試体の飽和膨潤試験及び解析検討より、高密度側と低密度側は平衡化の傾向は示すものの、飽和しても両者の土圧及び乾燥密度は均一にならないことを示した。よって、礫分と細粒分が混合体として存在するクニゲルGX等の粒状ベントナイト中では同様の動きが内部で生じ、その総和が粒状ベントナイトの膨潤挙動として現れるものと考えられる。そこで、礫分と細粒分が混同体で配置されるベントナイトの膨潤挙動の力学プロセスを解明することを目的として、粒状ベントナイトの要素モデルを用いて、飽和膨潤挙動解析を行った。

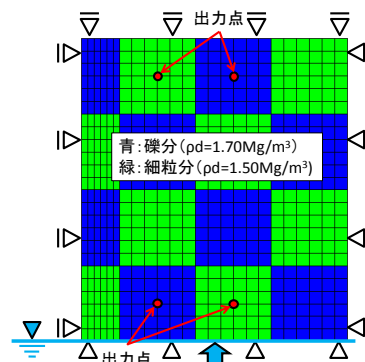


図-1 粒状ベントナイト要素モデル

表-1 要素モデル力学パラメータ

		礫分	細粒分
乾燥密度	ρ_d	1.700	1.500
間隙比	e_0	0.559	0.767
膨潤指数	κ_0	0.043	0.132
圧縮指数	λ_0	0.050	0.185
モデルパラメータ	κ_s	0.214	0.227
	α	-0.150	-0.150
	α_{sp}	-0.422	-0.602
限界状態応力比	M	0.640	0.520
先行圧密降伏応力	P_0^*	2.000	1.000
膨潤圧	P_{sw}	1.067	0.527

2. 解析モデル, 初期条件, 境界条件

余裕深度処分施設での候補材料であるクニゲルGXを想定して、原鉱石の大きさを10mmとし、その間に10mmの礫以外の細粒分が混在するものと仮定した。解析モデルを図-1に示す。解析モデルは2次元平面ひずみモデルとし、幅 $b=35\text{mm}$ 、高さ $h=40\text{mm}$ とした。礫分の乾燥密度は $\rho_d=1.70\text{Mg/m}^3$ 、細粒分の乾燥密度は $\rho_d=1.50\text{Mg/m}^3$ とし、平均乾燥密度 $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$ に締め固められた粒状ベントナイトを想定している¹⁾。初期飽和度については、練混ぜ後、十分に時間が経過し礫分と細粒分のサクションが釣り合っているものと仮定し、水分特性曲線に基づいて、礫分の初期飽和度が $S_r=90\%$ 、細粒分が $S_r=75\%$ とした。

力学境界条件は図-1に示すとおり、底部、上部は鉛直方向固定、水平自由、側部境界については鉛直自由、水平固定とした。二相流に関する境界条件は、上部を大気圧固定とし、底面は浸潤させ毛管圧によって吸水させる条件とした。なお、構成則はBarcelona Basicモデル³⁾を適用し、有限要素法解析コードCODE_BRIGHT⁴⁾を用い、力学連成二相流解析を実施した。

3. 解析パラメータ

解析に用いた力学パラメータを表-1に示す。ここで、膨潤指数、圧縮指数、限界状態応力比については要素試験結果からパラメータが取得されていないことから、山田ら⁵⁾の研究を基に表-1のとおり

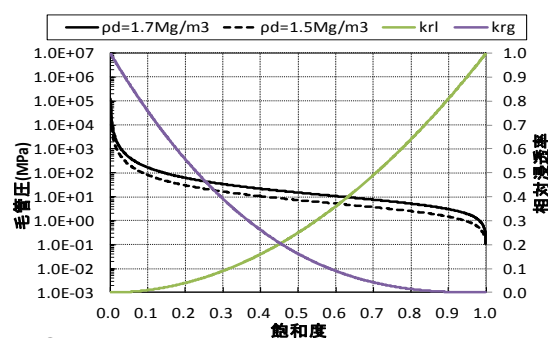
比例計算から求めた。膨潤圧については小峯の膨潤評価式よりモンモリロナイト含有量47%、温度20℃として算出している。不飽和パラメータについては山本ら⁶⁾の検討を参照し、膨潤特性は小峯の膨潤評価式⁷⁾と等価になるように設定した。先行圧密降伏応力については膨潤圧の2倍と仮定した。絶対透過係数については、JNC H17年レポート⁸⁾を参照し、降水系地下水を対象とした式を用いて礫分に対しては $k=7.88\text{E-}21\text{m}^2$ 、細粒分に対しては $k=2.44\text{E-}20\text{m}^2$ とした。毛細管圧力についてはvan Genuchtenモデルを適用し、図-2に示すように設定した。相対浸透率については乾燥密度に関係なく同一とし、佐藤ら²⁾の検討を基に図-2に示すように設定した。

4. 解析結果

解析結果として図-1に示した出力点における平均有効応力（実線）と飽和度（破線）の経時変化を図-3に示す。

キーワード 飽和膨潤解析, 不飽和ベントナイト, 力学連成二相流解析, 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



①毛細管圧力:
 $\rho_d=1.7\text{Mg/m}^3$, vGモデル, $P_0=6.24\text{MPa}$, $\lambda=0.412$, $S_{lr}=0.0$, $S_{ls}=1.0$
 $\rho_d=1.5\text{Mg/m}^3$, vGモデル, $P_0=3.03\text{MPa}$, $\lambda=0.412$, $S_{lr}=0.0$, $S_{ls}=1.0$
 ②相対浸透率: Power Law, $n=2.00$ (液相), $n=2.63$ (気相)

図-2 毛管圧力

平均有効応力は設定した膨潤圧に対して剛性と膨潤圧の高い礫分側が低下し、剛性と膨潤圧が低い細粒分側が上昇する。経時変化については全ての位置で飽和に至るまで平均有効応力が変化する結果となった。これは、後述の図-4 に示す間隙率の経時変化に示すとおり、浸潤前線の上昇に伴い体積変化が生じるためである。注水終了時の上部一列の要素の平均有効応力は 0.706MPa、底部の一列の平均が 0.773MPa となり、両者の平均値は 0.740MPa となる。小峯の膨潤評価式で平均乾燥密度 1.60Mg/m^3 で計算した場合は 0.750MPa となっており GX のように不均質であっても平均密度が同値であれば膨潤圧も同等になることが示唆される。

続いて、間隙率（実線）と飽和度（破線）の経時変化を図-4 に示す。飽和度の上昇に伴い膨潤により間隙率も上昇し続けるが、底部の細粒分については、始めは飽和度の上昇とともに湿潤膨潤により間隙率も上昇するものの、上部の飽和に伴う膨潤圧により上方から圧縮され間隙率が減少に転じる。一方、底部の礫分は膨潤圧も剛性も相対的に高いので細粒分のような飽和進展に伴う間隙率の反転は起こらない。上部については、礫分は一旦、圧縮されるものの、その後間隙率は飽和度の上昇とともに増加する。細粒分の間隙率は増加することはなく、圧縮されるのみとなる。細粒分については、礫分に比べ剛性及び膨潤圧が低いので、礫分の膨潤によって圧縮されることから、礫分の飽和膨潤による体積変化を緩衝する役割となる。よって、礫分と細粒分の初期剛性や飽和に伴う剛性変化及び発生する膨潤圧のバランスによって、粒状ベントナイトの飽和膨潤特性が変化するといえる。図-5 に注水終了時の間隙率及び乾燥密度分布を示す。図-4 でも同様の結果ではあるが、礫分と細粒分で間隙率は一定にならない。上部については、出力点位置で同様の間隙率になるものの、上部全体では一定にはなっていない。また、上部と底部を比較すると、既往の試験¹⁾と同様、注水側の間隙率は増加する。

5. まとめ

粒状ベントナイトをモデル化し、飽和に伴う力学的膨潤挙動を解析的に評価した。その結果、礫分と細粒分の飽和に伴う、力学プロセスのつり合いが粒状ベントナイトの飽和膨潤挙動を決定するが、礫分と細粒分の乾燥密度や膨潤圧が平均化されないことは解析的に示唆された。今後は、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行えることが期待でき、さらに、粒状ベントナイトの浸潤・力学挙動メカニズムを明確にしていきたい。

【参考文献】 1) 森拓雄ら：乾燥密度の異なる粒子が混在する粒状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，2) 佐藤ら：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，土木学会第 67 回年次学術講演会，3) E. E. Alonso, A. Gens and A. Josa : A Constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3, 1990. ,4)UPC(Technical University of Catalonia) : CODE_BRIGHT User's Guide, 5) 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，6) 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，7) Komine, H., et al. : New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, No. 2, pp.460-475, 2003., 8) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 ―平成 17 年取りまとめ― 分冊 2 工学技術の開発，2005 年

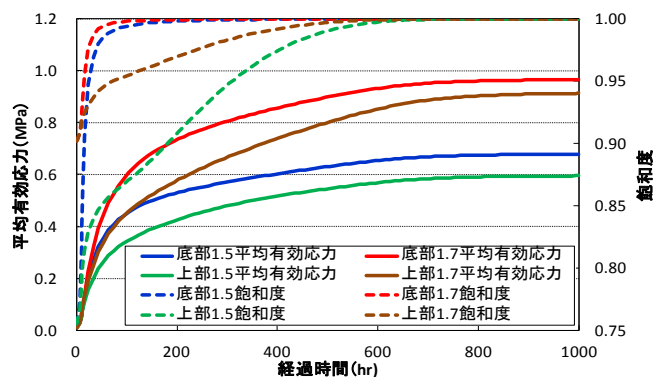


図-3 平均有効応力と飽和度の経時変化

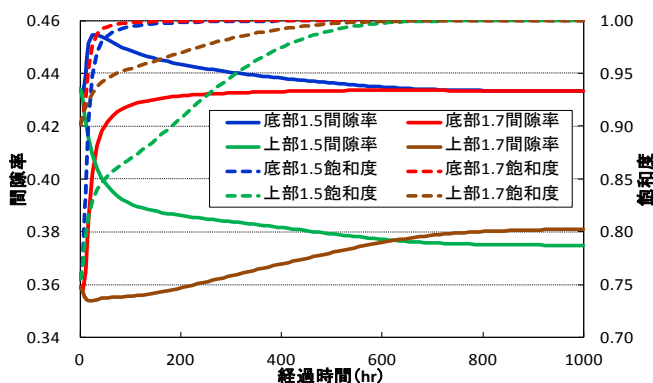


図-4 間隙率と飽和度の経時変化

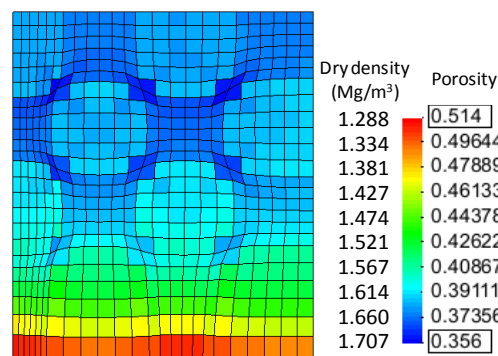


図-5 注水終了時の間隙率及び乾燥密度分布