

地層処分におけるベントナイトオプションの検討 数値解析的なアプローチ

神戸大学

正会員○伊藤真司 橋 伸也

電力中央研究所

正会員 渡邊保貴 新橋美里 非会員 横山信吾

原子力発電環境整備機構

正会員 山本陽一 後藤考裕

1. はじめに

本研究では人工バリア材料の合理的な選定や仕様設定に資することのできる多様な選択肢を示すことを目的として、これまで優先的に検討されてきた材料に加えて産地やタイプの異なる複数のベントナイトの特性データを様々な環境条件を考慮して取得し、地層処分への技術的な成立性を確認するための検討を実施する。各材料の地層処分への成立性あるいは適用性を評価するにあたって、数値解析は有用なアプローチになり得る。これを実践するためには、各材料について取得される特性データを解析パラメータに反映するための方法論が求められると同時に、実規模緩衝材の性能評価解析に先んじて、初期条件や境界条件が明確な室内試験等での応答の再現性を確認し、解析手法の妥当性を検証する必要がある。一方、室内試験で計測・算出できるデータは、対象とする材料の供試体全体像からすれば、部分的あるいは平均的である。これを表現できることが前提にはなるが、供試体内部に生起する、捉えることが難しい現象を理解するための演繹的な推論を与える術としても数値解析は有用である。本報告では、以上のような認識の下で進めている数値解析的なアプローチの内、不飽和土/水連成有限要素解析コード：DACSAR-I¹⁾による膨潤圧試験シミュレーションの一例を示し、解析結果から解釈される膨潤圧の発生機構について纏める。

2. シミュレーション概要および解析条件

本研究では、高さ 20 mm のベントナイト供試体を想定し、供試体の体積変化を拘束した条件下で、供試体下端面からの給水を模擬した膨潤圧試験シミュレーションを行う。ただし、供試体内の初期乾燥密度分布は不均一を仮定し、供試体下部 10 mm の領域と上部 10 mm の領域の初期乾燥密度をそれぞれ 2.0 Mg/m³、1.6 Mg/m³ とした。また、初期には供試体内に動水勾配が生じないように、初期サクションを一樣としている。初期サクション値は $s = 1.7$ MPa であり、ヒステリシスを考慮しない単一の水分特性曲線を仮定することにより、一樣な初期飽和度 $S_r = 35.9\%$ (有効飽和度 $S_e = 28.8\%$) を仮定した。また、初期全応力は全ての成分をゼロとし、有効応力式 ($p' = p + sS_e$) から初期有効応力を決定した。解析では、供試体の不飽和から飽和状態への変遷を取り扱うが、間隙空気圧は常に大気圧と等しい完全排気条件とする。すなわち、サクションは間隙水圧の異符号となる。給水開始時から、水理境界条件として供試体下端面の水圧をゼロとし、供試体への水の流入を促す。なお、解析では自重を無視している。また、側面摩擦も考慮しないため、軸方向にのみ変形と浸潤が生じる次元問題となるが、側圧変化は陽に考慮している。

土骨格の構成則として、膨潤性土盤材料を対象とした不飽和弾塑性構成モデルを用いる。このモデルでは、圧密降伏を規定する正規圧密線のみならず、除荷降伏を規定する塑性膨潤線を定義し、載荷・除荷の両方に対して弾性域を制限している²⁾。圧密降伏後の正規圧密線に沿う塑性圧縮とともに、除荷降伏後の塑性膨潤線に沿う塑性膨潤の発現を促す効果があり、これをもってベントナイトらしさを表現しようとしている。除荷過程での塑性膨潤の発現は、過去の圧密によって蓄積された塑性変形を忘失させるものであり、塑性体積ひずみを硬化パラメータにおくことで、除荷による降伏曲面の縮小化が促される。これによって、ベントナイト系材料に見られる、除荷過程の著しい膨潤、除荷・再載荷過程の応力-ひずみ関係のヒステリシスループを簡潔に記述しようとしている。不飽和状態への拡張には S_e -hardening モデル³⁾のアイデアを援用し、塑性体積ひずみの増減のみならず、有効飽和度の変化によっても弾性域の大きさが変化する硬化則を規定している⁴⁾。図-1 に、不飽和弾塑性構成モデルの特徴を概図として示す。

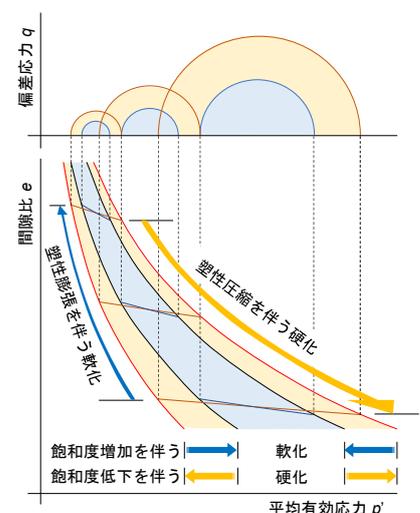


図-1 弾塑性構成モデルの概図

キーワード 放射性廃棄物処分, ベントナイト, 膨潤圧, 数値解析

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL: 078-803-6281 Email: stachi@people.kobe-u.ac.jp

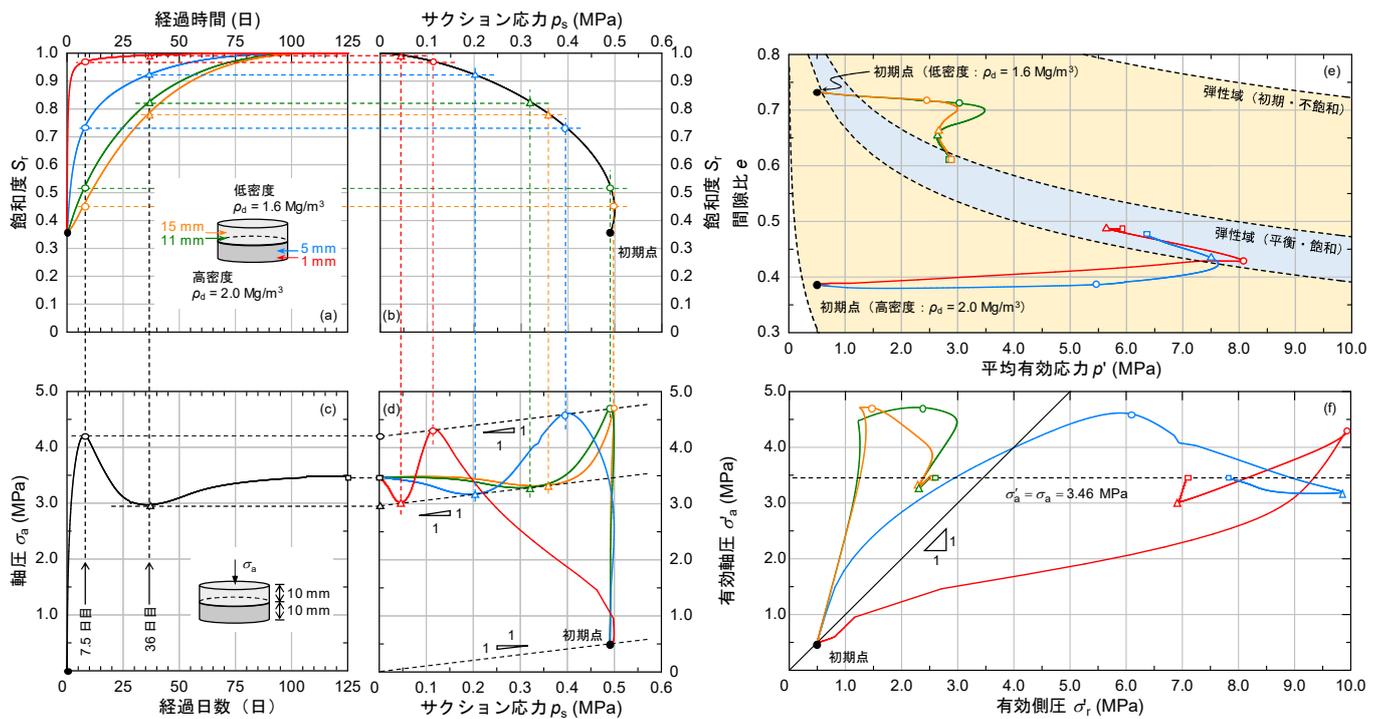


図-2 膨潤圧試験シミュレーションの解析結果

3. 膨潤圧試験シミュレーション解析結果の解釈

図-2(a)～(f)に数値解析結果を示す。供試体下端面からの浸透により、下部の高密度領域は早期に飽和度が上昇している(図(a)参照)。上部の低密度領域にも給水開始直後から飽和度の増加が見られるが、これは排気圧縮に因る。供試体の全体積が一定であるから、下部が吸水膨潤すれば、上部は収縮せざるを得ず、含水量に変化がなくても飽和度が增加する。このように、飽和化過程初期の飽和度増加の要因は上部と下部で異なる。しかし、仮定した水分特性はこれらを区別しないため、サクシオン s の減少は、時間的な遅れはあるものの、位置に依らず同一の水分特性曲線を進る。サクシオンと有効飽和度の積である、サクシオン応力 p_s と飽和度 S_r の関係として経路を描いても同様である(図(b)参照)。供試体上部にもやがて浸透が及び、125日経過後には供試体全体が飽和化するが、この平衡状態に至るまでの軸圧変化は単調ではなく、給水開始から7.5日目と36日目に、それぞれ極大・極小を迎えている(図(c)参照)。軸圧は、供試体端面で計測されるような所謂、膨潤圧であり、解析解として得られた膨潤圧変化のパターンは実測でも見られる。本解析では自重や側面摩擦を無視しているため、軸方向の力のつり合いより、軸圧は供試体の上から下まで常に一樣である。よって、図(d)の様に、サクシオン応力 p_s と有効軸圧 σ'_a の関係として応力経路を描けば、支配方程式の一つである有効応力式($\sigma'_a = p_s + \sigma_a$)からも明らかのように、同時刻の全ての位置での応力点は、同一の軸圧 σ_a を切片に持つ、勾配1の直線上に乗る。また、軸圧が極大・極小を迎えることは、全ての位置において、軸圧増分とサクシオン応力増分が等しくなることと等価である($d\sigma_a = 0 \Leftrightarrow d\sigma'_a = dp_s$)。サクシオン応力 p_s は図(b)の様に、ほとんど単調減少であるから、有効軸圧 σ'_a の変化が軸圧増減の要となる。図(e)と図(f)は、各位置での間隙比-平均有効応力関係と有効応力経路である。早期の浸透により飽和化する供試体下部は、先ず、僅かに膨張しながら、弾性域縮小の影響を受けて平均有効応力の上昇を呈する。この間、高密度状態が維持される理由は、上部の剛性が高いからである。ところが、上部にも飽和化が及ぶと、上部は载荷側で弾性域縮小の影響を受けて降伏、剛性が低下する。この上部の剛性低下が、すでに高飽和度化した下部の吸水膨張・一次元除荷を許し、軸圧の低下を招いている。ここではベントナイト供試体の飽和化シミュレーションの一例を取り扱った。今後、複数の材料を想定した種々の初期・境界条件下でのシミュレーションを実施し、実現象との比較・照合を進める。

参考文献：1) Takeyama, T., Tachibana, S. and Furukawa A.: A finite element method to describe the cyclic behavior of saturated soil, Int. J. Mater. Science and Eng., 2 (1), pp. 20-25, 2015. 2) 伊藤真司：除荷過程における地盤材料の塑性軟化特性を考慮した弾塑性構成モデル，神戸大学大学院修士論文，2017. 3) 大野進太郎，河井克之，橘伸也：有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集，63(4)，pp.1132-1141,2007. 4) 太田有祐：ベントナイトを対象とした弾塑性構成モデルの再現性の検証，神戸大学卒業論文，2019.