

飽和ベントナイトの膨潤・せん断挙動の弾塑性モデルによるシミュレーション

(一財) 電力中央研究所 フェロー会員 ○田中 幸久  
 (一財) 電力中央研究所 正会員 渡邊 保貴

1. はじめに

放射性廃棄物処分においては、放射性核種の移行を抑制するためなどの理由により締固められたベントナイトが用いられる。性能評価上ベントナイトに求められる性質は主に低透水性であるが、低透水性を確実にする性質として膨潤性は重要な特性である。

飽和したベントナイトの応力・ひずみ挙動は、非膨潤性の粘土に対して適用できるカムクレイ系のモデルでモデル化されることが多いが、ベントナイト特有の浸透圧による膨潤性が考慮されないことが少なくない。そこで、本論文では、飽和したベントナイトの膨潤特性に及ぼす浸透圧による膨潤の影響を述べるとともに、浸透圧による膨潤の考慮した修正カムクレイモデルによる数値シミュレーションを行い、実測結果と計算結果の比較を行った。

2. 既往の実験データによる浸透圧による膨潤の影響の検討

(1) 膨潤圧試験

図1は、イオン交換水または蒸留水と人工海水を用いて膨潤圧試験を行い、ベントナイトの膨潤圧に及ぼす溶液のイオン濃度の影響を調べたものである。有効粘土密度が  $1.5 \text{ Mg/m}^3$  以下では、蒸留水を用いた場合の膨潤圧の方が大きい、 $1.5 \text{ Mg/m}^3$  以上では両者の差はほとんどないことがわかる。有効粘土密度が  $1.5 \text{ Mg/m}^3$  以下で、人工海水を用いた場合の膨潤圧の方が小さいのは、人工海水中に含まれるイオンの影響により、モンモリロナイト結晶の近傍に発生する拡散 2 重層中のイオン濃度と溶液中のイオン濃度の差が減少し、モンモリロナイト結晶間に発生する浸透圧による膨潤圧  $P_{s,osm}$  が減少するためである。それに対して、有効粘土密度が  $1.5 \text{ Mg/m}^3$  以上では、モンモリロナイト結晶間に作用するサクシジョンの減少による膨潤圧  $P_{s,suc}$  が卓越するため、モンモリロナイト結晶間距離は一定であり、膨潤圧は溶液中のイオン濃度の影響を受けないためである<sup>1)</sup>。図2には、有効粘土密度が  $1.5 \text{ Mg/m}^3$  以上でも  $P_{s,osm}$  のデータがプロットされているが、これは締固め含水比が飽和含水比である試料の膨潤圧の測定値をプロットしたものである<sup>1)</sup>。さらに図2における有効粘土密度を間隙比  $e$  に換算してプロットしたものが図3である。 $e \sim \ln(P_{s,suc})$  関係、 $e \sim \ln(P_{s,osm})$  関係はいずれも直線で近似し得ることがわかる。

(2) 一次元圧縮・膨潤試験 (笹倉ほか, 2002 ; 笹倉ほか, 2003)

図4ならびに図5中の実測結果は、笹倉らが締固めたベントナイトに対して行った一次元圧縮・膨潤試験の結果の一部である。図4ならびに図5(a)によれば、除荷に伴い間隙比が非直線的に増加する傾向があることがわかる。これは、 $\sigma'_a$  または  $p'$  が減少し、 $P_{s,osm}$  よりも小さくなると、モンモリロナイト結晶間距離が増大するためであると思われる。一方、図5(b)によれば、除荷過程における軸差応力  $q$  が極小値を示した後、除荷しているにも関わらず軸差応力  $q$  が増大するという特徴的な挙動を示していることがわかる。

(3) 非排水三軸圧縮試験 (並河・菅野, 1997)

図6中の実測結果は、並河・菅野(1997)が締固めたベントナイトに対して行った非排水三軸圧縮試験の結果の一部である。

キーワード 放射性廃棄物処分, ベントナイト, 圧密・膨潤試験, 三軸圧縮試験, 数値シミュレーション

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電力中央研究所 TEL 0471-82-1181

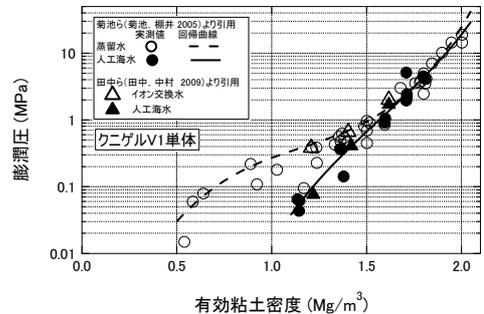


図1 膨潤圧と有効粘土密度の関係(田中, 2012)

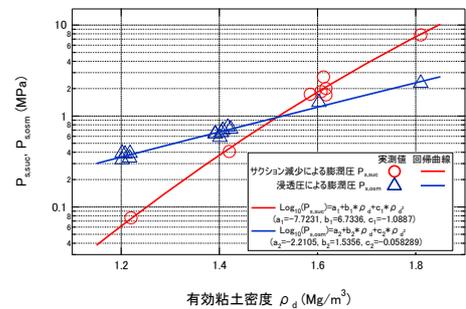


図2 膨潤圧と有効粘土密度の関係(田中, 2012)

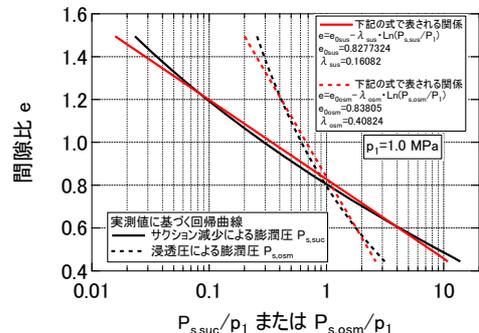


図3 膨潤圧と間隙比の関係(田中, 2012)

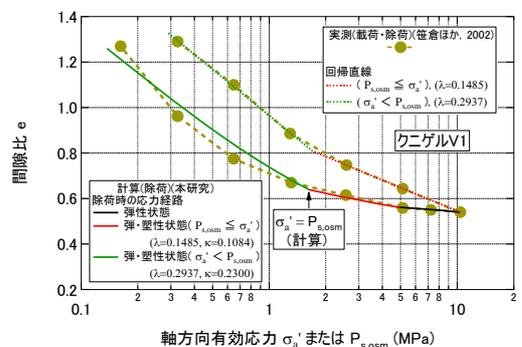


図4 クニゲルV1に対する圧密・膨潤試験結果(笹倉ほか, 2002)と計算結果の比較

図 6(a)によれば、試験ケース CU1-2~CU1-5 の応力経路はすべて図上で左上がりであり、ほぼ相似な形状であるのに対して、試験ケース CU1-1 の応力経路は初期には左上がりであるが、途中から右上がりに転じており、過圧密粘土の特徴を示す。

3. 修正カムクレイモデルによる試験結果の数値シミュレーション

(1) 一次元圧縮・膨潤試験結果のシミュレーション

修正カムクレイモデルによる一次元除荷時の挙動のシミュレーション計算を行った。この計算においては、除荷過程における膨潤性の大きさの変化を表すため、 $\sigma'_a < P_{s,osm}$  の  $\lambda$ ,  $\kappa$  の値を  $P_{s,osm} \leq \sigma'_a$  における値より大きく設定した。図 4, 図 5 は実験結果と計算結果を比較したものである。図 4, 図 5 では、除荷に伴い間隙比が  $\sigma'_a \leq P_{s,osm}$  で急増する様子がうまく表せている。

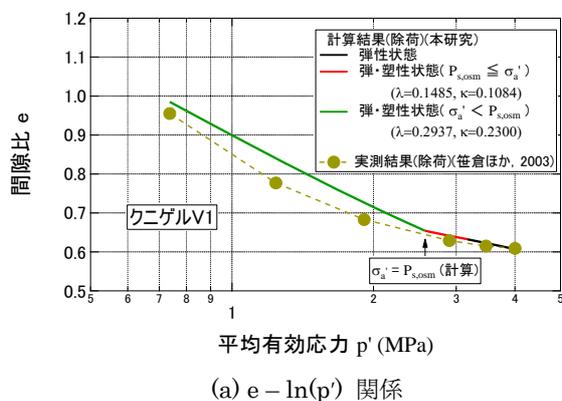
図 5(b) は除荷時の有効応力経路の実測結果と計算結果ならびに初期、 $P_{s,osm} = \sigma'_a$  時ならびに除荷終了時の降伏曲面の計算結果を示したものである。有効応力経路の計算結果は、軸差応力  $q$  の値に極小値が見られるなど実測値の傾向を概略表せていることがわかる。また、計算結果を詳細に検討した結果によれば、軸差応力  $q$  の値に極小値が見られる原因は、 $\eta < M < 0$  で塑性体積ひずみ増分が負になることにより、降伏曲線が収縮するためであることがわかった。

(2) 非排水三軸圧縮試験結果のシミュレーション

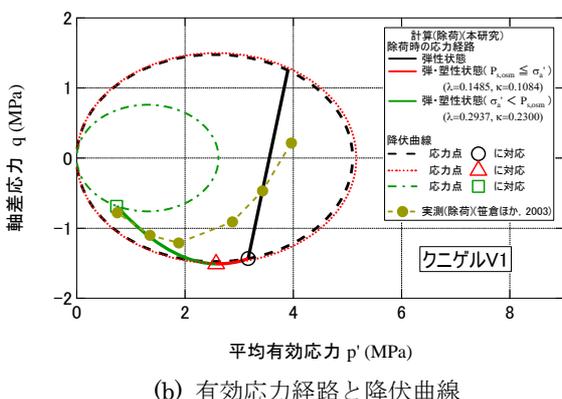
図 6 に実測結果と計算結果を示す。図 6(a) 中の赤実線、青実線は、各試験ケースのそれぞれ  $P_{s,osm} < \sigma'_r$ ,  $\sigma'_r < P_{s,osm}$  の部分であり、それぞれ図 3 の凡例中の  $P_{s,osm} < \sigma'_a$ ,  $\sigma'_a < P_{s,osm}$  に対応した  $\lambda$ ,  $\kappa$  の値を用いた。試験ケース CU1-2~CU1-5 の実線の計算結果は実測結果とほぼ一致している。赤点線は、 $\sigma'_r < P_{s,osm}$  であるにもかかわらず、 $P_{s,osm} < \sigma'_a$  対応した  $\lambda$ ,  $\kappa$  の値を用いた場合であり、青実線の計算結果よりも実測結果との一致度が低下することがわかる。一方、試験ケース CU1-1 の青実線、赤実線で示す計算結果と実測結果の一致度は低いが、その原因は、前述したように過圧密の影響であると思われる。そこで、下負荷面の概念<sup>5)</sup>を導入して計算したものが、図 6(a) 中の緑実線である。緑実線と実測結果の一致度は高い。

応力ひずみ関係について、図 3 の凡例中の  $P_{s,osm} < \sigma'_a$ ,  $\sigma'_a < P_{s,osm}$  に対応した  $\lambda$ ,  $\kappa$  の値を用いて計算したものが、図 6(b) 中の破線である。試験ケース CU1-3~CU1-5 の計算結果は実測結果とほぼ一致しているのに対して、試験ケース CU1-1 ならびに CU1-2 では計算した軸差応力は、実測結果より小さい。そこで、試験ケース CU1-1 に対して下負荷面の概念<sup>5)</sup>を導入して計算したものが、図 6(b) 中の赤点線である。計算した軸差応力は実測結果に近づくとともに依然として小さいことがわかる。

参考文献：1) 田中幸久 (2012)：締固めたベントナイトの吸水膨潤過程のモデル化(その2)、飽和・不飽和ベントナイトの膨潤モデルの提案とその検証、電中研研究報告N11035。2) 笹倉剛ほか(2002)：ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び調査、鹿島建設(株)、JNC TJ8400 2002-025。3) 笹倉剛ほか(2003)：ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得II、鹿島建設(株)、JNC TJ8400 2003-048。4) 並河努・菅野毅(1997)：緩衝材のせん断特性1、動燃、東海事業所、PNC TN8410 97-074。5) 橋口ほか(1996)：下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式、土木学会論文集、No. 547/III-36, pp. 127~144。

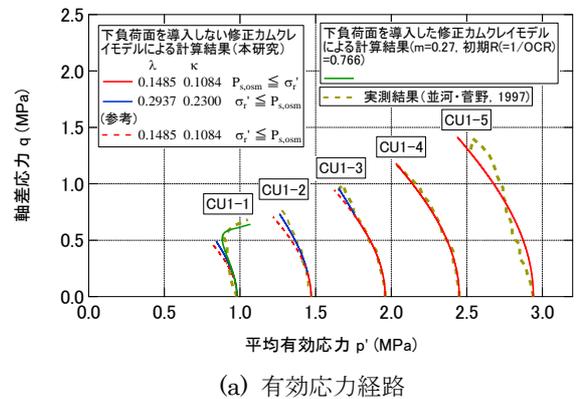


(a)  $e - \ln(p')$  関係

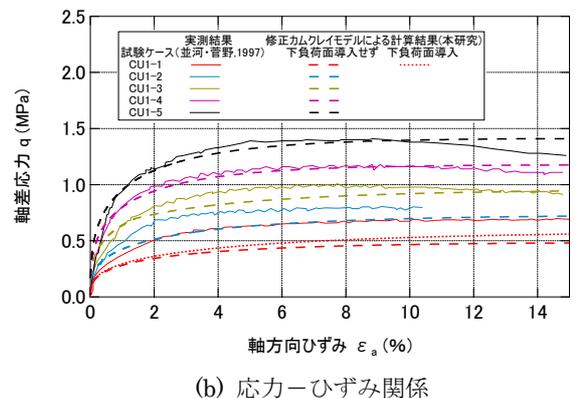


(b) 有効応力経路と降伏曲線

図 5 一次元圧縮・膨潤試験結果との比較(クニゲル V1)



(a) 有効応力経路



(b) 応力-ひずみ関係

図 6 非排水三軸試験結果との比較(クニゲル V1)