

微視的な構造の変化を考慮した締固めたベントナイトの一次元除荷・再載荷挙動のモデル化

(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止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などの力学特性は重要である。前報¹⁾では、浸透圧による膨潤とそれに伴う微視的な構造の変化を考慮した弾塑性モデルを提案したが、本報告では、再載荷時の挙動を表現するためにモデルを改良し、数値シミュレーションを行った。

2. 微視的構造モデル

(1) 膨潤圧試験結果

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、ベントナイトの平衡膨潤圧に及ぼす間隙比と溶液の種類の影響を示したものが図1である。図1には、システムの剛性の大きい、結合型試験装置による試験結果のみがプロットされている。間隙比が約0.9以上と大きい場合には、蒸留水またはイオン交換水を用いた場合の平衡膨潤圧は人工海水を用いた場合よりも大きい。

(2) SEM画像ならびにTEM画像

図2(a)、図2(b)は、それぞれイオン交換水、人工海水で飽和させた後に真空乾燥させ、更にオスミウムを凝着させたクニゲルV1を走査型電子顕微鏡で10,000倍の倍率で撮影したものである。図2(a)、図2(b)のいずれにおいても、ひらひらとした布のような物体が3次元的に不規則に積み重なっていることがわかる。元素分析によれば、この物体はいずれもモンモリロナイトの結晶であることがわかった。次に、図3にモンモリロナイトと同様な結晶構造を有しているスメクタイトのTEMによる画像を示す²⁾。スメクタイト結晶が層を成してひらひらした物体を形成していることがわかる。図2(a)、図2(b)のひらひらとした布状の物体も同様に層を成したモンモリロナイト結晶であると考えられる。このひらひらした布状の物体をスタックと呼ぶこととする。

(3) XRDによる知見

表1は、飽和したモンモリロナイトの微視的構造をX線回折(XRD)によって調べた既往の研究成果をまとめたものである。人工海水で飽和した場合、結晶層間は広い密度にわたって3層水和状態であるのに対して、蒸留水またはイオン交換水の場合

キーワード 放射性廃棄物処分、ベントナイト、一次元除荷・再載荷、微視的構造、モデル化

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財) 電力中央研究所 TEL 0471-82-1181

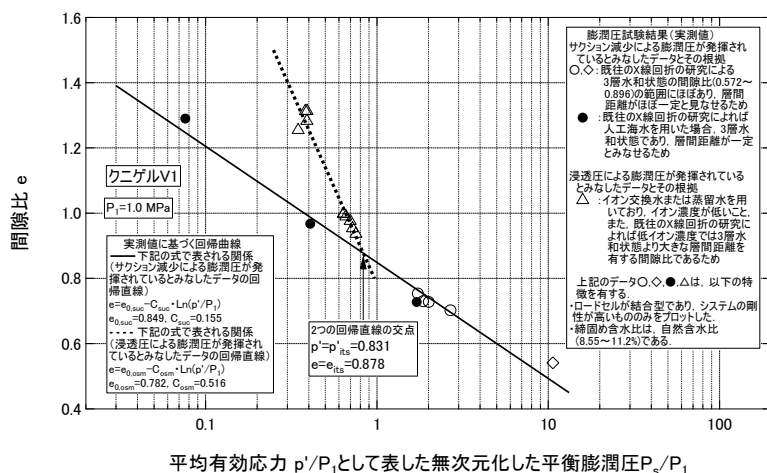
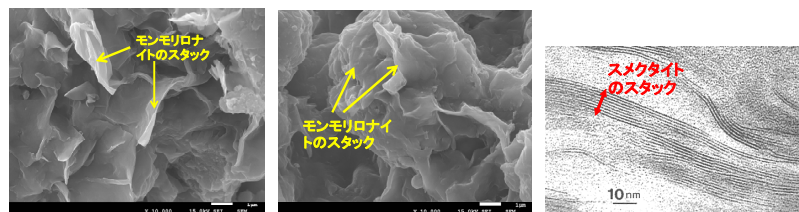


図1 無次元化した平均有効応力として表した蒸留水またはイオン交換水ならびに人工海水を用いた場合の無次元化した平衡膨潤圧と間隙比の関係(結合型試験装置によるデータのみのプロット)



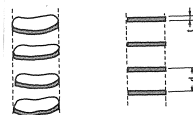
(a)イオン交換水 (b)人工海水
図2 クニゲルV1(乾燥密度 1.2Mg/m³)の走査型電子顕微鏡(SEM)による画像

図3 TEMによるスメクタイトの層状構造の画像(文献2))

表1 密度、間隙水の種類毎のモンモリロナイトの構造(文献3)引用・加筆)

有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{dm} (Mg/m ³)	$0.32 < \rho_{dm} < 0.74$	$0.74 < \rho_{dm} < 1.00$	$1.0 < \rho_{dm} < 1.3$
クニゲルV1換算の間隙比 ^{注1)} (Mg/m^3)	$3.876 > e > 1.389$	$1.389 > e > 0.896$	$0.896 > e > 0.572$
結晶構造	蒸留水またはイオン交換水 Straight columnモデル ^{注2)}	同左	3層水和状態
人工海水	3層水和状態		

注1) クニゲルV1の土粒子密度、モンモリロナイト含有率は、図1のデータの平均
注2) Straight columnモデルは下図のように表される。



合は、クニゲル V1 に換算した間隙比 0.896 を境界にして構造が変化している。この値は、図 1 における 2 つの回帰線の交点の間隙比 0.878 に近い。つまり、前述した間隙比が大きい場合と小さい場合の平衡膨潤圧-間隙比関係の違いは微視的構造の違いによると思われる。

(4) 締固めたベントナイトの微視的構造モデル

図 2 に示した電子顕微鏡写真から、蒸留水、イオン交換水ならびに人工海水中の Na 型モンモリロナイトの構造は図 4 に示すようにスタックが不規則に積み重なった構造としたモデル化で表されると考えた。さらに、イオン交換水または蒸留水の場合の微視的構造の変化は、平均有効応力 p' と図 1 における 2 つの回帰線の交点の平均有効応力 p'_{its} との大小関係により生じると考えた。

図 1 中で、 $p'/p'_{its} \leq 1$ における両回帰曲線による間隙比の差 Δe は、浸透圧による層間距離の増大によるものと考えられ、次式で表される。

$$\Delta e = -(C_{osm} - C_{suc}) \cdot \ln(p'/p'_{its}) \quad (1)$$

3. 一次元除荷・再載荷挙動のシミュレーション

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試験結果⁴⁾の一部であり、一次元圧縮・除荷・再載荷挙動を示す。図 5 中には除荷・再載荷に対応した計算結果も示されている。図 5 の凡例中に計算において想定した状態とパラメータの概要を記す。要点を以下に箇条書きで記す。1) 除荷に伴って、弾性状態、修正カムクレイモデルで表される弾塑性状態、モール・クーロンの破壊基準で表される塑性状態と変遷し、再載荷時には弾性状態、修正カムクレイモデルで表される弾塑性状態と変遷するとした。

2) $p' < p'_{its}$ における λ, κ は、浸透圧による膨潤の影響により、 $p'_{its} < p'$ における値より、 $\alpha_1 \cdot (C_{osm} - C_{suc})$ または $\alpha_2 \cdot (C_{osm} - C_{suc})$ だけ大きいとした。ここで、 α_1, α_2 はいずれも浸透圧による膨潤変形が土骨格の存在によって妨げられることを表す低減係数である。図 1 に見られるように、間隙比が大きくなるほど浸透圧の膨潤圧に比べてサクシオン減少による膨潤圧が小さくなるので、土骨格の存在により浸透圧による膨潤変形が妨げられにくくなり、 α_1 または α_2 は、1 に近い大きな値になるとと思われる。

図 5 においては、いずれの計算結果も実測結果の概略を表せているといえるが、④'~⑤' 間で α_1 より大きな α_2 を用いた場合の方が、実験結果と計算結果の全体的な一致度が高まることわかる。

一方、図 6 は、並河・菅野によるクニゲル V1 に対する一次元圧密・除荷・再載荷実験の実測結果⁵⁾であるが、図 5 の場合と異なり全過程を通じて $p' < p'_{its}$ である。図 6 中には計算結果も示されているが、 $p' < p'_{its}$ であるため、浸透圧による膨潤変形は発生しない。計算結果と実測結果の一致度は十分ではないが、除荷・再載荷時の挙動の概略を表せている。

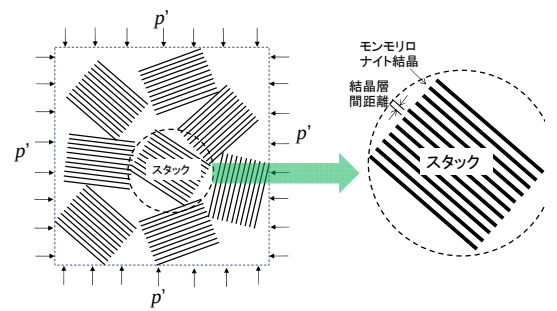


図 4 モンモリロナイトの結晶構造の模式図

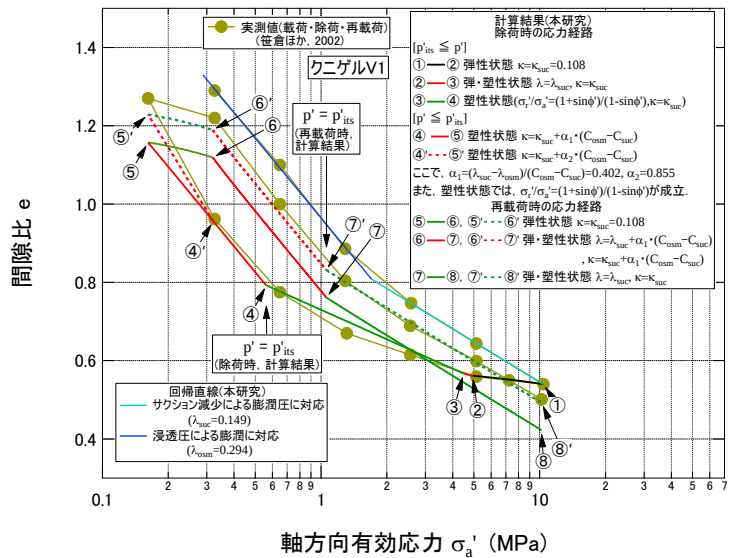


図 5 一次元除荷・再載荷時挙動の実測と計算

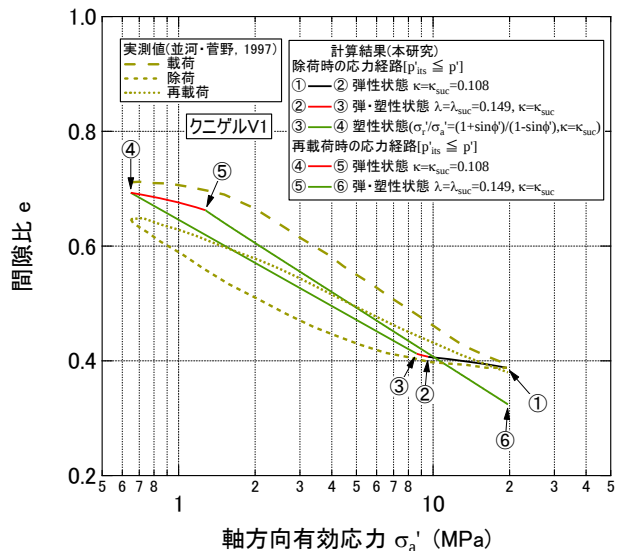


図 6 一次元除荷・再載荷時挙動の実測と計算 ($p'_{its} < p'$)

参考文献：1) 田中・渡邊(2015)：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，土木学会第70回年次講演，CS12-013，pp.25-26. 2) 須藤談話会編(2000)：粘土科学への招待，粘土の素顔と魅力，p.255. 3) 田中幸久(2011)：ベントナイトの吸水膨潤モデルによる膨潤圧試験における試験条件の影響評価，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol. 67，No. 4，pp.513-531. 4) 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. 5) 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.