



化学変質を考慮したベントナイト緩衝材の長期挙動 評価

神藤, 卓哉
飯塚, 敦
橘, 伸也

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 21:83-90

(Issue Date)

2017-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011538>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011538>



化学変質を考慮したベントナイト緩衝材の 長期挙動評価

Long-term assessment of behavior of Bentonite buffer
considering chemical alteration

神藤 卓哉¹⁾

Takuya Shinto

飯塚 敦²⁾

Atsushi Iizuka

橘 伸也³⁾

Shinya Tachibana

概要：我々人間は，これまで原子力発電によってエネルギーの多くを賄い，利用してきた．発電後燃料を再利用する過程で，放射性廃棄物が発生する．これらは有害であるため，地層処分による最終処分が検討されている．その際廃棄物を覆う緩衝材としてベントナイトという粘土鉱物が注目されている．ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトという物質には膨潤性があり，地下水の流出入を抑制したり，周囲の岩盤からの応力を支持することが可能である．このように緩衝材として有能な性質を持っているベントナイトであるが，長期的に微量に侵入してくる地下水の影響で廃棄体を覆うセメント系材料からアルカリ性の水溶液が溶出する．これにより化学的な作用が働き，モンモリロナイトが液相に溶解したり他の物質に化学変質してしまうような問題が発生する．モンモリロナイトが減少することが地下の処分場にどのような影響を与えるのか，その挙動をより明確に表現するために既往の実験から判明したベントナイトの特性を反映したモデルを使用し，発展させるべく弾性論，また新たに弾塑性論的な観点からもベントナイトについて検討し，変質のシミュレーションから処分場に与える影響を力学的に考察し，処分場の安全性の向上を目的とする．

キーワード：飽和ベントナイト，モンモリロナイト，固相体積変化率，化学変質

1. 背景

我々人類は、これまで原子力発電によってエネルギーの多くを賄い、利用してきた。発電後に発生する放射性廃棄物を人間の生活環境から隔離するために地層処分が検討されている。その際、廃棄体を覆う緩衝材としてベントナイトという粘土鉱物が注目されている。ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトという物質の膨潤性、難透水性は緩衝材として大変有能であるが、長期的な地下水の影響により処分場内から発生する高アルカリ水溶液によってモンモリロナイトが溶解・変質してしまう。本研究では、その作用によって処分場内で起こる力学的挙動を明確するためシミュレーションを行い、安全性の検討を行う。

2. ベントナイトについて既往のモデル

ベントナイトの研究によって、圧密やせん断が行われ膨潤やダイレイタンスの特性が解明されてきた。飽和ベントナイトの1次元圧密試験からモンモリロナイト含有率をパラメータにした圧密線を図1に示す。この圧縮線上に応力状態があるような弾性的なモデル化が行われ以下のように表される。

$$e = 0.65 - \lambda \ln \frac{\sigma'}{0.14 \exp(0.06 \times \alpha_{\text{mon}})} \quad (\text{式 1})$$

ただし、 e :間隙比、 λ :圧縮指数、 σ' :基準応力、 α_{mon} :モンモリロナイト含有率(%)である。

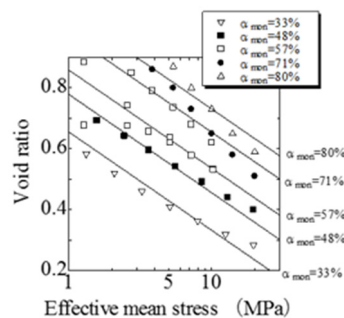


図1 飽和ベントナイトの圧縮線^[1]

3. 固相・液相間の変質現象

(1) 超長期的に起こるベントナイトの化学変質において、従来の土質力学の概念では土粒子の間隙の変化と体積の変化の関係は一意であったが、ベントナイト緩衝材が高アルカリ性水溶液によってイオン化し他の物質に変質、溶解することで化学的にモル定数の関係から固相部分の体積割合も変化してしまう(図2)。この複雑な現象によってこれまでの一般的なひずみの概念とは異っていて、固相の割合の変化を考慮できる新たなパラメータを導入する必要がある。そこで固相体積変化率 α を導入し変質の前後の固相部分について $V_{s2} = \alpha V_{s1}$ と表すことができる。

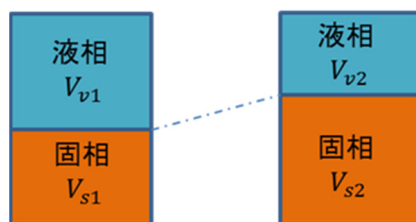


図2 ベントナイトの変質における固相・液相間の変化

(2)実際のベントナイトはモンモリロナイトの他にも、様々な鉱物で構成されており、複数の鉱物における複雑な固相と液相の変質現象を検討しなければならない。森本^[2]によって化学反応に関与する各物質の諸量から変質に伴う新たな固相体積変化率や土粒子密度の導出が定式化された。

$$\alpha = 1 + \sum_l \sum_k (\eta_l - 1) \frac{\rho_{s-ini}}{\rho_k} \alpha_{k-ini} \beta_{kl} \quad (\text{式2})$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \left[1 + \sum_l \sum_k \left(\eta_l \frac{\rho_l}{\rho_k} - 1 \right) \alpha_{k-ini} \beta_{kl} \right] \quad (\text{式3})$$

ただし、 η_l :生成物lに変質した際の体積増加率、 α_{k-ini} :鉱物kの初期含有率、 β_{kl} :鉱物kが生成物lに変質した割合である。

4. 弾塑性モデルの検討

一般的な土において、堆積後時間を経過すると二次圧密やセメンテーションなど様々な作用を受け粘土の剛性や圧密特性に影響を及ぼすことが考えられる。これは年代効果と呼ばれ地盤の強度が変化し e-logp 線では図3のように影響を受ける。処分場のベントナイトも数万年規模で考えるとこの年代効果の影響を受けることが予想されるので既往の弾性的なモデルだけでなく、より複雑な弾塑性的なモデル化を行っていく必要がある。弾性と弾塑性のモデルのイメージとしては図4,5のようにモンモリロナイト含有率が変化すれば図1における圧縮線上において線上まで応力状態が移動するものを弾性的とすれば、年代効果などによる長期的な作用によってより自由な応力状態を想定しうるためのモデルが弾塑性状態であり図のようになる。

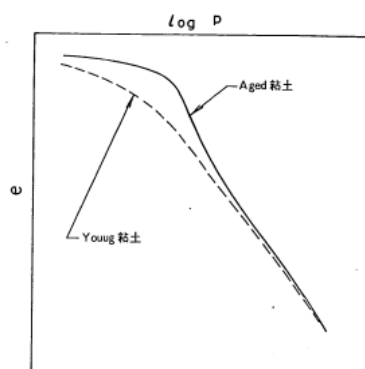


図3 年代効果の有無による e-logp 線^[3]

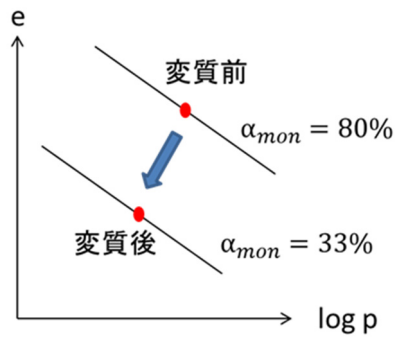


図4 弾性モデルの応力状態

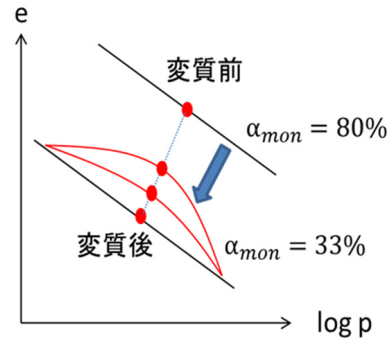


図5 弾塑性モデルの応力状態

弾塑性モデルの概要を図6に示す。固相体積変化率を用いた体積ひずみとの関係より

$$\varepsilon_v = 1 - \frac{\alpha(1+e)}{1+e_0} \quad (\text{式 4})$$

$$e = (1 - e_i) \frac{1 - \varepsilon_v}{\alpha} - 1 \quad (\text{式 5})$$

が得られる。この e - ε_v 線上において、化学変質によって固相体積変化率が変化した際に間隙比と体積ひずみの対応の変化(図6の平行線の傾き)をパラメータ C_α として導入する。このように e - ε_v 線と e - $\log p$ 線で弾塑性的に応力状態を表現するもので、モデルとしては

$$\lambda = \frac{C_\alpha + (1+e_0)}{C_\alpha \alpha + (1+e_0)} \lambda_0 \quad (\text{式 6})$$

$$\kappa = \frac{C_\alpha + (1+e_0)}{C_\alpha + (1+e_0)} \kappa_0 \quad (\text{式 7})$$

の式を導入することで、変質による固相体積変化率の変化に伴ってペントナイトの材料の剛性が変化する様子が e - $\log p$ 線上で表現されることになる。

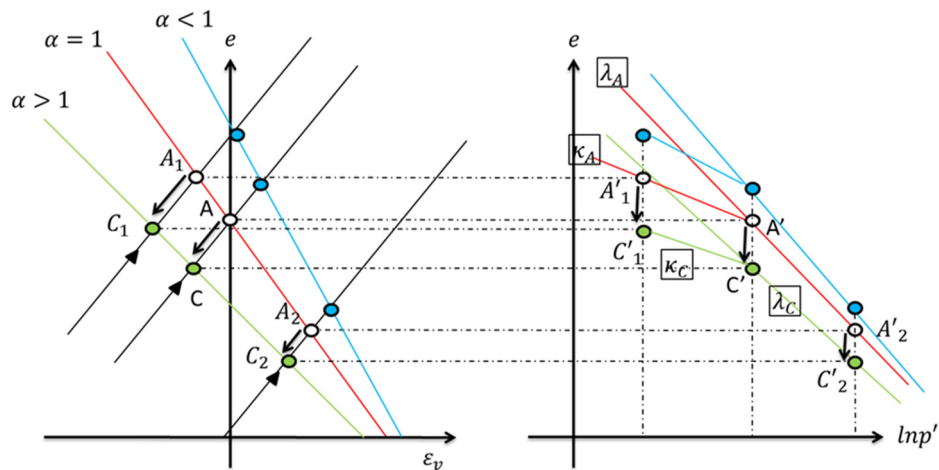


図6 弾塑性モデルの概要

この弾性モデルと弾塑性モデルで処分場の長期的な変質シミュレーションを行いその挙動を検討していく。

5. 長期化学変質

TRU廃棄物の実際の処分場を想定した要素シミュレーションをDACSARを用いて行う。想定されている円柱状の施設において、モルタル層とベントナイト層の一断面を抽出した図7の領域にて解析を行う。ベントナイト層で初期の乾燥密度が均一な場合と三層に不均一に分布する場合の2パターンを比較する。これは処分場の建設の過程における初期の密度の分布によってその後の長期的な変質の履歴に影響するかを比較検討するためである。上部程締め固めの影響を受けて密度が大きくなるという想定で配置している。モンモリロナイトが変質する物質としてはクリノプチロライトという生成物を検討する。クリノプチロライトは処分場の設計条件からモンモリロナイトが変質する可能性のある物質の1つである。他にも変質しうる物質はいくつか挙げられているが、クリノプチロライトはモル体積が大きく、その変質過程において化学的に体制膨張が大きく、処分場により大きな影響を与えると想定できるので安全性の検討においてその挙動を想定しておく必要があるであろう。緩衝材のモンモリロナイト含有率が33.6%から減少した分が全てクリノプチロライトに変質したものとする。

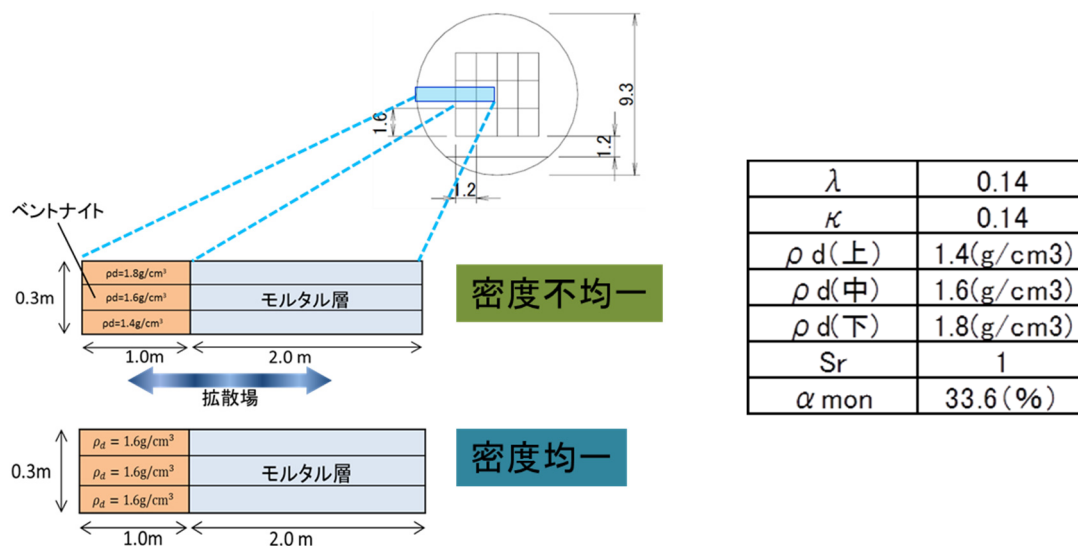


図7 解析断面とパラメータ

以下に解析結果を示す。図8と図9にはベントナイト緩衝材の密度均一な条件で弾性モデルと弾塑性モデルの解析結果を示す。モンモリロナイト含有率の変化が化学解析によって明らかになり、式2,3より変質後の固相体積変化率と土粒子密度が導出できる。これらを入力値として力学解析を行い、間隙比、有効応力、体積ひずみを出力する。解析結果は解析断面のうちベントナイト層の1m部分のみを抽出している。10万年後までの変質によりモルタル層に接している右端からモンモリロナイトが減少していき13%まで至っている。また左端でも減少しているのが分かる。これは左端側の岩盤付近に化学解析の条件で他の物質が浸透してき堆積してしまっていることが原因であり、他の物質の割合が増加したので相対的にモンモリロナイトが減少したように出力されているが、実際は量に変化は無い。モンモリロナイト含有率の変化に依存して含有率が減少すれば固相体積は増加しその分土粒子の密度が緩くなり小さくなる。土粒子が膨張すると

間隙が小さくなり有効応力が上昇する。体積ひずみは膨張するような関係性となる。

弾性モデルと弾塑性モデルの結果を比較すると、含有率の変化はあまり変わらないが特に弾塑性モデルにおいて間隙比の減少が大きいことが分かる。この違いは弾塑性モデルにおいて C_α の値に間隙比が依存していることになる。このパラメータの値をいくりにするかは検討する必要がありモデルの発展につながるであろう。

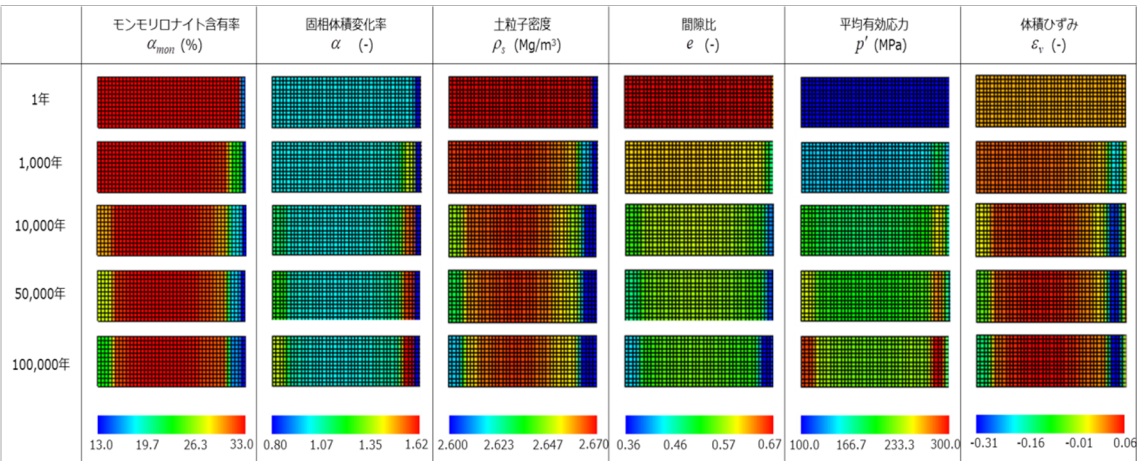


図 8 密度均一/弾性解析結果

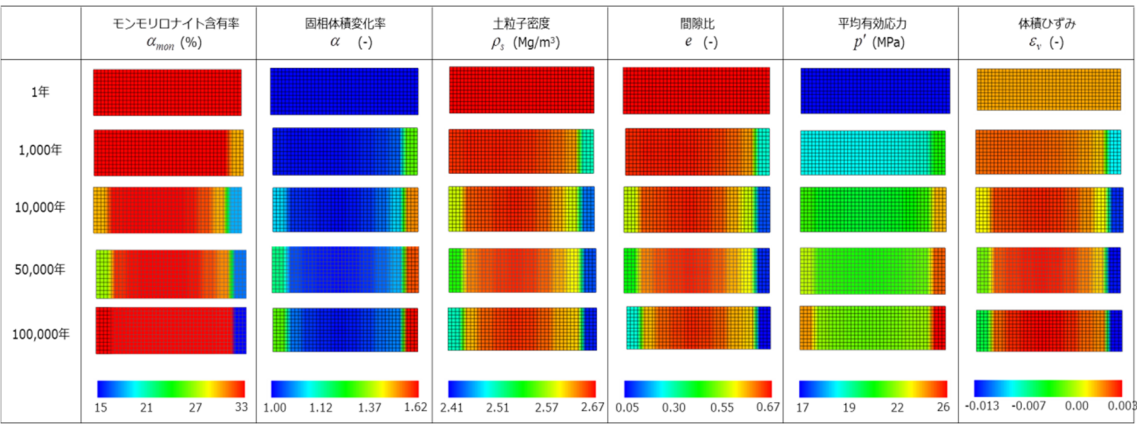


図 9 密度均一/弾塑性解析結果

図 10 と図 11 は初期の乾燥密度が不均一な条件での弾性解析と弾塑性解析の結果である。均一な場合と比較すると、密度の違いによって鉛直方向に変質の進行履歴が異なり底部の方がより内側まで変質しているのが見て取れる。弾性モデルに比べて弾塑性モデルの方が応力や体積ひずみの変化が小さくなっているが、密度均一の場合と同様に間隙比の減少が大変大きく弾性モデルとの大きな違いである。 C_α の値によって変質後の λ や κ の変化が自由に与えることができるので、 e - $\log p$ 線上での間隙比の値が大きく変化することになる。まとめとして弾性と弾塑性で比較するには条件が違いすぎ、別の議論で考察していく必要がある。より柔軟なベントナイトの変質現象の表現には弾性、弾塑性の両方のモデルを上手く発展させる必要があるであろう。

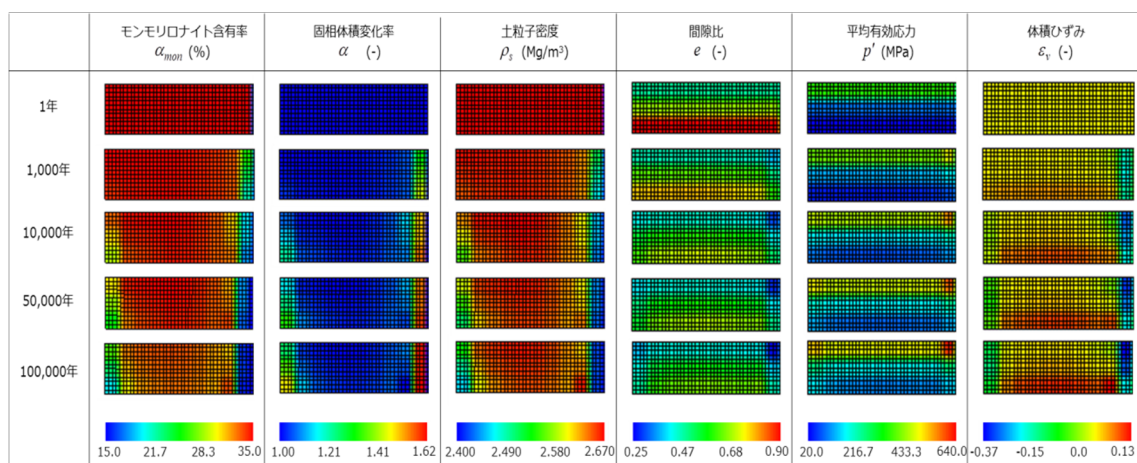


図 10 密度不均一/弾性解析結果

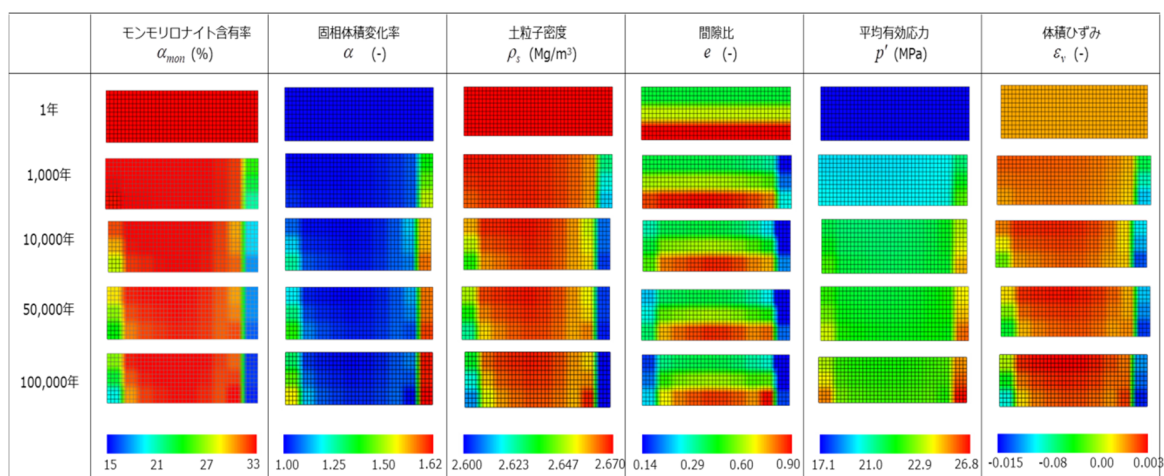


図 11 密度不均一/弾塑性解析結果

参考文献

- [1]高山裕介：ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質評価，博士論文，2014
- [2]森本晃樹：ベントナイト緩衝材における化学変質を考慮した力学モデル，卒業論文，2014
- [3]高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現：港湾技術研究所報告
- 著者：1) 神藤卓哉，工学研究科市民工学専攻，学生；2) 飯塚敦，都市安全研究センター、教授；3) 橘伸也，都市安全研究センター、講師

Long-term assessment of behavior of Bentonite buffer considering chemical alteration

Takuya SHINTO

Atsushi IZUKA

Shinya TACHIBANA

Abstract

We have supplied and used the energy by nuclear power generation. Waste including radioactivity occurs in the process of fuel reprocessing. we are planning to dispose these radioactive waste underground. To protect waste Bentonite materials are used as buffer. The swelling properties of bentonite are preferred as buffer. But in the underground alkaline aqueous solution leak from concrete materials under the influence of groundwater. Alkaline aqueous solution causes chemical changes bentonite into other substances. By chemical alteration, various mechanical effects occur in the disposal cite. In this study, it aims to analyze long-term behavior considering chemical alteration.

©2017 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.