

長期的化学変質作用を考慮するためのベントナイト緩衝材の力学モデル化

神戸大学 学生会員 高山 裕介

神戸大学 学生会員 ○鶴見 修平

神戸大学 正会員 飯塚 敦

神戸大学 正会員 河井 克之

鹿島建設株式会社 正会員 小林 一三

公益財団法人原子力環境整備促進資金管理センター 非会員 大和田 仁

1. はじめに

地層処分施設でのベントナイト材料は、長期的にコンクリート材料から高アルカリ水溶液が流入し、固相（土粒子）が化学的な作用により液相に溶け込むことや、固相自体が別の材料に変質することが考えられる。固相（土粒子）が溶解や変質を起こすと、土粒子の密度や体積、間隙水の密度や体積、さらには応力が変化することが考えられる。このような現象を記述できる力学的な数理モデルを構築していく必要がある。ここではその第一歩として、固相の変質や固相の体積変化を考慮できる応力-ひずみ関係を導出し、簡単な要素シミュレーションを行った。

2. ひずみ-間隙比関係

従来の土質力学の考え方では、間隙の変化量と体積ひずみは一对一の関係であるが、固相の体積が変化する場合、そうではなくなる。まず、初期体積を $V_i (=V_{vi} + V_{si})$ 、現在の体積を $V (=V_v + V_s)$ とする (図-1)。ここで、 V_{vi} : 間隙の初期体積、 V_{si} : 固相の初期体積、 V_v : 間隙の体積、 V_s : 固相の体積である。従来であれば、固相の体積は不変であるため、 $V_s = V_{si}$ であったが、固相の体積変化現象を考慮するために、

$$V_s = \alpha V_{si} \quad (1)$$

と定義する。ここで、 α は溶解や変質による固相体積の変化率とする（初期状態では $\alpha=1$ ）。従って体積ひずみは、圧縮を正とすると、

$$\varepsilon_v = \frac{V_i - V}{V_i} = 1 - \frac{V_s + V_v}{V_{si} + V_{vi}} = 1 - \frac{\alpha(1+e)}{1+e_i} \quad (2)$$

となる。ここで e_i : 初期間隙比、 e : 間隙比である。

3. 構成式

ここでは簡単のため、ベントナイト材料を一次元非線形弾性体とし、 $e - \ln \sigma'$ 関係上において直線を仮定する以下の式を用いる。

$$e - e_0 = -\lambda \ln \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \quad (3)$$

ここで、 e_0 : 基準間隙比、 λ : 圧縮指数、 σ' : 有効応力、 σ'_0 : e_0 における応力である。ベント

ナイトの力学特性（膨潤特性や圧密特性等）に大きな影響を与える因子として、モンモリロナイト含有率や層間陽イオンの種類やモンモリロナイト以外の鉱物の種類等が考えられる。ここでは剛性の変化を表す物理量に、モンモリロナイト含有率を用いる。図2に、モンモリロナイト含有率の異なるベントナイト材料に対する一次元圧密試験の結果を示す。図から、モンモリロナイト含有率が小さい材料ほど圧密線が左下に存在しているのが確認できる。

キーワード ベントナイト 変質現象

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 神戸大学都市安全研究センター・地盤環境リスク評価研究室 Tel:078(803)6029

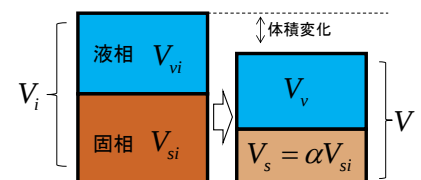


図-1 体積変化の概念図

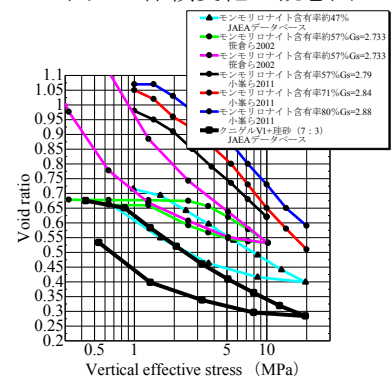


図-2 一次元圧密試験

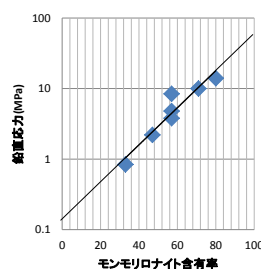


図3 含有率と鉛直応力

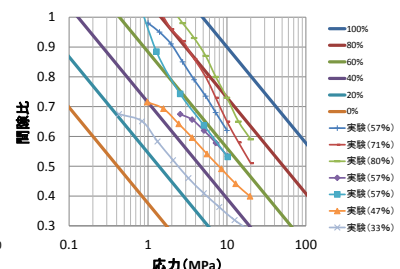


図-4 フィッティング結果

ここで、間隙比が 0.65 における応力値をモンモリロナイト含有率ごとに整理すると、図 3 のようになる。図には最小二乗法により求めたフィッティング関数も示している。フィッティング関数は、

$$\sigma'_{e=0.65} = 0.1405 \times \exp(0.0605 \times \alpha_{\text{mon}}) \text{ (MPa)} \quad (4)$$

である。ここで、 $\sigma'_{e=0.65}$ ：間隙比が 0.65 における応力、 α_{mon} ：モンモリロナイト含有率である。式 (3) に式 (4) を代入する。代入する際、 $e_0 = 0.65$ 、 $\sigma'_0 = 0.1405 \times \exp(0.0605 \times \alpha_{\text{mon}}) \text{ (MPa)}$ とする。よってモンモリロナイト含有率-間隙比-有効応力関係は、

$$e = 0.65 - \lambda \ln \frac{\sigma'}{0.1405 \times \exp(0.0605 \times \alpha_{\text{mon}})} \quad (5)$$

となる。ここで $\lambda = 0.14$ を用いて、等モンモリロナイト含有率線を描くと図 4 のようになる。また式 (5) を式 (2) に代入すれば応力-ひずみ関係を得る。

4 要素シミュレーション (例えばアナルサイム化)

ここではアナルサイム化を例に、変質による応力変化を計算する。アナルサイム化とは、以下に示すように、モンモリロナイト分子に水酸化ナトリウムが作用し、アナルサイム分子が二つ生成されることである。



ここで、 $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ：モンモリロナイト、 NaOH ：水酸化ナトリウム、 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6(\text{H}_2\text{O})$ ：アナルサイムである。モンモリロナイト及びアナルサイムの土粒子比重、体積は表 1 のようになっている。表 1 より、モンモリロナイト 1 分子がアナルサイム 2 分子になると体積は 1.475 倍されることになる。よってベントナイトのアナルサイム化は、図 5 のように表現できる。ここで、図中の β ：アナルサイム化率、 V_c ：その他の鉱物の体積、 ρ_c ：その他の鉱物の土粒子密度、 V_{ana} ：アナルサイムの体積、 W_{ana} ：アナルサイムの質量、 ρ_{ana} ：アナルサイムの土粒子密度、 V_{mon} ：モンモリロナイトの体積、 W_{mon} ：モンモリロナイトの質量、 ρ_{mon} ：モンモリロナイトの密度、である。よって、固相の体積変化率 α 、モンモリロナイト含有率 α_{mon} は、初期モンモリロナイト含有率 $\alpha_{\text{mon-ini}}$ を用いたアナルサイム化率 β の関数として、式 (6)、(7) ように表される。これらを式 (2)、(5) に代入すればアナルサイム化率-応力-ひずみ関係が得られる。例えば、クニゲル V1 ($\alpha_{\text{mon}} = 57\%$, $\alpha = 1$) を想定し、初期間隙比を 0.68 としたとき、体積が固定された条件下 ($\varepsilon_v = 0$) でのアナルサイム化に伴う応力変化は図-6 になる。

$$\alpha = 1 + \frac{0.475\beta}{1 + \frac{\rho_{\text{mon}}}{\rho_c} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{mon-ini}}} - 1 \right)} \quad (6),$$

$$\alpha_{\text{mon}} = \frac{\rho_{\text{mon}}(1-\beta)}{\rho_{\text{mon}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{mon-ini}}} - 1 \right) + 1.475\rho_{\text{ana}}\beta + \rho_{\text{mon}}(1-\beta)} \quad (7)$$

5. おわりに

ここではモンモリロナイト含有率や固相の体積変化で力学挙動が変化するようにモデル化し、簡単な要素シミュレーションを実施した。今後はモデルの更なる精緻化を目指すとともに、複雑な境界値問題を解けるように構成式以外の支配方程式についても導出していきたい。またそれと同時に化学との連成手法についても構築していきたい。本報告は経済産業省から公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが受託した「平成 24 年度 TRU 廃棄物処分技術：人工バリア長期性能評価技術開発 -人工バリアの長期挙動の評価-」の成果の一部である。

参考・引用文献 1) 笹倉剛, 岬柳幹雄, 岡本道孝：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, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNCTJ8400-2002-025, 2002 2) 石川博久, 石黒勝彦, 並河努, 菅野毅：緩衝材の圧密特性, 動力炉・核燃料開発事業団研究開発報告書, PNC TN8410 97-051, 1997 3) 高治一彦, 鈴木英明：緩衝材の静的力学特性, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TN8400 99-041, 1999 4) 石橋直樹, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 森拓雄, 伊藤弘志：ベントナイトの圧密特性に及ぼすモンモリロナイト含有率の影響, 第 46 回地盤工学会研究発表会, 2011

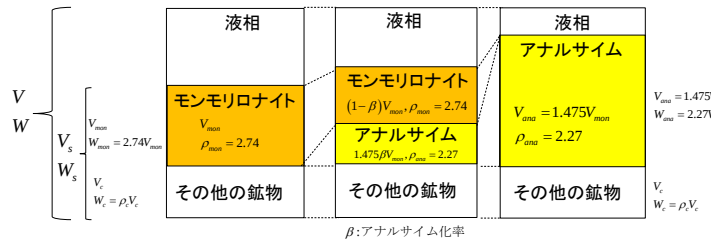


図-5 アナルサイム化

表 1 土粒子比重, 1mol あたりの体積

	モンモリロナイト	アナルサイム
土粒子比重(g/cc)	2.74	2.27
体積(cc/mol)	131.50	96.98

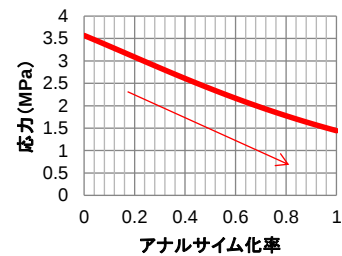


図-6 アナルサイム化に伴う応力変化