

膨潤性地山中のトンネルに対する修正 Cam-Clay モデルによる安定解析

○東北大学工学部 学生員 山本 颯人
 東北大学大学院工学研究科 正員 京谷 孝史
 東北大学大学院工学研究科 正員 松原 成志朗
 東北大学大学院工学研究科 学生員 劉 曉東

1. はじめに

近年、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイト類を含む地山において、スメクタイト類の吸水膨潤によりトンネルなどの地中構造物が破壊される問題が起きている。この膨潤性地山中のトンネルの破壊問題は地山の膨潤に対する適切なモデル化が必要になる。本研究では弾塑性力学モデルとして粘土の修正カムクレイモデルを採用し、それと組み合わせるスメクタイトの膨潤モデルの構築を行った。

2. 膨潤性粘土鉱物と膨潤メカニズム

一般的に粘土鉱物の主体は SiO₂ と表される珪酸塩鉱物であることが知られている。多くの粘土鉱物はこの珪酸塩鉱物が二次元的に連続するために、層状珪酸塩鉱物とも呼ばれる。スメクタイト類の代表的な粘土鉱物であるモンモリロナイトを例として膨潤のメカニズムを示す。モンモリロナイトは Si⁴⁺ を四つの O²⁻ が取り囲んで四面体を構成する四面体シート二枚と Al³⁺ が八つの陰イオンに取り囲まれて構成する八面体シート一枚が組み合わせられた複合層が積み重なった結晶構造を持つ。しかし八面体シートの一部の Al³⁺ が Mg²⁺ に置換される同型置換により、複合層間で電荷の不足が生じる。この電荷の不足により層間に Na⁺, K⁺ などの陽イオンを吸着する。高い水和性を持つ陽イオンを吸着することで、吸水によって層間の距離が増加し体積の増加につながる。図-1 は、吸水膨潤反応のイメージである。

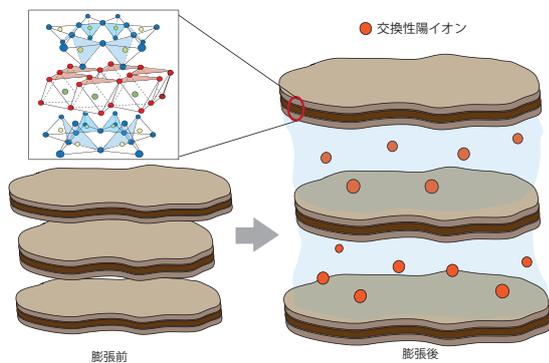


図-1 吸水膨潤反応のイメージ

3. 膨潤実験

本研究では、スメクタイトの膨潤モデルを構築する上でスメクタイトの膨潤性を定量的に把握するために膨潤によ

る体積増加を測定できる特殊な試験機を作成し、スメクタイト類の代表的な粘土鉱物であるモンモリロナイト粉末試料の膨潤実験を行った。まずゴムスリーブにモンモリロナイトを入れ、試験前に真空状態にして供試体を作成し、水圧と供試体に掛ける圧力を変えて膨潤実験を行った。膨潤実験結果を図-2 に示す。図-2 は、膨潤実験開始からの膨潤量の変化が見られなくなるまでの膨潤量の変化を示している。開始直後は膨潤率が非常に高く、徐々に膨潤率が低くなりバラつきはあるものの最終的に一定値に近づいていくことが分かる。

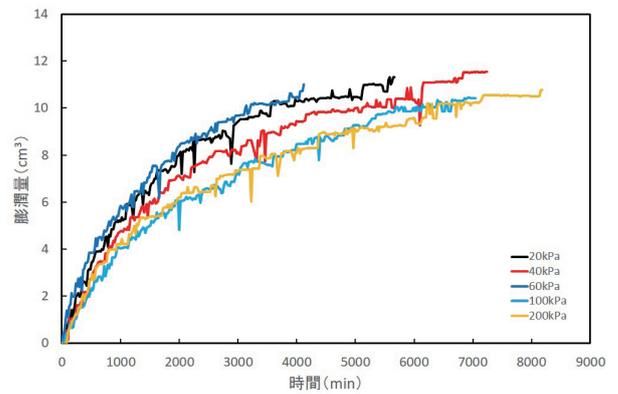


図-2 膨潤実験結果

4. スメクタイト膨潤モデル

図-3 に示すように膨潤中のスメクタイトは粘土鉱物と層間水からなる「系」である。吸水膨潤するスメクタイトは見えない半透膜で包まれていて、間隙水が半透膜を透過して層間水として取り込まれる。その水の移動はスメクタイトが周囲から受ける拘束力に依存すると考えられる。

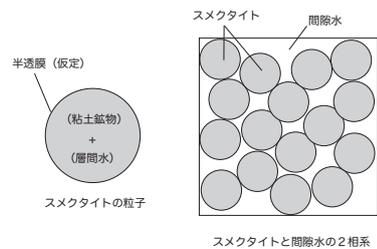


図-3 スメクタイトの基本概念

$$\mu_w(T, \sigma_m; N), \sigma_m = \frac{1}{3} \text{tr} \boldsymbol{\sigma} \quad (1)$$

ここで、上式の膨潤に関するポテンシャルはスメクタイト鉱物を単位質量 ($N_s = 1$) を含んだ質量 ($1+N$) のポテンシャルである。膨潤実験から膨潤挙動は間隙水圧に依存しないことが確認できたので、スメクタイトの膨潤ポテンシャルは平均有効応力の関数として表すことが妥当と考える。また、間隙水の化学ポテンシャルを基準として考えると水の移動が止まるつり合い状態は以下のように導出される。

$$\mu_w(T, \sigma'_m; N) = 0 \quad (2)$$

スメクタイト内部への水の移動速度がポテンシャルのつり合い状態からの隔たりに比例すると仮定すると、水の移動速度は以下のように導出される。

$$\frac{dN}{dt} = \gamma \cdot \mu_w(T, \sigma'_m; N) \quad (3)$$

膨潤挙動に関しては次の微分方程式によって近似的に表すことができるため、膨潤に関するポテンシャルは以下のように設定できる。

$$\frac{dN}{dt} = \alpha(\beta - N(t)) \quad (4)$$

$$\mu_w(T, \sigma'_m; N) = \lambda \cdot \frac{V_{max}}{N_{max}} (N_{max} - N) \quad (5)$$

この微分方程式の解により 40kPa の圧力状態での膨潤挙動を近似した結果を図-4 に示す。

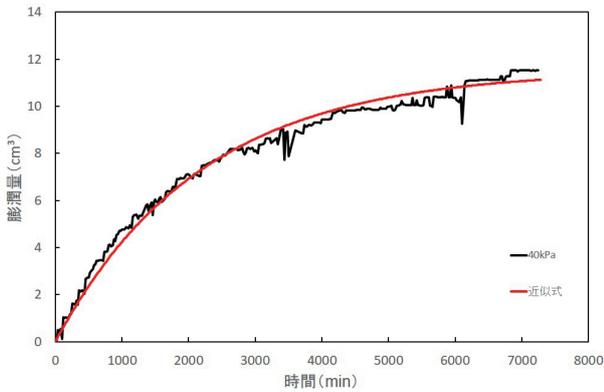


図-4 膨潤挙動の近似解との比較

単位体積当たりの Gibbs 自由エネルギーを次のように仮定する。

$$\rho(N)g(\sigma'_{ij}, N) = -\frac{1}{2} \left(\frac{s_{ij}s_{ij}}{2\mu(N)} + \frac{\sigma_m^2}{\kappa(N)} \right) \quad (6)$$

この Gibbs 自由エネルギーを Legendre 変換すると Helmholtz 自由エネルギーが得られる。この Helmholtz 自由エネルギーを弾性ひずみで微分することで弾性応力ひずみ関係が導出される。

$$\sigma'_{ij} = \rho(N) \frac{\partial \psi(\varepsilon_{ij}^e, N)}{\partial \varepsilon_{ij}^e} \quad (7)$$

また、供水膨潤による膨潤ひずみ速度は単位時間にスメクタイト粒子骨格が単位体積当たりに取り込む層間水の量に等しいので、次式で導出できる。

$$\dot{\varepsilon}_{sw} = \frac{\dot{N}}{1+N} \quad (8)$$

(8) 式を用いて異なる一定圧力状態での膨潤ひずみの時間変化を図-5 に示す。

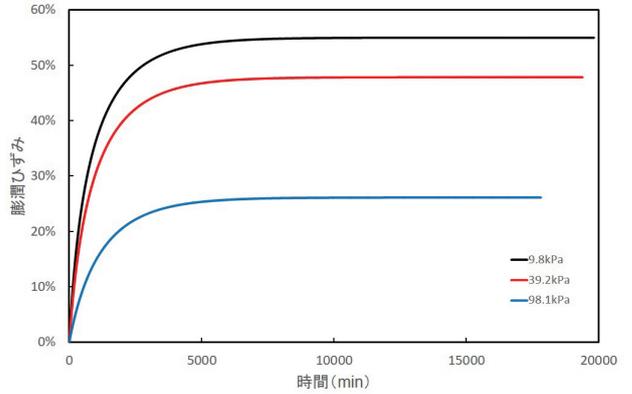


図-5 膨潤ひずみの時間変化

5. 修正 Cam-Clay モデル

修正 Cam-Clay モデルの降伏関数は次式になる。

$$f(p', q) = \frac{1}{1+e_0} \left[\frac{N-\Gamma}{\ln 2} \ln \left\{ \frac{M^2 + (q/p')^2}{M^2} \right\} + (\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}) \ln \frac{p'}{p'_0} \right] \quad (9)$$

ここで、 p' 、 q は平均有効応力とせん断応力で次式で表す。

$$p' = \frac{1}{3} \text{tr} \sigma' \quad (10)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}} S \cdot S, S = \sigma' - p' I \quad (11)$$

N 、 Γ 、 $\tilde{\lambda}$ は粘土の材料定数、 $\tilde{\kappa}$ は弾性定数、 M は限界状態の応力比である。材料定数間の関係を以下に示す。

$$N - \Gamma = \ln 2(\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}) \quad (12)$$

6. 弾塑性解析

修正 Cam-Clay モデルの降伏関数とスメクタイト膨潤モデルの弾塑性構成則を用いて、弾塑性解析を行う。弾塑性解析では Return-Mapping のアルゴリズムを利用する。

7. 結論

本研究では、膨潤実験を通してスメクタイト類の膨潤挙動のモデル化を行った。詳細な結果は当日発表する。

参考文献

- 1) 須藤 俊男：粘土鉱物学，岩波書店，1974。
- 2) H. Komine, N. Ogata :Experimental study of swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal. *Soils And Foundation*, 1999.
- 3) T.Al-Yaqoub, J. Parol, D. Znidarcic :Experimental investigation of volume change behavior of swelling soil. *Applied Clay Science*, 2017