

結晶層間の電気-化学-力学作用と内部構造劣化を考慮した膨潤性岩盤の有限要素解析

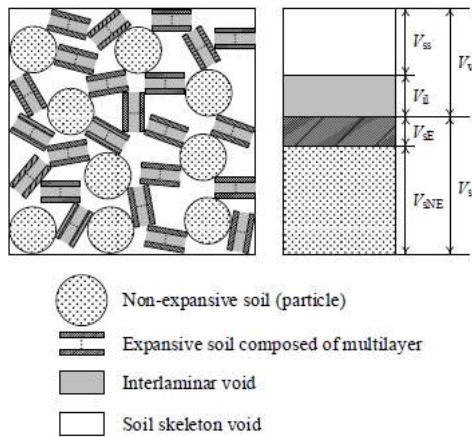
○東北大学工学部 学生員 星 啓太郎
 東北大学大学院工学研究科 正 員 山田 正太郎
 東北大学大学院工学研究科 正 員 京谷 孝史

1. はじめに

膨潤性粘土鉱物を含む岩盤は、間隙流体の化学組成が力学挙動に影響を及ぼす。岩盤の膨潤現象はトンネル掘削等で問題を生じており、定量的予測が必要である。膨潤性岩盤の膨潤現象を表現するためには、膨潤性粘土鉱物の表面での電気-化学-力学的な現象と岩盤の剛性の高さおよび劣化を考慮する必要がある。本研究では、結晶層間の電気-化学-力学作用を考慮した弾塑性モデルとセメンテーションと塑性変形に起因するその劣化を考慮した Cam-clay model を融合することで、膨潤性岩盤の力学モデルを提案する。

2. 結晶層間の電気-化学-力学作用の考慮

本研究では、膨潤挙動を表現するために、Kyokawa et al.¹⁾ が提案した結晶層間の電気-化学-力学作用を考慮した弾塑性モデルを力学構成モデルとして採用する。このモデルでは、膨潤性粘土の間隙構造を図-1 に示すような土骨格で形成される間隙と膨潤性粘土鉱物の結晶層間の層間間隙の2つで構成される二重間隙構造としている。

図-1 体積構成¹⁾

このモデルでは、間隙比（全体間隙比 e 、層間間隙比 e^{il} 、土粒子骨格間隙比 e^{ss} ）および二重間隙構造を考慮した体積ひずみを以下のように定義する。

$$e = \frac{V_v}{V_s}, e^{il} = \frac{V_{il}}{V_s}, e^{ss} = \frac{V_{il}}{V_s} \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{\Delta V_{ss} + \Delta V_{il}}{V_{s0} + V_{ss0} + V_{il0}} = \varepsilon_v^{ss} - \theta^* \frac{d - d_0}{d_0} \quad (2)$$

$$\text{ただし } \theta^* = \frac{e_0^{il}}{1 + e_0^{ss} + e_0^{il}}$$

ここで、 d は結晶層間の距離、 d_0 は初期状態における結晶層間の距離である。

以上から、全体のひずみ量を、土骨格のひずみ量と結晶層間距離の変化に伴う等方的なひずみ量の和で以下のように定義する。

$$\varepsilon = \varepsilon^{ss} - \frac{1}{3} \theta^* \frac{d - d_0}{d_0} I \quad (3)$$

また、電気-化学-力学作用を考慮した弾塑性モデルでは、結晶層間にはたらく力のつり合いを考えることで層間の挙動を表現している。結晶層間に作用する力として、浸透圧 f_r 、van der Waals 力 f_a 、水和力 f_h 、有効応力 f_e を考え、次のようなスカラー関係式を与える。

$$F^*(c, d, \sigma) = f_a(d) - f_r(c, d) - f_h(d) + f_e(\sigma) = 0 \quad (4)$$

ここで、 c は層間間隙の溶液濃度である。浸透圧、van der Waals 力、水和力はいずれも層間距離に対して単調減少関数であるが、浸透圧は層間間隙の溶液濃度によっても変化する。これによって、層間間隙流体の化学組成の変化に依存する力学挙動を表現する。以上のつり合い式に加えて、本研究では、3. で説明する内部構造の劣化を考慮した Cam-clay model を用いて土骨格の挙動を表現する。

3. 剛性と内部構造劣化の考慮

膨潤挙動に加えて、膨潤性岩盤の剛性の高さと内部構造劣化を考慮するために、本研究では、Yamada et al.²⁾ が提案したセメンテーションとその劣化を考慮した Cam-clay model を導入する。Yamada et al. が提案したモデルでは、Cam-clay model における降伏曲面を平行移動させることで、セメント改良土や岩盤が有する引張強度を再現している。同時に、降伏曲面全体を平行移動させることにより、見かけの拘束圧が高くなり、初期剛性の高さを表現できるモデルになっている。さらに、塑性変形に起因して降伏曲面の原点からのズレが解消されることで、塑性変形が進行すると、セメント改良土が土の挙動に近づいていくことを再現している。

具体的には、現有効応力 p に平行移動量 α を加えた修正応力 $\bar{p}$ を用いてモデルを記述する。

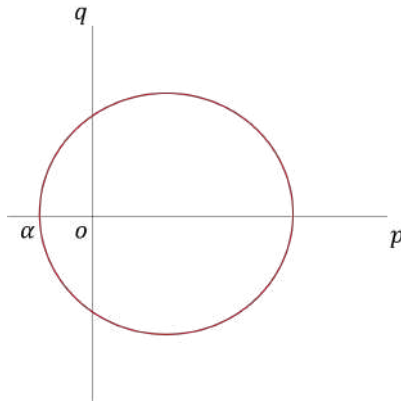


図-2 降伏関数の平衡移動

以上より、結晶層間の電気-化学-力学作用と初期剛性の高さおよび剛性の劣化を考慮することで、膨潤性岩盤の力学モデルを構築した。

4. トンネル掘削および膨潤解析による提案モデルの検証

(1) 解析手法および解析条件

提案モデルを有限要素解析コードに実装してトンネルの掘削および膨潤解析を行った。図-3 に示す解析モデルにおいて、初期状態におけるトンネル内空に作用する不平衡応力を計算し、その不平衡力を除荷していくことでトンネル掘削解析を行う。また、除荷後に全要素の間隙溶液濃度を低下させることで膨潤解析を行う。解析条件として、平面ひずみ状態を仮定し、鉛直荷重 1000kPa を作用させた。

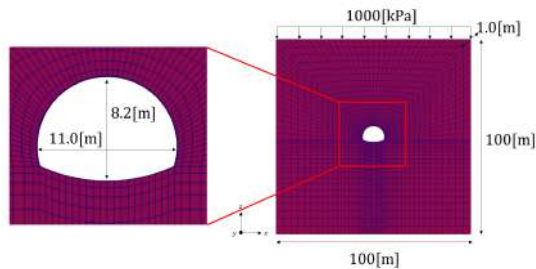


図-3 有限要素モデル

(2) 数値解析結果

図-4 に膨潤解析後のセメンテーションおよび膨張量のコンター図を示す。トンネル内空下面の变形が見られ、膨潤性岩盤の特徴的な挙動が再現できている。解析領域全体で一様に間隙流体溶液濃度を低下させているが、主にトンネル内空直下など限られた領域で膨潤およびセメンテーションの劣化が進行していることが分かる。提案モデルでは、(4) 式

より、有効応力が小さくなるほど層間距離が大きくなり、膨潤が増大するモデルになっている。したがって、掘削時に主にトンネル内空周りで有効応力が低下することによって、トンネル内空直下などの限られた領域で膨潤が大きくなり、それに伴って、内部構造の劣化が進行していると考えられる。

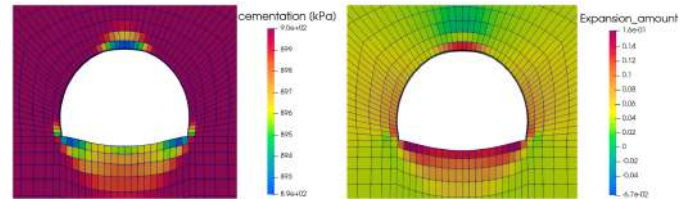


図-4 セメンテーションおよび膨張量の分布図

続いて、トンネル内空下の体積ひずみ分布および鉛直変位分布を図-5 に示す。縦軸に内空下からの深さ、横軸に内空下 10[m] 付近を基準点とした体積ひずみおよび掘削後からの鉛直変位をとっており、体積ひずみは膨張を正としている。図-5 から内空下 5[m] 付近から体積膨張および鉛直変位が急激に上昇していることが分かる。このような分布は膨潤性地山におけるトンネルの変状に類似している。

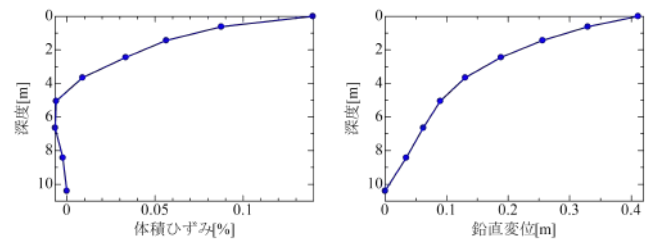


図-5 トンネル内空下の膨張量分布および鉛直変位分布

5. 結論

本研究では、粘土鉱物の結晶層間における電気-化学-力学作用を考慮した弾塑性モデルと、セメンテーションとその劣化を考慮した Cam-clay model を融合することで、膨潤性岩盤の力学モデルを開発した。提案した力学モデルを用いた有限要素解析は膨潤性岩盤の特徴的な挙動を再現している。

参考文献

- 1) Kyokawa, H., Ohno, S., and Kobayashi, I : A method for extending a general constitutive model to consider the electro-chemo-mechanical phenomena of mineral crystals in expansive soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 44, 749-771. [2019]
- 2) Yamada, S., Sakai, T., Nakano, M. and Noda, T : Method to introduce the cementation effect into existing elasto-plastic constitutive models for soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002727 [2021]