

FEMによる膨潤性粘土の力学-水理-化学連成解析

東京大学大学院 社会基盤学専攻 土質地盤研究室 依田 光平

2021年 2月 修士論文 要綱



1. 研究の概要

膨潤性粘土内では、間隙溶液中の陽イオンが粘土の力学的な特性に影響し、力学-水理-化学に関する連成現象が生じる。本研究ではこうした現象を記述する連立支配方程式をFEM（有限要素法）のフレームワークにより解く連成解析コードを開発し、既往実験の再現解析を行うことでその妥当性を確認した。さらに開発コードによって実際の海成粘土地盤を想定した解析を実施し、自然界（図1参照）で見られる膨潤性粘土の化学影響についても考察した。



図1 膨潤性粘土の化学影響による地すべり事例 (イタリア/G.scaringi, 2018)

2. 連成解析コードの開発

飽和膨潤性粘土では土粒子骨格の有効応力は間隙水の影響を受け、間隙水は土粒子と空間的に連続の関係にある。また、間隙水の流動は間隙溶液中の陽イオンを輸送し、イオン濃度を变化させる。イオン濃度の变化は土粒子表面に浸透圧の影響を生じさせて土粒子骨格の挙動に影響を与える（図2）。

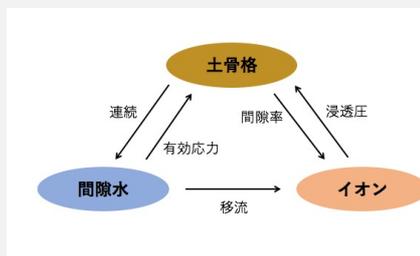


図2 飽和膨潤性粘土における力学-水理-化学連成現象

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = 0$$
 : 力のつり合い式

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{\partial w_i}{\partial x_i} = 0$$
 : 空間の連続式

$$\frac{Dc_a}{Dt} + \frac{\partial(w_i c_a/n)}{\partial x_i} + c_a \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{\partial J_{a_i}}{\partial x_i} = 0$$
 : イオンの質量保存則

σ_{ij} : 全応力テンソル
 x_i : 空間座標ベクトル
 ρ : 材料密度
 g_i : 重力加速度ベクトル
 v_i : 土の速度ベクトル
 w_i : 間隙水流量ベクトル
 n : 土の間隙率
 J_{a_i} : イオンの拡散フラックスベクトル

未知数
 u_i : 土の変位ベクトル
 h_i : 間隙水全水頭
 c_a : イオン濃度

図3 連成現象の支配方程式

本研究ではこうした膨潤性粘土内で生じる連成現象を三つの支配方程式（図3参照）で記述し、これらの支配方程式を強連成の定式化のもと解くFEMコードを開発した。この際、膨潤性粘土の要素挙動の記述には粘土鉱物表面の電気化学的現象を考慮した非線形弾塑性構成モデル（京川ら(2020)、依田(2019)）を適用し、化学影響による体積・強度変化特性を包括的に考慮した。

3. 既往実験の再現解析

開発コードを用いて既往実験（平賀, 2020）の再現解析を行った。実験では飽和膨潤性粘土供試体の両端面からNa⁺を浸透させ、浸透に伴う供試体内部のイオン濃度変化、局所沈下量推移を記録している。再現解析は二次元軸対称条件で行った。図4にイオン濃度変化、沈下量推移を実験と解析と比較して示す。グラフより、開発コードによる再現解析はイオン浸透過程における供試体内の濃度変化、またそれに伴う体積変化傾向を定量的に再現できていることが分かる。

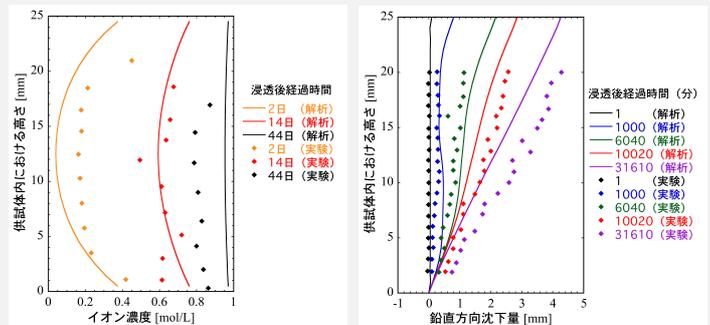


図4 浸透試験中の鉛直方向イオン濃度・局所沈下量分布の時間進展 (実線: 解析結果 / プロット: 実験結果)

4. 実現象を想定した解析

膨潤性粘土を含む海成粘土斜面ではしばしば地すべり被害が報告され、化学影響による粘土の強度低下がその一因ではないかと考えられている。本研究では開発コードを二次元平面ひずみ条件で用いてこうした現象を定性的に再現・考察した。解析ではNa⁺が一樣に分布する緩斜面において、時間経過に伴い地表面にNa⁺が溶脱していくものとする。図5にイオン溶脱後の斜面内の偏差ひずみ分布を示す。解析結果から、実際に化学影響により斜面が崩壊し得ること、また崩壊の箇所や時期は透水性（地中イオン移動特性）により大きく変化することが示唆された。

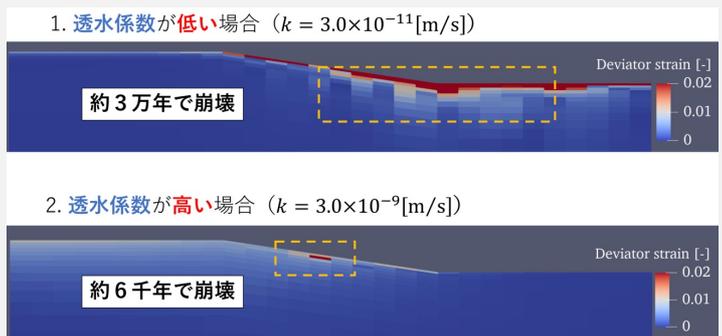


図5 斜面内の偏差ひずみ分布（イオン溶脱後）