

個別要素法による粘土の1次元圧密シミュレーション

佐賀大学 正 員 ○古賀 浩二

正 員 荒牧 軍治

正 員 佐々木 広光

学生員 白髪 崇幸

1. はじめに

個別要素法は、不連続体の力学的特性の解析に対して有用であり、土質力学の分野においても、土の力学的特性を左右する土粒子間の相互作用を研究するのに有用な解析法として知られている。

本研究は Anandarajah(1994, 1996)により提案されたモデルに基づき昨年行った粘土粒子構造体に関わる挙動シミュレーションに、新たに、以下の2つの項目を粒子に働く力として考慮し、粘土粒子がどのような挙動を示すか個別要素法を用いたシミュレートをおこなう。

①独立した粒子の曲げに関する振る舞い

②Van der Waals 吸引力

この2項目の追加により、土の挙動に関して過去に受けた応力の記憶の過程や、圧密時の非線型性を表現可能であることを知る足がかりとする。

2. 粒子間物理化学的応力のシミュレーション

プログラムの処理は、図1に示す通りである。以下に、主な事項について述べる。

(1) 幾何学について

図2に示す様にすべての2粒子間において、“ZOI”と呼ばれる領域を定義する事が本解析に於いて最も重要な事項である。粒子間の相互作用は、“ZOI”内で唯一存在すると仮定する。

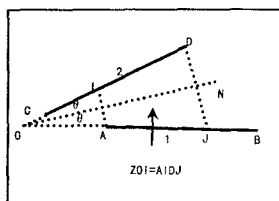


図-2 ZOI の定義

(2) 粒子間に働く反力(Repulsive Force)

粘性粒子は、一般にその表面を負に帯電させており、粒子が電解溶液にある時、溶液中に陽イオンと陰イオンが再分布し、結果的に粒子は、静電気力を受ける。その為、隣り合う2粒子間では、反力が生じる。本研究に於いて、粒子間に発生する反力は、無限に広がった液体中の二つの粒子をモデルとして考える。静電気力の法則により、全ての粒子における反力の合計は、2粒子の中間平面(Mid Plane) Nの垂線方向とし、その値は式(1)の様に計算できる。

$$F_y^R = 2nkKT \int_{\Gamma_m} \left[\cosh \left(\frac{ve\psi}{kT} \right) - 1 \right] dx \quad (1)$$

ここで、 Γ_m は2粒子間の中間にある平面、 k はボルツマン定数、 e は

$$K = \sqrt{\frac{8\pi n_0 e^2 v^2}{\epsilon kT}} \quad (2)$$

電荷、 T は絶対温度、 v 、 n は、イオンの原子価、濃度、 ψ は、それぞれの点における電氣的ポテンシャルである。 K は、標準的な二層厚さの逆数である。標準厚さというのは、単独の陽イオンと陰イオンで形成されている一価の系であり、式(2)として表される。

(3) 粒子間に働く吸引力(attractive Force)

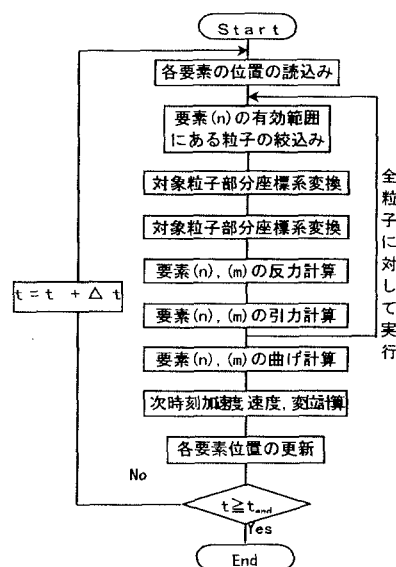


図-1 解析の概略フロー

前述の電氣的反力に加えて、コロイド粒子間に働く吸引 e, n_0, ε, T 力(ファンデルワールス力)を考慮に入れシミュレートを行うこととした。粒子間に働く吸引力も反力と同様等の値に依存するが、最終的に対象

$$F = \frac{L^a}{6\pi \sin 2\theta^a} \sum_{i=1}^8 (-1)^i \times \left[\frac{4}{cX_i} - \frac{1}{X_i^2} - \frac{12(X_i + c)^2}{c^4} \ln \frac{X_i + c}{X_i} \right] \quad (3)$$

とする粒子の大きさ、並びに粒子がなす角度、およびその距離により表すことが可能であり、本研究においては、Anandarajah により紹介されている以下の値(3)を使用した。

ここで X_i は粒子長、粒子の幅並びに粒子間の角度より表される数である。

(4) 粒子に発生する曲げについて

粒子に加わる外力を考える場合、粒子自体は剛体として扱っているため、粒子内部に働く曲げ応力をシミュレートすることができない。本研究では、粒子内部に発生する曲げ応力をプログラム上で実現するため、個々の粒子が、粒子端において他の粒子端と接続することを許し、その接続点に発生する応力を計算

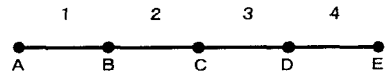


図-3 接続粒子

することにより、粒子に加わる曲げ応力をシミュレートすることとした。図-3の場合、1から4の粒子に関する接点B, C, Dにおける曲げを考慮する。曲げ応力の解析には、曲げ剛体モデルを使用した。

(5) 一次元圧密シミュレーション

本研究では、複数の粒子が、矩形をなす壁の間にあるというものについてシミュレートする。粒子は、基本的に図4にあるように粒子間の接続の無い単独の粒子と、互いに他の粒子と粒子端で接続した粒子の2種類の粒子をランダムで配置させた。壁、粒子の長さは、それぞれ $1.0\mu\text{m}$, $0.2\mu\text{m}$ とした。最初に粒子を配置した後、外力を与えない状態で、すべての粒子において、その変位が一定となった段階を初期状態とし(粒子、壁間の反力が釣り合っている状態、

合力0)、この状態から上部壁を平行に保ったまま一定の速さで動かした。図4に、シミュレートの様子を示す。

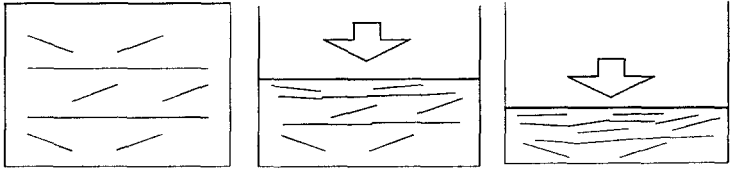


図4-(a)初期状態 図4-(b)圧密途中 図4-(c)圧密後

3. あとがき

昨年行った同様のシミュレーションに、粒子同士の吸引力と粒子内部に発生する曲げを追加してシミュレーションを行った。これにより土が持つ性質(特に土の持つ不可逆的な性質)を一部であろうが、定性的に表現することができると考えている。今回は、粒子内部の曲げ応力を弾性(線形)で模倣しているため、土が持っているすべり等の弾塑性の性質を表現する事はできていない。

粒子同士が接触した場合の粒子の接着現象や、接着面のすべり、あるいは粒子内部の曲げ応力に弾塑性を使用するなどにより土の持つ性質をより細かにシミュレートすることが今後の課題だと考える。

参考文献
 (1) Anandarajah, A.(1994) "Discrete Element Method For Simulating Behavior of Cohesive Soil" 'Journal of Geotechnical Engineering Vol. 120, No9
 (2) Cundall, P. A & Strack, O. D. L.(1979) "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies" 'Geotechnique 29 No1
 (3) Ning Lu & Anandarajah, A.(1992) "Empirical Estimation of Double Layer Repulsive Force Between Two Inclined Clay Particles of Finite Length" 'Journal of Geotechnical Engineering Vol. 118, No4