

個別要素法による粘土の一次元圧縮のシミュレーション

佐賀大学工学部 正 柴 錦春  
 佐賀大学工学部 正 三浦 哲彦

1. はじめに 個別要素法(DEM)は粒状体の力学特性を解析する有力な手法の一つである。この手法は既に砂またはジョイントが発達した岩盤の力学特性の解析に応用されている。粘土はマクロレベルで粒状体ではないが、マイクロレベルで一つ一つの粘土粒子或いは粘土粒子の集合体で構成される粒状体と考えられる。本研究では理想的な粘土粒子を仮定して、ランダムに生成した粘土のDEMモデルを用いて、一次元圧縮時の粒子の挙動をシミュレーションし、圧縮過程における粒子間の物理化学力・セメンテーションの影響を検討した。

2. 粘土粒子間の物理化学力の影響 主な粒子間の物理化学力は、2重層反力(R')と Van der Waals 引力(A')である。コロイド理論に基づいて、2つの平行な粒子間の単位面積あたりの2重層反力、R'は以下の式で求める<sup>1)</sup>。

$$R' = 2nkT[\cosh(v\epsilon / kT) - 1] \quad [1]$$

ここで、k:ボルツマン定数(1.38・10<sup>-23</sup>JK<sup>-1</sup>)、e:電荷量(1.602・10<sup>-19</sup>Coulomb)、T:絶対温度(°K)、n:陽イオン濃度(M)、v:イオンの原子価、 $\psi$ :粒子表面の電気ポテンシャル。

Van der Waals 引力(A')は粒子の鉱物構成、2粒子間の距離、粒子間に介在する溶液の性質の関数である。

コロイド理論を用いて表1に与えた条件で粒子間の物理化学力を計算した。一価陽イオン濃度 n=0.001M 及び n=1M の場合における粒子間の引力・反力・及び合力の分布は図1(a)~(b)に示す。イオン濃度が非常に低い時(n=0.001M)、粒子間の中線からの距離(d)が約10以下の場合、合力は引力であるが、10以上の場合は、粒子間の合力は反力である(図1-(a))。逆に、イオン濃度が高く(n=1M)、dが約15以下の場合では、合力は反力であるが、約15以上の場合では、合力は引力となる(図1-(b))。

粘土の堆積過程において、粒子間の距離が数十以上の場合では、粒子間の物理化学力は反力であれば、粒子間の接近を阻止し、分散状構造が形成し易い、逆に、引力であれば、粒子の集合体が形成し易くなる。

粘土粒子の長さを0.5~2.5µm、厚さ0.03µmと仮定して、ランダムに653個の個別要素(287個の粒子)を生成し、一次元圧縮のDEMモデルを作成した。このモデルの初期間隙比は約4で、モデルの辺長は7µmである。粒子間の物理化学力のつりあいを取った後の粒子の配列は図2に示す。イオン濃度n=0.001Mの場合は一個一個の粒子が分散していることが見られ、n=1Mの場合は、いくつかの粒子集合が観察できる。図2(a)と(b)を比較してみると、(a)の

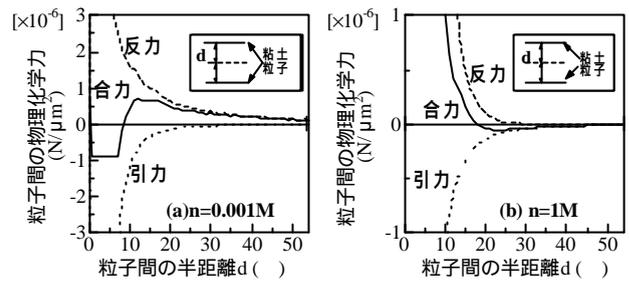


図1 粒子間の距離と物理化学力の関係

表1 仮定した条件

項目	数値	
間隙	陽イオンの原子価、v	1
水の特性	電気ポテンシャル、(mv)	210
	絶対温度、K°	293
	誘電定数、ε	80
Hamaker 定数、A (J)	4.5×10 <sup>-20</sup>	

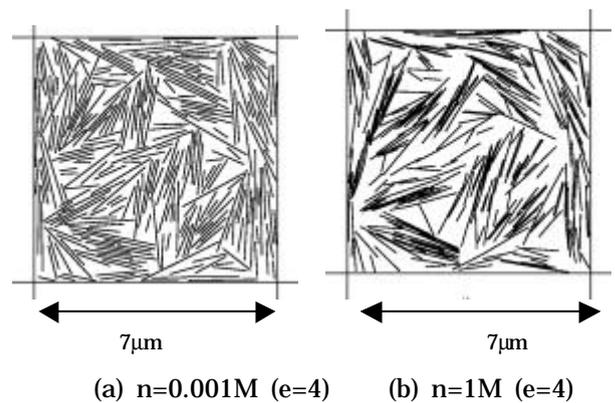


図2 粘土のDEMモデル

キーワード：個別要素法、粘土、圧縮、物理化学力

〒840-8502 佐賀市本庄町1、佐賀大学工学部都市工学科、Tel: 0952-28-8580、Fax: 0952-28-8190

場合では、間隙がたくさんあるが、特に大きいものがない。図 2(b)の場合では幾つかの大きな間隙が見られる。図 3 は一つの不攪乱有明粘土の電子顕微鏡写真である。図 3 と図 2(b)とを合わせて検討すると、電子顕微鏡で取った粘土の“塊”は粘土粒子の集合体であることが推測できる。また、陽イオン濃度の観点から見れば、 $n=0.001M$ 、 $1M$  はそれぞれ淡水、海水堆積環境を表している。従って、海水堆積環境の場合では、図 2(b)の構造が形成し易いと考えられる。

粘土粒子のヤング率と粒子間のばね定数を表 2 のように仮定して、一次元圧縮をシミュレートした。その  $e - \ln(\sigma_v)$  ( $e$ : 間隙比,  $\sigma_v$ : 鉛直応力) 曲線は図 4 に示されている。 $n=0.001M$  の場合では、仮定した条件において粒子間の物理化学力は反力が主導しているため、圧縮過程に  $\sigma_v$  の変動が小さかった。しかし、 $n=1M$  の場合では、粘土粒子間に一度接触と、反力により  $\sigma_v$  が増えるが、その反力によって、粒子間の距離が少し増加したら、粒子間力は引力になるので、 $\sigma_v$  の変動が激しかった。今回の解析結果から厳密な比較検討が出来ないが、傾向として以下のことが考察される。

(a)  $n=1M$  の場合は、 $n=0.001M$  の場合より降伏応力・曲線の勾配(圧縮係数)ともに大きい。つまり、 $n=1M$  の場合は構造が発達した自然粘土の挙動に近いといえる。攪乱試料中に塩含量の増加によりその非排水強度も増加したことは実験的にも確認された。

(b)  $n=0.001M$  の場合の降伏  $\sigma_v$  は約 2kPa である。これは初期状態で粒子間の物理化学力による抵抗と考えられる。

**3. 粘土粒子間のセメンテーションの影響**  $n=0.001M$ ,  $e=2.0$  の時点で、粒子間に 79 個の接点形成され、これらの接点にセメンテーションを導入した。仮定したセメンテーション強度は表 3 に示す。それ以降に形成された接点にはセメンテーションは働かないとした。

シミュレートした  $e - \ln(\sigma_v)$  の関係は図 5 に示す。接触した粒子間にセメンテーションを導入することによって降伏応力が増加し、特に高セメンテーションの場合(Case II)は、降伏応力は約 40kPa となり実際の自然粘土の降伏応力と比較することができる。また、セメンテーション有り・なしの両ケースについて、粒子の配列の異方性を検討した結果、セメンテーションの導入によって圧縮過程に粒子配列の異方性が減少した。

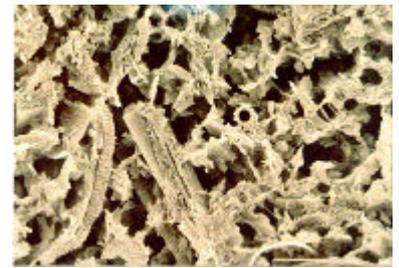
**4. まとめ**

(1) 粒子間の物理化学力は、粘土粒子の配列構造に大きな影響を与える。粒子間に引力が支配する場合は綿毛状構造、反力が支配する場合には分散構造になる。

(2) 粘土粒子間のセメンテーションの導入により、実際の粘土の挙動に近いシミュレーション結果が得られた。粘土の挙動において、粒子間のセメンテーションの影響が大きいことを明らかにすることができた。

**謝辞** 解析に用いた粘土用 DEM プログラムはアメリカ Johns Hopkins 大学の A.Anandarajah 教授が開発したものである。

**参考文献** 1) Verwey, E. J. W., and Overbeek, J. G. (1948). Theory of the stability of lyophobic colloids. Elsevier Publishing company, Inc., N. Y.



10 $\mu$ m

図 3 不攪乱有明粘土の電子顕微鏡写真 (港湾技術研究所の田中洋行氏提供)

表 2 粘土粒子のヤング率とばね定数

項目	数値
ヤング率 (N/ $\mu$ m <sup>2</sup> )	0.02 (2 $\times$ 10 <sup>4</sup> MPa)
正ばね定数 (N/ $\mu$ m)	4.65 $\times$ 10 <sup>-4</sup>
せん断ばね定数 (N/ $\mu$ m)	4.65 $\times$ 10 <sup>-4</sup>
モーメントばね定数 (N- $\mu$ m/rad)	1 $\times$ 10 <sup>6</sup>

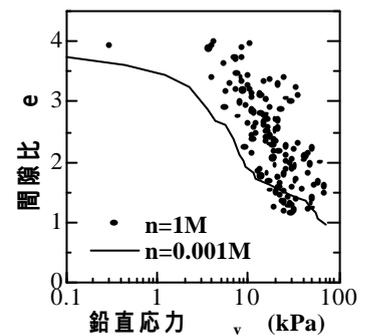


図 4  $e - \sigma_v$  関係 (イオン濃度の影響)

表 3 仮定したセメンテーション強度

項目	数値	
	Case I	Case II
伸張強度、(N)	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
せん断強度、(N)	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
モーメント強度 (N- $\mu$ m)	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>

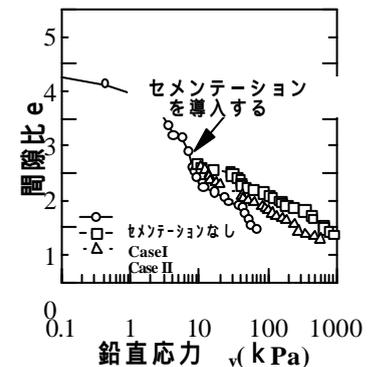


図 5  $e - \sigma_v$  関係 (セメンテーションの影響)