

氏 名	SAZZAD MD. MAHMUD
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)
学位記号番号	博理工甲第 837 号
学位授与年月日	平成 23 年 3 月 23 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Numerical study on macro and micro mechanical behavior of granular materials using DEM (DEM を用いた粒状体材料の巨視的および微視的挙動に関する数値解析的研究)
論文審査委員	委員長 准教授 鈴木 輝一 委員 教授 岩下 和義 委員 教授 桑野 二郎 委員 准教授 牧 剛史

## 論文の内容の要旨

Granular materials such as sand are discrete in nature and their micro characteristics are discontinues. The global behavior of a granular system is influenced by the individual behavior of each particle at the micro level. The understanding of these micro characteristics is of interest to the researchers for years. Unfortunately, the micro characteristics of granular materials can not be explored using the conventional experimental facilities and hence, the micro responses still remain illusive. The numerical approach such as the discrete element method (DEM) is a good alternative to explore the micro responses and simulate the macro behavior as well.

The major objective of the present study is to depict the capability of DEM to simulate the macro mechanical behavior of granular materials and investigate the micro mechanical characteristics comprehensively to explore the micro features and enhance the understanding of the complex behavior of granular materials. In addition, the study aims at establishing a macro-micro relationship regardless of the conditions applied. To fulfill the objectives, the computer program OVAL is modified. Several factors such as the interparticle friction, inherent anisotropy,  $b$  value and void ratio are considered while the simulations are conducted under the monotonic and cyclic loading conditions.

Simulations of drained monotonic and cyclic behavior are first performed under different interparticle friction angles. The simulated results are validated by the qualitative comparison of the numerical macro results with the experimental results. It is noted that the formation of the shape of cyclic loops is influenced by the variations of interparticle friction angles. The micro characteristics are explored as well and a unique macro-micro relationship is established considering only the strong contacts regardless of interparticle friction angles under biaxial cyclic loading.

A new sample preparation method is proposed for creating the inherent anisotropic samples numerically and it has been shown that the proposed method is capable of producing the inherent anisotropic samples. Simulations of drained

monotonic and cyclic responses are performed under different inherent anisotropic conditions of the samples and it has been shown that the inherent anisotropy of the sample significantly influences the macro-micro responses of granular materials. It is noted that the width of the stress-strain cyclic loops increases as the preferred bedding direction of particles changes from horizontal to vertical. The evolution of the contact fabric is explored as well for all, strong and weak contacts.

Stress path dependent macro-micro characteristics are also investigated in details by varying the parameter  $b$ , which represents the relative magnitude of the intermediate principal stress with respect to the major and minor principal stresses. The simulation of the stress controlled and the strain controlled constant mean stress  $b$ -test has been made available by modifying the computer program OVAL. It has been shown that the DEM based model can simulate qualitatively the macro behavior of granular materials including the principal deviatoric strain, stress and strain increment vectors, their behavior on the normalized  $\pi$  - plane etc. even with a very simple shape of particles such as sphere. The micro responses are explored and a unique macro-micro relationship is established regardless of sample density and  $b$  value considering only the strong contacts.

The undrained macro-micro responses and their inter-relationship are presented as well using DEM. The undrained behavior is simulated using the constant volume method. The conformity between drained and undrained macro-micro responses is examined and it is noted that the micro responses are not in conformity with each other. The liquefaction phenomenon is addressed and explained using the micro variables. The micro characteristics are explored and the macro-micro relationship is established.

## 論文の審査結果の要旨

本学位論文審査委員会は、平成23年2月14日に論文発表会を開催し、申請者による発表、質疑応答および論文内容の審査を実施した。

本論文は、9章から構成されており、以下に各章の概要と成果を示す。

第1章では、本研究の背景、目的および論文の構成について述べている。個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) は、粒状体の不連続な挙動を表す手法として着目され、通常の室内実験では得られない微視的挙動の観察によって、粒状体挙動のメカニズムの解明に用いられてきている。今後、粒状体を材料とする粉体工学や地盤工学の分野での適用が期待されている。しかしながら、有限要素法 (Finite Element Method, FEM) が、線形弾性材料を対象とした場合に定性的、定量的にも確立された手法であるのに対して、DEMでは、せん断帯のメカニズム解明等のための限定した範囲での定性的な研究に留まっていることと、定量的には十分な検証が行われていない等の課題が残されている。本研究は、DEMの種々の条件下における妥当性に関する研究の一環として、特に、2次元では、楕円形粒子を用いて、粒子間摩擦係数、固有異方性、繰返し载荷、排水・非排水 (定体積) 条件に関する巨視的、微視的挙動の解明を図り、3次元では、球粒子を用いて、2次元解析よりもより一般的な条件下での挙動についてDEMの有用性について検証している。

第2章では、DEMによる粒状体に関する既往の研究をレビューし、DEMに関わる現状の問題点、今後の課題について論じている。また、微視的挙動を表す種々の用語、すなわち、平均配位数 (1粒子の接触点数の平均)、滑り接触比 (全接触数に対する滑りを生じている接触点数の比)、構造テンソル等の定義について詳述している。

第3章、第4章では、使用するDEMプログラムの概要ならびに本研究で対象としている課題について述べている。DEMはCundall & Strack (1979) によって提案された手法であり、市販ならびにオープンソースのプログラムが種々存在しており、それぞれ若干機能が異なっているが、基本的にはCundall & Strack (1979) と同じ内容である。本研究では、Kuhn (2006) によって開発されたオープンソースプログラムに一部改良を加えて用いている。機能的には、2次元解析で円、楕円粒子、3次元解析で球、楕円体粒子を有している。本プログラムでは、周期境界条件を用いており、境界隅角部で生じやすい不均質性の影響を除外して検討することができる。また、不釣り合いの程度と解析結果の精度との関係等、これらの解析内容について詳述している。

第5章、第6章ならびに第8章では、楕円形粒子を用いた2次元解析について述べている。いずれも従来の室内三軸試験結果等と定性的に一致した結果であることを確認するとともに、微視的挙動の観察によって新たな知見を得ている。まず、第5章では、初期構造等方性になるように粒子を配置し、粒子間摩擦係数が二軸せん断圧縮試験結果に及ぼす影響について検討している。主応力方向に顕著な構造異方性が発達し、応力比  $q/p = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 + \sigma_2)$  と強構造テンソル比  $(= (H_1^e - H_2^e) / (H_1^e + H_2^e))$  の間に、粒子間摩擦係数の値によらず比較的一義的關係があることを明らかにした。第6章では、初期構造異方性 (固有異方性) について検討している。楕円形粒子の長軸が卓越する方向として、水平方向 ( $\delta = 0^\circ$ )、鉛直方向 ( $\delta = 90^\circ$ )、および、その中間の方向 ( $\delta = 45^\circ$ ) の3種類の初期配置方法について新たに提案し、プログラムを改良した。初期構造異方性によってせん断時の構造異方性の発達が異なり、構造異方性は、 $\delta = 0^\circ$  では大きくなり  $\delta = 90^\circ$  では小さくなること、さらに、繰返し载荷時のように载荷方向が逆転すると、構造異方性が  $\delta = 0^\circ$  では小さくなり  $\delta = 90^\circ$  では大きくなることを明らかにした。さらに、第8章では、定体積の条件を用いて、5種類の間隙比の非排水時挙動について検討している。ゆるい試料では液状化し易く、密な試料では液状化せずに大きな強度を示すという実験結果と同様な結果を得ており、また、ゆるい試料ほど平均配位数が振動しながら減少していくことを明らかにした。

第7章では、球形粒子を用いた3次元解析について述べている。2次元解析のように限定した条件のもとでの解析だけでは、実地盤における種々の問題に対しての検討としては不十分である。ここでは、中間主応力の影響を考慮するために、 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$  値について検討している。応力制御とひずみ制御の両方の機能を持たせるためにプログラムを改良した。ピーク強度まではどちらの方法でもほとんど同じ結果を得ており、プログラムの妥当性を確認している。b 値によってどのような挙動を示すかは既の実験で調べられており、主偏差ひずみ増分比が、ひずみが大きくなるにつれて等方弾性材料の理論値からずれを生じることなどを解析でも確認している。また、ピーク強度での破壊基準については種々提案されているが、Lade & Duncan (1975) の破壊基準がもっとも解析結果と合うことを確認した。また、応力比と強構造テンソル比の関係は、b 値や間隙比にもよらず一義的であることを明らかにした。

第9章では、本研究の結論と今後の課題を要約している。工学分野での実用化に関しては、コンピュータ容量の制約や膨大な計算時間等の残された課題も多い。もう一つのDEMの活用方法として、数値実験のツールとして、得られた解析結果を用いてFEMにおける精巧な構成則を構築することが考えられる。ただし、この場合でも、室内実験と同様に種々の条件下でのDEMの妥当性を検証して行く作業が必要であり、本研究もその一環として貢献に寄与している。今後は、さらに定量的な検証や流体との相互作用の考慮が不可欠となる。

以上のように、本研究は地盤材料等の粒状体の微視的および巨視的挙動に関する数値解析研究のための有用な知見を数多く得ている。よって、本学位論文審査委員会は、本論文が博士(学術)の学位を授与するに十分値するものと認め、合格と判定した。なお、本論文の内容は、いずれも学術雑誌論文の第一著者として、Granular Matterに1編が掲載済み、J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE および International Journal of Geomechanics, ASCE の2編が印刷予定である。