

氏 名	PHUSING DARAPORN		
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 998 号		
学位授与年月日	平成 27 年 9 月 18 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	Discrete Element Simulations on Granular Materials under Generalized Three-Dimensional Stress System (個別要素法による一般的な 3 次元応力条件下での粒状体挙動に関する研究)		
論文審査委員	委員長	教授	鈴木 輝一
	委員	教授	桑野 二郎
	委員	准教授	茂木 秀則
	委員	准教授	牧 剛史

論文の内容の要旨

This research interested in mechanical behavior of granular materials under generalized stress system where the major, intermediate and minor principal stresses σ_1 , σ_2 and σ_3 change continuously. The influence of intermediate stress ratio, specified by the b value $[= (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)]$ (Habib 1953), is a key parameter using in this research. The granular materials under constant b value stress paths have been studied by several researches. This study considers the granular materials under continuously varying b value stress paths. With this condition, the stress path can change the direction any place on the σ -plane. The macro behaviors and micro data have been explored. Discrete Element Method (DEM), known as a powerful method for studying granular materials, was used in this study. Based on the results presented in the dissertation, the following conclusions could be drawn:

- The direction of stress increment vector $\theta_{d\sigma}$ and strain increment vector $\theta_{d\epsilon}$ as well as stress-dilatancy results obtained from the DEM simulations qualitatively show good consistencies with the experimental data found in the literature on true triaxial tests under generalized stress conditions, defined by continuously varying b values. It was seen that modeling features available in DEM simulations are quite powerful in capturing both micro and macro behavior of granular materials.
- The DEM results showed that the shearing resistance angle ϕ is independent of the stress paths (i.e., not influenced by b values).
- The DEM results showed that the direction of strain increment $\theta_{d\epsilon}$ is not only dependent on the direction of stress increment $\theta_{d\sigma}$ but also on the approximate failure surface.
- The direction of strain increment vector $\theta_{d\epsilon}$ is influenced by the intermediate stress ratio of b , under continuously varying b test. The immediate change in the direction of strain increment vector occurs when the stress increment changes direction.

- The sliding contact fraction changes rapidly when the direction of stress increment changes under continuously varying b tests, indicating that the direction of stress path influences the sliding contact fraction
- The relationships between macro (defined by stress ratio q/p) and micro (defined by deviatoric fabric tensor) behavior were consistent for both constant b tests and continuously varying b tests. In both cases, consistent relationship between macro and micro behaviors was found when considering only in the strong contacts (defined by deviatoric strong fabric tensor).

Further study in this research was related to micro data, the mechanical behavior of granular materials was evaluated under more generalized stress conditions with five constant and three continuously varying b values called five CbS and three VbS. The assembly of sphere under 3-dimensional principal stresses (one vertical and two horizontal) of various stress paths was conducted under the constant mean stress and the stress-controlled method. We described the macro behaviors of granular materials using the stress-strain-dilation relationship. The micromechanical parameters consisted of contact normals (fabric), normal contact forces, and tangential contact forces a'_{ij} , a''_{ij} and a'_i . They were evaluated. We also described their significance to the macro behaviors regarding the varying b value. Important findings can be summarized for an initial isotropic material using sphere particles as follows:

- At peak, both the distributions and the degree of anisotropy of contact normal (fabric), normal contact forces, and tangential contact forces do not depend on the stress path.
- The increment vectors of contact normal (fabric), normal contact forces, and tangential contact forces depend on the location of stress paths as well as the degree of changing directions of those stress paths under constant and continuously varying b value stress paths.
- Changing the direction of stress paths causes not only changing the direction of maximum stress but also changing the incremental vectors of contact normal (fabric), normal contact forces, and tangential contact forces.

This research further studied the behavior of granular materials under more generalized cyclic loading tests. The more generalized cyclic stress condition in this study is identified as the unconventional cyclic loading with various stress amplitudes in 3-dimensional directions of principal stresses. Five different characteristics of cyclic shapes have been conducted using 8,000 spheres (similar granular assembly from the previous study). Cyclic loading simulations under constant mean stress and stress-controlled method were conducted. We described the macro behaviors of granular materials using the stress-strain-dilation relationship and the directions of principal strain increment vectors. The micromechanical response as well as the macro-micro relationship were explained. Important findings can be summarized as follows:

- The direction of principal strain increment vectors from DEM results shows good consistency with the actual behavior of sand under cyclic loading in more generalized stress condition.
- The direction of the principal strain increment vectors depends on not only the stress path, but also on the stress amplitude and the degree of the distance of that stress path from the failure surface. However, it is not influenced by the number of cycles.
- DEM result shows that the more unconventional cyclic stress path with a continuously high degree of stress amplitude is applied, the more effect of volumetric strain in the extension side and volume expansion.
- This unique macro-micro relationship does not depend on the more generalized cyclic stress paths, and on the number of cycles.

論文の審査結果の要旨

本学位論文審査委員会は、平成 27 年 8 月 10 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、7 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。従来、地盤挙動の基本的な特性を調べるためには、簡便三軸試験、単純せん断試験などの室内要素実験を用いるのが一般的である。しかしながら、これらの実験はかなり限定された応力条件下であるという制約がある。これに対して、より一般的な応力条件である 3 主応力を制御する真の三軸試験もあるが、実験の手間や精度の問題から、実験例はそれほど多くないのが現状である。一方、本論文で用いる個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) は、粒状体の不連続な挙動を表すことができ、通常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を解明する数値実験手法として期待されているツールである。本論文では、室内要素実験に代わり DEM による数値実験によって、真の三軸試験の詳細な挙動特性を把握することを目的としている。3 次元状態を表すために、中間主応力の相対的大きさを示す b 値 ($b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$) が用いられることが多い。 b 値一定での試験については、既に、室内要素実験及び数値実験による研究例がいくつかあるが、 b 値が変化するより一般的な応力条件下では、室内要素実験でも 1 例あるのみである。

第 2 章では、特に b 値に関する室内要素実験及び DEM による既往の研究をレビューし、現状の問題点について論じている。また、DEM によるシミュレーション結果を微視的に観察するために既に提案されている配位数 (粒子当たりの平均接触点数)、ファブリック (いわゆる構造) テンソル、さらにファブリックテンソルを用いた構造異方性のパラメータ等の定義について述べるとともに、構造異方性を表すパラメータによって応力が表せるとする既往の提案式等について詳述している。

第 3 章では、使用する DEM プログラムの概要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いる。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 Oval を用いている。Oval は、2 次元解析で円、楕円粒子等、3 次元解析で球、楕円体粒子等の機能を有しているが、主として、本論文で用いる 3 次元の球粒子と楕円体粒子に関する解析内容について詳述している。

第 4 章では、球形粒子を用いた場合、および、実際の砂粒子の形状に近い楕円体粒子を用いた場合について、 b 値を変化させた 3 次元の数値実験を行い、従来の室内三軸試験等で得られている考察が、 b 値を変化させた場合の数値実験結果にもあてはまることについて確認した。すなわち、粒子形状に関わらず、ピーク強度の負荷曲面 (いわゆる破壊曲面) が応力経路にはほとんど依存しないこと、主ひずみ増分比は主応力増分比と現在の応力点とピーク強度の点との相対的關係によって定まること等について明らかにしている。

第 5 章では、第 4 章での DEM シミュレーション結果をさらに微視的観点から考察した。特に接触法線方向、粒子間法線方向接触力、それに粒子間接線方向接触力のそれぞれの異方性パラメータを求める方法を詳述するとともに、これらの異方性の分布を 3 次元表示することによって、第 4 章で述べた負荷曲面や主ひずみ増分比の結果の解釈を容易にした。また、主応力比と強構造テンソル (平均接触力以上の接触力によるテンソル) 比の間に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、さらに球形粒子を用いて b 値を変化させた繰返し载荷の 3 次元数値実験を行い、通常室内要素実験では非常に苦勞すると思われる複雑な条件の下での挙動の解析結果について観察している。このよ

うなより実際の条件下における複雑な挙動のメカニズムについても、配位数、接触力等の微視的な考察によって説明できることを示した。

第7章では、本研究の結論と今後の課題を要約している。b値を変化させた非常に煩雑な室内要素実験においても、DEMが数値実験手法として強力なツールになり得ることを示した。実務レベルでのDEM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ことから、本論文で述べているもう一つのDEMの活用方法が現時点では有望である。すなわち、DEMの数値実験結果に基づき、FEMにおける精巧な構成則を構築することである。ただし、この場合でも、室内実験と同様に種々の条件下（粒子形状、初期構造異方性、定体積等）でのDEMの妥当性をさらに検証していく作業が必要である。

以上のように、本研究は地盤材料等の粒状体のより一般的な応力状態での微視的および巨視的挙動に関する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、ASCEのJournal of Engineering MechanicsおよびInternational Journal of Geomechanicsに2編が掲載済みである。