

氏名	ZAFAR MAHMOOD
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 809 号
学位授与年月日	平成 22 年 9 月 17 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	Effect of particle shape on the mechanical behavior of granular media (粒状体の変形機構における粒子形状の影響)
論文審査委員	委員長 教授 岩下 和義 委員 教授 桑野 二郎 委員 准教授 川本 健 委員 准教授 鈴木 輝一

論文の内容の要旨

Granular media are abundant in nature and are frequently dealt with in industry. Granular materials present a complex mechanical response when subjected to an external load. This global response is strongly dependent on the discrete character of the medium.

Strain localization in the form of shear bands is a common deformational feature associated with instability and failure in granular soils undergoing drained compression. A variety of experimental techniques have been used in past three decades to enhance understanding of strain localization phenomenon in sands, however, all of these methods have fallen short in characterizing the evolution of the grain-scale processes that necessarily control shear band formation and growth in sands. In the absence of an experimental means to capture the evolution of grain-scale processes in shear bands, particulate-based numerical approaches have been used in the past. These past numerical studies only used ideal (circular or spherical) shaped particles. The ideal-shaped particles have an inherent tendency of rolling, which can be constrained by imposing an artificial resistance (i.e. rolling resistance at contact). However, simulations with ideal-shaped-particles cannot study the influence of particle shape and inherent anisotropy on the mechanical behavior and the evolution of the microstructure of the granular media. Further, the material constant used to instill rolling resistance at contact has no clear physical meaning.

The objectives of this work was to study the mechanical behavior and evolution of the microstructure inside the shear band in granular media consisting of non-circular shaped particles in two-dimensional discrete element simulations of biaxial compression test. In order to include the effect of particle shape, the elliptical particles were used. Further, the effect of interparticle friction and inherent anisotropy on the mechanical behavior of the granular media was studied.

In the simulation of biaxial compression test, the generation of large voids and particle rotations were found to concentrate in the shear band in a quite similar manner to those of natural granular soils. Since the shear band formation was simulated accurately using elliptical-shaped particles without installing rolling resistance at contact, it is obvious that the rolling resistance is attributed to the particle shape, and no artificial constraint to rolling is required

if non-circular-shaped particles are used. The evolution of the microstructure inside and outside the shear band was studied. The particle rotation, which plays a dominant role in the development of shear bands, was influenced by the orientation of the long axes of the particles. The orientation of the long axis of a particle influences the magnitude and direction of its rotation irrespective of the rotation bias of shear band.

Observations were also made on the effect of interparticle friction on stress-strain behavior, shear band formation, and evolution of the microstructure. Except at small values of interparticle friction where microscopic friction plays an important role, the friction angle mobilized at the residual state were found independent of interparticle friction.

Numerical tests were carried out to investigate the influence of inherent anisotropy on the mechanical behavior of granular media and the evolution of the microstructure. The evolution of the microstructure was studied inside and outside the shear band respectively for different cases of anisotropies.

論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は、2010年8月12日にZafar Mahmood氏の論文発表会を開催した。その際の発表を含めて学位論文の審査を行った。論文の概要は以下のとおりである。

自然界及び工業分野では粒子材料が数多く存在し用いられている。粒状材料は大きな外力を受けるとひずみが局所化しせん断破壊するが、その際の挙動には非連続体としての性質が現れる。しかし従来は連続体ベースの理論が準用され、実際の挙動と異なることが問題となっている。

本論文は、粒状材料の特性のうち粒子形状に着目し、2次元数値実験を通してひずみが局所化する際に現れる効果を解明することを目的とする。このために数値実験には楕円粒子を用いる個別要素法を新たに開発し、2次元平面ひずみ試験によりひずみの局所化を再現させている。粒子形状に大きな影響を受ける粒子間の内部摩擦と堆積時に生じる初期異方性を取り上げて、粒子形状の影響を定性的に解明しようと試みている。

第1章は序論であり、研究の動機、本論文で目指す目的、本論文の構成について記載している。

第2章は関連文献のレビューであり、既往の実験結果として砂質土や実験室モデル粒子で観察されるせん断帯の特徴、従来の円形粒子を用いた個別要素法及び円形粒子間に転がり抵抗を導入した修正個別要素法により得られたせん断帯の特徴について説明している。実験結果との比較において個別要素法よりも修正個別要素法を用いた方がより観察結果を再現できることを示したうえで、修正個別要素法でも表現できない粒子形状の影響の重要性を記載している。

第3章は、非円形粒子として楕円粒子を用いた個別要素法を提案している。複数の円形粒子を重ね合わせることで楕円形状を表している。この手法の特徴は、個別要素法でもっとも解析時間がかかる粒子間接触が容易で計算量を軽減できることにある。また巨視的挙動の把握のために楕円集合体における微視的応力とひずみの求め方を定式化している。数値実験で用いる2次元平面ひずみ圧縮試験装置の詳細を述べている。

第4から6章は数値実験結果の解釈であり、第4章ではせん断帯内部における粒子群の微視的変形機構について説明している。楕円粒子を用いることで、実際の砂質土で観察されるのと同じように、円形粒子の場合に比べて高い巨視的応力比、せん断ひずみ、体積ひずみと粒子の回転のそれぞれがせん断帯内部に集中することを確認して、手法の信頼性を示している。解析結果を元に、せん断帯内部で外荷重をささえる柱状構造が屈曲するという従来の微視的せん断変形モデルに、粒状体の初期異方性である粒子長軸方向が初期の方向に応じて回転することで屈曲が生じる効果を加えた改良モデルを提案している。

第5章では粒子間摩擦が粒状体の巨視的応力、巨視的せん断帯と微視的構造とに与える影響を解析し、既往の実験結果と比較して評価している。小田・岩下は粒状体の強度と変形に粒子形状に起因する転がり抵抗が大きな影響を与えることを示したが、本研究は転がり抵抗がある場合には粒子表面の状況による滑り抵抗も大きな影響を与えていることを明らかにしている。

第6章では、初期供試体内部での初期異方性が粒状体の巨視的応力、発生する体積ひずみ、巨視的せん断

帯と微視的構造とに与える影響を評価している。粒子卓越方向と発現される巨視的応力比の関係が既往の実験結果とほぼ定性的に一致することを確認した上で、せん断帯の内外で異方性の変化が全く異なること、初期異方性がその後の異方性の変化に強く影響を与えていることを明らかにしている。

第7章はまとめであり、本研究で得られた知見を結論としてまとめるとともに、今後の課題についても言及している。

以上のように、粒子形状が粒状体微視的変形に与える影響について研究したものであり、特に従来理論で考えられていなかった初期異方性がせん断帯の発生する方向や強度に影響を与える可能性を示唆していることに特徴がある。本論文の結果は、今後地盤力学を基礎的に再構築するために必要なものであり、また斜面崩壊や支持力問題などの防災面への適用も期待できる工学的にもきわめて有用なものであるため、博士(学術)の称号にふさわしいと判断した。

学位論文審査委員会は、Mahmood氏のジャーナルへの論文発表の内容に関しても審査を行った。Mahmood氏は、本論文の成果を5編の論文として公表もしくは投稿している。すべて第1著者であり、2編が国際ジャーナルに掲載、1編はacceptされ印刷中、他に国内関連分野ジャーナルに1編が掲載済みである。以上より学位論文審査委員会は、Mahmood氏の論文発表に関しても博士を授与される資格があるものと判断した。