

氏名	ウ チャンシュン 武 建 勳
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年9月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
論文題目	粒状体の微視力学的研究
指導教官	東北大学教授 岸野 佑次
論文審査委員	主査 東北大学教授 岸野 佑次 東北大学教授 柳澤 栄司 東北大学教授 岩熊 哲夫 東北大学教授 池田 清宏

論 文 内 容 要 旨

地盤の変形特性や破壊メカニズムの解明は、土構造物の設計、地盤の補強、地盤災害防止などを実施する上で土質力学的な基本事項として位置づけられ、工学的に重要な意味をもつテーマであるといえることができる。

このようなテーマに関する研究の多くは、地盤材料の試験から得られる巨視的な応答に基づき、これを連続的に評価することによって行われてきた。しかしながら、地盤材料は微視的には土粒子などを含む不連続体であり、連続体力学を背景としたアプローチでは捉えることができない面があることも確かである。このような地盤材料の実物試験において高精度の結果を得ることを期待できないことも多い。このように、実物試験による研究には自ら限界があると考えられる。

さらに、地盤の変形特性や破壊メカニズムを微視的な立場から調べようとする場合、実際の地盤材料の試験において粒子接点角の配向性や粒子間力など刻々と変化する微視的物理量を計測することは事実上不可能である。以上のようなことから、地盤材料、とくに粒子の組み合わせによりなる砂や砂利などの堆積体については、これを本来の粒子の集合体として捉え、その巨視的な力学特性を粒子レベルの微視的な力学特性に着目して解明するアプローチを見出す必要がある。

微視的な変形機構を考慮した一般的な研究を進めるためには計算機によるシミュレーション解析を行うことが有効である。Cundallによって提案された個別要素法(Distinct Element Method)はこのような目的のために用いることのできる解析法であり、従来よりこれを応用した解析が種々行われてき

た。この方法は粒子ごとに立てられた動的釣り合い式を時間方向に差分法を用いて解析する陽解法である。これに対して岸野によって提案された粒状要素法 (Granular Element Method) は粒子の接触関係から得られた剛性マトリックスを用いて粒子を移動させる剛性法であり、準静的な解析法である。本論文においてはこの方法を改良し、これを用いて 2 次元粒状供試体モデルの種々の要素試験数値シミュレーションに応用した。

このような数値シミュレーション試験は、全ての中途データの記録や種々の巨視的および微視的力学量の算定を可能とする。さらに、数値シミュレーション試験は、ある状態におかれた一つの供試体モデルに対し、条件を変えた解析を幾通りにも実施することを可能とする。このようなことから、粒状供試体モデルによる数値シミュレーション解析は、粒状体の巨視的挙動を微視的挙動との関係に基づいて解明するために最も有用な手段であるということができよう。

Bardet は個別要素法を用いて応力空間の一点から出発して様々な方向へ同じ大きさの応力増分を与えて載荷・除荷を行う応力プローブ試験を試みた。このような応力プローブ試験を行うことにより、応力増分に対応して生じるひずみ増分を回復部分と非回復部分とに分けることが可能となる。このようにして求めた弾性ひずみおよび塑性ひずみ増分応答をもとに粒状体の構成則の検討を行うことができる。しかしながら、Bardet の行った個別要素法による解析においては応力制御の精度が不十分であり、これに基づく構成則に関する検討が十分に行われていない。

本研究は粒状要素法を用いて粒状供試体モデルの応力プローブ試験シミュレーション解析を行い、解析結果の詳細な検討により、粒状体の力学特性を明らかにすることを目的としている。

第 1 章は序論である。

第 2 章においては粒状要素法の概要を示した。とくに、粒状要素法の欠点である計算時間と記憶容量の問題を解決するために対角小行列のみを用いて Newton-Raphson 法に従って計算を進めるアルゴリズムについて詳述した。

第 3 章においては粒状要素法を用いて、粒状供試体モデルに対して載荷・除荷・再載荷のシミュレーション試験を行った。等方載荷により作成したデータから出発して様々な方向へ載荷して得られた結果を応力比 q/p により整理すると、載荷曲線はほぼ一義的に表されることがわかった。これらの載荷曲線の初期段階は滑らかに変化するが、ピークが近づくと急激に大きなひずみ増分が生じる遷移点が現れた。異なる載荷経路に対する遷移点は応力空間において原点を通る一つの直線上に並んでいることがわかった。さらに、散逸エネルギー曲線と共分散テンソルの第 1, 第 2 主値の変化曲線も、載荷曲線と同様に、載荷経路によらず、応力比 q/p により一義的に表されることを確認した。次に、除荷・再載荷試験を行った結果、粒状体においても金属と類似のひずみ硬化特性を備えていることを確認した。ここに示したような比較的単純なシミュレーション解析により、遷移点の存在やひずみ硬化特性など、粒状体のもつ基本的な性質を明らかにすることができた。

第 4 章においては主に遷移点に至る前の粒状供試体モデルに対して、応力プローブ試験を行った結果とその考察を示した。粒状要素法を用いた応力プローブ試験の結果は、Bardet が個別要素法を用いて行った応力プローブ試験の結果よりかなり精度よく行われていることがわかった。応力プローブ試

験から得られた弾塑性応答は近似的に古典的弾塑性理論により表されると考えられることから、その適合度を考察するために、弾性コンプライアンス及び塑性コンプライアンスに基づく推測式を応力プローブ試験から得られた弾塑性応答と比べた。その結果、大部分の場合に応力増分と塑性ひずみ増分の関係は非関連流動則に近似的に適合することが確認された。一方、載荷曲線のピーク点に近づくと流動則が適合しなくなる傾向があることもわかった。さらに、粒状供試体モデルに与える主応力増分主軸、従って主応力主軸と主ひずみ増分主軸は一致せず、非共軸性が観察された。また、その程度は安定的な硬化過程では弾性ひずみ増分や塑性ひずみ増分に対する非共軸角は小さいが、せん断応力の増加とともに徐々に大きくなることがわかった。なお、Chang の粒子集合体に対する弾性理論は上述の数値シミュレーション結果にあまり適合しないことがわかった。この理由として粒状供試体モデルにおける回復されるひずみ増分にも接触点における滑りの影響を含むことがあることを示した。

第5章においては剛体粒子を組み合わせて得られた供試体に比例載荷を行っても粒子の間に滑りが生じない理由や、剛体粒子集合体の降伏曲面は主応力空間の原点を通る直線群となる理由を説明した。応力増分を加えると、比例載荷方向の成分によって散逸エネルギーは生ぜず、比例載荷方向と垂直な成分のみにより散逸エネルギーが生じることになる。したがって、塑性ひずみ増分は載荷応力増分の降伏曲面に垂直な方向への投影長さに依存すると考えることは自然であるという結論を得た。剛体粒子の代わりに弾性体粒子から成る供試体の場合について考えると、微小変形の仮定が成立する限りにおいては以上の議論が有効であると考えられる。実際、種々の点で行った応力プローブ試験により求めた降伏線は主応力空間の原点を通る直線に対して僅かな差しか認められず、近似的に剛体粒子の場合と同様であることを確認した。また、第3章に述べた種々の力学パラメータは近似的に応力比 q/p の関数であることや遷移点がほぼ主応力空間の原点を通る直線上に並んでいることも同様の理由によるという結論を得た。さらに、応力プローブ方向別の滑動接触点数と滑動継続接触点数の割合を調べることにより、載荷方向と除荷方向における力学的挙動に明確な差異のあることを確認した。なお、等投影応力プローブ試験により、応力プローブ方向によらず、一定の流動方向に一定の大きさの塑性ひずみが生じていることを確認した。さらにこの等投影応力プローブ試験の結果に基づいて描いた粒子変位ベクトル図による観察や固有値解析などにより、載荷経路によらずほとんど共通の粒子移動パターンが存在することを確認した。

第6章においてはまず、Hill の安定条件が非弾性体に対しても有効であるかどうかを明らかにするために、Hill とは異なった考え方で安定条件を表す不等式の誘導を行った。すなわち、構成則が未定の動的平衡条件式に対して、動的仮想仕事の原理と関数の変数分離の概念を用いて逆問題的に Hill の安定条件の誘導を行った。その際、Hill の安定条件が有効となるための前提条件として変数分離可能性を考慮することにした。このような前提条件を個々の材料に対応させて吟味することは、材料の力学特性を定式化する上で本質的であり非常に重要なことであると考えられる。さらに、詳細な応力プローブ試験を行うことにより、非関連流動則が厳密には成立しないという重要な知見を得ることができた。しかも、安定な硬化状態においては、塑性ひずみ増分の方向と古典的流動則により定められる方向とのずれが Hill の安定条件を満たすように生じるという結果が得られた。このような事実は本研

究で行った詳細な応力プローブ試験シミュレーションで初めて得られた知見ではないかと思われる。このような研究の延長上には、さらに、粒子数、パッキング、材料定数、載荷条件、3次元化などを考慮して検討を重ねる必要があるが、本文においては少なくとも粒状体のもつ主要な特性の一端を明らかにすることができたのではないかと考えられる。

第7章は本論文の結論である。

以上本論文においては粒状要素法に基づく粒状要素供試体の種々の載荷シミュレーション解析をもとに、粒状体のもつ力学的特性について微視力学的な検討を行った結果について示した。本論文において用いた粒状要素法は、未だ個別要素法に比較して一般的に用いられるものとはなっていないが、第4章に示されているように、Bardetが個別要素法を用いて行った応力プローブ試験と比較する限り、高い精度が得られることが実証され、粒状要素法が有用であることが明らかとなった。また、このような手法を用いることにより、粒状体のもつ力学特性、とくに構成則を定式化する上で基本となる性質について上述のような種々の重要かつ新規の知見を得ることができた。

審査結果の要旨

地盤材料の変形特性や破壊のメカニズムを明らかにする上で、微視力学的な立場から解明を進めることが重要な課題となっている。本論文は、とくに地盤材料の粒状体としての力学特性を明らかにすることを目的として、粒状離散モデルの数値シミュレーション解析を実施し、これに基づいて粒状体の構成モデルや材料安定性について検討したものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、解析に用いた改良粒状要素法が提示されている。計算時間と記憶容量の問題を解決するためのアルゴリズムに新たな工夫がなされ、粒状体の解析的研究に有用な手法を提供している。

第3章では、共通の粒状供試体モデルに対して主応力比の異なる様々な载荷シミュレーション試験結果をもとに、ひずみ、エネルギー散逸、変形分散などの諸力学パラメータが、せん断応力と平均応力の比によりほぼ一義的に整理されるという指摘がなされている。

第4章では、種々の载荷段階における応力プローブシミュレーション試験結果より弾塑性コンプライアンスを平均量として求め、これに基づく予測式と個々のプローブ試験の弾塑性応答とを比べ、安定的硬化段階においては、応力増分ひずみ増分関係は非関連流動則に基づく弾塑性理論にほぼ適合するという基本的な確認がなされている。

第5章では、剛体粒子集合体に対して降伏曲面が応力空間原点を通る直線群になることを考察し、この論理がシミュレーション解析結果をよく説明することを示すとともに、粒子変位ベクトル場の固有値解析などに基づいて、流動則成立のメカニズムを明らかにしている。これは粒状体力学の構成に関する重要な知見である。

第6章では、非弾性材料に対しても Hill の安定条件が条件付きで成立すべきであることを動的仮想仕事の原理を用いて証明するとともに、詳細な応力プローブシミュレーション試験に基づいて、非関連流動則からの微妙なずれが Hill の安定条件を満たす方向に生じるという結論を得ている。これは従来未解決であった問題に対する重要な知見である。

第7章は結論である。

以上、要するに本論文は、粒状体について微視力学的な立場から詳細な解析とその考察を行い、粒状体力学構成のための重要な知見を得たものであり、土木工学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。