

## 学位論文題名

A Study on the Deformation-Failure Behavior of Sands  
with Different Primary Properties

(一次的性質の異なる砂の変形・破壊挙動に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

砂は、不規則な形状・寸法の粒子とその間隙との集合体であることに加え、他の材料とは異なり天然に産するため、砂粒子の物性は極めて変化に富み、一次的性質と呼ばれる、粒子形状、粒度分布、粒子の破碎性は千差万別である。したがって、構成材料の物性に強く依存する力学的性質も、それを構成する砂粒子の物性によって大きく異なることは、容易に伺える。

また同じ土においても、その密度を始めとする構造条件、応力履歴や応力状態、排水条件などの土がおかれた条件によっても変形・強度特性が変化することは良く知られている。土の力学挙動のモデル化・解析において、これ等の環境条件の影響を適切に取り入れることが重要であるために、特定の土については綿密な試験がこの分野に関心を持つ研究者によって行われ、多くの努力が集中されていると言ってもよい。しかし砂質土については、締めり具合を相対密度  $D_r$  で評価すると、異なった土についても変形・強度特性を一義的に決定できるとする考えが一般に受け入れられているため、土粒子の一次的性質が力学的性質に及ぼす影響は小さいとされ、この点についての十分な研究は行われていないのが現状である。

そこで本研究は、土の一次的性質が土の変形・破壊挙動に強く影響することを明らかにするとともに、統一的に砂粒子の物性を把握する方法を検討し、力学的性質に及ぼす一次的性質の影響を系統的に調べることをその第一の目的とした。

一方、粒状体の応力・ひずみ関係を記述する構成モデルが、これまで多数提案されている。しかし、実用的に用いられているモデルのほとんどは、連続体としての仮定に立脚しており、物理的意味が不明瞭で算定が困難なパラメータが含まれているものも少なくない。土の変形メカニズムを統一的に表現できるモデルは、未だ提案されていないのが現状である。そこで本研究は、従来異なるメカニズムによるとされ、分離してモデル化されてきたせん断変形と圧縮変形を、統一的に表現可能な力学モデルの提案を第二の目的としている。

本研究の実験結果から、この二つの変形特性は強い相関性を有し、同一のメカニズムに従うであろうことが示されている。また提案するモデルでは、いくつかの粒子で形成される楕円形状の楕円微細構造体を粒状体の構成単位として着目している。この構造は、これまでの種々の実験において、その存在と重要性とが指摘されている。

本論文は、前記主目的を内容とする実験的研究および解析的研究に関わる2編と、結論を加えた3編からなっている。論文の構成と各章の要旨は以下のようなものである。

## 第一編：砂の力学特性に関する実験的研究

第1章では、力学的性質に及ぼす一次的性質の影響を調べるために準備された、一次的性質の異なる約200種類の粒状試料が紹介されている。試料にはガラスビーズと軽量骨材の人工材料も含まれている。砂試料については、自然状態での粒度を用いたものと調整されたものとに分けられる。

第2章では、一次的性質および力学的性質の測定方法が示されている。その多くは、学会基準に基づいているが、粒子形状、粒子破碎性と安息角の測定方法は、本研究で新たに試験方法を提案している。

第3章では、全試料の一次的性質に関する検討から、間隙比幅 ( $e_{max} - e_{min}$ ) と粒子破碎性  $I_{cr}$  とを、一次的性質を代表するパラメータとすべきことを示している。

第4章では、全試料について行った排水三軸圧縮試験から得られた変形・破壊挙動を検討し、等方圧縮およびせん断時における変形特性と強度特性において、一次的性質が重要な役割を果たしていることを明らかにするとともに、変形・強度特性と一次的性質との相関に考察を加えている。

第5章では、変形・破壊挙動の拘束圧依存性を調べており、力学特性の拘束圧依存性は試料の一次的性質によって大きく異なることを明らかにしている。さらに、拘束圧の変化に伴う変形・強度特性の変化の程度は、その試料の ( $e_{max} - e_{min}$ ) と  $I_{cr}$  によって合理的に評価できることを示している。

第6章では、密度が変形・破壊挙動に及ぼす影響を検討しており、力学特性の密度依存性に及ぼす一次的性質の影響を、第5章における拘束圧依存性と同様の手法によって検討している。

## 第二編：砂の変形メカニズムに関する解析的研究

第1章では、砂のような粒状体の構成モデルの展開にあたり、微細構造の単位として、複数の粒子が形成する「楕円微細構造体」に着目している。まず、構造体の幾何学的定義を行い、2次元条件下での構造体の力学特性の考察と釣合条件から粒子間接触力を算定し、粒子間に動員される最大摩擦角に着目することにより、構造体の粒子間スベリに対する安定条件をその形状と応力条件の関数で表現している。次に、シェル理論と、粒子回転の効果を考慮するためにマイクロポーラ理論を適用することで変形解析を行い、弾性コンプライアンスについて検討している。この結果、構造体の変形において粒子回転は重要な役割を果たし、粒状体の特徴的力学特性である変形の異方性、非共軸性およびダイレイタンスは、楕円構造体の変形特性を考慮することによって説明可能なことを明らかにしている。

第2章では、楕円微細構造体に着目した粒状体の非線形変形解析方法「楕円微細構造体モデル」の開発について説明している。ここでは、楕円構造体間の相互作用を考慮するために 'Self-consistent Method' を適用して各構造状態における粒状体の平均剛性を求め、楕円微細構造の崩壊による粒状体内の構造変化によって、変形挙動の非線形性を表現している。

第3章では、楕円微細構造体モデルによって、等方圧縮、せん断および主応力回転などいくつかの典型的な応力条件下で粒状体の変形・破壊挙動を解析し、変形に伴う粒状体の構造変化を調べている。さらに、初期構造や粒子回転が変形・強度特性に及ぼす影響についても詳細な検討を行い、圧縮剛性とせん断剛性との間には極めて良い相関関係が存在することを理論的に示した。この関係は第一編で示した実験結果においても得られており、楕円微細構造体の力学特性に基づいて、従来は分離してモデル化されていた圧縮変形とせん断変形が統一的に表現可能なことを示している。

## 第三編 結 論

各章で得られた結論が要約されている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 岐 祥 介  
副 査 教 授 三 田 地 利 之  
副 査 教 授 石 島 洋 二  
副 査 助 教 授 三 浦 均 也

## 学 位 論 文 題 名

### A Study on the Deformation-Failure Behavior of Sands with Different Primary Properties

#### (一次的性質の異なる砂の変形・破壊挙動に関する研究)

本論文は、砂地盤および砂のような粒状体の力学的性質を実験的および解析的に研究したもので、砂の複雑な力学的挙動を、その一次的性質と呼ばれる特性値に注目して実験的に考察を加えている。さらに、砂のような粒状体の構成モデルの構築にあたり、その微細構造の単位として、これまで存在と重要性とが指摘されている、複数の粒子が形成する「楕円微細構造体」に着目して解析的研究を展開し、多くの成果を得ている。

砂などの粒状体は不規則な形状・寸法の粒子とその間隙の集合体で、力学的性質は、その強い非線形性に加え、密度などの構造条件、周囲の応力状態や履歴によって著しく変化することが知られている。さらに、他の材料とは異なり天然に産するために粒子形状、粒子破碎性、粒度分布などの砂の一次的性質は千差万別である。しかし、砂の一次的性質が力学的性質に及ぼす影響については、十分な研究が行われていないのが現状である。

また、現在まで提案されている実用的力学モデルは土を連続体とみなす仮定に立脚したものが多く、物理的意味が不明瞭で算定が困難なパラメータが含まれるものも少なくない。また、土の変形メカニズムを統一的に表現可能なモデルは未だ提案されていない。

このような背景の下で本論文は、砂の物性に関する実験的研究成果と、変形メカニズムに統一的解釈を与える新しい力学モデルの開発に関する解析的研究成果をまとめたものである。

実験的研究では、準備した一次的性質の異なる約200種類の粒状試料について、力学的性質に及ぼす一次的性質の影響を系統的に調べている。その主要な成果は以下のとおりである。

- 1) 多くの一次的性質の間に存在する相関を検討し、間隙比幅 ( $e_{max}-e_{min}$ ) と粒子破碎性  $I_{cr}$  とを、一次的性質を代表するパラメータとすべきことを示している。
- 2) 変形・破壊挙動を検討し、等方圧縮およびせん断時における変形特性と強度特性に、一次的性質が重要な役割を果たしていることを明らかにするとともに、変形・強度特性と一次的性質との相関に考察を加えて、多くの工学的に有用な知見を得ている。
- 3) 変形・破壊挙動の拘束圧および密度依存性を調べ、力学特性のこれらへの依存性は、試料の一次的性質によって大きく異なることを明らかにしている。さらに、拘束圧と密度の変化に伴う変形・強度特性の変化は、その試料の ( $e_{max}-e_{min}$ ) によって合理的に評価できることを示している。

解析的研究では、力学モデルの展開にあたり、いくつかの粒子で形成される楕円形状の楕円微細構造体を粒状体の構成単位として着目したところに本研究の特徴を有する。その主要な成果は以下のとおりである。

- 1) 構造体構成粒子間の滑りに関する安定条件解析、粒子回転の効果を取り入れるためマイクロボラ理論を適用した変形解析を行い、'Self-consistent Method'を用いて各構造体間の相互作用を考慮することで、構造体の崩壊・発生による粒状体内の構造変化に起因する変形挙動、およびその非線形性を表現できることを明らかにした。
- 2) 解析から得られた圧縮剛性とせん断剛性との間には、本研究における実験結果と同様な明確な関係が存在することが確かめられた。

すなわち本論文は、砂の力学的性質と一次的性質との相互関係について詳細な実験的研究を行い、多くの一次的性質の内、間隙比幅と破碎性によってその特徴的物性の把握が可能であることを示すという成果を挙げている。さらに、本研究で提案する構造体の粒子間すべりに対する安定条件と粒子の回転を考慮した「楕円微細構造体モデル」による変形メカニズムに基づけば、砂の圧縮変形およびせん断変形は、従来のように分離して取り扱うことなく、統一的に説明できることを解析的および実験的に明らかにしている。

以上のように本論文は、砂のような粒状体の変形挙動の解明に、多くの有益かつ新しい知見を得ており、砂の力学および地盤工学の発展に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。