



Title	Modeling Penetration Resistive Force in Non-Cohesive and Cohesive Granular Layers Considering Failure and Flow Mechanisms
Author(s)	飯川, 直樹
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105671
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (飯 川 直 樹)

論文題名

Modeling Penetration Resistive Force in Non-Cohesive and Cohesive Granular Layers Considering Failure and Flow Mechanisms
(破壊・流動メカニズムを考慮した非付着性・付着性粉体層の貫入抵抗モデル)

論文内容の要旨

本論文は、非付着性および付着性粉体層への貫入抵抗力の予測モデルを開発することを目的とする。まず、従来提案された非付着性粉体材料に対する予測モデルについて、その基礎となる構成則に付着に関する項を導入する。それにより、既存のモデルを付着性粉体層における貫入抵抗力を予測できるように拡張した。

続いて、離散要素法 (DEM) という数値計算手法を用いて、粉体と貫入物特性を様々な条件下で変化させた場合の貫入抵抗力を数値シミュレーションで調べた。そして、シミュレーション結果を予測モデルと比較した結果、特定の条件下で不一致が認められた。この不一致を解消するため、物体貫入時の粉体層における粒子挙動解析を通じて貫入メカニズムを調べた。まず、粉体層内のせん断ひずみ速度の詳細解析から、せん断帯が形成されない場合にモデルとシミュレーション間で貫入抵抗力の差異が生じることが判明した。そこで本論文では、せん断帯の形成状況に応じて、粉体層内の破壊範囲とモデル内の付着パラメータを修正することで、破壊モードの影響をモデルに導入した。次に粉体層内の粒子速度場解析から、貫入物前方に停滞領域が形成される場合、モデルとシミュレーション間で貫入抵抗力が異なることが明らかになった。さらに、停滞領域の範囲は主に貫入物の先端形状や粒子との摩擦係数といった特性に依存することが分かった。これらの結果に基づき、本論文では貫入物の特性から予測される停滞域の影響をモデルに導入した。これらの修正を行った結果、これらの貫入メカニズムを組み込んだモデルは、様々な粉体・貫入物特性の条件下でのシミュレーション結果を従来のモデルよりも高精度で説明できた。

さらに、本論文では、予測モデルの応用として計測した貫入抵抗から粉体の力学特性の推定を検討した。具体的には、モデルを用いて計測した貫入抵抗を逆解析することにより、月レゴリスおよびその模擬土の内部摩擦角と粘着力を推定した。そして、推定されたパラメータを文献値と比較したところ、両者は良好な一致を示した。また、これらの推定パラメータを用いた数値シミュレーションも実験データと整合的な結果を示した。したがって、本論文で提案したモデルを貫入抵抗の逆解析に用いることで、地球外表面に存在するレゴリスを含む粉体の力学特性の推定に活用可能であることを示した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (飯 川 直 樹)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査	教授 桂 木 洋 光
	副 査	教授 波 多 野 恭 弘
	副 査	教授 土 屋 旬
	副 査	准教授 江 端 宏 之
	副 査	准教授 辻 拓 也

論文審査の結果の要旨

本学位論文では、付着性を有する粉体層にコーン形状物体を陥入させる際の貫入抵抗力を、モール・クーロンの破壊基準に基づいて求める地盤力学的モデルが構築されている。構築されたモデルを実験により較正された離散要素法による数値計算結果と比較し、さまざまな陥入コーン形状や粉体層特性に対して、当該モデルが適切な推定値を与えることを示している。さらに、月レゴリスを対象としたコーン貫入試験結果から、その基礎物性値である内部摩擦角および付着応力を推定する試みにも取り組んでいる。

粉体層を連続体として近似し、コーン形状物体を陥入させた際の抵抗力から粉体層の破壊特性を特徴づける試みは、古くより地盤工学等の分野で研究されてきた。その最も代表的な手法として、内部摩擦角と付着応力により粉体層が破壊に至る臨界状態を求めるモール・クーロンの破壊基準がある。近年、この破壊基準が、コーンの準静的陥入中に常に成り立つことを仮定して、陥入抵抗力を推定する解析的モデルが提案された。このモデルでは、モール・クーロンの破壊基準の中でも内部摩擦角による破壊条件が粉体層内で満たされる曲線を「滑り線」として求め、その滑り応力を積分することで、陥入抵抗力を算出している。本学位論文ではこの手法を拡張し、粉体層が内部摩擦角に加えて付着応力を持つ場合についても、コーン陥入抵抗力を同様の手法で見積もる理論モデルを導出している。

得られたモデルの妥当性を検証するため、離散要素法による数値計算を行い、数値計算で求められた抵抗力の平均的挙動が、モデルと良好な一致を示すことを明らかにしている。数値計算におけるパラメータは、実験結果により較正されており、実際の粉体挙動を忠実に再現する条件下で行われていることから、この一致は、モデルの実現象への適用可能性を強く裏付けるものである。その上で、本学位論文では、さまざまな条件における数値計算結果とモデル推定の結果の一致を系統的に検証することで、モデルの適用可能範囲が広いことを明確に示している。

具体的には、モデルの適用範囲を広げるために、従来の研究では十分に考慮されてこなかったコーン先端形状や粉体層の摩擦特性、付着応力等の効果を、本学位論文では新たに取り入れている。これらの効果は、モール・クーロンの破壊基準から求められた滑り線モデルを補正する形で取り込むことが可能で、それにより、数値計算の結果を良好に再現できることが系統的なモデルと数値計算結果の比較により明らかにされている。また、モデルのパラメータが特定の範囲にある場合、粉体層の陥入による破壊のモードが切り替わる可能性があることも、このモデルの補正の中では考えられている。これらの補正は複雑で込み入ったものではなく、比較的シンプルな補正をいくつか施すことで、モデルの現象説明能力が大きく広がることが、本学位論文では明らかにされている。

最後に、モール・クーロンの破壊基準から求まる滑り線モデルに、数値計算結果に基づいた補正を加えたものを用いて、月レゴリスのコーン陥入試験の結果から、月レゴリスの内部摩擦角や付着応力の推定を行っている。実際の月レゴリス層におけるコーン陥入試験の結果は限られており、また、その試験結果から見積もられている内部摩擦角や付着応力の値は、様々な簡易化や仮定の上の古典的な推定値であり、その現代的見直しが必要な状況であった。そのような状況下で、本学位論文で求められたモデルを月レゴリスのコーン陥入試験結果に適用することで、より信頼性の高い内部摩擦角や付着応力の推定が可能であることが示されている。ただし、月レゴリス

の試験結果の量がまだ限られており、より信頼性の高い推定を行うためには、試験結果の量を増やすことが重要であることも明確に浮き彫りにされた。月レゴリス層の地盤としての基礎理解を深めるためには、このような基本的試験の高精度化は必要不可欠である。今後、月面開発などに人類が本格的に乗り出す際には、本学位論文で開発されたモデル等が重要な役割を果たすものになると期待される。さらに、このようなモデルは、地球上で地盤掘削等を行う重機の設計・開発・評価においても、重要な基本要素となることは間違いない。

このように、本論文では粉体層にコーン形状物体を陥入させる試験から粉体層の基礎物性である内部摩擦角および付着応力を求める表式を、解析計算と数値計算結果との比較から導いている。得られたモデルを用いて、月レゴリスのような今後の宇宙開発等において重要となる粉体材料の物性の推定にも挑戦している。これらの成果は、地盤工学等の分野で築き上げられた知見を、確実に大きく進展させるものであり、粉体物理、地盤工学、宇宙開発などの様々な分野に対して重要な基礎知見を提供するものである。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。