The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	離散要素法を用いた非付着性密充填粉粒体への平板貫入現象の研究
Author(s)	宮井, 慎一郎
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/76538
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

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　宮井　慎一郎）	
論文題名	離散要素法を用いた非付着性密充填粉粒体への平板貫入現象の研究

論文内容の要旨

粉粒体層への物体貫入現象は，建設・鉱山機械の土砂掘削，建築物の杭打設，脚ロボットの不整地歩行，隕石落下によるクレータ形成など，様々な工学・理学問題に関係している．貫入時に生じる抵抗の発生メカニズムを考える上で，物体近傍におけるよどみ領域やせん断帯の形成はとりわけ重要であるが，これらは複数の粒子から構成されるメゾスケール構造であり時空間的に局在化することから，実験的な手法や連続体近似に基づく計算手法によりその詳細を検討することは容易ではない．個々の粒子の挙動を直接取り扱うことができる離散的な計算手法が有効であると考えられるが，計算負荷の問題からこれまで十分な検討は行われていない．本論文は，貫入抵抗とメゾスケール構造の形成に代表される粉粒体挙動の関係を明らかにすることを目的とし，付着性のない粉粒体層への平板貫入現象を対象とした大規模な離散粒子シミュレーションを行ったものである．ここでは，メゾスケール構造が顕著に形成すると考えられる密充填状態を対象とし，また，貫入速度については貫入抵抗へ影響しない範囲とした．特に，粒子サイズ，貫入物の先端形状，貫入方向に焦点をあて検討を行った．本論文は，以下の6章で構成される．

第1章では，本研究の背景と既往の研究について説明し，目的を述べた．

第2章では，本研究で用いた離散粒子シミュレーション手法である離散要素法について説明し，実験結果との比較により，構築した平板貫入モデルが貫入抵抗，粉粒体の変形挙動ともに精度良く計算可能であることを示した．

第3章では，平板幅/粒子サイズを2.6～63の範囲で変化させ，粒子サイズの影響を検討した．粒子サイズは貫入抵抗の主要因である平板先端部に作用する先端抵抗に影響し，粒子サイズが平板幅に対して相対的に大きくなるに従い先端抵抗が大きくなること，平板幅/粒子サイズが20～30程度で先端抵抗の変動傾向が大きく変わることを示した．前者は，平板先端前方に形成されるよどみ領域の大きさに粒子サイズ依存性があるためであり，後者は変動の要因がせん断帯形成によるものであることに加えて，平板先端前方に形成されるせん断帯の厚みが粒子サイズの約20倍と依存性があるためであることを明らかにした．

第4章では，平板の先端形状に着目し，平板先端部の形状が貫入抵抗と粉粒体挙動に与える影響とそのメカニズムについて，先端部の角度を60～180度の範囲で変化させることにより検討を行った．先端角度が大きい場合にのみ，先端部近傍によどみ領域が形成することを示し，よどみ領域形成の有無がせん断帯の形成起点や発生頻度に影響することを明らかにした．さらに先端部の角度に応じてメゾスケール構造が変化することにより，粒子の接触に伴う摩擦散逸構造が変わり，結果的に貫入抵抗の大きさと変動傾向が変化することを明らかにした．

第5章では，平板の貫入角度が貫入抵抗および粉粒体挙動に与える影響について，粉粒体層に垂直な方向を0度とし，0～60度の範囲で変化させて検討を行った．平板先端部の形状が平坦な場合，貫入角度が0度となるに従って，先端抵抗が増加することを示した．これは，貫入時に平板が粉粒体層へ供給したエネルギーのうち，8～9割程度が平板先端近傍のせん断帯における粒子－粒子間の摩擦によって散逸し，貫入角度が0度に近づくにつれ先端近傍での摩擦散逸量が増加するためであることを明らかにした．

第6章では，本研究にて得られた結果を総括し，今後の課題と展望を述べた．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　宮井　慎一郎　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	准教授	辻　拓也
	副 査	教授	渋谷　陽二
	副 査	教授	田中　敏嗣
	副 査	教授	芝原　正彦

論文審査の結果の要旨

粉粒体への物体貫入現象は，建設・鉱山機械の土砂掘削，建築物の杭打設，脚ロボットの不整地歩行，隕石落下によるクレータ形成など，様々な工学・理学問題に関係しており重要である．本論文は，大規模な離散粒子シミュレーションにより，粉粒体へ平板を貫入させた際に生じる貫入抵抗と粉粒体挙動との関係を明らかにすることを目的とし，特に粒子サイズ，貫入物の先端形状，貫入方向のそれぞれの影響について詳細な検討を行っている．主要な成果は，以下の通りである．

1. 離散要素法（DEM）に基づく数値シミュレーションモデルおよび数千万個以上の粒子を用いた大規模計算を可能とする大型計算機向けに並列化された計算プログラムを構築し，回転抵抗モデルを導入することによりガラスビーズを用いた実験の結果を定量的に再現できることを示している．
2. 粒子充填率を一定に保ったまま，粒子サイズを平板幅に対して相対的に変化させることにより，粒子サイズの影響を広範囲に検討している．貫入抵抗や粉粒体挙動を考える上で重要な，せん断帯やよどみ領域などといった粒子のミクロなスケールから貫入抵抗が定義されるマクロなスケールまでの間に潜在するメゾスケールでの特徴的な構造に粒子サイズ依存性があることを明らかにしている．粒子サイズが平板幅の 1/20～1/30 程度と大きくなるに従い，これらのメゾスケールでの特徴的な構造の，特に動的な振る舞いを明確に捉えることが困難になることを明らかにしている．
3. 平板と平行な方向に貫入させた場合，貫入抵抗の主要因は平板先端面に生じるものであることを明らかにしている．また，粉粒体中のエネルギー散逸について検討を行い，平板から粉粒体に投入された全エネルギーの大部分が，平板先端部近傍に形成されるせん断帯において，粒子－粒子間の摩擦により散逸することを示し，貫入抵抗の発生が極めて局所的な現象に起因することを明らかにしている．
4. 平板先端部の突起形状が鋭角になるに従い，平板先端部近傍によどみ領域が形成されなくなることを示し，エネルギー散逸についても，平板先端面とこれに直接接触している粒子との間の摩擦によるものが支配的となることを明らかにしている．これは先端部の形状に応じてエネルギー散逸構造が変化し，結果的に貫入抵抗へ影響することを示している．
5. 粒子データから求めた連続体としての応力場から，せん断帯の発生方向が粉体層中の局所的な主応力方向と密接に関係していることを明らかにしている．

本論文は，連続体モデルでは直接取り扱うことができない粒子レベルの影響を，十分に多自由度な粉粒体を用いて検討したものであり，粉粒体力学の進展に寄与するものである．また，実用的な側面からも大きな示唆に富むものであると言える．以上より，博士論文として価値あるものと認める．