

| | | | |
|---|--|----|-------|
| 京都大学 | 博士 (理学) | 氏名 | 井嶋 大輔 |
| 論文題目 | Eigenvalue analysis of amorphous solids consisting of frictional grains under athermal quasistatic shear (非熱的準静的剪断下での摩擦のある粒子からなるアモルファス固体の固有値解析) | | |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>粉体のような主に斥力からなる分散粒子系は広範な応用を持ちながら、その複雑な振る舞いを予言する事は難しい。これらの系の研究は長いが、未だその振舞の物理的機構を明らかにする事は出来ていない。高密度に充填された分散粒子系は外力に対して固体的な応答を示すためアモルファス固体と呼ばれる。その応答を特徴付ける観測量が剛性率であり、どのようなモードが重要になるかを特徴付ける観測量が状態密度である。これらの観測量に関する近年の研究の進展は著しいが、その殆どが粒子間摩擦力の効果を見逃しており、これらの解析の現実的なアモルファス固体に対する有効性については疑問符が付く。この様な当該分野の現状を踏まえて本論文では摩擦のある粒子が準安定状態にあるアモルファス固体に微小剪断を加えた際の剛性率と状態密度を準安定状態の固有値・固有関数解析から理論的に求めた。</p> <p>本論文の第 1 章は本論文と関係した先行研究のレビューである。ここではアモルファス固体の概要と粒子間の摩擦力の役割を紹介した後、摩擦のない粒子からなるアモルファス固体で用いられる動的行列に基づく固有値・固有関数解析の概略と摩擦のある場合の少数の先行研究について紹介した上で、本論文の目的を説明している。</p> <p>第 2 章では本論文の解析で用いた数値計算的手法、特に離散要素法とアモルファス固体の初期条件をどのように用意するかの詳細を説明している。またこれらの数値解析における摩擦を含めた粒子間相互作用モデルと離散要素法が時間刻みに対して精度がどの程度保たれているかについても詳述している。</p> <p>第 3 章では、一層に敷き詰めた球形粉体に対応してヘルツ型相互作用をする摩擦のある粒子系が、剪断のない状態から無限小の剪断歪を加えた際の応答を調べている。まず摩擦力が十分小さいと状態密度が低周波領域に現れる粒子の回転モードと高周波領域の粒子の並進モードが分離でき、摩擦力が大きくなるにつれて 2 つのモードが融合して、状態密度が従来知られていない振る舞いを示す事を明らかにした。また線形応答領域では回転と並進がカップルした場合に摩擦力の影響で剛性率が大きく依存するという結果を得た。これらの結果はシミュレーションによるものと固有値・固有関数解析によるものが完全に一致しており、その結果の正しさを立証している。</p> <p>第 4 章では 2 次元の円盤から成るアモルファス固体を想定し、線形バネに基づく相互作用をする粒子系に対する有限歪における剛性率を解析している。その際、散逸力は粒子間相互作用に付随したのではなく、粒子速度に比例したものを採用している。本章での基準状態は有限剪断歪下での準安定状態である。本論文で示したことは有限歪下でストレス雪崩がある場合でも、その臨界的な歪の点を除き固有値解析は定量的に有効である事を示した点である。もう一つ注目すべき本論文の成果は、従来の研究で示唆されていたストレス雪崩の前駆現象は線形バネ系では存在せず、予兆なしにいきなり雪崩が生じる事を明らかにした点である。</p> <p>第 5 章では本論文の成果をまとめて、今後の研究の進展に向けての課題を幾つか提示した。また、付録では本文で説明できなかった解析の詳細について説明している。</p> | | | |

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

アモルファス固体では粒子の配置は相関を持った状態で乱れており、外力に対する応答を完全に理論的に再現する事は困難である。そのため、殆どの先行研究では粒子配置を理論的に決める事は諦めて、安定な粒子配置が与えられた際に外力に対する応答を動的行列の固有値問題を数値的に解く事で応答を求めている。本論文で用いられた解析もその手法を採用している。また、本論文で扱った摩擦力では粒子間の滑りの効果は無視されており、本論文で論じた摩擦力の影響も限定的である。

これらの方法論的な限界を踏まえた上でも、以下に説明する様に本論文の意義は明らかである。まず粒子間摩擦力の効果を正しく考慮した先行研究がほぼない状態で、本論文では一般に動的行列がヤコビ行列になり、左右固有値方程式が異なる事を正しく解析し、シミュレーションと完全に一致する結果を得た。更に3章で状態密度にどのように粒子回転の影響が現れるかを明らかにし、また粒子回転単独ではなく並進とカップルして剛性率が摩擦力に依存することを示した。また第4章で論じた線形バネで相互作用をする粒子系ではヘッセ行列がヤコビ行列と等価になり、接触力の履歴依存性が消えて、剪断歪の影響を受けて頻繁にストレス雪崩があるような大きな歪があっても、雪崩が起こる点を除きシミュレーションと完全に一致する剛性率を得た。以上の成果は本論文の意義を明確に示している。更に非線形バネ系で見られた雪崩の前駆現象がこの系ではないという結果は、塑性現象の前駆現象に基づき塑性現象を予見出来る筈という期待にアンチテーゼを示した点でその意義は大きい。また、本論文では常に固有値解析の結果とシミュレーションの結果の一致を確認しており、本論文の成果を通してのこの分野の着実な進展を印象付ける。即ち、粒子の安定配置さえ与えられれば、状態密度によってアモルファス固体の特徴的な振る舞いを特徴付ける事が出来、有限歪であっても剛性率が決められる事になる。これらの成果を踏まえて本論文の意義は大きい。

しかし、既に説明した本論文で用いられた手法には既存の手法の延長上にあり、得られた成果は驚くべきものではない。同時にその方法論の限界を明確に示している。特にシミュレーションや実験で粒子配置の詳細な情報がないと固有値解析ができないという点で、理論単独の予言性に乏しい。また、歪のない状態からの線形応答では粒子間滑りの効果は無視する本論文での解析は妥当であると期待されるが、塑性領域で粒子間配置が頻繁に入れ替わっている領域で滑りの効果が無視できるとは思えず、本論文で得られた成果の適用範囲は限定的であると言わざるを得ない。それにも拘わらず、仮に近似的に粒子配置を決める理論的手法があれば、本論文の手法と組み合わせて予言性を持つアモルファス固体の応答理論を完成できるのではと期待させるに足る内容を含んでいる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降