

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 中瀬 仁

粒子間接点に粘着力が作用してない非常に多数の粒子の集合体である砂や礫などの地盤材料の変形・強度特性を予測しようとする場合、通常的设计問題や研究手法においては、粒状体を連続体として仮定する。しかし、実際には粒状体は連続体でなく、そのことは変形と破壊過程に反映されているはずである。例えば、破壊直前に変形が狭い帯状の領域（すべり帯あるいはすべり層）に集中し始め、ピーク強度が発揮された後は、軟化しながらすべり層への変形の集中が一層進み、すべり層の外は弾性的な除荷変形をすることが経験的に知られている。さらに、すべり層の厚さは粒子の大きさに比例し粒子の形状の影響を受けることや、完全に軟化して残留状態に至るまでのすべり層のせん断変形の量も粒径に比例することも経験的に知られている。連続体力学の範疇での研究ではこの現象はひずみの局所化と呼ばれており、様々な数値的研究が行われて来た。しかし、本来この現象は多数の粒子で構成された構造物の安定と破壊の問題であるのにも拘わらず、数値的研究の物理的根拠を明らかにした研究は殆どない。また、実際の砂礫を用いた変形・強度実験において、このような微視的構造を観察することは非常に困難である。この様な理由のため、粒状体の破壊を含む変形・強度特性の本質理解が進んでこなかった。

本研究は、理想化した粒状体の二次元模型の平面ひずみ圧縮試験を行い、粒状体の破壊に伴う内部の微視的構造の変化を詳細に観察するとともに、個別要素法により数値的シミュレーションを行い、上記ひずみの局所化の現象に伴う粒状体の破壊メカニズムを微視的構造の立場から解明しようとしたものである。

序論で、既往の研究を総括し、上記のような研究の背景をまとめている。

第二章では、粒状体の破壊に伴う粒状体内部の微視的構造骨格の変化に関する既往の研究をまとめ、本論文の基本概念として、粒状体内部の微視的構造は、粒子が球形に近い程ヒンジで結節されたメンバーからなるトラス構造に近づき、球形から離れるほどメンバーの結節点でモーメントを伝達できるラーメン構造に近づくことを提示している。

第三章は、本研究で用いた数値的シミュレーション手法である、Cundallによって提案された二次元個別要素法の概要を述べている。この手法の妥当性を直接実験によって厳密に検証した研究例がこれまで殆ど無かったことから、球形粒状体に対する二次元個別要素法の計算条件に合わせた「円形断面の亚克力棒の一面せん断試験と平面ひずみ圧縮試験」を行っている。その実験結果を数値シミュレーションし、個別要素法により実験結果を正確にシミュレーションできることを示すと同時に、粒状体の破壊は粒子の局所的回転を伴っていることを、その結果により示している。

第四章では、既往の研究で行われた砂の平面ひずみ圧縮試験における供試体内部の局所的変形の様子を詳細に検討している。すべり層が剛な境界と接している供試体の上下端部からではなく、供試体の中央部から発生していることを示し、その理由として剛な上下端面を底辺とする二つの楔が形成され、その接近により供試体中央部に局所的に変形が集中することを示している。

第五章では、上記観察を基礎にして、平面ひずみ状態にある粒状体が破壊するときのマクロ的なひずみ硬化・軟化挙動を再現できるとともに内部の微視的構造の本質的メカニズムを保持しつつ最も理想化したモデルとして「アルミフレームの菱形ユニットを組み合わせた格子構造からなる供試体」を提案している。その圧縮試験を実施して、粒状体のひずみ硬化・軟化を伴うマクロ的な荷重～変位関係の特徴を持つ結果を得ている。また、ある箇所で格子点での塑性的変形を原因として局所的なユニットの格子メンバーの回転を伴うユニットの圧縮破壊が生じ、その変形モードが幾何学的に周囲へ伝播することにより変形が集中した帯（即ちすべり層が形成）されることを示した。また、格子メンバーの回転により圧縮力を支えるのに不利な構造になって行くことが、いわゆるひずみ軟化の原因であることを示している。これらの現象は、実際の粒状体の破壊現象と良く対応していて、実際の粒状体の局所的破壊メカニズムを理想化した形で捉えている。また、個別要素法を用いてこの軸圧縮試験のシミュレーションを実施して、マクロ的な荷重～変位関係とともに粒状体の破壊時の局所的な変形挙動を良く再現できることを示している。

第六章では、アクリル棒の平面ひずみ圧縮試験及びその個別要素法でのシミュレーションにおいて、上で述べた粒状体内部の微視的構造の破壊時の局所的な変形挙動を確認している。すなわち粒状体の破壊は、以下の様に内部の微視的構造の変化を伴って生じる。1) 粒状体内部の微視的構造骨格の不整によって局所的に集中した変形が生じて、その変形が幾何学的に伝搬してすべり層が形成され、2) 形成されたすべり層により供試体が複数の剛体的小ブロックに分割され、3) 小ブロック間の力の釣合いの均衡が失われて小ブロックが統合されて、供試体を貫くすべり層に沿った大ブロックの非対称的な相対変位が生じる。

第7章は、結論である。

以上要するに、理想化された粒状体の平面ひずみ圧縮試験と個別要素法によるその実験の数値シミュレーションを行うことにより、粒状体の破壊に伴う内部の微視的構造の変化とすべり層の形成過程を明らかにし、非連続体として粒状体の破壊メカニズムと変形強度特性の研究分野の発展に寄与する新しい知見を与えている。これらは、土質工学に分野において貢献することが大である。よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。