

氏名（本籍地）	大石 正行（滋賀県）		
学位の種類	博士（理工学）		
報告・学位記番号	甲第 477 号（甲（理工）第三号）		
学位記授与の日付	2020 年 9 月 25 日		
学位記授与の要件	本学学位規程第 3 条第 1 項該当		
学位論文題目	土粒の粉砕メカニズムに関する研究		
論文審査委員	主査	教授	工学博士 望月 修
	副査	教授	博士（工学） 田中 尚樹
	副査	教授	工学博士 吉田 善一
	副査	教授	博士（工学） 窪田 佳寛
	副査		安部健 (東京ガスエンジニアリングソリューションズ株式会社 事業企画部技術企画グループ マネージャー)

学位論文審査結果報告書〔甲〕

【論文審査】

本論文は土壌の検査のための試料を作るために用いる土粒粉砕機における土粒粉砕メカニズムを科学的に調べ土の性質解析の発展向上に寄与したものとして高く評価できる。また、現在土砂災害の防止対策を進める国内外の研究機関から簡易型高速粉砕機器が望まれており、その要望に応えるべく大石氏らが開発した現在の装置の改良発展に科学的根拠を示した点でも大いに評価できる。従来の粉砕装置は大型で、粉砕時に発生する土埃も環境を悪くするものとして問題視されていたものであったが、それらを解決するために本研究成果は研究環境の改善にも寄与できる。また小型化により多くの研究機関が保有できる可能性を高めた点でも社会的貢献度は大きい。

本論文は5章から構成されている。第1章に土粒研究における背景、本論文の研究目的を述べている。第2章では現存の土粒粉砕機における問題点の解決、小型化を目指して著者らが開発した遊星式土粒粉砕機における粉砕メカニズムの観察を行った結果について述べている。第3章では土粒の粉砕の基本的メカニズムについて、土粒の圧縮破壊、摩擦破壊、振動破壊についてそれぞれの力が単独で作用した際の破壊メカニズムについて実験を行った結果について述べている。第4章では、種々形状の土粒を円柱形ペレットで形状を統一して、モデル実験を行なって、粉砕のメカニズムに関わる力学的考察を行なっている。以下に本論文要旨を載せる。

第1章 序論

生物と土は密接な関係を持っている。環境汚染の増加とともに土壌汚染も広がり始め、土壌分析の重要性が高まっている。土壌の化学的な分析を行う場合、各種環境調査マニュアルに従い土壌を前処理した後に分析をする。この前処理の段階で、自然界から採取した土壌を分析の目的に応じて粒径を一定以下に調整する必要がある。土壌の粒径を調整する場合、土壌の粉砕と篩分けという工程を経なければならない。多くの測定対象土壌を分析するために、この粒径の調整を効率的に行える機械化が求められている。

この章では、まず、土壌の基本的な三相の構造と、粉砕する土壌が固い塊の状態になる団粒という特徴的な土壌構造について説明した。また、粉砕については、様々な粉砕方式や装置が生み出されている。そのメカニズムや理論研究に触れ、従来の土壌専用の粉砕装置の問題点から社会が求める粉砕装置の開発された経緯と装置の特徴について説明をした。

遊星式ロッドミルは非常に優れた粉砕能力をもっているが、そのメカニズムは明らかにされていない。この粉砕メカニズムを解明することが装置のさらなる改良や効率化に示唆を与えると考え次章に続く研究をした。

第2章 ロッドミル内の団粒土壌の破壊過程

遊星式ロッドミルにおいて、土粒がどのように粉砕されるのかを調査した。まず、遊星式ロッドミルで使用する、粉砕ロッドと粉砕能力の関係について粉砕ロッドの大きさと数量による粉砕能力の関係を実験により明らかにすると非常にユニークな関係があり、最適な粉砕ロッドサイズが求められた。

次に、粉砕する土粒を一軸圧縮試験装置でひずみと破壊される荷重の最大値を測定した。測定した土粒毎にピーク値に大きな差が認められたが1番目のピークで土粒は破壊され2番目のピーク以後土粒はさらに断片化された。遊星式ロッドミルに取り付けられた粉砕容器内の加速度を計測すると粉砕ロッドが土粒に与える力は、一軸圧縮試験で得られた土粒を破壊させる荷重の最大値の平均値よりはるかに小さいことが分かった。そこで、遊星式ロッドミルに取り付けられた容器内で土粒が粉砕されるメカニズ

ムを解明するために、容器の中で、粉碎ロッドと粉碎される土粒の挙動を容器上部に取り付け高速度カメラを用いて粉碎過程を撮影した。この可視化実験では粉碎ロッドが粉碎に大きな役割をしていることがわかった。可視化映像から粉碎過程の初期段階では不規則な粉碎ロッドの挙動により土粒に衝突して分割される様子を見ることができた。しかし粉碎過程が進むと容器内に土埃が多く発生し鮮明な画像が得られなかった。土粒の表面は粉碎ロッドと容器により摩耗にさらされているため、細かな土粒子は土粒の表面から発生している。土粒の角のある表面は粉碎ロッドが接近して移動するため、粉碎ロッドが土粒に接触・衝突する可能性が多くあり、それにより最初に削られ、次に表面の土粒子が結合力から解放されるために土粒全体が壊れやすくなると考えられた。

第3章 団粒土壌の破碎の基本的メカニズム

前章の可視化実験で明らかにできなかった容器内での粉碎メカニズムを解明するために基礎的な実験により粉碎を検討した。ここではどのような種類の応力が迅速な粉碎を引き起こすのか、土粒の垂直振動試験と往復摩耗試験装置による圧縮・せん断応力試験を行い、土粒に作用する単一応力による粉碎メカニズムを観察した。

粉碎容器内の振動運動をシミュレートし振動容器に土粒を単体で投入し、垂直振動と水平振動を与えて土粒の変化を観察した。土粒の塊としての質量は、時間経過とともに対数的にわずかに減少するが、2時間経過しても粉碎されなかった。したがって、遊星式ロッドミルの粉碎容器内での土粒の粉碎は衝撃圧縮によるものではなく、せん断応力によるのであると考え往復摩耗試験装置による圧縮・せん断応力試験をした。その結果、わずかなせん断力を土粒に加えるだけで短時間に壊滅的に土粒は破壊された。つまり、遊星式ロッドミルの粉碎容器内でロッドによるせん断力が土粒の粉碎に効果的であると考えられた。

第4章 土壌粒子の破碎メカニズム

これまでの研究で、土粒の粉碎には圧縮せん断力が効果的であると示唆された。粒子状物質である土粒を圧縮するとわずかに弾性挙動が観察される。さらに圧縮を加えると弾性変形から破壊へと至る。自然界から採取した土粒では大きさも形状も均一ではなく、弾性変形から破壊へと至る力の伝搬プロセスについて定量的な試験には適していない。

本章では、同一質量・サイズのソイルペレットを製作して、破壊に至る圧縮荷重と摩耗との関係を明らかにすることに焦点を当てた。このソイルペレットに垂直圧縮荷重試験と、段階的に荷重を加えた圧縮摩耗試験を行い、破壊プロセスを観察した。

ソイルペレットの均一性について検討するため、同じ土質の土粒と垂直圧縮加重試験により比較した結果、土粒の降伏応力とひずみ量の関係は不均一であるのに対し、ソイルペレットの94%は同じひずみ量で破壊した。ソイルペレットの垂直圧縮加重試験を観察すると、1番目の圧縮応力のピークでソイルペレットの中心部に垂直方向に亀裂が入り、亀裂の拡大とともに圧縮応力が低下したが一気に壊滅的な破壊には至らなかった。

荷重を加えた圧縮摩耗試験では、垂直圧縮加重試験同様にソイルペレットの中心部に亀裂が入り、亀裂の拡大とともに一気に壊滅的に破壊される様子が捉えられた。また、圧縮摩耗試験では段階的に加えた荷重量とソイルペレットの破壊に至るまでのペレットの回転数には対数的な相関関係があった。

第5章 結論

垂直圧縮荷重は、ソイルペレットに垂直荷重を適用するだけであるのに対して、往復圧縮荷重を加えた圧縮摩耗試験ではソイルペレットは円周方向の接触点に動的荷重を加えるため周方向に静的荷重と動的荷重を加えることになる。これにより、土粒子間の結合強度が低下し、ソイルペレット内部の土粒子間に亀裂が発生し、ソイルペレットが一気に破壊すると考えられた。これは、粉碎容器内の土粒を粉碎した粉碎ロッドの質量と容器の回転との関係を示唆している。

本研究の成果により土粒の粉碎のメカニズムが解明されたことで、粉碎装置としての回転機構の検討や、せん断・摩耗・圧縮衝撃力をより効率的に土粒に与える手法の改善など、装置の小型化、製造コストの削減、粉碎効率の向上、省電力化など装置の進化を考えた設計変更を可能にするものと考えている。

本論文に関する学術論文

- [1] Oishi, M., Kubota, Y., Mochizuki, O., (2019) Investigation of the Fragmentation Process of Clods in a Rod Mill Developed for Research Use, World Journal of Mechanics, **9**, 233-243. 第2章の成果として論文に纏めたもの
- [2] Oishi, M., Kubota, Y., Mochizuki, O., (2019) Investigation of Fundamental Mechanism of Crushing of Clods in a Rod Mill, Engineering, **11**, 703-716. 第3章の成果として論文に纏めたもの
- [3] Oishi, M., Kubota, Y., Mochizuki, O., (2020) Crushing Mechanism for Soil Particles, World Journal of Mechanics, **10**, 69-82. 第4章の成果として論文に纏めたもの

【審査結果】

東洋大学理工学研究科（生体医工学専攻）の博士学位審査基準に照らし合わせ、公聴会での口頭発表内容、論文内容審査の結果、妥当な研究内容であり、学位授与の資格ありと認められる。

本審査委員会は、大石正行氏の博士学位請求論文について、所定の試験結果と論文審査結果に基づき、全員一致をもって本学博士学位を授与するにふさわしいものと判断した。