

破碎性粒状体の主応力回転下における 力学挙動とその評価法に関する研究

学位論文内容の要旨

これまで地盤を構成する粒子の破碎現象は、しらすやまさ土などの特殊土における限定的な問題として捉えられてきた。しかし、構造物の大型化、大深度化に伴う地中応力の増大や、交通荷重の重量化などによって、もはや粒子破碎はあらゆる粒状体に生じうる一般的な問題と見なされるようになってきている。例えば、フィルダムにおけるロック材は粗大粒子で構成されており、ダム底部では数 MPa 以上の高圧が作用するため破碎が誘発されている。また、鉄道軌道を構成するバラストでは列車走行による繰返し荷重によって粒子の稜角性が失われ、沈下の増大や剛性の低下が生じるとされている。さらに、火山灰地盤や石灰質系の砂地盤においては杭周面における粒子破碎のために体積収縮が起こり、杭の周面摩擦力が低下するという報告がある。一方、粒子破碎に関する研究は従来主に三軸試験や、締固め試験などの試験前後における試料の粒度分布の変化を調べることで行われてきた。しかし、こうした力学試験が抱える問題と同様に、粒子破碎についてもこれらの試験が必ずしも原位置における応力状態、変形状態に対応しているとは言えないという指摘がある。

このような背景から、鉱物組成別の単粒子破碎特性に着目することによって集合体の力学挙動に結び付けようとする試みや、せん断帯部分とそれ以外の部分における粒子破碎の違いに着目した研究、大ひずみ領域まで変形を与える試験機を用いて、粒子破碎の収束を見極めようとする研究がいくつか行われてきた。これらの試みは、一定の成果を挙げてはいるものの、試験結果は用いた試料や試験方法に依存するところが大きく、普遍的な粒子破碎法則を導くには至っていない。このことはあらゆる条件に適合するような試験法や推定法、または法則を導くのではなく、現実には粒子破碎が起こっているような実現象を模擬したり、粒子破碎が起こりうるであろう条件を設定するなどの手法で、多様な議論を喚起する必要性を示していると指摘される。

また、異方性粒状地盤における主応力軸方向の違いが力学挙動に及ぼす影響や、主応力軸回転がダイレイタンス特性に及ぼす影響について調べた研究は多岐にわたっているものの、主応力軸方向の違いや主応力軸回転が粒子破碎に及ぼす影響について調べた研究は少ない。さらには、粒子破碎の抑止を目的とした研究もその事例が見当たらないのが現状である。

こうした背景から、本研究では主応力軸方向の違いや主応力軸回転が粒子破碎特性に及ぼす影響について論じている。また、粒子破碎に及ぼす物理的、力学的要因についても考察を加えている。さらに、限られた範囲内ではあるが、単調載荷過程および繰返し載荷過程における粒子破碎特性を明らかにしたうえで、これらの応力場における粒子破碎評価法を提案している。

さらに、一連の単調載荷試験結果から得られた粒子破碎特性を考察し、過圧密履歴を与えることで繰返し載荷過程における粒子破碎の進展を抑止する方法を提案した。

本研究は全6章から構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、粒子破碎に関する既往の研究をレビューした。粒子破碎に及ぼす影響因子を体系的に分類し、それぞれについて既往の知見をまとめている。そして、これまでの研究における問題点を明らかにしたうえで、本研究の方向性および目的を明示している。

第2章では、土質試験に用いられる様々な試験機を紹介し、本研究で用いた中空ねじりせん断試験機の特徴や優位性について述べた。

第3章では、本研究で破碎性粒状体として用いた北海道粗粒火山灰土の生成および堆積過程について概説し、試料のサンプリングから物理試験結果までを詳細に記述している。また、本研究で行った各試験方法について説明するとともに、本研究における粒子破碎評価指標として細粒分増加量を定義した。

第4章では、単調載荷過程における粒状体の力学特性および粒子破碎特性について明らかにしている。例えば、物理的、力学的要因が力学特性に及ぼす影響については、せん断応力の発現に及ぼす影響は殆ど見られなかったものの、土圧係数 K が軸ひずみ発生挙動に及ぼす影響は顕著であった。また、試料の乾湿が粒子破碎特性に影響を及ぼすことが確かめられている。次に、強度特性についてその特徴を詳細に考察したところ、通常の粗粒材料以上に強いせん断抵抗角の最小有効主応力依存性が確認され、ここに粒子破碎性の影響が認められるとしている。さらに、圧密および単調載荷過程で生じる細粒分増加量が、有効応力比および主応力軸方向によって表現されることを示し、これを圧密および単調載荷過程における粒子破碎評価法として提案している。

第5章では、繰返し載荷過程における粒状体の力学特性および粒子破碎特性について明らかにしている。具体的にはせん断応力比、 K 値、平均有効主応力、過圧密比、繰返し載荷回数、主応力軸回転角の影響について調べている。例えば、力学特性についてはせん断応力比および平均有効主応力が同じである場合、等方圧密供試体では発揮されるせん断ひずみ振幅が大きいものの、体積ひずみ発生挙動は小さく、異方圧密供試体ではそれぞれ全く逆の挙動が得られるとの事実を明らかにしている。また、粒子破碎特性については、せん断応力比が高くなるほど、または過圧密比が小さくなるほど発揮されるせん断ひずみ振幅および体積ひずみが大きく、生じる細粒分増加量も多くなることが明らかとなった。

続いて、繰返し載荷試験の応力とひずみの時刻歴によって与えられるせん断弾性係数、塑性仕事量を算出し、種々の要因が供試体剛性の変化ならびに粒子破碎に費やされるエネルギーの変化に及ぼす影響について考察している。ここでは、せん断応力比の高い領域では繰返し載荷回数の増大とともに供試体剛性が回復し、塑性仕事量が減少する傾向を示すことを明らかにしている。こうした傾向は異方圧密供試体において顕著であったことから、連続的主応力軸回転の影響に起因するとしている。さらに、過圧密供試体では正規圧密供試体に比べて、せん断応力比が大きな領域においてもせん断弾性係数、塑性仕事量の変化が安定することを示すとともに、先行圧密過程における粒子破碎が初期供試体剛性の増加に貢献し、なおかつ、繰返しせん断過程における粒子破碎を抑止するとしている。最後に、累積塑性仕事量と細粒分増加量、体積ひずみ挙動をせん断応力比、繰返し載荷回数、過圧密比毎に比較検討し、それぞれのパラメータが密接な対応関係にあることを明らかにしたうえで、累積塑性仕事量に基づく繰返し載荷過程の粒子破碎評価法を新たに提案している。

第6章では、各章で得られた知見を総括し、今後の展望と課題を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浦 清 一

副 査 教 授 三 田 地 利 之

副 査 教 授 藤 井 義 明

副 査 助 教 授 石 川 達 也

学 位 論 文 題 名

破砕性粒状体の主応力回転下における 力学挙動とその評価法に関する研究

地盤を構成する土粒子の破砕は、構造物の大型化や基礎の大深度化に伴う地中応力の増加、さらには交通荷重等の増大によって、各種の基礎地盤や土構造物において誘発される重要な工学的問題となってきた。例えば、フィルダムのロック材等は粗大粒子で構成されているが、底部では高拘束圧が作用するため顕著な破砕がもたらされている。また、鉄道軌道を構成するバラストでは、列車走行による多数回の繰返し荷重によって粒子の稜角性が失われ、沈下の増大や剛性の低下が生じるとされている。さらに、火山灰地盤や石灰質系の砂地盤においては、杭等の深い基礎周面における粒子破砕のために体積収縮が惹起され、杭体の支持力を構成する周面摩擦力が低下する。特に、しらす、軽石、スコリアなどの火山灰土は、普通レベルの荷重下でも粒子破砕が生じる破砕性土である。このような破砕性火山灰土では低い応力域においても構成粒子の破砕が生じやすく、粒子自体の硬度が高い砂のような非破砕性粒状体の力学特性とはかけ離れた特異な挙動を示すことが今までの研究により明らかにされている。

したがって、破砕性粒状体からなる地盤の力学挙動の評価では粒子破砕の影響を考慮することが必須となる。いままでに行われてきた粒子破砕に関する室内試験研究は、主に三軸圧縮試験や締固め試験などに基づいていた。しかしこうした力学試験は、厳密な意味では原位置における応力状態や変形状態に対応していないことから、実地盤における粒子破砕の特性を把握する手段としては不適切であり、したがって結果を実設計や施工にそのまま適用することはできない。

このような背景から、本研究では異方的な堆積構造にある実地盤で起こる“相異なる三主応力のもとで主応力軸方向が回転する”という一般的な応力条件を再現できる中空ねじりせん断試験機を用いて、せん断による普遍的な粒子破砕法則を見出すことを目指した。このために必要となる、主応力軸方向の違いや主応力の連続的な回転が粒子破砕に及ぼす

影響を定量的に明らかにするための一連の静的・繰返しねじりせん断試験が粗粒火山灰土を対象に行われた。さらに、種々の組み合わせ荷重下の単調載荷試験から得た粒子破碎特性を詳細に考察し、繰返し載荷過程における粒子破碎の進展を抑止する方法を検討した。

本論文は6章から構成されるが、研究の成果を章毎に要約すると以下のようなものである。

第1章では研究の背景ならびに既往の研究とその問題点を示し、本研究の目的を明確に述べている。

第2章では、土質試験に用いられる代表的な試験装置を紹介するとともに、本室内試験で用いた中空ねじりせん断試験機の特徴や力学的優位性について述べた。さらに、本研究の目的を達成するために行った装置の改良や自動化・高度化等の説明を加えている。

第3章では、破碎性粒状体として用いた粗粒火山灰土について、その生成および堆積過程を概説し、さらに試料のサンプリング法や物理試験結果を詳細に記述している。なお、本研究で行った各試験方法の説明に加えて、本研究における粒子破碎評価指標として用いた細粒分増加量の工学的意義とその有用性を示している。

第4章では、単調載荷過程における粒状体の応力一ひずみ特性と粒子破碎性との関連を明らかにしている。ここでは構成粒子の物理的性質の違いが力学特性に及ぼす影響に加えて、火山灰試料の乾湿が粒子破碎特性にも顕著な影響があることを示している。さらに、強度特性についてもその特徴を詳細に考察し、通常の粒状体に比べてはるかに強いせん断抵抗角の最小有効主応力依存性が確認されている。すなわち、粒子破碎による破壊包絡線の拘束圧依存性である。これらの事実から、有効応力比および主応力軸方向に支配される構成粒子の破碎量を一般化し、単断せん断過程におけるその評価法を導いている。

第5章では、繰返し載荷過程における力学特性および粒子破碎特性を、任意のせん断応力比、平均有効主応力、過圧密比、繰返し載荷回数、主応力軸回転角のもとで調べている。ここでは、特に応力一ひずみ一破碎特性の定量化に適用できるいくつかの知見を獲得している。例えば、等方圧密供試体では発揮されるせん断ひずみ振幅と破碎による細粒分の変化挙動が異方圧密供試体のそれとは明らかに異なること、これは任意のせん断応力比および過圧密レベルによらない傾向であること、などの注目すべき事実を明らかにしている。さらに、繰返し載荷試験の応力とひずみの時刻歴からせん断弾性係数および塑性仕事相当量を算出し、連続的主応力軸回転場における正規圧密・過圧密供試体の剛性の変化ならびに粒子破碎に費やされるエネルギーについて検討し、塑性仕事をもたらす粒子破碎の物理的な意味とその定量化の工学的意義を明示している。これらの考察から、累積塑性仕事量に基づく一般応力下での繰返し載荷における破碎評価法を新たに提案している。

第6章は結論であり、各章で得られた知見を総括し、今後の展望と課題を述べている。

これを要するに、著者は、破碎性粒状体である火山灰質土のせん断破碎則を“相異なる三主応力下でかつ主応力軸方向が回転する”という一般応力条件のもとで確立するとともに、この種の地盤における“過圧密化などの応力履歴の導入による粒子破碎抑止効果”を定量的に把握することに成功しており、土質力学ならびに地盤工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。