

学 位 論 文 題 名

火山灰質粗粒土地盤の動的変形特性と
その評価法に関する研究

学位論文内容の要旨

北海道域を襲った最近の大地震は、軽石を含む火山灰地盤において液状化による被害や土構造物の流動破壊をもたらしている。また、九州南部においても、火山灰質粗粒土の一種であるしらす地盤の崩壊や液状化による噴砂の被害が報告されている。これらの被災事例は、火山灰地盤の動的強度の把握のみならず、その耐震性能の評価法を確立していくために必要な広範囲なひずみレベルにおける動的変形特性を的確に把握することが緊急の課題であることを示している。

このような状況のなかで、地震応答解析等に適用するための火山灰地盤の微小ひずみレベルにおける動的力学特性とそのひずみ履歴依存性、例えばせん断剛性率 G や履歴減衰定数 h とそのひずみ依存性を調べた研究は極めて少なく、室内試験結果に基づくいくつかの知見が得られているにすぎない。

一方、砂質土に関しては従来数多くの研究がなされており、せん断剛性率が間隙比や拘束圧に依存することを定量的に表示することに成功している。ところが、本来砂質土と同様な粒状体である火山灰質粗粒土では、構成粒子の内部や表面に空隙が多数存在するため、砂に比べてその乾燥密度 ρ_d は低く、間隙比 e が3.0を越えるような高い値になることも多い。このため多孔質な火山灰質粗粒土では、間隙比自体が通常の砂質土と同様の状態量として利用できるかという問題が生ずる。そのため、多くの研究者が示した砂質土($e \leq 2.97$)に関するせん断剛性率の間隙比依存性が火山灰質粗粒土においても同じ枠組みで議論できるのかどうかについては全く不明である。また、火山灰質粗粒土の特徴の一つである粒子破碎が、せん断剛性率にどのような影響を及ぼすのか、そして自然堆積地盤で発揮されているセメンテーションの影響の有無も定量的に評価しておくことが望まれている。

このような背景から、本研究では変位制御式繰返し三軸試験装置を新たに開発し、日本に分布する代表的な火山灰質粗粒土として、北海道と鹿児島県の火山灰地盤から不攪乱および乱した試料を採取し、それらの動的変形特性を詳しく調べている。さらに、微小ひずみレベルにおける動的変形特性の間隙比や拘束圧の依存性を調べ、粒子破碎性を示す火山灰質粗粒土と非破碎性土との相違を明確にすることを目標とした。

なお本研究では、一連の原位置試験が実施され、計測された力学情報に考察を加えた。具体的には、サイスミックコーン貫入試験および弾性波速度検層から求めた火山灰地盤のせん断剛性率を室内試験から算定したせん断剛性率と比較し、原位置および室内試験結果の対応関係を不攪乱試料の乱れの影響も考慮した議論がなされている。さらに、火山灰地

盤における標準貫入試験結果に及ぼす粒子破碎の影響も明らかにしている。

本研究は、全8章から構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、砂質土および礫質土に関する既往の研究をレビューし、動的変形特性を求めるための試験方法や動的変形定数に影響を及ぼす諸要因についての既往の知見をまとめている。

第2章では、本研究が対象とした北海道と九州の火山灰地盤の堆積形成過程を概説するとともにその地質条件の特徴を詳細に説明している。

第3章では、不攪乱試料の採取法やそれらの物理的性質、さらに室内試験のための供試体作製方法および原位置試験法を述べている。なお原位置試験は、標準貫入試験、電気式コーン貫入試験、オランダ式二重管コーン貫入試験、地盤の弾性波速度検層、サイスミックコーン貫入試験およびダイラトメータ試験である。

第4章では、本研究で新たに作製した「変位制御式繰返し三軸試験装置」について、その製作目的と装置の概要を紹介した。また、開発された試験装置の特徴を詳細に説明している。

第5章では、応力-ひずみ関係から求まる動的変形定数の定義をまず説明し、その解析法を明らかにしている。まず、試験法の違いが動的変形特性に及ぼす影響を調べた。その結果、既存の研究成果との比較より、本変位制御式繰返し三軸試験装置と従来の応力制御式のそれとは同一の動的変形特性を与えることを示し、本試験法の妥当性を示した。すなわち本試験法は、①砂の拘束圧の変化による動的変形特性の変化は著しい、②せん断剛性率比 G/G_0 と履歴減衰定数 h の間隙比依存性は、拘束圧依存性よりも低いなどの粒状体特有の動的変形特性を適切に再現していることが示された。次いで、供試体の構造異方性が動的変形定数にどのような影響を及ぼすのかを豊浦砂で検討した結果、堆積構造の相違による動的変形定数の変化が明白であることも確認している。さらに、豊浦砂と同様なクリーンな砂であるけい砂7号の動的変形特性は、豊浦砂と類似の挙動を示すことを明らかにしている。なお、これら2種類の砂の顕著な相違点として、せん断剛性率に及ぼす間隙比の影響度が異なることを指摘している。

第6章では、火山灰土の動的変形特性とそのひずみ依存性を一連の詳細な室内試験により調べている。その結果、粒子破碎が卓越する火山灰質粗粒土では、再構成・不攪乱供試体を問わず、拘束圧の増大に伴うせん断剛性率の増加は粒子破碎によって抑制される傾向にあることが見出されている。また、火山灰土の間隙比は通常の砂よりも著しく高くなるため、せん断剛性率に及ぼす間隙比の影響は小さくなることが判明した。さらに、粒子破碎が卓越する火山灰質粗粒土に関する試験結果では、片振幅せん断ひずみ $\gamma_{SA}=10^{-4}$ 以下の繰返し非排水せん断による粒子破碎はほとんどたたらされていないことから、 G_0 値に及ぼす粒子破碎の影響は非排水せん断過程よりも圧密過程において誘発されるものが支配的となるとしている。また、再構成された火山灰質粗粒土のせん断剛性率は、通常の砂と同様、間隙比と拘束圧の関数として式示可能であることが明らかにされている。

第7章では、原位置試験から求まる火山灰地盤の力学性状を把握するとともに、原位置と室内試験から求まる火山灰土のせん断剛性率の対応関係を調べている。その結果、①原位置火山灰土のせん断剛性率にはセメンテーションの効果が存在し、その評価のためには、不攪乱試料の質の確保が重要であること、②破碎性の強い火山灰地盤では、標準貫入試験時のサンプラー貫入により粒子破碎が発生し、これが N 値の過小評価を導く、③このことから、 N 値のみからこの種の地盤の力学性状を推定することは適切ではないこと等の事実を明

らかにしている。

第8章は、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 石 島 洋 二

副 査 教 授 三 田 地 利 之

学 位 論 文 題 名

火山灰質粗粒土地盤の動的変形特性と その評価法に関する研究

火山灰土は我が国に広く分布し、特異な堆積構造を呈していることが知られている。このような地盤ではその工学的性質が多岐にわたっていると想定されるが、地盤工学的見地に立った研究は極めて限定されている。特に火山灰質粗粒土の動的力学挙動に関する研究は、近年この種の地盤における地震被災事例が多いにもかかわらず、ほとんどなされていない。たとえば最近の北海道域の大地震では、砂質土に類似した液状化による被害や構造物の流動破壊が火山灰質地盤でもたらされている。また、火山灰質粗粒土の一種である九州南部域のしらす地盤でも、斜面崩壊や液状化による噴砂の被害が報告されているが、このような動的破壊に至ったメカニズムは不明である。これらの被災事例からも明らかなように、火山灰地盤の動的力学特性を的確に把握し、その耐震性能の評価法を確立することが緊急の課題になっている。

このような背景から、本研究では変位制御式繰返し三軸試験装置を新たに開発し、日本に分布する代表的な火山灰質粗粒土として、北海道と鹿児島県の火山灰地盤から不攪乱試料を採取し、それらの動的変形特性を広範囲なひずみレベルにおいて明らかにすることを目指した。具体的には火山灰地盤の地震応答解析等に必要な微小ひずみレベルにおける動的力学特性とそのひずみ依存性、すなわちせん断剛性率や履歴減衰定数の評価法を新たに提案することを試みている。さらに、併せて実施した一連の原位置試験結果を詳細に解析し、火山灰質粗粒土の動的変形定数に及ぼす構成粒子の破碎の影響を定量的に示すとともに、実堆積地盤で発揮されているセメンテーション効果についても検討している。

本論文は8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章では研究の背景を示し、本研究の目的と論文の概要が述べられている。

第2章では、本研究が対象とした北海道および九州における火山灰地盤の堆積形成過程やその地質条件の特徴が説明されている。

第3章では、不攪乱試料の採取法やそれらの物理的性質、さらに室内供試体作製方法が紹介されている。また本研究で行った原位置試験である標準貫入試験、電気式コーン貫入試験、オランダ式二重管コーン貫入試験、地盤の弾性波速度検層、サイスミックコーン貫入試験およびダイラトメータ試験の原理と手順が述べられている。

第4章では、実際の動的変形条件をより合理的かつ簡便に再現することを目的に作製した「変位制御式繰返し三軸試験装置」について、その特徴および荷重や変形の制御法が詳しく論じられている。

第5章では、まず室内試験で計測される応力-ひずみ関係から動的変形定数や履歴減衰定数等を決定する手法を紹介している。ついで、各火山灰試料について実施した試験の結果から、本研究で提案した変位制御式繰返し三軸試験法によって求めた動的変形定数およびそのひずみレベル依存性が従来の応力制御式繰返し三軸試験法のそれと同一になることを確認している。このことは、今までの試験法に比べて簡便な手順で実行される本試験法が動的変形特性を正確に見積もることを可能にしたことを示すものである。さらに本章では、動的変形特性に及ぼす構造異方性の影響について調べ、実地盤の堆積条件の相違による動的変形定数の違いはその構造異方性によるものであることを明らかにしている。

第6章では、各火山灰質粗粒土の力学特性が動的外力の載荷時に誘発されるひずみ振幅の大きさや構成粒子の破碎性によってどのように変化するかについて詳細に検討している。まず、圧密・せん断による粒子破碎が卓越するような火山灰質粗粒土では、拘束圧の増大に伴うせん断剛性率の増加は粒子破碎によって抑制される傾向にあることを見出している。また、火山灰土の間隙比は通常の砂よりも著しく高くなるため、せん断剛性率に及ぼす間隙比の影響は小さなものになっていることを明らかにしている。このような火山灰土の動的変形特性が、その構成粒子の硬度や空隙特性の特異性によって合理的に説明できることを示している点は注目される。なお、せん断剛性率に及ぼす粒子破碎の影響については、せん断過程よりも圧密過程において誘発されるものが主因になっていることを指摘している。ついで、火山灰質粗粒土のせん断剛性率に及ぼす間隙比や拘束圧の影響を検討し、それらの推定式を誘導している。提示された推定式は、通常の粒状体のそれと同形式になっており、工学的に有用である。

第7章では、原位置試験によって火山灰土地盤の種々の力学パラメータを把握するとともに、原位置試験から求めたせん断剛性率と室内試験のそれとの明確な対応関係を導いている。また、火山灰土地盤では、セメンテーションの効果が存在するため、せん断剛性率の正当な評価を行うためには、不攪乱試料の質の確保が必須であることを明示している。さらに、火山灰質粗粒土地盤に対する標準貫入試験では、試験時のサンプラー貫入による粒子破碎が発生し、これが貫入抵抗 N 値の過小評価を導くため、 N 値のみからこの種の地盤の動的力学性状を推定することは適切でないとする重要な指摘をしている。

第8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、これまで未解明であった火山灰質粗粒土の動的変形特性に及ぼす諸要因を一連の室内試験および原位置試験から明らかにするとともに、この種の地盤の地震応答解析等に適用する力学パラメータの評価法について多くの貴重な知見を得ており、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。