

火山灰質粗粒土の粒子破碎による間隙構造の変化と その評価に関する研究

学位論文内容の要旨

火山国と呼ばれている我が国は、第四紀洪積世末に活動した火山群から噴出された火山噴出物が広く分布し、その範囲は日本の総面積の約 16%、平地の約 70% を占めるとされている。北海道域でも第四紀以降の火山活動によって多数の火山碎屑物が放出され、火山灰土は総面積の 40% の範囲に広く厚く堆積している。そのため、火山灰地盤が社会基盤整備上で議論の対象となることは極めて多い。

北海道域の火山灰土の特徴は、粗粒子（軽石）を多く含み、その構成粒子が脆弱であることから圧密・せん断時には破碎が生じ易く、そのため、その静的・動的力学特性は、粒子破碎が生じにくいシリカ砂等と比較すると特異な挙動を示すことが知られている。

このような破碎性を有する火山灰地盤では、構造物等からの長期間に渡る静的荷重によって粒子破碎が引き起こされるため、時間経過にともない地盤構造（間隙構造）が載荷初期時とは異なっていくことが懸念される。そこで破碎性を有する火山灰土地盤を基礎地盤とする構造物の長寿命化および維持・管理を含めたライフサイクルコストを考慮した地盤の設計手法として、粒子破碎により生じた間隙構造の変化を捉えることは極めて重要となる。

既往の研究から、火山灰質粗粒土のような破碎性材料の粒子破碎の要因は、①粒子集合体の初期構造、②粒子自体の破碎強度（粒子の硬さ）、③試験条件で変わる有効応力や変形の大きさなどに支配されると指摘されている。さらに②については、a) 粒子の鉱物組成、b) 粒子形状、c) 粒子内部構造、d) 風化の程度により定まるとみなされている。

そこで本論文では、火山灰土粒子の内部構造に焦点を当てるとともに、静的荷重に対する粒子破碎の時間依存性とその間隙構造の変化について検討を加えている。

本研究は全 8 章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、関連する既往の研究をレビューし、本研究の位置付けを行った。特に破碎性を有する火山灰土に関する静的力学特性と粒子破碎の関係に関する研究、多孔質な粒子に対する間隙構造に関する研究について整理している。

第 2 章では、北海道域に堆積する火山灰土の分布状況を示し、特に本研究で対象とした支笏降下火砕堆積物 (Spfa-1) の富川火山灰土および摩周降下軽石堆積物 (Ma-1) の当幌火山灰土についての堆積環境やその理工学的特徴をまとめている。

第 3 章では、本研究で実施した室内試験手法を述べている。実施した試験は、多孔質な特徴持つ火山灰質粗粒土の粒子内の間隙量を把握するために行った間隙比測定試験、火山灰土粒子の硬さを把握するために行った点載荷圧裂試験および静的力学特性におよぼす粒子破碎の時間依存性を調べる

ために行った主応力比一定排水三軸クリープ試験に関する手法を紹介している。

第4章では、本研究で対象とした火山灰土の粒子形状特性と物理的性質を調べている。これまで火山灰質粗粒土粒子は、粒子内に間隙を保有するとともに、その粒子表面には凹凸が存在することが指摘されてきた。そこで、X線CT法による写真撮影と薄片の作製による観察を行なうことで粒子の断面状況と輪郭形状について考察している。さらに物理的性質については、粒度特性、粒径に対する土粒子密度の関係、吸水率、粒子の硬さに関して、火山灰質粗粒土特有の性質について述べている。特に、土粒子密度に関しては、粉碎した細粒分の密度を求めることで粒子内には閉塞された間隙が存在する。また、吸水率からは通水可能な開口した間隙が存在することなどを明らかにしている。

第5章では、第4章で明らかにした粒子内の2種類の間隙の存在を前提とした、多孔質な火山灰質粗粒土に関する間隙構造モデルを提案するとともに、その定量化を試みている。提案された間隙構造モデルでは、火山灰質粗粒土の全間隙比 e は、粒子内の間隙比を内間隙比 $e_{intra-o}$ 、粒子間の間隙比を間隙比 e_{inter} の和で求められると定義している。さらに内間隙比は、通水可能な開口内間隙比 $e_{intra-o}$ と通水不可な閉塞内間隙比 $e_{intra-c}$ により構成されるとした。これらの間隙構造の定量化の結果、火山灰質粗粒土の全間隙は内間隙の占める割合が極めて大きく、さらにこの内間隙は開口内間隙が支配的になっていることを示している。

第6章では、火山灰質粗粒土および豊浦砂に対して行った排水三軸クリープ試験の結果を考察している。特に、同一応力条件下で比較した火山灰質粗粒土と豊浦砂のクリープ特性では、火山灰質粗粒土における発生軸ひずみが、豊浦砂と比較すると極めて大きく、その挙動にも違いが見られた。また、火山灰質粗粒土のクリープ特性では、軸ひずみおよび細粒分が時間経過とともに増加し、顕著な時間依存性を示している。さらにひずみは、細粒分増加と一義的な関係にあることから、火山灰質粗粒土のクリープによる軸ひずみの発生が著しくなる要因は、構成粒子の破碎が密接に関連していることを明らかにしている。

第7章では、第5章で提案した間隙構造モデルにもとづいて、火山灰質粗粒土のクリープ特性と間隙構造の変化の対応関係を詳細に検討している。その結果、①火山灰質粗粒土の粒子破碎の要因は、クリープ開始時の開口内間隙比の大きさに依存すること、さらに②時間経過とともに引き起こされる粒子破碎量は、閉塞内間隙比の減少が強く関与していることを見出している。

第8章は結論である。併せて、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

学 位 論 文 題 名

火山灰質粗粒土の粒子破碎による間隙構造の変化と その評価に関する研究

我が国では、主として第四紀に活動した火山群からの火山噴出物が広く堆積している。それらの構成粒子は極めて特異な形状・構造を呈していることから、いわゆる火山灰地盤の工学的性質は多様なものとなる。また、しらす、軽石、スコリアなどの火山灰質粗粒土は、通常レベルの荷重下でも粒子自体の破碎が特に卓越する材料である。この種の火山灰土では低い応力域においても構成粒子の破碎が生じやすく、粒子の硬度が高い砂のような非破碎性粒状体の力学特性とはかけ離れた挙動を示すことが知られている。このことから、火山灰土に通常の砂質土のような地盤工学的評価を与えて実務の設計・施工等を進めることは適切ではない。

破碎性を有する火山灰地盤では、上部・基礎構造物等からの長期間に渡る静的荷重によってさらに粒子破碎が誘発されるため、時間経過にともない地盤堆積構造(間隙構造)が載荷初期時のそれとは明らかに異なっていくとともに、想定を上回る沈下がもたらされることになる。そこで、破碎性を有する火山灰土地盤に構築された構造物の長寿命化および維持・管理を含めたライフサイクルコストを考慮した基礎地盤の設計においては、粒子破碎により生じた間隙構造の変化を定量的に捉えることが極めて重要となる。

このような背景から、本研究では、室内三軸試験機による主応力比一定のクリープ試験ならびに間隙比測定試験・点載荷圧裂試験を各種の火山灰土について実施し、定せん断応力載荷条件におかれた構成粒子の破碎の時間依存性とその間隙構造の変化挙動について検討を加えている。具体的には噴出源の異なる北海道各地の火山灰地盤より試料を採取し、その土粒子内部構造の変化と力学特性との関連性を明確にすることを目標にした。ここではさらに、種々の物性を有する火山灰粗粒土の一連の試験結果を詳細に解析することから、間隙構造モデルを提案し、クリープ下において粒子破碎の主因となる間隙の変化特性とその定量化を論述している。

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章は、本研究が対象にした北海道域にある火山灰土の分布履歴や堆積状況を説明している。特に富川火山灰土(支笏降下火砕堆積物)および当幌火山灰土(摩周降下軽石堆積物)についてその堆積環境や理工学的特徴を既往の研究とともにレビューしている。

第3章では、実施した室内試験手法が述べられている。すなわち、多孔質性を有する火山灰質粗

粒土の粒子内間隙の量を把握するために実施した①間隙比測定試験、構成粒子の硬度を調べるための②点載荷圧裂試験およびせん断応力作用下に生じる粒子破碎の時間依存性を評価するために行った③主応力比一定三軸クリープ試験について、それらの装置ならびに試験手法を紹介している。

第4章では、火山灰土の粒子形状特性と物理的性質の関連を調べている。ここではX線CT法による土粒子の写真撮影と薄片等の観察によって、粒子の輪郭形状や断面の様子(粗度)について考察している。さらに物理的性質については、粒度特性や粒径と土粒子密度の関係、さらには吸水率や粒子の硬さとの関連について検討している。特に、粉碎細粒分の密度を算出することで粒子内に閉塞された間隙が存在すること、または通水可能な開口間隙が存在することを吸水率から評価できること、等を定量的に明らかにしている。

第5章では、前章で示した多様な間隙の存在を前提とする多孔質粗粒土の間隙構造モデルを提案するとともに、工学的な間隙比の定量化を試みている。この間隙構造モデルでは、火山灰質粗粒土の全間隙は、粒子内にある間隙(内間隙)と粒子間にある間隙(間間隙)の和で求められるとみなし、さらに内間隙は、通水可能な開口内間隙と通水不可な閉塞内間隙により構成されるとした。間隙構造のこのようなモデル化により算出した各間隙量の考察から、火山灰土では内間隙比の占める割合が極めて高く、さらにこの内間隙比は開口内間隙比によって支配的になっていることを示している。この事実は、火山灰土のような多孔質粗粒土の力学特性に及ぼす間隙構造の変化すなわち構成粒子の破碎の影響を工学的に評価する上で重要な情報になっている。

第6章では、火山灰質粗粒土および通常の圧力レベルでは破碎が認められない豊浦砂について行った三軸クリープ試験の結果を詳細に検討している。特に、同一応力条件下で比較した火山灰質粗粒土と豊浦砂のクリープ特性では、火山灰質粗粒土における発生ひずみが、豊浦砂に比べて極めて顕著で、かつ両者のダイレイタンス挙動に大幅な違いが見られた。これらの挙動差、ならびに火山灰質粗粒土の細粒分が時間経過とともに増加し続けるという強い時間依存型の力学挙動は、構成粒子の破碎特性に密接に関連していることを明確に説明している。

第7章では、第5章で展開した間隙構造モデルにもとづいて、火山灰質粗粒土のクリープ特性と内部間隙構造の変化との対応を検討し、構成粒子のせん断による破碎が間隙構造の変化と密接に関連していることを示している。すなわち、①せん断応力作用下に誘発される火山灰質粗粒土の粒子破碎の要因は、開口内間隙比の大きさに依存すること、さらに②クリープ時間の経過とともに導かれる粒子破碎量は、閉塞内間隙比の減少が強く関与していること、等の工学的に無視できない事実を指摘している。

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、特異な粒子構造を有する火山灰質粗粒土のせん断による間隙構造の変化と粒子破碎の関係を明示するとともに、この種の地盤のダイレイタンスと沈下量の推定法の構築について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。