

うんの としやす
氏 名 海 野 寿 康
授 与 学 位 博士 (工学)
学位授与年月日 平成18年3月24日
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学 位 論 文 題 目 不飽和火山灰質砂質土の流動性崩壊機構に関する研究
指 導 教 員 東北大学教授 風間 基樹
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 風間 基樹 東北大学教授 岸野 佑次
東北大学教授 岩熊 哲夫 東北大学助教授 渦岡 良介

論 文 内 容 要 旨

火山灰堆積地域での地震時地盤災害に着目すると、火山灰質砂質土で構成された盛土斜面や自然斜面表層が流動性崩壊を生じている。本論文は、地震時に生じる火山灰質砂質土斜面表層の流動性崩壊について、その崩壊機構の解明を目指して行った室内試験の結果を論じたものである。本研究では、不飽和状態下における火山灰質砂質土を対象として、振動時の水分状態の変化や繰返しせん断変形挙動の把握を行った。その結果、振動によって不飽和土中の間隙水の状態が変化することを確認し、また、繰返しせん断を与えた場合、飽和度が70%程度であってもサクションが低下、有効応力の大半を失い、いわゆる液状化状態になることを示した。この挙動は、繰返しせん断による体積収縮に伴い間隙空気圧と間隙水圧が供試体の拘束圧と等しくなることで生じる。

本研究では、実験結果に基づいて不飽和火山灰質砂質土の液状化を定義し、それに基づく不飽和地盤の流動性崩壊機構を提案した。また、それに基づく崩壊危険度評価手法の提案を行っている。

本論文の目次構成は、以下に示す通りである。

第1章 序論

第2章 過去の被害事例と既往の研究

第3章 東北地方の火山灰質土と試験試料の物理特性

第4章 加振による不飽和土中の水分状態の変化

第5章 不飽和火山灰質砂質土の繰返しせん断変形特性

第6章 液状化機構の非火山灰質地盤材料での検証

第7章 不飽和土の流動性崩壊機構とそれに基づく崩壊危険度評価

第8章 結論

1. 火山灰質砂質土の保水性と加振による水分状態の変化について

(1) 火山灰質砂質土の保水性 (第3章)

主に過去の地震において流動性崩壊を生じた東北地方の火山灰質砂質土の物理的性質、保水性について明らかにした。一般的に火山灰質土は、非火山灰質起源の土に比べ高い保水性を有し、常時においても自然含水比が高いことが知られている。本研究では、過去に流動性崩壊を生じた土を中心に火山灰質砂質土の保水性を把握するとともに、土の粒子形状や粒度分布、密度による保水性への影響について調べた。過去の地震に流動性崩壊を生じた八戸しらすや築館土は、非火山灰起源の砂質土に比較して高い保水性を示す。この性質は火山灰質砂質土特有の多孔質な土粒子形状によるものである。この形状の違いは土粒子密度や被表面積、保水性に大きく影響することを明らかにした。

(2) 加振による不飽和火山灰質砂質土の水分状態の変化 (第4章)

2003年三陸南地震の際に崩壊した築館地区の事例では、崩壊堆積土砂は、一見泥状であり非常に高い含水状態であった。しかし、飽和に至るほどの含水比ではなく、外的要因がない場合には、高い流動性を示さない特性を持っていた。このことから、同じ含水比でも間隙中の水分状態の変化により、土の力学的状態が変化すると推測された。そこで本研究では、電磁式小型振動台を用いて2種類の試験を行い、振動中の水分状態やサクシジョンの変化を観察した。

土壌水分計を用いて、加振中の体積含水率を測定し土中の水分状態の変化を捉えることを試みた。試験の結果、間隙中の水分量は不変にも関わらず、センサーより計測されるみかけの体積含水率が変化した。本研究では、このみかけ上の変化を土中の水分状態の変化を表しているものと捉えた。この振動による水分状態の変化は、振動による団粒構造の破壊によるものと推測される。すなわち、団粒構造のように常時において間隙水を内包した状態が、振動を受けることにより壊れ、団粒構造内の水分も自由水化した結果、みかけの体積含水率が増加したと考えられる。

次に振動中の空気圧と間隙水圧を計測することで、サクシジョンの変化の把握を試みた。その結果、サクシジョンの変化挙動は、振動前の間隙水の状態によって異なり、特に粒径分布の影響を受ける。細粒分を除去した供試体では、加振によるサクシジョンの変化は小さいことが分かった。これは、保水される間隙水の絶対量が細粒分を含む供試体よりも少ないこと、細粒分の除去により間隙が大きくなり、メニスカスにより強固に拘束される水分が多くなったためと考える。一方、細粒分が多い土では、細粒分除去の供試体に比べてサクシジョンの変化が大きい。これは、間隙中の水分の絶対量が多いため、土粒子間のメニスカスで拘束される水分の割合が少なく、加振によりサクシジョンが容易に低下できたためと考えられる。また、振動によるサクシジョンの変化は土の初期密度によって差が生じる。緩い状態では、サクシジョンが変化するが、密な状態ではサクシジョンはほとんど変化しない。このことから、サクシジョン及び土中の水分状態は、せん断による土の骨格構造の変化に起因していると考えられる。

2. 不飽和砂質土の繰返しせん断変形特性と不飽和土における液状化機構について

(1) 不飽和火山灰質砂質土の繰返しせん断変形特性 (第5章)

振動台試験より得られた結論から、サクシジョンの変化には土がせん断を受け土骨格の変化が必要であることが推測された。そこで、築館土に対して不飽和土の繰返し三軸試験を行い、繰返し载荷中のサクシジョンや体積変化を考慮した繰返しせん断変形特性の把握を行った。その結果、繰返しせん断によって、体積収縮に伴い間隙水圧および間隙空気圧が上昇、サクシジョン及び有効応力が低下、飽和度75%程度の不飽和土でも有効応力がゼロに至り、飽和砂質土と同様な液状化現象が生じることを明らかにした(図-1は、飽和度75%供試体の応力-ひずみ関係と有効応力経路。繰返しせん断によって平均有効主応力がゼロに至り液状化していることが分かる)。これら供試体は、せん断後の有効応力減少比を算定するとほぼ1.0と

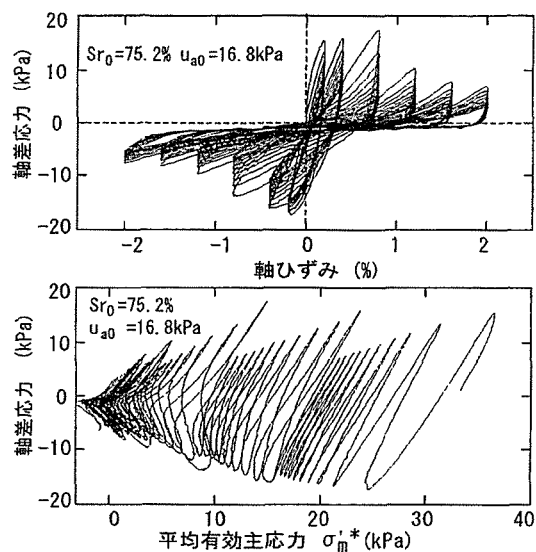


図-1 供試体の応力-ひずみ関係と有効応力経路の一例

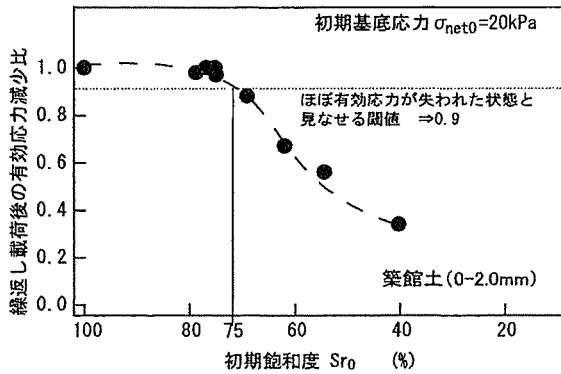


図-2 繰返し載荷後の有効応力減少比と飽和度関係

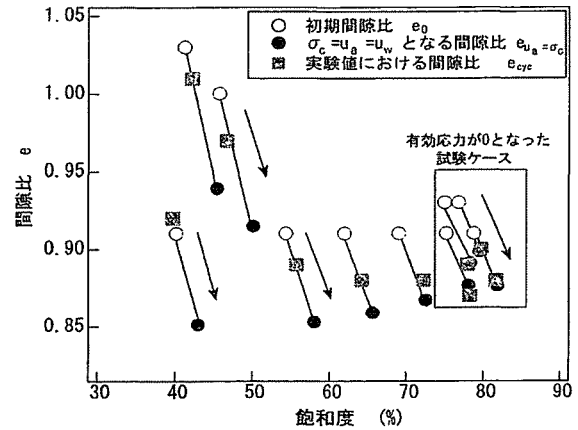


図-3 繰返しせん断による供試体の間隙比変化量

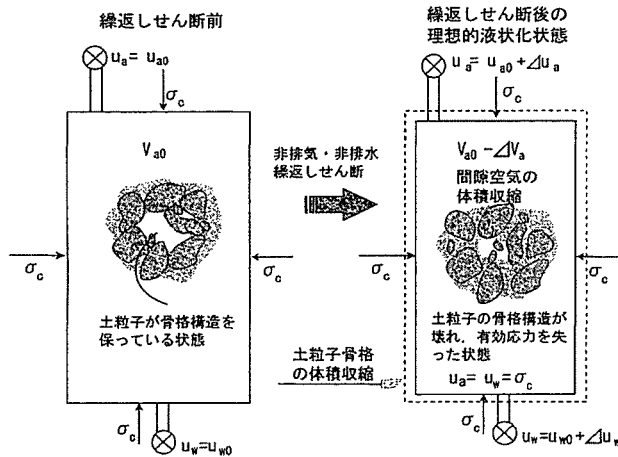


図-4 間隙空気の体積変化を考慮した不飽和砂質土の液状化機構の概念図

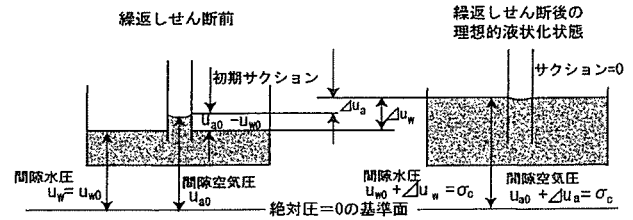
このとき間隙空気体積と間隙空気圧力には下記の関係が成立

$$u_{a0} V_{a0} = (u_{a0} + \Delta u) (V_{a0} - \Delta V_a) = \sigma_c (V_{a0} - \Delta V_a)$$

有効応力の変化

$$\sigma' = (\sigma_c - u_{a0}) + \chi (u_{a0} - u_w) \rightarrow \sigma' = 0$$

供試体内の間隙水圧および間隙空気圧の変化
(水頭圧力の変化のイメージ)



なる (図-2 参照). したがって, 不飽和土においても, サクションを考慮した有効応力の定義により, 飽和土の液状化と同等の取り扱いが可能と考えられる.

本研究では, 実験結果に基づいて, 不飽和土が繰返しせん断によって有効応力が 0 に至るための条件を考察した. 図-3 は, 繰返し載荷による間隙比の変化を表したものである. 図より液状化に至った供試体の体積収縮量は, ボイル・シャルルの気体の状態方程式より導かれる初期間隙空気圧が拘束圧と等しくなるまで上昇するために必要な体積変化量と一致していることが分かる.

以上の結果を用いて, 間隙空気の体積収縮を考慮した不飽和土の液状化機構を提案するとともに, 繰返しせん断による体積変化に着目することにより液状化の潜在的危険性を算定できる可能性があることを示した. 図-4 は, 間隙空気の体積収縮を考慮した不飽和砂質土の液状化機構の概念図である.

(2) 非火山灰質地盤材料の不飽和繰返しせん断変形特性} (第 6 章)

提案した不飽和火山灰質砂質土の液状化機構について, 非火山灰質地盤材料である豊浦砂を用いて不飽和繰返しせん断試験を行い, 理論の検証を行った. その結果, いくつかの供試体では, 築館土と同様に不飽和状態であっても有効応力がゼロに至り液状化する結果となった.

本研究で提案する液状化機構では、土粒子骨格が収縮しやすい緩い状態ほど繰返しせん断により体積収縮しやすく、有効応力がゼロに至りやすいが、実験結果においても密度が小さく緩い供試体ほど体積収縮し、液状化する飽和度範囲が広がり、液状化抵抗が小さい結果となった。同様に、拘束圧についても、ボイル・シャルルの式より拘束圧が高いほど、液状化に至るにはより多くの体積収縮が必要となり、液状化しにくくなるが、試験結果もこのことを支持している。以上の結果から本研究で示した不飽和土の液状化機構は火山灰質砂質土だけではなく、非火山灰質砂質土にも適用が可能であることが明らかとなった。

3. 崩壊機構とそれに基づく危険度評価指標（第7章）

不飽和繰返し載荷試験の結果を受け、不飽和砂質土の流動性崩壊機構を示すとともに、2003年三陸南地震における築館町館下地区の流動性崩壊事例に対する崩壊機構について考察した。

不飽和土の液状化についてサクシオンを考慮した有効応力が繰返しせん断によってゼロに至った状態と定義する。この不飽和土の液状化を考慮することで、地下水位より浅い不飽和層で生じる流動性崩壊の崩壊機構を説明できることを示した。2003年三陸南地震の際に生じた築館町の崩壊事例についても、提案する崩壊機構により説明が可能であると考えられる。

さらに、本研究では、崩壊機構に基づく崩壊危険度判定手法を提案するとともに、崩壊しやすい土の条件を示した。図-5は崩壊危険度判定の手順を示したものである。不飽和土が液状化するのに必要な間隙収縮量とその土の繰返しせん断履歴による最大体積収縮可能量を比較することで液状化する可能性のある飽和度範囲を求められる。これにより、ある密度状態にある土の液状化危険度範囲を飽和度より判定することができ、さらに流動性崩壊危険度の判定を行うことができる。崩壊機構より導かれる流動性崩壊の危険性が高い条件としては、①地震によって発生する繰返しせん断ひずみ大きいこと②体積収縮しやすいこと③飽和度が高いこと④拘束圧が低いことが上げられる。また、土の水分特性曲線の形状によって、液状化に至る層厚が大きく異なり、保水性の高い土ほど液状化する可能性のある層厚が厚くなり、液状化危険度が高く、また被害も大規模となることが予想されることが明らかにされた。

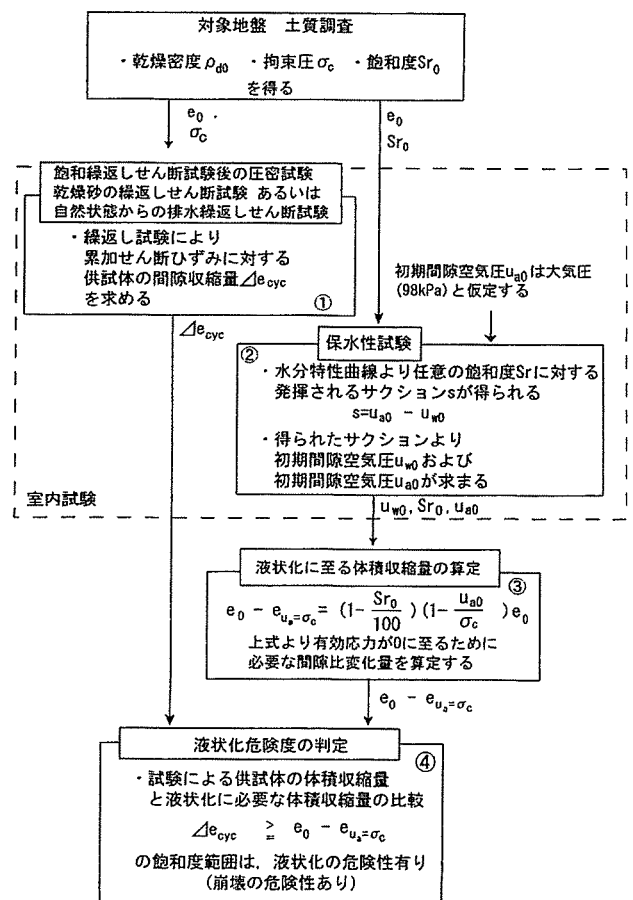


図-5 崩壊危険度評価の判定手順

論文審査結果の要旨

火山灰質砂質土の自然斜面や盛土斜面が不飽和であるにも関わらず地震時に泥流状の崩壊を起こす事例が国内外で数多く報告されている。本論文は、地震時の泥流土砂災害のメカニズムを力学的に明らかにしたものであり、全8章よりなる。

第1章は、2003年三陸南地震の際の火山灰質土による谷埋め盛土の流動性崩壊の概要を述べ、ここで対象とする問題の所在を示している。

第2章は、火山灰質砂質土の過去の被害事例と本研究に関係する既往の研究を整理している。

第3章では、過去の地震で流動性崩壊を生じた東北地方の火山灰質砂質土である八戸しらすや築館土の物理的性質を調べている。これらの土が、土粒子の多孔質性によって非火山灰起源の砂質土に比較して高い保水性を示すことを明らかにしている。

第4章では、電磁式小型振動台を用いて、加振中の土の体積含水率とサクシヨンの変化を調べ、常時において間隙水を内包した団粒構造が、振動を受けて壊れることによって、水分状態やサクシヨンが変化することを見出している。特に、不飽和土が繰返しせん断による骨格変形によって水分状態やサクシヨンを低下させることを実証したことは、重要な発見である。

第5章では、不飽和土の繰返し三軸試験において載荷中の間隙空気圧、間隙空气体積・間隙水圧の変化を計測し、繰返しせん断によって、体積収縮に伴い間隙水圧および間隙空気圧が上昇し、有効応力が低下することを実験的に明らかにしている。その結果、飽和度75%程度の不飽和土でも有効応力がゼロに至り、飽和砂質土と同様な液状化現象が生じることを明らかにした。このように、空気を含む土の液状化機構を新たに提示し、従来の液状化の概念を不飽和土にも適用可能にした意味は大きい。

第6章では、実験結果に基づいて、不飽和土が繰返しせん断によって有効応力が0に至るための条件を考察した。液状化に至るまでの体積収縮量は、気体の状態方程式より導かれる初期間隙空気圧が拘束圧と等しくなるまで上昇するために必要な体積変化量と一致していることを見出している。

第7章は、以上の知見から、2003年三陸南地震における築館町館下地区の流動性崩壊事例が説明可能であることを示している。さらに、提案した崩壊機構に基づく崩壊危険度判定手法を示した。

第8章は、本研究の結論および今後の展望について述べている。

以上、本論文は不飽和火山灰質砂質土で構成された斜面の泥流化機構を、不飽和土の非排気非排水繰返しせん断挙動から解明したものである。水分特性と間隙空気の圧縮性を取り入れたアプローチは、飽和土の動力学を空気の混入した不飽和土の動力学に一般化したものであり、地盤動力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。