

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20900

研究課題名(和文) 不飽和状態を考慮したローカル土の動的せん断挙動評価手法の構築

研究課題名(英文) Evaluation of dynamic deformation behavior of local soil under considering unsaturated condition

研究代表者

海野 寿康 (UNNO, Toshiyasu)

宇都宮大学・地域デザイン科学部・准教授

研究者番号：50570412

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：2016熊本地震や2011東日本大震災などの既往の地震地盤災害において自然斜面や盛土斜面が泥状になり流下する流動性崩壊が多大な被害をもたらしている。

本研究では、地震中、後の土砂中の間隙空気・間隙水そのものの挙動やせん断変形挙動への影響を明らかにし流動性崩壊の発生～流動の一連のメカニズム解明、危険度評価手法の構築を目指すため、崩壊土砂中の空気・水分状態を模した不飽和土に対して非排気・非排水繰返しせん断試験を実施しせん断変形挙動の把握を行った。その結果、従来想定されていなかったようなかなり低い飽和度であっても、水分状態や気泡によっては容易に液化し流動化する等の知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：Earthquake induced mudflow type slope failure of unsaturated soil has been attracting a lot of attention in recent years. It seems important to understand the mudflow mechanism of the unsaturated soil, and the objective of this study is to identify the deformation characteristics of unsaturated soils during an earthquake.

In this study, the cyclic shear test was carried out to clarify the relationship between shear behavior and water state to the unsaturated soil specimen. For example, Air-Entraining Agent was added into the soil to imitate the condition of mudflow soil. When the agent was added into the soil, the specimen became less resistance to liquefaction. It can be concluded that, even under same initial degree of saturation, the soil loosed its stiffness faster and became easily liquefied.

The conclusion of this study can be summarized as the cyclic shear behavior and liquefaction resistance of unsaturated soil varies because of the difference in the pore moisture state.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 繰返しせん断 液化 水分状態 ローカル土 間隙空気

1. 研究開始当初の背景

2003年三陸南地震や2011年東日本大震災などの既往の地震地盤災害において自然斜面や盛土斜面が泥状になり崩壊・流下する流動性崩壊の被害例がある。これら流動性の斜面崩壊は、埋立て地盤の液状化問題と比べ、人的被害や二次災害の危険性が高いにもかかわらず、研究は進んでいない。現状では、崩壊の発生・流動メカニズムは未解明な点が多く、土砂災害防止法などに代表される現状の傾斜角度による画一的な危険度評価では、事前の崩壊危険箇所の予測・選定が困難である。このため液状化問題同様に土質力学に基づく評価・予測手法の確立が望まれる。

一方で学術的には、不飽和土の動力学挙動に関する研究は、サクシジョンの取り扱いや有効応力の概念、試験装置の複雑さ等の問題から研究例が飽和土に比べ圧倒的に少ない状況にある。さらに同じ地盤工学の中でも不飽和土質力学と土質動力学は各々の専門研究者が独自に研究を行ってきた経緯がある。このためメカニズム解明や対策法の確立には両分野を横断する研究が必要であるとともに、国内の研究の活性化も含め不飽和土の耐震問題の重要性を喚起するためにも、これまで以上に不飽和土の動力学研究が必要である。他方、国際的な研究動向では、本研究の内容は土中の空気・水分状態の把握や応力の解釈、新しい試験法の開発など研究が活発化し出しており、地盤工学の国際的な研究の流れの一つになっている。

2. 研究の目的

流動性崩壊のメカニズム、特に一旦崩壊した土砂が、降雨がないにも関わらず泥化し数百メートル以上流下するメカニズムは依然として不明である。現状の危険度評価では、崩壊危険箇所の予測・選定が困難であり早期に土質力学に基づく崩壊危険度評価・予測手法の確立が望まれる。一方、学術的には地表面の比較的浅い部分が崩壊する流動性崩壊の研究は、外気や天候による土中水分への影響や土中空気への取り扱い、温度による水・空気への作用などの複雑化から研究実績が少なく新たな試験法や装置の確立なども含め課題が多い。本研究では、土砂流動の崩壊・流動メカニズムの解明を目指し、次に示す研究課題について取り組んだ。

(1) ローカル土の不飽和繰返しせん断変形特性の把握：

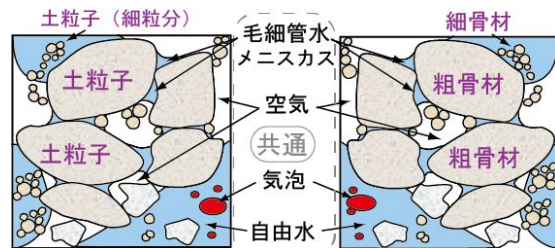
既往の流動性崩壊の多くが火山灰質土分布地で起こっている。しかし、火山灰質土は、起源である火山や発生年代により土の成分や構成が大きく異なる。粒度分布や軽石の有無、鉱物組成の違い等による泥化の程度の違いについては不明である。そこで本研究では、過去に地震時に流動性崩壊が発生した火山灰質土を中心に、各地の起源の異なる火山灰質土で構成された盛土斜面や自然斜面の現

地調査を実施するとともに、採取した試料を用いて室内実験を実施しせん断による軟化挙動の有無などデータの収集を行う。

(2) 間隙空気と水分状態によるせん断変形挙動への影響評価：

従来の土質力学では、不飽和土は間隙空気の存在により飽和土に比べてせん断抵抗が大きいとされてきた。不飽和土の動力学研究の軽視はこの点に由来する。一方、コンクリートに着目すれば、型枠充填性を上げるために空気連行剤(AE剤)を用いて積極的に空気を取り込み(不飽和化)流動性を高めている。図-1は、硬化前のセメント硬化体の構成と不飽和土の構成を比較したものであるが、土粒子と骨材以外の構成は間隙空気と間隙水であり差はない。コンクリートの流動性を上げる間隙空気(気泡)の効果は、ベアリング効果と呼ばれコンクリート工学では一般的であるが、申請者は不飽和土が長距離に流動するメカニズムはこの点にあると考えた。つまり崩壊後流動中の土砂にもこの間隙空気のベアリング効果が働いていると推定した。固体と空気と水分量の割合は、セメントと地盤では若干異なるが力学的なメカニズムは類似しているはずである。そこで本研究では、間隙空気や水分の状態をAE剤の添加により強制的に変化させた実験を実施し、せん断変形挙動に対する空気・水分の影響を解明することを試みた。

特に本研究では、流動する土砂中の空気の挙動について着目し実験を行っている。旧来の土質力学では、土中の空気は、土のせん断強度を増加させる効果があるとされてきた。さらには、空気のある不飽和土はせん断に強いという固定観念が存在する。一方、材料力学(コンクリート工学)に着目すれば、コンクリートの型枠への充填性を上げるため薬剤を用いて積極的に空気を取り込み、流動性を人為的に高めている。この空気による流動性を上げる効果は、気泡の“ベアリング効果”によるものとされるが、空気の効果は土質力学のそれとは大きく異なる。本研究では、土質力学としてこの空気の“ベアリング効果”によるせん断挙動への効果の把握に努めた。



(a) 不飽和土 (b) セメント硬化体
図-1 不飽和土とセメント硬化体の構成

3. 研究の方法

(1) 土試料の採取

本研究では、土試料として2011年東日本

大震災の際に大規模に土砂崩壊が発生した栃木県那須烏山市川西地区の崩壊土砂（以降，“(a)烏山土”とする）と火山灰質砂である鹿児島県産火山灰質砂（以降，“(b)しらす”とする）、および高根沢町上柏崎地区の崩壊土砂（以降，“(e)高根沢土”とする）、非火山灰質土との比較のために人工配合材料である石英粉と珪砂の1:1配合試料（(c)配合土）と(f)豊浦砂を使用した。また、本研究ではローカル土の力学挙動を把握することを目的としたため、静岡県駿東郡（箱根温泉の範囲内）に分布する火山岩類非アルカリ苦鉄質岩が温泉水により劣化した(g)温泉余土も土質試験を実施した。図-2に用いた試料の粒度分布を示す。

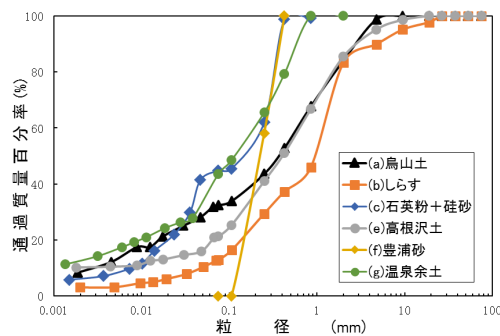


図-2 土試料の粒径加積曲線

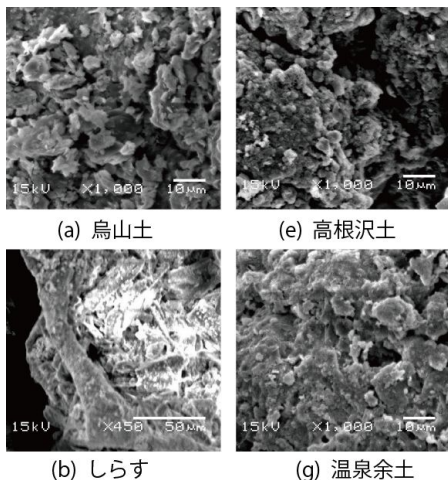


図-3 土試料の粒径加積曲線

烏山土と高根沢土はどちらも地質学的に火山灰由来の土であるが、細粒分含有率が高く、烏山土は火山灰質シルトに、高根沢土は火山灰質粘性土に分類される。しらすは、土砂採掘場より掘削採取したものであり風化作用を受けていない為に細粒分含有率は低く、砂礫分の多くが軽石である。これら土に対して電子顕微鏡を用いて土粒子表面を観察した。図-3はSEMによる土試料の粒子表面の拡大写真である。烏山土と高根沢土はしらすと同様に多孔質であるため、火山灰質起源の土の特性を有することが確認できる。これら栃木県内の崩壊土砂の特徴は、2003年三陸南地震や2008年岩手・宮城内陸地震の際に崩壊した土砂の特徴と一致する。日本の地盤において4割程度がこのような多孔質な粒子形状を有する火山灰質土が分布している。

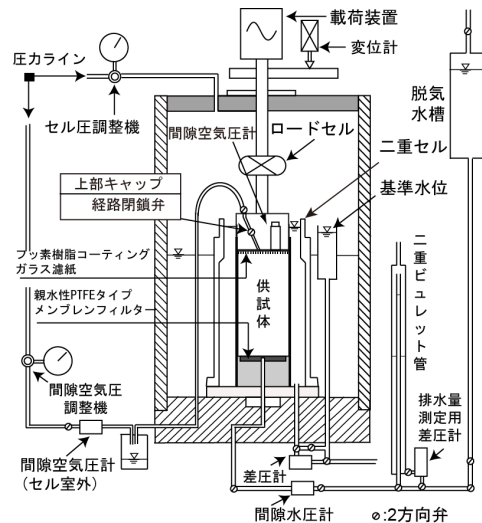


図-4 不飽和繰返し三軸試験装置の概要

(2) 不飽和繰返しせん断試験装置の開発と供試体作製方法、载荷履歴

本研究で実験に用いた不飽和土用三軸試験装置を図-4に示す。本研究で用いた三軸試験装置は、従来型の装置に比べ間隙水・間隙空気挙動をより精緻に計測するようフィルター類を見直し、下部ペダスタルの間隙水圧計測ラインに親水性PTFEタイプメンブレンフィルタを配置、上部キャップと供試体の境界にフッ素樹脂コーティングガラス濾紙を装着した。これらフィルターの選別には試行錯誤を要したが、供試体上部における間隙空気圧 u_a 、供試体下部における間隙水圧 u_w 測定について従来型の試験装置と比べ計測精度が向上している。間隙空気圧の計測は、供試体上部キャップに圧力計と電磁弁を配置することで供試体直上より計測可能となっている。試験は全て初期基底応力 σ_{net0} ($\sigma_m - u_{a0}$) = 20kPaで行っている。供試体の作製方法は、次の通りである。乾燥重量の土を所定の初期含水比（25%）になるよう事前に十分に混合しスプーンでモールドに投入する。サクシジョンの付与および圧密手順は、拘束圧を10kPa与えた後、基底応力を一定に保ち間隙空気圧を段階的に与える。間隙空気圧が所定の値になり定常状態になったことを確認した後、基底応力 σ_{net} を20kPaまで上昇させ含水状態が一定になるまで放置する。ただし、サクシジョンが空気侵入値を超えると急激に排水するような水分特性を有する土では、飽和度の制御が困難である。そこで本試験では、上記、排水手順を踏んだ後、所定の飽和度に達した時点で排水を強制的に止め、次の方法を用いて供試体の初期状態とした。サクシジョンを空気圧として付与する方法：目標の飽和度に達した時点で排水を強制的に停止した場合、供試体には、過剰間隙水圧が発生するが、空気圧を制御することで間隙水圧を大気圧と等しい値に調整し、初期サクシジョンを決定した。よって初期サクシジョンは、初期間隙空気圧 u_{a0} と等しい（図-5参照）。

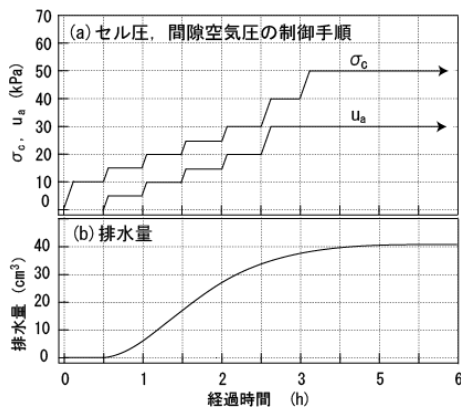


図-5 供試体の初期状態の荷重方法

上記の方法を用いてサクシオンを付与、間隙水圧、間隙空気圧が一定となったことを確認した後、等方応力状態の供試体に対して、セル圧一定、非排気非排水条件の下、ステップ荷重試験を行った。荷重は、軸ひずみ片振幅 $\epsilon_{a,max} = 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0\%$ の正弦波各 10 波(合計 60 波)を振動数 $f=0.05\text{Hz}$ で与えた。荷重速度は予備試験から繰返しせん断中に発生する水圧の応答性を考慮し設定した。

供試体の有効応力については、不飽和土の最も一般的な有効応力式とされる Bishop の式(1)を用いた。

$$\sigma'_m = \sigma_m - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

ここで、骨格応力に寄与するサクシオンのパラメーター χ は飽和度 ($S_r/100$) を用いている。以下、本稿では、式(1)より得られた有効応力を Terzaghi の有効応力と区別するため文中では(骨格応力)と併記する。なお、不飽和供試体の繰返し荷重前のスケンプトンの間隙圧係数 B 値は、どの供試体も非常に小さい値である。本研究では、飽和土の液状化判定に使われる有効応力減少比に倣い、下記に示した繰返し荷重後の有効応力減少比を用いて結果を整理した。

$$\text{有効応力減少比 ESRR} = 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0} \quad (2)$$

σ'_m : 平均主応力, σ'_{m0} : 初期平均主応力 (= σ'_c)。なお、非排気非排水条件は、繰返しせん断中に土要素の間隙水と間隙空気外部と出入りしないという条件であり、地震動による繰返しせん断時間が、透気透水速度より十分に速いことを仮定した。

4. 研究成果

(1) 火山灰質土の飽和状態におけるせん断変形特性と液状化抵抗

本研究では現地調査時の試料採取について飽和状態における繰返しせん断変形特性や液状化特性を把握するために液状化強度試験を行った。実施した試験結果の一例として、(a)烏山土と(e)高根沢土の繰返し荷重中の応力 ひずみ関係を図-6に示す。応力 ひずみ関係を見ると、烏山土、高根沢土とも細粒分が高い試料にも関わらず砂質土のような挙動を示し、繰返し荷重に伴い軸差応力は減少し、軸ひずみが増加する。このように両試

料は共に細粒分含有比率が高い土試料であるが繰返しせん断を与えると軟化挙動を示し液状化する。

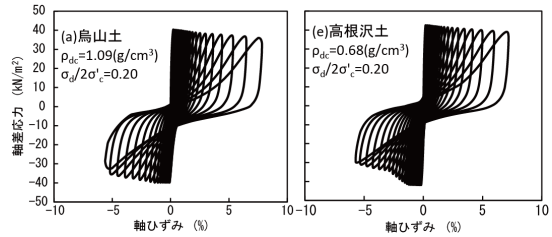


図-6 烏山土と高根沢土の応力～ひずみ関係

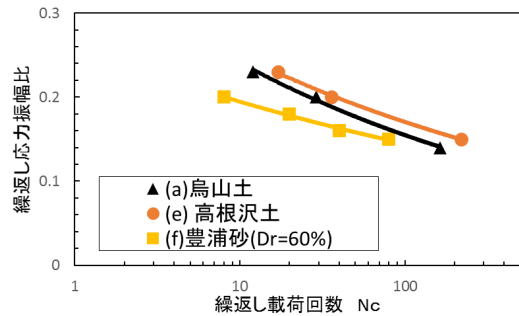


図-7 液状化強度曲線

図-7 に各土試料の液状化強度曲線を示す。(a)烏山土、(e)高根沢土の二つの試料について中密な(f)豊浦砂と比較すると、どちらの試料も豊浦砂の液状化強度曲線に近い値を示し一般的に液状化しやすい粒径の揃った"きれいな砂"の液状化強度に近い値を示す。繰返し荷重回数 20 回の時の液状化強度比であるが烏山土、高根沢土ともに液状化強度比は 0.22 程度と低い値である。大規模な地震が発生した場合、粘性土に分類されるような土であっても火山灰由来の土であれば、細粒分含有率が高くとも埋立て地盤同様に液状化に起因する地盤災害を発生しやすい土質特性を有する知見が得られた。

(2) 火山灰質土の不飽和状態における繰返しせん断変形特性

本研究では、前述した土試料に対して、不飽和状態下の繰返しせん断特性や液状化特性を把握するため崩壊現場の実情に近い飽和状態(飽和度 60% ~ 80%)において繰返し三軸試験を行った。結果の一例として図-8 に細粒分含有率の高い烏山土の初期サクシオン $s_c=12.7\text{kPa}$ 、飽和度 $S_{rc}=76.3\%$ のせん断によるサクシオン、平均有効主応力(平均骨格応力)、間隙水圧、間隙空気圧の時刻歴である。間隙水圧は間隙空気圧とほぼ同値をとっており、サクシオンと平均有効主応力(平均骨格応力)がゼロ付近まで低下している。平均有効主応力(平均骨格応力)がゼロに近づくと(2)式で定義した有効応力減少比は 1.0 に近づくと有効応力減少比が 0.95 を越えると一般的に液状化したとされ、図の供試体は有効応力減少比が 0.95 を越えており液状化と判断される。

図-9 には(a)烏山土、(b)しらす、(c)石英粉

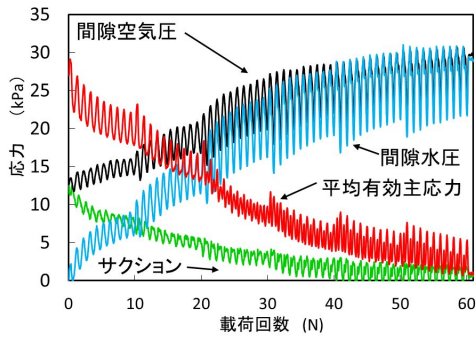


図-8 不飽和烏山土のせん断結果の例

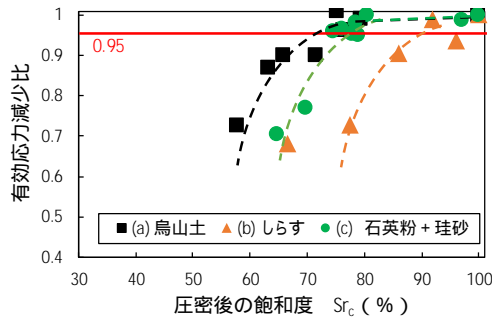


図-9 飽和度と有効応力減少比の関係

と珪砂の配合土の圧密後の飽和度と有効応力減少比の関係を示す。同じ飽和度の数値でみると、飽和度が85.0%を越えると(a)烏山土、(b)しらす、(c)石英粉と珪砂の配合土は全て液状化に至る。一方、圧密後の飽和度75.0%程度の領域では、(a)烏山土、(c)石英粉と珪砂の配合土は、有効応力減少比がまだ0.95を越えているのにも関わらず、(b)しらすは圧密後の飽和度は85.0%を下回るあたりで急激に有効応力減少比が低下していることが分かる。圧密後の飽和度が70.0%以下の領域でみると、(b)しらす、(c)石英粉と珪砂の配合土の順で有効応力減少比が大きく低下し、液状化に至らない。対して(a)烏山土は、飽和度65.0%程度でも高い有効応力減少比を示しており、低い飽和度でもせん断によって有効応力がゼロに至る。これら一連の研究結果より得られた知見は次の通りである。

繰返しせん断試験により、火山灰質土である烏山土、しらすは、いずれの試料もせん断後に有効応力の低下が見られ不飽和土においても初期飽和度によっては、せん断履歴により液状化する。このことから、繰返しせん断試験により非排気非排水条件下で動的载荷された場合、負のダイレイタンスによる体積収縮が起きることから、通常液状化判定が必要になる土であれば、不飽和状態においても初期飽和度によっては十分に液状化に至り崩壊する危険性を有する。

火山灰起源の有無による繰返しせん断変形挙動の差は、特に低い含水状態時において顕著化する。一方、火山灰質土においては、細粒分含有率が高いほうが低い含水状態でも有効応力がゼロに至る結果となった。このことから、同じ外力(地震動)であれば、

非火山灰土よりも火山灰質土が液状化・流動性崩壊を生じやすく、火山灰質土であれば、よい細粒分が多く含まれる土のほうが流動性崩壊を生じやすい。火山灰質土起源の有無の差は、土粒子の粒子形状(比表面積)にて、粒度分布は細粒分含有率にて、それぞれ表記できるため、これらの指標から簡易危険度評価が可能である。

(3) 高流動化させた砂質土の繰返しせん断変形特性

不飽和土の力学挙動は、既知の通りサクシオン効果により間隙空気や間隙水の状態に応じて影響を受けることから、これら水分状態と繰返しせん断変形挙動の関係について検討を行った。本研究では、コンクリート施工時に用いられる空気連行剤(AE剤)を使用して強制的に土中の水分状態を変化させ流動化させた不飽和土に対し、繰返しせん断試験を実施し、薬剤添加無しの試料と比較している。使用した土試料は、AE剤による間隙中の水分状態の変化による差のみを検討するため粒子表面形状による保水性の影響を除くため、(c)石英粉と珪砂の配合土とし、土試料に対して供試体作製時にAE剤を加えることで間隙中の水・空気の状態を強制的に変化させた。なお载荷履歴は、前項の不飽和土と同一を実施している。

水分状態を強制変化させるのに使用した空気連行剤は、BASF社のマスターポゾリス78P(Master Pozzolith78P)であり、JIS A 6204「コンクリート用科学混和剤」の多目的減水剤標準形(種)に適合する薬剤である。供試体は、初期状態として乾燥密度 $1.45\sim 1.50\text{g/cm}^3$ (中密)、飽和度($S_r=45\sim 85\%$)になるよう作製し、AE剤添加供試体(d)のみ間隙水70ccに対してAE剤を6~7cc(10%)で添加している。なお、実験中に使用した全ての試験水(間隙水)において、AE剤添加試験の場合は、10%濃度でAE剤を添加したものをを用いている。

まず、AE剤添加によるせん断変形挙動への影響について飽和土の試験結果を示す。図-10にAE剤添加有無における繰返し载荷時における有効応力経路と応力~ひずみ関係をそれぞれ示す。図より間隙中に空気(気泡)が無い飽和供試体ではAE剤の有無に関わらず初期条件が等しい場合、有効応力経路と応力~ひずみ関係の軌跡は一致し、AE剤添加自体が土の繰返しせん断変形挙動に影響を与えることは無いことが分かる。よって、懸念される薬剤自体による強度への影響は極端に小さい。この前提の下、土中に空気(気泡)が存在する不飽和状態下でAE剤添加の影響を観察する。

次に不飽和下における試験結果の比較を示す。無添加供試体と薬剤添加供試体の代表的な有効応力経路と応力~ひずみ関係を図-11に示す。図よりほぼ等しい飽和度にも関わらずAE剤の有・無により繰返しせん断

変形挙動に差が見られ、(c)AE 剤無の配合土では極端な軟化挙動を示さないが、薬剤添加により繰返しひずみ軟化し有効応力も 10kPa 以下まで低下するため水分状態によって大幅に挙動が変化する。従来考えられてきた供試体内の水分量のみで繰返しせん断変形挙動を一義的に決められない結果となった。

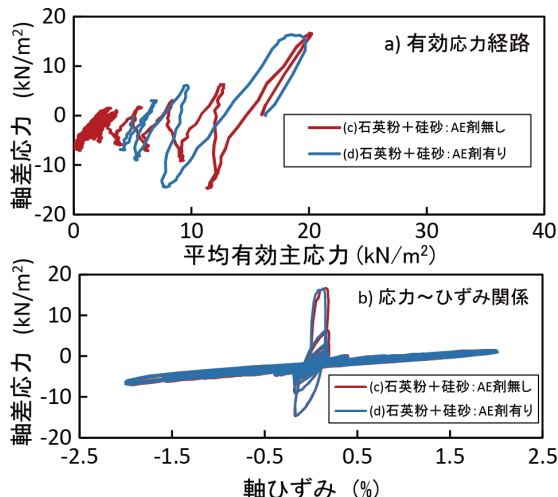


図-10 飽和供試体における AE 剤の影響

図-12 に(a)烏山土、(c)AE 剤無配合土(d)AE 剤有配合土の有効応力減少比と圧密後の飽和度関係のグラフを示す。AE 剤の有・無による液状化する飽和度範囲の影響をみると、添加無では有効応力減少比が 0.95 以下であった飽和度が AE 剤添加により 0.95 以上を示している。また、(a)と(d)はほぼ同じ軌跡をとることから、AE 剤を添加することで非火山灰質土が火山灰質土同程度の低い飽和度範囲まで有効応力ゼロに至り、液状化するように変化したことが伺える。以上、一連の研究結果より得られた知見は次の通りである。

石英粉+珪砂の配合土に対して AE 剤を添加し強制的に高流動化すると無添加では液状化しなかった外力条件でも薬剤添加により、試料は繰返しせん断によって有効応力がゼロに至り液状化する結果となり、AE 剤添加により液状化する飽和度範囲が広がる。この結果によれば、従来想定されていなかったようなかなり低い飽和度であっても、水分状態が AE 剤添加時と同じ状況（間隙中の空気が気泡化しメニスカスによる拘束状態になっていない）であれば、比較的容易に液状化し流動化する。また、非火山灰質土が薬剤添加によって流動化した場合、火山灰質土同様の繰返しせん断変形挙動を示す。

従来、不飽和化による液状化抵抗の指標として飽和度 S_r （土中水の体積割合）を用いることが一般的である。しかし、本成果から液状化抵抗が土中の水分量（体積割合）で一義的に決められず、水分状態によって挙動に差異が生じ、これまで危険性が低いとされてきた飽和度（土中水分量）でも、状態によっては十分に崩壊に至る可能性があることが示唆される。

高流動化した状態では、上記液状化強度のみ変化するだけでなく繰返しせん断変形挙動そのものが変化する。流動化試料の場合、繰返しせん断時の応力履歴や有効応力の挙動そのものが大きく変化する。このことから、地震時に液状化・流動化する可能性がある土と液状化後に大変位を生じる可能性が小さい土で明確化できる可能性があることを実験的に示した。

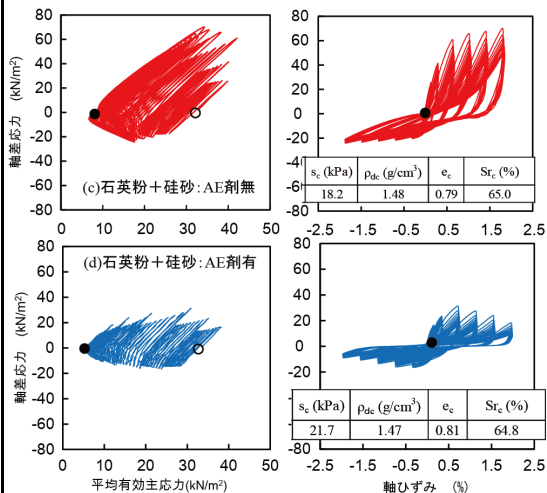


図-11 AE 剤有・無によるせん断挙動の差

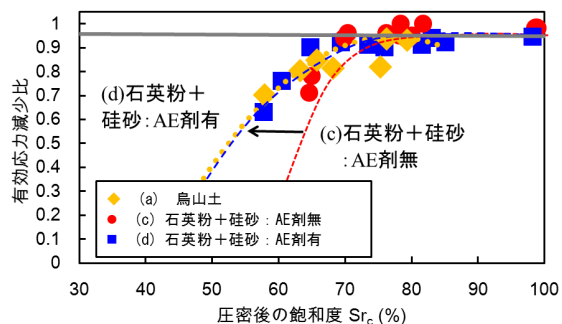


図-12 AE 剤による有効応力減少比の差

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 5 件)

- 1) Toshiyasu Unno et. al.: Liquefaction of Unsaturated Sandy Soil Considering Non-plastic Fine Granular and the Water State, 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (PBD-III), Geotechnical Earthquake Engineering and Associated Problems (ISSMGE-TC203), Vancouver, 2017.7.19.
- 2) AFIFAH Y. B. ZAKARIA, 隈元太朗, 海野寿康, 吉直卓也: 土中の水分状態を変化させた不飽和土の繰返しせん断変形挙動, 第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会, -27, 2017.03.07-08, さいたま市, 2017.

その他 3 編

6. 研究組織

(1)研究代表者

海野 寿康 (UNNO, Toshiyasu)

宇都宮大学・地域デザイン科学部・准教授
研究者番号: 50570412