

Evaluating Critical State Line of Volcanic Ash Soil by Stacked-ring Shear Apparatus

多層リングせん断試験機による火山灰土の限界状態線の評価

Phyu Thiri Thwe

(Outline of Master Thesis, July 2024)

Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, Japan



THE UNIVERSITY OF TOKYO
GEOTECHNICAL ENGINEERING LAB.

Introduction

In Japan, recently, the 2016 Kumamoto Earthquake and the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, have triggered landslides on **volcanic ash soils**, even on **gentle slopes** ($10^\circ - 30^\circ$) with **extensive runout distances**, over 100 m.

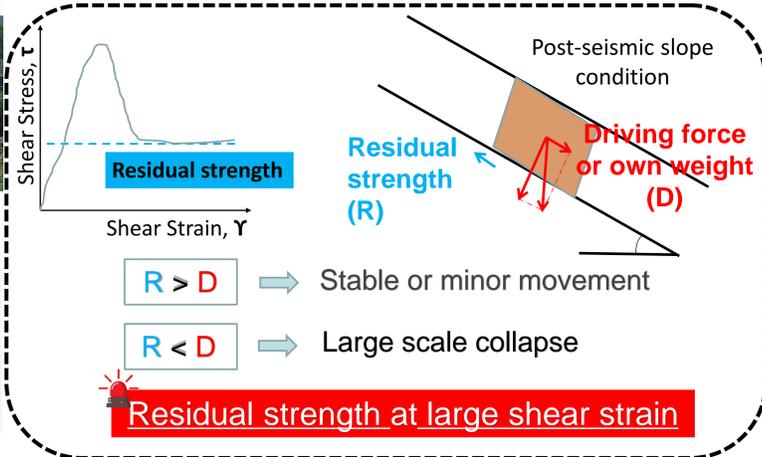
- Residual strength** is crucial to determine whether a slope will undergo large deformation or remain stable after an earthquake. Therefore, evaluating **critical state line (CSL)** of volcanic soil is essential to predict residual strength practically at any confining pressure.



Slope failure two months after 2016 Kumamoto Earthquake due to heavy rainfall

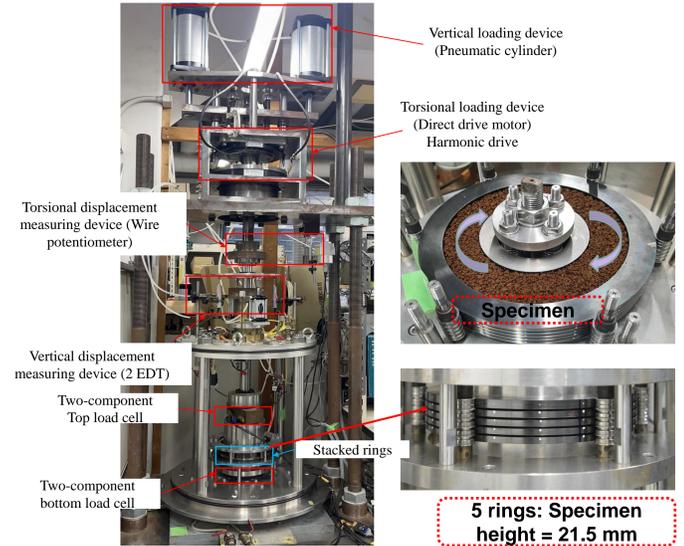


Slope failure after 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake



How to achieve Critical State?

Stacked-ring shear apparatus



General layout of Stacked-ring shear apparatus

It is possible to evaluate

- Stress-strain behavior at pre-peak
- Residual strength at **unlimited large shear strain (over 2000%)**, which is difficult to apply by normal triaxial test
- ✓ Able to reproduce the deformation of soil at large scale slope failures and reach critical state

Objectives

- To investigate **torsional shear behavior** of volcanic ash soil under **large shear strain**
- To evaluate the **Critical State Line** of volcanic ash soil
- To examine the extent of **particle breakage** of volcanic ash soil when subjected to large shearing

Materials



Aso soil from Kumamoto



Ta-d (red) from Hokkaido



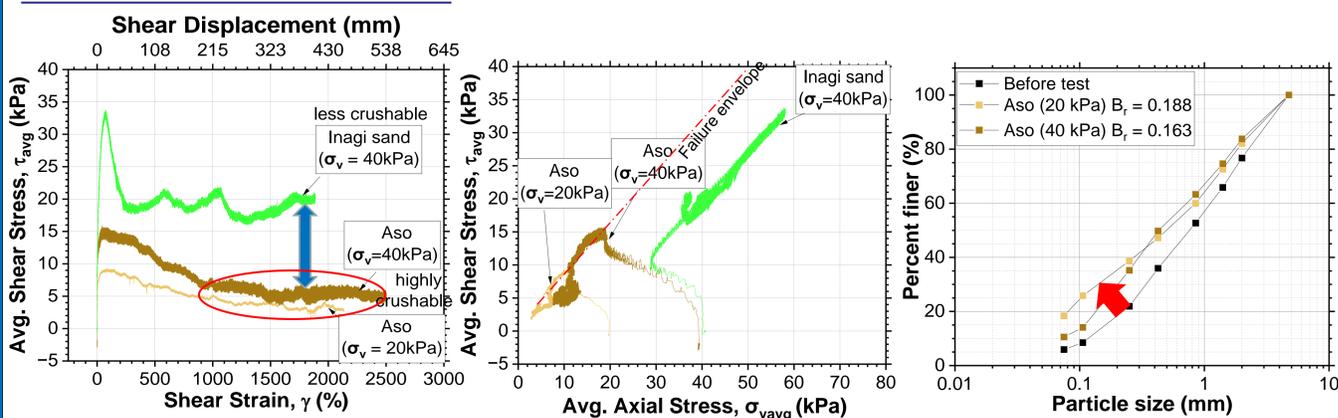
Inagi sand For comparison

Highly crushable volcanic ash soils

Less crushable typical sand

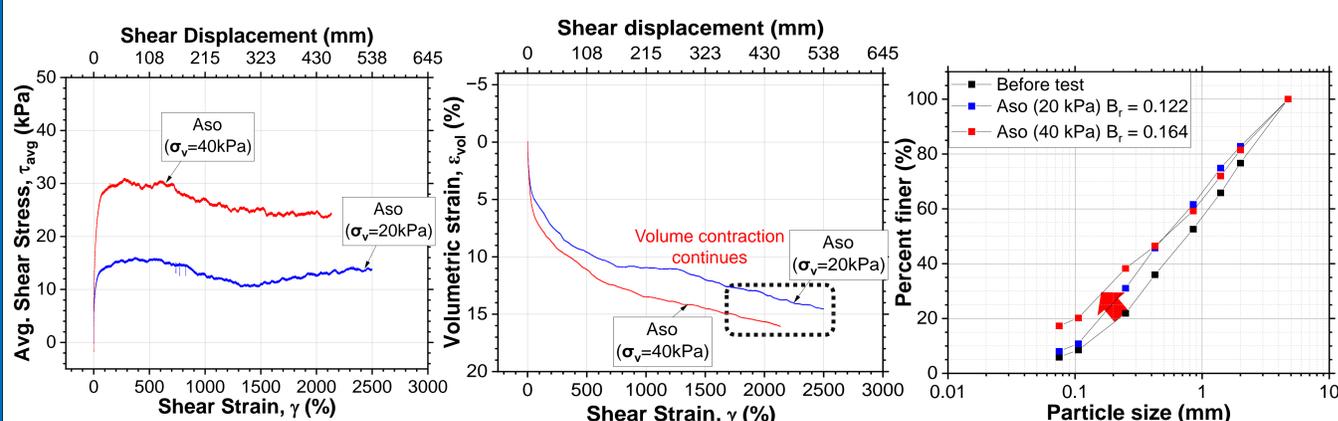
Torsional shear behavior

Constant volume test



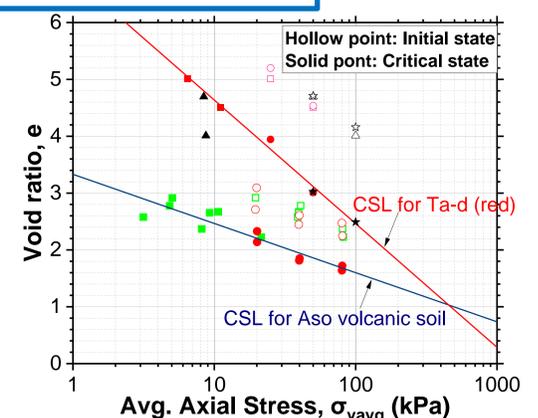
- Extremely **low residual strength** with **large strain softening** behavior compared to Inagi sand
- Substantial strength reduction** along failure envelope, due to **significant particle breakage**

Constant pressure test

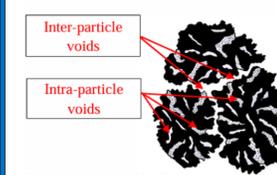


- Volumetric strain does not stabilize** until large shearing, possibly due to ongoing particle breakage, which could potentially result in a downward shift of the current CSL
- Strong contraction** during shearing, due to **particle breakage**

Critical state line



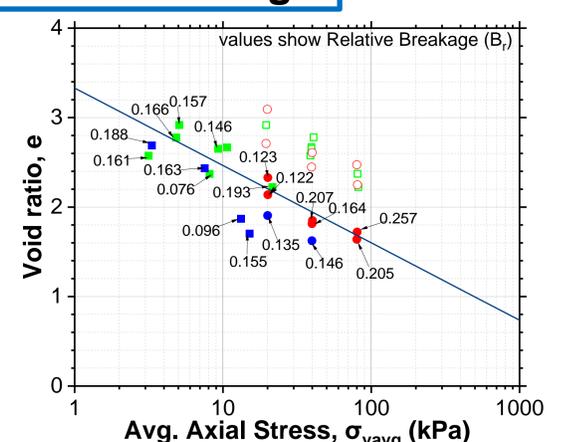
- The existence of the **CSL in sandy volcanic ash soils** is **evident** in both Aso and Ta-d (red) soils, despite their distinct CSL inclinations.
- CSL depends on soil type. One of the possible influencing factors is **intra-particle void ratio**.



(Dhanushka, 2024)

Ta-d (red) appears to have **larger intra-particle voids**, resulting in **higher initial void ratio**. Its influence on CSL should be explored in future.

Particle Breakage



Relative breakage index (Hardin, 1985) at critical state points

- Relative breakage ranges from 0.1 to 0.25, accounting for a single CSL for Aso volcanic soil up to 2000% to 2500% of shear strain

Prediction of residual strength of soil at super large strain level using the stacked-ring shear apparatus

多層リングせん断試験機による超大ひずみ領域における土の残留強度の予測



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

ISLAM Md Ariful

(Outline of Master Thesis, July 2023)

Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, Japan

THE UNIVERSITY OF TOKYO
GEOTECHNICAL ENGINEERING LAB.

Research Background

In recent years, during the 2016 Kumamoto earthquake and the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, several landslides occurred on gentle slopes (<10-15 degrees) with remarkable runout distances, sometimes exceeding 100 meters. Volcanic ash soil played a significant role in these extensive landslides on mild inclinations.

(Kawamura, 2019) and (Chairo, G. et al, 2017)



Slope failure after 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

Slope failure associated with **large shear deformation**. Evaluation of **residual strength** at **super large strain** level is necessary to investigate.

Objectives

- To investigate the influence of **friction**, and **soil leakage** of stacked ring shear apparatus on the stress-strain characteristics of sand.
- To **predict** the residual strength of **natural volcanic ash soil** which induced **large slope failure**.

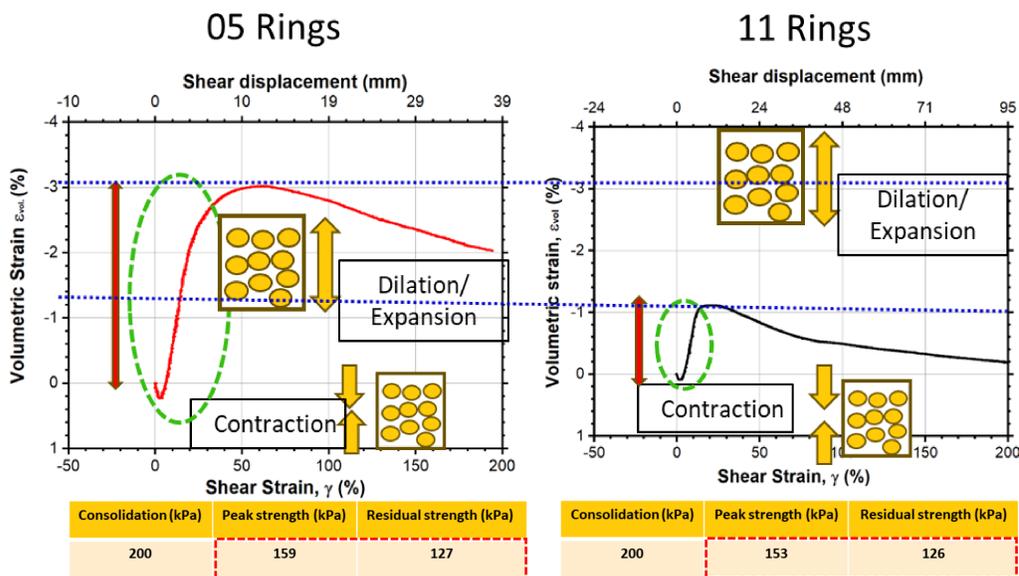
Materials



Volcanic ash soil (Hokkaido, Ta-d)

Silica sand #7

Influence of friction (Stacked ring shear apparatus)

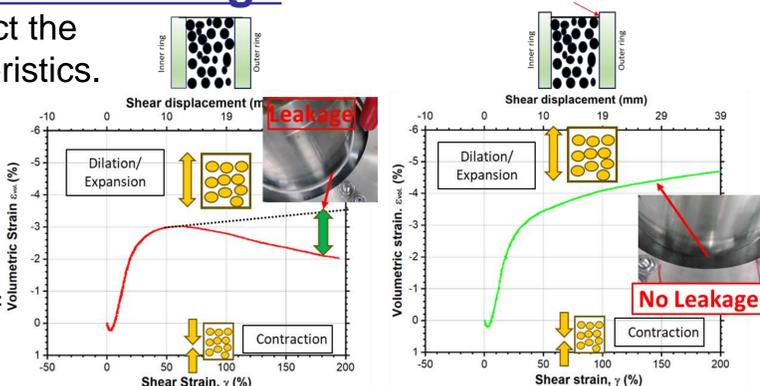


Friction has **negligible effect** on **peak** and **residual strength**. **Dilation characteristics** is strongly influenced by **friction**. 05 rings show more dilative characteristics than 11 rings.

Influence of soil leakage (Stacked ring shear apparatus)

Soil leakage affect the **dilation** characteristics.

Placing the specimen **below 1mm** from **top ring surface** can solve the issue of leakage problem.



How to evaluate residual strength?

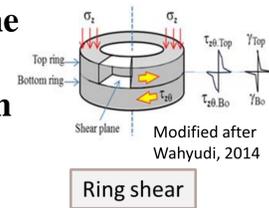
Conventional Apparatus

Unable to apply large strain (more than **around 20 %**)
Not a **simple shear test**



Tri-axial

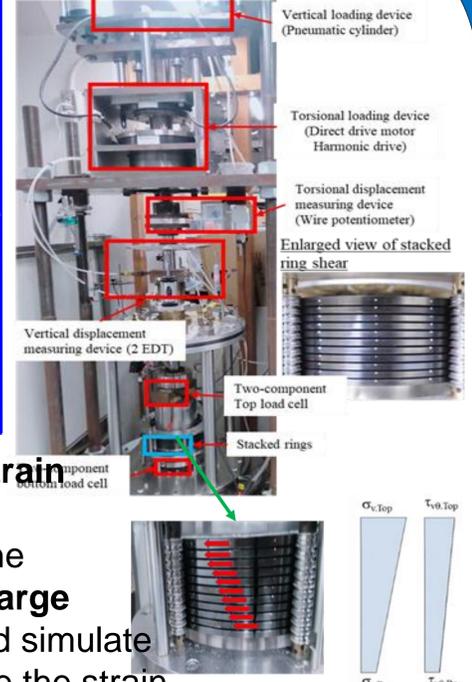
- **Predetermine shear plane**
- **Non-uniform stress strain distribution**



Ring shear

- **More uniform stress and strain distribution**
- **No predetermine shear plane**
- Possible to apply for **super large strain (1200 % or more)** and simulate simple shear condition before the strain localization.

Stacked Ring

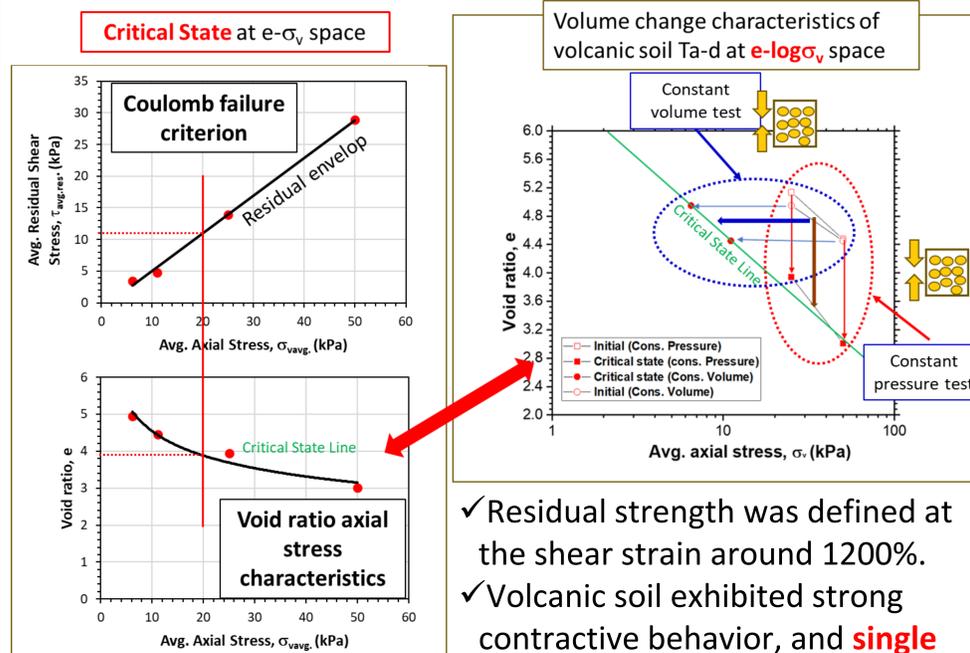


Complete view of stacked ring shear apparatus

Issues on stacked ring

- **Friction** between soil and rings
- **Soil leakage**

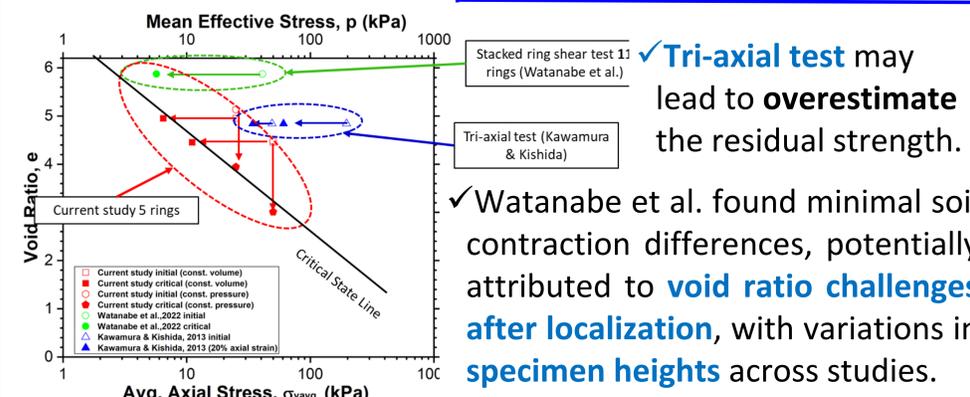
Prediction of residual strength of volcanic ash soil (Ta-d)



✓ Residual strength was defined at the shear strain around 1200%.
✓ Volcanic soil exhibited strong contractive behavior, and **single critical state line was observed**.

✓ **Void ratio** is very difficult to evaluated after **strain localization**.

Comparison to previous study



✓ **Tri-axial test** may lead to **overestimate** the residual strength.

✓ Watanabe et al. found minimal soil contraction differences, potentially attributed to **void ratio challenges after localization**, with variations in **specimen heights** across studies.

✓ Stacked ring shear apparatus more **convenient than tri-axial apparatus** for **prediction of residual strength** of **volcanic ash soil**.

AE技術を用いた火山灰土における粒子破碎 及び変形特性の継続的計測手法の確立



田島 直樹
(2022年度 修士論文概要)
東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 土質/地盤研究室

土の音を聞く ~AE(アコースティックエミッション)~

金属やコンクリートの損傷を検知するために用いられる技術
→損傷を“音”によって識別する!
ただし、土への適用事例はきわめて限定的

音で粒子破碎を
検知できないか?

火山灰土斜面の崩壊~平成30年度胆振東部地震~

平成30年北海道胆振東部地震で生じた多数の斜面崩壊には10°程度の緩斜面でも100mを越える大規模斜面崩壊も見られた。その原因として火山灰土の粒子破碎性が指摘されることは多い



北海道で見られた大規模緩斜面崩壊

粒子破碎の確認方法~ふるい分け~

粒子破碎の確認は、実験後にふるい分けするしかない。

× 実験途中にいつ破碎したかわからない
× 1供試体1回しか測れない



三軸圧縮試験を行いその後供試体は解体・分析へ

粒度データ
ここで初めて破碎を確認できるため…

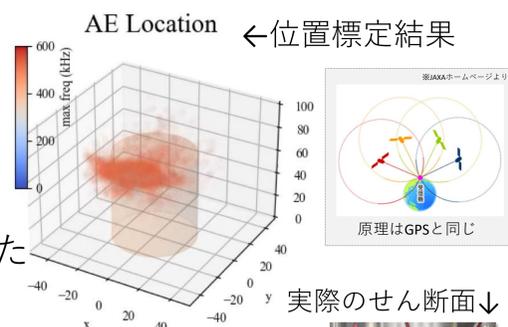
《いつ破碎していたのかわからない》

“火山灰土で” + “破碎量を” + “AE から” 判断することはできるのか?

①処理の高速化・高精度化

- 音の検出
- 音の到達時刻の算定
- 音源の位置標定

これらのプロセスには数週間の時間を要していた
→分析時間1日程度まで高速化することに成功



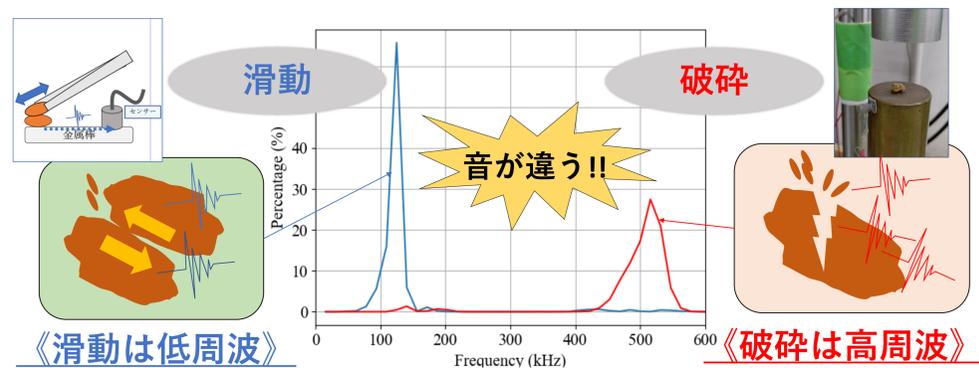
一般土を対象とした信号処理 in 土質試験分析技術の確立 & 効率化

従来の数十倍の実験効率!!!

②“割れる音”の確認

コンクリートや金属とは異なり土では粒同士の擦れ【滑動】が発生する

破碎時・滑動時音をそれぞれ実験によって確認



《滑動は低周波》

《破碎は高周波》

③破碎量との対応

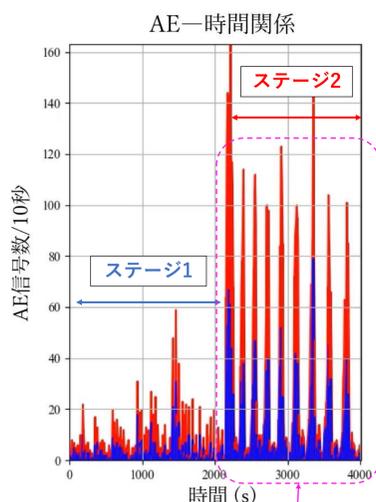
Q. AEは破碎量と対応していますか?
A. 対応します。

細かく段階的に繰り返し荷重を与えた
【ステージ1】ひずみ小, AE少, 破碎なし
【ステージ2】ひずみ大, AE多, 破碎多

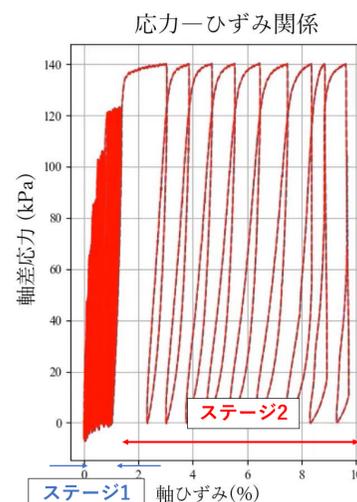
AEが増えた時に初めて破碎が発生
→AEは破碎量と対応している

AE技術で土の破碎をより詳細に検討できるようになった

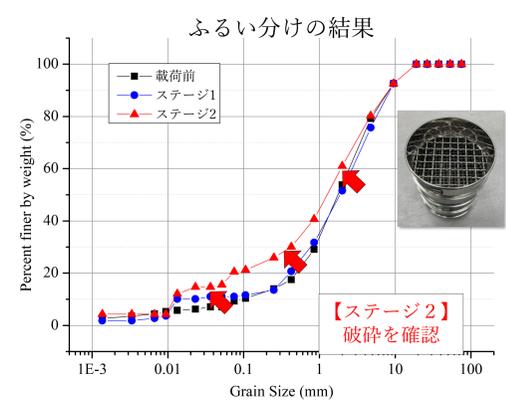
【将来展望】位置標定+破碎滑動の分別
→破壊する時の土の動き・破碎のタイミングをリアルタイムで追うことができる技術!?



AEは急増&減らないひずみも蓄積している



ステージ1: 20~120kPa繰り返し荷重各15回
ステージ2: 140kPa繰り返し荷重9回
左グラフでは 青: 低周波 赤: 高周波



ふるい分けの結果ステージ2のみで破碎が発生

今後の課題

- 破碎量の定量化・周波数の考察
- 変形予知技術としての利用 etc...

多層リングせん断試験機による北海道厚真町の火山灰土に生じた地震時大変形の考察



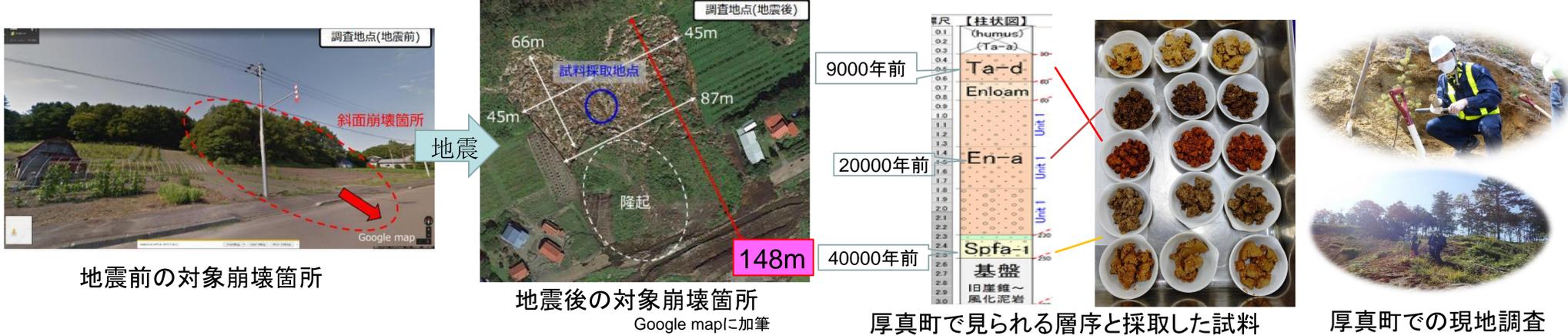
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

田島 直樹
(2020年度 卒業論文概要)

東京大学 工学部 社会基盤学科 土質/地盤研究室

研究の背景 ～平成30年度胆振東部地震～

平成30年北海道胆振東部地震で生じた多数の斜面崩壊の中には**10°程度の緩斜面でも100mを超える斜面崩壊**が見られた。本研究では現地で採取した火山灰土を用い、「**実地盤**」での「**地震動**」の影響、つまり「**不飽和条件下**」での「**繰り返し載荷**」が力学特性に及ぼす影響を調べた。



実験の概要 ～多層リングせん断試験～

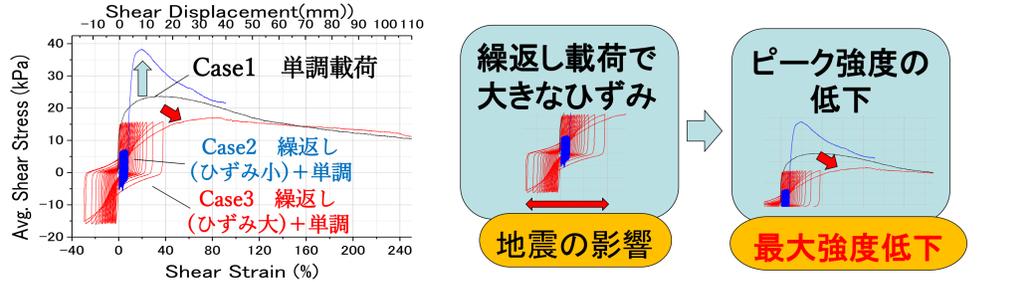
東京大学生産技術研究所で開発された「多層リングせん断試験機」を用いた。この試験機は滑り面を固定せず、**1000%にも及ぶ大きなひずみ**を与えることができる、特殊な試験機である。



多層リングせん断試験機

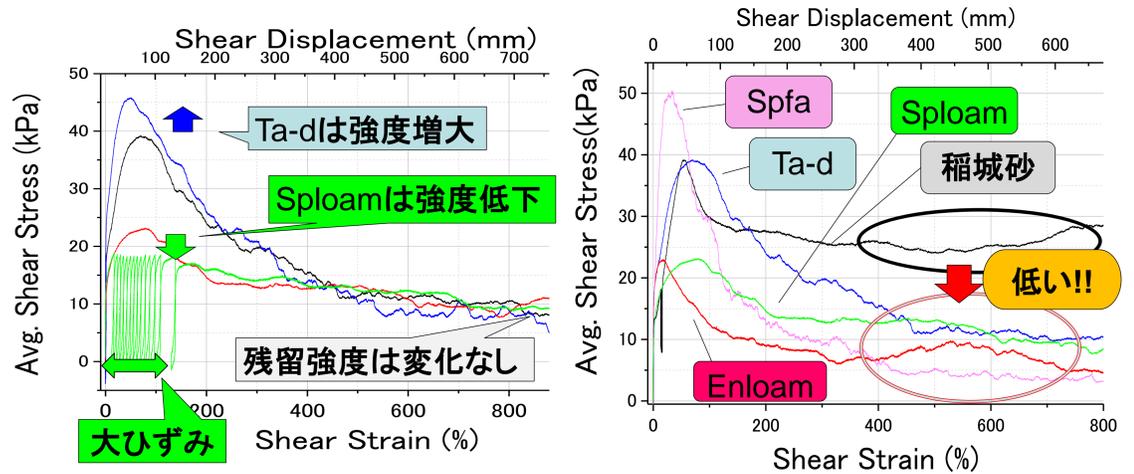
実験① 与える繰り返し載荷を変えた試験

「様々な繰り返し載荷+単調せん断」という試験を厚真火山灰土(Enloam)に対して行った。その結果、ピーク強度は増大・低下双方の結果が見られ、**大きなひずみが出るとピーク強度は低下**することが示された。



実験② 試料の種類を変えた試験

- ・現地で採取した4種の火山灰土と一般的な砂(稲城砂)に対し「現場地震相当の繰り返し載荷+単調せん断」という試験を行った。
- ・ピーク強度は実験①と同じく増大・低下の双方が見られ、繰り返し載荷時の大きいひずみがピーク強度低下につながることを確認された。
- ・残留強度に繰り返し載荷の影響はなかったが、土の種類を変えると**厚真火山灰土は一般的な砂と比べ極端に低い残留強度を示した。**



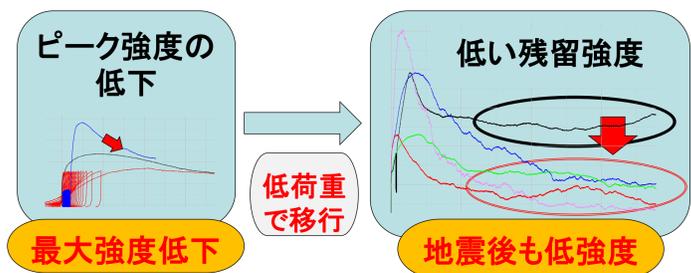
まとめ ～推測される斜面崩壊の原因～

実験結果をまとめると以下ようになる。

- ・繰り返し載荷による**ひずみが大きいとピーク強度が低下し、本来の強度を発揮せず残留強度へと移行してしまう。**
- ・厚真火山灰土は、どの種類でも**残留強度が低い**

厚真町で発生した緩斜面大崩壊の原因について、以下が推測された。

1. 地震の繰り返し載荷により、ひずみが生じる。
2. その**ひずみが大きいと、ピーク強度は低下**する。そして低い強度しか発揮できず、**残留強度へ移行**する。
3. その**残留強度も低い**ため地震後の緩斜面でも自重を支えられない
→**地震の後でも崩壊はとめどなく進行し、大崩壊に至る!**



緩斜面&地震がおさまった後においてでさえ自重を支えられない
→**緩斜面大崩壊**

多層リングせん断試験による北海道・厚真町で採取した火山灰土の大変形特性の分析



小野寺智哉

(卒業論文概要, 2020年3月)

東京大学社会基盤学科 土質/地盤研究室

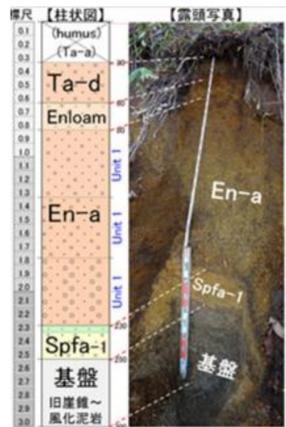
研究背景・目的

2018年北海道胆振東部地震により、厚真町などで同時多発的に大規模な斜面崩壊が発生した。この時発生した、低角度斜面における長距離土砂流動を伴う崩壊のメカニズムを地盤の力学特性の観点から検討した。

現地の層序は図のようになっており、場所によってTa-d, Enloam, Spfa-1がすべり面となったことが報告されている。現地でこれらの土を採取し、室内試験を行うことで、これらの層の力学特性を明らかにし、実際に斜面崩壊が起こり得る性質を持っていたか検討した。



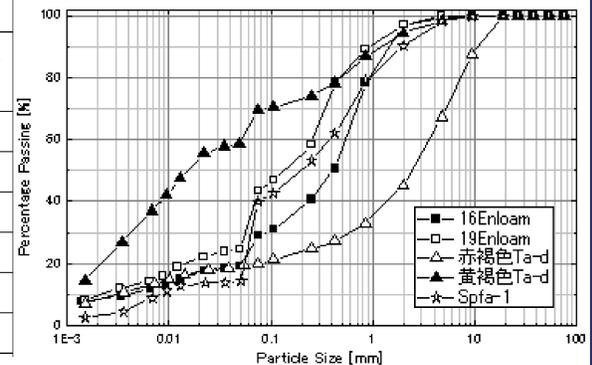
桜丘地区での崩壊の様子



現地の典型的層序

試料名	土粒子密度 (g/cm ³)	自然含水比 (%)	現地乾燥密度 (g/cm ³)	コンシステンシー特性			細粒分含有率 (%)	せん断試験用供試体	
				w _L (%)	w _T (%)	I _p		乾燥密度 (g/cm ³)	初期含水比 (%)
16Enloam	2.71	57.6	0.89	60.3	48.4	11.9	29.0	0.89	57.6
19Enloam	2.75	84.8	0.77	65.2	53.7	11.5	42.8	0.77	84.8
赤褐色 Ta d	2.68	189.1	0.34	169.2	139.5	29.7	20.0	0.37	224.4
黄褐色 Ta d	2.73	212.9	0.51	137.3	112.6	24.7	69.3	0.38	212.9
Spfa 1	2.55	107.7	0.59	49.0	40.0	9.0	39.9	0.59	93.3
稲城砂	2.71	—	—	—	—	—	4.8	1.44	18.5

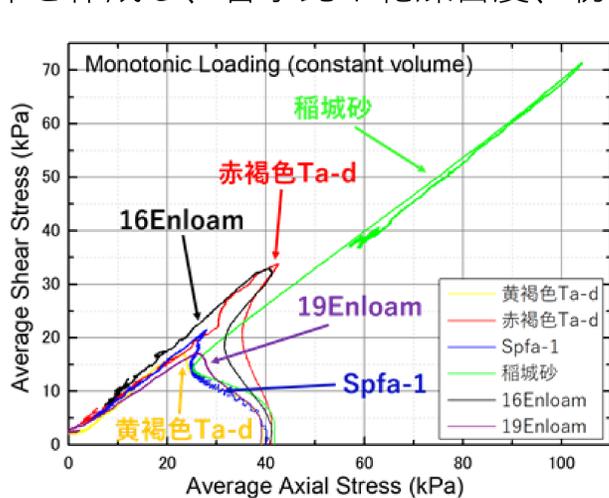
試料の物理試験結果



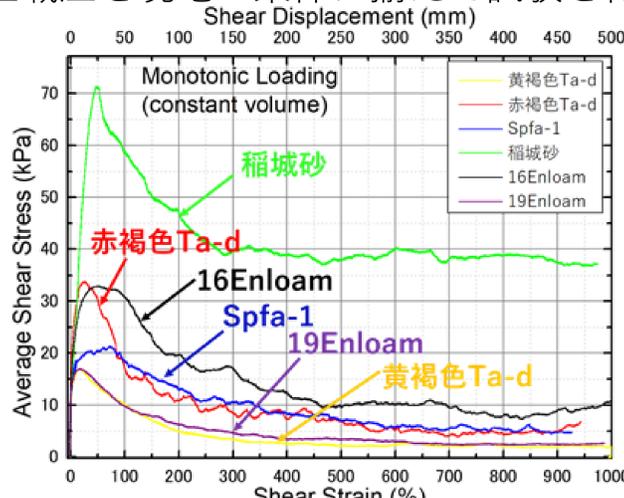
試料の粒径加積曲線

室内せん断試験

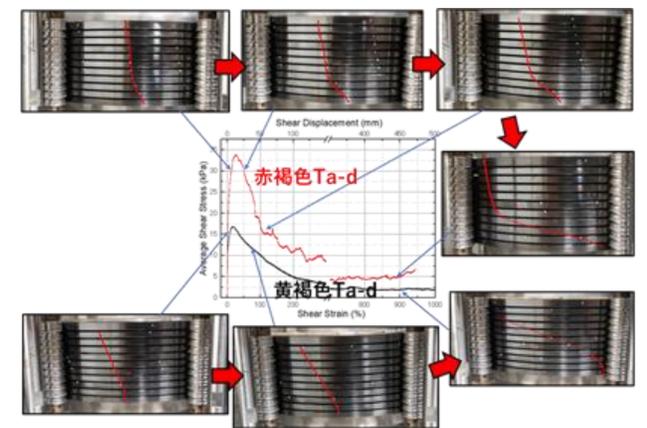
本研究では「多層リングせん断試験装置」を用いて、現場での大変形を模擬した定体積単調せん断試験を実施した。この装置は供試体断面を保ったまま、かつすべり面を限定せずに、せん断ひずみ1000%以上の大変形領域までのせん断試験を行えるのが特徴である。現地調査で採取した5種類の試料と一般的な砂(稲城砂)を用いて供試体を作成し、含水比や乾燥密度、初期上載圧を現地の条件に揃えて試験を行った。



応力経路図



応力-ひずみ関係図



せん断中の多層リングの回転

16Enloamや赤褐色Ta-dはダイレイタンスーが負→正→負と変化する「巻き返し挙動」が大きい特徴がある一方、19Enloamや黄褐色Ta-dはせん断中常に負のダイレイタンスーを示したまま破壊に至る。

厚真町の試料(特に19Enloam, 黄褐色Ta-d)は一般的な砂よりも大きなひずみ軟化挙動を示し、せん断ひずみ500%程度以上の領域で非常に低い残留強度(5~10kPa程度)を発揮している。

ピーク強度付近までは供試体全体が一様にせん断されているのに対し、ピークを超えると局所的なすべり面が発現することが確認され、その結果として非常に低い残留強度を発現することが示唆された。

斜面安定解析

せん断試験から得られた強度を用いて、斜面の安定性について計算を行った。

- 仮定
- 直線すべり面(傾斜10°, 深さ3m)を仮定
 - 地下水位は十分低い
 - 上載土のγ_tは全て13.8kN/m³
 - 近隣の観測所での地震加速度を採用
 - 斜面が発揮する抵抗力として、常時と地震時にはピーク強度を、地震後には残留強度を採用
 - 抵抗力は粘着力cのみによると仮定

安全率を算出



	常時 τ _{peak} α = 0	地震時 τ _{peak} α = 967gal	地震後 τ _{res} α = 0
稲城砂	10.15	1.54	5.21
16Enloam	4.68	0.71	1.42
赤褐色Ta-d	4.79	0.73	0.70
黄褐色Ta-d	2.41	0.36	0.28
Spfa-1	3.12	0.47	0.71

安定解析結果(安全率F)

常時はいずれの斜面も安定して存在するが、地震慣性力により厚真町の土は不安定化する。さらに、Ta-dやSpfa-1といった火山灰質土については、地震慣性力が無くなっても、残留強度が自重すら支えられない結果になった。

自重によって滑り続け、長距離流動が発生した可能性



$$F = \frac{c_u l \cos \theta \text{ [抵抗力]}}{\gamma_t b H \sin(\alpha + \theta) \text{ [滑動力]}}$$