

模型盛土斜面の加振崩壊時における 火山起源の土の粒子破碎挙動

吉原 隆¹・海野 寿康²・松丸 貴樹³・仙頭 紀明⁴

¹ 学生会員 宇都宮大学大学院生 地域創生科学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: mc216263@cc.utsunomiya-u.ac.jp

² 正会員 宇都宮大学准教授 地域デザイン科学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: unno@cc.utsunomiya-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ 正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: matsumaru.takaki.35@rtri.or.jp

⁴ 正会員 日本大学教授 工学部 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河 1 番地)

E-mail: sentou.noriaki@nihon-u.ac.jp

本研究では、外力によって容易に粒子破碎を生じる火山灰質粗粒土を対象に、要素力学試験（圧密・排水単調せん断試験，等方圧密試験）および振動台を用いた模型盛土斜面の崩壊実験を実施することで、排水単調せん断および等方圧密による粒子破碎挙動と、模型盛土斜面の崩壊による粒子破碎挙動を粒度試験により把握した。各種粒度試験結果から、要素力学試験における排水単調せん断過程および崩壊後の模型盛土斜面のすべり面における粒子破碎挙動を定性的に比較した結果、排水単調せん断過程および崩壊後の模型盛土斜面のすべり面における各種粒径区分の含有率の増加倍率は、ともに中砂分、細砂分および細粒分で大きく、特に細砂分において高い増加倍率を示し、同様の傾向を示すことが明らかになった。

Key Words: volcanic ash coarse-grain soil, particle breakage, shaking table test, torsional shear test

1. はじめに

火山国である日本に広く分布している火山起源の土は、地盤工学的に火山灰質粗粒土と火山灰質細粒土に分類される。その中でも特に、砂礫分が多く人工物にもしばしば使われる火山灰質粗粒土において、気候変動や地震、火山活動の活発化といった自然災害による被災事例が多く報告されており、社会基盤構造物の自然災害に対するリスクを高める要因となっている。近年の被災事例として、2008年岩手・宮城内陸地震¹⁾や2018年北海道胆振東部地震²⁾が挙げられ、自然斜面や盛土、土構造物が泥状になり崩壊する流動性崩壊が発生している。さらに、火山灰質粗粒土で構成された地盤では流動性崩壊だけでなく、液状化や不等沈下、豪雨浸食といった災害の事例も多く報告されている^{例えば 2)}。火山灰質粗粒土は粒子が多孔質かつ脆弱であり、外力により粒子破碎を生じることや、含有される細粒分が低塑性あるいは非塑性であると

いう一般の砂にはない特殊性を有している³⁾。この火山灰質粗粒土の特殊な土質特性が自然災害に対する脆弱性を高めていると考えられているが、火山灰質粗粒土の特殊な土質特性と災害脆弱性との因果関係は把握されておらず、メカニズムを含めて詳細な因果関係は不明である。ここで、しらすやボラなど、軽石を多量に含んだ火山灰質粗粒土における外力による粒子破碎性や、粒子破碎挙動と力学特性の関係に関する研究報告は数多くされている^{例えば 4) 5)}。いくつか例示すると、三浦・八木⁴⁾は構成粒子が脆弱な火山灰質粒状体では高圧下の地盤材料と同様に、一次元圧密過程では圧密応力の増加こともなって粒子破碎が増加していき、特に、圧密降伏応力を超えると粒子破碎が急増する傾向があることを明らかにした。また、堀田・三浦⁵⁾は破碎性粒状体のせん断抵抗角は他の粒状体と同様に最小有効主応力との関係で整理可能であり、粗粒火山灰土のせん断抵抗角は顕著な最小有効主応力依存性を示すことを明らかにした。さらに、粗粒火山

灰土の持つ破砕性がせん断抵抗角の減少に拍車をかけるものと推察している。一方で、実際の土砂災害や地盤災害において粒子破砕挙動がどう影響しているのかを把握するため、火山灰質粗粒土で構成された地盤に対して崩壊を起こし、その崩壊挙動と粒子破砕挙動を積極的に観察することはなされておらず、災害現場からの採取土をもって粒子破砕の影響を議論するに過ぎない。具体的に、斜面崩壊時にどの部分の土が破砕するかなど、メカニズム解明には、全体像の定性的な把握や観察が必要不可欠であるが、粒子破砕性を有する地盤材料を用いた模型実験を実施し、積極的に粒子破砕挙動の把握を試みた研究事例は殆どない。

以上の経緯から、本研究では外力により容易に粒子破砕を生じる火山灰質粗粒土を対象に、1G 場において振動台を用いた模型盛土斜面の崩壊実験を実施し、その崩壊挙動および崩壊による粒子破砕挙動の把握を行った。

2. 破砕性材料の物理特性および材料特性

本研究で模型盛土斜面の構築に用いた試料は栃木県鹿沼市産の赤玉土である。本試料は火山灰質粗粒土に分類され、前述した火山灰質粗粒土の特徴の通り、粒子が脆弱であり、粒子破砕を生じる破砕性材料である。このことから $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ で炉乾燥を行うと粒子破砕を生じることが懸念されるため、炉乾燥は 40°C で 48 時間以上として各種試験を実施した。本研究に用いた赤玉土の様子と電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) を用いて、土粒子表面を観察した様子を図-1 に示す。赤玉土の土粒子表面は全体的に丸みを帯びた形状をしており、粗い粒子の表面に細かな粒子が付着している様子が観察できる。

(1) 試料の物理特性

本研究に用いた赤玉土の粒径加積曲線を図-2 に示す。この赤玉土は粒子が脆弱な火山灰質粗粒土であるため、長時間のふるい分析により粒径が変化することが懸念される。そこで、春山ら⁷⁾のシラスの物理的性質の試験法を参考に、分散剤としてテトラリン酸ナトリウムを用い、ふるい分けは手動で3分間とした。また、粒子内空隙の影響による土粒子密度試験結果のばらつきが懸念されるため、既往の研究⁸⁾を参考に、事前にすりつぶした試料を用いて土粒子密度試験を実施した。試料の物理特性を表-1 に示す。ここで、土粒子密度は ρ_s 、50% 粒径は D_{50} 、均等係数は U_c 、細粒分含有率は F_{cl} とする。本研究では、模型実験における粒子破砕挙動を把握するため、細粒分含有率 3% と細粒分の少ない試料を用いた。なお、本研究に用いた赤玉土に含まれる細粒分は非塑性であった。

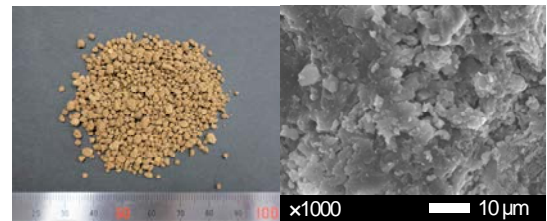


図-1 試料の様子と電子顕微鏡による土粒子表面の様子

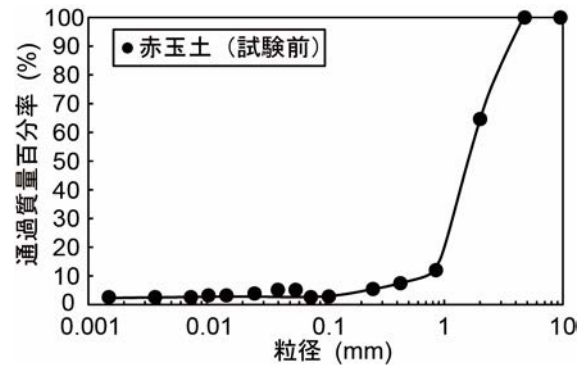


図-2 粒径加積曲線

表-1 試料の物理特性

試料名	ρ_s (Mg/m ³)	D_{50} (mm)	U_c	F_{cl} (%)
赤玉土	2.757	1.75	2.92	3

(2) 要素力学試験による破砕性材料の粒子破砕挙動

本研究に用いた赤玉土を対象に、中空ねじりせん断試験装置を用いて圧密・排水単調せん断試験を実施し、試験後試料を用いた粒度試験を実施することで、初期有効主応力が異なる条件下でのねじりせん断による粒子破砕挙動を把握した。

本研究では、初期有効主応力を 10kN/m^2 、 30kN/m^2 、 50kN/m^2 、 70kN/m^2 と変化させ、せん断ひずみ速度 $0.5\%/min$ として排水条件下で単調せん断履歴を与えた試験をシリーズ A-a、圧密応力を 30kN/m^2 、 50kN/m^2 、 70kN/m^2 と変化させ、等方圧密のみ実施した試験をシリーズ A-b としている (以降、シリーズ A-a およびシリーズ A-b と呼ぶ)。ここで、シリーズ A-a で使用した中空ねじりせん断試験装置の供試体は、外径 70mm 、内径 30mm 、高さ 100mm の中空円筒状であり、シリーズ A-b で使用した三軸圧縮試験装置の供試体は、直径 50mm 、高さ 100mm の円柱状である。シリーズ A-a および A-b で供試体作製に用いたゴムスリーブ厚は 0.3mm であり、試料の充填方法は自然含水比 48% 程度の試料を用いて突き固め法を採用し、圧密後の乾燥密度 $\rho_d=0.545\text{Mg/m}^3$ となるように調整し作製した。本研究では、模型実験における粒子破砕挙動との比較検討のため、試料の粒度調整は行わず最大粒径 4.75mm の試料を用いている。なお、供試体に CO_2 および脱気水を流した後、背圧を 100kN/m^2 付与することで B 値 0.95 以上を確保し、等方応力状態で圧密を行った。

シリーズ A-a の初期条件と試験結果を表-2 に、シリーズ

表-2 初期条件と試験結果 (シリーズ A-a)

試料名	Case No.	初期条件 (等方圧密後)				排水単調せん断過程				
		σ'_c (kN/m ²)	ρ_{sk} (Mg/m ³)	e_c	V_c (cm ³)	τ_d (kN/m ²)	τ_{pc} (kN/m ²)	γ (%)	γ_{max} (%)	p' (kN/m ²)
赤玉土	A-a-1	10.3	0.555	3.968	305.2	12.8	12.8	22.4	25.6	11.9
	A-a-2	29.5	0.550	4.013	301.1	20.5	20.6	22.5	25.1	29.9
	A-a-3	50.5	0.554	3.977	288.7	24.7	25.2	22.5	27.3	50.7
	A-a-4	70.6	0.562	3.906	279.9	25.1	25.7	22.5	28.1	71.2

表-3 初期条件と試験結果 (シリーズ A-b)

試料名	Case No.	初期条件 (供試体作製時)			等方圧密終了時			
		ρ_{si} (Mg/m ³)	e_i	V_i (cm ³)	σ'_c (kN/m ²)	ρ_{sk} (Mg/m ³)	e_c	V_c (cm ³)
赤玉土	A-b-1	0.524	4.265	184.5	29.7	0.539	4.119	179.4
	A-b-2	0.517	4.330	183.5	49.1	0.556	3.962	170.8
	A-b-3	0.493	4.590	181.5	68.6	0.553	3.988	161.9

表-4 シリーズ A-a, A-b の試験後試料による粒度試験結果

試料名	赤玉土								
	Case No.	実験前	排水単調せん断試験				等方圧密試験		
			A-a-1	A-a-2	A-a-3	A-a-4	A-b-1	A-b-2	A-b-3
試験時初期有効主応力 (kN/m ²)		0	10	30	50	70	30	50	70
細礫分 (%)		35.4	28.7	34.6	30.0	23.8	29.8	30.6	35.1
粗砂分 (%)		52.6	56.0	43.7	45.9	44.5	56.0	51.9	45.0
中砂分 (%)		6.6	9.1	11.1	12.2	15.5	7.6	8.8	10.7
細砂分 (%)		2.8	4.3	5.9	7.0	9.5	2.7	4.5	4.8
シルト分 (%)		0.0	0.0	2.8	2.4	3.6	0.0	0.0	0.0
粘土分 (%)		2.6	1.9	1.9	2.5	3.0	3.9	4.2	4.5
最大粒径 (mm)		4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75
均等係数 U_c		2.92	3.60	7.60	8.00	12.31	3.60	5.44	6.61
曲率係数 U'_c		1.37	1.74	3.03	3.78	2.70	1.88	2.10	2.34
細粒分含有率 F_{cf} (%)		3	3	5	5	7	3	4	5
細粒分増加量 ΔF_c (%)		0	0	2	2	4	0	1	2

A-b の初期条件と試験結果を表-3 に示す。ここで、初期有効主応力は σ'_c 、圧密後の各乾燥密度は ρ_{sk} 、間隙比は e_c 、体積は V_c 、せん断過程の各排水せん断強さは τ_d 、残留せん断応力は τ_{pc} 、 τ_d 時のせん断ひずみを γ 、試験終了時のせん断ひずみを γ_{max} 、試験終了時の平均有効主応力を p' 、供試体作製時の各乾燥密度は ρ_{si} 、間隙比は e_i 、体積は V_i とする。なお、排水せん断強さは $0 \leq \gamma \leq 22.5\%$ における最大せん断応力とし、せん断ひずみ 25% 程度を試験終了条件とした。

シリーズ A-a および A-b の試験後試料を用いた粒度試験の結果を表-4 に示す。ここで、細粒分増加量 ΔF_c は試験前試料の細粒分含有率 F_{ci} と試験後試料の細粒分含有率 F_{cf} の差として次式(1)で定義し、この指標の有効性については、既往の研究 ⁴⁾ により確かめられている。シリーズ A-a の試験後試料を用いた粒度試験結果から、初期

$$\Delta F_c = F_{cf} - F_{ci} \quad (1)$$

有効主応力が異なる条件下で単調せん断履歴を受けた試料の粒径加積曲線を図-3 に、シリーズ A-b の試験後試料を用いた粒度試験結果から、圧密応力が異なる条件下で等方圧密した試料の粒径加積曲線を図-4 に示す。また、シリーズ A-a および A-b の、初期有効主応力と圧密応力が同一な試験ケースにおける、単調せん断履歴の有無による粒子破碎挙動の比較を図-5 に示す。

図-3 より、シリーズ A-a において、単調せん断履歴を受けることで粒子破碎が生じ、初期有効主応力 10kN/m² と 70kN/m² の試験ケースにおいて粒子破碎の程度に大きな差が見られたことから、初期有効主応力が小さい試験ケースと比較して、初期有効主応力が大きいほど、粒子破

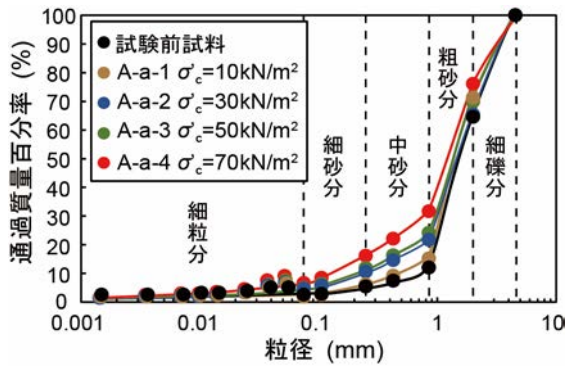


図-3 試験後試料の粒径加積曲線 (シリーズ A-a)

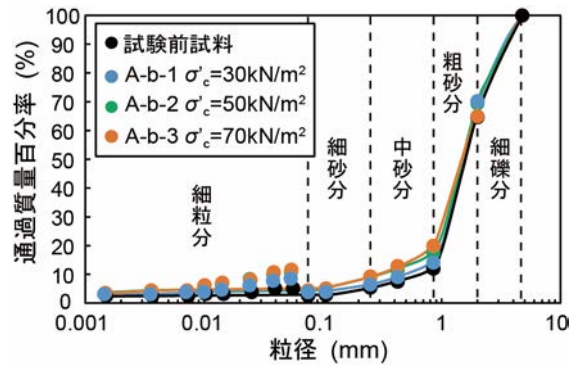


図-4 試験後試料の粒径加積曲線 (シリーズ A-b)

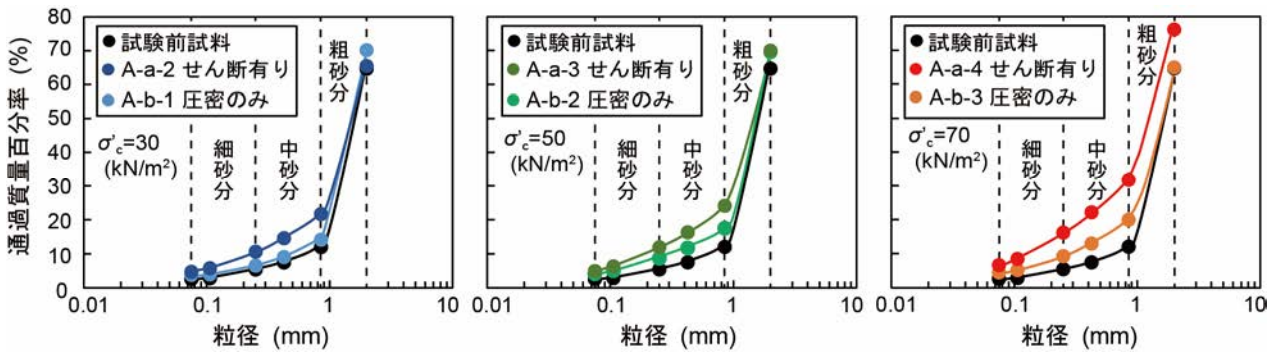


図-5 単調せん断履歴の有無による粒子破碎挙動の比較

砕が顕著に生じることが分かる。特に、実験前の粒度分布と比較して、砂分において粒度分布は大きく変化しており、粗砂分が減少し、中砂分および細砂分が増加する結果を示した。また、試験ケース A-a-1, A-a-2, A-a-3 および A-a-4 における細粒分増加量はゼロ%, 2%, 2% および 4% と初期有効主応力の増加にともない増加傾向を示したが、顕著な増加は見られなかった。図-4 より、シリーズ A-b において、圧密応力が異なる等方圧密を受けることで粒子破碎が生じ、圧密応力 50kN/m², 70kN/m² の試験ケースにおいて粒子破碎の程度が比較的大きく、中砂分および細砂分が増加した。圧密応力 30kN/m², 50kN/m² の試験ケースと比較して 70kN/m² の試験ケースでは粗砂分の減少が大きく、30kN/m² の試験ケースにおいては粒子破碎による粒度分布の変化は小さかった。また、試験ケース A-b-1, A-b-2, および A-b-4 における細粒分増加量はゼロ%, 1% および 2% であり、等方圧密による細粒分の増加はシリーズ A-a と比較して小さい結果を示した。ここで、図-5 より、粒子破碎による粒度分布の変化が大きかった砂分において、単調せん断履歴の有無による粒子破碎挙動を比較したところ、初期有効主応力および圧密応力が異なる各 3 種類の試験ケースにおいて、単調せん断履歴を受けることで、中砂分および細砂分は増加しており、せん断過程で粒子破碎が進行することが分かった。

3. 模型盛土斜面の崩壊挙動および粒子破碎挙動

振動台を用いた模型盛土斜面の崩壊実験により、模型盛土斜面の崩壊挙動を観察し、崩壊後の模型盛土斜面から採取した試料を用いて粒度試験を行うことで、崩壊による粒子破碎挙動を把握した。実験は、斜面のみを構築し崩壊させる CASE1, 天端・基盤・のり先を含む盛土斜面を構築し、背面加水により盛土内水分状態を変化させ崩壊させる CASE2 の 2 ケース実施した (以降、CASE1 および CASE2 と呼ぶ)。なお、本研究で実施した模型実験は 1G 場であり、10 分の 1 スケール程度を想定している。模型盛土斜面の構築は、試料の自然含水比 48% 程度で乾燥密度 $\rho_d=0.545\text{Mg/m}^3$ となるように構築し、模型盛土斜面の密度は、要素力学試験において作製可能な緩い密度かつ、斜面勾配 1:1.5 で斜面形成が可能な密度としている。ここで、試料の自然含水比 48% は飽和度に換算すると 33% 程度である。模型盛土斜面と同一の乾燥密度において、飽和定水位透水試験を実施しており、本研究に用いた赤玉土の飽和透水係数は $k_s=7.75\times 10^{-5}\text{m/s}$ であった。

(1) 実験 CASE1 の崩壊挙動および粒子破碎挙動

a) 模型盛土斜面の概要と加振条件

CASE1 で構築した模型盛土斜面の概要を図-6 に示す。

アクリル製土槽に土台斜面、板材を設置し、高さ400mm、斜面勾配 1 : 1.5、乾燥密度 0.545Mg/m^3 として、自然含水比 48%の試料を用いて層厚 50mm ごとに締固めることで模型盛土斜面を構築した。計測器（加速度計）の配置は図-6の通りであり、奥行方向中央部に設置した。加速度応答の他、鉛直変位を計測し、側面に 50mm 間隔で格子状に配置したターゲットで模型盛土斜面の変形を観察した。なお、アクリル製土槽の側面にグリスを塗布することでアクリル面とターゲットの間に摩擦が生じないようにした。加振は周波数 2.0Hz の正弦波を Step1 から Step4 の 4 段階に分け、各加振段階ごとに加速度振幅を増加させることで行った。なお、各加振段階の加振時間は 12 秒間としている。CASE1 において与えた加速度波形として、振動台に直接取り付けられた加速度計 A1 で計測した加速度振幅を図-7に示す。最初の加振では、最大加速度振幅（斜面解放側に慣性力が作用する方向、すなわち図-6に示す「+」側の加速度成分を示す）を 200gal 程度とし、模型盛土斜面が崩壊に至るまで最大加速度振幅を 100gal 程度ごとに増加させた。各加振段階において、加速度計 A1 で計測された最大加速度は Step1・213.5gal、Step2・310.8gal、Step3・405.9gal、Step4・522.2gal であった。

b) 模型盛土斜面の崩壊挙動

各加振段階終了時に計測した模型盛土斜面の鉛直変位を図-8に示す。ここで、鉛直変位は沈下を正としている。Step1・213.5gal でのり肩部分が崩壊し、Step3・405.9gal で

明確なすべり面が現れた。Step4・522.2gal で土台斜面に沿って斜面がすべり、実験を終了した。加振段階終了後の模型盛土斜面の一例として、Step3・405.9gal 終了時の様子を図-9に示す。加振により明確なすべり面が形成され、崩壊した土砂が斜面下方に堆積している様子が観察できる。これは図-8の Step3・405.9gal 終了時の鉛直変位からも同様に見て取れる。

c) 実験後試料の粒度試験による粒子破碎挙動の把握

実験後の試料を用いて粒度試験を実施するため、崩壊後の模型盛土斜面から試料を採取した。試料の採取位置および採取の様子を図-10に示す。試料採取において、粒子破碎により生じた細粒分を採り逃さぬよう、塵取りや刷けを用いて慎重に採取した。採取した試料を用いて実施した粒度試験の結果を表-5に、粒度試験より得られた粒径加積曲線を図-11に示す。実験前の粒度分布と比較して、すべり面上側、崩壊土砂で粒子破碎は生じず、すべり面下側で粒子破碎が生じ、中砂分および細砂分が増加したが、粒子破碎が生じたすべり面下側における粒度分布の変化は小さく、また、細粒分増加量はすべり面下側で 1%と目立った増加は示さなかった。

(2) 実験 CASE2 の崩壊挙動および粒子破碎挙動

a) 模型盛土斜面の概要と加振条件

CASE2 で構築した模型盛土斜面の概要を図-12に示す。アクリル製土槽に高さ 550mm、斜面勾配 1 : 1.8、乾燥密

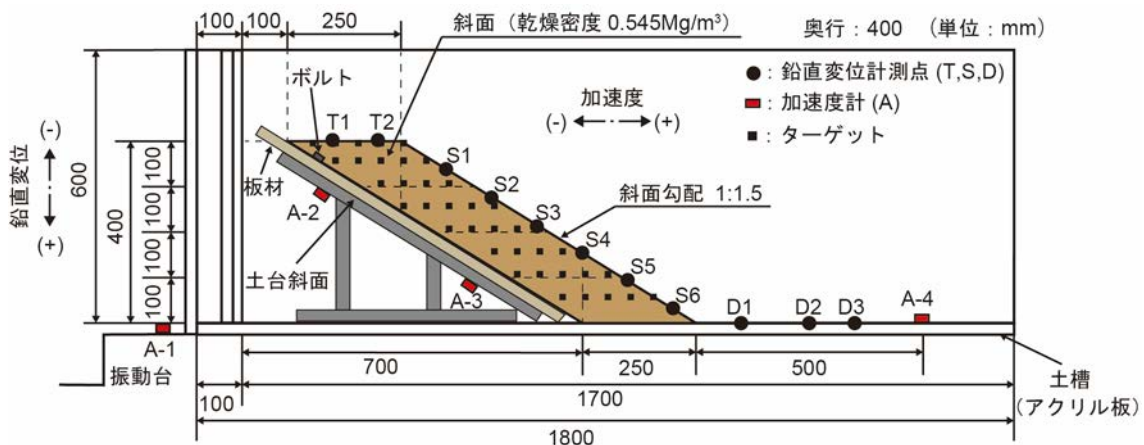


図-6 模型盛土斜面の概要図 (CASE1)

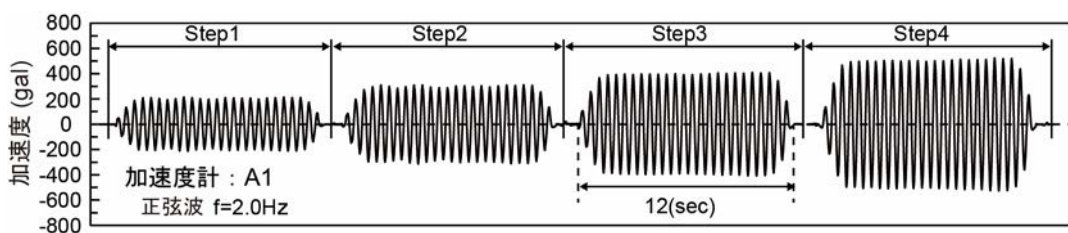


図-7 振動台に取り付けた加速度計 A1 で計測した加速度振幅 (CASE1)

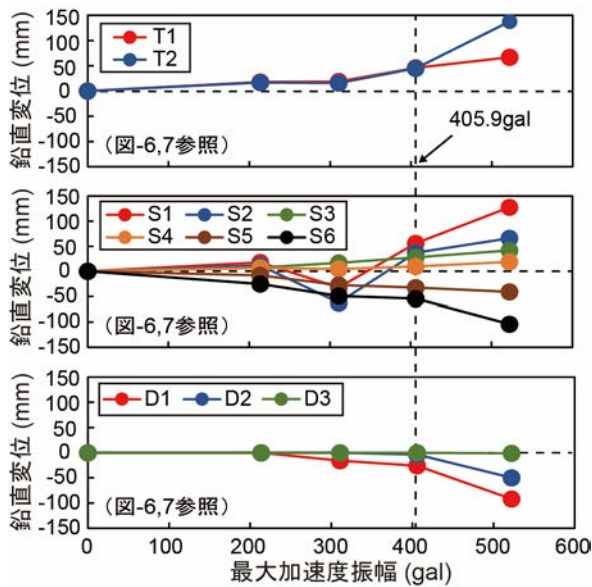


図-8 各加振段階終了時における鉛直変位 (CASE1)



図-9 Step3・405.9gal 終了時の様子 (CASE1)



(a) 粒度試験用試料の採取位置



(b) 採取の様子 (すべり面) (c) 採取の様子 (崩壊土砂)

図-10 試料の採取位置および採取の様子 (CASE1)

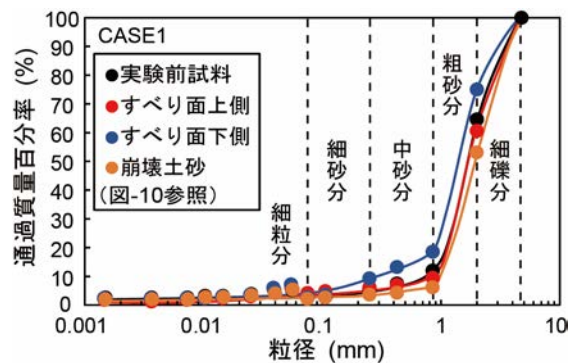


図-11 実験後試料の粒径加積曲線 (CASE1)

表-5 CASE1の実験後試料による粒度試験結果

試料名	赤玉土			
	実験前	すべり面上側	すべり面下側	崩壊土砂
CASE1				
細礫分 (%)	35.4	39.4	24.9	46.9
粗砂分 (%)	52.6	51.2	56.5	47.0
中砂分 (%)	6.6	3.3	9.2	2.6
細砂分 (%)	2.8	1.9	6.6	1.5
シルト分 (%)	0.0	2.5	0.3	0.1
粘土分 (%)	2.6	1.8	2.4	2.0
最大粒径 (mm)	4.75	4.75	4.75	4.75
均等係数 U_c	2.92	2.22	5.67	2.20
曲率係数 U'_c	1.37	1.01	2.82	1.02
細粒分含有率 F_{cf} (%)	3	4	4	3
細粒分増加量 ΔF_c (%)	0	1	1	0

度 0.545Mg/m^3 として、自然含水比 48% の試料を用いて層厚 50mm ごとに締固めることで模型盛土斜面を構築した。計測器 (加速度計・土壌水分計) の配置は図-12 の通りであり、奥行方向中央部に設置した。加速度応答、飽和度の他、鉛直変位の計測、側面に 50mm 間隔で格子状に配置したターゲットで模型盛土斜面の変形を観察した。

なお、アクリル製土槽の側面にグリスを塗布することでアクリル面とターゲットの間に摩擦が生じないようにした。加振は周波数 2.0Hz の正弦波を Step1 から Step8 の 8 段階に分け、各加振段階ごとに加速度振幅を増加させることで行った。なお、各加振段階の加振時間は 12 秒間としている。CASE2 において与えた加速度波形として、

振動台に直接取り付けられた加速度計 A1 で計測した加速度振幅を図-13 に示す。最初の加振では、最大加速度振幅（斜面解放側に慣性力が作用する方向、すなわち図-12 に示す「+」側の加速度成分を示す）を 100gal 程度とし、模型盛土斜面が崩壊に至るまで最大加速度振幅を 100gal 程度ごとに増加させた。各加振段階において、加速度計 A1 で計測された最大加速度は Step1・107.8gal, Step2・234.7gal, Step3・361.5gal, Step4・458.8gal, Step5・579.3gal, Step6・699.8gal, Step7・803.4gal, Step8・894.3gal であった。

b) 背面加水による加振直前の飽和度分布

背面加水は、アクリル製土槽左端に設けた浸透槽において、模型盛土斜面の下端から水位を徐々に増加させることで行った。浸透槽から模型盛土斜面への加水は、表面を不織布で覆ったパンチングメタルを介して行われ、右端に設けた不織布で覆った有孔板から排水する構造となっている。ここで、パンチングメタルおよび有孔板は加振により振動することはなく、変位境界条件（固定境界）を確保することができる。流水による粒子破碎および細粒分の流出を防ぐため、初期流量を抑えて加水を開始し、徐々に加水流量を増加させた。加水終了時の流量はおおよそ $5.8 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ であった。加水終了後、盛土内の水分状態を安定させるため 2 時間程度静置した。加振直前の模型盛土斜面の飽和度分布を図-14 に示す

c) 模型盛土斜面の崩壊挙動

各加振段階終了時に計測した模型盛土斜面の鉛直変位

を図-15 に示す。ここで、鉛直変位は沈下を正としている。Step3・361.5gal で図-14 において比較的飽和度が低い のり肩および斜面部分で崩壊が生じ、加速度振幅の増加に伴い崩壊が進行した。加振後の模型盛土斜面の一例として、Step6・699.8gal 終了時の様子を図-16 に示す。加振により斜面上部の低飽和度部分で崩壊が生じ、斜面のり先部分に崩壊した土砂が堆積している様子が観察できる。これは図-15 の Step6・699.8gal 終了時の鉛直変位からも同様に見て取れる。

d) 実験後試料の粒度試験による粒子破碎挙動の把握

実験後の試料を用いて粒度試験を実施するため、崩壊後の模型盛土斜面から試料を採取した。試料の採取位置および採取の様子を図-17 に示す。試料採取において、粒子破碎により生じた細粒分を採り逃さぬよう、塵取りや刷けを用いて慎重に採取した。採取した試料を用いて実施した粒度試験の結果を表-6 に、粒度試験より得られた粒径加積曲線を図-18 に示す。実験前の粒度分布と比較して、すべり面下側で粒子破碎による粒度分布の変化が大きく、粗砂分が減少し中砂分および細砂分が増加した。すべり面上側においても同様の傾向を示したが、すべり面下側と比較して粒度分布の変化は小さかった。崩壊土砂ではすべり面における粒子破碎挙動と異なり、細礫分が減少し粗砂分が増加した。これは、各加振段階終了時に崩壊土砂の除去を行わなかったため、その後の加振による攪乱を受けて割裂するように破碎したものと考

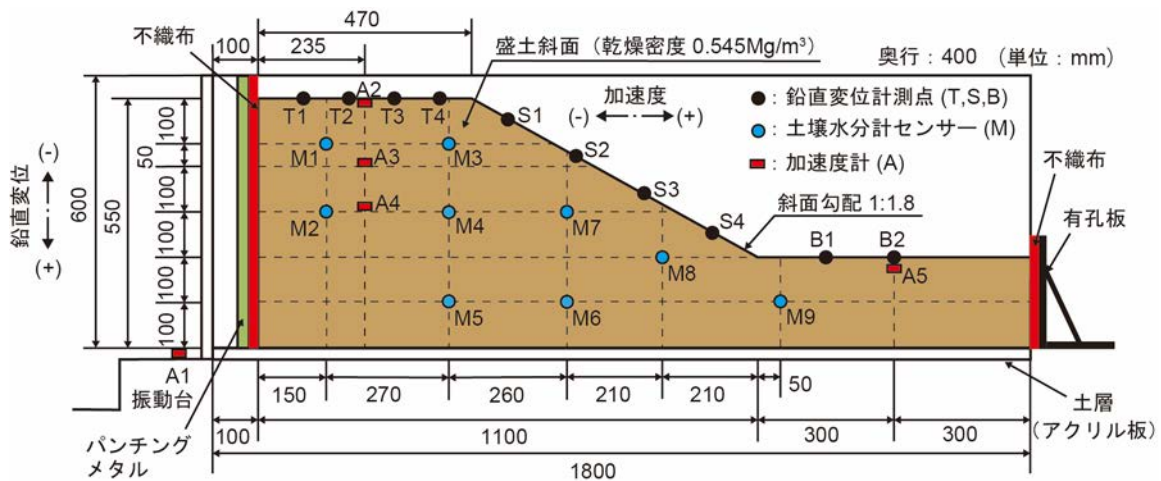


図-12 模型盛土斜面の概要図 (CASE2)

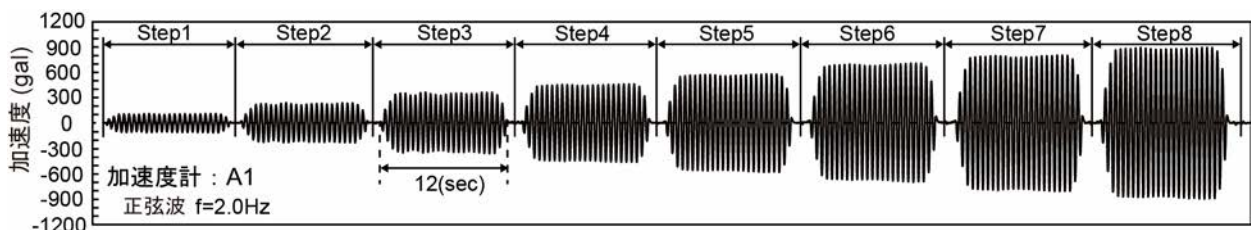


図-13 振動台に取り付けた加速度計 A1 の加速度応答 (CASE2)

える。また、基盤部分で粒度分布に大きな変化は見られず、目立った粒子破碎は生じなかった。粒度分布の変化が大きかったすべり面下側において、細粒分増加量は7%と他の採取試料と比較して細粒分の増加が大きかった。

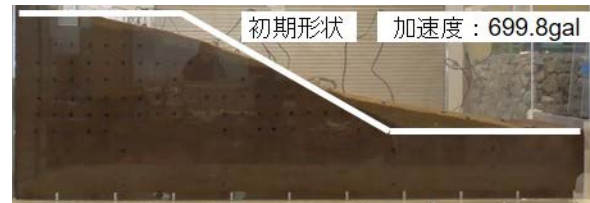


図-16 Step6・699.8gal 終了時の様子 (CASE2)

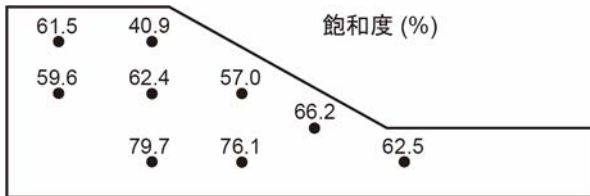
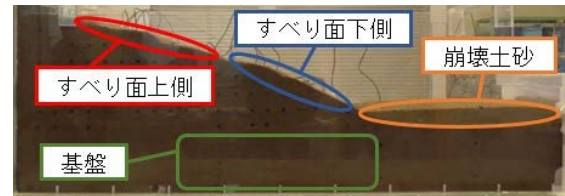


図-14 加振直前の飽和度分布



(a) 粒度試験用試料の採取位置



(b) 採取の様子 (すべり面)

図-17 試料の採取位置および採取の様子 (CASE2)

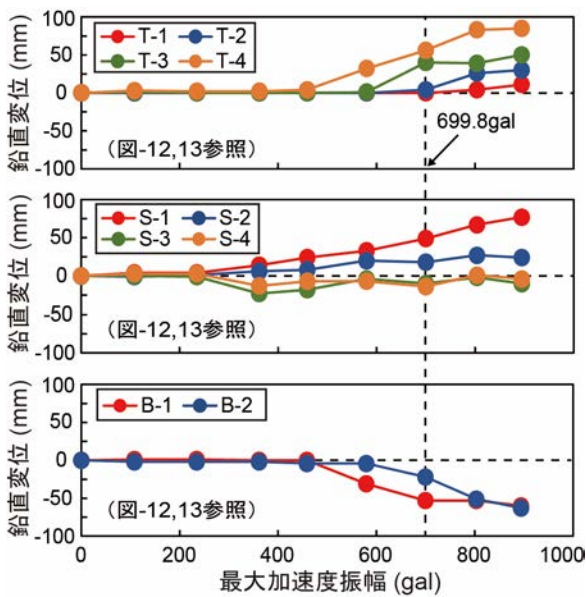


図-15 各加振段階終了時における鉛直変位 (CASE2)

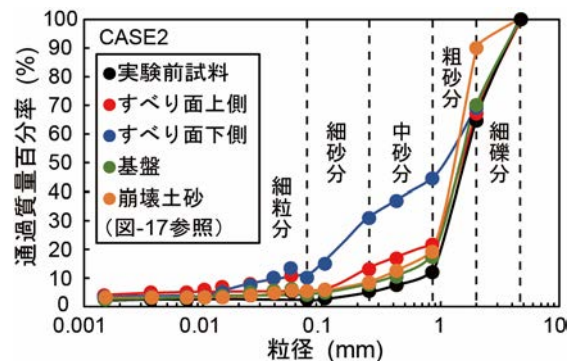


図-18 実験後試料の粒度加積曲線 (CASE2)

表-6 CASE2の実験後試料による粒度試験結果

試料名	赤玉土				
	実験前	すべり面上側	すべり面下側	基盤	崩壊土砂
CASE1					
細礫分 (%)	35.4	32.8	30.9	29.9	10.0
粗砂分 (%)	52.6	45.5	24.7	52.8	70.9
中砂分 (%)	6.6	8.6	13.6	9.6	10.7
細砂分 (%)	2.8	8.0	20.8	3.5	3.0
シルト分 (%)	0.0	0.1	6.7	1.1	2.3
粘土分 (%)	2.6	4.9	3.3	3.1	3.1
最大粒径 (mm)	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75
均等係数 U_c	2.92	10.00	22.86	4.38	4.84
曲率係数 U'_c	1.37	4.08	0.56	2.06	2.60
細粒分含有率 F_{cf} (%)	3	6	10	4	5
細粒分増加量 ΔF_c (%)	0	3	7	1	2

4. 要素力学試験および模型盛土斜面の崩壊実験における粒子破碎挙動の比較

本研究において、要素力学試験および模型盛土斜面の崩壊実験により明らかにした破碎性材料である赤玉土の粒子破碎挙動を、各種粒径区分（ここでは粗砂分、中砂分、細砂分および細粒分とする）の増加倍率を示すことで定性的に比較した。2.の(2)で明らかにした、要素力学試験による粒子破碎挙動から、せん断過程における各種粒径区分の圧密後試料に対する増加倍率を図-19に示す。ここで、増加倍率は排水単調せん断を受けた試験ケースの砂分の各種粒径区分および細粒分の含有率を初期有効主応力と同一な圧密応力条件下で等方圧密のみを実施した試験ケースの各含有率で除すことにより算出した。また、3.の(1)および(2)で明らかにした、模型盛土斜面の崩壊実験による粒子破碎挙動から、崩壊時にせん断力を受けたことが想定される崩壊後のすべり面における各種粒径区分の圧密後試料に対する増加倍率を図-20に示す。ここで、増加倍率は崩壊後試料の砂分の各種粒径区分および細粒分の含有率を実験前試料の各含有率で除すことにより算出した。

要素力学試験におけるせん断過程において、粗砂分は減少し、中砂分、細砂分および細粒分は増加した。全試験ケースにおいて細砂分の増加倍率が高い傾向を示し、特に、圧密応力が比較的小さく、等方圧密による粒子破碎の影響が小さかった試験ケース ($\sigma_c=30\text{kN/m}^2$) において細砂分の増加倍率は2.19倍と最も高く、せん断過程における粒子破碎の影響が大きい結果を示した。また、崩壊後すべり面において、CASE1、CASE2ともに中砂分、細砂分および細粒分は増加し、CASE2では粗砂分が減少する結果を示した。模型盛土斜面の崩壊実験で最も粒子破碎が顕著であったCASE2において、すべり面下側から採取された試料で細砂分の増加倍率が7.4倍、細粒分の増加倍率が3.3倍と高い結果を示した。以上より、要素力学試験（せん断過程）および模型盛土斜面の崩壊実験（すべり面）における粒子破碎挙動は、中砂分、細砂分および細粒分が増加し、特に、細砂分の増加が顕著であるという点で同様の傾向を示した。

5. 結論

本研究では、火山灰質粗粒土であり、外力により容易に粒子破碎を生じる赤玉土を対象に、圧密・排水単調せん断試験および振動台を用いた模型盛土斜面の崩壊実験を実施することで、単調せん断履歴を受けた火山灰質粗粒土の粒子破碎挙動を把握し、また、加振による模型盛土斜面の崩壊挙動を観察し、崩壊による粒子破碎挙動を

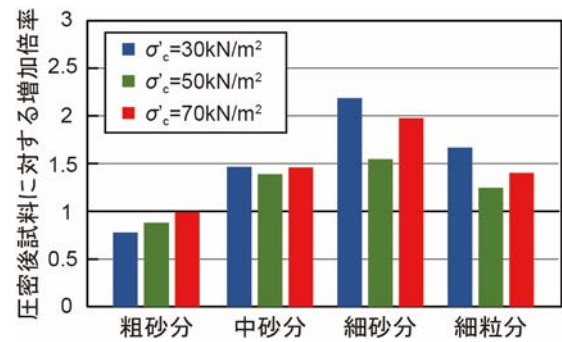


図-19 せん断過程の各種粒径区分の増加倍率

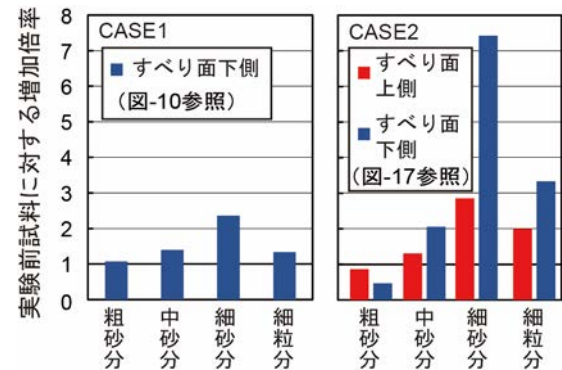


図-20 崩壊後すべり面の各種粒径区分の増加倍率

把握した。その後、要素力学試験におけるせん断過程および模型盛土斜面の崩壊実験においてせん断力を受けたと考えられる崩壊箇所の粒子破碎挙動を定性的に比較した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 圧密・排水単調せん断試験後の試料を用いた粒度試験を実施し、単調せん断履歴による粒子破碎挙動を把握した。その結果、初期有効主応力が大きいほど、粒子破碎の影響が大きくなり、特に砂分において粒度分布の変化が大きくなる。粒子破碎により粗砂分は減少し、中砂分および細砂分は増加した。また、細粒分増加量において、初期有効主応力の増加にともない増加傾向を示したが、初期有効主応力 70kN/m^2 の試験ケースで4.0%と、顕著な増加は見られなかった。
- (2) 等方圧密試験後の試料を用いた粒度試験を実施した。その結果、等方圧密によって粒子破碎が生じ、圧密応力が大きいほど、粒子破碎の影響が大きくなる。しかし、全試験ケースにおいて、単調せん断履歴を受けた試料と比較して、粒子破碎による粒度分布の変化は小さい。
- (3) 斜面のみを構築し、崩壊させた実験 CASE1 の結果から、Step1・213.5gal でのり肩が崩壊し、Step3・405.9gal で明確にすべり面が現れた。崩壊後の模型盛土斜面から採取した試料を用いた粒度試験結果から、すべり面上側および崩壊土砂において粒子

破碎は生じず、すべり面下側で粒子破碎が生じ、中砂分および細砂分が増加した。細粒分増加量はすべり面下側で 1.0%と目立った増加は示さなかった。

- (4) 天端や基盤を含む盛土斜面を構築し、背面加水を行った後、崩壊させた実験 CASE2 の結果から、Step3・361.5gal で比較的飽和度が低い肩および斜面部分で崩壊が生じ、加速度振幅の増加に伴い崩壊が進行した。崩壊後の模型盛土斜面から採取した試料を用いた粒度試験結果から、すべり面下側で粒子破碎による粒度分布の変化が大きく、粗砂分が減少し中砂分および細砂分が増加した。細粒分増加量は 7%と他の採取試料と比較して細粒分の増加が大きかった。
- (5) 要素力学試験（せん断過程）および模型盛土斜面の崩壊実験（すべり面）における各種粒径区分の増加倍率から、中砂分、細砂分および細粒分が増加し、特に、細砂分の増加が顕著であるという点で同様の傾向を示した。

謝辞：本研究は、科研費 19H00780（代表：菊本 統）および科研費 21H01423（代表：海野 寿康）の支援を

受けて実施いたしました。

REFERENCES

- 1) 2008年岩手・宮城内陸地震災害調査委員会：平成20年（2008）岩手・宮城内陸地震災害調査報告書，pp. 60-107, 2010. 6.
- 2) 平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団：平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団最終報告書，pp. 119-147, 2019. 8.
- 3) 八木一善，三浦清一：破碎性火山灰地盤の力学特性の評価，土木学会論文集，No.757, III-66, pp. 221-234, 2004. 3.
- 4) 三浦清一，八木一善：火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価，土木学会論文集，No.561, III-38, pp. 257-269, 1997. 3.
- 5) 堀田大介，三浦清一：種々の応力条件下における破碎性粒状体の力学特性，土木学会論文集 C，Vol 62, No. 1, pp. 157-168, 2006. 3.
- 6) 佐藤 完，北島弘子，高橋美紀，松島亘志：回転せん断による砂礫粒子の破碎特性評価，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol. 73, No. 2, pp.517-526, 2017.
- 7) 春山元寿，地頭園隆：シラスの物理的性質の試験法，昭和58年度土木学会西部支部研究発表会，III-2, pp. 278-279, 1984.
- 8) 荒巻憲隆，清松潤一，岡林 巧，藤井治雄：火山灰質粗粒土の物理試験測定値のばらつきに及ぼす影響因子の検討，地盤工学ジャーナル，Vol 9, No. 3, pp. 359-373. 2014. 7.

PARTICLE BREAKAGE BEHAVIOR OF VOLCANIC SOIL DURING SHAKING DISTURBANCE IN THA MODEL EMBANKMENT

Ryu YOSHIWARA, Toshiyasu UNNO, Takaki MATSUMARU, and Noriaki SENTO

In this study, the particle breakage behavior of a volcanic ash coarse-grained soil, which is easily broken by external forces, was determined by elemental mechanical tests (consolidation, drainage torsional shear test, and isotropic consolidation test) and a model embankment shaking disturbance test using a shaking table, in order to understand the particle breakage behavior by drainage torsional shear and isotropic consolidation and by the collapse of the model embankment by particle size tests. The results of various grain-size tests showed that the increase factors of the content of various grain-size fractions in the drainage torsional shear process and the slip surface of the model embankment after collapse in the elemental mechanical tests were qualitatively compared, and it was found that the increase factors of the content of various grain-size fractions in the drainage torsional shear process and the slip surface of the model embankment after collapse were large for medium sand fraction, fine sand fraction and fine grain fraction, especially the fine sand fraction showed high increase factors, showing the same tendency.