

新燃岳火山噴出流下土砂の三軸せん断特性

岡林 巧¹⁾・田中龍児¹⁾・徳山ミヨーキン¹⁾・本田泰寛¹⁾・羽野 暁¹⁾

¹⁾第一工業大学 工学部自然環境工学科 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)
E-mail:t-okabayashi@daiichi-koudai.ac.jp, r-tanaka@daiichi-koudai.ac.jp, m-khin@daiichi-koudai.ac.jp,
y-honda@daiichi-koudai.ac.jp, s-hano@daiichi-koudai.ac.jp

TRIAXIAL COMPRESSION SHEAR CHARACTERISTICS OF VOLCANIC ASH

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Daiichi Univ. Institute of Technology
(Kokubu-Chuo 1-10-2, Kirishima-shi, Kagoshima-ken 899-4395, Japan)
Takumi OKABAYASHI¹⁾, Ryouji TANAKA¹⁾, Myokin TOKUYAMA¹⁾,
Yasuhiro HONDA¹⁾, Satoshi HANO¹⁾

Mt. Shinmoedake resumed eruptive activity on January 26, 2011. Flumes have reached the altitude of 3000m in magma eruption in 189 years in 1822 since this eruption. Alert level pull up to 3 from level 2 around the crater, the Japan Meteorological Agency was prohibited incursion within 2km radius. In May 2014, current eruption forecast level becomes 2, under the worrisome crater debris flow regulation for the volcanic ash. This study is carried out by investigating the soil mechanics properties of volcanic ash with triaxial compression shear test of Mt. Shinmoedake volcanic ash and reported.

Key Words : *Shinmoedake ash, Triaxial test, Eruptive activity, Magma eruption, Crater*

1. はじめに

新燃岳は、霧島火山の中央部に位置する標高1,421mの成層火山で御鉢火山とともに多くの噴火記録を持つ活火山である¹⁾。同火山は、2010年3月以降小規模な噴火がたびたび確認されており、2011年1月27日には189年ぶりとなる爆発的噴火が発生し、人々の生活に甚大な影響を与え大きな社会問題となっている²⁾。また、降雨時には表層崩壊により発生した土砂の一部が流動化し、土石流となることも危惧されている³⁾。これらの事態を受け、各所の安全性を確保すべく国土交通省は、砂防堰堤の新設の対策を現在施行している^{4)、9)}。これにともない現時点では、表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価において、流下土砂のせん断強度定数が必要とされている。

本研究は、三軸圧縮試験装置を用いて圧密非排水せん断試験⁵⁾を行うことにより、新燃岳土石流の起因河川に流出堆積した新燃岳火山噴出流下土砂の非排水三軸せん断強度特性を究明するものである。

山噴出流下土砂を用いた。表-2.1は、新燃岳火山噴出流下土砂・豊浦砂の主要な物理的性質を示したものである。比重 G_s は両者ほぼ同程度であるが、最大・最小間隙比 e_{max} ・ e_{min} は新燃岳火山噴出流下土砂の方がやや小さい値を示す。図-2.1は、新燃岳火山噴出流下土砂の試料分析状況を示す。

表-2.1 試料の主要な物理的性質

	G_s	e_{max}	e_{min}
新燃岳噴出土砂	2.610	0.692	0.528
豊浦砂	2.634	0.951	0.603

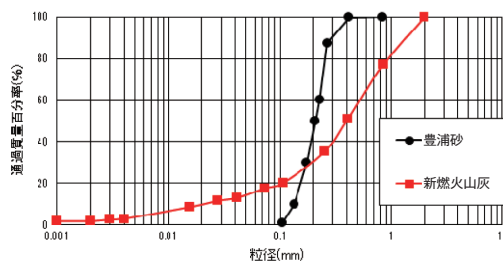


図-2.1 新燃岳火山噴出流下土砂と豊浦砂の粒径加積曲線

2. 試験概要

2.1 試料

使用試料は、にしろかたぐんたかはるちょう宮崎県西諸県郡高原町宮崎川河川で採取した粒径2mm以下の新燃岳火

山噴出流下土砂と豊浦砂の粒径加積曲線を示したものが図-2.1である。同図から分かるように新燃岳火山噴出流下土砂は、

豊浦砂に比較して極めて「粒度分布が良い」粒度分布特性を示していると言える。また、この粒度分布から新燃岳火山噴出流下土砂は、豊浦砂に比較してポーラスな火山性鉱物構造を持つ鉱物特性を有することからも、完全飽和状態にすることが非常に困難なことを予測させるものである。

図-2.1の新燃岳火山噴出流下土砂と豊浦砂の粒径加積曲線から、均等係数 U_c と曲率係数 U_c' を求める。加積通過率が10%, 30%, 60%

に対応する粒径を、それぞれ D_{10}, D_{30}, D_{60} として、次のように定義する。

$$\text{均等係数: } U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{曲率係数: } U_c' = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} \quad \text{----- (2)}$$

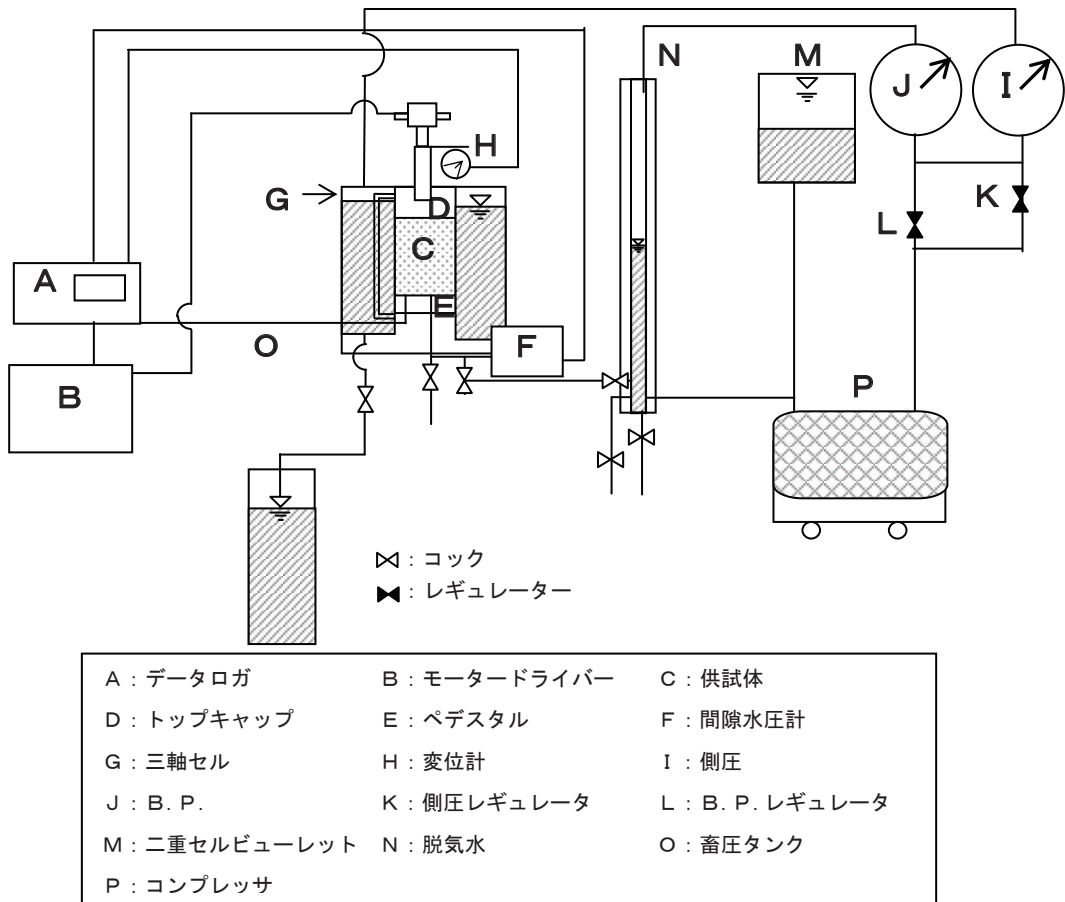


図-2.2 三軸圧縮せん断試験装置 (概要)

均等係数は粒径加積曲線の傾きを大まかに表すもので、均等係数が1に近い場合は、 D_{60} と D_{10} との差が非常に小さく、粒径加積曲線が直立することを表す。したがって、均等係数が大きくなるほど、粒度分布が広がる事を意味する。曲率係数は階段状の粒径加積曲線を持った土に対して、均等係数だけでは誤った判断をする場合があるので、これを補足するために用いられる³⁾。

粒度の良否判定の基準³⁾は、次のようになっている。

$U_c \geq 10, 1 \leq U_c' < \sqrt{U_c}$: 「粒度が良い」
上記の条件を満たさない場合: 「粒度が悪い」

また、「粒度が悪い」と判断された土は、次のいずれかに当たる。

$U_c < 10$: 「均等粒度」

$U_c \geq 10, U_c' \leq 1$ または $U_c' > \sqrt{U_c}$: 「階段粒度」

表-2.2 新燃岳火山噴出流下土砂と豊浦砂の均等係数等

	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	U _c	U _c '
新燃火山灰	0.021	0.19	0.51	24.286	3.371
豊浦砂	0.135	0.177	0.23	1.704	1.009

表-2.2は、新燃岳火山噴出流下土砂と豊浦砂の均等係数及び曲率係数を求めたものである。新燃岳火山噴出流下土砂は、前記の判定基準の「粒度が良い」条件を満たしている。一方、豊浦砂は「粒度が良い」条件を満たさず、U_c<10の評価値を示しているため、「均等粒度」であることが分かる。因みに、新燃岳火山噴出流下土砂由来の河川とは「宮崎県西諸県郡高原町宮崎川」であることをここに明記する。

2.2 試験装置

図-2.2は本試験で使用した三軸せん断装置を示したものである。本装置の特徴は、拘束圧を自由に設定でき、三軸圧縮試験を行うことが可能な点である。ここでは各部の名称を同図下段に表記した。

2.3 試験条件

本研究では、新燃岳火山噴出流下土砂の非排水三軸圧縮せん断挙動を明らかにするため、相対密度・拘束圧を種々に変化させ試験を行った。

表-2.3と表-2.4はそれぞれ初期相対密度 Dr を30%・90%、拘束圧 P_c を50kPa・100kPa に定めて試験を行った際の条件である。初期相対密度を2種類に分けた理由は、新燃岳火山噴出流下土砂の「ゆる詰め」状態(Dr=30%)・「密詰め」状態(Dr=90%)での三軸圧縮せん断特性を比較検討するためである。

拘束圧 P_c を50kPa・100kPa とした理由としては、実際に土石流や液状化が発生する地盤の深さを考慮し、試験条件としたためである。なお、表中において、D_r は初期相対密度を、P_c は平均有効主応力を示している。

表-2.3 D_r=30%

試験 No.	D _r (%)	P _c (kPa)	Mode
C001-30	30	50	Compression
C002-30	30	100	Compression

表-2.4 D_r=90%

試験 No.	D _r (%)	P _c (kPa)	Mode
C003-90	90	50	Compression
C004-90	90	100	Compression

2.4 試験方法

本研究では、非排水三軸圧縮せん断試験を行い新燃岳火山噴出流下土砂の三軸圧縮せん断特性を明らかにする。図-2.3に、非排水三軸圧縮せん断試験のフローチャートを示す。

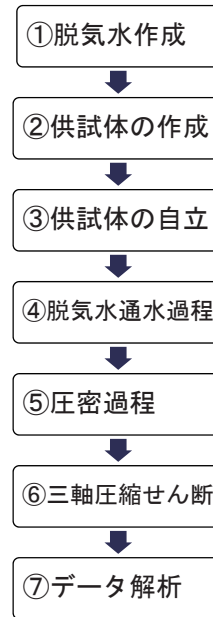


図-2.3 非排水三軸圧縮せん断試験のフローチャート

3. 三軸せん断特性

新燃岳火山噴出流下土砂が三軸圧縮非排水せん断挙動に与える相対密度と初期有効拘束圧の影響を調べるために行った三軸圧縮非排水せん断試験の結果を、①軸差応力・軸ひずみ関係、②間隙水圧・軸ひずみ関係、③有効応力径路、④せん断強度定数の4項目に分類して考察する。

3.1 各式の定義

(1) 軸ひずみ

今回の試験では供試体に生じるひずみが比較的大きいため、対数軸ひずみ ε₁を用いる事とした。軸ひずみを求める式は、以下の通りである。

$$\epsilon_1 = -\ln\left(\frac{H_c - \Delta H}{H_c}\right) \times 100 \text{ (\%)} \text{ ---- (3)}$$

ここに、ΔH：供試体の軸変位量 (cm)
H_c：圧密後の供試体高さ (cm)

(2) 平均有効主応力 p、主応力差 q

平均有効主応力主応力差は次式で定義される⁵⁾。また、用いた応力は全て有効応力である。

$$p = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} \text{ ---- (4)}$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ ---- (5)}$$

ここに σ₁：最大主応力 (kPa)
σ₃：最小主応力 (kPa)

3.2 軸差応力・軸ひずみ関係

図-3.1は、相対密度 $Dr=30\%$ の新燃岳火山噴出流下土砂の拘束圧 $P_c=50\text{kPa}$ 、 100kPa における軸差応力・軸ひずみ関係を示したものである。図から分かるように圧縮領域における軸差応力・軸ひずみ関係の、初期拘束圧の大きな軸差応力は、初期のせん断時に強いひずみ硬化挙動を示し、その後弱いひずみ軟化挙動に移行する傾向を示している。

相対密度 $Dr=90\%$ の新燃岳火山噴出流出土砂の軸差応力・軸ひずみ関係を示したものが図-3.2である。図から明らかなように、軸差応力は、ゆる詰め状態に比較してどの拘束圧とも同程度の大きな軸差応力値を示しつつせん断初期で強い硬化挙動を示した後、弱いひずみ硬化挙動に移行して定常化する傾向を示している。

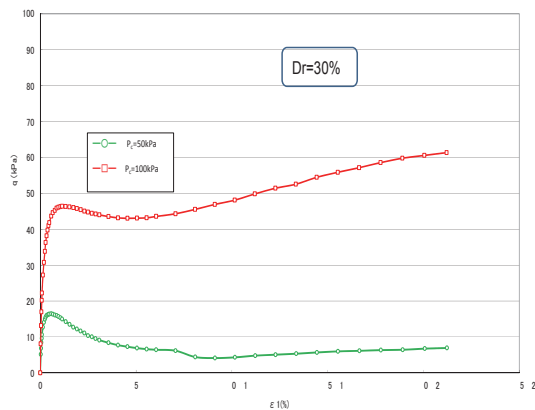


図-3.1 軸差応力・軸ひずみ関係 (Dr=30%)

相対密度 $Dr=90\%$ の新燃岳火山噴出流下土砂の間隙水圧・軸ひずみ関係を示したものが図-3.4である。図から明らかなように、密詰試料の間隙水圧は、ゆる詰め状態の場合とほぼ同一値を示している。特にピーク値に達した後は、著しく低減する特異な挙動を示すことが分かる。この主要原因として、せん断にともなって土粒子の回転によるダイレイタンスー効果が $Dr=30\%$ と $Dr=90\%$ では、土粒子の振舞に明らかな差が生じていることを意味している。すなわち、 $Dr=90\%$ での土粒子は、土粒子間が密である理由からせん断に伴い、 $Dr=30\%$ に比較して粒子の回転挙動が卓越し、結果として土粒子間の間隙水圧が負に移行するものと考えられる。

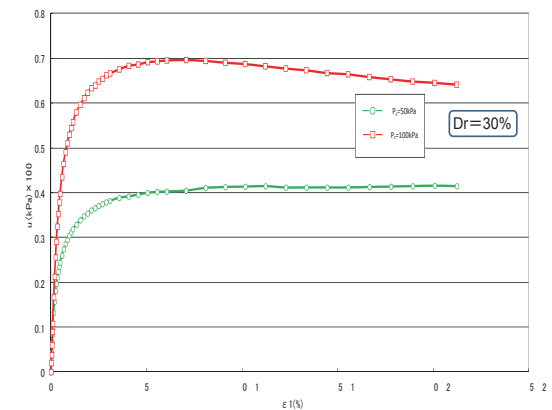


図-3.3 間隙水圧・軸ひずみ関係 (Dr=30%)

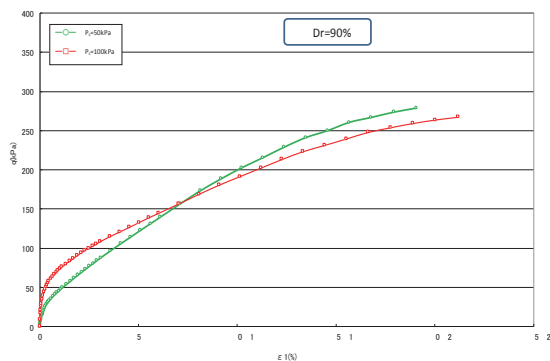


図-3.2 軸差応力・軸ひずみ関係 (Dr=90%)

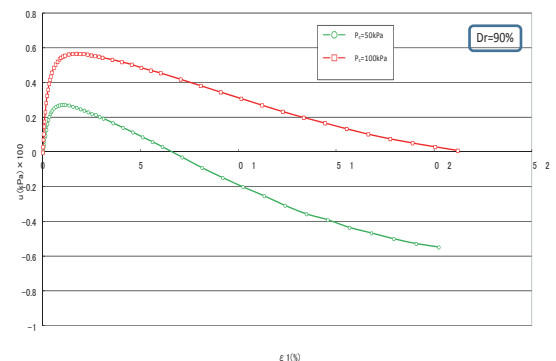


図-3.4 間隙水圧・軸ひずみ関係 (Dr=90%)

3.3 間隙水圧・軸ひずみ関係

図-3.3は、相対密度 $Dr=30\%$ の新燃岳火山噴出流下土砂の間隙水圧・軸ひずみ関係を示したものである。図から明らかなように、間隙水圧は、拘束圧の大きな条件ほど高いピーク値を示す傾向が認められる。また、せん断にともなう軸ひずみの増加とともに間隙水圧は、拘束圧の高い条件ほど徐々に低減する挙動を示すことが分かる。

3.4 有効応力径路

図-3.5は、相対密度 ($Dr=30\%$) の新燃岳火山噴出流下土砂の有効応力径路を示したものである。図から明らかなように相対密度の小さな条件での有効応力径路は、どの拘束圧条件でもせん断初期で収縮性の挙動を示す傾向が認められ、変相点に達した後に弱い膨張性

の挙動に移行し、定常状態に達するものと考えられる。

$$\eta_{fc} = \frac{6 \sin \phi_{fc}}{3 - \sin \phi_{fc}} \quad \text{----- (6) } ^5$$

表-3.1 せん断強度定数⁵⁾

Dr = 30 (%)		
拘束圧	圧縮	
Pc	η_{fc}	ϕ_{fc}
50 (kPa)	1.452	35°
100 (kPa)	1.466	36°
Dr = 90 (%)		
拘束圧	圧縮	
Pc	η_{fc}	ϕ_{fc}
50 (kPa)	1.429	35°
100 (kPa)	1.422	35°

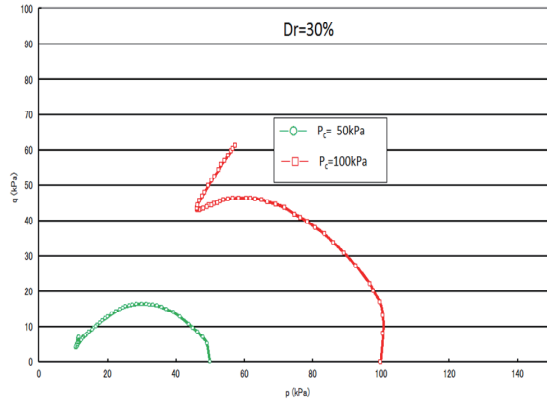


図-3.5 有効応力径路 (Dr=30%)

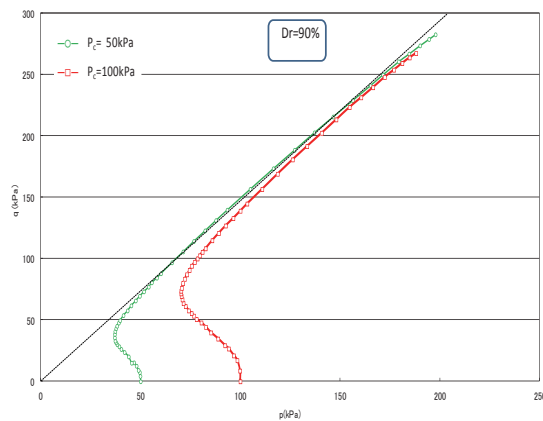


図-3.6 有効応力径路 (Dr=90%)

図-3.6は、相対密度 Dr=90%での拘束圧の対密度違いによる有効応力径路を示したものである。図から相対密度が大きな条件での有効応力径路は、せん断初期で相対密度の小さなDr=30%と比較して、より小さな収縮性の挙動を示すことが分かる。また、変相点に達した後相対密度の小さなDr=30%と比較して、より大きな膨張性の挙動に移行し、図示のように静的破壊線に沿った挙動を呈して定常状態に達する傾向にあることが確認できる。

3.5 せん断強度定数

本研究では、有効応力径路と軸差応力・平均有効主応力の相関において有効応力比が最大となる時点破壊と定義し、その時点の有効応力比を破壊応力比 η_{fc} と定義した場合の内部摩擦角 ϕ_{fc} について示す。ここで、破壊時の内部摩擦角 ϕ_{fc} は次式⁵⁾から逆算した。これらのことから、新燃岳火山噴出物流下土砂のせん断強度定数は、表-3.1に示すように粘着力 C=0 (kPa), 平均内部摩擦角 $\phi_{fc}=35^\circ$ 程度と判断される。

4. 結論

本論文は、鹿児島県と隣県の宮崎県に位置し、今なお活発な火山活動を持続し、火山噴出流下土砂による土石流災害が危惧されている新燃岳火山噴出流下土砂が、非排水三軸せん断挙動に及ぼす影響について調べた。研究結果の結論を以下にまとめた。

- (1) 軸差応力・軸ひずみ関係は、相対密度の違いによらず、初期のせん断時に強いひずみ硬化挙動を示し、その後の軸ひずみの増加とともに定常状態に達する。
- (2) 間隙水圧・軸ひずみ関係は、相対密度の違いによらず、ピーク値に達した後せん断に伴い低減傾向の挙動を呈する。
- (3) 有効応力径路は、相対密度の違いによらず、変相点に達するまで収縮性の挙動を示し、静的破壊線と原点を通る直線に沿った膨張性の挙動を示して定常状態に至る。
- (4) 新燃岳火山噴出物流下土砂の粘着力 C=0 (kPa), 平均内部摩擦角 $\phi_{fc}=35^\circ$ 程度と判断される。

参考文献

- 1) 広報きりしま：霧島山の新燃岳, 189年ぶりに大噴火号外 pp. 1-7, 2011.
- 2) 井村隆介・小林哲夫：霧島火山群新燃岳の最近300年間の噴火活動火山, 第36巻第2号, pp. 135-148, 1991.
- 3) 国土交通省河川局砂防部：霧島山(新燃岳)噴火に伴う緊急的土石流対策工事の完了について, pp. 1-4, 2011.
- 4) 土木研究所資料：表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル(案), ISSN 0386-5878, 土木研究所資料第4129号, pp. 1-34, 2009.
- 5) 岡林巧・兵動正幸・安福規之・村田秀一：乱した一次しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動, 土木学会論文集 No. 499/III-28, pp. 97-106, 1994. 9.
- 6) 中野坦・小山明・杉山武司：新版土質工学, pp. 9-18, 1987.
- 7) 鹿島出版社：土質実験法, 高専土質実験教育研究会編(改訂版), pp. 41, 2004.
- 8) 岡林巧：しらす地盤の不飽和浸透特性と非排水せん断挙動に関する研究(学位論文), pp. 62, 1999.
- 9) 鹿児島県：新燃岳噴火に係る当面の災害復旧・防止対策及び各種支援策, pp. 1-6