

平成30年北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊の特徴と地盤工学的考察

その他（別言語等）のタイトル	Slope failures over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and its evaluation
著者	川村 志麻, 岸田 航平
雑誌名	室蘭工業大学紀要
巻	69
ページ	13-19
発行年	2020-03-19
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010180

平成 30 年北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊の特徴と 地盤工学的考察

川村 志麻*¹, 岸田 航平*²

(原稿受付日 令和元年 10 月 31 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

Slope failures over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and its evaluation

Shima KAWAMURA and Kohei KISHIDA

(Received 31th October 2019, Accepted 20th February 2020)

Abstract

The 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake caused a large amount of slope failures over a wide area. In particular, the enormous damage due to slope failures was centered in Atsuma and Abira town which are to the north of the epicenter. In Atsuma town, a seismic intensity of seven has been observed for the first time in Hokkaido, Japan. The geology in this region was mainly formed from three kinds of pyroclastic fall deposits (fa) erupted from Tarumae volcano, Eniwa volcano, and Shikotsu Caldera. Especially, the serious damage was generated in these tephra stratus. This report summarizes earthquake-induced damages on natural slopes, and presents physical feature and mechanical properties of the collapsed pyroclastic fall deposits distributed over this area.

Keywords: The 2018 Hokkaido Iburi Eastern Earthquake, slope failure, pyroclastic fall deposits

1 地盤工学会, 土木学会災害調査団による現地災害調査報告について

2018 年 9 月 6 日 3 時 7 分頃、北海道厚真町を震源とする M6.7 の地震が発生し、北海道勇払郡厚真町では震度 7 を観測した。気象庁はこの地震を「平成 30 年北海道胆振東部地震」と命名している。厚真町周辺では、広範な土砂崩壊が同時多発的に発生し、樽前山、恵庭岳、支笏カルデラを噴出源とする「降下軽

*1 もの創造系領域 社会基盤ユニット

*2 北見市 (室蘭工業大学 卒業生)

石火砕堆積物」によって形成された自然斜面がこの大惨事誘発の主要因になった（写真 1 参照）。（公社）地盤工学会と土木学会では災害調査団を立ち上げ、現地の被害状況を調査・報告^{1)~4)}している。ここでは、それを援用し、併せて筆者らの現地視察で得られた知見^{5),6)}に基づいて、斜面災害の概要と日高幌内川の河道閉塞地点周辺の表層すべり崩壊した斜面より採取した降下火砕堆積物の物理・力学特性を報告する。

2. 厚真町周辺の地質特性と被災状況

2.1 厚真町周辺の地質特性

現地調査地点の概略図を図 1 に示す。震源地となった北海道胆振東部地域では、樽前山および恵庭岳と支笏カルデラを噴出源とする火山灰質土が広く分布している。支笏カルデラの降下テフラは約 4 万年前、恵庭岳の降下テフラは約 2 万年前、樽前山の降下テフラは約 300~9000 年前に堆積したとされている⁷⁾。

図 2 は、国土地理院の胆振東部地震による斜面崩壊・堆積分布図⁸⁾に、主に今回の災害の素因となった樽前山および恵庭岳を噴出源とする降下火砕堆積物の降灰範囲と震源からの距離を加筆して示したものである。樽前山を噴出源とする降下火砕堆積物（Ta）は、樽前山より東の方角に降灰の基軸を持ち、Ta-a から Ta-d までの 4 ユニットに分かれている。恵庭岳を噴出源とする降下火砕堆積物（En-a）も同様に東方に基軸を持ち、その降灰範囲は樽前系のものに比べ広い。それらは、いずれも粗粒な軽石により構成されており、乾燥密度は低く、その軽石部には内空空隙が含まれていることが特徴である⁹⁾。また、図より、斜面災害が発生した地域は、両火山灰質土が分布する地域と重なっていることが明らかである。判読の結果、その降灰の厚さはおおそ 50cm~100cm であった。

2.2 調査地点の被災概要

調査地点である日高幌内川流域では、沢地形が連続しており、斜面崩壊が発生しやすい地形であった。また、日高幌内川は谷地形を縫うように流れており、地震によって発生した大規模な岩盤すべりが谷を塞ぎ、河道を閉塞した。写真 2 は、大規模な岩盤すべりが発生した斜面の上空からドローンで撮影したものである。幅が約 400m、比高 50m の尾根が約 500m にわたって移動し、川を約 1100m の長さに亘り、せき止めたと報告されている¹⁰⁾。

写真 3 は、現地調査時点（H30.10.4 時点）での河道閉塞により形成されたダム湖の状況を示したものである。調査時点では 1 日あたりおよそ 50cm/日¹⁰⁾の速さで水位が上昇していた。日高幌内川の大規模な岩盤すべり下部周辺では、泥岩の岩体が散乱していた。岩塊の直径は約 15~25cm ほどで、手やハンマーで砕くことができるほどに崩れやすいものもあった。なお、日高幌内川をせき止めた岩盤すべりは、泥岩層内部にできたすべり面（中新統軽舞層の泥岩シルト岩互層の層理面）において崩壊したと見られ



写真 1 平成 30 年北海道胆振東部地震の厚真町大規模斜面崩壊の様子（北海道大学 清水教授提供）

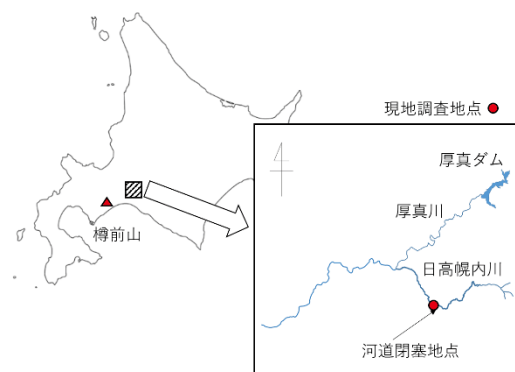


図 1 日高幌内川の位置と現地調査地点

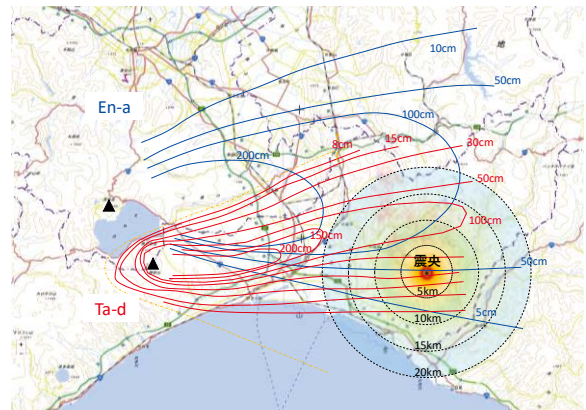


図 2 地理院地図：平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う斜面崩壊・堆積分布図（北海道厚真町周辺）（国土地理院 HP より引用・加筆）

ている。このすべり崩壊の原因として、この箇所は他の地域に比べて震源にも近いこと（5~10km 圏内）から、地震による強振動が影響したものと推測される。

一方、この岩盤すべり崩壊箇所の周辺では、表層すべり崩壊も多数確認されている。写真 4 は、岩盤すべり周辺で発生した表層すべり崩壊地点の様子を示したものである。写真からも明らかなように、この地点では、地表から 3m 程度の土層がすべり、その土塊が流下していた。この斜面は 25~30° の勾配を持ち、すべり面基部の泥岩には湿潤状態の火山灰質土が薄く堆積していた。増井ら¹¹⁾は、この地域の近辺では、粘土鉱物のハロイサイトが生成されていると報告している。

表層すべり崩壊した土塊は、主に、厚真町吉野地区、富里地区の被災現場にて確認された Ta-d と考えられる赤褐色（赤橙色）で粗粒な土粒子から構成されていた。なお、この地域より北側では、恵庭岳と支笏カルデラを噴出源とする降下火砕堆積物である En-a、Spfa-1 がすべりの素因となっている箇所もある。例えば、石丸ら¹²⁾は厚真町周辺の斜面崩壊の状況を説明しており、厚真町幌内地区では岩盤すべり、同朝日地区では Ta-d 層底面すべりと、En-a まじり斜面堆積物表層のすべり、同幌里地区では、沢型緩斜面の土層すべりで高速流動変形が発生したことを報告している。

3. 被災箇所から採取した土質の地盤工学的特徴

ここでは、日高幌内川の河道閉塞地点（岩盤すべり発生地点）周辺部の表層すべり崩壊発生地点で採取した火山灰質土の物理力学特性について報告する^{1)~6)}。

採取箇所は前述の表層すべり崩壊箇所である（写真 5）。試料は、土層を①~⑥に分類し、各層から採取している。図 4 と表 1 は、各試料の粒径加積曲線、示標特性を示したものである。なお、試料①は表層付近に位置するクロボクである。この層は、細粒化が進行しており、粒径加積曲線にもその特徴が現れている。試料②~⑥の試料に関しては、おおよそ相似な曲線を示し、ほぼ同等な粒度特性を示していることがわかる。

次に、土粒子の密度と自然含水比について調査を行った。試料②の土粒子の密度は $\rho_s=2.78\text{g/cm}^3$ 、試料③~⑥は $\rho_s=2.49\sim 2.50\text{g/cm}^3$ を示した。自然含水比 w_n の比較では、試料②が $w_n=34.4\%$ と低い値を示すものの、それ以外は $w_n=138.5\sim 197.3\%$ を示している。なお、採取日の 2 日前に 22.5mm/h の降雨が観測されている。強熱減量の試験結果では、北海道内の粗粒火山灰質土が示す値⁹⁾（おおよそ 10%以下）と同等の値（ $Li=4.99\sim 7.10\%$ ）を示していることがわかる。また、ほぼ同じ物性を持つ③~⑥の比較では、それらに違いが現れている。特に、すべり境界にあたる試料⑥の値が高いようである。一般に、自然含水



写真 2 日高幌内川大規模岩盤すべり崩壊の状況（ドローンからの空中写真）（苫小牧工業高等専門学校 谷口助教提供）



写真 3 砂防堰堤付近の天然ダム湖の状況



写真 4 表層すべり崩壊地点の露頭の様子

比が大きくなるほど、強熱減量が大きくなることが知られているが、試料⑥は、露頭の最下部層に位置しているため、地下水位等の水の影響を受けた可能性も考えられる。試料⑥に関しては、層の一部が変質し、ハロイサイトのような粘土分が生成¹¹⁾されている可能性があり、同じ Ta 堆積層およびそれと同等の物性を持つ土層においても化学的な風化の進行が伺える。

次に、三軸試験による力学挙動を調べてみた。露頭部の代表的なユニット Ta-d (赤褐色) 層④を用いている。実施した試験は、圧密排水三軸試験 (CD) と圧密非排水三軸圧縮試験 (CUB 試験) である。各供試体 (直径 70mm, 高さ 170mm) は多重ふるい落下法 (MSP 法) により作製しており、圧密後の相対密度 D_{rc} は 104~118% になった。なお、シンウォールサンプリングによる原位置の乾燥密度は 0.440 g/cm^3 であった。最大・最小乾燥密度は、三軸試験に用いた試料粒径を用いて算定し、それぞれ $\rho_{dmax} = 0.472 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmin} = 0.269 \text{ g/cm}^3$ である。試験は、有効拘束圧 $\sigma'_c = 49 \text{ kPa}$, 98 kPa , 196 kPa で圧密後、間隙圧係数 B 値が 0.96 以上になったことを確認し、せん断速度 $0.25\%/min.$ の下で試験を行っている。なお、各供試体の飽和化には二酸化炭素法が用いられている。



写真5 表層すべり崩壊現場の露頭部の状況

図5は、圧密非排水 (CUB) と圧密排水 (CD) 試験から得られた最大、最小主応力比 ($=\sigma_1'/\sigma_3'$) と最大、最小主ひずみ ($=\varepsilon_1, \varepsilon_3$) の関係を示したものである。比較のため、森火山灰質土と富川火山灰質土と中標津火山灰質土の試験結果を併記している。森火山灰質土は駒ヶ岳を、富川火山灰質土は支笏カルデラを、中標津火山灰質土は摩周を噴出源とした北海道を代表的する火山灰質土である。特に、摩周を噴出源とする中標津火山灰質土は、茶褐色で粗粒な土粒子を持つ火山灰質土であり、その粒子の脆弱性は、今回の試料と非常によく似ている。なお、これらの火山灰質土の力学特性については既報に詳しい¹³⁾。

はじめに、CUB の試験結果について示す。図より、強度-変形特性は密な砂が示す硬化-軟化型の挙動と類似していることがわかる。また、各試料の相互の正確な比較はできないものの、樽前火山灰質土 (Ta-d) の主応力比は富川火山灰質土や中標津火山灰質土の値よりも低く、森火山灰質土より高い値を示している。有効拘束圧 σ'_c の増加に伴って同じひずみレベルでの応力比が低下しており、拘束圧依存性を示している。一方、CD 試験結果では、樽前火山灰質土の主応力比は森火山灰質土や富川火山灰質土の値よりも低く、中標津火山灰質土のそれに類似の傾向を示していることがわかる。このような排水条件の違いによる力学挙動の変化は、破壊時の平均主応力の違いに起因する粒子破砕量に起因して生じたものであろう⁶⁾。結果として、せん断強度パラメータは、それぞれ $c' = 8 \text{ kPa}$ と

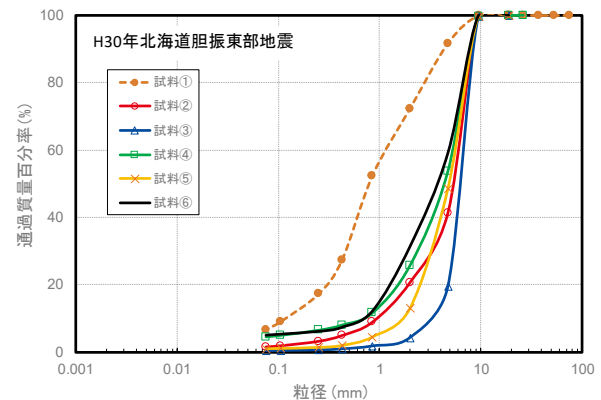


図4 表層すべり崩壊地点より採取した試料の粒径加積曲線

表1 各試料の示標特性

	①	②	③	④	⑤	⑥
自然含水比(%)	71.1	34.4	142.2	197.3	160.7	138.5
土粒子の密度(g/cm^3)	2.81	2.78	2.5	2.49	2.49	2.49
強熱減量(%)	-	-	4.99	5.88	4.85	7.10
10% 粒径(mm)	0.1	0.9	2.8	0.6	1.4	0.6
平均粒径(mm)	0.8	5.1	6.1	4.1	3.9	3.4
均等係数	11	6.7	2.5	8.5	3.9	8.0
液性限界(%)	-	-	-	93.9	-	-
塑性限界(%)	-	-	-	N.P.	-	-
最大密度(g/cm^3)	-	-	-	0.472	-	-
最小密度(g/cm^3)	-	-	-	0.269	-	-

$\phi' = 42.5 \text{ deg.}$ 、 $c_d = 33.0 \text{ kPa}$ と $\phi' = 29.0 \text{ deg.}$ になった。

前述のように、三軸試験では飽和状態の力学強度パラメータを調査した。続いて、①乾燥状態と②不飽和状態における樽前火山灰質土の力学挙動を調べてみた。行った試験は、定圧一面せん断試験である。試験は地盤工学会基準¹⁴⁾を準用し、実施している。地盤工学会基準では、最大粒径 0.85 mm 以下の土質への適用が規定されているが、樽前降下火砕堆積物は最大粒径 0.85 mm 以上の土試料が含まれているため、試験結果への影響が含まれている可能性もあるが、ここでは参考値として議論を進める。

乾燥状態の供試体(直径 60mm、高さ 20mm)は、空気乾燥した土試料を空中落下させることによって作製している。その後、所定の応力 49kPa、98kPa、147kPa で圧密し、ひずみ速度 1.0mm/min. の下、せん断変位 δ が 8.0mm になるまで試験を行った。不飽和状態の供試体は、乾燥状態の試料と同様に空中落下法で作製後、せん断箱ごと 24 時間水浸させ、その後 1 時間重力脱水させた。なお、飽和度 S_r は計測した含水比から算出し、 $S_r = 71.6\% \sim 99.3\%$ の範囲にある。圧密圧力は 49kPa、98kPa、147kPa の 3 種類、ひずみ速度は 0.2mm/min. として、せん断変位 δ が 8.0mm となるまで試験を行った。

図 6 に空気乾燥状態におけるせん断応力-せん断変位の関係を示す。図より、圧密応力が 49kPa、98kPa、147kPa に増加するに従って、せん断応力が増加していることがわかる。ダイレイタンスー特性に着目すると、有効拘束圧が 49kPa、98kPa、147kPa のいずれにおいても負のダイレイタンスー領域で破壊している(図 7)。得られた結果から、モールの応力円を用いた粘着力 c_d とせん断抵抗角 ϕ_d はそれぞれ、 $c_d = 22.4 \text{ kPa}$ 、 $\phi_d = 47.1 \text{ deg.}$ となった。

図 8 は、不飽和状態でのせん断応力-せん断変位の関係を示したものである。図より、圧密応力が増加するにしたがって、せん断応力が増加していることがわかる。一方、空気乾燥状態の試験結果と比べて、98kPa、147kPa のせん断応力のピーク値が小さくなっていることも確認できる。ダイレイタンスー特

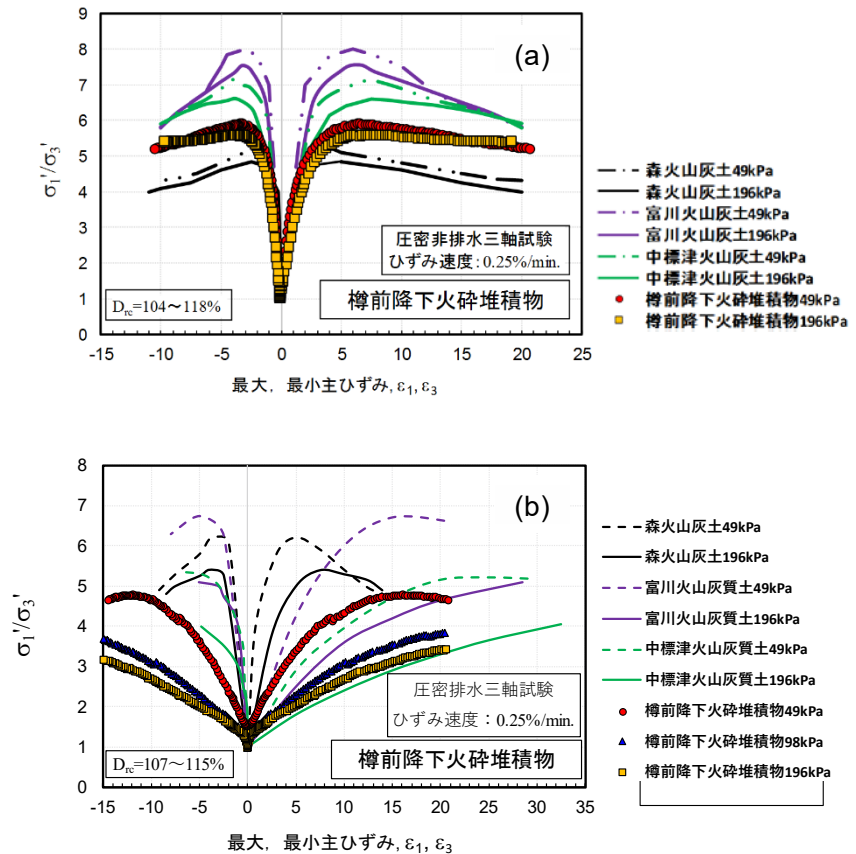


図 5 静的三軸試験から得られた最大、最小主応力比 ($=\sigma_1'/\sigma_3'$)と最大、最小主ひずみ($=\epsilon_1, \epsilon_3$)の関係：
(a)CUB 試験、(b)CD 試験

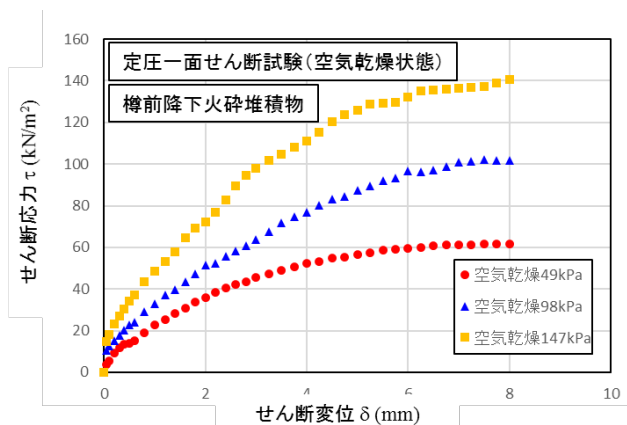


図 6 樽前火山灰質土のせん断応力-せん断変位の関係 (空気乾燥状態)

性に着目すると、先程と同様、いずれも負のダイレイタンシー領域で破壊している(図9)。それぞれの結果から、 $c_d=22.4\text{kPa}$, $\phi_d=51.2\text{deg.}$ となった。

上記の結果について、空気乾燥状態と不飽和状態における挙動の違いについて考察を行う。表-2は実験で得られた強度パラメータを示したものである。樽前降下火砕堆積物は、液性限界試験・塑性限界試験の結果、N.P.と判定されていることから、ここでは、各圧密圧力に対する割線係数によりせん断抵抗角 ϕ_d を算出し、工学的評価を行った。参考のため、飽和状態の三軸試験結果も併せて示す。

乾燥状態と不飽和状態における同一圧密応力下の比較では、乾燥状態の ϕ_d が圧密応力の増加に伴って不飽和状態のものより大きくなっていることがわかる。試験方法(応力場)が異なるので正確な比較はできないが、飽和状態の三軸試験結果との比較からも乾燥状態の強度が最も高い。特に、不飽和状態の圧密応力147kPaでは、強度が大幅に低下していることがわかる(表-2参照)。このことは、空気乾燥状態と比較しても特徴的である。前述のように、本試験料は地盤工学会基準ではN.P.と判断されるものの、液性限界は計測されることから、水分と細粒分(粒子破碎)の影響によって摩擦の低減効果が生じ、せん断抵抗角が低下した可能性が高い。いずれにしても、詳細な検討が必要である。

4. まとめ

一連の現地調査、物理・力学試験を行った結果、以下のような結論を得た。

1) 日高幌内川上流部では、吉野地区や富里地区の表層崩壊^{1)~5)}と異なり、大規模な岩盤崩壊が発生していた。移動体主部のすべり面は、中新統軽舞層の泥岩シルト互層の層理面(流れ盤)とみられている。また、その周辺で発生した表層崩壊は、樽前起源の降下火砕堆積物がすべり崩壊していた。表層すべりは基盤となる泥岩とTa-dとの境界で発生していた。また、Ta-d層と工学的に同一と判断した土層においても風化の進行が伺えた。

2) 樽前降下火砕堆積物 Ta-d のせん断強度特性を調査したところ、その強度パラメータは、排水、非排水

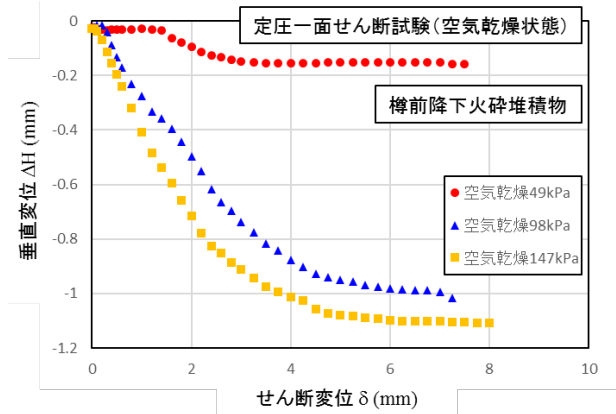


図7 樽前火山灰質土のダイレイタンシー特性(空気乾燥状態)

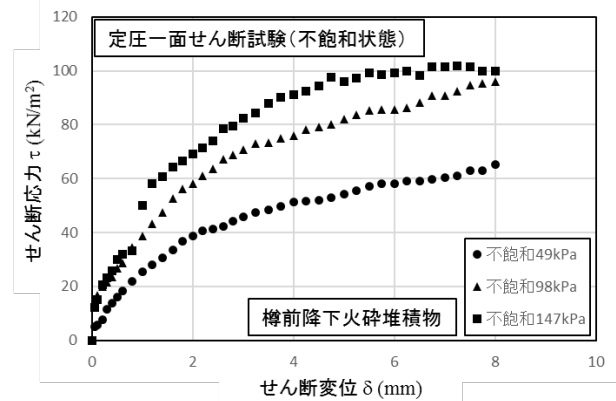


図8 樽前火山灰質土のせん断応力-せん断変位の関係(不飽和状態)

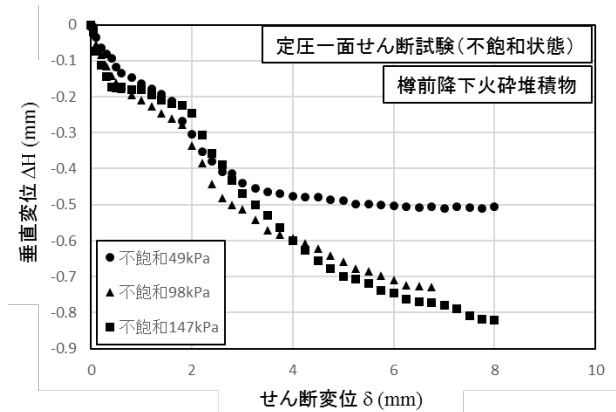


図9 樽前火山灰質土のダイレイタンシー特性(不飽和状態)

表2 定圧一面せん断試験の試験結果

	空気乾燥状態($S_r=0\%$)			不飽和状態($0<S_r<100\%$)			飽和状態($S_r=100\%$)		
試験方法	定圧一面せん断試験			定圧一面せん断試験			圧密排水三軸試験		
圧密応力	49kPa	98kPa	147kPa	49kPa	98kPa	147kPa	49kPa	98kPa	196kPa
$\phi_d(\text{deg.})$	51.5	46.1	43.7	53.1	44.4	34.7	40.8	34.0	35.3

条件ならびに飽和、不飽和条件によってかなり変化する。地盤や斜面の安定性など、工学的な評価を行う上では、適切な判断が必要となる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、北海道開発局室蘭開発建設部、北海道から、土試料ならびに、各種災害情報の提供を頂いた。また、現地調査では本学 中津川誠教授と苫小牧工業高等専門学校 谷口陽子助教の協力を得た。なお、本研究は、JSPS 科研費 JP17H03318 ならびに平成 30 年度室蘭工業大学北海道胆振東部地震災害緊急調査支援補助事業の助成で行われた。記して、深甚なる感謝の意を表します。

文献

- (1) 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，地盤工学会，2019.9.
- (2) 2018 年北海道胆振東部地震・大阪北部地震被害調査報告書，-地震被害調査シリーズ No.2, No.3-, 土木学会，2019.9.
- (3) 地盤工学会北海道支部：平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団速報会，2018.10.2，(<http://jgs-hokkaido.org/>)
- (4) 土木学会北海道支部：2018 年 9 月北海道胆振東部地震災害緊急合同調査団報告会，2018.12.15，2019.1.27 (<https://www.jsce.or.jp/branch/hokkaido/>)
- (5) S. Kawamura, S. Kawajiri, W. Hirose and T. Watanabe: Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, *Soils and Foundations*, 2019. (掲載決定)
- (6) 岸田航平，川村志麻：樽前山を噴出源とする降下火砕堆積物の力学特性とその評価，地盤工学会北海道支部年次技術報告集，第 59 号，pp.161-168，2019.1.
- (7) 古川竜太，中川光弘：樽前火山地質図，2010.
- (8) 国土地理院：平成 30 年北海道胆振東部地震に関する情報，(<http://www.gsi.go.jp/>)
- (9) 地盤工学会北海道支部 北海道の火山灰質土の性質と利用に関する研究委員会：実務家のための火山灰質土～特徴と設計・施工，被災事例～，2010.12.
- (10) 北海道開発局：平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う災害対応状況，(<https://www.hkd.mlit.go.jp/>)
- (11) 増井淳一，庄子貞雄：火山灰土壌中のカオリン鉱物について（第 2 報）ハロイサイトの産状，*日本土壤肥科学雑誌*，Vol.40, No.12, 1969.
- (12) 石丸聡：胆振東部地震により厚真周辺で発生した斜面崩壊，*日本地すべり学会北海道支部・日本応用地質学会北海道支部合同調査報告*：2018.9.29.
- (13) 三浦清一，八木一善，川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破砕，*土木学会論文集*，No.547/III-36, pp.159-170, 1996.9.
- (14) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（二分冊の 1），pp.287-308，2010.