

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23241056

研究課題名(和文)寒冷地にある火山灰質土斜面の自然外力に起因する崩壊危険度評価と予知法の提案

研究課題名(英文)Stability evaluation of volcanic slopes in cold regions

研究代表者

三浦 清一(MIURA, SEIICHI)

北海道大学・・・名誉教授

研究者番号：00091504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,100,000円、(間接経費) 9,330,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、凍結融解作用を受ける破碎性火山灰地盤の力学特性の変化に着目して、積雪寒冷地にある火山灰質粒状層を含む帯水斜面の崩壊のメカニズムを解明し、実務における斜面危険度評価法を提案することを目的とした。高精度の斜面崩壊予測法を提案するためには、実物大斜面における崩壊時の力学挙動評価が必要となる。一連の研究では、申請期間3年間に亘り、締固め条件や境界条件の異なる実物大盛土斜面を構築し、その動態観測ならびに崩壊実験を実施した。併行して、新たに試作した凍結融解履歴型繰返し不飽和三軸試験装置による室内要素試験、室内模型実験を実施し、それらの結果を考慮した高度な斜面危険度評価法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to reveal the failure mechanism of volcanic slopes in cold regions and to propose a prediction method on failure. To achieve the purposes, full-scale embankments were constructed under several conditions in Sapporo, Japan. A typical volcanic soil in the field was adopted as a soil material. After construction of embankments, changes in soil moisture, temperature, pore water pressure were investigated using devices such as soil moisture meters, etc. Simultaneously, a series of model tests was performed on small size slopes formed by the same material as that in the field to compare with the mechanical behavior of embankments. A series of triaxial tests was also conducted on compacted volcanic soils subjected to freeze-thaw cycles using a new apparatus. As a result, a reasonable prediction method of failure was proposed based on changes in water content, and its validity was confirmed.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム 自然災害科学

キーワード：地盤工学 土砂災害 防災 火山灰質土 凍結融解履歴

1. 研究開始当初の背景

北海道は、積雪寒冷地特有の融雪期における多量の融雪水や凍結融解作用に起因する構成地盤の力学的劣化の影響などによって、斜面災害が生じやすい自然環境にあると言われている。また、比較的歴史の新しい未風化火山灰土(火山性粗粒土)地帯が北海道の約40%を覆っており、そのことがさらに斜面災害多発の誘因となっている。例えば、1999年4月に起こった道央自動車道黒松内地区の大規模な切土のり面崩壊や2003年台風10号による斜面崩壊・表層すべりでは、これらの影響が崩壊の一因であるとの報告がある。しかしながら北海道のように凍結・融解履歴や地震による繰返し载荷履歴を受けるような厳しい自然環境下では、多数の影響因子が複雑に絡み合うため、災害の原因を特定することは極めて難しく、凍結・融解、降雨や地震などの履歴がどのような形で斜面崩壊に影響を及ぼしているかを詳細に調べた総合的な研究は、立遅れていた。

2. 研究の目的

本研究では、凍結融解履歴・振動载荷履歴を受けた火山灰質粒状層を含む帯水斜面の崩壊メカニズムを解明し、実務に対応可能な斜面災害予知法・危険度評価手法を提案することを目的とする。過去の研究(例えば、基盤研究A:No.19201035)では、積雪寒冷地における斜面崩壊を誘発する影響因子の力学的作用を、現地計測、室内模型試験、室内要素試験および数値解析、さらに地盤情報データベースから、その力学特性ならびに簡易斜面危険度評価法・予知法を解明・提案してきた。ここでは、特に締固め条件、境界条件を変化させた実物大模型実験を実施し、実務に適用可能な危険度評価法・予知法を確立するとともに、試作した凍結融解履歴型繰返し不飽和三軸試験装置と室内模型実験装置による実験結果にもとづいて、より高度な評価手法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では上記の目的を達成するため、以下の項目に検討を加えて、研究を遂行した。

(1) 実物大斜面の構築とその動態観測: 高さ5m, 奥行き2m, 傾斜角45°の条件の異なる実物大盛土斜面を北海道の火山灰質粗粒土の代表的な試料である支笏軽石流堆積物を用いて構築した。斜面内には土壌水分計, 温度計, 加速度計, 間隙水圧計を設置し, 降水や給水および積雪や凍結融解履歴を受けた斜面の力学挙動評価のための各種データを獲得した。

(2) 自然条件を再現した室内模型斜面の降雨・凍結融解による崩壊実験による検討: 二次元平面ひずみ模型土槽装置を用いた室内模型実験を実施した。締固め時の含水比と斜面崩壊パターンの関係を明確にし, 斜面崩壊時の含水比情報にもとづいて, 斜面崩壊予測法の検討を行った。

(3) 凍結融解履歴型不飽和繰返し三軸試験機の製作と盛土材料の動的力学挙動の解明: 自然地盤とほぼ同様な凍結・融解履歴および繰返し载荷履歴を再現できる凍結融解履歴型不飽和繰返し三軸試験機を製作した。実物大盛土構築に用いた上記の試料で凍結融解履歴を付与した繰返し三軸試験を実施し, その動的力学特性を把握した。

得られた上記各項目の検討結果を統合し, 寒冷気候の自然現象に起因する破砕性火山灰地盤の斜面崩壊の危険度判定・評価法を提案した。

4. 研究成果

(1) 実物大斜面の構築とその動態観測結果

構築した実物大盛土斜面は北海道札幌市南区真駒内に構築され, その法面方向は北向きである。本地点は, 支笏軽石流堆積物(Spfl)である駒岡火山灰土(K-soil と称する, $\rho_s = 2.47\text{g/cm}^3$, $\rho_{\text{din-situ}} = 1.01\text{g/cm}^3$, $D_{50} = 0.27\text{mm}$, $U_c = 46$, $F_c = 35.2 \sim 42.6\%$) が分布している地盤であることから, 盛土斜面構築の際にはこの試料を用いている。ここで, 2011年度に構築した盛土(Full-scale Embankment)をFE-2011, 2012年度の新設した盛土をFE-2012と称する。FE-2011は幅12m, 高さ5m, 奥行き2m, 勾配45°, FE-2012盛土は幅4m, 高さ5m, 奥行き2m, 勾配45°である。特に, FE-2012では境界条件を明確にするために, 盛土側面に側方拘束工を, 背面と底面にはシートを設置している。構築時の現場密度試験結果より, FE-2011とFE-2012の平均締固め度 D_c と初期平均含水比 w_0 はそれぞれ89.5%と95.9%, 43.0%と42.5%であることを確認している。

斜面内及び斜面背面に設置した計測機器は土壌水分計, テンソメータ, 加速度計, 地温計, 雨量計, 積雪計である。また, 斜面内の含水状態を高めるために, 給水管と給水タンクを斜面内と斜面上部にある地山に設置している。給水作業は, パイピングを起こさないように調整しながら行っている。写真-1と図-1は構築直後のFE-2011とFE-2012の全景と計器配置図を示している。なお, 詳細については, 雑誌論文(3), (6)を参照されたい。

動態観測中, 図-2に示すような地温の変化が盛土内に発生している。ここでは, FE-2011のケースを例示した。図より, 冬期間は地温が0°C以下になる期間・箇所もあり, 1年を通じて寒冷地特有の凍結融解作用を受けていることが明らかである。実際, 春先では盛土表層部において凍上・凍結に起因する表層の変位を確認している(雑誌論文(6)参照)。なお, このことはFE-2012においても同様であった。その後, 給水量を増加させることによって, 斜面の崩壊実験を実施した。はじめに, FE-2011の崩壊挙動について述べる。

FE-2011では断面を3つに分割し, 給水速度を変化させた実験を行った。冬期間前までは断面1(Section1), 断面2(Section2), 断面3(Section3)でそれぞれ35/hr., 28/hr.

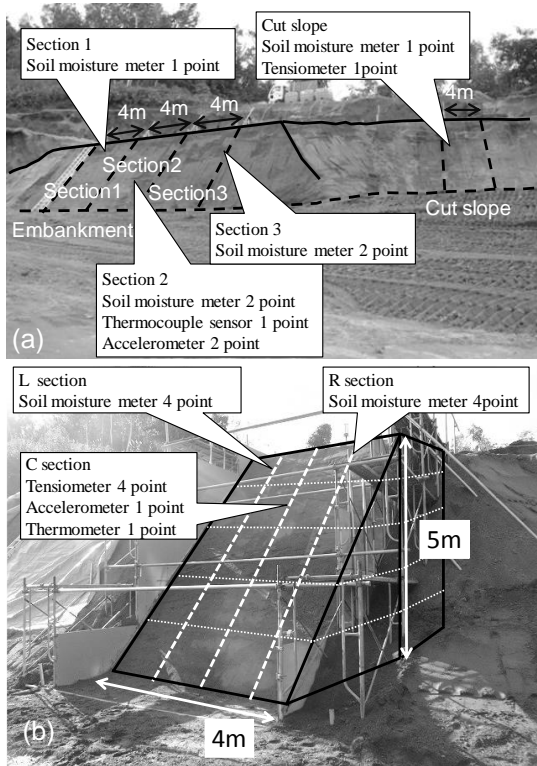


写真-1 構築した実物大盛土の全景：
(a)FE-2011, (2) FE-2012

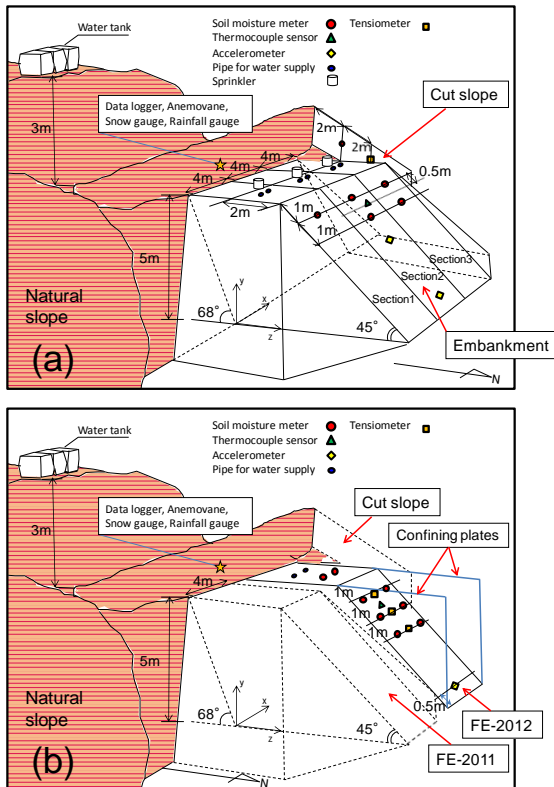


図-1 実物大盛土の計器配置概略図：
(a)FE-2011, (2)FE-2012

と 14/hr. の給水を、5 月以降は 1000/day になるように給水を行った。図-3 は盛土内に給水した累積水量と斜面内に設置した土壌水分計から得られる含水比の変化を示したものである。図より、5 月以降の豪雨と給水量

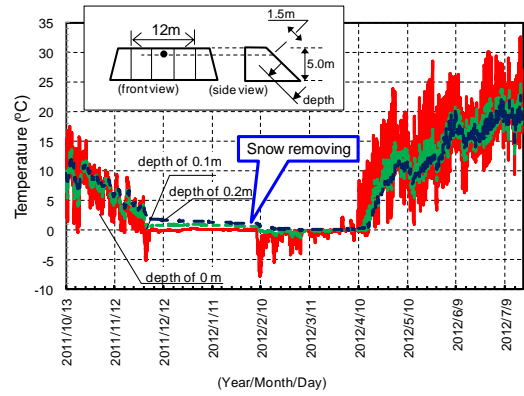


図-2 地温の変化 (FE-2011)

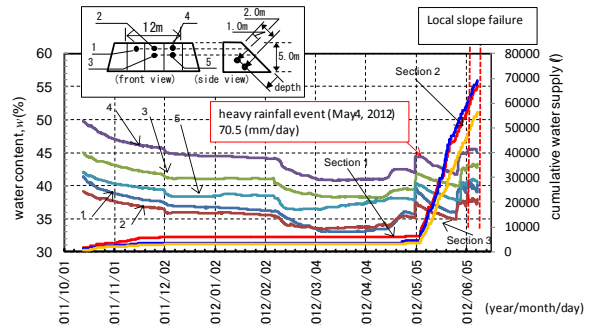


図-3 降雨と給水量増加による含水比の
変化 (FE-2011)

の増加に伴って、斜面内含水比が急増していることが明らかである。その結果として、2012年6月6日と6月18日に断面3と断面2において局所崩壊が発生した。写真-2は、崩壊後の写真を示したものである。それらより、ガリ侵食を伴う局所崩壊が発生していることがわかる。それぞれの崩壊箇所から試料をサンプルし、含水比を調べた結果、断面2では平均で54.6%、断面3において58.8%であった。

前述の FE-2011 の結果にもとづいて、FE-2012 では、境界条件を明確にして斜面を新設し、同様の動態観測を行った。図-4 は、計測期間に給水した水量と降雨量および累積給水量を示したものである。なお、斜面表層部への給水効果を高めるため、構築時から給水パイプを増設している。図示のように、段階毎に 1000~3000/day の給水を行っている。その結果、FE-2012 では給水量の増加によって法先部で侵食が進み(8月1日)、最終的に10月17日~18日にかけて表層崩壊が発生した。写真-3は表層崩壊発生後の斜面形状である。

図-5に崩壊時の斜面変形状況を3次元図として整理し、図中に計測機器の位置を示したものを、図-6に崩壊に至る前後の土壌水分量の変化(崩壊部地点に設置された R2)を提示した。図より、給水量の増加ならびに降雨の影響によって10月17日を境に計測器機付近の含水比が急増していることがわかる。また、その傾向は浅くなるにつれて顕著にある。同様に、崩壊付近の間隙圧の変化を図-7に示



写真-2 崩壊後の盛土の状況 (FE-2011)

Slope failure (17-18, Oct. 2013)

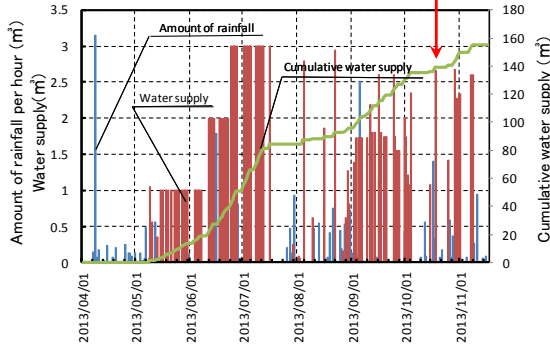


図-4 給水量、降水量と累積給水量の関係 (FE-2011)



写真-3 崩壊後の盛土の状況 (FE-2012)

す。図-5 にはセンサーの位置(C3)を併記している。図より、崩壊したと考えられる 10 月 17 日では負の間隙圧から急激に正の間隙圧に移行していることが明らかである。なお、崩壊エリアからサンプルした試料の含水比は 54%であった。FE-2011 の値と比較すると、あまり相違はない。

以上のことから、間隙圧と含水量の変化を経時的に把握することは、斜面の安定性を評価する上で重要であること、また、崩壊時の含水比は一義的に決定されることが明らかにされた。以下では、上記の結果にもとづいて、室内模型実験による検討を行った。

(2) 自然条件を再現した室内模型斜面の降雨・凍結融解による崩壊実験

図-8 は、実大盛土斜面と同一試料である駒岡火山灰土を用いた凍結融解履歴有の降雨実験結果の一例を示している。試験条件は、勾配 45°、初期含水比 $w_0=43\%$ 、締固め度 $D_c=85\%$ である。詳細は雑誌論文(3)に詳しい。写真から明らかなように、模型実験において

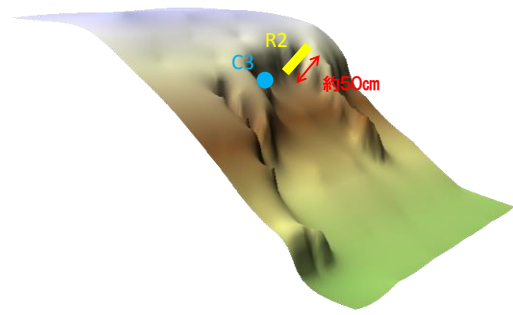


図-5 表層崩壊後の 3 次元図と R2, C3 の位置

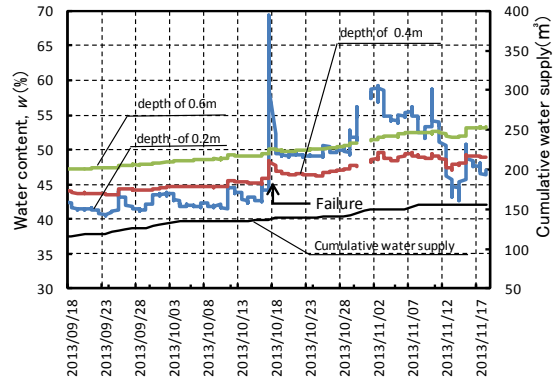


図-6 崩壊前後の土壌水分量の変化 (R2)

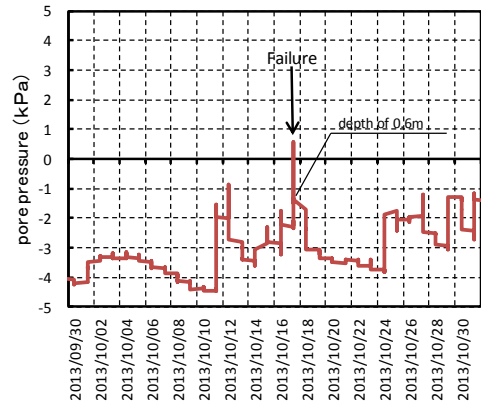


図-7 崩壊前後の間隙圧の変化 (C3)

も表層すべり破壊が生じている。図-9 はこの時の飽和度の変化を示したものである。崩壊は飽和度がピーク後に発生している。この崩壊箇所 (sm³) の飽和度を含水比に換算すると 58.8%となり、ほぼ実物大盛土の崩壊時含水比と一致する。

図-10 は、提案している危険度評価式、すなわち初期と崩壊時の含水比の関係を示したものである (雑誌論文(4), (5)参照)。この関係は図中の式(1)として表現され、実斜面においてもその有用性は確認されている (雑誌論文(9), (10)参照)。今回の実物大実験結果は式(1)によって良く表現されるようである。

以上のことから、提案した危険度評価式は、実規模の盛土においても精度良く、斜面の安定性・危険度を評価できることが示された。(3) 凍結融解履歴載荷型不飽和繰返し三軸試験機の製作と盛土材料の力学挙動の解明

ここでは、新たに試作した凍結融解履歴載荷型不飽和繰返し三軸試験機を用いて、盛土

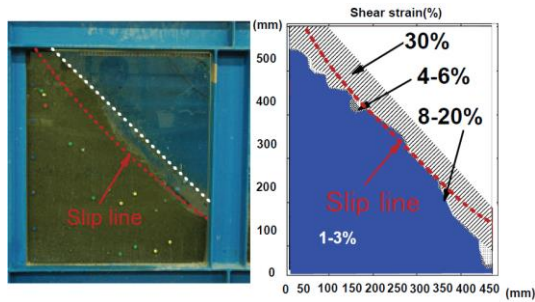


図-8 降雨模型実験の崩壊時の変形挙動

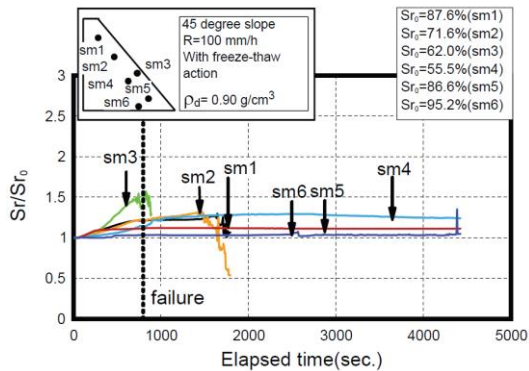


図-9 正規化された飽和度の経時変化

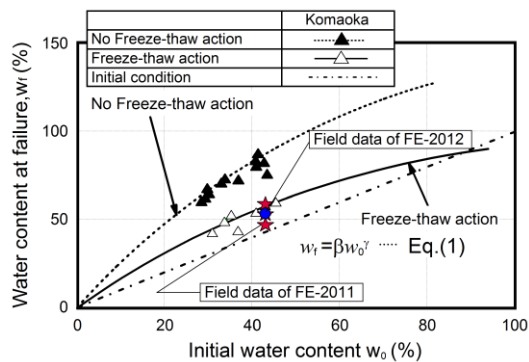


図-10 初期含水比と崩壊時含水比の関係

材料の動的力学挙動を把握した。

写真-4 は製作した凍結融解履歴載荷型不飽和繰返し三軸試験機である。装置の特徴として、空気圧シリンダを用いて供試体の軸方向に繰返し荷重を与える機構を有している。さらに、別途準備した2台の恒温水槽から温度を設定した不凍液を供試体のペテスタルおよび三軸セル内に循環させることで、供試体を凍結融解させることが可能である。ペテスタルには空気侵入値 $AEV=100\text{kPa}$ のセラミックディスクが設置されており、不飽和状態の試験も可能である。

凍結融解履歴を受ける不飽和条件下での K-soil の繰返し特性を調べた。供試体は締め固めて作製し、初期乾燥密度が 1.11g/cm^3 、含水比が 46.8%、飽和度が 92.6% になるようにした。供試体を凍結・融解する際には、供試体側面に円筒形アクリルセルを装着し、 20kPa の上載圧を供試体に載荷した状態で凍結融解作業を行った。1 台の恒温槽からの冷却水により三軸セル内を 0°C に保った上で、もう 1 台の恒温槽からの冷却水を装置のトップキャップに循環させて供試体上部より冷却を進めた。供試

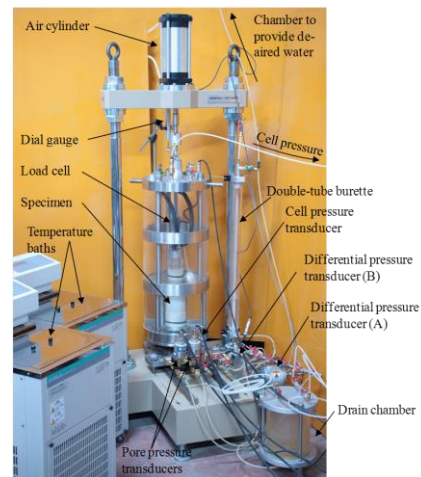


写真-4 凍結融解履歴載荷型不飽和繰返し三軸試験機

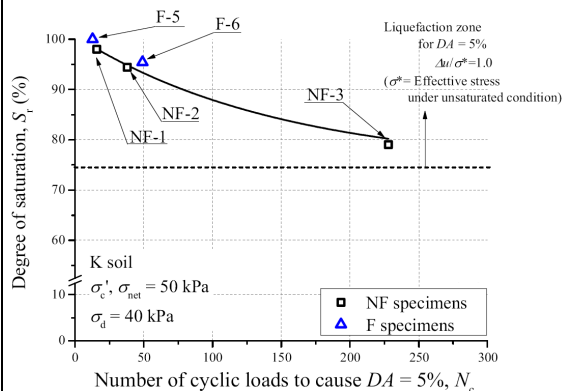


図-11 繰返しせん断直前の飽和度と繰返し回数(DA=5%時)の関係

体上部温度を -1°C から -15°C まで 48 時間かけて低下させた後、その状況を保つことで凍結した。融解時は恒温装置を停止させ、24 時間かけて自然解凍を行った。凍結融解後、基底応力 $\sigma_{\text{net}} = \sigma - u_a = 20\text{kPa}$ を保ったまま、間隙空気圧および間隙水圧を 200kPa まで段階的に上昇させた。その後、有効拘束圧 50kPa による等方圧密を行った。圧密終了後に間隙水圧を減じて所定のマトリックス吸着水 ($u_a - u_w$) に設定した後、繰返し載荷を周期 200 秒で行った。

図-11 は繰返しせん断開始時の飽和度 S_r と両振幅軸ひずみ DA が 5% に達した時の繰返し回数 N_c の関係を示す。図には凍結融解履歴を与えた F-5, F-6 供試体と凍結融解をさせない NF-1, NF-2, NF-3 供試体のデータを掲載している。これより、 N_c と飽和度 S_r の関係は、一義的に決定できることが示された。

一連の実験から、凍結融解履歴を受けた供試体では保水量が高まり、繰返し載荷による軸ひずみ発生が顕著になるという挙動が確認された。支筋軽石流堆積物である本盛土材料の凍結融解履歴有無における水分保持及び繰返し強度特性の相互関係が明らかとなった。前述の結果は、凍結・融解、地震の具体的な影響度を考慮したより高度な危険度評価法の提案に反映できる。なお、一連の研究では、他の盛土材料を対象とした力学挙動

評価も実施されている(雑誌論文(1), (2), (7), (8))。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- (1) 松村聡, 三浦清一, 横濱勝司: 粗粒火山灰質土の非排水繰返しせん断強度に及ぼす締固め条件および非塑性細粒分の影響, 土木学会論文集C, Vol.70, 2014. (印刷中) 査読有
- (2) S.Yokohama, S.Miura and S.Matsumura: Change in hydromechanical characteristics of embankment material due to compaction state conditions, Soils and Foundations, Vol.54, No.4, 2014. (in press) 査読有
- (3) S.Kawamura and S.Miura: Failure of volcanic slopes in cold regions and its prediction, The thematic issue on Italian workshop on Landslides, Procedia Earth and Planetary Science, 2014. (in press) 査読有
<http://www.journals.elsevier.com/procedia-earth-and-planetary-science>
- (4) S.Kawamura and S.Miura: Stability evaluation of volcanic slopes with crushable particles subjected to freezing and thawing, Journal of Frontiers in Construction Engineering, Vol.2, Iss.2, pp.43-53, 2013. 査読有
www.academicpub.org/fce/
- (5) S.Kawamura and S.Miura: Rainfall-induced failures of volcanic slopes subjected to freezing and thawing, Soils and Foundations, Vol.53, No.3, pp.443-461, 2013. 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2013.04.006>
- (6) S.Kawamura, S.Miura, S.Yokohama, A. Kudo and N. Kaiya: Field monitoring of embankment constructed by volcanic soil and its evaluation, Geotechnical Special Publication, ASCE, No.231, pp.373-382, 2013. 査読有
- (7) 松村聡, 三浦清一, 横濱勝司: 砂質シルトの繰返し非排水せん断特性に与える締固め条件の影響とその評価, 土木学会論文集C, Vol.68, No.4, pp.597-609, 2012. 査読有
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejge/68/0/_contents/-char/ja/
- (8) 横濱勝司, 三浦清一, 松村聡: 築堤材に用いられる砂質シルトの強度・透水性・せん断剛性に及ぼす締固め管理条件の影響, 土木学会論文集C, Vol.68, No.2, pp.422-432, 2012. 査読有
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejge/68/2/_contents/-char/ja/
- (9) S.Kawamura and S.Miura: Field monitoring of volcanic slope subjected to freezing and thawing and its evaluation, Geotechnical Special Publication, ASCE, No.225, pp.516-525, 2012. 査読有
- (10) S.Kawamura and S.Miura: Stability evaluation of slope subjected to rainfall and freeze-thaw actions based on field monitoring, Advances in Civil Engineering, Vol.2011, Article ID867909, 14pages, Hindawi Publishing

Corporation, 2011. 査読有

<http://dx.doi.org/10.1155/2011/867909>

他 査読無 総件数 12 件

[学会発表] (計 7 件)

- (1) S.Kawamura: Failures of volcanic slopes in cold regions and its prediction, The Italian Workshop on Landslides, 2013.10.23., Napoli, Italy.
- (2) S. Matsumura: Seismic behavior of embankment constructed by different compaction methods, Int. conf. on Ground Improvement and Ground Control, 2012.10.31, Wollongong, Australia.
- (3) S.Yokohama: Mechanical properties and soil fabric of compacted embankment, Int. conf. on Ground Improvement and Ground Control, 2012.10.31, Wollongong, Australia.
- (4) S.Kawamura: Bearing capacity improvement of anisotropic sand ground and its evaluation, Int. conf. on Ground Improvement and Ground Control, 2012.10.31, Wollongong, Australia.
- (5) S.Miura: Mechanical behavior and earthquake-induced failures of volcanic soils in Japan (Special lecture), Int. Symp. on Advanced in Transportation Geotechnics II, 2012.09.11, Sapporo, Japan.
- (6) S.Matsumura: Effects of compaction condition on seismic performance of dike embankment and its evaluation, Int. Symp. on Advanced in Transportation Geotechnics II, 2012.09.12, Sapporo, Japan.
- (7) S.Yokohama: Change in mechanical characteristics of embankment material by compaction control and its evaluation, Int. Symp. on Advanced in Transportation Geotechnics II, 2012.09.12, Sapporo, Japan.

他 総件数 15 件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 清一 (MIURA, Seiichi)

北海道大学・一・名誉教授

研究者番号: 00091504

(2) 研究分担者

石川 達也 (ISHIKAWA, Tatsuya)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号: 60359479

川村 志麻 (KAWAMURA, Shima)

室蘭工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 9025877

横濱 勝司 (YOKOHAMA, Shoji)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号: 50299731

(3) 連携研究者 (0 人)