

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06205

研究課題名(和文)地震動履歴を有する火山灰盛土の積雪・融雪期の不安定化機構の解明と維持管理法の確立

研究課題名(英文) Stability evaluation of volcanic embankments subjected by cyclic loadings in snowy-cold regions

研究代表者

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：90258707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震動履歴を受ける積雪寒冷地にある火山灰盛土の積雪期・融雪期の崩壊メカニズムを解明し、その危険度評価手法を提案することを目的とした。次のような結論を得ている。(1)積雪時に形成される凍結層は、盛土内の地下水位の増加に影響を及ぼす。特に、融雪期では盛土の力学的不安定化を導く可能性が高い。(2)地震動履歴を有する火山灰盛土に地下水による背面からの浸透流を与えた模型実験では、降雨や波の侵食による浸透流破壊に比べ、せん断履歴の影響は大きい。(3)土の物性評価と力学的評価(浸透流による有効応力の評価)を取り入れた、火山灰質土の内部浸食に対する安定性評価手法(評価フロー)を提案した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to reveal mechanical behavior of volcanic embankments subjected by cyclic loadings in snowy-cold regions. A series of laboratory-based model tests was performed on small-scale embankments constructed with a typical volcanic soil in Hokkaido, Japan. In the model tests, the effects of pre-deformation generated by cyclic loadings and existence of a frozen layer in snowmelt season on seepage flow failure were investigated. The following results were obtained; (1)slope failure is induced by an increase of pore water pressure due to the existence of a frozen layer in snowmelt season, (2)the effect of pre-deformation due to cyclic loadings on seepage flow failure is significant to discuss the stability of volcanic embankments and (3)an evaluation method for internal erosion of volcanic embankments is proposed by taking index properties and mechanical behavior of soil materials into account.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面崩壊 積雪寒冷地 地震動 火山灰質土 盛土 浸透流

1. 研究開始当初の背景

北海道では、比較的歴史の新しい未風化火山灰土(火山灰質粗粒土)地帯が北海道の約40%を覆っており、そのことが特殊土である「まさ土」と同様、土砂災害多発の誘因となっている。例えば、1968年と2003年十勝沖地震では札幌市清田区において、宅地盛土に用いられた支笏軽石流堆積物の液状化に起因する家屋や道路などの被害が発生している。これらの事例では、震源から長距離の地点にあったが、全く同じ地区の盛土造成火山灰地盤で液状化が発生し、住宅地等に多大な被害が誘発された。一方、2012年5月と2013年4月の春期に発生した一般国道230号中山峠土砂災害では、道路盛土が崩壊し、交通網に被害を与えている。特に、2013年の災害事例では通常の融雪期災害とは異なる“積雪時”での崩壊であったことから、その崩壊現象の解明が急がれている。

2. 研究の目的

本研究は、地震動履歴を受ける積雪寒冷地にある火山灰盛土の積雪期・融雪期の崩壊メカニズムを解明し、火山灰質土で構築された盛土の危険度評価手法を提案することを目的とした。過去の一連の研究では、実物大盛土による現地計測、室内模型実験、数値解析の結果をもとに、降雨災害に対する簡易危険度評価法並びに管理基準法を提案している。しかしながら、東北地方太平洋沖地震などの被災経験から、地震動履歴の影響を取入れた危険度評価手法の必要性が指摘されていた。ここでは、保有している振動載荷装置に積雪・融雪の影響を考慮できる模型実験装置を試作し、それらの実験結果と現地計測結果、実際の被災事例にもとづいて、積雪寒冷地における火山灰盛土を対象にした実務に適用可能な安定性評価法および土質特性を考慮した管理基準法の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、保有する振動台装置の改良ならびに積雪・融雪再現装置を開発し、実現象に近い条件のもとで模型実験を実施した。併せて、現地計測結果との比較・検討により、実務に適用可能な評価法・予測法を検討した。具体的な研究項目は、以下の通りである。

- (1)振動載荷型-積雪・融雪再現装置を試作し、はじめに火山灰盛土の動的力学挙動を詳細に評価する。特に盛土の締め固め条件の違い(密度、含水比の違い)による力学挙動の変化を明確にする。
- (2)積雪ならびに凍結層-融解現象を再現し、盛土表面ならびに内部への浸透現象を把握する。その後、崩壊現象に寄与する各影響因子を定量化する。
- (3)X線CTスキャンを用いた盛土の透水性能評価と浸食パイピング現象発生機構を解明する。

(4)北海道内で発生した火山灰盛土の崩壊事例を収集する。また、土砂災害の発生した地点(一般国道230号中山峠2地点)の現地動態計測結果と本実験結果の相互関係を比較・検討する。

上記各項の検討結果を統合した積雪寒冷気候の自然現象に起因する火山灰盛土の安定性評価法を検討した。

4. 研究成果

(1) 現地計測結果

はじめに、国道230号中山峠2地点の現地観測結果について報告する。

札幌から道南地方を結ぶ国道230号にある中山峠では、2012年5月4日に土砂崩れや地すべり、2013年4月7日に表層崩壊が2年連続で発生した(図1)。災害の規模は、2012年災害はKP40.6地点で道路幅約10m、道路延長約86mの範囲で地すべり、KP40.8m地点では盛土法面が幅約40m、横断幅約110mの範囲で道路盛土が崩壊した。また、2013年災害では、道路幅約50m、法面40~50mの盛土が崩壊している。

被災近傍の豊平峡ダム管理所の雨量データによると、2012年5月4日災害時の日雨量は58mm、2013年4月7日災害時は74mmが観測されている。2013年4月7日の降雨は、4月~5月としての最大値ではあるものの、ほぼ同程度の降雨が2008年にも観測されていた。次に、融雪水の発生源となる積雪状況を確認する。図2の上段は、被災地近傍の大二股地点における、災害の発生した2000年、2012年、2013年と、4月~5月の降雨規模が大きかった3年(1998年、2006年、2008年)の積雪深である。図の■印は、4月~5月の最大日雨量の起日を表している。図より、2000年、2006年、2012年、2013年の大雨時には積雪があったものの、1998年、2008年は大雨が発生する前に既に消雪していたことがわかる。また、大雨発生時において積雪のあった2000年、2006年、2012年、2013年の大雨発生までの7日間の日平均気温を示したものが図2の下段である。これら4例の気温経過を比較すると、2012年5月4日の災害時は気温の高さが際立っている。連日の高い

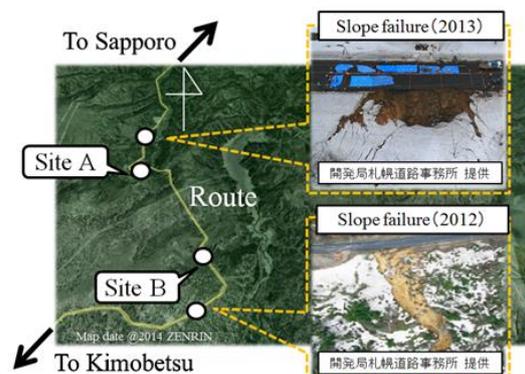


図1 災害発生箇所と現地計測箇所

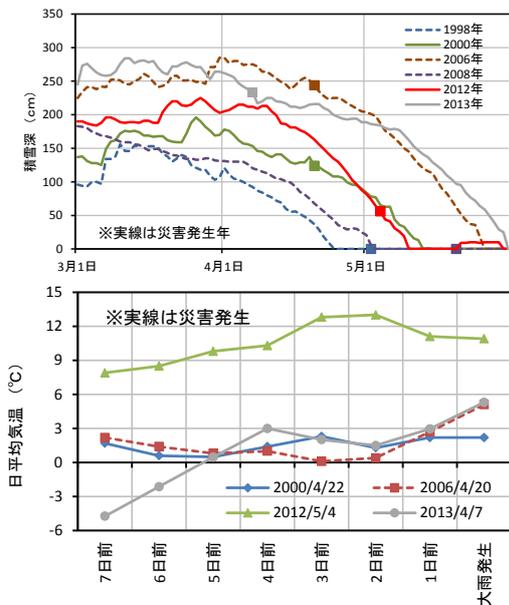


図2 積雪深（上段），気温（下段）の変化

気温により融雪が進み，地盤が融雪水で満たされ，このような中で大雨に見舞われていたことが伺える。

(2) 積雪寒冷地にある道路盛土の動態観測とその評価

前述のように，一般国道 230 号中山峠の両災害は，融雪期の降雨と融雪水により地下水位と間隙水圧が上昇したためと推測される。特に，2013 年 4 月のケースでは盛土法面の積雪が地下水浸出を妨げたとの報告もあることから，降雨や融雪水の影響を受ける盛土斜面の力学挙動を明らかにすることを目的とし，実斜面の動態観測を約 2 年間（計測期間：

2013 年 11 月 9 日～2015 年 11 月 13 日）行った。その動態観測（A 地点と B 地点 図 1 参照）では，盛土内の土壌水分と地温の変化を土壌水分計，地下水位の変動を坑内水位計により計測した。また，飽和－不飽和浸透流解析・模型実験を行い，その動態観測結果との関連を考察した。ここでは，代表的な盛土内の挙動について述べる。詳細は雑誌論文(3)を参照されたい。

図 3 は積雪降雨時の気温，降水，積雪，含水比，地下水位の変化を示したものである。現地は積雪が 200cm を大きく超える積雪寒冷地であるため，表層は未凍結地盤であると推測した。アメダス（喜茂別）のデータでは 3 月 9 日からプラスの気温が続き，積雪量は 10 日の 9 時まで減少した。一方，大二股では 9 日 20 時まで積雪量は減少している。同時期の気象・水文観測が，定山溪ダム（標高：400m）で行われている。その報告では，9 日夜遅くから 10 日午前中まで雨が降り続け，昼過ぎになると雪に変わったとされている。本研究で対象とした道路盛土は標高が定山溪より高く，大二股より標高の低い地点に位置することから，降水は雨と雪が入り混じった状態であったと推測される。A 地点では，融雪水により 3 月 10 日まで地下水位が段階的に上昇した。降水により更に上昇を助長させ，最終的に降水と地下水位のピークはよく一致している。B 地点でも融雪水により 3 月 9 日 12 時に地下水位が急激に上昇し，22 時まで地下水位が低下した。その後は 10 日 1 時になると降水により地下水位が 2m 以上まで上昇した。

一連の調査・動態観測結果から，近隣にあ

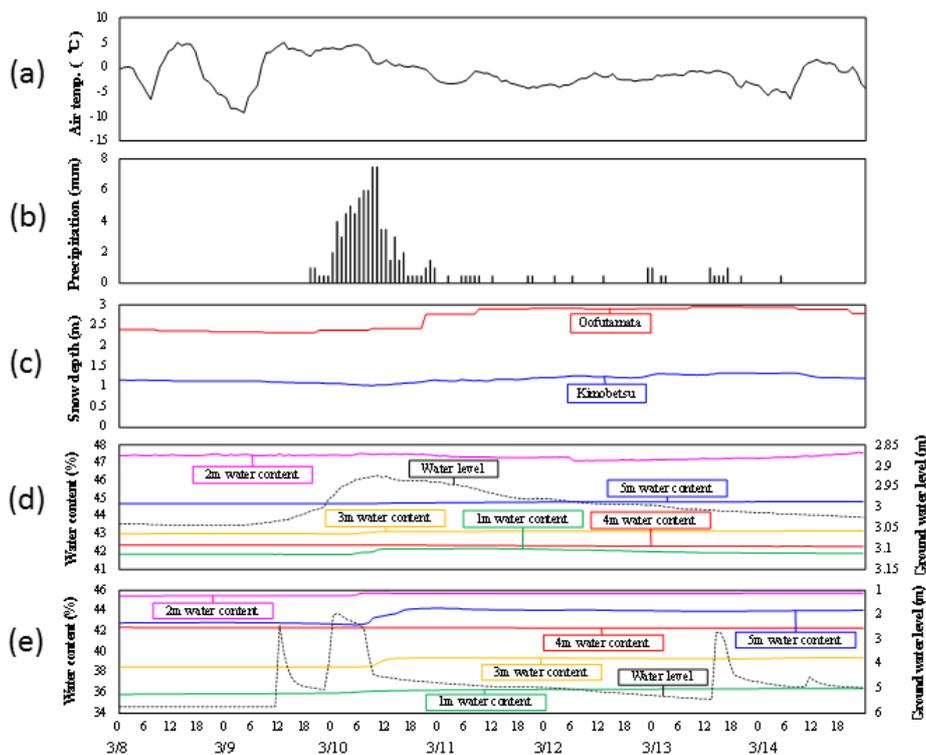


図3 積雪時（平成 27 年 3 月）の降雨：(a) 気温，(b) 降水，(c) 積雪，(d) 含水比と地下水位（A 地点），(e) 含水比と地下水位（B 地点）

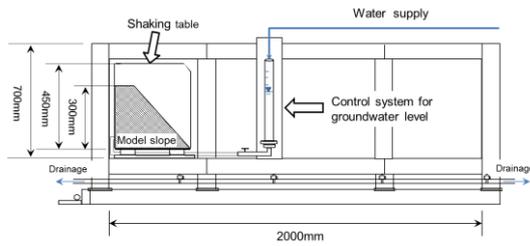


図4 試験装置

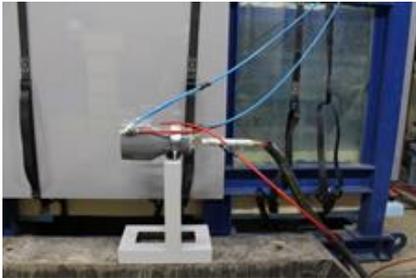


写真1 積雪再現装置



写真2 振動载荷装置

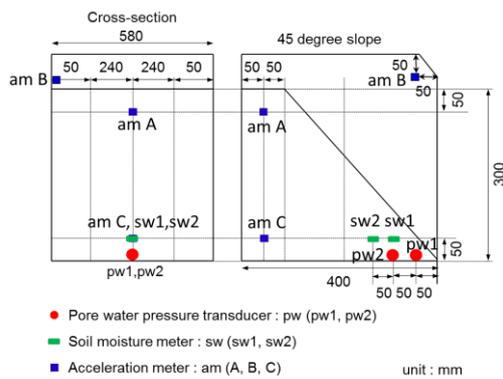


図5 模型斜面形状と計器配置位置

る定山溪ダムでは積雪時の降水後の総積雪底面流出量が総降水量の1.6倍だったため、中山峠でも盛土内への流入が多かったと推測されること、また、盛土法面の積雪・凍結層が法尻からの地下水浸出を妨げるため、積雪が多い3月10日に地下水位が大きく上昇したと結論付けた。

(3) 浸透流模型試験結果と考察

次に、国道230号中山峠の動態観測結果を参考にして、火山灰質土によって構築された道路盛土における、a)積雪状態下で形成される氷層の存在が浸透崩壊に及ぼす影響、b)地震動履歴が火山灰盛土の浸透流崩壊に及ぼす影響を、重力場の模型実験により調査した。

はじめに、a)について検討した結果について述べる。

本研究で用いた試験装置を図4と写真1に示す。模型土槽試験装置の内寸法は幅2000mm、高さ700mm、奥行き600mmであり、前面には厚さ20mmの強化ガラスが設置されている。写真1は新たに試作した積雪再現装置を示している。装置の後部にはエアジェットクーラ（冷空気発生装置）が設置されており、これに圧縮空気を供給することによって冷気を再現し、併せて、水を噴霧することにより造雪した。また、雪の量の調節が難しかったため、積雪下部に形成されている氷層はドライアイスで簡易的に再現した。試験中の間隙水圧と土壌水分量の変化を把握するために間隙水圧計、土壌水分計、加速度計およびビデオカメラを用いて、それらの変化を追跡した（図5参照）。なお、用いた試料は、支笏を噴出源とする駒岡火山灰土（ $\rho_s=2.47\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.120\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=0.759\text{g/cm}^3$, $D_{50}=0.27\text{mm}$, $U_c=46$, $F_c=35.2\sim 42.6\%$ ）である。締固め度85%（ $\rho_d=0.90\text{g/cm}^3$ ）を目標に締固め、模型斜面を作製した。振動载荷履歴は、最大荷重150kg、最大振幅 $\pm 50\text{mm}$ 、周波数0.05~5.0Hzが可能な载荷装置により与えている（写真2参照）。地下水制御装置は所定の動水勾配の下で、盛土背面から浸透流を与えることが可能になっている。なお、バルブの調整によって流入量も調整可能である。模型盛土作製後、積雪とドライアイスでその表面を凍結させた後に、盛土背面から透水係数 $1.0\times 10^{-4}\text{cm/sec}$ （ $w_0=37\%$ ）、 $1.0\times 10^{-5}\text{cm/s}$ （ $w_0=43\%$ ）の下で浸透させた。なお、各浸透速度は透水試験によって得られた透水係数の代表値を用いて設定している。また、動水勾配 i （=水位差/盛土底面長）は0.5で一定として実験を行った。振動载荷を与えた試験（検討項目b）では、はじめに繰返し振動载荷によって盛土内にせん断ひずみ $\gamma=0, 1, 2, 3, 4\%$ を発生させ、その後、盛土背面から地下水位制御装置で浸透流を与え、動水勾配を一定に保ちながら崩壊実験を行った。積雪・凍結層を与えた試験ケースならびに地震動载荷履歴を与えた試験ケースを表1と表2に示す。

凍結層無のケースにおける締固め時の初期含水比の違いによる影響をはじめに調べた（表1参照）。図6はCase2とCase4の間隙水圧の変化を示す。図より、 $w_0=37\%$ の方が $w_0=43\%$ に比べて間隙水圧の上昇が大きいことがわかる。このことは、従来から指摘されている乾燥側の含水比では、湿潤側の化含水比よりも早く崩壊する事実と一致する。図7は、Case1とCase2における凍結層有無による挙動の違いを調べたものである。凍結層斜面では、低温下であるため間隙水圧計が使用できないことから、土壌水分量の変化で地下水位の挙動を追跡した。図より、凍結層有の場合では飽和度の上昇率が高いことが分かった。特に下部に設置したsm2（底部より50mm位置）が急増している。これはドライ

表 1 試験ケース（積雪・凍結層の影響）

Test case	1	2	3	4
Sample name	Komaoka volcanic soil			
Angle of inclination, α (°)	45			
Length of base, B (mm)	400			
Dry density, ρ_d (g/cm ³)	0.9			
Initial water content (%)	37		43	
Freeze-thaw action	○	×	○	×
Coefficient of permeability(cm/sec)	1.0×10^{-4}		1.0×10^{-5}	

表 2 試験ケース（振動载荷履歴の影響）

Test case	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Sample name	Komaoka volcanic soil				
Angle of inclination, α (°)	45				
length of base, B (mm)	400				
Dry density, ρ_d (g/cm ³)	0.85				
Initial water content (%)	37				
Shear strain (%)	0	1	2	3	4

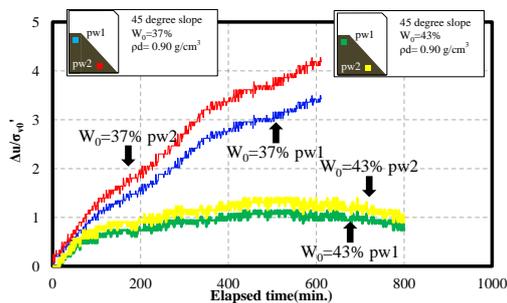


図 6 間隙水圧挙動の変化

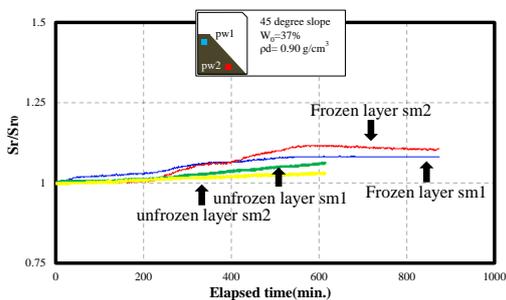


図 7 土壌水分量の変化

アイスにより盛土表面が凍結することで不透水層が形成され、浸透した水が排出されないことが原因と考えられる。次に、振動载荷履歴を与えた試験ケースについて述べる（表 2 参照）。

図 8 は、崩壊に至るまでの変形挙動を明らかにするために、崩壊時間 t_f と盛土のせん断ひずみ γ' （崩壊部）の変化を示したものである。図より、履歴無（ $\gamma=0\%$ ）の Case1 では、経過時間 493 秒から急激に変形が進行していることが明らかである。この時の間隙水圧挙動では、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_{vo}$ が 1.0 以上になっていることから、のり先部の有効応力は消失し、その結果、浸透崩壊が発生したものと推測される（図 9 参照）。なお、図示は省略するが、土壌水分値については初期段階よりほぼ一定値を示し、顕著な変化が現れなかった。これは、地下水位の影響により底部付近では飽和化が進んでおり、土壌水分量の変

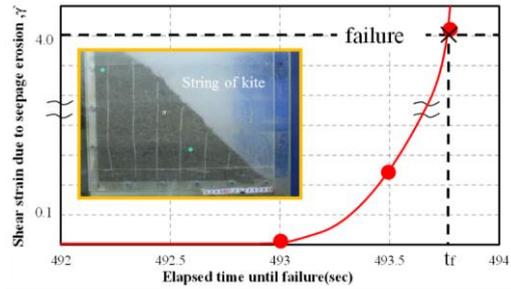


図 8 せん断ひずみの発達状況（ $\gamma=0\%$ ）

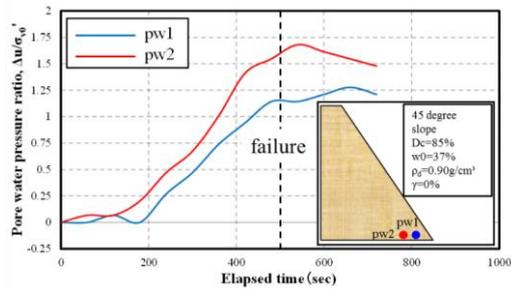


図 9 浸透流崩壊実験中の間隙水圧挙動（ $\gamma=0\%$ ）

化には反映しなかったものと考えられる。

得られた試験結果に基づいて、崩壊時間と繰返し载荷によるせん断ひずみ γ の関係を整理してみた（図 10 参照）。なお、崩壊時間 t_f は $\gamma=0\%$ の値 t_0 で正規化して示している。図より、せん断ひずみ 1% 程度でピークが現れ、その後、減少するようである。一方、一連の地震動履歴後の降雨実験（雑誌論文(5)）ならびに波の侵食実験結果（雑誌論文(2)）との比較では、浸透流崩壊の結果は γ が 1.5% 以上になると履歴無の値よりも低下した。このことから、盛土背面から浸透流があるような場合にはせん断履歴の崩壊に及ぼす影響は極めて大きいと言える。これは地震動履歴によって盛土内にクラックが発生し、パイピングが発生し易くなったことが原因と考えられる。

以上のことから、融雪期の降雨と外部からの融雪水の供給がある場合には特に注意が必要であり、また、地震動履歴の影響も無視できない。また斜面内のせん断ひずみ量の把握によって盛土の安定性が評価可能であることが示された。

(4) 浸透流によるパイピング現象と評価

このように、浸透流によって火山灰盛土は崩壊に至る可能性があることが明らかにされた。ここでは、浸透流破壊に及ぼす影響を上向き浸透流によるパイピング試験により、その発生メカニズムを工学的に評価した。

図 11 は、同火山灰試料（K soil）を用いた浸透流試験（要素試験）の結果を示したものである。締固め度は $D_c=83\%$ 、 88% と 95% である。締固め度の違いによってボーリング（有効応力が 0）に至る動水勾配 i に変化が

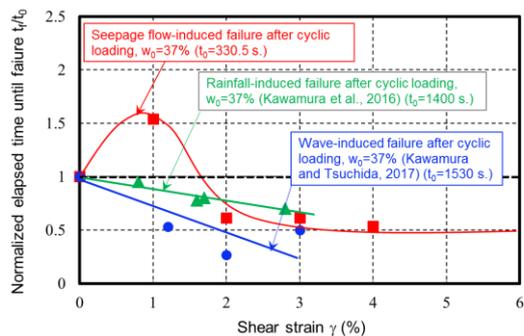


図 10 セン断ひずみ量の違いによる浸透流崩壊に至るまでの時間の変化

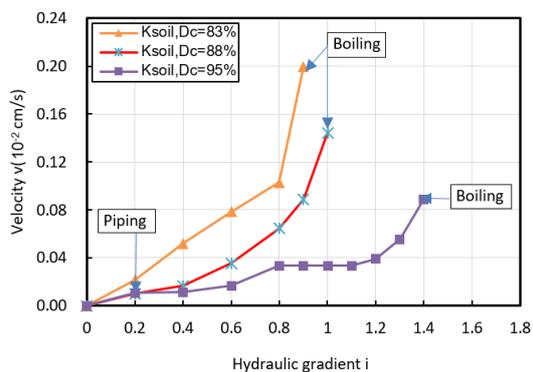


図 11 パイピング，ボイリング試験結果

現れている。得られた結果から動水勾配の範囲は0.9~1.4であった。また、細粒分の増加によってパイピングの発生に大きな影響を及ぼすことも明らかにされている。図示は省略しているが、X線CTスキヤンの画像解析より、浸透流にともなう土粒子個々の移動量を定量化し、パイピング現象のプロセスと土構造物の不安定化を導く要因も把握している(雑誌論文(1)、(4)参照)。

いずれにしても、積雪・融雪及び地震動履歴を受けた火山灰盛土の一連の浸透流モデル実験では、凍結層の存在が盛土構造物の不安定化に影響を及ぼすこと、盛土内で発生するせん断ひずみ量を定量的に評価することによって盛土の安定性を評価できることが示された。また、本研究では火山灰質土の土質特性が浸透流破壊に及ぼす影響を既往の研究成果と比較し、その特徴が併せて議論されている。詳細は、雑誌論文(1)~(5)を参照されたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- (1) D.M. Hieu, S.Kawamura and S.Matsumura: Internal erosion of volcanic coarse grained soil and its evaluation, International Journal of GEOMATE, pp.165-172, 2017. 査読有
<https://doi.org/10.21660/2017.38.70411>
- (2) 川村志麻, 土田雄貴: 地震動履歴を受けた火山灰盛土の耐波性能評価, 土木学会論文集

B2 (海岸工学), Vol.73, pp.1141-1146. 2017. 査読有

(3) 福津向基, 川村志麻, 土田雄貴: 積雪寒冷地にある実道路盛土の現地計測結果とその考察, 気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム論文集, Vol.6, No.3, pp.27-34. 2017. 査読無

(4) D.M.Hieu, S.Kawamura, S.Matsumura, L.Yunzheng: Piping phenomena of embankments constructed by volcanic soils and its evaluation, Geotechnical Special Publication, No.280, ASCE, pp.688-698, 2017. 査読有

(5) S. Kawamura, S. Miura, H. M. Dao and R. Yamada: Rainfall-induced failure of volcanic embankments subjected to cyclic loadings in cold regions, Geotechnical Special Publication, No.257, ASCE, pp.116-123, 2016. 査読有
他 4 件

[学会発表] (計 8 件)

(1) S.Kawamura and D.M.Hieu: Effect of pre-deformation by cyclic loadings on seepage flow failure of volcanic embankments, 5th GeoChina International Conference, 2018.7, (HangZhou, China) 予定

(2) 土田雄貴, 川村志麻, 畑勇志: 繰返しせん断履歴を受ける火山灰盛土の耐波性能評価, 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018.7, (高松市, 香川県) 予定

(3) 土田雄貴, 川村志麻: 波の侵食作用による盛土斜面の崩壊と安定性評価, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.7 (名古屋, 愛知県)

(4) 川村志麻, 福津向基: 積雪寒冷気候下にある道路盛土の現地計測結果とその考察, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.9 (岡山市, 岡山県)

(5) 山田亮一, 川村志麻: 凍結融解と繰返し載荷履歴を受けた火山灰質盛土の降雨時力学挙動, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015.9, (札幌市, 北海道)
他 3 件

6. 研究組織

(1)研究代表者

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: 90258707

(2)研究分担者

松村 聡 (MATSUMURA, Satoshi)
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官
研究者番号: 20748305