

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02393

研究課題名(和文)火山灰堆積地域での地震による山腹崩壊と土砂移動範囲予測手法の提案

研究課題名(英文) Prediction methods of sediment discharge areas due to slope failures caused by earthquake in volcanic ash deposited areas

研究代表者

山田 孝(YAMADA, TAKASHI)

北海道大学・農学研究院・教授

研究者番号：20333635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,300,000円

研究成果の概要(和文)：2018年の北海道胆振東部地震により厚真町で発生した斜面崩壊を対象として、地震前後のLPデータを用いて機械学習を実施した結果、事前に地上に亀裂が出現している斜面は脆弱であり、崩壊の発生の危険が高かったことが明らかになった。また、浸透流解析を実施し、地震発生時の斜面内部の水分状態を再現した結果、すべり面の保水性及びすべり面の下位に存在する層の透水性が崩壊危険斜面を抽出する際の着眼点となることが示唆された。さらに、剛体滑動モデルにより崩土の到達距離を計算し、横断方向は崩壊幅の平均値を与えることにより、滑動型表層崩壊の二次元の氾濫・堆積区域を設定する手法を作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、地震前、地震後の斜面の微地形(亀裂)に着目した機械学習による崩壊危険度評価手法、火山灰の堆積構造を踏まえた浸透流解析による斜面崩壊の箇所の抽出方法、火山灰が堆積した緩勾配斜面での斜面崩壊のメカニズム(地震動による間隙水圧の急上昇とすべり面境界付近の火山灰層の泥濘・強度低下、斜面安全率の低下)、滑動型表層崩壊による崩土の氾濫・堆積範囲の再現・予測手法を提案できた。これらの成果は、全国や海外においても火山灰が堆積した山腹斜面が地震によって崩壊した場合の土砂災害危険区域の設定(ハザードマップの作成)や対策工法の開発に大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Machine learning was conducted on the slope failures that occurred in Atsuma due to the 2018 Hokkaido Iburi East Earthquake, using pre- and post-earthquake LP data, which revealed that slopes with cracks appearing on the ground in advance were vulnerable and at high risk of slope failure. In addition, groundwater analysis was conducted to reproduce the moisture condition inside the slope at the time of the earthquake. The results suggest that the water retention property of the slip surface and the permeability of the layer below the slip surface are the key points to focus on when identifying slopes in danger of failure. Furthermore, we developed a method to establish a two-dimensional spreading and deposition area for a block sliding surface failure by calculating the reach of the collapsed soil using a rigid body sliding model (the dynamic friction coefficient was measured using field sediment samples) and giving the average value of the collapse width in the transverse direction.

研究分野：砂防工学

キーワード：胆振東部地震 斜面崩壊と崩土 亀裂 機械学習による斜面危険度評価 浸透量解析 斜面内部の水分状態 剛体滑動モデル 滑動型表層崩壊氾濫・堆積区域設定手法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1．研究開始当初の背景

豪雨による斜面崩壊とその崩土の移動については、斜面における雨水の浸透プロセスにおける間隙水圧の発生が山腹斜面を不安定化させ崩壊に至るメカニズムやその崩土が流動化して移動するメカニズムは、既往研究によってある程度明らかにされてきた。これらの現象に対しては、経験的な手法や数値シミュレーションによって、土砂移動範囲を予測することが相応の精度で可能であり、実社会でも土砂災害防止法による土砂災害危険区域の設定に活用されている(例えば、斜面崩壊：斜面法尻から斜面高の2倍の水平距離あるいは50m以内、土石流：勾配 $2\sim 3^\circ$ )。しかし、火山灰などの降下火砕物(テフラ)が堆積した山腹斜面が地震の強振動によって崩壊する現象に対しては、実態や土砂災害事例として事例的な整理はなされてきたが、斜面崩壊箇所の抽出方法、緩勾配斜面での崩壊のメカニズム、崩土が長距離移動できるメカニズムやその影響範囲の予測手法については明らかにされてこなかった。これは、豪雨による斜面崩壊の頻度は地震(特に火山地域)によるものよりもかなり大きく、これまでの研究の主体であったためである。しかし、近年は、大きな地震の頻度が増えており、2016年の熊本地震や2018年の北海道厚真町での斜面崩壊のように、甚大な土砂災害をもたらす危険のある地表変動現象として注目されつつある。

## 2．研究の目的

本研究の学術的な「問い」は、2018年の胆振東部地震などで発生した火山灰堆積斜面の崩壊とその崩土に着目し、斜面崩壊の発生危険度を微地形からどのように評価できるか、地震時の斜面内部にはどの程度の水分状態であったのか、地震動によって斜面内部の間隙水圧と斜面安定の程度はどのように変化するのか、崩れた土砂の到達範囲をどのように再現・推定するかが未解明なことである。そこで、本研究では、斜面微地形に着目した斜面崩壊の発生危険度の機械学習による評価方法、浸透流解析による地震直前の斜面内部の水分状況の推定、振動台実験による加振時の火山灰土層内部の間隙水圧と斜面安定度変化、崩土の土砂氾濫・堆積範囲の再現・推定手法を提案することを目的とする。これらのことが解明されれば、全国や海外においても火山灰が堆積した山腹斜面が地震によって崩壊した場合の土砂災害危険区域の設定(ハザードマップの作成)や対策工法の開発に大きく貢献できる。

## 3．研究の方法

2018年北海道胆振東部地震で多数の地すべりが滑動した厚真町厚幌ダム周辺の $30\text{km}^2$ を対象に、地すべりが発生した斜面の地形的特徴を、決定木を用いて求めた。説明変数として、地震前の航空レーザー測量データの解析から得た地形(勾配 方位 断面曲率 平面曲率 線状 凹地密度)、及び地質を採用した。応答変数は地すべり滑落の有無とした。一方、2016年熊本地震により被災した熊本県立野地区( $6\text{km}^2$ )では、地震亀裂の出現を表す指標として、Dense Crack Index(DCI)を提案し、DCIと地震後の斜面崩壊発生との関連を、他の説明変数(航空レーザー測量データ解析から得た地震直後の斜面勾配、平面曲率、断面曲率、CTI、斜面方位、および震源断層からの距離、PGA(本震時)、6月19日から29日までの総日雨量)とともにランダムフォレスト(RF)を用いて評価した。応答変数は、地震後に発生した表層崩壊の有無とした。

次に、2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震による表層崩壊における水の影響を検討するため、厚真町の隣接する崩壊斜面と未崩壊斜面を対象に浸透流解析を実施し、地震発生直前(9月6日午前3時)の斜面内部の水分状態を再現した。崩壊斜面の層構造は、上位から樽前a降下火砕堆積物(Ta-a:1739 A.D)、樽前c降下火砕堆積物(Ta-c:2.5 ka)、樽前d降下火砕堆積物(Ta-d:8.7-9.2 ka)、En-aローム(斜面上部では一部細粒軽石化する)、風化基岩(礫岩砂岩互層)

である。崩壊すべり面は En-a ローム基底付近である。非崩壊斜面の層構造は、上位から Ta-a, Ta-c, Ta-d, En-a ローム, En-a 軽石, クツラ火山起源の降下火砕堆積物(Kt-1:43.5 ka), 風化基岩である。テフラ層厚は崩壊・非崩壊斜面それぞれ 1.2~1.9 m, 1.1~3.2 m 程度で、斜面長はともに約 70 m である。現地で各層の不攪乱サンプルを採取し、室内試験で飽和透水係数と水分特性曲線を計測して、浸透流解析を行うモデル斜面に与えた。降雨は、2018 年 4 月 1 日以降のアメダス安平における観測値を用いた。

緩勾配斜面での崩壊が特に顕著である厚真町東和地区では、多くの崩壊は Ta-d 最下部の風化層がすべり面とされる。しかし本研究の調査地では、水を多く含んで容易に泥濁化する En-a が崩壊斜面に露出しており、さらに崩土の最下層部(旧地盤直上位層)として存在するため En-a が崩壊に大きく関わりと推察できる。そこで、高含水 En-a の地震応答を明らかにし、テフラ堆積地における地震誘因の緩勾配斜面崩壊について考察した。厚真町東和地区での典型的な斜面(斜面勾配 10°, 平滑型)において、トレンチ調査とすべり面での堆積層調査、崩壊斜面頭部から採取した試料の土質試験(湿潤・乾燥密度, 粒度分布, 自然含水比, 液性・塑性限界, 三軸圧縮試験(UU))を実施した。トレンチ調査では、崩壊斜面の堆積区域にある崩土の最上流部をトレンチ掘削した結果を再整理し、崩土の内部構造、特に旧地盤の直上位層である En-a の存在を把握した。堆積層調査では、表面が Ta-d 軽石層(赤褐色)で被覆された箇所での En-a 層の存在確認と層厚測定を実施した。土質試験では、現地調査の結果から本崩壊のキー層とした En-a 層に着目した。崩壊斜面にて En-a を不攪乱ブロックサンプリング(200 mm × 600 mm)し、実験室内で浸水させて飽和状態にした後に振動実験を実施し、地震加速度に伴う En-a 試料底面の間隙水圧変化を測定し、震度法を用いた簡易斜面安定解析を行った。

厚真町で発生した滑動型表層崩壊を対象とし、その抽出を行った。ここで、滑動型表層崩壊とは、崩土が変形せず、そのままの状態で滑落・氾濫・堆積した崩壊と定義する。崩土に残存する木の状態が立っている箇所かつバックフォーによるトレンチ調査可能な箇所を 3 か所(朝日地区、桜丘地区、東和地区(以下地区省く))を選び、それらが滑動型表層崩壊であるかどうか、「崩土の層構造の乱れ」「深さ」「体積」「幅」の変化から確認した。滑動型表層崩壊に適用する運動モデルは斜面を剛体が滑動するモデルを扱うので、計算に必要な動摩擦係数  $\mu_u$  を、飽和させ表面を攪乱させた En-a 層を用いたばねばかりによる実験にて求めた。実験方法は、縦 10cm, 横 7.3cm, 幅 1cm の金属の枠を用い、飽和させた En-a の土塊に装着し、土塊が飽和させ、表面を攪乱させた状態の En-a の上を等速運動するまでばねばかりを水平に引き続け、土塊が等速運動しているときの値を読み取った。この試行を土塊の重量を複数回変化させて行い、垂直抗力と摩擦力の関係から動摩擦係数  $\mu_u$  を求めた。得られた値を用い、滑動型表層崩壊モデルに適用することで崩土の到達距離を算出し、それぞれの地区で斜面の崩壊幅と氾濫・堆積場の平均幅をとり、比較・検討し、横方向の広がりを考慮した範囲を算出した。モデルによって得られた崩土の到達範囲の計算値と現地調査などによって得られた実測値を比較し、滑動型表層崩壊による崩土の氾濫・堆積範囲の再現手法を提案した。

#### 4. 研究成果

北海道厚真町の対象地で作成された決定木の正解率は 72.6%であり、ツリー構造からは、流れ盤の斜面にて線状凹地が密に発達していた場合、地すべりの滑落が発生しやすかったことが示唆された。一方、熊本県立野地区の対象地では、RF のモデルから、DCI は崩壊発生との関連が強く、地震後の崩壊発生場の推定に最も重要な因子であることが示された(図-1)。以上より、地上に亀裂が出現している斜面は脆弱であり、地震時からその後を通じて崩壊の発生の危険が高

かったことが、決定木およびランダムフォレストによるモデルから明らかになった。

地震発生直前の圧力水頭分布を図-2 に示す。崩壊すべり面であった En-a ローム基底付近（黒点線上）の圧力水頭は、崩壊斜面では約 0 ~ -1.5 cm である一方、非崩壊斜面では約 -40 ~ -80 cm であった。すなわち、崩壊斜面の En-a ローム基底付近のほうが高含水で、飽和に近いことが分かった。これは、崩壊斜面では En-a の下位に透水性の低い層（風化基岩）が存在することが一因と考えられる。今回の地震による崩壊のメカニズムとして、地震時に飽和条件下で土粒子構造の破碎が生じることによるすべり面液状化が指摘されている。本研究の結果から、地震時に土粒子破碎が発生する脆弱な層の存在のみならず、その下位に存在する層の透水性が崩壊危険斜面を抽出する際の着眼点となることが示唆された。

滑動型表層崩壊が発生した東和地区でのトレンチ調査では堆積区域の崩土を最上流側で掘削して内部の層構造を確認したところ、旧地盤の直上位層は En-a であった。また Ta-d などの En-a 上位層は殆ど攪乱されておらず、崩土上の樹木は倒れていなかった。堆積層調査では斜面全体を通して En-a の存在が確認できた。また、土質試験結果から、En-a は砂分 50.7% に対して細粒分 48.5(%) と殆ど差がないこと、自然含水比  $w_n=92.7(\%)$  が液性限界  $w_L=72.7(\%)$  を上回ることから、En-a は変形および流動しやすい流動粘土とみなすことができる。以上の現地・土質試験結果から、調査対象地での斜面崩壊の地震時せん断面は Ta-d と En-a 境界、En-a 内部、En-a と基岩(泥岩)境界の 3 通りの可能性があって断定には至らないが、En-a が関与していると言える。今回の地震で最大水平加速度を観測した追分観測所の地震波形を用いて振動実験を実施した(図-3)。間隙水圧は最大地震加速度近傍で急上昇し、約 3 秒遅れて最大となった。最大地震加速度  $a_{max}=1136(\text{gal})$  のとき、間隙水圧  $u=0.196(\text{kN/m}^2)$ 、最小安全率  $F_{s_{min}}=1.059$  を示した。今回の実験条件で安全率  $F_s$  が 1 を下回ることにはなかった。今回の実験条件で  $F_s$  が 1 を下回らなかった要因は幾つか考えられるが、その 1 つに斜面安定解析の対象外とする現象が発生した可能性があり、水の影響は間隙水圧  $u$  とは異なる形で現れるのではないかと考えた。まず 1 つ目に地震動による繰返しせん断を受けて En-a が軟化し、強度低下が起きることで En-a 内部がせん断された可能性がある<sup>(5)</sup>。2 つ目に En-a と基岩(泥岩)の境界に水膜が形成され、静止摩擦係数  $\mu$  が低下することですべり性崩壊が発生した可能性がある。もちろん、Ta-d と En-a の境界付近をせん断面として崩壊した可能性もまだ否定されていない。

実験により飽和させかつ攪乱状態の En-a 層の動摩擦係数  $\mu_u$  の値は 0.106 となった。この値を用いて、滑動型表層崩壊モデルにて崩土の到達距離を求めた。今回再現性の最も高い東和の崩壊を対象にし、結果を記載する。モデルによる東和の崩壊による崩土の到達距離は 94.5m となった。また実測値による到達距離は 87.7m であった。また、東和における崩壊発生場と氾濫・堆積場の幅はそれぞれ 74m であり、幅の変化はなく、横方向の広がりには斜面の崩壊幅を用いる事で再現可能であると考えた(図-4)。また、それぞれの崩壊にて斜面と堆積区域の測量を行ったところ、崩壊斜面にて En-a が残存・堆積しており、トレンチ調査によって氾濫・堆積場の崩土の底面にて En-a が確認された。以上のことから、東和における崩壊は、斜面にて En-a 層の内部で剪断が起き、En-a 層の上を En-a 層がすべり、滑動・堆積したと考えられる。すなわち、氾濫・堆積区域を矩形で表現する場合、流下距離については考察したモデル(実験で求められた動摩擦係数を使用)によって求められる崩土の氾濫・堆積長( $L'$ )、氾濫・堆積幅については、崩壊発生場の幅を用いることで相応の再現ができると考えられる。厚真町では、滑動型表層崩壊により被災した家屋の約 9 割が「流失・埋没」であり、犠牲者の全てはこの被災形態を呈する家屋で発生した。現地での崩壊滑落崖での堆積層構造と土質試験から崩土の平均的な密度や滑動深を推定し、運動モデルを作成して崩土の速度、衝撃圧を算定した結果、家屋の「流失・埋没」をもたらした崩土の衝撃

圧は、約 100kN/m 以上と推定される。

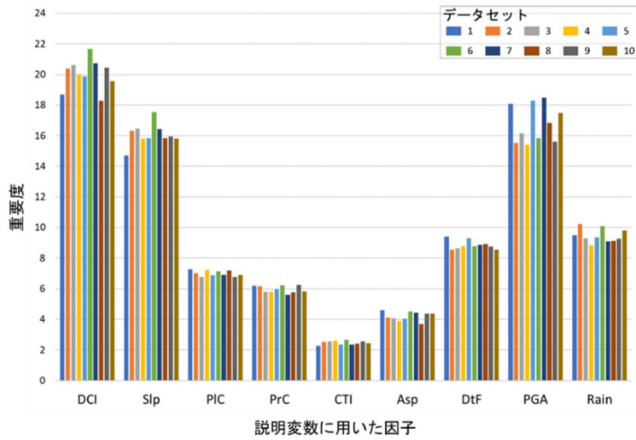


図-1 RF モデルによる各因子の地震後崩壊発生に関わる重要度

DCI: dense crack index, Slp: 斜面勾配, PIC: 平面曲率, PrC: 断面曲率, CTI: compound topographic index, Asp: 斜面方位. DtF: 布田川断層からの距離,

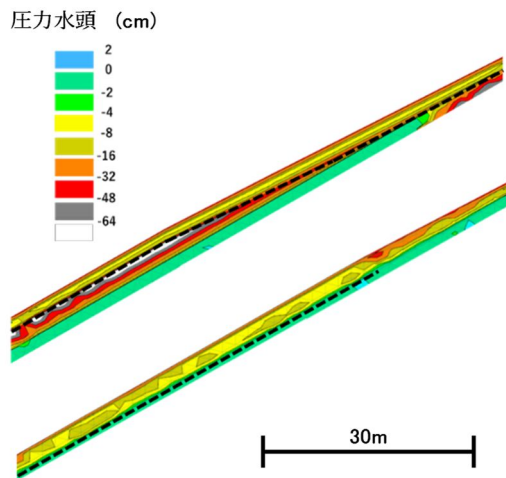


図-2 崩壊斜面(上)と非崩壊斜面(下)における地震発生直前の圧力水頭分布

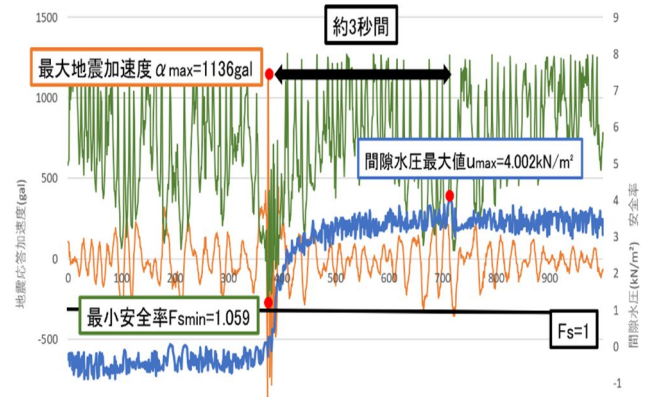


図-3 地震加速度に伴う間隙水圧と安全率の変化



図-4 東和地区における崩土の到達予測範囲 (赤四角の範囲)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Aoki, T., Katsura, S., Yoshino, T., Koi, T., Tanaka, Y., and Yamada, T.	4. 巻 Vol.5
2. 論文標題 Pressure head dynamics on a natural slope in Eastern Iburi struck by the 2018 Hokkaido earthquake,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Catastrophic Landslides and Frontiers of Landslide Science	6. 最初と最後の頁 81-86
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-60319-9_7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 武井健太, 笠井美青
2. 発表標題 北海道胆振東部地震で発生した地すべり斜面における地震前の地形的特徴
3. 学会等名 第60回 日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木稔弥, 桂真也, 厚井高志, 山田孝
2. 発表標題 透流解析に基づく平成30年北海道胆振東部地震による斜面崩壊の発生危険条件の検討
3. 学会等名 令和4年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木稔弥, 桂真也, 厚井高志, 田中健貴, 山田孝
2. 発表標題 平成30年北海道胆振東部地震により崩壊が多発したテフラ堆積斜面の降雨浸透特性
3. 学会等名 2020年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹中源弥・山田孝
2. 発表標題 平成 30 年北海道胆振東部地震で発生した緩勾配斜面崩壊に関する実験的研究
3. 学会等名 令和3年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Genya Takenaka, Takashi Yamada
2. 発表標題 Shaking table test on gentle slope failure induced by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake
3. 学会等名 5th World Landslide Forum
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤優人・山田孝
2. 発表標題 火山灰堆積斜面での地震動に起因した滑動型崩壊による木造家屋の被災形態推定手法の提案 2018年北海道胆振東部地震による事例
3. 学会等名 令和3年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 間片大地, 山田孝
2. 発表標題 地震に起因した火山灰堆積斜面崩壊による崩土の長距離移動実態の解明 - 2018年9月北海道胆振東部地震による厚真町の事例 -
3. 学会等名 令和2年度地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 笠井美青	4. 発行年 2020年
2. 出版社 北海道大学出版会	5. 総ページ数 355
3. 書名 崩壊の面積 頻度分布の特徴, 地震による地すべり災害: 2018年北海道胆振東部地震	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	桂 真也 (Katsura Shinya)  (40504220)	北海道大学・農学研究院・助教  (10101)	
研究分担者	笠井 美青 (Kasai Mio)  (80294966)	北海道大学・農学研究院・准教授  (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------