

北海道胆振東部地震による厚真町での滑動型表層崩壊による木造家屋被害の実態と被災形態の特性

遠藤優人¹・山田孝²

Actual Situation and Characteristics of Houses Damage Caused by Block Slides in Atsuma Town During the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

Yuto ENDO¹ and Takashi YAMADA²

Abstract

Block slides were responsible for ~70% of the damage to wooden houses caused by slope failures in Atsuma Town during the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake. In this study, we analyzed the topography of the area where block slides occurred, and quantified their source and deposition areas using ArcGIS. We collected photographs of the damaged houses taken by government agencies and the media to evaluate the degree of damage. Approximately 90% of the damaged houses were “washed out or buried.” All of the victims occurred in the houses exposed to the block slides exhibited this level of damage. The average density and sliding depth of soil were estimated by analyzing stratigraphy of the scarp and by conducting soil tests. The equation of motion was used to calculate the velocity and impact pressure of the block slides. The kinetic energy of the block slide that caused the “washed out or buried” of the houses is estimated to be approximately 313 kN/s or more.

キーワード：北海道胆振東部地震，滑動型表層崩壊，家屋被害形態，運動エネルギー

Key words: the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, block slide, damaged houses, kinetic energy

1. はじめに

2018年9月6日午前3時7分，北海道胆振中東部を震源とする，マグニチュード6.7，最大震度7を観測する極めて大きな地震が発生した。北海

道では，震度7の観測は史上初めてであり，気象庁はこの地震及びその後の一連の地震活動について，「平成30年北海道胆振東部地震」と命名した。震源に近い厚真町一帯には樽前山や恵庭岳などを

¹ 北海道大学農学部(現 岐阜県恵那土木事務所河川砂防課)
Faculty of Agriculture, Hokkaido University

² 北海道大学農学研究院
Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University

本稿に対する討議は2024年5月末日まで受け付ける。

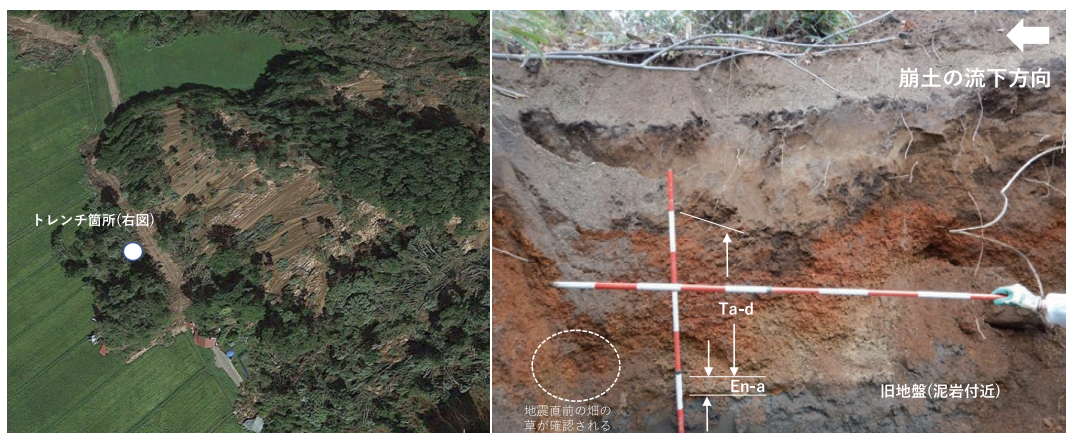


写真1 厚真町東和地区での滑動型表層崩壊の事例(左写真: Google Earth 2018年9月撮影)と不攪乱状態の崩土内部構造(右写真: 2019年9月トレンチ掘削実施)

起源とする降下火砕物が広く堆積しており、その崩壊によって多数の家屋(多くが木造家屋)が倒壊し、36名が犠牲となった。

厚真町で発生した崩壊は、明瞭な谷地形で発生したタイプと平滑な斜面で発生したタイプに分類できる(小山内・他, 2019; 間片・山田, 2020)。さらに後者は、崩土が層構造を乱さずに移動し攪乱状態で堆積したものと、特定の地質境界付近から上位の斜面土層が層構造を乱さずに滑動し、ほとんど攪乱せずに堆積したものに分類できる(間片・山田, 2020)。厚真町では、平滑な斜面で発生したタイプのうち、崩土がほとんど攪乱せずに堆積したタイプの崩壊箇所数は、家屋に被害をもたらした崩壊箇所数の約7割を占める。またそのほとんどが、従来の土砂災害警戒区域の領域を超えたところまで崩土が到達した。こうした火山灰堆積斜面での地震による崩壊の崩土の移動は、現行の土砂災害警戒区域設定の対象となる現象ではないが、当該現象に即した想定被害区域を検討し今後の減災手法を構築することは重要である。

以下、崩土が攪乱されずに滑動する崩壊を本研究では「滑動型表層崩壊」(写真1)と呼び、本研究で対象とする土砂移動現象とする。ちなみに、「滑動型表層崩壊」は、従来の崩壊地形の分類(Varnes, 1978)によれば、Translational Landslideのカテゴリー内の block slide に相当する。

滑動型表層崩壊による家屋の被害想定を行ううえで、崩土による家屋の被災形態と崩土の運動の関係をはっきりとすることは重要である。雪崩、津波、泥流や土石流、豪雨による崩壊などについては、これまで家屋の被災形態と運動エネルギーや衝撃圧の関係について研究が行われている(Perla and Martinelli, 1976; 水山・石川, 1989; 石川, 1989; 飯塚・松富, 2000; 南里・他, 2016; 山田, 2018; Thouret・他, 2020)。しかしながら、地震による滑動型表層崩壊による家屋の被災形態と崩土の運動の関係についての報告はなされていない。

そこで本研究では、厚真町で発生した滑動型表層崩壊に着目することで、滑動型表層崩壊による家屋の被災実態を明らかにし、滑動型表層崩壊の崩土の運動モデルを検討して家屋の被災形態と運動エネルギーの関係をはっきりとすることを目的とする。

2. 研究方法

2.1 研究対象地

研究対象地は、北海道勇払郡厚真町の図1-1に示す方形区域内(東経141度51分40秒~142度0分46秒, 北緯42度42分33秒~北緯42度47分2秒)である。厚真町は東西には17.3 km, 南北には32.5 kmの幅を有しており、総面積は404.61 km²である。多数の斜面崩壊が発生した厚真川本川沿

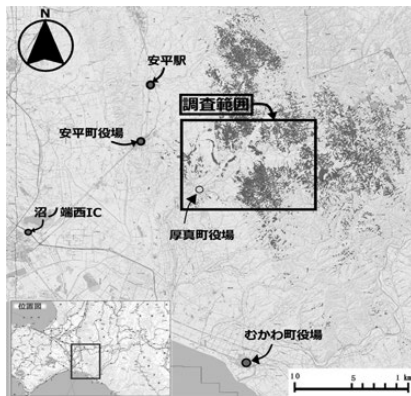


図1-1 調査の対象とした34箇所（図中の番号）の滑落型表層崩壊の位置（北海道勇払郡厚真町）

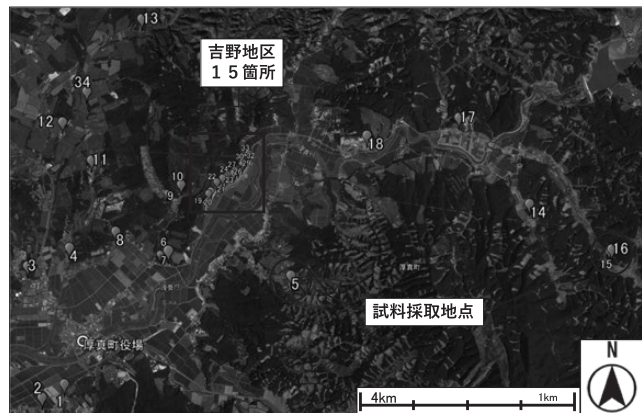


図1-2 調査の対象とした34箇所（図中の番号）の滑落型表層崩壊の位置（北海道勇払郡厚真町）

いの桜丘，東和，吉野，富里，幌内，上幌内の各地区は，夕張山地西縁南部の標高200～400 m の定高性を持った丘陵であり，尾根と河谷が直線的に延び，斜面を削る沢が互いに平行な配列を持つ（小山内・他，2019）。対象地周辺の地質は，1200～500万年前頃の砂岩泥岩互層が広く基盤として分布しており，その上を約50 km 西方の樽前火山，恵庭火山などから飛来した降下火砕物に覆われている。これらの降下火砕物は上位より樽前山起源の Ta-a, Ta-b, Ta-c, Ta-d, 恵庭岳起源の En-a などが丘陵斜面を被覆する。噴出年代は，Ta-a が1739年，Ta-b が1667年，Ta-c が2500年前頃，Ta-d が9000年前頃，En-a が約2万年前に噴出した（古川・中川，2010）。

2.2 滑動型表層崩壊箇所の選定と地形計測

Google Earth Pro を用いて，厚真町全域の2016年9月（災害発生前）と2018年9月（災害発生後）の空中写真を比較し，家屋に被害をもたらした崩壊52箇所を抽出した。次いで，その中から滑動型表層崩壊が発生した箇所を選定した結果，その7割弱に相当する34箇所が該当した。滑動型表層崩壊と判定した基準は，「崩土上の樹木が倒伏せず崩壊前の樹木の状態が維持されている」ことである。この判定基準は，筆者らによる崩土のトレンチ掘削調査（間片・山田，2020）において，崩土

上の樹木が乱雑に倒伏している崩土の堆積層構造はかなり乱れているのに対し，崩土上の樹木が倒伏していない崩土の堆積層構造はほとんど攪乱されておらず（写真1），後者の事例は滑動型表層崩壊による崩土とみなせることに基づいたものである。このように抽出した34箇所の位置を図1-1，図1-2に示す。

次に，ArcGIS ソフトを用いてこれら34箇所の対象斜面の地形計測を行った。計測項目は，①滑落崖②崩壊前の斜面下端③土砂到達点④家屋の4項目である。①，③，④の計測には，災害発生後の2018年9月に計測された0.5 m メッシュの数値標高モデル（北海道開発局提供）を用いた。②の計測には，災害発生前の2016年10月に計測された数値標高モデル（国土地理院基盤地図情報数値標高モデル）を用いた。①～④の位置を計測することにより，「斜面下端と滑落崖上端の比高」，「斜面下端から土砂到達点までの距離」，「斜面傾斜」，「斜面長」，「斜面下端から木造家屋までの距離」，「等価摩擦係数」（図4）を算出した。なお，等価摩擦係数とは，崩土の先端から滑落崖（崩壊斜面の頂部）までの水平距離（L）と鉛直距離（H）との比（H/L）で表される値であり，見かけの動摩擦係数を意味する。

2.3 家屋被災分布図の作成

北海道胆振東部地震による厚真町での住家被害は、全壊235棟、半壊335棟、一部損壊1,091棟と報告されている（厚真町・安平町・むかわ町，2021）。これらは、地震動と崩壊による被害棟数だけでなく、地震動のみによる被害棟数も含まれた数字であるが、それらの内訳は明らかにされていない。岡田（2019）のデータによると、厚真町では土砂崩れ被害を含む住家の全壊率は10%程度であるのに対し、震動被害のみのそれは5%程度と低い。また、厚真町に隣接する安平町早来地区、むかわ町鶴川地区では震度6強以上の大きな揺れにも関わらず、特定の階の全てが潰れてしまうような被害はほとんどなかったことが報告されている（岡田，2019）。本論で対象とする家屋の被害は、地震動と崩土の衝撃圧の組み合わせによるものであるが、地震動のみでどの程度家屋の強度が低下したのかは不明のため、本論では、地震動による家屋の損傷・強度低下は評価していない。

被災家屋の特定と分類は、まず空中写真とゼンリン住宅地図により被災建造物の位置を明らかにした。その後、収集した被災写真をもとに建造物の種類分けを行い、それらの位置を Google Earth Pro, Google Map にプロットすることにより行なった。厚真町で崩土による被害を受けた家屋の多くが木造家屋と想定される。厚真町での崩土により被災した家屋は11地区に点在し、このうち滑動型表層崩壊による被災が確認された地区は9地区（美里，本郷，東和，朝日，桜丘，幌里，幌内，富里，吉野）である。

次に、抽出した家屋を被災形態区分（図2）ごとに分類した。被災形態は「軽微」，「損壊」，「半壊」，「全壊」，「流失・埋没」の5つに区分した。「軽微」は、土砂が外壁などに接触したが目立った被害は確認できない状態、「損壊」は、外壁や開口部に被害が生じているものの、構造材に被害がない状態、「半壊」は、柱・梁・壁の一部が破壊される、または外壁の大幅な剥落が認められる

被災形態区分	イメージ図	胆振東部地震における被災状況写真	被災状態	被害認定区分 (内閣府, 2021)
軽微			土砂接触するが目立った被害は確認できない状態	準半壊に至らない
損壊			外壁や開口部に被害構造上の問題はなし	準半壊
半壊			柱・梁・壁の一部が破壊 外壁の大幅な剥落 修復可能な被害	半壊 中規模半壊 大規模半壊
全壊			柱・梁・壁の破壊 内部空間の著しい欠損 修復可能な被害	全壊
流失・埋没			一階部分の完全な欠損 完全な瓦礫化 基礎部のみが残存	全壊

図2 本研究での家屋の被災形態区分（軽微写真：HTB 北海道ニュース，被害のあった厚真町空撮レポートより（<https://youtu.be/GgW4RhSbp1U>）），（損壊写真：S氏提供），（半壊写真：国土交通省関東地方整備局提供），（全壊写真：厚真町役場提供），（流失・埋没写真：厚真町役場提供），（被害認定区分：内閣府，2021）

状態、「全壊」は、柱・梁・壁の破壊または内部空間の著しい欠損がみられる状態、「流失・埋没」は、一階部分の完全な欠損、完全な瓦礫化、基礎部のみが残存している状態である。内閣府(2020)によると、災害に係る住家の被害認定基準(本研究の被災形態区分に対応)では、全壊、大規模半壊、半壊、準半壊、一部損壊に分けられている。一方で、土砂災害の過去の事例からは、被災した木造家屋のうち、流出した木造家屋では高確率で犠牲者がみられること、半壊木造家屋では死者はおらず、流失木造家屋と全壊木造家屋に死者が出ていることが報告されている(小林ら, 2015; 鈴木ら, 2016)。そのため、本研究では全壊の被災形態を、「全壊」と特に高確率で犠牲者が出ている「流失・埋没」の2つに分類した。判読のために、空中写真や現地で撮影された写真(撮影者: 厚真町役場, 北海道警察本部, 北海道胆振総合振興局, 厚真町在住の住民)や報道写真を利用した。写真のみで判断できない家屋については、屋根の

形状に着目し、災害発生前後で形状に大きな違いが生じているか否かを Google Earth Pro を使って判定した。また、住民に聞き取りを行えた箇所では、住民の証言に基づき判定を行った。人的被害(死亡者)が発生した家屋の位置については、新聞やインターネットの情報を用いた。

以上の結果をもとに、家屋被災分布図を作成した。図3にその事例を示す。この図は、吉野地区(表3)の一部エリアを示したものであり、対象家屋以外の小屋や公民館なども含まれている。滑動型表層崩壊が発生する前は、15軒全ての家屋があり、斜面下端からそれぞれの家屋までの斜距離は、最短で約1.5 m、最長で約38 m、平均は約12 mと、斜面下端から近い距離に家屋が建てられていた。滑動型表層崩壊により、これら15軒の全ての家屋が「流失・埋没」の被災を受けた(流失は8軒、埋没は7軒)。流失した家屋の水平移動距離は数10 m から最大80 m 程度である。

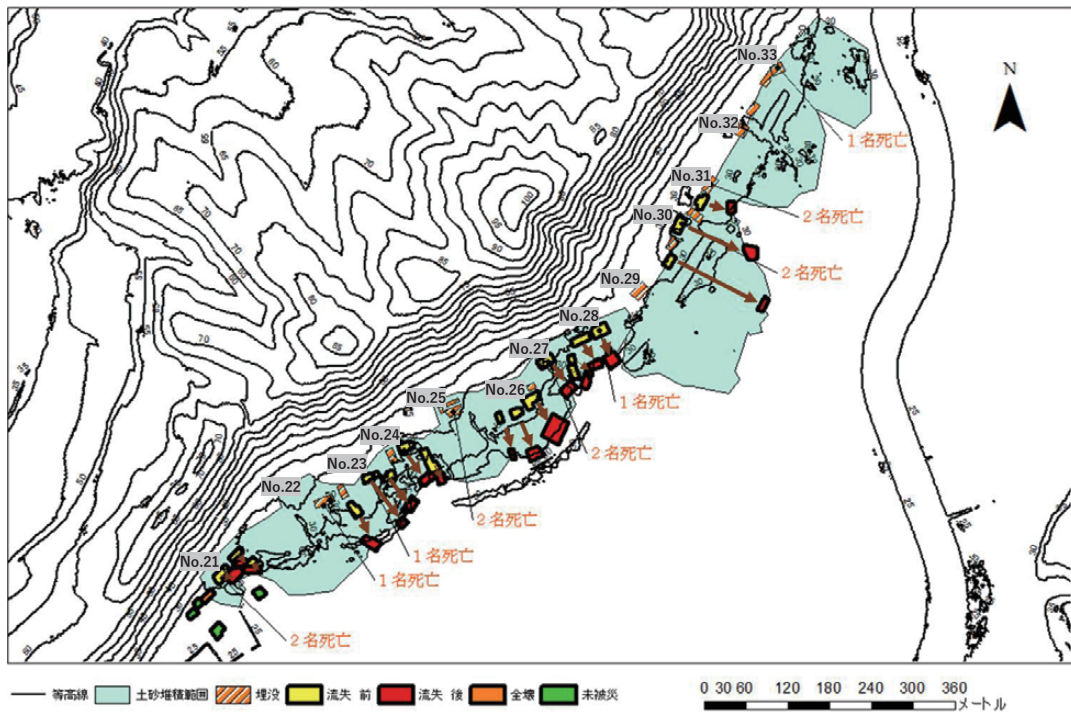


図3 木造家屋被災分布図の事例(表3に示す No.21～No.33の被災地区)

2.4 崩土の運動エネルギーの算出

2.4.1 崩土の密度の算出と滑動深の設定

土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律（以下、「土砂法」）では、告示第三百三十二号により、急傾斜地の崩壊に伴う土石等の移動と堆積により建築物の地上部分に作用すると想定される力の大きさ（単位：kN/m²）を算定式により求めることとしている。しかしながら、土砂法で対象となる急傾斜地の崩壊は、主に豪雨時の表層崩壊による攪乱・飽和した崩土であり、本研究で対象としている地震による滑落型表層崩壊（崩土は不攪乱・不飽和状態）に適用するのは不適であると思われる。また、芦田らは、崩壊土砂の運動方程式およびその解について一次元の式を提案し、実現象への適用性について報告した（芦田・江頭，1989）。それによると、崩土の流動深（ h ）と崩土の代表粒径（ d ）の比 h/d が 5～10 程度の崩土に対してはその適用性が確認されたとしている。しかし、本研究で対象としている崩土の滑動深は数 m、代表粒径は粘土やシルトサイズとすると、前述の h/d の適用性確認範囲を大きく超過している。

古賀らや仲野らは、崩土の衝撃力を流体力として取り扱っているが（古賀ら，2003；仲野・古今，1986）、本研究で対象とする崩土は剛体とみなしているため、流体力による評価は不適切であると考えられる。一方、水山らは、土石流による家屋の被災度を表す指標として流下時の土石流の単位幅、毎秒あたりの運動エネルギーに着目した（水山ら，1989）。

運動エネルギーであれば、流体のみならず剛体に対しても適用でき、家屋の被災形態との関係を議論できると考えられる。そこで本研究では、流下堆積プロセスにおいて、崩土は変形しない剛体として取り扱い、崩土が家屋に衝突する直前の運動エネルギーを算出することにより家屋の被災形態との関係を検討する。一般に剛体の運動エネルギーは、並進運動のエネルギーと回転運動のエネルギーの和で表されるが、本研究で対象としている滑動型表層崩壊による崩土は単純な滑動現象であるため、回転運動を無視し、並進運動のエネル

ギーのみで表すこととする。

単位幅、毎秒あたりの運動エネルギーは次式によって求める。

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_t \cdot h \cdot V^3 \quad (1)$$

ここで、 E ：単位幅、毎秒あたりの運動エネルギー [kJ/s]、 m ：崩土の単位幅、毎秒あたりの質量 [t/m・s]、 ρ_t ：崩土の密度 [t/m³]、 h ：家屋に衝突する直前の崩土の滑動深 [m]、 V ：家屋に衝突する直前の速度 [m/s]

崩土の密度は、以下の方法により推定した。まず、前述の滑動型表層崩壊により被災した家屋34箇所のうち、復旧工事が実施されていない等の理由により現地調査可能な14箇所を選定した。その中からアクセス可能な滑落崖が存在する13箇所（美里地区2箇所、本郷地区1箇所、東和地区1箇所、朝日地区1箇所、桜丘地区3箇所、幌里地区3地区、幌内地区2箇所）において滑落崖での層序を確認し、各層厚を計測した。ちなみに En-a、Ta-d の層厚分布と当該地震による崩壊箇所との関係を示した図（「地震による地すべり災害」刊行委員会，2020）によると、これらの13箇所は、En-a、Ta-d の50 cm 以上層厚分布のエリアに含まれている。

En-a 混じりの風化火山灰層の判定は、先行研究（「地震による地すべり災害」刊行委員会編，2020）で指摘されている層の色や構成材料の粒度の結果から特定した。ただし、鉱物分析は実施していない。また、本研究で対象とした13箇所の地区では、En-a 混じりの風化火山灰層の厚さはいずれも 5 cm 程度と薄い箇所が多く、全箇所でも En-a 混じりの風化火山灰層の双方から採土管挿入によって不攪乱土砂試料を採取することは困難であった。

現地調査を行った13箇所において斜面のすべり面表層に En-a 混じりの風化火山灰層の存在が確認された。桜丘地区の1箇所では斜面に露出したすべり面表層に明瞭な En-a 層を確認できなかったが、崩土の堆積構造を人力掘削によって調べた結果、旧地盤と崩土最下層の境界に 5 cm 厚程度

表1-1 土質試験結果 (幌内地区)

幌内地区	単位	Ta-a,b	Ta-c	クロボク	Ta-d (軽石)	風化火山灰土	En-a と En-a 混じりの風化火山灰層
土粒子の密度	t/m ³	2.821	2.774	2.702	2.692	2.603	2.748
間隙率	%	65.3	61.4	76.5	88.0	85.3	57.7
飽和度	%	34.2	38.0	63.3	75.6	68.1	96.2

表1-2 土質試験結果 (東和地区)

東和地区	単位	Ta-a,b	Ta-c	クロボク	Ta-d (軽石)	風化火山灰土	En-a と En-a 混じりの風化火山灰層
土粒子の密度	t/m ³	2.889	2.670		2.607	2.689	2.874
間隙率	%	64.3	69.9		86.0	83.2	62.8
飽和度	%	11.2	23.0		55.3	51.9	55.9

表1-3 土質試験結果 (幌内地区と東和地区の平均値)

2 地区の平均値	単位	Ta-a,b	Ta-c	クロボク	Ta-d (軽石)	風化火山灰土	En-a と En-a 混じりの風化火山灰層
土粒子の密度	t/m ³	2.855	2.722	2.702	2.6495	2.646	2.811
間隙率	%	64.8	65.65	76.5	87.0	84.25	60.25
飽和度	%	22.7	30.5	63.3	65.45	60	76.05

の En-a 混じりの風化火山灰層を確認した。

次いで、これらの13箇所のうち、斜面崩壊2箇所(東和地区、幌内地区)において、各々の滑落崖の各層から不攪乱土砂試料を採土管により採取した。他の地区(美里地区、本郷地区、朝日地区、桜丘地区、幌里地区)については、不攪乱土砂試料は採取していない。

Ta-d については、軽石分が多い層、粘土やシルトが多い風化層から別々に採土缶を用いて採取した。それらの試料を用いて土粒子密度、間隙率、自然含水比などを計測した。なお、地表面近傍の森林土壌の層については、樹木や草本等の根系の侵入によって不攪乱土砂の採取が困難であったために、Ran et al. (2020) が求めた土粒子密度の値を用いた。ここで東和地区においては、クロボクの層厚が薄く、同様に樹木の細根が密に存在していたため採土管の挿入ができず不攪乱土砂の採取ができなかった。また、飽和度が比較的小さくなっているが、露出していた断面から試料採取したためと考えられる。

前述の2箇所(東和、幌内地区)では、土粒子密度と間隙率の値に、大きな違いはなかった。一

方で前述の2箇所の距離は6 kmほど離れているが、密度・間隙率・飽和度などの土質データは大きく変わらないと考えられる。本研究では、調査箇所によってはそれぞれ層の物性が異なる可能性があることは考慮しつつ、土質データについては、代表値として2地区の土質試験結果の平均値を他の調査地に適用した(滑落崖に近づけなかったNo.17の斜面は、双眼鏡による目視観察により滑落崖での層構造は幌内地区のそれと同じと判断できたため、幌内地区の土粒子密度を用いた)。このとき2箇所の土質試験結果とそれらの平均値を表1に示した。また、崩土の密度の算出に必要となる含水率の値は、土質試験時の飽和度、間隙率、土粒子密度から求めた。

崩土の滑動深については、以下のようにして求めた。これまでの多くの調査により、対象地域のすべり面境界ゾーンについては、崩壊発生場によってTa-dあるいはEn-aの再堆積物、Ta-d直下の火山灰土および軽石混じり火山灰土といった報告がなされている(「地震による地すべり災害」刊行委員会編, 2020)。また、筆者らによる崩土の氾濫・堆積区域でのトレンチ調査の結果(例えば

表2 崩土の密度の計算結果の事例(朝日地区)

	層厚 [cm]	層割合 [%]	間隙率 [%]	飽和度 [%]	堆積土砂濃度 [%]	土粒子密度 [t/m ³]	層の密度 [t/m ³]
森林土壌 Ta-a	10.000	4.8	59.2	30.0	40.8	※2.654	1.261
Ta-a,b	45.000	21.4	64.8	22.7	35.2	2.855	1.152
クロボク Ta-b	25.000	11.9	76.5	63.3	23.5	2.702	1.119
Ta-c	10.000	4.8	65.7	30.5	34.4	2.722	1.135
クロボク Ta-c	30.000	14.3	76.5	63.3	23.5	2.702	1.119
Ta-d (軽石)	80.000	38.1	87.0	65.5	13.0	2.650	0.914
風化火山灰土 Ta-d	10.000	4.8	84.3	60.0	15.8	2.646	0.922
Ta-d (細粒化)	0.000	0.0	84.3	60.0	15.8	2.646	0.922
En-a と En-a 混じりの 風化火山灰層	0.000	0.0	60.3	76.1	39.8	2.811	1.576
En-a と En-a 混じりの風化火山灰層							
合計	210.000	100.0	77.0	52.1	23.0	2.711	1.046

※ Ran et al. (2020)

図1)では、旧地盤の直上位層はEn-aあるいはEn-a混じり火山灰土であった(間片・山田, 2020)。Ta-d, En-aのいずれも含水率は高く、特にEn-a混じりの火山灰土の自然含水率は液性限界値を超過していることが報告されている(小山内・他, 2019)。高含水率のEn-a混じりの火山灰土は繰り返しせん断によって容易に強度が低下して泥濘化する特徴を有する。地震動による繰り返しせん断によってEn-a混じりの風化火山灰層の強度が低下し、その付近を境界ゾーンとして土層が滑動し始めたとする事は可能であると思われる(竹中・山田, 2021)。

そこで、本研究では、前述の14箇所でのすべり面境界ゾーンはEn-aとEn-a混じりの風化火山灰層ゾーンであるとし、そのゾーン上端から地表面までの高さを崩壊深とし、これを崩土の滑動深とみなし、その深さのまま、家屋衝突直前まで滑動したものととした。さらに、14箇所のうち住民等から現地写真(滑落崖等、崩壊深、滑動深を判読できるもの)を収集できた3箇所については、崩壊深のデータとあわせて滑動深を推定した。

滑動型表層崩壊により被災した34箇所のうち、復旧工事などのために現地調査が困難であった20箇所については、工事前に実施された調査により計測された結果(小山内・他, 2018)や現地写真により滑動深を推定した。結果、崩土の滑動深は1.0~3.1m程度となった(表3)。

以上の結果をもとに、式(2)を用いて各層の

密度を求め、各層の単位幅・単位奥行の体積に乗じて質量を求め、これらを合計して、全体積で除することにより崩土の密度を算出した。ここで、崩土上の樹木の質量は、土塊の質量と比較すると小さいため(試算では、崩土上の樹木の質量は崩土の質量の1%程度)、本研究では考慮しない。また、崩壊発生直前の各層の飽和度は不明のため、調査時の値を採用した。

$$\rho_d = \rho_s C_s + W(1 - C_s) \rho_w \quad (2)$$

ここで、 ρ_d :各層の密度[t/m³], ρ_s :土粒子の密度[2.6t/m³], ρ_w :水の密度[1.0t/m³], C_s :土砂の容積濃度, W :飽和度

表2に事例として朝日地区での崩土の計算結果を示す。崩土を構成する各層の中で飽和度が高いEn-a層の密度は約1.7t/m³と高いが、崩土全体としては、1.0t/m³程度の値となる。このようにして求めた他の地区の崩土の密度の計算結果も、1.0t/m³程度となった。

家屋に衝突する直前の速度は、次項に示す(3)式の運動方程式により求めた。

2.4.2. 滑動型表層崩壊モデルと崩土の速度、運動エネルギーの算出

滑動型表層崩壊の崩土の氾濫堆積実態や崩土のトレンチ掘削断面での観察結果、崩土上の樹木が

あまり乱れずに林立している実態などから、崩土は、その運動中に崩土の変形や土量の増減がほとんどないため剛体として取り扱うことができ、崩土の密度は一定でかつ抵抗力としては崩土と斜面のすべり面の間の摩擦力のみ作用するとみなせる。従って、本研究で対象としている滑動型表層崩壊の崩土の運動モデルは、質点また剛体モデルが適切と判断される。崩土の質点あるいは剛体モデルについては、円弧斜面上から直線斜面上を崩土が滑るとした森脇 (1983) のモデルや地すべり土塊の運動時の見かけの摩擦係数を真の摩擦角と運動時の間隙水圧で表現した張・佐々 (1992) の改良そりモデルが知られているが、本研究で対象としている崩壊発生場・流下場・氾濫・堆積場の地形などを反映させやすい滑動型表層崩壊モデルを検討する (図 4)。厚真町で発生した滑動型表層崩壊の事例では、崩土の氾濫・堆積幅は崩壊幅に近い値を示しており、横方向の運動量変化を考慮しなくてもよいと判断し、一次元モデルで考察する。関連する先行モデル (古賀・他, 2003; 高橋・他, 1979) を参考に、上部の勾配 (θ_u) の斜面を「発生・流下区間」、下部の勾配 (θ_d) の斜面を「氾濫・堆積区間」と2つに分けて崩土の運動を考え

る。崩壊により発生した崩土は、「発生・流下区間」を滑動し、勾配変化点 (発生・流下区間と氾濫・堆積区間の境界) に達する。勾配変化点を境に速度が変化し、「氾濫・堆積区間」において距離 L' の位置まで到達して停止する。

崩土の家屋衝突直前の速度を求めるために、「氾濫・堆積区間」を滑動する崩土に着目する。図 4 に示した運動モデルにて発生・流下区間において成立する運動方程式は、次の (3) 式となる。

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta_u - \mu mg \cos \theta_u \quad (3)$$

ここで、 m : 崩土の質量 [t], v : ある地点での速度 [m/s], g : 重力加速度 [m/s²], θ_u : 滑動斜面勾配 [°], μ : 動摩擦係数

底面摩擦力はクーロン摩擦力を考える。また動摩擦係数について、現時点で実際の値は未知であるため、見かけの動摩擦係数に相当する等価摩擦係数を用いる。ここで、斜面下端速度 V_1 は以下の式で表せる。

$$V_1 = \sqrt{2gH'(1 - \mu \cot \theta_u)} \quad (4)$$

ここで、 V_1 : 斜面下端速度 [m/s], θ_u : 発

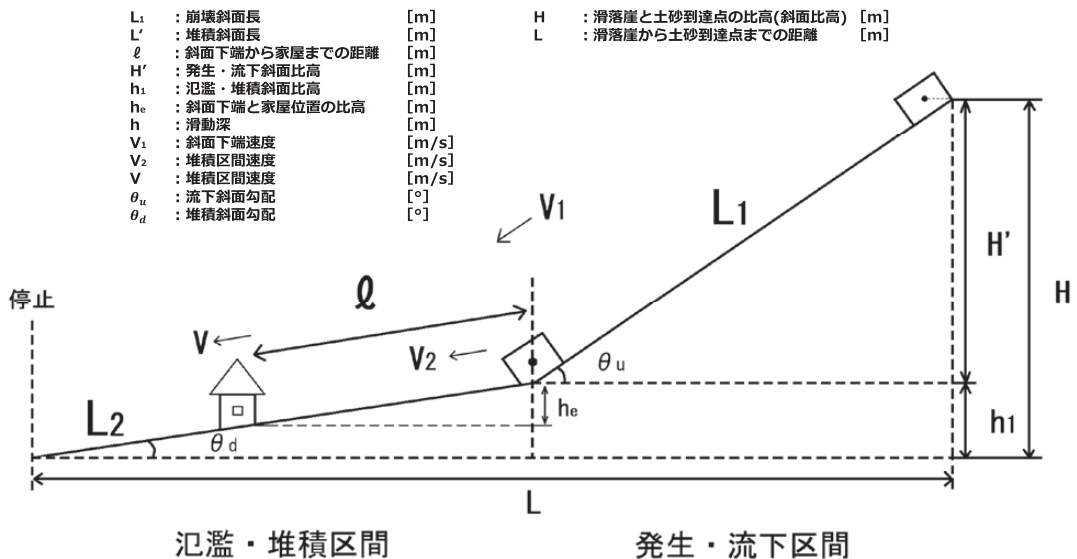


図 4 滑動型表層崩壊モデル

生・流下斜面勾配 $[\theta]$, μ : 動摩擦係数

屋の比高を h_e [m], θ_d : 氾濫・堆積斜面勾配 $[\theta]$ とすると、以下の式で表せる。

また、氾濫・堆積区間の速度を V_2 としたとき、崩土の家屋衝突直前の速度 V は、斜面法尻と家

$$V = \sqrt{2gh_e(1 - \mu \cot \theta_d) + V_2^2} \quad (5)$$

表3 滑動型表層崩壊が発生した34箇所の地形計測結果(図中の番号は図1に示す調査箇所番号と同じ)

番号	地区名	被災形態	H: 流下斜面比高 [m]	h_1 : 滑落崖から土砂到達点までの高さ [m]	h_2 : 堆積斜面比高 [m]	等価摩擦係数	θ_u	θ_d	L: 崩壊斜面長 [m]	L': 堆積斜面長 [m]	ℓ : 斜面下端から家屋までの斜距離 [m]	L'/H	層厚の確認方法
1	美里	流失	10.27	10.57	0.30	0.12	11.39	0.51	52.02	34.19	12.26	3.33	近傍の実測・現地写真
2	美里	損壊	8.82	9.48	0.66	0.17	17.27	1.44	29.72	26.23	24.18	2.97	近傍の実測・現地写真
3	本郷	流失	14.63	15.98	1.35	0.14	10.26	2.58	82.13	29.97	4.28	2.05	近傍の実測・現地写真
4	本郷	半壊	7.54	10.22	2.69	0.13	9.36	4.60	46.35	33.50	14.34	4.45	現地写真
5	東和	流失	17.94	21.31	3.37	0.11	9.88	2.09	104.53	92.56	16.62	5.16	近傍の実測
6	朝日	流失	34.42	34.92	0.50	0.15	16.29	0.24	122.68	117.16	8.17	3.40	近傍の実測値(No.7の値)を代用
7	朝日	流失	18.50	18.85	0.36	0.24	20.74	0.68	52.24	29.86	2.04	1.61	近傍の実測
8	桜丘	流失	11.83	21.16	9.34	0.21	21.61	7.71	32.11	69.59	12.51	5.88	近傍の実測
9	桜丘	流失	16.71	16.09	-0.63	0.17	17.07	-0.93	56.94	38.63	25.04	2.31	近傍の実測
10	桜丘	流失	34.12	35.17	1.05	0.25	22.61	1.06	88.76	56.72	28.03	1.66	近傍の実測
11	幌内	流失	16.85	20.64	3.79	0.15	10.90	4.00	89.07	54.37	16.13	3.23	近傍の実測
12	幌内	流失	11.44	14.86	3.42	0.10	13.26	2.10	49.88	93.25	5.97	8.15	近傍の実測
13	幌内	埋没	19.99	22.22	2.23	0.21	19.18	2.55	60.83	50.11	2.03	2.51	近傍の実測
14	幌内	埋没	36.35	37.25	0.89	0.23	18.20	0.94	116.42	54.56	13.61	1.50	近傍の実測
15	幌内	埋没	47.07	47.07	0.00	0.30	26.19	0.00	106.65	61.05	20.36	1.30	近傍の実測
16	幌内	流失	20.34	20.91	0.57	0.22	24.38	0.63	49.28	51.83	26.63	2.55	近傍の実測
17	幌内	軽微	37.30	37.38	0.07	0.52	29.31	0.77	76.20	5.44	5.39	0.15	工事前調査・遠望目視
18	富里	埋没	45.87	54.19	8.32	0.14	16.38	2.06	162.66	231.80	79.03	5.05	工事前調査
19	吉野	流失	29.85	34.42	4.57	0.20	20.18	2.82	86.51	93.00	8.98	3.12	工事前調査
20	吉野	埋没	28.90	31.72	2.83	0.17	18.19	1.68	92.55	96.59	1.54	3.34	工事前調査
21	吉野	流失	31.39	34.95	3.56	0.27	22.59	3.71	81.72	55.04	5.70	1.75	工事前調査
22	吉野	埋没	32.60	39.81	7.21	0.15	15.73	2.81	120.27	147.25	30.60	4.52	工事前調査
23	吉野	流失	35.32	40.25	4.93	0.16	16.04	2.13	127.82	132.37	5.68	3.75	工事前調査
24	吉野	流失	31.81	37.69	5.87	0.17	18.52	2.71	100.16	124.23	9.72	3.91	工事前調査
25	吉野	埋没	25.07	30.94	5.87	0.13	16.64	2.16	87.58	155.86	9.88	6.22	工事前調査
26	吉野	流失	41.97	47.15	5.18	0.16	16.41	1.88	148.54	158.22	38.05	3.77	工事前調査
27	吉野	流失	29.65	32.64	2.99	0.14	21.57	1.13	80.67	152.16	6.95	5.13	工事前調査
28	吉野	流失	35.44	39.35	3.92	0.24	19.15	3.74	108.02	59.96	3.89	1.69	工事前調査
29	吉野	埋没	45.28	49.78	4.50	0.16	20.05	1.31	132.06	196.74	27.30	4.35	工事前調査
30	吉野	流失	33.10	36.40	3.29	0.16	18.93	1.48	102.04	127.74	6.22	3.86	工事前調査
31	吉野	埋没	31.84	35.66	3.82	0.18	19.16	1.98	96.98	110.83	4.96	3.48	工事前調査
32	吉野	埋没	36.21	39.70	3.49	0.24	19.55	3.10	108.19	64.50	13.83	1.78	工事前調査
33	吉野	埋没	19.83	23.26	3.44	0.17	19.80	2.50	58.52	78.92	1.72	3.98	工事前調査
34	幌里	全壊	9.61	12.20	2.59	0.16	14.31	3.78	38.88	39.29	9.98	4.09	現地写真

このようにして得られた崩土の密度、滑動深、速度を用いて(1)式により崩土の運動エネルギーを計算した。

3. 滑動型斜面崩壊が発生した箇所での地形計測結果と家屋被災の実態

滑動型表層崩壊が発生した34箇所での地形計測結果を表3に示す。また、これら34箇所での土砂到達距離L'(斜面下端から土砂到達点までの距離)と斜面比高H'の関係を図5に示す。現行の土砂災害警戒区域の領域： $L'/H' \leq 2 \cap L' \leq 50$ mの領域である。土砂災害警戒区域の領域内に存在する箇所は2箇所(朝日地区No.6, 幌内地区No.17)あるものの、それ以外の32箇所で土砂災害警戒区域の領域を超過して崩土が氾濫・堆積したことが大きな特徴である。

家屋の被災形態判読の結果ならびに人的被害(死亡者数)を表4に示す。滑動型表層崩壊によって被災した家屋の約9割が、「流失・埋没」の被災形態である。さらに、滑動型表層崩壊による死

表4 滑動型表層崩壊による家屋被災別家屋数と犠牲者数

被災形態	戸数 [戸]	割合 [%]	犠牲者数 [名]
軽微	1	2.9	0
損壊	1	2.9	0
半壊	1	2.9	0
全壊	1	2.9	0
流失・埋没	30	88.2	25
合計	34	100	25

亡者の全てが「流失・埋没」の被災家屋で発生したことが明らかとなった。

4. 家屋被災形態別の崩土の運動エネルギー

(1)式によって算出した崩土の運動エネルギーの計算結果を表5に示す。崩土が木造家屋に衝突する直前の速度は0.7~21 m/s程度、崩土の運動開始から木造家屋に衝突までに要する時間は7~22秒程度であり、運動エネルギーは0.5~9304.4 kN/s程度と計算される。

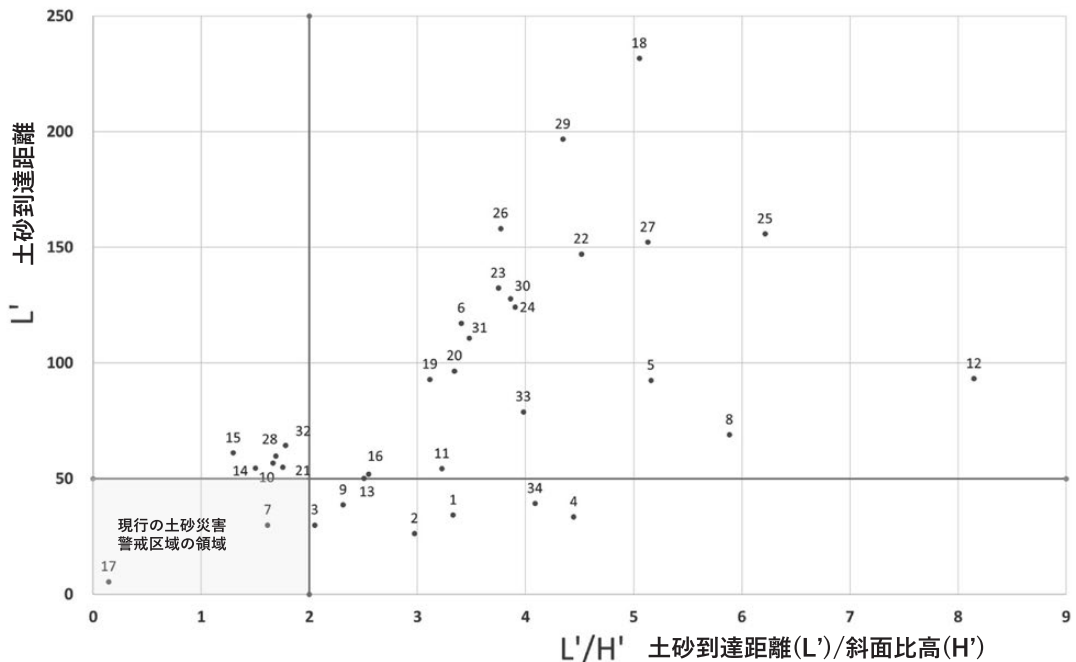


図5 土砂到達距離(L')と土砂到達距離(L')/斜面比高(H')との関係(図中の番号は図1, 表3に示す調査箇所番号と同じ)(現行の土砂災害警戒区域の領域： $L'/H' \leq 2 \cap L' \leq 50$ m)

表5 運動エネルギー算定結果（表中の番号は図1、表1に示す調査箇所番号と同じ）

番号	地区名	被災形態	滑動深 [m]	移動時の密度 [t/m ³]	斜面下端		家屋衝突直前		運動エネルギー [kJ/s]
					経過時間 [s]	速度 [m/s]	経過時間 [s]	速度 [m/s]	
1	美里	流失	1.80	0.996	11.8	8.8	1.5	7.0	312.6
2	美里	損壊	2.05	1.013	6.8	8.7	4.3	2.4	15.1
3	本郷	流失	1.80	1.044	21.5	7.6	0.6	7.1	331.1
4	本郷	半壊	2.05	1.011	16.4	5.6	2.9	4.3	80.8
5	東和	流失	1.15	1.009	18.2	11.5	1.5	10.4	650.7
6	朝日	流失	2.10	1.046	13.5	18.2	0.5	17.6	5948.7
7	朝日	流失	2.10	1.046	9.1	11.5	0.2	11.1	1518.6
8	桜丘	流失	1.15	0.996	6.2	10.3	1.3	9.3	467.2
9	桜丘	流失	2.77	0.988	9.5	12.0	2.6	7.1	488.9
10	桜丘	流失	1.65	1.069	11.0	16.2	2.0	11.5	1340.8
11	幌里	流失	2.05	1.020	19.9	9.0	2.0	7.5	445.6
12	幌里	流失	1.90	1.048	8.9	11.2	0.5	10.8	1251.7
13	幌里	埋没	1.80	0.989	9.6	12.6	0.2	12.4	1678.5
14	幌内	埋没	2.25	1.025	15.6	15.0	1.0	13.0	2506.6
15	幌内	埋没	2.27	1.011	11.3	19.0	1.2	15.5	4251.9
16	幌内	流失	2.27	1.011	6.8	14.4	2.2	10.1	1170.8
17	幌内	軽微	3.10	1.011	20.7	7.3	1.3	0.7	0.5
18	富里	埋没	1.75	1.011	15.0	21.7	4.0	17.6	4844.9
19	吉野	流失	2.00	1.011	10.5	16.4	0.6	15.6	3857.1
20	吉野	埋没	2.00	1.011	11.3	16.4	0.1	16.3	4376.9
21	吉野	流失	2.00	1.011	11.0	14.8	0.4	14.0	2777.1
22	吉野	埋没	2.00	1.011	14.0	17.2	1.9	15.3	3616.7
23	吉野	流失	2.00	1.011	14.5	17.7	0.3	17.3	5224.2
24	吉野	流失	2.00	1.011	11.5	17.4	0.6	16.7	4723.9
25	吉野	埋没	2.00	1.011	10.5	16.7	0.6	16.2	4270.8
26	吉野	流失	2.00	1.011	15.1	19.6	2.1	17.1	5045.3
27	吉野	流失	2.00	1.011	8.4	19.2	0.4	18.8	6702.0
28	吉野	流失	2.00	1.011	15.0	14.4	0.3	14.0	2748.5
29	吉野	埋没	2.00	1.011	11.7	22.6	1.3	21.0	9304.4
30	吉野	流失	2.00	1.011	11.0	18.5	0.3	18.0	5923.8
31	吉野	埋没	2.00	1.011	11.1	17.5	0.3	17.1	5089.8
32	吉野	埋没	2.00	1.011	14.2	15.3	1.0	13.5	2499.9
33	吉野	埋没	2.00	1.011	8.3	14.2	0.1	14.0	2788.4
34	幌里	全壊	1.013	1.011	9.2	8.4	1.3	7.3	198.3

木造家屋被災形態ごとの運動エネルギーと下限の運動エネルギーを図6に示す。「軽微」, 「損壊」, 「半壊」, 「全壊」については各々, 0.5 kN/s, 15.1 kN/s, 80.8 kN/s, 198.3 kN/sとなったが, 各々の対象家屋は一戸であったため, 衝撃圧の下限値は議論できない。「流出・埋没」については, その下限値を312.6 kN/sとみなした。「流失・埋没」の下限の運動エネルギーが大きな値を示すのは, 減速が小さい斜面下端から近い距離に家屋が位置していたためである。

5. おわりに

本研究により以下のことが明らかにされた。

- 1) 2018年北海道胆振東部地震によって厚真町管内では, 滑動型表層崩壊が発生した。それらの崩土の衝撃圧によって被災区域の家屋の約9割が「流失・埋没」の被災形態を呈し, 人的被害は全てその被災形態で発生した。
- 2) 滑動型表層崩壊の崩土の1次元運動モデルを構築し, 崩土の運動エネルギーを算出した。今回の災害で顕著であった「流失・埋没」の運動

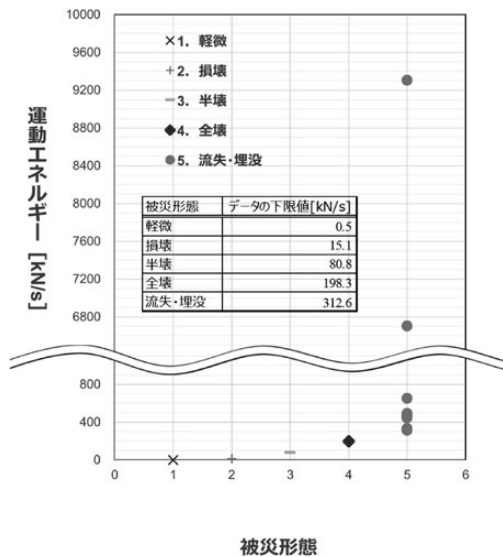


図6 木造家屋被災形態別の崩土の運動エネルギー

エネルギーは約313 [kN/s] 以上と推定される。

3) 地震による滑動型表層崩壊については、本研究で示した運動エネルギー算出方法により、家屋が流出・埋没する範囲を簡易な手法で推定することができると思われる。

地震による斜面崩壊の崩土の発生は、突発的であるために事前の家屋外への避難や自宅などでの垂直避難等が非常に困難となる。このような災害による被災を回避するためには、崩土の到達範囲、到達時間、運動エネルギー等の情報をもとに、各家屋での被害形態を事前に検討し、「流失・埋没」の区域等からの移転による土地利用形態の改善や斜面崩壊対策工事などのハード対策による斜面崩壊リスクの低減が必要となる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道開発局建設部の方々には地震後LPのデータを頂きました。さらに、厚真町役場、北海道警察本部、北海道胆振総合振興局、厚真町在住の嶋正吉様からは、災害発生当時の貴重な写真を提供頂きました。

また、現地調査の際には、住民の方々から当時の木造家屋被害状況に関する貴重な情報を頂きま

した。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小山内信智・海堀正博・山田孝・笠井美青・林真一郎・桂真也・古市剛久・柳井清治・竹林洋史・藤浪武史・村上泰啓・伊波友生・佐藤創・中田康隆・阿部友幸・大野宏之・武士俊也・田中利昌・小野田敏・本間宏樹・柳井一希・宮崎知与・上野順也・早川智也・須貝昂平：平成30年北海道胆振東部地震による土砂災害，砂防学会誌，Vol.71，No.5，pp.54-65，2019.
- 2) 間片大地・山田孝：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，砂防学会研究発表会概要集，pp.383-384，2020.
- 3) Varnes, D.J.: Slope movement types and processes, in Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., Landslides-Analysis and control: National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176, pp.11-33, 1978.
- 4) Perla, R. I. and Martinelli, M. Jr.: Avalanche handbook. Agriculture Handbook, Vol.489, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, pp.74-90, 1976.
- 5) 飯塚秀則・松富英夫：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集，第47巻，pp.381-385，2000.
- 6) 水山高久・石川芳治：土石流による家屋の被災度，新砂防，Vol.42，No.1，pp.22-25，1989.
- 7) 石川芳治：山地小流域からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京大大学学位論文，pp.1-125，1989.
- 8) 南里智之・山田孝・笠井美青・丸谷知己：十勝岳山麓大正泥流の到達時間・被災度の情報を加えた災害実績図，砂防学会誌，Vol.69，No.1，pp.12-19，2016.
- 9) 山田孝：土石流による木造家屋の破壊限界評価，平成30年度砂防学会発表概要集，pp.633-634，2018.
- 10) J.-C.Thouret・S.Antoine・C.Magill・C.Ollier: Lahars and debris flows: Characteristics and impacts, Earth-Science Reviews 201, pp.1-42, 2020.
- 11) 古川竜太・中川光弘：樽前火山地質図1：30,000，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2010.
- 12) 厚真町・安平町・むかわ町北海道胆振東部地震記録誌作成委員会：平成30年北海道胆振東部地

- 震記録誌, pp.8-9, 2021.
- 13) 岡田成幸：北海道胆振東部地震にみる積雪寒冷地住宅の強靱さと新たな問題, 消防防災の科学, No.138, pp.22-29, 2019.
 - 14) 内閣府：災害に係る住家の被害認定基準運用指針, 2021年3月, https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r303shishin_all.pdf, 2022年4月17日.
 - 15) 小林秀行・宇田川真之・田中淳：緊急避難行動における垂直避難の有効性についての研究, 平成25年度伊豆大島土砂災害を事例として, 地域安全学会梗概集, No.36, pp.33-36, 2015.
 - 16) 鈴木優貴・岡本あゆみ・山田孝：土石流に対する垂直避難行動の実態と垂直避難有効区域, 平成28年度砂防学会発表概要集, pp.354-355, 2016.
 - 17) 構造法令研究会：土砂災害防止法 建築物の構造規制マニュアル, pp.179-181, 三協法規, 2006.
 - 18) 芦田和男・江頭進治：崩壊・土石流の発生と土砂災害の危険範囲, 1988年7月島根・広島豪雨災害の調査研究(研究代表者 芦田和男), 文部省科学研究費(No.63115045), 突発災害調査研究成果, No.B-63-2, pp.8-21, 1989.
 - 19) 古賀泰之・呉耀華・門間敬一：崩土の衝撃力に関する1次元モデル(その1), 第38回地盤工学研究発表会, pp.2149-2150, 2003.
 - 20) 仲野公章・右近則男：砂質崩土の衝撃力に関する実験, 新砂防, Vol.39, No.1(144), pp.17-23, 1986.
 - 21) 「地震による地すべり災害」刊行委員会編：地震による地すべり災害, 2018年北海道胆振東部地震, pp.37-39, p.44, pp.62-68, 2020.
 - 22) Ran Li・Fawu Wang・Shuai Zhang: Controlling role of Ta-d pumice on the coseismic landslides triggered by 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, Landslides, Vol.17, pp.1233-1250, 2020.
 - 23) 竹中源弥・山田孝：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, 砂防学会研究発表会概要集, pp.2-021, 2021.
 - 24) 森脇寛：円弧斜面上を滑べる崩壊土塊の運動について, 新砂防, Vol.36, No.3(130), pp.10-16, 1983.
 - 25) 張得・佐々恭二：中国の酒勒山(Sale Shan)地すべりの運動機構について, 京都大学防災研究所年報 第35号 B-1, pp.95-112, 1992.
 - 26) 高橋保・吉田等：土石流の停止・堆積機構に関する研究(1), 京大防災研究所年報 第22号 B-2, pp.1-14, 1979.
 - 27) HTB北海道ニュース, 被害のあった厚真町 空撮レポート, <https://youtu.be/GgW4RhSbp1U>, 2022年4月17日.
- (投稿受理：2021年11月1日
訂正稿受理：2023年2月20日)

要 旨

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による家屋被災において、滑動型表層崩壊によるものはその約7割を占める。そこで、滑動型表層崩壊の発生場、崩土の流下・氾濫・堆積場の地形を ArcGIS によって解析した。また、行政機関や報道機関などが撮影した家屋被災写真を収集し、家屋被災の程度を把握した。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」である。犠牲者の全てはこの被災形態を呈する家屋で発生した。さらに、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、運動エネルギーを算定した。家屋の「流失・埋没」をもたらした崩土の運動エネルギーは、約313 kN/s 上と推定される。