

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属	役職
	<small>まるたに</small> 丸谷 <small>ともみ</small> 知己		北海道大学	名誉教授
②技術研究 開発テーマ	名称	大規模地震とそれに伴う地盤の劣化に起因する連鎖複合型土砂災害の発生機構と対策		
③研究経費 (単位:万円)	平成29年度	平成30年度	令和元年度	総合計
	※端数切り捨て。 1,955万円	1,717万円	1,322万円	4,994万円
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)				
氏名		所属・役職 (※令和2年3月31日現在)		
小山内信智		政策研究大学院大学 教授		
山田孝		北海道大学 教授		
笠井美青		北海道大学 准教授		
桂真也		北海道大学 助教		
古市剛久		北海道大学 学術研究員		
藤田正治		京都大学 教授		
堤大三		京都大学 准教授		
竹林洋史		京都大学 准教授		
宮田秀介		京都大学 助教		
堀口俊行		防衛大学校 准教授		
小杉賢一朗		京都大学 教授		
中谷加奈		京都大学 助教		
正岡直也		京都大学 特定助教		
笹原克夫		高知大学 教授		
内村太郎		埼玉大学 准教授		
伊藤和也		東京都市大学 准教授		
藤本将光		立命館大学 准教授		
平松晋也		信州大学 教授		
福山泰治郎		信州大学 助教		
海堀正博		広島大学 教授		
井良沢道也		岩手大学 教授		
地頭菌隆		鹿児島大学 教授		
権田豊		新潟大学 教授		
鄒青穎		弘前大学 助教		
田口岳志		秋田大学 助教		

⑤研究の目的・目標（様式砂防-1、砂防-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）

平成28年熊本地震など近年頻発する大規模な地震により多種多様な土砂移動現象が発生し、甚大な土砂災害をもたらしている。強い地震動に見舞われた地域では、亀裂の生成や土層構造の破壊といった地盤の劣化が発生し、地震後も長期にわたって影響を及ぼすと推測される。このような地盤劣化に伴う様々な土砂移動プロセスは、単独で起きることは少なく、連鎖的に繋がり複合型の土砂災害（連鎖複合型土砂災害）を発生させることが多い。大規模地震が地盤に与える影響を地形学、水文学、力学の多面的アプローチにより解明し、これに起因して連鎖する崩壊、土石流、地すべり、落石等のプロセスがどのようなタイプの土砂災害を生起するか判別することは、危険な箇所の判定および適切な砂防施設の配備にとって、また警戒避難体制の確立にとって喫緊の課題である。

そこで本テーマでは、大規模地震による土砂移動、大規模地震による地盤の劣化、大規模地震後の降雨による土砂移動それぞれについて総合的な調査・実験・解析等を行う。これにより、土砂移動や地盤劣化のメカニズムを明らかにし、地震や地震後の降雨による土砂災害の発生危険箇所や時期、土砂の到達範囲等を予測する際の基本的な考え方や着目すべき要因等を提示することを目的とする。

⑥研究成果

本テーマでは、上記の目的・目標を達成するため、地形学、水文学、力学の多面的アプローチにより調査・実験・解析を行い、大規模地震による土砂移動プロセスの解明と危険斜面抽出のための調査手法開発、大規模地震による地盤劣化の斜面安定性への影響評価、大規模地震後の降雨が土砂移動に及ぼす影響評価と土砂の再移動予測システムの開発を行った。以下、研究成果を記す。

1. 大規模地震による土砂移動プロセスの解明と危険斜面抽出のための調査手法開発

1.1 大規模地震による土砂移動現象の特徴と調査方法

1.1.1 大規模地震による崩壊の発生機構と深い地下水が関与する崩壊の発生危険斜面抽出手法の開発—熊本地震—

熊本地震の際、阿蘇地域では深い地下水が関与した規模の大きな土砂移動現象が生じた。この発生機構を明らかにし、渓流水や湧水の流量、電気伝導度（EC）の水文調査から深い地下水が関与する崩壊発生の恐れのある流域や斜面を抽出する調査法を提案した。まず、渓流水ECが高くて基底比流量が多い溪流は地形的流域界を越えて地下水が集中している流域として抽出する。次に、抽出された流域内で湧水の分布等を調査して地下水が集中して湧出している斜面を特定する。阿蘇地域では、地下水が集中している流域として、カルデラ壁239溪流から北東側に位置する22溪流が、中央火口丘群70溪流から西側に位置する7溪流が抽出された。基底比流量が大きい溪流では、地震により崩壊した土砂が溪流に入ると流動化して下流に土石流災害を引き起こす恐れがある。また、湧水が多い斜面では、地震で地下水排水システムが破壊されると地下水圧が上昇して斜面が大規模に崩壊する恐れもある。さらに、地下水が集中している斜面脚部の崖錐堆積物は常に飽和しており、崖錐斜面が地震で崩壊するとその土砂が流動化して広範囲に被害を及ぼす恐れがある。抽出された深い地下水が関与する崩壊の恐れがある流域や斜面において、下流に保全対象がある個所では地下構造や地下水状況に関する詳細な調査が必要である。

1.1.2 大規模地震による崩壊発生場の地形特性—熊本地震および北海道胆振東部地震—

熊本地震と胆振東部地震による斜面崩壊の発生場を解析したところ、熊本地震では傾斜角が 35° 以上で起こりやすく、傾斜角が大きくなるにつれ起こりやすさも増大し、凸部で崩壊が起きやすい傾向が見られた。これらは地震動の増幅の影響を受ける地震時崩壊の典型的な特徴を示していると言える。一方、胆振東部地震では、熊本地震と比較して、 $20\sim 35^{\circ}$ の緩勾配でも崩壊が起こりやすく、凹部でありながら比較的湿潤度の低い斜面での崩壊も多いという傾向が見られた。これは、多くの崩壊のすべり面となった樽前d降下火砕物（Ta-d）下部の粘土化した部分においてせん断破壊により発生した過剰間隙水圧が崩壊に寄与していると考えられることを踏まえると、凹部で周囲よりは水が集まりやすくTa-dが風化しやすい、また飽和しやすい斜面において崩壊が起こりやすかったことが原因と考えられた。

1.1.3 大規模地震後に崩壊が発生した斜面の地形的特徴—中越地震—

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震（震度7）発生により、斜面崩壊が特に多かった新潟県長岡市（旧山古志村）の芋川流域を調査対象とした。地震後において空中写真と航空レーザー測

量データを活用し、Arc GIS ver10.4を用いて地震発生後の二次的崩壊発生斜面の地形的特徴を中心に検討を行った。解析をおこなったのは地震時（H16年）に発生した崩壊1110個、地震翌年（H17年）に発生した崩壊866個、2年後（H18年）に発生した崩壊1897個、7年後（H23年7月新潟・福島豪雨災害時）に発生した崩壊788個である。検討結果は以下の通りである。

①地震後に発生した二次的な崩壊のほとんどは、地震から2～3年以内に発生していた。すなわち、地震動により緩みが生じるなど不安定化した斜面の大半は、その後2～3年程度以内の間に崩壊に至っていると考えられる。②二次的な崩壊の規模は地震時の崩壊に比べ小さい。③二次的な崩壊の勾配は地震時の崩壊に比べ緩やかであった。④二次的な崩壊は地震時の崩壊地と隣接して斜面中腹・下部に拡大するものが多くみられた。⑤地震による崩壊の残存した不安定土砂が再移動するケースも見られた。⑥芋川流域では地震により発生した崩壊地と、翌年の崩壊地は、尾根や遷急線に分類される凸型斜面での崩壊地がやや優勢な点が共通している一方で、地震から2年後の崩壊地では、遷緩線や谷などの凹型斜面での割合がやや大きくなっている。崩壊斜面の上部には谷地形や集水地形が多くみられ、崩壊地の形状が沢地形に沿って斜面下方に縦長のものが多いことから、崩壊の発生には地下水の集中が強く関係しているといえる。

1.1.4 大規模地震とその後の降雨による斜面崩壊の拡大—ネパール・ゴルカ地震—

2015年に発生したネパール・ゴルカ地震(Mw7.8)による崩壊が集中したトリスリ川沿い斜面において、以下のことが分かった。地震直後の雨による崩壊では地震の崩壊地での拡大10例、新規崩壊4例、崩壊地からの土石流発生1例があり、2017年では地震の崩壊地での拡大3例、新規崩壊11例があった。地震直後の雨による崩壊は2017年の結果に比べ二次的な崩壊の例が多い。それらは地すべり地移動体内で発生するケースが見られ、地下水の供給されやすい場所での拡大が推定される。遷急線付近から発生していた崩壊地の形状をみると、スプーン状にえぐれたような形のものが多いが、これは地震により崩壊地に出現した亀裂が地震後の降雨によって亀裂が拡大、崩壊に至る可能性が示唆された。また、2017年の崩壊は新規崩壊が多く、地すべり滑落崖付近で発生するケースが見られた。

1.1.5 大規模地震による地すべりの発生機構と崩壊源周辺の斜面変状—羽後津軽地震—

1704年（宝永元年）に発生したM7.0の歴史地震によってできた津軽十二湖地すべりや崩山の西側斜面において、以下のことが分かった。地すべり移動体は、北側と南側二つのブロックから構成される。北側のブロックには、流山状の小丘や圧縮リッジや末端肥厚部の地形が分布する。また、西北西方向へ伸びる舌状小尾根地形が存在することから、地震に加え降雨の影響で地すべりが流動化した可能性を示唆している。南側のブロックには、陥没や東北東方向の分離崖が見られ、末端部には圧縮帯とされる末端肥厚部や南北方向に伸びる圧縮リッジも見られる。そこから推定される運動形態はスライドに該当する。一方、崩山の西側斜面では、重力変形が見られ、斜面下部が切断されることがその原因の可能性がある。

1.1.6 複合型土砂災害の特性とその力学的特性—鳥海山周辺の地震—

鳥海山北部で2019年3月に発生した大規模土砂災害に焦点をあて、被災後の地震動や降雨、積雪・融雪による複合型土砂災害の特徴について地質的、地形的、力学的視点を併せて検討した。その結果、融雪や降雨の連鎖的イベントが土塊移動などの変状に影響を及ぼしていることが明らかとなった。また、震度4程度の地震動では変動がみられなかったが、その後の降雨による変動に影響を及ぼしている可能性が示された。さらに、天徳寺シルト岩は乾湿の繰り返しにより多数の割れ目が発生し細片化することから、風化しやすい傾向であることが明らかとなった。

1.1.7 火山性地質の地震動によるすべり面の液状化メカニズムの解明および非火山地域との比較

2016年4月14日および16日に起きた二度の最大震度7を記録した熊本地震、および、2018年9月6日に起きた北海道胆振東部地震(最大震度7)の比較から、流動性の高い土砂移動現象が多発する要因を検討した。その結果、強震動の継続時間が異なったことが大きな違いを生む原因で、200gal以上の揺れが10秒前後以上、または、400gal以上の揺れが5秒程度以上続くことが必要であると思われた。

また、両現地とも、膨潤性粘土鉱物のハロイサイトの含有が顕著で自然含水比の高い層があり、その層自体が地震動によって液状化に近い挙動をし上部の土塊ごと地すべり的な挙動をとったものと思われた。なお、ハロイサイトは一度乾燥すると膨潤性が失われるので、常に高含水状態が保たれた場であることが必要条件であるといえる。また、いずれも活火山地帯であり比較的最近の噴火活動による噴出物が風化し粘土化して流れ盤の層構造を形成していたことも要因である。

また、1976年以後に起きた主な地震についてはアメダス観測値から求めた地震発生時の実効雨量値は最大でも90mm以下と大きくはなく、降水の影響は無い条件下であったと言える。非活火山地帯でも地震動による流動性の高い土砂移動現象が起きる場合があるが、いずれも湛水しやすい谷埋め盛土

層などの土層構造のところであり、すべり面液状化が発生したことによるものと思われた。

1.2 大規模地震による土砂移動現象のプロセス

1.2.1 地震動の加速度を考慮した斜面崩壊発生プロセスの解析

地震動の加速度を考慮した斜面安定解析を実施した。その結果、地震による斜面崩壊の解析をStrem tubeによる領域分割法によって得られたエレメントを対象として実施することにより、ある程度妥当な結果を得ることができた。また、2018年9月に北海道胆振東部地震によって発生した斜面崩壊を対象に同様の解析を行った。対象流域は、小さな溪流の上流端部分が複数箇所表層崩壊を起こした厚真町幌内地区の小流域である。その結果、地震動が大きかった時間帯に数秒のずれをもって複数箇所の崩壊が別々に発生したことが示唆された。

1.2.2 地震による崩壊土砂の流動化・土石流化の特性の解明

(1) 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

厚真町で発生した山腹斜面の表層崩壊は、明瞭な谷地形の上流斜面で発生したタイプと平滑斜面で発生したタイプに大別される。そこで、そのタイプについて、質点系の滑動モデルが適用できるとして、崩土の長距離移動特性を調べた。その結果、斜面崩壊の多くが崩壊斜面の勾配が30度未満、30度以上にかかわらず、現行の土砂災害警戒区域の領域から外れて長距離移動したことが明らかとなった。また、等価摩擦係数が小さいほど流下比が大きくなる傾向があること、滑動タイプの崩土の方が流動タイプのものよりも大きな流下比を示す場合があることなどが明らかにされた。

(2) 土石流・泥流化した崩土の流動特性の解明

平滑斜面の代表例として厚真町吉野地区、谷地形の代表例として厚真町高丘地区で発生した土砂移動現象について、数値シミュレーションを実施した。平滑斜面である厚真町吉野地区では、斜面裾部に多くの家屋が存在し、斜面崩壊発生後約6秒で土砂が家屋に到達した。一方、谷地形である厚真町高丘地区では、斜面崩壊発生後約150秒で谷出口から家屋等が存在する平野部に流出し氾濫した。これによって、平滑斜面と谷地形で異なる避難方法および土砂災害対策を検討する必要性が示された。

1.2.3 個別要素法による斜面土層の流動化手法の提案とその考察

熊本県・山王谷における土石の移動における立木の効果について水粒子を適用した個別要素法を用いて検討を行った。その結果、立木を100本配置した時は、一気に立木がなぎ倒された。また、立木がないときよりは、土石流の広がりが少ないが、保全地域にあたる下流部全体に土砂が広がった。一方で、立木を350本配置した時は、土石流に直で衝突している立木がなぎ倒されているが、木が横たわっているだけで、礫材を抑え込んでいる。このことから、立木は350本程度連続して立っていると土砂災害において、立木における土砂流下の抑止効果があることが明らかとなった。

2. 大規模地震による地盤劣化の斜面安定性への影響評価

2.1 地盤劣化が見られた斜面の地形特性の解明および劣化した斜面の分布を広域的に把握する技術の開発

2.1.1 地震による劣化斜面および地震後の崩壊危険斜面を広域かつ迅速に把握する手法の開発

2016年の熊本地震、また地震後の降雨によって崩壊が多発した、阿蘇山カルデラ西壁に位置する立野地区(2 km²)を対象に、地震前、地震直後、地震から4か月後のLPデータを解析した。その結果、地震で線状地形が集中して出現した箇所では、3×3 m範囲での斜面勾配のばらつきが、地震直後には2度以上増加していたことを明らかにした。このばらつきの増加を利用し、斜面の線状地形の集中度を表す指標であるDCI (Dense Crack Index) を提案した。WoE (Weights of Evidence) 法を用いて、DCIと地震後に発生した崩壊との関係性を評価したところ、DCI値が高い (= 線状地形が集中して出現) 斜面ほど、崩壊発生のおッズが高かったことが分かった。またDCIを考慮し、斜面勾配、曲率、TWI (Topographic Wet Index) とともに地震後の崩壊危険度をWoE法より推定したところ、DCIを考慮せずに他の地形因子だけ用いたケースよりも、崩壊の危険がある斜面を精度よく抽出できたことが、ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線によるAUC (Area under Curve) 値を用いた検証で明らかになった。

2.1.2 曲率を用いた崩壊斜面及び亀裂の地形的特徴の整理・分析

地震後の亀裂発生実績の現地調査および空中写真の判読から、亀裂が尾根や溪岸斜面の肩、道路に面した法面の肩に集中していること、5m-DEMで求めた平面曲率および断面曲率が亀裂発生場の抽出に利用できる可能性があることを示した。また、地表被覆の少ない時期の空中写真判読と現地踏査を行うことで、効率的に亀裂の分布実態を把握し、亀裂の密度や面積率を示した。亀裂幅、亀裂深さの時間変化を把握するために、崩壊跡地上方の尾根にある4ヶ所の亀裂で、地震発生から742日後に標識

杭を設置し、1、224日後まで杭間距離や亀裂幅、深さを実測した。この間、杭間距離はほとんど変化がみられず、引っ張りによる開口部の変位は進行しなかった。一方、亀裂深さは最大17.6%減少し、亀裂幅は最大+45.2 %増加し、時間経過とともに亀裂幅は拡大し、深さは浅くなる傾向が見られた。これらの成果は、リモートセンシング手法による亀裂の迅速把握や、地震後の降雨浸透過程と斜面安定の変化を計算する際、亀裂の集中発生域や面積率を与えるのに寄与すると考えられる。

2.2 地震による浸透特性・土質強度の変化が豪雨時の地下水発生・斜面安全率に及ぼす影響に関する数値シミュレーションによる定量的評価

2.2.1 地震前後の地下水位変動解析に基づく大規模地震が地すべり斜面安定性に与える影響の評価

地震後に過去に経験した規模を下回る降雨であっても斜面崩壊が発生するプロセスについて検討した。まず、熊本地震の前後において地すべり地で観測された地下水位を詳細に分析した。その結果、地震動の影響を受けた後、斜面の上部や中部においては概して地下水位が低下し、斜面の下部においては地下水位が上昇する傾向がみられた。さらにこれらの地震前後の変化は、多くの地点において地震後3年が経過しても継続していた。次に、以上の知見に基づいて斜面安定解析を実施した。その結果、斜面下部は、斜面下方の土圧による支持が得られにくいいため崩壊危険度が相対的に高い部位だと考えられ、この部位における地下水位の上昇は、斜面の上部・中部で地下水位が低下した状況下であっても、斜面の最小安全率を低下させる可能性が高いことが示された。さらに、斜面下部で局所的な崩壊が発生すれば、土圧の開放によって、連鎖的に斜面中部・上部の崩壊が起きることが推察された。このようなプロセスを想定した場合、地震後の降雨による斜面崩壊の発生危険箇所、規模、時期、土砂の到達範囲等を予測するには、地震後の地下水挙動の正確な把握が必須であることが指摘された。

一方、解析を行った1地点では、地震後に見られた地下水位の増加傾向が年を追うごとに小さくなり、地震後3年を経過した時点では地震前の状況に戻る様子が検出された。地下水位の観測体制を整備してこのような事例に関する知見を蓄積していくことは、地震後に一旦引き下げた警戒避難基準を見直す場合の科学的根拠を提供することとなり、重要であると考えられた。

2.2.2 大規模地震による亀裂の生成や土質強度の変化を踏まえた地震後の斜面安定性の評価

大規模地震の発生により生じた斜面変状の一つとして位置づけられる開口亀裂に着目し、熊本地震時に表層崩壊が多発した阿蘇地域を対象として、大規模地震により生じた開口亀裂の実態を明らかにするとともに、これらの開口亀裂が斜面の安定性や崩壊規模に及ぼす影響を定量的に把握した。さらに、平成30年北海道胆振東部地震により崩壊が多発した厚真川流域内より不撓乱状態で採取した供試体を用いた一面せん断試験結果を用いて、地震時に斜面に作用した加速度が斜面の安定性に及ぼす影響や低下した斜面の安定性の回復に要する期間を明らかにした。

2.2.3 分布型モデルによる崩壊・土石流発生危険度評価における地震の影響度の解明

分布型の降雨流出モデルと斜面安定解析を組み合わせた崩壊・土石流発生予測モデルを阿蘇地域に適用し、H24年7月の豪雨、H28年7月の豪雨、その他の降雨イベントの際に発生した崩壊・土石流の実績と、モデルによる崩壊・土石流の発生予測結果が一致するよう、降雨イベント毎に最適なパラメータを算出した。H28年の地震の前後で、それらのパラメータを比較することにより、地震が崩壊・土石流の危険度に及ぼした影響、具体的には流域スケールでの地盤強度の低下の度合いを評価した。また、各対象地の地震の加速度の大きさとモデルのパラメータCの地震後の低下量は、概ね比例する関係があることが明らかとなった。

3. 大規模地震後の降雨が土砂移動に及ぼす影響評価と土砂の再移動予測システムの開発

3.1 大規模地震後の降雨が土砂移動に及ぼす影響評価

3.1.1 地震による崩壊土砂が再移動する地形条件の解明および再移動性の評価手法の開発

熊本地震による崩壊（一次移動）土砂とその後の降雨による二次移動について解析したところ、一次移動堆積域より上部斜面から新規・拡大崩壊土砂が到達する（外部影響あり）と、一次移動の堆積条件に関係なく94%が二次移動し、さらにその90%は一次移動堆積域の域外へと二次移動していた。外部影響がない場合、二次移動するのはわずか30%であった。この場合、ガリー等表面侵食の影響が大きいと考えられ、一次堆積土砂が凸形状を示すと地表流の影響を受けにくくなるなど一次堆積土砂の表面侵食の影響の受けやすさに関して地形的条件の関与は考えられるものの、二次移動発生の直接的な要因については堆積域より上部斜面の表面侵食による影響が大きいものと推測された。以上の成

果を踏まえ、地震時の崩壊・堆積土砂の二次移動の危険性を評価するフローを提示した。

3.1.2 地震前後の降雨による土砂移動の発生と土砂災害警戒情報の見直し

阿蘇地方を対象に解析雨量と土砂移動現象の発生状況を整理し、多数の降雨指標の組み合わせから解析雨量メッシュごと、土砂移動現象を発生させた降雨イベントごとに、熊本地震後のCLの引き下げ率と、地震後CLの引き上げ方法を検討した。地震により大きな加速度に見舞われた地域では、いずれの降雨指標の組み合わせで見ても、地震直後は地震前と比べて極めて小さい降雨で土砂災害や土砂移動現象が発生していた。これらをCLで捕捉しようとした場合、地震前のCLを横軸方向に0.5～3.5割まで引き下げる必要があり、現行の7～8割と比較しても大きく引き下げる必要があったことが分かった。このような地域でも、地震2か月後には地震直後よりも大規模な降雨（横軸方向5.5～10割）でないと土砂災害は発生しておらず、CLを地震前に近づけることが可能であった。こうしたCLの経時的な回復は土質強度の回復によるものと考えられた。降雨実績をベースに月ごとにCLを経時的に引き上げる手法も提案し、本地震に適用したところ、地震後2ヶ月で地震前の7.5～10割までCLを戻すことが可能であった。しかし、この時点で10割まで戻すことができなかった地域においては、それ以降は2年9か月を経てもCLをそれ以上戻すことはできず、土質強度の回復等を考慮した引き上げ方法を検討する必要があることが示唆された。

3.1.3 地震により亀裂が入った斜面の降雨浸透に伴う崩壊の発生機構の検討に基づく不安定度の評価手法の確立および斜面の損傷の程度による降雨時の崩壊しやすさのモデル化

熊本県阿蘇市の石地区において、阿蘇山外輪山頂部の、熊本地震により亀裂の入った斜面における降雨浸透と、それに伴う斜面の変動を計測し、地震により劣化した斜面の降雨に対する安定性を評価する。斜面の変形については、地表面50cmまでアンクル杭を打ち込み、そこに傾斜計を設置してアンクル杭の傾斜変動を計測した。そのうち上記の斜面下部の、亀裂周辺の傾斜計AK4、5、6の計測結果を検討する。これらのうちで、特にAK5は亀裂に囲まれた浮島のようなところに設置されている。また傾斜計設置個所の土壌を垂直方向に掘り、深さ10cm、30cm、50cmとアンクル杭の埋められている深さの範囲において、山中式土壌硬度計を用いて土壌硬度を計測した。これを土のせん断強度を表す指標とした。

2019年のAK4、5、6の計測結果を見ると、AK4とAK6は傾斜変動が小さいのに対して、AK5は特に5-6月の傾斜変動の変化が大きい。ただし谷側でなく、逆に山側に倒れこむような挙動である。その後も山側に倒れこむような傾斜が進む。各傾斜計の設置位置における深さ方向の土壌硬度を見ると、深さ10dmにおいては、AK5の土壌硬度が明らかに小さい。深さ30cm、50cmと深くなるにつれてAK4、5、6の土壌硬度の差異は小さくなるが、全体的にAK5の土壌硬度が低い。つまり地震動によりせん断強度が小さくなった部分が、その後の降雨浸透に伴う変形が大きいということが示唆される。これにより地震後の傾斜計による、降雨浸透に伴う斜面の変形の計測により、斜面の中の強度低下部を推定することができることが示された。

3.2 土砂の再移動予測システムの開発

流域の水・土砂動態シミュレーションモデルにSiMHISを用い、2016年の熊本地震に伴う阿蘇カルデラの崩壊後の崩土の二次移動特性について白川および黒川流域を対象として検討した。その結果、立野付近と上流に湧水点を持つ河道において特に土砂の流出率が高いという結果が得られた。SiMHISは降雨流出と土砂移動が流域スケールで同時に解析できるものであり、地震発生時の土砂二次移動による土砂災害が危険な流域をあらかじめ抽出することができる。地震後は、早急に生産土砂の堆積分布を調査することが第一で、その崩土の堆積分布のデータに対してSiMHISにより堆積土砂の二次移動特性を解析すれば、土砂災害の危険が高まる降雨条件などを知ることができる。

以上の研究成果を踏まえ、地震や地震後の降雨による土砂災害の発生危険箇所や時期、土砂の移動範囲等を予測する際の基本的な考え方や着目すべき要因について提示するとともに、今後さらに検討が必要と考えられる項目や、本研究成果を今後砂防行政に活用していく上で必要な視点・データ整備等についても整理し、活用可能性を念頭においた総合的な取りまとめを行った。

⑦研究成果の発表状況・予定

<論文> 計19本

- Hiroshi TAKEBAYASHI, Masaharu FUJITA et al.(2017): Two layer numerical analysis model of mud flow, International Symposium and Exhibition on Hydro-Environment Sensors and Software, Madrid, Spain.
- 竹林洋史・藤田正治(2018) : 2016年4月熊本地震時に発生した山王谷川の土石流の流動特性, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.5, I_1093-I_1098.
- Saitou, H., Katsura, S., Kasai, M., Marutani, T. et al.(2018): Geologic and topographic features of slope failure sites in the Aso caldera wall induced by the 2016 Kumamoto earthquake, Symposium Proceedings of the INTERPRAEVENT 2018 in the Pacific Rim: 117-122
- Nakatani, K., Miyata, S., Fujita, M. et al.(2018): Advanced Hazard Information and Methods for Appropriate Evacuation during Sediment Disasters, Proceedings of INTERPRAEVENT2018 in the Pacific Rim, 327-335.
- Shangning Tao, Taro Uchimura et al.(2018): Features of elastic wave propagation in a slope surface with different exciter energy, Proc. of The 7th China-Japan Geotechnical Symposium, 311-315.
- Hairani, A., Miyata, S. et al.(2018): Spatially distributed evaluation of initiation of mass erosion, Proceedings of 21th IAHR-APD Congress, 1139-1144.
- 谷本進・海堀正博ほか(2018): 2016年4月の熊本地震によって発生した特異な土砂移動現象についての考察、第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集、(公社)土木学会西部支部、pp. 161-166.
- 渡邊輝嗣・桂真也ほか(2018) : 平成28年熊本地震前後の阿蘇地域における土砂移動現象発生時の各種降雨指標値の比較, 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集,151-156
- 谷本進・海堀正博ほか(2018): 地震によって発生する特異な土砂移動現象についての研究、環境科学研究、広島大学大学院総合科学研究科紀要II、vol. 13、pp. 41-52.
- 竹林洋史(2018) : Numerical simulation of debris flow on the basis of two dimensional continuum body model、国際雪・雪崩シンポジウム2018, ニセコ, 北海道.
- Osanai, N., Yamada, T., Katsura, S., Furuichi, T. et al.(2019): Characteristics of landslides caused by the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, Landslides 16(8): 1517-1528, doi: 10.1007/s10346-019-01206-7.
- Hürlimann, M., Miyata S. et al.(2019): Debris-flow monitoring and warning: review and examples, Earth-Science Reviews, 199, Article 102981.
- 小山内信智・海堀正博・山田孝・笠井美青・桂真也・古市剛久・竹林洋史ほか(2019) : 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, p.54-65
- 笠井美青(2019) 地表粗度指標を用いた最適化ホットスポット分析による活動的な地すべり斜面の抽出, 地すべり学会誌56-3,115-123
- 石川新, 竹林洋史, 藤田正治(2019) : 北海道胆振東部地震によって発生した泥流の流動特性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.5, I_865-I_870.
- 立石龍平, 堀口俊行ほか(2019) : 回転円筒実験における土石流中の流木偏析現象に対する個別要素解析, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 821-834.
- L. Wang, T. Uchimura, K. Sasahara et al.(2019): Stability monitoring of post-earthquake slope failure using multi-point tilt sensors, 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 5621-5629
- Takebayashi H. and Fujita, M. (2020): Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model. Geosciences, 10, 45.
- Aoki, T., Katsura, S., Yamada, T. et al.(accepted): Pressure head dynamics on a natural slope in Eastern Iburu struck by the 2018 Hokkaido earthquake, Proceedings of the 5th World Landslide Forum.

<国際会議、学会等における発表> 計50本

- 竹林洋史, 藤田正治 : 2016年熊本地震による山王谷川の土石流災害, 平成29年砂防学会研究発表会概要集, p.320-321, 2017.

- ・地頭菌隆：最近の土砂災害の特徴と防災，鹿児島地方気象台，講演，2017.10.18
- ・地頭菌隆：大規模土砂災害を引き起こす土砂移動現象について，国土交通省 土砂災害防止法に基づく緊急調査研修会，講演，2017.10.31
- ・地頭菌隆：最近の大規模土砂災害の特徴と対策，国土交通省 大規模土砂災害発生時の緊急調査手法に関するスキルアップ研修会，講演，2017.11.30
- ・地頭菌隆：渓流水・湧水を活用した大規模土砂災害の予測，鹿児島大学「水」シンポジウム，講演，2017.12.8
- ・地頭菌隆：平成29年7月九州北部豪雨による土砂災害の特徴と対策，斜面防災対策技術研修会，講演，2018.2.19
- ・地頭菌隆：最近の土砂災害の特徴と防災，NPO法人かごしまGIS・GPS技術研究所 防災・減災対策セミナー，講演，2018.4.24
- ・野中慎介・藤本将光ほか：地震の影響を受けた盛土斜面における降雨時斜面安定性に関する実験的考察，第52回地盤工学研究発表会，930
- ・野中慎介・藤本将光ほか：平成29年度砂防学会研究発表会，Pa-10
- ・笹原克夫ほか：熊本地震で多数の亀裂が生じた斜面における傾斜変動，第56回日本地すべり学会研究発表会概要集,144-145,2017.8
- ・地頭菌隆：九州で発生した土砂災害を調査して，砂防と治水 51-2，2018.6.20
- ・梅谷涼太，桂真也ほか：熊本地震による崩壊土砂の斜面上堆積と二次移動発生要因，平成30年度砂防学会研究発表会概要集：509-510
- ・斉藤はるか，桂真也ほか：阿蘇カルデラ壁における平成24年7月九州北部豪雨による斜面崩壊発生箇所の地形・地質要因，平成30年度砂防学会研究発表会概要集：591-592
- ・渡邊輝嗣，桂真也ほか：平成28年熊本地震前後における土砂移動現象発生時の各種降雨指標の分析，平成30年度砂防学会研究発表会概要集：683-684
- ・林 一成・井良沢道也ほか（2018）：2008 年岩手・宮城内陸地震後に発生した斜面変動の分析，平成30年度（公社）砂防学会研究発表会
- ・宮本祐成・地頭菌隆ほか：阿蘇カルデラにおける渓流水・湧水を活用した崩壊予測，平成30年度砂防学会研究発表会，2018.5.16
- ・清崎淳子・地頭菌隆ほか：水文データを活用した崩壊予測－火山性地質を例に－，平成30年度砂防学会研究発表会，2018.5.16
- ・笹原克夫ほか（2018）：熊本地震により損傷を受けた自然斜面における亀裂の拡大－阿蘇市の石地区の事例－，平成30年度砂防学会研究発表会
- ・土佐信一（2018）：熊本地震により損傷を受けた自然斜面における降雨時の変形挙動の計測，平成30年度砂防学会研究発表会
- ・村上智哉，小杉賢一朗，正岡直也，地震動による土壌の保水性・透水性の変化が降雨流出に及ぼす影響，平成30年度砂防学会研究発表会
- ・竹林洋史，藤田正治：豪雨時に発生した近年の橋梁災害，平成30年砂防学会研究発表会概要集，p.25-26，2018.
- ・土佐信一（2018）：熊本地震で損傷を受けた自然斜面における亀裂の拡大と変動計測，第57回日本地すべり学会研究発表会
- ・地頭菌隆：最近の土砂災害の特徴と防災，防災・減災対策セミナー2018（NPO法人かごしまGIS・GPS技術研究所），2018.4.24
- ・地頭菌隆：火山地域における大規模崩壊の予測と警戒避難対応，九州地区森林技術者講習会（日本技術士会，森林・自然環境技術者教育会），2018.11.9
- ・宮本祐成・地頭菌隆ほか：阿蘇カルデラにおける渓流水・湧水を活用した崩壊予測，平成30年度鹿児島県気象研究会，2018.11.27
- ・Hayashi, S., Osanai, N., Yamada, T., Katsura, S., Furuichi, T. et al.: Landslides caused by the 2018 Hokkaido Eastern Iwate Earthquake, Japan Geoscience Union Meeting 2019, HDS09-07.
- ・深澤真聖・井良沢道也ほか（2019）：大規模地震後に崩壊が発生した斜面の地形的特徴，令和元年度（公社）砂防学会研究発表会
- ・梅谷涼太，桂真也ほか：平成28年熊本地震による崩壊土砂の堆積要因とその後の降雨による二次移動要因，2019年度砂防学会研究発表会，P-030

- ・齋藤はるか，桂真也ほか：数量化II類を用いた大規模地震が降雨による斜面崩壊発生場の特性に与える影響評価，2019年度砂防学会研究発表会，P-083
- ・宮本祐成・地頭菌隆ほか：阿蘇カルデラ壁における渓流水・湧水を活用した崩壊予測，令和元年度砂防学会研究発表会，2019.5
- ・林真一郎，桂真也ほか（2019）：土砂移動現象発生時刻の調査を踏まえた熊本地震前後の土砂移動現象発生時の各種降雨指標値に関する分析，2019年度砂防学会研究発表会
- ・中智昭，堤大三ほか：地震により発生する斜面崩壊の新たな解析手法の開発，令和元年砂防学会研究発表会概要集，p.549-550，2019.
- ・石川新，竹林洋史，藤田正治：地震動が泥流の流動特性に与える影響，令和元年砂防学会研究発表会概要集，p.501-502，2019.
- ・金指和将，権田豊：分布型表層崩壊モデルによる地震が土質強度に与えた影響の検討，2019年度砂防学会発表会概要集，p.585-586，2019.
- ・石川丈瑛・井良沢道也ほか（2019）：大規模地震後に崩壊が発生した斜面の地形的特徴，令和元年度第24回東北森林科学大会
- ・地頭菌隆：渓流水・湧水から土砂災害を予測する，鹿児島の水を追いかけて，南方新社，64-82，2019.4
- ・地頭菌隆：渓流水・湧水を活用した土砂災害予測法の開発，西部地区自然災害資料センターニュース，No.61，3-10，2019.9
- ・地頭菌隆：近年の大規模土砂災害と防災研究，全国都市問題会議文献集，129-135，2019.11
- ・天野祐一朗・地頭菌隆ほか：湧水を活用した地下水型崩壊発生の警戒避難対応，鹿児島県気象研究会，2019.11
- ・佐藤芽吹，田口岳志，井良沢道也ほか：連鎖複合型土砂災害の視点からみた鳥海山土砂災害の特徴，2019年度 土木学会東北支部技術研究発表会概要集CD-ROM,2019.
- ・Kanezashi, K., Gonda, Y.: Evaluation of the effect of an earthquake on the soil strength of the slope using a distributed-landslide conceptual model, Proceedings of 9th International Workshop on Multimodal Sediment Disasters in Tsu, Mie, Japan 17-19 October, p.32-33, 2019
- ・鄒青穎・檜垣大助ほか（2020）：大規模地震による地すべりの発生機構と崩壊源周辺の斜面変状：青森県津軽十二湖地すべり地を例にして，令和2年度（公社）砂防学会定時総会並びに研究発表会.
- ・Tsou, C.-Y., Higaki, D. et al.(2020): Possible explanations on the formative processes of the Tsugaru-Juniko landslide, northern Japan, European Geoscience Union, NH3.8.
- ・Tsou, C.-Y. (2020) : Slope movements in humid, tectonically active regions: Cases in the Japan's Shirakami Mountains and Nepal Himalaya. International workshop on snow cover changes and its modeling over Northern Eurasia (Hirosaki).
- ・石川丈瑛・井良沢道也ほか（2020）：大規模地震後に崩壊が発生した斜面の地形的特徴，令和2年度（公社）砂防学会研究発表会
- ・山口柊生・笠井美青，阿蘇カルデラ西壁を対象にした平成28年熊本地震後の崩壊危険斜面の評価.令和2年度砂防学会
- ・Yamaguchi, S., Kasai, M. Incorporating ground cracks in the estimation of post-seismic landslide susceptibility. Geomorphometry 2020 (開催は2021), Perugia, Italy (extended abstract accepted)
- ・天野祐一朗・地頭菌隆ほか：湧水流量を活用した地下水型崩壊発生の警戒避難対応，令和2年度砂防学会研究発表会，2020.5
- ・森田悠井・小杉賢一朗・正岡直也，地震による地下水挙動の変化が斜面崩壊に与える影響，令和2年度砂防学会研究発表会，2020
- ・松永一慶，桂真也（2020）：多数の降雨指標を用いた平成28年熊本地震後の警戒避難雨量基準の引き下げに関する検討，2020年度砂防学会研究発表会

⑧研究成果の社会への情報発信

<マスメディア> 計45件

2018/09/07

- ・NHK NEWSWEB 土砂崩れの現場を専門家が調査
- ・北海道新聞 「土石流に似た現象」専門家分析 土砂崩れ、もろい火山灰地質原因？
- ・朝日新聞 土砂崩れ、秒速10m超で流出か 火山灰の層が広範囲に
- ・読売新聞 火山灰の斜面、地震で揺さぶられ一気に崩壊か
- ・Science 誌のWeb サイト News Slippery volcanic soils blamed for deadly landslides during Hokkaido earthquake
- ・時事通信 地盤や地質、被害拡大か=厚真町土砂崩れで専門家－北海道地震

2018/9/13

- ・北海道建設新聞 4面 胆振東部地震 地盤、地質が被害拡大 厚真町土砂崩れで専門家
- ・読売新聞夕刊 胆振東部地震による北海道厚真町の土砂の流動特性

2018/09/14

- ・日本経済新聞 土砂崩れの危険続く 砂防学会が緊急調査
- ・NHK NEWSWEB 砂防学会が厚真町の現場を調査
- ・NHK NEWSWEB “比較的緩やかな斜面でも崩壊” 北海道地震で専門家調査

2018/9/20

- ・NHK 総合・おはよう日本 北海道厚真町吉野地区の崩土の流動シミュレーション

2018/09/26

- ・共同通信 崩落土砂180m 先到達、厚真町 再発の可能性も
- ・北海道建設新聞 1面 国交省が検討 直轄砂防で土砂災対策

2018/9/29

- ・読売新聞 夕刊11面 北海道 土砂崩れ6000か所 厚真町など3町 北大調査
- ・読売新聞 Web版 北海道地震で土砂崩れ6千か所、調査団が確認
- ・毎日新聞 朝刊27面 厚真土砂崩れ 雨による崩壊注意 斜面に亀裂も 砂防学会調査/北海道

2018/10/2

- ・北海道建設新聞 1面 砂防学会報告 厚真町の大規模斜面崩壊 数千年単位で繰り返し

2018/10/3

- ・共同通信朝刊・他12新聞 胆振東部地震による北海道厚真町の土砂の流動特性

2018/10/5

- ・北海道放送「今日ドキッ！」 北海道厚真町吉野地区の崩土の流動シミュレーション

2018/10/06

- ・朝日新聞 朝刊34面 もろい軽石・火山灰 リスク各地に
- ・読売新聞 朝刊7面 土砂崩れ わずか6秒 民家のむ
- ・毎日新聞 朝刊29面 土砂崩壊13平方キロ 国内最大規模
- ・北海道新聞 朝刊23面 緩やかな斜面でも崩壊の恐れ
35面 土砂崩れ面積最大 13平方キロメートル/中越地震上回る
- ・苫小牧民報社 Web版 斜面崩壊や液状化の原因、地震調査の結果報告 北大研究者が緊急フォーラム
- ・産経新聞朝刊 胆振東部地震による北海道厚真町の土砂の流動特性

2018/10/8

- ・TBS「JNN ニュース」 北海道厚真町吉野地区の崩土の流動シミュレーション

2018/10/18

- ・北海道放送「今日ドキッ！」 胆振東部地震による北海道厚真町の土砂災害の調査技術

2018/10/23

- ・朝日新聞 朝刊12面 地震テーマ 研究・体験報告 北大で「緊急フォーラム」
- ・読売新聞 朝刊14面 崩落、液状化 今後も注意 北大緊急フォーラム 北海道地震を解説
- ・UHB(北海道文化放送) 「震源が深いこと 大きな特徴」胆振東部地震のメカニズムや被害検証 北海道大学が緊急フォーラムを開催

2018/11/01

- ・苫小牧民報社 Web版 胆振東部地震緊急フォーラム－研究者からの報告 (2)広範囲の崩壊 珍しい

2019/1/31

- ・NHK そなえる防災 コラム 2018年9月北海道胆振（いぶり）東部地震で発生した土砂災害

<公開イベント> **計18件**

- ・竹林洋史：UFRGS lecture、Two dimensional debris/mud flow model、2019年12月6日、ポートアレグレ、ブラジル、30人。
- ・竹林洋史：気象予報士会研修会、CXレーダー雨量を用いた土砂災害発生予測と避難のための土石流の数値シミュレーション、2019年10月24日、京都、30人。
- ・竹林洋史：Thuy Loi University lecture、Two dimensional debris/mud flow model、2019年10月9日、ハノイ、ベトナム、20人。
- ・竹林洋史：台湾国立中興大学創立百周年記念講演会、Can you survive from sediment disaster? - Introduction to prediction methods of sediment disaster -, 2019年9月23日、台中、台湾、200人。
- ・竹林洋史：iRIC講演会 in 大阪、土石流の数値シミュレーション法、2019年6月28日、大阪、45人。
- ・竹林洋史：Hydro Lab Lecture、Introduction of iRIC、2019年3月7日、カトマンズ、ネパール、15人。
- ・竹林洋史：JR西日本市民防災講演会、近年の土砂災害の特徴と土砂災害を予測する最新技術、2018年12月8日、京都、100人。
- ・竹林洋史：JICA lecture in Manila、Two dimensional debris/mud flow model、2018年12月5日、マニラ、フィリピン、50人。
- ・竹林洋史：Hydro Lab Lecture、Introduction of bed deformation analysis for bed material load and debris/mud flow、2018年11月1日、カトマンズ、ネパール、15人。
- ・竹林洋史：iRIC講演会 in 沖縄、土石流の数値シミュレーション法、2018年9月20日、那覇、25人。
- ・竹林洋史：名古屋大学減災シンポジウム、近年の土砂災害の特徴と土砂災害を予測する最新技術、2018年9月19日、名古屋、150人。
- ・竹林洋史：土砂流動を考慮した河川計画に関するワークショップ、土石流の動態解析、2018年9月11日、東京、100人。
- ・竹林洋史：iRIC講演会 in 仙台、土石流の数値シミュレーション法、2018年6月21日、仙台、45人。
- ・竹林洋史：JR西日本市民防災講演会、土砂災害はどこまで予測可能か？、2017年12月11日、福井、150人。
- ・竹林洋史：京都大学宇治キャンパス産学交流会、土砂災害はどこまで予測可能か？、2017年11月28日、宇治、50人。
- ・竹林洋史：iRIC研究会、土石流の数値シミュレーション法、2017年11月2日、宮古、15人。
- ・竹林洋史：JICA研修会、Debris/Mud flow in Colombia、2017年10月19日、ボゴダ、コロンビア、35人。
- ・竹林洋史：iRIC研究会、土石流の数値シミュレーション法、2017年6月30日、山口、45人。

⑨表彰、受賞歴

該当なし

⑩研究の今後の課題・展望等

- ・阿蘇のような透水性の不連続な層が重なる地下構造の地域では、地震や大雨により地下水が関与する規模の大きな崩壊が発生している。このタイプの発生箇所を予測するには地下水が集中する地下構造をもつ流域や斜面の抽出が重要である。本研究で提案した渓流水や湧水の流量、電気伝導度等の水文調査から地下水が集中している個所を地域→流域→斜面のように段階的に絞り込む方法もそのひとつであり、他の地域においてさらなる検証が必要である。
- ・平滑斜面では、崩壊場、流下場、氾濫・堆積場での火山灰などの堆積層を調査し（火山灰堆積層の土質試験や含水率などの調査も含めて）、想定すべり面付近の堆積層を把握し、適切な動摩擦係数を設定することにより質点系滑動モデルを用いて崩土の到達距離を簡易に予測できると考えられる。ただし、平滑斜面の崩壊による「流動タイプ」の崩土、谷型斜面の崩壊による「流動タイプ」の崩土の到達範囲の予測については、流動モデルの作成が今後の課題となる。
- ・斜面土層の流動化については、個別要素法解析により堆積した礫がわずかな水を加えた上で地震動を与えることにより動き出し、礫の運動形態を追跡して礫の堆積位置を確認することができた。山王谷における計算事例のように、立木が礫の堆積を促進させる効果も検証できた。こうした技術は、植生状況も加味しながら土砂の到達範囲を予測する際や、立木が流木化するかどうかを判定する際に有効と考えられ、今後もさらに手法の精度を高めていく必要がある。
- ・本研究では、地震前後のLPデータを解析することにより、亀裂が新たに発生した場所を、地表の粗度の変化を用いて示すことができた。また、そのような箇所が集中して出現する斜面では、地震後も引き続き崩壊が発生する可能性が高かったことも分かった。研究の今後の課題と展望を以下に挙げる。
 1. LPデータについては、グラウンドデータの密度が粗であれば、粗度が過大に評価されることが分かった。この影響を低減するために、現在、平滑化した斜面を用いて粗度を求める試みを行っている。今後は、適当な粗度を求める為に最低限必要な密度についても明らかにしたい。
 2. 研究成果を他地域に適用するにあたっては、2時期以上のLPデータが必要となるが、実際にはLPデータは地震後の1時期のみ取得されている場合が多い。しかし線状地形は消滅するまで時間を要することから、それらの地形は必ずしも地震により形成されたとはいえない。本研究成果を適用するにあたっては、平時にもLP測量が推進されていることが望ましい。
 3. 崩壊危険度推定の精度を向上するために、機械学習を通じた因子および分類器の更なる検討が必要となる。本研究ではDCIの有効性を確かめるために対象範囲を限定したが、汎用性のある手法を提案するためにも、今後は地質や地震加速度、断層からの距離、降水量なども因子に含めたい。また分類器については、WoEより精度が高く崩壊危険度を推定できるとの報告も多いSVM (support vector machine) やRandom Forestなどの様々な種類の手法を試す予定である。
- ・地震前後の地下水挙動に関する観測データを更に収集し、その傾向を分析することにより、地震後の警戒避難基準の引き下げとその後の見直しの方法について、科学的根拠を提供できると考えられる。
- ・多数の降雨指標を用いた分析により、熊本地震により大きな加速度に見舞われた地域では、地震前と比較して極めて小規模な降雨により土砂移動現象が発生していたことが示され、これらの土砂移動現象を捕捉するにはCLを0.5~3.5割まで引き下げる必要があったことが分かった。これは、警戒避難基準雨量を暫定的に、震度5強を観測した地域では2割、震度6弱以上を観測した地域では3割減ずる(国土交通省HP)とする現行の運用方法では不十分であるといった危険性を示唆するものである。こうした現行の運用方法以上に基準を引き下げる必要がある地域の設定方法については、加速度や亀裂の密度等に注目することが考えられるが、他の地震での事例も踏まえながらさらに検討を加える必要がある。
- ・分布型の降雨流出モデルと斜面安定解析を組み合わせた崩壊・土石流発生予測モデルを、降雨を起因とする崩壊発生危険度の評価に用いようとする研究は従来から行われており、本研究で算出したUC(安全率 <1 となったセル数)は、土壤雨量指数と類似した時系列変化をすることが報告されている(執印ら、2010)。分布型の降雨流出モデルと斜面安定解析を組み合わせた崩壊・土石流発生予測モデルを崩壊発生危険度の評価に用いることにより、土壤雨量指数を用いた崩壊発生危険度の評価では難しかった、地震による影響を崩壊発生危険度の評価に取り入れることが可能になると考えられる。

⑩研究成果の河川砂防行政への反映

- ・熊本地震や北海道胆振東部地震では、崩壊土砂が場合によっては土石流・泥流化し、長距離を移動する現象が特徴的に見られた。地震時に崩壊土砂が土石流・泥流化する現象は、阿蘇の黒ぼくのような粒径の細かい土砂を多く含む斜面および溪流で発生しやすいと考えられる。崩壊した水と土砂の混合物が泥流として扱える場合は、一流体モデルによる二次元土石流・泥流数値シミュレーションによって土砂の移動範囲、移動速度、流動深などの時空間的な変化を、土砂災害対策を考える上で有用な精度で予測可能である。地盤内の水分量に着目すると、地盤内の間隙が飽和しているときに最も遠方まで土砂が流動するため、飽和条件で得られた土砂移動範囲が最大土砂移動範囲の一つの目安となる。そのため、斜面および溪流の水分量に着目すると地震による泥流の流動範囲は豪雨時の泥流の流動範囲よりも狭くなると考えられる。個別のケースについては、二次元土石流・泥流数値シミュレーションを実施することにより、地震時および豪雨時の土砂の移動範囲、移動速度、流動深などの予測が可能である。
- ・現在LPデータの整備が進み、かつ地震後にも速やかにLP計測が実施されれば、本手法を適用することにより、崩壊の危険性が地震後も継続して高い斜面を広域かつ迅速に抽出できると考える。
- ・地すべり地区等で掘削された調査ボーリング孔の水位観測を継続的に行うことの重要性が明らかになり、実務においてそれが実施されることによって警戒避難情報の質が向上することが示された。
- ・火山地域において大規模地震により発生した開口亀裂の存在により地下水深が最大92%増加し、最小安全率は最大24%も低下する事実が明らかになった。さらに、開口亀裂が存在するとその直下流部では崩壊発生限界雨量が最大で18%低下する結果となった。
- ・大規模地震発生後の時間経過にともなう土質強度や斜面安定性の回復に至るまでの過程を把握することを目的とした実験では、3.0Gの加速度が作用した場合には加振後3.0ヶ月経過すると概ね回復が確認されたものの、0.85Gと2.2Gの加速度が作用した場合には、加振直後に低下した土質強度や斜面の安定性は加振後3.0ヶ月経過しても回復には至らないといった結果となった。このため、今後は大規模地震時に斜面に作用した加速度が土質強度や斜面の安定性に影響を及ぼす期間を明らかにすることを目的として、3.0ヶ月以上の埋設期間を設けることにより引き続き埋設試験を実施していく必要がある。地震後降雨による崩壊地の地形解析結果を見ると、熊本地震後の阿蘇カルデラ壁では地震後少なくとも2か月までは地震の影響が見られた。これらの情報を用いながら、いったん引き下げた基準を元に戻す時期や手法を検討することも有効と考えられる。
- ・地震より亀裂が生成するなどして土質強度や降雨浸透特性が変化することが考えられる。土質強度の変化については、分布型の降雨流出モデルと斜面安定解析を組み合わせた崩壊・土石流発生予測モデルを使うことにより、地震の地盤への影響度合いを粘着力Cの変化として、流域スケールで定量的に評価できることが示された。また、地震の加速度と粘着力Cの低下の度合いには、ある程度相関があることが示された。
- ・SiMHiSは、降雨流出と土砂移動が流域スケールで同時に解析できるものであり、地震前、地震後で下記のような活用が考えられる。まず、地震前は、対象地域の降雨流出過程の基礎調査を行い、モデルのパラメータを同定する。この際、洪水流量の調査だけでなく、流域の降雨流出特性の違いを明確に理解するために湧水点の調査や、基底流量の調査が重要である。この結果を使って、地震による土砂生産のシナリオを作成し、堆積土砂の二次移動特性について検討する。これにより、地震発生時の土砂二次移動による土砂災害が危険な流域をあらかじめ抽出することができる。

その他、以下の委員会等において、本研究で得られた成果を踏まえて助言・研修等を行った。

- ・「阿蘇山における土砂災害対策の計画段階評価に関する有識者委員会」、「阿蘇大橋地区復旧技術検討会」、「無降雨時等の崩壊研究会」、「国道10号竜ヶ水地区の防災に関する技術検討会」、「国道220号牛根境地区防災検討会」、「2019年7月鹿児島大雨対応」（九州地方整備局）において、本研究成果も踏まえながら土砂災害対策に関する助言・提案を行った。
- ・土砂災害防止法に基づく緊急調査研修（九州地方整備局九州技術事務所）、2018年度に開催された大規模土砂災害発生時の緊急調査手法に関するスキルアップ研修（九州地方整備局川辺川ダム砂防事務所）において、本研究成果を活用して研修を行った。