

2. 大規模土砂災害等に対する減災、早期復旧技術の開発

研究期間：平成 23 年度～27 年度

プロジェクトリーダー：土砂管理研究グループ長 藤沢和範

研究担当グループ：土砂管理研究グループ（火山・土石流、地すべり、雪崩・地すべり研究センター）、
技術推進本部（先端技術）、地質・地盤研究グループ（地質、土質・振動、施工技術）、
寒地基礎技術研究グループ（寒地構造、防災地質）

1. 研究の必要性

近年、豪雨の発生頻度の増加や大規模地震の発生により、地域に深刻なダメージを与える大規模な土砂災害や道路斜面災害が頻発しており、今後気候変動に伴いこれらの危険性がさらに高まることが懸念されている。平成 23 年は、3 月に東日本大震災、そして、9 月には台風 12 号、15 号に伴う豪雨災害が相次いで発生し、豪雨・地震等に伴う大規模土砂災害や道路斜面災害に対する、大規模土砂災害等発生危険個所の抽出、事前の減災対策、そして、応急復旧技術の開発が求められている。

2. 研究の範囲と達成目標

本プロジェクト研究では、深層崩壊及び天然ダムの形成・決壊、火山噴火に起因した土石流・火砕流・融雪型火山泥流、さらには融雪や豪雨に伴う流動化地すべりの他、道路斜面災害として大規模岩盤崩落や大規模な落石、大規模な盛土災害を対象としてその発生危険個所の抽出、事前の減災対策、応急復旧技術の開発を範囲とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 大規模土砂災害等の発生危険個所を抽出する技術の構築
- (2) 大規模土砂災害等に対する対策技術の構築
- (3) 大規模土砂災害に対する応急復旧技術の構築

3. 個別課題の構成

本プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

- (1) 大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害の被害推定・対策に関する研究（平成 23～27 年度）
- (2) 火山噴火に起因した土砂災害の緊急減災対策に関する研究（平成 23～27 年度）
- (3) 流動化する地すべりの発生箇所・到達範囲の予測に関する研究（平成 23～27 年度）
- (4) 劣化過程を考慮した大規模岩盤斜面の評価・管理手法に関する研究（平成 23～27 年度）
- (5) 規模の大きな落石に対応する斜面对策工の性能照査技術に関する研究（平成 23～27 年度）
- (6) 道路のり面斜面对策におけるアセットマネジメント技術に関する研究（平成 23～27 年）
- (7) 大規模土砂災害等に対する迅速かつ安全な機械施工に関する研究（平成 23～27 年度）
- (8) 大規模な土砂災害に対応した新しい災害応急復旧技術に関する研究（平成 23～27 年度）

このうち、平成 26 年度は(1)～(8)の 8 課題全てを実施している。

4. 研究の成果

本プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2.研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、平成 23 年度から平成 27 年度までに実施してきた研究は要約すると以下のとおりである。

(1) 大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害の被害推定・対策に関する研究

本研究課題では、大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害に対応するため、それらのおそれのある危険箇所を明らかにし、危機管理および砂防施設の整備を着実に実施するための研究・技術開発を目的として研究を実施した。

2. 大規模土砂災害等に対する減災、早期復旧技術の開発

深層崩壊により被害が発生するおそれのある危険箇所を抽出するための技術として、従来から用いられている深層崩壊跡地情報の整理、微地形の判読に加え、深層崩壊に関連が想定される岩盤クリープについての水文地形特性及び重力変形地形に着目した抽出方法について検証し、斜面の凹凸の程度を評価する固有地比や斜面勾配比といった定量的な判定手法を得ることができた。さらに、谷地形が未発といった達地形の開析が進んでいない火山地域において、土石流が尾根を乗り越えて発生するおそれのある箇所を、土石流の有する水頭等を基に抽出する手法を提案し、伊豆大島での土石流災害において土石流が尾根を乗り越えた箇所を一定程度再現可能であることを確認した。

深層崩壊に起因する土石流に平常時及び緊急時に対応するために、氾濫解析モデルを開発した。本モデルでは、細粒土砂を間隙流体にとりこむこととしており、既往の深層崩壊に起因する土石流の到達範囲を良好に再現することが可能である。また、深層崩壊が天然ダムを形成した場合において、天然ダムが決壊することによって発生する土石流の氾濫範囲を緊急に推定する計算プログラムを開発及び改良を行った。

大規模な土石流が発生した場合においては、流体力など大きな外力が砂防堰堤に作用するため、その影響を評価する手法が必要である。影響の評価に資するため、外力により土石流によりどの程度損傷するといった実績の情報が必要となるが、物理探査の技術に基づく非破壊調査によって、堤体の一部ではあるものの砂防堰堤を対象とした調査では初めて連続する内部ひび割れの3次元分布を計測できた。また、大きな外力に対する設計手法としては、限界状態設計法の導入が想定される。どの程度の設計加重に対して現行の基準による安定性を確保するかは課題であるが、現行の基準に基づく設計荷重に対して、どの程度の設計荷重まで限界状態設計法により設計が可能であるか評価を行った。天然ダムといった緊急工事による対応が必要となる事象については、これまでも緊急工事の実績があるが、その後の侵食防止工が湧水によって破損するといった被災事例から施工における留意事項をとりまとめた。

(2) 火山噴火に起因した土砂災害の緊急減災対策に関する研究

本研究課題では、国土交通省が示した火山噴火緊急減災対策砂防計画策定ガイドラインに基づき全国で策定が進む火山において、その対応に先立つ緊急調査を行うために、降灰等の後の土石流の規模、発生時刻推定技術の高度化、火砕流の被害範囲推定技術の開発、融雪型火山泥流の発生規模推定技術の開発を目的に研究を実施した。

降灰等の後の土石流の規模の推定技術の高度化として、従前より汎用的に用いられている観測機器のほか、砂防堰堤の水通し部を通過する土石流の荷重の計測が可能な土石流荷重計、物体の形状を走査・測定可能な測域センサを用いて、時系列的に土石流の土砂濃度、単位堆積重量を推定するほか、流下断面形状と水脈飛距離を測定することにより土石流流速を算出する手法を開発した。降灰等の後の土石流の発生時刻推定技術の高度化として、火山灰堆積斜面における表面流の発生と土石流の発生の関係を整理し表面流の発生のしやすさに対する降雨の影響の評価を行った。

火砕流は、発生事例が少なく既往の噴火事例における文献や情報から被害範囲の推定に資するデータを蓄積することが重要である。また、火砕流の発生様式はいくつかの形態に分類され、それらを踏まえた国内外の被害範囲の推定が行うことが望ましい。このため、既往の国内外の火砕流の発生事例から噴火様式と到達しうる範囲について関係を示した。さらに、数値計算による到達範囲の再現計算には火砕流発生前の地形情報が必要である。そのため、1990年代の雲仙普賢岳の火砕流や土石流発生状況のアーカイブ写真からの地形の復元を試み、その地形データについて評価を行った。火砕流は、火砕サージを含めた危険範囲の推定のために、噴煙柱と大気との密度差に着目した密度流の数値モデルを開発した。平成26年、27年に火砕流が発生した口永良部島での事例をもとにモデルの検証を行ったところ、逆勾配や火口壁の形状などの地形的要因を受けてやや過小評価となる斜面もあるが、火砕サージの主たる到達範囲は推定することができた。

融雪型火山泥流は、積雪した火山山麓斜面に火砕堆積物が流下・堆積した場合に発生すると想定される。氾濫範囲を適切に推定するには、初期条件、境界条件の設定が重要であるが、既往研究により、実験による融雪過程から融雪して流出する量を推定するモデルが提案されている。一方で、高温砂礫の熱エネルギーが融雪に費やされる際には、水が生成されるとともに、昇華により直ちに水蒸気が生成され、大気へ放出する。雪の昇華熱量は雪の水蒸気化率（経験的）と昇華潜熱の積として算出しているが、条件によっては水蒸気発生量が多くなり、ハイドログラフの推定に大きく影響する可能性がある。本研究では昇華熱量の影響度合いを熱伝導解析により検討し、実験結果と比較してその妥当性を確認した。昇華熱量を考慮した解析結果は、それを考慮しない既往モデルと比較し実験結果とよく整合した。今後、この結果を融雪量の推定モデルに反映することでより実際の現象と整合した。

(3) 流動化する地すべりの発生箇所・到達範囲の予測に関する研究

地すべり土塊が流動化した場合、被害は通常想定されているものよりも広範囲に及ぶことが予想されるが、その発生・移送機構や到達範囲に関する知見は少ない。そこで、流動化する地すべりの発生要因の解明、並びに流動化する地すべりの発生箇所と到達範囲の予測手法の提案を目的として研究を実施した。

流動化する地すべりの発生要因と発生箇所の解明のため、流動化地すべりの発生箇所における地形・地質の特徴、運動形態等について調査と考察を行った。融雪を誘因として発生した地すべりの調査事例からは、当初は地すべり的な移動形態であったものが、移動とともに崩壊土砂と水の混合（スラリー化）が底面から生じ、下流に行くほどスラリー化が全体に進行して流体的な移動形態に移行したことが推定された事例、堆積域にあった積雪は土塊内部や底面に巻き込まれることなく周囲に押し出され、融雪水や降雨水の土塊側方への拡散が妨げられ、移動土塊内に水分が貯留されたことなどが推定された事例など、移送堆積域の地形や土地利用状況によって移動形態に差異が認められた。また、その発生箇所は、地すべり発生域下端が勾配約 9° の谷地形に接し、谷への流入角度が 70° 以下であることの2点を満たしていることが条件として示された。一方、火山灰被覆丘陵において地震を誘因として発生した地すべりの調査事例では、厚くテフラが堆積している斜面において、すべり面となりうる硬軟境界等の弱面が連続性をもって流れ盤であり、地震動の増幅等により尾根付近の遷急線付近を発生源としていた等のことが共通して認められた。また、流動化を引き起こす崩壊性地すべりが発生しやすい斜面の水文地質的特徴として、地下水帯となる透水性境界、地下水を貯めやすい形状の透水性境界が重要な要素として考えられた。

到達範囲について検討を行うため、収集した約250の地すべり事例を対象として統計的分析を行った。検討に際しては、移送堆積域の地形に着目し、「谷」、「平野」、「斜面」の各タイプに分類した。その結果、地すべり本体の長さの10%を超える動きのあった地すべり事例においては、地すべりの舌部（地すべり堆積域末端）から地すべり冠頂部を見通した角度の最小値は、「平野」が約 6° 、「谷」が約 8° 、「斜面」が約 10° であった。これらは、移送堆積域の各地形における地すべり移動土塊の最大到達地点を示すものであり、応急緊急時において最大到達範囲を予測する上での参考になるものと考えている。また、流動化する地すべりの地すべり斜面の平均勾配と等価摩擦係数の関係から、地すべり到達範囲の下限を表すことができる可能性を示した。

(4) 劣化過程を考慮した大規模岩盤斜面の評価・管理手法に関する研究

大規模岩盤斜面における崩壊に対する評価の精度は依然低く、それに基づく管理手法も万全ではない。本研究は、精度の高い大規模岩盤斜面の評価・管理手法を開発することを目標として、劣化過程を考慮した岩盤・斜面の長期的な管理手法を検討するものである。

本研究ではオーバーハングした崩落の発生形態をもつ岩盤斜面を対象として、遠心力模型実験、FEM解析、極限平衡法による解析、凍結融解の室内岩石試験等を実施し、岩盤強度の劣化過程や岩盤内の引張破壊による亀裂進展の過程を明らかにした。また、凍結融解に伴う岩盤強度低下の近似と、極限平衡法による岩盤斜面の安全率計算から、岩盤斜面の長期的な安全率変化を安定性能曲線として示し、凍結融解による劣化を考慮した岩盤斜面の安定性評価方法を提案した。これにより将来における岩盤斜面の安定性の予測と、計画的な岩盤斜面を評価・管理を可能とした。

(5) 規模の大きな落石に対応する斜面对策工の性能照査技術に関する研究

斜面对策工の一つとして採用事例が増加している高エネルギー吸収型を含む落石防護工の性能評価には統一的な指標がなく、開発者独自の実験や解析により行われていることから、それらに求められる機能を明確化するとともに、性能照査技術を確立することが必要である。

本研究では、落石防護工の要求性能の考え方について、海外基準や他の構造物の要求性能等を参考に提案を行った。従来型ポケット式落石防護網に関して、従来設計法に関する実験的・解析的検討により簡易式の適用範囲等を整理した。また、落石防護工の落石作用に対する部材・要素レベルおよび構造全体系の性能検証法について、実規模実験や数値解析結果等を踏まえた検討により提案を行った。

(6) 道路のり面斜面对策におけるアセットマネジメント技術に関する研究

今後、維持・更新の時代に遷移していく中、道路斜面防災事業においても限られた予算を有効に活用するためには、

2. 大規模土砂災害等に対する減災、早期復旧技術の開発

アセットマネジメントの考え方を導入して、中長期的な展望を踏まえた上での効率的かつ効果的な防災対策を行い、斜面災害の減災を図ることが必要である。

本研究では、4つの目標を設定し研究を行ってきた。主な成果は以下の通りである

①災害事例の蓄積・データベース構築

直轄および自治体の道路斜面災害計617事例を収集し、道路のり面・斜面防災のあり方に関する施策検討の基盤となる災害データベースを構築した。

②災害弱点箇所の的確な抽出・対策緊急度判定手法の提案

上記①で収集した災害事例を順次分析し、分析の結果明らかとなった災害弱点箇所の抽出の視点および防災上の留意点を手引き（案）としてとりまとめた提案した。

ピンボールにアタッチメント加工して土壤硬度計に装着し、排水孔から挿入して背面地山の空洞深および風化深を定量的に調査する「貫入土壤硬度計測手法」を提案した。ひび割れ状態、地山の空洞化・土砂化の状態等に応じた吹付のり面の経年劣化を考慮した吹付のり面の健全性評価の考え方を提案した。

③段階的な防災対策手法の提案

現地調査・模型実験等を通じて上記経年劣化を考慮した健全性に応じた段階的な対策の考え方を提案した。また、吹付工のり肩部からの背面への侵入水を排水するための対策方法を提案した。

④道路斜面管理におけるアセットマネジメント技術（案）の提案

上記①～③の成果を踏まえて、災害弱点箇所の抽出の視点および防災上の留意点をとりまとめた「災害事例から見た道路斜面防災・アセット管理上の留意点の手引き（案）」、吹付のり面の調査・設計・施工段階における確認事項、維持管理段階での点検および調査の考え方、健全度の判定の考え方および各段階での対応の考え方を手引き（案）として取りまとめた「吹付のり面のアセットマネジメントの手引書（案）」およびのり面被覆構造物の背面地山の風化・土砂化を評価するための調査手法のマニュアルとして「貫入土壤計測手法（案）」を作成した。

(7) 大規模土砂災害等に対する迅速かつ安全な機械施工に関する研究

災害発生時（地震・噴火などによる災害）における危険地帯での活動対策として、建設機械の遠隔操作による無人化施工が適用されている。

本研究課題では、①大規模土砂災害時における最適な建設機械技術導入のためのマニュアル（運用面を含む）の提案、②ヒューマンインターフェースを活用した無人化施工技術における施工効率の改善およびシステムの提案、を目的として研究を行った。

研究成果として、「緊急時の無人化施工ガイドブック（先端建設技術センター刊行）」28年度改定案を作成し提案することができた。また、実機を用いた標準実験モデルを策定し、無人化施工における作業効率が、通常施工に比べ約43%（2.3倍時間がかかる）ことを明らかにした。さらにインターフェースや視覚情報量を搭乗時に近づけることにより、無人化施工時の作業効率を改善できることを明らかにした。

(8) 大規模な土砂災害に対応した新しい災害応急復旧技術に関する研究

近年、豪雨や地震による道路盛土等の道路土工構造物の災害が大規模化し、交通機能が遮断され、復旧までに時間を要することで物流に支障を来すことや集落の孤立等の社会的影響が拡大する場合がある。被災によって遮断された交通機能は早期に回復することが求められ、復旧には被災現場の状況に応じて交通機能を効率よく且つ迅速に回復できる工法の選定が必要とされる。

既往の研究より、道路盛土の崩壊等の災害現場における応急復旧方法として、施工性や資材調達の迅速性の観点から大型土のうを用いた応急復旧が用いられていることが確認されている。そこで、本研究では大型土のうを用いた応急復旧に着目し、本復旧への適用性について検討することとした。大型土のうを用いた応急復旧は、施工性に優れる一方で、大規模な復旧（高盛土）においては構造物の安定性について未解明である。昨年度までの研究では、大型土のうを用いた応急復旧の変形挙動や安定性等について動的遠心載荷模型実験より確認した。また、大型土のうを残置させてそのまま本復旧へ適用可能な構造（大型土のうと補強土を組み合わせた構造）を提案し、その適用性について確認した。今年度は、実際に現場で災害復旧を経験された道路管理者及び復旧作業員（施工業者）を対象にヒアリングを実施し、実現

2. 大規模土砂災害等に対する減災、早期復旧技術の開発

場の施工条件を考慮した動的遠心载荷模型実験を実施した。その結果、排水の有無、大型土のうの配置形態、のり面形状等の違いにより変形挙動の変化が見られたものの、大型土のうによる本復旧の有効性が確認された。これらの研究成果を基に、「大型土のうを用いた災害復旧対策工法施工の手引き（案）」を作成した。

A STUDY ON MITIGATION AND EARLY RECOVERY TECHNOLOGIES AGAINST MASSIVE SEDIMENT-RELATED DISASTERS

Research Period : FY2011-2015

Project Leader : Director of Erosion and Sediment Control Research Group
KAZUNORI Fuiisawa

Research Group : Erosion and Sediment Control Research Group (Volcano and Debris flow, Landslide, Snow avalanche and Landslide)
Construction Technology Research Department (Advanced Technology)
Geology and Geotechnical Engineering Research Group (Geology, Soil Mechanics and Dynamics, Construction Technology)
Cold-Region Construction Engineering Research Group (Structures, Geological Hazards)

Abstract : Recent years, massive sediment-related disasters triggered by heavy rains or earthquakes often have occurred and caused such serious damage to local communities that they could no longer recover. The massive sediment-related disasters include deep catastrophic landslides, landslide dam outbreak floods, pyroclastic flows, lahars, mobilized landslides, massive rock avalanches, and massive collapses of embankment. In order to help mitigating or quickly recovering from these kinds of disasters, this study aims at 1) development of technologies to zone hazardous areas prone to massive sediment-related disasters, 2) development of technologies of measures against massive sediment-related disasters and 3) development of technologies on emergency restoration works at the time of disasters. It also aims to contribute to promote disaster mitigation measures against massive sediment-related disasters not only in Japan but also in other Asian countries.

Key words : mitigation, early recovery, massive sediment-related disasters, heavy rain, earthquake