

3 突発的な自然現象による土砂災害の防災・減災技術の開発

研究期間 : 平成 28 年度～令和 3 年度
プログラムリーダー : 土砂管理研究グループ長 西井 洋史
研究担当グループ : 技術推進本部 (先端技術チーム)、地質・地盤研究グループ (地質チーム、土質・振動チーム)、土砂管理研究グループ (火山・土石流チーム、地すべりチーム)、寒地基礎技術研究グループ (寒地構造チーム、寒地地盤チーム、防災地質チーム)

1. 研究の必要性

計画規模を超える豪雨、御嶽山噴火などの火山噴火、熊本地震などの大規模地震、気候変動によるゲリラ豪雨や急激な融雪といった突発的な自然現象が頻発している。これらに伴う土砂災害に対し、初期対応をより迅速・効果的に実施する技術と人命・資産・社会経済活動への被害を軽減する技術の開発が求められている。

2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、突発的に発生する自然現象に伴う土砂災害の被害を防止・軽減するための初期対応を、より迅速・効果的に実施するため、土砂災害が急迫・発生した箇所の早期把握、被害規模の推定、被害の防止・軽減、早期に復旧工事を実施するための無人化施工技術の開発等を研究範囲として以下の達成目標を設定した。

- (1) 突発的な自然現象による土砂移動の監視技術及び道路のり面・斜面の点検・管理技術の開発
- (2) 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発
- (3) 突発的な自然現象による土砂災害の防止・軽減のための設計技術及びロボット技術の開発

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」(1)、(2)、(3)に示した達成目標に関して、平成 30 年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) 突発的な自然現象による土砂移動の監視技術及び道路のり面・斜面の点検・管理技術の開発

①土砂移動による監視技術の開発

火山灰が、一定厚以上堆積すると土石流が発生し易くなることから、火山噴火後の土石流発生の危険性を評価する際に必要な、新たに積もった火山灰の堆積厚分布の推定方法の研究を行っている。平成 30 年度は、降灰後の土石流への対応として、火山灰の堆積厚と火口からの距離のべき乗の関係に基づき、国内の既往噴火事例の堆積厚分布を分析した。

②道路のり面・斜面の点検・管理技術の開発

現状の降雨に対する道路のり面・斜面の安定に関する点検・対策は、浸透水の作用による安定性を確保することが主な観点であり、短時間で集中的に降るゲリラ豪雨については考慮されていない。このため、ゲリラ豪雨に対する災害形態、災害の発生しやすい箇所の特徴を明らかにした上で、それに応じた点検・被害軽減策を提案する必要がある。そこで、ゲリラ豪雨等に対して道路交通機能を確保するための点検手法・対策手法を提案することを目的に研究を行っている。これまでに、ゲリラ豪雨に対応した点検・対策方法の検討に資する基礎資料を得ることを目的にして、過去の道路のり面災害データを用いて、道路のり面災害の発生形態及び発生要因を分析し、道路のり面における降雨による災害の特徴を整理した。平成 30 年度は、ゲリラ豪雨に対する高災害リスク箇所の定量的な抽出手法を検討するため、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨による災害地域を対象としてフラジリティ解析を行った。また、直轄国道の切土及び盛土で発生した表層崩壊・土砂流出等の災

害事例の分析により点検・管理ポイントを整理するとともに、ゲリラ豪雨（集中豪雨）型に分類される災害事例を抽出し、その素因・要因等を分析し、盛土部、切土部における点検・対応策を考察した。

③融雪期のり面・斜面分野における点検・管理技術の開発

積雪寒冷地の融雪期（3～6月）の道路盛土のり面の安定性を確保するため、融雪水に対する道路交通機能を確保するための点検手法を検討している。これまでに、過去10年間に北海道の主な直轄国道で発生した、融雪水が一因で盛り土に変状が生じたとされる道路盛土災害12事例について誘因を整理した。平成30年度は、この誘因の特徴や傾向を分類し、その危険箇所となり得る道路盛土構造や周辺環境等を踏まえ、道路盛土点検の視点から融雪期における新たな点検手法（素案）を検討した。

(2) 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

①土砂移動の範囲推定技術

降灰後の土石流によって生じるおそれのある氾濫区域を精度良く、迅速に想定する必要があるため、土石流氾濫計算シミュレーションの精度向上と計算時間の短縮化のための研究を行っている。平成30年度は、桜島において発生する土石流について、微細土砂の液相化を考慮したモデルを検討した。

崩壊性地すべりは、一般の移動土塊の動きが緩慢な地すべりとは異なり、比較的速い速度で短時間に滑落するために大きな被害を伴う場合が多い。このような崩壊性地すべり災害から人的被害を未然に防ぐ一つの方法として、地すべりの崩壊時刻を予測して、適切な警戒・避難を実施することが挙げられる。そこで、平成30年度は、現地での地すべりの計測結果をもとに、既往の崩壊予測手法の適用性を調査するとともに、地すべりのひずみとひずみ速度に着目した崩壊の切迫性評価手法を検討した。

②道路通行安全性確保技術

a) ゲリラ豪雨

豪雨時の道路利用者の安全性確保の観点から、土砂災害の危険性がある山地部の道路においては事前通行規制による対応が行われている。現在用いられている「異常気象時における道路通行規制要領」では連続雨量により事前通行規制の実施の判断をされているが、突発的に発生するゲリラ豪雨には十分に対応できていない。このため、ゲリラ豪雨にも対応した事前通行規制手法の提案を目的に研究を行っている。これまでに、事前通行規制に用いるための、ゲリラ豪雨に対応した降雨指標に資する基礎資料を得るため、過去の道路のり面の災害事例に対して種々の降雨指標を設定し降雨状況と災害との関連性の整理を行った。平成30年度は、レーダーアメダス解析雨量を用いて、降雨と道路斜面災害との関係及び事前通行規制の指標値としての適用可能性を検討した。

b) 融雪

積雪寒冷地の融雪期（3～6月）の道路通行安全性を確保した道路維持管理を行うためには、融雪水による特徴的な変状メカニズムを解明し、予め危険箇所を推測した上で対策を講じる必要がある。そのために融雪水による道路盛土の変状の挙動を計測し、それを連成解析による変状分析の研究を行っている。融雪期に変状が確認された道路盛土を対象に融雪・動態観測を行い、過去の北海道の主な国道で発生した道路盛土の変状について詳細調査した。平成30年度は、上記の現地の融雪観測結果と過去の変状要因調査から変状を来す融雪の特徴と傾向について分析した。

また、融雪期における斜面災害の被害から回避するために、降水量に融雪水量を加味した事前通行規制基準の設定が求められている。そのために、融雪を考慮した雨量指標と融雪斜面災害の発生の関係分析に向けて、融雪水量を加味した降水量の算出方法を検討する必要がある。これまで、融雪水量を降雨量に合算して求めた連続雨量と融雪斜面災害の発生との関係を検討した結果、この連続雨量による発災予測は困難であることが分かった。そこで、平成30年度には、無降雨時に発生した崩壊事例を対象とし、複数の条件を設定して、融雪水量を降雨量に合算した連続雨量と崩壊発生との関係について確認することで、融雪水量の雨量への合算条件を検討した。

c)岩盤崩壊

岩盤斜面の形状や亀裂情報と経年変化状況等から、崩壊想定箇所を適切に抽出し、危険岩体の形状・規模を正確に推定することで、精度の高い岩盤崩壊規模推定手法を提案することを目的にして研究を行っている。近年では UAV 技術が目覚ましく進歩し、地上からの撮影だけではなく、空中からの死角のない斜面接写も容易となってきている。このため、平成 30 年度は、UAV からの空中撮影画像に対して、背景差分法による変化箇所の抽出が可能となる UAV 撮影方法や画像処理方法を現地データに基づき検討した。

(3) 突発的な自然現象による土砂災害の防止・軽減のための設計技術及びロボット技術の開発

①土砂災害の防止・軽減のための設計技術

我が国の海岸線や山岳部の道路沿いには、落石等の自然災害から人命や道路交通の安全を確保するための様々な落石防護施設が設置されている。比較的小規模な落石等に対する落石防護施設として、落石防護擁壁や落石防護柵があるが、設計では想定していない損傷事例の報告や補強（性能向上）の困難さ等の指摘がなされている。そこで、従来型落石防護擁壁および従来型落石防護柵の耐衝撃挙動や保有性能を明らかにし、耐衝撃設計法を提案することを目的に研究を行っている。平成 30 年度は耐衝撃設計法を確立するための基礎的な検討として、耐衝撃挙動を把握するための基礎実験および数値解析を実施した。

②ロボット技術開発

災害発生時に無人化施工に代表されるロボット技術を、安全・迅速・高効率で適用するための提案を行うことを目的とし、課題点の整理、必要な要素技術の研究、技術マニュアルの提案のための研究を行っている。平成 30 年度は、まず無人化施工の生産性向上や迅速運用を実現するために、バーチャルリアリティやアラウンドビューシステムなどの最先端技術の活用を提案し、来年度以降本格的な実験を実施するための予備実験を行った。続いて昨年度までの研究成果を精査し、無人化施工の生産性にはオペレータの個人特性も大きく影響している可能性が高いことも明らかにした。また、平成 29 年度に引き続き、迅速な無人化施工運用に効果があると期待される有線給電 UAV を用いた検証実験を行い、効果を確認するとともに実現場導入にむけた課題点を把握した。さらに、迅速・高効率な無人化施工運用に必要な最適外部カメラ位置の検討実験を行い、最適位置の提案をした。

Improvement on Prevention or Mitigation Technologies Related Sediment Disaster due to A Natural Phenomenon Occurrence suddenly or extremely

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Erosion and Sediment Control Research Group
Fujisawa Kazunori

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

Abstract : Japan is exposed to risks of sediment-related disasters. In recently years, excessive rainfall, that is beyond the current design level, and a natural sudden phenomenon such as Mt.Ontake-eruption and Kumamoto-earthquake, have frequently occurred. It is required to mitigate or recover from these disasters quickly and effectively in the early stage. The achievement target is established as follows.

- 1) Improvement of sediment transport monitoring and road slope monitoring for a natural phenomenon occurrence suddenly or extremely
- 2) Improvement of estimation method of sediment transport area and road slope occurrence by rainfall index for a natural phenomenon occurrence suddenly or extremely
- 3) Improvement of design of the rockfall prevention-fence and unmanned technique for a natural phenomenon occurrence suddenly or extremely

Key words : mitigation technologies, sediment-related disasters, sudden national phenomenon, road slope management, unmanned technique

3.1 突発的な自然現象による土砂移動の監視技術及び道路のり面・斜面の点検・管理技術の開発

3.1.1 土砂移動の監視を踏まえた被害予測技術に関する研究

担当チーム：土砂管理研究グループ（火山・土石流チーム）

研究担当者：水野正樹、藤村直樹、寶杰、秋田寛己

【要旨】

斜面に火山灰が堆積すると、土石流が発生しやすくなる。降灰後の土石流に対して、警戒避難を的確に実施するためには、土石流の発生域となる溪流の上流側の火山灰の堆積範囲と堆積厚を把握することが必要となる。しかし、火口付近を含む規制された範囲内の火山灰堆積厚は、直接計測することができないおそれがある。そこで、火口付近の火山灰堆積厚の推定に役立てるため、火山噴火直後に実測された遠方の降灰厚から、火口近傍の降灰厚を推定した上で、その値を用いて降灰の等層厚線図を作成する手法について検討した。その結果、火口からの距離と降灰厚の関係はべき乗関数によって近似されたことから、べき乗関数を用いて火口近傍の降灰厚を推定し、推定値と火口から離れた地点の実測値を用いて、等層厚線図を作成できる可能性を示した。

キーワード：火山噴火、火山灰堆積厚さ、土石流、等層厚線図、推定式

1. はじめに

火山噴火により多量の降灰が発生すると、その後の降雨で土石流が発生しやすくなるが、そのメカニズムは、「火山の噴火や火砕流の発生に伴って細粒の土砂が地面を覆うと雨水の浸透能が小さくなり、表面流が発生しやすくなる」ためと考えられている¹⁾。したがって、噴火後に土石流発生の危険性が高まった溪流を抽出するためには、降灰厚・分布の把握が重要となる。降灰厚は現地で直接計測することができれば、正確な値を得ることが可能である。しかし、火山噴火活動が継続している場合、火口周辺規制や入山規制がかけられ、この範囲内の降灰厚は、直接計測することができず、降灰厚・分布を把握できない可能性が高い。急迫しうる土石流の危険性を評価するためには迅速に降灰厚・分布を把握することが必要である。したがって、本研究では、火山噴火直後に実測された遠方の降灰厚から、火口近傍の降灰厚を推定した上で、その値を用いて降灰の等層厚線図を作成する手法について検討する。火口からの距離と降灰厚の関係は、指数関数やべき乗関数で近似されるという報告があり²⁾、平成30年度は、噴火形式ごとにべき乗関数を用いて降灰厚を推定する手法の適用性を確認した。

2. 検討対象と手法

本研究では、1975年以降の国内の火山噴火について文献を収集し、4つの噴火様式（水蒸気爆発、マグマ

水蒸気爆発、ブルカノ式噴火、プリニー式噴火）に分類され降灰厚・分布データを入手できた13事例（について整理した。等層厚線が火口から最も遠方に延びる方向を降灰分布軸として設定し、その軸に対し $\pm 5^\circ$ の範囲で実測された降灰厚または単位面積あたりの堆積重量を抽出した。また、抽出したデータから、各噴火について火口からの距離と降灰厚の関係を分析し近似式を得た。その近似式から、火口からの距離と降灰厚の推定式を求め、火口近傍の降灰厚を推定した。その上で、推定降灰厚と遠方の実測降灰厚を統合し、等層厚線図を作成した。その結果の妥当性は文献に示された等重量線と比較することで検証を行った。

3. 検討結果

国内の噴火事例において、火口からの距離と降灰厚の関係を分析した結果、13の噴火事例のうち12事例でべき乗近似の決定係数（ R^2 値）が0.8以上となり、べき乗関数が良くあてはまる結果が得られた（図-1）。

ここで火口からの距離 X (m)における降灰厚を $T(X)$ (cm)とすると、 T_0 を定数として次のように表せる。

$$T(X)=T_0 \cdot X^{-B} \cdots \text{①}$$

式①から御嶽山2014年噴火の際の火口近傍の降灰厚を推定し、それを用いて等層厚線を作成し検討した結果を以下に示す。当該噴火の際には、大学や国の研究機関等によって多数の地点において降灰厚もしくは単位面積あたりの堆積重量が計測され、詳細な等層厚

線図（等重量線図）が作成された³⁾。式①のべき指数 B は、表-1 の水蒸気爆発 3 事例から得られた B の平均値 2.556 を用いた。火口から約 5.7 km 地点 (A) で実測された 1 m²あたりの堆積重量 695 g/m²から、この地点の堆積厚を 0.0695 cm に換算（密度 1.0 g/cm³と仮定）して式①に代入し、 $T_0 = 2.75695 \times 10^8$ が得られた。この値を用いて式①より、例えば火口から 500 m 地点における降灰厚は約 35 cm と推定される。本研究で推定した等層厚線は、噴火時に火口近傍の降灰厚の情報が取得できないことを想定し、火口から 4 km 以遠の実測降灰厚と、推定式から算出した火口近傍（火口から 500 m の範囲：火口域）の推定降灰厚を用いて作成した。火口域縁には風下以外の全方向にも風下側と同様の降灰厚があると仮定し、火口の東西南北の火口域縁 4 地点に推定降灰厚 35 cm を与えた。実測降灰厚と推定降灰厚のデータを統合して GIS 上で空間補間（自然近傍法）を行い、等層厚線図を作成した（図-2）。

御嶽山 2014 年噴火では降灰厚 1 cm の範囲の大部分は火口から 4 km の範囲内と推定され、この範囲内の実測データが得られない場合、1 cm の等層厚線を引くことが困難であった。しかし、図-2 のように火口近傍に推定値を与えることで、等層厚線の推定が可能となった。Takarada et al.³⁾に示された 15,000 g/m²（≒ 1.5 cm）の等層厚線と火口近傍の推定降灰厚を用いて作成した 1.5 cm の等層厚線を比較した結果、両者が重複する範囲の面積が約 80.3%であった。つまり過小評価となった範囲の面積は約 19.7%であり、約 80%の部分はカバーできていた。過大評価した範囲の面積は約 46.6%であり、精度に課題は残るものの、火口近傍の降灰厚を計測できない状況においても、遠方の降灰厚データから推定することで等層厚線図を作成可能であり、今回検討した手法はおおよその降灰厚・分布の把握には活用可能と考えられる。

4. まとめ

火口からの距離と降灰厚の関係はべき乗関数によって近似されたことから、べき乗関数を用いて火口近傍の降灰厚を推定し、推定値と火口から離れた地点の実測値を用いて、等層厚線図を作成できる可能性を示した。したがって、噴火直後の火口近傍の降灰厚の情報に乏しい段階においても、概略的な等層厚線図を作成できる可能性が見出せた。今後、推定式のパラメータについて検討を進め、パラメータのとりうる値の範囲を絞り込むことで推定式の精度の向上を図りたい。

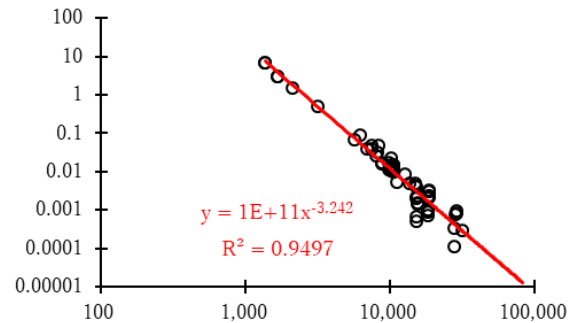


図-1 火口からの距離と降灰厚の関係
(べき乗近似；御嶽山 2014 年噴火の事例)

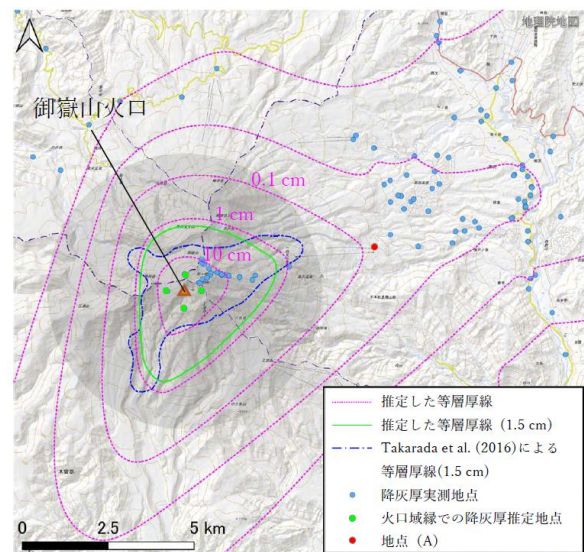


図-2 御嶽山 2014 年噴火の推定等層厚線図

参考文献

- 1) 池谷浩・ヘンドロヤント・小杉賢一朗・水山高久：火山噴出物の被覆による浸透能の減少—雲仙における比較試験—、砂防学会誌、Vol. 48（新砂防）、No. 2、p. 22-26、1995
- 2) González-Mellado, A. O., and Cruz-Reyna, S. : A simple semiempirical approach to model thickness of ash-deposits for different eruption scenarios. Nat Hazard Earth Syst 10(11), p. 2241–2257, 2010
- 3) Takarada, S., Oikawa, T., Furukawa, R., Hoshizumi, H., Itoh, J., Geshi, N. and Miyagi, I.: Estimation of total discharged mass from the phreatic eruption of Ontake Volcano, central Japan, on September 27, 2014. Earth Planets Space, 68, doi: 10.1186/s40623-016-0511-4, 2016

3.1 突発的な自然現象による土砂移動の監視技術及び道路のり面・斜面の点検・管理技術の開発

3.1.2 ゲリラ豪雨や急激な融雪等へ対応する道路のり面・斜面の合理的な管理手法に関する

研究（1）（ゲリラ豪雨対応・道路斜面：点検・対策）

担当チーム：地質・地盤研究グループ（地質チーム）

研究担当者：浅井健一、矢島良紀

【要旨】

ゲリラ豪雨に対する高災害リスク個所の定量的な抽出手法を検討するため、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨による異なる地質を含む災害地域を対象としてフラジリティ解析を行った。その結果、地質ごとに災害発生確率が異なり、花崗岩類>変成岩類>火山岩類の順に崩壊発生確率が高い結果が得られた。

キーワード：降雨、斜面、崩壊、フラジリティ解析

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨や急激な融雪による道路斜面災害により長期通行止めに至る災害が多発しており、人的被害の発生の懸念など安全・安心上の大きな課題となるとともに、交通機能確保の観点からも課題となっている。また、重要路線等においてはゲリラ豪雨や急激な融雪に対しても、早期の交通機能の確保が求められている。これらの課題に対し、本研究は災害データ及び関連する地形・地質状況、降雨状況を分析することにより、ゲリラ豪雨により生じやすい災害形態、災害の発生しやすい箇所の特徴を明らかにし、ゲリラ豪雨に対する高リスク個所の抽出・点検手法及び対策手法を検討するものである。

2. 研究方法

平成 29 年度は豪雨による道路斜面の高災害リスク個所の定量的な抽出手法の検討のため、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨による災害地域を対象として、災害発生と降雨、地形・地質等との関係を分析して災害発生確率を推定するフラジリティ解析を行った。解析の対象とした地域は特に崩壊が多発した約 350km²の範囲である。

3. 研究結果

3.1 災害の状況と地形・地質の特徴

平成 29 年の九州北部豪雨災害では、7 月 5～6 日の豪雨による土砂災害及び河川氾濫によって福岡県朝倉市、東峰村及び大分県日田市を中心に大きな被害が生じた。本災害では斜面崩壊も非常に多く発生し、今回の解析対象範囲において解析に用いるために抽出した崩壊箇所は

約 30,000 箇所である（図-1）。解析対象範囲の地質は花崗岩類、変成岩類（結晶片岩）、火山岩類（溶岩及び火山砕屑岩）の 3 種類に分けられる。

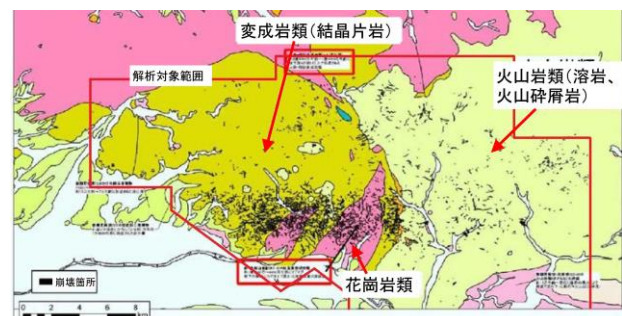


図-1 解析対象範囲の地質及び崩壊箇所分布

3.2 雨量指標

解析に用いる雨量指標として、気象庁のレーダー・アメダス解析雨量（1km²メッシュ）を用いて以下の指標について災害発生日（7 月 5～6 日）を間を含む 7 月 4～7 日の期間のメッシュごとの毎時の値を算出した。

- ・時間雨量
- ・降り始めからの連続雨量（6 時間無降雨でリセット）
- ・土壌雨量指数
- ・土壌雨量指数算出時の第 1・第 2・第 3 各タンクの貯留高
- ・48 時間雨量

算出期間前の降雨の影響を受ける指標については期間前のデータも用いた。例えば土壌雨量指数については約 1 ヶ月の助走期間を設けて 6 月 1 日から計算を開始して算出した。

解析に用いる雨量指標の値は本来であれば各崩壊箇所の崩壊時刻の値を用いるべきであるが、今回の豪雨災害

のように短時間で多数の崩壊が発生する場合は個別の崩壊箇所の崩壊時刻を特定できないため、算出期間内の最大値を解析に用いた。算出した雨量指標の分布図の例を図-2に示す。

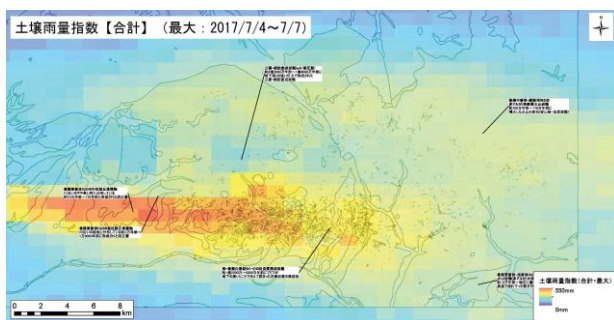


図-2 雨量指標の分布図の例

3.3 地形等の情報

10m メッシュの数値標高モデル (DEM) をもとに、GIS を用いて以下の指標を算出した。

- ・平均曲率¹⁾
- ・ラブラシアン¹⁾
- ・地上開度¹⁾
- ・地下開度¹⁾
- ・尾根谷度¹⁾
- ・遷急線までの距離
- ・ArcGIS Flow Accumulation による累積流量 (谷の侵食度合いを示す)

これらの指標に傾斜及び斜面方位を加えて主成分分析、クラスター分析等により各指標同士の関係や崩壊発生率との関係を整理した結果、雨量指標との多変量解析に用いる説明変数として傾斜、斜面方向、尾根谷度、累積流量を選定した。

3.4 多変量解析及びフラジリティマップ作成

3.3 で選定した説明変数を用いて、崩壊の発生・非発生を目的変数とした判別分析、ロジスティック回帰分析、及び重回帰分析を行い、その中で崩壊・非崩壊の推定精度が最も高かったロジスティック回帰分析の結果に基づいてフラジリティマップを作成した。作成にあたっては、ロジスティック回帰分析における判別スコアを地形の特性値として、解析対象範囲の3種類の地質について地形の特性値ごとに各雨量指標と崩壊発生率 (崩壊地点数/全地点数) の関係の近似式を作成し、それを用いて崩壊発生確率分布図 (フラジリティマップ) を作成した。

崩壊発生確率分布図の例を図-3に示す。崩壊発生確率は花崗岩類>変成岩類>火山岩類の順に高い結果が得られた。各地質における結果の特徴と理由として考えられる可能性は以下のとおりである。

- (1)花崗岩類では他の地質に比べて崩壊発生確率が大きく、また降雨量に対する崩壊発生確率の変化が大きい傾向にあった。理由としては表層が風化によりマサ化しており、降雨による浸透水や表流水の影響を大きく受けやすい (崩壊や土石流が発生しやすい) ことが考えられる。
- (2)変成岩類では全体的に花崗岩類に比べて崩壊発生確率が小さい傾向にあった。理由としては花崗岩類に比べて難透水性の地盤で雨水が浸透しにくいことが考えられる。
- (3)火山岩類では他の地質に比べて崩壊発生確率が小さい傾向にあった。理由としては火山砕屑物等の高透水性の地盤により雨水が表層よりも深く浸透しやすかった可能性が考えられる。日田市小野地区で大規模崩壊が発生した一方で表層崩壊が他の地質に比べて少なかったこととも大きく矛盾しない。

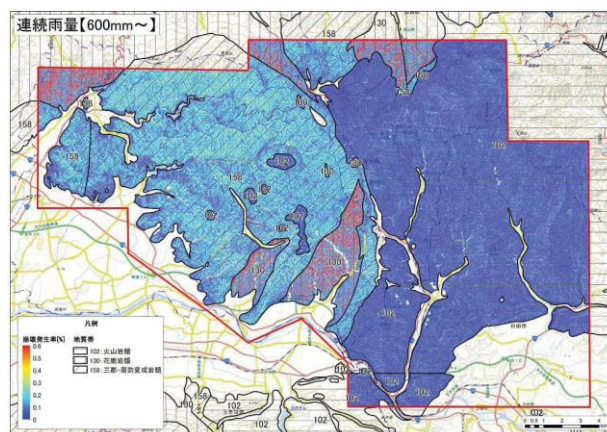


図-3 崩壊発生確率分布図の例

4. まとめ

ゲリラ豪雨に対する高災害リスク個所の定量的な抽出手法を検討するため、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨による異なる地質を含む災害地域を対象としてフラジリティ解析を行った。その結果、地質ごとに災害発生確率が異なり、花崗岩類>変成岩類>火山岩類の順に崩壊発生確率が高い結果が得られた。今後、定量的な高災害リスク箇所の抽出手法としてのフラジリティ解析手法の汎用性の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 内田太郎・片岡正次郎・岩男忠明・松尾修・寺田秀樹・中野泰雄・杉浦信男・小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料第 204 号、pp.56-60、2004 年 11 月

3.1 突発的な自然現象による土砂移動の監視技術及び道路のり面・斜面の点検・管理技術の開発

3.1.3 ゲリラ豪雨や急激な融雪等へ対応する道路のり面・斜面の合理的な管理手法に関する研究（2）（ゲリラ豪雨・道路のり面：点検・対策）

担当チーム：地質・地盤研究グループ（土質・振動）
研究担当者：佐々木哲也、加藤俊二

【要旨】

現状の降雨に対する道路のり面・斜面の安定に関する点検・対策については、浸透水の作用による安定性確保の観点が主であり、短時間で集中的に降るゲリラ豪雨については考慮しておらず、ゲリラ豪雨に対する災害形態を明らかにした上で、それに応じた点検・被害軽減策を提案する必要がある。このため、ここではゲリラ豪雨等に対して道路交通機能を確保するための点検手法・対策手法を提案することを目的に検討を行っている。

平成 28、29、30 年度は、ゲリラ豪雨に対応した点検・対策方法を検討するための基礎資料を得ることを目的に、過去の道路のり面災害事例を用いて、道路のり面災害の発生形態、発生要因等について分析し、道路のり面における降雨による災害の特徴や事例から得られる被災形態・素因・要因毎に点検・管理における着目点について整理した。

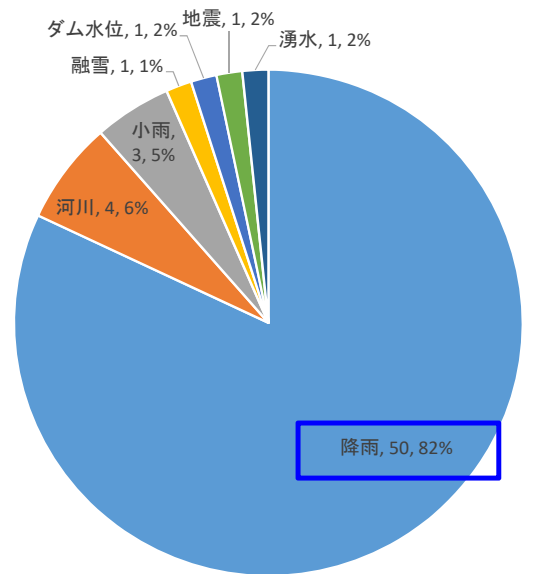
キーワード：道路のり面、ゲリラ豪雨災害形態、発生要因、事例分析

1. はじめに

現状の降雨に対する道路のり面・斜面の安定に関する点検・対策については、浸透水の作用による安定性確保の観点が主であり、短時間で集中的に降るゲリラ豪雨については考慮しておらず、ゲリラ豪雨に対する災害形態を明らかにした上で、それに応じた点検・被害軽減策を提案する必要がある。このため、ここではゲリラ豪雨等に対して道路交通機能を確保するための点検手法・対策手法を提案することを目的に検討を行っている。

平成 28、29 年度は、ゲリラ豪雨に対応した点検・対策方法を検討するための基礎資料を得ることを目的に、過去の道路のり面災害事例を用いて、道路のり面災害の発生形態、発生要因等について分析し、道路のり面における降雨による災害の特徴について整理した。

平成 30 年度は、さらに被災時の降雨がゲリラ豪雨（集中豪雨）型に分類される災害を抽出して素因・要因等の分析を行い、盛土部、切土部における点検・対応策に関する考察を行った。



(誘因 件数 割合)

図 2-1 被災誘因

2. 道路のり面災害事例分析

2.1 被災要因および誘因の整理

ここでは、平成 20～23 年度に発生した直轄国道の斜面災害における切土および盛土のり面で発生した表層崩壊・土砂流出等の 61 の災害事例について、発生形態、発

生要因等について分析し、道路のり面における豪雨災害の特徴について整理した。なお、以下の被災誘因や被災要因の分類は、災害直後に現場事務所で調査を行い分類・報告されたもので、統一的な指標の下で分類したものでないことを断っておく。

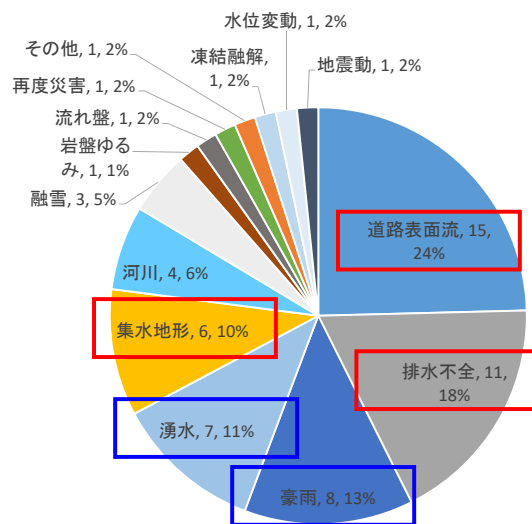
61 災害事例の被災誘因について整理した結果を図2-1に示す。約80%は直接降雨に起因するものであり、その他河川による洗掘や被災時の降雨がほとんどないような直接的に降雨が影響していないと思われる被災事例も約20%見られた。次に、具体的な発生素因・要因を整理した結果を図2-1に示す。図2-1で降雨が直接的な誘因と考えられる災害のほとんどは、図2-2(a)に示すように道路表面水の流入、集水地形による流入、排水施設の不全といった降雨の集排水に関連したのり面等の構造に起因するものと、豪雨（地形的な外部要因が見られずその地域で過去に経験のない累積雨量であったもの）・湧水（崩壊面内に大量の湧水が生じていたもの）といった雨水の浸透によるものの大きく2つに分類された。さらにこれらについて、切土のり面（図2-2(b))および盛土のり面（図2-2(c))単位で見ると、切土のり面では集排水の構造に起因するものと雨水の浸透によるものはほぼ半々でみられるが、盛土のり面では集排水の構造に起因するものがほとんどであった。これは、切土のり面自体は自然地盤であるため、のり面の地質・土質構造の不均質性の影響もあり盛土と比較すると降雨浸透に起因するような災害も起こりやすいが、盛土のり面は浸透水に対する安定を確保するように人工的に締めながら盛り立てて構築するものであり、降雨の表面浸透に対する構造上の不確実性が小さいものと考えられる。

2.2 被災事例から見る点検・管理のポイント

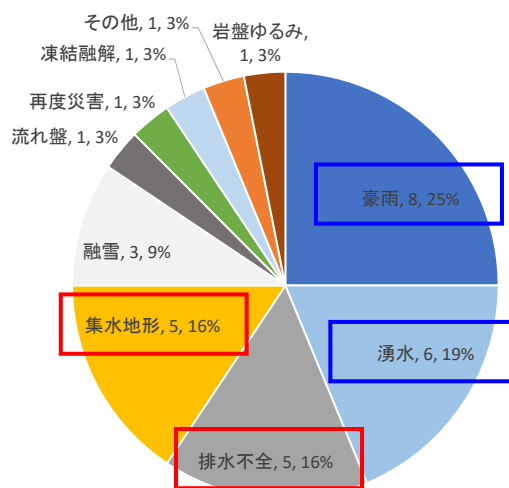
2.1 では、素因・誘因について整理したが、災害箇所の現地状況から、素因・誘因に対する点検・管理の着目点や対応方法について分析を行うため、現地調査を進めている。以下、盛土のり面、切土のり面における災害の調査事例を示す。

(1) 盛土のり面災害の事例

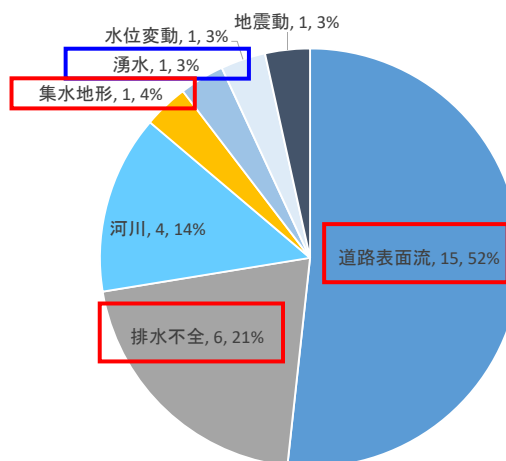
- ①場 所：静岡県駿東郡小山町須走
- ②路 線 名：国道138号17.8kp
- ③被災日時：平成22年9月8日 12:48
- ④崩壊規模：深さ4.0m、土量250m³、勾配1:0.5
- ⑤降 雨 量：連続274mm、最大時間82mm



(a)全体



(b)切土のり面



(c)盛土のり面

(要因、件数、割合)

図2-2 被災要因

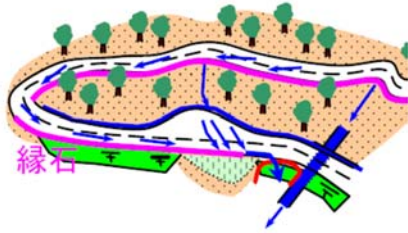


図2-3 被災箇所のイメージ図

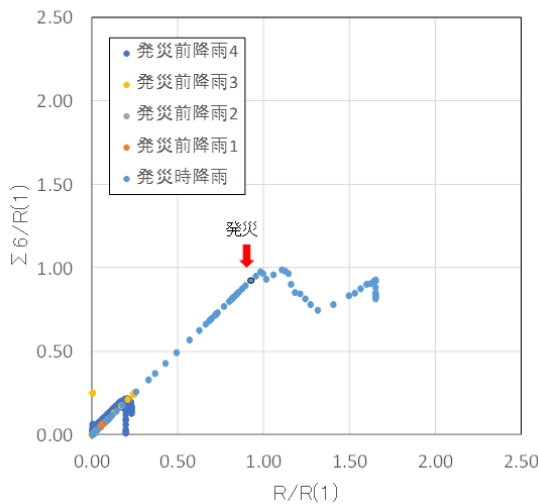


図2-4 発災前1か月間の降雨のスネーク曲線
($\Sigma 6/R(1) - R/R(1)$)

図2-3に現地状況のイメージ図を示す。当該道路は富士山裾部の山岳道路で、図の上方に向かって登り勾配となっている。被災箇所は、図右下の沢部を埋めた盛土(赤線部)である。当該箇所では、道路の表流水を縁石(アスカブ)で被災箇所の側溝に導いてから升および暗渠管を通じて沢部の縦排水により排水をしている。発災時の降雨は5時間という短時間で被災時の連続雨量に達しており、短時間の集中豪雨により大量の表流水が集中したため、崩壊したと考えられる箇所である。図2-4に発災前1か月の降雨について6時間累積雨量および連続雨量を1年確率連続雨量で正規化し作成したスネーク曲線($\Sigma 6/R(1) - R/R(1)$)を示す。この図からも、発災時には1年確率に近い連続雨量が6時間程度で一気に降っていたことがわかる。また、写真2-1に被災状況を示すが、アスカブで導かれた表流水が被災箇所に大量に流入しているのがわかる。

一方で、写真2-1をよく見ると手前に排水升があり、写真2-2に示すように上方からアスカブで導いた表流



写真2-1 被災状況



写真2-2 表面流の排水系統

水を側溝で受けて手前の升を介して沢に排水していたが、写真2-1では側溝が土砂で閉塞して草が生えている状況であり、適切な排水がなされていなかったことも、被災要因の1つであったと考えられる。

当該箇所は、降雨状況からはゲリラ豪雨(集中豪雨)型災害に分類できるものではあるが、図2-1で示した盛土の被災要因である道路表面流と排水不全の2つの要因が複合して生じており、側溝の清掃を定期的に行うとともに升の位置を切り盛り境界のところに設けて、斜面下方に導いて排水を行うことで防げた可能性のある災害でもある。

道路構造の観点から、当該箇所のような下り勾配のカーブ内側には水が流入しやすいので、点検においては道路上方からの表流水の処理方法も含めて、排水系統が適切であるかに着目する必要がある。

(2) 切土のり面災害の事例

- ①場 所：福岡県直方(のおがた)市頓野
- ②路 線 名：国道200号
- ③被災日時：平成21年7月26日11:00
- ④崩壊規模：深さ5.5m、土量0m³
- ⑤降 雨 量：連続80mm、最大時間27mm

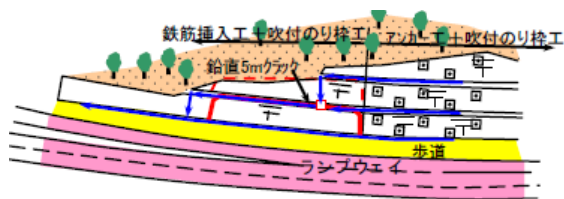


図 2-5 被災箇所のイメージ図

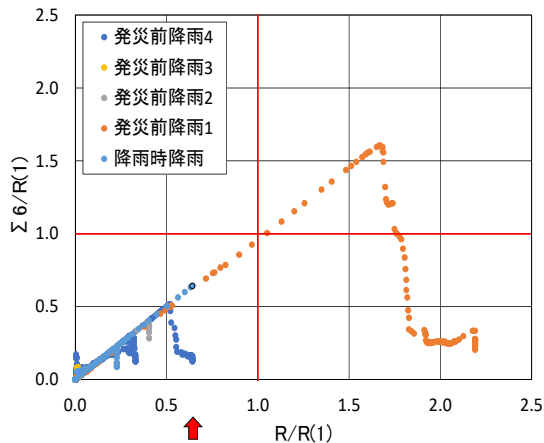


図 2-6 発災前 1 か月間の降雨のスネーク曲線 (Σ6/R(1)–R/R(1))

図 2-5 に現地状況のイメージ図を示す。当該道路は、小規模な丘陵部を開削した両切道路の切土のり面で、図右側の部分は「吹付のり枠+グラウンドアンカー工」で補強されており、被災箇所（図中赤線部）は「吹付のり枠+地山補強工」が行われていた。写真 2-3 に被災状況を示すが、土砂が流出するような崩壊には至っていないが、小段位置で大きくずれが生じた災害である。写真 2-4 に示すように、のり面近傍に溜池があり、その水面がほぼ変状が発生した小段の位置と一致していた。また、のり面からは多くの湧水が見られ、常時水位が高いものと推察された。

図 2-6 に発災前 1 か月の降雨について 6 時間累積雨量および連続雨量を 1 年確率連続雨量で正規化し作成したスネーク曲線 (Σ6/R(1)–R/R(1)) を示す。発災時の降雨は連続雨量 80mm で比較的降雨量は大きいものの集中豪雨型に分類するほどの降雨ではなく、前日に 240mm を超える先行降雨があり、先行降雨型に分類される。しかしながら、対策工が施されていた効果により崩壊までに至らなかったことや発災が遅れたことも考えられ、ゲリラ豪雨（集中豪雨）型に準じる事例として扱うこととした。

当該箇所は、図 2-2 で示した切土の被災要因である豪雨と湧水の 2 つの要因が複合して生じており、特に湧水



写真 2-3 被災状況



写真 2-4 周辺状況（溜池の位置関係）

の供給源となる溜池の位置が特徴的である。グラウンドアンカー工が施されていた範囲では、地下水を抜くための排水対策が行われていたが、地山補強工の部分では湧水があるためのり枠内は開放型であったものの、それ以外に排水対策が見られなかった。

点検においては、地下水の供給源に対して排水対策が十分であるか、またこのような箇所では被災事例のように被災が遅延して発生することも考えられるので、豪雨後の状況にも注意する必要がある。また、近傍に地下水の供給源がある場合には、設計段階でも排水対策や対策方法に特に配慮する必要がある。

2.3 ゲリラ豪雨（集中豪雨）型災害の特徴

前述のように被災事例を調査し、点検・管理のポイントを整理してきた。以下、盛土および切土部のゲリラ豪雨型（以下、集中豪雨型）災害を抽出して、被災要因等について整理した結果を示す。ゲリラ豪雨型災害の抽出は、降雨データにレーダーアメダス解析雨量を用いて別途通行規制手法に関連して検討している発災前の連続雨量と 6 時間累積雨量によるスネーク曲線によって集中豪雨型となったものとし¹⁾、全部で 35 件であった（表 2-1

表 2-1 降雨パターンの判別結果

		レーダーアメダス解析雨量				計
		長雨	集中豪雨	先行降雨	少降雨	
近傍 アメダス	長雨	6	8	2	0	16
	集中豪雨	2	19	0	0	21
	先行降雨	0	2	6	0	8
	少降雨	0	6	2	5	13
計		8	35	10	5	58

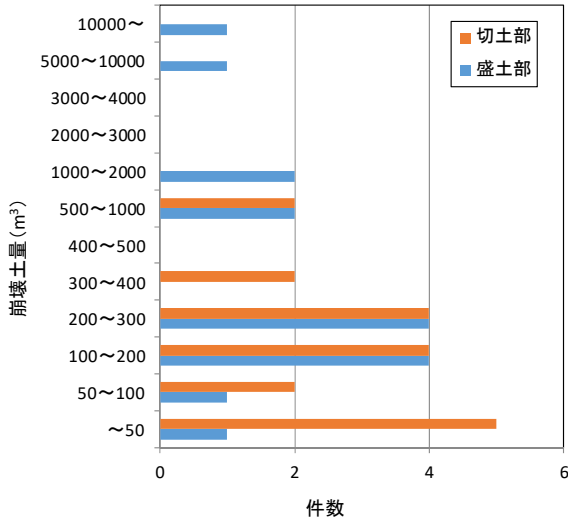


図 2-7 災害規模と件数

参照)。このうち、盛土部の災害は 16 件、切土部の災害は 19 件であった。図 2-7 に、それぞれの災害の崩壊規模のヒストグラムを示す。

(1) 盛土部の災害の特徴

盛土部の災害 16 件の被災要因は、路面等の表流水に起因するものが 12 件、河川の増水による洗掘・侵食(以下、河川増水) が 4 件であった。

表流水に起因するものについては、さらに 2 つに分類でき、1 つは路面の表流水が直接のり肩に流入し表層部が侵食・崩壊したケース(以下、のり肩流入)、もう 1 つはレベルバンク等窪地に滞水し盛土全体が浸透崩壊したケース(以下、窪地滞水)である。以下、それぞれの特徴を示す。

1) のり肩流入 (9 件/16 件)

表流水をアスカーブ等で流下させているところで盛土のり肩部が沈下している箇所で、滞水してアスカーブをオーバーフローしたり(写真 2-5)、アスカーブの端部が盛土部で終わっているところで表流水がのり肩からのり面に流入して(写真 2-6)表層部の侵食・崩壊が発生していた。盛土高さや、流入範囲にもよるが、崩壊規模は比較的小さく、概ね 250m³ 以下であった。1 件は流入範囲が広く 500m³ と比較的大きなものもあった(写真 2-7)。



写真 2-5 アスカーブ箇所(滞水⇒オーバーフロー)



写真 2-6 アスカーブ箇所(端部流入)



写真 2-7 のり肩流入で規模が大きかった事例

点検のポイントとしては、盛土部とアスカーブの端部の位置関係や盛土部の縦横断勾配の変化に対して、滞水してオーバーフローをしたり、端部の位置が不十分で盛土部に流入したりしないか、さらにアスカーブも含めた排水施設による路面排水の機能が十分であるかを確認することが必要である。また、対応策としては、切り盛り境界部に集水柵を設けてアスカーブにより導かれた表流水を排水して流末に導き、盛土部に表流水が流入しないようにするなど排水系統による工夫が考えられる。

2) 窪地滞水 (3 件/16 件)

山側にくぼんで滞水しやすい構造となっている盛土や沢部をまだ盛土で、もともと横断排水管が設けられて



(a) 崩壊状況



(b) 滞水状況

写真 2-8 窪地滞水による崩壊事例 (その 1)

いないあるいは土砂流入等で横断排水管が閉塞し排水機能が不全となり滞水し、浸透水により盛土内水位が上昇することで崩壊が発生していた (写真 2-8、写真 2-9)。崩壊規模が大きく (1,500、1,600、11,600m³) と路面に影響するものであった。盛土が全体的に崩壊し災害規模が大きくなるため、要注意箇所である。

点検のポイントとしては、レベルバンク等の滞水しやすい構造の箇所、横断管の閉塞の有無等、排水系統が適切であるかを点検することが必要である。

また、対応策としては、横断管の閉塞が起こりにくい構造とする (沈砂部分を大きくする等)、盛土部に路面の表流水が流入しないように、盛土部の外側両端に集水柵および路面を横断する排水溝を設け流末に導く、横断管が設置されていない箇所では通常水が流れていない沢でも豪雨時を考慮して横断管を設置するなどの対応が考えられる。

3) 河川増水 (4 件/16 件)

河川の攻撃面などの地形的要因によって、河川の増水に伴い護岸部分の洗掘・侵食により肩部部分下方が流失した (写真 2-10)。規模は、増水の程度や護岸などの構造によるため、大小様々であった (130、230、500、8,000m³)。河川の増水によるものは、道路の構造上の災害ではなく、対策については河川護岸との兼ね合いもあ



(a) 崩壊状況



(b) 滞水状況

写真 2-9 窪地滞水による崩壊事例 (その 2)



写真 2-10 河川増水による洗掘崩壊箇所の例

るため別途検討する必要はあるが、攻撃面や川幅が狭くなる箇所などの河川水の影響を受けやすい箇所については、注意をしておく必要があると考える。

以上のように、盛土部における災害については、地形や構造の観点から生じているもので、危険箇所についてはある程度目視により点検・抽出ができるものと考えられる。また対応策については、河川の増水によるものは、護岸対策との兼ね合いもあるため別途検討する必要はあるが、表流水によるものについては、上記のように排水

系統を工夫することで対応できるものとする。

(2) 切土部の災害の特徴

切土部の災害のほとんどは植生のり面で発生しており、構造物工については吹付工の崩落が1件であった。切土部の被災要因は、集中降雨のためほとんどの箇所では降雨強度が25mm/h以上と大きく、降雨強度の影響による表層崩壊が発生しやすい状況であった。そのうえで、地形的な素因として谷部・沢部における切土箇所（以下、地形的素因）、地質・土質的素因とし地山の風化・泥濁化によるゆるみが生じた箇所（以下、地質・土質的素因）で発生していた。吹付箇所の崩落を除き、いずれも被災形態がのり面の表層の侵食・崩壊による土砂流出で被災規模の小さいものがほとんどであり、300m³以下が16件/19件でその半分の8件は100m³以下であった。500m³を超えたものも2件（630、840m³）あったが、1,000m³を超えるような大規模なものはない。

以下、それぞれの特徴を示す。

1) 地形的素因（10件/19件）

沢部・谷部・鞍部を含む箇所を切土する際、尾根部にあたる場所は表層の脆弱な部分は切り取られるが、沢部・谷部・鞍部の切り取りが浅いところでは表層の脆弱部が残存することがある（図2-8）。このような箇所は、地質・土質的にも尾根部に比して崩壊しやすく、さらに背後に集水地形がある場合には、表流水の流入も伴いより崩壊しやすい状況となる。このような箇所を尾根部と同様に植生工のみ保護した箇所では崩壊が発生していた（写真2-11）。

また、土砂斜面において安定勾配で切土を行った箇所でも、背後に集水地があり大量の表流水が集中して、表層部を侵食したり、集水地が浸透性の高い土砂の段丘部分で浸透水が湧水として切土のり面に流入し、表層部が泥濁化して土砂流出が発生していた（写真2-12）。

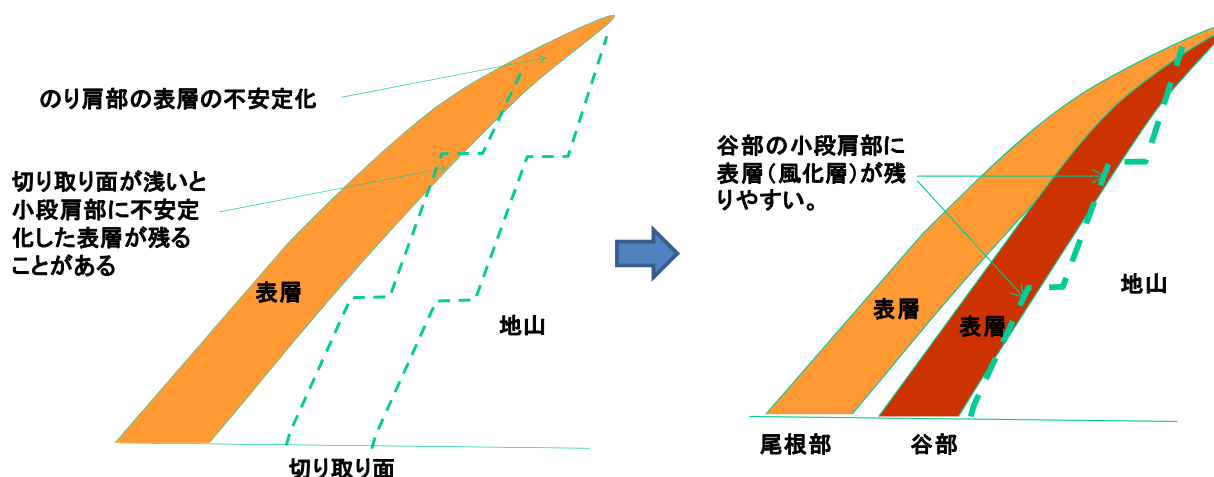


図2-8 切土位置による表層脆弱部の残存イメージ



写真2-11 谷部の切土箇所の事例（脆弱部残存）



写真2-12 背後地からの表流水による崩壊事例

前者のような箇所は、植生工で被覆されており目視での抽出は困難であり、元地形や施工時ののり面状況の記録の既存資料から脆弱部の残存の可能性を判断することになるが、残存状況（深さ・範囲等）を把握するためにはサウンディングを行う等の詳細調査が必要である。

後者のような箇所は、背後が大きな集水地形であれば地形図から判読を行うことである程度は抽出はできるが、小さな微地形については地形図からの判読は困難であり、現地踏査等の詳細な調査を行う必要がある。その際には、通常の降雨時の表流水の流入状況や湧水の状況に着目して点検を行い、問題がある箇所について地形状況の調査を行うのが良いと考える。

前者の対応策は、弱部が残存しているところについて本来であれば施工段階で地山補強工などを行っておく必要がある箇所であり、このような箇所が抽出された場合には、必要に応じて地山補強工を追加することが望ましい。

後者の対応策は、表流水については法肩部の排水機能を強化したり、湧水箇所については湧水処理を行ったうえで、必要に応じて構造物による保護工を追加することが考えられる。

2) 地質的素因 (9件/19件)



写真2-13 表層の風化による事例（地山：花崗岩）



写真2-14 表層の風化による事例（地山：砂岩泥岩）

植生工で被覆されたのり面で、岩の表面が風化して浅く土砂化した箇所、寒冷地において凍結・凍上性の地山が凍結融解によつてのり面が脆弱化した箇所、強雨による土砂流出が発生していた。いずれの箇所も切土時には十分な強度はあったが、気象作用により短期的あるいは中・長期的に土砂化した結果発生したものである。

前者では、強風化性岩でもともと風化を考慮して切土勾配をゆるく切っていた箇所以外に、切土時には十分な強度はあった軟岩等の通常の切土勾配の箇所でごく浅い表層部の風化が進行した結果生じたものがあつた（写真2-13、写真2-14）。

植生工は、植物の根の緊縛効果によりのり面表層の土砂の侵食・崩壊を抑制する工法であるが、一般に草本類を用いるため、根の侵入深さは概ね30cm程度である。岩の風化速度に比べて、植物の根の伸長速度は非常に速いため、地山との一体性が確保できるのであれば30cm未満の浅い風化に対しては草本類による植生工でも保護できるが、それを超える風化に対しては草本類では対応できない。草本類による植生工については、のり面が安定していることが前提で、侵食に伴い表層崩壊が発生しないようにするための侵食防止工であることを認識しておく必要がある。

したがって、これらの災害は、地山が徐々に土砂化・泥濘化することで不安定化が進行し、結果的には図2-8で示した脆弱部が残存した場合と同じ状況となり、脆弱部の範囲（深度）が草本類による植生工の保護機能の範囲を超えたため生じたものといえる。

このような箇所を抽出するには、地山自体の評価をする必要がある。強風化性の岩であれば、切土時に判断し事前に緩勾配化を図っているため、調査・設計時や施工時の記録により抽出することは可能であるが、通常の勾配で切土している一般的な箇所の風化については、机上調査や目視でスクリーニングすることは困難である。このため、ある程度の期間ごとに背面の地山の状況を確認する必要がある。調査方法としては、物理探査により風化深度を調査する方法はあるが大掛かりになるため、できるだけ簡易に確認する方法が求められる。一つの方法として、通常の見視点検時にピンを用いたサウンディングを行い、風化深度を確認することが考えられる（写真2-15）。また、水の影響もあるため、降雨後にのり面の湧水や表流水の状況についても確認しておくことが望ましい。

寒冷地の凍結・凍上については、のり面の湧水などの水の供給があるか、同様の被災履歴が近隣のり面でもあ



(a) 被災状況



(b) 凍上による浮き上がり

写真 2-16 凍上の影響による被災事例（プレキャストのり枠）



写真 2-17 吹付工オーバーハング部の崩落事例



(a) 測量用ピンを装着した土壌硬度計



(b) 調査状況

写真 2-15 土壌硬度計およびピンによるサウンディング方法の例²⁾

るかに着目し、該当する場合には春先ののり面状況を点検するとともに地山の凍上性の確認を行うのが望ましい。また、前述ののり面の風化と同様に可能であれば目視点検時にピンを用いた簡便なサウンディングを行い、ゆるみの生じている深度を確認することも一つの方法として考えられる。

対応策としては、風化による土砂化に対してはのり枠等の構造物工の併用が必要となる。寒冷地の凍結・凍上性ののり面においても同様であり、30cm以上の深さまで泥濘化するのり面には対応できないので、構造物工を用いる場合には凍上力によってのり枠のアンカーピンが持ち上げられることもあるため（写真 2-16）、かごマット工等の凍上対策となる工種を用いる必要がある。

吹付工の崩落についても、原因は背後地山の風化（土砂化）によるもので、地山と吹付工の密着不良が生じ自重および土圧が作用することで抜け落ちが生じている。特に、被災箇所のようなオーバーハング部は下部の吹き付け厚が薄くなり亀裂が入りやすく、風化により崩落が発生しやすい（写真 2-17）。このため、下部に亀裂があ

り湧水跡が見られるような箇所は特に注意が必要である。したがって、吹付工の施工箇所では可能な限りオーバーハング部が生じないように整形することが必要である。

以上のように、切土部における災害については、地形や地質の観点から生じているものであるが、目視により点検・抽出ができるものではなく、元の地盤情報のみならず、サウンディング等によりのり面保護工の背面の地山の状態を評価することも必要となる。また対応策については、土砂化による緩みの範囲に応じた補強や、可能であれば緩勾配に切り直しを行う等の検討も必要となる。

切土部の崩壊規模はごく小規模なものから中規模のものまで多々あるが、災害が発生した場合には道路に土砂が流入し道路交通に影響を及ぼすことから、のり面の規模と崩壊した際の道路への影響を考慮して、対応方針を検討することが必要である。

3. まとめ

上記のように道路のり面における降雨に起因する災害の特徴を整理した結果、盛土のり面では集排水の構造に

起因するものがほとんどであるという特徴的な結果が得られた。この結果は、盛土のり面に関しては周辺の地形状況も含め雨水の集排水の観点で検討することで対応が可能であることを示唆しているものと考えられる。

一方、切土のり面に関しては植生工など雨水がのり面に浸透するようなり面保護工の背面地盤の状況も含めた検討が必要であることが示唆された。

今後も引き続き降雨状況や現地の詳細な地形等も含めた分析を行い、ゲリラ豪雨にも対応した点検・対策手法の検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 川添英生、加藤俊二、佐々木哲也：豪雨等による道路のり面災害の降雨パターン分析—短時間集中豪雨災害の把握—，第73回土木学会年次学術講演会、2018.9
- 2) 加藤俊二、川添英生、佐々木哲也、相川淑紀：貫入土壌硬度計測によるのり面保護工背面地盤の簡易調査手法の検討（その1：器具の構造と調査方法）、第51回地盤工学研究発表会、2016.9

3.1 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

3.1.4 ゲリラ豪雨や急激な融雪等へ対応する道路のり面・斜面の合理的な管理手法に関する研究（3）（融雪期盛土のり面分野：融雪期道路盛土点検手法）

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地地盤チーム）

研究担当者：畠山 乃、青木 卓也、橋本 聖

【要旨】

積雪寒冷地の融雪期（3～6月）の道路盛土のり面の安定性を確保し、融雪水に対する道路交通機能を確保するための合理的で新たな管理手法に関する研究を行っている。これまでに、過去の北海道の主な直轄国道で発生した融雪水が一因とされる道路盛土変状の調査等から誘因分析を行った。そして、その誘因分析から特徴や傾向を分類し、危険箇所となり得る道路盛土構造や周辺環境等を踏まえ、道路盛土点検の視点から融雪期における新たな点検手法（素案）を整理した。

キーワード：融雪水、道路盛土、盛土変状、盛土点検

1. はじめに

平成24年5月と25年4月に連続で発生した北海道中山峠の道路盛土のり面災害¹⁾、²⁾に代表される融雪期の大規模な道路盛土のり面災害の変状メカニズムや北海道特有の急激な融雪の特徴や傾向は未だ明らかとなっていないのが現状で、融雪期に特化した道路盛土点検手法もない。

本研究ではこれら融雪期道路盛土のり面変状の発生メカニズムを明確にすることで、融雪を考慮した道路盛土のり面の安全性評価手法を検討し、減災を目的とした合理的な点検手法の提案を目指すものである。

平成29年度までは、北海道の主な国道で発生した道路盛土の変状について詳細調査し、その誘因について分析した。

平成30年度は、その誘因分析から特徴や傾向を分類した。そしてその危険箇所となり得る道路盛土構造や周辺環境等を踏まえ、道路盛土点検の視点から融雪期における新たな点検手法（素案）を整理した。

2. 北海道の主な国道で発生した融雪水が一因とされる道路盛土変状の発生誘因の分類

変状履歴資料や関係者から聞き取り調査した北海道の主な国道の平成22～28年度の融雪期に発生した道路盛土の変状はN=12件あった。その道路盛土変状(N=12)の着目点やその特徴や傾向を分類するため、その発生誘因

から多角的に抽出した。まず、盛土高さに着目した「盛土高さ」、盛土材料では、道路土工 盛土工指針³⁾による施工時に注意が必要とされるシルト・粘性土（火山灰質含む）や蛇紋岩・花崗岩の破碎土などを使用しているような盛土に関する「盛土材料」、片切片盛や盛土への腹付け盛土（土羽土含む）は「盛土形態」、盛土が造成されている基盤が地すべりや湿地帯、農用地、崖錐帯、河岸崖錐、傾斜地、氾濫原の盛土は「盛土位置」、地下水に関する「地盤水位」、集水や沢地形（沢埋め戻し）に関しては「地形」、縦横断こう配（サグ部・下りこう配）や平面線形が曲線にある盛土については「道路構造」、縦横断管の有無や盛土のり面排水対策、隣接する切土のり面排水対策の有無や機能については「排水施設」、周辺山地の規模と道路に到達する速度の関係から「集水面積と傾斜角」、日射に関係するため「盛土のり面の向き」、以上の発生状況から着目すべき項目を9つのカテゴリーに分類した。

続いて9カテゴリーに12箇所の特徴や傾向を当てはめ、分析した。「盛土材料」の適正については、不適質な土砂を使用している箇所はなく、古くから使用材料の品質管理が適正に行われている証であった。とは言え希にでも変状している理由は、トンネルずりや掘削した岩砕を盛土材として利用した際に水や空気に触れることで風化など経年変化により脆弱になっていたことが考えられる。

「盛土形態」では、片切片盛土部、腹付け盛土部で見られ、両盛土部では切土が隣接していた。「盛土位置」では、

傾斜地や沢埋め部に造成されていた。「地盤水位」では、周辺地山の水位が常に高い状態が保たれていた。「地形」では、盛土周辺に集水地形や沢地形、基盤が軟弱層や湿地、地すべりの頭部に造成されていたりしている箇所もあった。「道路構造」では、縦断こう配ではサグ部などの最低下部や下りこう配箇所、平面線形では片こう配で曲線部、これらの複合部など、路面水が集まり易い箇所で多く見られ、特徴的だった。「排水対策」では、のり面の表面水に対する排水処理対策が無い箇所、集水域の改変と考えられる箇所で見られた。「集水面積と傾斜角」については一概には言えないが、約3万～20万m²の集水面積を抱え、その傾斜は約10～30%を示していた。「のり面の向き」は、ほとんどののり面が東および西から以南の方向を示していた。

して着目すべき盛土箇所、その新たな着眼点、その際の確認する手段について定量的に整理した。表-2に示すとおり、着眼点とは着目すべき道路盛土が造成された周辺環境や道路構造等の状況を判断する基準を示し、手段はそれを確認するための現地踏査以外の方法を取りまとめた。例えば、その道路に集中する近隣山地の集水面積を求積する場合、地形だけにとらわれず、道路の縦断こう配や排水こう配にも着目して求積することが肝要である。なぜなら、集水地形以外の箇所から供給するようなこう配になっている場合があるからである。

表-1 積雪期における道路盛土点検の新たな手法（素案）

点検の盛土着目箇所	点検の着眼点	手段等
盛土材料	主たる盛土材が中材か、または、注意すべき特殊土（蛇紋岩や花崗岩の破砕土）か	工事記録や既往ボーリング柱状図等で確認
盛土形態	片切片盛土部または腹付け盛土部か、両盛土の場合は隣接した切土部があるか	道路現況図、道路維持台帳等で確認
盛土位置	傾斜地、崖錐斜面、沢埋め地の上に盛土が造成されているか	地質図幅・地形図等
盛土地盤と盛土周辺を含む水位	常時地下水が高いか、降雨時に地下水が上昇しやすいか、平地では周辺が高水位か	地質図幅・地形図等
地形	盛土部の周囲が集水地形となっているか、沢部が隣接してその流末が道路を横断しているか	地質図幅・地形図等
道路構造	盛土部がサグ部など道路縦断こう配の低下部となっているか	道路現況図、道路維持台帳等で確認
排水施設	盛土周辺の隣接する切土や盛土自体に排水施設（のり頭、小段、のり尻の縦横）はあるか、 破損等無く機能しているか、盛土部にアスカブがあり機能しているか、 降雨に対する呑み吐け排水が機能しているか、地下水に対する排水が機能しているか	現地踏査、年維持業者への聞き取り等
地形判読（集水面積と傾斜角）	地形判読を行う場合は、排水構造物計算時の周辺地形だけを考慮するのではなく、 道路こう配・道路排水工を加味し、そこへ到達するであろう隣接した地形を考慮する、 上記のうえで、約3万m ² 以上の集水面積を抱えているか、 盛土に面した自然斜面の地形が約10%以上の傾斜角となっているか	道路現況図、精度の良い地形図（2万5千分～5千分の1）、地質図幅、土木地質図、空中写真、航空レーザー測量によるコンタ図（地形図）、ドローン調査等で確認
盛土のり面方向	道路盛土のり面向きは東-西方向から南側へ向いているか	地質図幅・地形図等、道路現況図等

※手段には現地踏査は必須事項

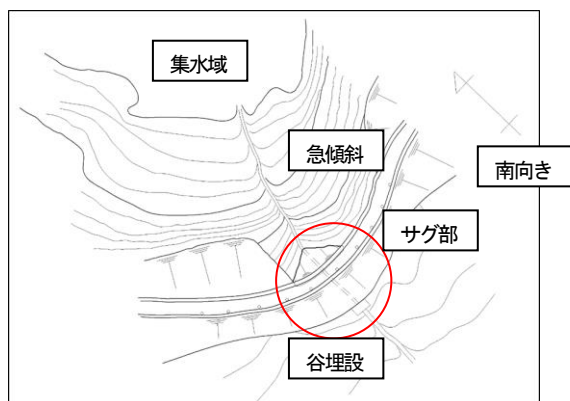


図-1 融雪による危険箇所と成り得る盛土イメージ図（赤枠箇所）

上表の事例となるモデルを図-1に示す。多項目が該当すると危険性が増す可能性がある、ということである。

3. 融雪期の道路盛土変状の誘因からみた新たな道路盛土点検手法（素案）

以上、前項で分析した変状誘因の特徴と傾向を踏まえて、北海道の国道における融雪期の道路盛土点検手法と

4. まとめ

この新たな点検手法は、道路盛土の融雪期に点検すべき箇所の抽出を事前に確認することができ、予防保全にも寄与する。点検は、基本的に目的を持って実施することが肝要であり、このように過去の実績から導くことでそれを達成することが可能である。さらにこれに加えて、点検者独自の経験や地域特性を考慮するとより確かなものとなり確実性が増すこととなる。

参考文献

- 1) 中野賢也、青木卓也、江川倫法：国道の災害復旧工事中における地表・地中計測を駆使した道路維持管理方法、国土交通省北海道開発局第56回北海道開発技術研究発表会、2012
- 2) 西村聡志、尾留川晴好、蛭澤秀則：一般国道230号中山峠災害の復旧工事について、国土交通省北海道開発局第57回北海道開発技術研究発表会、2013
- 3) 社団法人 日本道路協会：道路土工 盛土工指針、pp.62-67、2010

3.2 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

3.2.1 土砂移動の監視を踏まえた被害予測技術に関する研究（1）

担当チーム：土砂管理研究グループ（火山・土石流チーム）

研究担当者：石井靖雄、水野正樹、藤村直樹、山崎祐介

【要旨】

火山噴火にともなう降灰により土石流の発生のおそれが高まった場合には、緊急に土石流氾濫計算が行われる。土石流氾濫計算においては、土石流による土砂流出のタイミングや土砂の到達範囲の予測の精度向上が重要な課題の一つである。本研究では、観測データに基づき、土石流の土砂濃度や間隙流体の質量密度を推定し、数値解析モデルに反映して、その結果と観測結果を比較することにより、数値解析モデルの妥当性を検討するものである。平成 30 年度は、桜島において発生する土石流について、微細土砂の液相化を考慮したモデルを検討した。計算された水深と流速の時間変化について、観測値と比較すると、同様の傾向を示している。

キーワード：火山噴火、土石流観測、土砂流出予測、数値解析モデル、微細土砂の液相化

1. はじめに

火山地域では、噴火に伴う降灰により土石流が発生しやすくなる。土砂災害への警戒・避難のためには、土石流による土砂流出のタイミングや土砂の到達範囲を予測することが重要である。土石流の流動機構はある程度明らかにされてきており、その支配方程式も提案されている（例えば、芦田ら、2008）。実際の土石流の流れについては、映像や非接触流速計などにより水深と流速の観測は比較的容易であり、観測された水深と流速の関係に基づいた抵抗則の議論も行われている（例えば、水山・上原、1984）。桜島の有村川や野尻川に荷重計が導入され（大坂ら、2013）、土石流の土砂濃度や間隙流体の質量密度の推定が可能になったことにより、土砂濃度や間隙流体密度を既知とした抵抗則の検証が可能になってきている。また、火山灰は、微細粒子を含んでいることから、微細粒子の液相化を考慮する必要もある（西口ら、2011、江頭ら、2016）。本研究では、観測データに基づき、土石流の土砂濃度や間隙流体の質量密度を推定し、数値解析モデルに反映して、その結果と観測結果を比較することにより、解析モデルの妥当性を検討するものである。

流速計および測域センサーを設置しており、土石流の表面の標高、表面流速および荷重の計測によって、土石流の土砂濃度や間隙流体密度が算出できるようになっている（大坂ら、2013）。堰堤の直上流 150 m 区間の勾配は 3 度である。

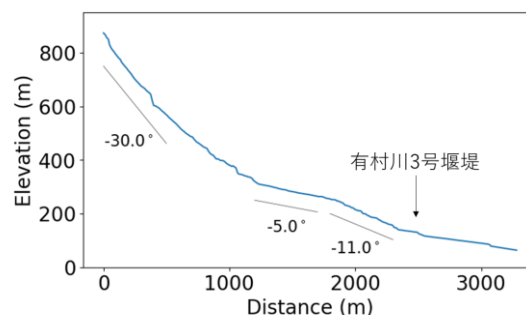


図-1 有村川 3 号堰堤の位置（上）と縦断勾配（下）

2. 桜島における土石流観測と解析モデル

2.1 土石流観測

図-1 に桜島有村川 3 号堰堤の位置と、堰堤近辺の縦断地形を示す。有村川 3 号堰堤には、荷重計、超音波

2.2 土石流の支配方程式

2.2.1 微細土砂の役割

微細粒子が土石流へ及ぼす影響を次のように考慮している。静止状態にある火山堆積物の粒度分布は、ある閾値によって粗粒粒子と微細粒子に分離される。粗粒粒子及び微細粒子は、固相として存在し、固相から構成される火山堆積物の間隙は水で飽和されているものとする。このとき、火山堆積物のうち、粗粒粒子および微細粒子は、それぞれ $p_c c^*$ および $p_f c^*$ である。ここに、 c^* は静止している火山堆積物の体積濃度、 p_c は堆積物における粗粒粒子の含有率、 p_f は微細粒子の含有率で、 $p_c + p_f = 1$ である。降雨による水の供給で堆積物層内の浸透流水深の上昇による不安定化により、堆積物が土石流化すると、粗粒粒子は固相として、微細粒子は水とともに液相として振る舞う。よって、土石流全体の土砂濃度は、 $c_c = p_c c^*$ である。一方、微細粒子の濃度は、 $c_f = p_f c^* / (1 - c_c)$ となり、間隙流体の密度は、 $\rho = (\sigma - \rho_w) c_c + \rho_w$ となる。ここに、 σ は砂礫の質量密度、 ρ_w は水の質量密度である。

堆積過程においては、粗粒粒子が体積濃度 c_c で堆積し、その構成する間隙に、水と微細粒子の混合物が取り込まれる。微細粒子の含有率 p_f が増加するほど土石流の土砂濃度 c_c は小さくなり、間隙流体の密度 ρ は大きくなる。これより、後述の式(8)より、土石流の平衡勾配が小さくなり、流動性が増加することとなる。

2.2.2 微細土砂の役割

土石流全体、粗粒土砂および微細土砂の侵食過程及び堆積過程における質量保存則（山崎・江頭、2018）を1次元モデルで表現すると、次式のようにあらわされる。

侵食過程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = \frac{E}{c_c} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_c uh}{\partial x} = p_c E \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_f (1 - c_c) h}{\partial t} + \frac{\partial c_f (1 - c_c) uh}{\partial x} = p_f E \quad (3)$$

堆積過程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = \frac{E}{c_{c,D}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_c uh}{\partial x} = E \quad (5)$$

$$\frac{\partial c_f (1 - c_c) h}{\partial t} + \frac{\partial c_f (1 - c_c) uh}{\partial x} = (1/c_{c,D} - 1) c_f E \quad (6)$$

ここに、 t は時間、 x は斜面に沿う軸、 h は水深、 u は水深平均の流速、 c_c は粗粒土砂の水深平均の体積濃度、 γ は土砂輸送補正係数、 c_f は流相における微細土砂の体積濃度、 E は侵食・堆積速度で、次式で表される(江頭、1993)。

$$\frac{E}{u} = c_c \tan(\theta - \theta_e) \quad (7)$$

ここに、 θ_e は土石流の平衡勾配で、次式で表される。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1) c_c}{(\sigma/\rho - 1) c_c + 1} \tan \phi \quad (8)$$

2.2.3 土石流の運動量保存則

土石流の運動量保存則は、次のように表される。

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial \beta uuh}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_m} \quad (9)$$

ここに、 β は運動量補正係数、 H は土石流の流れの表面の位置、 τ_b は河床せん断力、 ρ_m は土石流の質量密度であり、次式で表される。

$$\rho_m = (\sigma - \rho) c_c + \rho \quad (10)$$

$$\rho = (\sigma - \rho_w) c_c + \rho_w \quad (11)$$

ここに、 ρ_w は水の質量密度である。河床せん断力 τ_b は、次式で表される。

$$\tau_b = \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \quad (12)$$

ここに、 τ_y はクーロン型の降伏応力、 f_b は流動抵抗係数である。勾配が小さい条件下等では粒子が流れの全層に分散できなくなり、下層の集合流動層の上層に清水の層が形成される2層流となることがある。土石流および2層流における抵抗係数の評価は、宮本・伊藤(2002)の方法を採用している。

3. 土石流の水深・流速

3.1 計算に用いたデータと計算条件

対象区間は、図-1 に赤矢印で示す範囲で、対象イベントは、2014年8月29日に発生した土石流である。観測結果によると、流出している土石流の質量密度 ρ_m の平均値は、1500 kg/m³ 程度であった。堰堤付近の溪床勾配は $\theta = 3$ であるので、これらを式(8)と式(10)に代入すると、 $C_c = 0.08$ および $\rho = 1400$ kg/m³ が得られる。これらを満たす微細土砂含有率 p_f は、 $p_f = 0.2$ となる。

標高データには、国土地理院の基盤地図情報数値標

高モデルを用いている。計算に設定した物性値などは次のとおりである。空間解像度は 10 m、重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ 、砂礫の質量密度 $\rho=2650\text{kg/m}^3$ 、水の質量密度 $\rho_w=1000\text{kg/m}^3$ 、砂礫の内部摩擦角 $\theta=37^\circ$ 、砂礫の代表粒径 $d=0.05\text{m}$ 、反発係数 $e=0.85$ 、渓床における土砂の体積濃度 $c=0.6$ である。土石流発生地点は、計算領域上流端とし、計算開始と同時に流動化するものとしており、 $h=d$ 、 $u=0$ 、 $c=p_c c^*$ 、 $c^*=p_c d/(1-c)$ を与えている。また、初期条件として、堆積物は水で飽和させているが、上流端および側方からの水の供給は行っていない。対象区間における川幅および堆積物の厚さは、それぞれ一様に 4m、1m としている。土石流発生地点、代表粒径、川幅および堆積物厚は、計算結果が観測結果に近づくように試行錯誤により定めている。

3.2 計算結果

図-2 に堰堤地点の観測および計算による流動深と流速の時間変化を示す。観測による流速と水深は、計算結果の水深が 0 から立ち上がる時間に一致させて表示している。計算結果においては、流速のピーク値は観測値の約 97%、水深のピーク値は観測値の約 80% となっている。本研究で実施した計算では、流速および水深の立ち上がりからピークまでの変化やピーク後に減衰する傾向も計算できている。

4. まとめ

本検討では、桜島において発生する土石流について、微細土砂の液相化を考慮したモデルを提案した。計算された水深と流速の時間変化について、観測値と比較すると、ピークと減衰の傾向が再現された。土石流による土砂流出予測には、降雨流出過程および安定条件による土石流発生地点の推定や、斜面から河道への土砂移動過程を踏まえた河道における堆積物の分布の推定が課題である。

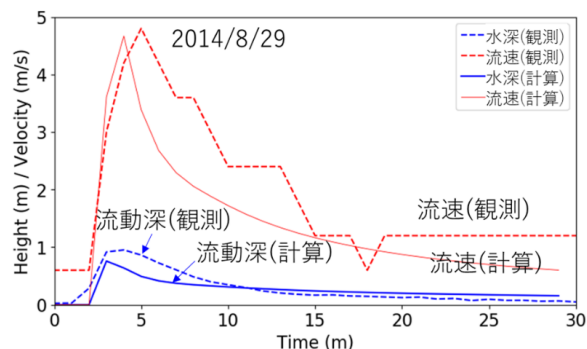


図-2 水深と流速の時間変化

参考文献

- 1) 芦田和男、江頭進治、中川 一：21世紀の河川学、京都大学学術出版会、2008
- 2) 水山高久、上原信司：土石流の水深と流速の観測結果の検討、砂防学会誌、Vol.37、No.4、pp.23-26、1984
- 3) 大坂 剛、高橋英一、國友 優、山越隆雄、能和幸範、木佐洋志、石塚忠範、宇都宮玲、横山康二、水山高久：桜島における土石流荷重計による単位体積重量測定、砂防学会誌、Vol.65、No.6、pp.46-50、2013
- 4) 西口幸希、内田太郎、石塚忠範、里深好文、中谷加奈：細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーション、砂防学会誌、Vol.64、No.3、pp.11-20、2011
- 5) 江頭進治、宮本邦明、竹林洋史：崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構、砂防学会誌、Vol.68、No.5、2016
- 6) 山崎祐介、江頭進治：豪雨に伴う土砂・流木の生産と流下過程に関する研究、河川技術論文集、第24巻、pp.71-76、2018
- 7) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム（1）、砂防学会誌、Vol.46、No.1、pp.45-49、1993
- 8) 宮本邦明、伊藤隆郭：支配方程式に浸食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法、砂防学会誌、Vol.55、No.2、pp.24-35、2002

3.2 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

3.2.2 土砂移動の監視を踏まえた被害予測技術に関する研究（2）

担当チーム：土砂管理研究グループ

（地すべりチーム）

研究担当者：藤平大、竹下航

【要旨】

本研究では、既往地すべりの移動量観測値をもとに、ひずみとひずみ速度の経時変化から崩壊の切迫性を評価する手法を検討した。その結果、地すべりのひずみとひずみ速度が急激に増加する点（加速点）以降の観測値を用いた場合に、既往の崩壊時刻予測手法の信頼性が高くなる傾向が示された。また、収集した事例では、加速点及び崩壊直前のひずみとひずみ速度は共に一定値を超えていた。これらの結果から、地すべりのひずみとひずみ速度に閾値を設定し崩壊の切迫性を区分して評価できる可能性を示した。

キーワード：地すべり、切迫性評価、崩壊時刻予測、ひずみ、ひずみ速度

1. はじめに

崩壊性地すべりは、一般の移動土塊の動きが緩慢な地すべりとは異なり、比較的速い速度で短時間に滑落するために大きな被害を伴う場合が多い。このような崩壊性地すべり災害から人的被害を未然に防ぐ一つの方法として、地すべりの崩壊時刻を予測して、適切な警戒・避難を実施することが挙げられる。

これまでに、定常ひずみ速度から斜面の崩壊を予測する方法¹⁾をはじめ、数多くの斜面の崩壊時刻の予測式が提案されている。しかしながら、これらの予測式では、それぞれの適用範囲や計算条件の設定方法などに一定の基準がないものが多く、個々の地すべりで計算条件を設定し計算結果を評価しなければならない。

そこで、本研究では、現地での地すべりの計測結果をもとに、既往の崩壊予測手法の適用性を調査するとともに、地すべりのひずみとひずみ速度に着目した崩壊の切迫性評価手法を検討した。

2. 研究方法

崩壊時刻予測の既往手法を適切に用いるには、現在の地すべりのクリープ段階を把握することが重要となる。しかし、実際の地すべりは、3つのクリープ段階を経て崩壊に至る場合もあれば、加減速などを繰り返した後に崩壊する場合や、そのまま変位が停止する場合もある²⁾。そのため、地すべりの滑動が進行する過程で、現在の地すべりのクリープ段階を把握することは困難を伴う。

本研究では、既往文献や災害報告資料から、地すべりブロック頭部での移動量が地盤伸縮計により観測されて

おり、地すべり移動体の斜面長が確認可能な34事例を収集した。収集した事例では、崩壊事例が12事例、未崩壊事例が22事例に分類された。これらの事例の計測値をもとに、ひずみとひずみ速度の経時変化から、地すべりのクリープ段階を評価する手法を検討した。この検討では図-1に示すように、地すべりの斜面長と頭部での変位量の比(D/L)を「ひずみ」とし、1時間当たりのひずみの増加量を「ひずみ速度」としている。次に図-2に示すように、各崩壊事例において、ひずみとひずみ速度の関係の経時変化を調査し、ひずみとひずみ速度が急激に増加する点を「加速点」として読み取っている。

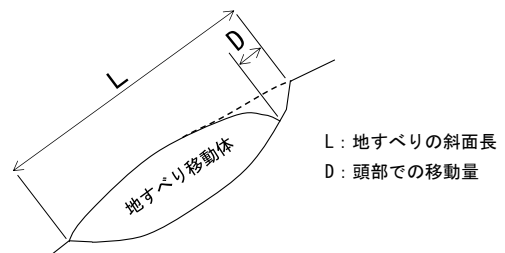


図-1 ひずみの算出方法³⁾

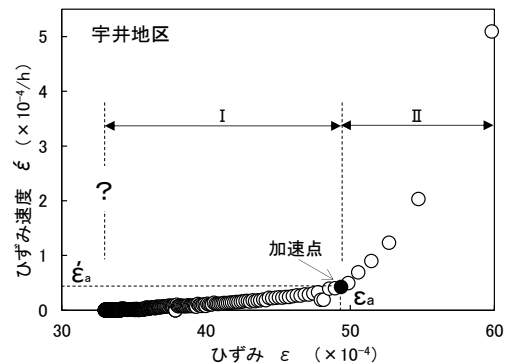


図-2 加速点の読み取り例³⁾

3. 研究結果

3.1 ひずみとひずみ速度による崩壊の切迫性評価

収集した崩壊事例について、ひずみとひずみ速度の経時変化を整理した。その結果、崩壊事例 12 事例中 9 事例において加速点の読み取りが可能であった。解析対象 34 事例の最大ひずみ (ϵ_m) と最大ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_m$)、及び加速点の読み取りが可能であった 9 事例の加速点ひずみ (ϵ_a) と加速点ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_a$) を図-3 に示す。図-3 は両対数表示であり、崩壊事例に加えて未崩壊事例も示した。崩壊事例では、最大ひずみ速度は $1.3 \times 10^{-4}/h$ 以上、最大ひずみは 57×10^{-4} 以上の領域に分布する。加速点ひずみ速度は $0.3 \times 10^{-4}/h$ 以上、加速点ひずみは 21×10^{-4} 以上の領域に分布する。一方、未崩壊事例については、一定の範囲の値をとる傾向は認められなかった。今回の解析事例では、崩壊事例の加速点と、崩壊直前に最大ひずみ速度を示した時のひずみとひずみ速度は共に一定値を超え、両者に閾値(図-3 に示す破線)が存在する可能性が考えられた。

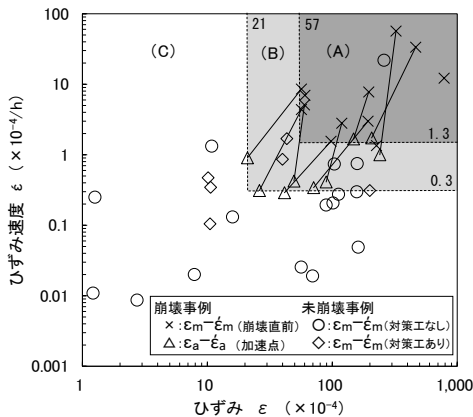


図-3 ひずみとひずみ速度の関係
 実線：同一事例の加速点と崩壊直前の計測値を結んだ線
 破線：加速点と崩壊直前の閾値

3.2 切迫性評価手法の適用例

3.2.1 綿田地すべりの概要

対象とした地すべりは大分県豊後大野市朝地町綿田地区で発生した。綿田地区は平均勾配 20 度の丘陵地であり、古くからの棚田と家屋が点在する。平成 29 年 5 月 16 日に一軒の民家宅地の地割れが報告された以降、多数の亀裂が発見されており、5 月 24 日時点では、亀裂群は幅約 250m、長さ約 400m の弧状に分布した。

3.2.2 崩壊の切迫性評価

計測開始から 5 月 26 日 11 時までの計測値を用いて、ひずみとひずみ速度を算出しプロットした結果を図-4 に示す。いずれの計測点でも、ひずみとひずみ速度は増

加傾向にあるものの、切迫性の評価区分は領域 C である。そのため、この時点では、地すべりのクリープ段階は近接予測法や移動速度逆算法により算出された崩壊予測時刻の信頼性は低いと考えられた。実際に、5 月 28 日を過ぎても地すべりが崩壊に至ることはなく、変位速度は次第に小さくなっていった。このように、計測値から算出したひずみとひずみ速度の経時変化を確認していくことによって、従来の崩壊予測手法による予測時刻の信頼性を評価することが可能と考えられる。

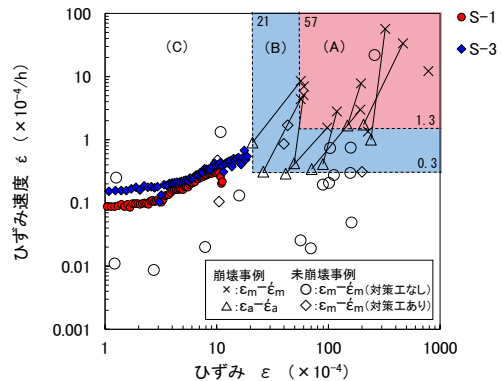


図-4 綿田地区におけるひずみとひずみ速度の経時変化

4. まとめと今後の課題

本研究では、ひずみとひずみ速度の 2 つの指標を用いて、地すべりの崩壊に対する切迫性を評価する手法を検討した。この手法は、ひずみを算出する際に、斜面長を計測した地すべりブロックにのみ適用される。そのため、監視を行っている中で、複数のブロックの存在が疑われる場合などは、適宜、斜面長の設定を変更するなどの対処を行うことも必要である。

本研究は限られた事例の中での検討であるため、さらに事例を蓄積し、手法の信頼性を高めていく必要があると考えている。

謝辞

本研究では各都道府県より地すべり災害資料を提供いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 斉藤迪孝・上沢弘: 斜面崩壊時期の予知、地すべり、Vol. 2、No. 2、pp. 7-12、1966
- 2) 斉藤迪孝: 実証土質工学、技報堂出版、pp. 144-182、1992
- 3) 杉井良平・西井稜子・石井靖雄: 地すべりのひずみ及びひずみ速度の経時変化による崩壊の切迫性評価、日本地すべり学会誌、Vol. 54、No. 6、pp. 11-20、2017

3.2 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

3.2.3 ゲリラ豪雨や急激な融雪等へ対応する道路のり面・斜面の合理的な管理手法に関する研究（1）（ゲリラ豪雨対応・道路斜面：安全確保）

担当チーム：地質・地盤研究グループ（地質チーム）

研究担当者：浅井健一、矢島良紀

【要旨】

災害データ及び関連する地形・地質状況、降雨状況を分析することにより、降雨と斜面災害の相関関係を明らかにし、安全性確保のための規制雨量の設定手法を検討するため、平成 30 年 7 月の西日本豪雨における降雨と道路斜面災害の関係について分析を行った。その結果、積算雨量や最大 1 時間雨量との関係では必ずしも雨量が多いほど災害数が多くなる傾向ではなく、積算雨量及び最大 1 時間雨量を 1km メッシュごとに定められている大雨注意報の発令基準で割り戻した雨量分布図と調和する傾向にあった。これは降雨経験の差の影響が考えられる。キーワード：豪雨、道路、斜面、災害

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨や急激な融雪による道路斜面災害により長期通行止めに至る災害が多発しており、人的被害の発生懸念など安全・安心上の大きな課題となるとともに、交通機能確保の観点からも課題となっている。また、重要路線等においてはゲリラ豪雨や急激な融雪に対しても、早期の交通機能の確保が求められている。これらの課題に対し、本研究は災害データ及び関連する地形・地質状況、降雨状況を分析することにより、降雨と斜面災害の相関関係を明らかにし、安全性確保のための規制雨量の設定手法を検討するものである。

2. 研究方法

平成 30 年度は災害発生と降雨との関係を検討するため、平成 30 年 7 月の西日本豪雨対象として、アメダスデータをもとに降雨と道路斜面災害の関係について分析を行った。

3. 研究結果

3.1 災害の状況

西日本豪雨における道路斜面災害の府県別の内訳を表-1 に示す。これは 7 月 10 日時点までの国道及び府県道の通行止め等の情報を中部地方以西の各地方整備局及び府県のホームページに掲載された情報から収集したものである（ただし新潟県及び沖縄県は除く）。収集した災害 1,154 件のうち 828 件は斜面災害の確実度が高いもの

（「土砂崩壊」「法面崩壊」「土砂流出」などと記載されており明らかに斜面災害と認められるもの）、それ以外の 326 件は斜面災害の確実度が前者に比べて低いもの（「道路損壊」「路肩損壊」あるいは単に「災害」などと記載されており斜面災害の可能性はあるが河川災害との区別が難しいもの）である（図-1～4 では前者を確実度高、後者を確実度中と区別して示している）。なお、「洗掘」「冠水」など明らかに原因が斜面災害でないと思われるものについては除外している。

表-1 西日本豪雨における道路斜面災害の府県別内訳

収集災害数：1,154 件 （うち斜面災害の確実度が高いもの 828 件、以下同じ）
府県別災害数 中国地方 広島県：272 件(184)、岡山県：158 件(89)、山口県：106 件(56)、鳥取県：20 件(19)、島根県：17 件(12) 四国地方 愛媛県：91 件 (65)、高知県：39 件 (22)、徳島県：11 件 (7)、香川県：5 件 (4) 九州地方 福岡県：46 件(33)、佐賀県：39 件(37)、大分県：33 件(27)、鹿児島県：10 件(8)、熊本県：9 件(8)、長崎県：3 件(3) 近畿地方 兵庫県：106 件(97)、京都府：80 件(64 件)、大阪府：16 件(12)、滋賀県：12 件(12)、和歌山県：4 件(4)、奈良県：4 件(0)、三重県：1 件(1) 中部地方 岐阜県：61 件(53)、長野県：23 件(23)、福井県：18 件(18)、富山県：4 件(1)、石川県：3 件(2)、愛知県：3 件(3)、静岡県：2 件(2)

3.2 降雨と道路斜面災害の関係

西日本豪雨における降雨の分布と道路斜面災害位置を図-1～6 に示す。降雨は気象庁より公表されているアメダス観測点における 7 月 3～8 日の 6 日間のデータを使

用した。降雨の「分布図の作成に当たっては GIS によるスプライン補完を行った。

図-1は7月3～8日の6日間の積算雨量の分布である。概ね 300～400mm 以上で災害数が多くなる傾向にあるものの、必ずしも雨量が多いほど災害数が多くなる傾向ではない。例えば災害が密に発生している中国地方南部に比べて、雨量が最も多い四国中央部では災害数が相対的に少ない傾向があるなど、地域差が認められる。

図-2は7月3～8日の6日間における最大1時間雨量の分布である。概ね時間雨量 40mm 以上で災害数が多くなる傾向にあるものの、中国地方などでは比較的小さい雨量強度でも多くの災害が発生しているのに比べて、四国中央部では雨量強度が大きいのが災害数が相対的に少ない傾向があるなど、積算雨量の場合と同様に地域差が認められる。これらの地域差の要因としては降雨経験の差などが考えられる。

そのことを踏まえ、積算雨量及び最大1時間雨量を 1km メッシュごとに定められている大雨注意報の発令基準（土壌雨量指数で設定されており、地域ごとの降雨

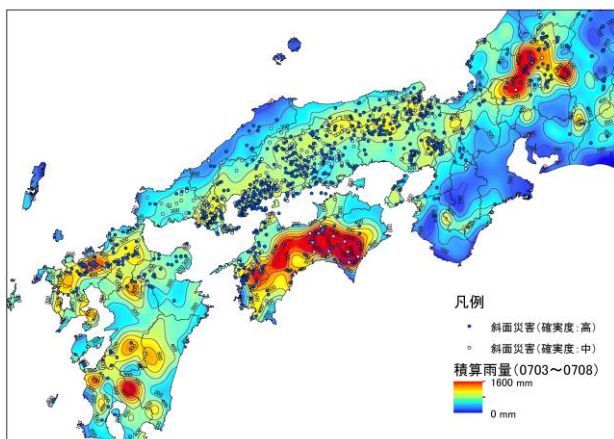


図-1 積算雨量分布図 (7月3～8日)

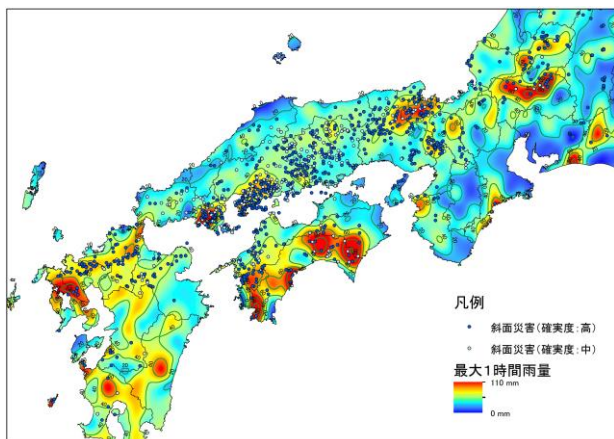


図-2 最大1時間雨量分布図 (7月3～8日)

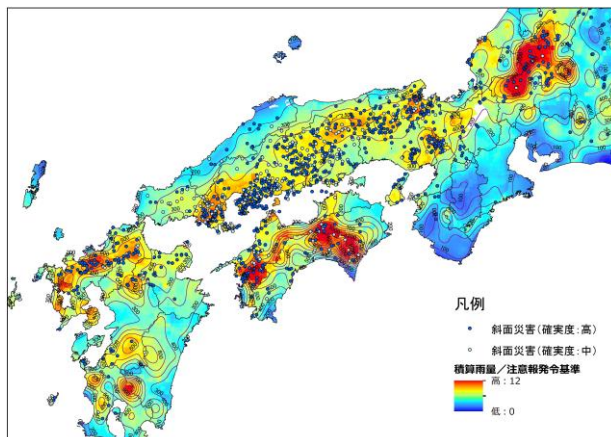


図-3 積算雨量/大雨注意報発令基準分布図 (7月3～8日)

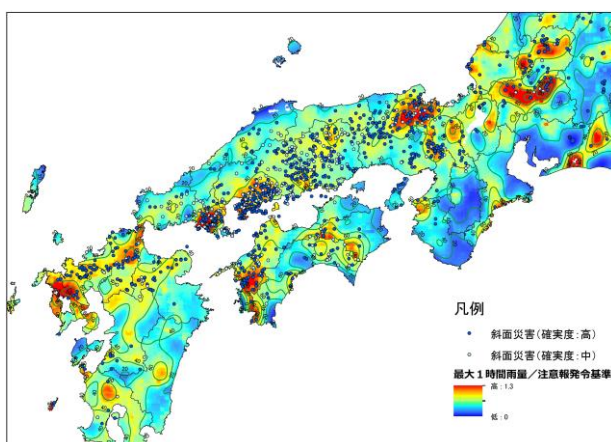


図-4 最大1時間雨量/大雨注意報発令基準分布図 (7月3～8日)

経験が反映されていると考えられる)で割り戻した分布図を図-3～4に示す。図-1～2に比べて、広島県南部、山口県東南部、愛媛県西部などで分布図と調和する傾向にあることがうかがえる。したがって、今後、既往最大雨量や降雨確率を考慮した降雨指標と災害発生との関係を分析する必要があると考えられる。

3. まとめ

平成30年7月の西日本豪雨における降雨と道路斜面災害の関係について分析を行った。その結果、積算雨量や最大1時間雨量との関係では必ずしも雨量が多いほど災害数が多くなる傾向ではなく、積算雨量及び最大1時間雨量を 1km メッシュごとに定められている大雨注意報の発令基準（土壌雨量指数で設定）で割り戻した雨量分布図と調和する傾向にあった。これは降雨経験の差の影響が考えられることから、今後、既往最大雨量や降雨確率を考慮した降雨指標と災害発生との関係を分析する必要があると考えられる。

3.2 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

3.2.4 ゲリラ豪雨や急激な融雪等へ対応する道路のり面・斜面の合理的な管理手法に関する研究（2）（ゲリラ豪雨・道路のり面：安全確保）

担当チーム：地質・地盤研究グループ（土質・振動）
研究担当者：佐々木哲也、加藤俊二

【要旨】

豪雨時の道路利用者の安全性確保の観点から、土砂災害の危険性がある山地部の道路においては事前通行規制による対応が行われている。現在用いられている「異常気象時における道路通行規制要領」では連続雨量により事前通行規制の実施の判断をされているが、突発的に発生するゲリラ豪雨を考慮しておらず十分に対応できていない。このため、ここではゲリラ豪雨にも対応した事前通行規制手法を提案することを目的に検討を行っている。

平成 28、29 年度は、ゲリラ豪雨に対応した降雨指標を検討することを目的に、過去の道路のり面の災害事例に対して種々の降雨指標を設定し降雨状況と災害との関連性の整理を行い、6 時間累積雨量を生起確率 1 年の連続雨量で正規化した値が、ゲリラ豪雨に対する事前通行規制の指標値となる可能性が見られた。

キーワード：ゲリラ豪雨、土砂災害、道路のり面、道路管理、事前通行規制

1. はじめに

豪雨時の道路利用者の安全性確保の観点から、土砂災害の危険性がある山地部の道路においては事前通行規制による対応が行われている。現在用いられている「異常気象時における道路通行規制要領」では連続雨量により事前通行規制の実施の判断をされているが、突発的に発生するゲリラ豪雨を考慮しておらず十分に対応できていない。このため、ここではゲリラ豪雨にも対応した事前通行規制手法を提案することを目的に検討を行っている。平成 28、29 年度は、事前通行規制におけるゲリラ豪雨に対応した降雨指標を検討するための基礎資料を得ることを目的に、過去の道路のり面の災害事例に対して種々の降雨指標を設定し降雨状況と災害との関連性の整理を行った。平成 30 年度は、レーダーアメダス解析雨量を用いて、平成 28、29 年度同様の分析を行い、レーダーアメダス解析雨量の適用性に関する検討を行った。

2. 豪雨等による道路のり面災害の降雨パターン分析

2.1 災害時降雨データの整理

平成 20～23 年度に発生した直轄

国道の斜面災害事例より切土および盛土のり面で発生した表層崩壊・土砂流出等の 61 の災害事例について、災害時の降雨状況を分析し事前通行規制の指標検討の基礎資料として整理を行った。

まず始めに、災害箇所最寄りのアメダスデータを用いて、各事例の災害発生時刻からさかのぼり 1 ヶ月前までの降雨データを収集し、事前通行規制の指標値の候補として考えられる 1、3、6、12、24、48、72 時間毎の累積雨量、事前通行規制で用いられる連続雨量および土壌雨量指数を算出し整理した。図 2-1 にその一例を示す。

2.2 災害時降雨パターンの分類

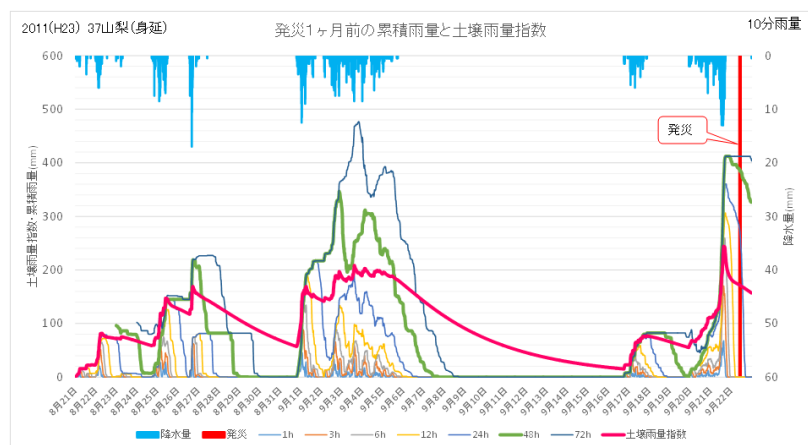


図 2-1 災害時降雨データの整理例

現状の事前通行規制は、概ね生起確率1～2年程度の連続雨量を基準値として実施されており、基準値は災害の発生と経験した連続雨量の関係を考慮して適宜見直しが行われている。図2-2は、現状の事前通行規制の課題を確認するために整理したものである。縦軸は、災害時連続雨量より前の先行降雨や長雨といった降雨の連続性を示すため48時間累積雨量 $\Sigma 48$ を用い、横軸は現状の事前通行規制での捕捉の可否を分類するため災害時連続雨量 R を用いたもので、いずれも生起確率1年の連続雨量 $R(1)$ で正規化している。なお、ここで用いた生起確率1年の連続降雨量 $R(1)$ は、アメダス確率年降雨計算プログラム(土木研究所HP参照、確率年計算式:フェア式)を用いて算出した概略値であることを断っておく。また、縦軸の $\Sigma 48$ を採用した理由は、各事例の1ヶ月間の個々の降雨で発生する土壌雨量指数のピーク値の発生時刻に対し、各時間毎の累積雨量のうち48時間累積雨量のピーク値の発生時刻との相関が高く、簡便に先行降雨の影響を評価できる可能性が高いと考えたためである。

図2-2において、横軸が1より大きい場合には、現状の連続雨量法による事前通行規制で捕捉できると考えられる災害であり、それ以下は見逃し災害となる。さらに縦軸が1より大きい場合には累積雨量が多い豪雨型の災害で、縦軸と横軸の比1:1の線より上にある場合には48時間以内に災害時連続雨量のほかに先行降雨があったことを示している。さらに、いずれも1より小さいものをここでは少降雨型の災害と分類し、この中には降雨との関連性が低いものも含まれる。これを見ると、約半数は連続雨量法による事前通行規制が設定されている場合には捕捉できであろう災害(図中破線右側)であるが、残りの半数は事前通行規制では捕捉できない災害(図中破線左側)であり、災害時の連続雨量が規制基準以下だが直前に先行降雨がありその影響を受けるもの(先行降雨型災害)と大きな先行降雨もなく連続雨量も規制基準未満のもの(少降雨型災害)への対応が必要であることがわかる。

次に、図2-3は集中豪雨型の分類を行うことを目的に整理したもので、縦軸に被災時の連続雨量 R を $R(1)$ で正規化した値($R/R(1)$)を、横軸に災害発生前6時間の累積雨量 $\Sigma 6$ を災害時連続降雨 R によって正規化した値($\Sigma 6/R$)を用いている。ここでは、 $R/R(1) \geq 0.5$ かつ $\Sigma 6/R \geq 0.7$ となるものを集中豪雨型の目安(図中四角囲み)とした。 $\Sigma 6/R$ が1に近いものは、災害時の連続雨量のほとんどが6時間以内に集中的に雨が降っているものであり、災害時の連続雨量が規制基準未満となるような少降雨の

場合でも比較的雨量の多いものの一部(図中赤丸囲み)は集中豪雨型に分類された。このような場合の降雨は、図中右上に示すように連続雨量もほとんど1のまま急激

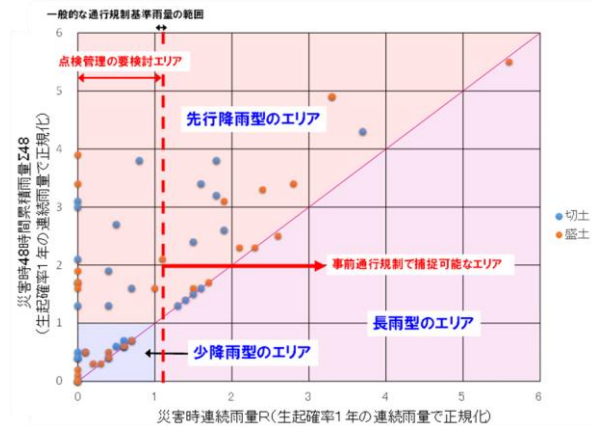


図2-2 災害時雨量の関係 ($R/R(1) - \Sigma 48/R(1)$)

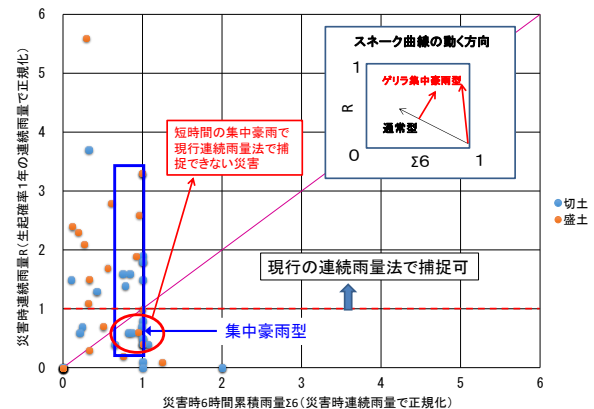


図2-3 災害時雨量の関係 ($\Sigma 6/R - R/R(1)$)

な増加をするので、短時間予測雨量なども踏まえてこの動きを考慮することで、事前通行規制の判断をすることが可能ではないかと考えられる。

2.3 スネーク曲線による災害時降雨の分析

平成29年度は、前述の直轄国道の切土および盛土のり面災害事例より融雪の影響と考えられる事例を除いた降雨を起因として発生したと考えられる災害58件について、ゲリラ豪雨を捕捉するための降雨指標の検討を目的として、6時間の累積雨量 $\Sigma 6$ を用いたスネーク曲線を作成し、災害時降雨のスネーク曲線の変化形状について分析を行った。

スネーク曲線の作成は、降雨の地域性を排除するため、横軸に連続雨量 R を $R(1)$ で正規化した値($R/R(1)$)、縦軸に6時間累積雨量 $\Sigma 6$ を $R(1)$ で正規化した値($\Sigma 6/R(1)$)を用いて、災害発生時からさかのぼり1か月間の降雨について行った。ここで、グラフ中、 $R/R(1) \geq 1$ となる範

圃で発生した災害は、1年確率の連続雨量で捕捉でき、 $\Sigma 6/R(1) \geq 1$ の場合は6時間以内に1年確率の連続雨量以上の降雨が集中的に発生したことを表す。

58件の災害について、スネーク曲線を作成した結果、降雨パターンは、概ね長雨型、集中豪雨型、先行降雨型、少降雨型の4パターンの傾向に分類することができた。

以下、それぞれのスネーク曲線の特徴と例を示す。

①長雨型災害 (16件/58件)

スネーク曲線の例を図2-4に示す。災害時の連続雨量は1年確率以上の連続雨量かつ $R/R(1)$ が比較的大きく、集中豪雨指標として $\Sigma 6/R(1)$ を用いた場合に、降雨継続中に生じている雨が、発災に至るまで $\Sigma 6/R(1) \geq 1$ とならなかったものを長雨型(連続雨量型)と判別した。

②集中豪雨型災害 (21件/58件)

スネーク曲線の例を図2-5に示す。災害時の連続雨量は概ね1年確率の連続雨量で、 $R/R(1)$ と $\Sigma 6/R(1)$ との関

係は概ね1:1で上昇し、ともに1年確率連続雨量 $R(1)$ を超えていたものを集中豪雨型と判別した。

③先行降雨型災害 (8件/58件)

スネーク曲線の例を図2-6に示す。災害時の降雨の前に、比較的雨量の多い先行降雨があり、その後の小降雨により発災し、発災時の $R/R(1)$ と $\Sigma 6/R(1)$ は、それぞれ1未満となったものを先行降雨型と判別した。

④少降雨型災害 (13件/58件)

スネーク曲線の例を図2-7に示す。発災前の降雨もほとんどなく、発災時の降雨も $R/R(1)$ 、 $\Sigma 6/R(1)$ とともに非常に小さかったものを少降雨型と判別した。

$\Sigma 6$ 等の短時間累積雨量と連続雨量の対比からスネーク曲線を描くことで、災害の降雨パターンを分類することができ、上記降雨パターン①~③は、降雨関連災害として通行規制対象と考えられる。

①②は、連続雨量型の降雨パターンであるため、今回

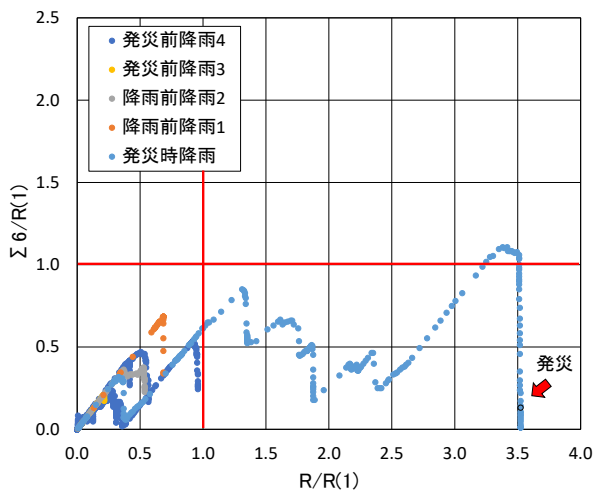


図2-4 長雨型災害のスネーク曲線の例

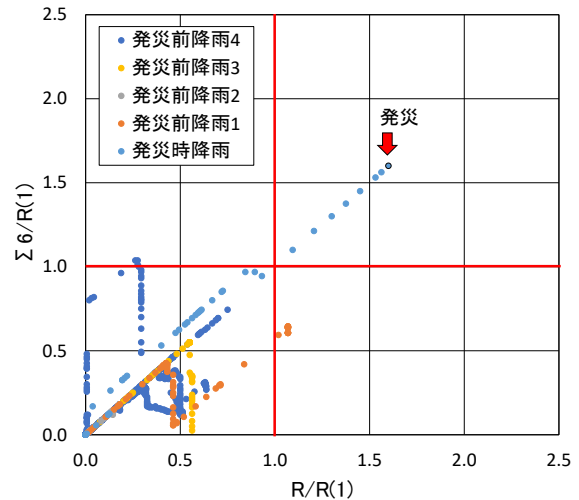


図2-5 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例

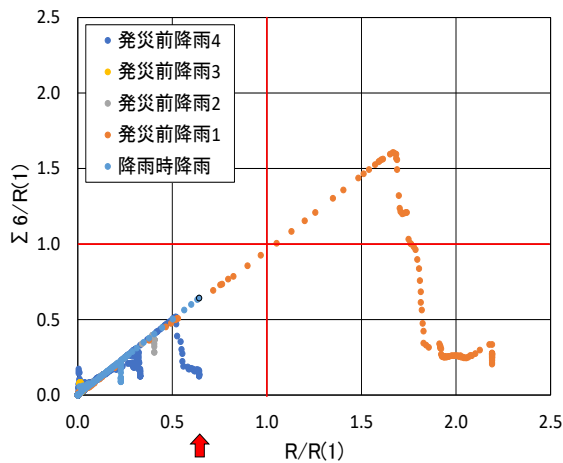


図2-6 先行降雨型災害のスネーク曲線の例

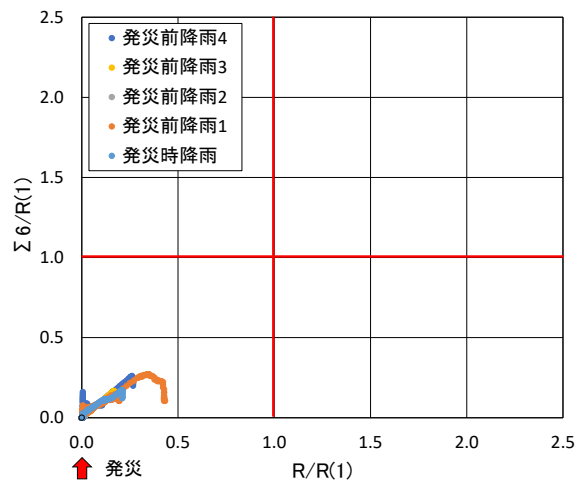


図2-7 少降雨型災害のスネーク曲線の例

の検討結果をベースとした災害の捕捉ができるものと考えられる。さらに $\Sigma 6$ を用いることで短時間降雨予測雨量を併用した管理体制も可能となるものと考えられる。

③については、先行降雨を加味できる指標が必要である。

一方、④は降雨の影響は小さく、排水不良や河川の増水や、波浪の影響等によって被災したと考えられるものである。これについては事前通行規制ではなく、施設の維持管理等で対応すべき事例と考えられる。

ここで、比較のために図5の事例について3時間累積雨量 $\Sigma 3$ を用いて整理した結果を図2-8に示す。 $\Sigma 3$ を用いた場合にも、発災時降雨と発災前降雨との違いをみることはできると考えられるが、 $\Sigma 6$ を用いて整理した図2-5の方が発災時降雨と発災前降雨との違いを明瞭に表しているものと考えられ、集中豪雨型の降雨指標として適しているものと思われる。

また、高速道路等では時間雨量一連続雨量による規制が行われており、比較のために図2-5で示した集中豪雨型の事例について縦軸に10分毎の時間雨量 r (累積時間雨量 $\Sigma 1$) を用いたグラフを図2-9に示す。図では、仮に時間雨量の基準値を1年確率連続雨量 $R(1)$ の0.4倍(発災時の時間雨量とほぼ等しい)とした場合のライン(青破線)を示している。降雨は1時間内で一定量で降るわけではなく観測時間間隔10分毎に増減があり、累積時間雨量 $\Sigma 1$ も短時間のうちに増加したり減少したりする。このため、時間雨量による規制ラインの引き方によっては、規制および規制解除を繰り返し行う必要が生じる可能性があるといった課題がある。

3. レーダーアメダス解析雨量の適用性検討

ここまでの検討は、被災地近傍のアメダスデータを用いているため被災地ピンポイントの降雨ではないが、降雨パターンと災害を関連付けるための整理を行ったものである。事前通行規制は規制区間に設置された雨量計による代表地点の雨量で規制を行っているが、規制区間の延長は1~20km程度と長短多岐にわたっており、特に区間長が長いところでは代表地点の雨量計では区間全体の降雨状況を捉えることが難しく、雨量計を増設して密に観測するかあるいは面的に降雨を把握する方法の活用が必要である。後者の一つの方法として、気象庁より発表されるレーダーアメダス解析雨量の速報値の活用が考えられる。

そこで平成30年度は、レーダーアメダス解析雨量を用いた被災時の降雨パターン分析を行うとともに、実降雨量との比較によるレーダーアメダス解析雨量の適用性

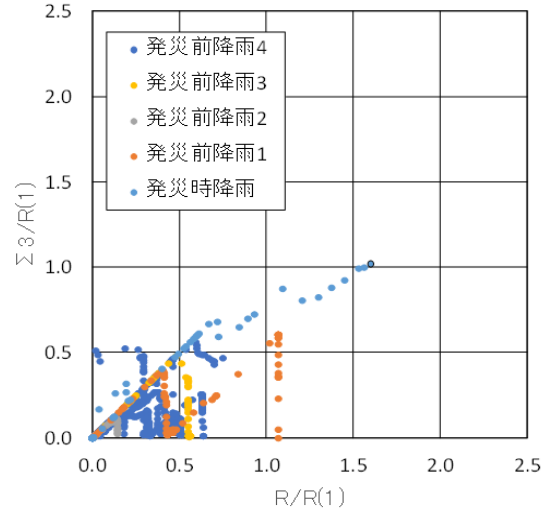


図2-8 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例 ($\Sigma 3$ による整理)

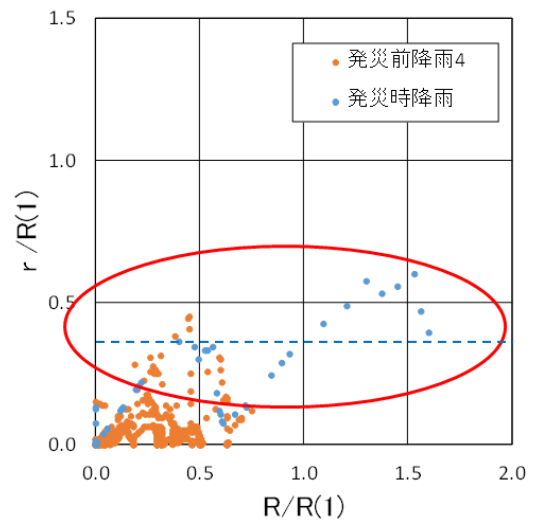


図2-9 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例 ($r(\Sigma 1)$ による整理)

検討を行うこととした。レーダーアメダス解析雨量は、国土交通省河川局・道路局と気象庁が全国に設置しているレーダー(Cバンド)やアメダス等の地上の雨量計を組み合わせ、降水量分布を1km四方の細かさで解析したものである(ただし2005年以前は2.5km四方、2001年3月以前は5km四方)。

まずはじめに、昨年度までに実施した近傍アメダス雨量データを用いた降雨パターン分析について、災害箇所のレーダーアメダス解析雨量(一般社団法人気象業務支援センター発行)を用いて同様の分析を行い、比較検討を行った。ここで、レーダーアメダス解析雨量は30分

表 3-1 降雨パターンの判別結果

		レーダーアメダス解析雨量				計
		長雨	集中豪雨	先行降雨	少降雨	
近傍 アメダス	長雨	6	8	2	0	16
	集中豪雨	2	19	0	0	21
	先行降雨	0	2	6	0	8
	少降雨	0	6	2	5	13
計		8	35	10	5	58

毎に前 1 時間の 1km メッシュ内の平均的雨量として整理されていることから、値の 1/2 を 30 分雨量 (以下、解析 30 分雨量) として用いた。

表 3-1 に、近傍アメダスおよび解析雨量による降雨パターンの判別結果を示す。近傍アメダスデータで少降雨型や長雨型に判別された災害の約半数が解析雨量データでは集中豪雨型に判別された。これは被災箇所と観測地点 (解析雨量の場合にはメッシュ) の位置関係から、近傍アメダスは被災箇所と大きく離れているため強い雨域から外れ、被災箇所の降雨が大きかったことによるものと考えられる。その結果被災箇所が 1 km メッシュ内に含まれる解析雨量での降雨量は全体的に大きい値となっていた。その一方で、アメダスデータで長雨型や集中豪雨型に判別された災害が解析雨量データでは先行降雨型に判別されたものもあり、これは雨域の移動や降雨強度の分布の影響により生じた結果と考える。したがって、解析雨量を用いることで雨域の移動や降雨強度の分布の影響を考慮した規制が可能となるものと考えられる。

ここで、解析雨量は 1 km 内のどこかで降雨がある場合には必ず雨量が発生し、そのメッシュでの平均的な値となるため地上の雨量計を用いた補正が行われているものの、実降雨との計算上の誤差があるものと考えられる。

このため、解析雨量を用いるにあたっては実降雨と解析雨量との誤差の影響を確認し、誤差を踏まえた運用の考え方を検討する必要がある。そこで、被災事例をもとに実降雨と解析雨量との比較を行い、解析雨量を用いるうえでの課題を整理することとした。

検討方法は、近傍アメダスデータでは少降雨型であったが解析雨量データで集中豪雨型に分類されたもののうち、近傍アメダスよりも近い箇所に国土交通省で設置している雨量計 (テレメーター) がある箇所を抽出し、災害時降雨について同様の比較を行った。さらに、レーダーアメダス解析雨量の速報値は 10 分毎に前 1 時間の解析雨量 (1km メッシュ単位) が報告され、土壌雨量指数の計算では時間雨量を 1/6 した 10 分雨量 (以下、解析 10 分雨量) を用いていることから、テレメーター雨量については、実測の 10 分雨量 (以下、観測 10 分雨量) とテレメーターの観測値から解析 10 分雨量と同様の方法で求

めた値 (以下、換算 10 分雨量) による降雨パターンの比較を行った。

当該箇所は、平成 22 年に盛土のり面の表層が崩壊した箇所、災害箇所から近傍アメダスまでの距離が約 13km、近傍テレメーターまでの距離が約 5km の位置にある (図 3-1 参照)。図 3-2 に示すように、近傍アメダスによる降雨パターンでは、少降雨型災害に分類されたが、被災箇所の解析 30 分雨量で整理すると、図 3-3 に示すように集中豪雨型災害に分類されたものである。

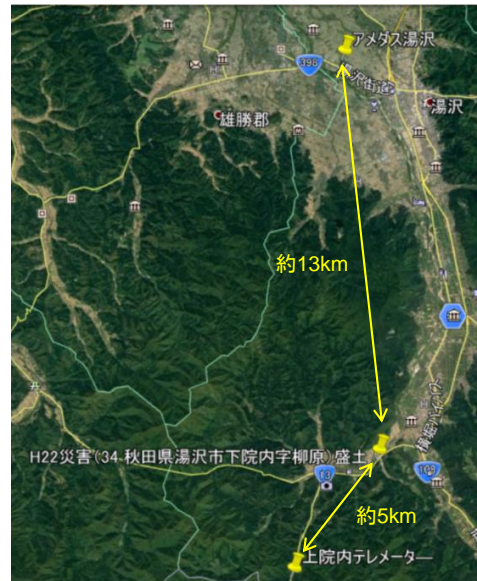


図 3-1 災害箇所と観測箇所の位置

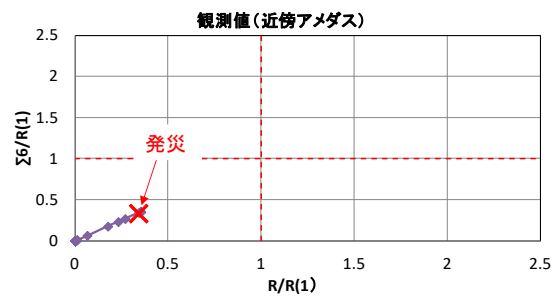


図 3-2 近傍アメダスの降雨パターン

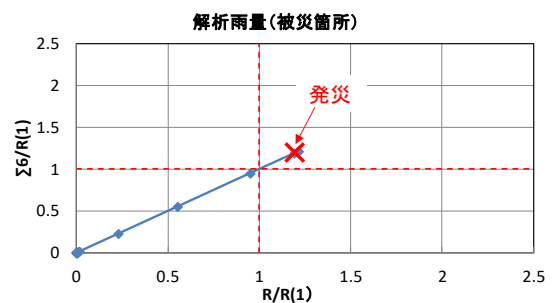


図 3-3 解析 30 分雨量の降雨パターン

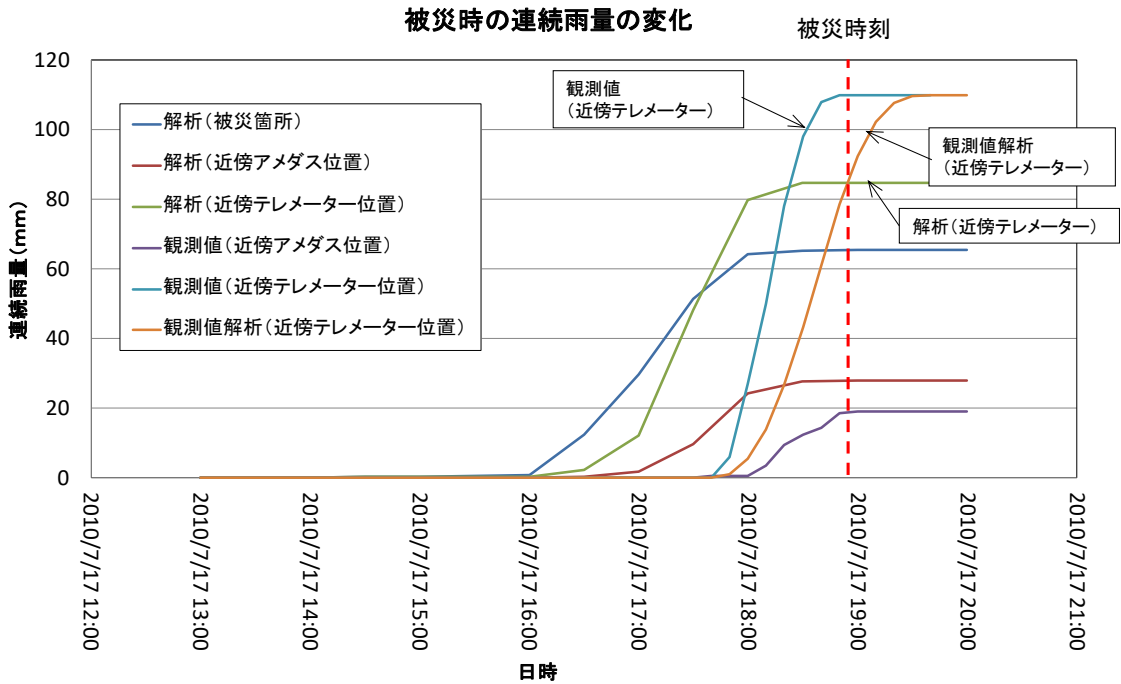


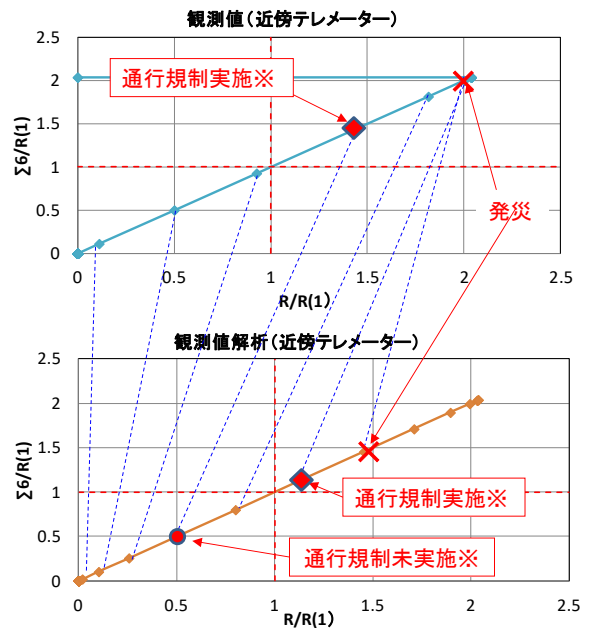
図 3-4 各雨量データによる連続雨量の変化

図 3-4 に、各降雨データによる災害時の連続雨量を整理したものを示す。図中凡例の、「解析」は解析 30 分雨量を用いたもの、「観測値」は雨量計による観測 10 分雨量を用いたもの、近傍テレメーターの「観測値解析」は換算 10 分雨量を用いたものである。また () 内は場所を示している。

この図から、アメダスやテレメーターのピンポイントの雨量計では降雨が観測されない場合でも、解析 30 分雨量による降雨は 1km メッシュ内のどこかで降雨があると判断されると雨量として記録されるため、雨量計で観測された実降雨よりも早い時間から雨量を記録しているのがわかる。また、解析 30 分雨量と観測値を比較すると、近傍テレメーターでは解析雨量の方が少なく、近傍アメダスでは観測値の方が少ない降雨となっており、解析雨量は実降雨に対して過大となる場合もあれば過小となる場合もある。過大となる場合は安全側に判断されるが、過小となる場合には災害を見逃す恐れもある。

また、図 3-4 中の近傍テレメーターにおける「観測値」に対して換算 10 分雨量による「観測値解析」の推移を比較すると、計算方法の特性から初期降雨が少なくなり降雨のピークが遅くなっているのがわかる。

図 3-5 に、1 年確率の連続雨量を規制基準とした仮定で、近傍テレメーターでの降雨パターン比較をしたものを示す。この災害例では、テレメーターの観測値で規制



※通行規制の実施については便宜的に赤破線右上を規制基準 (1 年確率連続雨量) とした場合の判定

※※同時刻を破線で表示

図 3-5 実雨量と換算 10 分雨量の比較

が実施された場合でも換算 10 分雨量では規制にならず、観測値では規制後約 30 分に発災し、換算 10 分雨量では 20 分遅れで規制となりその約 10 分後に発災となる。なお、被災箇所の降雨は図 3-3 の解析雨量による降雨パ

ターンから、規制ぎりぎりの程度の降雨量であったことがわかる。長雨型のような降雨の場合には 10 分程度の時間は大きな問題になりにくい、短時間の集中豪雨に対しては 10 分のずれが災害の捕捉に大きく影響する可能性がある。

4. まとめ

被災地近傍のアメダスデータを用いて降雨パターンと災害を関連付けるための整理を行った結果、道路のり面の災害と降雨の関係において、48 時間累積雨量 $\Sigma 48$ や 6 時間累積雨量 $\Sigma 6$ が、先行降雨型や集中豪雨型の災害の事前通行規制の指標値となる可能性が示唆された。また、6 時間累積雨量 $\Sigma 6$ と連続雨量 R によるスネーク曲線の形状から、災害時の降雨パターンを分類することができ、6 時間累積雨量 $\Sigma 6$ がゲリラ豪雨（集中豪雨型）災害に対する事前通行規制の指標値としての可能性が得られた。

アメダスデータは被災箇所のピンポイントの降雨ではないため、被災箇所に対してより精度の高いレーダーア

メダス解析雨量による降雨データを用いた、スネーク曲線による災害の捕捉性の分析・検討の結果、レーダーアメダス解析雨量を用いることで、短時間集中豪雨について面的に降雨を把握することができるが、事前通行規制に適用するには、実降雨に対して降雨の有無や大小の違い、降雨のピークのずれが生じるなどの課題があることがわかった。今後は、これらの課題への対応や土壌雨量指数の適用性も含めた検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 川添英生、加藤俊二、佐々木哲也：豪雨等による道路のり面災害の降雨パターン分析、第 72 回土木学会年次学術講演会、2017.9
- 2) 川添英生、加藤俊二、佐々木哲也：道路のり面災害の降雨パターン分析 ―短時間集中豪雨災害の把握―、第 73 回土木学会年次学術講演会、2018.9

3.2 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

3.2.5 ゲリラ豪雨や急激な融雪等へ対応する道路のり面・斜面の合理的な管理手法に関する研究（3）（融雪期盛土のり面分野：融雪災害の気象条件と変状に関する分析）

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地地盤チーム）

研究担当者：畠山 乃、青木 卓也、橋本 聖

【要旨】

積雪寒冷地の融雪期（3～6月）の道路通行安全性を確保した道路維持管理を行うためには、融雪水による特徴的な変状メカニズムを解明し、予め危険箇所を推測した上で対策を講じる必要がある。そのために融雪水による道路盛土の変状の挙動を計測し、それを連成解析による変状分析の研究を行っている。これまでに、北海道で融雪期に変状が生じた道路盛土に対して間隙水圧計やパイプ歪み計等の計器を設置し、融雪期間における盛土の動態観測調査を継続している。さらに、過去に北海道の主な直轄国道で発生した融雪水が一因とされる道路盛土変状の調査と要因分析から、急激な融雪状況の特徴や傾向とは、外気温が+で安定し、積雪深が100cm程度以下となると盛土や基礎地盤に多量の融雪水やその地下水が供給され、積雪低下量が過去最大値に近似してくると変状する可能性が出てくることが示唆され、積雪低下量が7日間値で40cm程度を越えると盛土の変状に注視する必要があることを明らかにした。

キーワード：融雪水、道路盛土、融雪・動態観測、急激な融雪

1. はじめに

平成24年5月と25年4月に発生した北海道中山峠の道路盛土のり面災害¹⁾²⁾に代表される融雪期の大規模な道路盛土のり面災害の変状メカニズムや北海道特有の急激な融雪が盛土に与える特徴や傾向は未だ明らかとなっておらず、道路通行安全性確保技術の開発が必要である。

本研究ではこれら融雪期道路盛土のり面変状の発生メカニズムを明確にすることで、融雪に配慮した道路盛土の通行安全確保技術を検討し、減災を目的とした合理的な管理手法の提案を目指すものである。

平成28・29年度では、融雪期に変状が確認された道路盛土を対象に融雪・動態観測を行い、過去の北海道の主な国道で発生した道路盛土の変状について詳細調査した。

平成30年度は、上記の現地の融雪観測結果と過去の変状要因調査から変状を来す融雪の特徴と傾向について分析した。特に、変状に至る急激な融雪に着目し、発生時の融雪の状態変化についても分析した。このことで危険箇所となり得る融雪期の道路盛土の特徴を明らかにすることで、安全性を確保するための管理手法に繋がる。

2. 融雪と地下水の活性

平成28年度より国道275号の道路盛土で融雪観測している（図-1）。この積雪は、2017/11/17に確認され、2018/2/28に最大積雪深231cmを観測した後、2018/5/4には積雪深が0cmとなっている。そして、日平均気温が連続して+（プラス）の気温となった2018/3/25付近を境に積雪深の低下とともに盛土内および基礎地盤の地下水位が上昇していることが確認でき、それ以前に融雪が確認されたとしても日平均気温が連続して安定的な+の外気温とならない場合には、地下水位は上昇しないと考えられる。さらに、融雪は、日最低気温が+になるまで気温が上昇した際に顕著に進んでおり、急激に低下していることが確認できる。また、その時点の積雪深は、100～130cm以下であった。つまり、外気温が+で安定し、積雪深が100cm程度以下となると、盛土や基礎地盤に多量の融雪水やその地下水が供給されてくると考えられる。

3. 変状に至る積雪低下量の分析

融雪の傾向を示すには1日にあらず、期間で分析する必要がある。そこで、融雪量の最大値とその期間に着目した。融解期に発生した過去8年間の変状件数N=12の発生直前の融雪状況と過去の融雪、積雪低下量の関係を

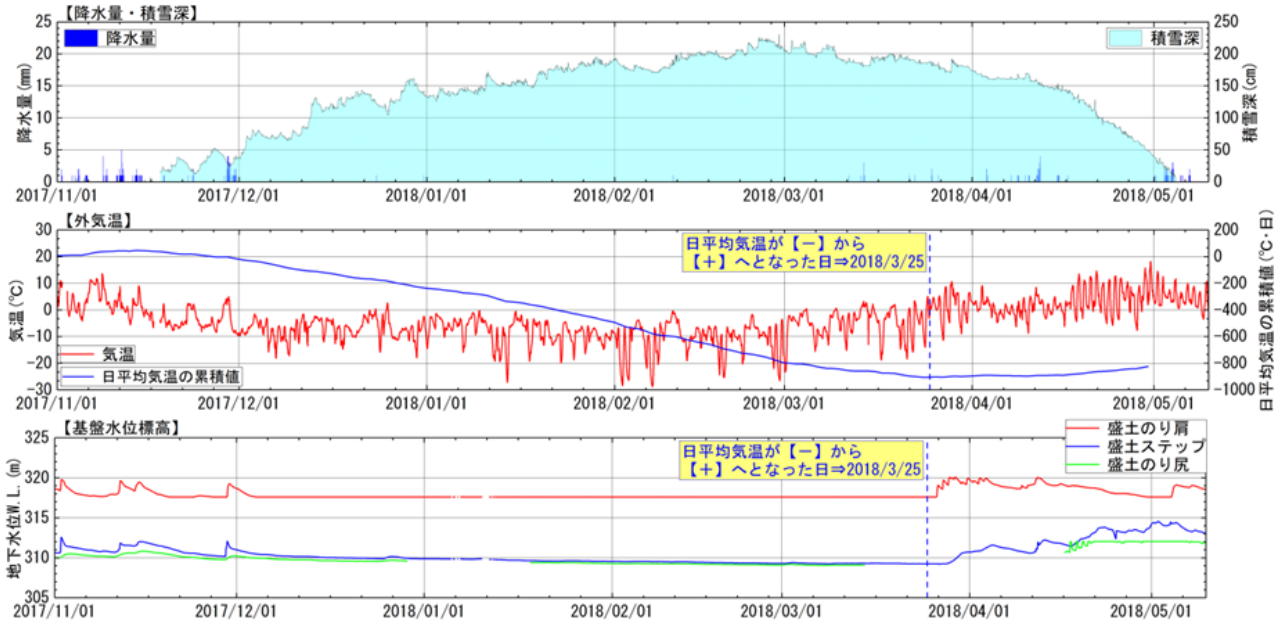


図-1 R275 道路盛土の積雪（上）と外気温（中）地下水位（下）の経時変化（積雪以降を抜粋）

を分析した。分析に使用するデータは、被災発生箇所の近隣アメダスデータおよび北海道開発局が管理する道路テレメーターデータを過去10年の2007年から取得した。まず、各年最大となるような積雪低下量とその期間を抽出し、発生年と比較した。3日間値、5日間値と試算した結果、7日間値が最大となることが分かった（図-2左）。そして、発生年についても発生直前の7日間値として計算した。その融雪低下量を過去最大値と比較した指標を融雪指数として図-2右に示す。

ここでは横軸に盛土高さを一例として関係を示した。縦軸に発生年の積雪低下量と各年の最大値との比較値である融雪指数を示す。図-2右から、総じて融雪指数が0.6以上となり過去最大値と同様の融雪指数に近似してくると変状する可能性が出てくることが示唆された。また、図-2左から、最大低下量となる時の積雪深は何れも100cmを下回ってから起きており、特別な傾向と言える。また、積雪低下量が、7日間値で40cm程度を越えると注視が必要とも言える。

被災箇所	盛土高 (m)	最大の低下が開始された時の積雪深 (cm)	7日間の積雪深低下量 (cm)	2007年から発生年までの最大値	発生年の量
1-5	1.5	39.0	39.0	39.0	39
1-6	10	96.6	74.2	74.2	74.2
1-9	20	43.0	27.0	27.0	26
1-10	5	61.0	61.0	61.0	43
2-1	8	75.4	64.9	64.9	40.9
2-2	10	106.0	72.0	72.0	49
2-7	9	37.0	37.0	37.0	37
2-11	15	41.0	41.0	41.0	41
3-1	33.7	37.0	29.0	29.0	29
3-2	10	40.0	39.0	39.0	39
3-3	5	66.0	41.0	41.0	38
3-4	10	58.0	53.0	53.0	48

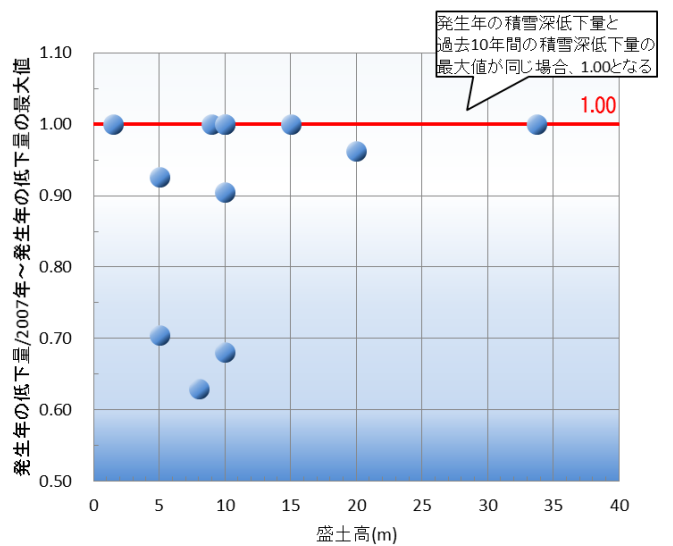


図-2 融雪期に発生した変状時と過去最大の積雪低下量とその期間（左図）、7日間の積雪低下量（右図）

4. まとめ

融雪期において道路盛土に変状を来す恐れのある融雪の特徴と傾向とは、以下のとおりである（図-3）。

- ・外気温が+で安定し、積雪深が 100cm 程度以下となると、盛土や基礎地盤に多量の融雪水やその地下水が供給され、盛土の変状に注視する必要がある。
- ・融雪が過去最大値と同様の融雪指数に近似してくると変状する可能性が出てくることが示唆された
- ・積雪低下量が、7 日間値で 40cm 程度を越えると盛土の

変状に注視する必要がある。

参考文献

- 1) 中野ら：国道の災害復旧工事における地表・地中計測を駆使した道路維持管理方法、国土交通省北海道開発局第 56 回北海道開発技術研究発表会、2012
- 2) 西村ら：一般国道 230 号中山峠災害の復旧工事について、国土交通省北海道開発局第 57 回北海道開発技術研究発表会、2013

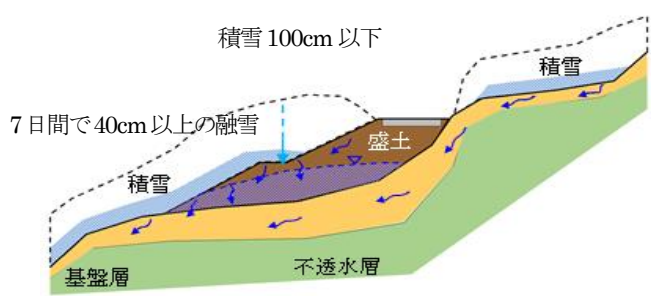


図-3 注視すべき融雪モデル

3.2 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

3.2.6 ゲリラ豪雨や急激な融雪等へ対応する道路のり面・斜面の合理的な管理手法に関する研究（４）（融雪期斜面分野：融雪量の推定）

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（防災地質チーム）

研究担当者：倉橋稔幸、日外勝仁、吉野恒平

【要旨】

融雪期における斜面災害の被害から回避するために、降水量に融雪水量を加味した事前通行規制基準の設定が求められている。そのために、融雪を考慮した雨量指標と融雪斜面災害の発生との関係分析に向けて、融雪水量を雨量に換算して合算する条件を検討する必要がある。本研究では、様々な条件で算出した融雪合算水量の連続雨量と融雪斜面災害の発生との関係から合算条件について検討した結果、連続雨量による発災予測は困難であることが分かった。今後は雨量への融雪水量の合算条件や、連続雨量以外の雨量指標について検討する必要があることを明らかにした。

キーワード：融雪、斜面災害、融雪水量推定手法、融雪合算水量、連続雨量

1. はじめに

北海道などの積雪地域では融雪期に斜面災害が多発する傾向にある¹⁾。これらの災害は融雪水が誘因であり、無降雨時/少降雨時に発生している。道路沿線で発生する斜面災害から回避するためには、降水量に融雪水量を加味した事前通行規制基準を設定する必要がある。そのために、融雪斜面災害の予測に適した融雪を考慮した雨量指標が求められる。

本研究では、融雪水量を推定し、雨量と足し合わせた上で雨量指標を求め、それと融雪斜面災害の発生との関係を分析することを目指している。現在、道内の国道の通行規制基準は連続雨量によって設定されており、時間雨量 0mm を 4 時間観測することで連続雨量がリセットされる。しかしながら、融雪水量をそのまま雨量に加算した場合、常に供給され続けることになり、連続雨量が過大値を示し、融雪期斜面の発生との関係を上手く表せないと予想される。以上のことから、推定された融雪水量を雨量に換算して合算する条件が課題として挙げられる。

そこで、H30 年度には、無降雨時に発生した崩壊事例を対象とし、複数の条件を設定した上で融雪水量を雨量に換算し、各融雪合算水量の連続雨量と崩壊発生との関係について確認することで、融雪水量の雨量への合算条件を検討した。

2. 研究方法

今回、北海道内の国道沿線で発生した崩壊事例を対象とした。本事例は 4 月 15 日に発生し、その前後には降雨は確認されていなかったとされる。レーダーアメダス解析雨量から本事例の崩壊箇所の雨量の時間変化量を抽出した上で、発生した融雪水量の推定と雨量への合算方法について検討した。

2.1 融雪水量の推定

崩壊箇所の融雪水量を推定するに当たり、国土地理院数値情報平均値メッシュデータを用いることにより崩壊箇所における積雪深初期値を算出した(図-1)。今回、融雪係数・時間積算気温の積から融雪深を表す

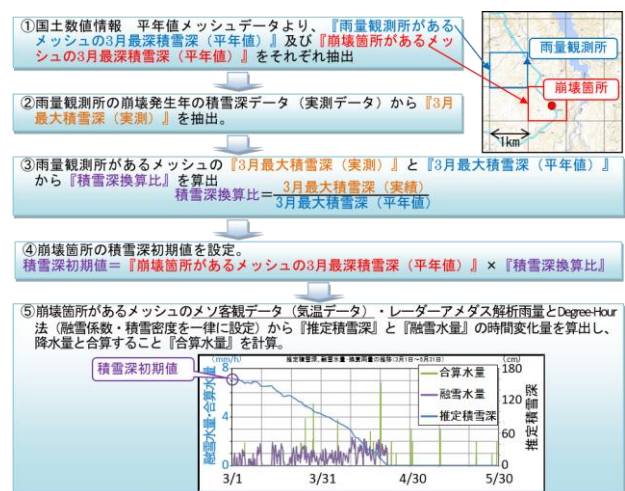


図-1 崩壊箇所における融雪合算水量推定フロー

Degree-Hour 法によって崩壊発生箇所での積雪深の時間変化を推定した。融雪係数は本来、時間的・空間的に変化するものであるが、本研究では道内各所のアメダス・テレメータデータから融雪水量を整理し、平均値である 1.36 を道内の融雪係数として設定した。これにメソ客観データから算出した時間積算気温を乗ずることで崩壊箇所における積雪深の時間変化量を推定した。積雪密度については融雪最盛期の平均密度として 0.5g/cm^3 とし²⁾、融雪深に乗ずることで崩壊箇所における融雪水量の時間変化量を推定した。

2.2 融雪水量の雨量への合算方法

推定した融雪水量を雨量に換算する際に以下の4つの条件を設定した上で各連続雨量と斜面崩壊との関係を検討した。

2.2.1 融雪水量をそのまま合算

気温が 0°C 以上の時に発生した融雪水量をそのまま合算した。

2.2.2 降雨時に合算

降雨時は融雪水が積雪層内を移動しやすく、地盤中に浸透しやすいと予想し、降雨時においてのみ融雪水量を雨量に合算した。

2.2.3 地盤浸透低減率を考慮して合算

地盤上に積雪層が存在する際、地盤中の空気と水の交換が阻害され、融雪水が地盤中に浸透しにくくなると予想し、融雪水量を9割、8割掛けすることによって地盤に浸透する水量を試算した上で雨量に合算した。

2.2.4 気温条件を考慮して合算

気温が閾値以上の時は地盤に供給されるほどの多量の水が発生するとして雨量に合算した。気温の閾値は 1°C 、 1.5°C 、 2°C 、 3°C に設定し、それぞれの連続雨量を算出した。

3. 研究結果

各条件で算出した連続雨量を図-2に示す。降水量のみで算出した連続雨量では発災日(4月15日)は 0mm を示すことから、現在の通行規制基準では融雪斜面災害の発災予測は困難であることが示唆される。従って、これらの災害を捉えるために融雪水量を加味する必要があることを確認した。

融雪水量をそのまま合算した結果、連続雨量は単調増加をし続け、過大値を示すことで崩壊発生との関係を上手く表すことができなかった。気温 0°C 以上の時に積雪表面で発生した融雪水が即座に全て地盤に浸透するわけではないため、融雪水をそのまま合算すると連続雨量が過大値を示すと考えられる。

降雨時に合算した場合、雨量のみと同様の連続雨量を示し、崩壊発生との関係は表すことができなかった。このことから本条件は無降雨時に発生した事例に対しては適用できないことを確認した。

地盤浸透低減率を考慮した場合、融雪水量を9割掛けて合算した連続雨量は、そのまま合算したものと同様の傾向を示し、災害との関係は確認できなかった。一方、8割掛けて合算した連続雨量は異なる変化傾向を示すものの、発災日と連続雨量のピークは一致しなかった。

気温条件を考慮する場合、閾値 1.5°C 以上の連続雨量については発災日以前では 100mm 未満であり、発災日の後にピークが現れていることから災害を捉えることができなかった。また、閾値 1°C の連続雨量については、発災日の数日前に 100mm を超えるピークが見られたものの、3月にほぼ同じ大きさのピークが見られたことに加えて、発災日の後により大きなピークが確認されたことから、災害との関係を表すことができなかった。

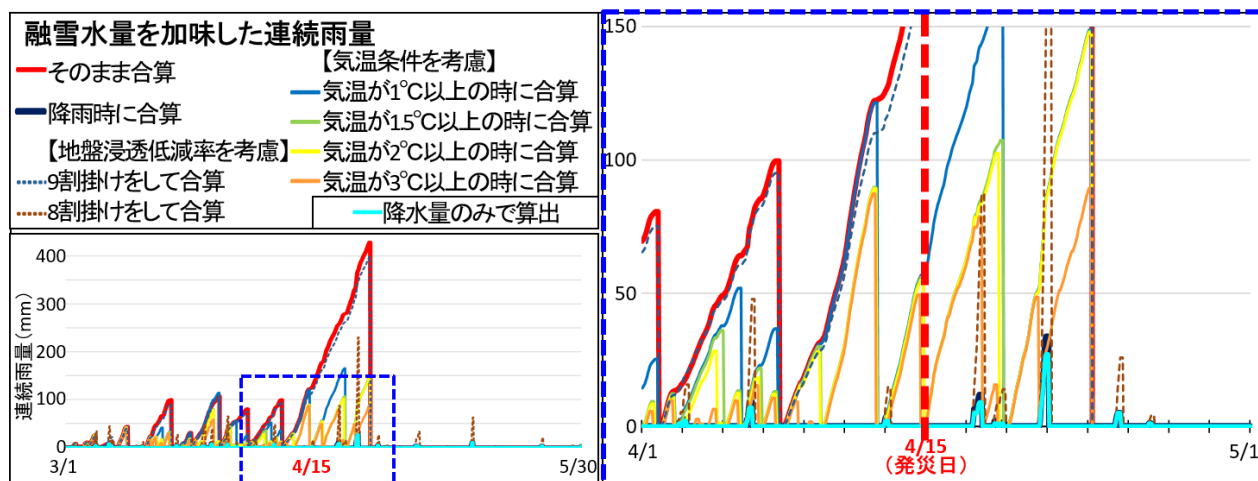


図-2 融雪合算水量から求めた連続雨量各種の時間的変化

以上のように融雪水量を雨量に換算する際に、地盤浸透低減率や気温条件を変えて、融雪水量換算条件を検証したが、融雪合算水量の連続雨量による発災予測は困難であることが分かった。

4. まとめと今後の課題

融雪を考慮した雨量指標と融雪斜面災害の発生の関係分析に向け、無降時雨に発生した融雪斜面災害事例を対象に融雪水量を雨量に換算して合算する条件を検討した。融雪斜面災害において、現在の通行規制基準である降水量のみの連続雨量が 0mm で発生しており、発災を捉えることができなかった。融雪水量をそのまま雨量に合算した場合の連続雨量は単調増加することで崩壊発生との関係を上手く表すことができなかった。このことは気温 0℃以上で発生した融雪水が全て地盤に浸透するわけではなく、気温 0℃以上の融雪水量をそのまま合算することで過大値を示したと考

えられる。本研究では合算時の地盤浸透低減率や気温条件を変えて、融雪水量換算条件を検証したが、融雪合算水量による発災予測は困難であることが分かった。今後は雨量への融雪水量の合算条件や、土壌雨量指数や実効雨量などについても検討する必要がある、それによって融雪を考慮した事前通行規制基準化を目指す。

参考文献

- 1) 吉野恒平、倉橋稔幸、日外勝仁：融雪水による斜面災害を回避するための面的な融雪水量の推定、第 62 回（平成 30 年度）北海道開発技術研究発表会、2019 年 2 月
URL:<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/splaat00001igm0-att/splaat000001igqm.pdf>
- 2) 沼地服三郎、本間仁監修：水工学便覧、森北出版、1246p、1966 年

3.2 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術及び道路通行安全性確保技術の開発

3.2.7 落石・岩盤崩壊対策手法に関する研究（岩盤崩壊分野）

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（防災地質チーム）

研究担当者：倉橋稔幸、日外勝仁、山崎秀策

【要旨】

本研究は、岩盤斜面の形状や亀裂情報と経年変化状況等から、崩壊想定箇所を適切に抽出し、危険岩体の形状・規模を正確に推定することで、精度の高い岩盤崩壊規模推定手法を提案することを目的としている。H30年度は、UAV から撮影した時期の異なる2枚の岩盤斜面の点検写真から、変化のあった箇所を抽出する手法を検討した。基幹技術である背景差分法は、従来固定カメラ画像を対象とした技術であるため、撮影位置が固定されていないUAVからの空中撮影や点検時期毎の使用機材の差異への対応という課題に対し、SfM技術によって構築した岩盤斜面の3次元地形モデルを活用したオルソ処理を行うことで、岩盤斜面の精緻な変化箇所抽出を可能とした。

キーワード：岩盤斜面、UAV、背景差分法、SfM、三次元地形モデル

1. はじめに

国道斜面の維持管理では、定期的な点検の中で経年変化の把握のために多数の写真が撮影されている。これらの点検写真の活用として、これまでに、背景差分法を用いた時期の異なる2枚の岩盤斜面写真の比較から崩壊発生跡などの変化箇所が抽出できる手法を研究し、写真点検手法として公開してきた¹⁾。

近年ではUAV技術が目覚ましく進歩し、地上からの撮影だけではなく、空中からの死角のない斜面撮影も容易となってきている。このため、H30年度は、UAVからの空中撮影画像に対して、背景差分法による変化箇所の抽出が可能となるUAV撮影方法や画像処理方法等を現地データに基づき検討した結果をとりまとめる。

2. UAV岩盤斜面写真に対する背景差分法適用条件

本研究で用いる背景差分法は、本来固定カメラ画像を対象としており、同じ構図の画像から変化箇所を把握する技術であるため、UAV撮影画像に適用し構図のほぼ同じ画像を用意するためには次の2つの課題がある。

- ① 同じ機材を使用できる場合には、撮影位置や撮影方向を前回撮影時と同じくした上で、同じ設定で撮影する必要がある。
- ② 使用カメラ機材が異なる場合には、焦点距離や収差歪曲などのレンズ特性が一致しないため、撮影後に画像処理による調整が必要となる。

3. 検証方法

3.1 同じUAVで撮影する場合

撮影画像ファイルのExif情報には、カメラ名や焦点距離などの撮影諸元の他に、GPSと連動したカメラでは緯度/経度/高度などの撮影位置情報も記録されている。この撮影情報やUAV航跡データを基にUAVの自動航行プログラムを設定し、撮影方向を垂直や水平に固定することで、ある程度同じ位置・方向からの撮影を行い、背景差分法の適用可否を検証した。

3.2 異なるUAVで撮影する場合

カメラ撮影画像は中心投影画像であるため、地形の影響を受け、撮影位置や方向によって構図にズレが生じてしまう。その対処として、図-1に示すように正射投影画像であるオルソ画像に変換することで、撮影位置によらない同じ構図のオルソ画像に対して背景差分法の適用状況を検証した。水平写真に対するオルソ画像変換にあたっては、SfM技術により複数の斜面写真から構築した三次元地形モデルを基に、比較する2モデル内で同じ標定点を設定して、モデルの座標と正射投影軸の位置関係を一致させた2時期のオルソ画像を作成し、背景差分の抽出を行った。

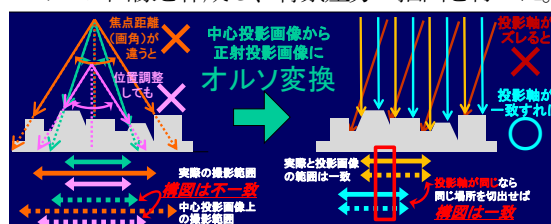


図-1 金網施工箇所の地形モデル化検証斜面

4. 結果

4.1 同じ UAV による撮影画像の背景差分結果

プログラム入力情報だけから UAV の位置や方向を定めて撮影した場合には、高さや撮影方向にズレが生じ、背景差分が行えなかった。そのため、前回の写真と今回のモニタ画像を見比べて高さや方向を調整して撮影した結果、図-2 に示すように、斜面の輪郭部に僅かなズレはみられるものの、斜面自体の画像はほぼ重なっており、背景差分は可能となった。



図-2 同じ機体調整撮影画像による背景差分結果

また、背景差分が可能となる撮影範囲のズレの程度については、図-3 に示す別斜面での検証により、ラップ率が約 90%以上であることが確認された。

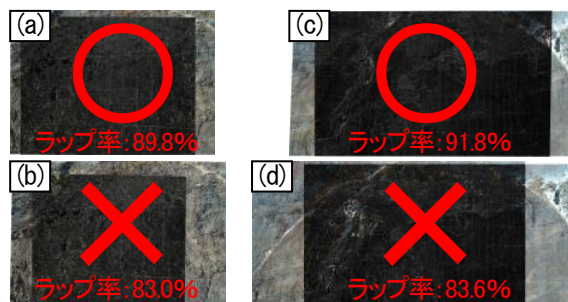


図-3 ラップ率による背景差分適用可否

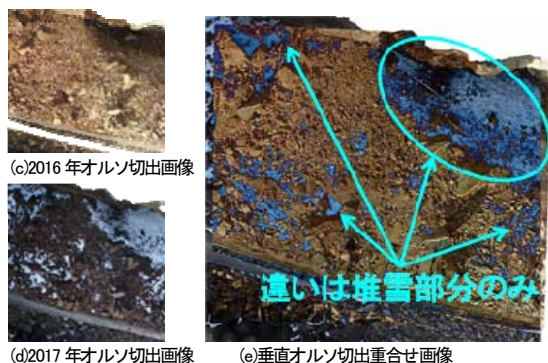


図-4 垂直オルソ画像における背景差分結果

4.2 異なる UAV による撮影画像の背景差分結果

垂直写真から作成した 2 時期のオルソ画像から同じ範囲を切り出した後に、背景差分を行った結果を図-4 に示す。異なるカメラによる 1 年の撮影間隔にも拘わらず、堆雪部のみが差分として抽出され、それ以外の箇所は全く一致した結果となり、精度の高い変化箇所抽出が可能となったことが確認された。

次に、垂直写真から作成した 2 時期のオルソ画像から同じ範囲を切り出した後に、背景差分を行った結果を図-5 (c) に示す。輪郭は重ねられているが、構図の微妙なズレのため、細かな白っぽい皺が全体に見られる。このことは、鉛直撮影とは異なり、水平方向では比較ケースにおける正射投影軸を完全には一致させられていないことが原因だと考えられる。そのため、図-5 (a)、(b) に示すように比較 2 ケースにおいて同じ標定点を設定することで、軸の一致を図った背景差分結果を図-5 (d) に示す。軸調整を行うことで、細かな白っぽさがなくなり、日当たりが違った部分やオルソ化の際に作成した地形モデル自体の細かな欠損部分以外は真っ黒に表示され、極めて高精度な変化箇所抽出が可能となった。

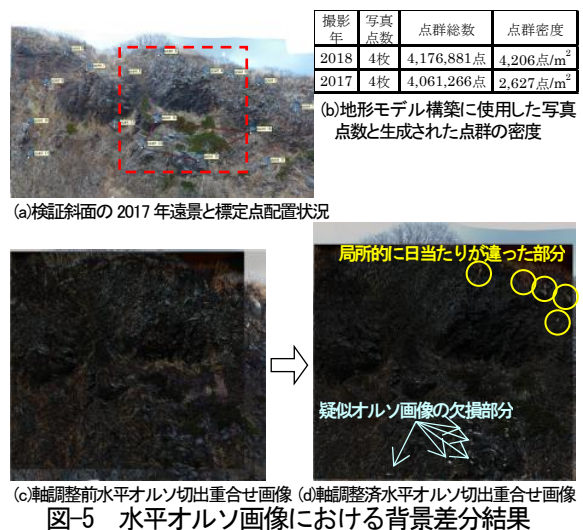


図-5 水平オルソ画像における背景差分結果

5. まとめ

点検等での定期的な斜面撮影において、UAV による空中からの撮影に対して、同一カメラによる撮影ではラップ率を 90%以上とすること、また、カメラが異なる場合には、SfM 技術を利用した写真からの地形モデル構築とオルソ処理を行うことで、背景差分法による岩盤斜面の変化箇所把握が可能となった。

文献

- 1) 寒地土木研究所防災地質チーム: 写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル(案)(平成 22 年 3 月版). URL <http://chishitsu.ceri.go.jp/soft.html>(2019.3.31)

3.3 突発的な自然現象による土砂災害の防止・軽減のための設計技術及びロボット技術の開発

3.3.1 落石・岩盤崩壊対策手法に関する研究（落石分野）

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地構造チーム）

研究担当者：西 弘明、今野久志、山澤文雄、寺澤貴裕、中村拓郎

【要旨】

本研究は、従来型落石防護擁壁・柵類について、耐衝撃挙動や保有性能を明らかにし、耐衝撃設計法を提案することを目的としている。落石防護擁壁に関しては、重錘衝突による擁壁の損傷に着目した実験および数値解析を実施し、その耐衝撃挙動を把握した。落石防護柵に関しては、実規模の重錘衝突実験および静的載荷実験、数値解析を実施し、その保有性能を把握した。

キーワード：従来型落石防護擁壁、従来型落石防護柵、重錘衝突実験、耐衝撃挙動

1. はじめに

我が国の海岸線や山岳部の道路沿いには、落石等の自然災害から人命や道路交通の安全を確保するための様々な落石防護施設が設置されている。比較的小規模な落石等に対する落石防護施設として、落石防護擁壁や落石防護柵があるが、設計では想定していない損傷事例の報告や補強（性能向上）の困難さ等の指摘がなされている。

本研究は、従来型落石防護擁壁および従来型落石防護柵の耐衝撃挙動や保有性能を明らかにし、耐衝撃設計法を提案することを最終目的としている。本年度は耐衝撃設計法を確立するための基礎的な検討として、耐衝撃挙動を把握するための基礎実験および数値解析を実施した。

2. 落石防護擁壁

2.1 実験および解析概要

擁壁の実験は門型フレームに吊り下げた重錘をクレーンで所定の高さまで吊り上げ、振り子運動によって擁壁中央部（地盤から高さ 0.8 m）に水平衝突させることにより実施し、三次元弾塑性衝撃応答解析による再現解析を実施した。

2.2 実験および解析結果と考察

図-1には、擁壁回転角および衝突方向変位量の時刻歴波形の一例を示す。解析結果は実験結果を若干過大に評価しているものの、その波形性状は大略一致している。

図-2には、最大回転角と重錘衝突エネルギーの関係を示す。実験結果において押抜きせん断破壊が生じるまでは、衝突エネルギーが大きくなるほど最大回転角も線形的に大きくなる傾向が確認できる。また、解析結果は押抜きせん断破壊が生じる場合を除き、概ね実験結果と一致している。

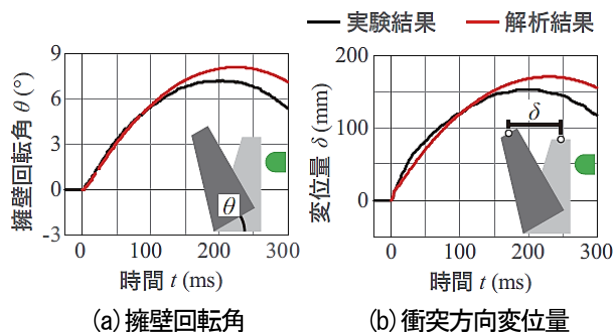


図-1 各種時刻歴波形の一例 ($m=309\text{kg}$ 、 $E=7.6\text{kJ}$)

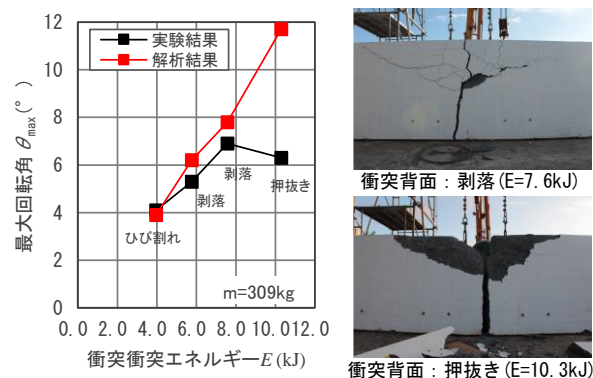


図-2 最大回転角と重錘衝突エネルギーの関係

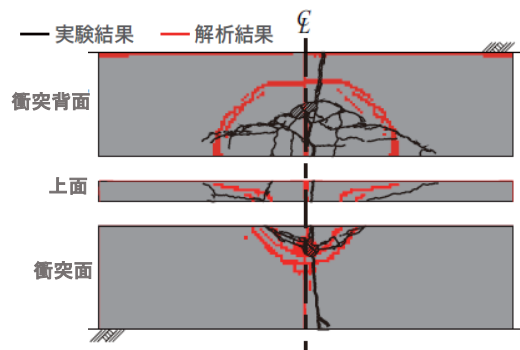


図-3 損傷状態の一例 ($m=309\text{kg}$ 、 $E=7.6\text{kJ}$)

図-3には、実験終了後の損傷状態の一例を示す。解析結果では、衝突背面の損傷範囲を実験結果より過大に評価しているものの、上面および衝突面においては、概ね実験結果と対応していることが分かる。

3. 落石防護柵

3.1 実験および解析概要

防護柵の実規模実験として、図-4に示す柵高2m、3m×3 スパンの供試体に対して振り子式による重錘衝突実験（重量10kN）と静的載荷実験を実施し、三次元弾塑性衝撃応答解析による再現解析を実施した。

3.2 実験および解析結果と考察

重錘衝突実験では、可能吸収エネルギーの設計値相当の衝突エネルギーを保有する重錘を衝突させた結果、図-5に示すように重錘衝突位置付近の金網の一部で破網が認められたものの、重錘は捕捉できる性能を有していることを確認した。次に、図-6に示すような数値解析モデルを作成して重錘衝突実験の再現解析を行った結果、図-7に示すように重錘貫入量やワイヤロープ張力を概ね再現でき、数値解析に適用する要素分割や構成則の妥当性を確認できた。また、静的載荷実験の結果から、先行して塑性変形する部材は、落石対策便覧に示される慣用設計法において設計時に想定される部材と一致することを確認した。図-8および図-9に示すように、中間支柱が先行して塑性変形する場合には、ワイヤロープの破断や金網の破網は生じず、中間支柱が弱軸方向へも塑性変形するとともに、最大荷重後の荷重は緩やかに低下し、ワイヤロープが先行する場合には、各支柱に目視下での塑性変形は認められず、ワイヤロープの破断や金網の破網をともなって荷重が急激に低下した。

4. まとめ

各衝突実験等より、得られた成果について以下に示す。

- 1) 落石防護擁壁では、供試体が押抜きせん断破壊が発生する場合を除き、数値解析によって実験結果の回転角および衝突方向変位を概ね再現できた。また、数値解析におけるひび割れ分布は、衝突背面の損傷範囲を過大に評価するものの、衝突面および上面に関しては実験結果とほぼ一致した。
- 2) 落石防護柵では、実規模供試体を用いた衝撃実験および静的載荷実験の結果から、その保有性能を明らかにした。また、再現解析では、重錘貫入量やワイヤロープ張力を再現できており、数値解析に適用する要素分割や構成則の妥当性を確認できた。

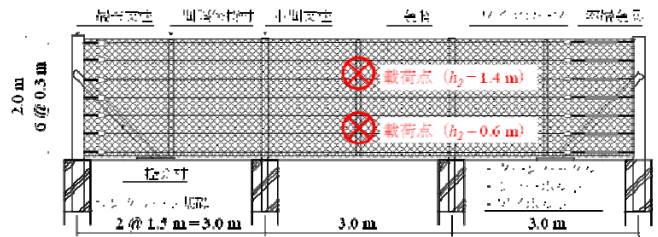


図-4 従来型落石防護柵の供試体概要図



図-5 衝撃実験後の供試体

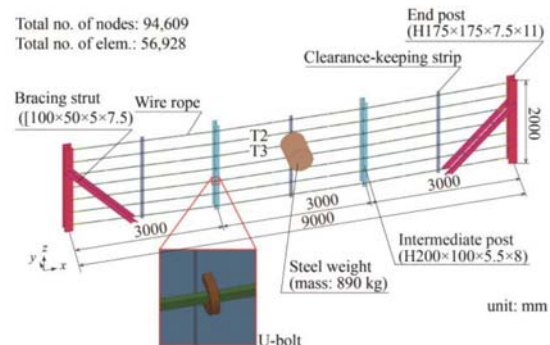
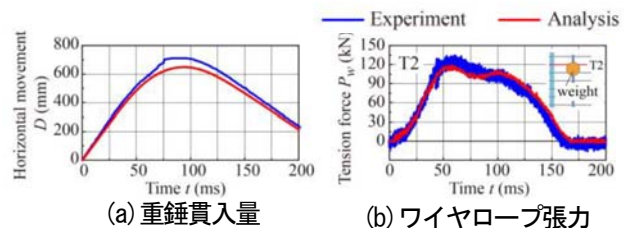


図-6 衝撃実験の数値解析モデル



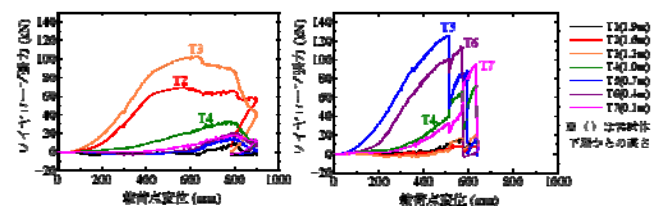
(a) 重錘貫入量 (b) ワイヤロープ張力

図-7 衝撃実験の数値解析結果の一例



(a) 上段に載荷 (b) 下段に載荷

図-8 静的載荷実験後の供試体の様子



(a) 上段に載荷 (b) 下段に載荷

図-9 静的載荷実験結果の一例

3.3 突発的な自然現象による土砂災害の防止・軽減のための設計技術及びロボット技術の開発

3.3.2 災害発生時におけるロボット技術適用に関する研究

担当チーム：技術推進本部（先端技術チーム）

研究担当者：新田 恭士、橋本 毅、山田 充
 油田 信一

【要旨】

大規模災害発生後の被害拡大防止や早期の復旧のためには、被災状況の調査や道路啓開などの応急対策を迅速に行うことが非常に重要であるが、これら応急対策は危険性が高い場所での作業となる場合が多い。そのような危険個所での施工では、安全のため遠隔操作が可能な建設機械を用いる無人化施工が運用される場合がある。災害が多く発生している我が国では、この遠隔操作型建設機械を用いた無人化施工はこれまで国内で200件以上の活用実績を持っている。

本研究は、災害発生時に無人化施工に代表されるロボット技術を、安全・迅速・高効率で適用するための提案を行うことを目的とし、課題点の整理、必要な要素技術の研究、技術マニュアルの提案を行うものである。本報告では、平成30年度の研究実績について述べる。

キーワード：遠隔操作、無人化施工、建設ロボット、生産性向上

1. はじめに

東日本大震災や熊本地震など、我が国はこれまで地震や火山、台風、津波といった多くの災害に見舞われており、甚大な被害が発生している。災害発生後の被害拡大防止や早期の復旧のためには、被災状況の調査や道路啓開などの応急対策を迅速に行うことが非常に重要であるが、これら応急対策は二次災害の危険性が高く、かつ地盤等が不安定な場所での作業となる場合が多く、安全性に配慮しつつ迅速に高効率で施工を行うことは極めて困難である。そのような危険個所での施工では、カメラ映像等を介して遠方より遠隔操作が可能な建設機械を用い、オペレータは安全な場所から操作を行うことで安全に施工することが可能となる（図-1）。このような遠隔操作型建設機械を用いる施工は「無人化施工」と呼ばれ、1993年に開始された「雲仙普賢岳水無除石工無人化施工試験工事」を契機に発展し、実用的な工法として確立された。その後、有珠山噴火（2000年）、新潟県中越地震（2004年）、岩手宮城内陸地震（2008年）、紀伊半島大規模土砂災害（2011年）、熊本地震（2016年）等の大規模災害や、東日本大震災後の福島第一原発周辺瓦礫処理工事（2011年）などで活用され、これまで日本国内で遠隔操作型建設機械を用いた無人化施工は200件以上の活用実績を持ってい

る¹⁾²⁾。

本研究は、災害発生時に無人化施工に代表されるロボット技術を、安全・迅速・高効率で適用するための提案を行うことを目的とし、課題点の整理、必要な要素技術の研究、技術マニュアルの提案などを行うものである。

具体的には、次の3点を達成目標としている。

- ① 無人化施工技術の適切な運用
- ② 迅速・安全な復旧対応、生産性向上
- ③ 復旧活動のための調査・機械施工技術マニュアル提案

30年度は、まず無人化施工の生産性向上や迅速運用を実現するために、バーチャルリアリティ（以下VR）やアラウンドビューシステム（以下AVS）などの最先端技術の活用を提案し、来年度以降本格的

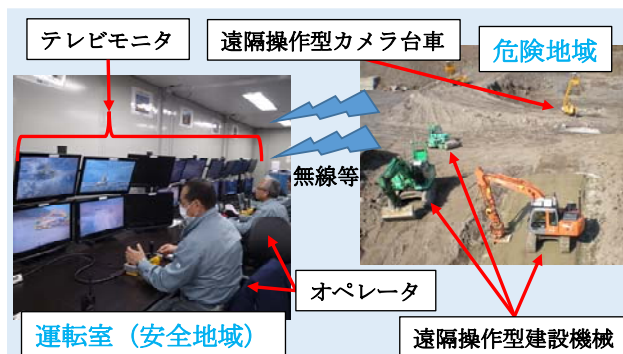


図-1 無人化施工イメージ

な実験を実施するための予備実験を行った。続いて昨年度までの研究成果を精査し、無人化施工の生産性にはオペレータの個人特性も大きく影響している可能性が高いことも明らかにした。また、昨年度に引き続き、迅速な無人化施工運用に効果があると期待される有線給電 UAV を用いた検証実験を、実験条件を変化させて行い、効果を確認するとともに実現場導入にむけた課題点を把握した。さらに、迅速・高効率な無人化施工運用に必要な最適外部カメラ位置の検討実験を行い、最適位置の提案を行った。

2. 最先端技術の活用

無人化施工の生産性向上を図るために、近年急速に発達している ICT 技術を導入することを考え、当チームが保有する遠隔操作システムへ搭載可能か予備実験を行った。具体的には VR および AVS を検討することとし、知見を保有する企業等と共同研究を締結した。なお、これら VR、AVS は生産性向上への効果が期待されるだけでなく、外部カメラ省略による迅速運用にも効果が期待できる。

2. 1 VR

VR システムは、ステレオ魚眼カメラを遠隔操作型油圧ショベルの運転席に搭載し、その画像を処理し HMD に写すことによって、あたかも運転席に座っているような映像をオペレータに提供するものである。本研究では、図-2、3 に示すようにステレオ魚眼カメラで取得した映像をそのまま専用無線で伝送し、運転室に設置した PC にて VR 映像に処理する形式とした。これによりショベル搭載機器の軽量化と映像遅延の低減が期待できる。本年度の予備実験により、土研保有の遠隔操作型ミニショベルおよび運転操作室への設置が可能であることを確認した。来年度より検証実験を開始する予定である。

2. 2 AVS

AVS システムは、建設機械の周囲を囲むように複数の魚眼カメラを建設機械上に設置し、これらの映像を変換処理することによって建設機械を仮想的に上空から眺めたような画像を生成し、オペレータへ提示するものである。本研究では、図-4、5 に示すように遠隔操作型油圧ショベルの周辺に4台の魚眼カメラを設置し、油圧ショベルに搭載した PC で処理した後一般的な無線 LAN にて運転室へ伝送する形式とした。これにより伝送容量の低減が期待できる。本年度の予備実験により、土研保有の遠隔操作型ショベルおよび運転操作室への設置が可能である

ことを確認した。来年度より検証実験を開始する予定である。

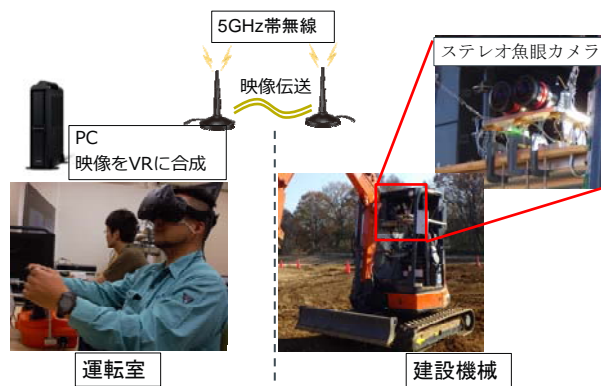


図-2 VRシステム概略



図-3 VRシステム映像 (HMD内部映像)

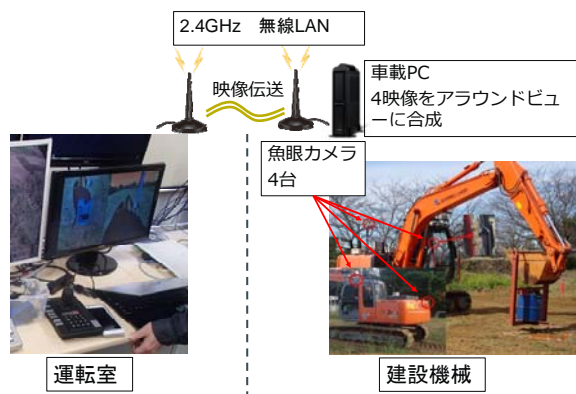


図-4 AVSシステム概略



図-5 AVSシステム映像

3. 生産性へのオペレータ個人特性の影響

当チームでは、本研究および既往研究を通し、延べ70名以上のデータを収集してきた。その経験より無人化施工の生産性にはオペレータの個人特性も大きく影響している可能性があることがわかってきた。

例として図-6に概往研究³⁾にて提案された「モデルタスクII」をオペレータ10名にて搭乗、遠隔それぞれ7回ずつ行った時の時間（以下サイクルタイム）平均を示す。

図-6によると、各オペレータサイクルタイムの標準偏差は、搭乗操作で14.0(s)、遠隔操作で45.6(s)であり、搭乗操作の場合はオペレータ間のサイクルタイムにそれほどバラツキがないのに比べ、遠隔操作の場合はバラツキが大きくなるのがわかる。特に被験者Aの遠隔操作時サイクルタイムは被験者Gのサイクルタイムの約半分となっており、無人化施工の生産性がオペレータにより大きく異なることがわかる。

以上から、遠隔施工が得意なオペレータを事前に選抜できれば、無人化施工の生産性を大幅に向上させることが可能であると考えられる。来年度よりオペレータ選抜について検討を行う予定である。

4. 有線給電 UAV 検証実験

29年度に引き続き、迅速な無人化施工運用に効果があると期待される有線給電 UAV を用いた検証実験を、実験条件を変化させて行い、効果を確認するとともに実現現場導入にむけた課題点を把握した。

4.1 実験概要と結果

実験は29年度のものに基づき、実際の災害現場により近づけるため難易度を上げる条件を加えたものとした。

具体的には以下の条件変更を行った（図-7）。

- ① 走行コースを狭めた
- ② 対象物の位置を毎回変更した
- ③ 障害を設けて対象物のある一定の高さまで上げなくてはならなかった
- ④ 遮蔽物を設けて、対象物設置場所がオペレータから見えなくした

上記のように変更した実験条件を用い、オペレータ10名にて通常遠隔、UAV 遠隔それぞれ7回ずつ行った結果を図-8に示す。

図-8によると、通常遠隔、UAV 遠隔のサイクルタイムにほぼ差異はなく、UAV 遠隔は通常遠隔と同等

の施工効率であることがわかる。UAV 遠隔は外部カメラが不要となるので、通常遠隔と同等の施工効率で迅速に運用できるシステムであると言える。

4.2 実現現場適用へ向けた課題

29、30年度の実験より、現状の有線給電 UAV を実際の施工現場で導入するとした場合の課題点として下記が判明した。

- ① 油圧ショベルオペレータと別に UAV オペレータが必要である
- ② UAV の飛行が安定しない時が多く、画像が揺れるため注視が難しい
- ③ 風速5m以上で UAV の飛行が大きく不安定となり、墜落の危険性がある

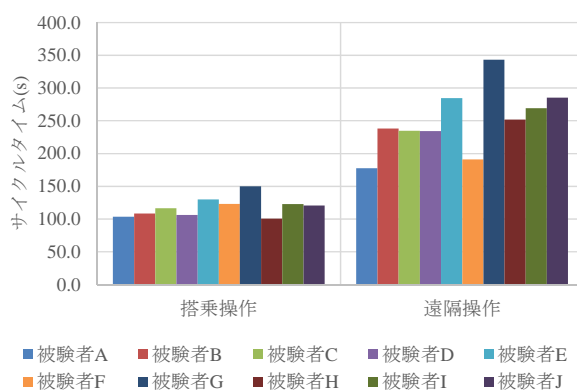


図-6 オペレータ別サイクルタイム



図-7 有線給電UAV実験状況

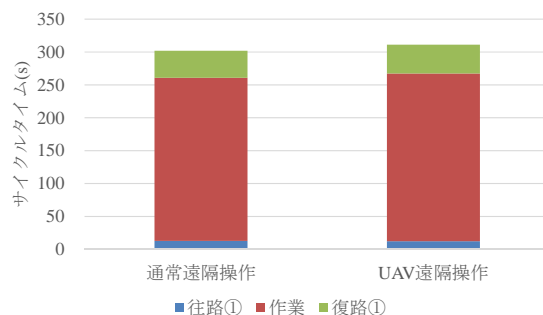


図-8 通常遠隔, UAV サイクルタイム

これら課題を解決するための方策を来年度より検討する予定である。

5. 最適外部カメラ位置の検討

外部カメラや有線給電 UAV 搭載カメラなどからの映像を使用して遠隔操作を行う場合、カメラが建設機械に対してどの位置からどの部分を撮影しているかが、遠隔操作の生産性に大きく影響していると考えられる。しかしながら、そのような外部カメラ等の最適位置に関する研究はこれまで行われていない。当チームでは早稲田大学と共同研究を締結し、外部カメラの最適位置に関する検討を行った。

検討は、遠隔操作型油圧ショベルと車載カメラ 1 台、外部カメラ 1 台を用い、油圧ショベルにて対象物を把持し 45 度移動させる動作を、外部カメラ位置を様々に変えて行った (図-9)。

外部カメラは対象物上端を中心とした半径 5m の球面上に設置するとし、パン角度 45°、60°、90°、120°、135°、チルト角度を 45°、60°、90° 変化させ、合計 15 通りの位置にて行った。パン角、チルト角の概要を図-10、11 に示す。(図ではショベルを球面の中心としているが、実際には対象物上部を中心としている。)

オペレータは 5 名、動作はそれぞれのカメラ位置にて 9 回ずつ行い、動作が完了するまでの時間を計測した。

作業完了時間の全平均を図-12 に示す。図-12 のデータを一元配置分散分析および Sidak 法を用いて分析した結果、パン角の最適配置は 90°、好適範囲は 60° ~ 90°、またチルト角の最適配置は 45°、45° ~ 90° の範囲が好適範囲であることが示唆された⁴⁾。

参考文献

- 1) 藤野健一：無人化施工の現状と展望-技術開発状況と今後の展開について、建設機械、Vol.39、No.3、pp.1-6、2003
- 2) 植木、猪原、北原：「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて、建設マネジメント技術、No.421、pp45-53、2013
- 3) 茂木、油田、藤野：油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案、建設機械施工、Vol.66、No.8、pp.71~79、2014
- 4) 佐藤、亀崎、山田、橋本、菅野、磐田：無人化施工における奥行感の把握が必要な手先作業時における外



図-9 外部カメラ最適位置検証実験

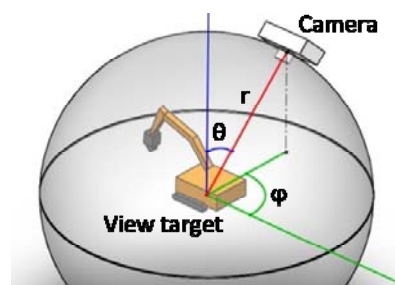


図-10 パン角 (φ) チルト角 (θ) 概略 1

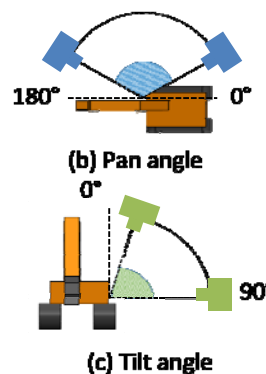


図-11 パン角、チルト角 概略 2

		パン角					
		135°	120°	90°	60°	45°	平均
チルト角	45°	39.1	40.3	30.5	29.3	36.1	35.1
	60°	36.1	42.7	26.9	37	34.2	35.4
	90°	36.1	34.5	30.1	35.7	41.4	35.6
平均		37.1	39.2	29.2	34.0	37.2	

図-12 外部カメラ位置による作業時間

部カメラの最適・好適配置の実験的導出、第 19 回建設ロボットシンポジウム、2019 (投稿済)