

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～33 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による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 29 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による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 29 年度は、多地点での降灰量を連続観測するとともに、火口付近の堆積厚を推定して等層厚線を作成する手法を開発した。また、2018 年九州北部豪雨における土石流、流木災害について流域全体を見据えた実態調査をした。その結果を踏まえ、流木災害対策について広域エリアを対象とした計画立案の必要性を示した。深層崩壊の対応では、土砂移動現象の発生だけでなく、土砂移動形態も推定できるようになれば、災害後の初動対応において有効な情報となりうる。平成 29 年度は、天然ダム形成事例について、天然ダム形成箇所からの距離と地盤振動の継続時間との関係を調査した。その結果、地盤振動の継続時間と天然ダム形成箇所からの距離の関係について、回帰モデルを用いて示すことができた。

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・対策については、浸透水の作用による安定性確保の観点の主であり、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 29 年度は平成 28 年度に引き続き、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、道路斜面面災害の発生形態、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毎に点検・管理における着目点について整理した。

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の検討を行っている。平成29年度は、融雪水が一因と考えられる盛土変状の形態等の特徴を明らかにし、点検手法を検討するため、平成22～28年度に北海道の主な直轄国道で発生した道路盛土変状37件のうち融雪水が一因とされる道路盛土変状14件の要因分析を行い、点検時の災害危険箇所の抽出のための着目点を検討した。その結果より、地形や道路造成された地盤、道路構造などの変状要因に着目して点検を行うことが重要であることが示唆され、それらを考慮して災害危険箇所の事前推測や点検手法の捕捉率向上に資する要点を検討した。

(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、早期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計算時間の短縮化のための研究を行っている。平成29年度は想定最大氾濫範囲での計算対象のDEMを絞り込む方法、氾濫グリッドのみを対象に集中的に計算する方法、並列計算による高速化方法を検討した。その結果、降灰後の土石流の氾濫範囲をより迅速・的確に推定できようになった。

地震時に不安定化する斜面を予測する上で、地震発生前から変動が進行している斜面を把握することは重要である。近年、国内では、航空レーザ測量が積極的に実施されるようになり、同一地域における複数時期の航空レーザ測量データ（以下、LPデータ）の蓄積も進みつつある。このため、斜面変動の発生を2時期のLP計測データの差分解析により把握する手法を研究している。平成29年度は、昨年度明らかとなった変動斜面の抽出作業時に発生する標高差分誤差（ノイズ）の発生原因を調査するとともに、実際に斜面変動が発生した領域のみを表示する手法について検討した。その結果、標高差分誤差（ノイズ）は、LP計測を植生繁茂期に実施したこと等によりグラウンドデータ密度が著しく低いことが原因であることを明らかにした。また、このような低密度ポリゴン領域を把握することで、標高差分解析実施時に実際の移動斜面領域のみを対象とした誤差（ノイズ）の少ない表現が可能となった。

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研究を行っている。平成29年度は、ゲリラ豪雨に対応した降雨指標を検討するため、過去の道路のり面・斜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。切土・自然斜面に対し、総雨量、土壌雨量指数等の雨量関係の指標と災害発生確率との関係を検討した結果、第1タンク貯留高と災害発生率との関係に正の相関関係がみられた。また、降雨パターン別に累積雨量と連続雨量の関係による検討を行った結果、雨量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。

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、融雪水の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、それを解析等で明らかにするための検討を行っている。平成29年度は、融雪水が一因でのり面が変状していると考えられる道路盛土に間隙水圧計や歪み計等の機器を設置し、融雪期間における盛土の動態観測調査を実施している。さらに、平成22～28年度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14件から道路盛土変状時の融雪水（換算雨量：雪面低下法）と発生要因について分析し、道路盛土のり面における融雪水による変状の特徴を整理した。

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

また、融雪期の道路斜面崩壊による被災の回避に向けて、降水量に融雪水量を加味した新たな事前通行規制基準を検討する上で必要な降雨や融雪による斜面崩壊メカニズムを明らかにする研究を行っている。表層崩壊は、融雪期・降雨期間問わず集水型斜面や遷急線地形において多発しており、集められた水が遷急線を持つ斜面に作用することが両者共通の崩壊要因であるものの、融雪期の斜面崩壊は、通常の降雨要因の他に積雪寒冷地特有の要因が加わって発生すると考えられる。そのため、収集した表層崩壊事例を基に、降雨や融雪による斜面崩壊メカニズムを両者の違いに留意して分析を行い、土質ごとの斜面への作用の仕方や変状位置の違いを解説図としてとりまとめた。

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ための研究を行っている。平成 29 年度は、SfM 技術による岩盤斜面の 3 次元地形モデル構築の際の課題であったオーバーハングや金網施工箇所に適した UAV 撮影条件を現地検証により明らかとした。また、地山内部に推定される不連続面と斜面との交差関係が立体的に把握可能となる開口亀裂の走向・傾斜と分布位置の情報を併せ持った三次元モデル化方法を提案した。

(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

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ための研究を行っている。平成 29 年度は、落石防護擁壁の保有性能に関しては、擁壁の延長に着目した重錘衝突実験を実施し、耐衝撃挙動を把握した。落石防護柵の保有性能に関しては、実規模の重錘衝突実験および間隔保持材の設置効果や金網の貫通現象を把握するための基礎的な部材実験を実施し、耐衝撃挙動を把握した。

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 29 年度は、昨年度に引き続き災害対応を担当した発注者、施工者等に対しアンケートを実施し、災害現場にて無人化施工を運用する際に発生した課題点を収集・整理を行った。そして 2 ヶ年の整理結果から、無人化施工運用に重要なキーワードについて考察した。さらに昨年度抽出した要素技術を用いた遠隔操作システムの構築を行い、検証実験を行った。

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（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：水野正樹、藤村直樹、竇 杰

【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、噴火中の火山のLiDARデータによる地形変化量から火口からの距離と火山灰の堆積厚の関係を調査した。その結果、噴火時にも立ち入り可能な山麓部の複数地点で火山灰堆積厚を直接計測することにより、火口付近の火山灰の堆積厚を推定できる可能性が示された。

キーワード：火山噴火、火山灰堆積厚さ、土石流、LiDAR データ、地形変化量

1. はじめに

火山活動により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、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。特に、土石流の発生域となる溪流の上流側の火山灰の堆積厚の把握が重要である。しかし、噴火の発生が予想される火山では、火口周辺規制や入山規制等のため火口付近は計測機器の設置が難しく、かつ、噴石等による機器の損傷が想定され、直接的な計測が困難である。そこで、火口付近の火山灰堆積厚の推定を目的として、噴火中の火山の地表面の標高の変化から火山灰堆積厚の推定を試みた。

た。火山体の東側に、測線を9方向に設定してそれぞれの火口からの距離ごとの地点で地形変化量を求め、噴火回数と比較した。例として、標高の変化が顕著である測線3の

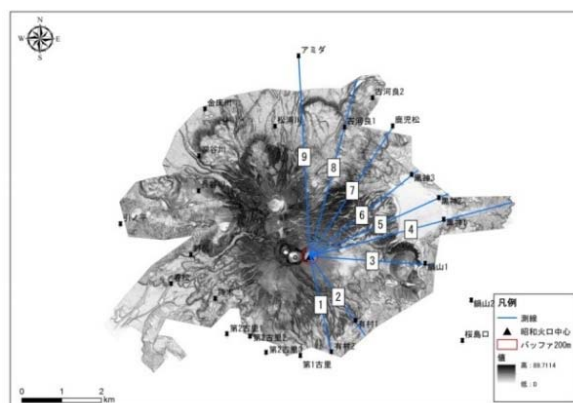


図-1 LiDAR データの測線

2. 研究の方法

2.1 対象火山および使用した観測データ

検討対象の火山は鹿児島市の桜島とした（図-1）。使用した観測データは2013年から2016年の間に毎年1回桜島全域で計測されたLiDARデータである。

2.2 データ解析方法

取得したLiDARデータから1年ごとの標高値の差分値とり、その値を火山灰の堆積厚とした。また、加茂ら(1977)を参考に、火口からの距離と火山灰の堆積厚の関係を調査した。

3. 結果

火山体全体で1年ごとの標高値の差分値を算出した結果、いずれの年も火山の東側で地表面の標高が増加してい

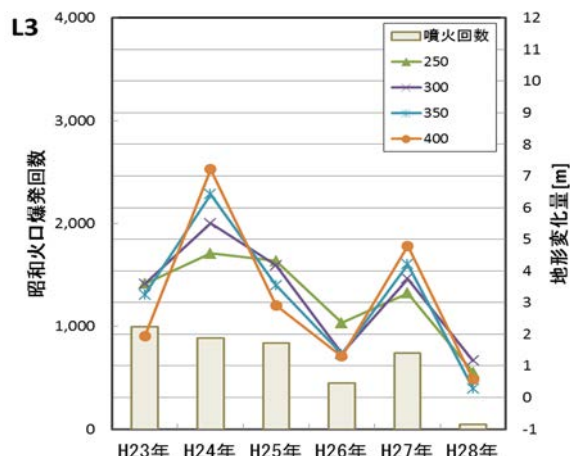


図2 測線3の年間地形変化量

結果を図-2 に示す。地形変化量は、噴火回数に応じて増減する傾向が認められた。このことから、地形変化量は、火山灰の堆積によるものと推定される。

さらに、火口からの距離と地形変化量の関係を分析した。火口からの距離と火山灰の堆積厚の間には、冪乗または指数関数の関係が確認された (図-3)。

火口からの距離と火山灰の堆積厚の関係が冪乗で表せるとすると、火口からの距離 (x) と堆積厚 (d) の関係は、

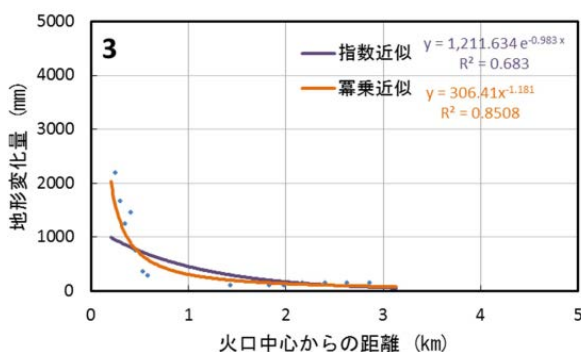


図-3 測線3の地形解析結果
(2013年～2014年にかけての地形変化)

式(1)のように表せる。

$$d(x) = d_0 \cdot x^{-B} \quad (\text{式1})$$

ここで、 $d(x)$ は、火口からの距離が x の地点の堆積厚、 d_0 は係数、 B は冪指数である。

火口からの距離が a の火山灰の層厚 $d(a)$ である既知の1地点与えられれば、 d_0 は式(2)および(3)によって求めることができる。

$$d(a) = d_0 \cdot a^{-B} \quad (\text{式2})$$

$$d_0 = d(a) \cdot a^B \quad (\text{式3})$$

4. まとめ

桜島の年間の火山灰の堆積量の関係を分析することによって、火口からの距離と火山灰の堆積厚の間には、冪乗または指数関数の関係が確認された。山麓部の複数地点で火山灰の堆積厚を把握することにより、火口付近の火山灰の堆積厚さを推定できる可能性が示された。今後は、過去の噴火様式や規模の異なる噴火事例を収集し、冪乗、指数の関係を分析していく。

参考文献

- 1) 加茂幸介ら：櫻島における降下火山灰の堆積について、文部省科研費自然災害特別研究「昭和51年6月豪雨による鹿児島県の土砂及び土石流災害に関する調査研究報告」、p.77-86、1977

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 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：火山・土石流チーム

研究担当者：石井靖雄、武澤永純

【要旨】

土砂移動現象の発生によって生じる地盤振動を検知することで、土砂移動の発生を監視する技術が開発されている。土砂移動現象の発生だけでなく、土砂移動形態も推定できるようになれば、災害後の初動対応において有効な情報となりうる。本研究では、天然ダム形成事例について、天然ダム形成箇所からの距離と地盤振動の継続時間との関係を調査した。その結果、地盤振動の継続時間と天然ダム形成箇所からの距離の関係について、回帰モデルを用いて示すことができた。

キーワード：土砂移動現象、地盤振動、地震計、継続時間

1. はじめに

土石流や斜面崩壊などが発生した場合、崩土が溪岸や溪床に衝突することにより地盤振動が発生する。このような土砂移動に伴う地盤振動を検知することで、土砂災害の発生を監視する技術が開発され、災害後の初動対応への活用が期待されている。土砂災害の発生だけでなく、土石流や天然ダムなどの発生形態も把握することができれば、災害時における初動対応の円滑化、迅速化に寄与できるものと考えられる。

土砂移動に伴う地盤振動は、土砂の運動が停止するまで発生し続けると考えられる。天然ダムは崩壊した土砂が河道に堆積・停止することで形成されるため、土砂の運動は斜面から河道に到達するまで継続すると考えられる。一方、土石流の場合、土砂は河道を流下し、扇状地など勾配が緩い区間で堆積・停止するため、土砂の運動の継続時間は天然ダムより長くなると考えられる。これより、地盤振動の継続時間に着目することで、土石流の発生や天然ダムの形成を推定できる可能性が考えられる。

本研究では、土砂移動に伴う地盤振動から土石流発生と天然ダム形成のいずれかであるかを推定する手法を開発することを目的とする。今年度は天然ダム形成事例を対象に、振動波形の継続時間を算出した。なお、地盤振動の振幅は観測地点のノイズの振幅より小さくなる場合、観測波形から土砂移動に伴う地盤振動を判別することは困難になる。地盤振動の振幅は震源からの距離により減衰するため、土砂災害発生箇所から観測地点の距離が遠くなる程、継続時間は短くなると考えられる。観測地点のノイズを考慮するため、地

表-1 検討対象事例

名称	発生年月日	観測地点数	崩壊土砂量 ($\times 10^6\text{m}^3$)	参考文献
野々尾	2005年9月6日	7	3.3	3)
熊野	2011年9月4日	5	4.1	4)

盤振動の継続時間は、木下らの方法により¹⁾、長短2つの振幅値の指標を用いて算出した。そして、天然ダム形成箇所からの距離と地盤振動の継続時間との関係を調査した。

2. 研究方法

2. 1 検討対象

本研究では、地盤振動が観測された土砂移動の事例²⁾から、崩壊土砂が河道を閉塞して天然ダムを形成したと報告されている2事例を対象とした(表-1)。なお、地盤振動の振幅から求めたマグニチュードは崩壊土量と相関関係があること³⁾が指摘されており、崩壊土砂量が大きいほど地盤振動の継続時間が長くなることが考えられる。地盤振動が観測された事例の崩壊土砂量は $8\times 10^4\sim 2.5\times 10^8\text{m}^3$ とばらつきがあるため²⁾、崩壊土砂量が同程度規模の事例を対象とした。

2. 2 地盤振動波形の処理

表-1に示す事例の地盤振動の観測記録は、(国研)防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)、広帯域地震観測網(F-net)の鉛直成分の観測記録を収集した。収集した観測記録からノイズ成分を除去するため

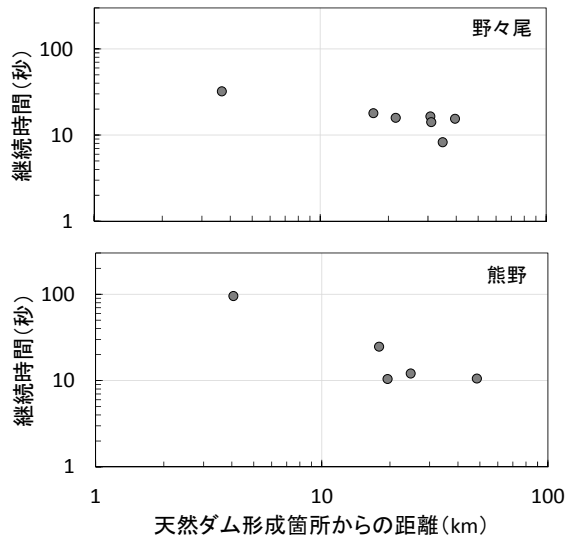


図-1 振動の継続時間と天然ダム形成箇所から観測地点までの距離との関係

表-2 回帰分析の結果

事例	係数		相関係数
	α	β	R
野之尾	1.74	-0.41	-0.83
熊野	2.50	-0.96	-0.92

に、1-10Hz のバンドパスフィルタによる処理を実施した。

2. 3 地盤振動の継続時間

振動の継続時間は、木下ら¹⁾の方法に基づいて算定した。まず、継続時間を算定するために、観測記録から式(1)に示す二乗平均平方根 (Root Mean Square) を算出した。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y(n))^2} \quad \dots (1)$$

ここに、 $y(n)$: n サンプル目の振幅値、 N : データ数である。

式(1)について、土砂移動の振動振幅の変化を表現する指標として2秒間の二乗平均平方根 (STA)、ならびに観測地点の長期的な振動振幅の変化を表現する指標として60秒間の二乗平均平方根 (LTA) を算出した。そして、STA と LTA の比 (STA/LTA) が2.0を2秒以上連続して超過した時刻と、STA/LTA が1.2を3秒以上連続して下回った時刻の区間を、振動の継続時間と定義した。

3. 結果

各観測地点で算出した継続時間について、天然ダム形成箇所から観測地点までの距離との関係を整理した結果を図-1に示す。図-1より、天然ダム形成箇所からの距離が遠くなるほど、継続時間は短くなる傾向が確認できる。回帰分析を用いて、天然ダム形成箇所からの距離を変数とした振動の継続時間の推定式を算出した。回帰モデルは式(2)を用いた。

$$\text{Log}_{10} DT = \alpha \cdot \text{log}_{10} R + \beta \quad \dots (2)$$

ここに、 DT : 継続時間 (秒)、 R : 天然ダム形成箇所から観測地点までの距離 (km)、 α 、 β : 係数である。

式(2)に基づき、回帰分析を行った結果を表-2に示す。野々尾の相関係数は-0.83、熊野の相関係数は-0.92であった。

4. まとめ

天然ダム形成箇所からの距離と地盤振動の継続時間の関係を調査した結果、天然ダム形成箇所からの距離と地盤振動の継続時間の関係について、式(2)を用いて示すことができた。

今後は土石流を対象に、発生箇所からの距離と地盤振動の継続時間の関係について調査を実施した上で、土石流と天然ダムの地盤振動の継続時間の違いを明らかにし、地盤振動の継続時間に着目した土砂移動形態の推定につなげていく予定である。

謝辞

本研究では(国研)防災科学技術研究所のHi-net(高感度地震観測網)およびF-net(広帯域地震観測網)のデータを利用させていただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 木下ら: 崩壊時の地盤振動特性に着目した大規模土砂移動の検知に関する研究、河川技術論文集、第23巻、pp.441-446、2017.
- 2) 浅原ら: 河道閉塞近傍の振動センサー記録による振動特性の検討、平成28年度砂防学会研究発表会概要集、B-140-B-141、2014.
- 3) 大角ら: 河道閉塞近傍の振動センサー記録による振動特性の検討、第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集、pp.163-168、2006.
- 4) 池田ら: 紀伊山地における深層崩壊・河道閉塞部の土砂移動の推移、平成26年砂防学会研究発表会概要集、B-18-B19、2014.

- 5) 大角ら：深層崩壊等を検知するための振動センサーの地中化によるノイズ低減と紀伊半島における検知可能な崩壊規模の検討、砂防学会誌、Vol.68、No.5、pp.32-37、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

3.1.3 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)

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ため、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨による道路切土・自然斜面災害の事例調査を行い、点検着目点を検討した。その結果、集水地形の確認された箇所が 5 割以上であったとともに、崩壊した層のほとんどは表土、崖錐堆積物または風化層であった。したがって、点検着目点として、集水地形の的確な抽出・確認と、表層堆積物、風化層等の状況の確認が重要であるといえる。

キーワード：ゲリラ豪雨、道路、斜面、災害、点検

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、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災害危険箇所の点検着目点の検討のため、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨による道路切土・自然斜面災害の事例調査を行い、災害の形態や特徴の整理を行った。対象とした事例は調査時点（平成 29 年 7 月及び 9 月）で通行可能であった自治体管理道路 7 路線の 47 箇所の事例である。

3. 研究結果

3.1 災害の状況

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。本災害では道路斜面においても多くの被害が生じたが、

表-1 調査対象 47 箇所の災害形態内訳

災害形態	箇所数	割合
表層崩壊	25箇所	53.20%
深層崩壊	3箇所	6.40%
土石流	18箇所	38.30%
地すべり	1箇所	2.10%

(表層崩壊と深層崩壊は崩壊深さ 5m で区分)



写真-1 表層崩壊の事例

そのうち調査できた 47 箇所の事例の災害形態の内訳を表-1 に示す。最も多いのが表層崩壊（写真-1）であり、次いで土石流（写真-2）が多く、この両者で全体の 9 割超を占めている。表層崩壊及び土石流は過去の豪雨による災害でも比較的多く発生する災害形態であり（例えば文献 1) 2)、今回の災害状況もそのことと大きく矛盾しない。

3.2 災害箇所の地形・地質の特徴

調査できた災害箇所の地形的特徴として、47 箇所中 26 箇所（55.3%）において集水地形の存在が確認された



写真-2 土石流の事例



写真-3 集水地形直下の表層崩壊の事例
崩壊斜面の上方に集水地形(赤丸内)が存在する。



写真-4 厚い風化層の深層崩壊の事例

(写真-3)。集水地形は昨年度の検討でも件数の多い災害原因として抽出されており、今回の結果もそれと矛盾しない。

また、調査できた 47 箇所において崩壊した層のほとんどは表土、崖錐堆積物または風化層であった。この特徴は表層崩壊の箇所や土石流のうち発生源の崩壊箇所が確認できた箇所で見られただけでなく、深層崩壊の箇所においても厚い風化層が崩壊していた(写真-4)。昨年度の検討で抽出された災害原因には「軟質層残存」「風化層形成」が含まれており、今回の結果もそれと矛盾しない。

3.3 災害の特徴を踏まえた点検着目点

3.2 で明らかとなった災害箇所の地形・地質の特徴から、豪雨による災害の起こりやすい箇所を抽出するための点検着目点として、以下の項目が考えられる。

1)集水地形の的確な抽出・確認

集水地形は今回調査できた 47 箇所の 5 割以上の箇所で確認されていることから、豪雨時の災害の発生に関わっていると考えられる。したがって、豪雨災害危険箇所を抽出するための点検において集水地形は重要な着目点である。昨年度行った災害危険箇所の捕捉率向上のための対応策の検討においてもレーザープロファイラや空中写真による 0 次谷や集水地形の抽出により危険箇所捕捉率が向上するという結果が得られており、今回の結果はそのことと大きく矛盾しない。

2)表層堆積物、風化層等の状況の確認

今回調査できた 47 箇所のほとんどが表土、崖錐堆積物または風化層の崩壊であったことから、表層堆積物、風化層等の分布、厚さ、ゆるみなどの状況は重要な着目点である。崖錐は地形判読により抽出できる場合があるが、堆積物の分布の詳細、厚さ、ゆるみなどの状況は現地で確認する必要がある。昨年度行った災害危険箇所の捕捉率向上のための対応策の検討においては土層強度検査棒などのサウンディングによる表土層厚・分布の把握により危険箇所捕捉率が向上するという結果が得られており、点検時に現地に携行して使用することは危険箇所抽出に有効であると考えられる。

4. まとめ

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箇所の抽出・点検手法及び対策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道路切土・自然斜面災害の事例調査を行い、点検着目点を検討した。その結果、集水地形の確認された箇所が 5 割以上であったとともに、崩壊した層のほとんどは表土、崖錐堆積物または風化層であったことが明らかになり、それらを考慮して 3.3 に示したような点検着目点を示した。今後、これらの結果をもとに危険箇所抽出方法の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 浅井健一・林浩幸・佐々木靖人：平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨における道路斜面災害の特徴、平成 22 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.261-262、2010 年 10 月
- 2) 金井哲男・浅井健一・佐々木靖人：記録的な豪雨による道路災害の特徴(平成 23 年紀伊半島大水害の事例)、平成 27 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.163-164、2015 年

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

3.1.4 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：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为主であり、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。

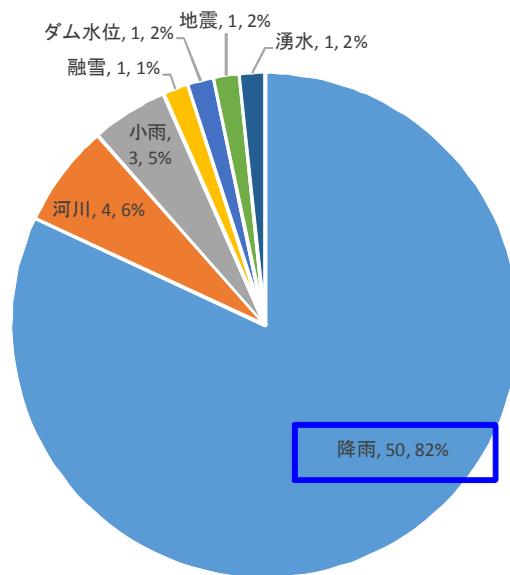
平成 28 年度、29 年度は、ゲリラ豪雨に対応した点検・対策方法を検討するための基礎資料を得ることを目的に、過去の道路のり面災害事例を用いて、道路のり面災害の発生形態、発生要因等について分析し、道路のり面における降雨による災害の特徴や事例毎に点検・管理における着目点について整理した。

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为主であり、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。



(誘因 件数 割合)

図 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 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に示す。図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(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(b)）および盛土のり面（図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固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、災害箇所での現地状況から、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

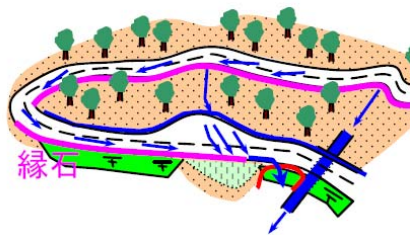
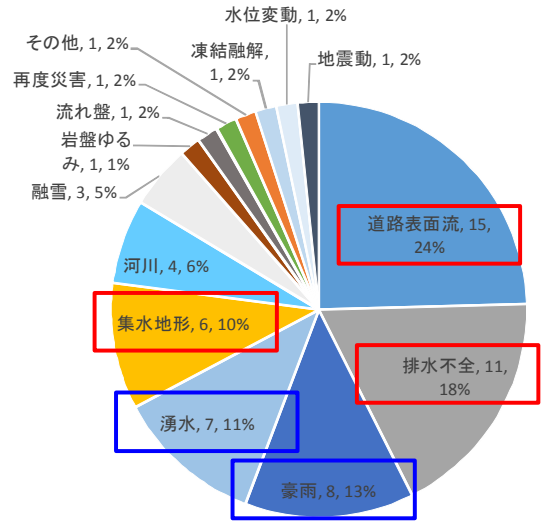
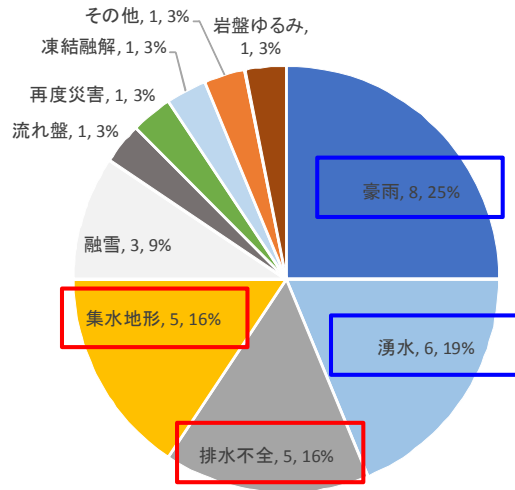


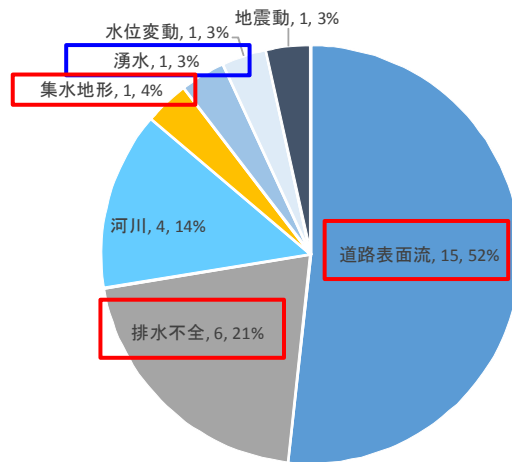
図3 被災箇所のイメージ図



(a) 全体



(b) 切土のり面



(c) 盛土のり面

(要因、件数、割合)

図2 被災要因

図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）で被災箇所の沢部に導いて排水をしている。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、崩壊した箇所である。図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一気に降っていたことがわかる。また、写真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。

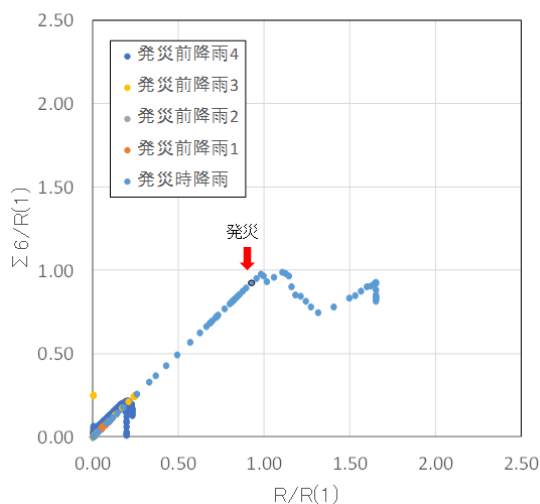


図4 発災前1か月の降雨のスネーク曲線
($\Sigma 6/R(1)-R/R(1)$)

一方で、写真1をよく見ると手前に排水升があり、写真2に示すように上方からアスカブで導いた表流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上方のアスカブ端部のところに設けて、斜面下方に導いて排水を行うことで被災を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



写真1 被災状況



写真2 表面流の排水系統

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（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

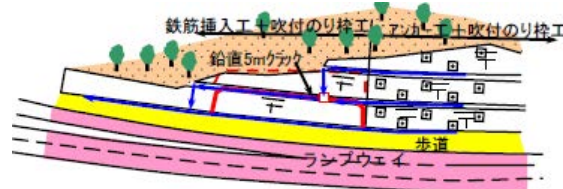


図5 被災箇所のイメージ図

図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3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 ($\Sigma 6/R(1) - R/R(1)$) 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。

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。



写真2 被災状況



写真3 周辺状況 (溜池の位置関係)

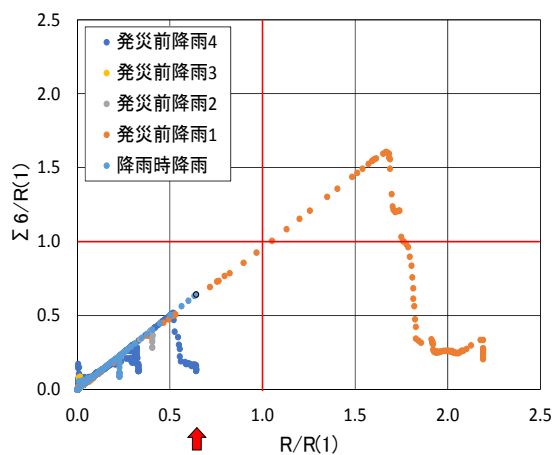


図6 発災前1か月間の降雨のスネーク曲線

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

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

3.1.5 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：融雪点検箇所抽出)

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：山梨 高裕、林 宏親、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の検討を行っている。そこで、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を行い、点検時の災害危険箇所の抽出のための着目点を検討した。その結果、地形や道路造成された地盤、道路構造などの変状要因に着目して点検を行うことが重要であることがわかった。

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月に発生した北海道中山峠の道路盛土のり面災害¹⁾に代表される大規模な融雪期の道路盛土のり面災害の変状メカニズムは未だ明らかとなっていないのが現状で、融雪期の道路盛土点検についてもそれに特化された手法もない。

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するとともに、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年度は、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、その要因について分析した。同時に融雪水との関係にも着目し、発生時の融雪の状態変化についても分析した。このことから危険箇

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要因

関係者から聞き取り調査した、平成22~28年度に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N=14件について分析した。

発生状況から要因を8つのカテゴリーに分類した(図-1)。その内、「道路造成」された地盤やその周辺環境、「道路構造」、周辺の「排水施設」の機能性、「盛土高」が主に関係することかわかった。その詳細は、「道路造成」された周辺環境では、集水地形や沢の埋め立て、基盤が軟弱層や湿地の場合、地すべりの頭部に造成されていたりしている箇所に変状していた。「道路構造」では、縦断こう配ではサグ部などの最低下部、平面線形では片勾配で曲線部、これらの複合部など、路面水が集まり易



所となり得る道路盛土の特徴を検討し、新たな点検時の着目点についても検討した。

い箇所でも多く見られていた。「排水施設」では、排水管やトラフの詰まりや破損、のり面の表面水に対する排水処理対策や隣接する切土のり面にものり面排水対策が無

い箇所によく見られた。さらに件数は少ないものの「盛土材料」に着目するとシルト系等のφ材を使用している盛土に発生していたが、今後さらに分析が必要である。

3. 融雪期の道路盛土変状の要因からみた新たな道路盛土点検の着目点

3.1 これまでの点検方法

防災点検については、平成8年に全国一斉の防災点検が開始されて以来、当年に「防災カルテ作成・運用要領(案)」³⁾が(財)道路保全技術センターから発行され、平成18年には国土交通省より「点検要領」⁴⁾が、平成20年には「北海道における道路防災点検の運用と解説(案)」⁵⁾が北海道開発局・寒地土木研究所から、平成21年には「道路防災点検の手引き」⁶⁾が(財)道路保全技術センターからそれぞれ発行されてこれらに基づいた点検が実施されてきた。さらに平成22年には8月11日に駿河湾を震源とする地震により、東名高速道路牧之原SA付近で盛土のり面が崩壊するという事態を受けて設置された「東名高速道路牧之原地区地震災害検討委員会」(NEXCO 中日本(株)設置)での検討結果を踏まえ、全国の高速度道路及び直轄国道における類似の盛土箇所について、地山の地形、地下水及び盛土材料の観点から盛土の性状を確認するため、「盛土のり面の緊急点検要領(素案)」⁷⁾に基づいた点検も実施されてきた。最新では、平成25年に「総点検実施要領」⁸⁾が道路局より、同時に「道路のり面・土工構造物の調査要領(案)」⁹⁾が国道防災課から発行され、現在はこれに基づいて点検している。また、専門書の「道路土工 盛土工指針(公益社団法人 日本道路協会)」¹⁰⁾においても記載されている。

3.2 新たな点検の着目点の検討

以上から、融雪期に発生した変状要因を分析し、危険箇所となり得る道路盛土の特徴を検討したうえで道路盛土点検の視点から融雪期における新たな点検の着目点を表-1にまとめた。特に減災を目的とした盛土点検を行う場合は、高盛土に着目し、特に片切片盛箇所は、その変状規模が大きい事例も報告されている。また、盛土の排水施設の有無と機能や隣接する切土のり面の排水施設の有無と機能の確認も行う。また、その周辺についてマクロ的な地形判読を行い、集水面積等の地形変化等をいち早く把握する事も重要である。さらに、盛土造成された地盤状況にも注視が必要で、このように変状した要因を踏まえた点検を実施することが肝要である。

5. まとめ

- ・近年、北海道の融雪期では、中山峠の災害を含め道路盛土の変状が多発している。
- ・融雪期の盛土変状は、特に注意すべき盛土材料を使用していない場合でも、盛土高さが5m以上の高盛土で発生している。
- ・融雪期における道路盛土変状の主たる要因は、縦断こう配の集水し易い道路構造にも見受けられたが、道路の造成された地形や地盤の環境的条件や盛土の排水処理対策の施されていない箇所でも見られた。
- ・変状要因を分析した結果、減災のための融雪期の盛土点検においては、地形を再判読しての確認、造成された地盤状況等、地域の特性に応じた新たな着目点を整理して実施することが必要である。
- ・今後は、融雪期における盛土変状メカニズムを解明し、変状の挙動からも注意が必要な箇所の抽出に繋げる。

表-1 融雪期における道路盛土の新たな点検の着目点

新たな点検視点	点検箇所のポイント	通常時の維持管理対策	該当ケース件数
① 高盛土で片切片盛された箇所の点検	盛土高さH=10m以上の片切片盛構造や拡幅盛土で薄く腹付け盛土した箇所を注視する。	盛土・路面・道路付属物の目視点検。新設の場合は、切土部側に全体に排水処理工を行う。	4件
② 排水施設の再点検	道路盛土や隣接する切土のり面の排水施設、道路縦断・横断排水工が機能されているかの確認。周辺に集水井工や水抜ボーリングなどの排水対策構造物がある箇所にも注視する。	既設排水工を日常パトロールで確認し、清掃等による維持管理を適切に行う。集水井等地下水量が卓越していると考えられる箇所の点検。必要な箇所には排水工を設置する。	9件
③ 高盛土周辺の地形判別を踏まえた点検	地すべり地形の頭部や沢埋め立て等に造成されているか、近年の気象により集水地形が改変され、面積や地下水流向の変化を現地踏査する。	再度、現地踏査して地形判別を実施する。	8件
④ 過去の地盤利用状況の確認	造成された地盤が農用地跡等や高含水比質地盤上に造成された盛土では、地盤からの水の供給を注視する。	新設の場合、切土と接してなくても、高盛土の中間層にドレーン等の排水処理工を施すことも検討する。	1件
⑤ 冬期に施工された盛土箇所の点検	冬期土工では、ブルーシート養生や土壌改良して施工していても積雪が盛土内に挟まれ凍結・融解により変状する。冬期大土工区間には注視する。	土工施工時期の確認。	1件

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) (財)道路保全技術センター: 防災カルテ作成・運用要領, 1996.
- 4) 国土交通省 道路局各課: 点検要領, 2006.
- 5) 北海道開発局道路維持課, 寒地土木研究所: 北海道における道路防災点検の運用と解説 (案), 2008.
- 6) (財) 道路保全技術センター: 道路防災点検の手引き, 2009.
- 7) 国土交通省 道路局: 盛土のり面の緊急点検要領 (案), 2010.
- 8) 国土交通省 道路局: 総点検実施要領, pp9-10, pp24-25, 2013.
- 9) 国土交通省 国道防災課: 道路のり面・土工構造物の調査要領 (案), p5, 2013.
- 10) (社) 日本道路協会: 道路土工 盛土工指針, pp273-293, 2010

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

3.1.6 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：点検・管理技術)

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、角田富士夫、吉野恒平

【要旨】

積雪寒冷地において融雪期・降雨期に道路斜面災害が多発する傾向にあるため、融雪を考慮した上で道路斜面点検手法の構築が求められている。表層崩壊は遷急線地形・集水型斜面において融雪期・降雨期間問わず多発しているが、融雪期と降雨期では水が斜面に作用する過程が異なることで、融雪期に不安定となりやすい斜面を抽出するための特有の点検着目点があると予想される。本研究は表層崩壊における融雪水の斜面への作用の仕方に注目し、斜面形状と崩壊部位の組み合わせから7つのタイプに分類し、タイプ毎の湧き水、表層地盤の状態、斜面形状を融雪水によって不安定となりやすい危険箇所抽出のための着目点としてとりまとめた。

キーワード：道路斜面災害、融雪、湧水、表層地盤、斜面形状

1. はじめに

積雪寒冷地である北海道では、地盤への水供給が多くなる融雪期と降雪期に、表層崩壊をはじめとする道路斜面災害が多発する傾向にある¹⁾。融雪期の斜面災害に対して発生箇所の早期把握のため、融雪を考慮した道路斜面点検手法の提案が求められている。

本研究では、表層崩壊について、地形、地質、水の移動に基づいてタイプ分類し、各タイプの点検着目点を抽出・整理することで、融雪期の道路斜面の点検方法の構築を目指す。表層崩壊は融雪期・降雨期に問わず、遷急線地形や集水型斜面において発生頻度が高いことが明らかにされている²⁾。このことから、表層崩壊は両時期において水が斜面に集中し、斜面の表層地盤に作用することで発生すると考えられる。水の供給・移動様式は両時期で異なることから、融雪期の崩壊に対して特有の点検着目点があると予想されるが、その詳細については明らかとされていない。

そこで、H29年度には、表層崩壊における融雪水の斜面への作用の仕方に注目し、斜面形状と崩壊部位の組み合わせからタイプ分類し、タイプ毎に融雪水によって不安定となり斜面抽出のための着目点を明らかにした。

2. 研究方法

2006年から2016年に北海道の国道斜面で発生した表層崩壊の内、道路防災点検の点検対象になっていて、崩壊前後の斜面情報のある90事例(図-1)のうち、

融雪に関連がある表層崩壊17事例を抽出し、斜面、崩壊箇所、崩壊深などの特徴の整理を行った。そして、雪が堆積しやすいことで融雪による表層崩壊が起こりやすい斜面形状、融雪水の表層地盤への作用とそれに至る融雪水の地下での浸透経路、そして融雪水が地表に出る位置(湧水の位置)を推定した。以上のことを整理した上で、斜面形状と崩壊部位との組み合わせから表層崩壊をタイプ分類した。そして、タイプ毎の湧水、表層地盤の状態、斜面形状を、融雪水によって不安定になりやすい各タイプに類似した危険箇所抽出のための着目点としてとりまとめた。

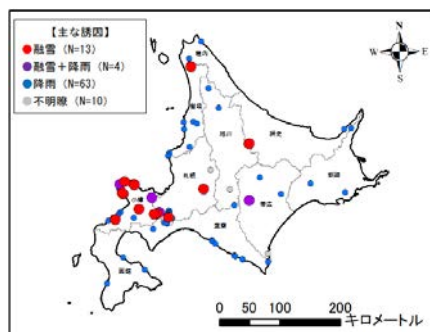


図-1 道内の国道における表層崩壊発生位置

3. 研究結果

3.1 堆雪性地形と崩壊部位に基づく崩壊タイプ分類

17事例の融雪による表層崩壊について斜面、斜面上部の状況、崩壊箇所、崩壊深について整理した(表-1)。遷急線背後から斜面に向かって融雪水が集中し、表層地盤に作用することで強度低下を引き起こし、崩壊箇所が生じると考えられる。この考えに基づいて、

表-1とそれ以外にも考えられる堆雪性地形と崩壊箇所を推定した。また、地下における融雪水の浸透経路は地質に規制されると考えられる。したがって、融雪水が遷急線背後から斜面に向かう地質状況と湧水が発生する斜面上の位置を推定した。それらを整理した結果、斜面形状と崩壊部位の組み合わせから表層崩壊を7つのタイプに分類した(図-2)。

表-1 融雪崩壊17事例の特徴一覧

No.	発生日月	発生路線	発生要因	斜面	斜面上部の状況	崩壊箇所	崩壊深(m)	崩壊タイプ
1	2006/4/20	国道274号	融雪・降雨	切土	平坦	法肩	2	2a
2	2006/4/24	国道229号	融雪	切土	平坦	法肩	0.3	1c
3	2006/4/27	国道5号	融雪	切土	平坦	法肩	1	1c
4	2010/4/12	国道40号	融雪	切土	平坦	法肩	3	2a
5	2009/4/4	国道453号	融雪	自然	緩斜面	遷急線直下	0.3	1c
6	2008/3/5	国道229号	融雪	自然	平坦	法肩	0.3	1c
7	2008/5/3	国道333号	融雪	切土	平坦	小段下	1.5	2a
8	2009/5/4	国道230号	融雪	切土	緩斜面	小段下	1.5	2a
9	2011/3/7	国道229号	融雪	自然	雪崩槽	遷急線直下	0.3	1b
10	2012/3/30	国道229号	融雪	自然	急勾配	中腹	2.5	2a
11	2012/4/6	国道229号	融雪・降雨	切土	平坦	遷急線直下	0.3	1c
12	2012/5/4	国道230号	融雪	切土	雪崩槽	雪崩槽直下	2	-
13	2012/5/2	国道230号	融雪	切土	平坦	法肩	1	2a
14	2013/4/29	国道452号	融雪	自然	平坦	法肩	4	-
15	2006/4/20	国道229号	融雪	切土	平坦	小段下	1.5	1b
16	2006/4/15	国道229号	融雪	自然	急勾配	遷急線直下	0.5	-
17	2006/5/11	国道393号	融雪・降雨	切土	平坦	中腹	0.5	1c

融雪崩壊17事例はほとんどが1b、1c、2aに分類される(表-1)。しかし、No.12、14、17はいずれのタイプに該当しなかった。これらの点検着目点については、異なる観点から検討する必要がある。

3.2 湧水と堆雪性地形の点検着目点への有効性

融雪期に各地形に該当する道路斜面において、遷急線よりも下位の斜面から湧水が出ている場合、融雪水が斜面に向かって移動していることにより表層崩壊が発生する可能性が考えられる。したがって、各タイプと表層地盤の状態、地形的特徴が一致する道路斜面において湧水が発生していた場合、そこで地質・地下水

移動を調査することによって同様の崩壊が起こる危険性がある箇所を見つけ出すことができるといえる。このようなことから、湧水、表層地盤の状態、斜面形状は融雪期に不安定になりやすい斜面を抽出する点検着目点になることを明らかにした。

4. まとめと今後の課題

事例収集と融雪水の作用に基づく崩壊メカニズムを考察した結果、斜面形状と崩壊箇所の組み合わせから表層崩壊を7つのタイプに分類した。各タイプと表層地盤の状態と地形的特徴が一致する道路斜面において、融雪期に遷急線よりも下位の斜面で発生する湧水が発生している場合、将来的に同様の崩壊が起こる危険性がある。このことから、湧水、表層地盤の状態、斜面形状は融雪水によって不安定となりやすい危険箇所を抽出する着目点になることを明らかにした。ただし、それらが確認された斜面の危険度評価手法については今後検討する必要がある。また、いずれのタイプに該当しない事例も確認された。これらについては、異なる観点からの検討が今後求められる。

参考文献

- 1) 日外勝仁, 角田富士夫, 倉橋稔幸: 北海道における道路斜面災害の発生と降雨・融雪の影響, 土木学会平成29年度全国大会第72回年次学術講演会講演概要集, pp.379-380, 2017年9月。

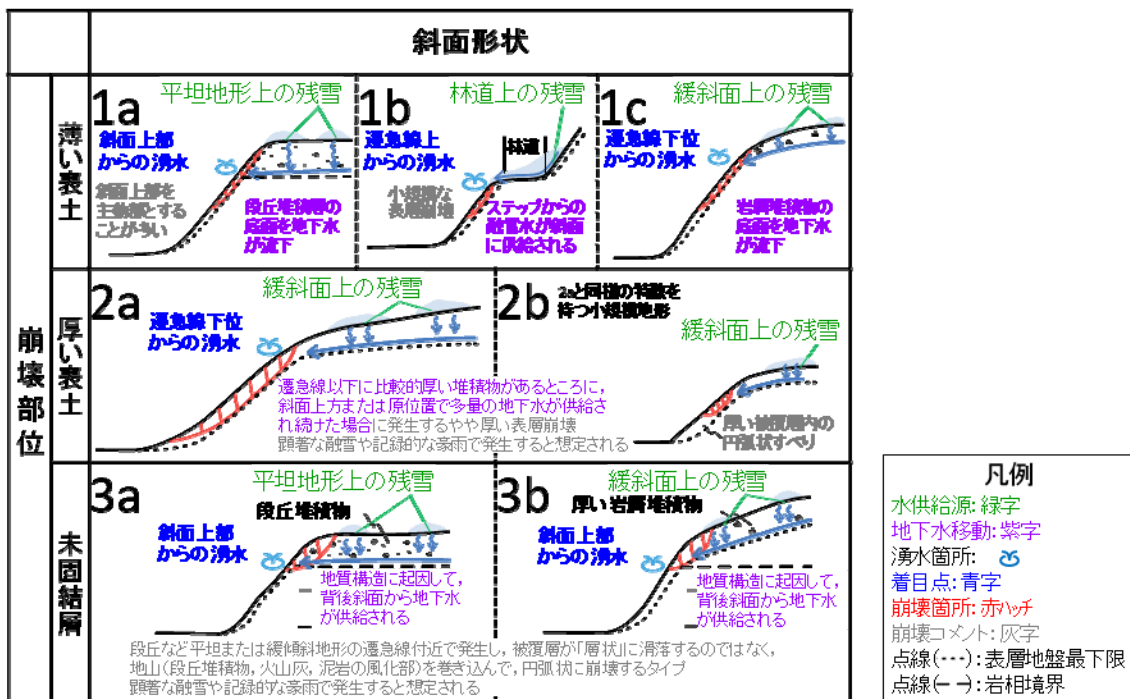


図-2 融雪水の斜面への作用の仕方注目した上で、斜面形状と崩壊部位からの表層崩壊のタイプ分類

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：水野正樹、藤村直樹

【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。土石流氾濫計算が迅速に行われ、早期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計算時間を短縮化する検討をした。本研究では、①任意形状の計算領域に対応するデータ構造の設計、②計算アルゴリズムの改善と並列化計算の実装を行い、高効率な氾濫計算プログラムの開発を行った。このプログラムにより、従来の計算と比較し、8.6倍～13倍程度の速度向上を得ることができた。

キーワード：火山噴火、土石流、緊急調査、土石流氾濫計算、

1. はじめに

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、国土交通省は、土石流の氾濫計算を行い、その想定氾濫範囲を公表することとなる。氾濫計算において起伏の激しい山地河川の微地形を表現するためには、できるだけ高い解像度の数値標高データを用いる必要がある。このような条件では、一般的に用いられる計算機では長い計算時間や多くの計算容量を要し、早期の想定氾濫範囲の公表が困難である。そこで、本研究では、①任意形状の計算領域に対応するデータ構造の設計、②計算アルゴリズムの改善と並列化計算の実装を行い、高速の計算処理が可能となるよう高効率な氾濫計算プログラムの開発を行うものとした。

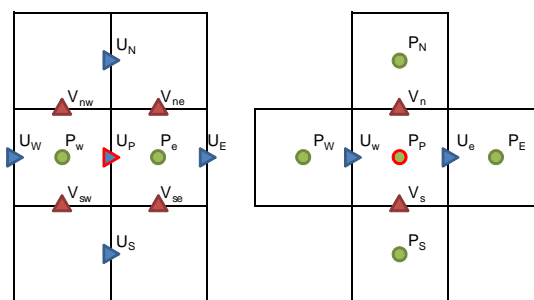
2. 研究方法

2.1 任意形状の計算領域に対応する計算方法

氾濫現象の支配方程式は高橋ら¹⁾の方法に則り保存型の浅水流方程式とし、差分法により離散化を行う。

通常、差分法では、矩形の計算領域に対し構造格子を構築するため、行・列方向に i 、 j 等のインデックスを用いて計算格子点を管理している。このため、河床から十分に標高が高く計算が不要な範囲を含む矩形領域を確保しなければならず計算容量の面で不利となる。本研究では、計算領域の削減のため、数値標高データを谷筋に沿った任意の多角形で想定最大氾濫範囲を抽出し計算を実施できるように差分式の書き換えを行った。任意の多角形の範囲で抽出した格子点に対し一連の格子点番号を

付し、差分式を評価する格子点に P 、隣接する格子点に E 、 N 、 W 、 S 等評価格子点からの方角を添字に取って（図-1参照）変数を表記した。これによりローカルな接続関係のみを用いて差分式を評価することが可能となり、任意形状計算領域でも計算が実施できる。



a) 運動方程式格子点 (x方向) b) 連続式格子点

図-1 格子点の接続関係

2.2 計算アルゴリズムと並列処理による高速計算方法

従来の計算プログラムでは運動方程式 (x 方向および y 方向)、連続式を解く際に計算格子点一点一点を捜査し、水域格子点であれば水理量計算を行い陸域格子点であれば計算をスキップするような内部分岐を逐次行っているものが多かった。開発プログラムでは時間ステップ毎に一度だけ水域陸域のチェックを行い、水域格子点のみを水理量の評価対象とするアルゴリズムとした。

近年のPCではマルチコアのCPUや大容量のメモリが実装され一般に普及している。このため、本研究では共有メモリ型の並列計算を実装することにより、計算の高速化を試みた。

3. 開発した計算プログラムの性能

降灰後の土石流を想定して24時間の降雨波形から算出した流出ハイドログラフによる氾濫計算を実施し、従来の計算プログラムとの計算時間の比較および並列化による効率化の評価を行った。火山地域の溪流を谷形状に沿って抽出し、20m精度の計算格子を作成した。従来のプログラムでは同等の範囲の矩形領域を計算範囲とした。図-2に開発したプログラムにより計算した計算格子切り出し範囲と最大流動深分布図を示す。

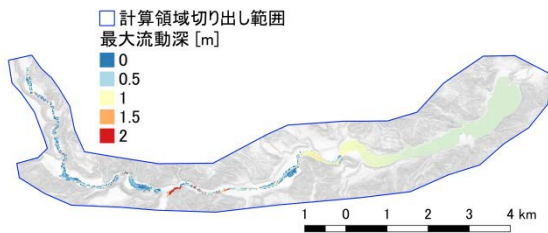


図-2 抽出した計算格子と最大流動深分布

図-3に従来の計算プログラムと開発した計算プログラムによる計算時間とその要する時間の向上率を示す。アルゴリズムの改良とプログラムのチューニングにより5.4倍程度の計算速度、更に並列化を実装することにより8.6倍～13倍程度の速度向上を得ることができた。

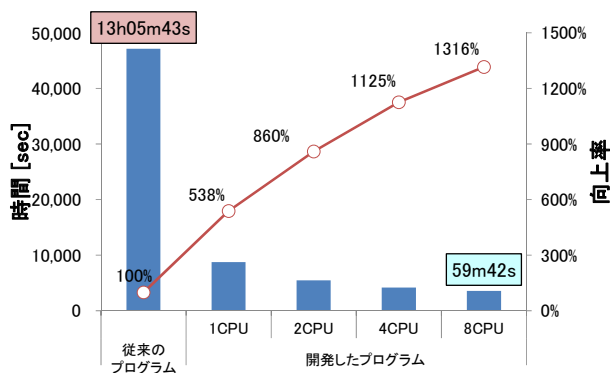


図-3 計算効率の向上状況

4. まとめ

3. で示したように、従来、想定氾濫範囲の推定に13時間を要したケースの計算が、開発したプログラムにより、約1/13の時間の1時間程度で実施できることが確認できた。災害時の緊急調査ではより高い解像度での計算も可能ではあったが、計算時間を考慮して50m精度の数値標高データが主に用いられてきた。本研究で開発したプログラムでは従来の氾濫計算プログラムに対し計算アルゴリズムの改良と並列化計算を実装することにより、

飛躍的に計算効率を向上させることができた。今後、緊急時において、当プログラムが活用されるよう、実際の対応を行うことが想定される地方整備局への技術指導を通じ、普及を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 高橋保ら：堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究、京都大学防災研究所年報、No. 29B-2、1986

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】

斜面変動の発生を2時期のLP計測データの差分解析により把握する手法を検討した。2年目である本年度は、昨年度明らかとなった変動斜面の抽出作業時に発生する標高差分誤差（ノイズ）の発生原因を調査するとともに、実際に斜面変動が発生した領域のみを表示する手法について検討した。その結果、標高差分誤差（ノイズ）は、LP計測を植生繁茂期に実施したこと等によりグラウンドデータ密度が著しく低いことが原因であることを明らかにした。また、このような低密度ポリゴン領域を把握することで、標高差分解析実施時に実際の移動斜面領域のみを対象とした誤差（ノイズ）の少ない表現が可能となった。

キーワード：斜面変動、航空レーザ測量、LPデータ、差分解析

1. はじめに

変動斜面の安全性は、非変動斜面に比べ、相対的に低い。そのため、変動斜面が地震動を受けると、さらに斜面の不安定化が促進される可能性が考えられる。このため、地震時に不安定化する斜面を予測する上で、地震発生前から変動が進行している斜面を把握することは重要である。近年、国内では、航空レーザ測量が積極的に実施されるようになり、同一地域における複数時期の航空レーザ測量データ（以下、LPデータ）の蓄積も進みつつある。このため、複数時期のLPデータを活用して経時的な斜面の変化を把握することで、広域斜面を対象に、効率的に変動斜面を抽出できる可能性が高まっている。

本研究では、LPデータを用いた変動斜面の抽出法を構築するため、今年度は、昨年度明らかとなった標高差分誤差（ノイズ）について、その原因を推定した。さらに、その原因である低密度ポリゴンの存在を考慮した標高差分解析の手法について検討した。

2. 調査方法

解析対象地域は、実際に斜面変動が確認されている口坂本地すべり地区周辺を含む静岡県安倍川流域を対象とした¹⁾。同流域では、表-1に示すとおり、平成21年度から平成25年度にかけて複数時期の航空レーザ測量が実施されている。これらを用いて6通りの標高差分解析を行った。本調査では、比較的短時間で解析できる標高差分法を用いて、斜面変動の抽出を試みた。標高差分法は、新しい計測時期の標高データから古い計測時期の標高データを引いて差分値を算出する方法である。本研究では、差分値-1～+1は誤差を多く含む可能性が高いと

考えられたため、差分値が+1m以上の値を標高の上昇（隆起）、差分値が-1以下の値を低下（沈降）の可能性のある斜面とみなし（潜在的変動斜面）、解析結果を整理した。

表1 安倍川流域における航空レーザ測量における主な計測諸元一覧

番号	①	②	③	④
計測日時	平成21年5月9日 ～5月20日	平成23年10月27日 ～11月1日	平成24年11月7日 ～12月7日	平成25年11月30日 ～12月1日
計測機体	固定翼	固定翼	固定翼	固定翼
照射密度（計画）	2点/m ²	1点/m ²	1点/m ²	2点/m ²
DEMサイズ	1m	1m	1m	1m
対地高度	1,000～2,450m	2,400m	2,400m	2,100m
対地速度	70m/s(252km/h)	260km/h	260km/h	260km/h

3. 調査結果、考察

3.1 標高差分解析結果

表-1に示す各測量成果より2時期の標高差分解析結果を陰影図に重ねたものの例を図-1に示す。差分解析した期間は、同左図では平成21年5月と平成25年11月末頃（①と④）、右図では平成23年10月末頃と平成25年11月末頃（②と④）である。図中の白線で囲った範囲の斜面では地すべり性崩壊により斜面中腹の標高が下がり斜面下部の標高が上がる傾向を示している。緑線で囲った範囲の斜面では崩壊により標高が下がる傾向を示している。一方、広域的にみると、右図では上記の他に斜面で標高差を生じていないが、左図では多くの斜面において標高差を生じる結果を示している。左図と同様の傾向は①と組み合わせたすべての標高差分解析により確認できる一方、それ以外の組み合わせでは確認できない。したがって、これらは、斜面変動とは関連しない①のデータ精度に伴う誤差によるものと考えられる。

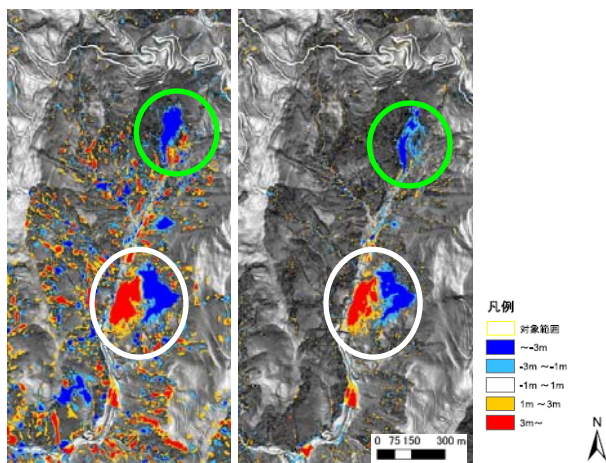


図-1 標高差解析結果
(安倍川流域 左図：H25-H21 右図：H25-H23)

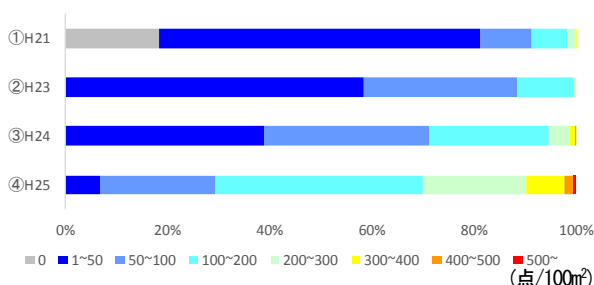


図-2 グラウンドデータ点密度の階級別割合

3.2 グラウンドデータ点密度分布

斜面変動がない範囲で標高差が抽出される原因を推定するために、各計測時期におけるグラウンドデータの点密度を確認した。10m 格子内のグラウンドデータの点数をカウントし、点密度の階級別の割合を図-2に整理した。平成21年度のグラウンドデータは、10m 格子内に50点未満のデータしかない範囲が80%近くを占めており、他の計測時期と比較してグラウンドデータを取得できていない範囲が多く存在する。計画時の照射密度は2点/m²で比較的密に設定されているが、計測時期が植生の繁茂時期と重複したことにより、グラウンドデータ点密度が低くなったと考えられる

3.3 低密度ポリゴンデータを除外した差分解析

標高差解析結果から、信頼性の高い部分のみを採用することで、実際の斜面変動範囲と誤差とみられる範囲とを分離できないか検討した。本研究では、信頼性の低い領域として、公共測量作業規定の準則に記載されている「低密度ポリゴンデータ」を活用した。図-3に示すように、5m 格子内にグラウンドデータが存在しない範囲を

低密度ポリゴンとして定義した。標高差解析結果に2時期の低密度ポリゴン領域を重ね合わせ、低密度ポリゴン領域を黒色でマスク表示したものを図-4に示す。

低密度ポリゴン領域を重ねることで、斜面変動と関連性が低い標高差分値を分離できることが確認された。このため、低密度ポリゴンと斜面変動に関連しない標高差分値との関連性は高いといえる。なお、当然のことながら、斜面変動が発生している範囲における低密度ポリゴン領域では斜面変動範囲を抽出できない。

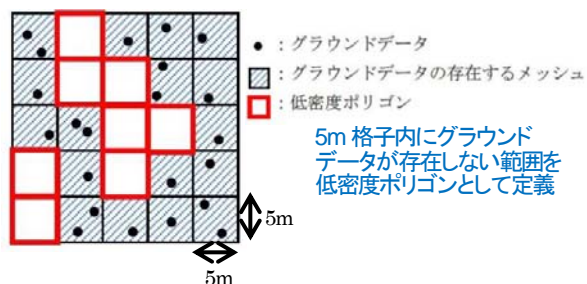


図-3 低密度ポリゴン作成の概念図

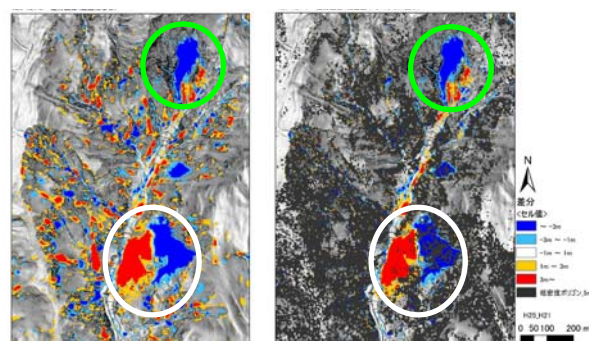


図-4 低密度ポリゴン領域を考慮した標高差解析結果
(左図：最適化なし 右図：低密度ポリゴンをマスク表示)

4. まとめ

本研究では、低密度ポリゴン領域を考慮することによって、植生の繁茂期を含む2時期の標高差差分解析においても、斜面変動の発生が確認可能な領域のみを抽出して表現することができた。今後の課題としては、標高差差分解析を実施するための航空レーザ測定の仕様標準化や、低密度ポリゴンとして定義する最適な格子サイズの検討等が考えられる。

参考文献

- 1) 中埜貴元・小荒井衛・大丸裕武・三森利昭・岡田康彦・小川明穂：(2013) :SAR 干渉画像で捉えた静岡市口坂本地区の地すべりの前兆変動 (速報、日本地理学会 2013 年秋季学術大会、2013)

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)

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 23 年 9 月の紀伊半島豪雨により和歌山県内の県管理道路で発生した 279 箇所の道路斜面災害を対象として、災害発生率と降雨の関係について分析を行った。その結果、土壌雨量指数の第 1 タンクの貯留高と災害発生率とは弱いながらも相関があり、災害形態として崩壊が多かったことと調和的である。

キーワード：ゲリラ豪雨、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 29 年度は災害発生と降雨との関係を検討するため、平成 23 年 9 月の紀伊半島豪雨により和歌山県内の県管理道路で発生した 279 箇所の道路斜面災害を対象として、災害発生率と降雨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

279 箇所の災害形態の内訳を表-1 に示す。また、279 箇所のうち切土・自然斜面災害の 204 箇所の災害形態の内訳を表-2 に示す。切土・自然斜面災害では最も多いのが崩壊であり、次いで土石流が多く、この両者で切土・自然斜面災害の 9 割超を占めている。なお、崩壊の大半は表層崩壊であり、過去の豪雨による災害でも比較的多

表-1 調査対象 279 箇所の災害形態内訳

災害形態	箇所数	割合
崩壊	163箇所	58.4%
土石流	38箇所	13.6%
地すべり	3箇所	1.1%
その他(盛土崩壊等)	75箇所	26.9%

表-2 切土・自然斜面災害 204 箇所の災害形態内訳

災害形態	箇所数	割合
崩壊	163箇所	79.9%
土石流	38箇所	18.6%
地すべり	3箇所	1.5%

く発生する災害形態である（例えば文献 1）2)）。

3.2 災害発生率の試算

本災害における道路沿いの災害発生率の試算を行った。試算は、道路の任意の地点を中心としたある一定区間内の災害発生数を集計し、1km あたりの災害発生数を算出して災害発生率とした。集計区間長を 10km（任意の地点の前後 5km ずつ）とした場合の災害発生率を図-1 に示す。集計区間長については 2km～30km での試算を行ったが、集計区間長が短いと発生率の分布が離散的になり、集計区間長が長いと発生率の差が現れにくくなる傾向となった。

3.3 災害発生率と降雨の関係

試算した災害発生率といくつかの降雨指標との関係について分析を行った。降雨指標は総雨量及び土壌雨量指数とし、土壌雨量指数についてはさらに第 1～第 3 の各タンクの貯留高も用いた。降雨データは気象庁公表の 1km メッシュ解析雨量を用い、土壌雨量指数の計算は災

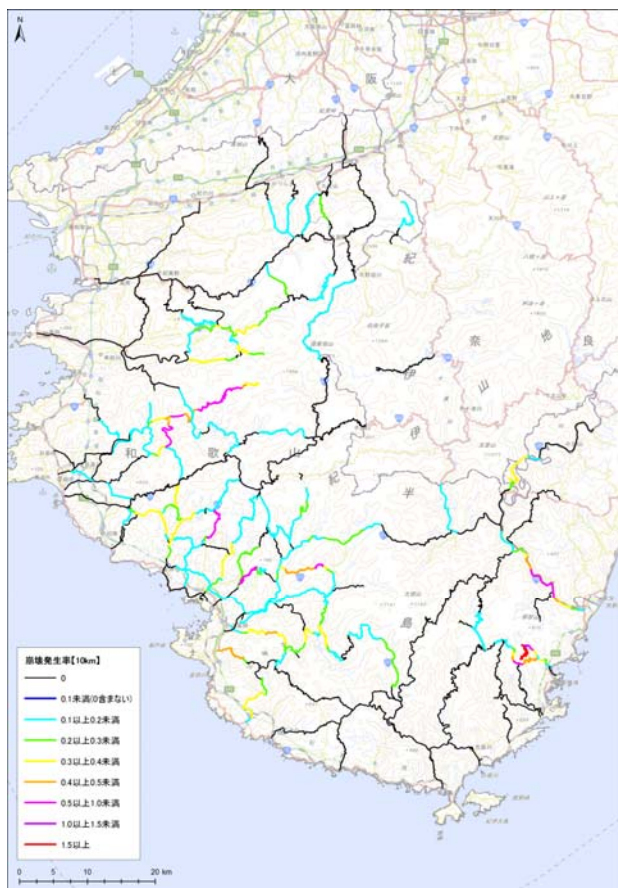


図-1 紀伊半島豪雨による道路沿い災害発生率
(集計区間長 10km の場合)

害発生約 2 ヶ月前 (7 月初め) から行った。全災害の発生率と降雨指標との関係を図-2 に示す。総雨量との関係では 400mm 程度以上になると災害発生率が上がり始める。また、災害発生率と降雨指標との相関関係は必ずしも明確でないが、第 1 タンクの貯留高と災害発生率とは弱いながらも右上がりの相関が見られる。第 1 タンクの貯留高は斜面表層付近の水分状態と関係していると考えられ、災害形態として崩壊が多かったことと調和的である。なお、災害形態ごとに分析すると、崩壊の場合は似た傾向であったが、他の災害形態の場合は必ずしも同様の傾向ではなく、さらに検討が必要である。

3. まとめ

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 23 年 9 月の紀伊半島豪雨により和歌山県内の県管理道路で発生した 279 箇所の道路斜面災害を対象として、災害発生率と降雨の関係について分析を行った。その結果、土壌雨量指数の第 1 タンクの貯留高と災害発生率とは弱いながらも相関があることが示され

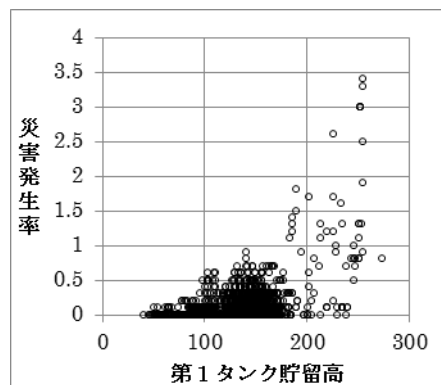
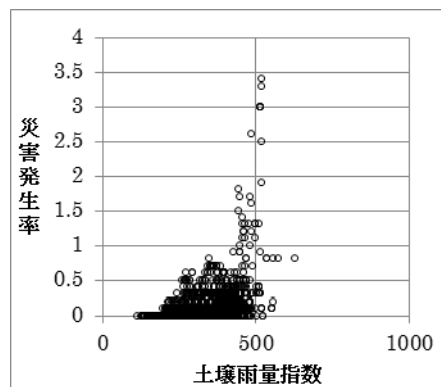
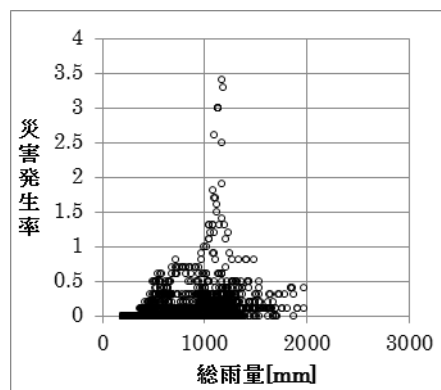


図-2 災害発生率と降雨指標との関係
(災害発生率の集計区間長 10km、降雨指標が総雨量、土壌雨量指数、第 1 タンク貯留高の場合の例)

た。なお、災害発生率と降雨指標との相関関係は必ずしもすべてが明確でなく、今後も検討が必要である。

参考文献

- 1) 浅井健一・林浩幸・佐々木靖人：平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨における道路斜面災害の特徴、平成 22 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.261-262、2010 年 10 月
- 2) 金井哲男・浅井健一・佐々木靖人：記録的な豪雨で発生した道路災害の特徴 (平成 23 年紀伊半島大水害の事例から)、平成 27 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.163-164、2015 年 9 月

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。

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

ここでは、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 1 にその一例を示す。

2.2 災害時降雨パターンの分類

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

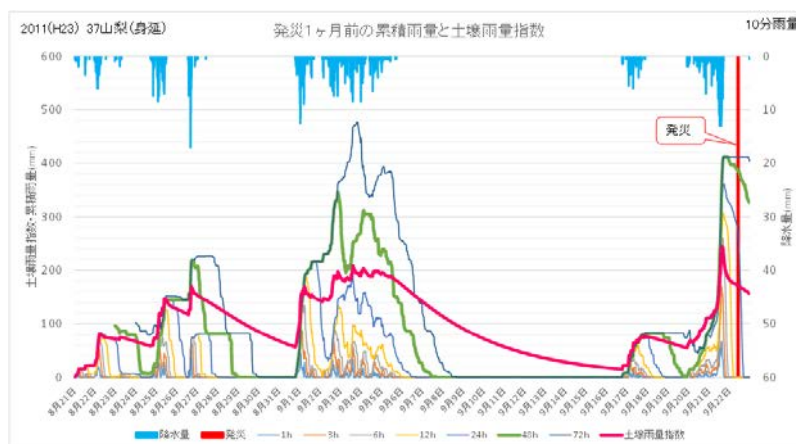


図 1 災害時降雨データの整理例

が行われている。図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も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るであろう災害（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 災害時雨量の関係 ($R/R(1)-\Sigma 48/R(1)$)

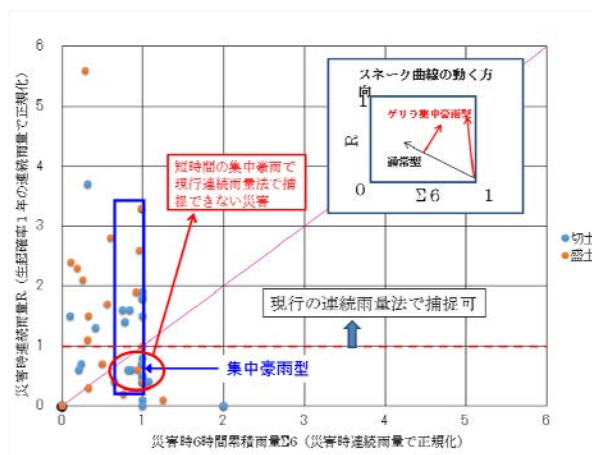


図3 災害時雨量の関係 ($\Sigma 6/R-R/R(1)$)

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

前述の直轄国道の切土および盛土の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、 $R/R(1) \geq 1$ となる範囲で発生した災害は、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。

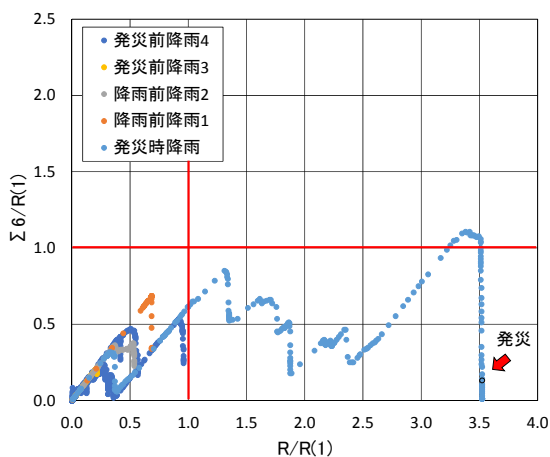


図4 長雨型災害のスネーク曲線の例

②集中豪雨型災害 (21件/58件)

スネーク曲線の例を図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 $R(1)$

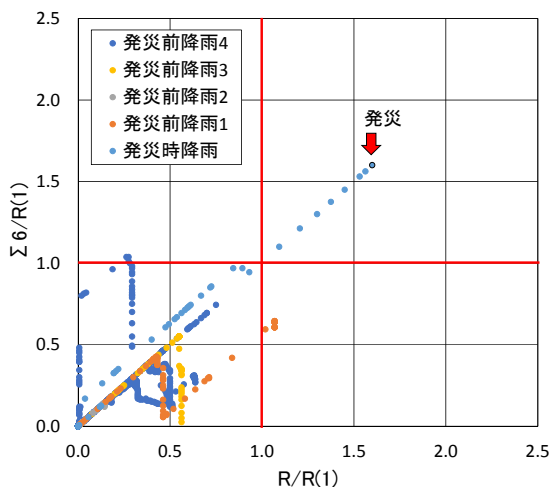


図5 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例

を超えていた。

③先行降雨型災害 (8件/58件)

スネーク曲線の例を図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ていた。発災時の $R/R(1)$ と $\Sigma 6/R(1)$ は、それぞれ1未満となった。

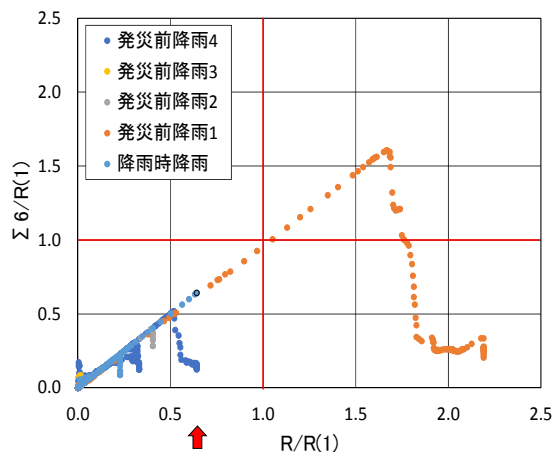


図6 先行降雨型災害のスネーク曲線の例

④少降雨型災害 (13件/58件)

スネーク曲線の例を図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。

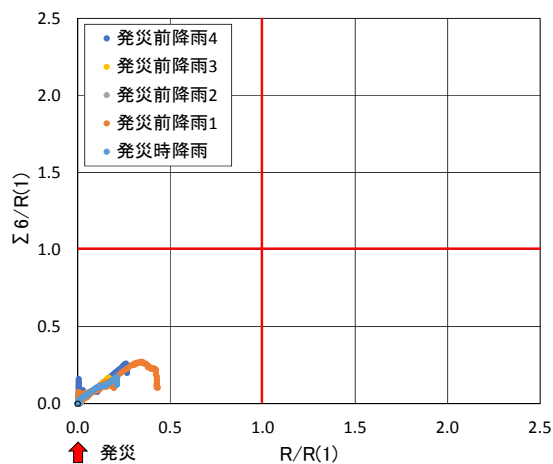


図7 少降雨型災害のスネーク曲線の例

$\Sigma 6$ 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

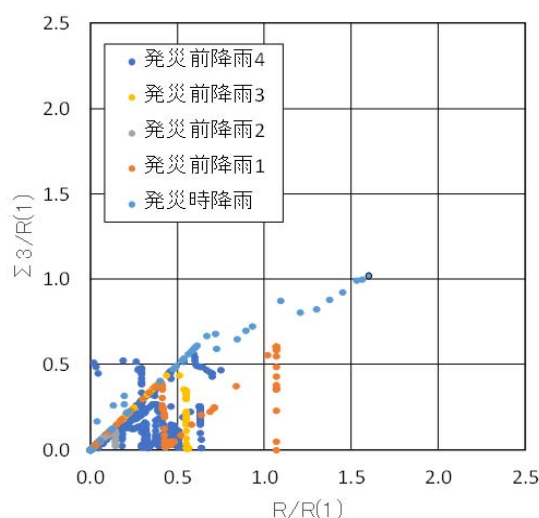


図8 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例
($\Sigma 3$ による整理)

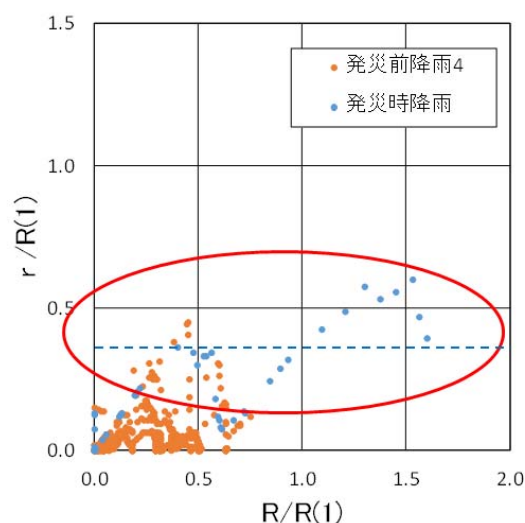


図9 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例
($r(\Sigma 1)$ による整理)

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す必要がある可能性があるといった課題がある。

3. まとめ

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。その結果、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。

今後は、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て、高いスネーク曲線による災害の捕捉性の分析・検討を行い、効果的な事前通行規制方法の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 (投稿中)

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：安全性確保技術)

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：山梨 高裕、林 宏親、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、融雪水の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、それを解析等で明らかにするための検討を行っている。そこで、北海道で融雪期に変状が生じた道路盛土を対象に融雪期の盛土内の水位を、融雪水を考慮した浸透流解析結果から仮定し、既存の円弧すべり解析により、融雪期盛土災害の発生メカニズムの解明に資する検討を行った。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を行い、道路盛土変状時の要因と融雪水 (換算雨量：雪面低下法) を分析し、関係式を導いた。

キーワード：融雪水、道路盛土、浸透流解析、安定解析

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⁾に代表される大規模な融雪期の道路盛土のり面災害の変状メカニズムは未だ明らかとなっていないのが現状で、融雪期の道路盛土点検についてもそれに特化された手法もない。

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するとともに、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 28 年度は、融雪期に変状が確認された道路盛土を対象に浸透流解析を行い、得られた水位をもって行った安定解析の結果について考察を行った。

平成 29 年度は、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、その要因について分析した。同時に融雪水との関係にも着目し、発生時の融雪の状態変化についても分析した。このことから危険箇所となり得る道路盛土の特徴を検討し、新たな点検時の着目点についても検討した。

2. 浸透流解析

2.1 融雪水の評価

融雪水については、積雪深が記録され始めた時点から

最大積雪深が観測された時点までは地表面が凍結していると仮定の上、非排水条件とし、また最大積雪深が観測された時点から積雪深がゼロになるまでを融雪期間とし、地表面の凍結期間に記録された降水量の累積を融雪期間の時間で割ることで融雪による浸透フラックスとし、降水として一時間ごとに節点に入力する、というものである。

2.2 解析結果

図 1(a) に降雨 (融雪水供給) 終了時の浸潤線を、図 1(b) に終了時の飽和度コンターを示す。これより地山の粘性土(Dc1)層の透水係数が低いいため、降雨終了時の地山部分の地下水位は融雪水の影響を受けず、水位上昇していない。それに対し、盛土部は地山に比べ透水性が高く、融雪水の影響による水位上昇が確認でき、盛土部が概ね飽和していることが確認できる。

3. 安定解析

3.1 解析手法

ここでは、盛土内への融雪水の浸入を想定した検討を行うため、水圧 (水位) を考慮した円弧すべり解析に着目する。この解析手法は、通常、地震時の過剰間隙水圧の発生を考慮した円弧すべり面を仮定した安定解析手法

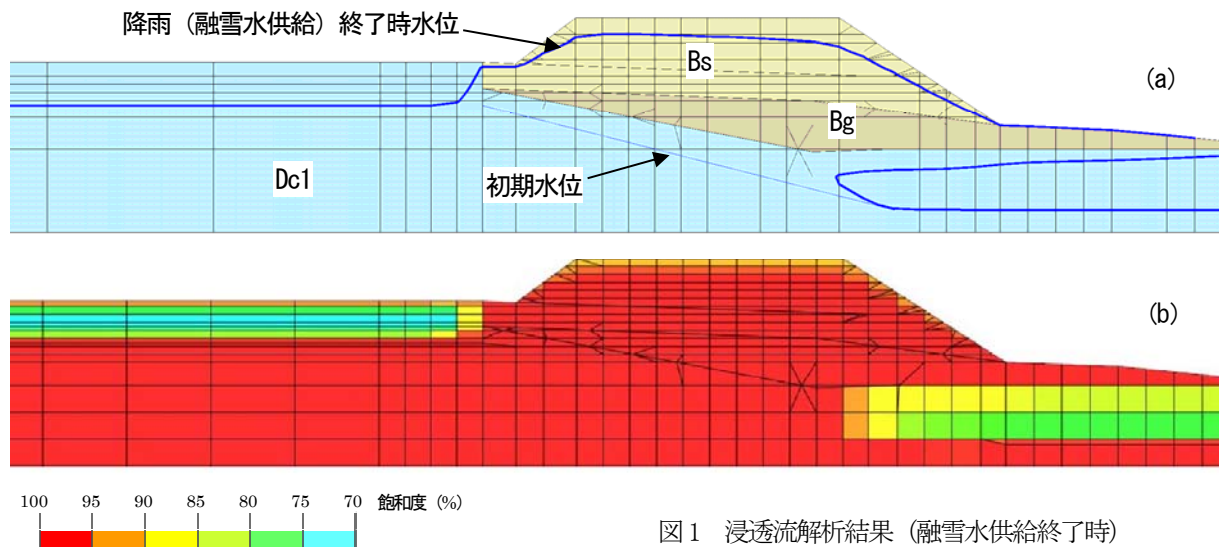


図1 浸透流解析結果（融雪水供給終了時）
(a) 浸潤線 (b) 飽和度

3)であるが、寒冷地における冬期もしくは融雪期では、盛土のり面等に存在する雪氷や凍土により、通常の排水が行われない可能性があり、盛土内に過剰間隙水圧が生じることも想定される⁴⁾。その水圧を融雪期の過剰間隙水圧とし、適用を試みたものである。

3.2 盛土変状時を想定した安定解析結果

図2に、過剰間隙水圧比をパラメータに実施した解析結果を示す。横軸に過剰間隙水圧 Δu 、縦軸は盛土のすべり安全率 F_s で整理している。図より、盛土内の過剰間隙水圧の上昇とともにすべり安全率が減少し、その過剰間隙水圧 Δu が 15kN/m^2 程度作用すると、盛土のすべり安全率 F_s が 1.2 程度となり、 Δu が 18kN/m^2 程度作用すると、盛土のすべり安全率 F_s が 1.1 程度、 Δu が 21kN/m^2 程度作用すると、盛土のすべり安全率 F_s が 1.0 程度となる。

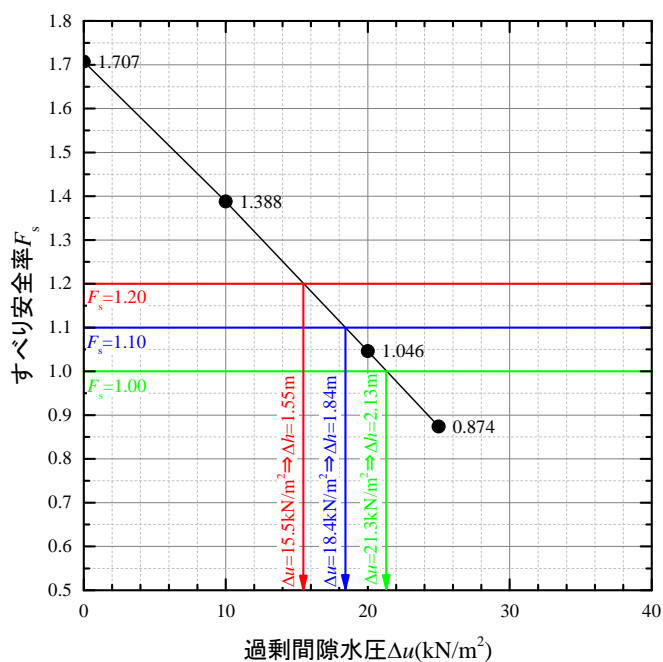


図2 盛土内の過剰間隙水圧とすべり安全率の関係

4. 融雪期における道路盛土変状の要因と換算雨量との関係

4.1 解析手法

融雪期の盛土変状と発生時の換算雨量との関係を分析した。盛土高さ・盛土形状（両盛土か片切片盛）を基準とし、「道路造成」「道路構造」「排水対策」の各要因と換算雨量との関係を図-2に示す。例えば、下記左図からは片切片盛の盛土形状で盛土高 $H=10\text{m}$ ・道路造成地盤が集水地形に道路盛土が存在する場合は、換算雨量値が約 60mm を超えると盛土変状の注視が必要となり、下記右図からは、両盛土形状で盛土高 $H=5\text{m}$ で縦断こう配が低下しているような箇所に道路盛土が存在する場合は、換算雨量値が約 50mm を超えると盛土変状の注視が必要となる、図-2からは、近接している切土のり面に排水対策が施されてしない場合、片切片盛の盛土形状で盛土高 $H=10\text{m}$ で換算雨量値が約 70mm を超えると盛土変状の注視が必要となる、ということである。今後は、各関係式を統一し、危険箇所抽出の要点として検討する。

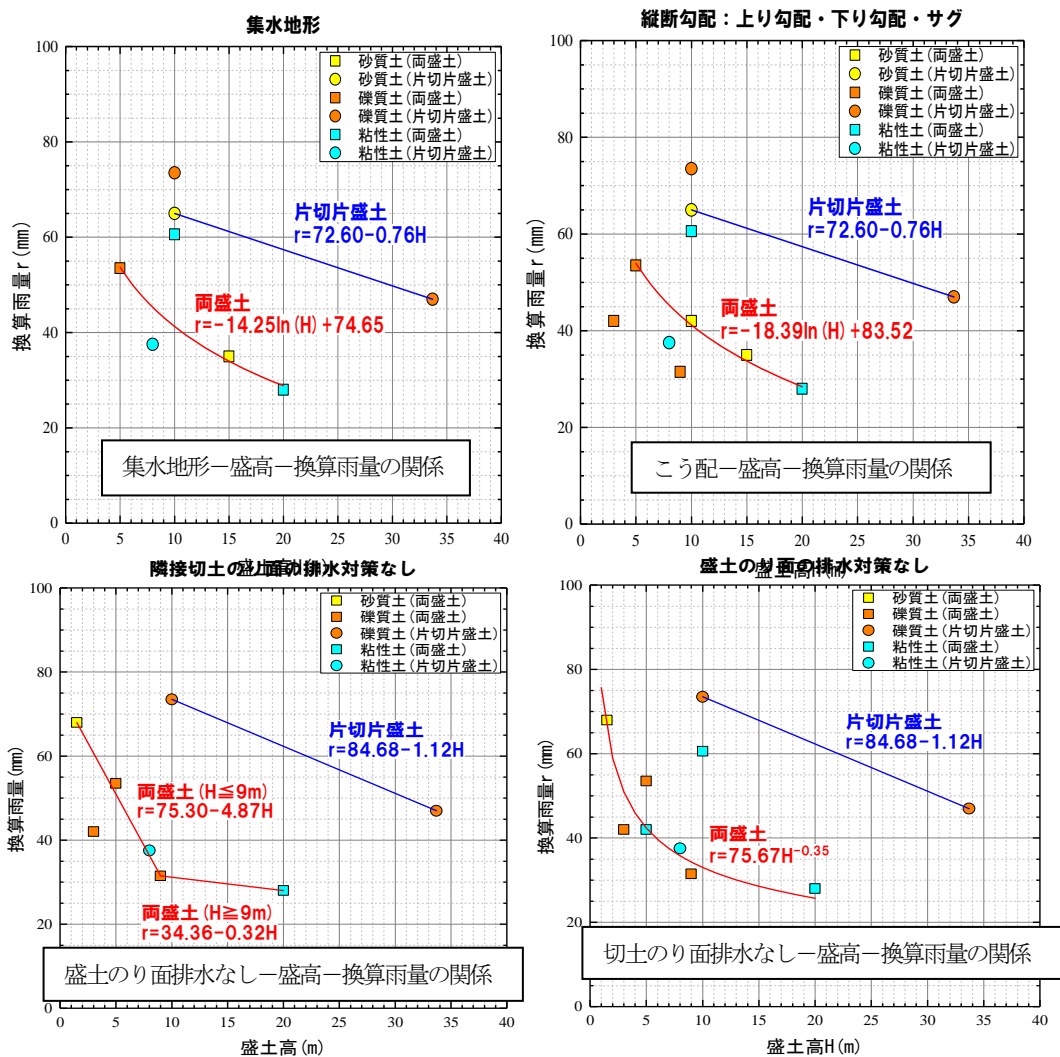


図-2 各要因と盛土高と換算雨量の関係式

5. まとめ

- ・近年、北海道では、融雪期に中山峠の災害を含め道路盛土の変状が多発している。
- ・浸透流解析を行った結果、盛土はほぼ飽和した状態を呈し、水位も盛土上端に近いところに形成された。その条件で一般的な安定解析を行ったところ、すべり安全率は1.7程度あり、盛土は安定した状態と判断された。
- ・水圧を考慮した安定解析を実施したところ、過剰間隙水圧 Δu が 15kN/m^2 程度作用すると、盛土のすべり安全率 F_s が1.2程度となり、 Δu が 21kN/m^2 程度作用すると、盛土のすべり安全率 F_s が1.0程度となった。
- ・この結果は、融雪期の盛土内には $15\sim 20\text{kN/m}^2$ 程度の過剰間隙水圧が作用（有効応力の減少）もしくはそれに相当する外力が加わっており、盛土が不安定な状態になる可能性が示唆された。
- ・融雪期の盛土変状と発生時の換算雨量との関係を分析

し、「道路造成」「道路構造」「排水対策」の各要因と換算雨量との関係が示されたが、今後はこの関係式をさらに分析して、危険箇所抽出の要点のひとつとして示す。

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)日本道路協会: 道路土工—軟弱地盤対策工指針, 2012.
- 4) 林啓二, 原靖, 松田圭大: 積雪寒冷地において盛土法面に発生する知られざる現象, 地盤工学会誌, Vol.63, No.4, pp.24-25, 2015.

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：安全性確保技術）

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、角田富士夫、吉野恒平

【要旨】

融雪期の道路斜面崩壊による被災の回避に向けて、降水量に融雪水量を加味した新たな事前通行規制基準を検討する上で、降雨や融雪による斜面崩壊メカニズムを十分に把握する必要がある。表層崩壊は、融雪期・降雨期間問わず集水型斜面や遷急線地形において多発しており、集められた水が遷急線を持つ斜面に作用することが両者共通の崩壊要因であるものの、融雪期の斜面崩壊は、通常の降雨要因の他に積雪寒冷地特有の要因が加わって発生すると考えられる。そのため、収集した表層崩壊事例を基に、降雨や融雪による斜面崩壊メカニズムを両者の違いに留意して分析を行い、土質ごとの斜面への作用の仕方や変状位置の違いを解説図としてとりまとめた。

キーワード：融雪期、道路斜面災害、融雪、降雨、崩壊メカニズム

1. はじめに

積雪寒冷地では融雪期に斜面災害が多発する傾向にある。融雪期は無降雨時でも融雪水が漸続的に地中に浸透するため、融雪期の斜面崩壊は降雨期よりも見かけ上少ない降水量で発生すると想定され、現行の雨量のみに基づいた事前通行規制基準では、融雪期に十分には対応仕切れていない。そのため、融雪期における斜面災害を防止・軽減するために、降水量に融雪水量を加味した新たな事前通行規制基準の設定や、融雪災害に対応した斜面点検手法の開発が求められている。そこで、H29年度は、北海道における道路斜面災害事例の収集・分析から、積雪寒冷地における融雪や降雨に係わる斜面崩壊の実態とその発生要因の分析を行った。

2. 研究方法

表層崩壊は融雪期・降雨期に関わらず、集水型斜面や遷急線地形において発生頻度が高いことが明らかとなっている。このことから、両時期ともに、遷急線下位の斜面表層に集中した水が作用して不安定化することで、崩壊が発生しやすくなったと推察される。しかしながら、融雪期と降雨期では、水の供給状況などに違いがある上、積雪寒冷地特有の事象もあり、両者の崩壊メカニズムには差異があると考えられる。

そこでまず、2006-2016年に北海道で発生した表層災害事例(90件)を収集し(表-1)、崩壊要因の分析を行い、どのような斜面に対して作用するのか、また、融雪期の積雪寒冷地特有の要因について、整理を行った。その上で、融雪期と降雨期における崩壊要因や作用の仕方の違いが分かる解説図としてとりまとめた。

表-1 崩壊要因毎の表層崩壊月別発生件数(2006-2016年)

発災月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
融雪のみ			3	7	3								13
融雪+降雨				2	2								4
降雨のみ			1	2	7	8	8	10	26	1			63
不明		1		5	4								10
合計	0	1	4	16	16	8	8	10	26	1	0	0	90

3. 研究結果

3.1 表層崩壊の崩壊要因の考察

表層崩壊の力学的な不安定化要因は、応力変化と強度低下の2つに大別される。応力変化に関しては、斜面形状や荷重の変化、間隙水圧の発生などがある。また、強度低下に関しては、地盤の吸水膨張や凍上現象、風化などがある。これら要因は、荷重の変化を除き、いずれも水が大きく関与している。

特に、斜面表層の土質が粘性土の場合には、斜面が傾いていることによるせん断力（軸差応力一定）が常に作用しており、地下水水位が上昇した状態が長時間継続すると、吸水膨張により徐々に過圧密粘土化（平均有効応力の低下に伴う間隙比の増大）し続け、高含水比になり、ついには、せん断力に耐えられなくなり破壊に至るといったメカニズムが考えられる。

斜面表層の土質が透水性の比較的高い砂質土主体の場合には、斜面内の土質が全て飽和状態にならず、地下水として、斜面下方へ流下する。流下した地下水が遷急線付近や法尻付近などの地下水流道を阻害する箇所集中することで表層崩壊が発生する。

また、遷急線直下は、引張応力により崩壊が発生しやすいだけでなく、同時に、斜面背後からの浸透水が集まることで水位が上昇し、水に起因して強度低下も生じることから、崩壊の発生しやすい箇所といえる。

3.2 融雪期の積雪寒冷地特有の崩壊要因

融雪崩壊と降雨崩壊では、発生時期、水の供給源、浸透時間に違いがある(表-2)。融雪崩壊の水の供給源は積雪であり、水の供給量は残雪の多寡で異なることに加え、供給源に近い法肩ほど長期間にわたり湿潤状態となる。一方、降雨崩壊の水の供給源は降雨であり、斜面表層全体にほぼ均等に供給される。

積雪寒冷地では、融雪水が数週間～数ヶ月にわたって供給され、粘性土主体の斜面では、地下水位が高い状態が長期間継続することになるため、降雨期に比べて崩壊に至りやすくなるほか、表層部では凍上現象(アイスレンズの形成)が生じやすい。気温が氷点下になると斜面が凍結し、斜面中の各所にアイスレンズが生じることによる上下の土質の分断の影響や、アイスレンズ周辺の間隙水も凍結することによる土質の体積膨張の影響で、斜面が崩壊しやすくなる(図-1)。

また、粘性土主体斜面では水の作用により凍結融解による強度低下、表面凍結による法尻部等の間隙水圧上昇なども発生し、これらの要因が複合的に作用することで融雪期の崩壊を助長していると考えられる。

	発生時期	水の供給源	浸潤時間
融雪崩壊	氷点下を経験した直後の融雪時期	上部平坦面など、斜面上部からの地表水・地下水	数週間～数カ月(残雪量と気温による)
降雨崩壊	年中	上空から斜面全体に均等に降り注ぐ雨水と地下水	長くて1週間程度(通常は2～3日以内)

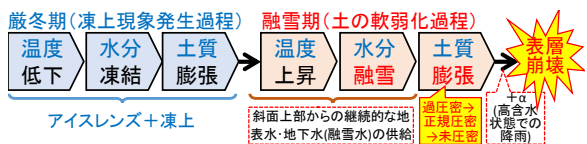


図-1 積雪寒冷と特有の崩壊メカニズム

3.3 融雪崩壊と降雨崩壊とのメカニズムの差異

融雪崩壊と降雨崩壊では、吸水膨張などによる強度低下から遷急線直下が不安定化するという基本メカニズムは同じであるものの、水の供給状況によって作用する斜面の箇所が異なると推測される。

多くが水に起因する表層崩壊の要因が、粘性土や砂質土といった表層の土質の違いによる作用のしやすさや、降雨や融雪による浸透地下水の浸透が遷急線地形などの斜面形状と合わさることで斜面のどの部位で発現しやすいのかなどを、積雪寒冷地における融雪期と降雨期と表層崩壊との違いが明確になるよう、崩壊メカニズム解説図(図-2)としてとりまとめた。

4. まとめ及び今後の課題

融雪期・降雨期の表層崩壊事例の分析などから、

- ・崩壊要因の多くが水に起因すること、
- ・融雪期特有の崩壊要因として、融雪による長期湿潤や凍上現象による強度低下などがあること、
- ・斜面形状や土質、浸透状況によって、強度低下等による不安定が生じやすい箇所が規制されること、

などを推定し、積雪寒冷地における融雪期と降雨期における表層崩壊のメカニズムを解説図としてとりまとめた。

今後、これらの知見を踏まえ、融雪災害に対応した新たな事前通行規制基準の設定や斜面点検手法の確立につなげたい。

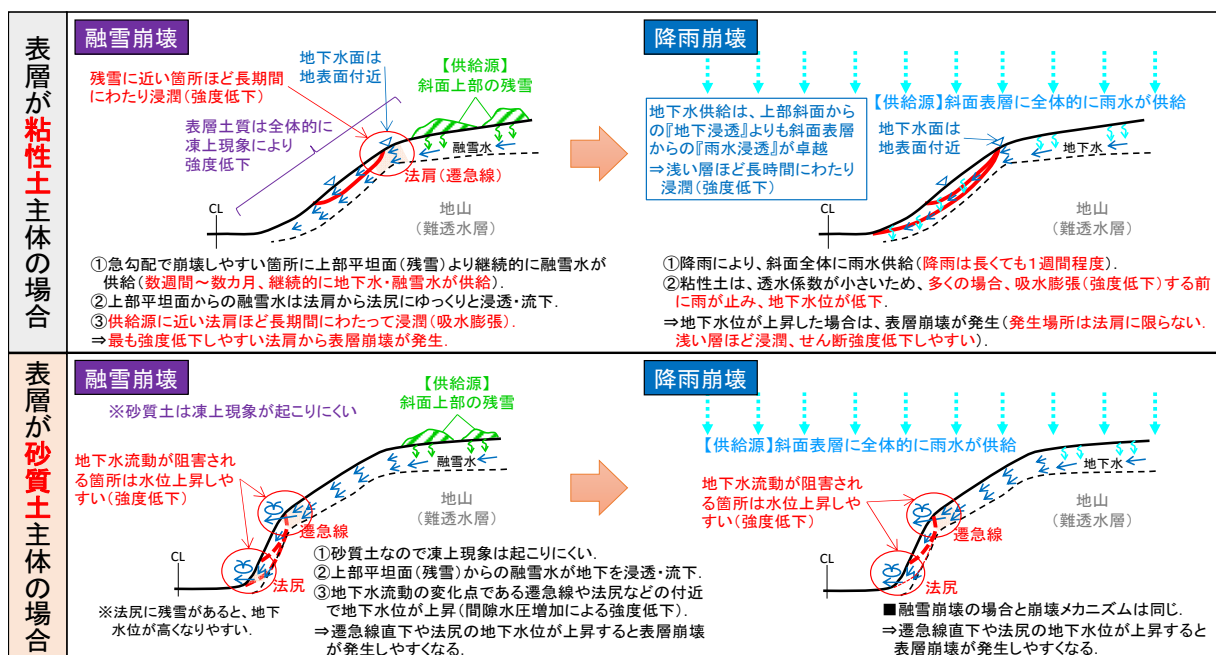


図-2 積雪寒冷地における水に起因した崩壊要因の作用の仕方留意した表層崩壊のメカニズム解説図

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 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 (5) (融雪期斜面分野 [融雪水量推定] : 安全性確保技術)

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、角田富士夫、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、降水量に融雪水量を加味した事前交通規制基準の設定が求められている。そのために、事前通行規制基準の対象区間周辺の融雪水量の分布を把握できる、面的な融雪水量推定法について検討する必要がある。本研究では、融雪水量係数と時間積算温度との積から融雪水量を表す改良 Degree-Hour 法を基幹とした面的な融雪水量推定法の考案を試みた。その結果、GIS 上で対象地域内の解析日射量を算出し、関係式から地域内の融雪水量係数を算出した。同様に、対象地域の標高データと時間積算気温の関係式から時間積算気温を面的に推定した。それらを掛け合わせることで融雪水量を面的に算出することができた。キーワード：融雪、斜面災害、融雪水量推定手法、改良 Degree-Hour 法、GIS

1. はじめに

積雪寒冷地では融雪期に斜面災害が多発する傾向にある。融雪水による道路沿いにおける斜面災害を回避するためには、降雨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、道路管理に適用可能な融雪水量推定手法の開発が求められる。

本研究では、積雪密度を織り込んだ融雪水量係数と時間積算気温との積から融雪水量を表す改良 Degree-Hour 法¹⁾による融雪水量推定手法を検討している。本手法では、任意の地点で融雪水量係数を算出することで、気温データのみから、その地点の融雪水量を推定することが可能になる。融雪水量係数と気温は地点によって異なるものの、過年度までの研究成果により、解析日射量と融雪水量係数の回帰直線式から、同一地域内において融雪水量係数の値を面的に推定できる可能性が示された²⁾。融雪を考慮した事前通行規制基準を設定する上で、対象区間周辺の融雪水量の分布を把握することが課題として挙げられる。

そこで、H29 年度には、GIS を用いて、対象地域の解析日射量から融雪水量係数、標高から時間積算気温をそれぞれ空間補完し、それらを乗ずることによって地域内の融雪水量を算出する面的推定方法を考案した。

2. 研究方法

今回、面的な融雪水量推定手法を検討するために、融雪期に斜面災害が発生した北海道札幌市南区定山溪において、2015 年に 12 地点で得られた融雪水量係数と時間積算気温を用いた。

GIS を用いて国土地理院の 5mDEM データから調査地点とその周辺域の全天日射量を解析した。そして、各観測地点の解析日射量と融雪水量係数の回帰直線式を求め、それと全天日射量の計算値から、対象地域内の融雪水量係数を算出した。また、各観測地点の標高と時間積算気温との関係を分析し、時間積算気温の値を面的に推定した。以上を踏まえた上で、融雪水量係数と時間積算気温を GIS 上で掛け合わせて、対象地域内における全メッシュの融雪水量を算出した。

3. 研究結果

3.1 解析日射量からの融雪水量係数の算出

観測地点周辺の解析日射量の計算値は約 $1.26 \sim 13.60 \times 10^4 \text{WH/m}^2$ となった。図-1 に示すように、12 地点の解析日射量と融雪水量係数は正の相関を示し、回帰直線式 (関係式①) は決定係数 $R^2 = 0.49$ となった。GIS 上で関係式① ($y = 0.0149x - 0.018$) の x に解析日射量の計算値を入力した結果、調査対象地域内の融雪水量係数の計算値は約 $0.01 \sim 0.18$ となった (図-1)。

3.2 標高からの時間積算気温の算出

調査地域内の標高は $337.72 \sim 981.76 \text{m}$ であった。12 地点の時間積算温度と標高は負の相関を示す (図-2)。また、回帰直線式 (関係式②) において決定係数 $R^2 = 0.85$ と比較的良い相関が認められた。このことから、標高は時間積算気温の推定に有効な要素であると言える。GIS 上で関係式② ($y = -4.6899x + 5677.9$)

の x に標高値を入力することで時間積算気温を算出した結果、調査対象地域内の時間積算気温は約 1073.6～4094.0℃となった(図-2)。

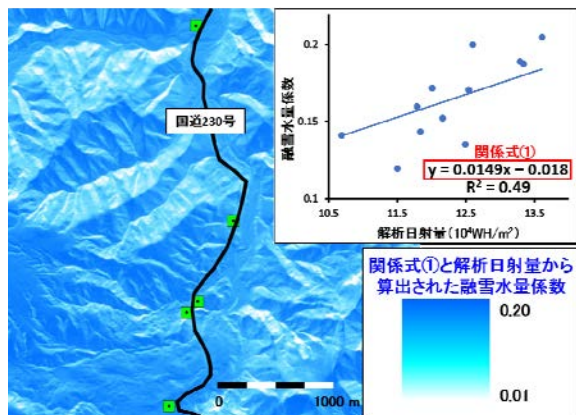


図-1 12地点における解析日射量と融雪水量係数の関係と観測地点周辺の融雪水量計数の面的推定

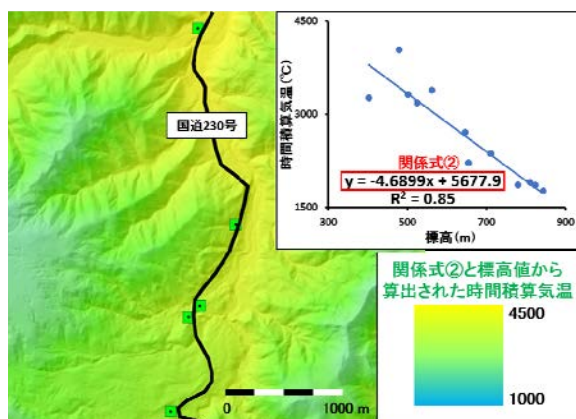


図-2 12地点における標高と時間積算気温の関係と観測地点周辺の時間積算気温の面的推定

3.3 融雪水量の面的推定

解析日射量と標高から、調査地域内の融雪水量係数と時間積算気温をそれぞれ算出した。これらを GIS 上で改良 Degree-Hour 法の式に代入することにより、地域内の融雪水量は約 1.4～660.2kg/m²と推定した(図-3)。本推定手法によって、任意の箇所での融雪水量の推定も可能になった。これにより融雪を考慮した事前通行規制基準の設定に貢献できると期待される。

ただし、今回示した関係式は単年のデータに限ったものであり、翌年以降、あるいは別地域で換算式として用いるには、複数年あるいは別地域でも積雪調査を実施し、係数などを新たに決定させる必要がある。また、融雪水量係数は年毎にもばらつくことが確認されていることから²⁾、本手法を実用化する上で時間的な

ばらつきの補正方法も検討する必要がある。加えて、現状では実測された日射量ではなく、GIS 上で計算された日射量を用いたため、実際の気象状況などによる解析日射量の値を補正方法も検討する必要がある。

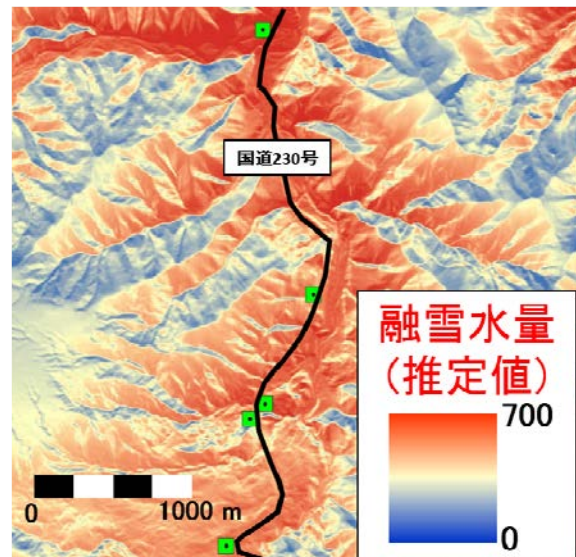


図-3 改良 Degree-Hour 法による融雪水量係数の面的推定

4. まとめと今後の課題

融雪水量係数と時間積算気温の積から融雪水量を表す改良 Degree-Hour 法を基に、積雪調査実施地域内の融雪水量を面的に推定した。解析日射量から地域内の融雪水量係数を面的に算出した。一方、時間積算気温は標高と高い相関を示し、標高値から地域内の時間積算気温を算出することができた。これらの計算結果を GIS 上で改良 Degree-Hour 法の式に代入することにより、地域内の融雪水量を面的に算出できた。今後は、本推定方法を実用化する上で、融雪水量係数の空間的・時間的なばらつきの補正方法に加えて、GIS 上で算出された解析日射量の実際の気象状況などによる補正方法について検討する。

参考文献

- 1) 矢島良紀, 倉橋稔幸: 融雪斜面災害の誘因となる融雪量の推定手法に関する検討, 寒地土木研究所月報, No.754, pp.28-34, 2016年3月。
- 2) 矢島良紀, 日外勝仁, 倉橋稔幸: 道路斜面災害の誘因となる融雪量の推定手法改良について, 平成28年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.167-168, 2016年10月。

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

3.2.8 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、角田富士夫、山崎秀策、吉野恒平

【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。H29年度は、SfM技術による岩盤斜面の3次元地形モデル構築の際の課題であったオーバーハングや金網施工箇所に適したUAV撮影条件を現地検証により明らかとした。また、地山内部に推定される不連続面と斜面との交差関係が立体的に把握可能となる開口亀裂の走向・傾斜と分布位置の情報を併せ持った三次元モデル化方法を提案した。

キーワード：岩盤斜面、UAV、SfM、三次元地形モデル、開口亀裂

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を撮影している。本研究でも、岩盤斜面に対する技術開発として、SfM (Structure from Motion) 技術による写真から岩盤斜面の三次元地形モデルを迅速に構築する方法を検討しており、地上からの撮影だけではなく、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle、以下 UAV) を用いた空中撮影への対応も想定した検討を行っている。

岩盤斜面の点検や調査を目的とした地形モデル構築にあたっては、地形面を正確にモデル化する必要があるが、H28年度の検討により、写真撮影条件によっては金網施工箇所やオーバーハングなどの凹地形において課題があることが明らかとなった。

このため、H29年度は、距離や方向などを変えて UAV 撮影を行い、金網が施工された急崖斜面においても、金網背後の地形をモデル化できる撮影条件を検討した。また、岩盤崩壊の危険性がある岩体を抽出して評価する方法を今後検討する上で必要となる不連続面の三次元情報について、UAV 撮影で確認できる表面の開口亀裂から地山内部の面構造を推定し、三次元地形モデル上に可視化する方法を提案した。

2. 金網施工箇所に適した UAV 撮影写真に基づく地形モデルの構築

2.1 UAV 機器の仕様と写真撮影方法

UAV の機種の違いによって、構築される金網施工箇所の地形モデルに差異があるかを把握するため、同程度の解像度でセンサーサイズとレンズの明るさ

が異なる、内蔵小型カメラ、交換式中型カメラ、後載式一眼レフカメラの3機種を用いた (表-1)。

表-1 UAV と搭載カメラの仕様

機体名称	DJI Phantom4Pro	DJI Inspire2	DJI S1000
プロペラ数	4枚(クアッドコプター)	4枚(クアッドコプター)	8枚(オクトコプター)
対角寸法	350mm	605mm	1045mm
合計重量	1388g	3440g	約4400g
最大飛行時間	約 30 分	約 23 分	約15分
GPS/GLONASS	姿勢制御+画像埋込	姿勢制御+画像埋込	姿勢制御と位置誘導
カメラ	FC6310 (備え付け)	Zenmuse X5S	Canon EOS5D Mark III
有効画素数	約2000万画素	約2080万画素	約2300万画素
最大解像度	5472 × 3648	5280 × 3956	5760 × 3840
レンズ	(備え付け)	DJI MFT 15mm/1.7ASPH	EF24mm F2.8 IS USM
焦点距離	2.8-11mm [9mm]	15mm	24mm
センサーサイズ	1型(13.2×8.8mm)	4/3型(17.3×13mm)	フルサイズ(36×24mm)
動画記録サイズ	4096 × 2160 (4K)	4096 × 2160 (4K)	1920 × 1080 (Full HD)

斜面に対する撮影距離や水平方向の撮影角度を達するほか、金網が浮くことで地形が把握しづらい凹地形に対応するため、機首を斜面に正対させた上で伏角 (鉛直方向の撮影角度) を変えた複数の撮影条件 (表-2) で、図-1 の金網施工斜面を撮影し、Agisoft Photoscan Ver. 1.4.1 により地形モデルを作成した。

表-2 金網施工斜面に対する撮影条件

カメラ方向	斜面との距離				
	20m	30m	50m	75m	100m
機首正対/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/-	P/I/S
機首左30度/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S
機首右30度/水平	P/I/-	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角15度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角30度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	P/I/S
機首正対/伏角45度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	P/I/S	-/-/S
機首正対/伏角60度	P/I/-	P/I/-	P/I/S	-/-/S	-/-/S

P: Phantom4Pro、I: Inspire2、S: S-1000、-: 未実施

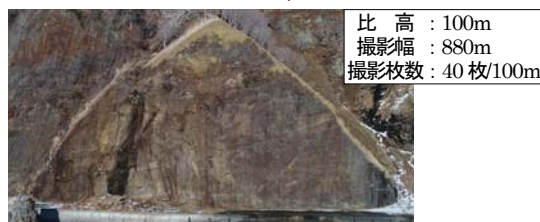


図-1 金網施工箇所の地形モデル化検証斜面

2.2 異条件撮影画像に基づく地形モデル構築結果

先ず、斜面に正対した水平撮影で、撮影距離と機種を違えた場合の地形モデルを図-2に示す。斜面から離れると徐々に金網のメッシュが現れ始め、50mを超えるとより顕著になることから、斜面との距離が近い方が金網の影響を受けにくいと考えられる。また、機種による著しい差異は認められなかった。

次に、オーバーハングなどの凹型地形の再現性を確認するため、3機種の中で最も安価で普及している Phantom4Pro を例として、異なる撮影条件下で作成した地形モデルの中央断面形状を図-3に示す。

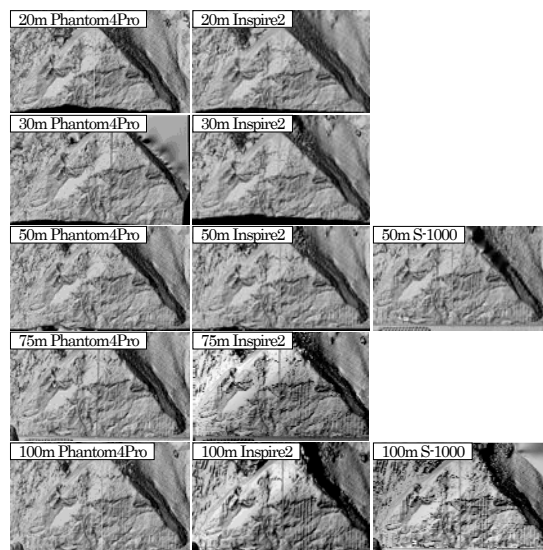


図-2 撮影距離と機種による地形モデルの違い

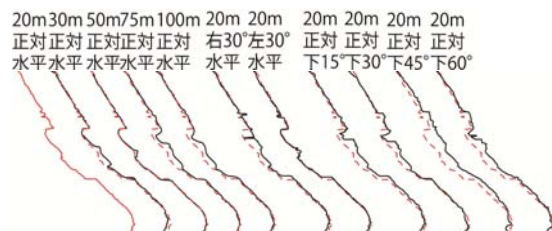


図-3 撮影条件による地形モデル断面形状比較

オーバーハング地形のモデル再現性について、斜面と正対した水平撮影においても、撮影距離が50mを超えるとオーバーハングがあまり再現されていない。機種を左右に振った水平撮影では、右30度のケースのみ著しく精度が悪く、実際の斜面形状と撮影方向の組み合わせによっては精度が出ない危険性を示しており、今後の課題といえる。伏角を与えた撮影では、30度を超えると金網がやや目立つようになり、凹地形が全く再現されないケースもあった。

金網施工斜面に適した撮影条件は、UAVのカメラの差はあまり影響せず、①斜面に近接して撮影する、②斜面とカメラを正対させる、③伏角は15度程度までが望ましいという3点にまとめられる。

3. UAV を活用した亀裂系の三次元地形モデルの構築

現地調査で亀裂面等の走向・傾斜を測る際には、クライミングが必要となるオーバーハング部や高比高部などでクリノメータを直接当てるのが困難な場合や、斜面が長大で亀裂の延長が長くなり、複数の計測地点での値がばらつき、亀裂全体を代表する走向・傾斜を特定しづらい場合など、様々な課題がある。そこで、UAVを活用することで、位置に係わらず亀裂状況を容易に視認でき、写真から構築できる三次元地形モデルと組み合わせることで、亀裂の全体形状と分布の正確な把握が可能となると考え、現地計測値だけでなく写真と合成した三次元地形モデルを基に亀裂の向きと位置の正確なモデルを作成した。その手順を図-4に、モデル作成例を図-5に示す。

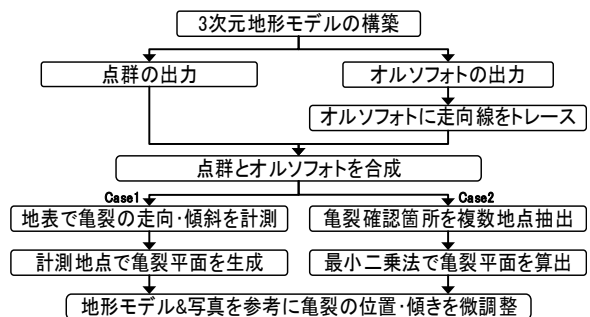


図-4 亀裂系の三次元地形モデル化フロー



図-5 亀裂面の走向・傾斜の三次元モデル化例

複数の亀裂面と斜面表面形状の交差状況の立体的な把握により、亀裂面が完全に分離したと仮定した場合の斜面から縁切られる岩体の特定と、その岩体の重心位置と支えとなっている下面の傾斜方向等から、崩落に至る運動像の推定が可能となった。

4. まとめ及び今後の課題

SfM技術を用いて急崖岩盤斜面の精度の高い三次元地形モデルを作成するにあたって、オーバーハングや金網施工箇所に適したUAV撮影条件や写真解析の留意点を整理したほか、開口亀裂面の交差状況が立体的に把握可能となる斜面と亀裂の三次元モデル化方法を提案した。

今後は、亀裂を含む岩盤斜面のモデルにおいて、亀裂面が分離面となる確度の評価を行うことで、より精度の高い岩盤崩壊の規模推定手法を検討したい。

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、荒木恒也、山澤文雄、寺澤貴裕

【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。落石防護擁壁の保有性能に関しては、擁壁の延長に着目した重錘衝突実験を実施し、耐衝撃挙動を把握した。落石防護柵の保有性能に関しては、実規模の重錘衝突実験および間隔保持材の設置効果や金網の貫通現象を把握するための基礎的な部材実験を実施し、耐衝撃挙動を把握した。

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 実験概要

落石対策便覧では、擁壁の有効長さを擁壁高さの4倍と仮定しているが、その根拠は明確ではない。ここでは、擁壁の延長を1.5mおよび高さの4倍(4m)とした場合の擁壁の耐衝撃挙動の検討を行った。実験ケース一覧を表1に、実験概要図を図1に示す。

2.2 実験結果および考察

図2には、擁壁天端中心点における水平変位分布の経時変化の一例を示している。重錘衝突によって擁壁全体が剛体運動をしていることがわかる。F9のケースでは、目標エネルギーE=1.0kJの実験時にひび割れが発生し、S9のケースではE=2.0kJの実験時にひび割れが発生している。その後、繰返し载荷によりひび割れが進展している。ひび割れが発生し重錘衝突エネルギーが大きくなると擁壁全体の回転運動に加えて重錘衝突位置を中心とした局所的な変形が示されていることがわかる。

表-1 実験ケース一覧

ケース名	基礎地盤	延長 L(m)	重錘質量 m(kg)	構造形式	目標エネルギーE(kJ) (繰返し载荷)
U1	コンクリート	1.5	110	RC	0.2,0.5,1.0,1.5,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0
U3			340		0.2,0.5,1.0,1.5,2.0,3.0,4.0
U9			890		0.5,1.0,1.5,2.0,3.0
F1	コンクリート	4.0	110	無筋	0.2,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5
S1					2.0,3.0
F3					0.2,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5
S3			2.0,3.0		
F9			0.2,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5		
S9			2.0,3.0,4.0		



図-1 落石防護擁壁実験状況

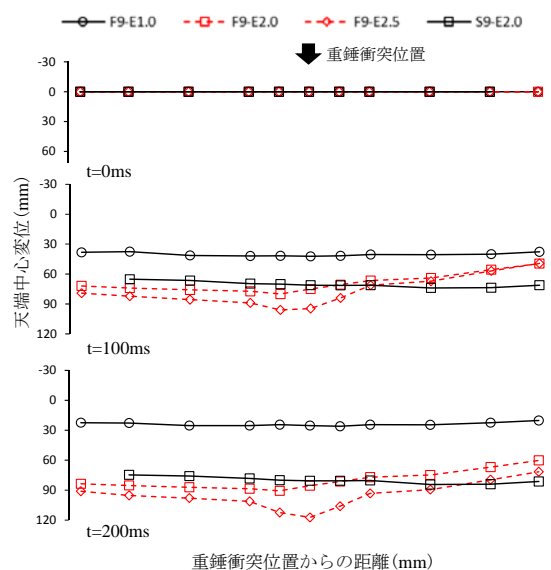


図-2 擁壁天端中心変位の経時変化

図-3には、擁壁重心での最大回転角と重錘衝突エネルギーの関係を示している。擁壁の最大回転角は重錘衝突エネルギーが大きくなるほど増加している。また、最大回転角の増加率は重錘質量が重いケースが大きい。ひび割れ発生後も押抜きに至るまでは、最大回転角は重錘衝突エネルギーが大きくなるにつれて増加しているが、擁壁の損傷が大きくなるにつれてその増加率は小さくなる傾向にある。

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、柵高2m、3m×3 スパンの供試体に対して重錘衝突実験（重量10kN）を、間隔保持材の設置効果や金網の貫通現象を把握するための部材実験として、重錘種類や重錘落下高さ、保持材間隔を変化させた重錘落下衝突実験（重量1kN）を実施し（図-4）、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

実規模実験において、図-5に示すように実験時の各部材の応答を数値解析によって大略再現できることを確認した。また、設計可能吸収エネルギーの約1/2程度が下方に作用した場合には、中間支柱基部に破損が認められ、数値解析上も降伏応力を超える応力が発生することを明らかにした（図-6）。

部材実験においても、図-7に示すように実験時の各部材の応答を数値解析によって大略再現できることを確認した。スパン中央部にワイヤロープの間隔保持材を設置することで、設置しない場合に比較して重錘がすり抜ける場合の衝突エネルギーは2倍以上となった。ただし、間隔保持材を設置した場合においても、重錘の衝突エネルギーが増加することで重錘のすり抜けが発生する場合があることなどを明らかにした。また、重錘が小さい場合には、金網の可能吸収エネルギーが設計値25kJより小さくなる可能性を示した。

4. まとめ

各衝突実験より、得られた成果について以下に示す。

- 1) 擁壁挙動は、擁壁全体が剛体運動する。しかし、重錘衝突速度を漸増していくと衝突点を中心とした局所的な変形が生ずる。
- 2) 擁壁の最大回転角は、重錘衝突エネルギーの増加に対して増加する。また、等価エネルギーでは重錘質量が大きいほど大きい。
- 3) 防護柵では、設計可能吸収エネルギーの約1/2程度

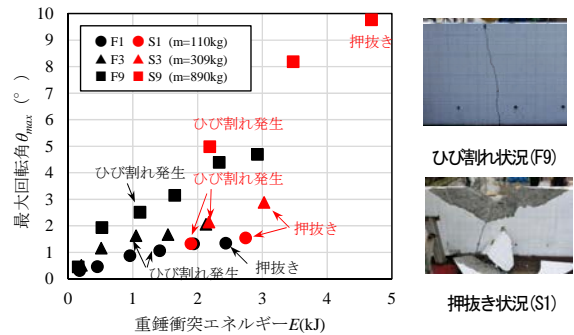


図-3 最大回転角と重錘衝突エネルギーの関係



図-4 防護柵の実規模および部材実験の様子

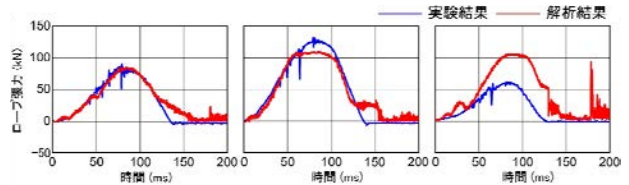


図-5 実規模実験の実験結果と解析結果の一例

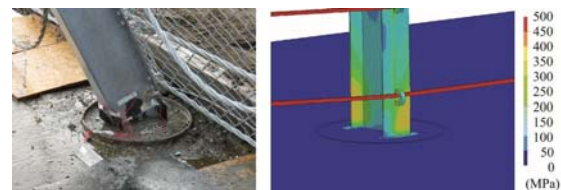


図-6 防護柵の支柱基部の損傷

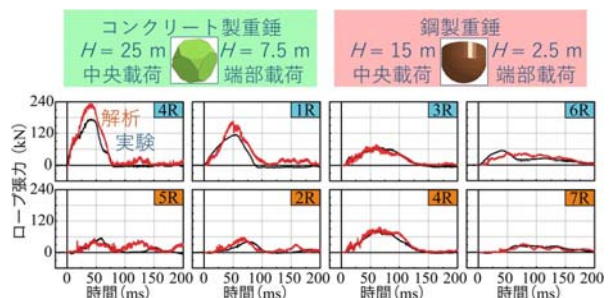


図-7 部材実験の実験結果と解析結果の一例

が下方に作用した場合、中間支柱基部には降伏応力を超える応力が発生することを確認した。

- 4) 間隔保持材によって落石のすり抜けをある程度抑制可能であるが、重錘が小さい場合は金網の可能吸収エネルギーは設計値よりも小さくなる可能性がある。

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：藤野健一，梶田洋規，橋本 毅
田中洋一，山田 充，山内元貴
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150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、29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150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を行うものである。

29年度は、昨年度に引き続き災害対応を担当した発注者、施工者等に対しアンケートを実施し、災害現場にて無人化施工を運用する際に発生した課題点を収集・整理を行った。そして2ヵ年の整理結果から、無人化施工運用に重要なキーワードについて考察した。さらに昨年度抽出した要素技術を用いた遠隔操作システムの構築を行い、検証実験を行った。

2. 無人化施工運用時課題点の収集・整理

2.1 収集方法

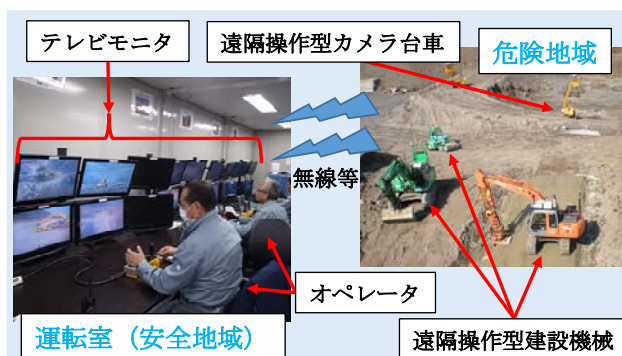


図-1 無人化施工イメージ

アンケートは、熊本地震、九州豪雨災害などにおいて、「無人化施工」を発注・運用した発注者、技術者を対象に実施した。

2.2 収集結果・分類

アンケートの結果、28件の課題点を収集できた。それら課題点を、内容から①機械の多様性に関する課題、②人員確保に関する課題、③作業環境に関する課題、④施工効率に関する課題、⑤無線に関する課題、⑥輸送に関する課題、⑦その他に関する課題、に分類した。その結果を図-2に示す。

図-2によると、①機械の多様性に関する課題が最も多く、続いて②人員確保に関する課題が多い、さらに③作業環境に関する課題と④施工効率に関する課題が同率で続き、⑤無線に関する課題、⑥輸送に関する課題、の順番となっている。分類されたそれぞれの代表的な課題点を以下に示す。

① 機械の多様性に関する課題

- ・ 巨石や流木の除去、土のう設置作業等が多く、ブレイカやグラップルなどに対応した遠隔操作ショベルが必要
- ・ 遠隔操作ショベル2台での除去作業では効率が悪く、遠隔クローラダンプが必要

② 人員確保に関する課題

- ・ 無人化施工現場経験がある人員の確保が難しい。昼夜兼行、休日無の現場が多いためさらに困難
- ・ 無人化施工には効率的な施工計画が必要であり、無人化施工全体のマネジメントする者が必要となる

③ 作業環境に関する課題

- ・ 操作室がないため搭乗運転と比較して、オペレータ

の作業環境が悪い

- ・ 室外ではディスプレイが見えない為、せめてテント等の操作環境が必要

④ 施工効率に関する課題

- ・ 搭乗作業に比べて作業効率が低下する

⑤ 無線に関する課題

- ・ 遠隔操作ショベル、他業者が設置した監視カメラ、センサ類、ドローン等の無線周波数が不明で混信

⑥ 輸送に関する課題

- ・ 大規模災害でない場合、特車の申請に時間が掛かる

⑦ その他に関する課題

- ・ 災害直後に、道路啓開や河道の確保など早急な対応が求められる場合の出動が増えてきている

2.3 まとめ

昨年度と今年度にて整理した課題点の内容から、無人化施工を災害現場で迅速・円滑に運用するために重要なキーワードがいくつか抽出できる。制度などにかかわるものと、機器に関わるものに分けると以下ようになる。

① 制度などに関わるキーワード

- ・ 指揮命令のルール
- ・ 迅速な通行許可申請
- ・ 燃料調達や補修のしくみ
- ・ 無線使用のルール
- ・ 人材育成

② 機器に関わるキーワード

- ・ 様々な種類や大きさの機械（大きさや機種が多様性）
- ・ 輸送が容易な機械、機器
- ・ 容易に設置でき、屋外でも見やすい画像装置
- ・ 施工効率を向上させる工夫

昨年度の課題整理結果から、次章に示すように無人化施工を災害現場で迅速・円滑に運用するために必要な要素技術を抽出したが、本年度の結果も踏まえた上記キーワードからも、この要素技術の必要性が再確認できる。

3. 要素技術を用いた遠隔操作システムによる検証実験

昨年度の課題整理より、無人化施工を迅速に運用するために必要であり、本研究で研究する要素技術として次の3点を抽出した。

- ① 輸送が容易な遠隔操作型小型油圧ショベル
- ② 持ち運びが容易であり、屋外でも見やすい頭部装着型ディスプレイ（以下HMD）
- ③ カメラ台車が不要となり準備時間が短縮できる有線給電UAV

本年度は、上記要素技術を用いた遠隔操作システムの

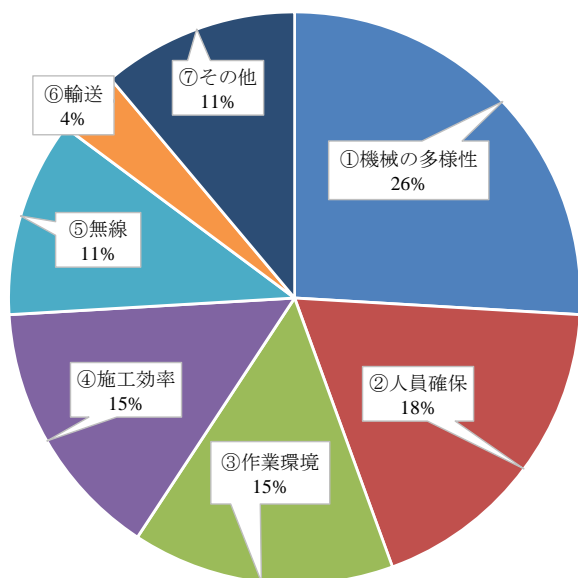


図-2 課題点分類結果

構築を行い、概往研究³⁾と同様の検証実験を行った。実験は概往研究³⁾にて提案された「モデルタスクⅡ」を表-1に示すオペレータ10名にてそれぞれ7回ずつ行い、「モデルタスクⅡ」を完了するまでの時間（以下サイクルタイム）を測定し平均することにより検証を行った。次節よりその結果について述べる。

3.1 遠隔操作型小型油圧ショベル

大型の油圧ショベルに比べ、輸送が容易な小型油圧ショベル（遠隔操作型）を昨年度購入した（図-3、表-2）。この遠隔操作型油圧ショベルを用いて、搭乗操作と遠隔

表-1 オペレータ

	年齢	経験年数
A	34	10
B	37	19
C	41	20
D	35	6
E	33	15
F	60	33
G	38	8
H	37	10
I	49	20
J	42	19

表-2 遠隔操作型小型油圧ショベル仕様

幅	1.74m
高さ	2.48m
長さ	4.64m
機械質量	3.5ton



図-3 遠隔操作型小型油圧ショベル

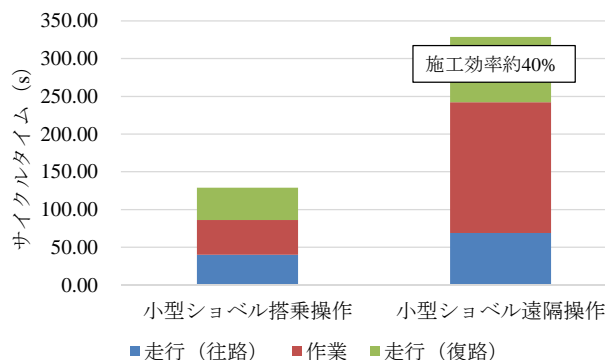


図-4 小型ショベル搭乗・遠隔比較実験結果

操作を行った結果を図-4に示す。図-4によると、搭乗操作に対する遠隔操作の施工効率は約40%程度となっていることがわかる。同様の実験を12tonクラス油圧ショベルにて行った先行研究⁴⁾によると、12tonクラスショベルの場合は搭乗操作に対する遠隔操作の施工効率は約45%程度であり、小型油圧ショベルは12tonクラスショベルに比べ遠隔操作時の施工効率が若干低いことがわかる。これは、小型油圧ショベルと12tonクラスショベルとの、操作レバー設定、油圧バルブ設定、最高速度設定などの相異が起因していると考えられるが、今回の実験のみでは明確に原因を特定できない。今後さらに検討を行いたい。

3.2 HMD

持ち運びが容易であり、屋外でも見やすい画像表示装置としてHMDを利用し、従来の遠隔操作画像提示状況（図-5）をHMD内に再現したシステムの構築をおこなった（図-6）。本システムと従来の表示装置を使用して遠隔操作を行った結果を図-7に示す。図-7によると、HMDを使用した場合、従来の画像表示システムを使用した場合に比べ、サイクルタイムが10%程度短縮していることがわかる。したがって、HMDは可搬性や準備時間短縮に効果あるだけでなく、施工効率にも効果があると考えられる。

3.3 有線給電 UAV

カメラ台車が不要となり準備時間が短縮できる映像取得システムとして、有線給電 UAV を利用した機体周辺映像取得システムの構築をおこなった（図-8、9）。本システムと従来の表示装置を使用して遠隔操作を行った結果を図-10に示す。図-10によると、有線給電 UAV を使用した場合、従来の画像表示システムを使用した場合に比べ、サイクルタイムが5%程度短縮していることがわかる。したがって、有線給電 UAV は準備時間短縮に効果あるだけでなく、施工効率にも効果があると考えられる。

4. 達成目標に対する到達度と次年度以降の計画

本研究は、最終的な達成目標として次の3点を挙げている。

- 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

①の達成目標に対し、本年度までの研究成果により、災害現場にて無人化施工を運用する際に発生した課題点の収集・整理を行い、無人化施工運用に重要なキーワー

ドについて考察することができた。今後これらキーワードへの対策等の検討を進めていきたい。

また②の達成目標に対し、本年度までの研究成果により、迅速・安全・生産性向上に資する新たな遠隔操作システムの構築を行い、検証実験を開始した。その結果、HMDや有線給電UAVは、準備時間短縮のみでなく施工効率にも効果があると考えられることがわかった。今後は、現状様々な企業や大学などで開発されている遠隔操作作用システムの現状調査を行うとともに、それら技術の検証実験も行っていきたい。

上記研究を進めていくところにより、最終的には③の達成目標である復旧活動のための技術マニュアルの提案につなげていきたい。

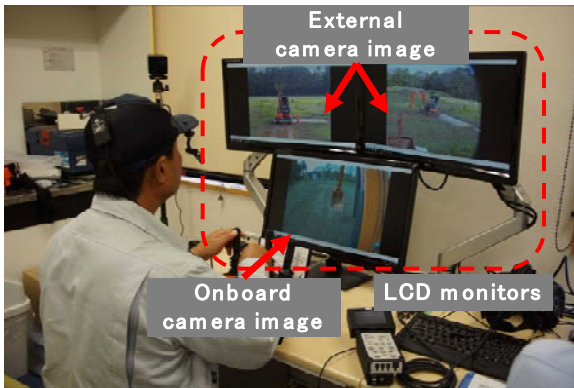


図-5 従来の遠隔操作システム

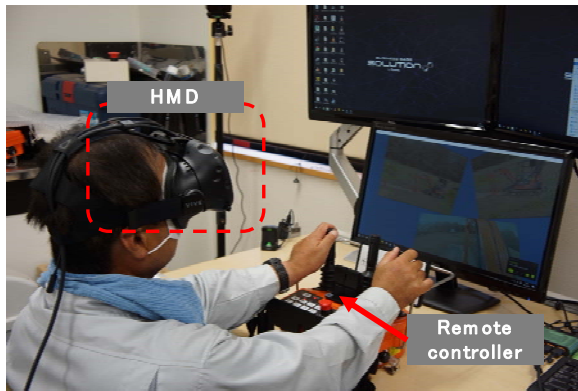


図-6 HMDを利用した遠隔操作システム

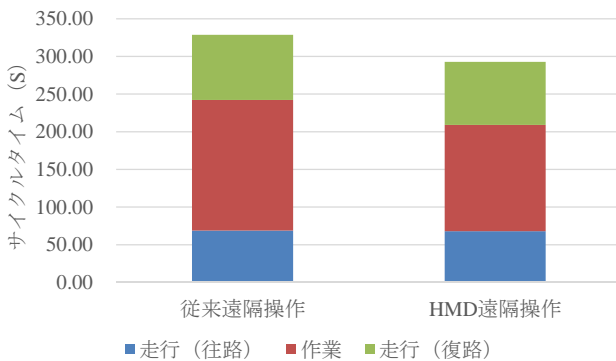


図-7 従来・HMD比較実験結果

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，pp.45-53，2013.
- 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) 橋本毅，梶田洋規，藤野健一，茂木正晴，油田信一：油圧ショベル遠隔操作における施工効率について，建設機械，Vol.53，No.6，pp.53-58，2017.



図-8 有線給電UAV



図-9 有線給電UAVを利用した遠隔操作システム

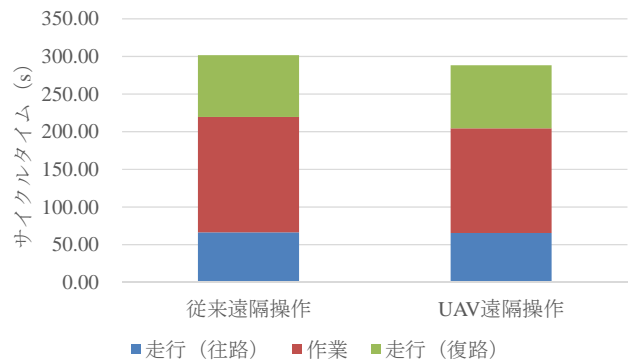


図-10 従来・UAV比較実験結果