

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 富田 陽子
 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

土砂災害対策は一定の確率規模の降雨を想定した計画等に基づき実施されているが、近年は確率規模を上回る降雨が生じている。また、火山噴火、大規模地震、局所的大雨及び急激な融雪といった突発的な自然現象に伴う土砂災害により、緊急対応が求められる事例が増加している。特に、災害時の初期対応をより迅速・効果的に行うとともに、被害を最小化する対策技術が求められている。

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、被害範囲等の早期推定、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、令和元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土砂移動の監視技術の開発

阿蘇山 2016 年噴火を対象に、人工衛星に搭載された合成開口レーダによる噴火前後の 2 時期、及びさらに噴火前の 1 画像追加した 3 時期の撮影画像で、コヒーレンス解析による降灰範囲の推定を試みた。双方とも光学衛星による降灰範囲や現地調査による数 cm 以上の降灰範囲を、地表面の変化範囲として推定できた。さらに、3 時期画像によるコヒーレンス解析は、噴火前の地表面の変化による影響を低減できることが示された。

②道路のり面・斜面の点検・管理技術の開発

ゲリラ豪雨によって発生する土石流化する崩壊に対応するためには、土石流化する崩壊土砂の崩壊時の到達地点を効率よく求めることが必要である。土石流化した崩壊土砂の到達範囲を推定するための基礎資料を作成するため、平成 30 年 7 月豪雨によって発生した広島県呉地域と愛媛県宇和島地域を対象として、現地調査及び崩壊地判読を行った。その結果、広島県呉地域では 2 タイプの崩壊土砂流下形態があること、愛媛県宇和島地域でも 2 タイプの崩壊形態が存在することが分かった。

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た、融雪期における道路盛土点検の新たな点検マニュアル（素案）を取りまとめた。その後、北海道の国道管理者の了承を得て、国道点検業務を担うコンサルタントの管理技術者に対し、利用説明会を開催した。

(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

噴火後に発生する土石流に対する迅速な避難のため、XRAIN 等流域内の降雨分布データを活用した土石流流出解析モデルを開発し、氾濫範囲の予測精度の向上を図る。令和元年度は、降雨から土石流の発生・流下までの物理過程をモデル化し、XRAIN を用いて、任意の地点における土石流の流量の推定が可能な、分布型土石流流出解析モデルを開発した。また、開発したモデルを桜島有村川流域に適用し、浸透能の相違が土石流の流出へ及ぼす影響の検討を行った。その結果、降灰がある場合の土石流の流量の増加の時期は降灰がない場合よりも早く、最大流量は降灰がない場合よりも大きくなることが示された。

また、発災直後から地すべり災害の全体像を3次元的に把握することにより、効果的かつ効率的な応急対策の実施に資することを目的として、「地すべり災害対応のCIMモデル」の作成手法について検討した。「地すべり災害対応のCIMモデル」を活用することにより、従来の2次元図面を用いるよりも地すべり災害の全体像が正確・迅速に把握可能となり、避難範囲・応急対策検討、情報伝達等の災害対応の迅速性及び正確性等の向上に貢献するものと考えられる。

②道路通行安全性確保技術

a) ゲリラ豪雨

ゲリラ豪雨による道路防災や斜面防災を考える上で、雨量情報と崩壊の関係を整理や分析することが重要である。この関係の整理や分析に用いる雨量情報は、分解能が高く、なるべく崩壊地に近い点である事が望ましい。これらの条件をある程度満たし、手軽に入手できる雨量情報として、国土交通省が無償で公開している XRAIN リアルタイム雨量情報システムの 250m メッシュデータ（以下、「XRAIN データ」と呼ぶ）がある。しかし、XRAIN データは生データのため、当該データから通行規制等に利用される各種通行規制基準雨量などを作成するには、個別に計算をする必要があった。このような背景から、XRAIN データから各種通行規制基準雨量（時間雨量、連続雨量、土壌雨量指数、48 時間雨量）を作成するプログラムを開発した。

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がされているが、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、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とした検討も行っている。

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。平成 30 年度は、降雨状況の面的把握を目的としたレーダーアメダス解析雨量の適用性の検討を行い、解析雨量の面的な平均化により実降雨に対して場所により大小が生じる課題を確認した。令和元年度は、土壌雨量指数の適用性に関する検討を行い、一部の災害においては先行降雨の影響が加味されることで、災害捕捉性が向上することを確認した。

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、同時に連成解析による変状分析を行い、比較検討して安定性を評価する研究を行っている。これまでに、融雪水が原因で変状が生じた道路盛土に対して地下水水位計や間隙水圧計等を設置し、融雪期間における盛土の動態観測を 2 ヶ年間調査した。その融雪期間の盛土内最大地下水水位に達したときの盛土の現地状況と解析結果を比較した結果、概ね一致した。さらに、過去の変状を解析で

再現した結果、大きな変状が得られ、これも概ね一致した。その際に累積換算雨量を指標として比較検討し、関係性を求めた。

また、融雪期に発生する斜面崩壊による被災を回避するために、融雪を考慮した事前通行規制基準の開発を目標とし、現状で入手が容易な気温等の気象情報のみから融雪水量を簡便に推定する手法として改良 Degree-Hour 法を考案し、その現地検証として、過去に融雪による崩壊が発生した地区内の複数地点で5年に亘り融雪状況を調査してきた。R1年度は、調査データを基に発災地点の過去の融雪水量を推定し、降雨との合算水量指標の試算から、事前通行規制の基準値の検討を行った。その結果、降雨をリセット条件とした降雨と融雪の連続合算水量を指標とすることで、崩壊発生時のみで通行規制となる基準値案を試算することができた。

c) 岩盤崩壊

岩盤斜面の形状や亀裂情報等から、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。令和元年度は、UAV 撮影した岩盤斜面写真から SfM 技術により構築した三次元地形モデルを基礎に、露頭における開口亀裂の走向・傾斜調査や、空中写真によるリニアメント解析から、開口亀裂面の交差状況を立体的に再現した。その上で、開口亀裂に囲まれて地山から縁切られた明瞭な崩壊岩体だけではなく、近傍の崩壊跡等から崩壊に繋がると想定される面構造と開口亀裂との組み合わせによる潜在的な崩壊岩体をモデル化する手法を提案し、漏れなく抽出できるようになった。

(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ことを目的としている。落石防護擁壁に関しては、実規模擁壁模型を用いた重錘衝突による擁壁の損傷に着目した実験と設計手法との比較を実施し、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阻止面を再現した部材実験と数値解析を実施し、その保有性能を把握した。

②ロボット技術開発

大規模自然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、自然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。令和元年度は、アラウンドビューシステムの活用を提案し、適用性について検証実験を行った。続いて無人化施工に長けたオペレータ選定手法の検討を行い、直接目視遠隔操作が選別手法となる可能性があることを明らかにした。また、無人化施工の施工効率低下原因を検証し、施工効率低下の最も大きい原因は視覚情報である可能性を明らかにした。

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR PREVENTION AND MITIGATION OF SEDIMENT-RELATED DISASTERS INDUCED BY UNFORESEEN NATURAL PHENOMENA

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Erosion and Sediment Control Research Group
TOMITA Yoko

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 : Countermeasures against sediment-related disasters are generally designed based on the recurrence interval of rainfall events. However, the frequency and intensity of some recent extreme rainfall events exceeded the current planning criteria. Moreover, sediment-related disasters induced by unforeseen natural phenomena, such as volcanic eruption, catastrophic earthquakes, torrential rainfall, and rapid snowmelt have newly emerged as critical issues. Therefore, we aim to provide novel technologies for the prevention and mitigation of those disasters, by achieving the following respective targets:

- 1) Development of innovative monitoring and management systems of slope failures following unforeseen natural phenomena;
- 2) Development of innovative hazard risk assessment and traffic regulation guidelines following unforeseen natural phenomena;
- 3) Development of innovative structural design for rockfall protection fences and unmanned construction technologies following unforeseen natural phenomena.

Keywords : Sediment-related disasters, Slope failure, Hazard risk assessment, Unmanned construction

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）
研究担当者：石井靖雄，林真一郎

【要旨】

阿蘇山 2016 年噴火を対象に，人工衛星に搭載された合成開口レーダによる噴火前後の 2 時期，及びさらに噴火前の 1 画像追加した 3 時期の撮影画像で，コヒーレンス解析による降灰範囲の推定を試みた。双方とも光学衛星による降灰範囲や現地調査による数 cm 以上の降灰範囲を，地表面の変化範囲として推定できた。さらに，3 時期画像によるコヒーレンス解析は，噴火前の地表面の変化による影響を低減できることが示された。

キーワード：阿蘇山 2016 年噴火，合成開口レーダ，衛星画像解析，降灰範囲，降灰厚

1. はじめに

火山噴火時に噴出される火山灰等は重量に応じて落下し火口付近でより厚く堆積する。火山灰等で斜面が覆われると噴火以前よりも小さな降雨で土石流が発生する可能性がある。そのため，噴火後には，降灰範囲と降灰厚を迅速に得て，土石流発生の危険性の高い流域を明らかにして，住民の避難につなげることが重要となる。

噴煙により上空からの目視等が困難な場合や地上調査のために火山山麓に立ち入れない場合，降灰範囲や降灰厚が把握できない。その場合でも，人工衛星に搭載された高分解能合成開口レーダ（以下，SAR という。）は，宇宙から噴煙を通過可能なレーダであるため，広域の降灰状況を観測できる場合がある。

そこで，SAR で撮影された画像（以下，SAR 画像という。）を用いたコヒーレンス解析により降灰範囲・降灰厚の推定を試みた。本稿は筆者らの既発表¹⁾の図を修正した上で再掲しさらに結果にさらなる考察を加えたものである。

2. 方法

2016 年 10 月 8 日の阿蘇山噴火による降灰を調査対象とした。現地調査により得た降灰厚分布と噴火直後 2016 年 10 月 10 日に光学衛星 SPOT6 による可視画像及び双方から推定した降灰範囲（以下，明瞭な降灰等の堆積範囲¹⁾という。）をそれぞれ図 - 1 と 2 に示す。これを検証データとして降灰範囲・降灰厚を得るために，異なる 2 時期と 3 時期に撮影された SAR 画像のコヒーレンス解析を実施した。噴火前後の 2

時期のコヒーレンス解析は，地表面の変化による相関値（以下，コヒーレンス値，という。）の小さい範囲を抽出する手法である。3 時期のコヒーレンス解析は，噴火前の 2 時期と，噴火前後の 2 時期のコヒーレンス値の差をとって，噴火前の地表面変化（落葉樹の季節変化など）を除去し，噴火前後の降灰による変化範囲を抽出する手法である。

解析に使用した SAR 画像を表 - 1 に示す。衛星軌道などが同じで，撮影時期の異なる 2 枚あるいは 3 枚の画像を画像セット A，B として設定した。各画像セットのコヒーレンス値は現地の実測降灰厚と比較した¹⁾。

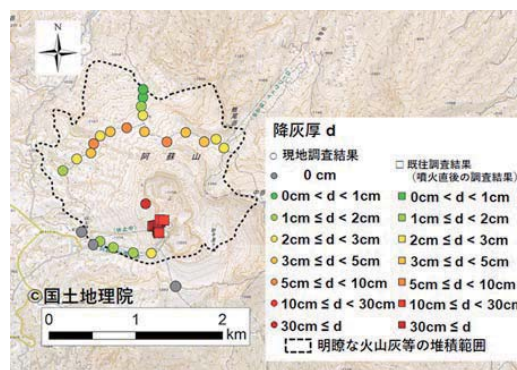


図 - 1 現地調査結果と空中写真による降灰範囲

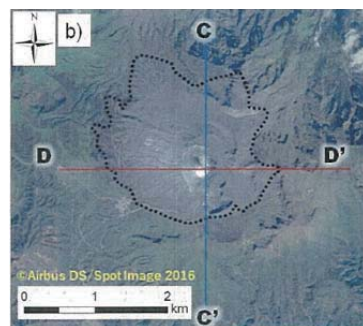


図 - 2 SPOT6 による可視画像

表 - 1 解析に用いた SAR 画像の撮影時期など

名称	2時期解析の SAR画像	3時期解析の追加画像	撮影時期	衛星軌道と観測角度
A	2016/10/3	2016/9/19	噴火前	南行 32.4°
	2016/10/17		噴火後	
B	2016/6/16	2016/2/25	噴火前	北行 32.4°
	2016/10/20		噴火後	

3. 結果と考察

噴火前後の2時期画像セット A, Bによるコヒーレンス解析の結果をそれぞれ図-3と図-4に示す。表-1に示すように、図-3はともに10月に撮影された2時期画像を、図-4は6月と10月の2時期画像を用いた。コヒーレンス値が小さい範囲は地表面が変化した範囲と考えられる。この2ケースの解析では現地調査による降灰厚1 cm以上の範囲がコヒーレンス値 γ 0.6~0.7以下の範囲と対応する¹⁾。図-3では全ての範囲が明瞭な降灰等の堆積範囲に内包される。しかし、図-4では南側では γ が低い範囲が明瞭な降灰等の堆積範囲よりも広い範囲に分布する。この理由は火山灰堆積以外に原因があると考えられる。

次に、表-1に示す2時期解析の画像ペアに噴火前の1画像を追加した3時期のコヒーレンス解析によるコヒーレンス差を図-5と図-6に示す。現地調査における降灰厚との対比からコヒーレンス差が0.0~0.2以上の範囲は降灰厚2 cm以上と対応する¹⁾。その範囲(黄・褐色)は、

2 時期の解析と大きな違いは見られないが、図-4の南側における明瞭な降灰等の堆積範囲を超える結果とならなかった。表-1を見ると、画像セット Bでは、噴火前の撮影時期が6月と2月で、噴火後は10月である。3 時期解析では植生の季節変動などの降灰以外の表面変化の影響を低減できたと解釈される。

以上の結果より、2時期と3時期の SAR 画像のコヒーレンス解析から数 cm 以上の降灰厚範囲が推定できた。さらに3時期画像によるコヒーレンス解析は、噴火前の地表面の変化による影響を低減できることが示された。

謝 辞

ALOS-2/PALSAR-2をから提供された(国研)宇宙航空研究開発機構、解析等に対し国土交通省九州地方整備局九州技術事務所九州防災・火山技術センター、図の転載を許諾された(公社)砂防学会に謝意を表す。

参考文献

- 1) 水野正樹, 堤宏徳, 岡崎敏, 柴山卓史, 平田育士, 本田健, 杉本惇, 林真一郎: 降灰厚と複数時期 SAR 画像間のコヒーレンス低下の関係に基づく降灰範囲抽出手法と適用性, 砂防学会誌, Vol.72, No.6, p.18-28, 2020

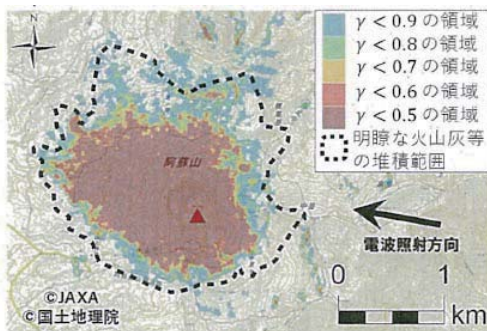


図-3 2時期画像セット Aによるコヒーレンス値¹⁾

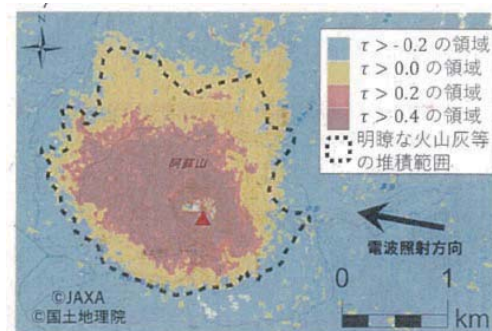


図-5 3時期画像セット Aによるコヒーレンス差¹⁾

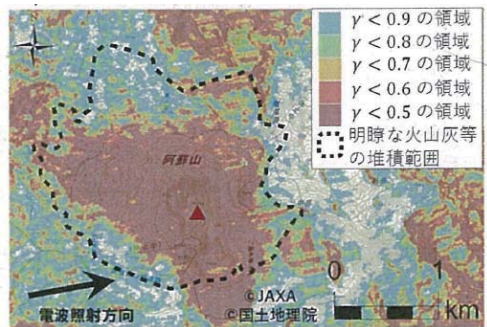


図-4 2時期画像セット Bによるコヒーレンス値¹⁾

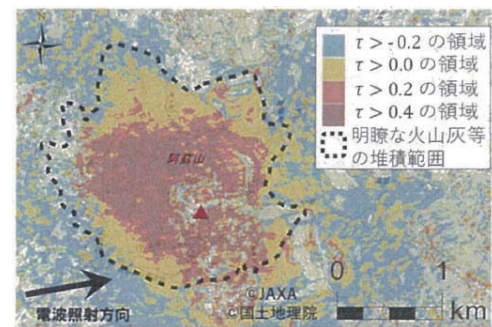


図-6 3時期画像セット Bによるコヒーレンス差¹⁾

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（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、梶山敦司

【要旨】

ゲリラ豪雨によって発生する土石流化する崩壊に対する対応を行うためには、土石流化する崩壊土砂の崩壊時の到達地点を効率よく求めることが必要である。土石流化する崩壊を対象とした、崩壊土砂の到達範囲を推定するための基礎資料を作成するため、平成 30 年 7 月豪雨によって発生した広島県呉地域と愛媛県宇和島地域を対象として、現地調査及び崩壊地判読を行った。その結果、広島県呉地域では 2 タイプの崩壊土砂流下形態があること、愛媛県宇和島地域でも 2 タイプの崩壊形態が存在することが分かった。

キーワード：降雨、斜面、崩壊、土石流

1. はじめに

近年、短期集中型の豪雨が毎年発生し、甚大な被害をもたらしており、豪雨による災害傾向として、表層崩壊の発生が原因となる災害事例が多いことが挙げられる。平成 30 年 7 月豪雨では、0 次谷で発生した表層崩壊が土石流化したり、遷急線より下方の斜面で表層崩壊や落石が発生したりし、斜面下方の交通インフラが被災した事例が多くみられた。そのため、道路防災対策を行う際にこれまで考慮されてこなかった道路管理用地区域外の斜面において発生する崩壊についても今後検討を行っていく必要があり、このような災害を軽減するためには、崩壊土砂の到達距離を整理する必要がある。

令和元年度は、崩壊土砂の到達範囲予想を目的とした基礎資料を作成するために、現地調査による崩壊特性の整理を行い、崩壊地判読を実施した。本報告では、その一環として実施した平成 30 年 7 月豪雨によって発生した広島県呉地域と愛媛県宇和島地域の現地調査及び崩壊地判読結果について示す。

2. 研究方法

本研究では、道路への影響を評価する各種基礎資料を作成するために、対象地域の選定、崩壊地判読、現地調査を実施した。以下に、その方法を示す。

2.1 対象地の選定

令和元年度は、崩壊地の特性の整理を行ったが、引き続き 2.2 で示す崩壊地判読結果をもとに、土量の到達範囲などを整理する必要がある。そのため、「崩壊土砂が流下する地形とするため崩壊前の LP 図」、「崩壊地範囲を判読するため崩壊後の LP 図」、「崩壊地範囲の判読と崩壊土砂の到達地点の判読をするために崩壊後のオルソ画像」がある箇所を対象地として選定した。

2.2 現地調査

崩壊地の地質特性や崩壊地の崩壊特性を確認するために、現地調査を行った。その上で、崩壊特性によってタイプ分けが必要な場合は、タイプ分けを行った。

2.3 崩壊地判読

崩壊後の LP 図をもとに崩壊地判読を実施した。判読時は、崩壊後のオルソ画像も活用した。なお、対象の豪雨によって発生した崩壊の判断には、オルソ画像を用いて植生の回復状況によって、対象豪雨によって発生した崩壊と以前の崩壊に区分した。

3. 研究結果

3.1 研究対象地域の選定

本研究では対象とする豪雨を平成 30 年 7 月豪雨とし、当該豪雨によって表層崩壊が多発した地域を選定した。なお、崩壊前の LP 図、崩壊後の LP 図、崩壊後のオルソ画像が存在する地域は、広島県呉地域と愛媛県宇和島地域の 2 地区であり、2 地区を研究対象とした。

3.2 現地調査

(1) 広島県呉地区

当該地域は主に中生代の広島花崗岩類及び高田流紋岩類が露出する。現地調査は崩壊が多発した広島花崗岩類分

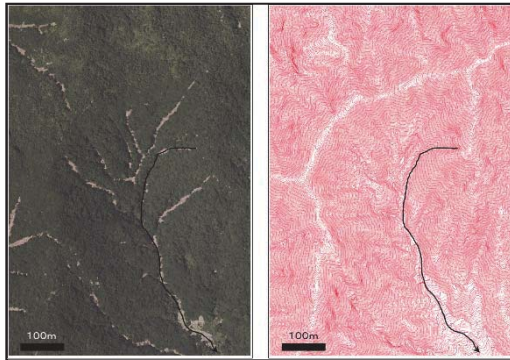


図-1 溪床堆積土砂流動タイプ
(左：空中写真，右：地形図)

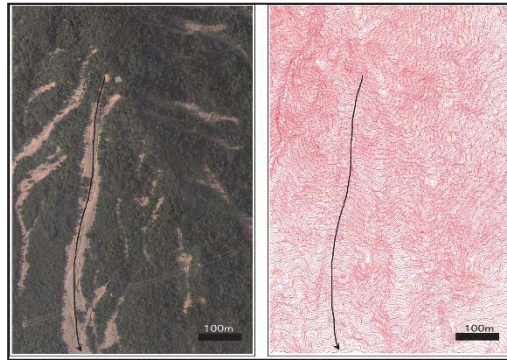


図-2 山腹崩壊土砂流動タイプ
(左：空中写真，右：地形図)

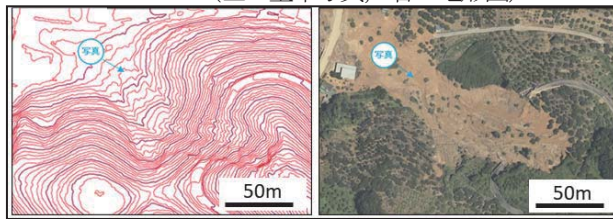


図-3 表層崩壊タイプ
(左：地形図，右：空中写真)

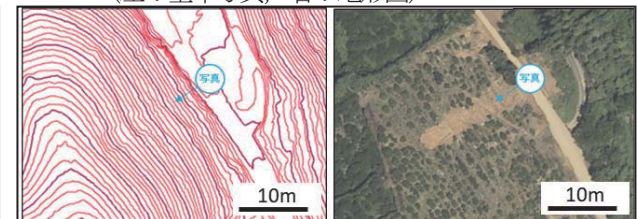


図-4 表層土砂流出タイプ
(左：地形図，右：空中写真)

布地域と高田流紋岩類分布地域で行った。その結果、崩壊には2つのタイプが存在することが分かった。

溪床堆積土砂流動タイプ：表層崩壊が溪流に一度トラップされた土砂あるいはもともと溪床に堆積していた土砂が流動化し土石流化したもの（図-1）

山腹崩壊土砂流動タイプ：表層崩壊した崩壊土砂が山腹を流下中に土石流化したもの（図-2）

なお、「溪床堆積土砂流動タイプ」と比較して「山腹崩壊土砂流動タイプ」は崩壊源頭部の風化が進行していることが分かった。

(2) 愛媛県宇和島地区

当該地域には主に中生代の堆積岩である四万十層群が露出する。現地調査を行った結果、崩壊には2つのタイプが存在することが分かった。

表層崩壊タイプ：一般的に言われる表層崩壊（図-3）

表層土砂流出タイプ：30～50cm程度の表層部の土砂が流出したもの（図-4）

なお、「表層土砂流出タイプ」の発生場の特徴として、主にミカン畑等の果樹園利用されているような比較的裸地の範囲が多い地域に見られることが分かった。

3.3 崩壊地判読

(1) 広島県呉地区

広島県呉地区では地形図のみを用いて崩壊地判読を行った。その上で、平成30年7月の豪雨で発生したか確認するために、オルソ画像を用いて旧崩壊地と新崩壊地の2つに区分した。その結果、平成30年7月の豪雨によって、約1,500箇所の崩壊が認められた。

(2) 愛媛県宇和島地区

愛媛県宇和島地区では現地調査結果を踏まえ、崩壊地判読を行う際に、「表層崩壊タイプ：Aタイプ」は地形図のみを用いて判読を行い、「表層土砂流出タイプ：Bタイプ」は地形図の等高線の乱れとオルソ画像による裸地を合わせて判読することで崩壊地を判読した。その結果、「Aタイプ」を約400箇所、「Bタイプ」を約1,500か所、計約1,900箇所の崩壊が認められた。

4. まとめ

令和元年度の研究では、以下のことが分かった。

- ・広島県呉地区では、「溪床堆積土砂流動タイプ」、「山腹崩壊土砂流動タイプ」の少なくとも2タイプの崩壊土砂流下形態があること
- ・愛媛県宇和島地区では、「表層崩壊タイプ」、「表層土砂流出タイプ」の2タイプの崩壊形態があること

今後、抽出した崩壊地について崩壊土砂到達範囲の抽出を行っていく。また、崩壊土砂流下形態の違いと崩壊形態の違いを踏まえた上で、各種条件の整理・解析を行い、崩壊しやすい斜面条件の抽出、崩壊到達範囲に影響を与える条件の抽出を行っていく予定である。また、それらの結果を組み合わせることによって、道路へ影響を及ぼす可能性の高い斜面を効率的に抽出する方法を整理することを最終目標として研究を進める予定である。なお、本研究を行うにあたり、国土地理院には崩壊前のLPデータおよび崩壊後のオルソ画像の提供を受けた。また、林野庁治山課には、崩壊後のLPデータおよびオルソ画像の提供を受けた。

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 (3) (融雪期盛土のり面分野)

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た、道路盛土点検の視点から融雪期における新たな点検マニュアル(素案)を取りまとめた。その後、北海道の国道管理者の了承を得て、国道点検業務を担うコンサルタントの管理技術者に対し、利用説明会を開催した。

キーワード:融雪水、道路盛土変状、道路盛土点検マニュアル(素案)

1. はじめに

図-1に示す平成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らかにすることで、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。

令和元年度は、「北海道の国道における融雪期の道路点検マニュアル(素案)」として取りまとめ、北海道の国道管理者に説明、了承を得、国道点検業務を担う各コンサルタントの管理技術者に対し、利用説明会を開催した。このことは、新たな維持管理手法として寄与できる。

2. 注意すべき融雪影響領域の抽出手法

過去の融雪期の変状傾向を踏まえ、注視すべき道路盛土の抽出手順について図-2に示す。ここで示す盛土形状スクリーニング項目は過去の変状事例をほぼ満たす項目である。よって、この項目にほぼ該当する箇所から抽出するこ

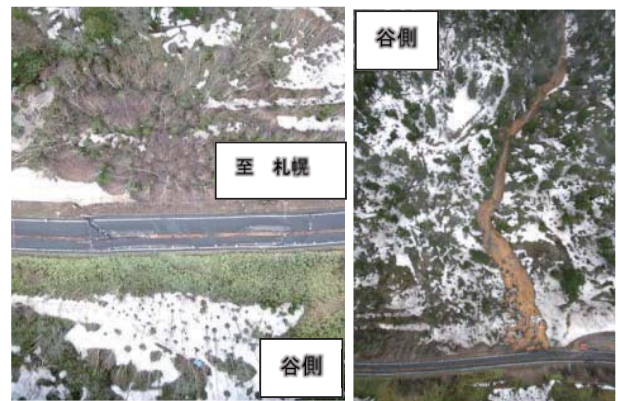


図-1 積雪期における国道230号盛土災害事例

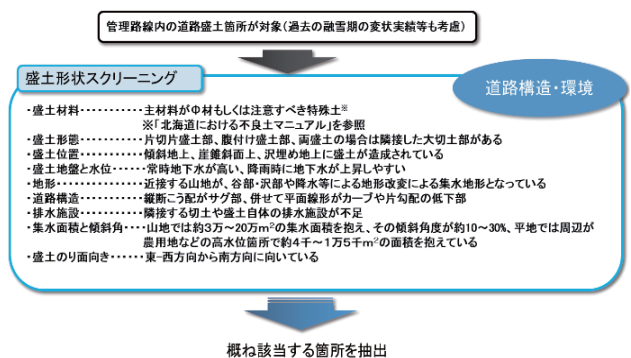


図-2 危険箇所抽出のための盛土形状スクリーニング

ととなるが、その他、変状の規模にかかわらず、事前に経験している融雪水の影響を受けた変状箇所についても抽出しておくことが望ましい。

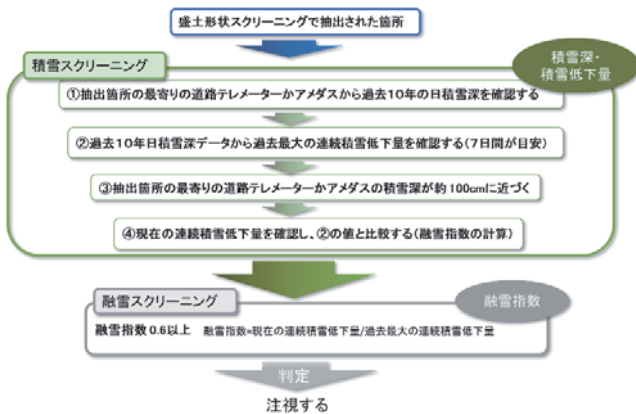


図-3 危険箇所抽出のための融雪スクリーニング

3. 注意すべき融雪影響時期の推定手法

前項の盛土形状スクリーニングで抽出された箇所の融雪状況を確認することとなる。図-3に示すとおり融雪スクリーニングでは、最寄りの道路テレメーターかアメダスの過去10年間の3～6月期における温度、積雪量を1時間単位で抽出する。事前作業として、その数値から過去最大の積雪低下量（単位はcm/〇日間）を求めておく。調査した過去の変状事例では、積雪深が約100cmに近似した後、7日間で約40cm以上の積雪低下量がある場合に変状していた。そして過去最大値に対する実際の積雪低下量の割合（ここでは融雪指数という）に注視し、この指数が0.6以上となると注視が必要となり、体制等の準備をしておくことが肝要である。

4. 「北海道の国道における融雪期の道路点検マニュアル（素案）」の公表

過年度の研究成果を整理し、道路管理者からの了承を得た上で「北海道の国道における融雪期の道路点検マニュアル（素案）」を取りまとめた。写真-1に示す本点検マニュアルの利用説明会では、北海道内の国道の道路点検業務を担うコンサルタントの管理技術者を招き、研究の背景から目的、利用にあたっての注意点等を説明した。参加者からは様々な意見、質問が出て、点検者の道路管理への責任感が伺えたとともに、関心が高いことも感じ取れた。

5. まとめ

点検に必要なことは目的を持って実施することである。過去の変状事例から本点検マニュアルを作成し今回実践することとなるが、図-4に示すとおり、あくまで早期に発見することが大事となる。そのためには過去の変状実績を



写真-1 各点検コンサルタントへの利用説明会風景
(令和2年1月22日 寒地土木研究所講堂で開催)



図-4 本点検マニュアルの概念

取りまとめた本点検マニュアルを活用して欲しい。

今後、本点検マニュアルには、抽出した道路盛土の安定性を評価する解析等を使用した手法についても掲載予定であり、さらに、本説明会を経て、実際の利用実態や意見聴取結果を取り入れ、使いやすい点検票に向けた修正等を行う予定である。そして、次年度には点検コンサルタントの実務者向けの説明会を実施したい。このことは、融雪期の道路盛土点検に関する維持管理の新たな手法として寄与できる。

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, 蛸澤秀則: 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、林真一郎、山崎祐介

【要旨】

本研究は、噴火後に発生する土石流に対する迅速な避難のため、XRAIN 等流域内の降雨分布データを活用した土石流流出解析モデルを開発し、氾濫範囲の予測精度の向上を図る。令和元年度は、降雨から土石流の発生・流下までの物理過程をモデル化し、XRAIN を用いて、任意の地点における土石流の流量の推定が可能な、分布型土石流流出解析モデルを開発した。また、開発したモデルを桜島有村川流域に適用し、浸透能の相違が土石流の流出へ及ぼす影響の検討を行った。その結果、降灰がある場合の土石流の流量の増加の時期は降灰がない場合よりも早く、最大流量は降灰がない場合よりも大きくなることが示された。

キーワード：噴火後の土石流、土石流氾濫予測、降灰、浸透能

1. はじめに

火山噴火後には、噴火前には発生しなかった小規模の降雨でも土石流が発生することがある¹⁾。これは、降灰によって山腹斜面の土壌への雨水の浸透性や保水性が変わると考えられるためである。噴火後に発生する土石流に対して迅速な避難を行うためには、土石流の氾濫範囲を示したハザードマップが有効である。土砂の氾濫範囲を推定するためには、土砂の氾濫開始地点における、土石流の流量の最大値や総流出量を予め設定する必要がある。

本年度は、降雨の時空間分布や、山腹斜面の土壌被覆（以降、表土層という）の厚さ、表土層への雨水の浸透能、表土層の透水性、山腹斜面と溪流の接続や溪流と他の溪流との合流、さらに、溪床に堆積している土砂の取り込みや取り込んだ土砂の堆積を考慮することで、任意地点の土石流の流量を計算できる数値モデルを開発した²⁾。本稿では、開発したモデルとモデルを用いて降灰の有無を想定した浸透能の相違が土石流の流出へ及ぼす影響について検討した結果を報告する。

2. 解析モデル

2.1 概要

本モデルでは、次の現象を扱う。流域に降った雨は、山腹斜面表土層に浸透して浸透流となり溪流へ流下していくが、浸透しなかったものは斜面の表面を浸透流よりも速い表面流となって溪流へ流下していく。その後、溪流を流れる水は他の溪流と合流しながら溪床に堆積した土砂を取り込んだり、また、流れに取り込んだ土砂を溪床に堆積させたりしながら流下していく。本研究で開発した分布型

土石流流出解析モデルは、このようにモデル化された現象の数値解析を行う。このモデルでは、山腹斜面から溪流までの雨水の移動を解析する部分（以降、降雨流出解析という）と、溪流で土砂の取り込みや堆積を伴う土石流や洪水の流下を解析する部分（以降、洪水流・土石流解析という）から構成されている。

2.2 降雨流出解析

降雨流出解析は、設定した地点から上流における複数の山腹斜面と溪流によって構成される地形モデルにおいて行う。火山の噴火によって降灰が発生したときには、山腹斜面の表土層の浸透能を変化させることができるようになっていく。浸透流及び表面流には、それぞれダルシー則及び Manning 則を適用して計算する。

2.3 洪水流・土石流流下解析

洪水流・土石流流下解析は、溪流の合流を考慮して行う。溪流は線分で構成されたネットワークで表現されている。山腹斜面において、降雨流出解析により計算された表面流及び浸透流は、溪流に流入する。溪流には堆積物が設定しており、斜面からの流入によって浸透流が発生する。浸透流水深が増加していくと、堆積物が不安定になり、全層が流動化して土石流となって流下するとしている。洪水流や土石流の流れの計算は、流れの深さと速さの関係式³⁾や土砂の取り込みの式⁴⁾を用いて行っている。

3. 解析モデルの桜島有村川流域へ適用

開発したモデルを、桜島有村川流域（図-1）に適用し、降灰の有無を想定した浸透能の相違が土石流の流出へ及ぼす影響の検討を行った。

3.1 計算に用いたデータと条件

計算に用いる地形データは、2013年10月に計測された航空レーザー測量成果から10m間隔のグリッドセルを作成した。作成した地形データから、集水面積が1,000m²以上となるセルを溪流とした。図-1に計算領域と溪流網を示す。溪流の幅は10m、取り込み可能な土砂の厚さは1mとした。降灰がない場合とある場合を想定して、浸透能および飽和透水係数を既往文献⁵⁾に基づいて、降灰なし： 1.0×10^{-3} cm/s、降灰あり： 1.5×10^{-4} cm/sと設定した。その他の計算に必要な設定値は、既往文献²⁾をもとに、重力加速度 $g = 9.8$ m/s²、砂礫の質量密度 $\sigma = 2.65$ g/cm³、水の質量密度 $\rho_w = 1$ g/cm³、内部摩擦角 $\phi = 37^\circ$ 、溪床堆積物の体積土砂濃度 $c_s = 0.6$ 、運動量補正係数 $\beta = 1$ 、土砂輸送補正係数 $\gamma = 1$ とした。また、微細土砂含有率 $p_f = 0.3$ 及び代表粒径 $d = 0.15$ mとした。

対象とした降雨は2014年8月29日に発生した降雨で、降雨データは国土交通省より提供され、DIASの下で収集・提供されているXRAINデータを用いた。図-1に、計算に10分間隔で与えた2014年8月29日14時から18時までの降雨データの累積値の空間分布を示す。

3.2 浸透能の相違が土石流流下に及ぼす影響

図-2に下流端(図-1)における降灰がない場合とある場合の計算による流量、及び観測された土石流の流量を示す。降灰がない場合は、土石流の流量の急増が観測結果より10分ほど遅く、流量の最大値は観測値の1.5倍程度となった。一方、降灰がある場合は、流量の急増が観測結果より30分ほど早く、流量の最大値は、観測値の5倍程度となった。本検討結果により、降灰がある場合の土石流の流量の増加の時期は、降灰がない場合よりも早く、最大流量は降灰がない場合よりも大きくなることが示された。

4. まとめ

本研究では、降雨から土石流の発生・流下までの物理過程をモデル化し、XRAINなどの降雨の時空間分布を与え、任意の地点における土石流の流量の推定が可能な、分布型土石流流出解析モデルを開発した。また、開発したモデルを桜島有村川流域に適用し、浸透能の相違が土石流の流出へ及ぼす影響の検討を行った結果、降灰

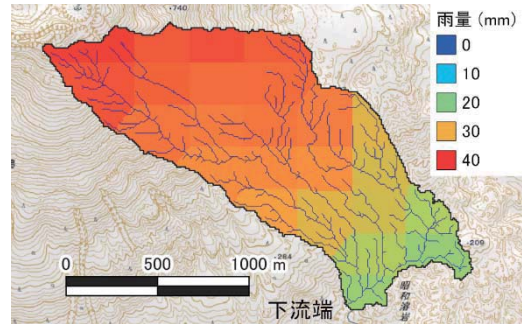


図-1 計算に用いた降雨の累積値の空間分布

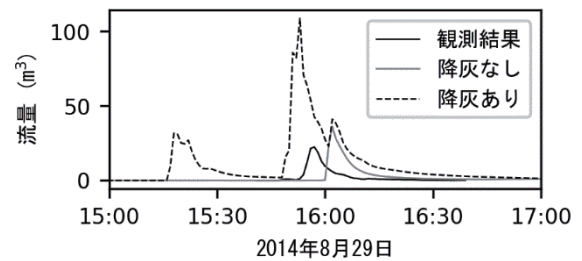


図-2 降灰の有無と土石流流量の相違

がある場合には土石流の流量の増加の時期が早くなり、最大流量が大きくなることが示された。今後は、再現性の向上や条件設定の最適化を行う予定である。

参考文献

- 1) 田村圭司、山越隆雄、松岡暁、安養寺信夫：火山噴火後に土石流が発生した事例、土木技術資料、52巻、3号、p. 34-39、2010
- 2) 山崎祐介、手塚咲子、平岡真合乃、林真一郎、石井靖雄：降雨強度が河道網における土石流の発生・流下に及ぼす影響の数値解析、令和2年度(公社)砂防学会研究発表会学術講演集、2020
- 3) 江頭進治、芦田和男、矢島啓、高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究、京都大学防災研究所年報、32号、B-2、p. 487-501、1989
- 4) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(1)、砂防学会誌、46巻、1号、p. 45-49、1993
- 5) 田方 智、山越隆雄、栗原淳一、笹原克夫、桜庭雅明、高橋秀、小野寺勝：新規細粒火山灰が堆積した流域における分布型流出解析モデルの検討、砂防学会誌、60巻、4号、p.15-24、2007

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：杉本宏之、竹下航

【要旨】

本研究では、発災直後から地すべり災害の全体像を3次元的に把握することにより、効果的かつ効率的な応急対策の実施に資することを目的として、「地すべり災害対応のCIMモデル」の作成手法について検討した。「地すべり災害対応のCIMモデル」を活用することにより、従来の2次元図面を用いるよりも地すべり災害の全体像が正確・迅速に把握可能となり、避難範囲・応急対策検討、情報伝達等の災害対応の迅速性や正確性等の向上に貢献するものと考えられる。

キーワード：地すべり、CIM、災害対応、SfM、カラー点群データ

1. はじめに

地すべり災害の発災直後の対応としては、地すべりの変状範囲と移動方向の確認、移動土塊の挙動の予測、拡大の可能性の検討、影響範囲の推定等が行われ、警戒避難体制の整備や応急対策等が実施されるが、その際に重要なのは斜面地形、変状の発生状況、保全対象の分布状況等の位置関係を3次元的に理解することである。

通常、災害対応を行政機関が実施する際は、紙に印刷された地形図や現地状況を撮影した写真を中心に状況を把握し、情報伝達や対応の検討を行うことが多い。しかし、等高線地図だけでは地すべり斜面や保全対象域の勾配、地すべり斜面と保全対象との高低差等は読み取りにくく、また、現地状況写真の枚数が多くなるほど、それらの位置関係を確認して全体を把握するのは大変な作業となる。しかし、CIMの活用によって地形・地物が3次元的に表示されれば、斜面勾配や保全対象との高低差等の関係が把握しやすくなる。また、3次元形状と現地状況写真を組み合わせることで視覚的に理解しやすいといったメリットが期待できる。そのため、発災直後から3次元地形モデルを活用することで、状況把握及び情報伝達の迅速性や正確性等の向上が期待される。

そこで、本研究では、発災直後から地すべり災害の全体像を3次元的に把握し、効果的かつ効率的な応急対策の実施に資するため、カラー点群データからなる3次元地形モデルを基盤とした「地すべり災害対応のCIMモデル」の作成手法について検討した。

2. 研究方法

まず、地すべり災害が発生した場合の一般的な対応の流れをふまえ、地すべり災害対応に活用可能なCIMの作成方

針について検討を行った。次に、カラー点群データを取得する手法について適用性を検証し、地すべり災害対応のCIMモデルの構成及び作成手法、CIMモデルの活用方法について検討した。

3. 研究結果

3.1 地すべり災害対応のCIMモデルの作成方針

地すべり災害の発生後、応急対策段階において警戒避難対策や応急対策工事等の検討が行われる。その後、復旧・復興段階に移行し、災害復旧事業、災害関連緊急事業等が本格実施される^{1,2)}。発災直後の応急対策段階からCIMの活用が可能であれば、効果的かつ効率的な応急対策の実施に資すると期待されることから、本研究では、発災直後の応急対策の検討に活用するCIMとして、「地すべり災害対応のCIMモデル」を検討することとした。なお、復旧・復興段階におけるCIMの活用については、CIM導入ガイドライン³⁾に沿った精度の高いCIMモデルを用いた対応が可能と考えられる。

地すべり災害対応のCIMモデルに求められる要件として、まず、短時間で作成が可能であることが重要と考え、1日程度で作成できることを目標とした。あくまで地すべり災害の全体像の把握に必要なレベルとし、迅速性を優先する。また、実施できる者が限定されないよう、特殊な技術が不要であることも重要と考えた。

表1 地すべり災害対応のCIMモデル作成方針

目的	<ul style="list-style-type: none"> ・発災直後の地すべり災害の全体像の把握 ・発災直後の警戒避難対策、応急対策工事への活用
要件	<ul style="list-style-type: none"> ・短時間で作成が可能であること ・特殊な技術が不要であること ・精度は概要が把握できるレベルで可

3.2 カラー点群データ取得方法の適用性の検討

カラー点群データを取得する方法としては、SfM解析や

レーザー計測がある。表2に示すとおり、モデルを作成する対象域（全体、部分）に分け、4つのデータ作成方法について実際に地すべり地で計測・解析を行い、適用性の検討を行った。地すべり全体を対象としたモデルの作成においては、UAV 写真撮影と SfM 解析の組み合わせによってカラー点群データを作成する手法が、地すべり全体のデータの取得が可能であり、かつ、迅速性と精度も有している結果となった。変状発生域の部分的なモデルの作成においては、精度が良好なのがレーザースキャナを用いる方法で、迅速性が高いのが地上写真撮影と SfM 解析を用いる手法であるという結果となった。

表2 カラー点群データ計測手法の適用性

	SfM 解析		可搬型レーザースキャナ	
	UAV 写真	地上写真	据え置き型	手持ち型
地すべり全体の概略地形モデル	○迅速 ○精度良い	○迅速 ×全体撮影が難しい	○精度良い ×全体撮影が難しい	○精度良い ×全体撮影が難しい
変状発生域の部分的な詳細地形モデル		○迅速	○精度良い	○精度良い

3.3 地すべり災害対応の CIM モデルの構成・作成手法

カラー点群データの取得方法の適用性の検討結果をふまえ、地すべり災害対応の CIM モデルの構成および作成手法について検討した。

地すべり災害対応の CIM モデルの構成は、迅速性を優先するために、UAV 写真撮影と SfM 解析の組み合わせにより作成する、地すべり災害全体の概略的な精度の地形モデルを基本とし、必要に応じて各種データを組み合わせたものとした。現地踏査において地すべり性の変状が確認された場合、主要な変状発生箇所について詳細な点群データを取得し、地すべり災害全体の概略地形モデルと統合することが望ましい。また、災害直後の緊急的な調査の結果、警戒避難対策・応急対策工事の検討結果、基盤地図情報・国土数値情報等の公開データ等を組み合わせることも効果的と考えられる。

このように、地すべり災害対応の CIM モデルは、緊急を要する発災直後に作成することから、迅速性を優先し、保全対象域も含めた地すべり災害全体の概略地形モデルを作成することを基本として、各種データを組み合わせる作成手法とした(図1)。

3.4 地すべり災害対応の CIM モデルの活用方法

地すべり災害対応の CIM モデルは、地すべり災害の全体像の把握、警戒避難体制の検討、応急対策の検討等に活用できるとともに、Web 共有により関係機関相互の情報伝達

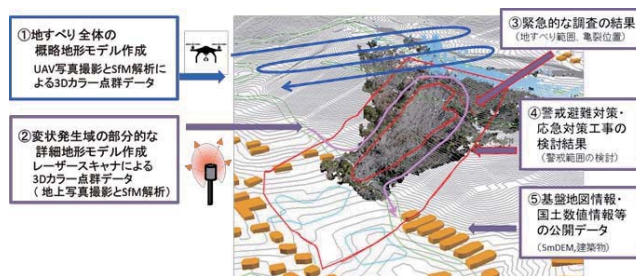


図1 地すべり災害対応の CIM モデルの作成手法

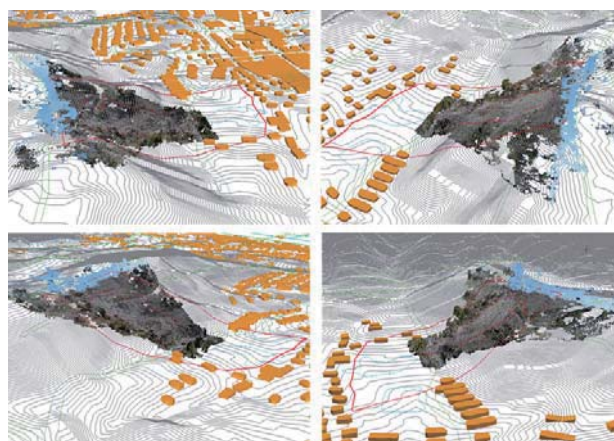


図2 警戒避難範囲の検討の活用イメージ（多方向からの確認）（概略地形モデル+避難範囲の検討結果）

や打合せ協議、専門家による技術支援にも活用できる(図2)。また、視覚的にわかりやすい特徴を生かし、地域住民等への説明に活用することも効果的であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、発災直後から地すべり災害の全体像を3次元的に把握し、効果的かつ効率的な応急対策の実施に資するための地すべり災害対応の CIM モデルの作成手法について検討した。今後は、実際に災害対応時に活用しつつ手法の改良を行って適用性を高めていくことが重要と考えている。

参考文献

- 1) 杉本宏之：「地すべり対策における CIM の活用」、第60回砂防及び地すべり防止講義集、(一社)全国治水砂防協会、pp55-65、2020
- 2) 竹下航、杉本宏之、和田佳記：「地すべり CIM の活用による調査・対策の迅速化・効率化に向けた取組」、土木技術資料、61-12、pp20-23、2019
- 3) 国土交通省：「CIM 導入ガイドライン（案）第9編地すべり編」、2019、<http://www.mlit.go.jp/common/001289037.pdf>

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、梶山敦司

【要旨】

ゲリラ豪雨による道路防災や斜面防災を考える上で、雨量情報と崩壊の関係を整理や分析することが重要である。この関係の整理や分析に用いる雨量情報は、分解能が高く、なるべく崩壊地に近い点である事が望ましい。これらの条件をある程度満たし、手軽に入手できる雨量情報として、国土交通省が無償で公開している XRAIN リアルタイム雨量情報システムの 250m メッシュデータ（以下、「XRAIN データ」と呼ぶ）がある。しかし、XRAIN データは生データのため、当該データから通行規制等に利用される各種通行規制基準雨量などを作成するには、個別に計算をする必要があった。このような背景から、業務発注により XRAIN データから各種通行規制基準雨量（時間雨量、連続雨量、土壤雨量指数、48時間雨量）を作成するプログラムを開発した。

キーワード：豪雨、雨量、斜面、災害

1. はじめに

近年、集中豪雨などによって多くの土砂災害が発生しており、減災を目的とした雨量情報を用いたソフト対策が進められている。雨量観測も観測技術の向上に伴い、雨量計のみで観測されていた点の情報から、レーダによる解析雨量のような面の情報に代わりつつある。現在は、レーダによる解析雨量の解像度も高くなり、約 250m グリッドの情報が生駒他(2016)によって開発された「AMeNOW!」において視覚化・ダウンロードが行える状況にある。一方、減災等に活用されている雨量情報は、雨量観測をもとに個別に計算を行う必要がある。現在、気象庁などによって時間雨量や土壤雨量指数などの情報が提供されているが、任意地点かつ任意の条件で雨量情報を作成した場合には、利用者は別途個別にプログラムなどを作成して計算する必要がある。

このことから、現在配信されている高精細な XRAIN 雨量データを用いて、各種雨量情報を計算できるプログラムの開発を行った。なお、プログラムの開発に際し Ishihara and Kobatake(1979)によって提案された5種類の地質区分に対応したパラメータを扱えるようにした。

2. プログラムの機能

このプログラムの機能は、XRAIN 雨量データをもとに、各種雨量情報を作成可能である。以下に、入力データ、ソフトウェアで計算可能な雨量情報、出力データを示す。

2.1 入力データ

入力データとしては、以下に示す3つを用意する。

- (1) XRAIN データ：X/C バンド MP レーダ(XRAIN)リ

アルタイム雨量情報においてダウンロードが行える約 250m メッシュの解析雨量データ。

- (2) 解析雨量：気象業務支援センター(2020)から提供される約 1km メッシュの解析雨量データ。
- (3) 地質区分：Ishihara and Kobatake(1979)によって提案されている区分を適用したデータ。

なお、プログラムは XRAIN データのみでも実行可能であるが、以下の場合に、他のデータが必要となる。

- ・AMEDAS 解析雨量は XRAIN データの欠損を補うために利用する場合。
- ・地質区分は土壤雨量指数を地質分布に合わせて計算させる場合。

2.2 計算雨量

計算可能な雨量情報は、以下に示す4つである。

- (1) 48時間雨量：計算開始時刻の48時間後から計算終了時刻間に対し、入力データの間隔毎に48時間の合計降雨量を計算し、最大値を出力する。
- (2) 時間雨量：計測開始時刻の設定した時間後から計測終了時刻間に対し、入力データの間隔毎に設定した時間の合計降雨量を計算し、最大値を出力する。なお、時間雨量の設定値を48時間に設定した場合、(1)の計算値となる。
- (3) 連続雨量（累積雨量）：各分野によって連続雨量の考え方は異なるが、一定時間以上無降雨となる場合、累積した降雨量をリセットし、降り始めから降雨を累積した値である。本プログラムでは、累積値をリセットする際の降雨量の下限値と期間を変更できる仕様とした。

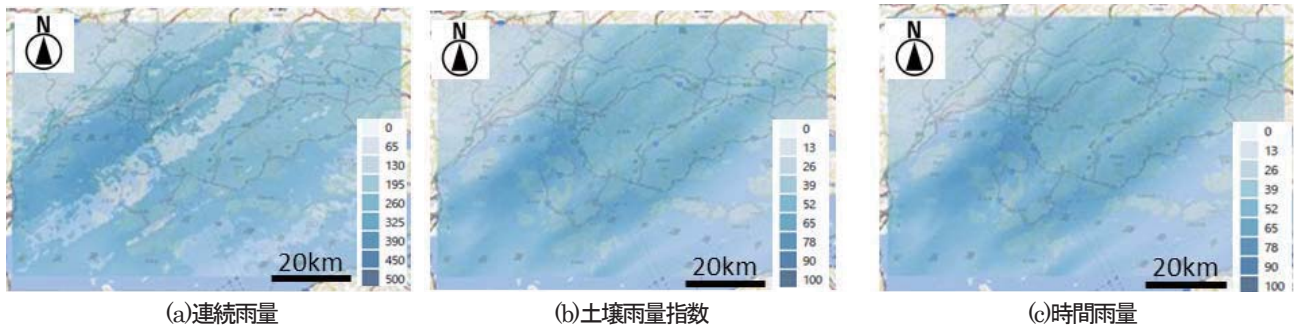


図-1 プログラムを用いて出力した雨量情報

(4) 土壌雨量指数: 気象庁によって、土砂災害予測のために開発された 3 段直列タンクモデルによってあらわされる指数(岡田他: 2001)であり、計測開始時刻から計測終了時刻間に対し、入力データの間隔毎に指数を計算し、最大値を出力する。また、土壌雨量指数の計算に用いたタンクモデルの各タンクの最大値も出力する。現在、気象庁のホームページで公開されている土壌雨量指数は、Ishihara and Kobatake(1979)によって提案されている地質区分毎に 5 種類設定されていたもののうち、花崗岩のパラメータを全国一律で使用したものとなっている。本プログラムでは、地質毎にパラメータを変更して計算できる仕様とした。

2. 3 出力データ

出力データは、テキストデータで確認することができる GOLDENSOFTWARE 社製、Surfer の GRD ASCII Exact format とした。同形式は Surfer から出力される形式であるが、シェアウェアである ESRI 社製ソフト ArcGIS やフリーオープンソフトウェアである QGIS などでも表示や解析を行える形式である。

3. プログラムの実行例

開発したプログラムの実行例を以下に示す。実行例の対象は、西日本を中心に全国的に豪雨が記録された平成 30 年 6 月 28 日～7 月 8 日にかけて発生した平成 30 年 7 月豪雨(気象庁: 2020)とした。また、対象地域は広島県呉地域とした。

図-1 にプログラムを用いて、計算した時間雨量(2 時間雨量)、連続雨量、土壌雨量指数を示す。

4. まとめ

現在取得することができる XRAIN 雨量データをもとに、任意地点および任意条件で 48 時間雨量、時間雨量(時間間隔任意)、連続雨量(降雨量の下限とリセット期間を任意で変更可能)を計算できるプログラムを開発した。また、

土壌雨量指数の計算では、地質区分を入力することによって、地質区分ごとに提案されていたパラメータの利用を可能とした。今後、このプログラムを用いて計算した各種雨量情報と崩壊の関係を整理する予定である。なお、本プログラムは地質チームのウェブで公開する予定である。

なお、本プログラムを作成にあたり、利用した解析雨量データである XRAIN データは国土交通省より提供を受けた。

参考文献

- ESRI(2020): ArcGIS Desktop. URL: <https://www.esri.com/products/arcgis-desktop/> (確認日: 2020/4/15)
- GOLDENSOFTWARE(2020): Surfer. URL: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer> (確認日: 2020/6/17)
- 生駒栄司・佐野仁美・松村浩道・根本利弘・小池俊雄・喜連川優(2016): XRAIN 雨量データ視覚化・ダウンロードシステム「A MeNOW!」の構築. 第 78 回全国大会講演論文集, 2016, no.1, pp.475-476.
- Ishihara, Y. and Kobatake, S.(1979) *Runoff model for flood forecasting*. Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ. vol.29, pp.27-43.
- 気象庁(2020): 平成 30 年 7 月豪雨. URL: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/20180713.html> (確認日: 2020/6/17)
- 気象業務支援センター(2020): 解析雨量. URL: <http://www.jmbc.or.jp/jp/offline/cd0100.html> (確認日: 2020/4/15)
- 岡田憲治・楨原康隆・新保明彦・永田和彦・国次雅司・斉藤青(2001)土壌雨量指数. 天気, Vol.48, no.5, pp.59-66.
- QGIS プロジェクト(2020): QGIS. URL: <https://www.qgis.org/en/site/index.html> (確認日: 2020/6/17)

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（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。平成 30 年度は、降雨状況の面的把握を目的としたレーダーアメダス解析雨量の適用性の検討を行い、解析雨量の面的な平均化により実降雨に対して場所により大小が生じる課題を確認した。令和元年度は、土壌雨量指数の適用性に関する検討を行い、一部の災害においては先行降雨の影響が加味されることで、災害捕捉性が向上することを確認した。

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 年度と同様の分析を行い、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。令和元年度は、先行降雨の影響を考慮するため、連続雨量に対して土壌雨量指数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。

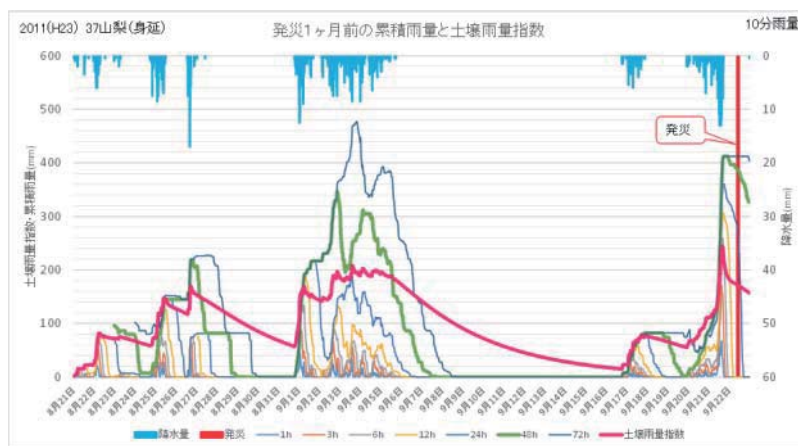


図 2-1 災害時降雨データの整理例

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

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近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

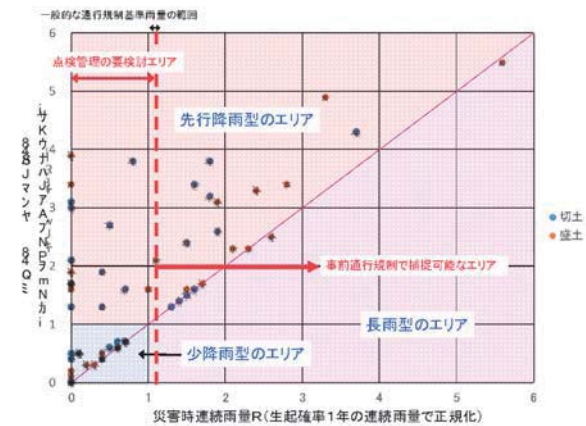


図2-2 災害時雨量の関係 ($R/R(1) - \Sigma 48/R(1)$)

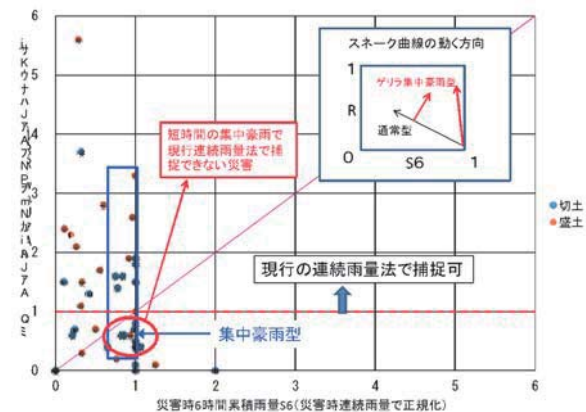


図2-3 災害時雨量の関係 ($\Sigma 6/R - R/R(1)$)

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2-4に示す。災害時の連続雨量

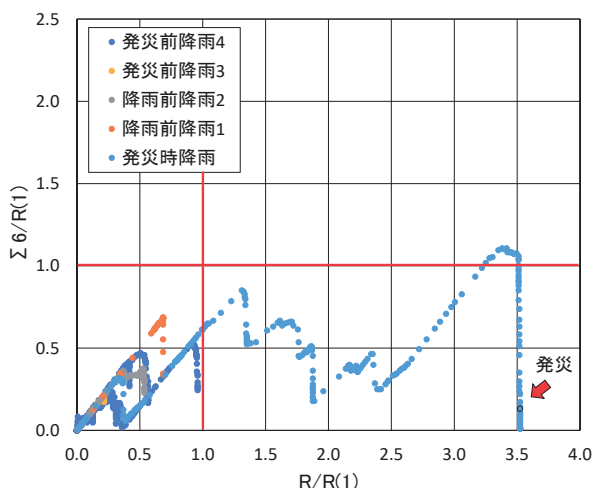


図2-4 長雨型災害のスネーク曲線の例

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

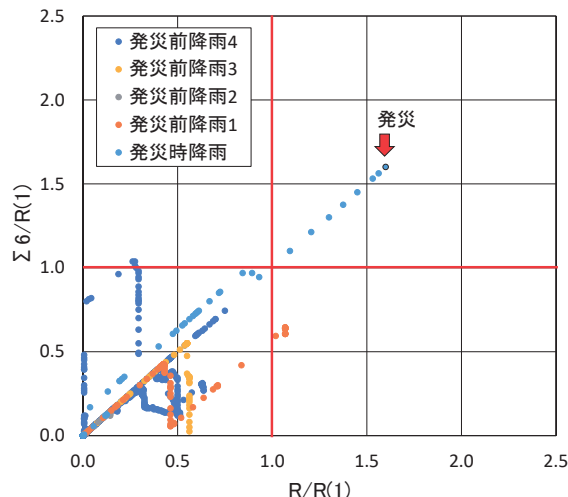


図2-5 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例

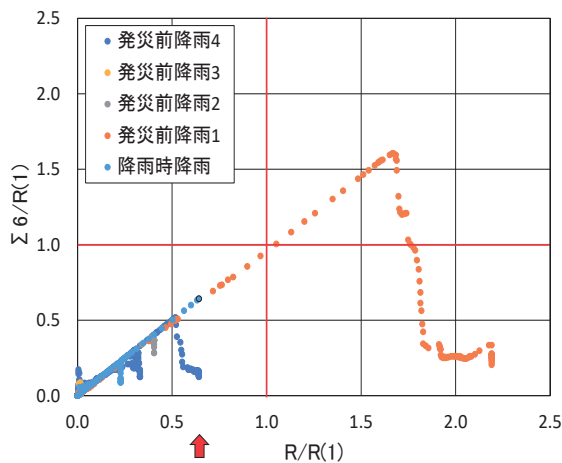


図2-6 先行降雨型災害のスネーク曲線の例

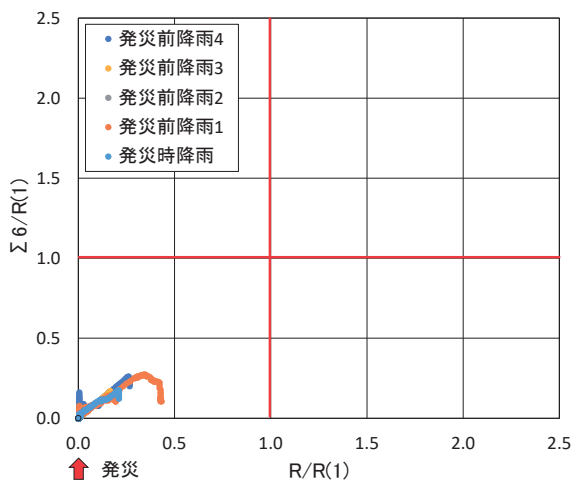


図2-7 少降雨型災害のスネーク曲線の例

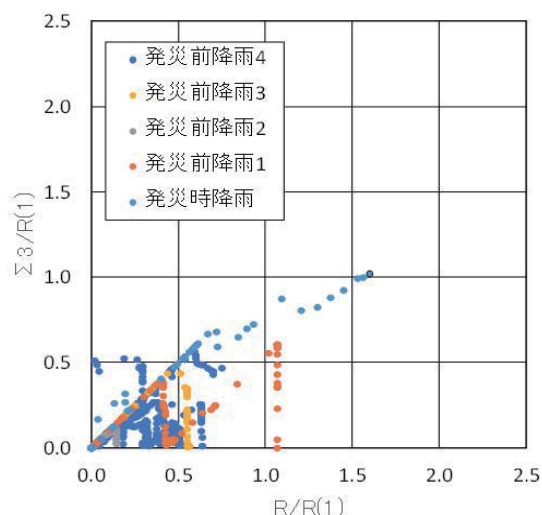


図2-8 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例
($r(\Sigma 1)$ による整理)

とどなく、発災時の降雨も $R/R(1)$ 、 $\Sigma 6/R(1)$ 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2-5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

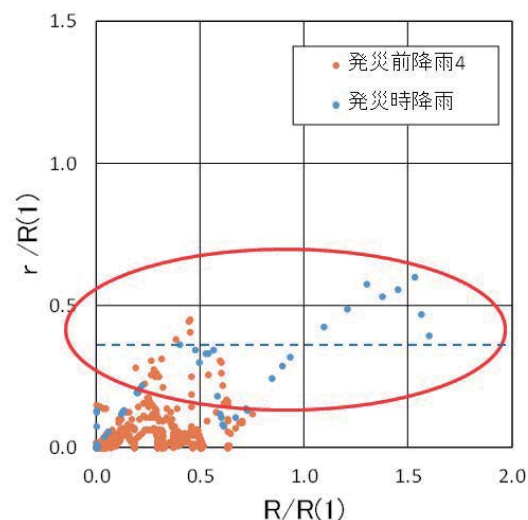


図2-9 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例

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と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(ただし平成17年以前は2.5km四方、平成13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1km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1km²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

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



図3-1 災害箇所と観測箇所の位置

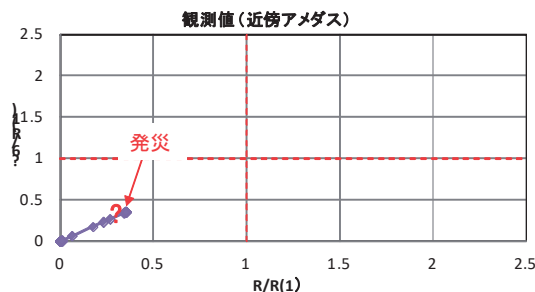


図3-2 近傍アメダスの降雨パターン

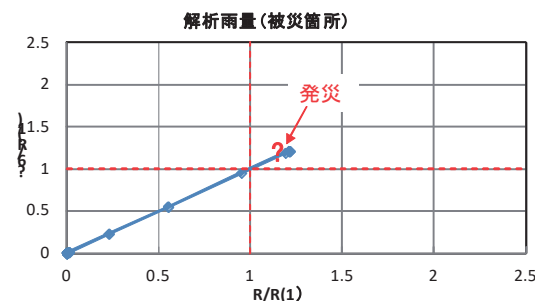


図3-3 解析30分雨量の降雨パターン

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。

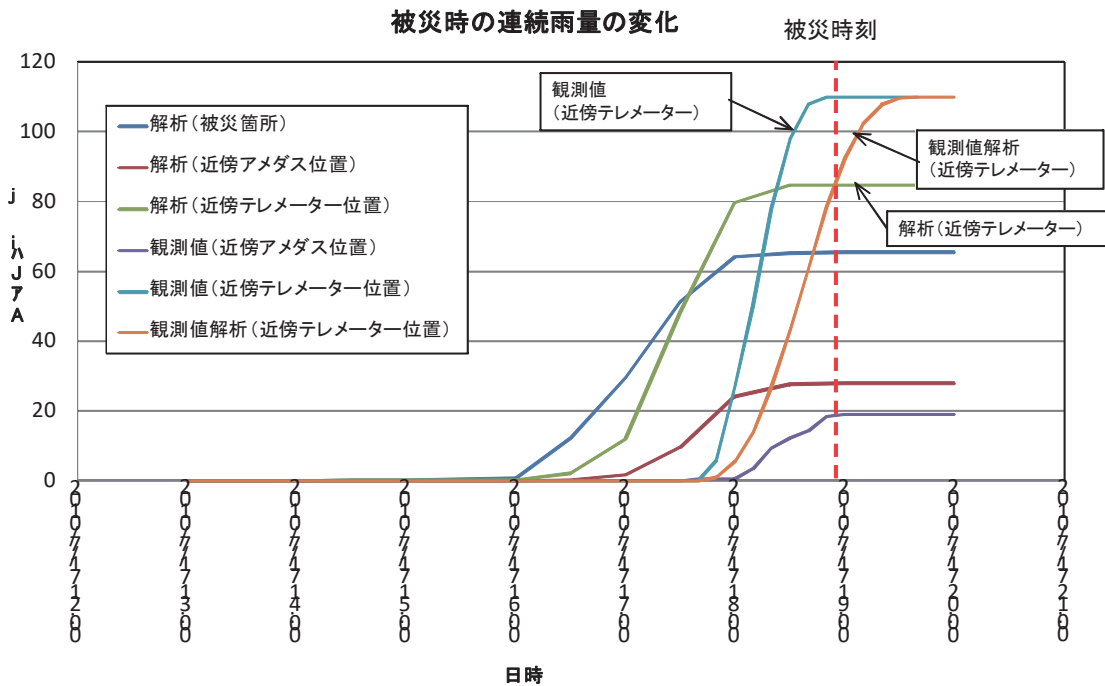
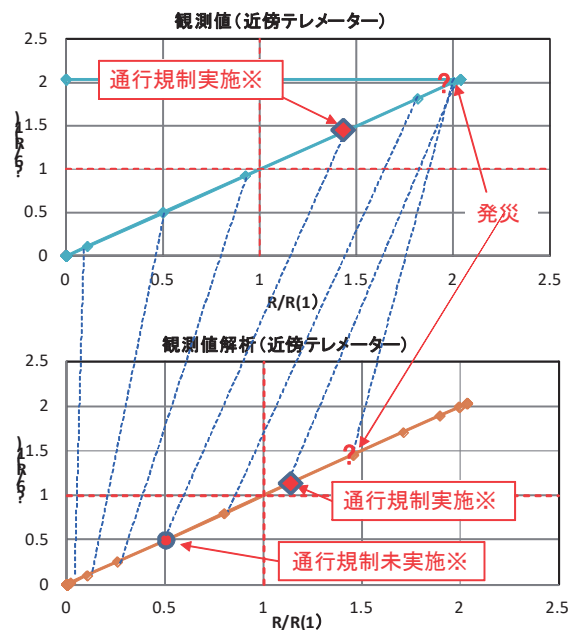


図 3-4 各雨量データによる連続雨量の変化

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 3-4 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。過大に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。



※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

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」の推移と比較すると、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。しかしながら、現状の 1 箇所の雨量計のみで広範囲の規制区間を管理することにおいても、運用上の状況は同様であり、解析雨量を用いて面的に降雨状況を把握できるメリットの方が大きいものとする。

4. 土壌雨量指数の適用性検討

道路の事前通行規制は前述のように連続雨量法で実施されているが、国道における連続雨量法では 3 時間の累積雨量が 2mm 以下になると一連の降雨が終了したものとみなして 1 度リセットし、新たに降雨の累積を行っている。このため、リセット前に比較的大きな先行降雨があっても、その影響が加味されないため通行規制基準値に至らないで災害が発生する、見逃し災害への対応が課題となっている。先行降雨に対しては、気象および砂防分野において異常気象時の警戒情報や避難誘導の際の指標として活用されている土壌雨量指数の活用が考えられる。土壌雨量指数は、土中の水分状況を 3 段タンクでモデル化したもので、連続雨量のようなリセットがなく過去の降雨も含めてすべての降雨の浸透および表面流出、地下流出の状況が反映されるものである。また、気象庁では気象レーダーにより解析雨量を用いて実況の土壌雨量指数を算出するとともに、6 時間先の降雨予測を行っており、道路の事前通行規制においても解析雨量および土壌雨量指数に期待するところが大きい。そこで、前述の降雨パターン分析を行った道路災害のうち、切土のり面の先行降雨型、集中豪雨型、長雨型の災害について、土壌雨量指数を算出して連続雨量を用いた場合との比較を行い、土壌雨量指数の適用性について検討を行うこととした。検討にあたっては、レーダーアメダス解析雨量 (1988 年～2017 年：一般社団法人気象業務支援センター発行) を用いて、災害発生当日までの土壌雨量指数 (DI) および連続雨量 (R) に対して、時間雨量 (r)、3 時間累積雨

量 ($\Sigma 3$)、6 時間累積雨量 ($\Sigma 6$) を用いてスネーク曲線を作成し、それぞれの 1 年確率値との関係がわかるように整理した。また、その地域の土砂災害警戒情報に関するクリティカルライン (CL) が、公表されている箇所については、土砂災害警戒情報の CL との関係がわかるように整理した。なお、各指標値の確率年値については、降雨統計においては非毎年法による統計期間の全降雨を対象として計算することで確率年の小さい発生頻度に対応した計算値となり、連続雨量や毎正時時間雨量のように一連の降雨単位が明確な指標の場合は非毎年法での計算が可能である。しかしながら、一連の降雨の定義がない土壌雨量指数等では、個々の降雨に切り分けることが難しいことから、連続雨量も含めた各指標の確率年値を同じ算出方法とするため、各年 (1988 年～2017 年) の最大値を用いる毎年法によることとした。確率年値の計算は、(財) 国土技術センター「水文統計ユーティリティ ver1.5」により算出し、毎年法では発生確率年の小さい (発生頻度の多い) 少量の雨量値が 1 年確率付近に漸近するため 1 年確率値を過小に評価する結果となることから、1 年確率値については 2 年、3 年、4 年確率値を用いて線形近似直線により求めることとした (図 4-1 参照)。

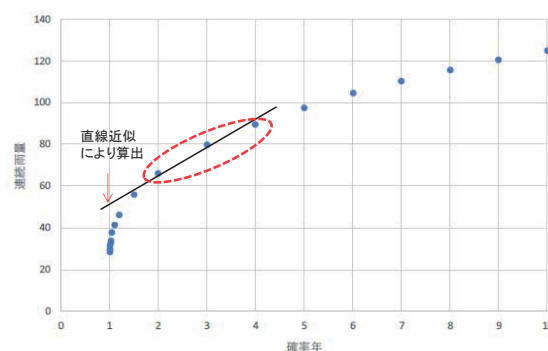


図 4-1 1 年確率値の算出の考え方

ここでは、先行降雨型災害、集中豪雨型および長雨型災害について、先行降雨の大小に関わらず、各地域の土砂災害警戒情報の CL が確認できた災害事例の被災当日およびその前 7 日間の降雨状況、土壌雨量指数および連続雨量に対して時間雨量および 6 時間累積雨量を用いたスネーク曲線を整理した結果を示す。

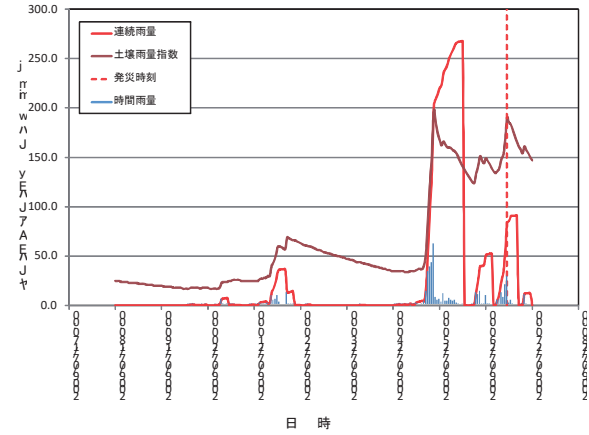
(1) 先行降雨型災害事例

1) 事例 1 (図 4-2)

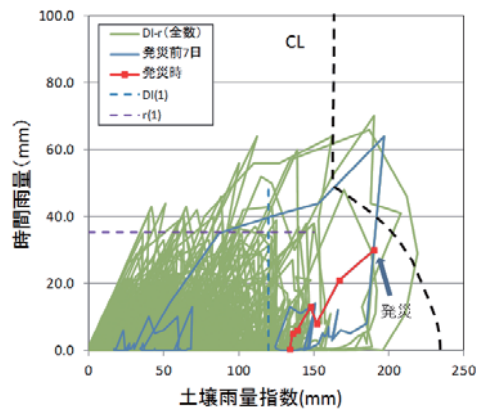
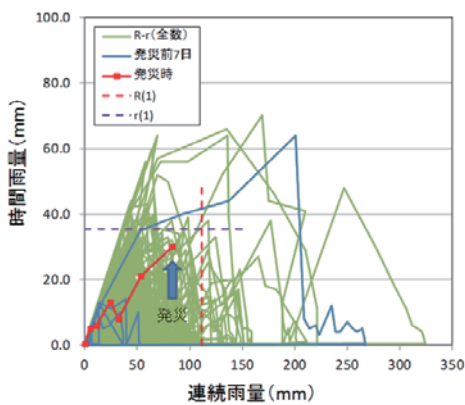
当該箇所は、のり枠+鉄筋挿入工が施されたのり面で、近傍の背後地 (左側) にため池を有する箇所である。また被災箇所の右側方に向かってのり高さが高くなり、深



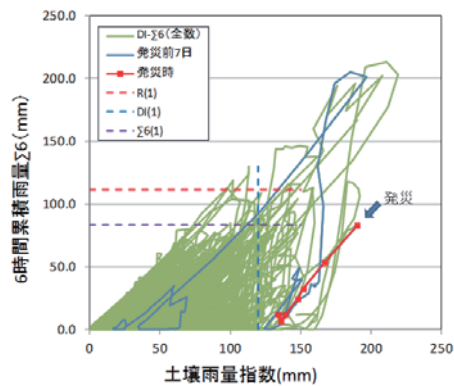
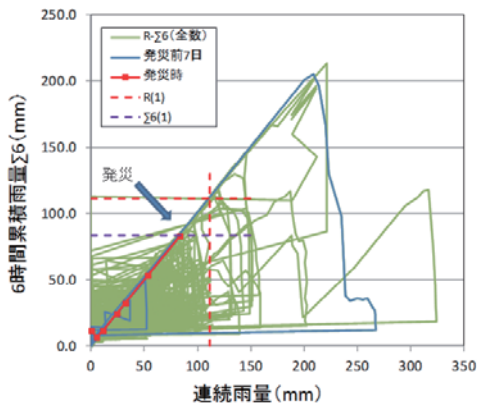
(a) 被災箇所の状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

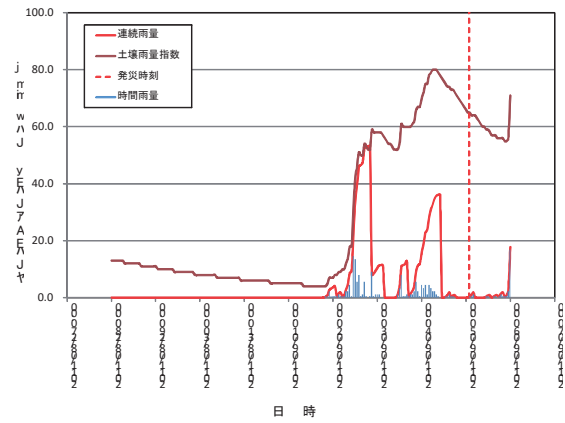
図4-2 災害事例1の降雨状況

いすべりを想定したのり枠+グラウンドアンカー工が施されていた。当時の降雨状況は発災2日前に既往最大に近い非常に大きな降雨があり、この降雨の影響により災害に至ったものと考えられる。のり面では多くの湧水が見られたため池からの浸透水により地下水位が高く、被災後の復旧工としてグラウンドアンカー+横ボーリングによる排水対策が行われている。2日前の先行降雨はこの地域の土砂災害に関するCLを超えるものであったが、当

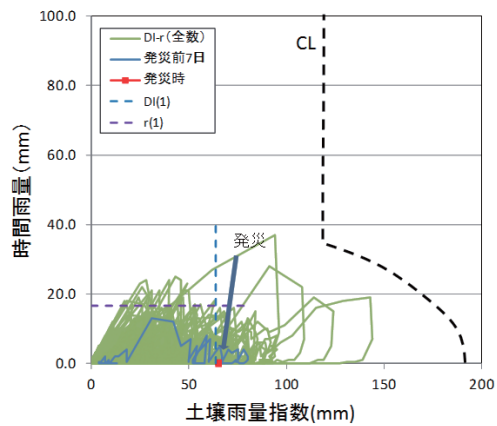
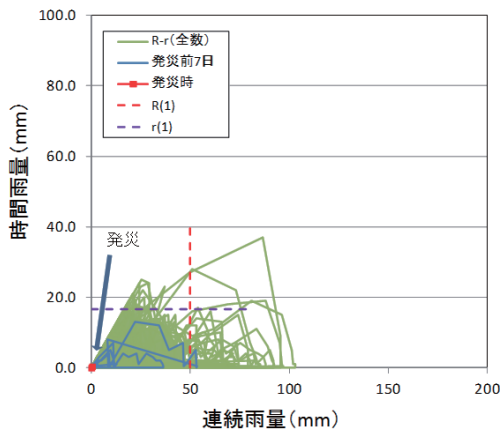
日は被災には至らず地下水位の上昇により既設の鉄筋挿入工と地山との境界での滑りが生じたものと考えられる。被害状況としては、滑動した部分が歩道部にめり込み歩道部が数10cm程度隆起したが、道路への被害は生じていない。当該箇所は、平成19年に完成した開削切土の新設のり面で、供用後既往最大の降雨であった。この降雨から見られる特徴は、先行降雨の土壌雨量指数がピークに達した後も時間雨量5~10mm程度の雨が継続しているに



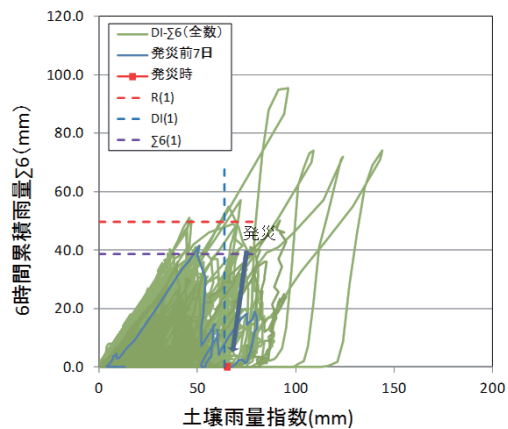
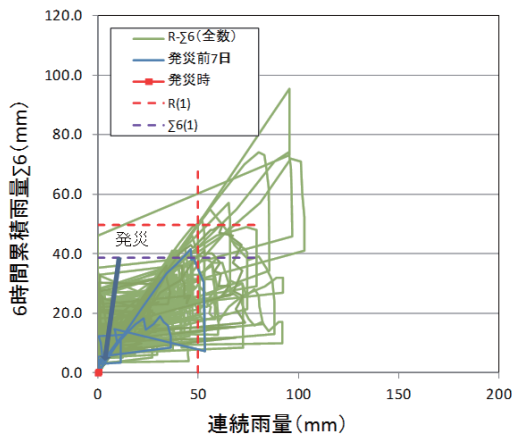
(a) 被災箇所状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

図4-3 災害事例2の降雨状況

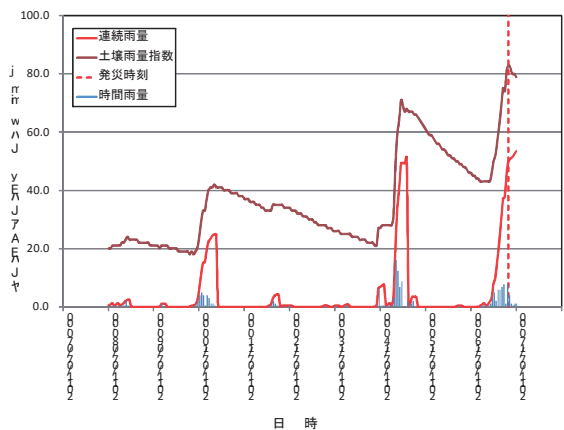
にもかかわらず、約1日で土壌雨量指数が大きく減少している点である。連続雨量と異なり、降雨が継続していても時間雨量の大きさによっても土壌雨量指数が減少する場合があります、規制解除方法の検討の際に留意すべき点と考えられる。

2) 事例2 (図4-3)

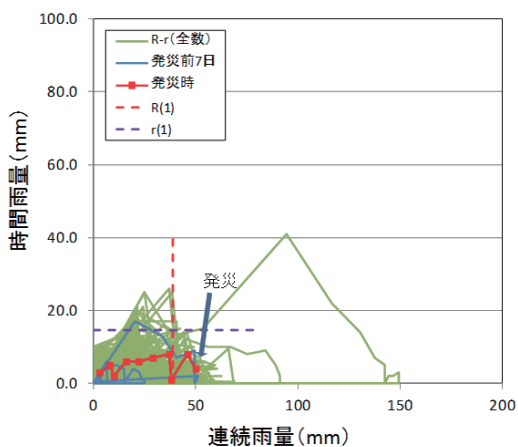
当該箇所は、背後が段丘平坦地で比較的小規模なりのり面で、連続するのり面内で過去にも同様の被災形態で複数回の被災履歴がある箇所である。湧水が多くみられ、地下水位が高い箇所、のり面勾配も 1:1.0 急勾配であった。また、凍上の影響を受けて脆弱化しやすい地域であり、このため比較的小さい降雨で被災しているもの



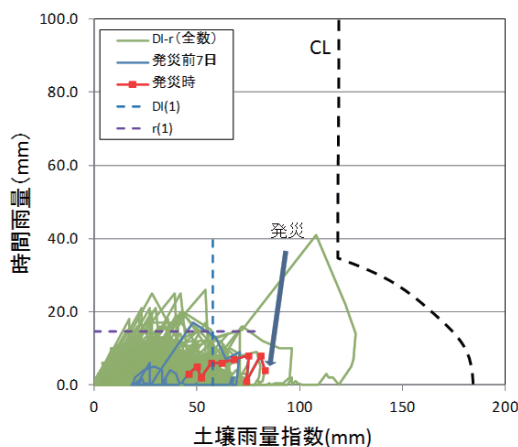
(a) 被災箇所の状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

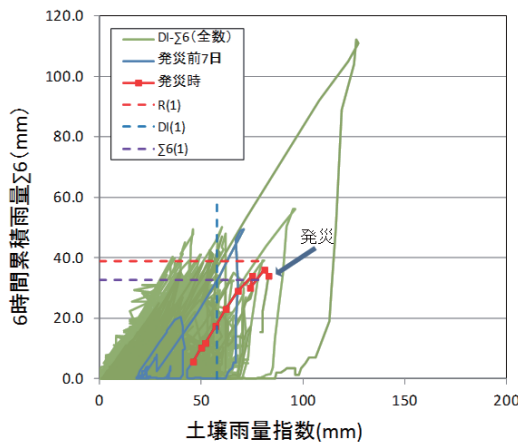
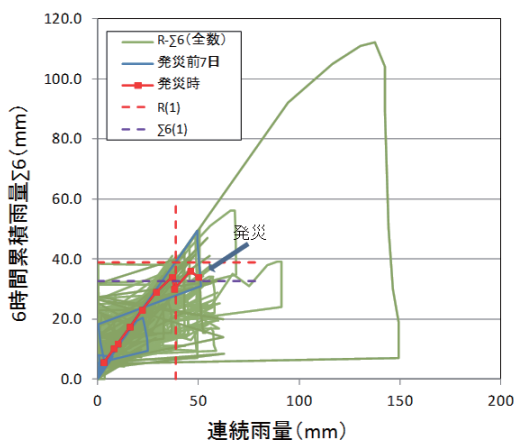


図4-4 災害事例3の降雨状況

と考えられる。スネーク曲線を見ると、連続雨量はほとんどないが、土壌雨量指数は1年確率を超えており、先行降雨の影響による災害といえる。一方で、過去の災害の被災時期が不明であるが、降雨履歴はすべて当地域の土砂災害のCLの内側にあり、上記の過去の被災もCLでの捕捉はできない。土砂災害のCLに対して小さな降雨で災害が発生していることから、この箇所の降雨に対して

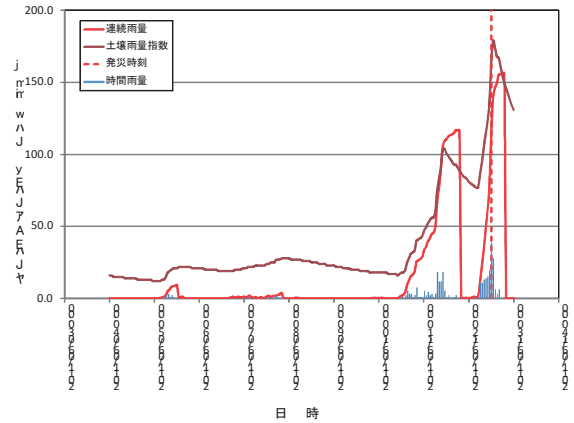
CLが適切でなかった可能性もあるが、凍上の影響を受けている可能性や被災要因を踏まえると通行規制ではなく、定期的な点検によるのり面の健全性の確認や、湧水対策および適切なのり面保護工を行う等の維持管理対応が適切な箇所と考えられる。

3) 事例3 (図4-4)

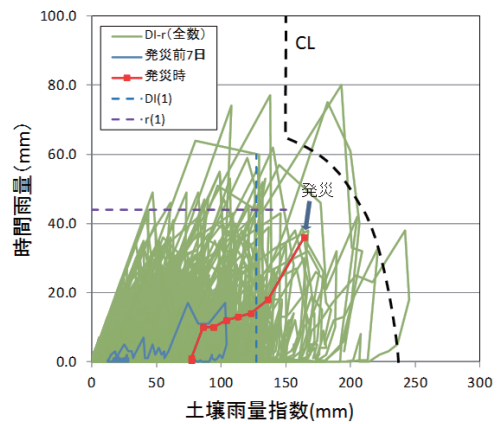
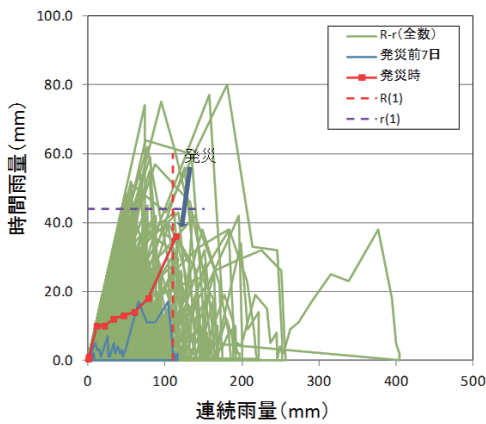
当該箇所は、背後が段丘平坦地で比較的小規模場なの



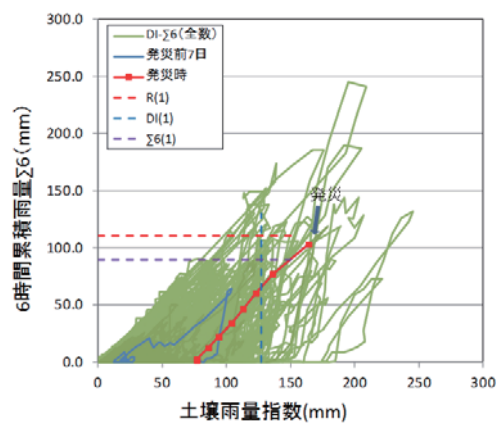
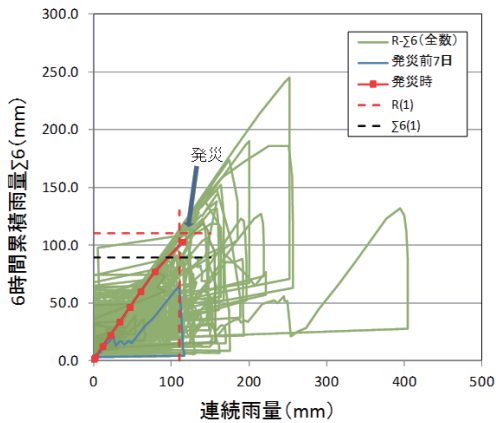
(a) 被災箇所状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



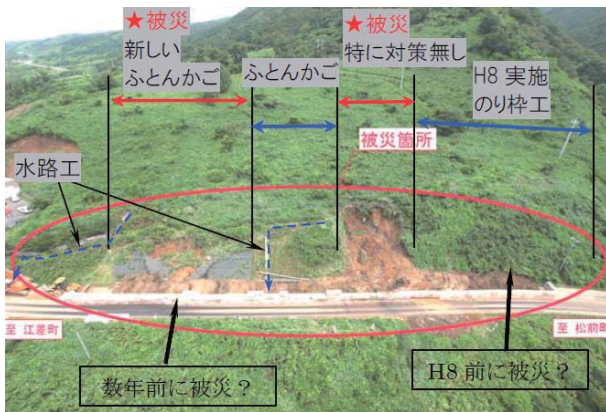
(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

図4-5 災害事例4の降雨状況

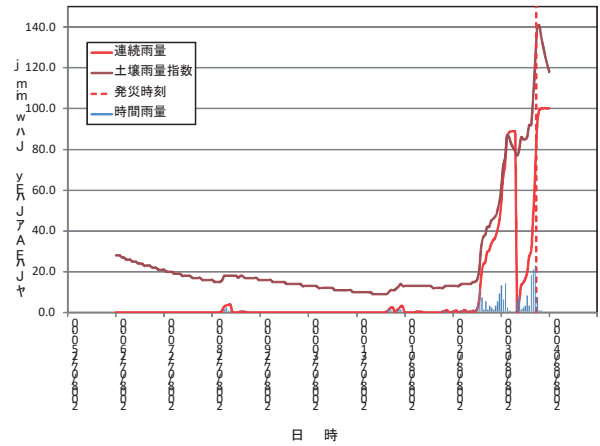
り面で、過去の既往最大の降雨で被災（表層崩壊）した箇所の対策工の脇で発生したもので、法肩部の排水不良（排水工は半割のコルゲートで被災箇所の部分に滞水が見られ雨水が集中してオーバーフローしたものと推察された）により対策工側部に流水が集中して生じた小規模な侵食によるものがある。2日ほど前の先行降雨および発災時の降雨も比較的まとまった降雨であるが、事例2と

同様に過去の降雨履歴はすべて当地域の土砂災害のCLの内側にあり、上記の過去の被災もCLでの捕捉はできない。CLが適切でない可能性もあるが、被災要因を踏まえると通行規制ではなく、定期的な点検により排水工の健全性の確認やのり面保護工の範囲の適切な設定や流水対策などの維持管理対応が重要な災害であると考えられる。

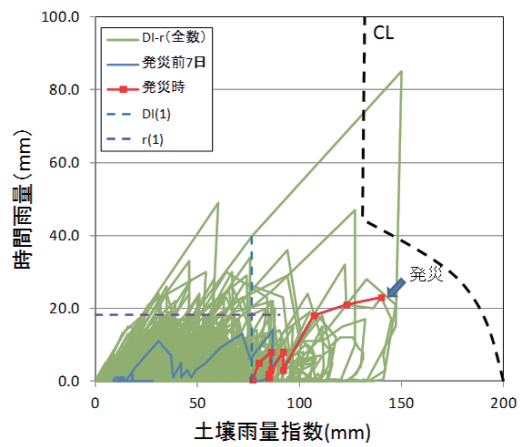
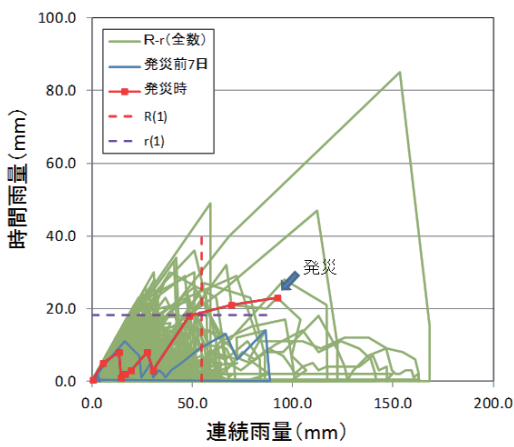
4) 事例4 (図4-5)



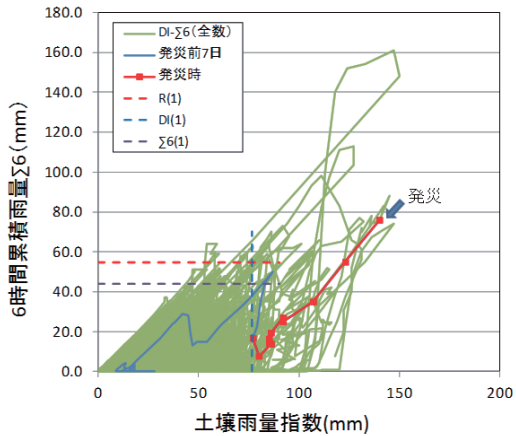
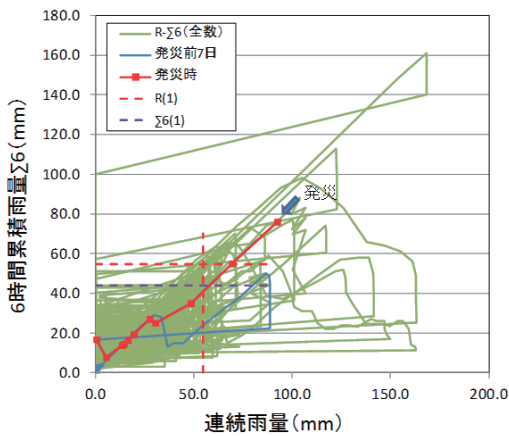
(a) 被災箇所の状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線

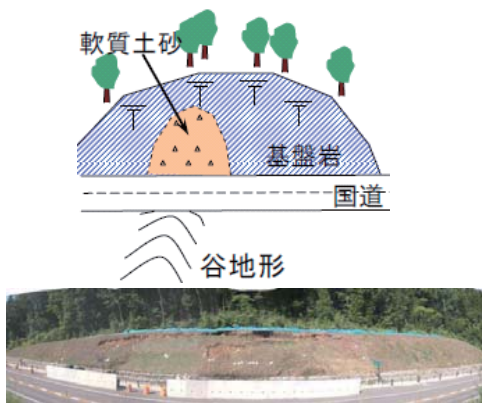


(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

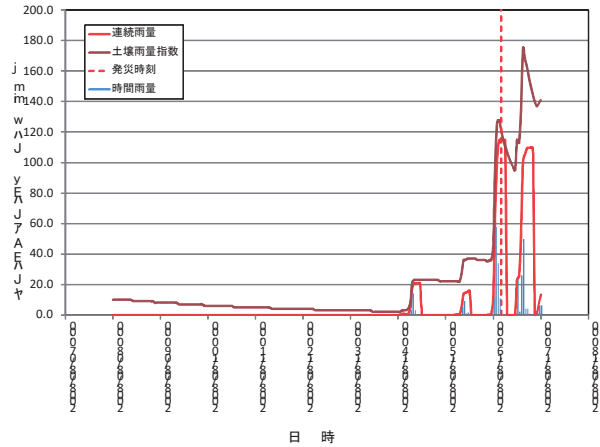
図4-6 災害事例5の降雨状況

当該箇所は、もともと地下水位が高い箇所を切土しており、切土により地下水の湧出が生じやすくなり、かつ地山は強風化しており切土によりゆるみが生じたところに比較的まとまった降雨があったため生じた災害と推定される箇所である。道路改良に伴う切土箇所の道路供用前に発生した災害で比較的植生も若く切土初期に生じた災害である。発災時の降雨状況を見ると集中豪雨型に準

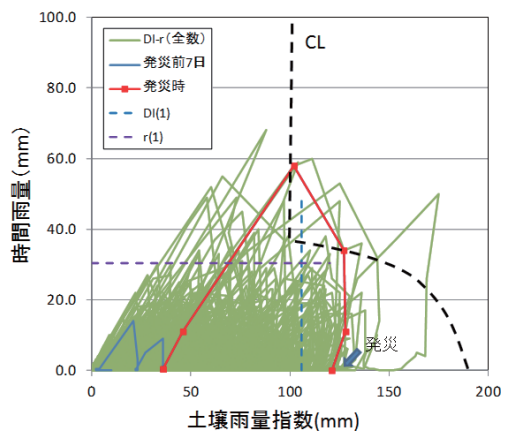
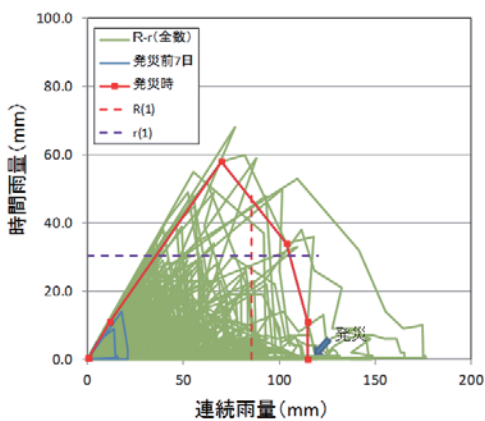
ずるもので、連続雨量として1年確率程度で、時間雨量も1年確率には満たないが比較的大きなものであった。1日前の先行降雨も降雨の継続時間が長い1年確率程度の連続雨量で、先行降雨の影響も反映して土壌雨量指数も比較的大きな値となつてはいるが、当該地域のCLの内側で発生している。切土法面工事は終了していたが、幸いにも道路供用開始前の被災であったため、道路交通へ



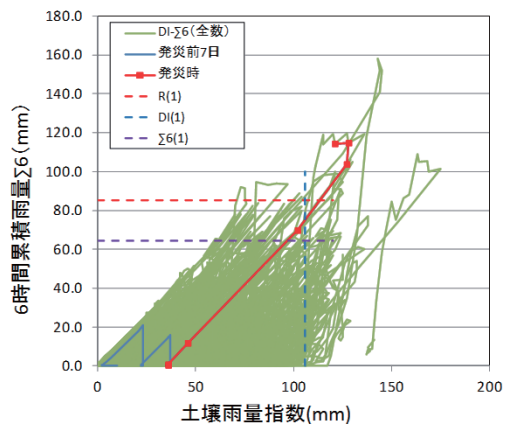
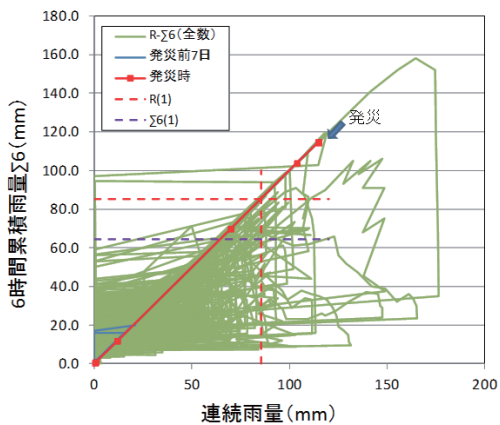
(a) 被災箇所状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

図4-7 災害事例6の降雨状況

の影響はなかったが、降雨状況によっては供用開始後に発生していた可能性もある。この災害を捕捉するためにはCLの見直しが必要であるが、もともと地下水位が高く地山自体が強風化していたため、被災箇所以外の範囲では地山補強工が実施されており、施工段階で対応ができなかったかについても検討が必要な災害である。また、切土初期には応力開放によりゆるみが生じやすく、切土

後はしばらくは重点的に点検を行い湧水の状況やのり面のゆるみの状況などを確認することも必要と考えられる。

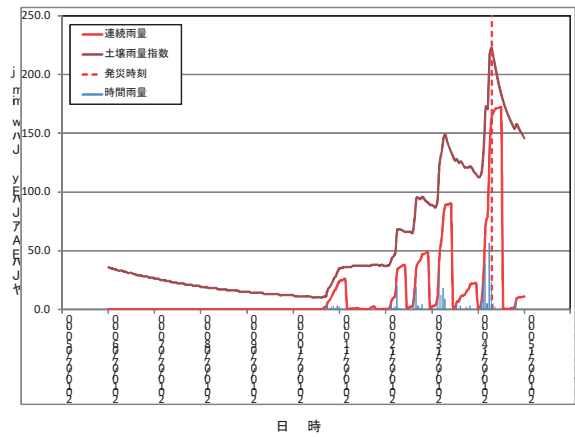
(2) 集中豪雨型災害事例

1) 事例5 (図4-6)

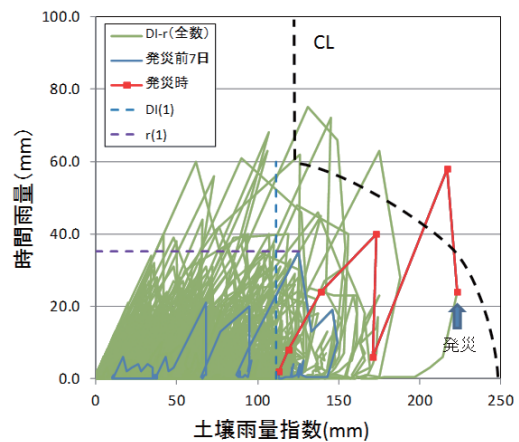
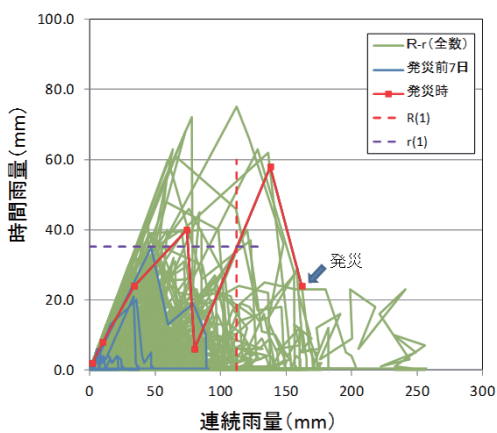
当該箇所は、過去に同一のり面内に複数の被災履歴があり、被災毎に対策を行っており、未対策箇所が災害が生じている。海生段丘(粘土層)上に堆積した風化花崗



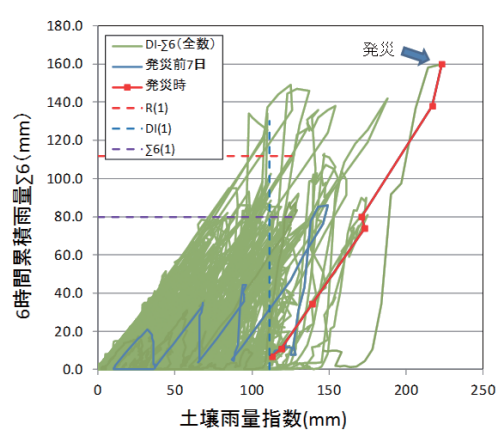
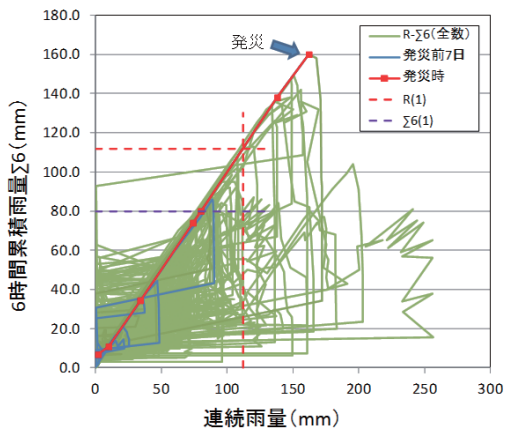
(a) 被災箇所状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

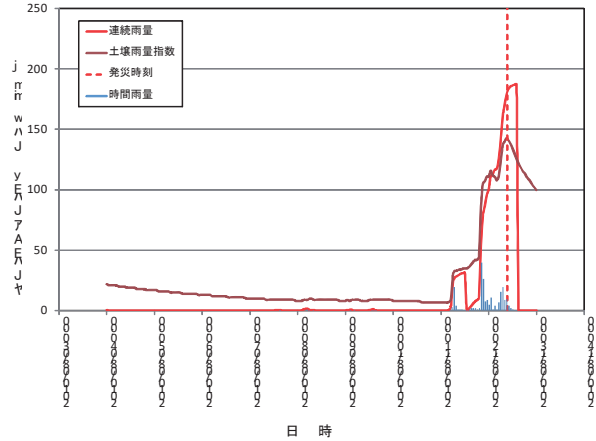
図4-8 災害事例7の降雨状況

岩に起因する崖錐堆積物が豪雨で崩壊した箇所で、被災当時の地下水位は非常に高く、崩壊面からは大量の湧水が確認されている。当時の降雨状況は、先行降雨のリセット直後に非常に大きな連続雨量が継続しており、土壌雨量指数では既往最大に近いものであったが、当地域の土砂災害のCLの内側であった。過去に複数回の被災が生じ

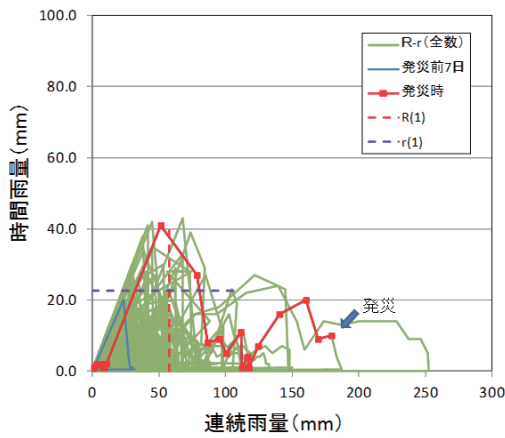
ているが被災時期の記録がないためどの降雨で被災したかが不明であるが、CLを超える降雨は1996年に記録した1回のみであり、写真右側のH8実施のり枠工はこの降雨により被災した箇所を復旧したものと思われる。当箇所は凍上の影響を受けやすい地域であり、経年的にこのり面が脆弱化して繰り返し崩壊が生じているものと推察



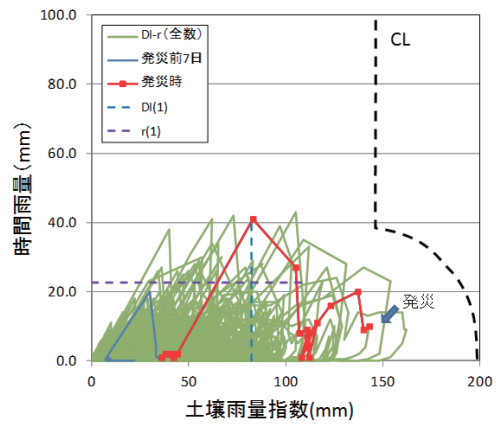
(a) 被災箇所状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

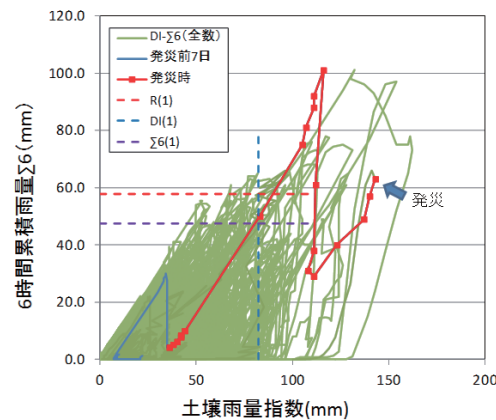
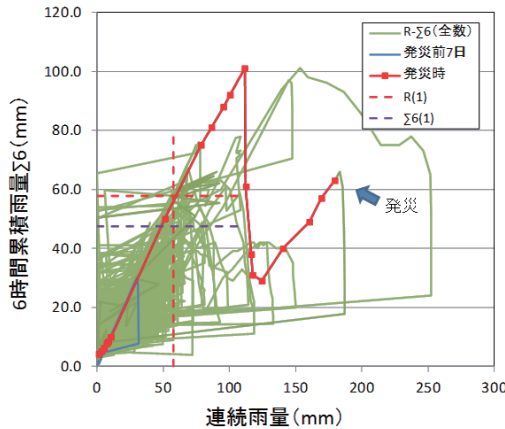


図4-9 災害事例8の降雨状況

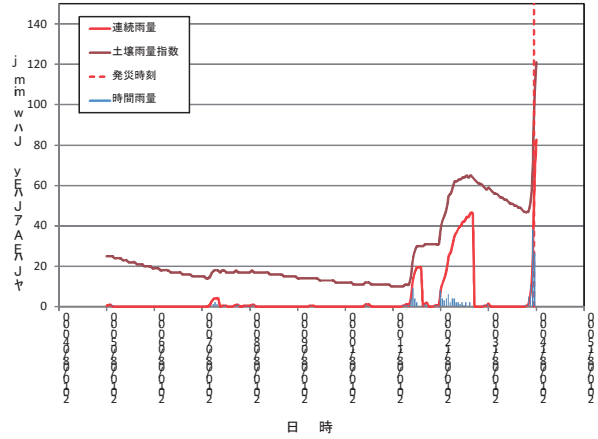
される。当箇所の災害に対してはCLが若干大きいものである。ただし、過去に複数の被災履歴があることから、復旧時にのみ面全体を一体的に対策を行う等の対応が重要であると考えられる。また、経年的なり面の脆弱化の進行の可能性も考えられることから、定期的な点検と補修も重要な箇所であると考えられる。

2) 事例6 (図4-7)

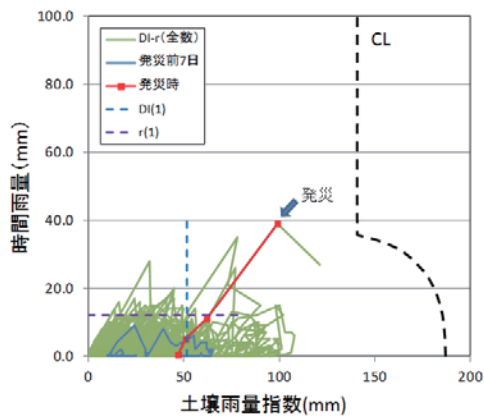
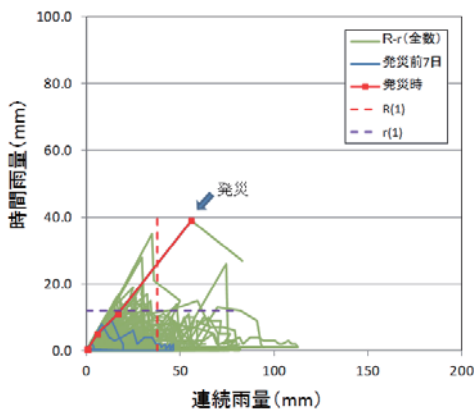
当該箇所は谷地形上を切土した箇所で、基岩上に谷部の軟質土砂が残存していた箇所で生じた災害である。供用開始後1年で被災しており、元地形が谷部であるため、雨水が集中しやすいことも伴い短時間の豪雨で崩壊が発生したと考えられる。当時の降雨状況を見ると、非常に短時間の集中豪雨で、時間雨量もほぼ既往最大であったが、連続雨量、土壌雨量指数とも既往最大ではない。発



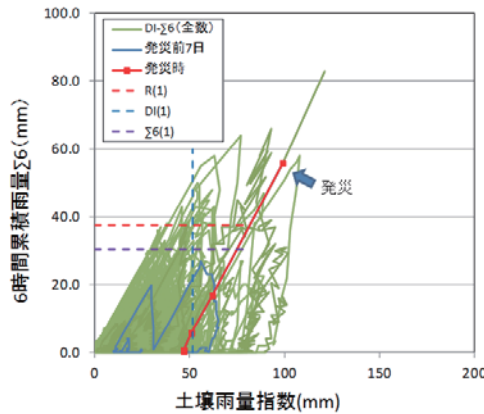
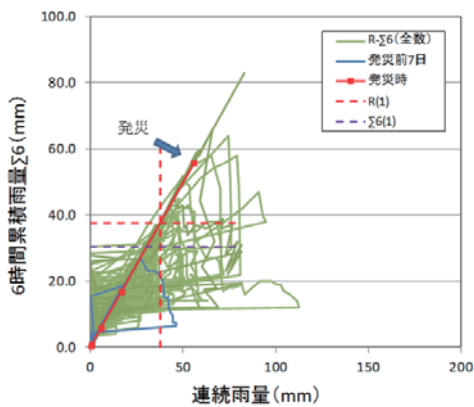
(a) 被災箇所状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

図4-10 災害事例9の降雨状況

災前2日間に連続雨量で20~25mm程度の先行降雨が2回あり、その影響が加味されることで、当地域の土砂災害のCLを超えており、土砂災害のCLで捕捉可能な災害であった。本災害事例では、先行降雨の影響だけではなく、短時間集中豪雨の捕捉性についても、土砂災害のCLの考え方で捕捉できる可能性も確認できた。元地形が谷部の箇所では、切り取り深さが浅いと軟質土砂が残存しやす

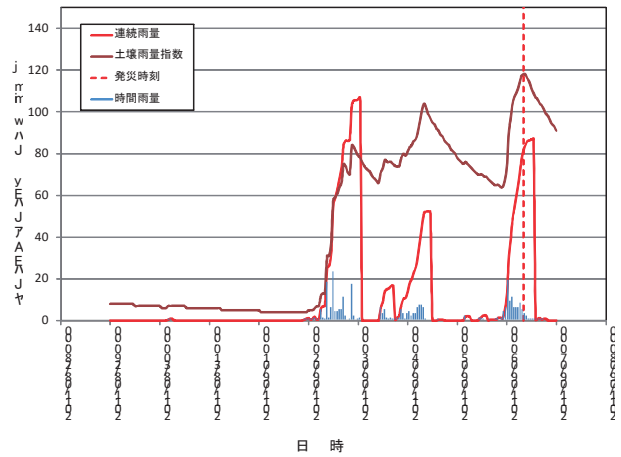
いので施工時に注意するとともに、供用開始後も雨水が集中しやすいことから湧水の状況などを重点的に点検することが重要で、変状を確認した場合には対策によりり面の性能を高めることが重要である。

3) 事例7 (図4-8)

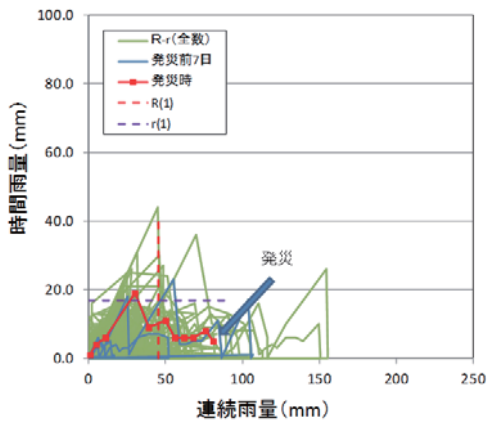
当該箇所は、基岩が花崗閃緑岩で風化により表層が土砂化し緩みが生じたところが豪雨により崩壊したもので



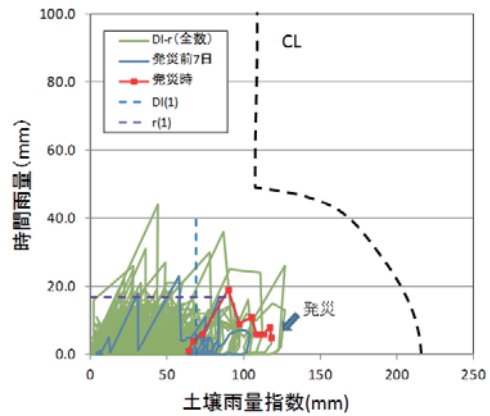
(a) 被災箇所の状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

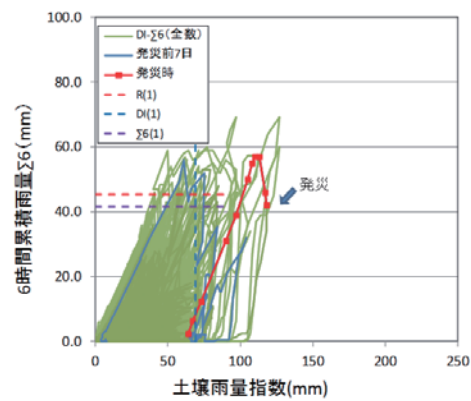
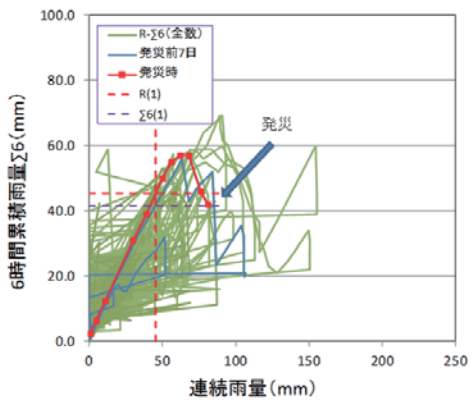


図4-11 災害事例10の降雨状況

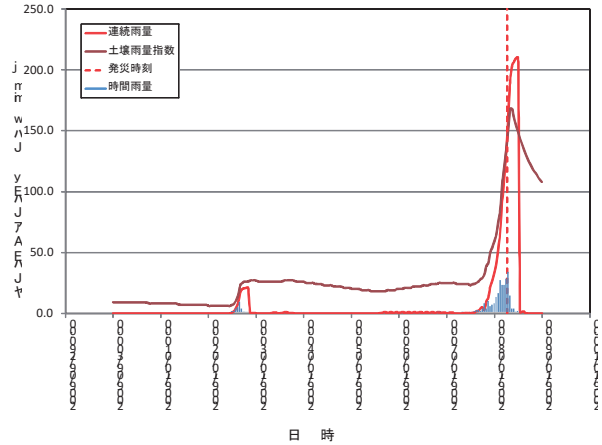
ある。発災時は短時間集中豪雨であるが、発災前の数日間に数回の先行降雨を伴っており、先行降雨の影響が反映された結果、土壌雨量指数で既往最大の降雨となっており、当地域の土砂災害のCLでも捕捉可能な災害であった。事例6は先行降雨の影響は比較的小さかったが、本災害は先行降雨の影響が顕著な事例の1つで、連続雨量

で明確に災害発生降雨を分離することは難しいが、土壌雨量指数を用いることで災害時降雨が明確に分離できている。当該箇所は典型的な表層崩壊であり、土壌雨量指数自体も表層崩壊を踏まえてモデル化しているものであり、適合しやすい災害であったものと考えられる。

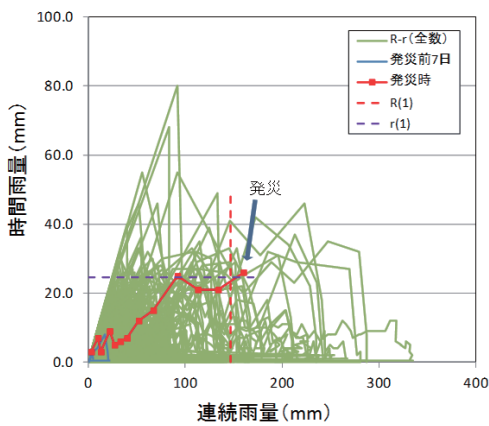
4) 事例8 (図4-9)



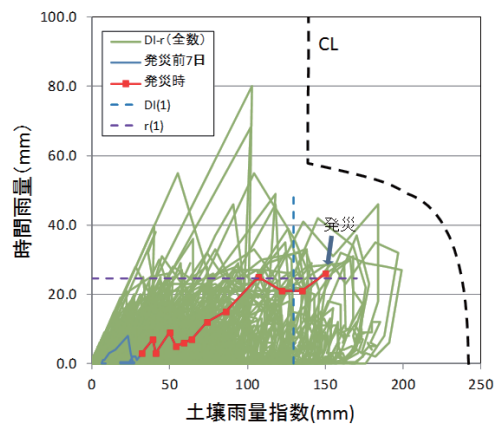
(a) 被災箇所状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

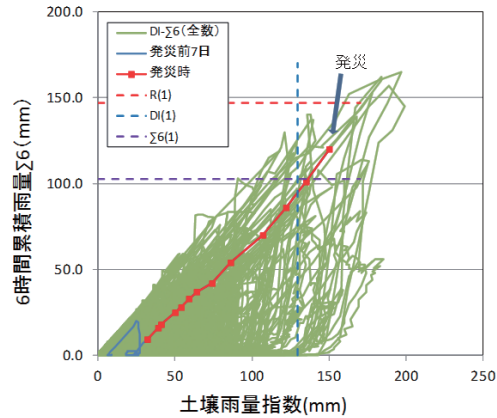
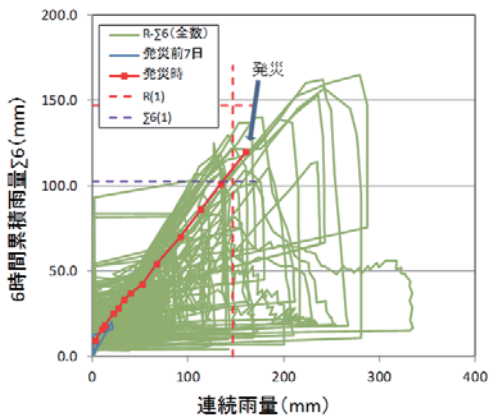


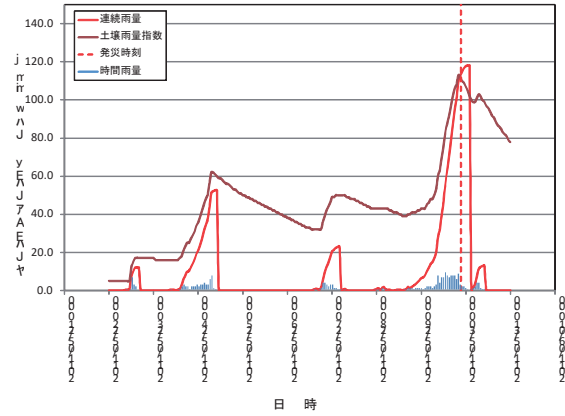
図4-12 災害事例11の降雨状況

当該箇所は、被災箇所上方に微細な沢地形があり、そこから被災箇所に雨水が流入して、地山と植生の根茎境界から土砂崩落が生じている。当時の降雨状況は、2つの集中豪雨の山があり、1つ目の山が連続雨量法のリセット直前で2つ目の山が発生している、先行降雨型と集中豪雨型の複合型といえる。土壤雨量指数は、既往最

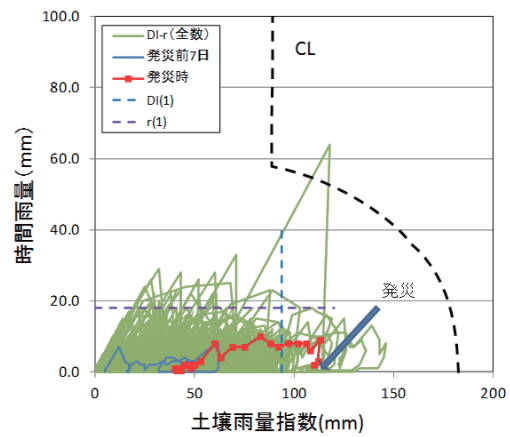
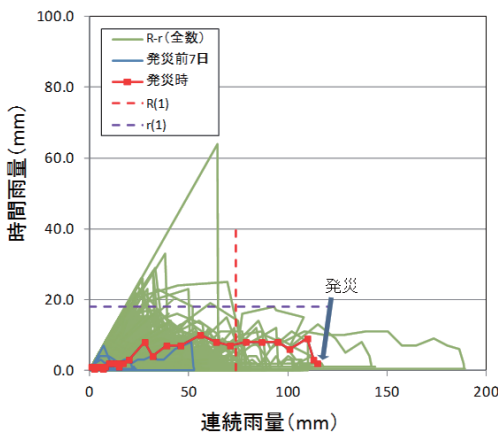
大に近い降雨となっているが、過去の降雨すべてが当地域の土砂災害のCLの内側であった。この災害を捕捉するにはCLの再考が必要であるが、非常に小規模な災害である。可能であれば、のり面新設の段階で前述の微地形を評価し、のり面構造を植生工単独ではなく緑化基礎工としてのり枠を設けたり排水工を追加するなどの対応をす



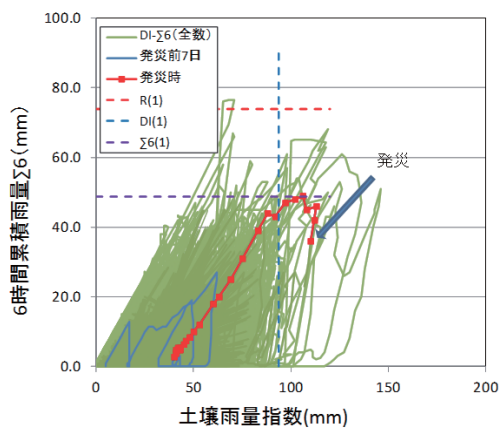
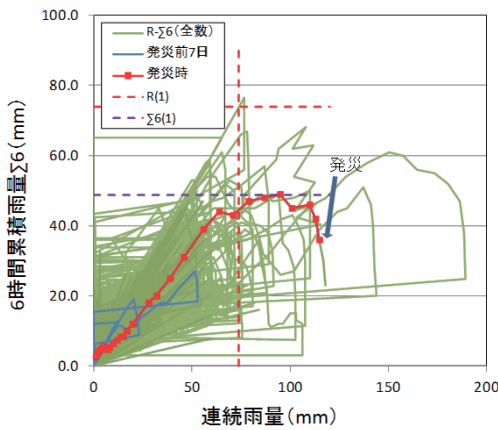
(a) 被災箇所の状況



(b) 発災当時の降雨状況



(c) 時間雨量によるスネーク曲線



(d) 6時間累積雨量によるスネーク曲線

図4-13 災害事例12の降雨状況

るのが望ましい。

5) 事例9 (図4-10)

当該箇所は、地すべり地形の末端に位置する、風化蛇紋岩の植生のり面の表層崩壊である。過去に同一のり面内で小崩壊が発生しており、また側方でも被災履歴がありこちら側にはふとんかごが既に設置されている。降雨状況を見ると、当該箇所の時間雨量は既往最大で、土壌

雨量指数も既往最大に近いものであった。当地域の土砂災害のCLに対して、過去の降雨履歴は非常に小さく、過去にも被災履歴があることから、当該箇所の災害を捕捉するにはCLの見直し検討が必要と考えられる。

しかしながら、このような箇所については、被災履歴とその降雨の状況、のり面性状を考慮して、過去の災害復旧時に一体的に対策を行っていくことが望ましい被災

形態であると考えられる。

6) 事例10 (図4-11)

当該箇所は、地山は強風化凝灰岩からなり非常に小規模な礫混じり土砂のり面で、後背斜面は比較的平坦に近い火山麓の緩斜面が広く分布しており、地下水の涵養源となっている。また、崩壊箇所は小さな沢地形の端部に位置し、崩壊面には水みち(パイピングホール)から多量の湧水が認められ、地山背後からの浸透水の影響により、表土が泥濘化し小崩壊が生じている。災害発生4日前にも大きな先行降雨があり、その後も数度の少降雨があったのちに当日の集中豪雨で発災している。土壌雨量指数は先行降雨の影響もあり、既往最大に近い値となっている。一方で、当地域の土砂災害のCLに対して、この箇所の降雨は非常に小さく、この災害を捕捉するためには、CLの見直しが必要である。しかしながら、災害の規模としては非常に小さいもので道路への影響もなく、規制対象となるような崩壊ではないが、事前の調査でこの災害の発生の予見も難しいものとする。

(3) 長雨型災害事例

1) 事例11 (図4-12)

当該箇所は、モルタル吹付工が施された切土のり面(吹付のり面)のオーバーハング部が降雨の影響で崩落した事例である。崩落した箇所には吹付背面に法肩からの水みちとなっている空洞が見られ、背面からの水の侵入により地山の風化に伴う密着不良が生じていたものと推察される。当時の降雨状況は、発災時には時間雨量20mmの雨が4時間連続しており、比較的多い状況であったが、過去の降雨と比べると、連続雨量も土壌雨量指数もさほど大きなものではない。また、当地域の土砂災害のCLに対して当該箇所の降雨は小さいものである。吹付のり面の風化が主要因であり、亀裂や空洞状況などの定期的な点検と補修により対応する必要がある被災形態である。

2) 事例12 (図4-13)

当該箇所は、平成元年以前に供用が開始されており、谷頭部を切土したのり面で、緑化基礎工としてプレキャストのり枠を用いた植生工が施されている。崩壊箇所は谷部の軟質土砂が薄く残存しており、その部分が崩落したものと推定されるものである。

当時の降雨状況は、時間雨量10mm以下の雨が約1日継続しており、当該箇所の連続雨量としては、比較的大きなものであった。災害前1週間以内に数回の先行降雨があり、土壌雨量指数にはその影響も反映されているが、発災時の土壌雨量指数をみるとタンクモデルの排水の影響からさほど大きくはなっていない。谷部の切土において

は、設計時・施工時に元地形から谷部の軟質土砂の残存の確認と必要な補強を行うことが重要であり、点検においてもそのような観点で調査を行い、適切な対応を図る災害と考える。一方で、当該箇所の降雨履歴をみると、平成12年8月に時間雨量60mmを超えるような短時間集中豪雨を記録しており、この降雨では土壌雨量指数で先行降雨の影響が加味されることで、土砂災害のCLを超過している。当該箇所のほとんどの降雨は土砂災害のCLに対して大きく内側に位置しており、土壌雨量指数のみをみるとこの降雨より大きな事例もあるものの、被災時の降雨と比較すると降雨条件としてはこの降雨の方が厳しいと判断されるものにもかかわらず被災していない。当該箇所は前述のように平成元年以前に供用されており、供用後22年以上経過している。谷頭部は水が集まりやすいため他に比べて乾湿の繰り返して風化が進行しやすく、その影響で軟質土砂の範囲が広がった結果、既設の植生工では安定が保てない状態となり崩壊した可能性が考えられる。したがって、このような箇所では、長期的な風化の影響も考慮した定期的な点検や対策も必要であると考える。

(4) 考察

土壌雨量指数を用いることで、連続雨量法で考慮できなかった先行降雨の影響が加味され、土砂災害のCLで捕捉可能な事例も見られ、災害の捕捉性が向上する可能性が確認された。一方で、災害箇所の過去の降雨履歴がCLに対して大きく下回る箇所も見られ、地域の土砂災害のCLの設定がピンポイントではなく、比較的広域で設定されているため、道路の事前通行規制においては、規制区間の降雨履歴を踏まえた検討が必要と考える。また、道路における土砂災害は、前述の事例に多く見られるような比較的小規模なものも多く、災害規模と道路への影響、事前の調査・設計での対応や点検・維持管理での対応の可否なども踏まえた規制の考え方の整理も必要と考える。

上記12事例のうち、10事例が土砂災害のCLより低い降雨で被災しており、凍上や雨水の影響による風化・脆弱化の進行によるものが5箇所、微細な谷地形による表流水や浸透水の影響によるものが4箇所、排水不良によるものが1箇所であった。また、12事例のうち新設のり面で3箇所被災していた。これらのような災害は、定期的な点検や補修による維持管理における対応や設計・施工時の配慮が重要である。また、被災した場合には、被災形態、降雨状況等を踏まえ、被災を繰り返さないような対策の検討が重要である。

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。

土壌雨量指数を指標値を用いることで、連続雨量法による通行規制の課題である先行降雨の影響が考慮され、災害の捕捉性が向上する可能性を確認することができた。

一方で、道路における土砂災害が比較的規模の小さなものが多く、これらの中には被災要因によって捕捉性が低い災害形態もあり、災害形態や規模、道路への影響なども考慮し、定期的な点検・補修等により対応する災害と規制により対応する災害形態を明確にする必要があることも確認できた。

これまでは、切土・盛土のり面の災害を主として検討を行ってきたが、今後は、道路に隣接する自然斜面災害も含め、実際の事前通行規制区間における災害および降雨状況や道路の影響等も踏まえた事前通行規制の考え方について検討・整理を行う予定である。

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) 加藤俊二, 酒井章光, 佐々木哲也: 道路の事前通行規制におけるレーダーアメダス解析雨量の適用性検討, 第 74 回土木学会年次学術講演会, 2019. 9

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、同時に連成解析による変状分析を行い、比較検討して安定性評価の研究を行っている。これまでに、融雪水が原因で変状が生じた道路盛土に対して地下水位計や間隙水圧計等を設置し、融雪期間における盛土の動態観測を2ヶ年間調査した。その融雪期間の盛土内最大地下水位に達したときの盛土の現地状況と解析結果を比較した結果、概ね一致した。さらに、過去の変状を解析で再現した結果、大きな変状が得られ、これも概ね一致した。その際に累積換算雨量を指標として比較検討し、関係性を求めた。

キーワード：融雪水、道路盛土、連成解析、累積換算雨量

1. はじめに

平成24(2012)年5月と平成25(2013)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(2016・2017)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³⁾。

平成30(2018)年度は、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、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⁴⁾。

令和元(2019)年度は、北海道の主要な国道における融雪水が要因で変状が生じたと推察できる道路盛土とそ

の周辺環境について現地調査を行い、連成解析による融雪水が道路盛土に影響を及ぼす際の浸透と挙動について分析した。

2. 解析による融雪水が道路盛土に影響を及ぼす際の浸透と挙動

国道275号の道路盛土(図-1)は、片切片盛の形状で造成され、融雪水が要因で変状が生じたと推察された変状が過去複数発生し、例年春先に谷側路面に変状が発生している。そこで平成29(2017)年11月17日から2シーズン融雪観測した(図-2)。ここの積雪は、平成30(2018)年2月28日に最大積雪深231cmを観測するなど豪雪地となっている。この変状について、融雪水が道路盛土に影響を及ぼす際の浸透と挙動を連成解析(定常解析)で分析した。

2-1 盛土の性状と解析条件

図-1に示す道路盛土のり肩部でオーガーボーリングおよび中間の盛土小段部でボーリングと現場透水試験、そして室内試験を実施した。粒度試験から、盛土とされる表層部Bsとその下部層の崖錐堆積物(dt)は、火山灰質礫質砂~砂質礫で構成されていた。このことから、現地発生材を用いて盛土したことが推測される。

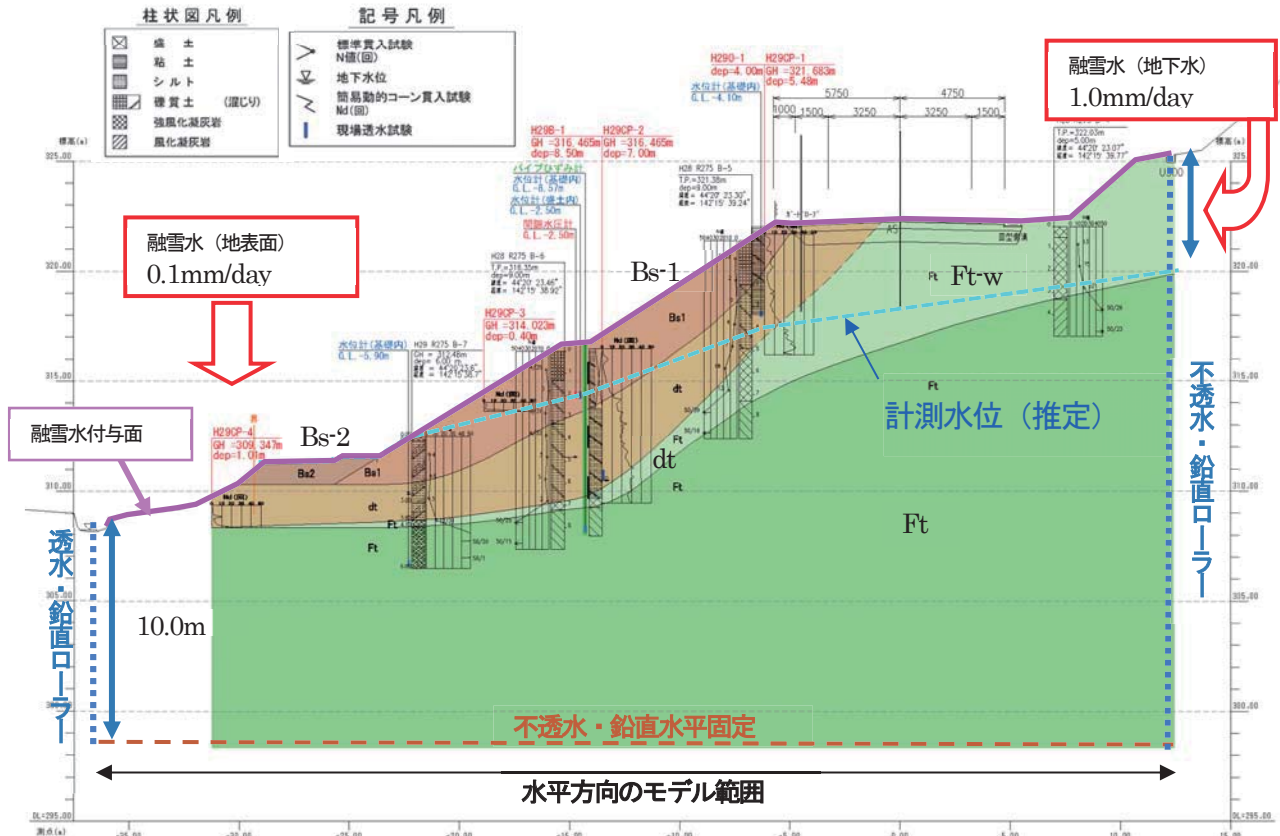
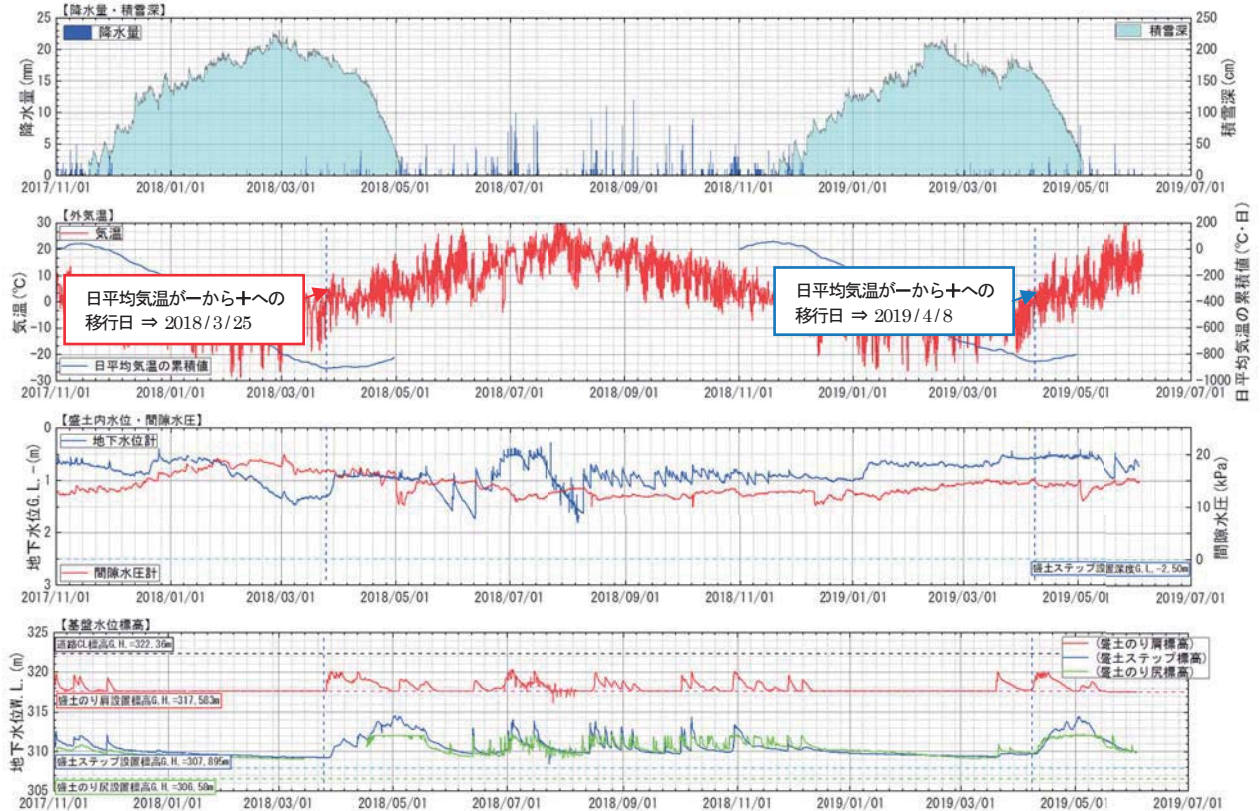


図-1 道路盛土内計測水位推定図と解析モデル図



道路 F.H 標高=322.36m, 盛土のり肩設置標高 G.H=317.583m, 盛土ステップ設置標高 G.H=307.895m, 盛土のり尻設置標高 G.H=306.58m

図-2 道路盛土の気温・地下水位の経時変化図 (R275)

表-1 土質定数

土質	変形係数	単位体積重量		粘着力	せん断抵抗角	ポアソン比	透水係数	モデル	不飽和 浸透特性
	E kN/m ²	湿潤 γ_1 kN/m ³	飽和 γ_{sat} kN/m ³	c kN/m ²	Φ °	v	k m/day		
Bs1, Bs2	8,400	16.4	16.7	6.9	26.6	0.35	1.56E-03	弾塑性	砂質土
dt	14,000	16.0	16.4	16.2	26.3	0.35	8.64E-03	弾塑性	砂質土
Ft-w	72,300	16.2	16.2	87.2	20.4	0.30	8.64E-03	弾塑性	砂質土
Ft	198,900	18.7	18.7	211.7	20.9	0.30	8.64E-04	弾塑性	粘性土

さらにその下部の基盤は凝灰岩で構成されている。その表層部付近で実施した簡易動的コーン貫入試験の結果から、盛土のり肩部の表層～深度 3.5m と盛土小段部の表層～深度 2.0m で $N_d \leq 10$ 回が確認された。「盛土のり面の緊急点検要領(案)(国土交通省 道路局)」⁵⁾には簡易動的コーン貫入試験による盛土材の脆弱性の目安として、盛土材が粘性土である場合 $N_d \leq 2$ 、盛土材が砂質土等である場合 $N_d \leq 10$ と記載されている。つまり、この結果を要領に照らし合わせると Bs 層と dt 層は、脆弱な盛土として評価されることとなる。

現地調査において、原位置試験とボーリングコアによる室内試験を実施した。さらに、過去の調査データも踏まえて表-1 に示す土質定数を得た。この数値を解析パラメータとする。

次に解析モデルの範囲について、水平方向は、山側は排水工から、谷側は河川までとし、鉛直方向は、山側は排水工の天端から、谷側は河床から地下 10.0m とした。融雪水等の浸透については、山側は不透水・鉛直ローラーとし谷側は透水・鉛直ローラーとした。

続いて融雪水と降雨を盛土に付与する降雨強度を検討した。山側からは、Ft-w 層からの地下水が供給されるとし、その初期値を 1.0mm/day とした。この数値については、石井・佐藤⁶⁾、石井⁷⁾が、冬期間でも積雪の融解は行われており、積雪が概ね 100cm を超えると冬期間を通じておよそ 100mm の底面浸透が生じている、と報じており、この場合、冬期間を約 3 ヶ月とすると 1 日約 1mm の底面融解があることから設定した。そして、盛土の表面からの供給水については、二次元平面解析のため、この断面の河川から山頂までの斜長と付与する表面斜長との長さの比を計算し、地下水量に対して 0.1mm/day の降雨強度パラメータとした。

2-2 浸透流解析

まずは、図-1 に示す地下水位計測から得た計測結果を図-2 に示す。現地踏査においてものり尻部から平坦部に

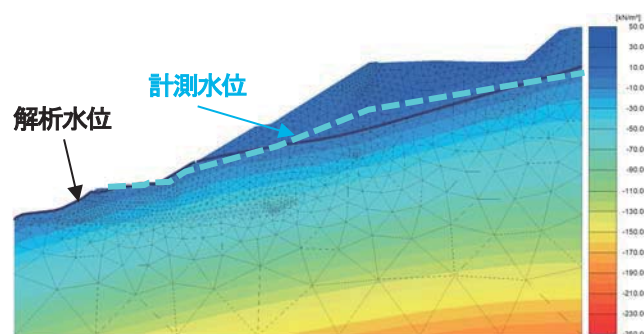


図-3 盛土内水位(計測と解析)と間隙水圧分布図
(水圧0の位置が水位線となる)

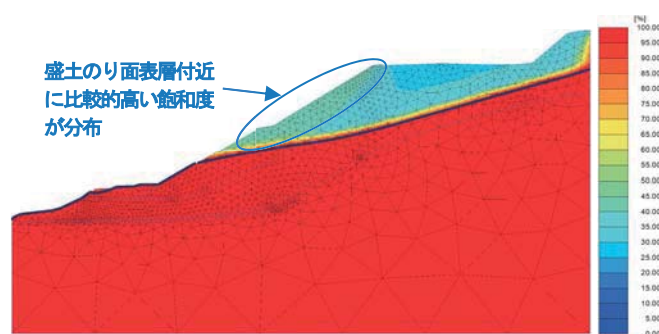


図-4 飽和度分布図

かけて、常時、水が浮いているのを確認しており、のり尻部は比較的高い位置に水は存在した。盛土小段部では多少水位は下がってはいるものの、のり肩部では水位が高い状況にあると推測される。これは地表面だけでなく、山側からの地下水による浸透を示唆している。

土質定数と解析モデル、水位分布を踏まえて解析した結果、間隙水圧分布図(図-3)と飽和度分布図(図-4)を得た。計測地下水位と解析水位とを比較するため、間隙水圧分布図に計測水位をあてはめた結果、その位置は、概ね一致しており、前述した供給水の付与の値は妥当と考えられる。また詳細に見ると、水位線より浅い位置にもかかわらず、のり面表層で比較的高い間隙水圧分布が確認され、さらに、飽和度分布図においても、のり面表層に比較的高い飽和分布が確認される。これらのことは、融雪期においては、地下水位が高くなることのみならず、

盛土のり面表層の水分量も多く、そのり面は不安定な状態であることが示唆される。

2-3 弾塑性解析

引き続き連動して、弾塑性解析を実施し、盛土の変形図(図-5)とせん断ひずみ図(図-6)を得た。変形図からは、のり面路肩部からのり尻付近の表層部分に集中した変形が分布している。特に盛土小段部から上部ののり面表層に高い変形が示されている。せん断ひずみ図では、Bs層とdt層の境界とその深部のdt層とFt-w層の境界にそれぞれひずみが発生している。そして、深部のdt層とFt-w層の境界ひずみの方が大きいにも関わらず変形図では、Bs層の変形が大きくなっている。これは、前述した図-1の柱状図にも示しているとおり、表層に近いBs層の方がdt層より脆弱になっているため変形が大きくなっていると考えられる。

以上、今回計測を開始してから最大の地下水位における盛土の安定性を検討した結果、大きな変状には至らなかった。現地も大きな変状は発生していないが、その時点での現地の状況はというと、図-5の写真に示したような状況であり、谷側路面に亀裂が発生し、路肩部がやや沈下した程度だった。つまり、解析結果と現地状況は、概ね一致していると考えられる。

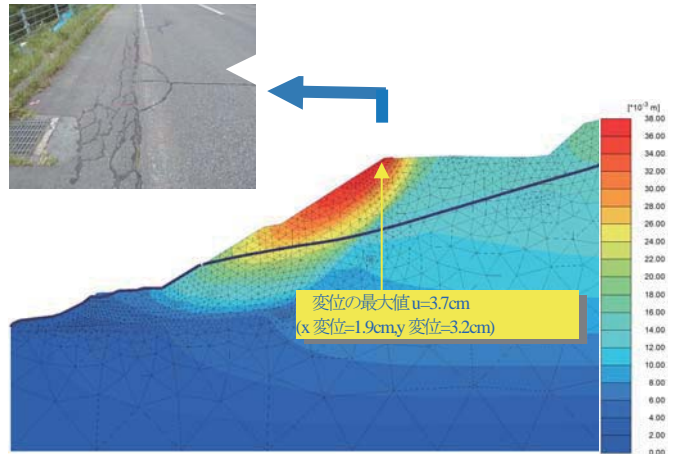


図-5 変形図と路面状況(写真)

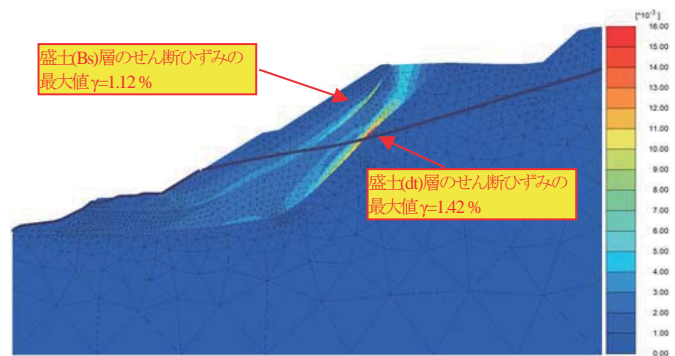


図-6 せん断ひずみ図

2-4 累積換算雨量を指標とした過去の盛土変状の再現

前項のとおり、計測時では大きな変状に至らなかったため、平成25(2013)年10月28日に発生した崩壊の再現を試みた。

試算するにあたり、解析パラメータの検討を行った。土質定数については変更しないこととした。融雪水と降雨を盛土に付与する降雨強度については、前項では山側からの地下水供給初期値として1.0mm/day、盛土表面からの供給量は、0.1mm/dayを付与していた。この基本降雨条件の根本となっている融雪とは、図-7(図-2から抜粋)の赤枠で示す融雪による地下水位が上昇し始めた平成30(2018)年3月25日から5月2日間の融雪量に関係していると考えられる。しかし、すべての積雪が融雪水として地下に浸透する訳ではなく、表面水として流出したり地下移動したりしている。積雪が融解してどの程度の量が地下に浸透するかは不明な点が多いが、この期間の全融雪量と降雨が地下水を形成していると考えられるので、この期間の融雪水量に降雨を加算した累積換算雨量を試算した。なお、融雪水量は、雪面低下法を用いて日々の積雪低下量(cm)から算出している。

その結果、この期間の累積換算雨量は1,209mm/40day

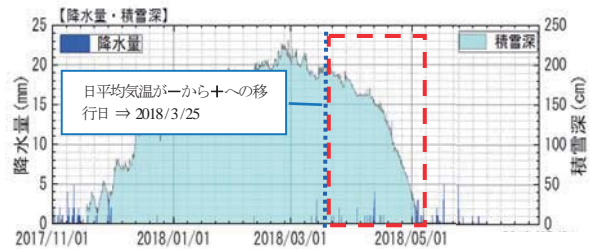


図-7 地下水位が上昇した2018/3/25から最高地下水位となった2018/5/2までの積雪深と降水量

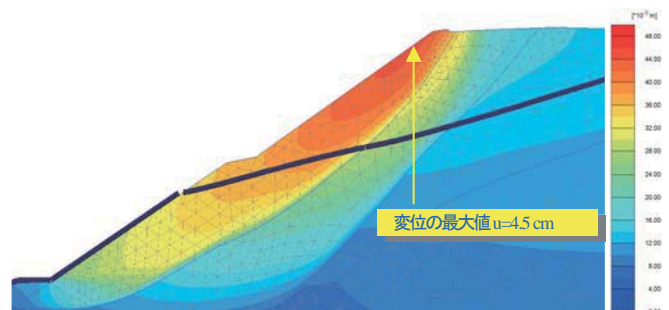


図-8 再現解析の変形図(拡大)

(30.2mm/day)であった。次に、崩壊した平成25(2013)年10月28日の前日までに降った延べ連続雨量を計算す

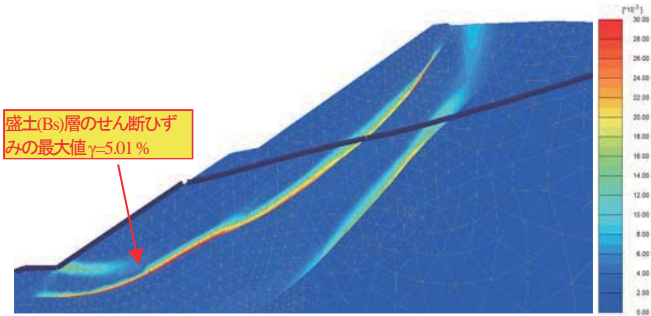


図-9 再現解析のせん断ひずみ図 (拡大)

ると35時間で61mmだった(前項と同様箇所の母子里の道路TMデータより)。これは、41.8mm/dayとなる。つまり基本降雨条件に対し、約40%増の累積雨量となる。表面と地下水の降雨強度を一樣に40%増加させて解析すると図-8, 9に示すように崩壊に至った。

4. まとめ

以上より、

- ・連成解析で変状メカニズムを推測するにあたり、解析パラメータの付与について、土質定数に関する資料は、できる限り多くの現地データ資料を収集すると良い。融雪を伴う降雨強度の考え方は、文献と累積換算雨量で検討した。解析結果と現地状況や計測データとの整合性を図り確認すること。
- ・今回は累積換算雨量をひとつの指標としたが、盛土が

不安定に近づく際の融雪気象の目安を確認するための定量的な指標の検討が必要である。

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, 2013.
- 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, 2014.
- 3) 青木卓也, 山梨高裕, 橋本聖, 林宏親: 急激な融雪による道路盛土変状に対応する保全対策技術の検討, 社地盤工学会北海道支部 技術報告集 第58号, p115-120, 2018.
- 4) 青木卓也, 畠山乃, 橋本聖: 融雪水が道路盛土変状に及ぼす影響と融雪期の盛土点検, 社地盤工学会北海道支部 技術報告集 第59号, pp211-214, 2019.
- 5) 国土交通省 道路局: 盛土のり面の緊急点検要領(案), 2010.
- 6) 石井吉之, 佐藤大輔: 積雪底面融解量の場所による変化と流域平均量, 北海道大学地球物理学研究報告, 第75号, pp59-71, 2012.
- 7) 石井吉之: 水資源としての雪, 水環境学会誌 第30巻 第2号, pp58-61, 2007.

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）

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】

本研究では、融雪期に発生する斜面崩壊による被災を回避するために、融雪を考慮した事前通行規制基準の開発を目標とし、現状で入手が容易な気温等の気象情報のみから融雪水量を簡便に推定する手法として改良 Degree-Hour 法を考案し、その現地検証として、過去に融雪による崩壊の発生した地区内の複数地点で 5 年に亘り融雪状況を調査してきた。R1 年度は、調査データを基に発災地点の過去の融雪水量を推定し、降雨との合算水量指標の試算から、事前通行規制の基準値の検討を行った。その結果、降雨をリセット条件とした降雨と融雪の連続合算水量を指標とすることで、崩壊発生時のみで通行規制となる基準値案を試算することができた。

キーワード：融雪、斜面災害、融雪水量推定手法、融雪合算水量、連続雨量

1. はじめに

北海道などの積雪寒冷地では、融雪期に切土のり面や自然斜面で表層崩壊（以下崩壊という。）が多発する傾向がある。これら融雪期の崩壊には融雪水が大きく影響しており、降雨が少ない場合にも崩壊が発生することもある。しかしながら、道路の通行管理は雨量によって規制されており、融雪は考慮されていないのが現状である。そこで、融雪期の斜面崩壊による道路被災を回避するために、融雪水量を加味した新たな通行規制基準の設定が必要と考え、過去の被災事例に基づき検討を行った。

2. 検討方法

2.1 任意地点の融雪水量係数の算出方法

融雪期の斜面崩壊発生地点の周辺 17 地点で、2015 年から 5 年に亘り（その内、5 箇所は 2018 年から）、融雪期に積雪深・全層積雪水量・気温等の積雪状況を毎週調査し、差分から融雪水量の把握を行ってきた。融雪には日当たりが影響するため、調査地点の特性を示す情報として、斜面の向きや勾配を考慮して GIS により解析した日射量分布を、調査地点位置図と合わせて図-1 に示す。

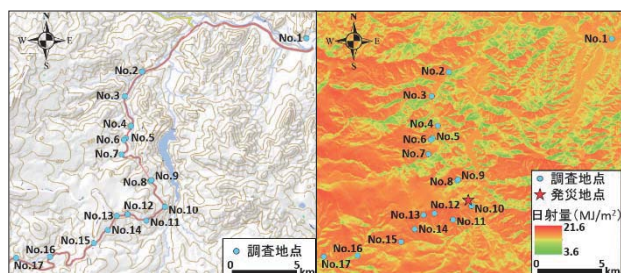


図-1 調査地点位置と解析日射量分布状況

過年度に提案し改良 Degree-Hour 法と名付けた融雪水量推定式を式-1 に示す。これは、累積融雪水量とプラス気温の合計値である積算気温との相関に基づき、過去の観測データから融雪水量係数を算出した後は、気温情報のみから融雪水量を推定するものである。

$$\text{融雪水量}[\text{mm}] = \text{融雪水量係数}[\text{mm}/\text{T}] \times \text{プラス気温}[\text{T}] \cdots (1)$$

17 地点において、式-1 の推定式に基づき、調査データから年毎に融雪水量係数を割り戻す形で計算し、調査期間の融雪水量係数の平均値をその地点の標準値と定めた。

次に、各地点の解析日射量と融雪水量係数との回帰式を求めた上で、地形情報から解析した任意地点の日射量を回帰式に当てはめることで、その任意地点の融雪水量係数を推定した。

2.2 降雨・融雪合算水量指標の算出方法

降雨と融雪水を合算した水量指標に関し、現在道路通行規制基準で用いられている連続雨量に倣うことにした。連続雨量は、時間雨量 2mm を 4 時間観測された場合にリセットされる数値であるが、融雪においては、気温が 0°C 以上であれば数週間でも融雪が継続し、加算値は大きな値を示すことになる。そこで、降雨と融雪の合算方法の試案の 1 つとして、降雨の連続雨量と同じリセット条件を採用し、連続合算水量を算出した。

2.3 発災地点における規制基準値の検討方針

2012 年の発災年を含むそれまでの過去 5 年間の融雪期において、連続合算水量の経時変化をグラフ化し、発災時点の連続合算水量と発災以前の過去最大値との関係进行分析し、崩壊発生を見逃さず、かつ、空振りが少なくなるような適切な規制基準値の設定が可能かを検討した。

3. 検討結果

3.1 発災地点での融雪水量係数の算出

17 地点における融雪水量係数の単年値と平均値及び GIS で解析した累積日射量を表-1 に示す。ここで、累積日射量のばらつきが大きかったため、全地点の平均値を中心に±2σ を外れた値を異常値と判断し、No.6 と No.8 の 2 地点を除外した。残りの 15 地点のデータを基に、融雪水量係数の地点平均値と累積日射量との相関を求めた(図-2)。線形 1 次の回帰式の決定係数は 0.68、相関係数は 0.83 となり、両者の相関を確認できた。図-1 に示した GIS で解析した発災地点の累積日射量は 1374 MJ/m² となり、この回帰式に基づくと、発災地点の融雪水量係数を 0.12 と推定できた。

表-1 調査地点の融雪水量係数と累積日射量

地点名	融雪水量係数 (kg/m ² /°C/hour)					累積日射量 (MJ/m ²)	異常値		
	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年		1次除外	2次除外	
No.1				0.089583	0.10125	0.095417	1392	1392	1392
No.2				0.163333	0.111667	0.1375	1390	1390	1390
No.3	0.138333	0.1275	0.117083	0.1425	0.08375	0.121833	1449	1449	1449
No.4	0.135417	0.182917	0.2275	0.157917	0.11875	0.1645	1419	1419	1419
No.5	0.153333	0.16125	0.135417	0.140417	0.13375	0.144833	1464	1464	1464
No.6	0.120417	0.152083	0.135	0.155417	0.105	0.133583	959	削除	削除
No.7	0.143333	0.177917	0.17	0.185417	0.116667	0.158667	1495	1495	1495
No.8		0.135	0.183333	0.175417	0.1675	0.117917	0.155833	1240	削除
No.9	0.187917	0.179167	0.162083	0.2225	0.142917	0.178917	1505	1505	1505
No.10	0.172083	0.22	0.194167	0.181667	0.113333	0.17625	1560	1560	1560
No.11	0.130833	0.145417	0.144167	0.178333	0.145833	0.148917	1575	1575	1575
No.12	0.16875	0.217083	0.21	0.2	0.204583	0.200083	1602	1602	1602
No.13	0.19375	0.1675	0.25	0.16375	0.193333	0.193667	1640	1640	1640
No.14				0.249583	0.143333	0.196458	1598	1598	1598
No.15	0.19875	0.254167	0.259167	0.255417	0.22125	0.23775	1630	1630	1630
No.16				0.155417	0.080833	0.118125	1376	1376	1376
No.17				0.165417	0.183333	0.174375	1468	1468	1468

累積日射量の異常値除外判定: μ±1σ区間内 μ±2σ区間内 μ±2σ区間外(←異常値として除外)

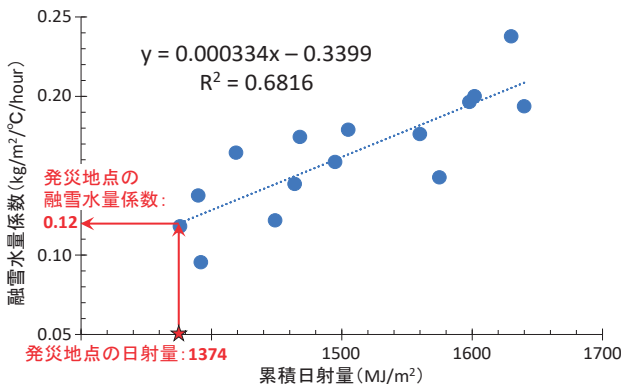
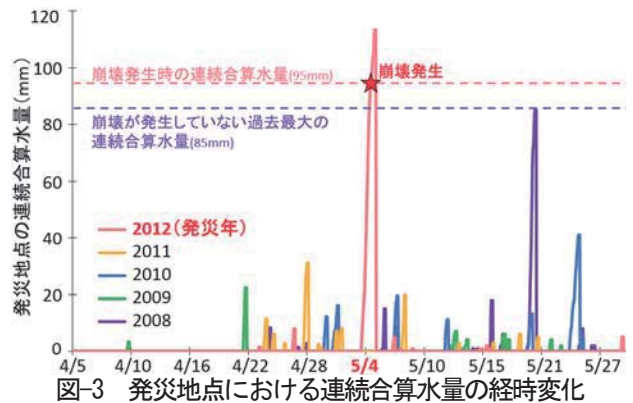


図-2 融雪水量係数の地点平均値と累積日射量の関係

3.2 発災地点の降雨・融雪合算水量の経時変化

2012 年の発災年を含むそれまでの過去 5 年間の融雪期において、発災地点の最寄りのテレメータ観測所で記録されていた気温データと前節で求めた融雪水量係数から、1 時間ごとの融雪水量を計算した。その値と同じテレメータ観測所の降雨データとをリセット条件を加味して連続合算水量を計算し、4 月から 5 月にかけての融雪期の経時変

化を図-3 に示した。



3.3 発災地点の事前通行規制基準値の試案結果

発災した 2012 年の連続合算水量の最大値は 113mm で、発災時刻での値は 95mm であった。一方、発災以前の 2008 年までの連続合算水量の最大値は 85mm であった。この災害発生の有無と連続合算水量値の関係から、事前通行を規制する基準値を 85~95mm の範囲内で設定できていれば、2012 年の災害発生に対しては見逃しなく被災を回避でき、その上、発災以前の 2008~2011 年においては空振りとなる規制は生じておらず、適切な基準値の試案結果となった。

4. まとめと今後の課題

気温情報のみから簡便に推定できる融雪水量と降雨量との合算値を規制基準とすることで、被災回避につなげられる可能性を確認できた。また、本提案手法は、気温のみから融雪水量を推定できるため、気温と降水量の予測情報があれば、数日後の合算水量が予測でき、通行規制体制の準備もし易く、有効といえる。

ただし、本報告は融雪期に発生したたった 1 事例の斜面崩壊に対するものであり、実際に事前通行規制区間において規制基準を設定するためには、区間内全体で今後発生し得る崩壊に対応できる必要があり、更なる事例検討が求められる。

また、本検討では、融雪と降雨の合算水量指標として、降雨時リセットをともなった連続水量を試しに取り上げたが、今後は、リセット条件を必要としない半減期を考慮した実効雨量や時間遅れを考慮できる土壌雨量指数なども参考に、融雪と降雨の合算に適した水量指標の検討についても行っていきたい。

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。R1年度は、UAV撮影した岩盤斜面写真から SfM 技術により構築した三次元地形モデルを基礎に、露頭における開口亀裂の走向・傾斜調査や空中写真によるリニアメント解析から、開口亀裂面の交差状況を立体的に再現した。その上で、開口亀裂に囲まれて地山から縁切られた明瞭な崩壊岩体だけではなく、近傍の崩壊跡等から崩壊に繋がると想定される面構造と開口亀裂との組み合わせによる潜在的な崩壊岩体をモデル化する手法を提案し、漏れなく抽出できるようになった。
キーワード：岩盤斜面、UAV、SfM、三次元地形モデル、リニアメント

1. はじめに

岩盤斜面崩壊の大きな素因として、斜面内部の不連続面構造が挙げられる。不連続面は、規模の大きな分離度の高い層理面や断層破碎帯から規模が小さく卓越方向を持つ節理群まで様々な種類があり、それらの組み合わせが形状等を規制して崩壊が発生すると考えられる。そこで、斜面や不連続面の形状や位置関係から今後起こり得る崩壊モデルの推定手法を提案し、その結果を例示する。

2. 検討方法

岩盤斜面の想定崩壊岩体のモデル化手法を以下に示す。モデル化したい崩壊岩体の明瞭さの違いによって、作業手順は2段階となっている。

[第1段階]；開口亀裂面の組合せによって、斜面から縁切りされる明瞭な崩壊岩体のモデル化方法

- (a) 露頭で不連続面の成因や走向・傾斜等を調査する。
 - (b) SfM 技術により UAV 撮影写真から構築した三次元地形モデル上に、亀裂面の位置と方向を再現する。
- [第2段階]；内在面構造と開口亀裂面の組合せによって、斜面から縁切りされる潜在的な崩壊岩体のモデル化方法
- (c) (a) (b)に加え、空中写真等から調査地域のリニアメント解析と現地地形の形成に関わる崩壊跡の分析を行う。
 - (d) 崩壊形成面と開口亀裂面で、不連続面の成因・性状や走向・傾斜等のセンスが同じとなる面構造を抽出する。
 - (e) 抽出したセンスの同じ面を並行移動させた面と開口亀裂面を組み合わせることで崩壊岩体をモデル化する。

3. 検証結果

3.1 明瞭な崩壊岩体のモデル化

露頭で亀裂を調査し、走向・傾斜等の亀裂の諸元を図-1

に示す形式で整理した。



図-1 露頭で観察される亀裂の調査結果例

また、UAVによる空中からの岩盤斜面写真から、SfM技術を用いて三次元地形モデルを構築し、その表面に写真を貼り付け、斜面全体の俯瞰図を作成した（図-2）。



図-2 UAV 写真を表面に貼った三次元地形モデル

その上で、図-3に示すように、地形モデル上に開口亀裂平面を再現してモデル化し、斜面形状と亀裂平面の交差状況を把握した結果、開口亀裂面は会合せず、開口亀裂によって斜面から切り出されるような明瞭な岩体は抽出されなかった。

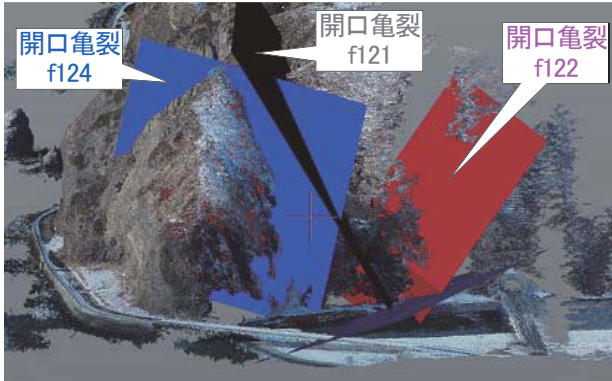


図-3 斜面形状と開口亀裂を再現した三次元地形モデル

3.2 潜在的な崩壊岩体のモデル化

実際の岩盤崩壊は、露頭で開口亀裂として現れない以外の斜面内部の潜在的な不連続面にも規制されて発生すると考えられる。そのため、図-4に示すように、空中写真からリニアメント解析を行い、露頭レベルの亀裂と空中写真レベルの面構造の対比を確認した。

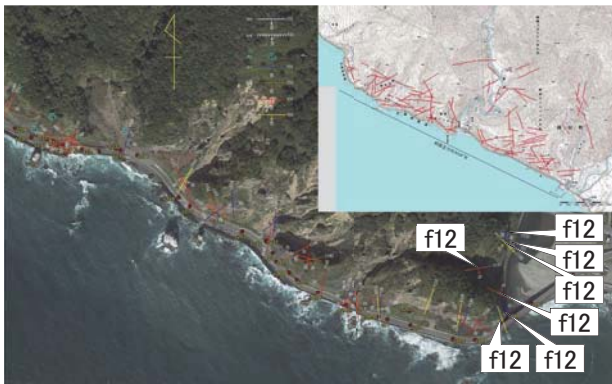


図-4 調査地域におけるリニアメント解析結果

当該地区は、海岸沿いの急崖斜面であり、波による浸食と崩壊の繰り返しにより、後退しつつある斜面である。そのため、崩壊跡地形である現在の斜面形状を読み取ることで、過去の崩壊を規制したであろう面構造を推定した。リニアメントと開口亀裂における、卓越方向の分析結果を図-5に、沢壁面と開口亀裂で走向・傾斜の一致する面構造の抽出例を図-6に示す。図-6に示すような、沢壁面などの過去の崩壊規制面と露頭で確認される開口亀裂面において、走向・傾斜や性状の一致が見られれば、その近傍では、同じ走向・傾斜を持つ面構造によって、今後再度崩壊が発生する可能性が高いと判断できる。

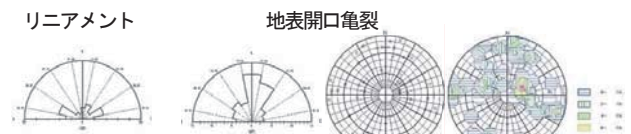


図-5 リニアメントと開口亀裂における卓越方向分析

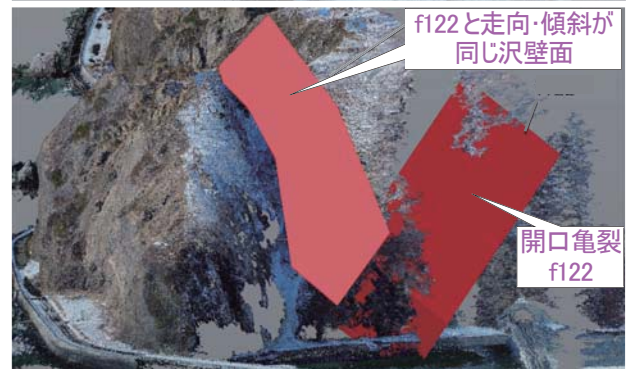
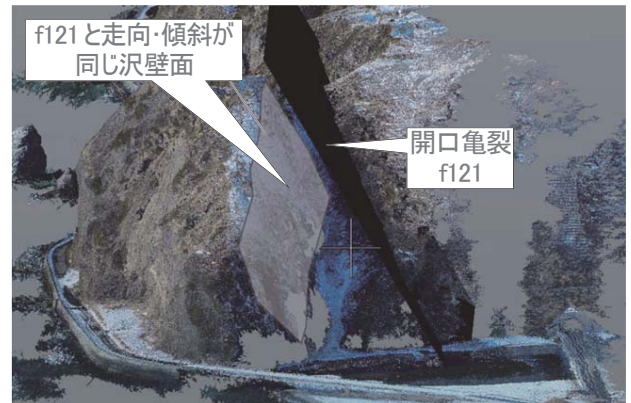


図-6 走向・傾斜が一致する面構造の抽出結果

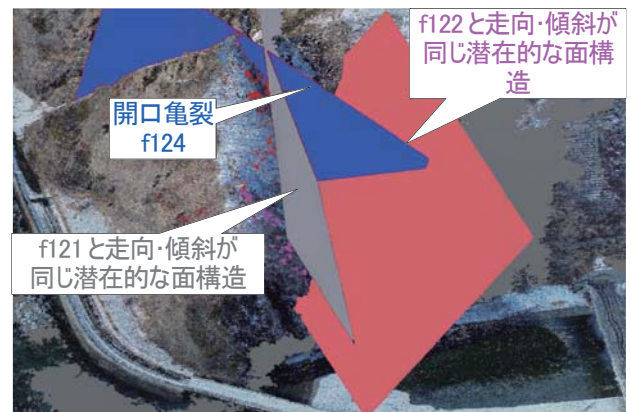


図-7 想定面構造による潜在的な崩壊モデルの推定

以上から、走向・傾斜が同じ面構造と開口亀裂面を組合せることで、潜在的な崩壊岩体をモデル化できた(図-7)。

4. まとめ

今回提案した岩盤崩壊モデル化方法によって、開口亀裂のみによって囲まれた明瞭な岩体だけではなく、開口亀裂と一致する走向・傾斜の面構造の考慮により、潜在的な崩壊岩体まで漏れなくモデル化することができた。

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：葛西 聡、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、実規模擁壁模型を用いた重錘衝突による擁壁の損傷に着目した実験および設計手法との比較を実施し、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阻止面を再現した部材実験と数値解析を実施し、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、それらに基づく耐衝撃設計法を提案することを最終目的としている。

令和元度はこの耐衝撃設計法を確立するための基礎的検討として、耐衝撃挙動を把握するための基礎実験および数値解析等を実施した。

2. 落石防護擁壁

2.1 実験概要

擁壁の実験はラフテレーンクレーンを2台使用し、吊り下げた重錘を所定の高さまで引き上げ、振り子運動によって図-1に示す高さ2m延長8mの擁壁中央部（地盤から高さ1.6m）に水平衝突させることにより実施した。

2.2 実験結果と考察

図-2には、重錘衝突速度と最大回転角の関係を示す。図中には、落石対策便覧により算定した回転角も記載した。便覧では反発係数 $e = 1$ （完全弾性衝突）と仮定して計算しているが、実際には完全弾性衝突には至らないものと推察され、最大回転角は反発係数 $e = 0$ （完全非弾性衝突）とする場合とほぼ対応することが分かった。図-3には、重錘衝突速度と最大衝撃力の関係を示す。図中には振動便覧式のラーメ定数を変化させた算出結果も記載した。振動便覧式は、 $P_{\max} = 2.108 (mg)^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5}$

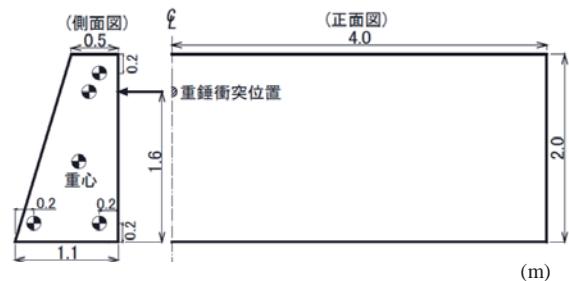


図-1 擁壁模型の形状寸法

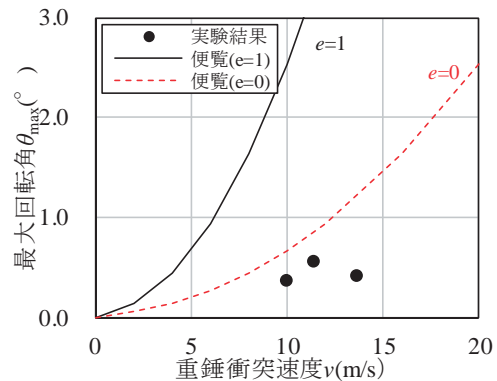


図-2 重錘衝突速度と最大回転角の関係

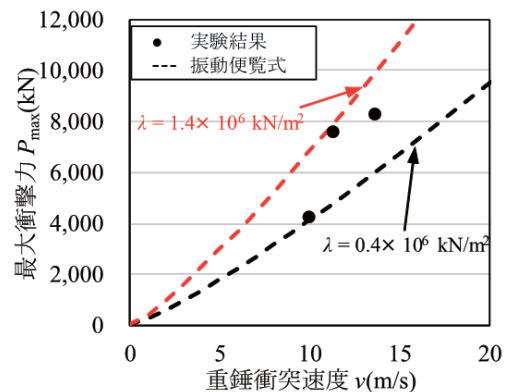


図-3 重錘衝突速度と最大衝撃力の関係

で表され、 P_{max} : 落石の衝撃力 (kN)、 m : 落石の質量 (ton)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 λ : ラーメの定数 (kN/m^2)、 H : 落下高 (m) である。ラーメ定数 $\lambda=1.4 \times 10^6$ kN/m^2 を使用することで、最大衝撃力を概ね安全側で評価可能であることが分かる。

3. 従来型落石防護柵

3.1 実規模実験

従来型落石防護柵の保有性能を確認するための実規模実験として、図-4に示す柵高2m、延長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）を行った。その結果、慣用設計法で用いられている算定モデルとは異なる間隔保持材と中間支柱の間に衝突させた場合であっても、図-5に示すように、可能吸収エネルギーの設計値に相当する衝突エネルギーを保有する重錘が阻止面を貫通しないことを確認した。なお、間隔保持材に重錘が衝突する場合の捕捉性能については過年度に確認している。

3.2 部材実験と再現解析

設計時には想定されていない、ワイヤロープ間隔よりも小さい径の落石が衝突する際のひし形金網の補足性能を把握することを目的に、図-6に示すような支柱間隔が3m、柵高さ2mの従来型落石防護柵の1スパン分の部分模型に対する重錘落下衝撃実験を実施するとともに、三次元弾塑性衝撃応答解析による再現解析を実施した。その結果、実験においては図-7(b)に示すような実構造物の被災状況と類似したひし形金網の貫通状況も確認することができた。また、素線径を4.0mm以上のひし形金網でワイヤロープ間隔と同程度の直径を有する落石の補足可能性を確認できた。再現解析においては、図-8に示すように重錘を補足した実験ケースの重錘貫入量やワイヤロープ張力等を大略再現可能な要素分割や構成則の妥当性を確認できた。

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、回転角は便覧において反発係数 $e = 0$ (完全非弾性衝突) とする場合とほぼ対応する。衝撃力は、ラーメの定数 $\lambda=1.4 \times 10^6$ kN/m^2 とする振動便覧式を用いて概ね安全側で評価可能である。
- 2) 落石防護柵では、実規模供試体を用いた衝撃実験結果から、その保有性能を明らかにした。また、阻止面を再現した部材実験から、実構造物の被災状況の再現やその保有性能を把握するとともに、実験結果

を大略再現できる数値解析モデルを示した。

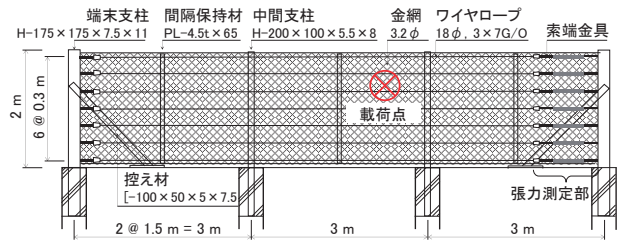


図-4 従来型落石防護柵の供試体概要図



図-5 衝撃実験後の供試体と重錘

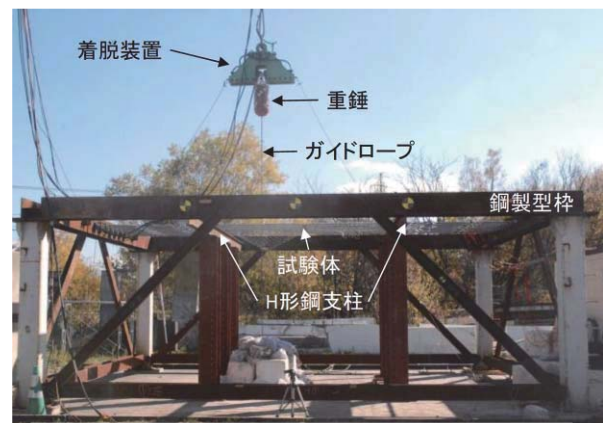
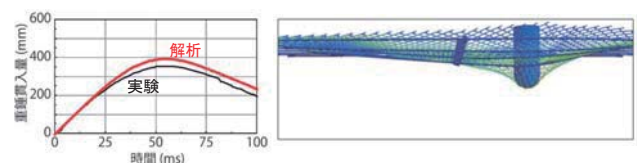


図-6 部材実験の様子



(a) 重錘を捕捉した場合 (b) 金網を貫通した場合

図-7 実験後の阻止面の状況



(a) 時刻歴応答波形 (b) 変形状況 (最大貫入時)

図-8 再現解析結果の一例

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：森川博邦、橋本 毅、山田 充
山内元貴、油田信一

【要旨】

大規模自然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、自然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、令和元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（2011年）や西日本豪雨災害（2018年）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自然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、二次災害の危険や不安定な地盤がある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。こ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、オペレータは離れた場所から操作を行うことで安全を確保できる（図-1）。この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）等の大規模自然災害や、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、自然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

令和元年度は、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の最先端技術の一つとして、アラウンドビューシステム（以下 AVS）の活用を提案し、適用性について検証実験を行った。続いて昨年度に「オペレータの個人特性が施工効率に大きく影響している」という仮説を導出したため、本年度はその仮定に基づきオペレータ選定手法の検討を行った。その結果、直接目視遠隔操作が選別手法となる可能性があることが判明した。また、無人化施工の施工効率は、通常施工（搭乗施工）に比べ約50%程度と低い値となっているが³⁾、その原因を調査する検証実験を行った。その結果、施工効率

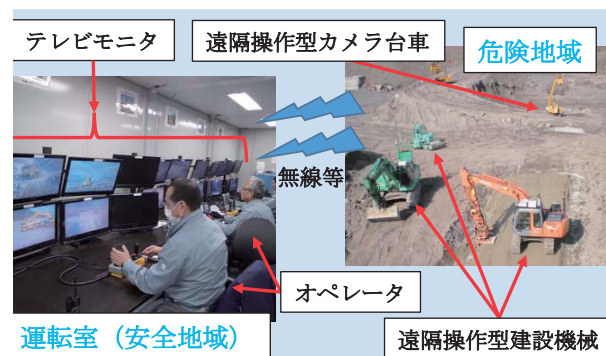


図-1 無人化施工イメージ

低下の最も大きい原因は、視覚情報である可能性が判明した。

2. AVS 適用性検証

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。この AVS は外部カメラ省略による迅速運用への効果が期待されている。本年度はこの AVS と通常の無人化施工システムの施工効率の相違について検証実験を行った。

実験は、図-2 に示す対象物を、同じく図-2 に示す開始地点から A、B、C それぞれの場所へ移動させることをそれぞれ 2 回ずつ行い、すべての移動作業 (6 回) のトータルタイムを計測した。オペレータは、熟練オペレータ A (建設会社社員) と非熟練オペレータ B (土木研究所研究員) の 2 名とし、上記の実験をそれぞれ、「従来の外部カメラを用いたシステム (外部カメラ 2 台と車載カメラ 1 台の映像：図-3)」「AVS (俯瞰映像と車体前方の映像：図-4)」を使用して行った。

実験結果を図-5 に示す。図-5 によると、AVS と従来システムのトータルタイム差は、オペレータ A、B ともに約 30% 程度 AVS の方が大きくなっており、オペレータ熟練度によらず AVS の方が従来システムにくらべ施工効率が劣る可能性があることがわかる。これは、本実験のような作業を行う場合、対象物と油圧ショベルバケットの相互位置を把握することが必要であるが、従来システムは外部カメラの設置場所で上記情報を把握できるのに対し (例えば建設機械横からの映像)、AVS の映像は建設機械を上から見た映像のみであり、上記情報が十分に把握できないことが原因と考えられる。

上記結果から、AVS は従来システムに比べ施工効率が劣る可能性があるが、外部カメラを省略できる可能性があり、迅速な無人化施工の運用には非常に有効な技術である。特に外部カメラの設置は、災害発生地の危険地帯であるため、その省略は安全面における効果も大きい。今後は AVS の施工効率向上に関して調査を行う予定である。

3. 無人化施工に適したオペレータ選定手法の検討

平成 30 年度の検証から、「オペレータの個人特性が無人化施工の施工効率に大きく影響している」という仮説が導出された。そこで令和元年度はその仮定に基づき、施工効率の高いオペレータ (無人化施工に適したオペ

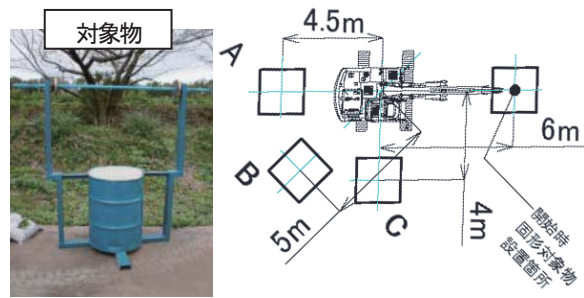


図-2 AVS実験概要



図-3 従来システム映像



図-4 AVS映像

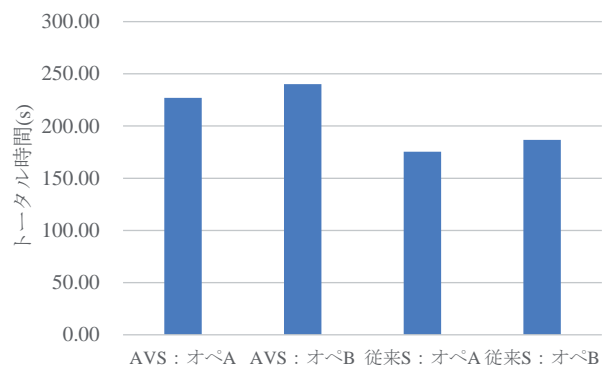


図-5 AVS実験結果

レータ) 選定手法の検討を行った。

通常施工と無人化施工の大きな相違点は、映像を介して操作を行うか否かである。そしてその映像は、建設機械運転席に搭載した車載カメラ映像のみではなく、建設

機械を外から見る外部カメラ映像が加わっている(図-1, 3)。これは、映像は奥行き感がなく画角も人間の眼より狭いため、車載カメラ映像のみでは周辺状況などの把握が困難であり、外部カメラ映像を追加情報として加えているからである。そこで、「通常施工と無人化施工の施工効率の差は、外部カメラ映像、すなわち車外から見た映像、を有効に活用できるか否かである」と仮定し、車外から見た映像として「地上からの直接目視による遠隔操作(図-6)(以下「直接目視操作」)と「従来の映像を介した無人化施工(以下「従来遠隔操作」)」の関連を調査する検証実験を行うこととした。

実験は、概往研究³⁾にて提案された「モデルタスクⅡ」を用い、直接目視操作と、遠隔操作を10名のオペレータにて5回ずつ行った。

各オペレータ5回のサイクルタイムを平均した結果を図-7に、縦軸を直接目視操作のサイクルタイム、横軸を従来遠隔操作のサイクルタイムとし各個人のデータをプロットしたものを図-8に示す。図-8から、直接目視にて効率が高いオペレータは、遠隔操作でも効率が高いことがわかり、直接目視操作の結果から遠隔操作の施工効率が高いオペレータを判定可能であると言える。

この直接目視操作を用いてオペレータの選別を行うことにより無人化施工の施工効率向上が可能である。例として無人化施工を行っている現場に2名のオペレータを派遣することを目的に、図-7にてオペレータの選定を行った場合の効果を試算してみる。図-7から、現場へ派遣する2名として直接目視操作サイクルタイムが短い上位2名のオペレータを選定すると、被験者Aと被験者Fとなる。この2名の従来遠隔操作サイクルタイム平均は184(s)であり、一方10名全員の従来遠隔操作サイクルタイム平均は251(s)である。したがって、直接目視にてオペレータの選別を行うと、無作為でオペレータを派遣するのと比較して施工効率は約30%向上することになる。直接目視操作は、映像システムが不要なため、遠隔操作油圧ショベルがあれば容易に実施することができる。

したがって本手法は、無人化施工の施工効率を向上させるために非常に有効であると言える。

4. 無人化施工効率低下原因検討

無人化施工の施工効率は、通常施工(搭乗施工)に比べ約50%程度と低い値となっている³⁾。無人化施工と通常施工の相違点は、①操作インターフェース、②視覚情報、③音・振動などの有無、などが挙げられるが、どの要因が最も影響が大きいかは明らかにされていない。原



図-6 直接目視操作

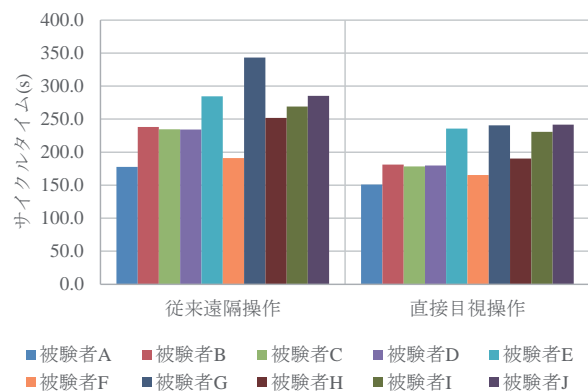


図-7 サイクルタイム個人別

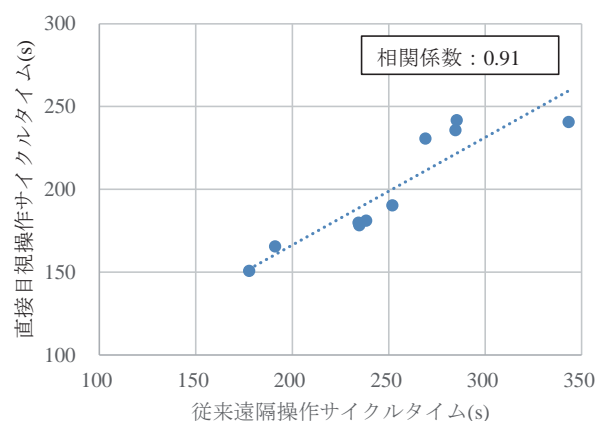


図-8 従来遠隔操作と直接目視操作の関係

因を明らかにすることで、施工効率向上研究を効率的に進めることが可能となる。そこで、その原因を調査する検証実験を行った。





実験は搭乗操作から一つ一つ条件を変えていき、どの段階の施工効率低下が大きいかで検討を行った。具体的には、表-1に示すように、搭乗操作から条件を変えて、既往研究³⁾にて提案された「モデルタスクⅡ」を3名のオペレータにて行いサイクルタイムを計測した。

3名の結果を図-9に示す。なお、図-9の縦軸は搭乗操作のサイクルタイムを100とした場合の割合で表している。図-9によると、オペレータA、Bは条件②③間でサイクルタイムの増加が最も大きくなっており、したがって視覚情報の変化（カメラ映像に変わる）が施工効率低下の最も大きい要因であると推測される。一方オペレータCはすべての条件間におけるサイクルタイム増加がほぼ等しく、特に一つの要因が原因ではないと推測される。オペレータの実験数が少ないため、令和2年度も引き続き実験を行い、傾向を調査する予定である。

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) 植木睦央, 猪原幸司, 北原成郎：「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) 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一：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, 山内元貴, 藤野健一, 油田信一：無人化施工における HMD を用いた画像表示システムの効果について, 建設ロボットシンポジウム, O3-1, 2018.

表-1 実験条件

実験条件	① (搭乗)	② 搭乗+JS	③ 搭乗+JS+HMD	④ 操作室+JS+HMD
操作インターフェース	運転席レバー	ジョイスティック	ジョイスティック	ジョイスティック
視覚情報	運転席から直接目視	運転席から直接目視	カメラ映像 (HMD)	カメラ映像 (HMD)
音・振動など	有 (搭乗)	有 (搭乗)	有 (搭乗)	無 (操作室)
				
注：JS=ジョイスティック, HMD=ヘッドマウントディスプレイ HMD内の映像は、通常の無人化施工と同様に、運転席映像と俯瞰映像を並べたものとした ⁴⁾				

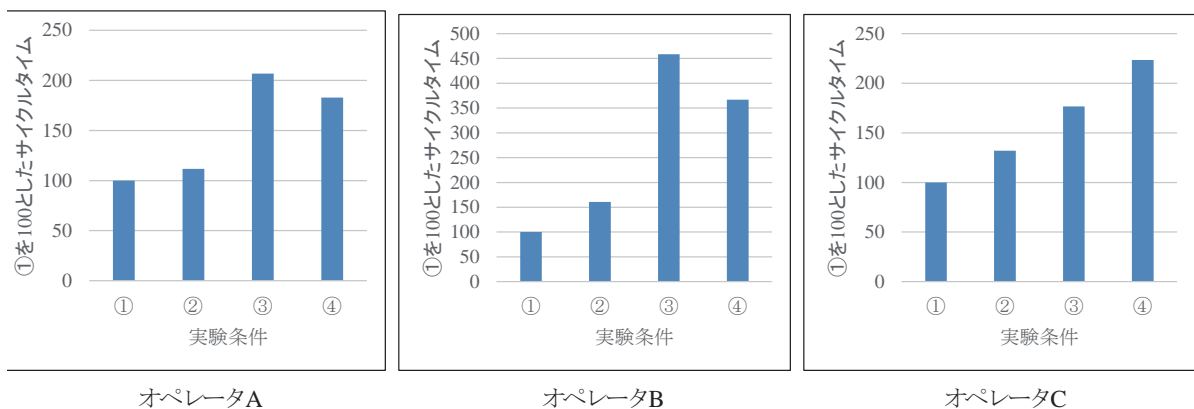


図-9 施工効率低下要因検証実験結果