

### 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 : 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)、地質・地盤研究グループ (地質チーム、土質・振動チーム)、技術推進本部 (先端技術チーム)、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 2 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

噴火後の降下火砕物は、その後の降雨により土石流発生が頻発する一因と言われる。平成 30 年度には、自動降灰量計の観測データの補間に、降下火砕物の堆積層厚が火口からの距離のべき乗で薄くなる関係式を適用した。令和元年度は、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のコヒーレンス解析による降灰範囲の推定を試みた。これらの手法は適用時期が現地調査後に限定されるため、令和 2 年度は三宅島 2000 年噴火と御嶽山 2014 年噴火を対象とし、噴火直後に得られる噴火規模のみを入力値とした場合の堆積厚分布を推定可能な方法について検討した。その結果、噴火規模の大小により推定モデルを選択する必要があるものの、適切なモデルを用いることにより降下火砕物の堆積層厚分布を適切に推定できることが分かった。

###### 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 20～23 年度の直轄国道斜面災害、平成 29 年九州北部豪雨災害、平成 30 年 7 月豪雨災害を対象として、現地調査・崩壊地判読等によって道路斜面災害の特徴の整理・原因分析、点検着目点・対応策の検討、フラジリティ解析による定量的な高リスク災害箇所抽出手法の検討を行った。フラジリティ解析では地質の違いによって崩壊発生確率が異なる結果が得られた。

### ③融雪期のり面・斜面分野における点検・管理技術の開発

北海道の国道における道路盛土の変状には、台風や前線がもたらす降雨、地震によるものだけでなく積雪寒冷地特有の融雪水の影響があり、近年、通行止めを伴う道路盛土の変状が発生している。本研究は、積雪寒冷地における融雪水が要因となる道路盛土の変状メカニズムの解明や道路盛土の安定性、保全対象として管理手法の提案を目的として進めている。令和2年度は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、積雪寒冷地特有の盛土災害に対する点検手法を取りまとめた「北海道の国道における融雪期の道路盛土点検マニュアル（案）」を作成した。

## (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

#### a) 噴火後の土石流氾濫範囲推定手法の高度化等

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ことを目的としている。令和2年度は、前年度に開発した任意の地点における土石流流量を推定できる分布型土石流解析モデルと、令和2年度に開発した土石流氾濫範囲推定モデルとの一体型の数値解析法を構築し、これを過去の土砂災害に適用した。その結果、計算による流動深と実現象とで差が生じたエリアがあったが、これは用いる地形モデルに水路や道路盛土などを表現することで解消されるものと考えている。

#### b) 災害対応の迅速化・効率化

また、令和元年度に作成手法を開発した地すべり災害対応のBIM/CIMモデルについて、災害対応の現場でより実践的にBIM/CIMモデルを活用できるよう、令和2年7月豪雨等により発生した地すべり災害における地方自治体への技術支援等に本手法を活用した事例をふまえ、BIM/CIMモデルの作成手法の改良を検討するとともに、災害対応における活用ケースを想定し、そのケース毎にBIM/CIMモデルの作成ポイント等について検討した。

### ②道路通行安全性確保技術

#### a) ゲリラ豪雨

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、過去の道路斜面災害における降雨の特徴の整理、災害発生率と降雨の関係の分析を行った。また、崩壊と各種雨量指標の関係を詳細に分析できるようにするため、国土交通省のXRAINデータから各種の雨量指標（時間雨量、連続雨量、土壌雨量指数、48時間雨量）を迅速に算出するプログラムを開発した。

また、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。令和2年度は、前年度に検討した時間雨量－土壌雨量指数による土砂災害警戒情報のCLを道路の事前通行規制に用いる場合の課題を整理し、それに対して土壌雨量指数の各タンクの役割を再考して土中水分の状態を表す第2、第3タンクの合計値と土壌雨量指数との関係を用いた新しい規制手法の検討を行い、災害の捕捉性や規制の効率性の面からも時間雨量－土壌雨量指数と比してわかりやすい手法であることを確認した。

## b)融雪

北海道の国道における道路盛土の変状には、台風や前線がもたらす降雨、地震によるものだけでなく積雪寒冷地特有の融雪水の影響があり、近年、通行止めを伴う道路盛土の変状が発生している。

本研究では積雪寒冷地における融雪水が要因となる道路盛土の変状メカニズムの解明や道路盛土の安定性、保全対策として管理手法の提案を目的として進めている。本報告では、検討中の既存の気象観測システム（降雨量、積雪深、気温）と現地の地下水位計測結果より、融雪期の盛土内水位を簡易に推定する手法（浸透流解析）と、その解析水位を踏まえて盛土の安定性評価（弾塑性変形解析）を行った。その結果、現場の地下水位計測結果と計測箇所近傍の気象データを使用し、融雪水を考慮した降雨強度を算出し、簡易に融雪期の盛土内水位を推定できる可能性が示された。

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、過去に融雪による崩壊の発生した地区内で6年に亘り融雪状況を調査してきた。令和2年度は、改良 Degree-Hour 法による融雪水量の推定において、ノイズ扱いしていた融雪期の降雪の補正と、降水量から降雪量を除いた降雨量への修正を行うことで、降雨と融雪の合算水量の推定精度を高めることができたほか、そこから算出した土壌雨量指数の経時変化から災害時と非災害時とを判別でき、事前通行規制への適用性を検証できた。

## ③落石・岩盤崩壊対策技術

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。令和2年度は、過年度に UAV 撮影した岩盤斜面写真から SfM 技術を用いて構築した斜面形状や開口亀裂面の立体交差状況から推定された三次元崩壊形態モデルを基に、FEM ステップ解析法を考案し、応力・ひずみ分布から亀裂面の劣化進行状況の予測を試みた。その結果、亀裂面の劣化範囲としての塑性ひずみ分布が徐々に拡大する状況を再現できた。これにより、将来的な経年劣化により亀裂面に囲まれた岩体が地山から縁切られて不安定になる可能性を判定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

本研究は、落石防護擁壁および従来型落石防護柵について、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。擁壁を基礎とした落石防護柵の検討としては、擁壁を基礎とした鋼製支柱模型に対し支柱の変形および擁壁基礎の回転挙動に着目した基礎的な重錘衝突実験を行った。落石防護柵に関してはさらに、重錘衝突実験における捕捉性能や損傷状況を整理し、現行の設計法において想定されていない損傷等を予防するための構造細目等について検討し、標準図案終を作成した。

## 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。そのような危険箇所での施工は、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件以上の災害実績を持っている。

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・公害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2年度は、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として、外部カメラの有効活用をオペレータに促す新画像インターフェース、および SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術の活用を提案し、適用性について検証実験を行った。その結果、光学カメラのみより遠隔操作時の安心感が増大するなどの効果が明らかとなり、本技術は無人化施工における安全性の向上や迅速な施工着手に有効であることがわかった。

## 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** : Erosion and Sediment Control Research Group (Volcano and Debris Flow Research Team, Landslide Research Team), Geology and Geotechnical Engineering Research Group (Geology Research Team, Soil Mechanics and Dynamics Research Team), Construction Technology Research Department (Advanced Technology Research Team), Cold-Region Construction Engineering Research Group (Structures Research Team, Geotechnical Research Team, Geological Hazards 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災害の防災・減災技術の開発

#### 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，清水武志

##### 【要旨】

噴火後の降下火砕物は、その後の降雨により土石流が頻発する一因と言われる。平成 30 年度には、自動降灰量計の観測データの補間に、降下火砕物の堆積層厚が火口からの距離のべき乗で小さくなる関係式の適用を試みた。令和 1 年度は、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のコヒーレンス解析による降灰範囲の推定を試みた。これらの手法は適用時期が現地調査後に限定されるため、噴火直後に得られる噴火規模をのみを入力値として堆積厚分布を推定可能な方法について検討した。その結果、噴火規模の大小により推定モデルを選択する必要があるものの、適切なモデルを用いれば降下火砕物の堆積厚分布を適切に推定できることが示された。

キーワード：火山噴火，降下火砕物，堆積厚分布，Windy Tephra<sup>2</sup>，Tephra，シミュレーション

##### 1. はじめに

噴火後に土石流発生危険性が高まった溪流を抽出するには、降下火砕物の堆積厚分布の迅速な把握が重要となる。しかし、噴火直後に取得可能な情報は限られる。そのような状況下で降下火砕物の堆積厚を把握する手法は複数ある。例えば、Windy Tephra<sup>2</sup><sup>1)</sup>、Tephra<sup>2</sup><sup>2)</sup>、ジェットモデル<sup>3)</sup>、Gonzalez らモデル<sup>4)</sup>、楕円近似法<sup>5)</sup>、相似法<sup>6)</sup>、気象庁降灰予報<sup>7)</sup>である。しかしながら、それぞれの手法は利用可能な条件が異なる。そこで、各モデルの入力情報と火山噴火時に時系列で得られる情報を整理し、降下火砕物堆積厚の推定に活用可能なモデルを整理した。さらに、活用可能なモデルを 2 噴火の事例に適用し、降下火砕物堆積厚推定手法の適用性を評価した。なお、本稿は筆者らの既発表原稿<sup>8)</sup>を基に作成したものである。

##### 2. 研究手法と対象噴火

###### 2.1. 噴火直後に利用可能な推定モデルの選択

気象庁降灰予報の推定結果は、現状において降下火砕物堆積物層厚が 2 mm 以上か未満を閾値として表示される。そのため土石流が発生する数 cm 以上の堆積厚分布は不明である。本研究では火山ハザードマップ等の作成に利用される手法を中心に、①Windy Tephra<sup>2</sup>、②Tephra<sup>2</sup>、③ジェットモデル、④Gonzalez らモデル、⑤楕円近似法、⑥相似法の 6 つの降下火砕物堆積厚推定モデルを検討対象とした。まず、各モデルの利用可能な場面および入力パラメータを整理した。次に、この整理結果に基づき、噴火前から噴火後

にかけて様々な機関から公表される情報を、各推定手法で利用可能な整理した。さらに、これらの整理結果に基づき、噴火直後（噴火から数時間以内とする）に利用可能な推定モデルを選択した。

###### 2.2. 推定モデルの適用性の評価

2.1 で選択された推定モデルについて、それらのモデルが既往噴火直後に適用可能な評価した。対象とした噴火は、噴火後に詳細な降下火砕物堆積厚とその分布に関する調査結果が公表された御嶽山 2014 年噴火と三宅島 2000 年噴火とした。これらの噴火に対して、各推定モデルによる降下火砕物堆積厚分布を計算し、等層厚線図を作成し、その等層厚線の範囲（計算分布範囲）と、実績の堆積厚に基づく等層厚線の範囲（実績分布範囲）を比較した。ここで、既往火山噴火後の土石流発生実績が堆積厚数 cm であったこと<sup>9)</sup>を踏まえ、実績の等層厚線のうち三宅島 2000 年噴火は堆積厚 3.2cm 以上の範囲、御嶽山 2014 年噴火は堆積厚 1cm 以上の範囲を対象として評価した。

##### 3. 結果と考察

###### 3.1. 噴火直後に利用可能な推定モデルの選択

検討対象とした推定モデルとその入力パラメータを表 - 1 に示す。表 - 1 に示したパラメータのうち、噴火中から噴火以前に取得できないパラメータは、実測堆積量（自動降灰量計などを除く）及び堆積物の物性であった。

地形データは、噴火前から国土地理院の基盤地図情報などを取得できる。また、噴火時の大気情報は、毎日3時間おきに配信されるGPVデータなどから取得できる。噴火開始後は気象庁発表の噴火に関する火山観測報から、噴煙高度などを取得できる。噴火後は、カメラ映像や地震計データなどから噴火継続時間を取得できる。実測堆積量は、自動計測・データ転送する仕組みがあれば取得可能である。それ以外のパラメータは、通常地上調査できる1日以上噴火から経過した後に取得可能と想定される。

以上の結果から、噴火直後までに取得可能な情報で利用可能なモデルは、表-1の①～④であった。実測堆積量のデータ取得が必要な⑤、⑥のモデルは噴火直後の利用が難しいため、以後の検討から除外する。

3.2. 各推定モデルの適用性の評価

三宅島2000年噴火の計算分布範囲の形状を比較すると(図-1)、①と②の手法の分布軸は火口から北西および南東方向に伸びる。これは風速が小さいものの、高度によって風向が変化するため2つの方向に伸びたと考えられる。一方、③と④の手法は一樣な風を与えるため、南東方向への分布軸が顕著である。特に③の手法は風下方向の分布しか推定できないため、扇形状の分布を示した。

この事例から次の2点が示唆された。①と②の手法は、高度別に風向が変化する噴火や風速が小さく分布範囲が火口を中心とした同心円に近い形状となる噴火に適用できる。一方、③と④の手法は、そのような噴火には適用が難しい。

御嶽山2014年噴火の計算分布範囲の形状を比較すると(図-2)、①の範囲がほかのモデルよりも小さくなった。②の範囲は分布軸が全体的に実績と比べて南にずれたが、実績分布範囲と類似した形状を示した。③の範囲形状は扇形であるが、分布軸方向の到達距離は実績分布範囲と計算分布範囲でおおむね一致した。④の分布はおおよそ楕円形状を示した。分布軸方向の到達距離は実績分布範囲と計算分布範囲でおおむね一致した。計算分布範囲は実績分布範囲をほぼ網羅する結果となった。分布軸から離れた方向では実績分布範囲よりも計算分布範囲が広がった。

①の計算分布範囲が大きく異なった理由としては、御嶽山2014年噴火の噴出量が、三宅島2000年噴火の噴出量より1桁程度小さかったことが考えられる。このことから、噴火規模が小さい場合には①が適用できない可能性が示唆された。

表-1 推定モデルとパラメーター一覧

推定モデル	入力パラメータ
①Windy Tephra2	大気条件(高度別)、計算点地形(標高あり)、噴火条件(噴火規模、噴煙初速、マグマ物性、噴出物物性)、計算条件(拡散係数、渦拡散係数、噴煙先端距離)
②Tephra2	大気条件(高度別)、計算点地形(標高あり)、噴火条件(噴火規模、マグマ物性、噴出物物性)、計算条件(拡散係数、渦拡散係数、噴煙先端距離)
③ジェットモデル	大気条件(一様)、計算点地形(標高なし)、噴火条件(噴火規模、噴煙初速、噴出物物性)、計算条件(連行係数、火砕物堆積濃度)
④Gonzalezらモデル	大気条件(一様)、計算点地形(標高なし)、噴火条件(噴火規模、噴出物物性)
⑤楕円近似法	実測堆積量
⑥相似法	実測堆積量

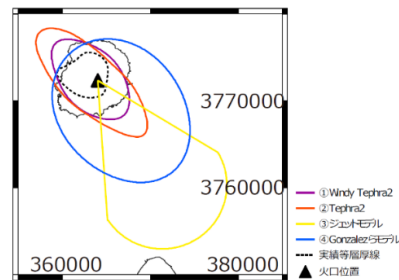


図-1 三宅島2000年の計算分布範囲と実績分布範囲

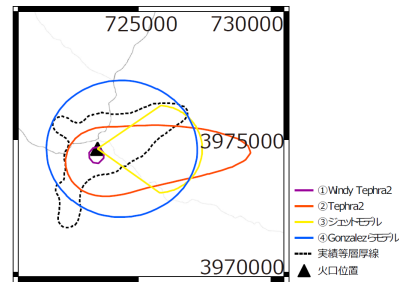


図-2 御嶽山2014年の計算分布範囲と実績分布範囲

参考文献

- 1) Kazutaka Mannen, Toshiaki Hasenaka, Atsushi Higuchi, Koji Kiyosugi, Yasuo Miyabuchi: JGR Solid Earth, Vol. 125, Issue 6, 10.1029/2019JB018902, 2020
- 2) Costanza Bonadonna, Charles B. Connor, B. F. Houghton, Laura Connor, Marc A. Byrne: JGR, 110, B03203, 2005
- 3) 前海真司・宮本邦明・矢島照夫・桑野修司: 砂防学会研究発表会概要集, pp. 6-9, 1990
- 4) González-Mellado and Cruz-Reyna: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, pp. 2241-2257, 2010
- 5) Yasuhisa Tajima, Keiji Tamura, Takao Yamakoshi, Akira Tsune, Shinjiro Tsurumoto: Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, No. 1, pp. 291-306, 2013
- 6) 木佐洋志・山越馨雄・石塚忠範・瀧口茂隆・田島清久: 平成23年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 172-173, 2011
- 7) 新堀敏基・甲斐玲子・林洋介・林勇太・菅井明・長谷川嘉彦・橋本明弘・高木朝充・山本哲也・福井敬一: 気象研究所研究報告, Vol. 65, pp. 75-107, 2014
- 8) 山本望・清水武志・石井隼雄: 令和3年度砂防学会研究発表会概要集, P1-18, pp.311-312, 2021
- 9) 田村圭司・山越馨雄・松岡暁・安養寺信夫: 土技術資料, 52-3, pp. 34-39, 2010
- 10) 鈴木建夫: 職業訓練大学紀要, Vol.19A, pp.1-17, 1990

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

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

##### 【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箇所の抽出・点検手法及び対策手法を検討するため、平成 20～23 年度の直轄国道斜面災害、平成 29 年九州北部豪雨災害、平成 30 年 7 月豪雨災害を対象として、現地調査・崩壊地判読等によって道路斜面災害の特徴の整理・原因分析、点検着目点・対応策の検討、フラジリティ解析による定量的な高リスク災害箇所抽出手法の検討を行った。フラジリティ解析では地質の違いによって崩壊発生確率が異なる結果が得られた。

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、人的被害の発生の懸念など安全・安心上の大きな課題となるとともに、交通機能確保の観点からも課題となっている。また、重要路線等においてはゲリラ豪雨や急激な融雪に対しても、早期の交通機能の確保が求められている。これらの課題に対し、本研究は災害データ及び関連する地形・地質状況、降雨状況を分析することにより、ゲリラ豪雨により生じやすい災害形態、災害の発生しやすい箇所の特徴を明らかにし、ゲリラ豪雨に対する高リスク箇所の抽出・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

以下の項目について検討を行った。

##### 2.1 定性的検討

道路防災点検<sup>1)</sup>の事前スクリーニングで点検対象から外れた箇所（以下「点検対象外箇所」）及び点検で特に新たな対策を必要としないとされた箇所（以下、「対策不要箇所」）で発生した災害の危険性を有する斜面を事前に捕捉することを目的に、平成 20～23 年度に全国の直轄国道で発生した 115 件の道路斜面災害の特徴を整理し、それらの災害の原因分析を行って点検での災害危険箇所の捕捉率向上のための対応策を検討した。

また、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、災害の形態や特徴を整理し、豪雨による道路斜面災害危険箇

所の点検着目点の検討を行った。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。

##### 2.2 定量的検討

道路斜面の高災害リスク箇所の定量的な抽出手法の検討のため、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨による災害地域を対象として、災害発生と降雨、地形・地質等との関係を分析して災害発生確率を推定するフラジリティ解析を行った。解析の対象とした地域は特に崩壊が多発した約 350km<sup>2</sup>の範囲である。

また、道路管理用地外の斜面からの崩壊土砂の到達範囲の推定手法の検討のため、平成 30 年 7 月豪雨災害において表層崩壊が多発した地域のうち「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」がそろって存在する地域を対象として、崩壊地判読及び現地調査を行い、崩壊のタイプ分け及び崩壊土砂到達範囲の整理を行った。

#### 3. 研究結果

##### 3.1 定性的検討

###### 3.1.1 直轄国道斜面災害

###### (1) 災害の状況

平成 20～23 年度の直轄国道斜面災害は、点検対象外箇所及び対策不要箇所が発生した災害が 64%を占める（図-1）。これら点検対象外箇所及び対策不要箇所が発生した災害の種別は自然斜面崩壊、切土のり面崩

壊及盛り土崩壊を主とする(図-2)。これらのうち点検対象外箇所での災害は盛り土崩壊が約40%、切土のり面・自然斜面崩壊が50%弱であるのに対し、対策不要箇所での災害は切土のり面・自然斜面崩壊が約60%であり、他の災害は比較的少ない(図-3)。

(2) 災害原因

点検対象外箇所における災害原因ごとに区分した災害発生数を図-4に示す。件数の多い発生原因は道路表流水の流入(14件/点検対象外箇所の災害54件中)及び集水地形(11件/点検対象外箇所の災害54件中)で、この両者で約半数(25件/点検対象外箇所の災害54件中)を占めている。この両者の

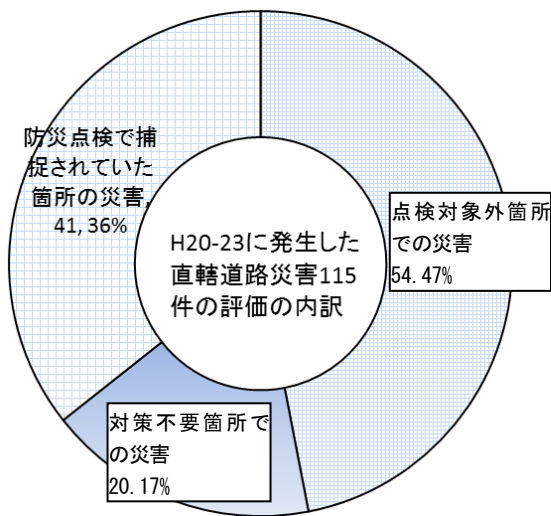


図-1 平成20~23年度直轄国道災害事例の内訳

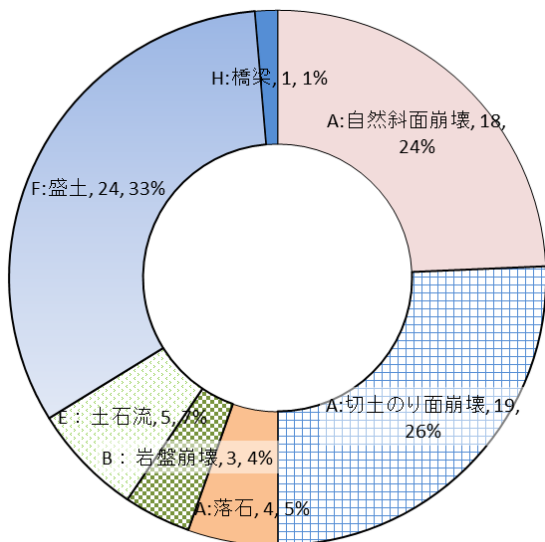


図-2 点検対象外箇所及び対策不要箇所の災害種別 (n=74)

災害のうち約3分の1は時間雨量30mm以上の降雨で発生しており、ゲリラ豪雨で発生しやすい災害形態であることが推測できる。これらの要因を重視して点検を行うことが点検による災害捕捉率を向上させる効果的な方法であるといえる。

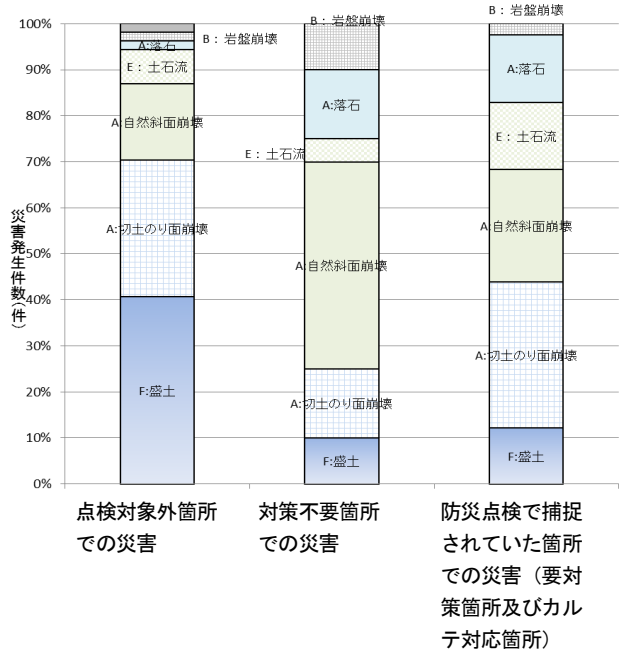


図-3 点検対象外箇所、対策不要箇所及び防災点検で捕捉されていた箇所別の災害種別 (n=115)

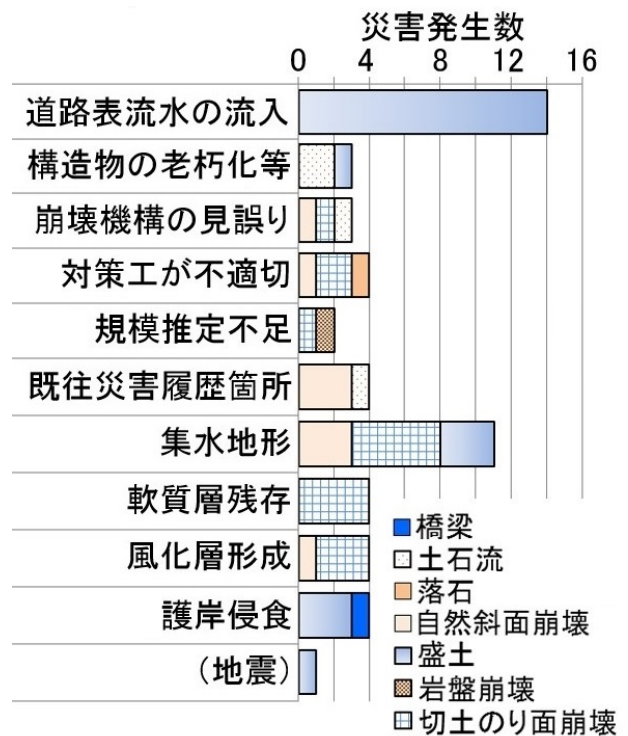


図-4 災害原因ごとの災害発生数 (点検対象外箇所、n=54)



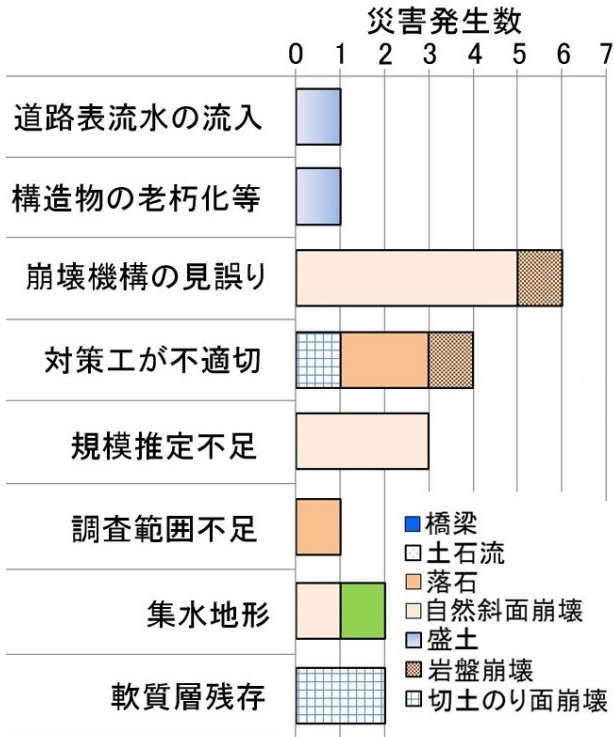


図-5 災害原因ごとの災害発生数 (対策不要箇所、n=20)

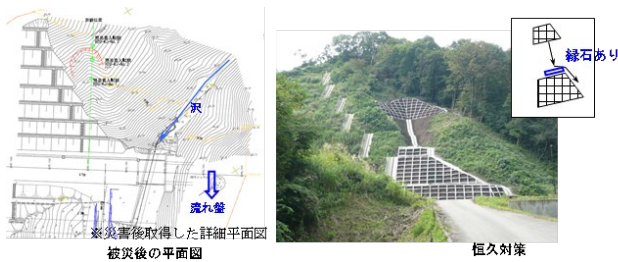


図-6 狭い集水地形で崩壊した箇所の事例

対策不要箇所における災害原因ごとに区分した災害発生数を図-5に示す。件数の多い発生原因は崩壊機構の見誤り(6件/対策不要箇所の災害20件中)及び対策工が不適切(4件/点検対象外箇所の災害54件中)で、既設対策工の効果により十分対応可能であると判断された箇所が被災する事例が約半数を占めている。また、対策不要箇所での災害箇所を踏査した事例では狭い集水地形での崩壊事例(図-6)、もともと不安定な土砂・岩盤が降雨で不安定化した事例などが見られており、点検でこれらの条件に該当する箇所を抽出することが重要である。

(3) 災害危険箇所捕捉率向上の対応策

(2)の災害原因から考えられる災害危険箇所の捕捉率向上の対応策としては以下の項目が考えられる。ここで、災害危険箇所の捕捉率を高めるためには、対応の難易度が低く、捕捉率の向上率が高いものから優先

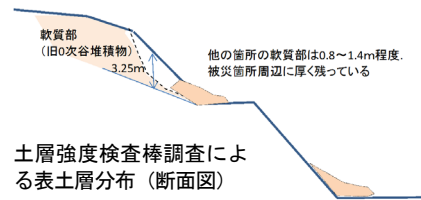


図-7 地形判読による0次谷の抽出により危険斜面を想定した事例

的に実施するのが効果的であることから、作業のしやすさ、調査での対応のしやすさ、作業者の必要技術力及び効果の即効性を考慮して優先度を設定した。

- 1)優先度1：机上調査(難易度：低)
  - ①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(13.9%向上)
  - ②優先度2：現地調査における判断(難易度：高)
    - ②道路表流水の流入跡の確認(12.2%向上)
    - ③道路ストックの安全パトロール(6.1%向上)
  - 3)優先度3：現地調査における判断(難易度：高)
    - ④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(7.8%向上)<sup>2)</sup>
    - 4)優先度4：現地調査における判断(難易度：高)
      - ⑤崩壊機構を正確に把握する(8.7%向上)
      - ⑥対策工の効果を再評価(7.0%向上)

これらの対応策を踏まえて現場で試行した危険斜面の抽出事例を図-7に示す。この箇所は、空中写真判読に示すように、0次谷の谷頭を薄く切土した斜面であり、切土のり面に0次谷の堆積物が残存している可能性が示唆された。そこで土層強度検査棒を用いて土層

深さを調査した結果（断面図参照）、当該斜面は、周囲に比べて 2m以上表土層が厚く、もともとこの箇所の斜面安定性が低かったことが確認され、これらの対応策を用いることで危険斜面を抽出できる場合があることが確認された。

### 3.1.2 平成 29 年九州北部豪雨災害

#### (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、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 3） 4）、今回の災害状況もそのことと大きく矛盾しない。

#### (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-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

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

壊の箇所においても厚い風化層が崩壊していた（写真-4）。3.1.1(2)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) 災害の特徴を踏まえた点検着目点

(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 割以上の箇所を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。平成 28 年度に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



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

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。3.1.1(3)で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。

## 3. 2 定量的検討

### 3.2.1 平成29年九州北部豪雨災害

#### (1) 災害の状況と地形・地質の特徴

平成29年の九州北部豪雨災害では、7月5～6日の豪雨による土砂災害及び河川氾濫によって福岡県朝倉市、東峰村及び大分県日田市を中心に大きな被害が生じた。本災害では斜面崩壊も非常に多く発生し、今回の解析対象範囲において解析に用いるために抽出した崩壊箇所は約30,000箇所である(図-8)。解析対象範囲の地質は花崗岩類、変成岩類(結晶片岩)、火山岩類(溶岩、火山砕屑岩)の3種類に分けられる。

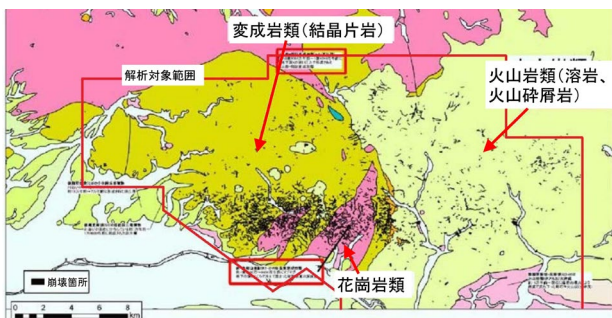


図-8 解析対象範囲の地質及び崩壊箇所分布

#### (2) 雨量指標

解析に用いる雨量指標として、気象庁のレーダー・アメダス解析雨量(1km<sup>2</sup>メッシュ)を用いて以下の指標について災害発生日(7月5～6日)を間を含む7月4～7日の期間のメッシュごとの毎時の値を算出した。

- ・時間雨量

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

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

解析に用いる雨量指標の値は本来であれば各崩壊箇所の崩壊時刻の値を用いるべきであるが、今回の豪雨災害のように短時間で多数の崩壊が発生する場合は個別の崩壊箇所の崩壊時刻を特定できないため、算出期間内の最大値を解析に用いた。算出した雨量指標の分布図の例を図-9に示す。

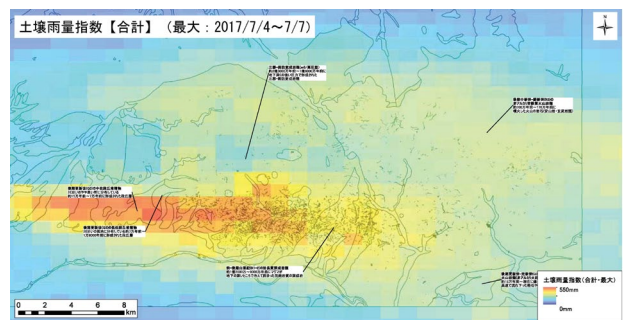


図-9 雨量指標の分布図の例

#### (3) 地形等の情報

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

- ・平均曲率<sup>5)</sup>
- ・ラプラスアン<sup>5)</sup>
- ・地上開度<sup>5)</sup>
- ・地下開度<sup>5)</sup>
- ・尾根谷度<sup>5)</sup>
- ・遷急線までの距離
- ・ArcGIS Flow Accumulationによる累積流量(谷の侵食度合いを示す)

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

#### (4) 多変量解析及びフラジリティマップ作成

(3)で選定した説明変数を用いて、崩壊の発生・非発生を目的変数とした判別分析、ロジスティック回帰分析、及び重回帰分析を行い、その中で崩壊・非崩壊の

推定精度が最も高かったロジスティック回帰分析の結果に基づいてフラジリティマップを作成した。作成にあたっては、ロジスティック回帰分析における判別スコアを地形の特性値として、解析対象範囲の3種類の地質について地形の特性値ごとに各雨量指標と崩壊発生率（崩壊地点数／全地点数）の関係の近似式を作成し、それを用いて崩壊発生確率分布図（フラジリティマップ）を作成した。

崩壊発生確率分布図の例を図-10に示す。崩壊発生確率は花崗岩類>変成岩類>火山岩類の順に高い結果が得られた。各地質における結果の特徴と理由として考えられる可能性は以下のとおりである。

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

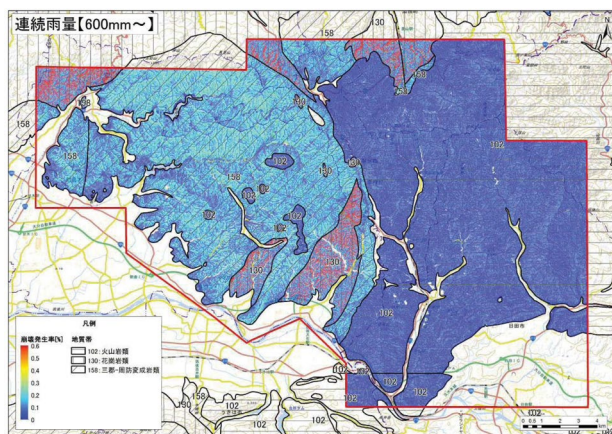


図-10 崩壊発生確率分布図の例

### 3.2.2 平成30年西日本豪雨災害

崩壊前のLP図、崩壊後のLP図、崩壊後のオルソ画像がそろって存在する地域として、広島県呉地域及

び愛媛県宇和島地域の2地区を選定して、いかの検討を行った。

#### (1) 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。

**渓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渓床に堆積していた土砂が流動化し土石流化したもの（図-11）

**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-12）

なお、「渓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-13）

**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-14）

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。

#### (2) 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」は地形図のみを用いて判読を行い、「表層土砂流出タイプ」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、「表層崩壊タイプ」を約400箇所、「表層土砂流出タイプ」を約1,500か所、計約1,900箇所の崩壊が認められた。

#### (3) 崩壊土砂の到達範囲の整理

上記のうち広島県呉地区について、崩壊土砂の到達

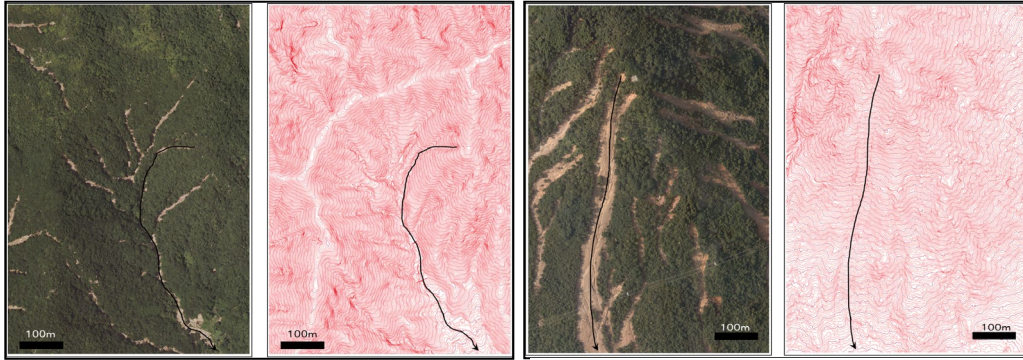


図-11 溪床堆積土砂流動タイプ  
(左：空中写真, 右：地形図)

図-12 山腹崩壊土砂流動タイプ  
(左：空中写真, 右：地形図)

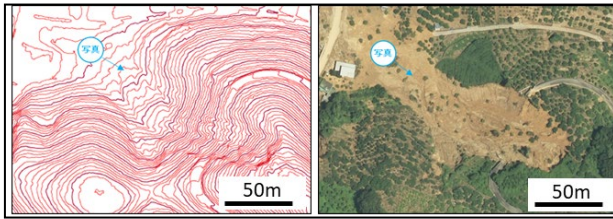


図-13 表層崩壊タイプ  
(左：地形図, 右：空中写真,)

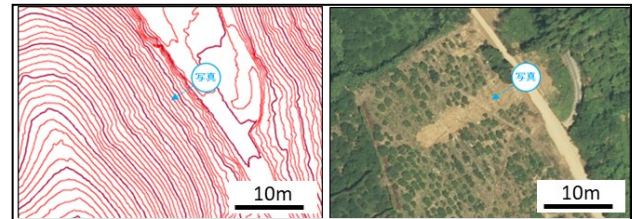


図-14 表層土砂流出タイプ  
(左：地形図, 右：空中写真,)

範囲の整理を以下の通り行った。

1) 崩壊土砂到達範囲の判読

広島県呉地区の崩壊箇所のうち、複数地点で発生した崩壊土砂が合流して移動する箇所を除外し、単独で移動した箇所 439 渓流について、LP 地形図及び空中写真（オルソ画像）を用いて崩壊土砂到達範囲の判読を行った。これらの崩壊土砂到達範囲を崩壊発生点から崩壊土砂停止点までの見通し仰角として整理した結果、見通し仰角の平均値は 24.3 度、下限値は 9.6 度となった。

2) 現地調査

崩壊土砂が道路上に堆積した場合、厚く堆積した場合は早期の復旧が困難となるが、薄く堆積した場合は早期の復旧も容易となる。よって、「厚く堆積した場合」と「薄く堆積した場合」に分けて整理することは道路防災の観点からは有効と考えられる。したがって、1)で判読した渓流のうち見通し仰角が比較的小さい 53 渓流の現地調査を行って崩壊土砂の堆積状況を確認し、「厚く土砂が堆積した範囲」と「薄く土砂が堆積した範囲」を区分した。両者の区分は、常田ほか (2007) において、車の段差走行実験の結果から、小型緊急車両（パトロール車、救急車等）の場合は走行速度が 0～10km/h 程度であれば段差 20 cm までは段差を乗り降りすることが可能である

と評価している<sup>6)</sup>ことを参考として、層厚 20 cm 以上土砂が堆積している範囲を A「厚く土砂が厚く堆積しているタイプ」とし、層厚 20 cm 未満のものを B「薄く土砂が厚く堆積しているタイプ」として整理した。

3) 見通し仰角の整理結果

上記 1)2)で区分したタイプごとに見通し仰角を整理した結果を図-15 に、崩壊土砂の水平移動距離と比高の関係を図-16 に示す。A タイプ (n=50) の見通し仰角の平均値は 19.9 度、下限値は 12.6 度、B タイプ (n=16) の見通し仰角の平均値は 13.4 度、下限値は 9.6 度、現地調査未実施の渓流 (n=382) の見通し仰角の平均値は 25.2 度、下限値は 12.9 度であり、崩壊土砂の堆積層厚区分ごとに見通し仰角の分布傾向に差があることから、道路防災の観点からは堆積厚さを区分した整理が重要であるといえる。

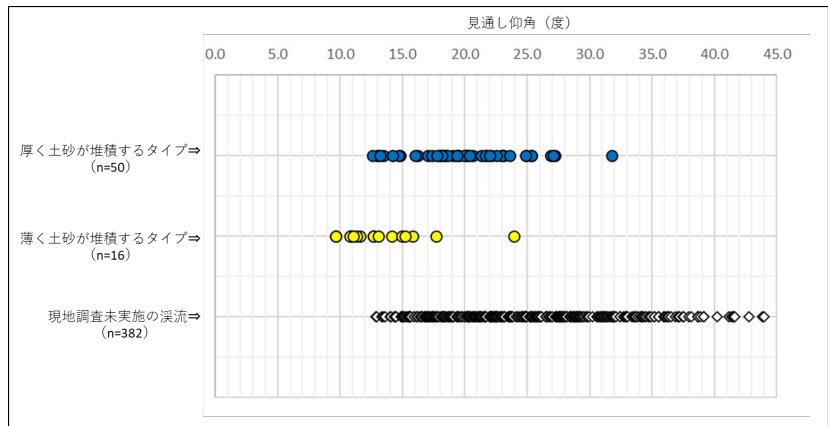


図 - 15 堆積層厚タイプごとに求めた見通し仰角の傾向

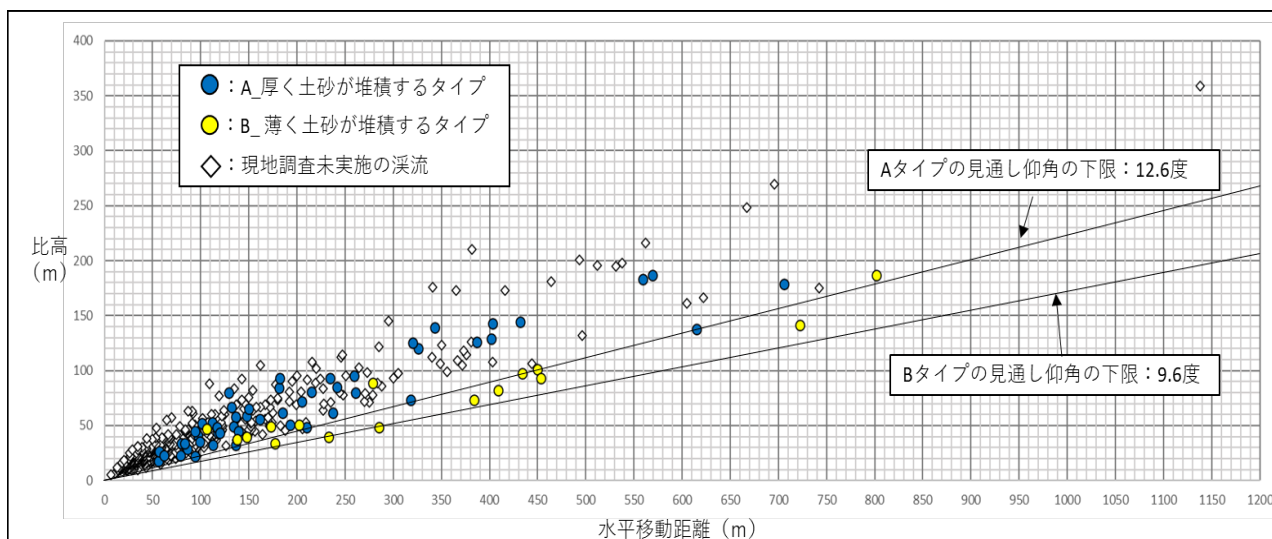


図 - 16 水平移動距離及び比高と見通し仰角の関係

#### 4. まとめ

平成 20～23 年度の直轄国道斜面災害、平成 29 年九州北部豪雨災害、平成 30 年 7 月豪雨災害を対象として、現地調査・崩壊地判読等によって道路斜面災害の特徴の整理・原因分析、点兼着目点・対応策の検討、フラジリティ解析による定量的な高リスク災害箇所抽出手法の検討を行った。その結果、点兼着目点・対応策の整理・提案を行うとともに、フラジリティ解析では地質の違いによって崩壊発生確率が異なる結果が得られた。また、崩壊土砂到達範囲は堆積厚さによって差があり、道路防災の観点からは堆積厚さを区分した整理が重要であることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 財団法人道路保全技術センター：道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等）、179p. 2009 年 5 月
- 2) 金井哲男・浅井健一・佐々木靖人・法水哲：土層強度検査棒を用いた危険斜面抽出方法、平成 28 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.169-170、2009 年 10 月
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 内田太郎・片岡正次郎・岩男忠明・松尾修・寺田秀樹・中野泰雄・杉浦信男・小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料第 204 号、pp.56-60、2004 年 11 月
- 6) 常田賢一・小田和弘・中平明憲・林 健二・依藤光代：段差走行実験に基づく地震時の道路の性能評価および交通運用、土木学会地震工学論文集、Vol.29、pp.596-604、2007 年 8 月

### 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

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

##### 研究（2）（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、林 宏親、山木 正彦、御厩敷 公平

##### 【要旨】

北海道の国道における道路盛土の変状には、台風や前線がもたらす降雨、地震によるものだけでなく積雪寒冷地特有の融雪水の影響があり、近年、通行止めを伴う道路盛土の変状が発生している。

本研究は、積雪寒冷地における融雪水が要因となる道路盛土の変状メカニズムの解明や道路盛土の安定性、保全対策として管理手法の提案を目的として進めている。本報告では、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、積雪寒冷地特有の盛土災害に対する点検手法を取りまとめた「北海道の国道における融雪期の道路盛土点検マニュアル（案）」について紹介する。

キーワード：道路盛土、融雪水、道路盛土点検マニュアル（案）

#### 1. はじめに

積雪寒冷地である北海道において、近年、融雪期（春先）に通行止めを伴う道路盛土の変状が発生しており（図-1）、降雨だけでなく急激な融雪水が盛土の不安定化の一因と想定されている。

道路は人の移動や物流、観光など常時の国民生活を支援する役割だけでなく、緊急時や災害時には避難や救助、救急搬送や救援物資の輸送などを支援する役割を担っている。そのため、通行止めは極力回避することが望ましく、また、道路の変状による通行止めが生じたとしても早期の交通機能の確保が求められている。しかし、融雪水の影響を考慮した道路盛土の点検・管理技術は確立されておらず、熟練した現場技術者が減少する中で、効率よい点検による省力化が求められている。



図-1 融雪期に発生した道路盛土変状事例

このような社会的要請から、本研究では急激な融雪時などにおける積雪・融雪量と道路のり面災害の発生形態、発生箇所、道路交通機能への影響などの関係を明らかにし、突発的な自然現象に対して道路通行の安全性を確保するための管理手法および道路交通機能を確保するための点検手法・対策手法を検討している。

平成 29 年度まで、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、調査・分析結果から特徴や傾向を分類し、危険箇所となり得る道路盛土構造や周辺環境等を踏まえ、道路盛土点検の視点から融雪期における新たな点検手法を整理した。

令和元年度は、平成 30 年度成果を点検マニュアル（素案）として取りまとめ、北海道の国道管理者への説明、了承を得た後、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点検マニュアル（素案）の利用説明会を開催し、試験運用を開始した。

令和 2 年度は、説明会での意見や融雪期点検の試験運用結果を踏まえ、「北海道の国道における融雪期の道路盛土点検マニュアル（案）」として改訂した。

融雪水の影響を考慮した道路盛土の点検・管理技術、道路通行安全性確保のための本マニュアル（案）は、熟練した現場技術者が減少する中で、効率よい点検が可能となる。

## 2. 策定した道路盛土点検マニュアル（案）の紹介

本マニュアル（案）（図-2）は、道路盛土の予防保全を目的とした点検手法として、図-3に示す注視すべき道路盛土の抽出手順（盛土形状スクリーニング）を取りまとめている。これらの項目は過去の変状事例をほぼ満たす項目であり、例えば、盛土材料や盛土形態、周辺環境などの項目があり、これらの項目に該当する箇所を融雪期に注視すべき道路盛土として抽出することとなる。

そして、盛土形状スクリーニングにより抽出された道路盛土に対して、点検実施の目安となる融雪状況の確認手順として図-3に示す積雪・融雪スクリーニングを取りまとめている。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月における温度、積雪深を1時間単位で抽出し、事前準備として、その数値から過去最大の7日間あたりの積雪低下量（単位：cm/day）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、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。積雪深低下状況の確認のため、過去最大の7日間あたりの積雪低下量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）を算出し、この融雪指数が0.6以上となる場合に、注視が必要とし、自主点検実施の目安としている。試験運用では、上記のスクリーニング手法について妥当性を検討中である。また、本マニュアル（案）は点検時に重点的に点検を行うべき着目箇所について取りまとめているため、点検時の手引きとして活用できる。

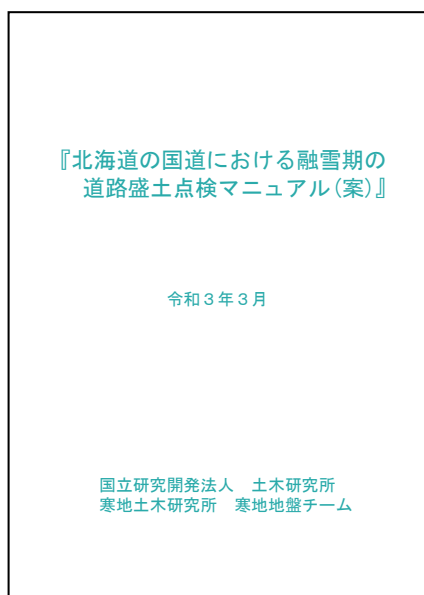


図-2 策定した道路盛土点検マニュアル（案）

## 3. まとめ

融雪期の道路盛土災害発生リスクが高い箇所の特徴を把握するため、融雪水が要因となる道路盛土の変状事例を踏まえ、既往災害資料や降雨・降雪、融雪などの気象データ、地形・地質データ等の分析や現地調査を行い、積雪・融雪特性と道路のり面災害の相関を分析し、整理した。「北海道の国道における融雪期の道路盛土点検マニュアル（案）」は、それらの調査・分析結果を踏まえ、道路盛土の予防保全を目的とした点検手法について、点検の若年技術者から中堅技術者の実務者の手引きとして活用できるように取りまとめたものである。

現在、北海道内の既設の道路盛土において地下水に関する現地調査を実施しており、その結果をもとに、融雪期の盛土内水位を簡易に推定する手法と、その水位を踏まえて盛土の安定性評価を行う手法について検討を行っている。

試験運用結果や上記の安定性評価手法を含め、今後の研究成果もマニュアル（案）改訂に反映させる予定である。積雪寒冷地の道路盛土点検に携わる技術者の皆様に有益な点検手法として広く活用していただけることを期待している。

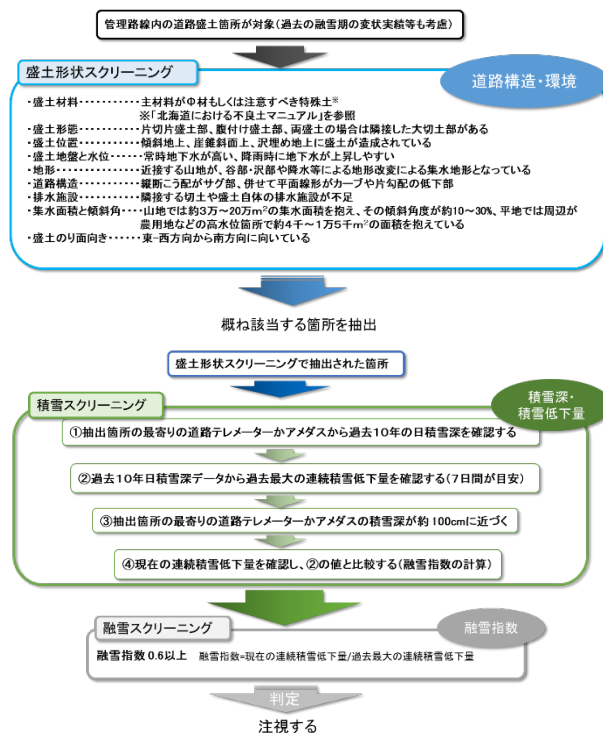


図-3 注視すべき道路盛土の抽出手順と点検の目安となる融雪状況の確認手順



## 3.2 突発的な自然現象による土砂移動の範囲推定技術の開発

### 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，山崎祐介，平岡真合乃

#### 【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に資するため、XRAIN等の降雨分布データ及び降灰状況を活用できる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ものである。令和2年度は、令和元年度に開発した分布型土石流流出解析モデルを発展させ、新たに開発した下流域の氾濫範囲推定モデルと一体化させた数値解析法を構築し、既往土砂災害に適用した。また、降灰の浸透特性を明らかにするため、桜島有村川流域における観測結果に対し不飽和浸透理論による再現計算を実施した。地下への浸透過程が再現できないことやパラメータ設定方法に課題はあるが土石流発生に寄与する表面流出の波形を再現できることが分かった。キーワード：噴火後の土石流，土石流氾濫予測，降灰，浸透能，表面流出

#### 1. はじめに

火山噴火後には、噴火前には発生しなかったような小規模な降雨でも土石流が発生することがある<sup>1)</sup>。これは、降灰により山腹斜面の土壌への雨水の浸透能や保水性が変わるためであると考えられる。噴火後に発生する土石流に対する警戒避難のためには土石流の氾濫範囲の推定が有効である。氾濫範囲を適切に推定するためには、斜面の崩壊発生から河道への流入、そして流動する一連の過程、さらには河道の流下能力に応じて溢流し氾濫することをシミュレートできることが望ましい。

昨年度は、上流域における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、渓床に堆積す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<sup>2)</sup>。本年度は、河道からの溢流、下流域の流れを表現できる土石流氾濫モデルを開発し、昨年度の成果と一体化した<sup>3)</sup>。また、このモデルに組み込み目的で、火山の上流域での降灰を想定した不飽和浸透理論に基づく分析を行った<sup>4)</sup>。

## 2. 降雨浸透・流出過程および土石流発生・流下・氾濫過程の一体型の数値解析

### 2.1 解析モデルの概要

地形モデルは、流域地形モデルと氾濫原地形モデルから構成されている。流域地形モデルは、降雨流出モデルおよ

び土石流流下モデルの計算領域であり、斜面系と河道系によって構成されている。斜面系は直交座標系上に等分割されたグリッドセルで表現され、河道系は隣接する周囲8方向のグリッドセルの中心を結ぶ線分で表現されている。河道の上流端は、ある閾値以上の集水面積を持つグリッドセルであり、最急勾配方向下流側のグリッドセルに接続し順次下流端に至る。河道の幅・深さは、グリッドセルのサイズから独立して設定することが可能である。氾濫原地形モデルは、等分割されたグリッドセルで表現されている。

降雨流出モデルは、流域斜面において表土層の湿潤・乾燥過程、飽和側方浸透流（以降、浸透流という）および表面流の発生・流下過程の計算を行う。土石流流下モデルは、斜面からの表面流および浸透流による流入量を境界条件とし、土石流の侵食・堆積をとともなう流下過程の計算を1次元座標系で行う。土石流氾濫モデルは河道から溢流した土石流の氾濫過程の計算を平面2次元座標系で行う。

### 2.2 結果と考察

1990年7月の豪雨により、阿蘇市一の宮町では古恵川で発生した土石流が市街地で氾濫した。この災害を対象とし、災害発生時刻、土石流の痕跡、氾濫範囲や氾濫した土砂量に関する調査結果を用い<sup>3)</sup>、土石流流出および土石流氾濫の再現性を検討した。

図-1に最大流動深の計算値と調査結果による氾濫範囲を示す。最大流動深は家屋の床下とみなし0.45m未満を非表示にしている。計算による流動深は、領域の北端に氾濫水が滞留していること、東岳川に沿って氾濫水が流下し

ている点などに違いが生じている。これは、地形モデルに水路や道路盛土などの地形を表現することにより改善されるものと考えている。

### 3. 不飽和浸透理論に基づく流出解析モデルの桜島有村川の降灰裸地斜面への適用

#### 3.1 方法

前述したモデルで現時点では考慮していない斜面土層の不飽和浸透過程を検討するため、桜島有村川流域の観測結果を用い、降灰の有無を想定した浸透能の相違が土石流の流出に及ぼす影響の検討を行った。2020年の有村川の年降水量は3,067 mmであり、24時間以上の無降雨期間で区切ったものを降雨イベントとした。降雨イベントは67個存在し、流出が発生したイベントは17個であった。そのうち観測区画の表土層が不飽和状態で表面流の発生が確認された1事例を対象とし、不飽和浸透理論に基づいて降雨流出量を計算し、観測結果と比較した。観測条件、モデルの詳細は既発表文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

#### 3.2 結果と考察

計算結果を図-2に示す。不飽和透水係数の与え方などを工夫した結果、(a)に示すように表面流出量の流出波形は概ね再現することができた。しかし、土中の体積含水率 $\theta$ の観測値(b)と計算値(c)を比較すると、両者の経時変化の傾向は再現することはできなかった。表土層の地下に雨水が浸透する過程については、観測値と計算値の挙動が一致しなかったが、表面流出波形は再現された。

#### 4. まとめ

令和2年度には流域全体を対象とした土砂流出モデルが概ね完成した。また、火山地域に特徴的な降灰火砕物による保水性やその影響を考慮した流出解析モデルにより表面流発生波形の再現を行うことができた。令和3年度は粒径と層厚が異なる火山灰試料で実験を行ない、不飽和浸透流解析による再現性を検討する。

#### 謝辞

不飽和浸透流解析に用いた降水量は、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所にご提供いただいた。

#### 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:

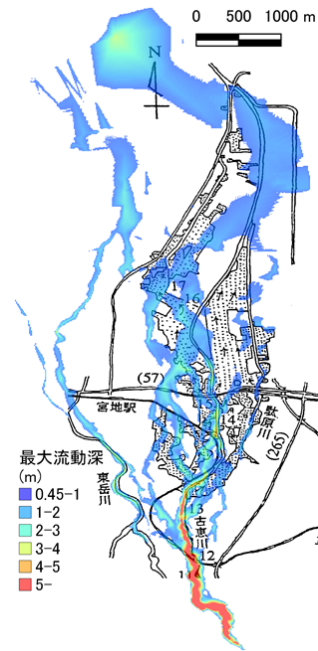


図-1 最大流動深分布<sup>3)</sup>

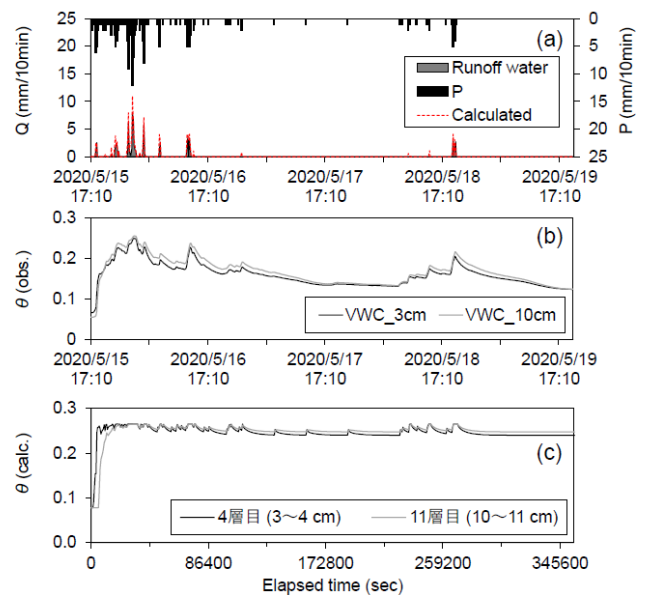


図-2 (a) 観測値と計算値のハイドログラフ, (b)  $\theta$ の観測値, (c)  $\theta$ の計算値<sup>4)</sup>

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) 山崎祐介, 清水武志, 石井靖雄: 降雨浸透・流出過程および土石流発生・流下・氾濫過程の一体型の数値解析法, 砂防学会発表会, R1-6, pp.33-34, 2021
- 4) 平岡真合乃, 手塚咲子, 山崎祐介, 清水武志, 石井靖雄: 不飽和浸透理論に基づく流出解析モデルの桜島有村川の降灰裸地斜面への適用, 砂防学会発表会, P1-89, pp.453-454, 202

### 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、令和元年度に作成手法を開発した地すべり災害対応のBIM/CIMモデルについて、災害対応の現場でより実践的にBIM/CIMモデルを活用できるよう、令和2年7月豪雨等により発生した地すべり災害における地方自治体への技術支援等に本手法を活用した事例をふまえ、BIM/CIMモデルの作成手法の改良を検討するとともに、災害対応における活用ケースを想定し、そのケース毎にBIM/CIMモデルの作成ポイント等について検討した。  
キーワード：地すべり、BIM/CIM、災害対応、カラー点群データ、オープンデータ

#### 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。

地すべりチームでは、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BIM/CIMモデル」の作成手法を令和元年度に開発した。令和2年5月には本手法を解説した技術資料を公表し、土砂災害の対応を行う地方整備局・都道府県に対して、国土交通省から本手法の活用が通知された。その後、令和2年7月豪雨等により発生した地すべり災害における地方自治体への技術支援等に本手法を活用<sup>1,2)</sup>するなかで、災害対応をより迅速かつ効率的に行うためには、災害対応のBIM/CIMモデルをいち早く作成し、そのモデルが災害対応における場面でどのように活用できるのかを示すことが必要と考えられた。

そこで、本研究では、令和元年度に作成手法を開発した地すべり災害対応のBIM/CIMモデルについて、地すべり災害対応の現場でより実践的にBIM/CIMモデルを活用できるよう、BIM/CIMモデルの作成手法の改良を検討するとともに、災害対応における活用ケースを想定し、そのケース毎にBIM/CIMモデルの作成ポイントについて検討した。

#### 2. 研究方法

令和元年度に作成手法を開発した地すべり災害対応のBIM/CIMモデルについて、実際の災害対応において活用し、より迅速に作成するための手法の検討を行った。また、実

際の災害対応時の活用事例をふまえ、BIM/CIMモデルを災害対応に活用する際の活用ケースや、その際に必要となるBIM/CIMモデル作成のポイントについて検討した。

#### 3. 研究結果

##### 3.1 地すべり災害対応のBIM/CIMモデルの作成手法の改良

実際の災害対応に地すべり災害対応のBIM/CIMモデルを活用した事例では、UAVを用いた災害後の空中写真撮影がいち早く行われることが多く、このUAV空中写真を用いたSfM解析によるカラー点群データと、インターネットから入手可能なオープンデータを用いることが実用的と考えられた。そこで、地すべり災害対応のCIMモデルの構成は、①地すべり全体の概略地形モデル(カラー点群データ)に②基盤地図情報等のオープンデータを組み合わせる構成を基本構成とし、必要に応じて、③変状発生域の部分的な詳細地形モデル、④調査結果、⑤警戒避難対策等の検討結果等を順次追加し、組合せるものとした(図-1)。

概略地形モデル(カラー点群データ)とオープンデータを組み合わせた、基本構成の地すべり災害対応のBIM/CIMモデルを作成する作業手順について図-2に示す。この作業手順であれば、1日程度で地すべり災害対応のBIM/CIMモデルを作成できるため、迅速な対応が可能となる。

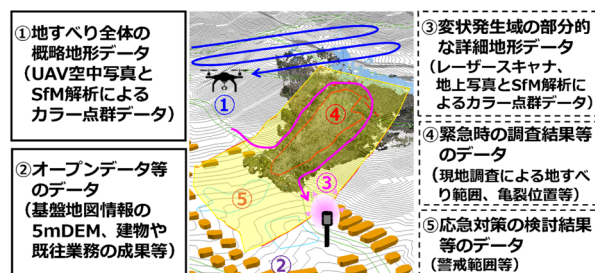


図-1 地すべり災害対応のBIM/CIMモデルの構成

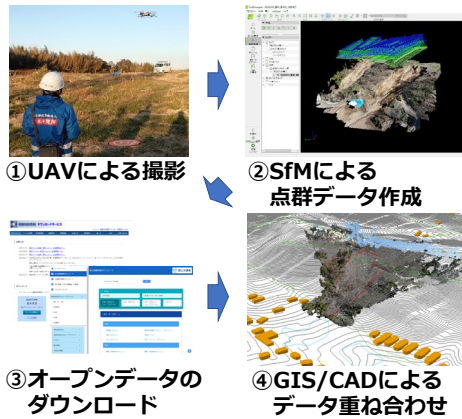


図-2 地すべり災害対応のBIM/CIMモデルの作成手順

表-1 地すべり災害対応のBIM/CIMモデルの活用ケースとモデル作成のポイント

No	確認内容	BIM/CIMモデル作成のポイント	活用イメージ
1	地すべりを含む周辺の災害全体の概要を把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>発生直後の地すべり地形を点群データで表現する</li> <li>地すべり周辺の地形、保全対象等のオープンデータ等を点群データと重ね合わせる</li> <li>必要に応じて、調査結果等や検討結果等を追加する</li> </ul>	<p>①地すべり全体の現地地すべりデータ (SfMによる点群データとカラー点群データ) ②発生直後の地すべり地形の点群データ (SfMによる点群データとカラー点群データ) ③保全対象等のオープンデータ (国土院の地形データ、河川・道路・地すべり履歴の履歴データ) ④地すべり発生後の地すべり地形の点群データ (SfMによる点群データとカラー点群データ) ⑤地すべり発生後の地すべり地形の点群データ (SfMによる点群データとカラー点群データ) ⑥地すべり発生後の地すべり地形の点群データ (SfMによる点群データとカラー点群データ)</p> <p>地すべり災害対応のBIM/CIMモデルの例</p>
2	発生機構の推定	<ul style="list-style-type: none"> <li>地すべり全体を点群データで、周辺をオープンデータ等のデータで表現する</li> <li>必要に応じて変状位置等を重ね合わせて地形や変状の現地状況が3次的に確認できるように表現する</li> <li>BIM/CIMモデル上で機構解析結果を把握できるように表現する</li> </ul>	<p>発生機構の推定への活用イメージ</p> <p>BIM/CIMモデルを用いた分析・検討</p>
3	警戒避難体制の検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>地すべりの範囲と方向、拡大の可能性のある範囲、地すべり下方斜面の形状、保全対象との位置関係、標高差等を3次的に確認する</li> <li>検討の際には、BIM/CIMモデルを動かして多数の方向からの視点で地すべりの影響範囲を予測する</li> <li>警戒範囲等は線等で表現する</li> </ul>	<p>BIM/CIMモデルを用いた警戒範囲等の検討</p>
4	応急対策の検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>点群データ等により土砂の堆積状況や現地の段差や勾配の状況、構造物・道路・河川・樹木の配置等を3次的に確認する</li> <li>土砂流出が発生した場合の3次的な流出経路を予測する</li> <li>地形形状や地物の配置の現地状況等を考慮した3次的な応急対策の配置計画等を表現する</li> </ul>	<p>BIM/CIMモデルを用いた応急対策の検討</p>
5	BIM/CIMモデルの共有	<ul style="list-style-type: none"> <li>災害後の現地状況や発生機構を視覚的に把握できるように表現することが望まれる</li> <li>Web会議システムやWeb-GISを活用する</li> <li>汎用性の高いファイル形式でBIM/CIMモデルを関係者に送信して共有することも考えられる</li> </ul>	<p>Web-GISによるBIM/CIMモデル共有イメージ</p> <p>汎用性の高いファイル形式でのBIM/CIMモデル共有イメージ</p>
6	会議や説明会への活用	<ul style="list-style-type: none"> <li>関係者の会議や住民説明会・マスコミ記者会見への説明では視覚的に把握できるように表現することが望まれる</li> </ul>	<p>BIM/CIMモデルを用いた関係者協議</p> <p>BIM/CIMモデルを用いたマスコミ記者会見</p>

### 3. 2 地すべり災害対応のBIM/CIMモデルの活用ケースとモデル作成のポイントの整理

地すべり災害対応のBIM/CIMモデルを災害対応において活用する際の、確認内容、BIM/CIMモデルの作成のポイント、活用イメージ等について、実際の災害対応で活用された事例をふまえ、ケース毎に表-1に整理した。活用ケースとしては、地すべりを含む周辺の災害全体の概要把握、発生機構の推定、警戒避難体制の検討、応急対策の検討、BIM/CIMモデルの共有、会議や説明会への活用が挙げられる。例えば、発生機構の推定に活用する際は、点群データとオープンデータ等で地すべり全体を表現し、必要に応じて変状位置等を重ね合わせ、地形や変状の現地状況を3次的に確認できるように表現することが効果的である。

### 4. まとめ

本研究では、令和2年7月豪雨等により発生した地すべり災害における地方自治体への技術支援等に地すべり災害対応のBIM/CIMモデルを活用し、改善点の検討を行い、より迅速な作成手法へ改良し、土木研究所資料<sup>3)</sup>にとりまとめて公表した。その内容は、令和3年3月の「CIM導入ガイドライン(案)第9編 地すべり編」から「BIM/CIM活用ガイドライン(案)第3編 砂防及び地すべり対策編」<sup>4)</sup>への改定の際に反映されており、新たに地すべり災害対応のBIM/CIMモデルがガイドラインに追加された。

引き続き、実際の災害対応に地すべり災害対応のBIM/CIMモデルを活用していき、災害対応の効率化・迅速化を図っていくことが必要と考えている。

### 参考文献

- 1) 和田佳記・竹下航・杉本宏之：地すべり災害の初動時におけるCIMモデルの活用-令和2年7月豪雨での災害対応の事例-、日本地すべり学会誌、Vol. 58、No. 2、pp23-29、2021
- 2) 竹下航：地すべり災害対応のCIMモデルを活用したリモートによる技術支援、砂防と治水Vol. 53、No. 4、pp29-31、2020
- 3) 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：地すべり災害対応のBIM/CIMモデルに関する技術資料、土木研究所資料 第4412号、[https://www.pwri.go.jp/team/landslide/kanrisya/cim/cim\\_model.pdf](https://www.pwri.go.jp/team/landslide/kanrisya/cim/cim_model.pdf)、2021
- 4) 国土交通省：BIM/CIM活用ガイドライン(案)第3編 砂防及び地すべり対策編、<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001395763.pdf>、2021

## 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（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、梶山敦司

#### 【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、過去の道路斜面災害における降雨の特徴の整理、災害発生率と降雨の関係の分析を行った。また、崩壊と各種雨量指標の関係を詳細に分析できるようにするため、国土交通省の XRAIN データから各種の雨量指標（時間雨量、連続雨量、土壌雨量指数、48 時間雨量）を迅速に算出するプログラムを開発した。

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、人的被害の発生の懸念など安全・安心上の大きな課題となるとともに、交通機能確保の観点からも課題となっている。また、重要路線等においてはゲリラ豪雨や急激な融雪に対しても、早期の交通機能の確保が求められている。これらの課題に対し、本研究は災害データ及び関連する地形・地質状況、降雨状況を分析することにより、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

災害発生と降雨との関係を検討するため、以下の検討を行った。

##### (1) 直轄国道斜面災害

平成 20～23 年度に全国の直轄国道で発生した 115 件の道路斜面災害における降雨を分析し、道路防災点検<sup>1)</sup>の事前スクリーニングで点検対象から外れた箇所（以下「点検対象外箇所」）、点検で特に新たな対策を必要としないとされた箇所（以下、「対策不要箇所」）及び点検により災害危険箇所として捕捉されていた箇所（「対策が必要と判断される」及び「防災カルテを作成し対応する」とされた箇所）における降雨の特徴を整理した。

##### (2) 平成 23 年 紀伊半島豪雨災害

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) 平成 30 年 西日本豪雨災害

平成 30 年 7 月の西日本豪雨対象として、アメダスデータをもとに降雨と道路斜面災害の関係について分析を行った。

##### (4) XRAIN データに基づく雨量指標算出プログラムの作成

崩壊と各種雨量指標の関係を詳細に分析できるようにするため、国土交通省の XRAIN データから各種の雨量指標（時間雨量、連続雨量、土壌雨量指数、48 時間雨量）を迅速に算出するプログラムを開発した。

#### 3. 研究結果

##### 3.1 直轄国道斜面災害

###### 3.1.1 災害発生時の降雨の生起確率

災害が短時間降雨と長時間降雨のいずれの影響を受けているかを検討するため、災害発生前 24 時間以内の最大時間雨量の生起確率と災害発生前 24 時間の累積雨量の生起確率の比較を行った結果を図-1 及び 2 に示す。点検対象外箇所の災害は長時間降雨・短時間降雨のいずれの生起確率の領域でも発生している（図-1）。一方、対策不要箇所での災害は 24 時間累積雨量の生起確率が低く時間雨量の生起確率が高い領域で多く発生している（図-2）。このことは、対策不要箇所の場合は点検において短時間豪雨で発生する危険要因に対する判断を誤っている場合が多いことを示している

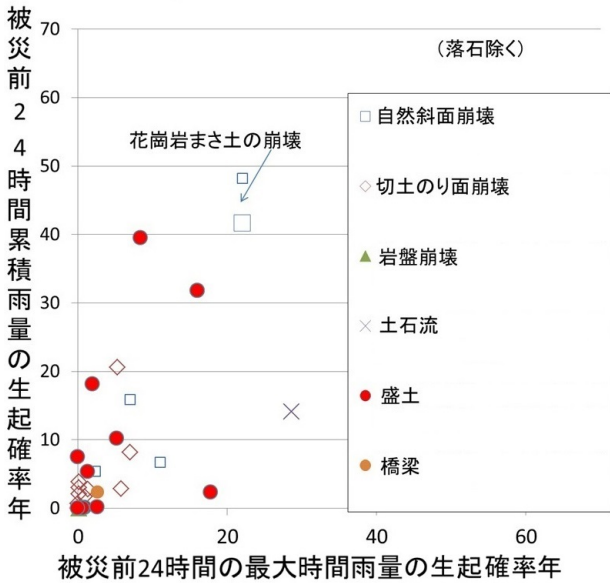


図-1 平成 20～23 年度直轄国道災害事例のうち点検対象外箇所災害の生起確率分布

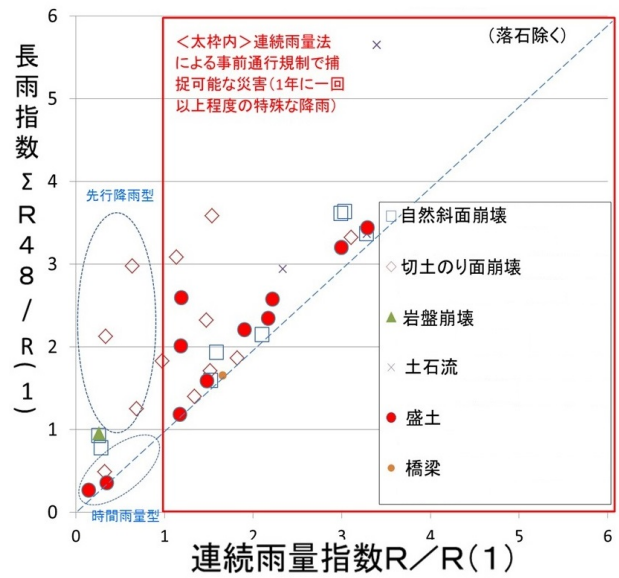


図-3 連続雨量指数と長雨指数の関係(平成 20～23 年度直轄国道災害事例のうち点検対象外箇所災害)

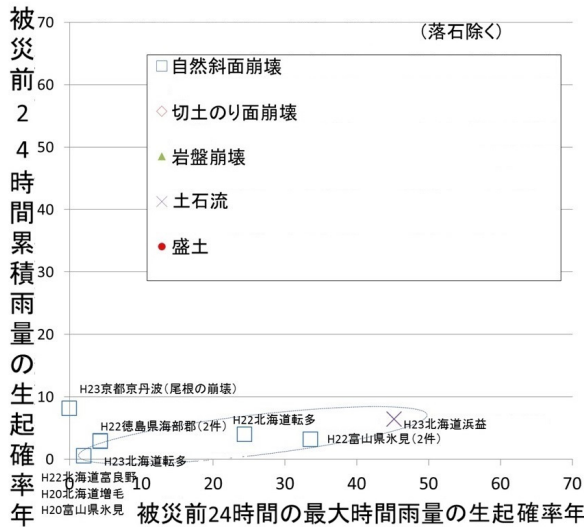


図-2 平成 20～23 年度直轄国道災害事例のうち対策不要箇所災害の生起確率分布

と考えられる。

### 3.1.2 災害発生に対する先行降雨の影響

災害発生時の降雨より以前の先行降雨の影響を検討するため、川添ほか<sup>2)</sup>による連続雨量指数と長雨指数の比較を行った結果を図-3 及び 4 に示す。図-3、図-4 に示した連続雨量指数  $R/R(1)$  は、災害発生時の連続雨量を災害発生時連続雨量期間における生起確率 1 年に相当する連続雨量で除した指数であり、長雨指数  $\Sigma 48/R(1)$  は、災害発生時の 48 時間連続雨量を災害発生時連続雨量期間における生起確率 1 年に相当する連続雨量で除した指数を示している。図の破線上の領域(長雨指数=連続雨量指数)の災害は、先行降雨のない降

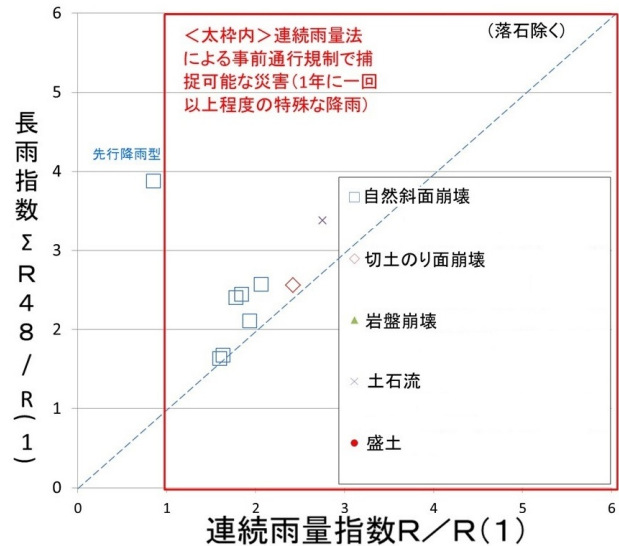


図-4 連続雨量指数と長雨指数の関係(平成 20～23 年度直轄国道災害事例のうち対策不要箇所災害)

雨災害を示している。点検対象外箇所の災害は、自然斜面崩壊や土石流を除くと、災害発生降雨以外にも 48 時間以内に降雨があったものが多いことがわかる(図-3)。一方、対策不要箇所の災害は、先行降雨がなく、短時間の強い降雨で発生したものが多い(図-4)。

## 3.2 平成 23 年紀伊半島豪雨災害

### 3.2.1 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、この両方で切土・自然斜面災害の 9 割超を占めている。なお、崩

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%

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く発生する災害形態である(例えば文献 3) 4)。

### 3.2.2 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-5 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

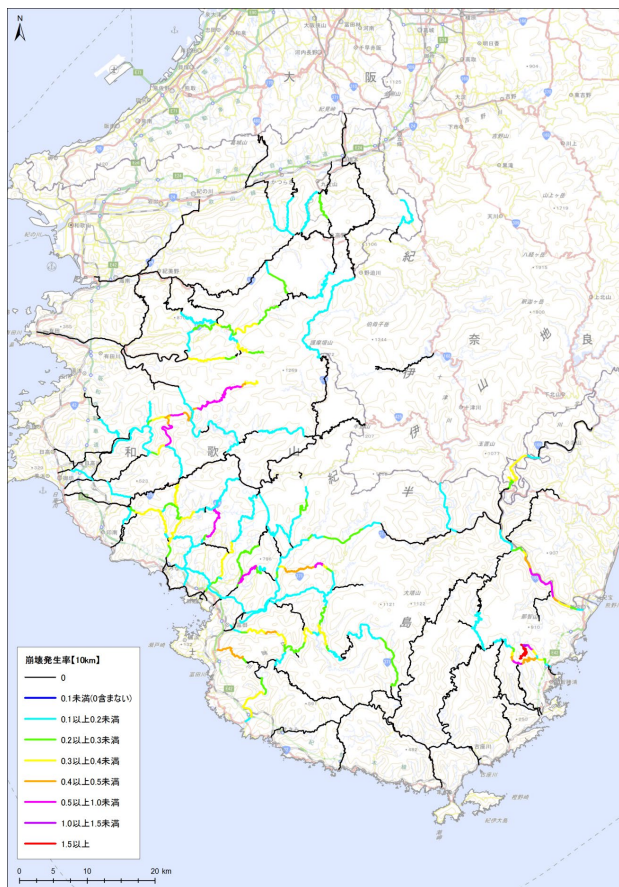


図-5 紀伊半島豪雨による道路沿い災害発生率 (集計区間長 10km の場合)

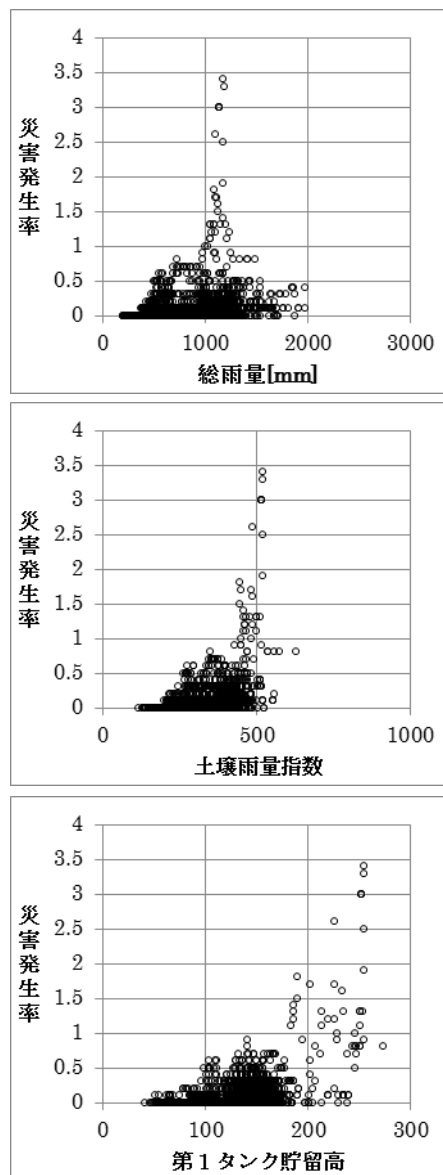


図-6 災害発生率と降雨指標との関係 (災害発生率の集計区間長 10km、降雨指標が総雨量、土壌雨量指数、第1タンク貯留高の場合の例)

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。

### 3.2.3 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-6 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。

### 3.3 平成30年西日本豪雨災害

#### 3.3.1 災害の状況

西日本豪雨における道路斜面災害の府県別の内訳を表-3に示す。これは7月10日時点までの国道及び府県道の通行止め等の情報を中部地方以西の各地方整備局及び府県のホームページに掲載された情報から収集したものである（ただし新潟県及び沖縄県は除く）。収集した災害1,154件のうち828件は斜面災害の確実度が高いもの（「土砂崩壊」「法面崩壊」「土砂流出」などと記載されており明らかに斜面災害と認められるもの）、それ以外の326件は斜面災害の確実度が前者に比べて低いもの（「道路損壊」「路肩損壊」あるいは単に「災害」などと記載されており斜面災害の可能性はあるが河川災害との区別が難しいもの）である（図-7～10では前者を確実度高、後者を確実度中と区別して示している）。なお、「洗掘」「冠水」など明らかに原因が斜面災害でないと認められるものについては除外している。

表-3 西日本豪雨における道路斜面災害の府県別内訳

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

#### 3.3.2 降雨と道路斜面災害の関係

西日本豪雨における降雨の分布と道路斜面災害位置を図-7～10に示す。降雨は気象庁より公表されているアメダス観測点における7月3～8日の6日間のデータを使用した。降雨の「分布図の作成に当たってはGISによるスプライン補完を行った。

図-7は7月3～8日の6日間の積算雨量の分布であ

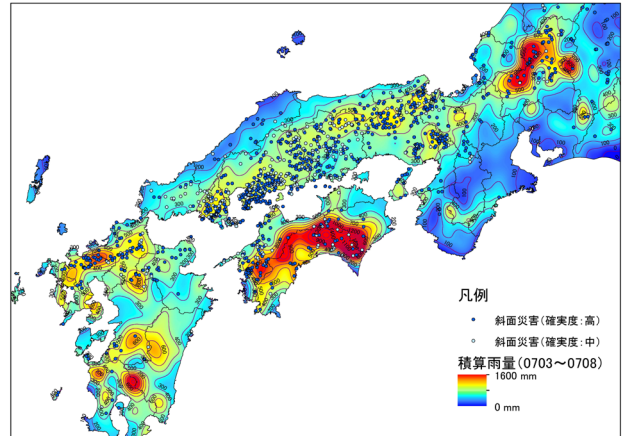


図-7 積算雨量分布図（7月3～8日）

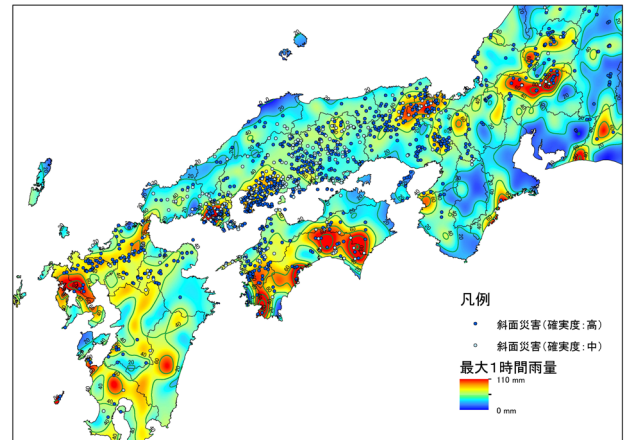


図-8 最大1時間雨量分布図（7月3～8日）

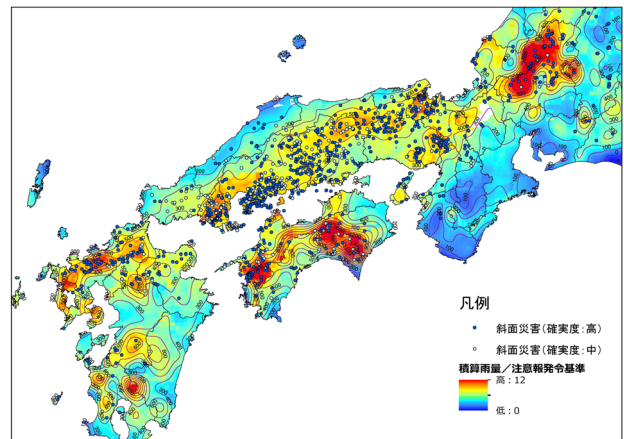


図-9 積算雨量／大雨注意報発令基準分布図（7月3～8日）

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

図-8は7月3～8日の6日間における最大1時間雨



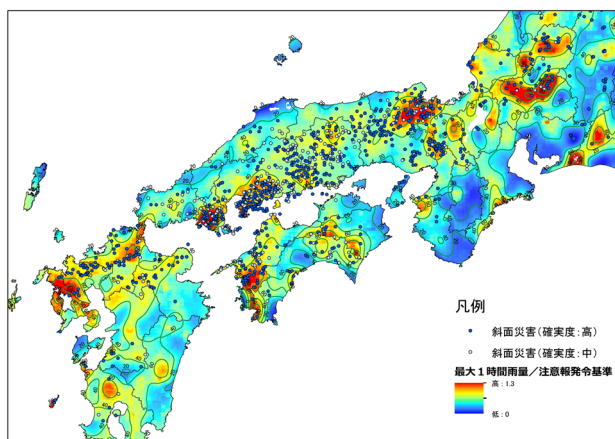


図-10 最大1時間雨量／大雨注意報発令基準分布図  
(7月3～8日)

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

そのことを踏まえ、積算雨量及び最大1時間雨量を 1km メッシュごとに定められている大雨注意報の発令基準（土壌雨量指数で設定されており、地域ごとの降雨経験が反映されていると考えられる）で割り戻した分布図を図-9～10 に示す。図-7～8 に比べて、広島県南部、山口県東南部、愛媛県西部などで分布図と調和する傾向にあることがうかがえる。したがって、今後、既往最大雨量や降雨確率を考慮した降雨指標と災害発生との関係を分析する必要があると考えられる。

### 3.4 XRAIN データに基づく雨量指標算出プログラムの作成

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) 5)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壌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) 6)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。

#### 3.4.1 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。

##### (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 7)
- 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 8)

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。
- ・ 地質区分は土壌雨量指数を地質分布に合わせて計算させる場合。

##### (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值と期間を変更できる仕様とした。

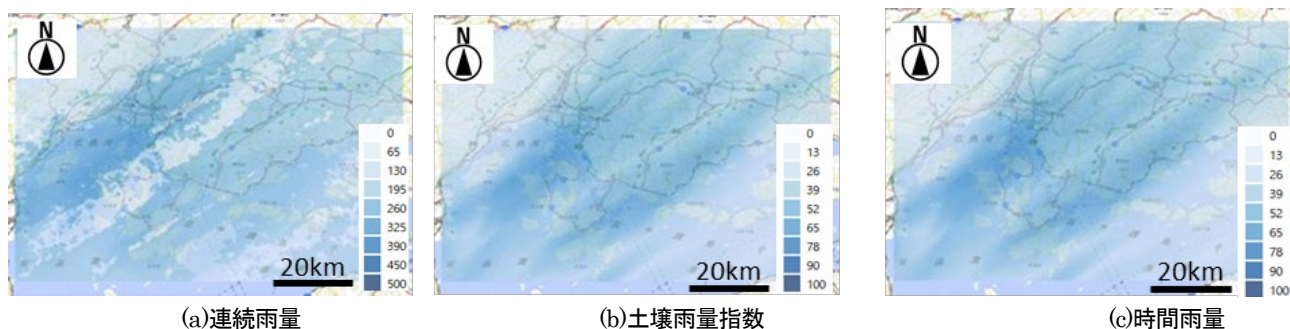


図-11 プログラムを用いて出力した雨量情報

4) 土壤雨量指数：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)<sup>9)</sup>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、土壤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土壤雨量指数は、Ishihara and Kobatake(1979)<sup>6)</sup>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

### (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<sup>9)</sup>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<sup>10)</sup>やフリーオープンソフトウェアである QGIS<sup>11)</sup>などでも表示や解析を行える形式である。

### 3.4.2 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-11 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、土壤雨量指数を示す。

## 4. まとめ

過去の道路斜面災害における降雨の特徴の整理、災害発生率と降雨の関係の分析を行った。また、崩壊と各種雨量指標の関係を詳細に分析できるようにするため、国土交通省の XRAIN データから各種の雨量指標(時間雨量、連続雨量、土壤雨量指数、48時間雨量)

を迅速に算出するプログラムを開発した。

## 参考文献

- 1) 財団法人道路保全技術センター：道路防災点検の手引き(豪雨・豪雪等)、179p. 2009年
- 2) 川添英生・加藤俊二・佐々木哲也・金井哲男・浅井健一：豪雨等による道路のり面災害の降雨パターン分析、平成29年度土木学会全国大会講演集、2017年
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 生駒栄司・佐野仁美・松村浩道・根本利弘・小池俊雄・喜連川優：XRAIN 雨量データ視覚化・ダウンロードシステム「AMeNOW!」の構築、第78回全国大会講演論文集、no.1、pp.475-476、2016年
- 6) Ishihara, Y. and Kobatake, S. : Runoff model for flood forecasting, Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ. vol.29, pp.27-43, 1979
- 7) 気象業務支援センター：解析雨量、解析雨量. URL : <http://www.jmbc.or.jp/jp/offline/cd0100.html> (確認日：2020年4月15日)
- 8) 岡田憲治・楨原康隆・新保明彦・永田和彦・国次雅司・斎藤清：土壤雨量指数、天気、Vol.48, no.5, pp.59-66、2001年
- 9) GOLDENSOFTWARE : Surfer. URL : <https://www.goldensoftware.com/products/surfer> (確認日：2020年6月17日)
- 10) ESRI : ArcGIS Desktop. URL : <https://www.esri.com/products/arcgis-desktop/> (確認日：2020年4月15日)
- 11) QGIS プロジェクト : QGIS. URL : <https://www.qgis.org>

[org/en/site/index.html](http://org/en/site/index.html) (確認日: 2020年6月17日)

### 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。令和 2 年度は、前年度に検討した時間雨量－土壌雨量指数による土砂災害警戒情報の CL を道路の事前通行規制に用いる場合の課題を整理し、それに対して土壌雨量指数の各タンクの役割を再考して土中水分の状態を表す第 2、第 3 タンクの合計値と土壌雨量指数との関係を用いた新しい規制手法の検討を行い、災害の捕捉性や規制の効率性の面からも時間雨量－土壌雨量指数と比してわかりやすい手法であることを確認した。

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。令和 2 年度は、前年度の検討を踏まえて時間雨量－土壌雨量指数による土砂災害警戒情報

の CL を道路の事前通行規制に用いる場合の課題を整理し、それに対して土壌雨量指数を活用した新しい通行規制手法の検討を行った。

#### 2. 豪雨等による道路のり面災害の降雨パターン分析

##### 2.1 災害時降雨データの整理

平成 20～23 年度に発生した直轄国道の斜面災害事例より切土および盛土のり面で発生した表層崩壊・土砂流出等の 61 の災害事例について、災害時の降雨状況を分析し事前通行規制の指標検討の基礎資料として整理を行った。

まず始めに、災害箇所最寄りのアメダスデータを用いて、各事例の災害発生時刻からさかのぼり 1 ヶ月前までの降雨データを収集し、事前通行規制の指標値の候補として考えられる 1、3、6、12、24、48、72 時間毎の累積雨量、事前通行規制で用いられる連続雨量および土壌雨量指数を算出し整理した。図-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性を考慮して適宜見直しが行われている。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。 $\Sigma 6/R$

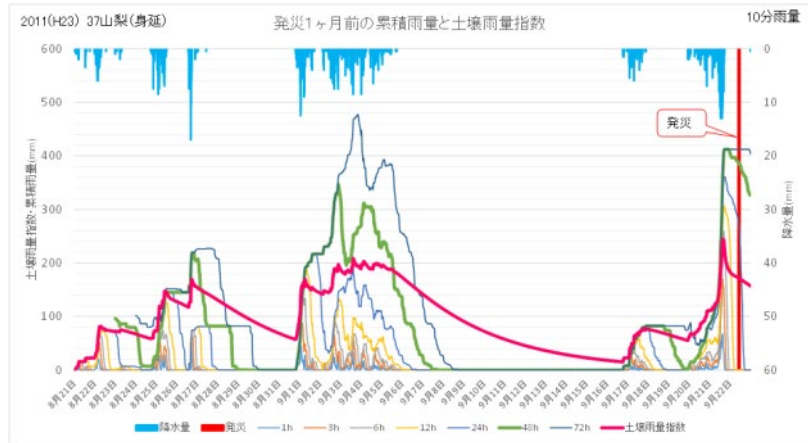


図-1 災害時降雨データの整理例

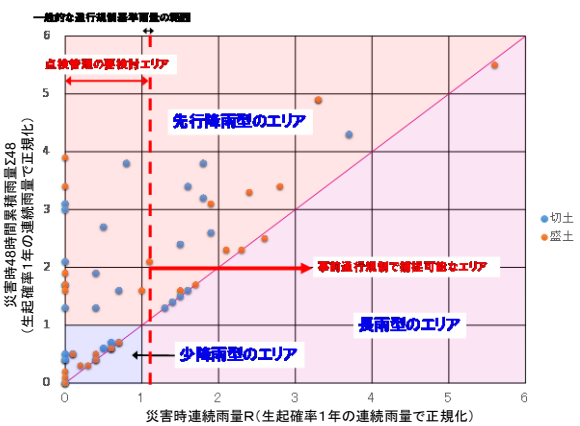


図-2 災害時雨量の関係 ( $R/R(1) - \Sigma 48/R(1)$ )

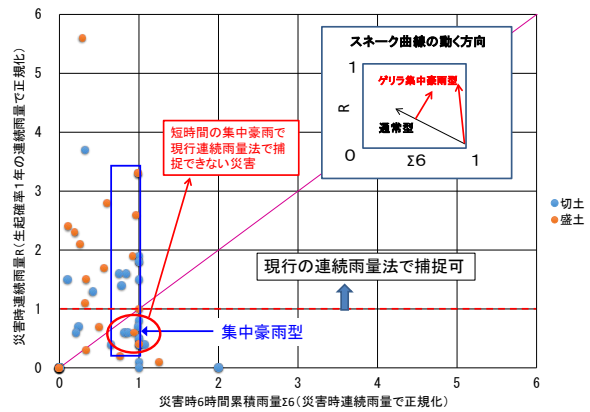


図-3 災害時雨量の関係 ( $\Sigma 6/R - R/R(1)$ )

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

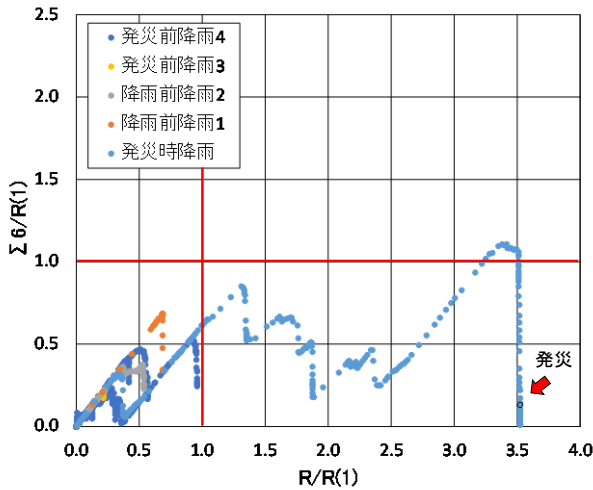


図-4 長雨型災害のスネーク曲線の例

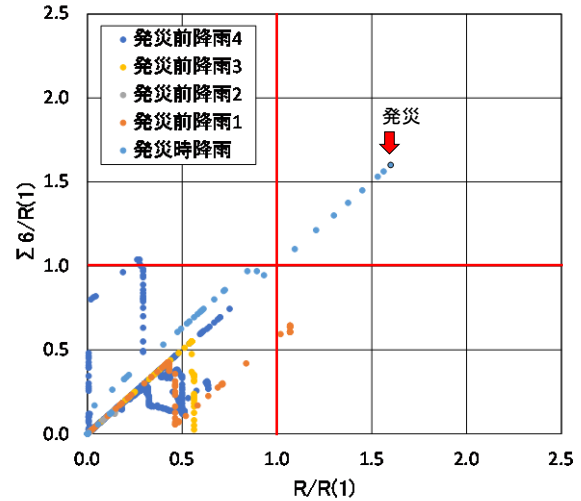


図-5 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例

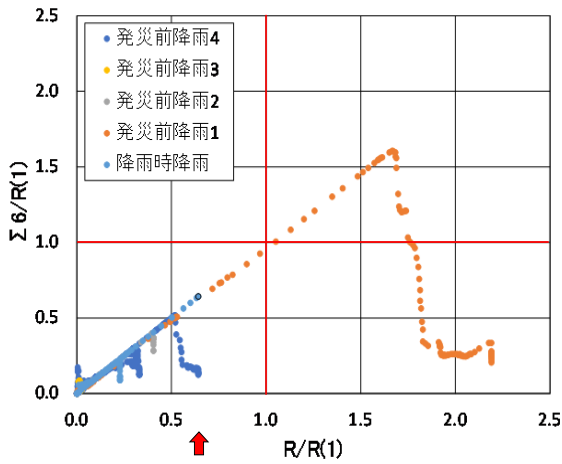


図-6 先行降雨型災害のスネーク曲線の例

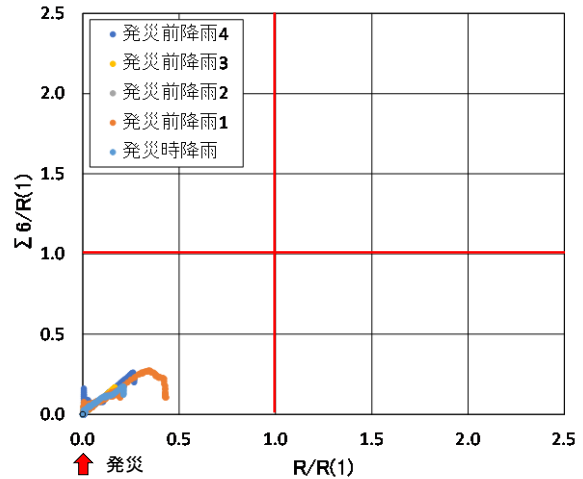


図-7 少降雨型災害のスネーク曲線の例

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Σ6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Σ6を R(1) で正規化した値 (Σ6/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) ≥ 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、

Σ6/R(1) ≥ 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 Σ6/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 Σ6/R(1) ≥ 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-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 Σ6/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

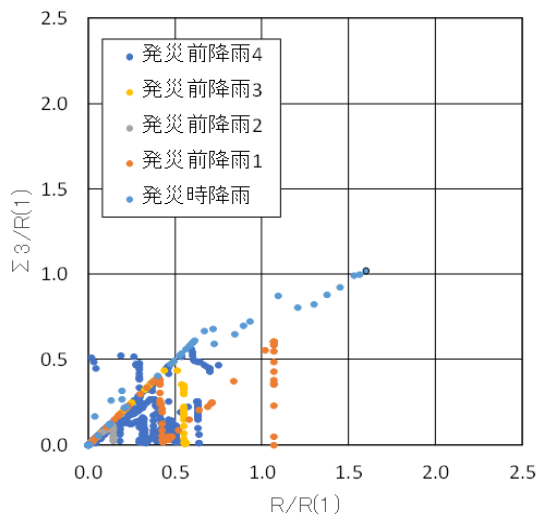


図-8 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例  
( $r(\Sigma 1)$  による整理)

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-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-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-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

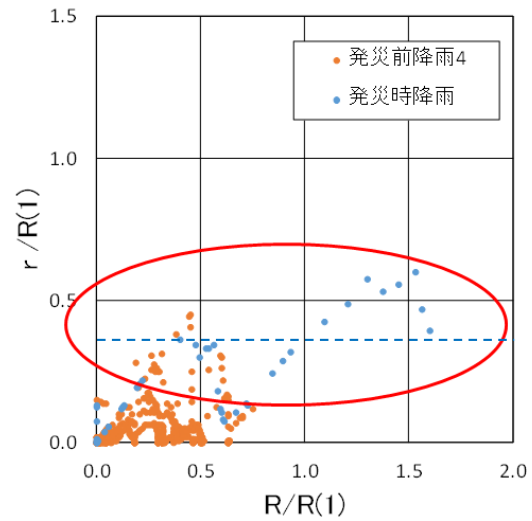


図-9 集中豪雨型災害のスネーク曲線の例

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と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内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、災害箇所と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-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1km<sup>2</sup>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

表-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-10 災害箇所と観測箇所の位置

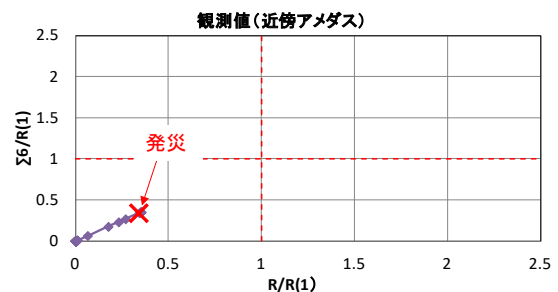


図-11 近傍アメダスの降雨パターン

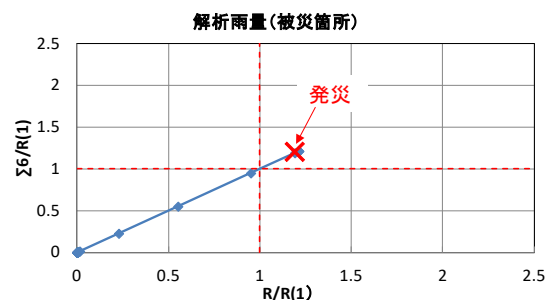


図-12 解析30分雨量の降雨パターン



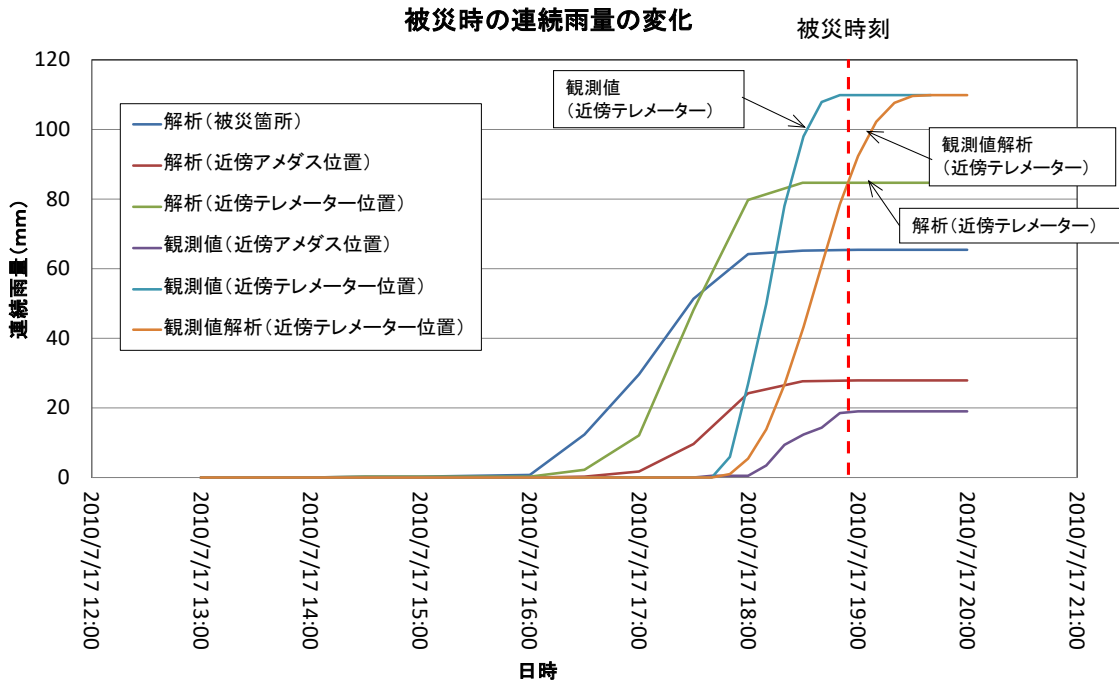


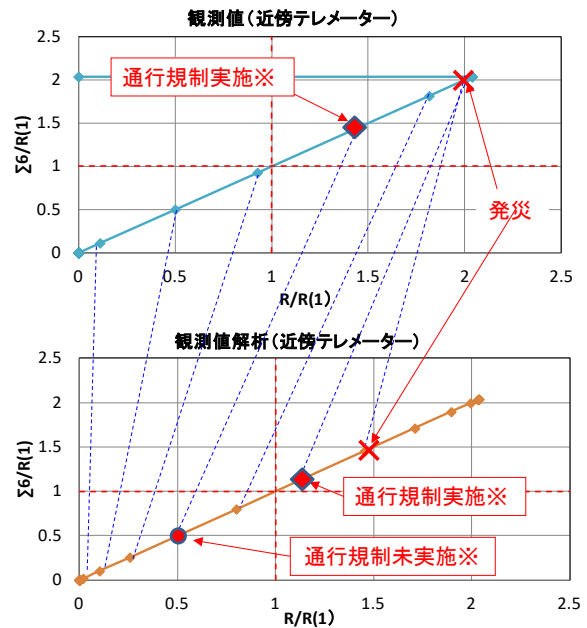
図-13 各雨量データによる連続雨量の変化

雨について同様の比較を行った。さらに、レーダーアメダス解析雨量の速報値は 10 分毎に前 1 時間の解析雨量 (1km メッシュ単位) が報告され、土壌雨量指数の計算では時間雨量を 1/6 した 10 分雨量 (以下、解析 10 分雨量) を用いていることから、テレメーター雨量については、実測の 10 分雨量 (以下、観測 10 分雨量) とテレメーターの観測値から解析 10 分雨量と同様の方法で求めた値 (以下、換算 10 分雨量) による降雨パターンの比較を行った。

当該箇所は、平成 22 年に盛土のり面の表層が崩壊した箇所、災害箇所から近傍アメダスまでの距離が約 13km、近傍テレメーターまでの距離が約 5km の位置にある (図-10 参照)。図-11 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-12 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-13 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



※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-14 実雨量と換算 10 分雨量の比較

断されると雨量として記録されるため、雨量計で観測された実降雨よりも早い時間から雨量を記録しているのがわかる。また、解析 30 分雨量と観測値を比較すると、近傍

テレメーターでは解析雨量の方が少なく、近傍アメダスでは観測値の方が少ない降雨となっており、解析雨量は実降雨に対して過大となる場合もあれば過小となる場合もある。過大となる場合は安全側に判断されるが、過小となる場合には災害を見逃す恐れもある。

また、図-13中の近傍テレメーターにおける「観測値」に対して換算10分雨量による「観測値解析」の推移を比較すると、計算方法の特性から初期降雨が少なくなり降雨のピークが遅くなっているのがわかる。

図-14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、被災箇所降雨は図-12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-15参照)。

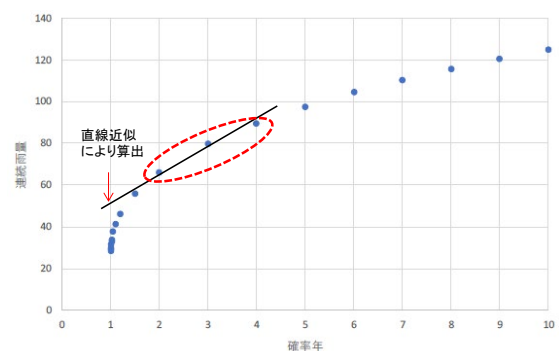
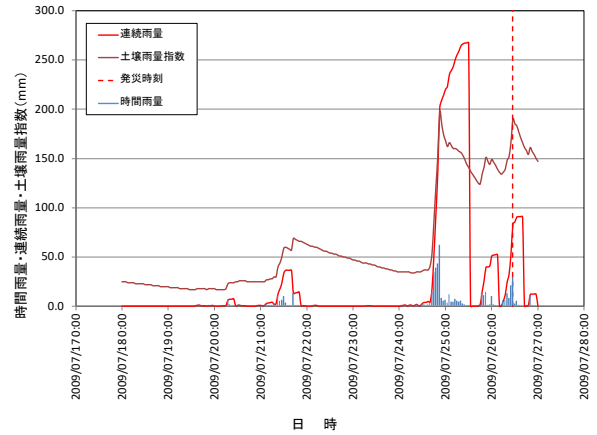


図-15 1年確率値の算出の考え方

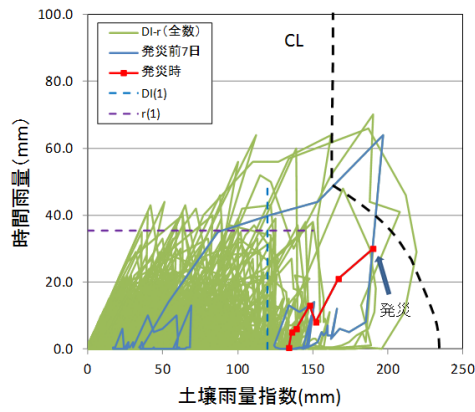
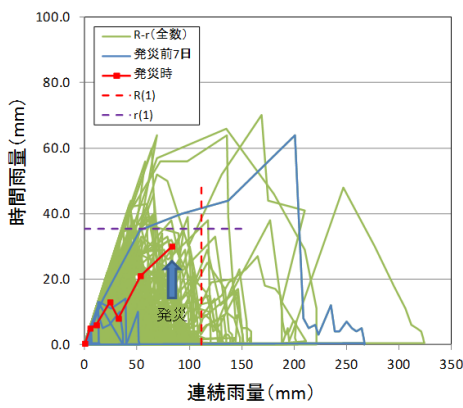
ここでは、先行降雨型災害、集中豪雨型および長雨型災害について、先行降雨の大小に関わらず、各地域の土砂災害警戒情報のCLが確認できた災害事例の被災当日およびその前7日間の降雨状況、土壌雨量指数および連続雨量に



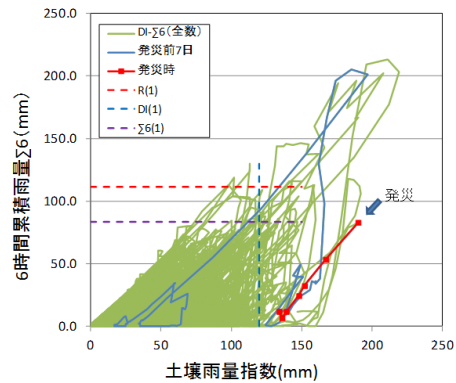
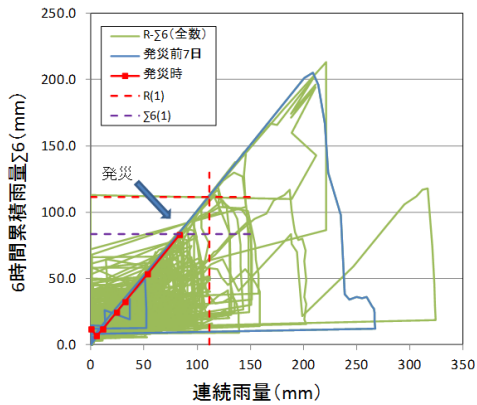
(a) 被災箇所状況



(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-16 災害事例1の降雨状況

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

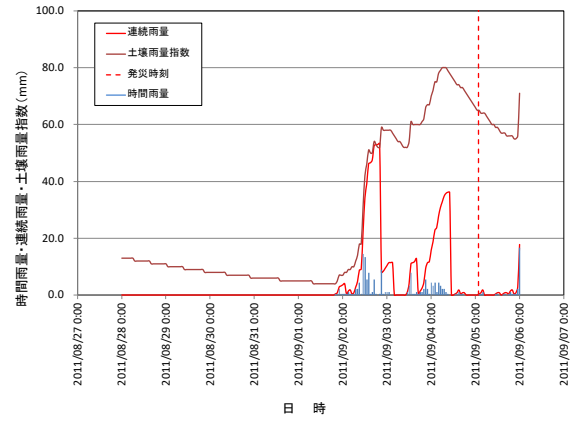
1) 事例1 (図-16)

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

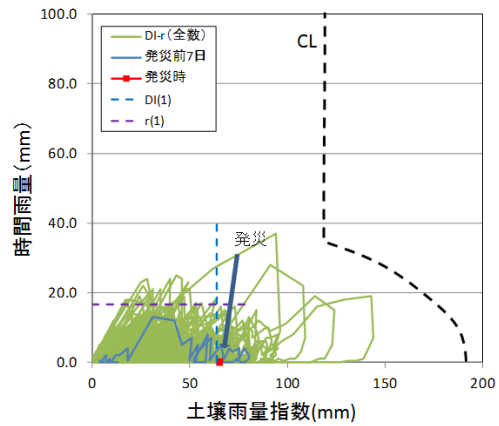
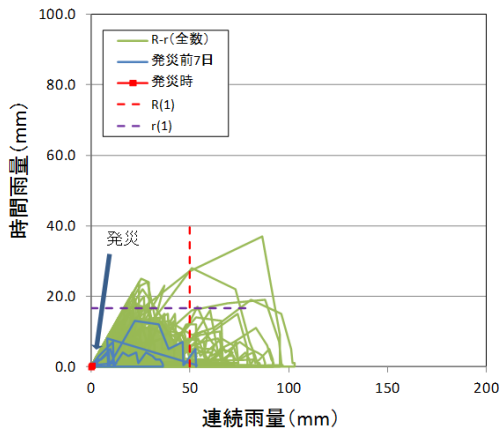
ていた。当時の降雨状況は発災2日前に既往最大に近い非常に大きな降雨があり、この降雨の影響により災害に至ったものと考えられる。のり面では多くの湧水が見られたため池からの浸透水により地下水位が高く、被災後の復旧工としてグラウンドアンカー+横ボーリングによる排水対策が行われている。2日前の先行降雨はこの地域の土砂災害警戒情報のCLを超えるものであったが被災には至らず、地下水位の上昇と被災当日の降雨により既設の鉄筋挿入



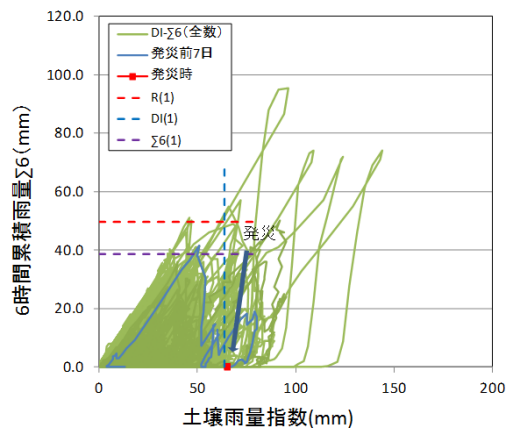
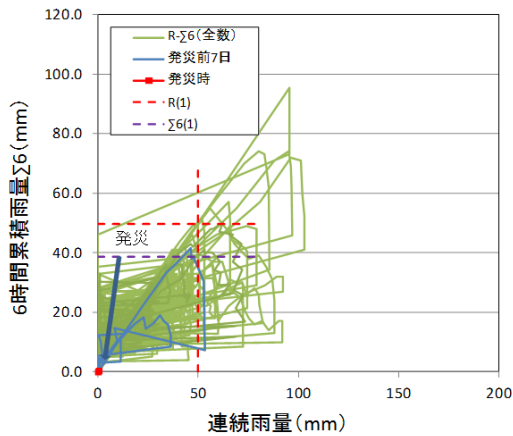
(a) 被災箇所の状況



(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-17 災害事例2の降雨状況

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、

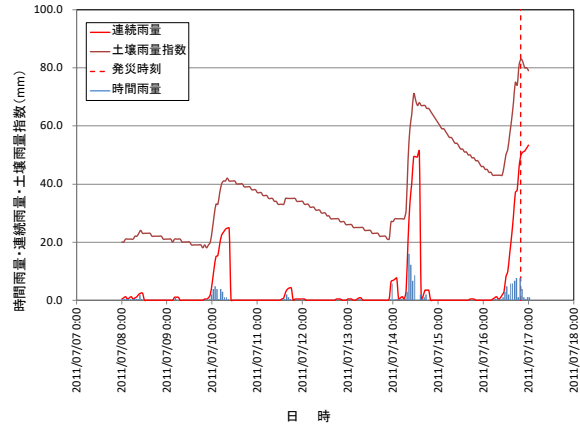
約1日で土壌雨量指数が大きく減少している点である。連続雨量と異なり、降雨が継続していても時間雨量の大きさによっても土壌雨量指数が減少する場合があります。規制解除方法の検討の際に留意すべき点と考えられる。

2) 事例2 (図-17)

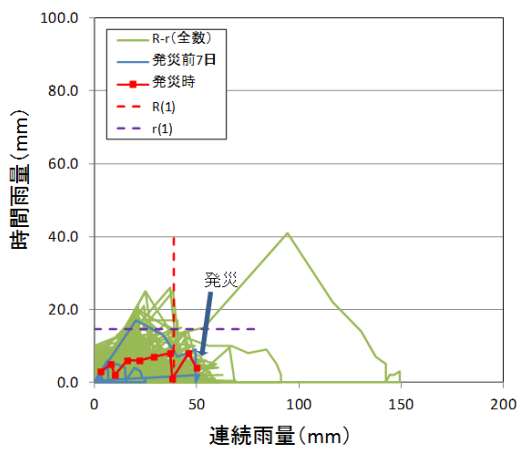
当該箇所は、背後が段丘平坦地で比較的小規模なり面で、連続するのり面内で過去にも同様の被災形態で複数回



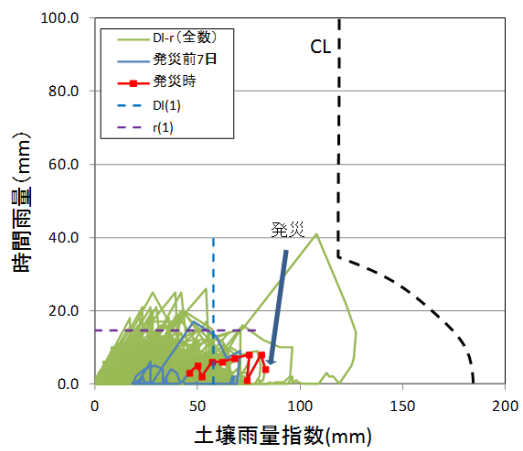
(a) 被災箇所状況



(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

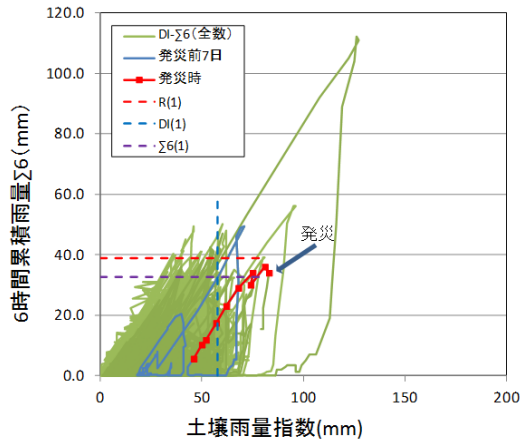
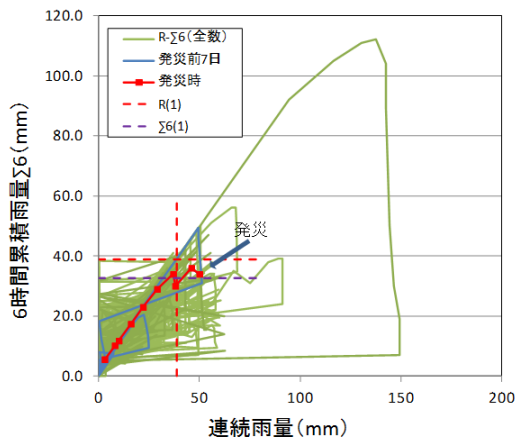


図-18 災害事例3の降雨状況

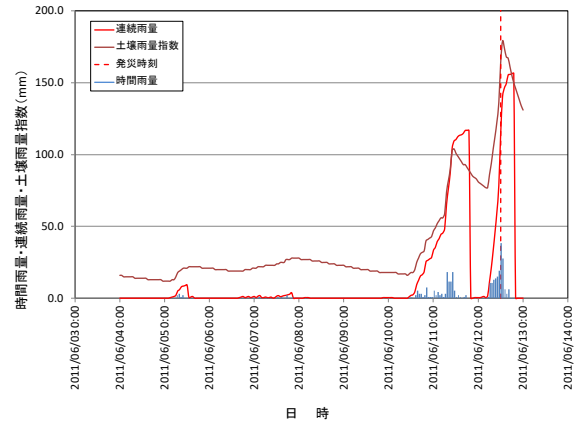
の被災履歴がある箇所である。湧水が多くみられ、地下水位が高い箇所でのり面勾配も1:1.0急勾配であった。また、凍上の影響を受けて脆弱化しやすい地域であり、このため比較的少ない降雨で被災しているものと考えられる。スネーク曲線を見ると、連続雨量はほとんどないが、土壌雨量指数は1年確率を超えており、先行降雨の影響による災害といえる。一方で、過去の災害の被災時期が不明であ

るが、降雨履歴はすべて当地域の土砂災害警戒情報の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。土砂災害警戒情報の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

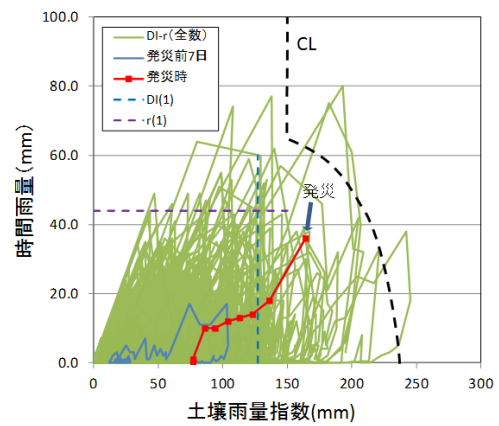
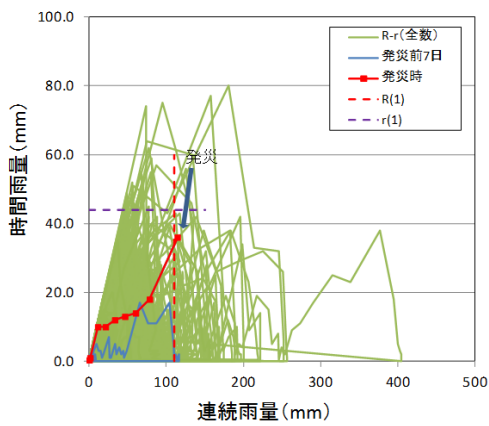
### 3 突発的な自然現象による土砂災害の防災・減災技術の開発



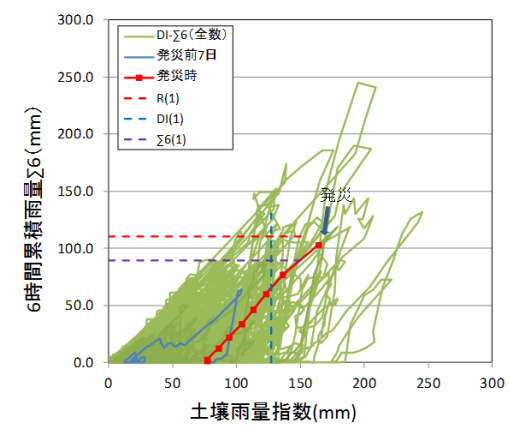
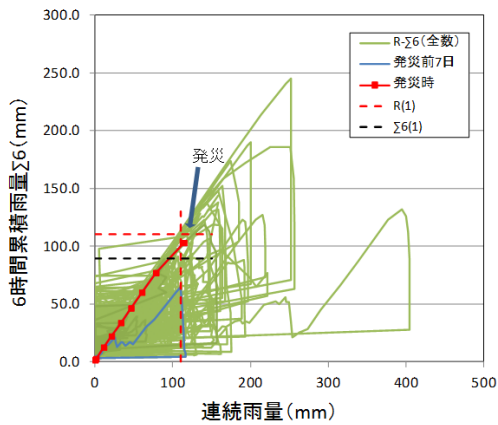
(a) 被災箇所の状況



(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

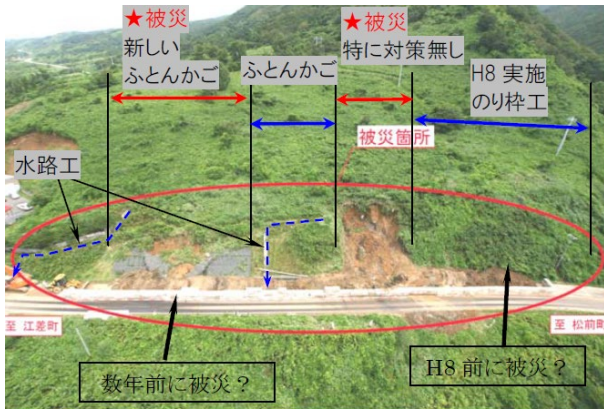
図-19 災害事例4の降雨状況

なりの面保護工を行う等の維持管理対応が妥当な箇所と考えられる。

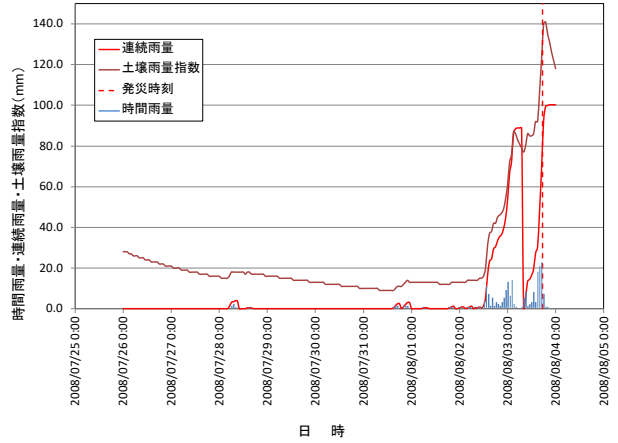
#### 3) 事例3 (図-18)

当該箇所は、背後が段丘平坦地で比較的小規模場なりの面で、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

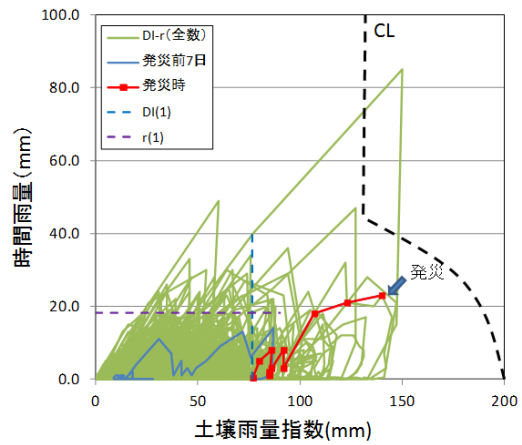
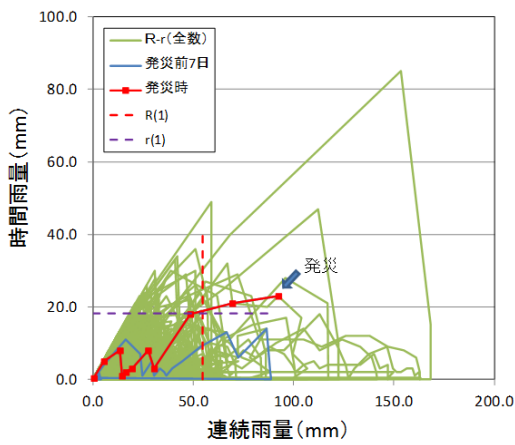
雨水が集中してオーバーフローしたものと推察された)により対策工側部に流水が集中して生じた小規模な侵食によるものある。2日ほど前の先行降雨および発災時の降雨も比較的まとまった降雨であるが、事例2と同様に過去の降雨履歴はすべて当該地域の土砂災害警戒情報のCLの内側にあり、上記の過去の被災もCLでの捕捉はできない。CLが適切でない可能性もあるが、被災要因を踏まえると通行



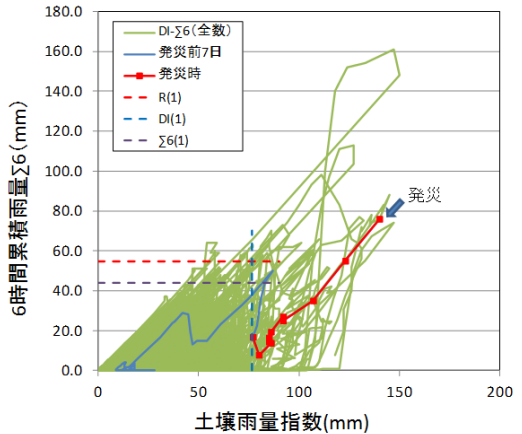
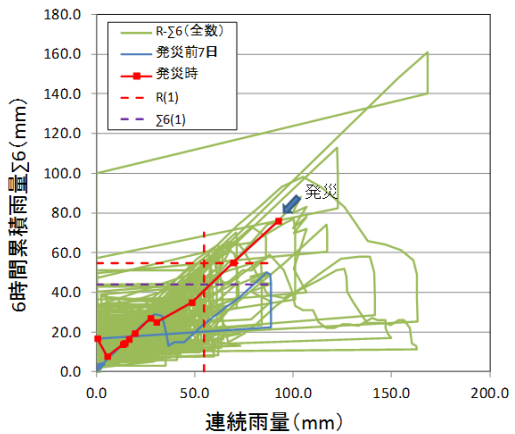
(a) 被災箇所の状況



(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-20 災害事例5の降雨状況

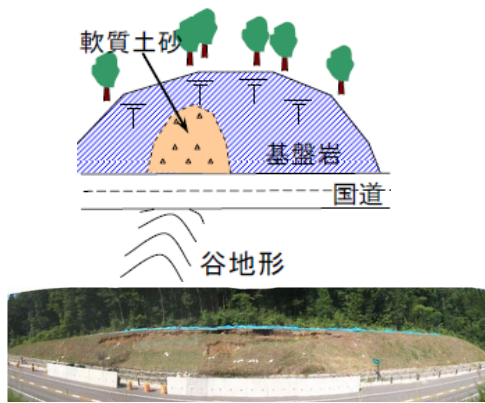
規制ではなく、定期的な点検により排水工の健全性の確認やのり面保護工の範囲の適切な設定や流水対策などの維持管理対応が重要な災害であると考えられる。

4) 事例4 (図-19)

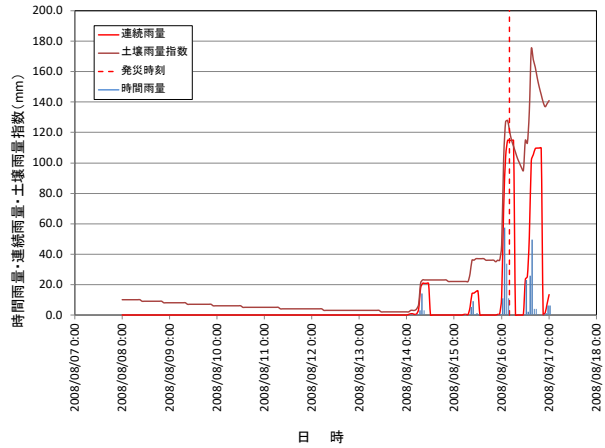
当該箇所は、もともと地下水位が高い箇所を切土しており、切土により地下水の湧出が生じやすくなり、かつ地山は強風化しており切土によりゆるみが生じたところに比

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、

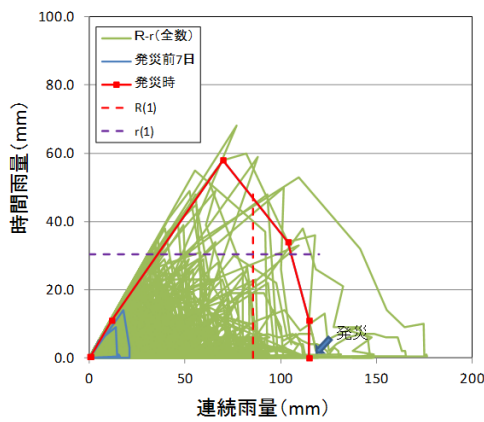
3 突発的な自然現象による土砂災害の防災・減災技術の開発



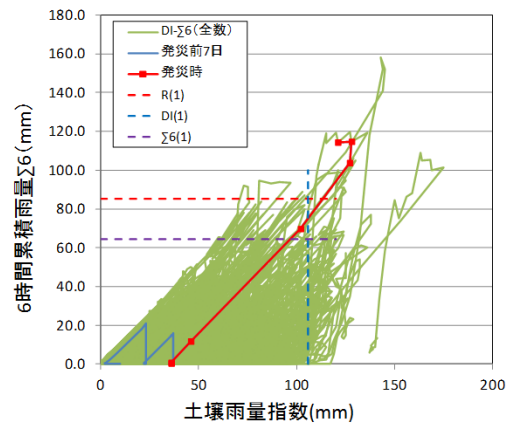
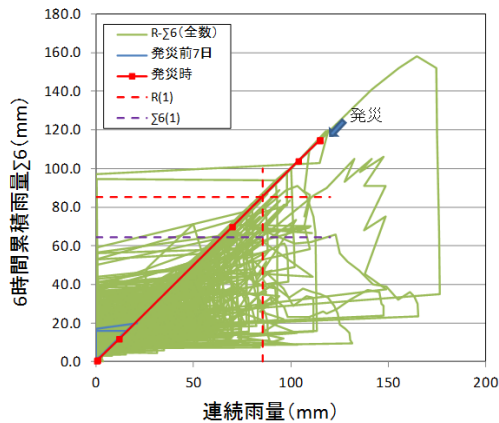
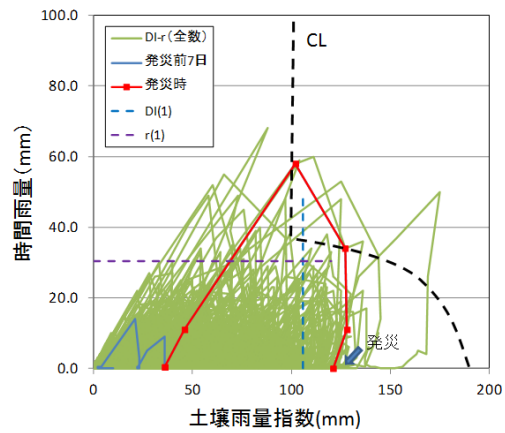
(a) 被災箇所状況



(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-21 災害事例6の降雨状況

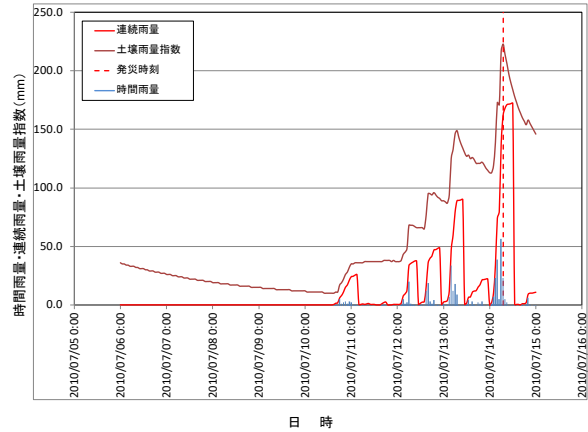
先行降雨の影響も反映して土壌雨量指数も比較的大きな値となつてはいるが、当該地域のCLの内側で発生している。切土法面工事は終了していたが、幸いにも道路供用開始前の被災であったため、道路交通への影響はなかったが、降雨状況によっては供用開始後に発生していた可能性もある。この災害を捕捉するためにはCLの見直しが必要で

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

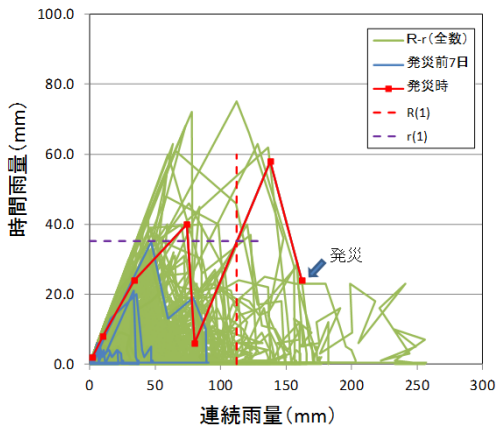




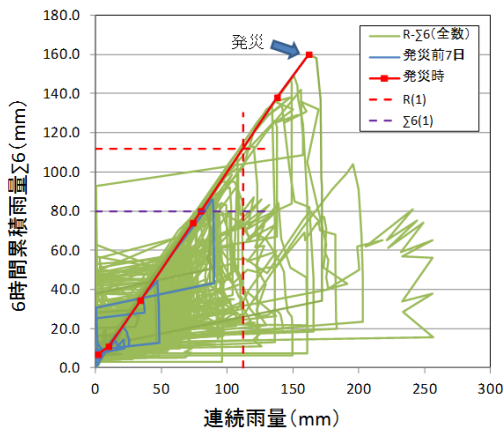
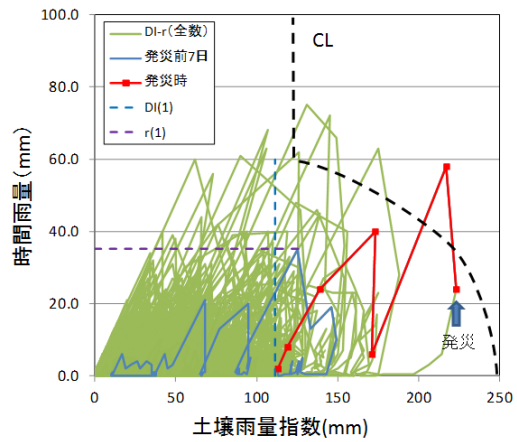
(a) 被災箇所状況



(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

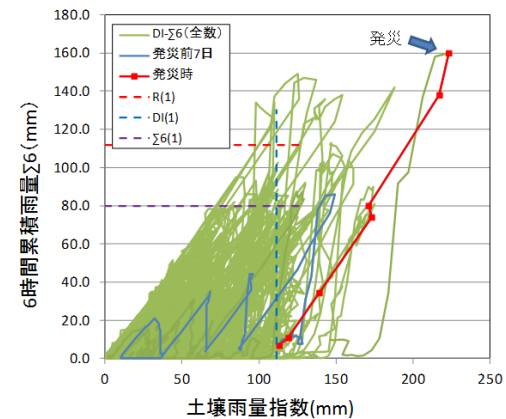


図-22 災害事例7の降雨状況

とも必要と考えられる。

(2) 集中豪雨型災害事例

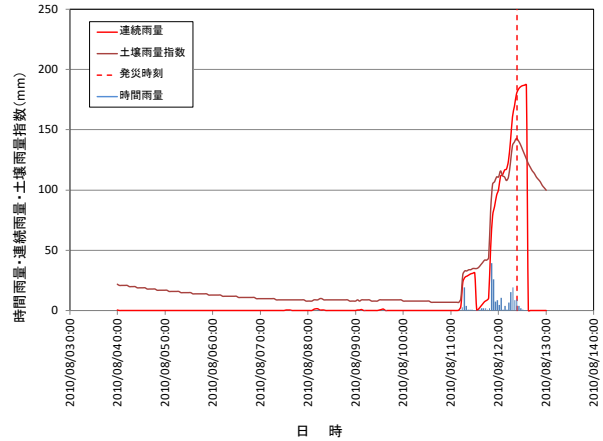
1) 事例5 (図-20)

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、未対策箇所で災害が生じている。海生段丘(粘土層)上に堆積した崖堆積物が豪雨で崩壊した箇所、被災当時の地下水位は非常に高く、

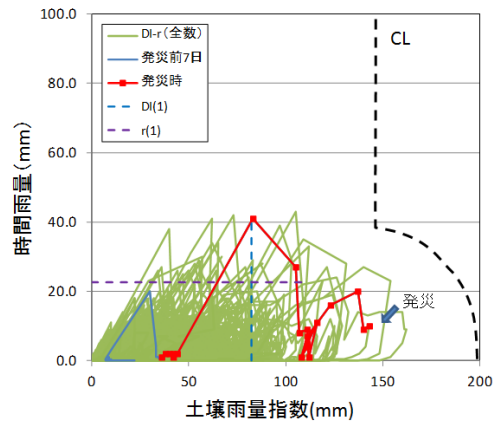
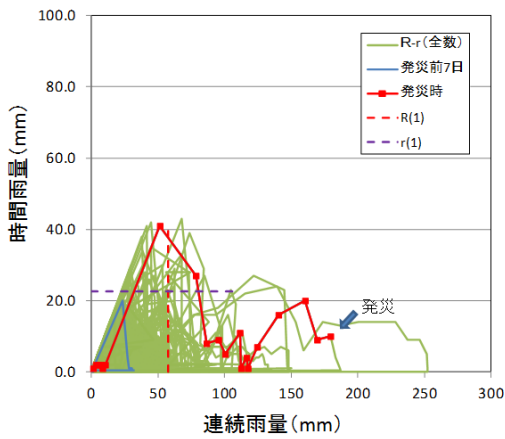
崩壊面からは大量の湧水が確認されている。当時の降雨状況は、先行降雨のリセット直後に非常に大きな連続雨量が継続しており、土壌雨量指数では既往最大に近いものであったが、当地域の土砂災害警戒情報のCLの内側であった。過去に複数回の被災が生じているが被災時期の記録がないためこの降雨で被災したかが不明であるが、CLを超える降雨は1996年に記録した1回のみであり、写真右側



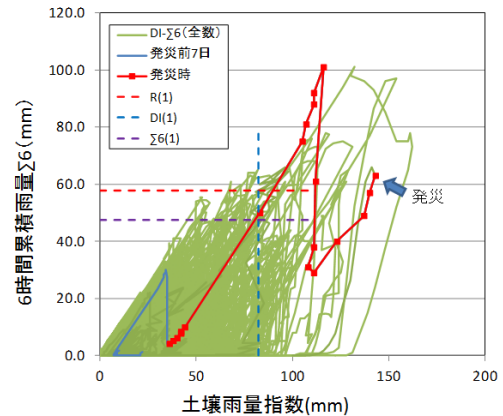
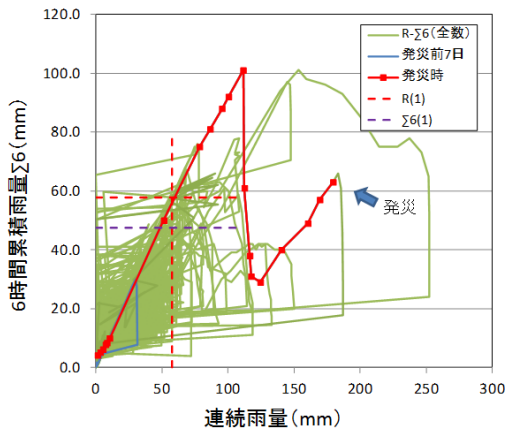
(a) 被災箇所状況



(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-23 災害事例8の降雨状況

のH8実施の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である。当箇所は東上の影響を受けやすい地域であり、経年的に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、復旧時にのり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

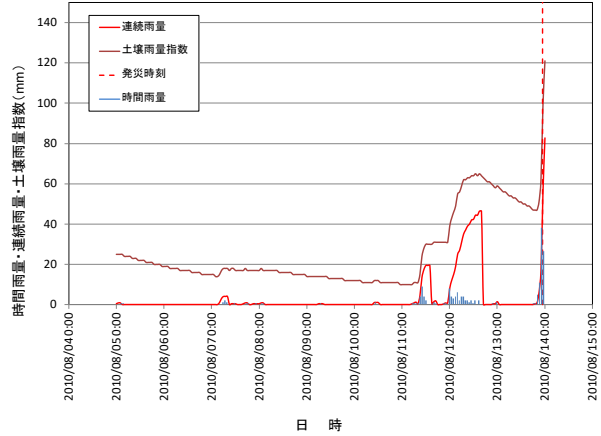
なりの脆弱化の進行の可能性も考えられることから、定期的な点検と補修も重要な箇所であると考えられる。

2) 事例6 (図-21)

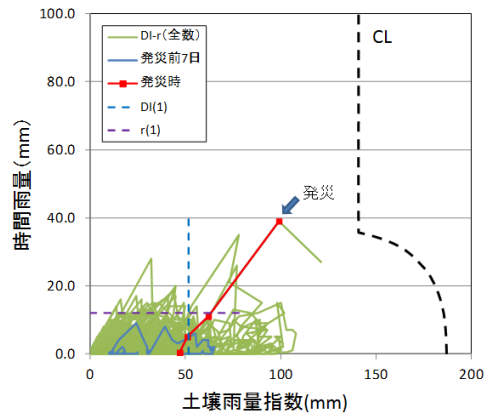
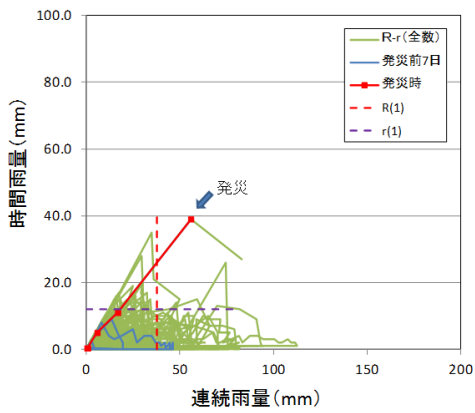
当該箇所は谷地形上を切土した箇所で、基岩上に谷部の軟質土砂が残存していた箇所で生じた災害である。供用開始後1年で被災しており、元地形が谷部であるため、雨水が集中しやすいことも伴い短時間の豪雨で崩壊が発生し



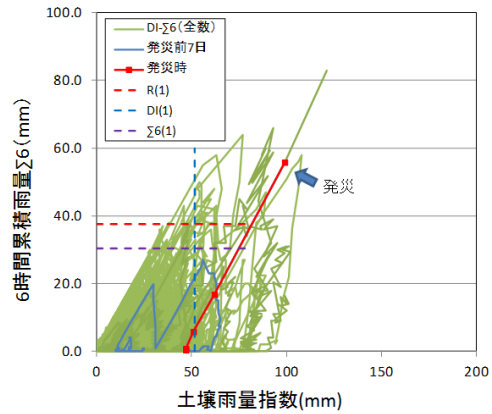
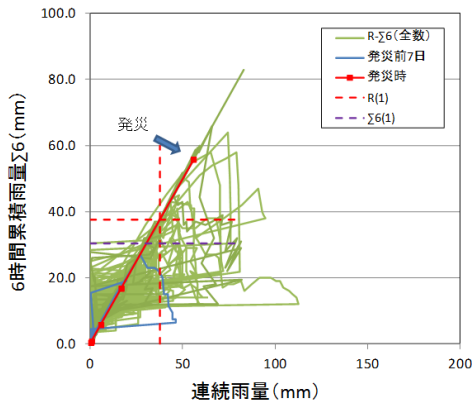
(a) 被災箇所状況



(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

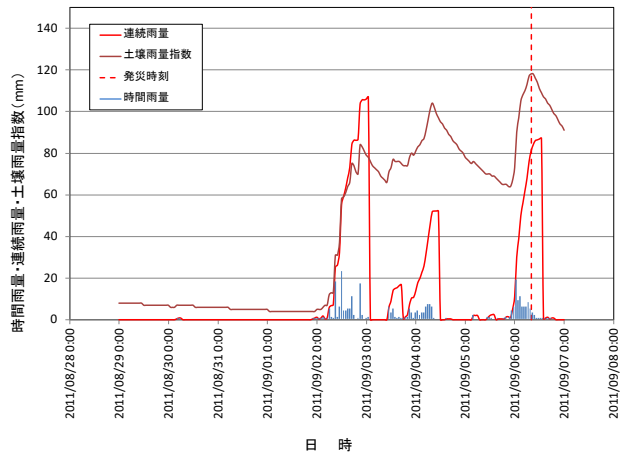
図-24 災害事例9の降雨状況

たとえられる。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、当地域の土砂災害警戒情報のCLを超えており、土砂災害警戒情報の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

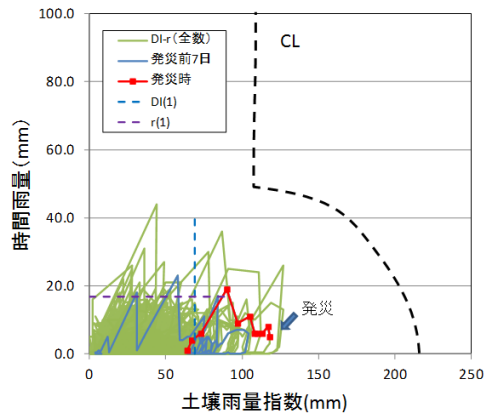
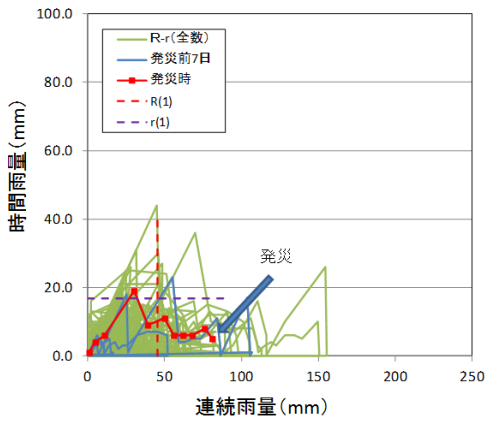
く、短時間集中豪雨の捕捉性についても、土砂災害警戒情報のCLの考え方で捕捉できる可能性も確認できた。元地形が谷部の箇所では、切り取り深さが浅いと軟質土砂が残存しやすいので施工時に注意するとともに、供用開始後も雨水が集中しやすいことから湧水の状況などを重点的に点検することが重要で、変状を確認した場合には対策によりり面の性能を高めることが重要である。



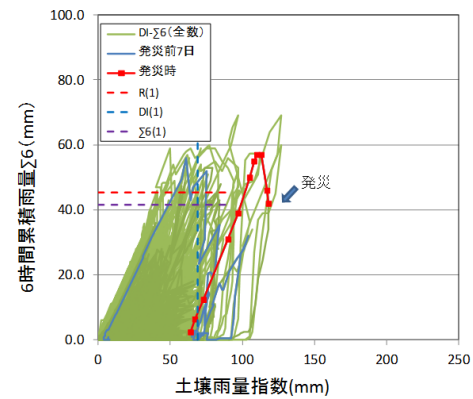
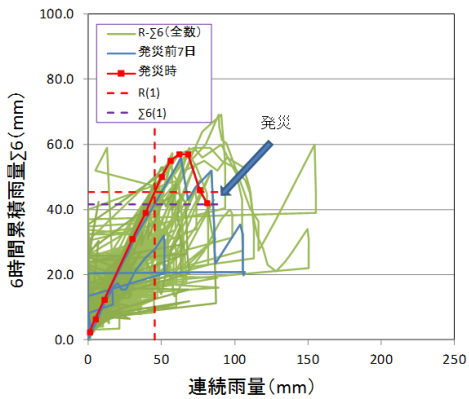
(a) 被災箇所の状況



(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-25 災害事例10の降雨状況

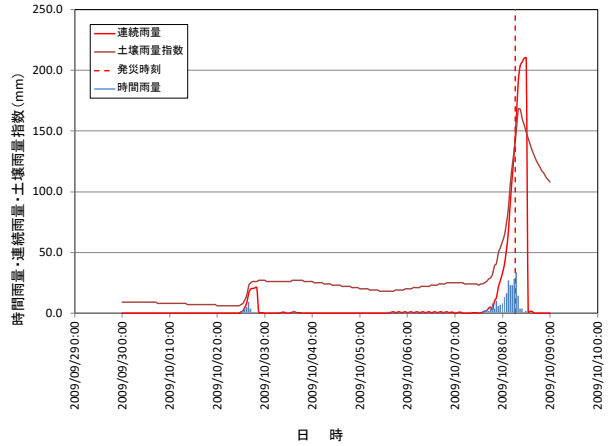
3) 事例7 (図-22)

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

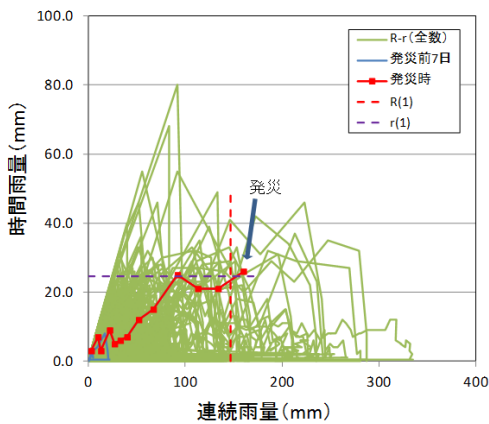
地域の土砂災害警戒情報のCLでも捕捉可能な災害であった。事例6は先行降雨の影響は比較的小さかったが、本災害は先行降雨の影響が顕著な事例の1つで、連続雨量で明確に災害発生降雨を分離することは難しいが、土壌雨量指数を用いることで災害時降雨が明確に分離できている。当該箇所は典型的な表層崩壊であり、土壌雨量指数自体も表



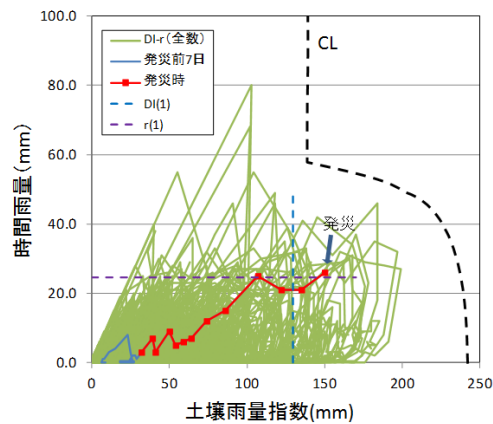
(a) 被災箇所の状況



(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

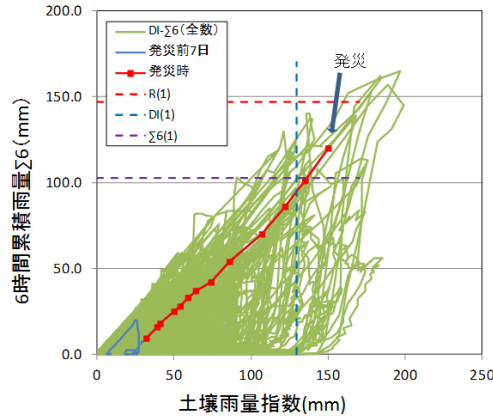
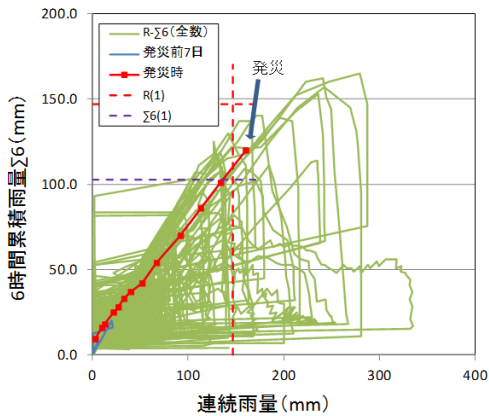


図-26 災害事例 11 の降雨状況

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する。

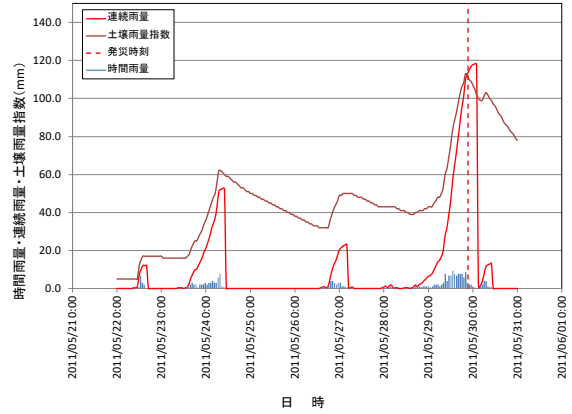
4) 事例 8 (図-23)

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

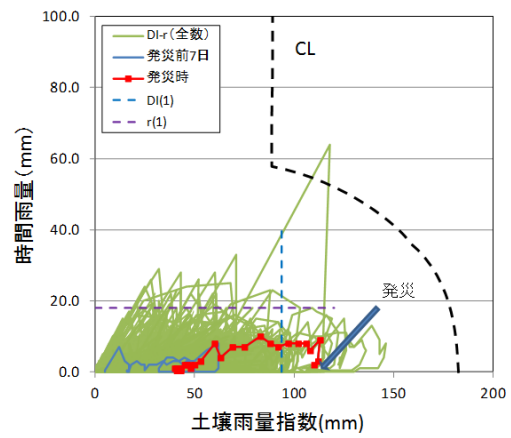
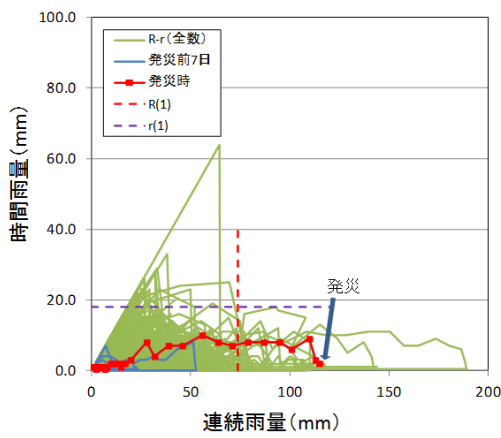
豪雨の山があり、1つ目の山が連続雨量法のリセット直前で2つ目の山が発生している、先行降雨型と集中豪雨型の複合型といえる。土壌雨量指数は、既往最大に近い降雨となっているが、過去の降雨すべてが当地域の土砂災害警戒情報のCLの内側であった。この災害を捕捉するにはCLの再考が必要であるが、非常に小規模な災害である。可能で



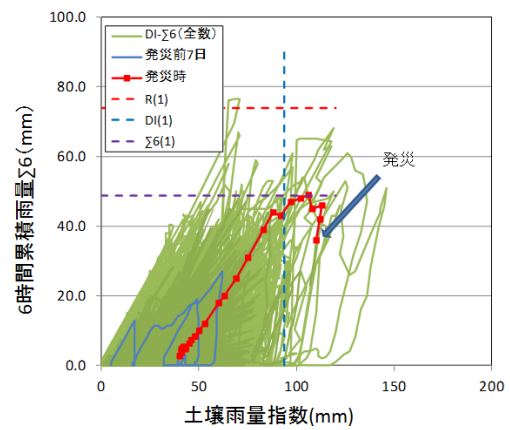
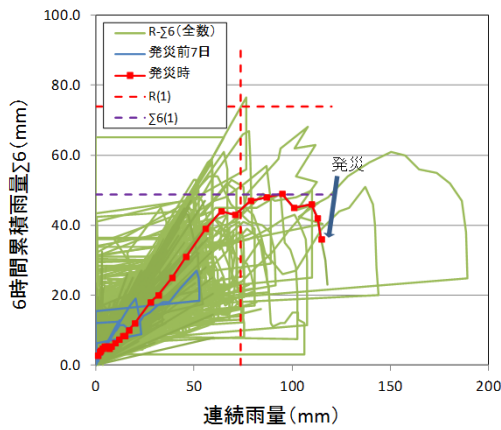
(a) 被災箇所状況



(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-27 災害事例12の降雨状況

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るのが望ましい。

5) 事例9 (図-24)

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。当地域の土砂災害警戒情報の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-25)

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、当地域の土砂災害警戒情報の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-26)

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、当地域の土砂災害警戒情報のCLに対して当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-27)

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、土砂災害警戒情報の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警戒情報の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があるとする。

#### (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、土砂災害警戒情報の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、地域の土砂災害警戒情報の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する。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する。

上記12事例のうち、10事例が土砂災害警戒情報の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。

### 5. 土壌雨量指数を活用した事前通行規制手法の検討

#### (1) 時間雨量－土壌雨量指数による通行規制の課題

前記4. で示したように、道路における従来の連続雨量法に対して、砂防・気象分野で用いられている時間雨量－土壌雨量指数の関係をを用いることで、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、土砂災害警戒情報のCLで捕捉可能な道路災害事例も見られ、災害の捕捉性が向上する可能性が確認された。

その一方で、土砂災害警戒情報のCLより低い降雨で発生している災害も多く、関連して土砂災害警戒情報のCLに対して被災箇所の既往の降雨履歴が小さく、当該地域で設定されているCLが被災箇所の降雨履歴に適合していない箇所も多くみられた。これについては、各自治体で設定しているCLは比較的広範囲で設定されている場合が多く、事前通行規制区間の狭い範囲での降雨状況に適合した基準値の設定検討も必要である。さらに、道路災害の中には小降雨にもかかわらず排水工の目詰まり等を原因とした災害も含まれており、事前通行規制で捕捉すべき災害か点検・維持管理で対応すべき災害かについての検討も必要である。

したがって、これらの課題に対応した指標値の検討が必要である。

#### (2) 土壌雨量指数及び各タンクの挙動を考慮した規制手法の検討

上記(1)で示した課題に対応するため、まず土壌雨量指数および各タンクの役割と降雨時におけるそれぞれの挙動の確認を行うこととした。土壌雨量指数は、図-28に示すように3段タンクを用いて雨水の地盤への浸透および表面流出・地下流出をモデル化したものである。第1タンクは地表面上の水の状態を表現したタンクで、地表の植生等による涵養的な役割も含めて降雨を一時貯留して地表面流出と地中への浸透に振り分けている。また、第2タンクおよび第3タンクは地盤内の水の状態を表現したタンクで、第2タンクは表層部の浸透水の含水状態の変化をモデル化したもの、第3タンクは地盤の地下水の上昇および流出による減少をモデル化したものである。土壌雨量指数は、これら3つのタンク内の水の貯留量の合計値である。なお、土壌雨量指数の計算方法等の詳細については、気象庁のホームページ<sup>4)</sup>を参照されたい。

図-29は、降雨による土壌雨量指数および各タンクの動きをわかりやすく確認するために、時間雨量6mm(土壌雨

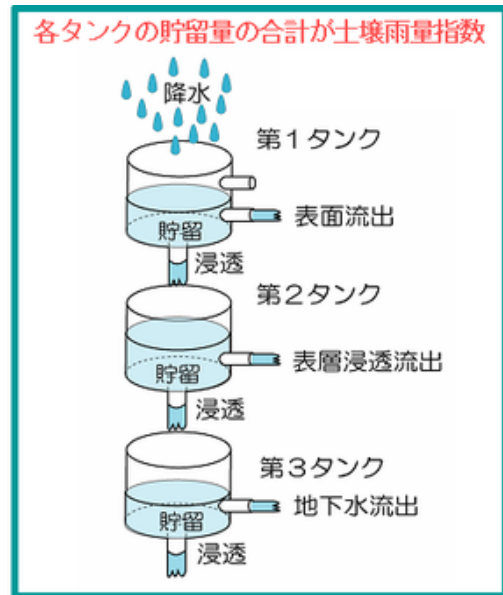


図-28 土壌雨量指数の概念図<sup>4)</sup>

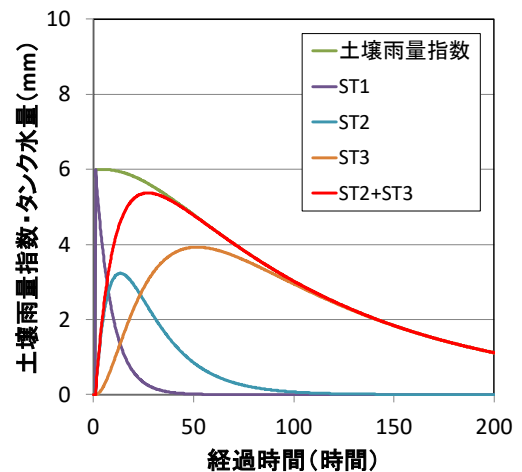


図-29 土壌雨量指数および各タンクの挙動 (時間雨量6mm)

量指数の計算上10分1mm計6mm)の降雨による土壌雨量指数および各タンクの変化を示したものである。土壌雨量指数の増加は、降雨(時間雨量)によるものでありそれ以外の要因で増加することはない、まずは第1タンク(ST1)に蓄積される。また、前述のように第2(ST2)、第3タンク(ST3)は地盤内の水の状態を表しており、第1タンクに蓄積されていた水のすべてがおおむね地盤に浸透するころに第2第3タンクの合計値が最大となり、土壌雨量指数とほぼ等しくなる。また、第1タンクと第2第3タンクの合計値が1:1になるときの第2タンクの値がおおむねピークを迎える時点であり、第3タンクの値はほとんどなく、雨水が表層部分に浸透した状態と考えることができる。



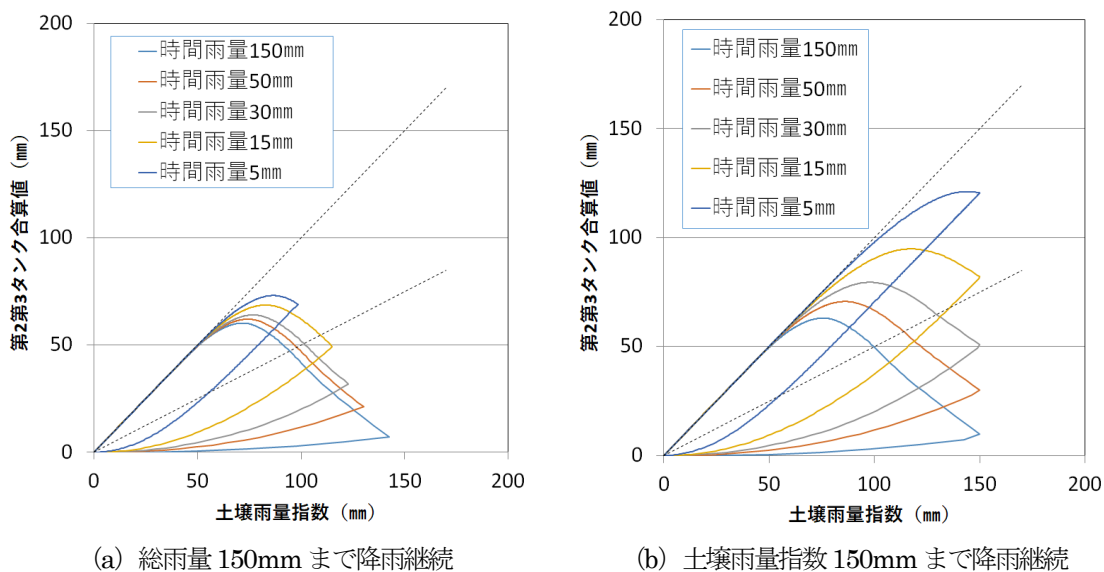


図-30 時間雨量の違いによる挙動比較例

これらの関係から、土壌雨量指数に対する第2第3タンクの水量の占める割合が土中水分の影響、土壌雨量指数の増加が降雨強度の影響を表す指標となるものと考えられる。

図-30は、集中豪雨、長雨による挙動の違いを確認することを目的に、異なる降雨強度で総雨量が同じおよび土壌雨量指数が同じ(図はいずれも150mm)になるまで降雨を継続させた場合の、第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係(スネーク曲線)を示したものである。総雨量が同じ場合、土壌雨量指数の最大値は降雨強度が大きいほど大きくなるが、土中水分の状況を表す第2第3タンクの合計値(以下、タンク合計値)は、降雨強度が小さいほど大きくなり、長雨になるほど土中水分の影響が大きくなる。同じ土壌雨量指数まで継続した場合は、その傾向がより顕著に表れる。

(3) 被災事例による挙動確認

平成20~23年度(2008~2011年度)に切土のり面で発生した降雨による被災事例について、実災害・実降雨における上記の関係を整理した。以下、時間雨量—土壌雨量指数の関係と第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係を比較し、その適用性を検証した旨を述べる。

災害との関係性を整理するうえで、ここでは発災時土壌雨量指数に対する第2第3タンクの合計値の比率0.5以上を一つの目安として、第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係による方法の事前通行規制への適用性について検討を行った。

併せて、被災事例について事前通行規制での対応の良否および対応の考え方について整理した。なお、降雨データ整理の関係から、以下年号については西暦による記載とす

る。また、土砂災害警戒情報における地域のCLは、確認できた事例のみグラフ中に示している。

事例1) (4. 災害事例5 参照)

発災日時：2008年8月3日17:28

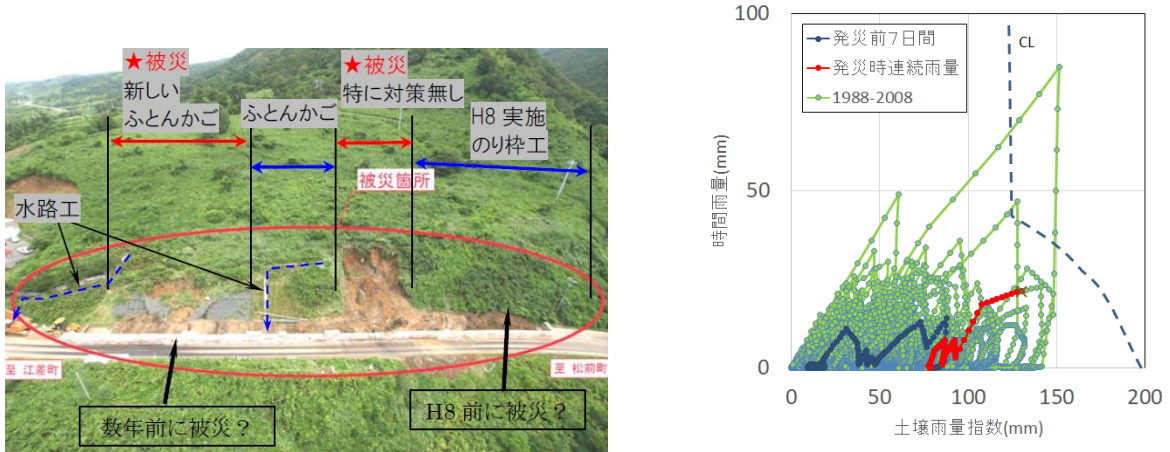
被災形態：土砂崩壊

発生土量：630m<sup>3</sup> 道路到達土量：630m<sup>3</sup>

図-31に(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係、(d)(c)について発災時土壌雨量指数で正規化したものを示す。被災箇所の状況については、4.の記述を参照されたい。なお、最初の事例であることから(c)のグラフも示しているが、事前通行規制の適用検討にあたって、第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係については降雨の地域性を排除して比較することを目的とするため、事例2以降については発災時土壌雨量指数で正規化した結果のみを示す。

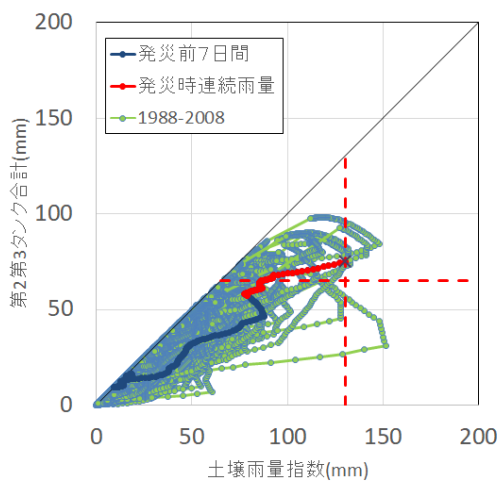
グラフの作成に用いたデータは、1988年から発災年までのレーダーアメダス解析雨量を用い、土壌雨量指数は毎正時の解析雨量の1/6を10分雨量として計算を行い、10分ピッチでそれぞれの関係のグラフにプロットしている。また、赤が発災時刻までの道路における連続雨量の履歴、青が発災前7日間の降雨履歴、黄緑は1988年~発災年までの降雨履歴を示している。

降雨の状況は、(b)の時間雨量—土壌雨量指数の関係をみると、当該地域の降雨としては比較的大きなものではあるが、破線で示す当該地域の土砂災害警戒情報のCLより小さいものであった。降雨履歴でCLを超過した降雨は2件であるが、2件は先行降雨がなく2~3時間で時間雨量

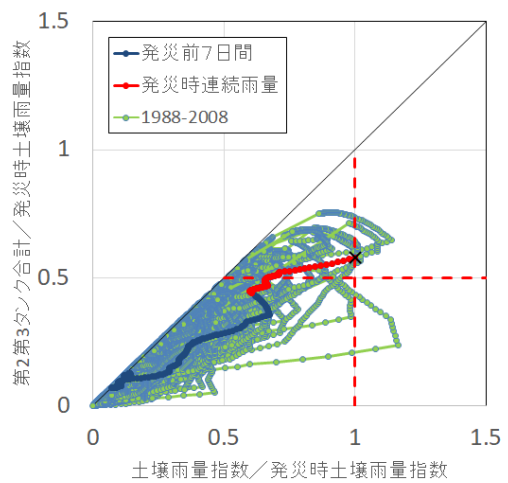


(a) 被災箇所の状況(再掲)

(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2 第3 タンク合計値—土壌雨量指数の関係



(d) (c) を発災時土壌雨量指数で正規化

図-31 事例1の降雨履歴の整理結果

数十ミリの降雨が連続した短時間の集中豪雨であり、この2件での被災は確認できなかった。(a) に示す被災履歴は本事例の発災時降雨と同じような土壌雨量指数でCL以下であった2、3件の降雨で発災していたようである。

(c)、(d) で示す第2 第3 タンクの合計値—土壌雨量指数の関係で上記の降雨履歴を見ると、被災履歴のある降雨については、今回の発災時土壌雨量指数で正規化した場合、タンク合計値は0.5以上の範囲にあり、短時間集中豪雨の2件は、前記図-30 (b) で示した時間雨量 30 mmや 50 mmでの挙動に類似しており、土壌雨量指数自体は大きい、土中水分としては小さい状態で降雨がやんだため発災に至らなかったものと推察される。当該箇所においては短時間集中豪雨で非発災降雨と発災降雨とがうまく分離してとらえられている事例と考えられる。また、本事例は当該箇所の降雨履歴からも大きな雨量であるとともに発生土量も多く、通行規制手法を検討するうえでの対象災害となるものと考えられる。

なお、当該箇所のように同じようなり面が連続しており、類似した降雨で繰り返し被災しているような箇所については、被災箇所のみではなく発生要因を考慮してのり面体を対策するような検討も必要であるが、管理上斜面全体の対策が完了するまでの間は通行規制を併用するといった考え方もある。

事例2)

発災日時：2008年8月16日4:00

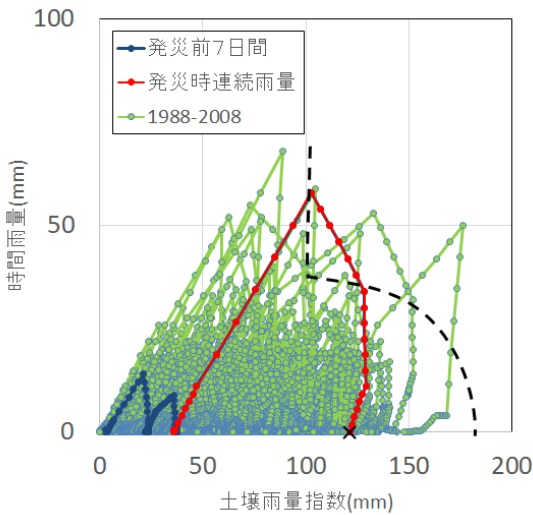
被災形態：土砂崩壊

発生土量：840m<sup>3</sup> 道路到達土量：63m<sup>3</sup>

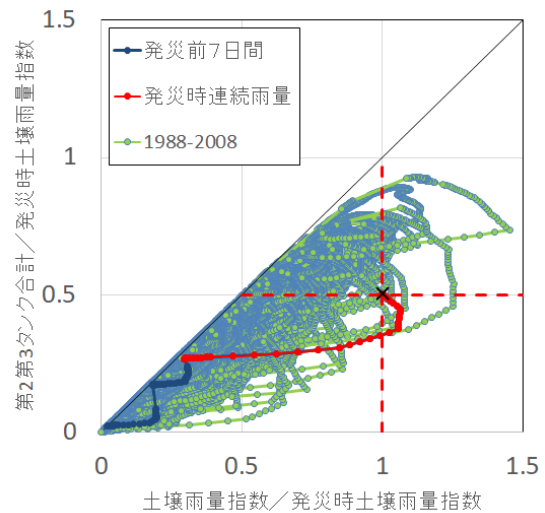
図-32に、(a) 被災箇所の状況、(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c) 第2 第3 タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、2007年に供用開始された新設道路の切土のり面で、供用開始後1年で被災した事例である。被災箇所は谷地形(鞍部)の切土箇所でのり面に軟質土砂が残存しており、施工中ものり面で小崩壊が発生し、対策として法尻にふとんかごが設置されていた。この



(a) 被災箇所状況



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-32 事例2の降雨履歴の整理結果

ため、崩壊規模としては840 m<sup>3</sup>と比較的大きな範囲で被災したがふとんかごによる抑え効果により道路への到達土量が少なかった。

降雨の状況は、(b)の時間雨量—土壌雨量指数の関係を見ると当該地域の降雨としては比較的大きく、若干の先行降雨はあるが短時間での集中豪雨である。また、破線の当該地域の土砂災害警戒情報のCLを超過しており、CLで捕捉可能な災害であるが、CLを大きく下回ってから発災している。なお、その他のCLを超過した降雨は道路供用以前のものである。

(c)で示す第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係で発災時降雨の動きを見ると、発災時の降雨は(b)でCLを超過した後にCLを下回る時点までのタンク合計値は発災時土壌雨量指数に対する比率で0.4程度と比較的小さい状態であったが、その後も第2第3タンクの合計値は増加し続け、おおむね比率が0.5程度となった時点で発災している。この関係を用いることで、この災害は捕捉できるものと考えられる。

ただし、本被災事例は前述したように谷部の切土でのり面に弱層が残存していた箇所で、施工中にも発災している。

このような箇所では、上方の法肩付近に多く弱層が残存しやすく、当該箇所のような法尻のふとんかごでは対策効果は小さい。したがって、のり面は植生工単独ではなく法枠・地山補強工などの適切なのり面補強とともに法肩部の排水対策を行う、弱層を残さないような切土を行うなど、施工中の被災も踏まえたのり面上方～法肩部分に対する対策検討を行うことが必要である。

事例3) (4. 災害事例11 参照)

発災日時：2009年10月8日6:25

被災形態：吹付のり面崩落

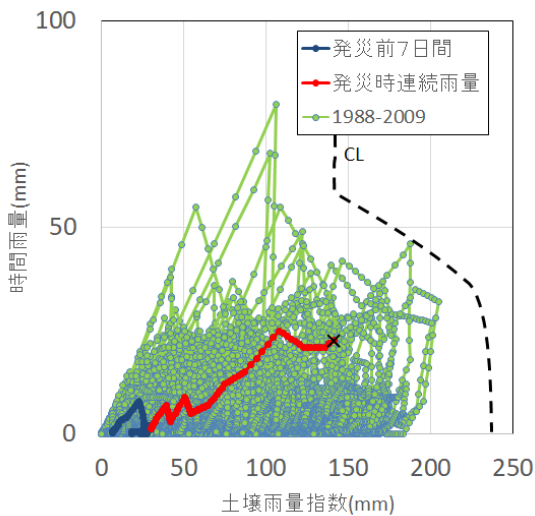
発生土量：2m<sup>3</sup> 道路到達土量：2m<sup>3</sup>

図-33に、(a)被災箇所状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、前述したように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。

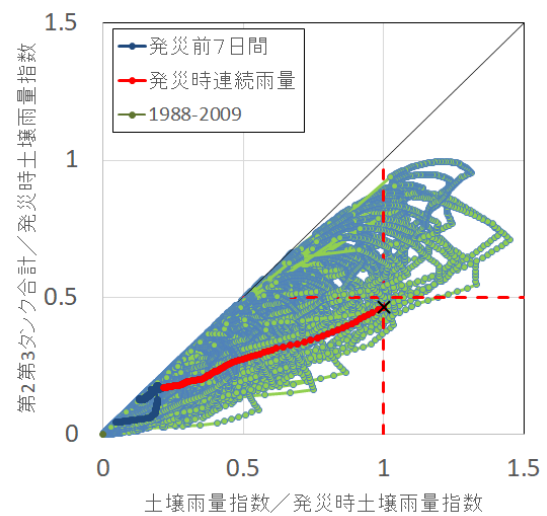
降雨の状況は、(b)の時間雨量—土壌雨量指数の関係をみると、4.でも記述している通り、当該箇所の降雨履歴は当該地域の土砂災害警戒情報のCLに対して当該箇所の降雨は小さい。また、発災時の降雨は時間雨量20mmの雨が4



(a) 被災箇所の状況 (再掲)



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-33 事例3の降雨履歴の整理結果

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、さほど大きなものではない。

(c) で示す第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係で発災時降雨の動きを見ても、(b) 同様過去の大きな降雨と比してさほど大きなものではない。タンク合計値の発災時土壌雨量指数に対する比率は0.5に近いもので、土壌雨量指数としては土中水分の状態は多くなりつつあるが、当該箇所の被災要因が吹付のり面の背後地山の風化に伴う密着性の低下が主要因であり、一般的な土砂崩壊とは現象が異なるため、降雨による事前通行規制の対象災害ではなく、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と言える。

事例4) (4. 災害事例1 参照)

発災日時：2009年10月8日6:25

被災形態：土砂崩壊（滑り）に伴う歩道部の隆起

発生土量：不明 道路到達土量：0m<sup>3</sup>

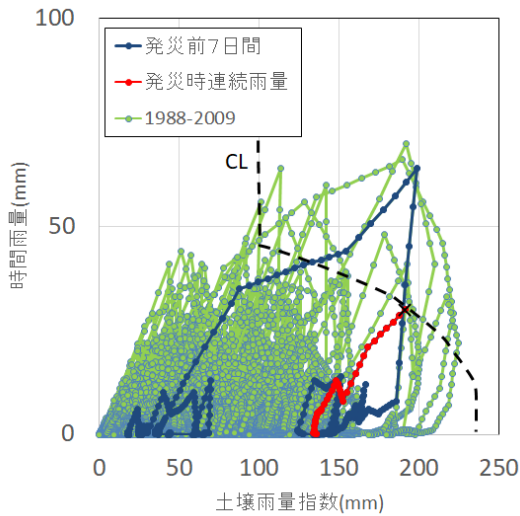
図-34に、(a) 被災箇所の状況、(b) 時間雨量—土壌雨量

量指数の関係、(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、のり枠+鉄筋挿入工が施されたのり面で、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災害である。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。

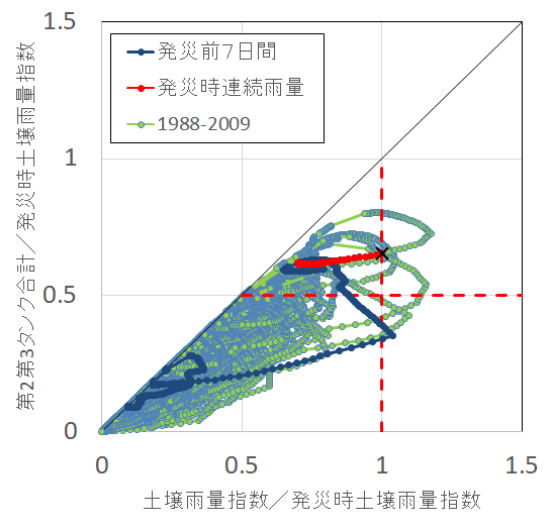
降雨の状況を見ると、(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係では、2日前の先行降雨がこの地域の土砂災害警戒情報のCLを超えるものであったが被災には至らず、当日の比較的強い短時間降雨によりCL付近で発災に至っている。2日前の先行降雨は、発災時の降雨に対して土壌雨量指数および時間雨量のいずれも大きなものである。また、本事例は、2007年の供用開始後2年で発生した災害であるが、当該箇所の発災までの約20年間の降雨履歴を見ると当該地域のCLを超過する降雨が十数回発生しており、比較的短時間の集中豪雨も多くみられる地域である。



(a) 被災箇所状況 (再掲)



(b) 時間雨量－土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値－土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-34 事例4の降雨履歴の整理結果

一方、(c) の第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係を見ると、発災2日前の先行降雨では土壌雨量指数が最大時のタンク合計値の比率は発災時土壌雨量指数の0.5未満と小さく、その後の浸透によりタンク合計値の比率も0.5を超過して当日の集中豪雨で災害に至ったような傾向がみられる。また、過去の降雨履歴についてみると、発災時土壌雨量指数より大きく、かつタンク合計値の比率が0.5以上となる降雨の数は、(b)のCLを超過した降雨の数に対して約1/3程度に減少しており、比較的大きな先行降雨がないタンク合計値の小さい短時間集中豪雨の空振りに対する効果が期待される傾向がみられる。

当該事例は、(b)、(c)の関係でも捕捉できる事例であるが、被災した結果として実際に崩壊した形態に対する抑止対策が十分でなかった可能性が確認されたものである。これに関しては、地盤の不確実性に対する地盤調査および対策工の設計の難しさがあるため、のり面・斜面の対策においては、調査・設計・施工・維持管理の全体を通じて段

階的に目的とする性能となるように対応することが必要とされている。なお、本事例では、法枠工自体の滑動は見られたためのり面としては被災しているが、崩壊土砂は発生していないため道路交通への影響はなく、地山補強工と法枠工により表層崩壊による土砂を抑止・抑制するための対策工の目的と機能は満足しているといえる。

事例5)

発災日時：2009年7月21日9:00

被災形態：土砂流出

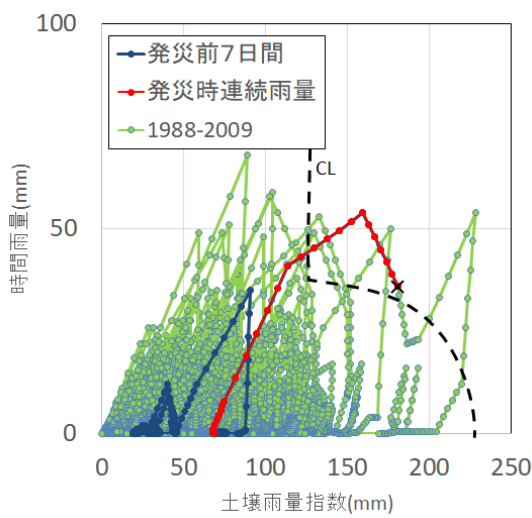
発生土量：20m<sup>3</sup> 道路到達土量：3m<sup>3</sup>

図-35に、(a)被災箇所状況、(b)時間雨量－土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は集水地形を切土し植生工を施したのり面で、短時間の集中豪雨により雨水が集中して縦排水溝を横に屈曲させた箇所からオーバーフローし、周辺の表面土砂が浸食・流出した事例である。

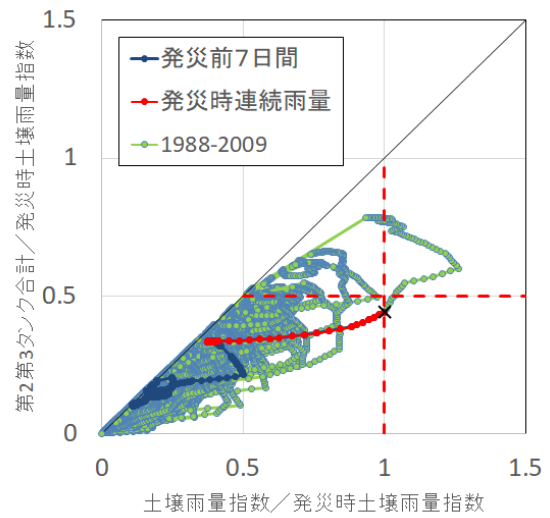
降雨の状況を見ると、既往最大の降雨で、(b)時間雨量



(a) 被災箇所の状況 (再掲)



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-35 事例5の降雨履歴の整理結果

—土壌雨量指数の関係では当該地域の土砂災害警戒情報のCLを超過した状態で発災しており、当該地域のCLにより捕捉される災害であった。

一方、(c)の第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を見ると、発災時のタンク合計値の比率は0.5より小さく、仮にタンク合計値の比率0.5を基準とした場合には、見逃し災害となる。しかしながら、本被災形態は排水溝の屈曲部からのオーバーフローが原因の災害である。このような集水地で雨水が集中しやすい箇所では排水施設にできるだけ屈曲箇所を設けないようにするとともにますを設置して溢水が生じないように配慮し、排水溝周辺については植生工のみではなく、侵食に配慮した法枠などの構造物工の併用といった、設計段階での検討が必要な災害形態と考える。

事例6) (4. 災害事例7 参照)

発災日時：2009年7月14日7:00

被災形態：土砂崩壊

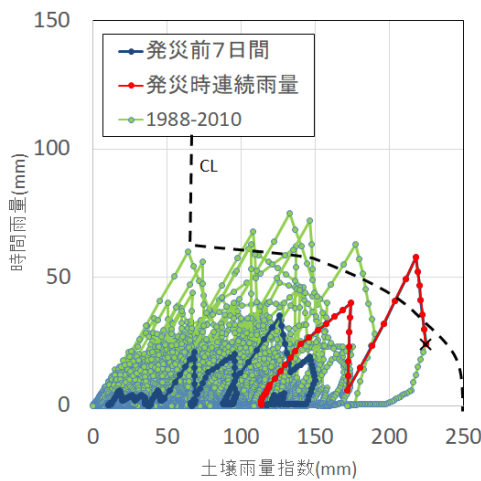
発生土量：200m<sup>3</sup> 道路到達土量：200m<sup>3</sup>

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ある。現地は国道と市道が並走しており市道側にある切土のり面で、崩土は国道には到達してはいない。図-36に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。

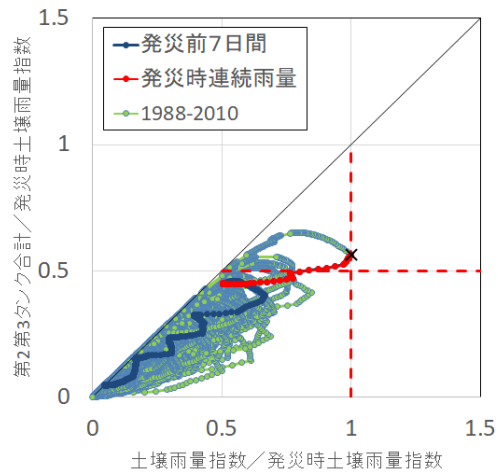
(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係を見ると、4.で既述したように、発災時は短時間集中豪雨であるが、発災前の数日間に数回の先行降雨を伴っており、先行降雨の影響が反映された結果、土壌雨量指数で既往最大の降雨となっており、当該地域の土砂災害警戒情報のCLで捕捉可能な災害であったが、災害は若干下回ったところで発生して



(a) 被災箇所状況 (再掲)



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-36 事例6の降雨履歴の整理結果

いる。また、CL を超過する降雨は過去に数回発生しており、これらは事例の発災時土壌雨量指数に対して小さい土壌雨量指数での短時間集中豪雨により CL を超過したものであった。

一方、(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を見ると、発災時土壌雨量指数に対するタンク合計値の比率が0.5を超過したところで発災している。また、上記の過去の降雨でCLを超過した降雨については、(b)の関係をを用いる場合には規制の対象となるが、(c)の関係をを用いる場合には規制対象外の降雨となり、本事例では(c)の方法によることで規制の空振りの減少につながる可能性が示唆されたものとする。

当該箇所は切土のり面であるが、崩壊のメカニズムとしては地山の長期的風化により土砂化した表層部の崩壊であり、自然斜面においても普通に想定される現象で、土壌

雨量指数で想定している災害形態である。当該箇所のように植物が繁茂していると、何らかの変状がみられない限り、目視で風化の進行状況や崩壊の危険性を判断することは困難であり、事前通行規制による対応が有効な災害形態の1つと考えられる。

事例7) (4. 災害事例8 参照)

発災日時：2010年8月12日9:20

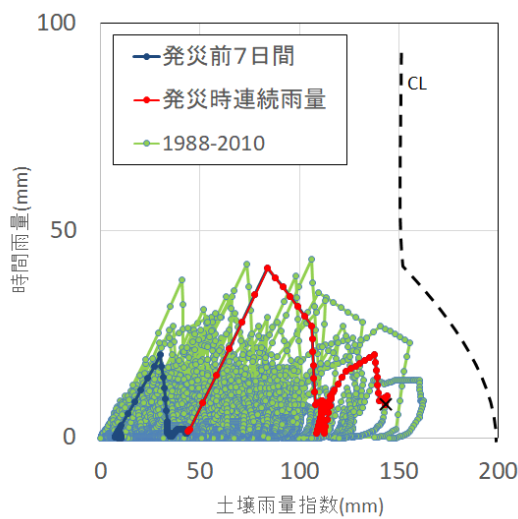
被災形態：土砂流出

発生土量：30m<sup>3</sup> 道路到達土量：30m<sup>3</sup>

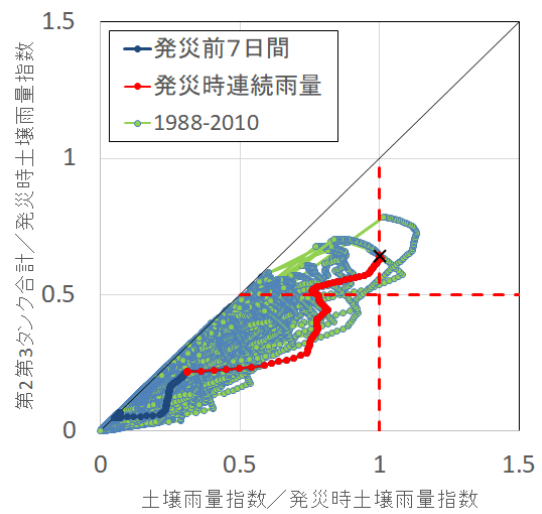
図-37に、(a)被災箇所状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、前述したように被災箇所上方に微細な沢地形があり、そこから被災箇所へ雨水が流入して、地山と植生の根茎境界から土砂崩落が生じている。当時の降雨状況を見ると、(b)時間雨量—土壌雨量指数の



(a) 被災箇所状況 (再掲)



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-37 事例7の降雨履歴の整理結果

関係では、土壌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警戒情報のCLの内側であり、この災害を捕捉するにはCLの再考が必要である。(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を見ると、発災時土壌雨量指数に対するタンク合計値の比率が0.5を超過したところで雨脚が強まり時間雨量20mm前後の降雨2、3時間続いたところで発災している。この事例はCLを再考することで、(b)、(c)のいずれの関係でも捕捉できると考えられるものである。

ただし当事例は、過去にも同じ箇所でも小崩落の被災履歴があり、同程度のことが起こることを想定して既設の落石防護柵の裏にコンパネで対処を行っていた箇所での災害である。このような箇所では、事前通行規制ではなくできる限り災害の発生を防止するような対策を検討することが望ましく、被災履歴を踏まえて微地形を評価し集水地形がみられる場合には、想定される崩壊規模や道路への影響

を考慮して、のり枠を設けたり排水工を追加するなどの対策が想定される。

事例8) (4. 災害事例9 参照)

発災日時：2010年8月13日23:00

被災形態：土砂崩壊

発生土量：180m<sup>3</sup> 道路到達土量：180m<sup>3</sup>

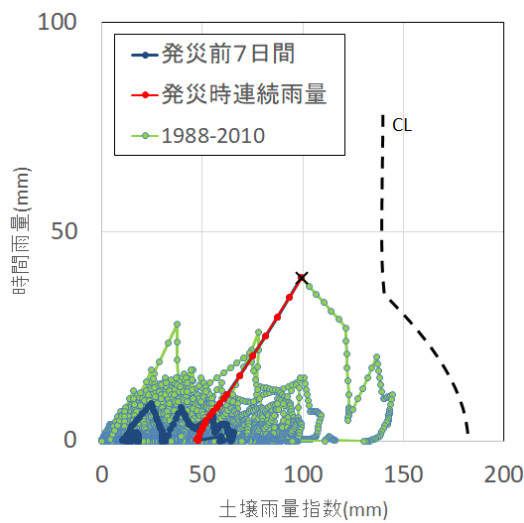
図-38に、(a)被災箇所状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。4. 災害事例9でも述べたように、当該箇所は、地すべり地形の末端に位置する、風化蛇紋岩の植生のり面の表層崩壊である。

当時の降雨状況は、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係をみると、比較的雨量の小さい長雨型の先行降雨があり、その後の短時間集中豪雨で被災に至っている。発災時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が、地域の土砂災害警戒情報のCLに対して、

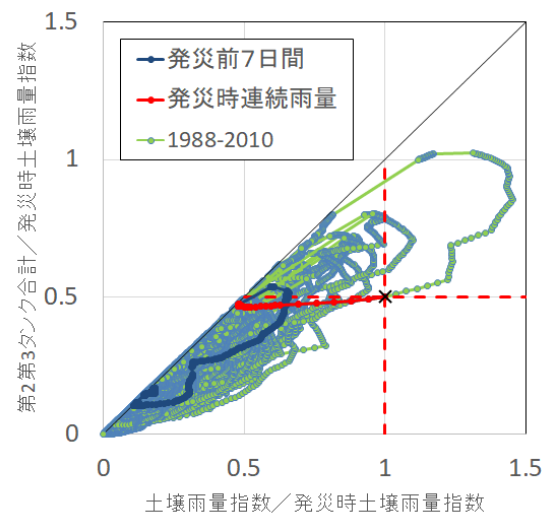




(a) 被災箇所状況 (再掲)



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-38 事例8の降雨履歴の整理結果

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、前述したように当箇所の災害を捕捉するにはCLの見直し検討が必要である。

(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係をみると、長雨型の先行降雨により発災時土壌雨量指数に対するタンク合計値の比率が0.5を超過したところでいったん降雨がやみ、土壌雨量指数の減少とともにタンク合計値の比率も0.5を若干下回ったところで発災時の集中豪雨により土壌雨量指数は急増加している。それに伴いタンク合計値の比率も漸増し、0.5を超過した時点(0.501)で発災している。被災形態としては表層崩壊であり(b)の関係でCLを見直すあるいは(c)の関係により捕捉できる災害であると考えられる。ただし、本事例は、前述したように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箇所であると考えられる。

事例9)

発災日時：2010年4月22日19:55

被災形態：土砂崩壊

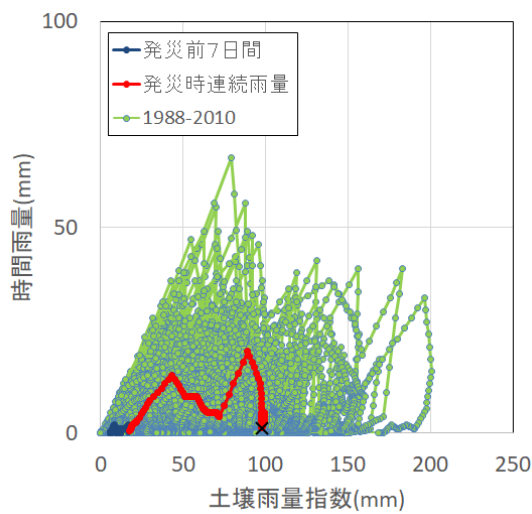
発生土量：300m<sup>3</sup> 道路到達土量：4m<sup>3</sup>

図-39に、(a)被災箇所状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、花崗岩を主体とする切土のり面で、切土勾配は1:0.8と比較的急こう配の切土である。昭和50年以前から供用されており、長年の風化により表面が土砂化して降雨により表層崩壊が発生したものである。

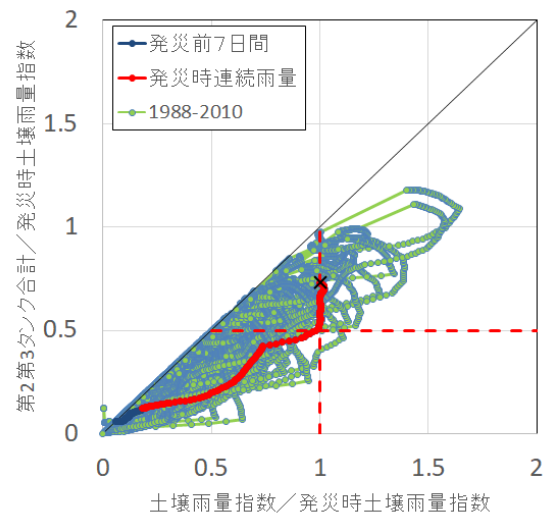
当時の降雨状況は、時間雨量10mm前後の降雨が10時間ほど継続して、土壌雨量指数がおおむね100mm程度となったところから、時間雨量4mm前後の降雨が7時間ほど継続して発災に至っており、降雨量としてはさほど大きなものでなかった。(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係をみる



(a) 被災箇所の状況



(b) 時間雨量－土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値－土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-39 事例9の降雨履歴の整理結果

と、土壌雨量指数の計算における水の流出量と降雨による増加量の収支がほぼ同じであると、3つのタンクの総量である土壌雨量指数はほぼ同じ位置に停滞するため、この事例では時間雨量4mm程度かつ土壌雨量指数100mm程度のところで停滞しているのがわかる。時間雨量が小さい長雨型の降雨の場合、時間雨量－連続雨量法であれば連続雨量はリセット条件にならない限り加算されて増加するが、時間雨量－土壌雨量指数法の場合には事例のように停滞する(雨量によっては減少する)ケースもあるため、土砂災害警戒情報のCLでは捕捉されにくくなる点に問題がある。

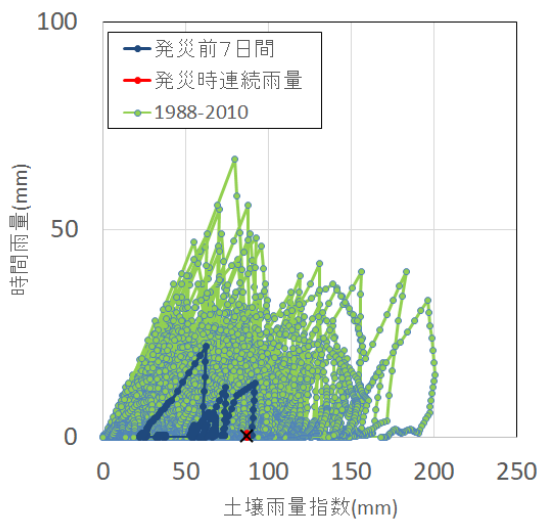
一方、(c) 第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係を見ると、発災時の土壌雨量指数の収支が同じような時間数mmの降雨が継続した場合にも、地表面から地盤内への浸透すなわち第1タンクから第2タンクへの流入による増分により、タンク合計値の比率が増加している。した

がって、この関係を用いることで、地盤内での水の収支としては増加傾向にあるため、注意が必要な状態であると判断することが可能となり、時間雨量－土壌雨量指数に対して優位性があるものとする。

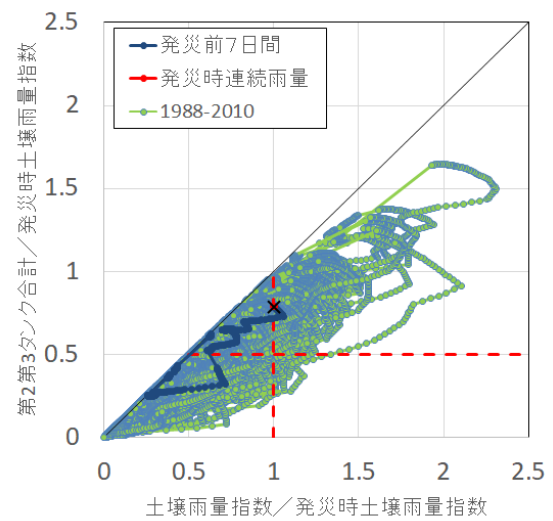
なお、当該箇所の1:0.8の切土勾配は、軟岩であれば標準のり面勾配の範囲内であるが、風化により土砂化しており、土砂斜面におけるのり面勾配としては、標準のり面勾配の適用範囲外の勾配で不安定な状態になっていたと考えられる箇所で、発災以前の数年前にも同じ箇所で小規模な表層崩壊が発生している(既設の落石防護網と落石防護柵があったため道路への影響はなかった)。このような箇所については、本事例のように比較的少ない降雨でも崩壊が発生することが想定されるため、点検により切土勾配と風化の影響を考慮して切り直しや補強対策の維持管理での検討をすることが望ましい。また、岩の風化に



(a) 被災箇所の状況



(b) 時間雨量－土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値－土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-40 事例10の降雨履歴の整理結果

伴う土砂化が想定される場合には、設計段階でその風化の影響を考慮して緩勾配化を図るとともに必要に応じて補強工を計画することが望ましい。

事例10)

発災日時：2010年7月14日14:10

被災形態：表層すべり・はらみだし

発生土量：360m<sup>3</sup> 道路到達土量：0m<sup>3</sup>

図-40に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量－土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、やせ尾根先端部を1:1.2で切土したのり面で、砂岩・泥岩の高角度の流れ盤の箇所でのり面表層が崩壊には至らなかったがはらみだした事例である。のり戻では湧水がみられ、切土後10年で表面が緩んでおり、当該箇所としては比較的少ない降雨で変状が発生した事例である。事例9が急勾配の切土であったの

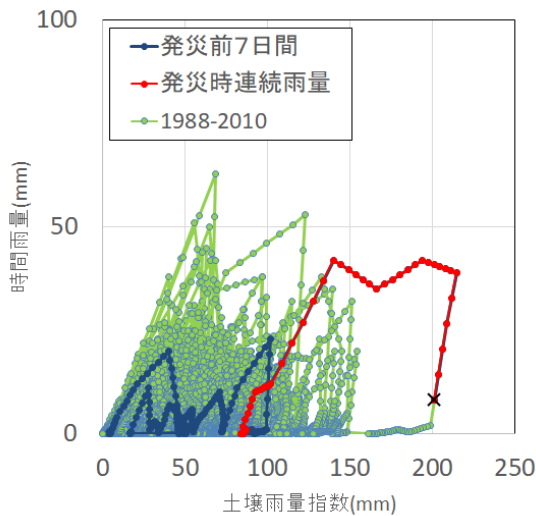
に対して、本事例は1:1.2と比較的緩い勾配での切土であったことから、道路に影響するような崩壊には至らなかったものと考えられる。

降雨の状況は、(b)時間雨量－土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係をいづれを見ても、中程度の降雨であり事前通行規制では困難な事例である。

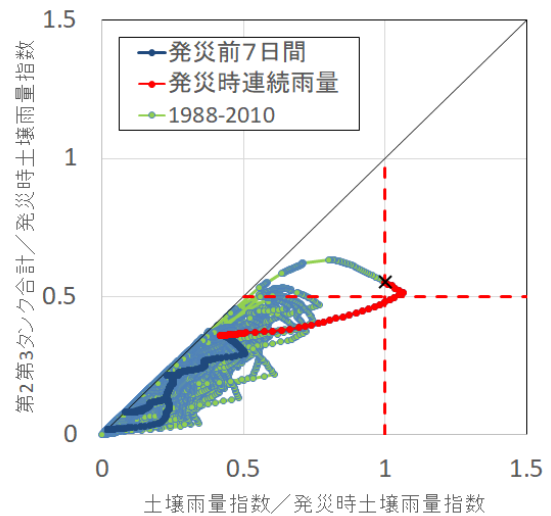
当該箇所のように、緩勾配で切土をしている場合には、風化等により表層にゆるみが生じて、降雨により変状が発生しても、比較的少ない降雨であればはらみだしのような変状は生じるが、崩壊に至る可能性は低いものと考えられる。本事例のように、湧水がみられるような箇所では、水の影響でゆるみが進行している可能性があるため、定期的な点検や日常のパトロール等で変状を見つけ、ゆるみの状況を調査し必要に応じて補強対策を検討するのが望まし



(a) 被災箇所の状況



(b) 時間雨量－土壌雨量指数の関係



(c) 第2 第3 タンク合計値－土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-41 事例11の降雨履歴の整理結果

い。

事例11)

発災日時：2010年9月13日23:57

被災形態：土砂崩壊

発生土量：100m<sup>3</sup> 道路到達土量：30m<sup>3</sup>

図-41に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量－土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、背後斜面に奥行き100mほどの集水地形を有する谷地形をまたぐ切土のり面で、のり尻部分には土砂崩壊を想定した待受擁壁が設置されており、待受擁壁で受けきれなかった30m<sup>3</sup>の土砂が道路1車線分まで到達した事例である。当該箇所は、連続雨量150mmで事前通行規制を行っている区間で、事前通行規制中に発災しており、連続雨量法でも捕捉している事例である。事前通行規制は22:30より行われており規制後約90分で発災している。

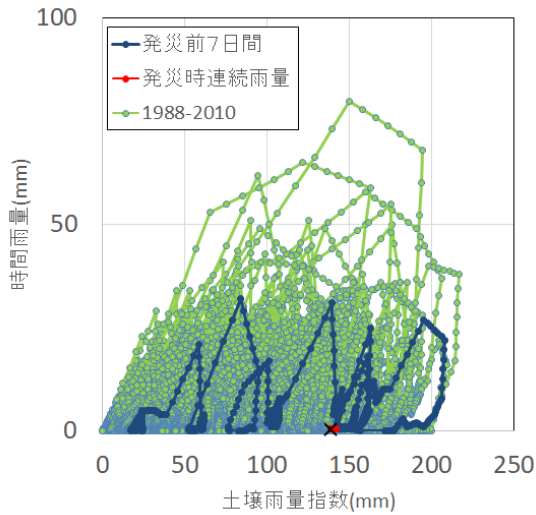
降雨状況について、(b)時間雨量－土壌雨量指数の関係

を見ると、先行降雨の影響もあり明らかに既往最大の降雨で発生していることがわかる。この関係で本災害を最も効率よく捕捉するためには、土壌雨量指数で200mm以上となる場合に規制をかける必要がある。前述のように連続雨量法では規制後約90分で発災しており、グラフのプロットは10分間隔で計算しており、土壌雨量指数が200mmに到達した時点から発災時まで約100分であったことから、これにより連続雨量法とほぼ同等の規制時間となる。

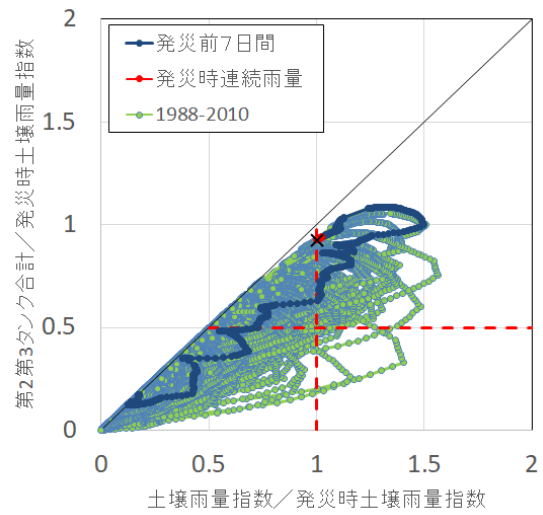
一方、(c)第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係をみると、(b)同様に既往最大の降雨であることは明確である。災害は発災時土壌雨量指数に対するタンク合計値の比率が0.5以上で発生しており、合計値の比率が0.5以上を規制基準とした場合には規制後約70分で発災に至っている。事前通行規制はテレメータによる雨量で規制を行っているため、事例検討で用いているレーダーアメダス解析雨量の値とは異なることから、単純に比較することはできないが、本事例においては降雨条件によっては規制時



(a) 被災箇所状況



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-42 事例12の降雨履歴の整理結果

間の短縮にもつながる可能性が示唆された。

事例12)

発災日時：2010年7月15日9:30

被災形態：土砂崩壊（滑り）に伴う歩道部の隆起

発生土量：1700m<sup>3</sup> 道路到達土量：0m<sup>3</sup>

図-42に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は谷を横断するように切土を行った箇所で、のり面上方には谷部の崖錐堆積物（軟質土砂）を整地した耕作地跡（耕作放棄地）があった。崩壊は耕作放棄地より下方で発生し、滑動したと推定された土量は1700m<sup>3</sup>で最大深さ6m程度と規模としては大きなものであったが、のり面には密閉型の法枠工が設置されてお

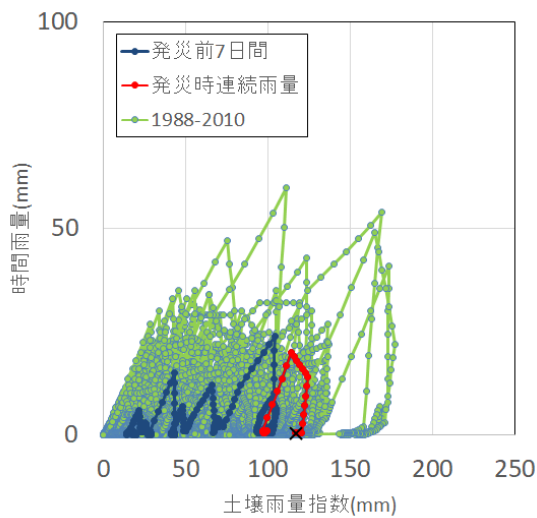
りおそらくその効果で土砂が封じ込められていたことから比較的深い滑りとなり、被害は歩道部で隆起が生じたものの土砂で道路が閉塞されるような災害にはならなかったものと考えられる。

降雨状況について、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係をみると、発災前の先行降雨で既往最大に近い土壌雨量指数となったが、その後の発災に至るまでの降雨では土壌雨量指数は減少しており、土壌雨量指数を増加させるほどの強い降雨がなかったことがわかる。

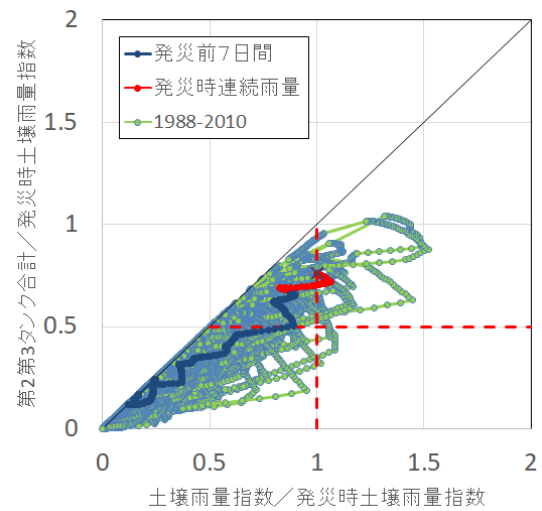
一方、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係をみると、土壌雨量指数のピーク値以降もタンク合計値の比率は増加しており、タンク合計値のピーク値を記録したのちタンク合計値が土壌雨量指数とほぼ等しくなった



(a) 被災箇所の状況



(b) 時間雨量－土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値－土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-43 事例13の降雨履歴の整理結果

ところで発災している。この関係で発災に至るまでの7日前からの降雨履歴を見ると、既往最大のものであったといえる。

本事例に関して、災害捕捉性の観点からみると (b) の関係に対して、(c) の関係に優位性があるものと考えられる。しかしながら、事前通行規制により本災害をとらえる場合には、土壌雨量指数による基準値が小さいため、既往の降雨履歴を見ても比較的頻繁にかつ長時間の規制を行う必要があり、別途検討が必要な被災形態であると考えられる。

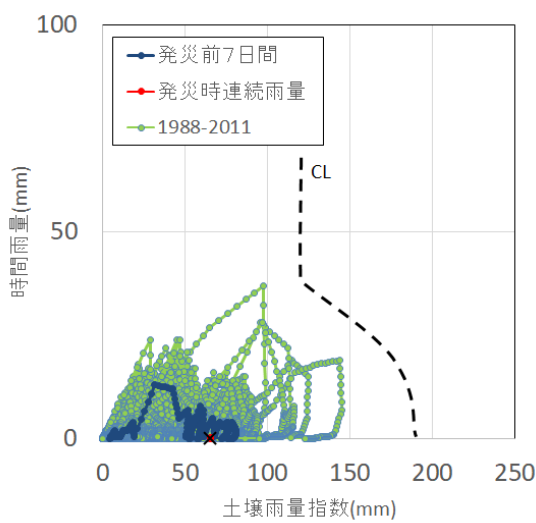
図-30 で示したように、土壌雨量指数が減少しながらタンク合計値がピークとなる時点が、おおむね第2タンクと第3タンクの比率が1:1となり、それ以降は第3タンクの値が土壌雨量指数に近づいていき、本事例のように土壌雨量指数とタンク合計値がほぼ等しい状態の時の土壌雨量指数はほぼ第3タンクの値となる。土壌雨量指数に

おいて第3タンクの値が主となる場合には、地盤内の地下水位が上昇している状況が考えられる。このような状況で考えられる災害形態は、地すべりや深層崩壊といった深い滑りが想定され、表層崩壊は比較的降雨強度に依存するような降雨で発生しやすいが、深い滑りでは先行降雨も含めて累積降雨も大きく比較的長時間継続するような豪雨が想定される。本事例はのり面保護工の効果もあり比較的深い滑りとなった事例であると考えられる。

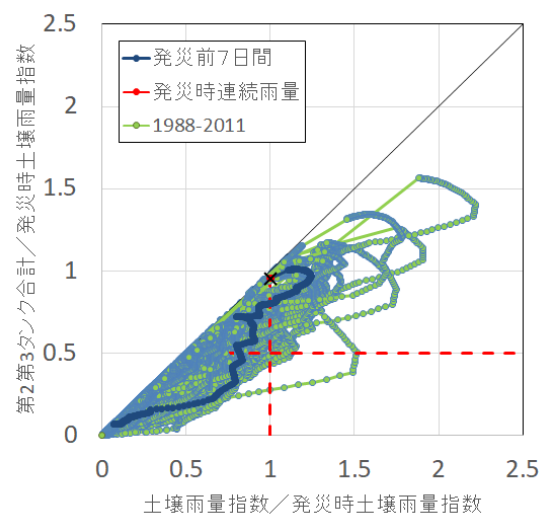
地すべりや深い崩壊を事前通行規制で捕捉するには、降雨がやんだ後に発生することも想定されるため降雨終了後も長時間規制する必要があり、事前通行規制には適さない災害形態であると考えられる。したがってこのような災害形態に対しては、弱点箇所を把握し事前値策を行うとともに、通行規制解除後も道路パトロールでのり面・斜面や路面・歩道の変状に注意するような体制をとることが妥当であ



(a) 被災箇所の状況 (再掲)



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-44 事例14の降雨履歴の整理結果

ると考える。

事例13)

発災日時：2010年7月14日3:10

被災形態：土砂崩壊

発生土量：250m<sup>3</sup> 道路到達土量：160m<sup>3</sup>

図-43に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、昭和50年以前に施工された花崗岩を主体とする切土のり面で、のり面勾配1:0.7で表層は強風化して土砂化(まさ化)していた。

降雨状況について、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係をみると、先行降雨の影響もあり発災時の土壌雨量指数は比較的大きな値ではあったが、発災時の降雨は小さくこの関係を用いて災害を捕捉するには規制頻度が多くなるような基準線を設定する必要がある。

一方、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関

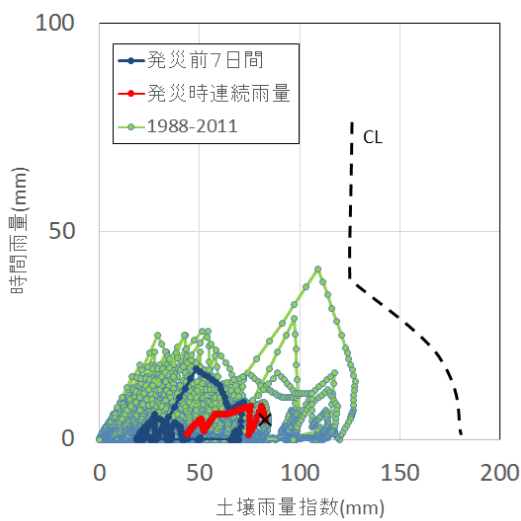
係を見ると、発災時のタンク合計値は過去の降雨履歴と比較して、比較的大きなものであり、この関係を用いることで捕捉できると考えられ、(b)の関係に対して優位性はあるものといえる。

しかしながら、発災時の土壌雨量指数が比較的大きな値ではあるものの、過去の履歴と比較すると既往最大に近いような降雨とはいえない災害である。当該箇所は、前述のように花崗岩を1:0.7で切土した箇所がまさ化した箇所である。切土勾配から施工当時は比較的大きな硬い岩であったものと推察されるが、花崗岩は風化しやすくまさ化することによって標準のり面勾配の適用範囲からも大きく外れており、経年変化でまさ化した範囲も深くなっていき不安定な状態になっていたと考えられる。

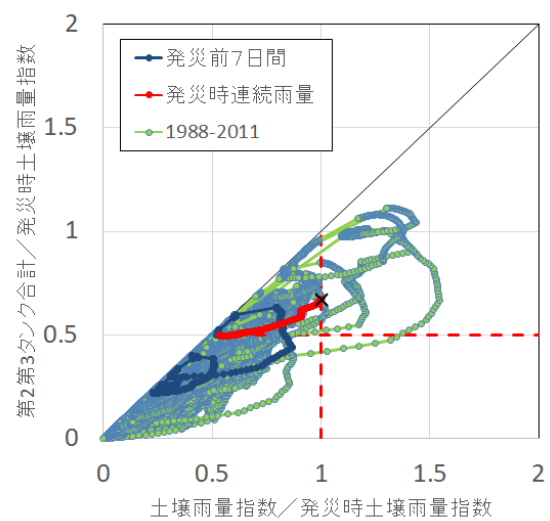
このような風化しやすい岩を急勾配切土した箇所については、前述の事例9でも述べたように比較的小さい降雨でも崩壊が発生することが想定されるため、設計段階か



(a) 被災箇所状況 (再掲)



(b) 時間雨量-土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値-土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-45 事例15の降雨履歴の整理結果

ら緩勾配化や補強工の検討を行うとともに、既設ののり面については点検により切土勾配と風化の影響を考慮して切り直しや補強対策の維持管理での検討をすることが望ましい。

事例14) (4. 災害事例2 参照)

発災日時：2011年9月5日1:36

被災形態：土砂崩壊

発生土量：200m<sup>3</sup> 道路到達土量：80m<sup>3</sup>

図-44に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量-土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値-土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、4. 災害事例2でも述べたように、背後が段丘平坦地で比較的小規模なり面で、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急勾配であるとともに、

凍上の影響を受けて脆弱化しやすい地域であった。

降雨状況について、(b)時間雨量-土壌雨量指数の関係をみると、先行降雨も含めてさほど大きな降雨ないことがわかる。前述してように降雨履歴はすべて当地域の土砂災害警戒情報のCLの内側にあり、上記の過去の被災も当該地域のCLでの捕捉はできないため、CLの見直し検討が必要な箇所である。

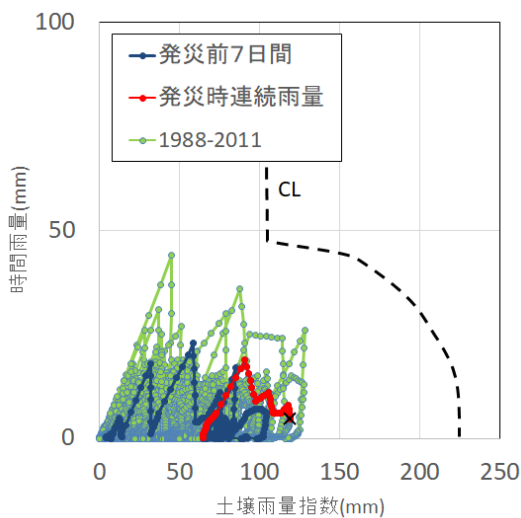
一方、(c)第2第3タンクの合計値-土壌雨量指数の関係をみると、発災時の土壌雨量指数は小さいもののタンク合計値の値は比較的大きく、土中水分の状況からは災害が起こりやすかった状態にあった傾向はみられる。しかしながら、(b)の関係と同様に過去の降雨履歴と比較すると、この関係を用いて事前通行規制を行うには適さないものとする。

当該箇所は、4.でも述べたように凍上の影響を受けて

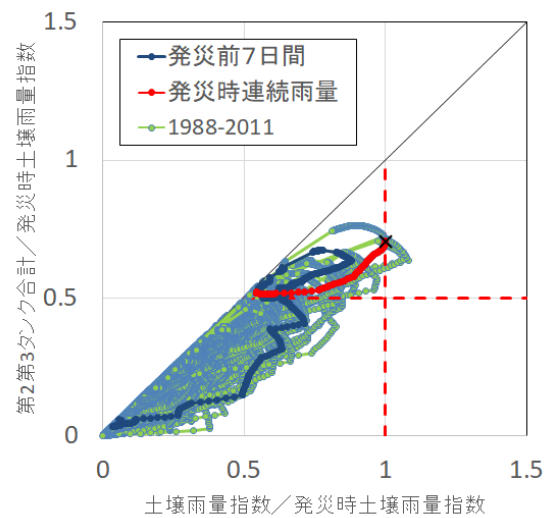




(a) 被災箇所の状況 (再掲)



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-46 事例16の降雨履歴の整理結果

いる可能性や被災要因を踏まえると、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妥当な災害である考えられる。

事例15) (4. 災害事例3 参照)

発災日時：2009年7月21日9:00

被災形態：土砂流出

発生土量：4m<sup>3</sup> 道路到達土量：3m<sup>3</sup>

図-45に、(a) 被災箇所の状況、(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、4. でも述べたように法肩部の排水不良(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。

降雨状況について、(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係

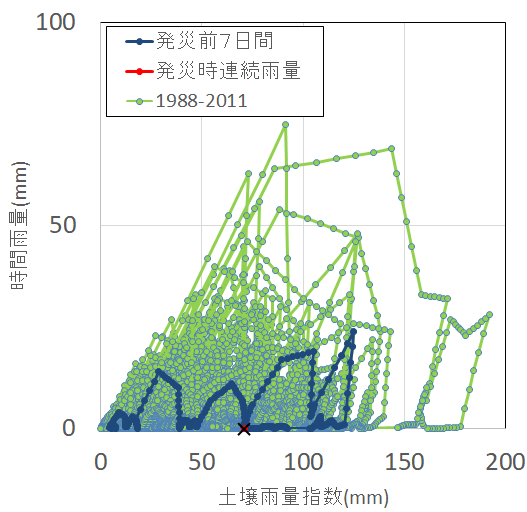
を見ると、先行降雨および発災時の降雨も比較的まとまった降雨であるが、事例14と同様に過去の降雨履歴はすべて当地域の土砂災害警戒情報のCLの内側にあり、当該地域のCLでの捕捉はできないため、見直し検討が必要な箇所である。

一方、(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を見ると、発災時土壌雨量に対するタンク合計値の比率は0.5以上となっており、この関係を用いて規制を行うことは可能であると考えられる。しかしながら、(b)の関係と同様に過去の降雨履歴と比較すると既往最大に近いものとはいいがたく、この関係を用いて事前通行規制を行うには適さないものと考えられる。

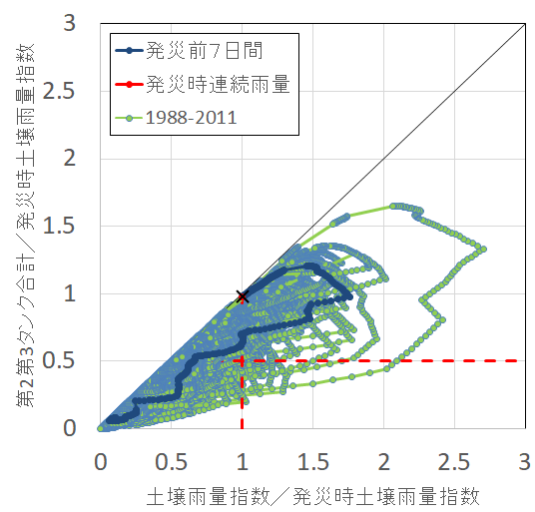
また、被災形態や規模の観点からみても、本事例は排水不良に起因する土砂流出で被災規模も極めて小さく、4. でも述べたように排水工の点検による適切な維持管理によって対応すべきものである。



(a) 被災箇所状況



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-47 事例17の降雨履歴の整理結果

事例16) (4. 災害事例10 参照)

発災日時：2011年9月6日8:10

被災形態：土砂崩壊

発生土量：5m<sup>3</sup> 道路到達土量：4m<sup>3</sup>

図-46に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、4. で述べたように、非常に小規模な礫混じり土砂ののり面で、切土高4mと低く切土勾配も1:1.2と標準のり面勾配の適用範囲の最緩勾配での切土箇所である。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おり、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たものである。

降雨状況について、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係をみると、比較的大きな先行降雨もあり当日の集中豪雨で

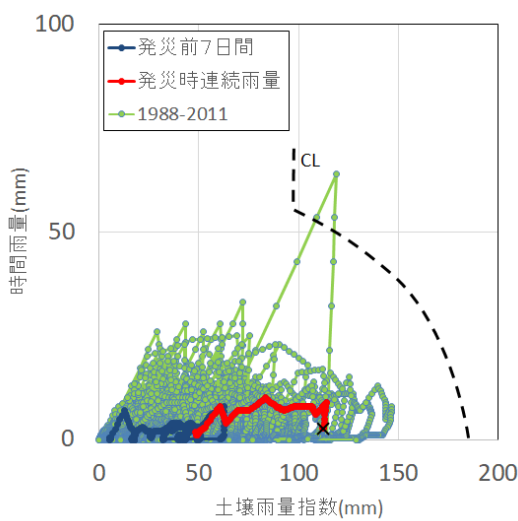
発災している。土壌雨量指数は先行降雨の影響もあり、既往最大に近い値となっている。一方で、当地域の土砂災害警戒情報のCLに対して、この箇所の降雨は非常に小さく、この災害を捕捉するためには、CLの見直しが必要である。

一方、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係をみると、発災時のタンク合計値の比率は、土壌雨量指数の基準値線上で見るとほぼ既往最大であり、当該箇所においては土中水分の状況から災害が起りやすかった状態にあった傾向を示していると考えられ、この関係により本災害を効率的に捕捉できる可能性はみられる。

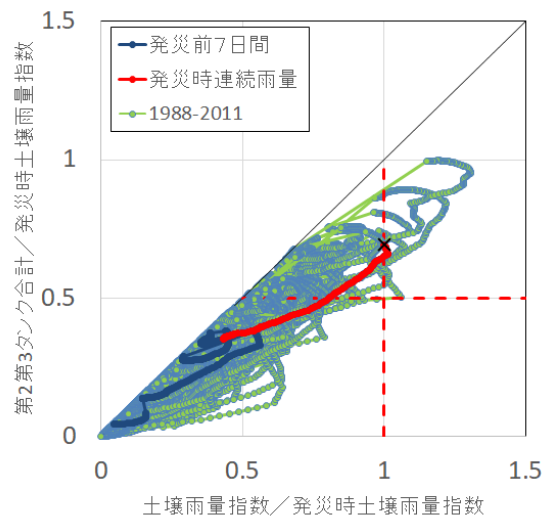
被災規模の観点からみると、災害の規模としては非常に小さいもので道路への影響もなく、規制対象となるような崩壊ではないが、日常から顕著な湧水がみられる等の兆候がない場合には事前の調査でこの災害発生の予見も難しいものとする。当該箇所は、のり面の規模が小さかったこともあり、被災規模も小さく道路への影響はなかったも



(a) 被災箇所の状況 (再掲)



(b) 時間雨量－土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値－土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-48 事例18の降雨履歴の整理結果

のと考え、(b)、(c)のいずれの関係を見ても降雨との関連性が高く、地域の状況(のり面規模や道路への影響)踏まえて、道路管理者が必要と判断される場合には事前通行規制基準を検討する際の対象災害とすることも考えられる。

事例17)

発災日時：2011年6月25日17:30

被災形態：土砂崩壊

発生土量：350m<sup>3</sup> 道路到達土量：150m<sup>3</sup>

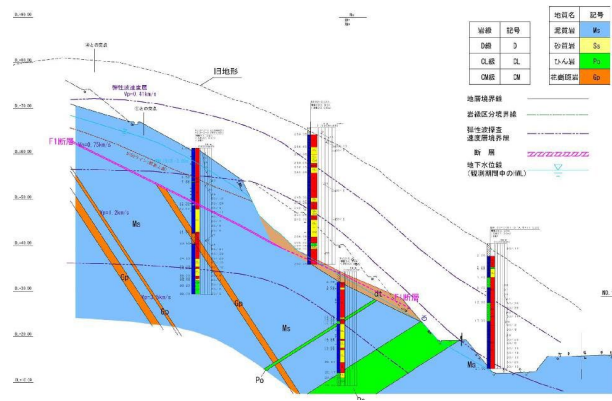
図-47に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量－土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係を示す。

当該箇所は、発災の4年前(2007年)に供用開始された道路の長大切土のり面である。崩壊箇所は、旧谷頭部に位置しており、旧地表面に近い切土のり面上部に軟質な土砂が残存していた。また、直近の2009年に点検が行われ

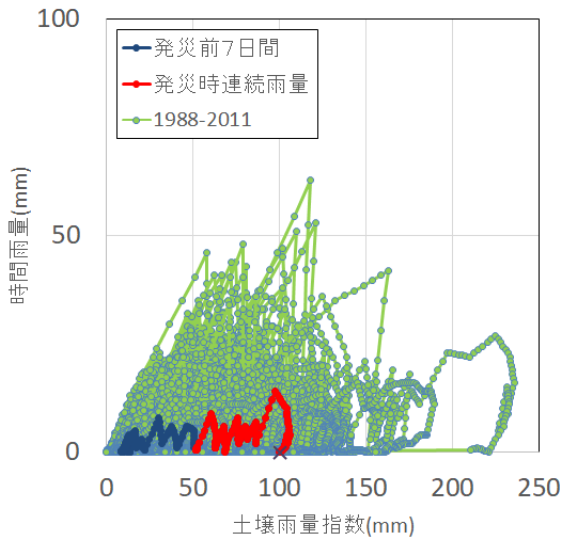
ており、被災箇所付近の縦排水溝には滑動跡とみられる水平の亀裂や側溝の土砂による閉塞が確認されており、供用開始時からすでに変状は進行していたものと考えられる。崩壊土砂は、のり面を通過する側道を閉塞したが、本線には影響はなかった。

降雨状況について、(b)時間雨量－土壌雨量指数の関係を見ると、比較的大きな先行降雨があり、当該箇所近傍のアメダスでは観測史上最大の日雨量を記録しており、供用開始後最大の降雨であった。この影響で発災したものと考えられるが、発災時には降雨はほとんどない状態で、土壌雨量指数も大きく減少しており、この関係を用いて本災害を捕捉することは難しいと考える。

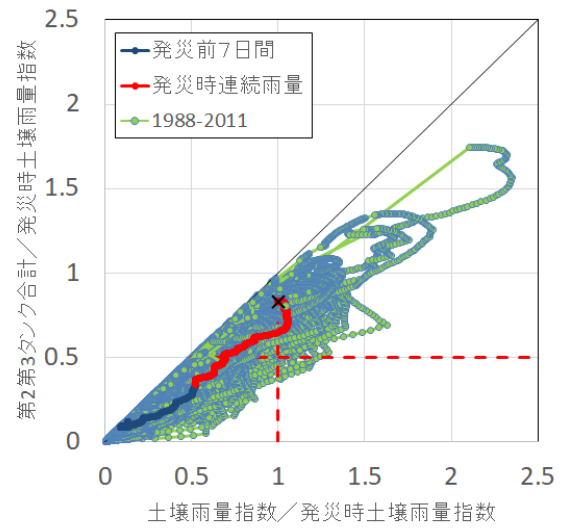
一方、(c)第2第3タンクの合計値－土壌雨量指数の関係を見ると、発災時土壌雨量指数に対してタンク合計値の比率は高く、土中水分の状況から災害が起りやすかった状態にあった傾向を示していると考えられるが、この関係



(a) 被災箇所の状況



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-49 事例19の降雨履歴の整理結果

を用いても効率的に本事例を捕捉することは難しい災害である。

前述のように、当該箇所は谷頭部に残存した軟質土砂が崩壊したもので、供用開始後の数年間ですでに変状が確認されている。このような箇所は、切土時に軟質土砂を考慮して補強等を実施することが望ましく、本事例では点検で変状が確認されていることから、早期に元地形を考慮して軟質土砂の残存範囲を調査して補強対策を行うなどの検討が必要な箇所であったと考える。

事例18) (4. 災害事例12 参照)

発災日時：2011年5月29日21:20

被災形態：土砂崩壊

発生土量：260m<sup>3</sup> 道路到達土量：70m<sup>3</sup>

図-48に、(a) 被災箇所の状況、(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。当該箇所は、4. で述べたように

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。

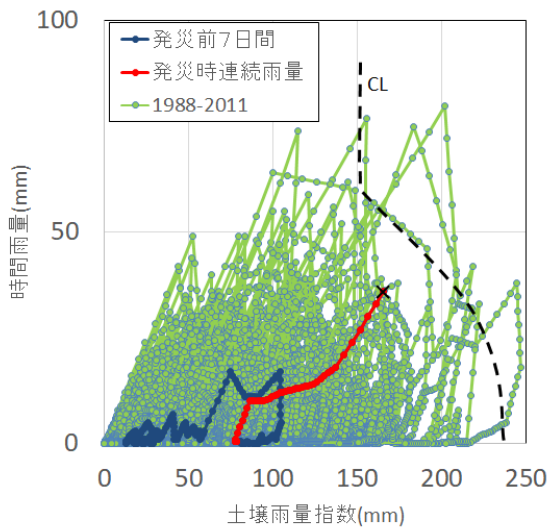
降雨状況について、(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係をみると、先行降雨の影響もあり発災時の土壌雨量指数は比較的大きなものであったが、当該箇所のほとんどの降雨は土砂災害警戒情報のCLに対して大きく内側に位置しており、本事例を捕捉するためには、見直しが必要である。

一方、(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係をみると、発災時のタンク合計値の比率は0.5を超えており、約20年間での降雨履歴をみるとこの関係を用いた場合の規制頻度はさほど多くはないことから、本災害を効率的に捕捉できる可能性はみられる。

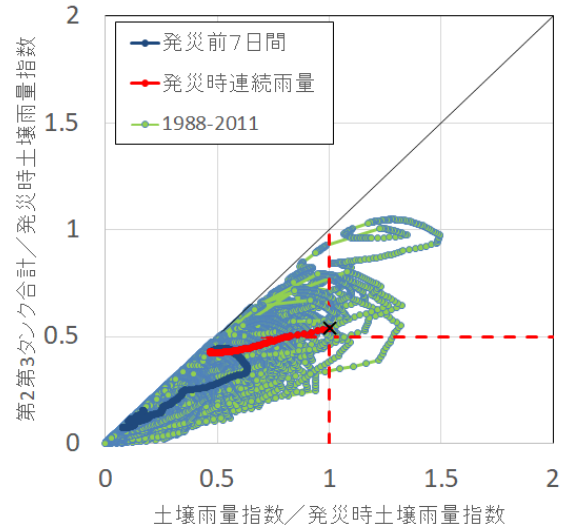
しかしながら、何度も繰り返しとなるが谷部の切土にお



(a) 被災箇所の状況 (再掲)



(b) 時間雨量—土壌雨量指数の関係



(c) 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係  
(発災時土壌雨量指数で正規化)

図-50 事例20の降雨履歴の整理結果

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。当該箇所は、供用開始後22年以上経過しており、他の供用開始数年での被災事例とは異なるが、4.でも述べたようにもともと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で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。プレキャスト法枠工は、安定したのり面で植生基盤を保持するための緑化基礎工であり、経年劣化により不安定化が想定される箇所には適さない工法である。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があると考えられる。

事例19)

発災日時：2011年5月12日1:00

被災形態：土砂崩壊

発生土量：10000m<sup>3</sup> 道路到達土量：5000m<sup>3</sup>

図-49に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。

当該箇所は、旧尾根地形を切土した新設の長大のり面(2008年供用開始;切土高70m)で、切土のり面は尾根部に位置しており、地山深部まで風化が及んでいたとみられる。のり面には流れ盤構造の強風化した泥質岩が分布し、のり面に斜交する流れ盤の断層が存在しており、この断層がすべり面となり、くさび状に崩壊したとみられる箇所である。のり面勾配は、1:1.0と長大切土にもかかわらず比較的急勾配での切土であった。

降雨状況について、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係

を見ると、発災時の土壌雨量指数および時間雨量のいずれもさほど大きなものではなく、本事例を効率よくとらえるのは難しいと考えられる。

一方、(c) 第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を見ると、発災時土壌雨量指数に対してタンク合計値の比率は高く、土中水分の状況から災害が起こりやすかった状態にあった傾向を示していると考えられるが、この関係を用いても効率的に本事例を捕捉することは難しいと考えられる。

なお、当該箇所は連続雨量200mmで事前通行規制を行っており、おおむね事前通行規制基準付近での降雨で被災している。事例9でも述べたように時間雨量と土壌雨量指数を計算する際の流出量の収支に大きな差がない場合には、土壌雨量指数はほとんど変化しないため、本事例のように時間雨量が小さい長雨型の場合には図-30(a)で示したように、総雨量に対して土壌雨量指数が大幅に小さくなる。

しかしながら、当該箇所は、長大切土により流れ盤および断層面がのり面内に表れており、切土により不安定化したものと考えられる災害で、事前通行規制の対象とするには不適切な災害と考える。長大のり面では、災害が発生するとその規模は非常に大きいため、事前の調査でどこまで把握して対策を行うかが重要であり、特に断層破碎帯の存在が予想される場合、地質構造を考慮したボーリング調査やボアホールカメラを実施し、のり面の安定性に影響を及ぼす断層の分布や流れ盤などの構造を把握し、その結果を設計に反映することが重要である。

事例20) (4. 災害事例4 参照)

発災日時：2011年6月12日11:00

被災形態：土砂崩壊

発生土量：20m<sup>3</sup> 道路到達土量：3m<sup>3</sup>

図-50に、(a)被災箇所の状況、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を示す。

当該箇所は、4.で述べたように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。

降雨状況について、(b)時間雨量—土壌雨量指数の関係を見ると、発災時の降雨は比較的短時間の集中豪雨で前日にも先行降雨がありその影響を反映して土壌雨量指数も比較的大きな値となっているが、当該地域のCLの内側で発災しており、この災害を捕捉するためにはCLの見直しが必要である。

一方、(c)第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関

係を見ると、発災時のタンク合計値の比率は0.5を超えており、この関係を用いることで捕捉することは可能であることはわかる。

しかしながら、事前規制対象とすべき災害であるかを考えた場合、4.でも述べたように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。

### (3) 考察

(2)での被災事例における個々の結果を見ると、第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係は、時間雨量—土壌雨量指数の関係と比較しても災害の捕捉性、規制の効率性の観点からわかりやすい方法であると考えられる。短時間集中豪雨に対しても、先行降雨の影響の有無や降雨強度の違いにより規制の有無の判断ができる可能性も確認された。

基準値の設定検討の観点で見ると、切土のり面の場合には、人為的に山を切土しており通常自然斜面に対して不安定化させているものといえるため、のり面に不安定部分が存在する場合には比較的弱い降雨でも災害が発生することが考えられる。上記の事例検討においても、既往の降雨履歴の観点からも効率よくとらえられる場合とそうでない場合が混在している。前述の事例検討のように強制的に基準線を設定することはできるが、切土のり面の災害については被災要因を踏まえ点検や維持管理での対応や、新設の場合には設計時の配慮などが重要であり、本来は事前通行規制を前提とするものではないと考える。

被災事例からみられる傾向としては、谷頭部での切土箇所ののり面上方の軟質土砂の残存、軟岩箇所の急こう配切土箇所の風化(土砂化)といった不安定要因がみられるところで、豪雨とまでは言い難い降雨で発災している。このような箇所については、新設に関しては設計時に地山の地形や地質特性(風化し土砂化しやすいか)を考慮し、既設ののり面についても同様の観点で点検・調査を行い必要対策を行うのが望ましい。

また、排水不良(集中豪雨によるオーバーフロー)に伴う流水による浸食(土砂流出)については、道路への影響も小さく流水が集中しやすい箇所の改善や、点検により排水施設の損傷に対する補修などの維持管理での対応によるものと考えられる。

さらに、構造物によるのり面保護工が行われている箇所については、構造物が想定している被災形態を踏まえて点検・管理を行うものとする。

図-51は、第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係による事前通行規制の考え方を整理したもので、プロットは(2)での検討事例である。長雨型や先行降雨型の災害は左上側の注意域(黄色いゾーン)から右上側の危険域(赤いゾーン)への動きに対して、集中豪雨型は右下側(黄色いゾーン)から右上側の危険域(赤いゾーン)への動きとなる。気象庁より発表される予測雨量をもとに体制を検討し、スネーク曲線が注意域に入ったら通行規制の準備体制を整え、適宜予測雨量および実況雨量により土壌雨量指数等を算出して経時変化を見ながら、危険域に入る際に通行規制を実施するものと考えている。

また、先行降雨の影響がほとんどない条件での比較的短時間での集中豪雨(一般にゲリラ豪雨と呼ばれているような降雨)のように右下側の注意域から、危険域を通らずに左上の注意域に抜けている降雨では規制は行われぬ。これにより短時間集中豪雨に対しての空振り規制の減少にも効果があるものと考えられる。

この方法で、事前通行を行うための検討課題としては、  
①規制を行う行わないの判断において右下から左上に抜ける場合に降雨と伴っているか否か  
②危険域において降雨が止んだ場合に規制解除をどうするか

の2点が考えられる。1つの考え方としては、①については、降雨時に想定される被災形態が排水施設からの溢水による侵食や表流水による泥水の流出と考えられ、降雨がないのであれば災害発生の可能性は極めて低いと考えられる。一方、②については基準線との位置関係にもよるが、無降雨が継続して土壌雨量指数および第2第3タンクの合計値が減少に転じており、降雨予測でもその後の降雨がないことが確認できた場合には、解除することが考えられる。

## 6. 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

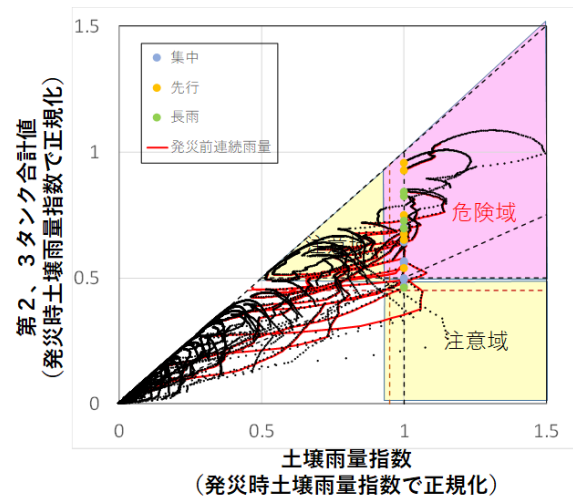


図-51 第2第3タンク合計値—土壌雨量指数の関係による事前通行規制の考え方

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に用いることで、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。

土砂災害警戒情報で用いられている時間雨量—土壌雨量指数の関係は道路の事前通行規制に用いる場合の課題を整理し、土壌雨量指数のモデルの考え方および計算で用いる各タンクの挙動を踏まえて、第2第3タンクの合計値—土壌雨量指数の関係を用いた新たな事前通行規制手法(案)を考案し、切土のり面での被災事例に対して適用性の検討を行い、時間雨量—土壌雨量指数の関係と比較しても災害の捕捉性、規制の効率性の観点からわかりやすい方法であることを確認した。

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

- 4) 気象庁ホームページ:

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>



## 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（5）（融雪期道路盛土のり面分野）

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、林 宏親、山木 正彦、御厩敷 公平

##### 【要旨】

北海道の国道における道路盛土の変状には、台風や前線がもたらす降雨、地震によるものだけでなく積雪寒冷地特有の融雪水の影響があり、近年、通行止めを伴う道路盛土の変状が発生している。

本研究は、積雪寒冷地における融雪水が要因となる道路盛土の変状メカニズムの解明や道路盛土の安定性、保全対策として管理手法の提案を目的として進めている。本報告では、検討中の既存の気象観測システム（降雨量、積雪深、気温）と現地の地下水位計測結果より、融雪期の盛土内水位を簡易に推定する手法（浸透流解析）と、その解析水位を踏まえて盛土の安定性評価（弾塑性変形解析）を行った結果について述べる。

キーワード：道路盛土、融雪水、FEM 土・水連成（浸透流・弾塑性変形）解析

#### 1. はじめに

北海道の国道における道路盛土の変状には、台風や前線がもたらす降雨、地震によるものだけでなく積雪寒冷地特有の融雪水の影響があり、近年の代表的な融雪期の盛土変状事例として、国道 230 号中山峠付近における、2012 年 5 月（図-1）と翌 2013 年 4 月の大規模災害が挙げられる<sup>1)2)</sup>。2012 年災害では、発生直前 2 週間の融雪量が、過去 10 年間の各年最大融雪量（単位：cm/day・東中山道路 TM）の平均値と比較し、約 1.5 倍を記録していた。急激な融雪水が盛土の不安定化の一因となることが想定され、融雪水の影響を踏まえた対策工の選定や、今後の道路盛土の維持管理に関して検討する必要がある。



図-1 2012 年の融雪期に発生した国道 230 号中山峠付近の被災の様子

本研究は、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、融雪水を考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。

令和元年度は、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、FEM 土・水連成（浸透流・弾塑性変形）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<sup>3)</sup>。以後、令和元年度の現地計測結果及び解析結果をケース A とする。

令和 2 年度は、北海道内の既設の道路盛土において、地下水に関する現地調査及びその結果をもとに新たに浸透モデルを構築し、検討中の解析手法の妥当性の確認を目的とした再現解析を行った。その結果、現場の地下水位計測結果と計測箇所近傍の気象データを使用し、簡易に融雪水を考慮した降雨強度（浸透流解析に用いるパラメータ）を算出できる可能性が示された。以後、令和 2 年度の現地計測結果及び解析結果をケース B とする。

検討中の解析手法は、気候変動により積雪・融雪が増大する懸念がある中、積雪寒冷地特有の融雪期盛土災害に対して、冬期の原位置水位と積雪深等から融雪期盛土内水位を推定し、その水位を踏まえた盛土の安定性評価を可能とすることを目的としている。

2. 現地計測結果

ケース B の道路盛土 (図-2) は、過去に盛土の変状が発生しており、盛土の状態を把握するための調査・試験を実施後、2018年9月から2020年6月まで現地計測を行った。

図-3は2018年9月~2020年6月における降水量と積雪深及び地下水位の経時変化を示している。積雪の多かった2018年~2019年に着目すると、当該箇所では2018年11月22日に積雪が確認され、時間の経過とともに積雪深の増加が見られ、2019年2月16日に最大積雪深 227cm を確認した。その後、気温が 0 度前後となったあたりから徐々に融雪に伴う積雪深の低下が確認され、日平均気温が連続的に+となった

2019年4月6日あたりを境に、急激な積雪深の低下が確認された。この間の積雪深と地下水位の経時変化に着目すると、積雪深が低下し始めた2019年2月16日から2019年3月4日までは積雪深の低下があるにも関わらず、地下水位の上昇は確認されなかった。その後、2019年3月5日あたりから積雪深の低下に伴って、盛土のり肩部の地下水位が上昇し始め、日平均気温が一時的に連続的に+となった2019年3月19日から盛土のり尻部で地下水位の上昇が確認された。

ケース A においても同様の傾向が確認されていることから、融雪が確認されたとしても日平均気温が連続して安定的な+の気温とならない場合には、地下水位は上昇しないと考えられる。よって、後述する浸透流

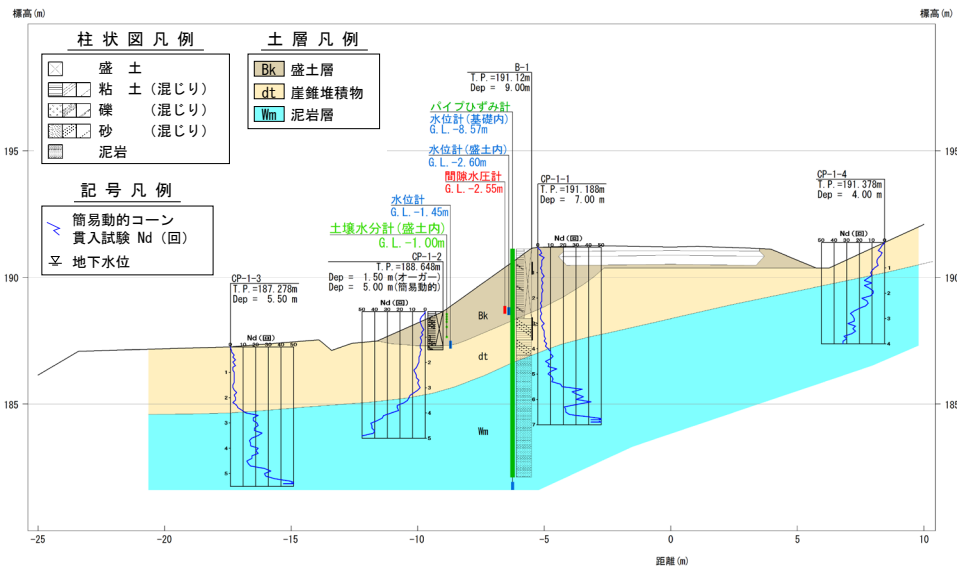


図-2 ケース B の土層断面図及び計測機器設置箇所

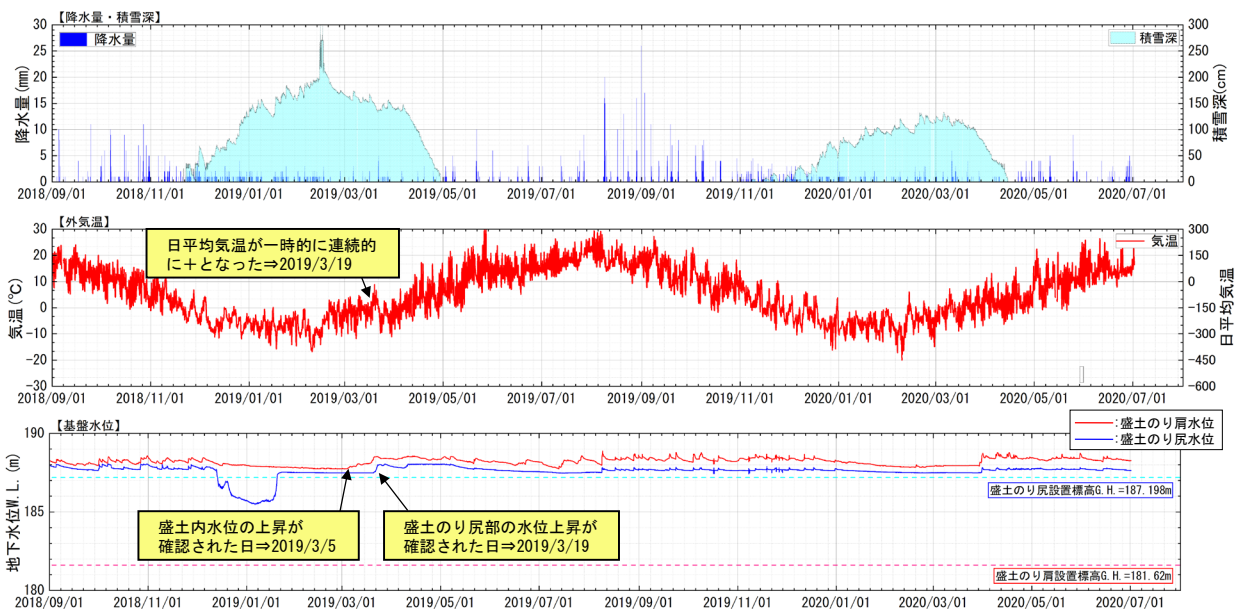


図-3 ケース B の現地計測結果

解析の条件として、初期水位や降雨強度として付与する積雪深値は、近傍の道路 TM の日平均気温が+となり地下水位が上昇する日の 0 時時点の値を参照した。

3. 解析手法と解析条件

本解析で設定した解析モデルを図-4 に、解析に用いた土質定数を表-1 に示す。土質定数は現地調査における原位置試験とボーリングコアによる室内試験結果から設定した。また、各土層の比貯留係数と不飽和透水係数は、「河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）」4) に示されている土質ごとの一般値及び関係図から設定した。解析モデルの範囲は、山側は道路排水までとし、谷側は河川までとした。一般に、室内透水試験から得られる透水係数は、現場透水試験から得られる透水係数よりも 1 オーダー程度低くなる傾向がある<sup>9)</sup>と報じられている。そこで、本検討では室内透水試験結果を 10 倍した値を入力値とした。また、基盤層 (Wm) は泥岩層であるが、ボーリングコアの観察の結果から

概ね土砂化しており、dt 層と大きな差異が無いと判断し同様の値を用いた。

浸透流解析における水理境界条件として、融雪水は地表面部だけでなく山側の集水域から dt 層を通じて供給されると想定した。当該モデルは 2 次元平面モデルのため、山側側面部と地表面部に付与する降雨強度は、検討断面の山頂から河川までの斜面長と検討モデルに付与する表面長の長さの比から算出した(図-5 参照)。ケース A では、背面地山の斜面長 (L1) = 243.4m と地表面部 (L2) = 39.9m の降雨強度の合計を 1.0mm/d とし、山側側面部と地表面部には斜面長の長さの比 (山側側面部 : 地表面部 = L1/(L1+L2) : L2/(L1+L2)) をもとに配分したケースで解析水位と計測水位 (融雪期の最大の地下水位) が概ね一致しており、初期水位を設定した日の積雪深は 188cm であったため、斜面長の合計 (L1+L2) = 283.3m で積雪深が 188cm の時の降雨強度の合計が 1.0mm/d であることになる。そこで、上記の考えをもとにケース B の斜面長と、日平均気温が+になった日の積雪深から降雨強度を算出した (表-2 参照)。

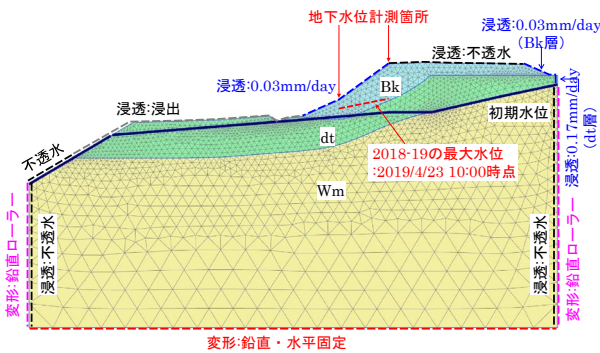


図-4 解析モデル図

4. FEM 土・水連成 (浸透流・弾塑性変形) 解析結果

図-6 は融雪期の再現解析 (浸透流解析) の結果 (間隙水圧分布) を示している。計測水位は図-3 に示した地下水位計測結果から融雪期における最大の地下水位 (2019 年 4 月 23 日) を示している。解析水位が計測水位を下回る結果となり、のり肩にかけて水位に差が生じる結果となった。この理由として、ケース B の降

表-1 解析に用いた土質定数

土層記号	変形解析におけるモデル	単位体積重量		変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν	粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 φ (°)	透水係数 k		比貯留係数 S <sub>s</sub> (l/m)	不飽和浸透特性
		湿潤状態 γ <sub>t</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	飽和状態 γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )					室内透水試験結果 (m/s)	解析に用いた値 (m/s)		
Bk	弾塑性	16.8	17.9	8,080	0.3	6.2	21.6	5.9E-08	5.9E-07	1.0E-03	粘性土
dt	弾塑性	17.8	18.7	35,720	0.3	15.3	27.9	1.9E-10	1.9E-09	1.0E-03	粘性土
Wm	弾塑性	17.8	18.7	35,720	0.3	15.3	27.9	-	1.9E-10	1.0E-03	粘性土

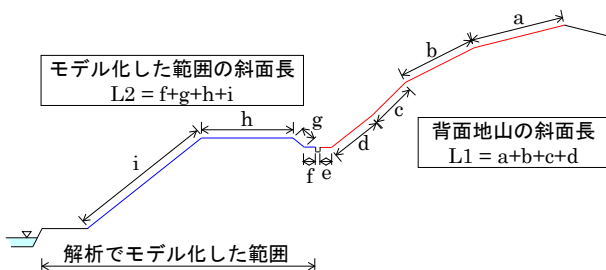


図-5 斜面長算出のイメージ

表-2 降雨強度算出に用いた斜面長と積雪深値

	背面地山の斜面長 L1 (m)	解析断面の斜面長 L2 (m)	斜面長の合計 L1+L2 (m)	日平均気温が+になった日の積雪深 (cm)	降雨強度の合計 (mm/d)
ケースA	243.4	39.9	283.3	188	1.00
ケースB	48.4	18.6	67.0	156	0.20

雨強度はケース A の降雨強度、積雪深、斜面長の合計の比率から算出しており、融雪期の降雨が反映されていないためと考えられる。

そこで、融雪期の降雨が盛土内水位にどの程度影響を与えるのかを確認するため、山側側面及び地表面部に付与する降雨強度の割合を増加させ、解析水位と計測水位が概ね一致する降雨強度を算出した（図-7）。降雨強度の割合を3割増加させたケースでのり尻部の解析水位と計測水位が概ね一致したものの、盛土のり肩部では解析水位が計測水位を下回る結果となった。

降雨強度を増加させた検討結果より、当該箇所では融雪期の盛土内水位は降雨による影響が多少あるものの、地表面から流入する融雪水及び降雨よりも背面地山から流入する融雪水が盛土内水位に与える影響が大きく、支配的であると考えられる。

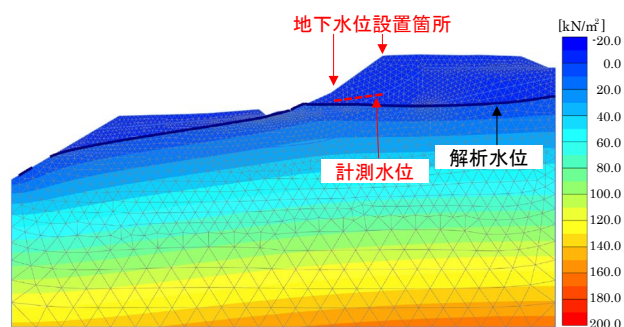


図-6 浸透流解析結果

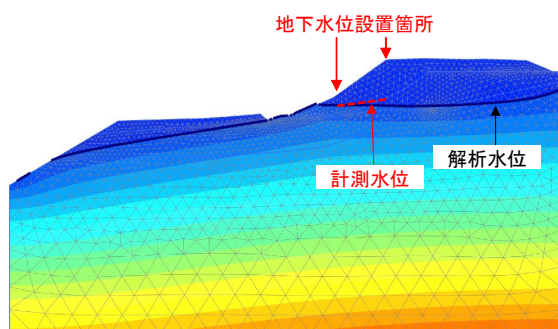


図-7 降雨強度を3割増加させた浸透流解析結果

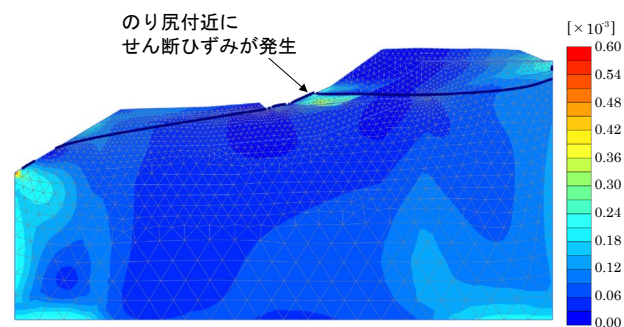


図-8 降雨強度を3割増加させた時のせん断ひずみコンター図

図-8は降雨強度を3割増加し解析水位と計測水位が概ね一致したケースにおける弾塑性変形解析結果（せん断ひずみコンター図）を示している。融雪水による地下水位の上昇に伴って、盛土のり尻付近にせん断ひずみが発生しているものの、その値は $0.3 \times 10^{-3}$ 程度と非常に小さな値となっている。当該箇所の現地計測結果において、融雪期に盛土内水位が上昇しても、盛土内にひずみはほとんど発生していないことから、解析結果は概ね妥当であると判断できる。

## 5. まとめ

既存の気象観測システム（降雨量、積雪深、気温）と現地の地下水位計測結果を用いて、融雪期の盛土内水位を簡易に推定する手法（浸透流解析）について検討を行った。さらに、その解析水位を踏まえた盛土の安定性評価（弾塑性変形解析）を行った。

その結果、現場の地下水位計測結果と計測箇所近傍の気象データを使用し、融雪水を考慮した降雨強度を算出し、簡易に融雪期の盛土内水位を推定できる可能性が示された。また、弾塑性変形解析では、解析結果と現地計測結果が概ね一致していたことから、一連の解析手法は概ね妥当であると判断できる。

今回の検討の範囲では、融雪期の降雨を反映するに至っていないため、引き続き、融雪水を考慮した解析手法の提案を目指して検討を行っていく。

## 参考文献

- 1) 中野賢也ら：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) 西村聡志ら：一般国道230号中山峠災害の復旧工事について、国土交通省北海道開発局第57回北海道開発技術研究発表会、2013
- 3) 青木卓也ら：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の研究、地盤工学会北海道支部技術報告集、No.60、pp325-330、2020
- 4) 一般財団法人 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）、2012
- 5) 小高猛司ら：現地不攪乱堤体土の透水性の評価、第53回地盤工学会研究発表会講演集、No.531、pp.1059-1060、2018

### 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 (6) (融雪期斜面分野：融雪量の推定)

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ (防災地質チーム)  
研究担当者：倉橋稔幸、日外勝仁、坂本尚弘、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、過去に融雪による崩壊の発生した地区内で6年に亘り融雪状況を調査してきた。2020年度は、改良 Degree-Hour 法による融雪水量の推定において、ノイズ扱いしていた融雪期の降雪の補正と、降水量から降雪量を除いた降雨量への修正を行うことで、降雨と融雪の合算水量の推定精度を高めることができたほか、そこから算出した土壌雨量指数の経時変化から災害時と非災害時とを判別でき、事前通行規制への適用性を検証できた。  
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、土壌雨量指数

#### 1. はじめに

北海道などの積雪寒冷地では、融雪水の影響で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。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、改良 Degree-hour 法の融雪水量係数に補正を加え、精度良く推定した融雪水量と降雨量から算出した土壌雨量指数の経時変化から災害時と非災害時における値を比較し、融雪に対応した新たな通行規制基準への適用性を検証した。

#### 2. 検討方法

##### 2.1 融雪水量推定方法の補正方法

融雪水量の推定において、融雪水量と積算暖度との比例関係に基づき、式(1)に示す改良 Degree-hour 法を提案してきた<sup>1),2),3),4)</sup>。従来の Degree-hour 法は積雪深減少の推定に利用されるため、地盤へ供給される融雪水量

の把握には、積雪深減少量に積雪密度を掛け合わせる必要があった。しかしながら、積雪密度は、積雪初期から融雪期にかけて徐々に増加していくため、正確な融雪水量を把握し辛いことが課題であった。それに対し、新手法では積雪密度を内包した融雪水量を直接推定できる点が特徴である。

$$\text{融雪水量} = \text{融雪水量係数} \times \text{積算暖度} \cdots \cdots \text{式(1)}$$

ただし、その運用にあたっては、予め融雪水量や気温を計測し、融雪水量係数を算定しておく必要がある。ライシメーターを地盤に設置することで融雪水量を直接計測できるが、機器及び設置費用が高額となる。そのため、従前では、図-1(a)に示すように週に1回スノーサンプラーで積雪水量を計測し、その減少量を融雪水量と見なして、週の値を累計することで融雪水量の推定を行ってきた。しかしながら、その計測期間中の降雪は無視されてノイズとして扱われるため、降雪状況によっては推定精度の低下が懸念されていた。

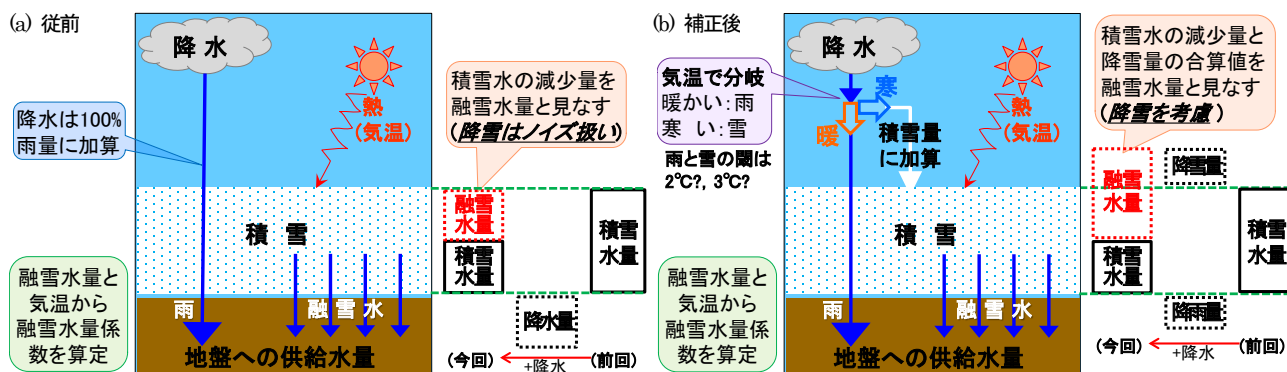


図-1 融雪を考慮した地盤供給水量検討モデル



0.9477 を、閾値を 3℃とした時が最も高い 0.9552 を示した。したがって、比較ケースにおいては、閾値を 3℃とした場合が最も適切であると考えられる。また、傾きについては、閾値を 3℃とした場合で 0.2453 となり、降雪の考慮がない従来の場合の 0.217 に比べて 13% 大きい値を示した。閾値を 3℃とした場合の回帰式の傾きの有効桁数を整えた値が、式(1)に示した改良 Degree-hour 法における積雪調査地点における最も適切な融雪水量係数と算定される。

一方、単年毎に回帰した場合の傾きと統計量を表-1 に示す。標準偏差が平均値の 1 割程度を示すことから、基準値となる融雪水量係数の算定には、バラツキに対応するため、複数年にわたる計測を行い、標準となる値を算出することが必要と思われる。

### 3. 2 土壌雨量指数の経時変化と管理基準値 (案)

発災年から過去 5 年間における 3 月から 5 月にかけての融雪期の土壌雨量指数の経時変化を図-5 に示す。

5 年間の土壌雨量指数では、崩壊時が最大値の 170.8 を示し、それ以外の崩壊が発生していない時はいずれも 150 を下回る値を示した。このことから、土壌雨量指数の閾値は 170 から 150 の間にあると推定される。よって、例えば融雪を考慮した土壌雨量指数による管理基準値を、安全側を見て 150 と設定することで、災害発生時に見逃

表-1 各年における融雪水量係数 (回帰式の傾き)

	降雪考慮 : なし	降雪考慮 : 閾値0℃	降雪考慮 : 閾値1℃	降雪考慮 : 閾値2℃	降雪考慮 : 閾値3℃
2015 傾き	0.1673	0.1924	0.2100	0.2154	0.2201
2016 傾き	0.2228	0.2297	0.2319	0.2416	0.2443
2017 傾き	0.2440	0.2626	0.2631	0.2674	0.2704
2018 傾き	0.2344	0.2416	0.2424	0.2441	0.2483
2019 傾き	0.2035	0.2104	0.2131	0.2131	0.2138
2020 傾き	0.2534	0.2775	0.2808	0.2840	0.2885
平均値: $\mu$	0.2209	0.2357	0.2402	0.2443	0.2476
標準偏差: $\sigma$	0.0287	0.0290	0.0255	0.0256	0.0261
塗色:	$\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma$		$X < \mu - \sigma, X > \mu + \sigma$		

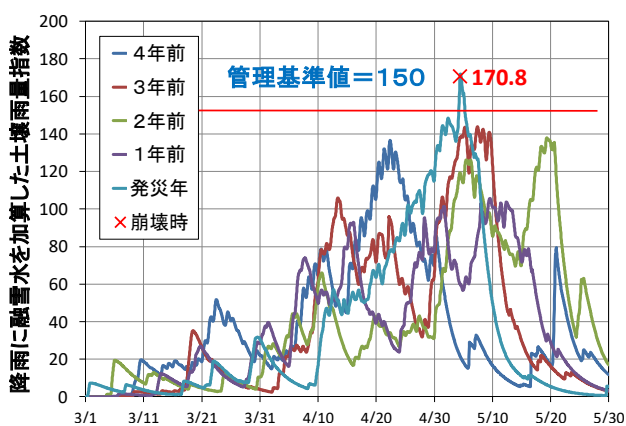


図-5 発災地点における土壌雨量指数の経時変化

しがなく、かつ非発生時においても空振りのない、通行規制の運用が可能と考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

気温に融雪水量係数を乗じることによって簡便に融雪水量を推定できる改良 Degree-hour 法において、算定の基となる融雪水量の測定の際に、気温 3℃を閾値として降雪を降雪か降雨かを判別して降水量を補正することで、融雪水量、及び降雪を除外した降雨量の推定精度を向上させることができた。

さらに、過去の被災モデル地において、補正した融雪水量と降雨量の合算値に基づく融雪を考慮した土壌雨量指数を算定した結果、災害発生時のみを非災害時から判別でき、融雪を考慮した事前通行規制へ適用性が示された。今後は、他の災害事例での検証を重ね、事前通行規制の基準値の設定方法をマニュアルとしてとりまとめを行う予定である。

### 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.
- 2) 日外勝仁, 角田富士夫, 吉野恒平, 倉橋稔幸: 北海道の道路斜面災害における融雪崩壊と降雨崩壊の特徴, 土木学会平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会講演概要集, pp.141-142, 2018.
- 3) 日外勝仁, 吉野恒平, 倉橋稔幸: 北海道の道路斜面における融雪崩壊のタイプ分類と気温及び積雪量との関係, 土木学会令和 2 年度全国大会第 75 回年次学術講演会講演概要集, III-36, 2020.
- 4) 吉野恒平, 倉橋稔幸, 日外勝仁, 角田富士夫, 矢島良紀: 道路管理に適した融雪水量推定手法の検討, 第 53 回地盤工学研究発表会平成 30 年度発表講演集, 2018.
- 5) 松尾敬世: 雪と雨をわかるもの, 天気, Vol.48, No.1, pp.33-37, 2001.

### 3.2.7 落石・岩盤崩壊対策手法に関する研究(1) (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、坂本尚弘

#### 【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。2020年度は、過年度に UAV 撮影した岩盤斜面写真から SfM 技術を用いて構築した斜面形状や開口亀裂面の立体交差状況から推定された三次元崩壊形態モデルを基に、FEM ステップ解析法を考案し、応力・ひずみ分布から亀裂面の劣化進行状況の予測を試みた。その結果、亀裂面の劣化範囲としての塑性ひずみ分布が徐々に拡大する状況を再現できた。これにより、将来的な経年劣化により亀裂面に囲まれた岩体が地山から縁切られて不安定になる可能性を判定できるようになった。

キーワード：岩盤斜面、三次元地形モデル、開口亀裂、経年劣化、FEM ステップ解析法

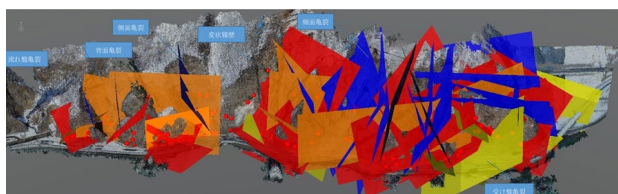
#### 1. はじめに

近年の UAV や SfM 技術の発達により、写真から簡易に岩盤斜面の三次元モデルが作成可能となり、地上からは見通し辛い亀裂の分布状況も簡単に把握できるようになってきた。そのことで、近傍の崩壊跡の調査を踏まえ、斜面形状と亀裂の立体交差状況から、岩体の崩壊形態をより正確に推定することが可能となった。そこで、想定崩壊岩体を地山と縁切る亀裂の不連続面が応力作用により経年劣化し、最終的に崩壊を引き起こす可能性を予測評価するための数値解析手法の検討を行った。

#### 2. FEM 解析検討方法

##### 2.1 解析モデル作成方法

まずは、FEM による連続体解析を行うために、解析モデルの作成方法を説明する。過年度成果に基づき、UAV による写真より作成された三次元地形モデルに対して、亀裂を面モデルとして合成した。なお、亀裂面は斜面との交差状況で色分けを行った (図-1)。



【亀裂面区分】 赤色：流れ盤亀裂、黄色：受け盤亀裂、橙色：背面亀裂、紺色・青色：側面亀裂、赤点：落石発生箇所

図-1 亀裂面三次元分布状況 (過年度成果)

これまでに確認されている崩壊形態を踏まえ崩壊が発生し易いと考えられる複数の亀裂面によって地山から分断された状態のブロックの内、特に大きなブロックを検討対象として抽出した (図-2)。

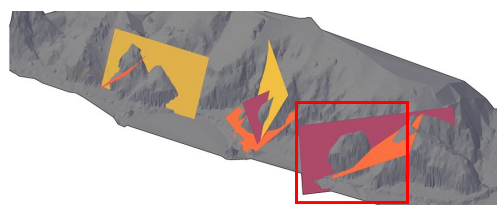


図-2 亀裂面交差状況に基づく解析対象岩体の抽出箇所

一般的にはジョイントとしてモデル化されるのに対し、本検討では、約 2m の厚みを持った弱層部としてモデル化したことで、弾塑性解析により弱層部の塑性状態の評価が可能となった (図-3)。

解析メッシュのサイズとして 5m を基本として、4 面体によるメッシュ作成を行った。また、拘束条件として、底面を三方向拘束とし、周辺を x・y 軸の二方向拘束とした (図-4)。赤色のメッシュが、弱層に囲まれた不安定岩体と仮定した。

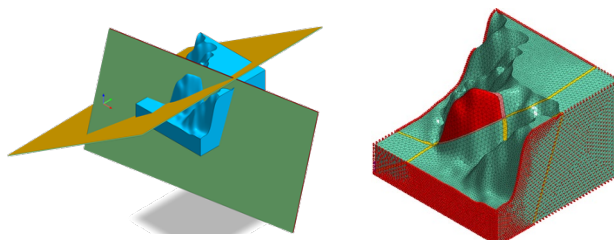


図-3 亀裂面のモデル化 図-4 解析モデルと拘束条件

##### 2.2 劣化進行を表現する FEM ステップ解析方法

FEM ステップ解析方法における応力劣化サイクルの検討評価は、自重解析の塑性ひずみの値を用いて、塑性ひずみ値により微小破壊の程度判定を行っている。塑性ひずみ値範囲に岩盤等級を割り振り要素メッシュ毎に物性値を変化させ、再度自重解析を行う。このような物性



値変更と自重解析を繰り返すことにより、塑性ひずみの発生範囲の進展を把握し、自重による劣化影響が収束するまでの範囲を把握するものである(図-5)。

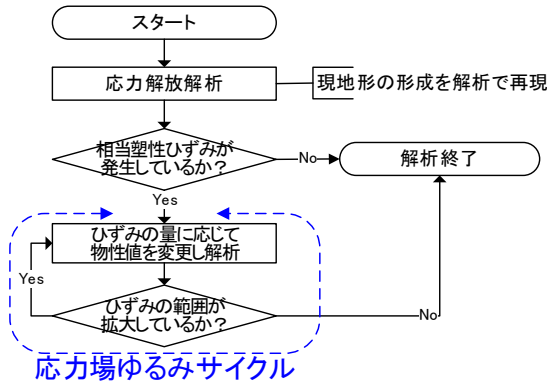


図-5 応力劣化サイクルフロー

FEM ステップ解析の具体的な手順は、表-1 に示すように、モデル全体の岩盤要素を CH 級岩盤、亀裂の弱層要素を CM 級岩盤として、自重解析終了後の崩壊ブロック底面部のメッシュ要素毎に塑性ひずみ値に対応した物性値に低減変更した解析メッシュにより、再度自重解析を行った。この解析サイクルを繰り返すことで、自重による亀裂を模した弱層部の応力劣化を疑似的に再現した。

塑性ひずみ量に対応させる物性を以下のとおり設定した。

- 1.00%以上 : 破壊部
- 0.50%以上~1.00%未満 : 未固結 S1
- 0.10%以上~0.50%未満 : D 級
- 0.05%以上~0.10%未満 : CL 級
- 0.05%未満 : CM 級

表-1 使用物性値

名称	物性値 (静的変形特性)					
	ポアソン比 $\nu_s$	ヤング率 $E_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 $C$ (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)	静止土圧係数 $K_0$
CH級岩盤	0.30	500,000	25	250	40	0.357212
CM級岩盤	0.30	50,000	25	150	35	0.426424
CL級岩盤	0.30	25,000	20	75	30	0.500000
D級岩盤	0.30	12,500	20	38	25	0.577382
未固結S1	0.35	6,250	16	20	25	0.577382
破壊部	0.35	3,125	16	10	20	0.657980

### 3. FEM 解析結果

亀裂に囲まれた岩体の崩壊を最も規制すると思われる岩体底面の弱層部の塑性ひずみ分布を、上位の不安定岩体を透過させた状態で、図-6 に示す。

弱層部は、当初 CM 級岩盤としたが、有効塑性ひずみの値によって、逐次物性値を変化させることで、劣化の進行・拡大を簡易的に再現し、破壊部のメッシュ数が 10step 変わらない時点を収束と見なし、STEP27 まで解析を繰り返した。弱層部の要素数の変化を表-2 に示す。

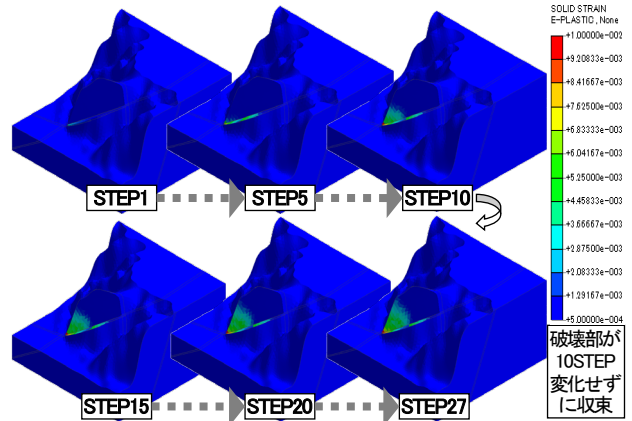


図-6 岩体底面弱層部の塑性ひずみ分布

表-2 物性値変更履歴

STEP	CM級				CL級				破壊部
	未変化数	未変化率	変化数	増加率	未変化数	未変化率	変化数	増加率	
STEP0	1256	—	—	—	—	—	—	—	—
STEP1	1118	89.0%	60	—	78	—	0	—	—
STEP2	1062	84.6%	45	-25.0%	99	26.9%	49	—	0.1%
STEP3	1025	81.6%	36	-20.0%	115	16.2%	79	61.2%	1 0.0%
STEP4	1015	80.8%	26	-27.8%	118	2.6%	96	21.5%	1 0.0%
STEP5	974	77.5%	39	50.0%	129	9.3%	112	16.7%	2 100.0%
STEP6	935	74.4%	38	-2.6%	159	23.3%	121	8.0%	3 50.0%
STEP7	905	72.1%	31	-18.4%	130	-18.2%	130	7.4%	4 33.3%
STEP8	872	69.4%	39	23.8%	201	54.6%	138	6.2%	6 50.0%
STEP9	844	67.2%	37	-5.1%	220	9.5%	148	7.2%	7 16.7%
STEP10	822	65.4%	33	-10.8%	242	10.0%	151	2.0%	8 14.3%
STEP11	806	64.2%	26	-21.2%	259	7.0%	155	2.6%	10 25.0%
STEP12	788	62.7%	34	30.8%	262	1.2%	162	4.5%	10 0.0%
STEP13	772	61.5%	38	11.8%	266	1.5%	169	4.3%	11 10.0%
STEP14	765	60.9%	31	-18.4%	270	1.5%	179	5.9%	11 0.0%
STEP15	749	59.6%	33	6.5%	279	3.3%	184	2.8%	11 0.0%
STEP16	730	58.1%	42	27.3%	282	1.1%	191	3.8%	11 0.0%
STEP17	724	57.6%	37	-11.9%	291	3.2%	193	1.0%	11 0.0%
STEP18	717	57.1%	34	-8.1%	298	2.4%	195	1.0%	12 9.1%
STEP19	709	56.4%	30	-11.8%	308	3.4%	198	1.5%	12 0.0%
STEP20	696	55.4%	37	23.3%	310	0.6%	201	1.5%	12 0.0%
STEP21	687	54.7%	40	8.1%	303	-2.3%	214	6.5%	12 0.0%
STEP22	684	54.5%	36	-10.0%	310	2.3%	214	0.0%	12 0.0%
STEP23	682	54.3%	32	-11.1%	315	1.6%	215	0.5%	12 0.0%
STEP24	677	69.8%	31	-3.1%	320	1.6%	216	0.5%	12 0.0%
STEP25	671	69.3%	32	3.2%	323	0.9%	218	0.9%	12 0.0%
STEP26	668	53.2%	32	0.0%	323	0.0%	221	1.4%	12 0.0%
STEP27	664	52.9%	30	-6.3%	327	1.2%	223	0.9%	12 0.0%

弱層部では、斜面下部の応力作用が顕著な部位において、有効塑性ひずみが増加しており、応力劣化が下端から上方に進行し、脆弱化した領域が拡大する様子が再現されているが、劣化が岩体底面全体にまで広がるといった極端な不安定化の進行は見られなかった。

次に、要素数の変化から崩壊の可能性を考察すると、破壊部のメッシュ数は、要素全体の 1%程度と非常に少なく、強度低下の発生箇所が全体の 50%を下回ることから、応力的な劣化によっては崩壊に至る可能性は低いと判断した。ただし、破壊部となった部位のうち、表層近くは不安定であるため、局所的な崩落や落石の発生に注意が必要な部位である。

### 4. まとめ

SfM 技術により UAV 撮影写真から構築した亀裂面分布を含む三次元地形モデルを基に、提案する FEM ステップ解析法を用いて、想定崩壊岩体と地山との境界面の劣化進行状況を推定することで、亀裂面に囲まれた岩体が応力的な経年劣化により将来的に崩壊する可能性があるかを判定できる可能性を示した。また、亀裂面の劣化が表層に到達する部位では、落石や小崩壊の発生が懸念されるため、重点的な点検箇所抽出にも有効と考えられる。

### 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

#### 3.3.1 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：安中新太郎、今野久志、中村拓郎、山澤文雄、寺澤貴裕

##### 【要旨】

本研究は、落石防護擁壁および従来型落石防護柵について、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。擁壁を基礎とした落石防護柵の検討としては、擁壁を基礎とした鋼製支柱模型に対し支柱の変形および擁壁基礎の回転挙動に着目した基礎的な重錘衝突実験を行った。落石防護柵に関してはさらに、重錘衝突実験における捕捉性能や損傷状況を整理し、現行の設計法において想定されていない損傷等を予防するための構造細目等について検討した。

キーワード：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

我が国において、比較的小規模な落石等から道路交通の安全を確保するため、落石防護擁壁や落石防護柵が整備されているが、それらについて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、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等を提案することを目的としている。

本年度は擁壁を基礎とした落石防護柵の安定照査手法の提案に向けた基礎的検討として、耐衝撃挙動を把握するための基礎実験を実施した。また、落石防護柵の実規模衝撃実験等における捕捉性能や損傷状況の結果を基に、落石防護柵の損傷等を予防するための構造細目等を検討した。

##### 2. 擁壁を基礎とした落石防護柵の重錘衝突実験

実験は高さ 2m、延長 3 m の擁壁の中央に鋼製支柱（H-200×100×5.5×8）を設置した模型（図-1）を用いた。衝撃荷重は、質量 1,000 kg の鋼製重錘を振り子運動により支柱に衝突させることによって载荷した。载荷位置は擁壁天端から 1.4 m および 0.6 m の高さとし、重錘衝撃エネルギーを変化させて実験を行った。

落石防護柵の基礎の設計は落石対策便覧（以下「便覧」という。）に基づき、落石の作用による動的挙動を考慮しない慣用的な方法が用いられている。本実験の模型について、静的荷重を漸増させた試算では支柱は塑性変形に至らずに擁壁が回転する。しかしながら、実験（写真-1）では、支柱が塑性変形するとともに擁壁も回転する

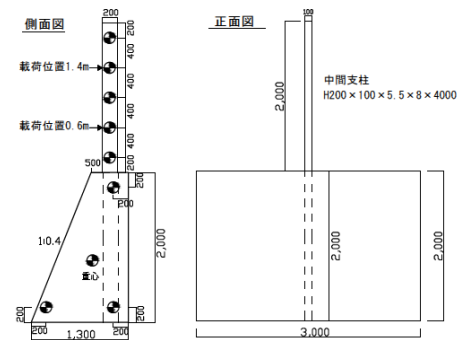


図-1 擁壁を基礎とした支柱模型の形状寸法

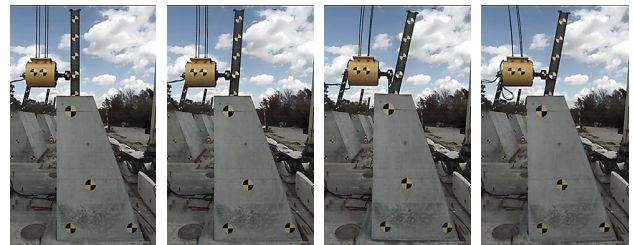


写真-1 高速度カメラ画像の一例

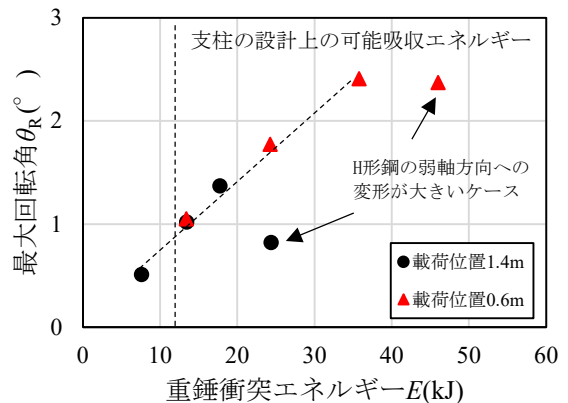


図-2 衝突エネルギーと最大回転角の関係

ことが明らかになり、動的な挙動を考慮した安定照査手法が必要であることが分かった。図-2に衝突エネルギーと擁壁の最大回転角の関係を示す。支柱の弱軸方向への変形が大きい2ケースを除き、最大回転角は载荷位置に関わらず衝突エネルギーの増加に伴いほぼ線形に増加している。また、擁壁の回転角は便覧の許容回転角2~3°以下であった。これらは、より合理的な動的設計法を構築するための重要な知見であると考えられる。

### 3. 従来型落石防護柵の構造細目の見直し

既設の落石防護柵では、落石衝突に起因する支柱基部の局部座屈による横倒れや、ワイヤロープのゆるみ、ひし形金網の破網等の損傷が報告されている。こうした損傷事例の中には設計時に想定されていない損傷箇所や形態も含まれている。そこで、落石防護柵の実規模衝撃実験等の結果から損傷状況等を整理し、損傷対策のための構造細目に関する検討を行い<sup>1)</sup>、その結果を基に、北海道開発局の道路設計施工要領等に掲載されている標準図の次の項目に対し変更を提案した。①端末支柱の外側に補強鋼板を設置(写真-2)、②中間支柱基部の吊り線孔の廃止(写真-3)、③間隔保持材の取付け向きを車道側から山側に変更(写真-4)、④下段のワイヤロープの設置間隔の変更と追加、⑤最下段のワイヤロープに結合コイルを設置(写真-5)。なお、提案した構造細目等の見直し案(図-3)は、より安全な落石対策への貢献が期待されるため、今後、国内の主要メーカーや学識経験者等との意見交換、試験施工等によって現場展開に向けた更なる検証を進める予定である。

### 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) 擁壁を基礎とした落石防護柵に関して、静的载荷による計算では支柱は塑性変形に至らずに擁壁が回転する結果となるが、実験では衝撃荷重により支柱が塑性変形するとともに、擁壁基礎は回転運動をする。
- 2) 従来型落石防護柵に関して現行の設計体系では想定されていない損傷等を予防するための構造細目を見直した標準図集案を作成した。

### 参考文献

- 1) 中村拓郎、今野久志、安中新太郎：従来型落石防護柵の損傷状況と構造細目に関する一考察、第64回(2020年度)北海道開発技術研究発表会論文、防40(道)、2021.2



(a) 補強無し (b) 補強有り  
写真-2 端末支柱外側の補強鋼板の効果



(a) 孔有り (b) 孔無し  
写真-3 吊り線用4φ孔による亀裂の誘発



(a) 間隔保持材の車道側への飛散 (b) Uボルトの破断  
写真-4 間隔保持材の取付け向きが原因とみられる損傷



(a) 中央部での捕捉 (b) 端部での捕捉  
写真-5 結合コイルにより中央部と同等の捕捉性能(金網端部のめくり上がり予防)

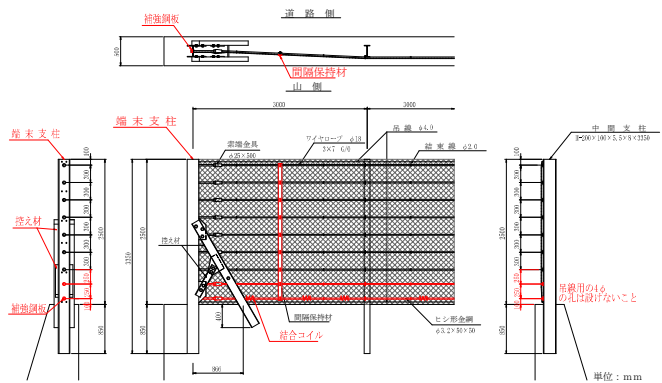


図-3 構造細目を一部変更した標準図案(柵高さ2.5mの例)

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

#### 3.3.2 災害発生時におけるロボット技術適用に関する研究

担当チーム：技術推進本部（先端技術チーム）

研究担当者：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2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<sup>1)2)</sup>。

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2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として、外部カメラの有効活用をオペレータに促す新画像インターフェース、および建 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術の活用を提案し、適用性について検証実験を行った。続いて、昨年度に「無人化施工の施工

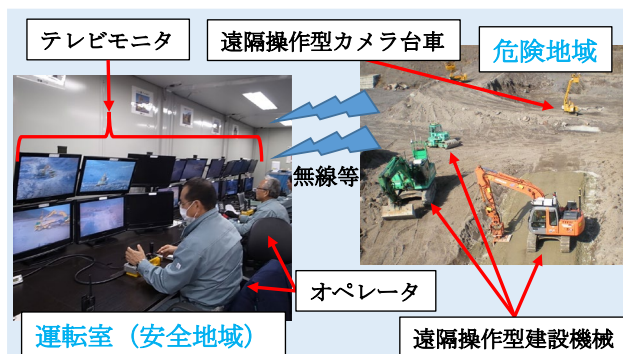


図-1 無人化施工イメージ

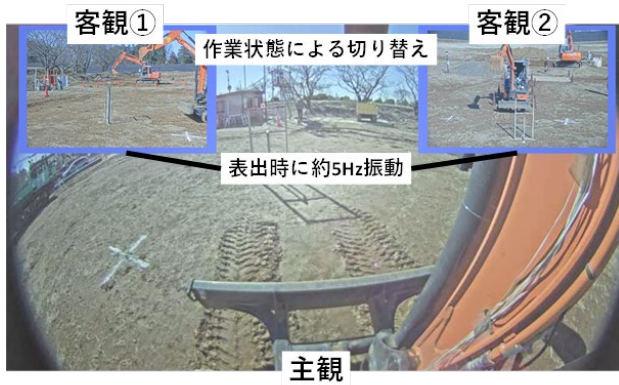


図2 新インターフェース

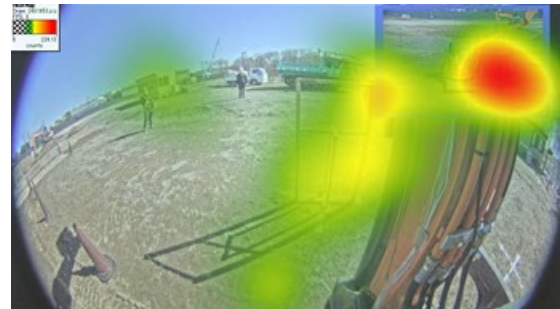


図3 アイマークカメラ



従来インターフェース

車載カメラからの平均視線変更回数：468



新インターフェース

車載カメラからの平均視線変更回数：578

図4 オペレータ注視点ヒートマップ

効率低下の最も大きい原因は、視覚情報である」という仮説を導出したが実験件数が不足しており、引き続きの実験が必要であった。そこで令和2年度は引き続き検証事件を行った。その結果、施工効率低下の大きい原因は、視覚情報と操作インターフェースであることが判明した。

## 2. 新画像インターフェース適用性検証

これまでの研究成果から、遠隔操作が得意なオペレータは、車載カメラ映像のみではなく車体周辺を俯瞰的に撮影している外部カメラ映像を有効に活用しており、また不得意なオペレータは、車載カメラ映像のみに注視してしまっていることが判明している<sup>3)</sup>。これは、車載カメラ映像のみでは機体の周辺状況を十分把握できないため、必要に応じて（機体と対象物との距離調整を行う場合など）外部カメラ映像を活用することが、遠隔操作時の施工効率を向上させるために有効であることを示している。

しかしながら、現在の遠隔操作時に使用されている映像インターフェースは、図-1に示すように各映像を並べただけであり、オペレータ（特に不慣れたオペレー

タ）にとって見るべき映像を把握し、視線を移動させることが容易ではない構造になっている。

そこで本研究では、外部カメラ映像（客観映像）を見るべきタイミングで振動させたり、大きさや位置を変更させたりすることで、オペレータの視線を誘導し、必要な情報を提示できる新たなインターフェース（図-2）を開発し、実証実験を行った。

実験は土木研究所実験場を利用し、既往研究で提案されている「モデルタスクⅡ」<sup>4)</sup>を用いて行った。オペレータ2名にて従来型の画像インターフェースと新型インターフェースを活用した遠隔操作をそれぞれ3回ずつ行い、作業中のオペレータ視線をアイマークカメラで計測した（図-3）。

アイマークカメラで計測したオペレータの注視点ヒートマップと、車載カメラ映像から外部カメラ映像への平均視線変更回数を図-4に示す。図-4から、新たな画像インターフェースはオペレータの車載カメラ映像から外部カメラ映像への視線誘導に効果があることが判明した。今後は振動、大きさ、位置などの最適化や、それらの自動化技術について検討を行い、遠隔操作時の施工効率向上につなげたいと考えている。

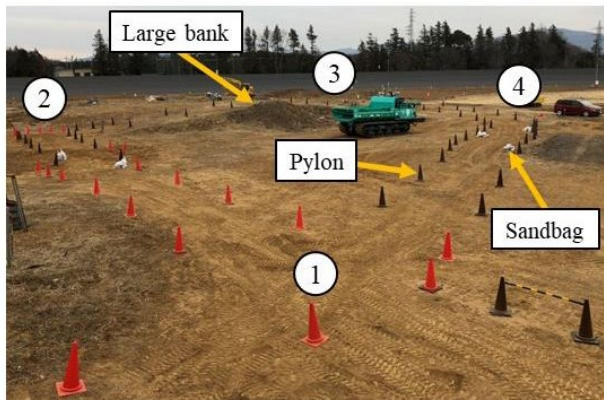


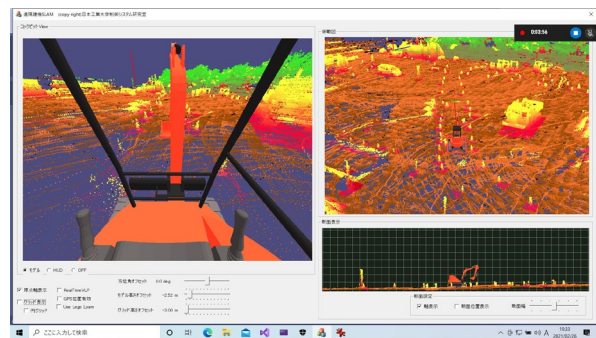
図-5 走行コース



図-6 SLAMシステムを搭載遠隔操作型油圧ショベル



車載カメラ映像



SLAM映像

図-7 実験時映像

### 3. SLAM 適用性検証

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) とは、移動中にカメラやレーザスキャナ等で取得した周辺環境情報から、事前に地図が与えられていなくても自己位置特定と周辺の地図作成を同時に行うことができる技術のことであり、市販の掃除ロボット「ルンバ」等に採用されている。本技術を無人化施工の建設機械に適用することにより、外部カメラがなくても建設機械周辺状況の把握が可能となる。また、SLAMにて使用するセンサにレーザスキャナを選択することにより、夜間など光学カメラが使用できない環境でも周辺状況把握が可能となる利点も持っている。そこで、土木研究所実験場において SLAM 技術を用いた遠隔操作の検証実験を行った。

実験は土木研究所実験場に、約 130m の走行コースを三角コーン (Pylon) や土嚢障害物 (Sandbag) を使用して作成し (図-5)、レーザスキャナ活用 SLAM システムを搭載した遠隔操作型油圧ショベルに (図-6) にて夜間に走行することで行った。走行はオペレータ 6 名にて行い、それぞれ①車載カメラ映像のみ、② SLAM 映像のみ、③車載カメラ映像と SLAM 映像、の

3 パターンを 2 走行ずつ実施した (図-7)。

走行後にオペレータへヒアリングを行った結果、夜間においても機体の周辺状況を把握することが可能であり、光学カメラのみより遠隔操作時の安心感が増大することが判明した。また、本技術を活用することにより、外部カメラを省略することも可能である。以上のことより、本技術は無人化施工における安全性の向上や迅速な施工着手に有効である。





### 4. 無人化施工施工効率低下原因検討

昨年度と同様に、無人化施工の施工効率低下要因として、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、のいずれの影響が大きいかを調査する検証実験を行った。

実験は表-1 に示すように、搭乗操作から条件を変えて、概往研究<sup>4)</sup>にて提案された「モデルタスクII」を 6 名のオペレータにて行いサイクルタイムを計測した。昨年度の 3 名に加え、合計 9 名のデータを得ることができた。

9 名のサイクルタイム平均を図-8 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-8 によると、条件②③間で

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 <sup>4)</sup>				

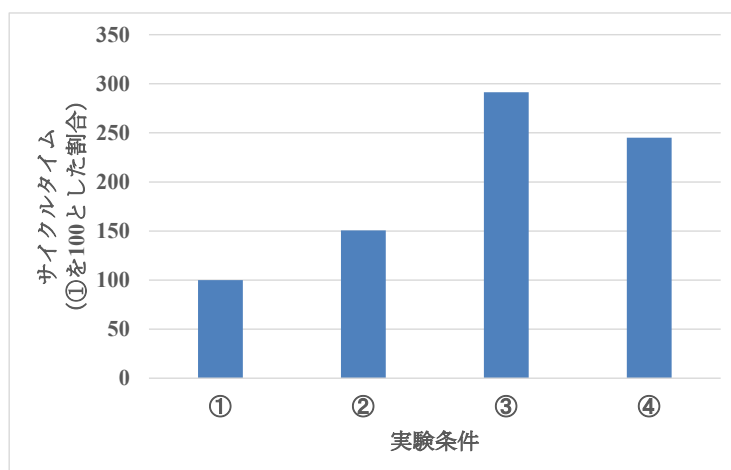


図-8 施工効率低下要因検証実験結果

のサイクルタイムの増加が最も大きく，続いて①②間，そして③④間はサイクルタイムは逆に減少しておりその差も小さくなっている。したがって視覚情報の変化が施工効率低下の最も大きい要因であり，次に操作インターフェースの変化であると推測できる，一方，音・振動の有無は本条件では遠隔操作の施工効率低下にはほとんど影響がないと推測される。本結果から，遠隔操作時の施工効率向上には，視覚情報に関する技術検討が有効であると考えられる。

#### 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) 藤野健一，橋本毅，油田信一，建山和由：無人化施工に最適なオペレータの選抜手法に関する研究，土木学会論文集F3，Vol.74，No.1，pp.11-17，2018.

4) 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.