令和3年度

大規模土砂災害対策研究機構年報

大規模土砂災害対策研究機構

1. 研究機構の概要

大規模土砂災害対策研究機構は、平成23年紀伊半島大水害において多数発生した大規模 な土砂災害を契機として、大規模土砂災害への対応技術の高度化に対して行政・大学・研 究機関が連携して取り組むために平成26年度に設立され、様々な取り組みを進めている。

1.1 構成機関

大規模土砂災害対策研究機構は下記の9機関により構成される。

- ・ 国土交通省近畿地方整備局(大規模土砂災害対策技術センター)
- · 国土交通省国土技術政策総合研究所
- · 国立研究開発法人土木研究所
- · 和歌山県
- 那智勝浦町
- · 北海道大学
- · 三重大学
- 京都大学
- · 和歌山大学

1.2 研究機構の取り組む課題

研究機構では、主として下記の課題に対して取り組みを行う。

- 大規模土砂災害に係る危険箇所の抽出・評価
- 中山間地域の危機管理対策
- 国土監視及び国土管理の強化
- ・ 次世代災害対応技術の開発・導入

1.3 研究機構の果たす役割

上記の取り組みに加え、地域に根ざした研究機関として、研究機構は下記の役割を果た すことを目指す。

- 土砂災害防止に関わる人材育成支援
- ・ 地域防災力の充実・強化支援
- 防災知識普及のための広報
- ・ 諸外国に向けての技術の発信

2. 研究課題

研究機構における研究として、大規模土砂災害対策技術センターが主体となり、構成機関の助言を受けながら実施する研究と、センターを含め構成機関相互の連携により共同で 実施する研究を実施している。

令和3年度は下記のテーマについて研究を行った。

2.1 大規模土砂災害対策技術センター・国土技術政策総合研究所

- ・ 2011 年台風 12 号により深層崩壊が発生した熊野地区でのドローン空中電磁探査に よる深層崩壊メカニズムの解明
- ・ LP データに基づく深層崩壊による生産土砂の滞留期間および再移動に関する検討
- ・ 紀伊山系における深層崩壊メカニズムとリスク評価手法の提案
- ・ 放射性炭素年代測定を用いた紀伊山系の深層崩壊発生頻度推定
- 深層崩壊後の土砂流出に伴う下流合流点での土砂堆積に関する現地観測と水理模型
 実験
- ・ 那智川流域の表層崩壊・土石流の発生メカニズムと危険度評価マップの作成
- ・ UAV の自律飛行による河道閉塞や砂防施設の調査・点検
- ・ 2011 年台風第 12 号により発生した長殿・栗平地区天然ダムの水文特性の違い
- ・ 2011 年台風第 12 号により発生した天然ダムを構成する岩石のスレーキング試験・ X線回折分析の結果と天然ダムの安定性
- ・ 2011 年紀伊半島大水害で深層崩壊により発生した河道閉塞箇所の監視・観測手法
- ・ 地質境界による浅層地下水位上昇の浸透流解析を用いた考察
 ~2011年台風第12号時における那智川流域の事例~
- ・ 近畿インフラ DX 推進センターにおける DX 推進の取り組みについて(報告)

2.2 和歌山県

- ・ 高感度地震観測網の微小振動データを用いた大規模出水時の河川水位の推定
- ・ 大規模斜面崩壊時の地盤振動特性に関する室内実験による検討
- ・ 紀伊半島大水害の被災体験(紙芝居)を伝承する活動と年齢別の研修効果
- ・ 土砂災害防災ロールプレイングゲーム「土砂災害が発生したとき」の開発とゲーム を用いた防災教育の効果検証
- 和歌山県田辺市における明治22年水害の災害教訓伝承に関する調査
- ・ 和歌山県日高郡みなべ町における断層破砕帯での地すべり対策
- ・ 後世に伝える過去の山地災害に関する調査と防災学習の取り組みについて
- BIMCIM for landslide countermeasure facilities

2.3 三重大学

・ 電極板を用いた非接触型流砂計測法開発のための水路実験

2.4 京都大学

- ・ 大規模土砂災害発生後の警戒・避難における未経験降雨指数の活用について
 一 平成 23 年紀伊半島大水害後の事例分析 —
- 紀伊山地における空中電磁探査結果を用いた基岩内地下水位の推定とその精度の向
 上に関する検討

2011 年台風 12 号により深層崩壊が発生した熊野地区での ドローン空中電磁探査による深層崩壊メカニズムの解明

国土交通省国土技術政策総合研究所(近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター) 〇木下篤彦 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター 柴田俊 国土交通省国土技術政策総合研究所 山越隆雄・中谷洋明 大日本コンサルタント株式会社 河戸克志・金山健太郎・奥村稔 有限会社ネオサイエンス 城森明・城森敦善 株式会社エイト日本技術開発 藤原康正・中野英樹

1.はじめに

2011 年 8 月 25 日に発生した台風 12 号では,紀伊半島の総降水量は広い範囲で 1,000 mm を超え,記録的な大雨 となった.これにより,紀伊半島では,崩壊面積が lha 以上の深層崩壊が,72 箇所で発生した.深層崩壊のメカ ニズムについては,災害直後から地形・地質・水文等様々な角度から研究が行われている.特に,既往研究から, 斜面内を横断する断層破砕帯が周辺の地下水を崩壊斜面に誘導,あるいは地下水を堰き止めた可能性がある.本稿 では,和歌山県田辺市熊野地区の深層崩壊(写真-1)を調査対象として、ドローン空中電磁探査(写真-2)を活用し た崩壊メカニズム解明に向けた取り組みを紹介する.

2. 熊野地区の概要と調査内容について

本研究が対象としている熊野地区は、日置川水系の熊野 川上流域にあり、堆積岩類が広く分布している. 深層崩壊 の規模は、幅440m、高さ250m、長さ480mで崩壊土砂量 は約526m³である.本研究では、豪雨時の断層破砕帯によ る地下水の挙動への影響を確認するため、2020年10月中 旬の台風14号の3日後と同12月上旬の乾燥期に、ドロー ン空中電磁探査により、地下約0~200m程度の比抵抗分 布を測定した.

3. ドローン空中電磁探査による断層破砕帯周辺の比抵抗 分布の特徴

まずは、大まかな地質や地下水・湧水の分布を把握する 目的で2012年11月28日にヘリコプターによる空中電磁 探査を実施した.なお、実施日は前線通過による総雨量 98.5mm (気象庁西川観測地点)の降雨の2日後である.図 -1に地下約0~10m での比抵抗分布を示す.崩壊斜面中 腹~下部にかけて低比抵抗となっており、この付近の乾燥 期の地下水位の観測結果と比較すると地下水位は地下約 10mよりも浅い位置にあると考えられ、地下水及び湧水に より低比抵抗域が形成されていると考えられる.

次に,図-2に2020年11月25~27日に実施した電気探



写真-1 災害1日後の熊野地区の様子(2011年9月5 日,国土交通省による撮影).黄色の実線は図-2中の ドローン探査の測線を,白色の点線は地表踏査と図-2の電気探査の結果及びボーリング調査の結果を基に した断層破砕帯を示す.矢印は流向を示す.



写真-2 ドローン空中電磁探査の様子.地表に敷設したケーブルに電流を流して磁場を発生させ、ドローンに吊した磁場センサーで地下の鉛直成分の磁場を測定する.



図-1 空中電磁探査の結果(地下約0~10m). 2012年11 月28日実施. 黄色の実線は電気探査及びドローン探査 の測線を, 白色の点線は地表踏査と図-2の電気探査の 結果及びボーリング調査の結果による断層破砕帯を示 す. 矢印は流向を示す.

査(写真-1・図-1の A-A'測線)の結果を示す.電気探 査方法は2極法とし,電極間隔10m,探査深度200m とした.なお,測定開始時点で4日間ほぼ無降雨で あり,乾燥期の比抵抗である.比抵抗が大きく変わる 箇所が断層と考えられ,4つあることが分かった.

図-3(a),(b)にドローン空中電磁探査による比抵抗 分布の解析結果(写真-1・図-1のA-A'測線)を示す. (a)は乾燥期にあたる2020年12月2日の比抵抗分布 図で,(b)は2020年10月の台風14号による降雨終 了3日後(2020年10月13日)の比抵抗値を(a)の比抵 抗値で除した値の縦断分布図である.水色のゾーン は降雨時に比抵抗値が低下したことを表し、地下水 の侵入が推定される.(a)から,断層1よりA側と断 層2よりA'側に高比抵抗ゾーンが分布する.これ らは破砕されて空隙が多いゾーンと考えられる.(b) から,断層1よりA側の水色のゾーンは(a)の結果か



測定時点で4日間ほぼ無降雨であり乾燥期である.断層 は比抵抗変化が大きく表れている箇所に位置する.



図-3 写真-1・図-2のA-A'測線での(a)ドローン探査による乾燥期(2020年12月2日)の比抵抗縦断分布図,(b)令和2年台風14号による降雨(総雨量217mm)終了3日後の比抵抗値を(a)の比抵抗値で除した値の縦断分布図.

ら破砕ゾーン内に地下水が浸入していると推定され、その地下水は断層1付近で止まっている. このことから、断層1は地下水を堰き止めるタイプの断層破砕帯と推定される. 断層1と2の間は、水色のゾーンがA'側に向かっ て標高が高くなっており、地下水は百間谷に向かって流下していると考えられる. 断層1と3の間は、地下水が尾根付近からA'側に向かって地下約80m付近を流下していると考えられる. 断層2は亀裂に富み、かつ、断層2付近は水色のゾーンの幅が大きくなっていることから、地下水を周囲から誘導するタイプの断層と考えられる. 断層 3付近は、水色のゾーンの幅が断層4に向かって小さくなり、断層4付近は水色のゾーンが消失している. 断層3・ 4は、断層1同様地下水を堰き止めるタイプの断層と考えられる.

4. おわりに

本研究では、ドローンによる空中電磁探査から、熊野地区において深層崩壊のメカニズムを調査し、災害時には 断層破砕帯が大きな影響を与えたことが示唆された.今後は、今回の成果を踏まえて、深層崩壊のリスク評価手法 を確立する予定である.

LPデータに基づく深層崩壊による 生産土砂の滞留期間および再移動に関する検討

EXAMINATION OF TIME-SERIES CHANGES IN THE AMOUNT OF SEDIMENT

MOVEMENT DUE TO DEEP-SEATED LANDSLIDE BASED ON LIDAR

田中健貴1・小竹利明2・山田拓2・柴田俊2・木下篤彦3・

臼杵伸浩4・岡野和行4・江口友章4

Yasutaka TANAKA, Toshiaki KOTAKE, Taku YAMADA, Suguru SHIBATA, Atsuhiko KINOSHITA, Nobuhiro USUKI, Kazuyuki OKANO and Tomoaki EGUCHI

1正会員 農修 北海道大学広域複合災害研究センター(〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目)

2非会員 農修 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター

(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

3正会員 農博 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター

(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

4非会員 農修 アジア航測株式会社 (〒530-6029大阪市北区天満橋1-8-30 OAPタワー29F)

We analyzed the erosion and sedimentation in the basin where a deep-seated landslide induced landslide dam occurred using LiDAR obtained for multiple periods.

As a result, the erosion of the landslide dam was large for 4 years after typhoon Talas, and the amount of sedimentation on the downstream was correspondingly large. After that, the amount of the landslide dam erosion and the amount of sedimentation on the downstream decreased with the passage of time. However, the riverbed remains higher than before typhoon Talas throughout the survey area. Therefore, it is expected that erosion and sedimentation will continue to occur and the riverbed will rise and fall repeatedly.

Key Words : deep seated landslide, landslide dam, LiDAR, sediment delivery

1. はじめに

2011年台風12号によって紀伊山地では深層崩壊と呼ばれ る大規模な斜面崩壊が多発した¹⁾(図-1).豪雨による生 産土砂は一度の出水では流域外へ流出せず,その後の豪雨 で再移動する²⁾.再移動した土砂は下流域で河床上昇をも たらし,洪水氾濫やダムの異常堆砂といった被害を与える. このような流域の滞留土砂の再移動による被害を防止する ためには,砂防堰堤による土砂調節,河道内やダムにおけ る浚渫といった再移動する土砂量の制御が有効である.こ のような構造物の建設や浚渫といった対策を行うためには, 構造物の規模や浚渫範囲を検討し,今後再移動する移動土 砂量を推定する必要がある.Izuniyama et al. (2020)³は国内 で発生した大規模土砂生産イベントを対象にイベント発生 前の平衡状態に戻るまでの時間(影響期間)を推定する方 法を提案した.その中で,土砂生産量,滞留期間,流域へ の影響期間を整理し,影響期間は約19年であることを示した.また,Marutani et al. (2008)⁴は土砂生産の発生頻度を"Recurrence interval",土砂生産による河床上昇とその後の河床低下を"Relaxation process"と捉え,両者の繰り返しによって河床上昇,低下が生じることを指摘した.しかし,大規模土砂生産直後における降雨イベントでの土砂移動量,また降雨量と土砂移動量の関係の変化はこれまでの計測間隔の大きい空中写真を用いた研究^{3,4}では明らかになっていない.大規模土砂生産直後において,特に土砂移動が顕著な期間を明らかにすることで,発生直後の警戒すべき期間や対策の効率化が期待できる.

そこで、本研究では詳細な地形解析が可能であるLPデー タが2011年の災害発生後から高頻度に複数回取得されてい る深層崩壊が生じた流域で、災害発生から2020年までの土 砂変動量の時系列変化をLPデータから求めた.その上で、 土砂変動量と降雨規模との関係を調査した.



図-2 2011年台風12号後の降雨イベントとLP取得状況

2. 方法

(1)調査地

調査は平成23年台風12号で深層崩壊が発生した栗平川流 域(奈良県十津川村)で実施した(図-1).栗平で発生し た深層崩壊は幅600m、高さ450m、長さ650mであり,崩壊 土砂量は約2,385万m³であった.深層崩壊による崩壊土砂は 河道閉塞を形成した.栗平地区では、2011年以降に複数の 降雨によって河道閉塞の越流侵食が生じ,下流へ土砂流出 が生じている.なお,栗平地区では砂防堰堤が2016年12月 に建設された.

(2) 降雨データの整理

栗平地区で観測されている2012年4月以降の雨量データ

を収集し,降雨イベント毎の総雨量を整理した.24時間降 雨がない場合に当該イベントでの降雨が停止したと考え, 総雨量を計算した.

(3) 地形計測

河道閉塞の越流侵食が生じた降雨イベント時に合計10回 のLP測量が実施された(図-2).LPデータをDEM(Digital Elevation Model)に変換し,新しい計測時期のDEMから古 い計測時期のDEMを差し引き,鉛直方向の地形変化を求め た.ここで,正の差分値は堆積を,負の差分値は侵食を示 す.なお,調査地を崩壊部,河道閉塞部にあたる渓岸部お よび河床部,1号砂防堰堤上流,1号砂防堰堤下流①,1号 砂防堰堤下流②,滝川合流点下流の5区間に分けた.さら に河床高の変化量を合算し,土砂変動量とした.なお, 1.0mグリッドのDEMを用いた.



図-3 2011年台風12号後の降雨データ

3. 結果

(1) 降雨データの整理

栗平地区の降雨データの整理結果を図-3, 表-1に示す. 総雨量は、2019年台風10号が900.5mmと最も雨量が多く、 次いで2015年台風11号が782.5mm、2014年台風11号が 691.5mmであった.2015年台風11号は時間雨量,総雨量と も他イベントと比較し、降雨量が多かった(表-1).

(2)砂防堰堤建設前までの土砂移動状況

調査地における2012年から2015年までの河床高の変化を 図-4に示す.2012年,2013年に取得されたデータの差分結 果から,渓岸部と河床部の変動量は723,500m³の侵食を示し た.これは、今回対象とした期間の中で最大の侵食量で あった.また、河道閉塞部よりも下流では全域で堆積を示 した.次に、2013年から2015年の期間においても渓岸部と 河床部は521,400m³侵食されているが、前期間よりも侵食量 は小さい.また、河道閉塞よりも下流部では、1号堰堤下 流①および滝川合流点下流では堆積を示しているが、1号 堰堤下流②では侵食を示している.

(3) 砂防堰堤建設後の土砂移動状況

調査地における2015年から2020年8月までの河床高の変 化を図-5に、2020年8月から9月の河床高の変化を図-6に示 す.いずれの期間においても渓岸部と河床部の侵食が生じ ていた.一方で、2018年10月から2019年8月の期間以外は、 渓岸部と河床部の侵食量は徐々に減少していた.また、 2015年から2017年の期間では、1号砂防堰堤が建設された ことで、1号砂防堰堤上流では土砂が堆積、1号砂防堰堤 下流①では侵食と明瞭に土砂移動状況が変

	表-1 総雨量が	多い降雨イベント
順序	総雨量 (mm)	イベント名
1	900.5	2019年 台風 10号 (8月)
2	782.5	2015年台風11号(7月)
3	691.5	2014年台風11号(8月)
4	571.5	2017年台風21号(10月)
5	546.5	2020年7月豪雨(7月)
6	535.5	2018年台風20号(8月)
7	492.0	2013年台風18号 (9月)
8	342.0	2012年6月豪雨(6月)
9	323.5	2017年 台風5号 (8月)
10	308.0	2015年6月豪雨(6月)

化した. 2019年8月までの期間において1号堰堤上流は一貫 して堆積傾向を示すが、1号堰堤下流①よりも下流区間に おいては、堆積と侵食を繰り返した.

(4) 土砂変動量の時系列変化と河床高の変化

区間ごとの土砂変動量の変化の時系列変化を図-7に示す. 渓岸部,河床部,1号堰堤上流における堆積および侵食が 他区間と比較して,大きい傾向があった.1号堰堤上流で は2019年までは堆積量が増加しているが増加量は期間ごと に変化した.また,渓岸部と河床部においては,対象期間 において侵食傾向を示した.

河床高の変化を図-8に示す.河道閉塞部の侵食によって, 河道閉塞部の河床高が小さくなるとともに,河道閉塞の下 流側勾配は経年的に小さくなっている.また,1号砂防堰 堤上流では,砂防堰堤が完成する前の時期(2013年および 2015年)においても河床高が高くなっている.







図-5 2016年に1号堰堤が建設された後から2020年8月までの土砂移動状況



図-6 2020年8月から9月までの土砂移動状況





図-8 降雨量と河床高の変化の関係(上図:全体図 下図:□部分の拡大)

(5) 降雨と土砂移動の関係

図-9に総雨量と土砂変動量の変化の関係を示す.土砂変 動量の変化は2012年で大きく,おおむね時間経過とともに 土砂変動量は減少した.総雨量が最大値を示したのは2019 年台風10号における降雨であったが,土砂変動量が最大値 を示したのは2012年から2013年においてであった.2018年 から2019年の期間に降雨と土砂変動量の変化の増加が同時 に見られたが、この期間においては河道閉塞部(渓岸部と 河床部)が大きく侵食されていた.



図-9 降雨量と土砂変動量の関係(矢印は時系列を示す)

4. 考察

(1) 土砂変動量の時系列変化

渓岸部と河床部における侵食量が大きいイベントでは、 1号堰堤上流から滝川合流点下流における侵食量,堆積量 の大きさは土砂生産後2015年まで大きかった.その後, 2016年は比較的降水量が少なかったことや1号砂防堰堤の 完成によって、時間経過とともに渓岸部と河床部における 侵食量,1号堰堤上流から滝川合流点下流における侵食量, 堆積量の大きさは減少傾向であった. このことは、土砂生 産後少なくとも2015年までは河道閉塞の侵食による土砂の 再移動によって、河道閉塞よりも下流域の侵食、堆積が影 響を受けていた可能性を示す.また,河床高の変化に注目 すると,河道閉塞部である渓岸部と河床部では侵食量は土 砂生産による河道閉塞形成直後で大きく、経年的に減少し た.一方で、1号堰堤上流から滝川合流点下流における河 床高は土砂生産直後と比較しても依然として高い. つまり, 土砂生産直後は河道閉塞として流域に滞留していた土砂が, 侵食を受けて、徐々に流下し、再度1号堰堤上流から滝川 合流点下流にかけての区間で堆積していることを示す. こ れは、1号砂防堰堤完成後については、砂防堰堤による効 果であると考えられ、下流への土砂流出を緩やかにするだ けでなく、河道閉塞脚部の河床を安定させる効果があった と考えられる. また, 河道閉塞部(渓岸部と河床部)のみ を考えれば、河床高が低下しており、"Relaxation process"に あると考えられる.しかし、1号堰堤上流から滝川合流点 下流までは土砂生産後2012年と比較しても2020年9月時点 で河床が高く、また2014年と比較すると河床が上昇してい る. 河道閉塞部に土砂が残存していることを合わせて考え ると、今後もしばらくの期間は、河床の上昇、低下を繰り 返すと考えられる.

(2) 降雨と土砂変動量の変化の関係

土砂変動量の変化は2012年から2013年にかけて最も多く,

その後時間経過とともに減少した.2018年から2019年にか けて増加したが、さらにその後には時間経過とともに減少 した.また、必ずしも降雨量の増加と連動している様子は 見られなかった.このことは、近年においては河道閉塞よ りも下流の勾配が小さくなっていること、また侵食されや すい土砂量が減少していることが要因として考えられる. っまり、降雨量だけでなく、河道閉塞の侵食による生産土 砂量が、下流での土砂堆積、侵食に影響を与えていること を示唆する.

5. まとめ

本研究で得られた結果は次のとおりである.

・2011年台風12号による土砂生産では、不安定土砂は普段 から流水によって侵食される河道内堆積土砂ではなく、河 道閉塞として滞留した

・河道閉塞形成直後は降雨によって大きく越流侵食される
 が、侵食量は時間経過とともに徐々に減少する

・土砂生産直後が対象流域では、堆積、侵食ともに顕著で あった.その後、堆積量、侵食量ともに減少するが、河道 閉塞の侵食量が大きい場合には、河道閉塞の下流側におい て堆積量が増加した

・長期的には対象流域では河床は低下することが予想され るが、河道閉塞として大量の土砂が残存しており、河床高 は上昇低下を繰り返すと考えられる

・時間経過とともに河道閉塞の新たな侵食量は小さくなり、 降雨に対する土砂変動量は減少した.これは、対象流域に おける土砂生産後の土砂変動量の増加に河道閉塞の侵食に よる土砂量が影響していたことを示唆する

参考文献

- 1) 松村和樹・藤田正治・山田孝・権田豊・沼本晋也・堤大三・中谷加奈・今泉文寿・島田徹・海堀正博・鈴木浩二・徳永博・柏原佳明・長野英次・横山修・鈴木拓郎・武澤永純・大野亮一・長山孝彦・池島剛・土屋智:2011年台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害,砂防学会誌,Vol.64,No.5, p.43-53, 2012
- 新谷融,黒木幹男:流域動態の認識とその方法,北海道大学図 書刊行会,p.209,2001.
- Izumiyama, H., Uchida, T., Horie, K., Sakurai, W.: Characteristics of sediment dynamics following large-scale sediment supply events in mountain watersheds in Japan, Geomorphology, Vol.367, 15, pp. 1-15, 2020
- 4) Marutani T., Kikuchi S., Yanai S. and Kochi K., Light and dark of Sabodammed streams in steep land settings in Japan. River Futures ed. by Brierley G. and Fryirs K., 220-236, Island Press, 2008

紀伊山系における深層崩壊メカニズムとリスク評価手法の提案

木下篤彦・山越隆雄・中谷洋明・鈴木大和

1. はじめに

2011年8月25日に発生した台風第12号では、紀 伊半島において、72箇所で深層崩壊が発生した¹⁾。 これらの深層崩壊のメカニズムについては、災害 直後から地形・地質・水文等様々な角度から研究 が行われている^{例えば、2)・3)}。特に、既往研究³⁾から、 断層破砕帯が地下水を遮水し、間隙水圧が上昇し た可能性が指摘されている。

本稿では、断層破砕帯の分布と地下水の挙動と の関係に着目し、深層崩壊発生箇所においてこれ らを調査・観測事例を紹介するとともに、断層破 砕帯に着目した深層崩壊リスク評価手法について も提案する。

2. 紀伊半島大水害の概要と調査地について

2011年台風第12号では、総降水量は、紀伊半 島を中心に広い範囲で1,000ミリを超え、一部の 地域では解析雨量で2,000 ミリを超えた¹⁾。特に、 深層崩壊に伴う河道閉塞が17箇所で発生した(図-1)¹⁾。これらのうち、直轄砂防事業の対象となっ たのは図-1の赤文字で示した8箇所であり、坪内 地区は3箇所のうち1箇所のみが対象となった。 また、写真-1に災害2日後の赤谷地区の様子を示 す。深層崩壊により河道閉塞(天然ダム)が発生し、 その上流に湛水池ができている。湛水池の水位が 上がると、越流決壊するおそれがあった。表-1に 調査対象とした深層崩壊の規模の概要を示す。

なお、調査対象エリアの地質は、図-1のように 付加体に分類される白亜系日高川層群や古第三系 音無川層群・牟婁層群が分布している。

3. 断層破砕帯に着目した崩壊メカニズム

断層破砕帯と地下水の動きとの関係を調査する 目的で、栗平地区・熊野地区の2箇所で、物理探 査やボーリング調査、ボーリング孔を用いた地下 水位の時間変化について調査を行った。



図-1 2011年台風第12号による河道閉塞(天然ダム)発生箇 所(17箇所)一覧(20万分の1シームレス地質図に追記)



写真-1 災害2日後の2011年9月6日の赤谷地区(奈良県 五條市)の様子

表-1	直轄事業で	「対象とした	二深層崩壞	その規模の概要
地区名	長さ(m)	高さ(m)	幅(m)	崩壞土砂量(m ³)
赤谷	850	600	460	約1,138万
長殿	650	400	340	約595万
栗平	650	450	600	約2,385万
北股	350	190	200	約117万
熊野	480	250	440	約526万
清水	350	250	220	約160万
坪内	290	180	230	約140万
三越	330	180	200	約50万

The Mechanism of Deep-Seated Landslides in Kii Mountains

and the Proposal of a Risk Evaluation Method



写真-2 栗平地区の崩壊斜面と断層(断層破砕帯)の分布



図-2 栗平地区における空中電磁探査による周波数 140kHz(地下約0~10m)での見かけ比抵抗の平面分布

3.1 栗平地区での調査事例

栗平地区では、ヘリコプター空中電磁探査に よって広域的な比抵抗分布を調査するとともに、 電気探査によって豪雨時の断層破砕帯周辺の地下 水の挙動を調査した。

写真-2に栗平地区の崩壊斜面と現地踏査や電気 探査を基にした断層(断層破砕帯)の分布図を示す。 Araiら³⁾による赤谷地区での調査結果と同様、崩 壊地周辺に断層破砕帯が存在することが分かった。

図-2に、ヘリコプター空中電磁探査を用いた地 下約0-10mでの見かけの比抵抗分布を示す。崩壊 斜面中腹から下部にかけて低比抵抗域となってお り、湧水の存在が示唆された。

図-3に、乾燥期(2019年12月3~5日)のA-A'測線 (写真-2・図-2)での電気探査の結果を示す。点線 は断層破砕帯を表す。矢印で示した2箇所で高比 抵抗の領域が計測されており、断層に伴う亀裂が 生じているエリアと考えられる。



図-4 写具-1・図-2の測線A-A での出水期(2019年8月 20~23日)と乾燥期2019年12月3~5日)の比抵抗値の差 の分布。

図・4に2019年台風第10号(総雨量901mm)4日後 のA・A'側線の電気探査と図・3の乾燥期との比抵抗 値の差を表す。青で示したエリアが降雨によって 比抵抗が大きく低下した領域であり、地下水が流 入したと考えられる。図・3に矢印で示した2箇所 と同じ位置を図・4でも矢印で示した。これらの箇 所は、比抵抗値が大きく低下しており、地下水の 通り道となったと考えられる。

以上から、断層破砕帯に伴う地下の亀裂は、降 雨時には地下水の通り道となり、2011年の深層 崩壊時はこれらの亀裂を通って周辺から崩壊斜面 に地下水が流入したと考えられる。

3.2 熊野地区での調査事例

熊野地区では、ヘリコプターによる空中電磁探 査により広域的な比抵抗分布を調査するとともに、 ドローン空中電磁探査により、豪雨時の断層破砕 帯周辺の地下水の挙動を調査した。

写真・3に災害1日後の熊野地区の様子と断層破 砕帯の分布を示す。現地踏査や電気探査の結果か ら、5本の断層破砕帯の存在が確認された。

図-5にヘリコプター空中電磁探査の結果(地下 約0-10m)を示す。総雨量98.5mmの降雨の2日後 であり、斜面中腹から下部にかけて低比抵抗領域 が広がっており、湧水の存在、もしくは地下水が 多いことが確認された。

図・6にB・B'測線(写真・3・図・5)でのヘリコプ ター空中電磁探査による比抵抗縦断分布を示す。

13



写真-3 災害1日後の熊野地区の様子と断層(断層破砕帯)の分布(2011年9月5日撮影)



図-5 熊野地区の空中電磁探査の結果(地下約0~10m、 2012年11月28日実施)と断層(断層破砕帯)の分布



図-6 写真-4・図-5中B-B'断面でのヘリコプター空中電磁 探査による縦断比抵抗分布図(地下約0~10m、2012年11月 28日実施)

点線を挟んで比抵抗が大きく異なることが分かる。 写真-3・図-5からも点線付近は断層破砕帯集中エ リアであり、図-6のような比抵抗分布が確認され た場合は断層破砕帯が存在することが示唆される ことが分かった。

図-7にB-B'測線(写真-3・図-5)でのドローン空 中電磁探査による、(a)乾燥期(2020年12月2日)、 (b)2020年台風第14号による降雨(総雨量217mm) 終了3日後の比抵抗を(a)の比抵抗で除した値の縦 断分布図を示す。なお、断層と断層破砕帯は同義 である。水色のゾーンは降雨時に比抵抗値が低下 したことを表し、地下水の浸入が推定される。 (a)から、断層1よりB側と断層2よりB'側に高比



抵抗ゾーンが分布する。これらは断層により破砕 されて空隙が多いゾーンと考えられる。(b)から、 断層1よりB側の水色のゾーンは(a)の結果から破 砕ゾーン内に地下水が浸入していると推定され、 その地下水は断層1付近で止まっている。このこ とから、断層1は地下水を堰き止めるタイプの断 層破砕帯と推定される。断層1と2の間は、水色 のゾーンがB'側に向かって標高が高くなってお り、 地下水は百間谷に向かって流下していると 考えられる。断層1と3の間は、地下水が尾根付 近からB'側に向かって地下約80m付近を流下し ていると考えられ。断層2はボーリング調査の結 果から亀裂に富むことが分かっており、さらに、 断層2付近は水色のゾーンの幅が大きくなってい ることから、地下水を周囲から誘導するタイプの 断層と考えられる。断層3付近は、水色のゾーン の幅が断層4に向かって小さくなり、断層4付近 は水色のゾーンが消失している。断層3・4は、 断層1同様地下水を堰き止めるタイプの断層と考 えられる。

4. 断層に着目した深層崩壊リスクマップ

3章から、断層破砕帯が地下水を誘導、もしく



は、堰き止めることが深層崩壊の一因になったこ とが示唆された。この成果を基に、紀伊山系にお いて、レーザプロファイラによる地形判読図と空 中電磁探査による比抵抗分布を用いて、断層破砕 帯の有無に着目した深層崩壊リスク評価マップを 作成した。

リスクレベルは3段階とした。レベル1は、ひ ずみ率(滑落崖の長さを斜面長で除した値)が5% 以上であることとした²⁾。レベル2は、それに加 えて、空中電磁探査の比抵抗分布の縦断図からす べり面の存在が確認された斜面とした。レベル3 は、レベル1・2の条件に加え、図・6のような、斜 面縦断方向の比抵抗の違いが見られる斜面とした。 リスクレベル3の一例を図・9に示す。このレベル では、斜面の変形が見られること、緩み域が確認 できること、縦断方向の比抵抗分布の違いが確認 できる。

リスク評価結果の一例を図-10に示す。このように、レーザプロファイラの取得とヘリコプター 空中電磁探査の実施により、大まかに深層崩壊危 険箇所を把握できると考えられる。



図-10 レーザプロファイラとヘリコプター空中電磁探査 による比抵抗分布を基にした深層崩壊リスク評価マップ図

5. まとめ

本稿では、主に物理探査を用いて、断層破砕帯 やそれに連動した地下水の動きに着目して、深層 崩壊メカニズム評価やリスク評価手法の提案を 行った。実際には、これ以外にも複数の要因が合 わさって深層崩壊が発生していると考えられるた め、今後とも現地での観測や物理探査、ボーリン グ調査等を通して検討していきたいと考えている。

参考文献

- 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法 人土木研究所:平成23年(2011年)紀伊半島台風12 号土砂災害調査報告、213p、2013
- Chigira, M., Tsou, C., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and Matsuzawa, M. : Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, Geomorphology, 201, pp. 479 – 493, 2013
- Arai, N. and Chigira, M. : Rain-induced deepseated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan, Island Arc.2018; 27: e12245, 2018

木下篤彦	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室(近畿地方整備局大規模土 砂災害対策技術センター)主任研究室 農博
	Dr. Atsuhiko KINOSHITA
山越隆雄	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室室長,農博
	Dr. Takao YAMAKOSHI
中谷洋明	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室室長,農博
	Dr. Hiroaki NAKAYA
鈴木大和	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室研究官
	Mr. Yamato SUZUKI

放射性炭素年代測定を用いた紀伊山系の深層崩壊発生頻度推定

1. はじめに

2011年台風第12号では、紀伊山系周辺の 72箇所で深層崩壊が発生している。また、紀 伊山系周辺においては、過去にも1889年の 明治十津川大水害、1953年の有田川水害な どで、多数の深層崩壊が発生している¹⁾。こ のようなことから、紀伊山系では、深層崩壊 が今後も発生する可能性が高い。

深層崩壊対策を含む砂防計画を立てるため には、地形図から崩壊危険斜面を判読し、そ の面積を求めるとともに、物理探査等により 崩壊見込み深さを推定する必要がある。また、 妥当投資額の目安を得るため、対象流域にお いて深層崩壊発生頻度を推定する必要がある。

本稿では、特に、放射性炭素年代測定を用 いた深層崩壊発生頻度推定手法に着目し、紀 伊山系において深層崩壊の発生頻度を推定し たので、その結果を報告する。

2. 調査地の地形・地質概要

図・1に調査地の地質図を示す。紀伊山系は、標 高1,000m~1,900mの山々が連なる急峻な地形で、 尾根が東西方向に伸長している。地質は、主に白 亜系~古第三系の付加体(主に四万十帯)が広く分 布している¹⁾。

国土交通省が2010年に公表した深層崩壊推定 頻度マップにおいても、紀伊山系においては、頻 度が「特に高い」や「高い」のエリアが広範囲に 及んでいる。また、紀伊山系では、2012年に深 層崩壊渓流レベル評価マップと深層崩壊跡地密度 マップも公表されている。

深層崩壊の頻度推定には、年代の分かっている 火山灰の分布を確認する手法がある。しかし、紀 伊山系ではアカホヤ(約7,300年前)のみ分布して おり、それ以降崩壊履歴判定が困難であった。そ



 図・1 紀伊山系の地質と深層崩壊跡地判読範囲(赤線 で囲ったエリア)、炭化物試料採取箇所
 (国土地理院 20万分の1シームレス地質図に加筆)

こで、本稿では、深層崩壊時に巻き込んだと推定 される木片等の炭化物を用いて発生履歴を評価す ることとした。

3. 年代測定用試料の採取斜面について

3.1 深層崩壊跡地の判読および分類

深層崩壊跡地の判読には、図・1に示す範囲の LPデータから崩壊跡地の地形判読を行った。図 中の赤線が囲まれた流域が調査対象である。なお、 1889年明治十津川大水害と1953年有田川水害、 2011年紀伊半島大水害の崩壊地は、文献より崩 壊発生斜面がおよそ分かっており、1889年明治 十津川大水害より古い深層崩壊跡地を対象とする。

Attempt to Estimate the Frequency of Deep-seated Landslides in the Kii Mountains using a Radiocarbon Dating Method



滑落崖輪郭が明瞭





②滑落崖輪郭が不明瞭



図·2 微地形判読例(地形表現図:SL3DMap:特許番号5795283)

図・2に判読結果の例を示す。判読した深層崩壊 跡地は、滑落崖輪郭が明瞭なケースと不明瞭な ケースがあった。崩壊発生から時間が経過するに つれ侵食によって輪郭は不明瞭になると考えられ る。このため、輪郭の明瞭さを調査することによ り崩壊からの経過時間を推定できる可能性がある。 ①輪郭が明瞭、②輪郭が不明瞭、③中間(どちら とも判断し難い)の3つに分類して崩壊跡地を判 読した(図・2 ①~③)。

3.2深層崩壊跡地の選定

2011年紀伊半島大水害で発生した深層崩壊で 形成された河道閉塞箇所では、河道閉塞の上流側 に湛水池が形成されて植物や流木が残存している 場合や、河道閉塞の一部が侵食されて崩壊地の下 流側に崩土が流出して堆積段丘面が形成され、流 木が取り込まれている場合もあった。このような 深層崩壊の崩土の堆積状況を考慮し、年代測定用 の試料を採取する対象斜面は、深層崩壊跡地の上 流側や下流側および対岸のいずれかに、崩壊時の 崩土が残存している可能性のある堆積段丘面が形 成されていることに着目した(図-2④)。これらの 堆積層の中から炭化物を採取した。

1889年明治十津川大水害より古い深層崩壊跡 地について、判読した結果、面積1ha以上の深層 崩壊跡地は合計1,204斜面であった。内訳は,以 下の通りである。

①輪郭明瞭 ·	•	•	•	•	•	•	•	458斜面
②輪郭不明瞭	•	•	•	•	•	•	•	648斜面
③中間・・・	•	•	•	•	•	•	•	98斜面

図-1に示すように、対象地では複数の地質が分 布しているので、特定の地質帯に偏らないこと、 堆積段丘面が形成されていること、試料採取にア クセスの良いことなどを考慮して、試料採取する 深層崩壊跡地を選定した。

炭化物が細粒で採取できない場合や有機物が含 まれていそうな土砂状の堆積物があった場合は、 パイプ型サンプラー(写真-1・2)を利用して土砂 部の試料を採取した。実際に試料採取に行くと、 アクセスの点から、現地で試料を得ることができ なかった斜面もあり、最終的には19斜面の崩壊



写真-1 使用したサンプラー



写真-2 サンプラーを使用した炭化物採取状況 跡地(図-1)で 42試料を採取できた(写真-3)。 なお、図-1から、19斜面で代表的な地質での採取 はできていると考えられる。

4. 放射性炭素年代を用いた測定について

放射性炭素年代の測定は、微量な試料でも分析 可能なAccelerator Mass Spectrometry (AMS法) を採用し、¹⁴Cの計数、¹³C濃度(¹³C/¹²C)、¹⁴C 濃度(¹⁴C/¹²C)の測定を行った。¹⁴C年代は、過 去の大気中の¹⁴C濃度が一定と仮定して測定され、 1950年を基準年(0yrBP)として遡る年代であ る。¹⁴C年代測定値は、既知の¹⁴C濃度を基に描か れた較正曲線と照らし合わせて暦年較正年代を算 出した(図-3)¹⁾。暦年較正年代は、1標準偏差 ($1 \sigma = 68.2 \%$)あるいは2標準偏差($2 \sigma =$ 95.4%)で表示される。対象地では、古文書等が 少なく、深層崩壊跡地ごとの発生年が不明なため、 可能な限り幅広く年代値を採用することとし、2 σ (標準偏差)範囲で表示された全期間の範囲を 「採用年代範囲」と定義した(図-3)。

5. 放射性炭素年代測定結果

2σ 暦年較正年代の最小値と最大値で表示され



写真-3 採取された炭化物の例(赤丸で囲ったものが採



図-3 暦年較正グラフの例

る範囲で採用した放射性炭素年代の測定結果を表 ・1に示す。得られた年代について、同じ堆積層で 複数の試料の年代値が重複する期間がある場合は、 同時期に崩土に取り込まれた可能性が高いと推定 され、その重複期間に深層崩壊が発生したと判断 される(表-1)。一方で、同じ堆積層内の複数の資 料で推定年代が大きく異なる場合は崩壊時にどの ように炭化物が取り込まれたか判断できない。例 えば、崩壊と無関係に上流から木片が流下して堆 積した可能性もある。このため、1つの深層崩壊 跡地で、複数の試料の2σ暦年較正年代の採用年 代範囲が重複している場合を「重複年代範囲」と 定義し、重複年代範囲があるケースのみを深層崩 壊発生年代とした。これらの結果、崩壊発生年代 は、1300年代、1500年代、1700年代に集中して おり、200年周期の崩壊発生頻度が想定される。

このように、精度の良い頻度推定には、同じ堆 積層で複数の試料を採取し、重複年代を基に年代 推定をすることが重要である。

	AD BC	
	2485	
NUMP Image: bold index of the		
水-2 白亜系 中間 14.5 AD 612 669 1 1 吉野川 Y-3 ジュラ系 明瞭 12.1 AD 154<-AD24	a 2342	
吉野川 Y-3 ジュラ系 明瞭 12.1 BC 154 - AD24 1 1 AD 1445 - 1623		
Bayni 13 $2 \perp 3 \times 3$ 3×3 12.1 AD 1445 -1623 -1442 -1623 -162		
T-1 $end m m$ Pm 2.1 AD 1677 1776 Pm M M $T-1$ $end m$ Hm 2.1 AD 1657 <		
Result $1 - 3$ $1 - 3 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 +$		
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		7837
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		8207
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	╏┼┼┨┝───╂	
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		
熊野川 下流 S-4 古第三系 明瞭 15.9 AD 1287 1394 Image: Constraint of the state of the stat		
下流 64 日本 99歳 13.5 10.5 10.5 10.5 10.5 有田川 A-2 白亜系 明瞭 2.8 AD 1270 ~ 1385 AD AD 1289 ~ 1409 AD AD 1289 ~ 1409 AD AD 1409 AD AD 1409 AD AD 1409 AD AD AD 1409 AD AD AD 1416 ~ 1423 AD AD AD 1416 ~ 1423 AD AD AD 1416 ~ 1623 AD AD AD 1416 ~ 1623 AD AD AD 1416 ~ 1623 AD AD AD 1451 ~ 1632 AD AD AD 1451 ~ 1632 AD AD AD 160 ~ 1763 AD	<u>↓ </u>	
A-2 白亜系 明瞭 2.8 AD 12/9 - 1409 -	▙┼┼┨┝───┼	
HK-1 古第三系 可勝 2.5 AD 1446 1403 日高川 HD-4 古第三系 明瞭 2.5 AD 1446 -		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		20625
日面川 10-1 日第二派 91歳 2.3 70 146 1423 1223 10 147 1423 1223 10 147 1423 1423 1423 1423 1423 1423 1423 1423		23023
HK-1 古第三系 明瞭 12.4 AD 1416 1449 Image: Constraint of the state of the s	╅┽┽┫┝───╅	
HK-1 古第三系 明瞭 12.4 AD 1410 1449 Image: Constraint of the state of the s	╆┼┼┨┝──┼	
日置川 HK-2 古第三系 不明瞭 10.9 BC 23612 23176 Image: Constraint of the state of the sta	╊╶┼╌╀┨┝────╄	
HK-2 古第三系 不明瞭 10.9 BC 23612 ~ 23176 · · · · · HK-3 古第三系 明瞭 3.1 AD 1280 - 1389 · · · · ·	╏┼┼┨╎───┼	
Inf 日本 1790 IU.9 EU 23012 23170 1 HK-3 古第三系 明瞭 3.1 AD 1282 - 1391 AD	┟┼┼┨┝───┼	02610 -
HK-3 古第三系 明瞭 3.1 AD 1282 - 1391 AD 1288 - 1389	<u>╆</u> ╶┼┼┨┝───┼	23012
AD 1280 - 1389	<u>┨</u> ┥┥┨┝╼╼┥┥	
	╃┼┼┨┝───┼	
	╆┼┼┨┝───┼	
在丟洋川 IN-3 白弗二糸 明瞭 1.0 AD 1454 - 1632	╆┼┼┨┝───┼	
AD 1689 — 1729		
19斜面 :年代が一部:太字は重複する年代範囲の	の最大・最小	

表·1 放射性炭素年代測定結果

6. まとめ

本稿では、放射性炭素年代を用いて、紀伊山系 における深層崩壊発生頻度の推定を行った。その 結果、紀伊山系では約200年の周期で深層崩壊が 発生していることが分かった。今後は他の手法と も比較検討し、推定精度向上のための研究を続け ていく。また、今回得られた発生頻度の結果を用 いた砂防計画の検討も行いたい。

参考文献

 小川内良人、横山修、木下篤彦、山田拓、柴田俊、 田中健貴、山越隆雄、西山賢一:放射性炭素年代 から推定される紀伊山地の深層崩壊発生頻度、砂 防学会誌、第74巻、第1号、pp.3~14、2021

木下篤彦	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室(近畿地方整備局大規模土
	砂災害対策技術センター)主任研究官,農博 Dr. Atsuhiko KINOSHITA
山越隆雄	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室室長, 農博 Dr. Takao YAMAKOSHI

深層崩壊後の土砂流出に伴う下流合流点での土砂堆積に関する 現地観測と水理模型実験

木下篤彦・山越隆雄

1. はじめに

熊野川流域では、2011年台風第12号によ る豪雨で多数の深層崩壊が発生し、河道閉塞 (天然ダム)が発生した。天然ダム発生箇所で は災害後も台風等の豪雨により、天然ダムや 斜面の侵食、河床堆積土砂の侵食により、下 流河道に土砂を流出させている。このような 深層崩壊や天然ダムが発生した流域にある河 道が下流で合流した場合、その合流点では土 砂が多量に堆積し、河床が数m以上上昇する とともに、澪筋が大きく偏流することが報告 されている¹⁾。この状況が長く続くと、豪雨 時には氾濫のおそれも出てくる。

本稿では、深層崩壊発生後にその下流河川 との合流点で過剰な土砂が堆積した赤谷川流 域とその下流の川原樋川との合流点を調査対 象とし、土砂堆積のメカニズムを調査する。 合流点での河床上昇に着目し、定期的な地形 測量による河床変動調査を行った。また、合 流点を模した水理模型実験により、合流点で の土砂堆積のメカニズムを調査した。

2. 合流点周辺での河床変動調査

写真-1に災害2日後の赤谷地区の崩壊斜面を含 む川原樋川と赤谷川の合流点の様子を示す。災害 2日後には、流出した土砂が赤谷川と川原樋川の 合流点付近(点線で囲まれたエリア)に堆積すると ともに、川原樋川の合流点上下流でも土砂が堆積 していることが分かる。

図-1に赤谷地区の深層崩壊斜面や赤谷川・川原 樋川合流点を含む周辺の2時期の地形差分図を示 す。(a)は災害1年後の2012年6月と災害前の2009 年8月の差分を、(b)は災害6年後の2017年11月と 災害1年後の2012年6月の差分を示す。なお、川 原樋川は図-1の範囲では、赤谷川の他、池津川も



写真-1 災害2日後の2011年9月6日の赤谷地区(奈良県 五條市)と赤谷川・川原樋川合流点の様子

合流している。ただし、池津川の上流域は2011 年台風第12号では大きな崩壊が発生していない。 一方で、川原樋川上流には図・1の範囲外ではある が北股地区等複数の大規模崩壊地が存在している。 (a)から、深層崩壊によって、赤谷川・川原樋川 合流点に扇形に土砂が堆積していることが分かる。 また、合流点上流は約6kmに渡って土砂が堆積し ていることが分かる。(b)から、赤谷地区崩壊斜 面及び赤谷川の天然ダム位置から下流で侵食が発 生しており、赤谷川・川原樋川合流点付近でも同 様に侵食が発生していることが分かる。また、砂 防堰堤上流では土砂が堆積している。一方で、赤 谷川・川原樋川の上下流は2012年以降も土砂が 堆積している状況にある。

図・2に災害前後の赤谷川・池津川との合流点を 含む川原樋川の縦断図を示す。2009年・2012 年・2017年はヘリコプターによる測量結果であ る。2020年はUAVによる測量結果である。災害1 年後の2012年6月には、赤谷川合流点直上流付近 で約5mの土砂堆積が見られるのと、その上流域 の池津川合流点までの間で最大約4.2mの土砂堆 積が約3kmに渡って見られる。赤谷川との合流点 付近で土砂が堆積することによって、その上流で

Field Observations and Flume Experiments on Sediment Depositions at Downstream Confluences Associated with Sediment Runoff after Deep-seated Landslides



図-1 赤谷地区の深層崩壊地を含む赤谷川と川原樋川の2時期の差分図



図-2 災害前後の赤谷川・池津川との合流点を含む 川原樋川の縦断河床形状

土砂堆積が発生したと考えられる。災害から約9 年経った2020年12月でも、赤谷川との合流点と 池津川との合流点との間は災害前に比べて最大 3m程度の土砂がほぼ一様に堆積している。

写真-2に災害6年後の2017年9月30日撮影の赤 谷川・川原樋川合流点の様子を示す。合流点付近 では支川からの土砂が扇形に堆積し、その影響で 川原樋川の流水が左岸側に偏流している。

3. 赤谷川・川原樋川合流点の水理模型実験

3.1 実験条件

赤谷川・川原樋川の合流点を模した水理模型実 験を行った。図-3に実験装置の概要を示す。模型 の縮尺は現地の1/100とした。実験に用いた水路 は、本川の幅0.7m、勾配1/100とし、下流端から 2.5mの位置に幅0.4m、勾配1/25の支川を90°で 合流させた。本川水路は全長17mであるが、下流 端から上流5.0m地点まで土砂を0.03m敷きつめ、 上流端付近から土砂を供給した。支川水路は長さ 3.0mで、合流点の上流2.5m地点まで河床に土砂 を0.03m敷き、上流端付近から土砂を供給した。 河床および供給土砂は、川原樋川と赤谷川の合流



写真・2 赤谷川・川原樋川合流点の様子(2017年9月30日撮影)

点付近の河床材料の粒径が最大値で8~16cmで あったことを参考に、縮尺に合わせて平均粒径 1.5mmの砂を使用した。流入ハイドログラフは、 2018年台風第20号時(総雨量471.5mm: 気象庁所 管風屋雨量観測所)の川原樋川と赤谷川の水位観 測結果を参考とした。本川に対する支川ハイドロ グラフのピーク流量の比は、赤谷川と川原樋川の 流域面積を参考に0.1とした。なお、赤谷川、川 原樋川の合流点上流の流域面積はそれぞれ、14.1、 136.6km²である。本支川のピーク流量時刻の差 は、2018年台風第20号時の水位観測結果を参考 に、現地スケールで3時間を想定し、Froudeの相 似則を考慮し、実験スケールで18分とした。こ れらの条件を満たすケースをCase 1とし、基本条 件とした。比較条件として、ハイドログラフの流 量比を0.2とするケース、支川のピーク流量時刻 差を9分および0分とするケースを設定し、基本 ケースを含めた合計6ケースの実験を行った(表・ 1・図-4(a)・(b))。なお、本川・支川上流からの 供給土砂は、平衡流砂量となるように供給した。



図-3 水理模型実験装置の(a)平面図、(b)本川区間の側面図

3.2 実験結果

図-5にCase 1(流量比0.1、流量ピークは支川が 本川より18分先行)の(a)支川ピーク時(36分後)、 (b)本川ピーク時(54分後)、(c)通水終了後(144分 後)の結果を示す。また、図-6にCase 4(流量比0.2、 流量ピークは支川が本川より18分先行)の(a)支川 ピーク時(36分後)、(b)本川ピーク時(54分後)、(c) 通水終了後(144分後)の結果を示す。Case 4は Case 1と比べると、支川ピーク流量が2倍となっ ている。Case 4(図-6(a)~(c))の支川ピーク時・本 川ピーク時・通水終了後のいずれにおいても、支 川出口付近での土砂堆積範囲が広くなっている。 また、本支川の流下領域の境界が図6(a)・(b)で はいずれも図-5(a)・(b)より本川左岸側に向かっ てせり出している。これらのことから、流量比が 大きいほど、すなわち支川からの流量が本川に比 べて多いほど、支川からの土砂は合流点の広い範 囲で堆積することが分かった。

次に、図-7に、Case 3(流量比0.1、流量ピーク は支川と本川が同時)における(a)支川ピーク時 (54分後)、(b)通水終了後(144分後)の河床変動高 を示す。Case 1(図-5)とは本川と支川の流量ピー クが同時、という点で異なっている。図-7(a)で は、図-5(b)と比較すると、トレーサの軌跡から 推定した本支川流下領域の境界が本川右岸側(支 川出口)に寄っており、支川出口付近にほとんど 土砂が堆積していない。図-7(b)についても、図-5(c)比較すると支川出口付近にほとんど土砂が堆 積していない。このことから、支川の流量ピーク が本川の流量ピークに先行すれば合流点に土砂が 堆積しやすく、ピークがほぼ同時であれば、土砂

表-1 実験における本川・支川のピーク流量条件とピー ク流量時刻の時間差様子

ケース	本川ピーク流量に対する 支川ピーク流量の比	ピーク流量時刻差
case1	0.1	支川が18分先行
case2	0.1	支川が9分先行
case3	0.1	本支川同時
case4	0.2	支川が18分先行
case5	0.2	支川が9分先行
case6	0.2	本支川同時

(a) 本川ハイドログラフ



が堆積しにくいことが分かった。

4. まとめ

本稿では、地形測量データと水理模型実験に よって深層崩壊後の下流河道合流点での土砂堆積 について調査し、支川流量比が大きいほど、また、 支川の流量ピークが先行する方が合流点で土砂が 堆積しやすいことが分かった。今後は現地での観 測データをさらに増やすとともに、土砂堆積に関 するシミュレーションモデルの構築も目指したい。

参考文献

 岡野和行、木下篤彦、山田拓、柴田俊、井之本信、 上杉温子、吉安征香、山越隆雄、里深好文:山地



図-5 Case 1(流量比0.1、流量ピークは支川が本川より18分先行)における(a)支川ピーク時(36分後)、(b)本川ピーク時 (54分後)、(c)通水終了後の河床変動高



図-6 Case 4(流量比0.2、流量ピークは支川が本川より18分先行)における(a)支川ピーク時(36分後)、(b)本川ピーク時 (54分後)、(c)通水終了後の河床変動高(144分後)



図-7 Case 3(流量比0.1、流量ピークは支川と本川が同時)における(a)本川ピーク時(54分後)、(b)通水終了後の河床変動高(144分後)

河川の合流点における河床変動に関する実験的研究、 砂防学会誌、第74巻、第2号、pp.31~38、2021

木下篤彦	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室(近畿地方整備局大規模土
	砂災害対策技術センター)主任研究官,農博 Dr. Atsuhiko KINOSHITA
山越隆雄	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室室長,農博 Dr. Takao YAMAKOSHI

2.1 相互連携に基づく研究 テーマ6

那智川流域の表層崩壊・土石流の発生メカニズムと 危険度評価マップの作成

1. はじめに

2011年台風第12号によって和歌山県東牟婁郡 那智勝浦町を流れる那智川流域では、表層崩壊に 起因する土石流が多発し、甚大な被害が生じた¹⁾ (図-1)。表層崩壊に起因する土石流への対策を実 施するためには、表層崩壊が発生するおそれを評 価し、崩壊のおそれがある斜面(以後、危険斜面) を抽出する必要がある。

災害発生時の崩壊分布から、地質境界による地 下水位上昇によって熊野酸性岩分布域で表層崩壊 が集中したこと、斜面の侵食状況で崩壊面積率や 崩壊発生メカニズムが異なると考えられてきた。 これらの指標が崩壊に与える影響は,近年の観測 や調査結果から,その影響が実証されてきている。 これらの指標を包括的に取り込んだ危険斜面抽出 手法を提案できれば、蓋然性が高い危険斜面抽出 が可能となり,地域住民への警戒避難の啓発にも 活用できる。以上から,これまでの知見を包括し た危険度評価マップを作成した²⁾ので報告する。

2. 地質・地形に着目した表層崩壊発生メカ ニズムと崩壊面積率

2.1 地質

那智川流域の地質は、低標高部に中新統熊野層



図-1 那智川流域における表層崩壊発生状

Study on the mechanism of shallow landslides and debris flow and development of a risk assessment map in the Nachi 田中健貴* 木下篤彦**



図-2 那智川流域における地質分布況



群、高標高部に熊野酸性火成岩類が分布する(図 -2)。熊野層群は泥岩優勢砂岩泥岩互層から成り、 花こう斑岩によって貫入されている。熊野酸性岩 類は、花こう斑岩から構成されている。

River basin



図-4 山地の地形解析区分(松澤ら3)に加筆)

また,これまでの検討で地質境界が受け盤の場合 には地下水位が上昇しやすいことが示されている (図-3)。そこで,本研究でも地質境界の走向傾斜 に着目した。現地踏査から地層境界の走向傾斜は N80W11~14Nであったため,地層と斜面の傾斜 が同一方向の場合は流れ盤,交差している場合は 受け盤,水平である場合を水平と区分した。

2.2 地形解析区分

山地の開析(侵食)程度によって土層構造が異な るため、表層崩壊発生特性が異なることが示され てきた³⁾。そこで,那智川流域においても山地の 開析程度を調査し、山頂緩斜面、開析斜面上部、 開析斜面下部の3つに分類した(図-4)。低標高部 の熊野層群分布域では尾根沿いに山頂緩斜面が面 的に分布し、開析斜面下部の分布が限定的である。 一方、高標高部の熊野酸性岩類が分布する範囲は、 全体的に開析が進行しており、開析斜面下部が広 く分布している。また、山頂緩斜面の分布は限定 的で、尾根沿いに帯状に分布する程度となってい る(図-5)。



図-5 那智川流域における山地の開析程度

2.3 崩壊面積率

地質および山地の開析程度が表層崩壊発生に与 えた影響を評価するため,崩壊面積率を次の手順 で算出した(表-1)。

①地質、山地の開析程度について各区分の分布面積を算出(表-1、 A)

②各区分での崩壊面積率を算出(表-1、 C/A)

花こう斑岩分布域では、山頂緩斜面で0.11%、 開析斜面上部で0.74%、開析斜面下部で0.38%で あったのに対し、泥岩分布域では、山頂緩斜面で 0.05%、開析斜面上部で0.21%、開析斜面下部で

分類			∆·公布 而 積	崩	懐地	崩壊地の分布特性		
			(km2)	B: 個 数 (個)	C: 面 積 (km ²)	B/A: 個 /km ²	C/A: 面積率 (%)	
1. 那智川全域			16.1	226	0.06	14	0.38	
		山頂緩斜面	1.33	11	0.00	8.2	0.11	
 2.山地の開析区 分と地質の組合せ 	熊野酸性岩類	開析斜面上 部	4.31	73	0.03	17	0.74	
		開 析 斜 面 下 部	4.47	68	0.02	15.2	0.38	
	熊野層群	山頂緩斜面	0.48	5	0.00	10.5	0.05	
		開 析 斜 面 上 部	2.52	22	0.01	8.7	0.21	
		開 析 斜 面 下 部	0.32	15	0.00	47.2	0.64	
3. 地質境界の影	熊野酸性岩類	-200m	1.46	60	0.03	41.2	1.85	
響 (受け盤のみ)	熊野層群	-50m	0.37	13	0	35.4	1.03	

表-1 各指標における崩壊地の個数、面積、崩壊面積率



図-6 地質境界からの距離と崩壊面積率(松澤ら4)に加筆)

0.64%であった。つまり、花こう斑岩分布域の開 析斜面上部で最も崩壊が多発していた。

地層境界部に着目した検討では、地質境界から の距離と崩壊面積率の関係を算出した(図・6)。熊 野酸性岩類では、受け盤分布域では地層境界から の距離が200mまでは崩壊面積率が2%以上と高 かった。一方、流れ盤地域では0.6%以下と面積 率が高くなる傾向はなかった。熊野層群では、受 け盤分布域では地層境界からの距離が50mまでは、 崩壊面積率が1.5%と高かったが、流れ盤地域で は面積率が高くなる傾向はなかった。

なお、水平地域について、熊野酸性岩類で200-400m、熊野層群で200-300mにおいて崩壊面積 率が高いが、水平地域は分布面積が狭いために、



図-7 流域ごとの危険度評価マップ(松澤ら4) に加筆) 崩壊面積率が増加する傾向があったと考えられ、 地層境界の影響で崩壊が多発した可能性は低いと 考えられる。以上から、受け盤構造では熊野酸性 岩分布域では地層境界から200m 以内で、熊野 層群分布域では地層境界から50m以内で崩壊面積 率が高いことが分かる。

3. 危険度評価とマップ作成

3.1 危険度評価マップの作成

2.で示した崩壊面積率を基に崩壊危険度を算出 した。その1例を表・2に示す。2.3 ①で算出した 分布面積に、②で算出した崩壊面積率を乗じた値 を合計点として算出した。ただし、地質走向の傾 斜を考慮して、熊野酸性岩類では地質境界から

	地形と地質の組み合わせの評価						地質境界の影響(受け盤のみ)						
	台口田之王令为中 十月末日		ī	* 男 和 書		熊野酸性岩類			熊野層群			D:総合 証価占	
	八只	町110日石形	ł		11、生17)目右半		地質境界から 200m		地質境界から 50m		印门面心心		
	山頂緩斜	開析斜面	開析斜	山頂緩	開析斜面	開析斜面	山頂緩斜	開析斜	開析斜面	山頂緩	開析斜面	開析斜面	
	面	上部	面下部	斜面	上部	下部	面	面上部	下部	斜面	上部	下部	
分布面積	0.035	0.107	0.002	0.000	0.033	0.014	0.015	0.044	0.000	0.000	0.008	0.009	
崩壊面積率	0.110	0.740	0.380	0.050	0.210	0.640	0.400	2.750	1.420	0.200	0.930	2.900	
合計点	0.000	0.080	0.000	0.000	0.010	0.010	0.010	0.120	0.000	0.000	0.010	0.030	0.980

表-2 崩壊危険度の金山谷川流域の1支川における算出事例(上段:分布面積、中段:崩壊面積率、下段:合計点)

※合計点=分布面積×崩壊面積率 総合評価点=合計点 / 流域面積 マップには総合評価点を正規化した値を使用



図−8 グラデーション表示した危険度評価マップ 謝 辞

200mの範囲について5.5倍, 熊野層群では地質境 界から50mの範囲を6.9倍した。さらに、合計点 を単元流域の面積で除した値を「総合評価点」と し(表-2、D)、これを正規化した値を基に危険 度評価マップを作成した(図-7)。

ただし、地質境界からの距離によって崩壊面積 率が異なったため、崩壊面積率に応じて崩壊危険 度を上げた。この危険度評価マップは、那智川流 域の左岸側の地質境界周辺で発生した崩壊や右岸 側で発生した比較的規模の大きな崩壊(図-7中 右矢印)が生じた流域も高い崩壊危険度として表 現できている。

また,地域住民への土砂災害啓発を踏まえて, 見やすさを向上させるため危険度をグラデーショ ン表示したマップを作成した(図-8)。必ずしも 流域界によって危険度が異なるわけではないため, グラデーション表示の方が実態を反映できている 可能性もある。また、図-8では那智川流域の左岸 側や右岸側の金山谷川で崩壊危険度が高い傾向が より鮮明に示すことが出来ている。

4. まとめ

現地特性(地質、地形)を反映して作成した今 回の危険度評価マップは、崩壊実績を良好に反映 し、かつ地域住民が分かりやすいことが期待でき る。今後、崩壊危険度の蓋然性や他評価法との比 較を検討するとともに、土砂災害の啓発活動や観 測機器設置個所の選定に活用したいと考えている。

京都大学松四雄騎准教授、筑波大学内田太郎准 教授には危険度評価マップ作成方針のアドバイス を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局:2011年紀伊半島大水 害 国土交通省近畿地方整備局災害対応の記録、 2013
- 2) 松澤真·伊藤達哉·南智好·小竹利明·山田拓· 柴田俊・木下篤彦・田中健貴:那智川流域の地 形・地質特性を反映した表層崩壊危険度マップの 作成、令和3年度砂防学会研究発表会概要集、 275-276, 2015
- 3) 松澤真・木下篤彦・高原晃宙・石塚忠範 (2015)花 崗岩地域における土層構造と表層崩壊形状に与え る山地の開析程度の影響、地形、Vol.36、No.1、 pp.23-48.

田中健貴*	北海道大学広域複合災害研究センター(元 近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター)
	田中健貴
	Yasutaka TANAKA
木下篤彦**	国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室(近畿地方整備局大規模土砂災害
	対策技術センター)主任研究官、農博、
	Dr. Atsuhiko KINOSHITA

UAVの自律飛行による河道閉塞や砂防施設の調査・点検

1. はじめに

近年多発する異常な集中豪雨により、全国各地 で土砂災害が頻発している。ひとたび土砂災害が 発生すると、その規模や周囲の荒廃状況などの情 報を取得し、土砂災害が発生した周辺地域におけ る警戒避難体制を適切に確保する必要がある。し かし土砂災害が発生する現場は山間地であること が多く、また災害発生直後は斜面が不安定化して いることから、災害発生直後に現地調査を行う際 には多くの労力と危険が伴う。

また、これまでに整備されてきた砂防施設の老 朽化対策を計画的に進めるためには、施設の状況 を的確に把握する施設点検が必要であるが、砂防 施設は山間の狭隘かつアクセスの悪い場所に設置 されることが多く、点検作業にかかる労力が非常 に大きい。

近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術セン ターでは、大規模な河道閉塞箇所の調査や砂防施 設の点検におけるUAV (Unmanned Aerial Vehicles、以下UAV)の自律飛行の有用性につい て検討を進めてきた。本稿では、防災・公物管理 (インフラ管理)を目的としたものとしては全国 初となる目視外補助者なし飛行(以下、レベル3 飛行、図・1)の取組ならびに紀伊山系砂防事務所 管内におけるUAVのさらなる活用に関する取組に ついて報告する。



Survey of landslide dams and SABO facilities using autonomous flight of Unmanned Aerial

小杉 恵*·北本 楽**·柴田 俊***

2. レベル3飛行の現場検証実施箇所の概要

2.1 栗平地区の概要

レベル3飛行を実施したのは奈良県吉野郡十津 川村栗平地区である。本地区は、2011年9月の紀 伊半島大水害により幅600m、高さ450m、長さ 650mの深層崩壊が発生し、これによって発生し た約2,385万m3もの土砂によって河道閉塞が生じ た地区である(図-2)。本地区においては河道閉 塞により湛水池が生じ、湛水を原因とする土石流 が発生するおそれがあったことから、土砂災害防 止法に基づく緊急調査で継続監視となっていた (湛水地が解消したため緊急調査は令和3年3月に 終了¹⁾)。



図-2 被災当時の栗平地区 (2011年9月6日撮影)

2.2 栗平地区における現地調査の課題

国土交通省では発災後より緊急的に対策を実施 し、砂防堰堤等の施設整備を進めているが、斜面 や渓床には不安定な土砂が未だ残存しており、降 雨時には水とともに大量の土砂が移動・流出して いる(図-3)。



Vehicles (UAVs)

図・3 栗平地区における出水前後の土砂の移動状況

現地へは無舗装かつ急勾配の工事用道路でしか アクセスができないうえ、降雨時には急激に水位 が上昇するため、水位が下がるまで現地に立ち入 ることができない。また、急峻な山の谷底という 地形であるため、携帯電話の電波も圏外となって しまう。緊急調査は「調査を行う者の安全確保を 図りながら迅速に調査を行う」(土砂災害防止対 策基本指針)こととなっているが、栗平地区にお いては上述のとおり、調査の迅速性や円滑な連絡 体制、安全確保に課題を抱えていた。

2.3 栗平地区におけるこれまでの取組

栗平地区では、過年度より目視内・自律飛行で のUAVによる崩壊斜面、河道の調査および砂防施 設の点検を行っている。自律飛行とは、あらかじ め設定した飛行ルートに従いUAVを自動で飛行さ せることで、手動操縦よりも正確かつ迅速に同じ ルート・画角で撮影を可能とする手法である。前 述の通り、栗平地区は急峻な地形に囲まれて河道 も湾曲していることから見通しが悪く、携帯電話 の電波も圏外である。こうした環境下では、UAV 飛行中に地上の操縦リモコン(以下、プロポ)と 空中の機体との通信電波が途切れる場合があり、 異常時に操縦者による飛行中の強制介入が難しい ため、航空法に基づくレベル3飛行の許可を得る ことができなかった。これを受けて目視内飛行を 検討したが、対象地区でUAVを飛行させるために は、崩壊斜面直下の河道部に複数の操縦者および UAVを直接目視する補助者を配置する必要があり、 この方法では出水時などの緊急的な調査の際に調 査員の安全を確保することが困難であった(図-4)。



図・4 栗平地区におけるUAV目視内飛行時の調査員配置 このため、携帯電話の電波が圏外という条件下 で通信電波強度の不安定化を解決し、二次災害の 心配がない安全な地点から目視外によるUAVの長 距離飛行を用いた点検・調査を可能にすることが 必要であった。

3. UAVの自律飛行による点検・調査の検証

3.1 機体の選定

まず、過去の被災状況から適用場面を整理した うえで、現場適用条件を設定した。設定に当たっ ては、離着陸地点として設定する立ち入り可能箇 所から調査地点・調査範囲までの距離・定点ポイ ント・解像度等を整理するとともに、離着陸地点 および撮影範囲内の障害物の有無について確認を 行った。栗平地区においては、架空線等の上空の 障害物はないものの河道閉塞部であることから急 峻かつ複雑な地形を呈しており、離着陸地点にお いては携帯電話の電波が圏外となるうえ、離着陸 地点から最遠の調査地点まで直線での見通しが確 保できないという現場条件であった。

上記の現場条件を踏まえ、河道閉塞の緊急調査 に用いるためのUAVの性能仕様条件を①対象地区 全体を網羅する長距離飛行が可能であり、地形や 砂防施設の出水前後の変状を検知可能なカメラの 解像度を有すること、②離着陸まで全自動飛行が 可能かつ、産業用機体もしくはレベル3飛行の承 認実績がある機体であることと定めて機体を選定 し、この結果、MATRICE 300RTK (DJI社)、 skydio2 (skydio社)、ALTA X (FreeFly社)、 ACSL-PF2 (自律制御システム研究所)の4機体 (図-5)を一次選定した。

なお、UAVには固定翼機、回転翼機があるが、 本検証では砂防事業における実運用を見据えて機 種が豊富な回転翼機(マルチローター)を対象と した。



図-5 現地検証に際して選定されたUAV4機体

3.3 航空法等各種法令のクリア

UAV飛行に関する法令は図・6に示すように様々 なものがあり、飛行前にレベル3飛行、高度150 m以上での飛行、離発着箇所の土地占用申請等の 申請を事前に行う必要があった。特に、航空法に 関する申請では、レベル3飛行下で使用するUAV 機体の安全性の確保について航空局への申請が必 要である。今回の申請手続き過程で得た重要な知 見は、①レベル3飛行の申請はホビー用機体を想 定しておらず、産業用機体を用いること、②自律 飛行中に強制的に操作介入ができるように機体と プロポの通信が飛行中に途切れないこと、③想定 される運用に対して十分な飛行実績があり、実績 は機体の初期故障期間を超えたものであることで あった。飛行計画の申請に必要な立入管理区域の 設定や初期故障期間についてはメーカーからの情 報提供を元に算定する必要があった。航空局への レベル3飛行の許可申請に要した日数は、初回に 申請した機体は57日であったが、申請手順を整理 したことにより、その後に申請した機体では23日 と、手続き期間を短くすることができた。



図-6 UAV飛行における主な関連法令 (●:UAVによるレベル3飛行下の自律飛行に関する法令)

3.4 栗平地区における機体・プロポ間の通信途絶の課題の解消

栗平地区においてUAVのレベル3飛行を行う上 での最大の課題は、UAV飛行中にプロポと機体と の通信電波が途切れるおそれがあることであった。 そこで、プロポと現地点検・調査用のUAV(以下、 撮影機)との通信電波を中継するためのUAV(以 下、中継機)を飛行させることで通信強度を安定 させ、レベル3飛行下での自律飛行の実施を試み ることとした。なお、本検証では、一次選定した 4機体の中からACSL-PF2を使用することとした。 3.5 現場検証の実施

UAVの離発着地点は、過去の出水実績を踏まえ て、河道閉塞箇所から土砂流出した場合でも車で アクセス可能な安全な地点(河道閉塞箇所から下 流約2kmの地点)とした。離発着地点には地上局 としてUAVの操縦者およびUAVから伝送される 機体制御情報や画像の監視者を配置した。

撮影機の自律飛行ルートを図・7に示す。飛行 ルートは前年度までに実施した目視内飛行のルー トを用いた。なお、離発着地点では左右岸が急峻 な狭窄地形となっており、GNSS捕捉数が自動離 着陸を行うために十分な数を下回ることから、撮 影機は離着陸時のみ手動で操作し、上空のGNSS 捕捉数が十分になった地点から自律飛行に切り替 えた。

撮影機は、栗平地区の崩壊斜面や斜面直下の河 道の危険箇所および1号砂防堰堤等の砂防施設の 撮影を行うために、対地高度の上限を149mとし て飛行計画を作成し、対地高度150m以上の飛行 に必要な航空法の申請を省略した。なお、堰堤等 の施設付近は出水前後の変状の判別を想定し、対 地高度100mまで近接して飛行した。飛行は往復 約6kmの区間を動画撮影1回と静止画撮影(イン ターバル2秒/枚)1回の計2回自律飛行させた。中 継機は、離着陸地点での携帯電話の電波が圏外で あり、操縦者と撮影機の直線見通しが悪いため、 中継機を介して通信電波の伝送が可能な対地高度 300mまで離着陸地点からほぼ垂直に上昇させ、 撮影機から地上局に対して機体制御情報や撮影映 像の伝送を試みた。



図-7 UAVの飛行ルート、 左下:UAVの位置関係、右下:地上局

3.6 検証結果

撮影機と中継機を2機同時に併用することで、 飛行中にプロポと撮影機の通信強度を安定させレ ベル3飛行下での自律飛行を行うことができた。1 回の飛行は約15分であった。撮影した映像や機体 制御情報は中継機を経由してリアルタイムに地上 に伝送され、離発着地点に設置したモニター画面 で確認することができた(図・7)。また、撮影し た動画から崩壊斜面、斜面直下の河道、1号砂防 堰堤の状況や堆砂域の土砂堆積状況を迅速に確認 することができた。さらに、撮影した静止画は 2,000万画素と高解像度であり、出水前後の砂防 施設の変状等を識別できる解像度を有することが 確認された。

以上より、急峻な地形に囲まれてアクセスも悪 く、携帯電話の電波が圏外かつ、危険で人の立ち 入りが困難な箇所において、安全な地点から2機 のUAVを同時に自律飛行させることで中継機によ る電波経由を利用し、崩壊斜面や河道、砂防施設 の状況を迅速に把握することが可能であり、出水 時における緊急的な点検・調査においてUAVによるレベル3飛行が有効であることが示された。

3.6 撮影データの解析

インターバル撮影した静止画はオーバーラップ 85%以上になるよう設定しており、計208枚の連 続した静止画とSfM (Structure from Motion) 解析により栗平地区全体のオルソ画像と3次元モ デルの作成を行った。使用したSfM解析ソフトは Metashape (Agisoft社)であり、解析時間は約2 時間であった。オルソ画像(図-8)からは対象地 区全体の土砂堆積・侵食を迅速に確認することが できた。また砂防施設の3次元モデル(図-9)か らは洗掘による破損や摩耗についても確認するこ とができた。



図-8 SfM解析で作成したオルソ画像



図-9 3次元モデルによる堰堤の変状推定 3次元モデルは静止画に比べてテクスチャが荒 くなるため、ひび割れ等の細かな変状を把握する のは困難であったが、地区の全容を視覚的に分か りやすく俯瞰できることから、調査・点検におい て地区全体の変状や土砂流出・堆積状況を判断す る際に活用できることが示された。

3.7 今後の課題

栗平地区における現地検証では、中継機との通 信強度を安定させるために撮影機の高度を最低で も対地高度100mとした。しかし、砂防施設のひ び割れのような数mmの変状まで識別するために は、より対地高度を下げて、砂防施設に近接する 必要がある。今後は中継機と撮影機の位置関係を 試行錯誤的に試験し、相互位置の自動補正機能な どを検討するとともに、撮影機への中継機追尾技 術や複数台のUAVの使用まで発展させていきたい と考える。

4. 高機能なUAVを活用した取り組み

4.1 離発着を含む完全自律飛行の検証

レベル3飛行による施設点検のさらなる有効性 を確認するために、スイッチ1つのみで現場に設 置した格納庫からUAVが離陸し、砂防施設の点検 ルートを飛行したのち格納庫に収納されるまでを 自動で行う完全自律飛行を追加で検証した(図-10)。なお、本検証は一次選定した4機体(図-5) のうちSkydio2を用いた。

本検証では、UAVに搭載されたカメラ画像を用 いて周辺環境と機体位置を推定するVisual SLAM 技術を搭載したUAVを用いることで、機体自らが 障害物を回避して飛行するようにした。本検証に より、将来的には、あらかじめ現地に格納庫を設 置してUAVをスタンバイしておけば、作業員が現 場に行かずとも、安全かつ効率的な施設点検の実 施に活用できることが示唆された。



図-10 離発着を含む完全自律飛行の検証

今後は、UAV格納庫の設置箇所の検討やVisual SLAM技術を前提とした施設点検計画などの運用 条件の整理を行う必要がある。

4.2 公共BBを搭載したUAVによる映像伝送

携帯電話の電波受信が不可能な箇所において、 公共BBを搭載したUAVを活用することでUAVに よる調査映像の伝送を行い、迅速な情報提供への 適応性を検証した。なお、本検証では一次選定し た4機体(図-5)のうちALTA Xを用いた。

本検証では、撮影機と公共BBを搭載した中継 機の同時飛行を行い、撮影機のプロポが受信する 撮影映像を、公共BBを介して携帯電話の受信範 囲まで伝送させ(図-11)、インターネット経由で 事務所への映像伝送を行うとともに、衛星電話に よる通話ができない撮影機の離着陸地点において は、公共BBを利用したIP電話による通話を行っ た。



図-11 公共BBを搭載したUAVの飛行ルート 本検証により、公共BBを搭載したUAVを活用 することで、IP電話による通話と映像伝送が可能 となり、携帯電話の電波の受信ができない箇所に おいても調査結果を現場外と迅速に共有すること が可能となることが示唆された(図-12)。



図-12 映像受信状況

なお、本検証では映像の遅延や停止が発生して おり、中継機のホバリング地点と撮影機の飛行 ルート等の位置関係やアンテナ方向の調整を適切 に実施するなど、携帯電話の電波が遮断されるよ うな事前調整が困難な地点において、受信感度を 保つための調整方法に課題を残している。

4.3 UAVを用いた砂防施設の定期点検手法の検討 及び検証

本検証では、対象施設の現地条件からUAVによ る施設点検の適用性や優位性を整理の上、対象施 設を選定し、機体を周辺状況に応じて使い分けて UAV空撮を行い、砂防関係施設点検要領に準拠し た点検を実施した。なお、本検証では自律飛行が 可能な機体として、phantom4RTK(DJI社)な らびにSPIDER6(ルーチェサーチ社)を用いた。

本検証によって、施設に接近して撮影可能な箇 所については詳細な変状の評価が可能であり、樹 木の被覆等により接近が困難な箇所でも堆砂変動 等の顕著な変状を検知できることを確認できた。

さらに、新技術を活用した詳細点検手法として、 上記2機体以外も用いて、UAVに搭載したレーザ による樹木被覆下の状況把握、マルチスペクトル カメラでのNDVI計測による堆砂敷植生の活性度 把握、赤外線カメラ画像による漏水箇所の検出、 AIによる変状箇所の自動抽出、長距離飛行対応 のVTOL機やマルチコプターの狭隘地形下での適 用性も確認できた(図-13)。



図-13 熱赤外画像による漏水の疑いのある箇所の判別例 今後は、砂防施設の長寿命化や土砂災害による 被害の軽減のため、上記の多様な点検手法の活用 も含めて場面ごとの最適な点検手法の組み合わせ を検討し、UAVによる砂防施設点検計画を策定の うえ運用していきたいと考えている。

5. おわりに

レベル3飛行は、目視外においてUAVを飛行さ せることによって、目視内では制限される長距離 の飛行を可能とするものである。栗平地区におけ る検証は、電波状況の改善のためにUAVによる中 継機を併用したが、携帯電話の電波等が届く環境 であれば電波中継はUAVでなくても可能であり、 たとえば事務所と現場といった遠隔地から、地上 の電波局を経由してUAVのレベル3飛行の運用が 可能になると考えられる。

また、本稿で述べたとおり、UAVの撮影画像を 伝送することにより離着陸地点に設置したモニ ター画面だけでなく遠隔地でもリアルタイムで画 像を確認することができ、出水直後の土砂災害 防止法に基づく緊急調査着手の判断の際にも活用 が期待される。近年では、伝送される動画や静止 画から同時並行でSfM解析を行うことで、リアル タイムにオルソ画像や3次元モデルを作成し、よ り詳細な情報を取得することが可能となっている (図-14)。



図-14 UAVと遠隔地間での映像共有

自律飛行はあらかじめ飛行ルート・画角を設定 することで繰り返し同一ルート・画角での撮影が 可能であることから、例えば出水前後など、複数 期間の変状をより効率的に抽出することができる。 これに、AI等を活用した画像解析技術を用いる ことで、二時期の画像から変状を自動検知するこ とも可能であると考える。また出水前後の3次元 モデル同士の差分解析などにより土砂流出状況の 定量的な解析も可能になり、堰堤の堆砂状況の把 握や除石管理の計画検討にも利用できる。今後は、 同一アングルで撮影される定点画像を用いて自動 で変状抽出から施設点検台帳作成まで行うような 定期点検へのあり方が考えられる。

UAVはヘリコプターよりも低コストかつ高頻度 で飛行可能であり、その普及のしやすさも利点で ある。UAVによるレベル3飛行は、調査・点検作 業を飛躍的に効率化・迅速化し、地域における警 戒避難体制の早急な確保や砂防施設の計画的な老 朽化対策に資するとともに、作業自体の安全性の 向上にも寄与するものと考えている。

大規模土砂災害対策技術センターでは、これま での取組で得た知見を「UAVの自律飛行による天 然ダムの緊急調査及び被災状況把握に関する手引 き」として2020年3月に作成・公表²⁰しており、 2021年7月に本手引きを改定・公表すると同時に、 「UAVの自律飛行による砂防関係施設の自動巡 視・点検に関する手引き」についても公表したの で、これらの手引きについてもぜひ参考とされた い。

UAVをはじめとした新技術は日進月歩である。 今後も技術開発の動向を踏まえ、新技術を活用し ながら、地域の安全・安心はもちろんのこと、砂 防事業に携わる全ての人々の安全・安心も確保で きる砂防事業を展開していきたい。

謝 辞

UAVに関する各種取組において、指導・助言・ 協力いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 国土交通省近畿地方整備局:紀伊半島大水害によ る河道閉塞箇所の湛水池埋め立てが一部完了しま した、2021、 https://www.kkr.mlit.go.jp/news/top/press/20210 331-1.html
- 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技 術センター:「UAVの自律飛行による天然ダムの緊 急調査及び被災状況把握に関する手引き」、2020 https://www.kkr.mlit.go.jp/kiisankei/center/img/ uav_guidance.pdf

小杉恵*	国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所調査課長(併)大規模土砂災害対策技術セン
	<i>A</i> —
	Megumi KOSUGI
北本楽**	国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター
	Gaku KITAMOTO
柴田俊***	研究当時 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター 現 長野県姫川砂防
	事務所砂防課
	Suguru SHIBATA

2011 年台風第 12 号により発生した長殿・栗平地区天然ダムの水文特性の違い

Differences in hydrological characteristics of the landslide dams in the Nagatono and Kuridaira districts caused by Typhoon Talas in 2011

木下篤彦(国総研,大規模土砂災害対策技術センター)*,只熊典子・海原荘一(エイト日本技術開発), 北本楽(大規模土砂災害対策技術センター),古江智博(紀伊山系砂防事務所),山越隆雄・中谷洋明(国総研),

Atsuhiko KINOSHITA (NILIM)*, Noriko TADAKUMA, Soichi KAIHARA (EJEC), Gaku KITAMOTO, Tomohiro

FURUE (MLIT), Takao YAMAKOSHI, Hiroaki NAKAYA (NILIM)

キーワード : 天然ダム,深層崩壊,越流侵食,透水係数,土砂流出

Keywords: Landslide dam, Deep-seated Landslide, Erosion, Hydraulic conductivity, Sediment runoff

1 はじめに

2011年台風第 12 号では,紀伊半島で多数の天 然ダムが発生した。災害から 2021年現在で約 10 年が経過しているが,越流侵食により天然ダムの 形状が災害直後と現在で大きく変化したものも あればほとんど変化していないものもある。その ような越流侵食の発生に違いが生じた原因とし ては,降雨特性や天然ダム堤体の浸透特性,天然 ダムの湛水池の規模,流域の水文特性等が挙げら れる。本研究では,栗平地区(**写真-1**)と長殿地 区(**写真-2**)の天然ダムを事例として,前述の項 目について比較するとともに,越流侵食の違いが 生じた原因を考察した。

2 台風第12号災害と調査箇所の概要

2011 年 8 月 25 日に発生した台風第 12 号では, 総降水量は広い範囲で 1,000 ミリを超え,一部で は解析雨量で 2,000 ミリを超えた。紀伊半島では 72 箇所で深層崩壊が発生し,うち 17 箇所で天然 ダムが発生した。調査対象とした長殿地区(流域 面積 4.5km²),栗平地区(流域面積 8.7km²)はいずれ も奈良県南部に位置し,地質は付加体であり,自 亜系日高川層群美山層に属する。



-具一 1 災害 2 日後の長殿地区の様子 (崩壊土砂量約 595 万 m³)



写真-2 災害2日後の栗平地区の様子 (崩壊土砂量約2,385万m³)

地区名	災害直後(2011	現在(2021年3	
	年9月)の天然	月)の天然ダム	天然ダム発生直後から現在(2021年3月)までの状況
	ダムの高さ(m)	の高さ(m)	
長殿	80	80	・ 湛水池の中は工事等による改変は行われていない。
			・ 災害直後に天然ダム天端に排水路を設置したが、一度も満
			水・越流していない。
栗平	100	62	・ 工事により発生した土砂で湛水池を埋め立てている。
			・ 台風などにより、ほぼ毎年、越流が発生しており、天然ダ
			ムの高さは約10年間で約38m低くなった。
			・ 災害直後に天然ダム天端に排水路工を設置し,その2年後
			に推進工法により天然ダム堤体に暗渠排水管を設置したも
			のの,2014年台風第11号により天然ダムが侵食され、い
			ずれも流失。

表-1 災害から約 10 年間の天然ダムの状況につ



3 長殿地区・栗平地区の天然ダムの水文特性

図-1に2地区での天然ダムでの水文特性把握 のための水文観測システムの概念図を示す。両地 区共に,災害直後から,転倒ます型雨量計で雨量 観測を行うと共に,湛水池の水位計測,天然ダム 堤体の2箇所のボーリング孔を利用した地下水位 の観測を実施している。なお,栗平地区について は,2014年8月の台風第11号により,堤体が約 17m侵食され,ボーリング孔も流失し,それ以降, 堤体での地下水位が観測不能となっている。

図-2に,総雨量 50mm 以上の降雨イベントを 対象とした総雨量と天然ダム流入高との関係を 示す。なお,総雨量はイベント前後 24 時間降雨 が無いことを定義として算出した。天然ダム流入 高とは,降雨量との比較のため天然ダムへの流入 量を流域面積で除した値である。栗平地区の方が, 単位当たりの総雨量に対する流入量が多く,平均 で約 1.7 倍も湛水池に流入しやすいことが分かる。

図-3に、2地区での天然ダム堤体の年平均透水係数の推移を示す。なお、透水係数は、堤体に 設置したボーリング孔の水位データから、ダルシー則によって推定している。なお、栗平地区の 2014年の値は台風第11号による天然ダムの侵食 で水位孔が流出するまでの期間の値である。災害 直後の2012年は、長殿地区の透水係数が栗平地 区の約2.3倍あったことが分かる。このため、栗 平地区の方が



図-4 長殿地区・栗平地区における出水期の 平均天然ダム空き容量と漏水高との関係

湛水池の水位が上昇しやすく,越流しやすかった と言える。2014年に栗平地区で,年平均透水係数 が前年比約 1.5倍になっているが,これは 2014年 10月に完成した,暗渠排水管の効果(透水係数に 換算して評価している)によるものと考えられる。 2013年以降,長殿地区での透水係数は徐々に小さ くなり,2020年は,2012年に比べて約 0.6倍にな っている。これは,上流域から湛水池に流入した 土砂のうち,細かい粒径の土砂が堤体を構成する 礫に入り込んで透水性が低下したものと考えら れる。

図-4に2地区の出水期(6月~10月)の平均天 然ダム空き容量と天然ダム漏水量との関係を示 す。なお,天然ダム空き容量,天然ダム漏水量共 に,上流域の流域面積で除した値で2地区の比較 をしている。長殿地区の方が,流域面積に対して, 湛水池の容量が小さいものの,漏水量が多い等の 理由により,流域面積当たりの平均の空き容量は 大きい。このように,漏水量の違いも天然ダムの 越流侵食のしやすさに影響を与えていたと考え られる。

4 おわりに

本研究では、長殿地区・栗平地区について、こ れまでの天然ダムの越流侵食状況の違いについ て、降雨流出特性や天然ダム堤体の水文特性の違 いから分析した。今後、天然ダム堤体の浸透特性 から安定性を判定する手法の構築を目指したい。
2011 年台風第 12 号により発生した天然ダムを構成する岩石のスレーキン グ試験・X 線回折分析の結果と天然ダムの安定性

Results of slaking tests and X-ray diffraction analysis of rocks constituting the landslide dams formed by the 2011 Typhoon Talas and the stability of the dams

木下篤彦^{a)·b)*},柴田 俊^{b)},山越隆雄^{a)},中谷洋明^{a)},小川内良人^{c)},柴崎達也^{c)},眞弓孝之^{c)},

長谷川陽一^{。)}, 三田村宗樹^{d)}, 松井 保^{e)}

Atsuhiko KINOSHITA, Suguru SHIBATA, Takao YAMAKOSHI, Hiroaki NAKAYA, Yoshito OGAWAUCHI, Tatsuya SHIBASAKI, Takayuki MAYUMI, Yoichi HASEGAWA, Muneki MITAMURA and Tamotsu MATSUI

Key words: deep-seated landslide, landslide dam, stability, slaking test, X-ray diffraction analysis キーワード: 深層崩壊、天然ダム、安定度、スレーキング試験、X 線回折分析

1. はじめに

2011 年 9 月の台風第 12 号では,紀伊半島周辺で 72 個の深層崩壊が発生した。また,そのうち 17 箇所で河 道閉塞し,天然ダムが発生している¹⁾⁻³⁾。天然ダムにお いて,越流侵食やすべり破壊,浸透水によるパイピング が発生すると,土石流や氾濫により下流域に大きな被害 が発生するおそれがある⁴⁾⁻¹⁰⁾。日本国内における既往事 例⁶⁾⁻¹⁰⁾では,越流による天然ダムの侵食が報告されてお り,天然ダム発生後は,長期に亘り,湛水池の水位を監 視する必要がある。また,豪雨時などにより越流の恐れ がある場合は,行政は土砂災害防止法に基づいて下流域 の住民に避難を促す必要がある。2011 年 9 月の台風第 12 号で発生した天然ダムも 2021 年 3 月で災害から約 10 年が経過し,砂防堰堤や排水路工等の砂防工事が進んで いる。一方で,時間の経過とともに様々な要因で天然ダ ムの安定性が変化している可能性もある。

これまで、天然ダムの安定性に関して、様々な研究が 行われている。Casagli and Ermini¹¹⁾は、天然ダムの土 砂量と集水面積から安定度を評価する方法を提案してい る。また、湛水池の容積と天然ダムの土砂量から、評価

* 連絡著者/corresponding author
a) 国土交通省国土技術政策総合研究所
National Institute for Land and Infrastructure Management
〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6
3027-6, Ichinono, Nachikatsu-ura Town, Higashimuro-gun, Wakayama
Prefecture, 649-5302, Japan
b) 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター
Sediment Disaster Prevention Technology Center
c) 国土防災技術株式会社
JAPAN CONSERVATION ENGINEERS & CO., LTD.
d) 大阪市立大学
Osaka City University
e)大阪大学
Osaka University

する手法も合わせて提案している。Ermini and Casagli¹²⁾は、安定性の指標として、DBI(Dimensionless Blockage Index, 以下 DBI とする。)を挙げ, 集水面積 と天然ダムの高さ、天然ダムの体積から安定度を評価す る指標を提案している。Korup¹³⁾は、安定度の指標とし τ , I_s (Backstow Index), I_a (Basin Index), I_r (Relief Index)を挙げ、天然ダムの高さ、湛水池の容積、天然ダ ム上流の集水面積, 天然ダム上流域の起伏から安定度を 評価する指標を提案している。Dong et al.14)は、ピー ク流量や天然ダムの高さ,集水面積,天然ダムの幅,天 然ダムの長さ, 天然ダムの体積等から, 安定度を評価す る手法を提案している。Shan et al.¹⁵⁾は, 天然ダムの 高さや幅、体積や集水面積に加えて、天然ダム構成土砂 の粒径を評価に加えることで、精度良く安定度を評価で きることを示している。王ら¹⁶⁾は, 2008 年の四川大地 震で発生した天池での天然ダムについて, DBI¹²⁾では不 安定であると判定されたものの,実際はダム堤体の表面 のほとんどが φ=2~6mの岩石で覆われており, 越流して も決壊しにくいと述べている。このため、DBI だけでな く表面波探査を併用することを提案している。Kiyota et al.17)は、2005年にパキスタンで発生したカシミール地 震で発生した Hattian Bala での天然ダムについて、ス レーキング試験やせん断試験から、乾期である2月にダ ム堤体に侵食が発生した原因について調査している。こ の結果、乾湿の繰り返しによる泥岩のスレーキングによ る強度の低下や細粒分の流出が天然ダムの侵食を招いた と結論づけている。

紀伊山系では、2011年台風第12号による災害で深層 崩壊が発生し、天然ダムも発生している。2021年までの 約10年間、複数の天然ダムで台風等の豪雨により、ほ ぼ毎年、越流侵食が発生している状況にある。Kiyota et al.¹⁷⁾が示すように、海外ではスレーキングが原因で天 然ダムが侵食された事例があり、紀伊山系の天然ダムに ついても、スレーキングによる侵食の可能性について調 査しておくとより良い対策となると考えられる。特に、 天然ダム下部の常時浸潤ゾーンと中位の水位変動ゾーン



図-1 2011 年台風 12 号による河道閉塞発生箇所(17 箇所)一覧(地理院地図色別標高図に追記)。赤丸かつ赤文 字で示した箇所は本研究での対象地区,黒丸かつ黒文字で示した箇所は本研究の対象外の地区である。なお,坪 内地区は地区内にある3箇所のうち1箇所を本研究の対象としている。

はスレーキングの影響を受けやすいと考えられ,強度低 下リスクを判定する必要がある。

本研究では、天然ダム構成岩石のスレーキング特性と 岩石と水が接した際の溶出イオンによる水の酸性化に着 目し、2011年台風第12号時の深層崩壊によって発生し た天然ダムの約10年間の安定性との関係について検討 する。まず、災害直後の天然ダムの安定性について、王 ら¹⁶⁾の研究成果を参考にして、Ermini *et al.*¹²⁾の提案 している*DBI*を算出する。これにより、越流等に対する 天然ダムの安定性を検証する。次に、スレーキング特性 に影響を及ぼすと考えられる鉱物の分析を目的として、 天然ダム構成岩石のX線回折分析を実施する。その上で、 岩石のスレーキング試験を実施し、スレーキング特性と 溶出イオンによる水の酸性化について分析する。

2. 紀伊半島大水害の概要と調査地

2.1 紀伊半島大水害の概要

2011 年 8 月 25 日 9 時にマリアナ諸島の西海上で発生 した台風第 12 号は,発達しながらゆっくりとした速さ で北上し,30 日に小笠原諸島付近に達し,大型で強い台 風となった。台風が大型でさらに動きが遅かったため, 長時間にわたって台風周辺の非常に湿った空気が流れ込み,西日本から北日本にかけて,山沿いを中心に広い範囲で記録的な大雨となった。8月30日17時から9月5日24時までの総降水量は,紀伊半島を中心に広い範囲で1000ミリを超え,紀伊半島の一部の地域では解析雨量で2000ミリを超えた¹⁸⁾。

6日間続いた台風12号による降雨の影響で地盤がゆる み,紀伊半島各地で土石流,地すべり,がけ崩れ等の土 砂災害が発生した。奈良県・和歌山県・三重県において 航空写真判読等により崩壊箇所を読み取ったところは約 3,000箇所にのぼり,崩壊土砂の総量は約1億m³と推定 された。特に,深層崩壊により河道閉塞が17箇所で発 生し,奈良県五條市の赤谷地区,十津川村の長殿地区・ 栗平,野迫川村の北股地区,和歌山県田辺市熊野地区で は大規模な河道閉塞が形成された(図-1)¹⁾⁻³⁾。

2.2 調査地の概要

図-1に2011年台風第12号による河道閉塞発生箇所 一覧を示す。また、図-2に紀伊半島周辺の地質図を示 す。本研究は、図-1に示す17箇所のうち、8箇所(図 -1・図-2)で行った。8箇所の深層崩壊発生直後の状 況は写真-1の通りである。図-2において、地質は四



図-2 X線回折及びスレーキング試験を実施した箇所とその地質(20万分の1シームレス地質図に追記)。赤丸 かつ赤文字で示した箇所は本研究での対象地区,黒丸かつ黒文字で示した箇所は本研究の対象外の地区である。 なお,坪内地区は地区内にある3箇所のうち1箇所を本研究の対象としている。

万十帯白亜系の日高川層群,古第三系音無川層群,牟婁 層群が分布し,さらに,断層によりいくつかのユニット に細分されている。各地区の地質や主な構成岩種は表-1 の通りである。最北部に位置する坪内地区は日高川層群 花園層に属し,赤色凝灰岩や凝灰質角礫岩からなる塩基 性岩類,頁岩層から構成される。北股地区は日高川層群 湯川層で,主にチャート,緑色岩類,砂岩・砂岩頁岩互 層から構成される。清水地区,赤谷地区,長殿地区,栗 平地区は日高川層群美山層に属し,主にチャート,緑色 岩類,砂岩・砂岩頁岩互層から構成される。三越地区は 古第三系音無川層群羽六層,熊野地区は牟婁層群中部・ 下部層に属し,主に砂岩泥岩互層,礫岩層から構成され る。

なお、崩壊斜面の規模は表-1の通りである。

3. 災害直後の天然ダムの安定度とその後の状況

3.1 災害直後の天然ダムの安定度

まず,2011年の災害直後の天然ダムの観測データから 当時の安定度を求める。安定度については,王ら¹⁶⁾, Kiyota *et al.*¹⁷⁾の研究と比較検証する目的で,これら の研究と同様に,Ermini *et al.*¹²⁾の提案している *DBI* を算出し,これに基づき安定度を評価する。

DBIは以下の式(1)より求める。

 $DBI=\log(A_b \times H_d/V_d) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$ ここに、 A_b :集水面積(m²)、 H_d :天然ダムの高さ(m)、 V_d : 天然ダムの土砂量(m³)である。日本を含む世界各地の事 例を統計的に整理した結果、DBI < 2.75の場合には天然ダ ムは安定、2.75<DBI < 3.08の場合には不安定となる可能 性があり、3.08<DBIの場合には不安定、と報告されてい Z¹²⁾。

表-2に各地区でのパラメータと DBI の計算結果を示 す。なお,清水・坪内・三越については,天然ダム発生 約1.5~3時間で越流によりほぼ流出しており¹⁹⁾,パラ メータの各数値が不明であり,DBI は算出できなかった。

赤谷・長殿・栗平・北股・熊野の各地区については, 2011年の災害直後の天然ダムの DBI はいずれも 2.75 を 下回っており,安定と判定された。

3.2 災害直後から現在までの天然ダムの状況

表-2に対象とした天然ダムの災害直後から現在まで の状況を記載する。赤谷地区は、災害直後より、砂防工 事により発生した土砂で、湛水池を埋め立てている。ま た、ほぼ毎年数回程度越流している状況である。天然ダ ムについては、砂防工事の効果もあり、この 10 年間大 きな侵食は発生していない。長殿地区は、工事により発 生した土砂で湛水池を埋め立てている。2021年3月まで の約 10 年間に越流は発生しておらず,安定している。 栗平地区は、災害以降、台風等の豪雨の度に越流が発生 しており^{6)・7)}, 天然ダムの高さは当初の約100mから2021 年3月現在で約62mまで約38m低くなっている。北股地 区は、災害直後に砂防工事により湛水池を埋め立ててお り, それ以降, 越流等による侵食は発生しておらず, 2021 年3月までの約10年間,安定している。熊野地区も, 北股地区同様,2011年の災害直後に砂防工事により湛水 池を埋め立てており、それ以降、2021年3月までの約 10年間, 越流等による侵食は発生しておらず, 安定して いる。

いずれの地区も災害時に既に越流等による天然ダムの 表層の侵食や下流への土砂流出が発生していることや,



写真-1 本研究で対象とする深層崩壊箇所。(a)赤谷地区(奈良県五條市),(b)長殿地区(奈良県十津川村),(c) 栗平地区(奈良県十津川村),(d)北股地区(奈良県野迫川村),(e)熊野地区(和歌山県田辺市),(f)清水地区(奈良県 五條市),(g)坪内地区(奈良県天川村),(h)三越地区(和歌山県田辺市)。撮影は全て災害2日後の2011年9月6 日に行った。河道付近の矢印は流向を示す。

災害直後に実施した排水路工等の工事を実施していることから、3.1節の DBI の結果は、5 つの天然ダムには、 必ずしもそのまま適用できないと考えられる。

なお,5 地区の天然ダムでは,これまでのところ,い ずれもKiyota *et al.*¹⁷⁾が報告しているようなスレーキ ングによる大規模な土砂流出は発生していない。 4. X線回折分析及びスレーキング試験の実施方法

紀伊山系の天然ダムのスレーキング特性を調査する目 的で、X線回折分析により主な岩石の鉱物を同定すると ともに、スレーキング試験を行って、その特性を調査し た。なお、2011年の災害直後に天然ダムの大部分が流出 した清水・坪内・三越の3地区についても分析・試験を

地区名	長さ(m)	高さ(m)	幅(m)	崩壞土砂量(m ³)	地質	主な構成岩種
赤谷	850	600	460	約 1,138 万	白亜系日高川層群美山層	チャート・緑色岩類・ 砂岩・砂岩頁岩互層
長殿	650	400	340	約 595 万	白亜系日高川層群美山層	チャート・緑色岩類・ 砂岩・砂岩頁岩互層
栗平	650	450	600	約 2,385 万	白亜系日高川層群美山層	チャート・緑色岩類・ 砂岩・砂岩頁岩互層
北股	350	190	200	約 117 万	白亜系日高川層群湯川層	チャート・緑色岩類・ 砂岩・砂岩頁岩互層
熊野	480	250	440	約 526 万	古第三系牟婁層群中部・ 下部層	砂岩泥岩互層・礫岩層
清水	350	250	220	約 160 万	白亜系日高川層群美山層	チャート・緑色岩類・ 砂岩・砂岩頁岩互層
坪内	290	180	230	約 140 万	白亜系日高川層群花園層	赤色凝灰岩·凝灰質角礫岩· 頁岩
三越	330	180	200	約 50 万	古第三系音無川層群 羽六層	砂岩泥岩互層・礫岩層

表-1 本研究で対象とした深層崩壊斜面の概要

表-2 2011 年災害直後の天然ダムの安定度指標 DBI について

地 区 名	集水面積 (×10 ⁶ m ²) A _b	災害直後 の天然ダ ムの高さ (m) H _d	災害直後の 天然ダムの 体 積 (× 10 ⁶ m ³) <i>V</i> _d	災害直後の DBI DBI=log(A_b × H_d/V_d)	判定 ・DBI<2.75 安定 ・DBI>3.08 不安定	天然ダム発生直後から現在(2021 年 3 月)までの状況
赤谷	13.2	85	6.9	2.21	安定	 ・災害時に、越流等により天然ダムが 侵食され、土砂流出が発生した。 ・工事により発生した土砂で湛水池を 埋め立てている。 ・毎年台風等の豪雨で越流が発生し、 天然ダム表層の土砂が流出している。
長殿	4.5	80	2.9	2.09	安定	 ・災害時に,越流等により天然ダムが 侵食され,土砂流出が発生した。 ・工事により発生した土砂で湛水池を 埋め立てている。 ・これまで約10年間越流していない。
栗平	8.7	100	12.4	1.85	安定	・災害時に,越流等により天然ダムが 侵食され,土砂流出が発生した。 ・過去何度も越流が発生し,天然ダム 表層の土砂流出により,天然ダムの高 さは約10年間で約38m低くなってい る。
北股	0.4	25	0.3	1.52	安定	 ・災害時に、越流等により天然ダムが 侵食され、土砂流出が発生した。 ・2011年の災害直後に工事により湛水 池を埋め立てており、その後約 10 年 間安定している。
熊野	1.2	60	2.4	1.48	安定	 ・災害時に,越流等により天然ダムが 侵食され,土砂流出が発生した。 ・2011年の災害直後に工事により湛水 池を埋め立てており,その後約10年 間安定している。
清水	218.5 ¹⁹⁾	不明	不明	不明	不明	 ・天然ダム発生約 1.5 時間後に越流に よりほぼ流出した¹⁹⁾。
坪内	107.5 ¹⁹⁾	不明	不明	不明	不明	 ・天然ダム発生約3時間後に越流によりほぼ流出した¹⁹⁾。
三越	23.119)	不明	不明	不明	不明	 ・天然ダム発生約3時間後に越流によりほぼ流出した¹⁹⁾。

区分	0	1	2	3	4
				Sep	
Α -	変化なし。	割れ目が少しできるが 供試体の原形を保って いる。	全体に割れ目が多数で き、幾つかの岩片にわ かれる。 供試体の原形はおおむ ね判別できる。	全体が細粒化し、供試 体の原形は判別できな い。泥状化の進行は顕 著でない。	全体が泥状化。
			RO	(S)	
в -	変化なし。	割れ目が少しできるか, 周辺が少し崩れる。 供試体の原形を保って いる。	周辺がかなり崩れ,供 試体の原形は判別が難 しい。	周辺がほとんど崩れ、 粒子の分離が顕著。 供試体の原形はほとん ど判別できない。	全体が砂状化。

図-3 スレーキング区分の段階

行った。

4.1 X線回折分析の実施方法

X 線回折分析により, 天然ダムを構成する主な岩石の 鉱物を同定した。分析に用いた試料は 10 試料である。 試料の採取は 2012 年 1~2 月に行った。北股地区と坪内 地区については, それぞれ 2 種類の岩石が観察されたこ とから, それぞれの岩石について実施した。X 線回折分 析は,日本電子株式会社製の X 線回折システム JDX-3532 を用いた。Cu 管球, 管電圧 25kV, 管電流 40mA, 走査速 度 2deg/min の条件で実施した。岩石試料を粉砕し, 全 岩試料を対象に不定方位分析を実施した。

4.2 スレーキング試験の実施方法

岩石のスレーキングへの耐性を調査するため,スレー キング試験を行った。試験に用いた試料は4.1と同様で 10種類である。試料の採取は2012年1~2月に行った。 乾湿繰り返しによる岩石の脆弱性を把握するスレーキン グ試験は,様々な試験方法が提案されている²⁰⁾⁻²²⁾。本 研究では,乾湿の繰り返し回数を多くとった際のスレー キング挙動を確認するため,10回乾湿を繰り返す「岩の 乾湿繰返し吸水率試験方法 (NEXCO 試験法 111)」²⁰⁾ で実施した。試料に使用する量は,自然含水状態で500 ~1,000g程度のものを標準とした。試料の形状は特に規 定しないが,できる限りブロックのものとした。

試験の順序としては、以下の通りであった。

- 1)自然含水状態試料を容器に入れ、その質量を計った。
- 2) 試料を容器ごと水槽につけて 24 時間放置した。
- 3) 試料の入った容器を傾けて水を排水した。約2分間放置後,下部に溜まった水をろ紙で吸いとり試料の質量を計った。なお,容器内の水を出すとき,なるべく水と土が逃げないよう注意した。

- 4)試料を110±5℃の温度で一定(24時間を標準とする) 質量になるまで炉乾燥した。乾燥した試料をデシケー タの中で室温になるまで冷まし、炉乾燥土と容器の質 量を計った。
- 5)質量を測定する試料を容器ごと再び水につけて,24時 間放置した。
- 6)以後,同じ作業の繰返しを 10 回続けた。また,早期 に破壊するものについては,土砂状になった時点で中 止した。

なお,3)において,岩石の吸水率 Wan を,以下の式(2) から求めた。

W_{an}= (M_{an}-M_{bn}) / (M_{bn}-M_c) ×100 (%)・・・(2)
 ここに、W_{an}:n回目の水浸後の吸水量、M_{an}:n回目の吸水量測定の際の水浸後の湿潤試料の重量、M_{bn}:n回目の
 炉乾燥後の乾燥試料の質量、M_c:容器の質量である。

また,NEXCO 試験法 111²⁰⁾では,スレーキングによる 岩石の形状変化について判定は求められていないが,本 研究では,地盤工学会の基準 JGS2124(岩石のスレーキ ング試験方法²¹⁾や JGS2125(岩石の促進スレーキング試 験方法)²²⁾を参考に,乾燥・水浸のサイクル毎に、図-3に準拠したスレーキング区分判定を行った。また,岩 石のスレーキングの進行を検証するため,浸水させた 24 時間後の水の pH および電気伝導度を併せて計測した。

5. X線回折分析及びスレーキング試験の結果

5.1 X線回折分析の結果

図-4及び表-3にX線回折分析の結果を示す。全般 的に含有鉱物は共通しており,粘土鉱物としては,石英, 長石類,イライト,緑泥石の割合が多い。この結果はArai and Chigira²³⁾の赤谷地区(図-1・図-2・写真-1 (a))周辺での破砕帯で無い母岩の調査結果と同様であ った。その他,熊野地区の岩石では,黄鉄鉱が検出され



図 4 石石武科(10武科)の人脉回折力析の和未

表-3 X線回折分析の結果。記号は相対的な含有量を示し、+++は多量、++は中程度、+は少量、(+)は微量に含有 すること、空白は検出されなかったことを表す。

		粘土鉱物	その他の鉱物					
地区名	岩種	イライト (雲母粘土鉱物)	緑泥石	石英	長石類	黄鉄鉱	赤鉄鉱	
赤谷	泥質岩	+	+	+++	++			
長殿	泥質岩	+	+	+++	+			
栗平	泥質岩	+	(+)	+++	++			
北股	泥質岩	+	+	+++	++			
北股	砂岩	+	+	+++	+++			
熊野	泥質岩	+	+	+++	+++	+		
清水	泥質岩	+	+	+++	++			
坪内	緑色凝灰岩	+	++	+++	+			
坪内	赤色凝灰岩	+	+	+++	+		+	
三越	泥質岩	++	+	+++	++			



(b)長殿地区

実験後

実験前

た。黄鉄鉱を含有すると酸化及び地下水と反応して硫酸 が発生することが知られている²⁴⁾。

5.2 スレーキング試験の結果

(a)赤谷地区

(c)栗平地区

実験後

実験前

写真-2に10試料で試験前と乾湿繰返しを10回行っ た後の試料の様子を示す。ただし、北股地区と坪内地区 は天然ダムが2種類の岩石で構成されていたため、それ ぞれについて試験をした。(a)赤谷地区,(c)栗平地区, (d) 北股地区(泥質岩), (g) 清水地区で試料に割れ目や表 面が崩れる等の変化が見られた。特に(g)清水地区につ いては、表面が崩れて粘土状になった。

表-4に乾湿繰り返しによるスレーキング区分の段階 変化を示す。スレーキング区分は最大でも段階2止まり であった。既往研究²⁵⁾⁻²⁷⁾では、地すべり地周辺のボー リングコアもしくは岩石を使ったスレーキング試験が実 施されたが、乾湿の繰り返しにより細粒化、もしくは土 砂化した事例も報告されており、本研究でスレーキング 試験を実施した岩石については、それらに比べるとスレ ーキングしにくい結果となった。北股地区(泥質岩)と清 水地区は他地区に比べて岩石の表面が崩れ始めるのが速 いことが分かった。

図-5に乾湿繰り返しによる吸水量の変化を示す。北 股地区(泥質岩)と清水地区では、繰り返し回数1回で吸 水割合が多くなり、その後も徐々に吸水割合が多くなっ た。この2地区については表-4でもスレーキング速度 が他地区より大きくなった。その他の地区については、 吸水割合に多少の差はあるが、いずれも繰り返し回数 1 回で吸水割合が大きくなり、それ以降はほぼ一定、もし くは多少の増加が見られる。全般的に、白亜系の泥質岩

表-4 スレーキング試験の繰り返し回数とスレーキング区分との関係。スレーキング区分の段階2以上について 赤文字で表示してある。

地区名 繰り返 回数	赤谷	長殿	栗平	北股 (泥質岩)	北股 (砂岩)	熊野	清水	坪内 (緑色 凝灰岩)	坪内 (赤色 凝灰岩)	三越
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
3	1	1	1	2	0	0	1	1	1	0
4	1	1	1	2	0	0	2	1	1	0
5	1	1	1	2	0	0	2	1	1	1
6	1	1	1	2	0	0	2	1	1	1
7	2	1	2	2	0	1	2	1	1	1
8	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1
9	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1
10	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1



図-5 乾湿繰り返しによる吸水率の変化。繰り返し回数0の吸水率は、実験前の岩石の初期含水率を示す。





(赤谷・長殿・栗平・北股・清水・坪内)においては, 繰り返し回数1回の吸水率と初期吸水率との比が3前後 となるような吸水率の変化が大きい試料ほどスレーキン グ区分が大きくなりやすい。一方,古第三系の泥質岩(熊 野・三越)においては,繰り返し回数1回の吸水率と初 期吸水率との比は3前後であるが,スレーキング区分が 顕著には大きくならない。

図-6に乾湿の繰り返し回数と岩石を水に浸してから 24時間後の水の pH の値の変化との関係を示す。三越地 区と熊野地区で pH3~4 で酸性となった。また,乾湿の 回数を重ねる毎に pH が下がった。このことは,表-4・ 図-5の結果と合わせると,乾湿を繰り返すことにより,



図-7 水浸 24 時間後の水の電気伝導率の変化。浸水開始時の電気伝導度とは加えた水の電気伝導度である。





写真-3 熊野地区の現地発生岩石を活用した鋼製枠堰堤(2021 年 2 月 16 日撮影)。(a)全景写真,(b)近接写真。 設置から約 9 年経つがスレーキングによる細粒化や土砂流出は見られない。

岩石表面と水との接触面積が増え,より多くの鉱物の溶 解が進行するようになったことが示唆される。硫酸塩・ 硫化物の含有は、白亜系の岩石(赤谷・長殿・栗平・北 股・清水・坪内)には認められず(図-4・表-3)、酸 化状況におかれる乾湿繰り返し試験でも酸性化には至ら なかった。一方、古第三系の泥質岩(熊野・三越)は、乾 湿繰り返し初期段階から pH が4程度と低い状況にあり、 さらに繰り返し回数が増えると酸性化する傾向があった。 熊野地区の岩石は X 線回折分析で黄鉄鉱が確認できた (図-4・表-3)。これは、海成泥岩に特有の硫化物で ある。三越地区の岩石は X 線回折分析で黄鉄鉱は検出限 界以下であるものの(図-4・表-3)、酸性を示した。

図-7に乾湿の繰り返し回数と岩石を水に浸してから 24時間後の水の電気伝導度の変化との関係を示す。熊野 地区と三越地区で電気伝導度が高く,熊野地区の方がよ り電気伝導度が高かった。図-6の pH の変化ではほぼ 熊野地区と三越地区で同程度の値であったことを考える と、これら2地区においては、pH と電気伝導度の相関性 は低かった。熊野地区の岩石は初期段階から高い電気伝 導度を維持するが、三越地区では図-5の吸水率の変化 も考慮すると、吸水率が徐々に増加するにつれて、水と 岩石の接触面積が増え、可溶塩が溶け出しやすくなり、 これにより電気伝導度が徐々に増加していったと考えられる。なお,熊野地区・三越地区以外の地区は電気伝導 度が低く,鉱物からのイオン溶出が少ないことが示唆される(図-7)。

5.3 実験結果を基にした考察

5.1, 5.2 から, スレーキングに対しては全ての地区で 耐性はあるものの,地区によっては相対的に強弱がある ことが分かった。相対的にスレーキングの耐性が小さい 地区では,将来的にスレーキングによって天然ダムを構 成する岩石が土砂化し,降雨等によって流出するおそれ があるため,注意が必要である。

その他,熊野地区では鋼製枠砂防堰堤(写真-3(a))に, 深層崩壊によって発生した岩石の一部が使用されている。 これらの中詰めの岩石は,工事完了から約9年経った 2021年2月現在でもスレーキングによると思われるひび 割れや細粒化,土砂流出等が生じていない(写真-3(b))。 表-4において,熊野地区は繰り返し回数10回時のス レーキング区分が段階1であり,スレーキング試験の結 果は妥当であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、2011年台風第12号によって発生した天

然ダムの長期のスレーキングに伴う安定性の低下に着目 し, 天然ダムを構成する岩石について X 線回折分析とス レーキング試験を行い, スレーキング特性を検証した。 得られた結果は以下の通りである。

Ermini et al.¹²⁾の成果を基にした,2011 年災害直後 の天然ダムの安定性評価の結果,赤谷・長殿・栗平・北 股・熊野の5地区の越流等に対する安定性は高いと判定 された。一方,実際には,2011 年の災害時及び災害後に 越流等により,天然ダム表層の土砂が何度も流出したこ とや,災害直後からの排水路工等の工事の効果もあり, DBIは5つの天然ダムには必ずしもそのまま適用できな いことが分かった。

スレーキング試験の結果からは,乾湿繰り返しにより, スレーキング区分で段階1~2 の破砕進行が確認された。 ただし,いずれの地区の岩石も10回の乾湿繰り返しで はスレーキング区分が段階2で終了しており,スレーキ ングに対する耐性が高いことが分かった。

スレーキング試験において,熊野地区と三越地区で鉱物からのイオン溶出に伴い,岩石を浸している水の酸性 化が見られた。特に熊野地区の岩石には,黄鉄鉱が検出 されており,水と接することで硫酸が生成された可能性 がある。硫酸を検出することは,スレーキング事象の早 期検知にも役立つと考えられる。

スレーキング特性には地区によって違いがあることが 分かった。今後の赤谷・長殿・栗平・北股・熊野の5地 区の天然ダムの安定性には、スレーキング特性によって 違いが出てくる可能性がある。また、対策工の検討にお いてもX線回折分析やスレーキング試験の結果を踏まえ るとより、適切な設計や対策工につながるものと考えら れる。今回の調査結果から、スレーキング特性の違いに よって天然ダムの侵食にどのような違いが生じるかを長 期的に調査するとともに、さらにこれらの特性の違いを 踏まえた天然ダムの安定性に関する調査・研究や効果的 な対策手法の検討を進めていきたい。

謝辞

本研究の遂行に当たっては,エイト日本技術開発(株) の海原荘一氏,只熊典子氏にデータ提供のご協力をいた だきました。また,編集委員と査読者からは貴重な助言 をいただきました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1)松村和樹・藤田正治・山田孝・権田豊・沼本晋也・堤大三・ 中谷加奈・今泉文寿・島田徹・海堀正博・鈴木浩二・徳永博・ 柏原佳明・長野英次・横山修・鈴木拓郎・武澤永純・大野亮 一・長山孝彦・池島剛・土屋智(2012):2011年9月台風12 号による紀伊半島で発生した土砂災害,砂防学会誌,Vol. 64, No. 5, pp. 43-53.
- 2)国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究 所(2013):平成23年(2011年)紀伊半島台風12号土砂災害 調査報告,国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法 人土木研究所,213p.
- 3) 国土交通省近畿地方整備局(2013): 2011 年紀伊半島大水害

国土交通省近畿地方整備局災害対応の記録,国土交通省近畿 地方整備局,199p.

- 4) Costa, J. E. and Schuster, R. L. (1988) : The formation and failure of natural dams, Geological Society of America Bulletin, Vol.100, pp.1054 - 1068.
- 5) 石塚忠範・梶昭仁・水山高久・吉野弘祐・西尾陽介・森田耕 司・山越隆雄(2016):現地映像資料にもとづくインドネシ ア・アンボン島天然ダム決壊洪水の発生過程,砂防学会誌, Vol. 69, No. 2, pp. 4-12.
- 6) 桜井亘・梶原修・大山誠・水山高久・池田暁彦・西尾陽介・ 徳永博・太田敬一・大塚康之(2014):平成24年9月台風17 号による河道閉塞対策施設の被災について~CCTV 画像を中 心とした侵食過程の解析~,砂防学会誌,Vol.66,No.5, pp.33-41.
- 7) 桜井亘・酒井良・奥山悠木・水山高久・池田暁彦・海原荘一・ 只熊典子・柏原佳明・吉野弘祐・小川内良人・龍見栄臣・島 田徹(2016):2014年8月台風11号時に河道閉塞で生じた侵 食・土砂流出と対策への影響,砂防学会誌, Vol. 68, No. 6, pp. 4-13.
- 8)千葉幹・森俊勇・内川龍男・水山高久・里深好文(2007):平 成18年台風14号により宮崎県耳川で発生した天然ダムの決 壊過程と天然ダムに対する警戒避難のあり方に関する提案, 砂防学会誌, Vol. 60, No. 1, pp. 43-47.
- 9)内田太郎・松岡暁・松本直樹・松田如水・秋山浩一・田村圭 司・一戸欣也(2009):天然ダムの越流侵食の実態:宮城県三 迫川沼倉裏沢地区の事例,砂防学会誌, Vol. 62, No. 3, pp. 23 -29.
- 10)加藤幸男・宮野貴・水山高久(2005):芋川流域における小 規模な河道閉塞(天然ダム)の決壊〔速報〕,砂防学会誌, Vol.
 57, No. 6, pp. 47-50.
- 11) Casagli, N. and Ermini, L. (1999) : Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine, Trans Jpn Geomorphol, Vol.20, No.3, pp.219 - 249.
- 12) Ermini, L. and Casagli, N. (2003) : Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index, Earth Surface Process and Landforms, Vol.28, pp.31 - 47.
- 13) Korup, O. (2004) : Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams, Eng Geol, Vol.73, No.1-2, pp.13 35.
- 14) Dong, J. J., Tung, Y. H., Chen, C. C., Liao, J. J. and Pan, Y. W.
 (2011) : Logistic regression model for predicting the failure probability of a landslide dam, Eng Geol, Vol.117, No.1-2, pp.52 61.
- 15) Shan, Y., Chen, S. and Zhong, Q. (2020) : Rapid prediction of landslide dam stability using the logistic regression method, Landslides, Vol.17, pp.2931 - 2956.
- 16) 王功輝・黄潤秋・釜井俊孝・張帆宇(2012):長距離運動地 すべりにより形成された地すべりダムの内部構造と安定性 について-2008 年四川大地震時に発生した天池地すべりダ ムを例として-,日本地すべり学会誌, Vol. 49, No. 4, pp. 34 -43.
- 17) Kiyota, T., Sattar, A., Konagai, K., Kazmi, Z. A., Okuno, D. and Ikeda, T. (2011) : Breaching failure of a huge landslide dam formed by the 2005 Kashmir Earthquake, Soils and Foundations,

Vol.51, No.6, pp.1179 - 1190.

- 18) 気象庁(2011): 平成 23 年台風第 12 号による 8 月 30 日から 9月5日にかけての大雨と暴風, 災害時気象速報, 79p.
- 19) 横山修・内田太郎・木下篤彦(2016):決壊までの継続時間 からみた天然ダムの分類,砂防学会誌, Vol. 68, No. 6, pp. 14 -23.
- 20) 高速道路総合技術研究所(2017):「乾湿繰返しによる岩石の吸水率試験方法(NEXC0 試験法 111)」. NEXC0 試験方法第
 1 編 土質関係試験方法, pp. 48-51.
- 21) 地盤工学会(2009):地盤工学会基準「岩石のスレーキング 試験方法」(JGS2124-2009).地盤材料試験の方法と解説, pp. 285-287.
- 22) 地盤工学会(2009):地盤工学会基準「岩石の促進スレー キング試験方法」(JGS2125-2009).地盤材料試験の方法と 解説, pp. 287-289.
- 23) Arai, N. and Chigira, M. (2018) : Rain-induced deep-seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan, Island Arc.2018;e12245.
- 24)丸山清輝・武士俊也(2004):中栗地すべりにおける鮮新世
 泥岩の化学的風化,日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 4, pp. 375-384.
- 25) 森屋洋・阿部真郎・檜垣大助(2008):新第三系硬質泥岩層 地すべりのボーリングコアおよび露頭観察による移動地塊 の破砕に関する考察,日本地すべり学会誌, Vol. 45, No. 4, pp. 53-60.
- 26)前田寛之・河野勝宣・長谷部賀宣・澤野宏樹・桧垣駿介 (2014):グリーンタフ地域の硬質頁岩卓越層を基岩とする流 れ盤型地すべりの地質的特徴,日本地すべり学会誌, Vol.51, No.3, pp.81-89.
- 27) 三田地利之・藤澤久子・和智真太郎・大河原正文・工藤豊 (2003):神居古潭帯に分布する蛇紋岩の不攪乱状態および再 構成粘性土試料の力学特性,日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 4, pp. 293-301.

2011 年紀伊半島大水害で深層崩壊により発生した河道閉塞箇所の監視・観測手法

木下 篤彦 1), 北本 楽 2), 山越 隆雄 3), 中谷 洋明 4), 海原 荘一 5), 荒木 義則 6)

¹⁾ 国土交通省国土技術政策総合研究所(近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター) (〒649-5302 和歌山 県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6, E-mail: kinoshita-a92wq@mlit.go.jp)

²⁾ 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市 野々3027-6, E-mail: kitamoto-g8910@mlit.go.jp)

³⁾ 国土交通省国土技術政策総合研究所(〒305-0804茨城県つくば市旭1, E-mail: yamakoshi-t925h@mlit.go.jp)

⁴⁾ 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1, E-mail: nakaya-h24z@mlit.go.jp)

⁵⁾株式会社エイト日本技術開発(〒700-8617岡山市北区津島京町3丁目1-21, E-mail: kaihara-so@ej-hds.co.jp)

⁶⁾ 中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8510 広島市南区出汐 2 丁目 3-30, E-mail: araki@cecnet.co.jp)

概要

2011年9月の台風第12号では、紀伊半島を中心に広い範囲で土砂災害が発生し、72箇所で深層崩壊が発生し、17箇所で河道閉塞(天然ダム)が発生した。河道閉塞箇所では、まとまった降雨により、天然ダム上流の湛水池の水位が上昇し、越流すると、侵食により多量の土砂と水が流出し下流域に被害が及ぶおそれがあった。このため、災害直後から湛水池の水位を観測するとともに、水位予測システムを構築・運用している。本稿では、これらの観測・予測システムの概要を紹介する。また、近年新たに開始したドローンによる、天然ダムの変状調査についても紹介する。

キーワード:深層崩壊,河道閉塞,天然ダム,水位,ドローン

1. はじめに

2011 年 8 月下旬に発生した台風第 12 号では, 奈 良・和歌山・三重の3県を中心に大規模な土砂災害 が発生した。特に,72箇所で深層崩壊と呼ばれる崩 壊面積 1ha を超える大規模な崩壊が発生し、その うち、17 箇所で河道閉塞(「天然ダム」とも言う) が発生した(Fig.1・2)¹⁾⁻³⁾。河道閉塞箇所では,河道 が堰き止められ、湛水池と呼ばれる湖が発生した。 河道閉塞箇所では,その後の梅雨期や台風時のまと まった雨により湛水池の水位が上昇し,河道閉塞部 の高さを超えて越流すると,河道閉塞の侵食と湛水 池に溜まった水が一気に流出し,下流域に大きな被 害を与える可能性があった⁴⁾。日本国内における既 往事例 5)-9)では、越流による河道閉塞部の侵食が報 告されており、河道閉塞発生後は、長期に亘り、湛 水池の水位を監視する必要があった。また,豪雨時 などにより越流の恐れがある場合は, 行政は土砂災 害防止法に基づいて下流域の住民に避難を促す必 要があった。

本稿では,2011年の災害直後に構築した河道閉 塞部の湛水池の水位の観測システム及び水位予測 手法について紹介する。また,2年前から始めたド ローンによる天然ダムの変状に関する調査方法等 についても紹介する。

2. 紀伊半島大水害の概要と監視・観測対象地

2.1 紀伊半島大水害の概要

2011 年 8 月 25 日 9 時にマリアナ諸島の西海上 で発生した台風第 12 号は,発達しながらゆっくり とした速さで北上し,30 日に小笠原諸島付近に達 し,大型で強い台風となった。台風が大型でさらに 動きが遅かったため,長時間にわたって台風周辺の 非常に湿った空気が流れ込み,西日本から北日本に かけて,山沿いを中心に広い範囲で記録的な大雨と なった。8月 30 日 17 時から 9 月 5 日 24 時までの 総降水量は,紀伊半島を中心に広い範囲で 1,000mmを超え,紀伊半島の一部の地域では解析 雨量で 2,000mmを超えた¹⁰。

6日間続いた台風第12号による降雨の影響で地 盤がゆるみ,紀伊半島各地で土石流,地すべり,が け崩れ等の土砂災害が発生した。奈良県・和歌山県・ 三重県において航空写真判読等により崩壊箇所を 読み取ったところは約3,000箇所にのぼり,崩壊 土砂の総量は約1億m³と推定された。^{2)·3)}。

2.2 監視・観測対象地の概要

Fig.1に2011年台風第12号による河道閉塞発生箇 所一覧を示す。本稿では,Fig.1に示す17箇所の河 道閉塞箇所のうち,8箇所を対象とする。8箇所の 深層崩壊発生直後の状況はFig.2の通りである。地 質は四万十帯白亜系の日高川層群,古第三系音無川 層群,牟婁層群が分布し,さらに,断層によりいく つかのユニットに細分されている。各地区の地質や 主な構成岩種は付加体と呼ばれる堆積岩であり,最 北部に位置する坪内地区は日高川層群花園層に属 し,赤色凝灰岩や凝灰質角礫岩からなる塩基性岩類, 頁岩層から,北股地区は日高川層群湯川層で,主に チャート,緑色岩類,砂岩・砂岩頁岩互層から構成 されている。清水地区,赤谷地区,長殿地区,栗平 地区は日高川層群美山層に属し,主にチャート,緑 色岩類,砂岩・砂岩頁岩互層から,三越地区は古第 三系音無川層群羽六層,熊野地区は牟婁層群中部・ 下部層に属し,主に砂岩泥岩互層,礫岩層から構成 されている。



Fig.1 2011 年台風第 12 号による河道閉塞発生箇所(17 箇所)一覧(地理院地図色別標高図に追記)。 白丸箇 所は国土交通省の直轄砂防事業の対象地区,灰色の丸印の箇所は対象外の地区である。なお,坪内地 区は地区内にある 3 箇所のうち 1 箇所が直轄砂防事業の対象である。



Fig.2 本稿で対象とする河道閉塞箇所。(a)赤谷地区(奈良県五條市),(b)長殿地区(奈良県十津川村),(c)栗平地区(奈良県十津 川村),(d)北股地区(奈良県野迫川村),(e)熊野地区(和歌山県田辺市),(f)清水地区(奈良県五條市),(g)坪内地区(奈良県 天川村),(h)三越地区(和歌山県田辺市)。撮影は全て災害2日後の2011年9月6日に行った。河道付近の矢印は流向 を示す。

災害から約 10 年間の天然ダムの状況

Table 1 に調査対象とした河道閉塞部の 2011 年の 災害直後から現在までの状況を示す。赤谷地区は, 災害直後より、砂防工事により発生した土砂で、湛 水池を埋め立てている。また、ほぼ毎年数回程度越 流している状況である。赤谷地区の河道閉塞部につ いては,砂防工事の効果もあり,この10年間大きな 侵食は発生していない。長殿地区は, 2度ほどあと あるが,2021年3月までの約10年間に越流は発生よる大規模な侵食は発生していない。

しておらず,安定している(Fig.3)。栗平地区は,災 害以降,台風等の豪雨の度に越流が発生し5)・6),河 道閉塞部の高さは当初の約 100m から 2021 年 3 月 現在で約 62m まで約 38m 低くなっている(Fig.4)。 北股地区は、災害直後に砂防工事により湛水池を埋 め立てており、それ以降、越流等による大規模な侵 食は発生しておらず,2021年3月までの約10年間, 安定している。熊野地区も北股地区同様,2011年の 災害直後に砂防工事により湛水池を埋め立てており, 数 m で満水になるところまで水位上昇したことは それ以降, 2021 年 3 月までの約 10 年間, 越流等に

地区名	災害直後の天然 ダムの高さ(m)	災害直後の天然ダ ムの体積(×10 ⁶ m ³)	集水面積 (×10 ⁶ m ²)	天然ダム発生直後から現在(2021 年 12 月)までの状況
赤谷	85	6.9	13.2	 ・災害時に、越流等により河道閉塞部が侵食され、土砂流出が発生した。 ・工事により発生した土砂で湛水池を埋め立てている。 ・毎年台風等の豪雨で越流が発生し、河道閉塞部表層の土砂が流出している。
長殿	80	2.9	4.5	 ・災害時に、越流等により河道閉塞部が侵食され、土砂流出が発生した。 ・今まで2度ほど満水に近い水位となったことがあるが、これまで約10年間 越流していない。
栗平	100	12.4	8.7	 ・災害時に、越流等により河道閉塞部が侵食され、土砂流出が発生した。 ・過去何度も越流が発生し、河道閉塞部表層の土砂流出により、天然ダムの 高さは約10年間で約38m低くなっている。
北股	25	0.3	0.4	 ・災害時に、越流等により河道閉塞部が侵食され、土砂流出が発生した。 ・2011年の災害直後に工事により湛水池を埋め立てており、その後約10年間 大規模な侵食はない。
熊野	60	2.4	1.2	 ・災害時に、越流等により河道閉塞部が侵食され、土砂流出が発生した。 ・2011年の災害直後に工事により湛水池を埋め立てており、その後約10年間 大規模な侵食はない。
清水	不明	不明	$218.5^{11)}$	・河道閉塞発生約1.5時間後に越流によりほぼ流失した11)。
坪内	不明	不明	$107.5^{11)}$	・河道閉塞発生約3時間後に越流によりほぼ流失した11)。
三越	不明	不明	$23.1^{11)}$	・河道閉塞発生約3時間後に越流によりほぼ流失した11)。

Table 1 各地区の河道閉塞の規模と現在まで





Fig.3 災害から約8年後の長殿地区の河道閉塞部の様子(2019年11月28日撮影)。(a)排水路工,(b)河道閉塞下流側の 排水路工。矢印は流向を示す。





Fig.4 災害から約7年後の栗平地区の様子(2018年9月11日撮影)。(a)崩壊斜面・河道・湛水池,(b)河道の侵食状 況。河道付近の矢印は流向を示す。

4. 河道閉塞箇所の監視・観測と水位の予測

4.1 河道閉塞部における監視・観測の概要

河道閉塞が発生した箇所では,越流により侵食さ れた土砂と湛水池の水が多量に流出することによ り下流で被害が生じるおそれがあり,自治体への土 砂災害防止法上の土砂災害緊急情報の提供にあた り,湛水池の水位を把握するための監視・観測を実 施している。

紀伊半島大水害で発生した河道閉塞箇所のうち, 直轄砂防事業の対象箇所における河道閉塞部にお ける主な監視・観測機器とその目的を Table 2 に, Fig.5 に概念図を示す。また,それらの主な監視・ 観測機器の写真を Fig.6 に示す。

2011 年の紀伊半島大水害の場合は,災害発生直 後から湛水池の水位を計測するとともに,水位予測 システムの構築が検討された。河道閉塞箇所は山間 部であることから,現地での観測機器の設置が困難 であったため,当初はヘリコプターから衛星携帯通 信機を搭載してバッテリで3ヶ月動作可能な土研 式投下型水位観測ブイ(Fig.6(a)(b))¹²⁾を,欠測防止 のため複数基設置して水位を計測した。また, CCTV (Fig.6(g))も早期に設置され,地元自治体に も監視映像を提供した他,斜面崩壊センサーやワイ ヤーセンサー(Fig.6(h))等の河道閉塞部の著しい侵 食を検知するための機器も設置された。投下型水位 観測ブイを設置した箇所は,湛水池の規模の大きか った赤谷・長殿・栗平・熊野の4地区であった¹²⁾。 なお,比較的アプローチの良い北股地区については 水圧式の水位計を設置した。

その後,熊野地区の2箇所の湛水池と,北股地区 の湛水池は土砂で埋める工事が早期に完了したた め,赤谷・長殿・栗平の3地区で水位計測が継続さ れたが,その後,工事用道路が完成したため,赤谷・ 長殿・栗平の3地区では,より安定的に水位計測が しやすい一般的な水圧式の水位計(Fig.6(c))や雨量 計等(Fig.6(i))を設置した。

観測機器	監視・観測目的				
雨量計	雨量の把握				
湛水池水位計	湛水池水位の把握(水位予測の条件)				
CCTV/Web カメラ	崩壊計画の状況把握				
ワイヤーセンサー	河道閉塞部の越流や土砂流出の検知				
湛水池上流水位計	河道閉塞部の地下水位の変動の把握 湛水池流入量の把握水位予測精度の向上)				
河道閉塞部几内水位計	漏水量の把握(水位予測精度の向上)				
湧水量計測	河道閉塞部下流の湧水量の把握 (水位予測精度の向上)				

Table 2 河道閉塞周辺に設置した観測機器とその観測目的



Fig.5 河道閉塞部の監視・観測機器配置の概念図



Fig.6 河道閉塞部に設置されている監視・観測機器、(a)土研式投下型ブイ、(b)その投入状況、(a)湛水池水位計、(d)河道閉塞上流水位計、(a)その流量計測 状況、(b)孔内水位計、(g)CCTV、(h)ワイヤーセンサー、(i)雨量計及び衛星通言機

なお,監視カメラや衛星携帯通信機(Fig.6(h))を除く 水文観測機器はソーラーパネルで動作するものを, 通信機については携帯電話通信機を,携帯電話通信 エリア外では衛星携帯通信機(Fig.6(i))を採用した。 さらに,湛水池の水位予測精度向上のための水文デ ータ取得等のため,2012年より河道閉塞部の地質調 査用のボーリング孔を活用した孔内水位計測 (Fig.6(f))や湛水池上流の水位計測(Fig.6(d)),河道閉 塞部の下流での湧水量計測を実施し,低水時の湛水 池上流の水位計測(Fig.6(e))に基づく河道閉塞部の 透水係数とダルシー則に基づく水収支を把握¹³⁾⁻¹⁴⁾ している。

赤谷地区については、2012 年 6 月の再崩壊によ りをボーリング孔内水位計が使用不可能となり、栗 平地区については、2014 年 8 月の台風第 11 号によ り,堤体が約 17m 侵食され、ボーリング孔も流失し、 それ以降、堤体での地下水位が観測不能となってい る。

4.2 河道閉塞部の水位予測

河道閉塞部の越流は前述の水位計による水位観 測結果と、72時間先までの予測雨量に基づき、流 出解析法の1つである貯留関数法による湛水池へ の流入量予測に漏水量の予測値を加味して湛水池 の深浅測量結果から作成した湛水池の水位一容量 曲線に基づいて、水位予測を行っている。また、 越流の可能性が生じた場合など、必要に応じて地 元自治体に情報提供を行っている。なお、貯留関 数法のパラメータについては、過去の河道閉塞部 の水文データで調整を行っている。

上記の予測雨量や水位予測の情報は, Fig.7 に示 す紀伊山系砂防事務所降雨状況通知システムで運 用されており,利便性の向上や,予測精度の向上を 目指してさらなる改良が進められている。



Fig.7 紀伊山系砂防事務所降雨状況通知システム



(b) (a) と同じ箇所でのサーモグラフィー 10°C

Fig.8 長殿地区の河道閉塞部下流側でのドローンによる調査、(a)空中写真、(b)サーモグラフィー映像(撮影日は2021年9月29日)

5. 最新の天然ダムの監視・観測手法

大規模土砂災害対策技術センターでは,最新の河道 閉塞箇所の監視手法として,ドローンによる空中写真 の撮影やサーモグラフィーの撮影を行っている。Fig.8 に 2021 年 9 月に長殿地区の天然ダム下流側で実施し た空中写真とサーモグラフィーを示す。ドローンによ る空中写真,サーモグラフィー撮影時は 2021 年 9 月 29 の 13:00~15:00 に行い,直前 3 日間は無降雨であ った。この結果からは,漏水等による変形は見られず, 河道閉塞部は安定していることが分かった。

このドローンによる調査の他にも新たな監視手法として CCTV 映像による輝度差分値による崩壊検知手法¹⁵が検討されている。

また、本稿では主に河道閉塞発生後の監視・観測手 法について紹介したが、河道閉塞の原因となる深層崩 壊発生の発生降雨条件の検討¹⁶⁾⁻¹⁷⁾による発生危険度 評価や合成開ロレーダ(SAR)画像による河道閉塞箇所 の判読¹⁸⁾⁻¹⁹⁾、河川流量データを用いた河道閉塞の検知 方法²⁰⁾、高感度地震観測網の地盤振動を活用した大規 模土砂移動検知システム²¹⁾などの広域を対象とした 大規模な土砂移動や河道閉塞の早期発見のための検知 技術も多数研究・開発されており、また、特定箇所の 深層崩壊の発生危険度の把握を目的とした地下水の電 気伝導度による湧水センサー²²⁾も開発されていること から、今後はこれらを組み合わせることで、より高度 な監視を行うこととなると考えられる。

6. おわりに

本稿では多数の河道閉塞が生じた 2011 年の紀伊半 島大水害の災害直後からの河道閉塞部の状況や水位観 測・予測システム,最新のドローンによる調査につい て紹介した。深層崩壊により河道閉塞が生じた場合, その影響は長く続くおそれがあり,今後同様な災害が 発生した時に,本稿で紹介した観測・調査方法が役立 てば幸いである。

参考文献

- 松村和樹,藤田正治,山田孝,権田豊,沼本晋也,堤大三,中谷 加奈,今泉文寿,島田徹,海堀正博,鈴木浩二,徳永博,柏原佳 明,長野英次,横山修,鈴木拓郎,武澤永純,大野亮一,長山孝 彦,池島剛,土屋智:2011年9月台風12号による紀伊半島で 発生した土砂災害,砂防学会誌,Vol.64, No.5, pp.43-53 (2012)
- 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所: 平成23年(2011年)紀伊半島台風12号土砂災害調査報告,国土 交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所, 213p(2013)
- 国土交通省近畿地方整備局:2011年紀伊半島大水害国土交通 省近畿地方整備局災害対応の記録,国土交通省近畿地方整備局, 199p (2013)
- J.E. Costa and R.L. Schuster: The formation and failure of natural dams, Geological Society of America Bulletin, Vol.100, pp.1054 - 1068 (1988)

- 5) 桜井亘,梶原修,大山誠,水山高久,池田暁彦,西尾陽介,徳永 博,太田敬一,大塚康之:平成24年9月台風17号による河道 閉塞対策施設の被災について~CCTV 画像を中心とした侵食 過程の解析~,砂防学会誌,Vol.66,No.5,pp.33-41 (2014)
- 6) 桜井亘,酒井良,奥山悠木,水山高久,池田暁彦,海原荘一,只 熊典子,柏原佳明,吉野弘祐,小川内良人,龍見栄臣,島田徹: 2014年8月台風11号時に河道閉塞で生じた侵食・土砂流出と 対策への影響,砂防学会誌,Vol.68, No.6, pp.4-13 (2016)
- 7) 千葉幹,森俊勇,内川龍男,水山高久,里深好文:平成18年台風14号により宮崎県耳川で発生した天然ダムの決壊過程と天然ダムに対する警戒避難のあり方に関する提案,砂防学会誌, Vol.60, No.1, pp.43-47 (2007)
- 内田太郎,松岡暁,松本直樹,松田如水,秋山浩一,田村圭司, 一戸欣也: 天然ダムの越流侵食の実態:宮城県三迫川沼倉裏沢 地区の事例,砂防学会誌, Vol.62, No.3, pp. 23-29 (2009)
- 9) 加藤幸男,宮野貴,水山高久:天然ダムの越流侵食の実態:芋川 流域における小規模な河道閉塞(天然ダム)の決壊〔速報〕,砂防 学会誌,Vol. 57, No.6, pp.47-50 (2005)
- 10) 気象庁: 天平成 23 年台風第 12 号による 8 月 30 日から 9 月 5
 日にかけての大雨と暴風,災害時気象速報, 79p (2011)
- 11) 横山修, 内田太郎, 木下篤彦: 決壊までの継続時間からみた天然 ダムの分類, 砂防学会誌, Vol. 68, No.6, pp. 14-23 (2016)
- 12)山越隆雄,石塚忠範,伊藤洋輔,大坂誠一・中込淳:2011年台風12号による紀伊半島における天然ダム災害への投下型水位観測ブイの適用事例について,砂防学会誌,Vol.65,No.5,pp.45-49(2013)
- 13)秋山怜子,藤村直樹,石塚忠範,内田太郎,桜井亘,酒井良,海 原荘一,只熊典子:天然ダムの水位予測に漏水量が与える影響, 砂防学会誌, Vol.67, No.4, pp.31-37(2014)
- 14) S. KAIHARA, N. TADAKUMA, Y. FUJIWARA, W. SAKURAI, M. OYAMA and R. SAKAI : Landslide dam hydrological observation and hydrological balance calculation procedures, Extended Abstracts of the INTERPRAEVENT 2014 in Pacific Rim, pp.140-141 (2014).
- 15) 柴田俊,小竹利明,山田拓,木下篤彦,中谷洋明,金澤瑛,海原 荘一,井深真治:輝度の差分映像による斜面崩壊・土石流の検 知と降雨・夜間の監視映像の鮮明化,第10回土砂災害に関する シンポジウム論文集,pp.79-84(2020)
- 16) 内田太郎・岡本敦:深層崩壊を引き起こした降雨の特徴,土木 技術資料, Vol.54, No.11, p.32-35(2012)
- 17) 坂井佑介・内田太郎・林幸一郎・北原哲郎・永井愛:崩壊規模と 降雨条件の関係分析による深層崩壊発生要因の考察, 2019 年度 砂防学会研究発表会概要集, p.219-220(2019)
- 18)水野正樹,神山嬢子,江川真史,佐藤匠,蒲原潤一:単偏波の高 分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所の判読調査手法(案),国土 技術政策総合研究所資料,第 760 号, 30p(2013)
- 19)水野正樹,神山嬢子,江川真史,佐藤匠,蒲原潤一:2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法(案), 国土技術政策総合研究所資料,第791号,32p(2014)
- 20)蒲原潤一・内田太郎・丹羽諭:流量観測データを用いた河道閉塞 (天然ダム形成)覚知に関するデータの整理・分析の手引き,国土 技術政策総合研究所資料,第767号,45 p(2013)
- 21)海原荘一,浅原裕,木下篤彦,中谷洋明,田中健貴:高感度地 震観測網による大規模土砂移動発生時の地盤振動特性と検知, 砂防学会誌, Vol. 73, No.5, pp. 27-37 (2021)
- 22)地頭薗隆・石塚忠範・ 能和幸範・柳町年輝:深層崩壊警戒対応 の湧水センサーの開発,砂防学会誌, Vol.66, No.5, p.49-52, 2014

地質境界による浅層地下水位上昇の浸透流解析を用いた考察 ~2011年台風第12号時における那智川流域の事例~

Effect of geologic boundary on uplift shallow ground water level in Nachi gawa river basin: A seepage flow analysis

田中健貴 Yasutaka Tanaka / 北海道大学広域複合災害研究センター Center for Natural Hazards Research, Hokkaido University

木下篤彦 Atsuhiko Kinoshita / 国土交通省国土技術政策総合研究所 National Institute for Land and Infrastructure Management

国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター Sediment Disaster Prevention Technology Center

小竹利明 Toshiaki Kotake/国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター Sediment Disaster Prevention Technology Center

柴田 俊 Suguru Shibata / 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター Sediment Disaster Prevention Technology Center

山田 拓 Taku Yamada / 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター Sediment Disaster Prevention Technology Center

松澤 真 Makoto Matsuzawa / 公益財団法人 深田地質研究所 Fukada Geological Institute

伊藤達哉 Tatsuya Itou / パシフィックコンサルタンツ株式会社 PACIFIC CONSULTANTS CO., LTD.

キーワード:表層崩壊, 電気探査, テンシオメータ, 地質境界, 浸透流解析 Key words: Shallow landslide, Electrical prospecting, Tensiometer, Geologic boundary, Seepage flow analysis

1. はじめに

2011 年台風第 12 号によって,和歌山県東牟婁郡那智 勝浦町を流れる那智川流域では,表層崩壊が多発し,下 流域に甚大な被害をもたらした¹⁾。表層崩壊による被害 を防ぐためには,表層崩壊が発生するおそれのある斜面 (以後,危険斜面)を抽出する必要がある。

那智川流域で発生した表層崩壊は、斜面下部に位置す る熊野層群(泥岩)と斜面上部に位置する熊野酸性岩(花 崗斑岩)の地質境界周辺で多数発生したことが指摘され てきた。例えば、柳井・笠井(2020)²⁾は地質境界から100m 以内で表層崩壊の発生が比較的多いことを指摘しており, その要因として地質境界による地下水位上昇が考えられ てきた。実際、那智川流域では地表と地質境界の接点に 湧水が多く見られる³⁾。湧水は地質境界によって集中し た地下水の選択的な流れ(以後,選択流)の出口と考えら れ、地質境界が地下水の流れに影響を与えている可能性 がある^{4),5)}。榎原ら(2018)⁶⁾は那智川流域において地 下水位観測を行い、地質境界よりも上部に位置する花崗 斑岩の範囲では地下水位が降雨に反応して上昇しやすい 傾向があると指摘した。さらに, 榎原ら(2019)⁷⁾はテン シオメータによる観測から、降雨規模の大きなイベント では地質境界に沿った地下水の流れによって、地下水位 が上昇している可能性を示した。

※ 連絡著者/ Corresponding author

```
〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目
```

Kita 9, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, Japan, 060-8589

以上から,那智川流域で2011年台風第12号時に発生 した表層崩壊は,地質境界による地下水位上昇によって 発生した可能性が考えられる。これが検証できれば,地 質境界を那智川流域において危険斜面を抽出するための 指標とすることが出来る。しかしながら,那智川流域に おいて表層崩壊が発生した際の地下水位上昇に,地質境 界の有無が与えた詳細な影響は明らかになっていない。 地質境界を危険斜面抽出の指標とするためには,表層崩 壊発生時に地質境界によって表層崩壊の崩壊深程度の地 下水位(以後,浅層地下水位)が上昇するプロセスを明ら かにする必要がある。そこで本報告では,地下水位上昇 に地質境界が与えた影響を,飽和-不飽和浸透流解析によ って明らかにした。

2. 調査地と解析モデル

2.1 調査地

調査地は,那智川支川平野川流域内の斜面である(図-1)。当該流域では,2011年台風第12号で崩壊深1-3m程 度の表層崩壊が多発した。観測箇所近傍の崩壊地は,地 質境界に沿って連続しており,調査対象斜面の周辺にお いても,地質境界が表層崩壊発生に影響を与えた可能性 が示唆される。

那智川流域は、下位に泥岩で構成される熊野層群が、 上位に花崗斑岩で構成される熊野酸性岩が分布する。花 崗斑岩は風化部(概ね CL 級)と新鮮部(概ね CM 級)か らなり、風化部の鉛直方向の厚さは、ボーリング地点で 約10mである。泥岩は、風化部(CL 級)は薄く数m以下で、 CM 級主体と推定される。ボーリング孔で観測された地下水



図-1 調査地と観測箇所(等高線間隔1.0m) 標高 TH-1:244.9m, TH-2:234.6m, TH-3:228.5m



位は,花崗斑岩基底部と泥岩岩盤中において常時地下水位 が観測される。花崗斑岩不飽和帯では大きな雨の時に、一 時的に飽和水体が見られる⁸⁾。観測は図-1に示す箇所でテ ンシオメータ,土壤水分計を用いて浅層地下水位を測定 した。TH-1は花崗斑岩領域,TH-2は地質境界付近,TH-3 は泥岩領域に設置した。埋設深度はテンシオメータが 0.4m,土壤水分計が0.8mであり,観測期間は2019年2 月から2019年12月である。榎原ら(2019)はこれらの 観測機器およびボーリング孔を用いた地下水位観測から, 地質境界によって山体の深い領域,浅い領域ともに地下 水位の上昇が見られ,このことが平成23年台風第12号 による表層崩壊発生に寄与したと指摘している。



2.2 地質特性

対象斜面は、花崗斑岩の風化が進み、緩い傾斜の亀裂 が発達するという特徴がある⁸⁾。表層は表土または崖錐 堆積物が分布し、TH-1~TH-3 設置部の表土厚さは0.7~ 0.85m である。

対象斜面における花崗斑岩と泥岩の分布を推定するた め電気探査を実施した。電気探査の探査測線は測線長80m, 最大探査深度 40m, 電極間隔 1m である (図-1)。電気探 査の結果を図-2に示す。電極配列は二極法とし、逆解析 により結果を得た。斜面下部には 300Ω・m 以下の低比 抵抗帯が分布し、斜面上部は1200Ω・m以上の高比抵抗 帯が分布した。また、斜面表層には比抵抗 600~1200Ω・ m 程度の比抵抗帯が薄く分布し、斜面上部にいくにつれ て消失している。既往研究で実施された地質調査⁸⁾と合 わせて考えると、低比抵抗帯には熊野層群の泥岩、高比 抵抗帯は花崗斑岩が分布すると考えられる。比抵抗分布 から、当該斜面では泥岩で構成される難透水層の熊野層 群と花崗斑岩の地質境界は見かけ20°程度の受け盤を形 成していると考えられる。これは、図-1に示す箇所で実 施したボーリング調査の結果とも整合的である。また, 表層部で見られる中程度の比抵抗帯は表層土層に相当す ると考えられる。斜面上部へいくにつれ、比抵抗がより 大きくなっているが、これは露岩が多く分布する状況を 反映していると考えられる。

2.3 モデル断面の設定

有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析プログラム を用いて非定常浸透流解析を行った。使用したソルバー はソースコードが公開されている Dtransu-2D・EL である。 図-3 に解析断面図全体を,図-4 に拡大図を示す。地形モ デルは,実斜面に設置された TH-1, TH-2, TH-3 および 電気探査実施位置を通るように断面を設定した。実斜面 とモデル斜面を区別するため,モデル上では TH-1, TH-2, TH-3 が設置された箇所を th-1, th-2, th-3 とする。斜 面下方は沢底部までとし,斜面上部は実際の集水範囲を



浅層地下水位観測範囲を拡大した要素分割 図-4

考慮し、尾根の伸長方向に合わせて断面線を屈曲させる ように設定した。なお、実際の地形形状を基本としつつ、 電気探査の地形断面形状基に微細な凹凸は平準化してい る。地質モデルは、電気探査結果断面図の比抵抗構造を 基に地質構造を推定したうえで、既往ボーリング調査結 果⁹⁾, TH-1, TH-2, TH-3 設置時の土検棒調査結果を基 に、地層を5区分(①表土または崖錐堆積物、②風化花 崗斑岩, ③花崗斑岩, ④風化泥岩, ⑤泥岩)した。地層境 界は、電気探査、ボーリング調査を基に、20°の受け盤 と設定した。また、流向が急変すると考えられる地質境 界付近を中心に要素分割を細分した。最小要素サイズは 約0.2m, 最大要素サイズは2.0m であり, 総節点数17738, 総要素数 34714 である。なお、降雨が与えるモデル表面 のうち,斜面下部は固定水頭境界,斜面中部から上方ま では地下水涵養境界とした(図-3)。その他のモデル側面 及び基底部は不透水境界とした。また,解析実施期間前1 年間の日平均降雨量を与える非定常解析を行い、初期水 位を設定した。

2.4 解析方法とパラメータの設定

パラメータはボーリング調査時の湧水圧試験、土質試 験,次節に示す 2019 年台風第 19,20,21 号を対象とし た浸透流解析から設定した。今回は、豪雨時の表層土層 不飽和領域における水分変化に注目するため、不飽和領 域を含めた解析を行う。不飽和領域における浸透流の基 礎方程式は、Richards 式に基づき、下式で表現される。

$$\frac{\partial\theta}{\partial\psi}\frac{\partial\psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_x(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial z}\right) + \frac{\partial k_z(\psi)}{\partial z} \tag{1}$$

θ:体積含水率, ψ: 圧力水頭, kx(ψ): 水平方向の透水係数, kz(w): 鉛直方向の透水係数

 $\partial \theta / \partial \psi$ は比水分容量 C としても示され、 ψ に対する θ の変化率を表す。ここで現地採取試料を用いた保水試験, および観測データから得られた θ および ψ について, van Genuchten(1980)⁹⁾に従い,次に示す式(2),(3)からθ-ψ曲 線の近似式を求めた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (|\alpha\psi|)^{\beta}}\right)^{\gamma}$$
(2)

$$\gamma = 1 - \frac{1}{\beta} \tag{3}$$

 S_e :有効飽和度, θ : 体積含水率, θ_s :飽和体積含水率, $\theta_r: 残留体積含水率, \alpha, \beta, \gamma: 土壌固有のパラメータ$

式(2)を展開すると次に示す式(4)が得られ、θとψの関 係を示すことが出来ていることが分かる。

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha \psi)^\beta \right]^{-\gamma} \tag{4}$$

また、不飽和領域で浸透流解析を行うには、不飽和浸 透係数が必要である。そこで不飽和透水係数を得るため に, Mualem(1976)¹⁰⁾の提案したモデルに水分特性曲線モ デルを代入することで飽和透水係数と不飽和透水係数の 比である比透水係数を推定した。比透水係数の推定はθお よびψとの関係から式(5),(6)によって行った。

$$k_r = S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{\gamma}})^{\gamma}]^2$$
(5)

 $k(\psi) = k_r(\psi)k_s$ (6)

k(ψ): 圧力水頭ψに対応する不飽和透水係数 $k_r(\psi)$:比透水係数, k_s : 飽和透水係数

不飽和領域では式(1)の透水係数を式(5),(6)で求め た不飽和透水係数に置き換えて計算した。飽和不飽和浸 透流解析に使用した土壌の物理特性および近似で得られ たパラメータを表-1に示す。飽和透水係数について、表 層土は土質試験から、花崗斑岩および泥岩領域はボーリ ング調査時の湧水圧試験から求めた。泥岩風化部につい ても湧水圧試験で求めた。花崗斑岩風化部については, 室内透水試験結果を基に設定した。有効飽和度は、飽和

	表→」 解析に用いた工層物理特性とハフメータ												
1	地質		Ks (cm/s)	α(/cm)	β	θ_s	θ_r						
	表層土		7.1 \times 10 ⁻³	0.039	1.35	0.520	0.040						
	花崗斑岩	風化	1.5×10^{-3}	0.137	1.40	0.415	0.130						
		新鮮	1.2×10^{-4}	0.137	1.40	0.415	0.130						
	泥岩	風化	9.3 $\times 10^{-6}$	0.039	1.29	0.270	0.200						
		新鮮	6.3 $\times 10^{-6}$	0.039	1.29	0.270	0.200						



体積含水率と残留体積含水率の差として求めた。さらに、 得られた ψ - θ 関係および ψ -k関係をそれぞれ図-5(a), (b)に 示す。

2.5 2019 年台風第 19, 20, 21 号を対象としたモデルの 検証

モデル検証のため,地下水位および浅層地下水位の観測 がされた 2019 年台風第 19, 20, 21 号による降雨を対象に

飽和不飽和浸透流解析を実施した。モデルには、調査地近 傍の市野々小学校に設置された雨量計(市野々観測所)で 観測された 2019 年 10 月 18 日 4 時~10 月 25 日 5 時の降 雨を地表面から与えた。図-6に降雨量と浅層地下水位の実 測値を,図-7に浸透流解析で再現された浅層地下水位の結 果を示す。浸透流解析では、th-1とth-2において、降雨に 対応する水位上昇が生じる結果が得られた。特に、花崗斑 岩領域に位置する th-1 では, th-1 の鉛直下方 53cm におい て、降雨に対応した 5m 程度の水位上昇が生じる結果が得 られた。th-2 では水位が 10mm/h 以上の降雨に対応して数 10cm 程度の水位上昇が計算された。th-1, th-2 における浸 透流解析の結果は、浅層地下水位の降雨に対応した上昇を 示している。しかし、実測値では、地層境界付近の th-2 に おいて降雨による地下水位上昇が見られるが、地層境界か ら離れた th-1, th-3 では長時間にわたって大きな水位変化 は見られない。浸透流解析の結果と実測値で地下水位の変 化が異なる理由として,表層における一時的な地下水の集 中,また選択流の影響が考えられる。特に今回の浸透流解 析モデルでは花崗斑岩領域を一体と扱ったため、選択流に よる局所的な透水係数の変化 ¹¹⁾を考慮出来ていない可能 性が考えられる。





図-8 浸透流解析による地下水のフラックス

次に,浸透流のフラックスの計算結果を図-8 に示す。透 水係数の高い地表面付近(表層土層中)を流下する水の流 れが主体であるが,花崗斑岩分布域に与えられた降雨は,

一部は地下に浸透する結果が得られた。一方で、泥岩分 布域に与えられた降雨は、泥岩の透水係数が小さいため に、泥岩中には浸透せず、地表面付近を流下した。さら に、地層境界付近において地下水が集中し、局所的に上 向きの地下水流が発生する結果が得られた。以上のように 2019年台風第19号を対象とした浸透流解析の結果は観測 値と比較して、降雨に対する浅層地下水位の上昇が大きい ため、地下水位を過大に再現する傾向があるが、地質境界 に沿った地下水の集中した流れを再現出来ている。その ため、降雨時の地質境界による浅層地下水位上昇自体は 評価できると考えられる。また、崩壊が発生するおそれを 評価できるという観点では、地下水位の影響をより強く評 価できるため、このモデルを使用した。

3. 2011 年台風第 12 号を対象とした飽和不飽和浸透流 解析

図-9に示す2011年9月1日0時~5日0時の降雨を, モデルに地表面から与えた。解析実施期間前の1年間 (2018年10月~2019年9月)の日平均降雨量8.32mm(≒ 時間降雨0.35mm)を与え、長時間の非定常解析を行い、初 期水位を設定した。なお,9月1日から4日4時までは調査 地近傍の市野々観測所で雨量が観測されていたが,9月4 日5時以降は欠測のため,市野々観測所以外で最も調査地 に近い色川観測所の雨量データを用いた。解析で得られた



地下水位変化を図-10 に示す。降雨に対応し, th-1 では 8m 程度, th-2 では 4m 程度の水位上昇が再現された。先述の 通り, このモデルでは地下水位の低下は再現しきれていな いものの, これらの地下水位上昇は 2019 年台風第 19 号に よる地下水位上昇よりも大きい。th-3 では大きい水位変化は 見られなかった。

次に,浸透流のフラックスの計算結果を図-11 左に示 す。2019年台風第19号による解析結果と同様,透水係 数の高い表層付近に多量の流水が生じること,浸透した 地下水の一部は地層境界付近に集中し,地表面側へ上向 きの地下水流となって流れた。また,表層土層中の浸透 流のフラックスは2.9×10⁻¹ (m/hour)と2019年台風第 19号による降雨より大きい。さらに,地層境界の影響を



図-11 地質境界を設定した場合(左)と設定しなかった場合(右)の2011年台風第12号による地下水のフラックス



図-12 地質境界を設定した場合(左)と設定しなかった場合(右)の 2011 年台風第 12 号による地下水位の比較



図-13 2011 年台風第 12 号 (左) と 2019 年台風第 19, 20, 21 号 (右) による自由地下水面の比較 いずれも地質境界は設定 最も自由地下水面が高い位置に到達した時刻を比較

考慮するため、地層境界が存在せず全域に花崗斑岩が分布 する条件で解析を行った(図-11右)。浸透した地下水は、 地層境界が存在しないため、地下深部方向へ浸透した。ま た、局所的に地下水が集中する箇所はなかった。

地層境界の有無による自由地下水面の違いを図-12 に示す。 いずれの場合においても,地表面付近に一時的な地下水面 が形成され,斜面上方まで分布する。地質境界を設定し, 浸透流が透水性の低い泥岩の影響を受ける条件(図-12 左) では,計算開始 75h時点で地層境界から約 50m 上方まで自 由地下水面が形成された。モデルを花崗斑岩のみで構成し, 地層境界を設定しない条件(図-12 右)と比較すると,斜 面上方に 30m 程度上方まで自由地下水面が達した。

さらに、図-13 に 2011 年台風第 12 号による降雨(図-13 左) と 2019 年台風第 19 号による降雨(図-13 右)によ る自由地下水面上昇の比較を示す。両者の比較から、2011 年台風第 12 号による降雨を与えた方が、2019 年台風第 19 号による降雨を与えた場合よりも、自由地下水面が斜面上 方まで分布したことが分かる。

4. 地質境界が浅層地下水位上昇に与える影響

2011年台風第12号を想定した降雨を与えた浸透流解析 では、地質境界を設定した場合、th-1、th-2で浅層地下水位 は大きく上昇した(図-10)。また地質境界に沿って地下水 が集中し、また降雨継続に伴って斜面上方まで地下水位が 上昇した(図-12, 13)。地質境界を設定しなかったケース では、地下水は地質境界で集中せず、また地下水位も地質 境界を設定したケース程上昇しなかった。このことは、那 智川流域のように明瞭な地質境界が難透水層として存在 する場合には、地質境界が地下水位上昇の要因となりうる ことを示す。また,地下水流は地質境界付近で比較的大き なフラックスを示した (図-11)。現場の地質境界周辺で湧 水が見られることと合わせて考えると、地質境界で集中し 大きなフラックスを持つ地下水が地表付近で湧水となる プロセスが考えられる。以上から、地質境界によって地下 水の流れが制御され,その結果地下水位が上昇することで 斜面が不安定化したと考えられる。

また,2011年台風第12号による降雨と2019年台風第 19号による降雨の比較では,2011年台風第12号による降 雨でより地下水位の上昇が大きかった(図-13)。ここで, 2011年台風第12号は降雨終盤に120mm/hの降雨が記録さ れ,降雨規模が大きい。これらのことは,表層崩壊が発生 した2011年台風第12号では地質境界による地下水位上昇 にあわせて,降雨の規模が大きかったことで,さらに地下 水位が上昇した可能性を示唆する。

5. まとめ

本研究では、2011年台風第12号によって表層崩壊が発生 した那智川支川平野川流域において、ボーリング調査およ び電気探査によって地質境界の分布を把握した上で、地質 境界による地下水位上昇を浸透流解析によって検討した。 その結果、以下の知見が得られた。

1)浸透流解析から、地質境界がある場合、地質境界に地

下水が集中し,地質境界に沿った地下水の流れが生じた。 さらに,表層崩壊が発生する深度において地下水位が上昇 することが分かった。

2)地下水のフラックスは、地質境界を踏まえた浸透流解析の結果、地質境界沿いで大きくなることが分かった。地 質境界と表面地形が交差する箇所周辺で湧水が見られて おり、地質境界に沿った流れが表層に集まることで浅層地 下水位が上昇したことが考えられる。

3) 飽和-不飽和浸透流解析による2011年台風第12号と 2019年台風第19号による地下水位の再現では,2011年台風 第12号でより地下水位の上昇が大きかった。このことは地 質境界だけでなく,2011年台風第12号では降雨量が極めて 大きかったことにより地下水位がさらに上昇したことが 表層崩壊発生をもたらしたことを示唆する。

以上より,2011年台風第12号によって那智川流域で発生 した表層崩壊は、地質境界によって地下水位が上昇しやす い流域に極めて大きな降雨が与えられたことで斜面が不 安定化したことでもたらされたと考えられる。

今後,今回得られた結果を踏まえ,流域全体を対象に表 層崩壊のリスク評価につなげたい。

引用文献

- 1)松村和樹・藤田正治・山田孝・権田豊・沼本晋也・堤大三・中谷加奈・今泉文寿・島田徹・海堀正博・鈴木浩二・徳永博・柏原佳明・長野英次・横山修・鈴木拓郎・武澤永純・大野亮一・長山孝彦・池島剛・土屋智(2012):2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害,砂防学会誌,Vol.64,No.5,pp.43-53
- 2) 柳井一希・笠井美青(2020): WOE 法及びロジスティック回帰法 による和歌山県那智川流域における表層崩壊危険度分布,日本 地すべり学会誌, Vol. 57, No. 3, pp. 90-98
- 3)西岡恒志・榎原伴樹・坂口武弘・木下篤彦・田中健貴・河戸克志(2018):地層境界付近の地下水位変状と空中電磁探査解析結果に着目した表層崩壊危険斜面抽出の研究,平成30年度砂防学会研究発表会概要集,pp.575-576.
- Uchida, T. (2004): Clarifying the role of pipe flow on shallow landslide initiation, Hydrological Processes, Vol.18, No.2, pp.375-378.
- Wilson GV, Rigby JR, Ursic M, Dabney SM. (2016): Soil pipe flow tracer experiments: 1. Connectivity and transport characteristics. Hydrological Processes, Vol.30, No. 18, pp.1265– 1279.
- 6) 榎原伴樹・西岡恒志・崎山明紀・坂口武弘・木下篤彦・田中健 貴・河戸克志(2018):表層崩壊危険斜面における空中電磁探査 解析と地下水位の変動に関する研究,第9回土砂災害に関する シンポジウム論文集,pp.43-48
- 7) 榎原伴樹,崎山明紀,坂口武弘,岸畑明宏,田中健貴,木下篤 彦,野池耕平,松澤真,河戸克志(2019):地質境界が存在す る斜面での地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険度評 価手法の提案,河川技術論文集,Vol.25,pp.687-682.

8) 辻野裕之・吉村元吾・菅原寛明・田中健貴・木下篤彦・西岡恒

志・中村静也・赤嶺辰之介(2018):那智川流域で発生する崩壊 と地質・水文特性との関連-地質分布と地下水挙動-,平成 30 年砂防学会研究発表会概要集,pp.171-172

- 9) van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, Vol.44, No. 5, pp. 892-898
- 10) Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic con-ductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, Vol.12, No. 3, pp. 513-522.
- Beven, K.F., Germann, P. (2013); Macropores and water flow in soils revisited, Water Resources Research, Vol. 49, No. 6, pp. 3071-3092

2.1 相互連携に基づく研究 テーマ12

近畿インフラDX推進センターにおけるDX推進の 取り組みについて(報告)

寺田 一秋1

1近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 防災課 (〒670-0947兵庫県姫路市北条1丁目250番地)

近畿地方整備局では、これまでに生産性向上のために取組んできたi-Constructionを更に深化させるため、インフラ分野のデジタルトランスフォーメーション(以下「DX」)を推進している.これらインフラ分野のDXを推進するため、官民の人材育成拠点として令和3年4月1日に近畿インフラDX推進センターを近畿技術事務所内に開設した.

近畿インフラDX推進センター(以下「DXセンター」)では、インフラ分野のDX推進における重要な課題となる人材育成や情報発信を行っている.

本報告は、これら全国に先駆けて実施しているDXセンターの取り組みについて紹介する.

キーワード i-Construction, インフラデジタルトランスフォーメーション, 近畿インフラDX推進センター

1. はじめに

インフラ分野において、インフラの老朽化対策や防災対 策の必要性が高まる一方、今後深刻な担い手不足が進むこと が懸念されており、国土交通省では 2016 年より ICT 技術の 活用等による建設現場の生産性向上を目指す i-Construction を推進している¹.

また、コロナ禍を契機とし、公共工事の現場において非 接触・リモート型の働き方に転換するなど、感染症リスクが ある中でも強靭な経済構造の構築を加速することが切迫した 課題となっている.

こうした状況を踏まえ,近畿地方整備局において 2020 年 12 月にインフラDX推進本部を立ち上げ,インフラ分野の DX推進に取組んでいる².

2. 近畿インフラDX推進センター

これらのインフラ分野のDXを推進するため、デジタル 技術を扱う官民一体の人材育成を目的とし、近畿地方整備局 における建設技術支援、防災技術支援、新技術活用支援、及 び人材育成支援に関する業務を行っている近畿技術事務所内 に、2021年4月1日に全国に先駆けてDXセンターを開設し た.

DXセンターは、DX推進のための「育成」「見学」 「情報発信」の実施機関として、DX研修、DXセンターの 見学、DX関連情報の発信を行う.施設としては、360°プ ロジェクター、VRを用いて3Dデータや新技術を体験できる Web 会議ルーム、遠隔操縦の建設機械を操縦できる機器とマ ルチモニターを用い,建設機械を遠隔操縦実習できる建機オ ペレーションルーム, 3D データを操作できるタッチパネル を用い,3次元ソフトを用いたDX研修全般を行う研修ルー ムがある.

3. インフラ分野のDXの「育成」

デジタル技術を扱える人材の育成を目的とし、2021 年度に 「BIM/CIM 研修」、「ICT 活用研修」、「無人化施工研修」を 実施した.

実施内容を以下に示す.

(1) BIM/CIM 研修

国土交通省では,2023 年度までに小規模なものを除く全 ての工事に BIM/CIM 活用を原則適用する.これらに対応する ため,BIM/CIM が活用できる人材を育成することを目的とし, 職員向けに研修を行った.

研修は、各職員の BIM/CIM 知識にあわせた技術習得をする ため、入門編、初級編、中級編を設定した.

入門編では、BIM/CIMに関する基礎知識を習得するこ



図-1 WebでのBIM/CIM研修

とを目的とし, BIM/CIM の概要, BIM/CIM 活用の現状と展 望, BIM/CIM モデル(3D-CAD)の基礎的な使用説明とした. 新型コロナウィルス感染拡大防止の観点より,入門編はオン ライン開催とした(図-1).

初級編では BIM/CIM モデル(3D-CAD)に関する基本操作を習 得することを目的とし,研修生が高性能 PC を実操作し(図-2),基本図形の作成や BIM/CIM 成果 3D-CAD の閲覧及び修正 等の 3D-CAD ソフトウェアの基本操作実習とした.

中級編ではBIM/CIMモデル(3D-CAD)を用いた業務及び工事の 監督・検査・納品等の一連の知識を習得することを目的とし, BIM/CIM検査納品要領等の説明, BIM/CIM成果品の検査方法実 習等とした.

BIM/CIM 研修の受講者は、入門編 170 名、初級編 48 名、中 級編 39 名ののべ 257 名であった.



図-2 高性能PCでの実操作

(2) ICT活用研修

国土交通省では、ICTの全面的な活用に関する実施方針を 策定しており、直轄工事でICT施工を実施している.

これらを受けて ICT 活用研修では、すぐに業務に役立つ実 践的なカリキュラムとし職員向けと施工者向けの研修(図-3)を行った.

入門編及び初級編では、ICT に関する基礎知識及び施工手順を習得することを目的とし、土工における起工測量から施工、出来形管理までの一連の流れについて、ICT 測量技術 (UAV, TLS)の実演、3 次元データの作成、ICT 建機(MC バック ホウ)の施工体験、3 次元データの活用等を実施した.

中級編では、河川及び道路工事の工種における ICT 活用の 知識ならびに様々な現場で応用するためのノウハウを習得す ることを目的とし、ICT による現場改善事例、ICT の技術動 向・今後の展開、3 次元データの活用(応用編)等を実施し た.

ICT 活用研修の受講者は,発注者向けが入門編 38 名,初級 編 38 名,中級編 38 名,施工者向けが入門編 39 名,初級編 36 名,中級編 43 名ののべ 232 名であった.

(3) 無人化施工研修

近年,異常気象により土砂災害等が多く発生しており, 被災した現場の復旧作業には,更なる土砂崩落,落石などの 恐れがあり,迅速な復旧作業が求められているが,



図-3 ICT活用研修(施工者向け)

作業員の安全確保のため現場に立ち入ることが困難な場合が ある.そこで、作業員の安全性を確保しつつ、復旧作業を迅 速に行うことができる無人化施工のオペレーターの育成が必 要となっている.従って、実際の災害現場における作業を想 定し、無人化施工の遠隔操縦を習得するため、近畿地方整備 局と災害協定を締結している団体員を対象に研修(図-4)を 実施した.

入門編では無人化施工における基礎知識及び基本操縦を 習得すること目的とし,無人化施工の構造の習得,遠隔操縦 バックホウや簡易遠隔操縦機器を設置した簡易遠隔操縦バッ クホウの操縦体験を行った.

初級編では災害現場での無人化施工の作業を想定し、遠 隔操縦を実習することを目的とし、災害現場に見立てたフィ ールドでの遠隔操縦バックホウ操縦実習を行った.また、遠 隔操作機能を有しない建機に後付けの遠隔操縦が可能となる 簡易遠隔操縦機器の設置体験を行った.

無人化施工研修の受講者は、入門編25名、中級編18名の のべ43名であった.



図-4 無人化施工研修

(4) 無人研修における新型コロナウイルス感染症対策等

新型コロナウイルス感染症対策のため、研修において座 席の離隔確保(座席と座席の間を2メートル以上)(図-5)、 参加者・講師の体調チェック、マスク・手袋の着用、都度会 場の清掃等を実施するなど、感染拡大を

防止するための予防策を複数講じ、コロナ感染者を一人も出 すことなく年間スケジュールを終えることができた.また、 熱中症対策として、日除けテント、冷風扇、スポットクーラ 一等の機材、飲料や冷却材等の消耗品を準備して受講生の体 調管理に配慮した.



図-5 離隔を確保しての研修状況

4. インフラ分野のDXの「見学」

学生,一般の方々にインフラ分野のDXを知ってもらい, 興味を持ってもらうことを目的とし,一般の方向けにDXセンターの施設見学を行っている.

見学では、DXに関する技術を見て、触って体験しても らうこととし、360°プロジェクターによる映像で設計段階 のインフラ施設体験、ラジコン建機の操縦による無人化施工 の体験、ダム・道路などインフラ施設の3Dデータをタッチ パネル操作するなど様々な角度から見学することができる

(図-6).また、公募による民間企業等からのNETIS技術、 PRISM技術の動画も紹介している.見学時間は約1時間程度で あり、見学受付は、近畿技術事務所のホームページで事前予 約を行っている.

(https://www.kkr.mlit.go.jp/kingi/infradxcenter/application/index.html)

図-6 DXセンターの見学

上記の通常見学に加え、近畿技術事務所で毎年11月に開催 する「ふれあい土木展」においてもDXセンターの施設を一 般ブースとして使用し(図-7),近畿技術事務所を含む5団 体の展示を行い、来場者の方々に最新のインフラDX技術を 紹介した.

■ふれあい土木展2021



図-7 バックホウラジコン操作体験と 天ヶ瀬ダムWR体験(淀川ダム統合管理事務所)

新型コロナウイルスの感染防止対策のため、施設見学は、 1グループ5名までの案内としたが、2021年度は968名の来場 者数があった(図-8).



図-8 2021年度DXセンターのべ来場者数(名)

来場者の内訳として建設業が319名と最も多く,次に整備 局職員が140名,想定よりも学生,教育関係の来場者数が少 なかった.

なお、一般者・その他が323名と多く見えるが、そのほと んどが「ふれあい土木展」での来場者のため、一般者の見学 が少ない結果となった.

見学者のアンケートから「DXについての具体的なイメ ージを膨らませることができた」,「DXの現況と建設業の 未来が学べました.建設業の未来に希望が持てました」等の 感想があった.

5. インフラ分野のDXの「情報発信」

DXセンターでは、企業が取り組む新技術やi-Construction, BIM/CIMなどの取り組みの情報を収集し、発信 することを目的とし、近畿インフラDX通信 (図-9)の ほか、ホームページやSNSで情報発信している.

近畿インフラDX通信は、DXセンターの研修内容や近畿 地方整備局管内の各事務所や府県市でのインフラDXの取り 組みを掲載しており、2022年5月時点で7月号まで発刊している.また、NETIS技術やPRISM技術などの新技術の動画をDX センター内や近畿技術事務所YouTubeで紹介、さらに近畿技 術事務所Twitterでは研修募集案内や施設紹介などを投稿した.



図-9 近畿インフラDX通信

6. インフラDX研修の結果について

受講者に研修に対するアンケートを実施した. 各研修に おけるアンケート結果を以下に示す.

(1)BIM/CIM 研修

入門編の受講者の意見として「受講前は BIM/CIM の漠然と したイメージしかなかったが、受講後は調査から施工までの 3 次元データの活用イメージを持つことができた.」という 意見があり、初めて BIM/CIM の触れる方に基本的知識を習得 でき、有効な研修であったと考える.

初級編の受講者の意見としては、講義は既に作成された3 次元データを編集することが主であったが、自ら何か3次元 データを作成する実践形式の時間もあれば良いと感じた.」 という意見があり、受講者のレベルは様々なため、限られた 研修時間内での練習課題の出し方にも工夫が必要であると考 える.

(2)ICT 活用研修(発注者向け)

入門編の受講者の意見として「わかりやすく良い講習で あった. 初級編,中級編についても機会があれが受講した い.」という感想があり,受講者のレベルに合わせて習熟で きるカリキュラムとなっており,有効なカリキュラムの設定 であると考える.

(3)ICT 活用研修(施工者向け)

入門編の受講者の意見として「研修を受講し、社内での ICT 導入のルールづくりが必要であると感じた.」という意 見があり、社内で ICT 導入が進むきっかけになればと考える.

初級編の受講者の意見として「インフラ分野のDXの推 進に向けて,情報発信をどんどんしていただきたい.」との 声があり,近畿インフラDX通信等の情報発信も重要である と感じた.

(4)無人化施工研修

「簡易遠隔操縦バックホウの操縦体験では、不慣れなた め操縦が難しかったが、丁寧に教えていただいた.」との声 があり、バックホウ操縦の熟練者が操縦を教えることにより、 状況に応じた適切な指導ができたと考える.

また、「講義だけでなく、簡易遠隔操縦機器の操縦や設 置などの体験があり、有意義であった.」との意見があり、 講義及び体験も行うことにより、オペレーターの遠隔操縦技 術の向上に有効であると考える.

どの研修でも概ね「講師の説明がわかりやすく,研修内容 に満足であった.」という結果であり,有効な研修内容であ ったが,「ICT 技術を活用して上手くいった事例,上手くい かなかった事例を教えてほしい.」「3 次元データの活用事 例を知りたい.」等の意見もあり,今後の研修の改善点であ ると考える.

7. まとめ

DXセンターは2021年4月に開所し、1年間DXの推進を目 的として、研修、DXセンター見学、情報発信等を実施して きた.研修においては、わかりやすく、充実した研修内容で あったとの研修生の意見が多かったが、DX技術の進化はま すます早くなることから、それらを取り入れた研修にすると ともに、アンケート結果や意見交換会での意見を反映し、研 修内容の向上を図りたい.DXセンター見学においても、コ ロナ禍である中、968名の多くの見学者がありインフラDX 推進にかかる期待度の高さが伺えた.今後は、来場者が少な かった学校関係者・一般者等へのPR強化及び、紹介できる DX技術の収集をさらに行い、多くの方々に情報発信を行い たい.これらDX推進の活動をさらに進め、近畿インフラD X推進センターをインフラ分野のDX推進の拠点としていき たい.

謝辞

本原稿の作成にあたり,関係各所の皆様に多大なご指導を頂 きました.ここに謝意を表します.

参考文献

- 1). 国土交通省HP: 国土交通省インフラ分野のDX推進本部の設置に ついて https://www.mlit.go.jptec/content/200729_01.pdf
- 2). 論文:砂田千佳,近畿地方整備局におけるインフラDXの取り組 みについて,令和3年度近畿地方整備局研究発表会論文集,2021 年.
- 3). 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所近畿インフラDX推進 センターHP:近畿インフラDX通信について https://www.kkr.mlit.go.jp/kingi/infiadx-center/dx/index.html#dxtushin

2.2 相互連携に基づく研究 テーマ1

高感度地震観測網の微小振動データを用いた大規模出水時の河川水位の推定

和歌山県土砂災害啓発センター
 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター(現所属:長野県姫川砂防事務所)
 柴田俊
 株式会社エイト日本技術開発
 海原荘一・谷田佑太
 浅原裕
 国土交通省国土技術政策総合研究所
 へ下篤彦・中谷洋明

1. はじめに

河川の水位は河川計画の流量算定,河川構造物の位置や標高設定のための基本的データであり,一般的には河道 に隣接した圧力式水位計等を用いて計測されている。しかし,大規模洪水時には水位計自体の破損等により欠測と なる事態が生じている。

一方,わが国には全国的に約 20km 間隔で防災科研の Hi-net¹⁾等,高感度地震観測網が整備されている。河川流 量増大による振動はノイズの一つとして捉えられてきたが,河川流量増加に伴い振動エネルギーが増加すること ²⁾や河川のピーク流量と地盤の速度振幅とに相関があること³⁾等が報告されており,流量増大時の微小な振動デー タから水理量を推定することができれば計画規模の設定や的確な警戒避難の判断のために有効な情報となる。ま た,Hi-net 地震計は,センサーとして見た場合,設置場所も耐水性があり,洪水・浸水等に対して比較的堅牢性 が高く,危機管理の面で有利である。

そこで本稿では、2020年7月の豪雨における球磨川を対象に周辺のHi-net 観測データを用いて洪水時の観測 期間内の水位と地盤振動特性との関係性を分析し、その関係を外挿することで欠測となった期間の河川水位の推 定を試みた。

2. 対象地と方法

図-1 に球磨川中流域の水位観測局・Hi-net 観測局・雨量観測局の位置を示す。また大野観測局と人吉観測局での2020年7月3日から12日の水位,および降水量を図-2に示す。水位が途切れている期間は欠測となっている。 最高水位に達したと推測される時間帯に欠測が発生している。

まず,洪水時の地盤振動データのスペクトル解析を行った。次いで水位と相関の高い周波数を検討するため,球 磨川流域の人吉市周辺の6水位観測局とHi-netの3観測局の上下成分のデータを用い,1~10Hzの周波数帯で1Hz 毎のバンドパスフィルターで処理し,RMS値(二乗平均平方根)を算出した。得られたRMS値の時系列に対して,異 常値の除去および1時間ごとの平均値を計算し,帯域毎に各水位局データとの相関を求めた。これらを元に地盤 振動のRMS値と相関の高い水位観測局とHi-net観測局とを組み合わせ,水位観測が欠測となった期間における水 位を1次式で推定した。

3. 結果と考察

大野および人吉 Hi-net 観測局のスペクトログラムを図-3 に, RMS 値の時間変化を図-4 に示す。出水時に数 Hz



67

ている時間帯は欠測している



- (a) N. ASKH(芦北)(b)N. HYOH(人吉)
- **図-4** 芦北と人吉観測局の振動の RMS 値の時間変化。 フィルターなし

表-1 球磨川の水位観測局と直近 Hi-net 観測局での水位と周波数帯別の指標値との相関係数。

水位観測局	Hi-net観測局	no-filter	1-2Hz	2-3Hz	3-4Hz	4-5Hz	5-6Hz	6-7Hz	7-8Hz	8-9Hz	9-10Hz
大野	N.ASKH(芦北)	0.72	0.67	0.61	0.60	0.61	0.64	0.69	0.67	0.61	0.59
人吉	N.HYOH (人吉)	0.83	0.90	0.71	0.49	0.72	0.82	0.85	0.81	0.81	0.78
一武	N.HYOH (人吉)	0.83	0.93	0.72	0.47	0.72	0.83	0.85	0.83	0.82	0.79
渡	N.HYOH (人吉)	0.84	0.94	0.72	0.43	0.75	0.83	0.84	0.83	0.81	0.75
深田	N.UWEH (上)	0.78	0.92	0.87	0.79	0.84	0.84	0.77	0.80	0.78	0.49
多良木	N.UWEH (上)	0.77	0.92	0.75	0.63	0.71	0.70	0.59	0.66	0.64	0.30

灰色で示した値が各観測局で相関係数が最も大きい値である

~20Hz の周波数帯の振幅スペクトルが増大することが 確認できた。RMS 値および水位と地盤振動データの RMS 値との相関係数(表-1)のいずれも人吉が大きい値であ った。人吉では RMS 値において7月8日以降,人工的影 響と考えられる日変化がみられる。人吉 Hi-net 観測局は 球磨川に近く,地震計は深度が浅く,剪断波速度が低い 層に設置されている。これらの違いが RMS 値や水位との 相関係数の大きさに関係すると考えられる。

次に, 欠測していない水位と RMS 値から1次式を求め, 水位を推定した結果を図-5 に示す。人吉では水位変化を 概ね再現できている。また,人吉水位観測局での推定最 高水位は8.04mで,国土交通省九州地方整備局による痕 跡水位7.27mと符合する結果であった。



4. おわりに

1~2Hz の周波数帯の微小振動に着目することで,既存の高感度地震観測網を従来の水位計を補う河川水位計として有効活用できる可能性を示すことができた。本稿で示した手法がどのような観測条件の場合に適合できるのか,他の流域においても検討していきたい。

謝辞:本研究にあたっては国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)の地震観測データを利用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0003, 2019 2) Díaz ほか: Hierarchical classification of snowmelt episodes in the Pyrenees using seismic data, *PLoS ONE*, 2019 3) 武澤ほか: 山地河川における洪水時の地盤振動特性の評価, 土木技術資料, 2013

2.2 相互連携に基づく研究 テーマ2

大規模斜面崩壊時の地盤振動特性に関する室内実験による検討

和歌山県土砂災害啓発センター ○宮崎徳生・筒井和男・坂口隆紀 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター(現所属:長野県姫川砂防事務所) 柴田俊 株式会社エイト日本技術開発 海原荘一・谷田佑太 国土交通省国土技術政策総合研究所 木下篤彦・金澤瑛・中谷洋明

1. はじめに

防災科研のHi-net や国土交通省の高感度の地震計による観測網を用いた大規模土砂移動の発生検知は、新しい災害監視手法として重要なものである。大規模土砂移動現象が発生する振動特性については、既往研究より知見が蓄積されつつ¹¹あるが、発生頻度が稀であることから、十分な観測が行われているとは言えない。そこで筆者らは、大規模土砂移動の再現を目指して、室内振動実験を実施している²⁰。本稿では下記の3つの知見¹¹が室内実験で再現できるのかという観点で室内実験の結果を検討したので報告する。

①河床幅(対岸までの距離)の違いによる振動特性

崩壊土砂が対岸に衝突する場合(衝突型)と衝突しない場合(流下型)に分類すると,波形の立ち上がり勾配が衝 突型において急になること。

②土砂の粒径

・重量の違いによる振動特性の違い

粒径が大きいものが崩土に含まれていると卓越周波数において低周波成分(1~7Hz)が発生すること。 ③変位波形と土砂の移動方向との関係

変位波形(パーティクルモーション)が斜面の移動方向に一致すること。なお,2011年の赤谷地区での振動解析 において 0.01~0.1Hzの速度波形から求めた変位波形において土砂の移動方向への変位が確認されている。

2. 実験方法

2.1 実験装置と使用機器

土砂移動時に発生する振動を地盤に伝達するためコンクリートブロックを積み,隙間にモルタルを充填した水路 を作成した(図-1,2)。対岸に見立てた壁を水路下流に設けた。振動は据置き式のサーボ型加速度計(白山工業 JU410, 3 成分計測)を4 台使用し,水路と平行に1mの距離に設置した(図-3)。ナイキスト周波数は200Hz である。 2.2 実験ケース

実験ケースは表-1 に示す。粒径と質量の異なる3種類の鉄球の組み合わせを変えて移動させるケースと、粒径の 異なる礫を移動させるケースに大別し、礫を用いたケース(A-8・9, B-8・9)に壁位置(0m, 1m)を変えた。合計11 ケース実施した。なお、水は加えていない。 表-1 実験ケース



図-1 実験装置の模式図(単位:mm)



図-2 実験装置外観





3. 実験結果と考察

3.1 河床幅の違いによる振動特性

河床幅の違いによる振動波形の違いを評価するため波形の立ち上が り勾配を確認した。既往研究を参考に,最大振幅と,その発生時刻と土 砂移動開始時刻との差から定義した。大礫を用いたケースの壁位置によ る違いで比較した(図-4)。斜面下端と壁との距離がないケースで立ち 上がり勾配が大きくなる傾向が確認できた。

3.2 土砂の粒径・重量の違いによる振動特性

計測した波形のフーリエ振幅スペクトルを求め,周波数特性を検討した。ケースA-1,A-6での土砂移動時と常時微動とのスペクトル比(S/N比)を図-5に示す。卓越周波数はどのケースでも100Hz程度となり,粒径の違いによる明瞭な違いは確認できなかった。また,重量が増えると低周波成分(1~100Hz)でS/N比が大きくなる傾向が確認できた。

3.3 変位波形と土砂の移動方向との関係



10~200Hz のバンドパスフィルターを通した波形を積分し、変位波形を求めた。鉄球を流下させたケースにおいて鉛直方向の変位が確認できた(図-6)。時間的には、①→②の順で下方向に変位後、上方向に変位したことがわかる。第1章の知見③で述べた土砂移動により生じる力の方向に応じた変位を計測できた可能性がある。

3.4 室内振動実験における相似則

模型実験において現象に関係する力の相似性を用いれば,模型と実体との長さの縮尺比を λ とすると,振動数の 縮尺は λ^{0.75} となる³⁰。例えば,100 分の1の縮尺を用いた実験の場合,振動数の比は約 31.6 となる。大規模土砂 移動の実現象において数 Hz の低周波成分が卓越すると言われており¹⁰,本実験で 100Hz 前後が卓越周波数と確認 できたことは矛盾しないと考えられる。ただし,実現象では弾性波の伝達過程で減衰が生じていると考えられるた め,今後,低周波成分が実現象で卓越する理由について,数値実験からの分析を進めていきたい。

4. おわりに

実現象の観測が困難な大規模土砂移動現象の室内実験による再現を試みた。移動土砂の粒径,重量の違い,対岸 との衝突の有無,および変位波形の観点から計測した振動波形について検討した。対岸に見立てた壁の有無により 波形の立ち上がり勾配が大きくなる傾向が確認でき,実現象から得た知見と調和的な結果を得ることができた。今 後,数値実験等も行い大規模土砂移動の検知に資する現象の解明を図りたい。 参考文献

1)海原ほか:高感度地震観測網による大規模土砂移動発生時の地盤振動特性と検知,砂防学会誌,2021 2)筒井ほか:土砂移動時の地盤振動の再現-模型実験からの考察-,砂防学会誌,2021 3)香川:土構造物の模型振動実験における相似則,土木学会論文報告集,1978

2.2 相互連携に基づく研究 テーマ3

紀伊半島大水害の被災体験(紙芝居)を伝承する活動と年齢別の研修効果

和歌山県土砂災害啓発センター ○坂口隆紀・筒井和男・宮崎徳生・岸畑明宏 防災士(和歌山県東牟婁郡那智勝浦町在住) 久保榮子 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター 木下篤彦

1. はじめに

和歌山県土砂災害啓発センター(以下,「センター」とい う.)では、土砂災害の被害軽減に向けた研修と地域の小中 学校と連携した防災学習を実施している.また,紀伊半島大 水害(写真-1)の被災者のご遺族の中には、自らが体験した 悲しみを後世の人に味あわせたくないと考え、悲惨な被災体 験を後世に伝承しようと体験紙芝居等を作成し懸命に活動 をされている方がおり、センターが実施している啓発研修と 体験紙芝居を合わせた防災学習を行っている.

防災学習については、学習を行った後,その効果を把握し, 今後の副教材、時間、指導内容などに反映させることは重要 である(檜垣ら20161)).そのため、本報告では、その効果に ついて学習会実施後に行った中学校・高等学校・専門学校の 感想文を基にテキストマイニング手法での年齢別の効果分 析を試みた.

2. 啓発センターが実施している小中高等学校等への防災学習

センターでは、小中学校への防災学習は、子どもは将来の防災 の担い手であり、子どもから保護者や地域全体にその知識が広 まる事が期待される事から積極的に取り組んでいる。平成28年 度から国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術セン ターの支援のもと近隣の那智勝浦町内にある小中学校を中心に 防災学習を開始し、令和2年度は小中高数30校(研修回数55回) となっている(表-1).その中で今回の啓発研修と体験紙芝居 を合わせた学習プログラム(以下,「学習プログラム」という.)の 実施は、中学生以上で多く実施され令和 2 年度で専門学校(1 校), 高等学校(2 校), 中学校(3 校) である.

3. 紀伊半島大水害体験紙芝居と土砂災害研修を合わせたプログラム

防災学習で大切なことは、東日本対震災の際に「釜石の 奇跡」と言われた「津波てんでんこ」のように、「学んだこ とを行動に移せる」ことである.

そのような事から今回の学習プログラム(写真-2)で は、啓発研修については、受講者が土砂災害の現象・特徴 と危険な場所を知り、土砂災害について「考える力」を養 うことが出来る研修内容とし、また、紀伊半島大水害体験 紙芝居では,被災者の久保氏による,降りしきる大雨の時 に避難勧告が発令されても避難しなかった事に対する後 悔の念の描写や、久保氏自身がその後、近隣の住民ヘヒア リングを行って判明した避難行動の描写から「どうして早 めの避難をしなかったのか」、「事前の準備や早めの避難を していれば全ての命は助かっていた.」という訴えから,受 講者が土砂災害に対して実際に避難する「行動力」の重要 性について学習することを意図している.

平成23年 紀伊半島大水害(那智川流域) 当時の状況(紙芝居) 洪水氾濫 同時多発的な土石流 那智の滝 MOIII 市野々地区 土砂・洪水氾濫 #腿地区

和歌山県東牟婁郡那智勝浦町

写真-1紀伊半島大水害と紙芝居で見る当時の状況

表-1 防災学習の実施状況 入和の左の日のの日相大

				17/113/11/27	년 20 년 <i>9</i> 년 1도
	小学校	中学校	高等学校	計	研修回数
平成28年度	3	2	0	5	5
平成29年度	6	2	0	8	8
平成30年度	3	2	0	5	5
令和元年度	5	3	0	8	10
令和2年度	16	11	3	30	55



学習プログラム 写直 - 2

なお、学習プログラムに要する時間は、土砂災害「考える力」に関する研修として約30分間の啓発研修を行い、 その後に約60分間の紀伊半島大水害体験紙芝居「行動力」の計90分と設定した.

紀伊半島大水害体験紙芝居の前に行う約 30 分間の土砂災害研修では,「土砂災害の種類ついて」,「受講者の近 隣で発生した過去の土砂災害事例」,「平成 23 年紀伊半島大水害について」,「土砂災害警戒区域について」,「ハザ ードマップについて」,「早期避難と避難のタイミング(土砂災害警戒情報)について」をスライドや動画によって 説明し、加えて、紀伊半島大水害体験紙芝居の理解度向上を目的として、啓発研修の後に行う紀伊半島大水害体験 紙芝居における久保氏が被災した場所や遭遇した土砂・洪水氾濫状況について説明している.特に、「早期避難・ 日頃の準備の重要性について」は紀伊半島大水害体験紙芝居における久保氏の訴えで扱われる内容であり, 避難行 動の実施に直結する内容であることから重要と考え、受講者の市町村のハザードマップなどを研修資料とするな ど自分ごとなるような研修内容とした.

4. プログラムの効果検証

(1) 特別学習プログラムの対象

研修プログラムは、令和2年9月4日に和歌山県田辺市立龍神中学校(1年生28名),同年10月19日に和歌山県
みなべ町立高城中学校(全校生28名),同年10月23日に和歌山県 印南町立稲原中学校(全校生28名),同年10月23日に和歌山県 立新翔高等学校(1年生97名),同年11月4日に和歌山県立なぎ 看護学校(39名)を対象に実施した.また,研修による効果の検証 に用いた資料には,研修後に受講者が書いた感想文を用いた.

(2) テキストマイニング手法による解析

受講者が書いた感想文を計量化し、分析・可視化するにあたり、 テキストデータを計量的に分析することが可能であるKH Coder²⁾ を用いた.KH Coderでは、テキストデータにおいて出現している 単語の検索や出現頻度の分析や、テキストデータにおいて、併せ て出現することが多い共起関係にある単語を、多変量解析により 共起ネットワークとして、単語と単語が共起する関係を直感的 に捉えることができる形で示すこと等が可能である³.このよう な事から、研修を受けた感想文とこれらの研修内容が年齢別でど のように関連付けられ、意味づけられているかの検討を行った.

(3) 共起ネットワーク解析と研修結果の検証

共起ネットワーク解析結果を示す.中学校(図-1)は大きく6 つのクラスターに高等学校(図-2)・専門学校(図-3)は大きく 5つのクラスターに単語の共起関係が分類されているのが分か る.この円が大きいものほど、出現回数が多い事を示し、また、 単語と単語が線で結ばれているものは共起性や関連性があるこ とを示し、線の太さが関連性の強さとして表現している.

なお,今回の解析においては,受講者が学習プログラムに対し て感じた主要テーマを明確にするため,出現頻度が上位20位以内 にある単語について共起ネットワーク解析を行った.

中学校・高等学校・専門学校別の一番大きなクラスターを見る と、共起関係にあるワードで中学生は「災害」・「思う」・「土砂」・ 「避難」,高校生・専門学生は「思う」・「災害」・「避難」といっ た関連の強いグループを基本に大きなクラスターを形成して いる.特にこの学習の最大の目的は災害から得た教訓の伝承で あり、研修内容で一番伝えたかった「早期避難が大切」という であることを年齢に関わらず考え、「(土砂)災害を思った・避難 を思った」という事から及第点と思われる.また、中学生・高 校生は「土石流」・「台風」などの自然現象の記述はあるが、専 門学生には見られない.専門学生には「避難」・「場所」・「大切」・ 「学ぶ」のクラスターがあり避難についてもう少し踏み込んだ 内容となっている.しかし、土砂災害警戒区域という言葉は啓 発研修で説明しているにも関わらずどの年齢(学校別)で記述は 見られない.

5. 抽出された課題への対応事例

土砂災害警戒区域への対応ついては、土砂災害のおそれのあるところで、自宅等がどのようになっているか知る事は警戒避 難を行う上でも最も重要な事の一つである.

また、土砂災害警戒区域は多くの各都道府県のホームページでも閲覧可能で、空中写真と重ね合わせて自宅が確認できるようになっている事から、実際の学習時に受講者の自宅を聞いてその部分を画面に映しての説明や、学習時間を確保できる場合には、事前に受講者の住宅の位置情報を聞き、土砂災害警戒区域と空中写真と合成したセンター作成の防災マップ(図-4)を学習する方法は、教員からも「受講者も自分ごとにしやすい」との意見もある事から最近では研修内容に多く用いている.

参考文献

- 1) 桧垣ら:土砂災害と防災教育 命を守る判断・行動・備え,浅倉書店, 2016
- 樋口耕一:社会調査のための計量テキスト分析 一内容分析の継承と発 展を目指して一、ナカニシヤ出版、2020
- 末吉美喜:テキストマイニング入門 Excel と KH Coder で分かるデー タ分析,株式会社オーム社,2019





図-4 防災マップや学習状況

土砂災害防災ロールプレイングゲーム「土砂災害が発生したとき」の開発と

ゲームを用いた防災教育の効果検証

和歌山県土砂災害啓発センター	○岸畑明宏	・坂口隆紀・	・筒井和男・	·宮﨑徳生
和歌山工業高等専門学校専攻科エコシステム工学専攻				西萩一喜
和歌山工業高等専門学校環境都市工学科				辻原治
国土交通省国土技術政策総合研究所(国土交通省近畿地方整備局大規	模土砂災害素	策技術セン	(ター)	木下篤彦

1. はじめに

最新の学習指導要領では、小学校教育で「自然災害に関する知識を得ること」や「災害から身を守ること」、「災害から 人々を守る行動」などについて指導することが強化され、2020年度から全面実施されることとなっており、土砂災害につ いても効果的な防災教育教材の開発が求められている.

防災教育教材では、書籍やボードゲームなどに加えて、デジタルコンテンツを利用した教材の開発も行われており、辻原 ら¹⁾は、防災教育教材として RPG(ロールプレイングゲーム)ソフトウェアを開発し、RPG で学習したグループが、テキ スト学習のグループに対して、学習直後と1か月後の学習内容を問うテストの正答率が上回っていたことを確認し、理解 度や定着度の観点から、RPG を用いた防災教育の効果について言及している.

RPGの特徴は、ゲームの操作者(プレイヤー)自らが **RPG**のストーリーに主体的に参加できる点であり、土砂災害に関する防災教育に適用した場合は、**RPG**のプレイヤーである児童・生徒自身が、ストーリー(土砂災害からの避難など)を「自分ごと」として学習できることが期待される.一方で、**RPG**を用いた学校における土砂災害に関する防災教育の事例はなく、今回、**RPG**ソフトウェアの開発とこれを用いた防災教育を行った.

2. RPG「土砂災害が発生したとき」の開発

土砂災害に関する防災教育を対象とした RPG ソフトウェアの開発にあたり, RPG ソフトウェアを用いた防災教育につい ての研究を行っている和歌山工業高等専門学校環境都市工学科辻原研究室と、土砂災害に関する防災教育を行っている和 歌山県土砂災害啓発センターが、共同でシナリオの立案など、ソフトウェアの開発から防災教育までの一連のプロジェク トを遂行した.本プロジェクトは、2020 年 5 月より、対象年齢と想定した小学校高学年の学習内容の調査から始め、同年

12月に RPG ソフトウェアが完成し,2021年1月から小学校などにおいて防災教育を開始した.

なお、RPG ソフトウェアの開発は、著者の1人の西萩が、RPG 開 発用ソフトの「RPG ツクール VX Ace」を用いて行い、RPG の題名 は「土砂災害が発生したとき」とした.

3. RPG のシナリオ

RPG のシナリオやシステムを立案するにあたり、4 点(①ゲーム としての楽しさ、②ストーリーの没入しやすさ、③ゲーム後の達成 感、④ゲームによる学習効果)に注意し、①については、**RPG**内に 複数のクイズを挿入(図-1)して、飽きさせない工夫をした.また、 ②については、児童・生徒の日常生活に即した以下のシナリオを考 えた.

「楽しみにしていた遠足当日は大雨で,遠足は中止になってしまう. 更に雨は強まり、大雨警報などの防災情報が発令(図-2)され、主 人公は事前にハザードマップで確認していた避難所へ兄と一緒に避 難することになったが、土石流、がけ崩れ、地すべりといった土砂 災害の危険を避けながら無事に避難できた.」

次に③については、RPGのストーリー終了後に、出題されたクイズ正答率の合計からスコアとして提示する工夫をした. ④については、土石流、がけ崩れ、地すべりのそれぞれについて実際の災害の映像を、博士というキャラクターによって土砂災害の特徴に関する説明を行った後に挿入した.



図-1 挿入したクイズの一例



図-2 大雨警報の発令

4. RPG を用いた防災教育の実施

2021 年1月から小中学校(小学校3年生~中学校3年生)を対象として RPG ソフトウェアを用いた土砂災害に関する防災教育(以下,授業)を行った.2021 年4月時点では6小中学校を対象に,計6回の授業を行っている.また,授業の時間としては,1時限(45分)を標準とし,初めに WEB ミーティングソフトを用いたオンラインでの RPG 操作方法の説明を行い,次に児童・生徒が RPG をプレイ(図-3)した.また, RPG 終了後の児童・生徒にアンケート調査を行った.

5. RPG を用いた防災教育の効果検証

授業を行った学校のうち、アンケート調査結果に加えて感想文を頂いた A 小学校(対象児童7名)と M 中学校(対象生 徒6名)について、防災教育結果の分析を行った. 感想文の分析にあたり、まずはテキストデータ化を行い、KH-Coder³を 使用して共起ネットワーク分析³⁾を行った. なお、同分析は、集計単位は1 感想文とし、3 文以上に表れる語句を対象とし た. M 中学校の感想文を分析した結果を図-4 に示す. ここで凡例の Subgraph は抽出された関係が密接なグループを示し、 Frequency は各語句を中心とした円であり、その大きさが語句の出現度数の大きさを示す. 図-4 では、「体験」「防災」「映 像」「学ぶ」、「実際」「知る」、「ゲーム」「楽しい」、「いつ」「分かる」「思う」の4 つの語句のグループが確認された. これ は、「ゲーム」で「楽し」く、「実際」の土砂災害の「映像」を通して、「防災」について体験できたことが想定された. 以 上から、①ゲームとしての楽しさについては、児童・生徒が概ね楽しく RPG をプレイすることができたようであった. ま た、②ストーリーの没入しやすさについても、アンケート結果から児童・生徒の多数が RPG を通して「自分の命は、自分 で守る」という感想を持ったことから、ストーリーを通して防災を「自分ごと」として認識できたことが想定された. ③ゲ ーム後の達成感については、「(スコアが) 100 点満点でよかった」といった感想があり、スコア表示が RPG の達成感につ ながっていることが想定された.

一方,④(土砂災害の学習)については、アンケート結果から「土砂災害のことをもっと詳しく勉強したい.」と感じなかった児童・生徒が30%程度いたものの、感想として、「土砂災害警戒情報などの難しい言葉も分かってよかった」といった内容があり、一定の土砂災害に関する学習効果を確認できた.

6. おわりに

本研究では、土砂災害に関する防災教育を目標とした RPG ソフトウェアの開発と、RPG ソフトウェアを用いた防災教育 について紹介した.感想文やアンケート結果から、児童・生徒が RPG を楽しく、ストーリーに集中して行うことができ、 RPG クリア時には達成感を感じられたことが想定された.一方で土砂災害の学習としては、迫力ある実際の土砂災害映像 などを通して、土砂災害や防災情報についての学習効果は見られたが、土砂災害に関する知識の定着や学習意欲の向上と いう点については、RPG に加えて、事後学習の導入などを行うなどの、更なる工夫が必要なことも想定された.

参考文献

- 1) 辻原ほか: 防災教育教材としての RPG ソフトウェアと学習効果, 土 木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.74, No.2, pp.I_20-I_28, 2018.
- 末吉美喜: テキストマイニング入門 Excel と KH Coder で分かるデ ータ分析,株式会社オーム社,2019.
- 3) 樋口耕一: 社会調査のための計量テキスト分析 一内容分析の継承 と発展を目指して一, ナカニシヤ出版, 2020.



図-3 2人組で RPG をプレイする児童(A小学校)



図-4 共起ネットワーク分析結果 (M 中学校)

和歌山県田辺市における明治22年水害の災害教訓伝承に関する調査

和歌山県県土整備部砂防課 和歌山県土砂災害啓発センター 国土な通常近幾地古敷備昌士規構土板 〇森川 智 宮崎徳生・筒井和男・岸畑明宏・坂口隆紀

国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センターホ下篤彦

1. はじめに

和歌山県では、平成 23 年の紀伊半島大水害を契機と して和歌山県土砂災害啓発センターを設置し、土砂災害 の発生メカニズムに関する調査研究及び紀伊半島大水 害をはじめとする過去の災害記録や教訓を風化させず 後世に継承するため、土砂災害に関する啓発活動に取り 組んでいる.

大規模土砂災害に備えるためには、「過去の災害に学び・生かす」取り組みが大切であり、県内各地域の過去の災害記録や教訓を調査し土砂災害に関する啓発活動の資料として活用している.

本県における過去の大規模土砂災害としては,明治22 年,昭和28年,平成23年と約60年周期で発生してい る.特に,明治22年水害は県内で死者1,247人,流出 家屋3,675軒の激甚な被害をもたらした.中でも,県南 部に位置する会津川,富田川流域に被害が集中し,田辺 市では会津川流域上流部に位置する高尾山と槇山で大 規模な崩壊の発生により天然ダムが形成された.その後 決壊し,下流部にあたる田辺市街地を中心とする地域で 甚大な被害が発生した.

本研究では、田辺市における明治 22 年に発生した大 規模災害に関する写真、住民ヒアリング、自然災害伝承 碑における土砂災害教訓伝承に関する調査結果を紹介 する.

2. 明治 22 年水害における教訓伝承に関する調査方法

参考文献 ^{1)~3)}を基に明治 22 年水害の教訓伝承に関す る調査を田辺市紺屋町から長野周辺エリアと龍神村下 柳瀬地区(図-1)で以下のとおり実施した.

2.1. 明治22年水害当時の写真と現在を比較

明治 22 年水害当時の写真を基に、紺屋町から長野周 辺エリアで写真撮影を実施し、明治 22 年水害当時の写 真と比較した.代表的な比較写真を**写真-1~3** に示す. 当時被災した場所の多くでは家や道路が再建されてい る.また、**写真-1**,2 の大規模崩壊斜面は、現在は緑に 覆われているが、水害後 130 年以上が経過しても大規模 崩壊が発生した地形であることが確認できる.なお、山 全体の形は明治 22 年水害当時の原形をとどめていた.

2.2. 当時の記録を知る住民へのヒアリング調査

明治 22 年水害の記録を知る住民 2 人のヒアリング調 査を実施した.





写真-1明治22年水害当時の写真と現在の比較.田辺市上秋津地内. (左)M22年水害時.(右)2021.3.1撮影.





写真-2 明治 22 年水害当時の写真と現在の比較. 田辺市長野地内. (左) M22 年水害時.(右) 2021. 3. 10 撮影.



写真-3明治 22 年水害当時の写真と現在の比較. 田辺市紺屋町地内. (上) M22 年水害時. (下) 2021. 2. 10 撮影.

2.2.1. 龍神村下柳瀬地区の天然ダムに関する証言

龍神村誌 3によると、明治22年8月19日未明に下柳瀬 六地蔵山が突如崩壊し、日高川を堰き止めたため上流一帯 は瞬時に水没した. 民家は川上へと押し流され住人らは屋 根に上り助けを求めたが、それも束の間ことで大規模な崩 壊により形成された天然ダムは一挙に決壊し、水魔は民家 や人命を一瞬のうちに呑み,70 戸が流失し83名の犠牲者 が出た.

今回,当時の記録を知る区長 Y 氏と崩壊斜面の地権者 0 氏の2人にお話しを聞いた(写真-4).

Y氏・0氏の主な証言は次のとおりである.

・慰霊碑があるところがおそらく山崩れの中心である.

・過去にこの周辺の田んぼを掘り返したときに水害当時の ものと思われる大木や崩れた岩盤が発見された.

・明治 22 年 4 月の町村合併でこの周辺が村の中心地とな り役所もあったが、わずかその4ヶ月後に水害に見舞われ役 所をはじめ村のすべてが流された.

・川の近くにあった家は、水害後、山裾などの高い位置に建 てられた.

・地元では、山崩れで日高川が堰き止められ天然ダムがで き民家が上流に流されこと,その後,天然ダムの決壊で民 家が下流に一気に流されたこと、大正時代に地区に設置さ れた灌水用の水路まで天然ダムの水位が上昇したことが言 い伝えられている.

 ・令和元年8月に水害後130年目の慰霊祭として水害 当時に避難を呼びかけた村民を主役とした講演会を開催 し、明治22年水害の記録を振り返った.

2.3. 自然災害伝承碑に関する調査

参考文献 3~5,地域関係者への聞き取り調査を参考に現 地調査を実施し、明治22年水害、明治26年水害、平成23 年紀伊半島大水害に関する自然災害伝承碑が確認できた. 明治22年水害に関する代表的なものを写真-5~9に示す.

水難記念碑がある長野八幡神社の旧社殿は、現社殿の下 方に建立されていたが明治 22 年水害で流失し現在の場所 に再建された. その後, 水害から 100 年以上が経過した平 成2年に下流の上三栖縄手の河原で旧社殿地にあった2つ の灯籠が発見され、現社殿の水難記念碑のそばで大切に安 置されている.

また、田辺市上芳養石神地区では、明治22年水害の災害 記録と石神地区の復興が記された看板が田辺梅林から大蛇 峰まで整備された遊歩道の入り口に設置され、大蛇伝説とし1)明治大水害誌編集委員会:紀州田辺明治大水害-100 て地域に語り継がれている事例も見受けられた.

3. おわりに

知る人は限られていたが貴重な災害記録や教訓伝承に関する5)井上公夫:歴史的大規模土砂災害地点を歩く(そのIII), 丸源書店, 情報を収集することができた.全国的な過去の大規模土砂災 2020. 害に関する事例については井上 5により調査が行なわれてい るように土砂災害の歴史や教訓を研究することも重要であり, 引き続き研究を継続し、減災のため土砂災害に関する啓発活 動に活用していきたいと考える.





写真-5 下柳瀬橋にある明治

22 年水難者霊位.

写真-4 明治22年水害に関 する住民ヒアリング状況.



写真-6 会津公園内にある明治 大水害記念碑.





写真-7 蟻通神社前に ある大水害百周年記念 碑(水位標).



写真-8 長野八幡神社にある水難記念碑と平成2年に現社 殿に安置された灯籠の一部及びその説明文.

平成元年二月一日 上芳養石神区	石神は 山限りなく 梅の國	い彼方に四国がかすんで最高の眺望が楽しめ山・高尾山・慎山・虎ヶ峰の山やまを望み、近くに竜神山・立てぼ、一月三十万本、春を告げる樽の花い	今も石神地主神と赤が奈られています。大峧 り、同屋してこの様林を育てましたが、大峧 その後、至の人がとは大水客の国勢から立 さなずき合ったといわれます。	にビーッと表した。 やく首手術の明治二十二年に紀希地方は大 したが、その病の大不能主く」ドルの高に望る力 まう根状となってしまいました。このとう。 たれて、各地は大不容主したが、その で、この時の大不能にいびが入り、大美智と で、この時の大不能にいてはため上方といい。 したが、その時の大不能にいてはため上方は大	・ ここ石神操林の置後に展成のように立ち上 ここ石神操林の置後に展成のように立ち上 が、技売を出めにつけ、根元は長く古穂い社 たっいましたが、その根元あたりを大院が 後のこいます。大量からら院が接ん でいましたが、その根元あたりを大院が
神区	(僧正	楽しめます。 弾山・三星	。 大蛇峰に 、 大蛇は、 、 、 大蛇は、 、	あたりに響 した。 大地 しまう 点前 しまう 点前 に 学	られていたち た乾いほどの体 したながする。 ないな物のついた。

写真-9 田辺市上芳養石神地区(田辺梅林)にある明治22年水 害と復興の記録が記された看板.

参考文献

- 周年記念誌, 和歌山県田辺市, 1989.
- 2) 紀南文化財研究会:ふるさとの思い出写真集明治大正昭和田辺, 佐藤今朝夫, p68-71, p114-115, 1980.

明治 22 年水害から 130 年が経過し、当時の記録や教訓を³⁾ 龍神村誌編さん委員会:龍神村誌上巻、龍神村、 p67-88, 1985. 4) 森光國:長野地区社会史, p118-123, 2011.

和歌山県日高郡みなべ町における断層破砕帯での地すべり対策

Countermeasures for the landslide on fault crush zone in Minabe Town, Wakayama Prefecture 岸畑明宏*,坂口隆紀(和歌山県土砂災害啓発センター),木下篤彦(国土交通省国土技術総合研究所) Akihiro KISHIHATA, Takaki SAKAGUCHI (Wakayama Sabo Research and Education Institute), Atsuhiko KINOSHITA (National Institute for Land and Infrastructure Management)

キーワード:地すべり、断層破砕帯、地下水、対策

Keywords: Landslide, Fault Crush Zone, Groundwater, Countermeasure

1 はじめに

2019年8月15日の台風第10号に伴う大雨(日 雨量208mm)により,みなべ町東本庄に位置す る切土・法面吹付工施工箇所では吹付工法面にク ラックが生じた.

和歌山県日高振興局建設部による調査の結果, 切土法面の背後約 20m の地点に地すべりの滑落 崖(L≒20m, 落差約 80cm)が確認され, 吹付工 の亀裂が拡大していた.加えて,地すべりの前方 には二級河川南部川が流れ,さらに対岸には国道 424 号と辺川集落が存在し,地すべりが崩落した 場合,南部川の河道閉塞や溢水,土石流等による 周辺への甚大な被害が生じる恐れがあった.

地形地質に関しては、古第三紀の泥岩(四万十 帯音無川層群)が分布する付加体で、近隣に断層 が広く分布(図-1)している.また、踏査の結果、 現場においても断層が確認された(図-2).

断層の地すべりや深層崩壊への影響について, 山崎ほか²⁾,川上³⁾は,それぞれ断層による地下 水の堰き止めが地すべりの原因である事例を示 している.また,木下ら⁴⁾は,断層沿いの地下水 流入が深層崩壊発生の一因と考察している.

本研究では、断層が存在する現場における、地 すべり調査と地すべり対策工の選定を行った事 例について報告する.



図-1 現場周辺の地質図(地質図幅¹⁾を編集)

2 地すべりの調査・観測

和歌山県日高振興局建設部は地すべり発生後, 2019 年 9 月から地盤伸縮計による地表面変動の確認,地下水位観測,パイプひずみ計観測を行っている.(図-3)

岸畑ら⁵⁾の手法に従って,2019年10月から2021 年3月の間で連続雨量が10mm以上となった降水 イベント(計54回)における地下水位上昇量をプ ロットしたものを図-4に示す.断層面より上方に 位置する,Bor-2,Bor-3,Bor-2W,Bor-3Wでは, 連続雨量に対する地下水位上昇量の近似直線の傾 きが0.0009~0.0414であった.一方,断層面より下



図-2 踏査によって確認した断層



図−3 現場の調査機器配置図

方に位置する Bor-1, Bor-4, Bor-1W では, 0.0006 ~0.00075 であり, Bor-3W を除き, 断層面より上 方では,連続雨量に対する地下水位の上昇量が大 きかった.このことから,地下水の主測線下方へ の流動に対して, 断層面によるせき止め効果が存 在し,特に, Bor-2, Bor-3 ではその効果が大きい ことが想定された.

3 地すべり対策工の選定

ボーリング調査結果とパイプひずみ計観測結 果から,頭部を滑落崖とする最大深さ 21m のす べり面が設定(図-5)され,観測最高水位におけ る安定解析から,対策工の配置と工法比較を行い, 抑止工にアンカー工,地下水排除工に横ボーリン グ工が選定(図-6)された.なお,横ボーリング 工については,断層面による地下水の堰き止めを 想定し,断層面を貫通する深度の横ボーリング工 が選定された.

4 おわりに

現在,和歌山県日高振興局建設部による地すべり 対策工事が行われている.また,地すべり観測に ついては継続的に行われており,施工後の効果の 確認についても行っていきたい.



参考文献

- 鈴木達夫(1939):7万5千分の1地質図幅,地質調 査所
- 山崎ら (2003): 大規模地すべりの水文地質構造を考 慮した立体排水工,日本地すべり学会誌,Vol. 40, No. 3, pp. 29-36.
- 川上浩 (2007): 断層によるせき止め地下水を原因と する地すべり2例,日本地すべり学会誌,Vol. 44, No. 4, pp. 33-36.
- 4) 木下ら(2021):2011年に深層崩壊が発生した奈良県 十津川村栗平地区における比抵抗探査を用いた断層 沿いの地下水流入過程の検討,日本地すべり学会誌, Vol. 58, No. 1, pp. 40-47.
- 5) 岸畑ら (2020):地すべり対策工の効果の簡易的な検 証方法の提案,日本地すべり学会誌, Vol. 57, No. 5, pp. 19-24.





後世に伝える過去の山地災害に関する調査と防災学習の取り組みについて

和歌山県土砂災害啓発センター 〇宮﨑徳生・筒井和男・岸畑明宏・坂口隆紀 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター 木下篤彦

1.はじめに

和歌山県では,平成23年の紀伊半島大水害を 契機として和歌山県土砂災害啓発センター(以下,「センター」)を設置し,土砂災害に関する 調査研究及び紀伊半島大水害をはじめとする災 害記録や教訓を後世に継承するため,土砂災害に 関する啓発活動に取り組んでいる.

山地災害等から身を守るためには,過去の災害 に学び備えることが重要であり,災害を他人ごと ではなく自分ごととして捉えるため,県内各地域 の過去の災害記録や教訓を調査し,啓発研修や小 中学校等の防災学習を実施する対象者に応じた 地域の啓発資料として活用している.

本報告では、明治22年水害で甚大な被害が発 生した和歌山県田辺市における大規模山地災害 に関する災害記録に関する調査結果とそれらの 結果を生かした小中学校等における防災学習の 取り組みについて報告する.

2. 明治22年水害に関する調査方法

明治 22 年水害は県内で死者 1,247 人, 流出家 屋 3,675 軒の激甚な被害をもたらした¹⁾. 中でも, 県南部に位置する会津川,富田川流域に被害が集 中し,大規模な山腹崩壊の発生により形成された 天然ダムの決壊により甚大な被害が発生した田 辺市紺屋町から長野周辺エリアと龍神村下柳瀬 地区(図-1)で以下のとおり実施した.

2-1 明治22年水害当時の写真と現在を比較

明治22年水害当時の写真を基に, 紺屋町から 長野周辺エリアで写真撮影を実施し, 明治22年 水害当時の写真と比較した.代表的な比較写真を 写真-1 に示す. 当時被災した場所の多くでは家 や道路が再建されている.また, 大規模崩壊斜面 は,現在は緑に覆われているが, 水害後130年以 上が経過しても大規模崩壊が発生した地形であ ることが確認できる.

2-2 当時の記録を知る住民ヒアリング調査



図-1 調査箇所位置図.



写真-1 明治 22 年水害当時の写真と現在の比較. 田辺市長 野地内. (左)明治 22 年水害時. (右) 2021. 3. 10 撮影.





写真-2 下柳瀬橋にある明 治 22 年水難者霊位.

写真-3 会津公園内にある明 治大水害記念碑.

龍神村誌²によると,明治22年8月19日未明 に下柳瀬六地蔵山が突如崩壊し,日高川を堰き止 め上流一帯は瞬時に水没した.それも束の間こと で形成された天然ダムは一挙に決壊し,水魔は民 家や人命を一瞬のうちに呑み,70戸が流失し83 名の犠牲者が出たとある.

今回,当時の記録を知る区長 Y 氏と崩壊斜面 の地権者 0 氏の 2 人にお話しを聞いた.

Y氏・0氏の代表的な証言は次のとおりである. ・慰霊碑があるところがおそらく山崩れの中心 であり,過去にこの周辺を掘り返したときに水害 当時のものと思われる大木や崩れた岩盤が発見 された. ・明治22年4月の町村合併でこの周辺が村の中 心地であったが、わずかその4ヶ月後に水害で村 のすべてが流された.

・令和元年8月に水害後130年目の慰霊祭とし 講演会を開催し,水害当時の記録を振り返った. 2-3 自然災害伝承碑に関する調査

参考文献^{1)~2)},地域関係者への聞き取り調査を 参考に現地調査を実施し,明治22年水害,明治 26年水害,平成23年紀伊半島大水害に関する自 然災害伝承碑が確認できた.

また,田辺市上芳養石神地区では,明治22年 水害の災害記録と石神地区の復興が記された看 板が設置されている事例も見受けられた.明治 22年水害に関する代表的なものを**写真-2,3**に 示す.

3. 過去の山地災害の経験を生かした小中学校等 における防災学習

防災学習は、将来の防災の担い手となる子供 が防災の知識を身につけるだけでなく、子供か ら家庭へ、さらには地域への防災意識の広がり が期待できるため、センターの啓発活動の一つ の柱と位置づけ積極的に取り組んでいる.学習 では山地災害等から身を守るため、自分ごとと して考え行動できることを学習目標に、前章に 述べた過去の災害記録や学校が所在する地域の 情報を取り入れた教材となるよう工夫するとと もに実験や現地調査なども取り入れ児童・生徒 が関心や興味をもち土砂災害について学び理解 を深めることから始めている.

3-1 デジタルコンテンツを活用した防災学習

山地の割合が高く台風の影響を受けやすい和 歌山県では,過去に多くの山地災害が発生してい る.過去の災害の記録や経験を学び防災の知識を 身につけ災害から身を守るため,土砂災害と避難 行動が体験できる防災 RPG (ロールプレイゲー ム)「土砂災害が発生したとき」(写真-4)を和 歌山工業高等専門学校辻原研究室と共同し開発 した.シナリオは,「楽しみにしていた遠足当日 は大雨で遠足は中止となった.雨は強まり,大雨 警報などの防災情報が発令される.主人公は事前 にハザードマップで確認していた避難所へ無事 に避難できるか.」というストーリーに答えなが らプレイし,最後にクイズのスコアが表示される 工夫が行われている.ソフトウェアの開発は同校 専攻科エコシステム工学専攻の西萩さんが行い,





写真-4 防災 RPG「土砂災 害が発生したとき」.

写真-5 防災 RPG での学習 の様子.

小学校等(写真-5)で活用し、一定の学習効果が 確認でき好評を得ている.

また,WEBサービスを使った土石流模型装置 による実験のライブ配信にも積極的に取り組ん でいる.これにより,センター以外で行う防災学 習等でも臨場感のある実験の様子を観察するこ とが可能となり,より深い関心が得られると考え る.

4. おわりに

明治22年水害から130年以上が経過し,当時 の記録や教訓を知る人は限られていたが貴重な 災害記録に関する情報を収集することができた. 後世に災害の記録や教訓を伝えるためには山地 災害等の歴史を調査することも大切であり,引き 続き調査を継続し,啓発資料やデジタルコンテン ツを用いた教材として活用していきたい.

また、デジタル化の推進により文部科学省 GIGA スクール構想での ICT 教育の実現にあた りデジタルコンテンツを利用した防災学習にも 柔軟に対応できるよう教材の開発及び改良を行 うとともにWEBサービスを利用した実験動画の ライブ配信などにも積極的に取り組んでいきた い.

参考文献

 1) 明治大水害誌編集委員会:紀州田辺明治大水 害-100周年記念誌-,和歌山県田辺市,1989.
2) 龍神村誌編さん委員会:龍神村誌上巻,龍神村, p67-88, 1985.

Building / Construction Information Modeling, Management (BIM/CIM)

for landslide countermeasure facilities

Satoru Morikawa^{1,*}, <u>Akihiro Kishihata²</u>, Hisashi Kameda³

¹ Erosion and sediment control division, Wakayama prefectural government,

Wakayama 640-8585, Japan

² Wakayama sabo research and education institute, Wakayama prefectural government,

Tel: +81-735-29-7532; E-mail: e0806041@pref.wakayama.lg.jp

³ Nippon Koei Co., Ltd.

Abstract

The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism has been introducing a BIM/CIM at the first (investigation and design) stage, as a method of i-Construction. The Wakayama prefectural government also focused on this technology and has built a BIM/CIM for landslide investigation, mechanism analysis, and design of landslide countermeasure facilities in the Nagano, Tanabe-city.

Through introduction of the BIM/CIM, it was proved that the landslide countermeasure facilities was able to be designed effectively because the BIM/CIM was able to represent the slip surface and the distribution of groundwater, etc. in the landslide area with a three-dimensional model.

The BIM/CIM will be utilized in order to design landslide countermeasure facilities based upon the fluctuation of the groundwater table during flood season, etc. and to implement longterm management of the facilities for extending service life, etc. in the future.

And through this operation, the prefectural government studied some lessons as follows.

 The BIM/CIM is very useful for the design of emergency works against landslide movement.
Staffs, who can operate the BIM/CIM, should be trained.



Fig. 1 The landslide CIM.

Acknowledgments

Authors wish to express sincere appreciation for support provided by persons concerned with this CIM.

References

Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism (2019) Draft of guideline for introduction of BIM/CIM, chapter No.9 Landslide

電極板を用いた非接触型流砂計測法開発のための水路実験

三重大学生物資源研究科 〇石坂光, 堤大三 国土交通省中部地方整備局 今井惣一朗

【はじめに】

日本や欧米各国では,過去 30 年間,プレートジオフ オンやパイプハイドロフォン(堤ら,2015)といった間 接的手法による土砂移動計測が精力的に行われてきて いる。しかしこれらの手法は,土砂の衝突を検知する 接触型の計測手法であるため,大粒径の砂礫や高速移 動する土砂の衝突によって機器そのものが破損してし まうことがあるため,最も重要な大規模土砂移動現象 を計測できないという問題点がある。

そこで,我々は非接触型の新たな流砂量計測手法の 開発を行っている。この手法は,河川両岸に電極を設 置し,交流電圧を与えた際の水中を流れる電流を計測 して電気伝導度を求め,土砂濃度に依存して電気伝導 度が低下することを利用して土砂濃度を求めるもので ある(図-1)。

【土砂移動計測原理】

土砂濃度*Cs* は、式(1)により求められる。ここで、 σ_{st} は計測から求めた電気伝導度 σ [mS/m]を水自体の 電気伝導度 σ_m [mS/m]で標準化して求めるものであり (式(2))、 σ を求める際の電極幅には、後述する、実 際の電極幅 l_e [m]の外側の通電範囲を考慮した見かけ 電極幅 l_a [m]を用いている(式(3))。ここで、V[V]: 電圧、I[mA]:電流、 l_e [m]:電極間距離である。

$$C_s = 1 - \sigma_{st} \tag{1}$$

$$\sigma_{st} = \frac{\sigma}{\sigma_m} = \frac{1}{\sigma_m} \left(\frac{l}{V} \frac{b_e}{h \, l_a} \right) \tag{2}$$

$$l_a = \frac{1}{\sigma_m} \left(\frac{l}{V} \frac{b_e}{h \, l_e} \right) l_e \tag{3}$$

【実験方法】

計測そのものが可能かを検証する静水条件における 実験と,より現地計測に近い条件での検証を目的とし た流水条件における実験を行った。流水実験の実験装 置の概略図を図-2に示す。

(1) 静水実験



図-1 土砂移動計測のイメージ図



図-2 実験水路概略側面図

水槽の両端に電極板を設置し,電圧をかけた際に計測 される電気伝導度が,土砂濃度に依存して変化するかを 検証する実験を行った。その際,電極幅と水槽幅が一致 する条件と一致しない条件で比較をした。電極は両実験 ともに幅:19 cm,高さ:10 cm である。水槽幅と電極幅を 一致させた実験では,水槽は幅・奥行・高さ:19 cm で, 使用した土砂は平均粒径4.75 mm,間隙率0.39 である。 水槽幅と電極幅が一致しない条件では,幅:35 cm,奥 行:21 cm,高さ:26 cm の水槽を用い,土砂は水槽幅と電 極幅を一致させた実験と同じものを用いた。

(2) 水槽幅を変化させる静水実験(土砂無し)

実験(1)を踏まえて,水路型水槽を用いて電極幅に対 して水槽幅 *L*(cm)を変化させ,電極幅外側の通電領域を 定量化する実験を行った。使用した水槽は,最大幅:180 cm,縦長さ:9 cm,高さ:10 cmである。

(3) 流水実験(土砂供給なし)

流水条件において, 土砂が存在しない状態で電流を流

した際に,計測される電気伝導度の変化を検証した。この際,水位変化がない場合(Run1)と水位変化を発生させた場合(Run2,3,4)で実験を行い,水位変化が計

測結果に影響を及ぼすかどうかを比較した。

(4)土砂移動計測実験(50 V)

高い電源電圧(50 V)を与えた場合,流水条件において計 測が可能かどうか検証するための実験を行った。土砂供給 量を 150,300,450 cm³(Run5,6,7)として各投入量1回 ずつ実験を行った。土砂はベルトコンベアによって供給し, ベルトコンベア上の土砂設置区間はすべて 90 cm で統一し た。

(5)低電圧土砂移動計測実験(10 V)

現地計測への適用を想定し、電源電圧を小さくした状態 で計測が可能かどうかを検証した。実験条件は、電源電圧以 外はすべて実験(4)と同一であるが(Run 8, 9, 10), ここ では各条件で3回繰り返した。

【結果と考察】

実験(1)で求められた標準化電気伝導度を図-3 に示す。ど ちらの場合でも土砂濃度に依存して電気伝導度が低下する ことが示された。ただし、水槽幅が電極幅よりも大きい条件 では、電極幅と水槽幅が同じ条件と比較して電気伝導度が 大きく計測されることから、電極幅の外側に通電領域が存 在することが示された。

実験(2)で得られた見かけ電極幅と水槽幅の関係を図-4 に示す。ここから電極幅外側の通電領域には限界があり,一 定の見かけ電極幅が存在することが判明した。

実験(3)から(5)の結果を図-5 に示す。流水のみの計測結 果を見ると、土砂量がマイナスと計算される場合もあるも のの、0 に近い値となった。

高電圧(50 V)の結果を見ると、土砂量の推定値は実際の 投入量に近い値となり、全体としても両者の関係は 1:1 の 直線に乗っていることがわかる。よって、流水条件下での土 砂移動量計測において、本手法が高い精度で有効であるこ とが分かった。

低電圧(10 V)の結果を見ると、供給土砂量 300 cm³以下の 場合では、実験の繰り返し間でのばらつきや、土砂量の推定 値と実際の投入量の間の誤差が見られるが、450 cm³の場合 では、精度よく土砂量が推定できている。このことから、 電圧を低く設定すると、土砂濃度が低い場合は計測精度 が低下する可能性もあるが、土砂濃度が高ければ 50 V の 場合と同様に、高精度での推定が可能であることが分か



った。

【まとめ】

本研究で行った水路実験で,静水条件下,流水条件下 ともに電気的手法による土砂移動計測が有効であること, 負荷電圧を低くした場合でも計測が可能であることを確 認した。また,計測精度に関しても,パイプハイドロフォ ンなどでは5~1/5 倍の範囲であると言われており,それと 比較しても劣らない精度であるため,有効な手法であるこ とが判明した。今後も水路実験によりさらに多くの条件で の検証を継続するとともに,現地実験による計測手法の確 立を目指していく。

大規模土砂災害発生後の警戒・避難における未経験降雨指数の活用について — 平成 23 年紀伊半島大水害後の事例分析 —

京都大学大学院農学研究科 ^〇小杉賢一朗・福田 幹

1. はじめに

自然斜面や渓流において雨水流動や土砂移動に係る物理特性を正確に把握することは困難であり、土砂災害 の予測精度向上には未だ多くの課題が残されている。現状の土砂災害に対する警戒・避難技術においても、見 逃しを軽減しようとして土砂災害発生危険基準線(CL)を低く設定することにより空振りが増えてしまう問題 が指摘されている。このため警戒・避難技術では、たとえ空振りしてもその後の住民の避難行動に負の影響を 与えないことが重要になると考えられる。具体的には、空振りにより得られた「この規模の降雨では災害が発 生しないであろう」という知見が直ちに活用され、次回以降の空振りの減少に直結することが重要になろう。 しかしながら現行の方法では、一般に、一度設定された CL の見直しに時間と手間がかかることが多い。

近年筆者らは、土砂災害発生危険度を評価するための新たな指標である未経験降雨指数 TPを提案した(小杉ら, 2021;小杉, 2022)。未経験降雨指数は、「現在時刻の雨は、時刻 TPより後の期間における最大規模になっている」という客観的事実を示す指標であり、その計算に当たっては常に最新の雨量データが用いられる。よって未経験降雨指数を用いた土砂災害危険度判定技術においては、空振りが発生した場合でもその知見が直ちに活用される仕組みが自ずと整っている。本研究では、大規模土砂災害発生後の警戒・避難における未経験降雨指数の活用について、現行手法との比較に基づき検討を行った。

2. 未経験降雨指数 T_P

小杉(2022)は、スネーク曲線図において「現在時刻から過去に 遡ったときに、『既往最大値超過ではない』という状況が初めて出現 する時刻」を未経験降雨指数 *T*_Pと定義した。*T*_Pは雨量の時系列デー タを用いて算定され、各時刻においてその値が定まる。ある現在時 刻における *T*_Pの具体的な算定手順は次のとおりである。

- 観測開始から現在時刻までの全期間の雨量データを用いて、半減期がそれぞれ M₁, M₂ (ただし M₁≥M₂とする)の2種類の実効雨量 X(M₁,t), X(M₂,t)を算定し、X(M₁,t)を横軸に X(M₂,t)を縦軸にとって、図-1 に示したスネーク曲線図を描く。図上に落とされた個々の点を、以下ではプロットと呼ぶ。
- ② スネーク曲線図上の「過去の降雨イベント中のプロット」全て を対象として、現在時刻のプロットからみて右上の領域(図-1 中の灰色四角で示した領域。但し、境界線を含む。)にあるもの たんてけ出れて、たいた河流でいい、温力の15日の正見ごびにし、



する模式図(小杉(2022)の図-2 を引用)

- を全て抽出する。なお本研究では、過去 24 時間の雨量がゼロより大きい場合を降雨イベント中と判断し、 24 時間以上の無降雨期間によって降雨イベントが区切られるとした。
- ③ ②で抽出したプロットのうち、「時刻が最も新しいプロット」の時刻を未経験降雨指数 *T_P*の候補とする。 図-1 に示した例の場合、*T_P*の候補は「2004/7/4 3:00」となる。
- ④ M₁とM₂の組合せを①とは異なる組合せに設定した上で、全期間の雨量データを用いて図-1と同様の新たなスネーク曲線図を描き、上記②~③を行って新たなT_Pの候補を定める。この作業を、種々のM₁とM₂の組合せについて繰り返し、種々のスネーク曲線図の各々についてT_Pの候補を定める。

⑤ 以上により得られた T_Pの候補のうち,最も過去に遡ったものを未経験降雨指数 T_Pとする。

上記の *T_P*算定プロセスにおいて種々のスネーク曲線図を用いることは、「土砂災害の発生予測に有効と考えられる種々の見方」で降雨の特徴を分析することに対応している。そして、種々の候補のうち最も過去に遡った時刻を採用する(上記⑤)ことによって、*T_P*は「遡り期間の設定において *T_P*まで遡らなければ、少なくとも一つの見方において、現在時刻の雨が過去に経験したことのない規模になっている(既往最大値超過の状況にある)」ことを表している。換言すれば、「遡り期間の設定において *T_P*まで遡れば、分析に用いたいずれの見方をした場合でも、現在時刻の雨が過去に経験したことのある規模以下である」ことを表している。以上の意味合いにおいて、「現在時刻の雨は、時刻 *T_P*より後の期間における最大規模になっている」と考えることが

できる(以上,小杉(2022)より引用)。「土砂災害の発生 予測に有効と考えられる種々の見方」に関して、本研究 では 1326 種類のスネーク曲線図を用いて降雨の特徴を 分析した。すなわち、半減期 M_1 , M_2 (ただし $M_1 \ge M_2$) を 0.1~3000hの範囲で、その対数値の変化量が一定にな るようにして計 51 通りに設定し、考えられる全ての M_1 , M_2 の組合せから成るスネーク曲線図を用いた。

3. 検討事例と結果

和歌山県那智勝浦町の市野々地区,井関地区,川関地区 では、2011 年 8 月 30 日~9 月 6 日の紀伊半島大水害時に 斜面崩壊や土石流が多発し甚大な被害が発生した。ここで は、市野々地区にある観測局の時間雨量データ(2003 年 1 月 1 日~2020 年 7 月 31 日)および和歌山県土砂災害啓発 センターの敷地内に設置された観測局の時間雨量データ

(2020 年 8 月 1 日~12 月 31 日)を使用し,前述の方法で *T_P*を算定した。なお国交省砂防部と国総研土砂災害研究部 による土砂災害データベース(非公開)には,紀伊半島大 水害よりも後の期間(2020 年 12 月 31 日まで)において災 害発生の記録はみられなかった。

図-2aには、各降雨イベントにおける *T_P*(イベント中に ^{N14、ント数}(パやら (2022)の図 6.22 を038) 最も過去まで遡った値)を時系列で示している。紀伊半島大水害直後の 2011 年 9 月 19 日に発生した積算雨量 183 mm の降雨イベントでは、紀伊半島大水害の際に大きく増加した半減期の長い実効雨量が十分に低下しない うちに再び大きく増加した。これが効いて *T_P*は 1998 年 9 月 24 日まで遡った。この降雨イベントを除けば、そ れ以降の約9年間に発生した全ての降雨イベントにおいて、*T_P*はどんなに遡っても紀伊半島大水害までである。 つまり、紀伊半島大水害を引き起こした降雨イベントを含め、それ以降に発生した降雨イベントにより既に経 験した規模の降雨であることを表している。

もし*T_Pが紀伊半島大水害を*引き起こした降雨イベント時より昔に遡るようなことになれば(すなわち,紀伊 半島大水害を引き起こした降雨イベントを超過する規模の降雨であるとしたら),甚大な被害が発生する可能性 が極めて高いことから,避難行動が必要なことは明白であろう。一方,*T_P*が紀伊半島大水害を引き起こした降 雨イベント時まで遡ったとしたら,それは紀伊半島大水害より後の期間において初めて経験する規模の降雨に なっていることを意味している。市野々地区,井関地区,川関地区では,紀伊半島大水害時に多くの斜面崩壊や 土石流が発生し流域が大きく荒廃したことによって,斜面崩壊や土石流の発生に対する抵抗力が低下したこと が考えられることから,「紀伊半島大水害より後の期間において初めて経験する規模の降雨である」ことは避難 行動を起こす適切な根拠になる可能性が考えられる。以上に基づき「*T_P*の紀伊半島大水害時以前への遡り」を 避難の根拠とした場合,図-2aに示した期間において避難が呼びかけられた降雨イベントの総数は31であった。

図-2b は同期間における RBFN 値の時系列である。閾値を 0.965 に設定した場合,期間全体で閾値を超える降雨イベントの総数が図-2a と同じ 31 となった。すなわち総数でみた場合,「*T_P* の紀伊半島大水害時以前への遡り」を根拠にすることは,RBFNの閾値を 0.965 に設定することと同等であったことになる。さらに図-2c では,*T_P* と RBFN の各々を用いた場合に避難が呼びかけられた降雨イベントの数を年ごとにまとめている。総数は同じであるが,*T_P*を用いた場合の方が期間前半で多く,後半で少なくなっていることがわかる。すなわち *T_P*を用いると,紀伊半島大水害の直後はより頻繁に避難の呼びかけをすることになるが,時間の経過とともにその回数が相対的に減少している。これは空振りを繰り返すたびに知見が自然と蓄積されていくからであり,理に適った手法になっている可能性が考えられる。

雨量データや被災状況,避難状況等に関するデータを提供いただいた和歌山県,那智勝浦町,国交省,紀伊山 系砂防事務所,国総研に謝意を表す。本研究は国交省河川砂防技術研究開発公募制度の補助を受け実施した。 本稿は,令和4年度砂防学会研究発表会概要集(JSECE Publication No.89, ISSN 2433-0477)に掲載された内容 を一部改変,再録したものである

図-2 *T_p*と RBFN 値の時系列および避難が呼びかけられた降 雨イベント数(小杉ら(2022)の図 6.2-2 を改変)

小杉賢一朗ら(2021)スネーク曲線の既往最大値超過に基づく土砂災害発生予測,令和3年度砂防学会研究発表会概要集,p.15-16 小杉賢一朗(2022)土砂災害に対する警戒・避難のための未経験降雨指数の提案,砂防学会誌,Vol.75,No.1(印刷中) 小杉賢一朗ら(2022)令和三年度・降雨の既往最大値超過を基軸とした革新的な警戒避難情報提供技術の開発,国交省河川砂防技術研究開発公募 制度報告書,pp.219

紀伊山地における空中電磁探査結果を用いた基岩内地下水位の推定とその精度の向上に関する検討

京都大学大学院農学研究科 〇木村佑・小杉賢一朗・正岡直也 国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 山本悟司・小杉恵・北本楽

1 背景と目的

基岩内地下水位の値は土砂災害発生の予測に非 常に大きな役割を果たすと考えられている。しか しながら基岩内地下水位の測定には大きなコスト を要する。このため空中電磁探査が簡便な調査法 として注目されているが,地下水位の推定精度に ついてはまだわからないことが多い。空中電磁探 査によって得られる比抵抗値のデータは基岩の岩 質,含水率,風化度合いの影響を受けている。本 研究では紀伊山地における空中電磁探査データを 整理し,基岩内地下水位との関係性を解析した。

調査地と方法

平成23年9月の台風12号による紀伊半島大水 害で甚大な被害を受けた紀伊山地の計10地区を対 象とした。これらの地区では深層崩壊斜面とその 周辺でボーリング孔が掘削され地下水位が計測さ れている。これらの地区を対象に2012年7月,10 月,11月,2013年11月の4回に分けて空中電磁 探査が行われた。調査は140 kb,31 kb,6900 Hz, 1500 Hz,340 Hzの5種類の周波数を用いて行わ れ、それぞれの周波数で異なる深さの地盤の比抵 抗値が計測された。一般に、周波数が高くなるほ ど浅層の情報を反映しているといわれている。

本研究では、10地区の計142本のボーリング孔 について、2012年8月から2020年3月までの1 時間ごとに計測された地下水位と空中電磁探査に より得られた比抵抗値の相関を解析した。解析に おいては、各地区における地質調査結果も考慮し た。

3 使用した地下水位データについて

本研究で用いたボーリング孔内の地下水位は 2012 年 8 月から 2020 年 3 月までの 1 時間ごとに 計測されたものであるが,ボーリング孔ごとに計 測時期は異なる。また空中電磁探査が行われた 2012 年秋から 2013 年秋にかけてのデータが存在 しているボーリング孔は非常に少なかった。そこ で本研究では、実効雨量を基にした地下水位解析 を行った。はじめに以下の式を用いて実効雨量を 計算した。

$$X(t) = X(t-1) e^{\alpha} + R(t)e^{\alpha/2}$$

$$\alpha = ln \ (0.5)/M$$

ただし,時刻 *t*における実効雨量*X*(*t*),1時間前の実効雨量*X*(*t*-1),時刻*t*-1~*t*の間の雨量 *R*(*t*),減少係数*α*,半減期*M*である。

さらに求めた実効雨量を基にして地下水位解析 を行った。この解析には複数の関数モデルが存在 しているが、今回は以下の式を用いた。

$H(t) = b_0 + b_1 X(t)^{p_1}$

ただし、時刻tにおける地下水位H(t)、各地点の 最低地下水位に相当する地下水位b₀、実効雨量の地 下水位変動に対する寄与の大きさにより決まる係 数b₁である。

以上の方法で推定した地下水位を用いて,空中 電磁探査を行った時期のデータの平均値を算定し た。

4 結果と考察

4.1 地下水位と比抵抗値の相関性

図1に140 朏で行われた電磁探査について,10 地区すべての地下水位と比抵抗値の相関を示し た。相関は高くないものの,比抵抗値が大きくな るほど地下水位が深くなる傾向が見られた。



他の周波数についても同様に地下水位と比抵抗 値の相関を解析した。いずれの周波数でも140 朏 と同様の傾向が見られた。R²は140 朏の場合に最 も高くなった(図2)。このため本研究では140 出の調査結果を用いることで地下水位分布の概略 を把握できると考えた。





4.2 地下水が存在しない孔を取り除いた結果

各ボーリング孔の地下水位データについて、地 下水位が存在しないと考えられる孔も存在し、そ れらを取り除くことで相関性が向上するのではな いかと考えた。

各孔について、地下水位の数値から孔の長さを 引いた値がほとんどの時間で0となっている孔に ついては地下水位が存在しないものとして散布図 から取り除いた。整理後の散布図ではこれまでの 結果に比べて R²が大きくなった(図4)。



図4:整理後の結果

4.3 地下水位変動が少ない孔を取り除いた結果 各ボーリング孔の地下水位データについて、降 雨があったにもかかわらず地下水位の変動がほと んど無い孔を取り除くことで相関性が向上するの ではないかと考えた。整理後の残布図ではこれま での結果に比べて R²が大きくなった(図3)。



5 まとめ

紀伊山地のボーリング孔について、比抵抗値が 大きくなるほど地下水位が深くなるという傾向が 見られた。また、この傾向は140 朏での調査結果 で最も強く見られた。

この結果について、用いた地下水位データの妥 当性について検討し、地下水位が存在しない孔, 地下水位の変動が無い孔を取り除いた結果それぞ れ相関性は向上した。今後は地質によって比抵抗 値が受けた影響等を考慮することで相関性がどの ように変化するかを調べていく。

本稿は、令和4年度砂防学会研究発表会概要集 (JSECE Publication No.89, ISSN 2433-0477) に 掲載された内容を再録したものである。

6 参考文献

- 小杉ら、山体基岩内部の地下水位変動を解析するた めの実効雨量に基づく関数モデル、砂防学会誌 vol 66No.4, p21-32, 2013.
- 防災地質チーム,地質調査における電気探査の活用, 寒地土木研究所月報 No.651, p51-54, 2007.
- 大日本コンサルタント株式会社、那智川流域他空中物 理探査による広域斜面調査業務概要書, 2015.

大日本コンサルタント株式会社,新宮川流域南部他空 中物理探査解析業務成果概要版,2013.

3. 学会活動

3.1 学会誌掲載

タイトル 執筆者(連盟含む)		雑誌名	巻号	論文種別	発行年月
放射性炭素年代から推定される紀伊山地 の深層崩壊発生頻度	小川内良人・横山修・ 木下篤彦・山田拓・柴 田俊・田中健貴・山越 隆雄・西山賢一	川内良人・横山修・ S篇彦・山田拓・柴 没・田中健貴・山越 推・西山賢一		論文	2021.5
昭和28年日高川流域での土砂災害教訓 伝承の取り組み	森川智・宮崎徳生・崎 山朋紀・榎原伴樹・岸 畑明宏・坂口隆紀・筒 井和男・木下篤彦	砂防学会誌	Vol.74 No.1	論文	2021.5
高感度地震観測網の微小振動データに着 目した大規模出水時の地盤振動特性と欠 測水位の推定	筒井和男・坂口隆紀・ 柴田俊・海原荘一・谷 田佑太・浅原裕・木下 篤彦・中谷 洋明	河川技術論文集	Vol.27	論文	2021.6
LPデータに基づく深層崩壊による生産土 砂の滞留期間および再移動に関する検討	田中健貴・小竹利明・ 山田拓・柴田俊・木下 篤彦・臼杵伸浩・岡野 和行・江口友章	河川技術論文集	Vol.27	論文	2021.6
山地河川の合流点における河床変動に関 する実験的研究	岡野和行・木下篤彦・ 山田拓・柴田俊・井之 本信・上杉温子・吉安 征香・山越隆雄・里深 好文	砂防学会誌	Vol.74 No.2	論文	2021.8
紀伊山系における深層崩壊メカニズムと リスク評価手法の提案	木下篤彦・山越隆雄・ 中谷洋明・鈴木大和	土木技術資料	Vol.63 No.8	情報誌	2021.8
放射性炭素年代測定を用いた紀伊山系の 深層崩壊発生頻度推定	木下篤彦・山越隆雄	土木技術資料	Vol.63 No.8	情報誌	2021.8
深層崩壊後の土砂流出に伴う下流合流点 での土砂堆積に関する現地観測と水理模 型実験	木下篤彦・山越隆雄	土木技術資料	Vol.63 No.8	情報誌	2021.8

タイトル	タイトル 執筆者(連盟含む)		巻号	論文種別	発行年月
那智川域の表層崩壊、土石流の発生メカニ ズムと危険度評価マップの作成	田中健貴・木下篤彦	土木技術資料	Vol.63 No.8	情報誌	2021.8
UAVの自律飛行による河道閉塞や砂防施 設の調査・点検	小杉恵・北本楽・柴田 俊	土木技術資料	Vol.63 No.8	情報誌	2021,8
大規模土砂移動発生時の地盤振動に関す る振動特性と室内実験	筒井和男・金澤瑛・木 下篤彦・中谷洋明	土木技術資料	Vol.63 No.8	論文	2021,8
和歌山県土砂災害啓発センターでの防災 学習の取り組み	坂口隆紀・宮崎徳生・ 岸畑明宏	土木技術資料	Vol.63 No.8	論文	2021.8
土砂災害啓発のためのRPGコンテンツの 開発と評価	西萩一喜・辻原治・坂 口隆紀・岸畑明宏・筒 井和男・宮崎徳生・木 下篤彦	砂防学会誌	Vol.74 No.4	論文	2021.1
2011年台風第12号により発生した天然 ダムを構成する岩石のスレーキング試 験、X線回折分析の結果と天然ダムの安定 性	木下 篤彦・柴田俊・山 越隆雄・中谷洋明・小 川内良人・柴崎達也・ 眞弓孝之・長谷川陽 ー・三田村宗樹・松井 保	日本地すべり学会誌	Vol,59 No.1	論文	2022.1
地質構造に起因する透水性境界上の浅層 地下水位上昇を再現した浸透流解析〜 2011年台風12号による那智川流域での 表層崩壊の事例〜	田中健貴・木下篤彦・ 小竹利明・柴田俊・山 田拓・松澤真・伊藤達 载	日本地すべり学会誌	Vol,59 No.1	論文	2022.1
人工衛星「しきさい」を活用した那智の 滝上流域の水源涵養機能に関する研究	宮﨑徳生・坂口隆紀	水利科学	No.383	論文	2022.2

3.2 学会発表

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
1	天然ダム堤体の浸透特性と水収 支	只熊典子・海原荘ー・木下篤彦・古江智 博・山越隆雄・束原純・加藤智久	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
2	紀伊半島で60年毎(1889, 1953, 2011年)に発生した 大規模土砂災害	井上公夫・小竹利明・山田拓・木下篤 彦・柴田俊・中根和彦・町田尚久・今村 隆正	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
3	2011年台風12号により深層崩 壊が発生した熊野地区でのド ローン空中電磁探査による深層 崩壊メカニズムの解明	木下篤彦・柴田俊・山越隆雄・中谷洋 明・河戸克志・金山健太郎・奥村稔・城 森明・城森敦善・藤原康正・中野英樹	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
4	UAVを用いた2機体同時飛行に よるレベル3(目視外補助者無 し)自律飛行の実証実験につい て	荒木義則・久家政治・能島佑佳・河井恵 美・大盛泰我・小竹利明・山田拓・柴田 俊・木下篤彦	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
5	高感度地震観測網の微小振動 データを用いた大規模出水時の 河川水位の推定	筒井和男・坂口隆紀・柴田俊・海原荘 ー・谷田佑太・浅原裕・木下篤彦・中谷 洋明	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
6	土砂災害防災ロールプレイング ゲーム「土砂災害が発生したと き」の開発とゲームを用いた防 災教育の効果検証	岸畑明宏・西萩一喜・辻原治・坂口隆 紀・筒井和男・宮崎徳生・木下篤彦	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
7	紀伊半島大水害の被災体験(紙芝 居)を伝承する活動と年齢別の研 修効果	坂口隆紀・筒井和男・宮崎徳生・岸畑明 宏・久保榮子・木下篤彦	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
8	紀伊山地における深層崩壊箇所 周辺の地下水特性と比抵抗分布 の関係	林幸一郎・小松慎二・窪田安打・橋本裕 司・小竹利明・山田拓・柴田俊・木下篤 彦・田中健貴	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
9	放射性炭素年代から推定される 紀伊山地の深層崩壊発生頻度	小川内良人・横山修・小竹利明・山田 拓・木下篤彦・柴田俊・田中健貴・西山 賢一	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
10	那智川流域の地形地質特性を反 映した表層崩壊危険度マップの 作成	松澤真・伊藤達哉・南智好・小竹利明・ 山田拓・柴田俊・木下篤彦・田中健貴	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
11	熊野川流域における人工衛星 データを用いた山地水文状態の 推定方法の試行	小林航・小竹利明・山田拓・木下篤彦・ 柴田俊・中谷洋明・鈴木大和・鈴木清 敬・柴山卓史・徳武祐斗	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
12	UAVを用いたゼロオペレーション ン(無人自律飛行)による砂防 施設点検の実証実験について	河井恵美・荒木義則・大盛泰我・久家政 治・能島佑佳・小竹利明・山田拓・柴田 俊・木下篤彦	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
13	差分画像を用いた画像からの降 雨の抽出	金澤瑛・木下篤彦・中谷洋明・山田拓・ 柴田俊・海原荘一・井深真治	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
14	熊野川流域における流砂水文観 測データに基づく土砂移動状況 の把握(その3)	井元成治・小竹利明・山田拓・木下篤 彦・柴田俊・岡野和行・上田征香・井之 本信	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
15	那智川流域における土砂動態観 測技術の高度化	柴田俊・小竹利明・山田拓・木下篤彦・ 松澤真・豊福恒平	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
16	輝度の差分映像による土砂移動 検知装置の開発	海原荘一・井深真治・木下篤彦・小竹利 明・山田拓・柴田俊・中谷洋明	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
17	UAVを活用した砂防施設維持管 理CIMモデルの一提案について	大盛泰我・荒木義則・河井恵美・久家政 治・能島佑佳・小竹利明・山田拓・柴田 俊・木下篤彦	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
18	和歌山県田辺市における明治22 年水害の災害教訓伝承に関する 調査	森川智・宮崎徳生・筒井和男・岸畑明 宏・坂口隆紀・木下篤彦	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
19	地下水位と河川流量による土砂 災害危険度評価のための地盤飽 和度検討	竹本大昭・川原健士朗・海原荘一・木下 篤彦・柴田新俊・小竹利明・山田拓・中 谷洋明	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
20	大規模土砂生産後の中長期的な 土砂移動を考慮した対策検討 ー紀伊山系滝川流域栗平地区の 事例ー	井之本信・小竹利明・山田拓・木下篤 彦・柴田俊・臼杵伸浩・岡野和行・江口 友章・水山高久	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
21	栗平地区における公共BB搭載 UAVによる映像伝送の実証実験 について	能島佑佳・荒木義則・河井恵美・久家政 治・大盛泰我・小竹利明・山田拓・柴田 俊・木下篤彦	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
22	和歌山県 会津川流域,富田川流 域の歴史的砂防施設	中根和彦・小竹利明・山田拓・木下篤 彦・柴田俊・井上公夫・今村隆正	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
23	散水試験による浸透過程の電気 探査を用いた推定と室内試験に よる比抵抗の検証	田中健貴・小竹利明・山田拓・柴田俊・ 木下篤彦・松澤真・伊藤達哉	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
24	大規模斜面崩壊時の地盤振動特 性に関する室内実験による検討	宮崎徳生・筒井和男・坂口隆紀・柴田 俊・海原荘一・谷田佑太・木下篤彦・金 澤瑛・中谷洋明	2021年度砂防学会 研究発表会	2021,5

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
25	流入量が時間変化する合流点の 流況と河床変動に関する考察	岡野和行・小竹利明・山田拓・木下篤 彦・柴田俊・井之本信・北村一貴・水野 裕斗・里深好文	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
26	河川の合流点を考慮した一次元 河床変動モデルの提案	水野裕斗・北村一貴・里深好文・小竹利 明・山田拓・木下篤彦・柴田俊・岡野和 行・井之本信	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
27	掃流区間の河川合流部に関する 実験的研究	北村一貴・水野裕斗・里深好文・小竹利 明・山田拓・木下篤彦・柴田俊・岡野和 行・井之本信	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
28	土砂移動現象に関係性の高い支 配的な素因,誘因の特性分析	西内卓也・宮瀬将之・國田佳穂・濵地 亮・林真一郎・松本洋和・鬼頭舞・坂井 佑介・小竹利明・山田拓・柴田俊	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
29	木津川水系におけるUAVを活用 した砂防施設点検事例	中西宏彰・小竹利明・山田拓・柴田俊・ 家田泰弘・片嶋啓介・内柴良和・中西宏 彰・河野元・戸舘光	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
30	紀伊山地における空中電磁探査 結果と基岩内地下水位の関係性	木村佑・小杉賢一朗・正岡直也・小 竹利明・山田拓・柴田俊	2021年度砂防学会 研究発表会	2021.5
31	高感度地震観測網の微小振動 データに着目した大規模出水時 の地盤振動特性と欠測水位の推 定	筒井和男・坂口隆紀・海原荘一・谷田佑 太・木下篤彦・柴田俊・浅原裕・中谷洋 明	2021年度河川技術に関 するシンポジウム	2021.6
32	和歌山県日高郡みなべ町におけ る断層破砕帯での地すべり対策	岸畑明宏・坂口隆紀 木下篤彦	年度日本地すべり学会研究	2021.9
33	2011年台風第12号により発生 した長殿、栗平地区天然ダムの水 文特性の違い	木下篤彦・只熊典子・古江智博・海原荘-	年度日本地すべり学会研究	2021.9

(1) 砂防学会研究発表会

オンラインで開催された【砂防学会研究発表会】に参加し、研究発表を行った。期 間:平成 28 年 5 月 18 日(水)~20 日(金)

(2) 日本地球惑星科学連合大会

オンラインで開催された【日本地球惑星科学連合大会 2021】 に参加した。 期 間:2021 年 5 月 30 日(日) ~6 月 6 日(日)

(3) 河川技術に関するシンポジウム

オンラインで開催された【河川技術に関するシンポジウム 2021 】に参加した。 期 間:2021 年 6 月 10 日 (木) ~6 月 11 日 (金)

4. 広報・啓発活動

講演

●紀伊半島大水害から10年、土砂災害研究講演会

【紀伊半島大水害から10年、土砂災害研究講演会】と題し、紀伊半島大水害で 発生した土砂災害に関する話題や、この災害を契機に進められている土砂災害に 関する研究の動向について、講演会を開催した。

- 開催日:2022年1月28日(火)
- 会 場:那智勝浦町体育文化会館
- 共 催:近畿地方整備局 紀伊山系砂防事務所、和歌山県、那智勝浦町

5. 研修活動

- (1)「田辺高等学校と磐城高等学校(福島県)との土砂災害に関するオンライン学習」 和歌山県立田辺高等学校と福島県立磐城高等学校両校とが進める防災交流に際し、 紀伊半島大水害の概要や土砂災害の種類、対策工事についてオンラインで説明し、 土石流模型装置による実験のライブ配信により、土石流や砂防堰堤の効果を実演し た。
 - 開催日:2021年5月26日(木)
 - 会 場:オンライン
 - 参加者:60名

(2)「関西広域連合職員を対象とした土砂災害に関するオンライン研修」

関西広域連合主催の防災職員向けの研修において、オンライン配信による土砂災害 に関する研修を実施した。

- 開催日:2021年8月6日(金)
- 会 場:オンライン
- 参加者:100名

令和 3 年度 大規模土砂災害対策研究機構年報

発	行	令和 4 年 1 1 月
編集	・発行	国土交通省 近畿地方整備局
住	所	大阪市中央区大手前3-1-41 大手前合同庁舎
連	絡先	河川部 河川計画課 TEL 06-6942-1141(代表)
機	構 HP	http://www.kkr.mlit.go.jp/kiisanchi/kikou/