〈特集〉

# 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<sup>1)</sup> 北 本 <sup>(2)</sup> 山 越 雄3) 降 洋明4)、海原荘一5)、荒 中 谷 木 義 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)

<sup>5)</sup>(㈱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)

<sup>6)</sup> 中電技術コンサルタント(株)

(〒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 原稿受付 2021.12.27

EICA: 26(4) 60-66

## 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**)<sup>1-3)</sup>。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1,000 mmを超え,紀伊半島の一部の地域では解析雨量で2,000 mmを超えた<sup>10</sup>。

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



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。



 (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。



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m<sup>3</sup>と推定された<sup>23)</sup>。

#### 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。

# 3. 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年間は堤体の高さが 変化するほどの大きな侵食は発生していない。長殿地 区は、2度ほどあと数mで満水になるところまで水 位上昇したことはあるが、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(Fig.3)。

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 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	集水面積 (×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	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	<ul> <li>・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。</li> <li>・工事により発生した土砂で湛水池を埋め立てている。</li> <li>・毎年台風等の豪雨で越流が発生し、崩壊斜面の残った土砂が流出している。</li> </ul>
長殿	80	2.9	4.5	<ul> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
栗平	100	12.4	8.7	<ul> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
北股	25	0.3	0.4	<ul> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
熊野	60	2.4	1.2	<ul> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
清水	不明	不明	218.511)	・河道閉塞発生約1.5時間後に越流によりほぼ流失した <sup>11)</sup> 。
坪内	不明	不明	107.511)	・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	23.111)	・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の状況





(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.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) 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。
 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)

栗平地区は、災害以降、台風等の豪雨の度に越流が発 生し<sup>5.6)</sup>、河道閉塞部の高さは当初の約 100 m から 2021 年 3 月現在で約 62 m まで約 38 m 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、それ以降、2021 年 3 月までの約 10 年間, 越流等による大規模な侵食は発生していない。

## 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、バッテリーで3ヶ月動作可能な土研式投下型水 位観測ブイ (Fig.6(a)(b))<sup>12)</sup>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<sup>12)</sup>。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

Table 2 河道閉塞周辺に設置した観測機器とその観測目的

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(水位予測条件の把握)		
CCTV/Web カメラ	崩壊斜面の状況把握		
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)		
河道閉塞部孔内水位計	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)		



Fig.5 河道閉塞部の監視・観測機器配置の概念図



(a) 土研式投下型水位観測ブイ, (b) その投入状況, (c) 湛水池水位計, (d) 河道閉塞上流部の水位計, (e) 流量観測状況 (f) 孔内水位計, (g) CCTV, (h) ワイヤーセンサー, (i) 雨量計及び衛星通信機

Fig.6 河道閉塞部に設置されている監視・観測機器



Fig.7 紀伊山系砂防事務所降雨状況通知システム

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。

なお,監視カメラ(Fig.6(g))や衛星携帯通信機 (Fig.6(i))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))や湛水池上流部での水位計測 (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流量観測(Fig.6(e)) に基づき,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<sup>13,14</sup>している。

赤谷地区については、2012年6月の残った土砂の 崩壊によりボーリング孔内水位計が使用不能となり、 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,湛水池の深浅測量結果 から作成した湛水池の水位-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。

#### 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日の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<sup>15</sup>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 壊の発生降雨条件の検討<sup>16,17</sup>による発生危険度評価や 合成開口レーダ (SAR) 画像による河道閉塞箇所の 判読<sup>18,19)</sup>、河川流量データを用いた河道閉塞の検知方 法<sup>20)</sup>、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<sup>21)</sup>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



(a) 空中写真,(b) サーモグラフィー映像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(2021年9月29日撮影)

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<sup>22)</sup>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)
- 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: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)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 8) 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)
- 気象庁: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)
- 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)
- 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, pp. 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,45p(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, pp. 49-52, (2014)