

2011 年紀伊半島大水害で発生した 長殿地区と栗平地区の2つの天然ダムの 水文特性の違いと越流しやすさの関係

CAUSED BY THE 2011 KII PENINSULA DISASTER OF TWO LANDSLIDE
DAMS IN THE NAGATONO AND KURIDAIRA AREA RELATIONSHIP
BETWEEN DIFFERENCE OF HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS AND THE
EASE OF OVERFLOW

只熊典子¹・海原荘一²・木下篤彦³・古江智博⁴・北本楽⁵・小杉恵⁶・山越隆雄⁷

Noriko TADAKUMA, Soichi KAIHARA, Atsuhiko KINOSHITA, Tomohiro FURUE,
Gaku KITAMOTO, Megumi KOSUGI and Takao YAMAKOSHI

¹株式会社エイト日本技術開発 (〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町3-1-21)

²株式会社エイト日本技術開発 (〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町3-1-21)

³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)

⁴国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 (〒637-0002 奈良県五條市三在町1681)

⁵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)

⁶国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 (〒637-0002 奈良県五條市三在町1681)

⁷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)

Key Words : landslide dam, Hydrological characteristics, meteorological characteristics, Permeability characteristics

1. はじめに

深層崩壊などに伴う天然ダムの越流侵食は湛水池の水が一気に流下するため、下流に甚大な被害を及ぼす。2011年の紀伊半島大水害では、広範囲で連続雨量が1000mmを超えるような記録的大雨¹⁾となり、72箇所の深層崩壊が発生し、17箇所の天然ダムが発生した^{2)~4)}。それらの天然ダムのその後の状況は様々で、2回ほど、あと数mで満水になる水位まで上昇はしたものの、この約10年で満水になっていない長殿地区の天然ダムのようなものもある。しかし、一方で何度も越流侵食を繰り返している栗平地区のような天然ダムもある⁵⁾⁶⁾。

Costa and Schuster⁷⁾の調査によると天然ダムの決壊事例のほとんどは越流侵食によるもので、紀伊半島大水害以外の近年国内で発生した天然ダムでも越流侵食の報告があり⁸⁾⁹⁾、水山ら¹⁰⁾、田畑ら¹¹⁾の資料によると有史以降の

天然ダム決壊事例のうち多くは越流が原因になっているものが示されている。その天然ダムの安定性評価としては、天然ダムの土砂量と単位面積あたりの集水面積から安定度を評価する Casagli and Ermini の BI(Blockage Index)¹²⁾やその改良版である天然ダムの高さを考慮した Ermini and Casagli¹³⁾のDBI(Dimensionless Blockage Index)の他、Korup¹⁴⁾は安定度の指標として、天然ダムの高さ、湛水池の容量、単位面積当たりの集水面積、上流の川の長さ等から安定度を評価する指標が提案されている。さらにDong et al.¹⁵⁾¹⁶⁾は、ピーク流入量や天然ダムの高さ、単位面積当たりの集水面積、天然ダムの幅、天然ダムの流下方向の長さ、天然ダムの体積等から、安定度を評価している。しかし、これらは天然ダムへの流入量(流域からの流出量)などの水文学的要素が考慮されていない。

他方、千葉・水山¹⁷⁾は累加雨量と損失雨量の関係から、満水までの雨量を求める方法を検討しており、また、横山ら¹⁸⁾は上流の流域面積や天然ダムへの流入量の比流量

に加え、漏水量を考慮して天然ダムの決壊までの継続時間を求める方法を提案している。それらの天然ダムの安定性や越流の危険性の評価方法は、水文的要素をある程度考慮しているものの、天然ダム形成直後の極めて少ない観測資料に基づく大まかな予測方法としては有用と考えられる。しかし、短い期間の水文観測資料に基づいているということもあり、千葉・水山¹⁷⁾の評価では長殿地区よりも栗平地区の天然ダムの方が満水しにくいようにも見える結果となっており、また、横山¹⁸⁾らの検討結果でも、グラフが両対数でばらつきが大きいということもあるが、長殿地区も栗平地区も越流しやすさはあまり変わらないようにも見える。また、田畑ら¹⁹⁾の分析における湛水量／ピーク流量・平均流量の関係においても両対数のグラフ上でも明瞭な関係性は見い出せない。それらの原因としては、予測に用いるパラメータのうち、流入量の比流量が一定といった多くの仮定に基づいて検討していることが原因の1つと考えられる。

天然ダムが越流するかどうかは、降雨イベント前の湛水池の空き容量がその降雨イベントで流入する総流量から漏水量を差し引いた水量以下となるかどうかといった水収支的な観点や気候学的な要因を評価することが重要であると考えられる。

本稿は越流状況が大きく異なる長殿地区と栗平地区について、数年間の水文観測資料が蓄積された現時点において、秋山らの天然ダムの透水係数による漏水量の算定¹⁹⁾やそれに基づく精度の高い水収支算定方法²⁰⁾により越流侵食のしやすさの比較を行うとともに、降雨特性の違いや漏水特性の違い、流出特性などの、天然ダムの越流侵食の危険度評価に考慮すべき水文学・気候特性に関する項目も含めて検討を行ったものである。

2. 検討対象とした天然ダムの概要

今回検討対象とした長殿地区と栗平地区の2つの天然ダムの概要を以下に示す。

(1) 長殿地区の天然ダムの概要

長殿地区の天然ダムは奈良県吉野郡十津川村長殿地内にあり、堤体の高さは約80m、湛水容量は約1,935,500m³(2012年5月時点)、湛水池地点の流域面積は約4.62km²であり、水文観測施設としては転倒ます式雨量計、湛水池の水位計、堤体孔内水位計、上流河道に水位計が設置されている。図-1に示すように2015年と2020年に満水に近い水位となったものの2011年の天然ダム形成後、過去1度も越流しておらず、災害後に設置された仮排水路は2021年時点でも健全な状態である。なお、流域面積、天然ダムの高さ、天然ダムの体積から求まるErmini and Casagli¹³⁾のDBIは2.09²¹⁾であり、DBI<2.75であることからその判定基準では安定と区分される。

(2) 栗平地区の天然ダムの概要

栗平地区の天然ダムは奈良県吉野郡内原地内にある天然ダムで、災害直後の堤体高さは約100mで、湛水容量約5,169,600m³(2012年5月時点)、上流流域面積約8.95km²、水文観測施設は長殿地区と同様に、転倒ます雨量計、湛水池の水位計、堤体の孔内水位計、天然ダム上流の河道に水位計が設置されている。この天然ダムは図-2に示すように2012年以降、毎年のように越流し、中でも特に2014年の台風第11号、2015年の台風第11号、2018年の台風第21号など大規模な越流侵食が発生しており、2011年時点から約38mも侵食されている。また、2014年の出水では堤体の孔内水位計が使用不可能となった。2011年の災害直後のDBIは1.85と長殿地区よりも小さい値となっており、Ermini et al.¹³⁾の判定基準では長殿地区と同様に安定と区分される。

3. 検討方法

(1) 天然ダムの水収支の算定方法

現在、長殿・栗平の両地区で水文観測として、雨量観測、天然ダム湛水池水位及び越流標高の計測(水準測量)、天然ダム流入量計測(水位計測等)を行っている。天然ダム上流において、水位計と流速計により連続的かつ直接的に流入量を計測することは、商用電源の確保の問題から困難である。そこで、観測機器点検時に実施できる電磁流速計による流量観測で天然ダム上流位置の河道において水位の低い範囲で、比較的精度の高いH-Q曲線を求め、その期間でそのH-Q曲線や堤体のボーリング孔内水位を基にダルシー則に基づいて求めた透水係数²⁰⁾で漏水量を推定し、その漏水量と貯水増減量を加え、越流時は仮排水路越流量も加え、天然ダム流入量を求めることで、各天然ダムの降雨イベントごとの水収支を把握した。図-3に天然ダム周辺の水収支の概念図を示す。また、水収支の算定式や具体的な算定方法を以下に示す。

a) 漏水量及び天然ダム堤体の透水係数の算定方法

漏水量及び天然ダム堤体の透水係数は、天然ダム堤体の漏水がダルシーの法則に従うと仮定する秋山ら¹⁹⁾の示した式(1)及び(2)を適用した。具体的には天然ダム堤体の透水係数 k_s は天然ダム堤体における2箇所(ボーリング孔内水位から求められる動水勾配 dz/dx と堆積土砂内の通水断面積 A)を用い、また、推定精度の確保のため天然ダム上流のH-Q曲線の適用水位範囲内期間における透水係数 K_s を逆算して算出し、その平均値を採用している。

$$Q(Q_{out}) = -k_s \cdot \frac{dz}{dx} \cdot A \quad (1)$$

$$k_s = \frac{Q_{in} - \frac{dv}{dt}}{-\frac{dz}{dx} \cdot A} \quad (2)$$

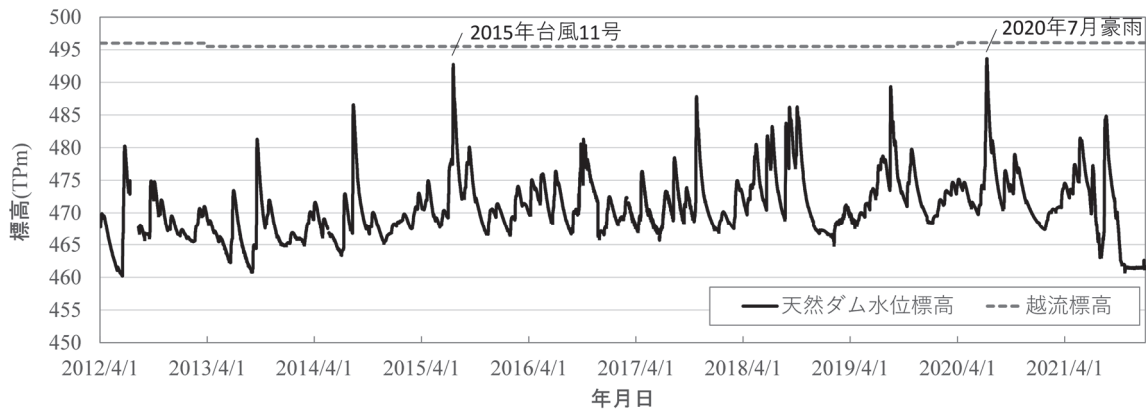


図-1 長殿地区の天然ダムの水位標高と越流標高(2012. 4~2021. 12)

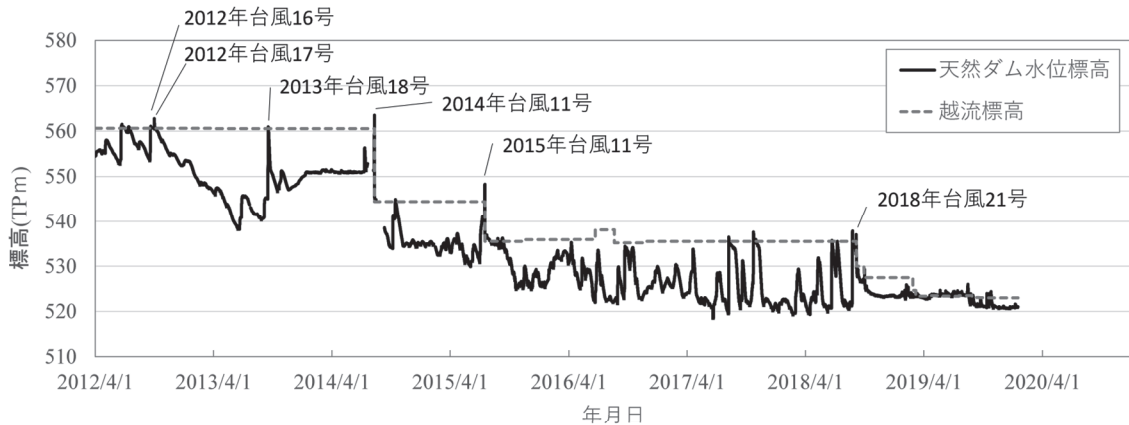


図-2 栗平地区の天然ダムの水位標高と越流標高(2012. 4~2020. 1)

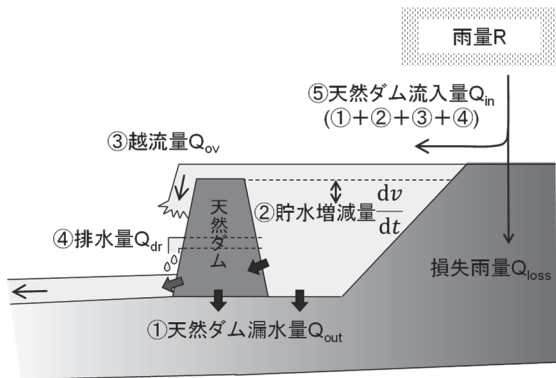


図-3 水収支概念図

ここに、 k_s は飽和透水係数、 dz/dx は動水勾配、 Q_{in} は天然ダム流入量、 dv/dt は貯水増減量、 A は通水断面（浸透面積）である。ただし、本検討では実際には dv/dt は極めて小さい時期のデータで算定している。

b) 水収支の算定

天然ダム周辺の水収支は、秋山ら¹⁹⁾に示されている水収支の式に仮排水路の越流及びポンプ等による排水を考慮した式(3)により、後述する流出特性比較のための流出率は式(4)にて求めた。なお、ここでは雨量と対比させるため、式(3)に示す流入量等についても流域面積で除してmm換算することにより流入高としている。また、水収支の計算時間間隔は1.0hrとしている。なお、水収支の検討対象期間は24時間無降雨で区切られる降雨の降り

始めから、水位上昇ののち元の水位に戻った時期または水位低下後に水位が安定した時期までとした。

$$Q_{in} = \frac{dv}{dt} + Q_{out} + Q_{ov} + Q_{dr} \quad (3)$$

$$f = \frac{\sum Q_{in}}{\sum R} \quad (4)$$

ここに、 Q_{in} は天然ダム流入量(mm)、 dv/dt は貯水増減量(mm)、 Q_{out} は天然ダムからの漏水量(mm)、 Q_{ov} は越流量(mm)、 Q_{dr} はポンプによる排水量(mm)、 f は流出率、 R ：雨量(mm)である。

雨量は現地での転倒ます雨量計による雨量を用い、損失雨量は降雨イベントごとの総雨量 $\sum R$ から天然ダム総流入量 $\sum Q_{in}$ を差し引いて求めた。

天然ダム流入量 Q_{in} (はa)に示した方法で算定した透水係数から求めたダム漏水量に、天然ダムのH-V曲線と水位データから求めた貯水増減量を加えて算出した推定値であり、ポンプによる排水を実施している期間についてはポンプ排水量 Q_{dr} を考慮した。また、台風時等の仮排水路の越流量 Q_{ov} は越流水深及び仮排水路の諸元に基づきマンニングによる等流計算にて求めた。

検討対象とした降雨イベントはある程度の流入量が見込める連続雨量50mm以上の降雨イベントとし、長殿地区の検討対象期間は水収支算出期間である2012年(H24)から2020年(R2)までの9年間、栗平地区の検討対象期間

表-1 各年における年最大連続雨量

地区	長殿地区 (mm)	栗平地区 (mm)	比率
2012(H24)	163	292	1.79
2013(H25)	332.5	492	1.48
2014(H26)	468	628.7	1.34
2015(H27)	473.5	308	0.65
2016(H28)	146.5	192	1.31
2017(H29)	447	571.5	1.28
2018(H30)	387.5	535.5	1.38
平均値	345.4	431.4	1.25

表-2 天然ダム上流流域面積と湛水池容量の比率

地区名	容量計測 時期	湛水池満水 容量V (m ³)	上流流域 面積A (m ²)	比率 V/A
長殿地区	2012(H24)	1,935,462	4,626,456	0.42
	2016(H28)	1,748,430	4,626,456	0.38
	2017(H29)	1,750,576	4,626,456	0.38
栗平地区	2012(H24)	5,169,619	8,952,763	0.58

は2012年(H24)から2014年(H26)台風第11号による越流侵食崩壊までの3年間とした。

(2) 水文特性の違いによる決壊のしやすさの検討方法

長殿地区と栗平地区の越流侵食のしやすさの原因となっている要因は天然ダムの容量、流域面積だけでなく、降雨特性や漏水量などが複合的に関係していると考えられる。そこで、本研究では①降雨特性の違い、②ダム上流流域面積と湛水池容量の比率、③流出特性の違い、④漏水特性の違いの4つの項目で比較を行った。

4. 検討結果

(1) 降雨特性の違い

天然ダムの湛水は流域内の降雨に起因する上流からの流出量の貯留であることから、長殿地区と栗平地区の降雨特性の比較を行う上では、短期降雨指標ではなく、長期雨量指標となる24時間無降雨で区切った連続雨量で比較した。現地雨量計の観測データから各年度の最大連続雨量を表-1に示す。2015年以外はすべて栗平地区の方が大きく、最大で長殿地区の1.79倍となっている年もある。各年の最大連続雨量の平均値で25%程度栗平地区の方が降雨量は大きくなっており、降雨特性及び4(3)に示す流出特性からも栗平地区の方が越流しやすいことがわかる。

(2) 天然ダム上流流域面積と湛水池容量の比率

天然ダム上流流域面積に対する湛水池の容量の割合を湛水池の容量データの更新（深浅測量結果）ごとに算出したものを表-2に示す。

長殿地区の天然ダム上流流域面積は4.63km²、栗平地区は8.95km²であり、流域面積あたりの天然ダム湛水池

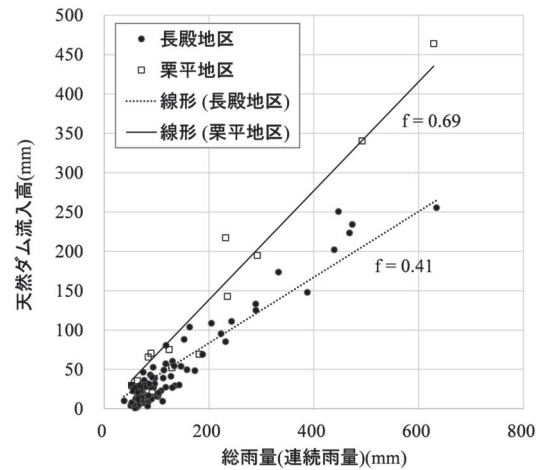


図-4 天然ダム上流の流出率

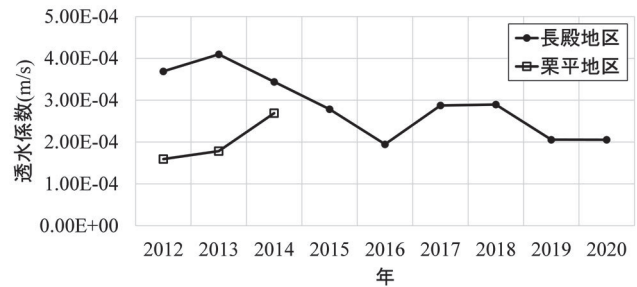


図-5 長殿地区、栗平地区における年平均透水係数の推移

容量は長殿地区より栗平地区の方が1.93倍も大きいですが、上流流域面積と湛水池容量の比率をみると栗平地区の方が大きいいため越流しにくい状況であると考えられる。

(3) 流出特性の違い

2つの天然ダムの流出特性の違いの比較のため、図-4に流出率（総雨量と天然ダム流入高との関係）を示す。長殿地区の流出率は $f=0.41$ 程度であるのに対し、栗平地区は $f=0.69$ と約1.7倍も流出率が大きい。このため、長殿地区よりも栗平地区の方が天然ダムに水が流入しやすいことがわかる。

(4) 堤体の漏水特性の違い

a) 透水係数の経年変化

天然ダムの漏水量が大きい方が、湛水池の空き容量の確保がしやすいといえる（パイピングが生じない程度であることが前提となる）。図-5に第3章に示した方法で求めた天然ダム堤体部分の透水係数を示す。なお、栗平地区は天然ダムの堤体のボーリング孔が流失する2014年の大規模な越流侵食発生以前のデータを示している。

長殿地区の方が栗平地区に比べて年平均透水係数が大きい傾向となっている。また、透水係数には経年変化がみられ、長殿地区の透水係数は全体としては透水係数が小さくなる傾向となっており、これは湛水池内の粘土などの細粒土砂の堆積による被覆が影響していると考えられる。2014年の栗平地区の年平均の透水係数が前年度と比べて大きくなっているが、これは水位が高い状態が継

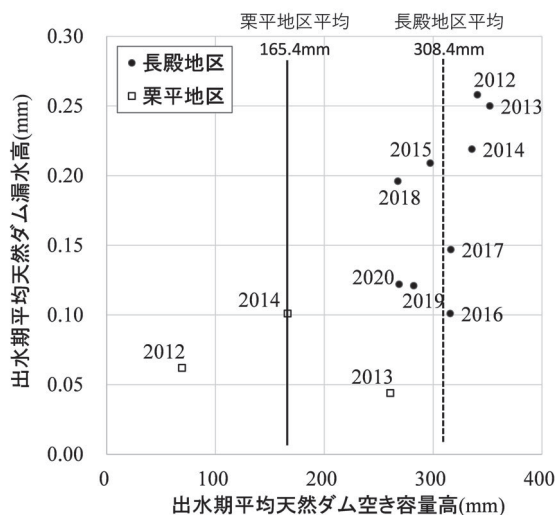


図-6 各年の出水期平均天然ダム空き容量と出水期平均天然ダム漏水高との関係

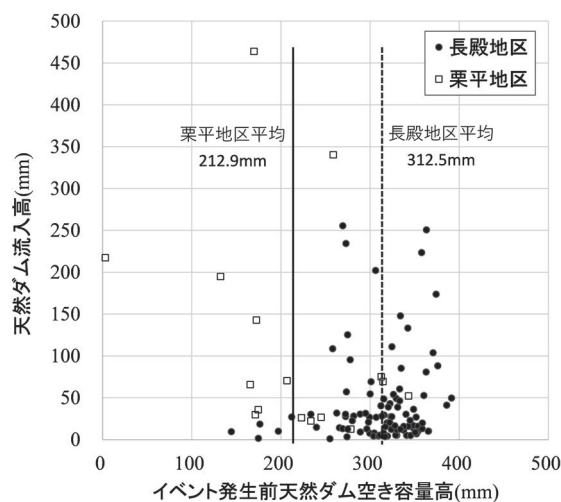


図-7 降雨イベント直前の天然ダム空き容量と天然ダム流入高との関係

続し、当時設置されていた暗渠排水管が常時機能していたことが影響しているためであり、2014年に限っては暗渠排水管からの排水量の影響を含んだ値となっている。

なお、図-5に示した水文観測データに基づく長殿地区の天然ダムの透水係数は、概ね $2.0 \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ となっているのに対し、2012年に実施している長殿地区の天然ダム堤体部分の現地のボーリング調査で実施した現場透水試験の結果は $1.61 \times 10^{-6} \sim 7.33 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ であり、図-5のデータはその範囲に含まれている。

b) 出水期平均漏水量と空き容量との比率

出水期（6/1～10/31）の平均天然ダム漏水量を求め、越流侵食しやすい出水期における平均天然ダム空き容量との関係を図-6に示す。なお、天然ダムの空き容量の値は降雨と比較しやすいように流域面積で除して単位を「空き容量高」で表現している。また、栗平地区は2012年(H24)から2014年(H26)台風11号による越流侵食崩壊までの3年間を対象としている。

出水期平均の天然ダム漏水量、出水期平均の天然ダム空き容量ともに栗平地区の方が小さく、平均的に長殿地区よりも栗平地区の方が満水に近い水位の高い状態にあるが、栗平地区の方が平均的な透水係数が小さいため結果的に漏水量が少なくなっていると考えられ、このことにより栗平地区においては水位上昇後、漏水によって水位低下しにくくなっているためと考えられる。また、図-7に示した総雨量50mm以上の降雨イベントを対象とした降雨イベント直前の天然ダムの空き容量と流入高の関係でも、栗平地区の方が天然ダム流入量は大きいイベントがあるにも関わらず、降雨イベント直前の空き容量が小さい傾向となっている。反対に長殿地区は天然ダムの流入高が小さく、出水直前の空き容量も大きく、ここでも栗平地区の方が越流しやすい傾向になっている。

なお、漏水量は透水係数だけでなく、通水面積の影響もあるため、天然ダムの3次元的な形状等も影響してい

る可能性がある。

5. おわりに

本研究では、2011年紀伊半島大水害で生じた天然ダムのうち、越流状況の大きく異なる長殿地区と栗平地区の天然ダムを対象に、①降雨特性の違い、②ダム上流域面積と湛水池容量の比率、③流出特性の違い、④漏水特性の違いを比較し、以下に示すように①、③、④の項目で長殿地区よりも栗平地区の方が、越流しやすい環境となっていた。

- ・ 降雨特性：長殿地区よりも栗平地区の年平均最大雨量の方が約1.25倍大きい。
- ・ 上流域面積と湛水池容量の比率：長殿地区より栗平地区の方が大きい。
- ・ 流出特性：栗平地区の方が天然ダム流入量は大きく、降雨イベント直前の空き容量も小さい傾向となっている。
- ・ 漏水特性：年平均透水係数、出水期平均天然ダム漏水量ともに栗平地区の方が小さく、漏水しにくい状況となっており、それを反映して出水期平均の天然ダム空き容量も栗平地区は小さくなっていた。

長殿地区と栗平地区のErmini and Casagli¹³⁾のDBIは同程度の値であり、判定基準ではどちらも安定に分類されるが、天然ダム形成後10年経過した時点では、結果的に越流侵食の状況には大きな違いが生じている。比較的近い位置にある長殿地区と栗平地区の2つの天然ダムも、気候特性や水文特性を考慮することで、その違いを把握することができると考えられる。また、新規に発生した天然ダムも気候特性値や周辺の水文特性値を仮定し、本稿に示した2つの天然ダムの各水文諸数値と比較することで、今後発生する天然ダムの越流のしやすさを判断す

る材料とできる場合もある。

天然ダム形成後の応急対策としては、仮排水路や排水トンネルといった選択肢があるが²³⁾²⁴⁾、天然ダム形成後、早期に水文観測を開始し、大きな降雨イベントを経験した時点で、本稿で示したような水収支からの天然ダム流入量データに基づくタンクモデル等の比較的精度の高い流出解析法と漏水特性や既存の気象データなどを組み合わせたシミュレーションを行うことで、対策工の方針や湛水池の水位の予測や越流の可能性を検討できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 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，2011。
- 2) 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。
- 3) 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，2013。
- 4) 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，2013。
- 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，海原莊一，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) Costa, J.E. and Schuster, R.L. : The formation and failure of natural dams, Geological Society of America Bulletin, Vol.100, pp.1054 - 1068 1988。
- 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。
- 10) 水山高久，森俊勇，坂口哲夫，井上公夫：日本の天然ダムと対応策，古今書院，2011。
- 11) 田畑茂清，水山高久，井上公夫：天然ダムと災害，古今書院，2002。
- 12) Casagli, N. and Ermini, L. : Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine, Transactions Japanese Geomorphological Union, Vol.20, No.3, pp.219 - 249, 1999。
- 13) Ermini, L. and Casagli, N. : Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index, Earth Surface Process and Landforms, Vol.28, pp.31 - 47, 2003。
- 14) Korup, O. : Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams, Eng Geol, Vol.73, No.1-2, pp.13 - 35, 2004。
- 15) Dong, J. J., Tung, Y. H., Chen, C. C., Liao, J. J. and Pan, Y. W. : Logistic regression model for predicting the failure probability of a landslide dam, Eng Geol, Vol.117, No.1-2, pp.52 - 61, 2011。
- 16) Dong, J. J., Li, Y. S., Kuo, C. Y., Sung, R. T., Li, M. H., Lee, C. T., Chen, C. C. and Lee, W. R. : The formation and breach of a short-lived landslide dam at Hsiaolin Village, Taiwan - part I: postevent reconstruction of dam geometry, Eng Geol, Vol.123, No.1-2, pp.40 - 59, 2011。
- 17) 千葉幹，水山高久：天然ダムの水位観測による満水までの雨量推定方法について(平成 23 年台風 12 号に関する事例研究)，砂防学会誌，Vol. 65，No. 5，pp. 50-55，2013。
- 18) 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。
- 19) 秋山怜子，藤村直樹，石塚忠範，内田太郎，桜井亘，酒井良，海原莊一，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。
- 20) Kaihira, S., Tadakuma, N., Fujiwara, Y., Sakurai, W., Oyama, M. and Sakai, R.: Landslide dam hydrological observation and hydrological balance calculation procedures, Extended Abstracts of the INTERPRAEVENT 2014 in Pacific Rim, pp.140— 141 (2014)。
- 21) 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，長谷川陽一，三田村宗樹，松井保：2011年台風第12号時の深層崩壊に伴う天然ダムを構成する岩石のスレーキング試験結果と約10年間の天然ダムの安定性との関係について，地すべり学会誌，Vol. 59，No. 1，pp. 16-27，2022。
- 22) 木下篤彦，北本楽，山越隆雄，中谷洋明，海原莊一，荒木義則：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，環境システム計測制御学会誌，Vol. 26，No. 4，pp. 60-66，2022。
- 23) 森俊勇：国内外で採用された天然ダム緊急対策工法，Vol. 68，No. 2，pp. 56-62，2015。
- 24) 桜井亘：大規模河道閉塞の緊急工事の考え方について，砂防学会誌，Vol. 71，No. 6，pp. 14-20，2018。

(2022. 5. 30 受付)