天然ダム決壊時におけるすべり破壊可能性の検討 Occurrence of landslide in the landslide dam bursting processes

森 俊勇*1	伊藤 達 平*1
Toshio MORI	Tatsuhei ITOU
水 山 高 久*2	小田 晃*3
Takahisa MIZUYAMA	Akira ODA

Abstract

When landslide dams are formed, it is demanded to predict flood discharge accurately. Therefore it is necessary to judge if landslide occurs inside the landslide dam during overtopping-erosion processes. The horizontal length of landslide dams is generally long when compared with the height, and the downstream slope is milder than the angles of repose, which denotes low possibility of landslide occurrence inside the landslide dam. Furthermore, when the sediment of landslide dam is coarse, as erosion by overtopping flow proceeds, the eroded sediment by overtopping is deposited on downstream slopes and the slope becomes more stable against the outburst. However when the sediment of landslide dam is fine or cohesive sand, or torrent gradient is steep enough to generate debris flow, the sediment will not be deposited on lower reach of the slope. In these cases, the possibility of landslides will increase according to the erosion proceeds. We investigated how the dimensions of landslide dam's material (cohesion, the internal friction angle) influence the landslide dam's safety factor. Also, the conditions (the shape of the landslide dam and the soil parameters of the material) of slide occurrence are considered with calculation of safety factors using different calculation condition. As a result, we found out that downstream slope gradient and dam height have the strong influence on the safety factor of landslide dam when the sediment is fine.

Keywords: landslide dams, outbursts of landslide dams due to landslides, calculation of stability based on soil engineering

1. はじめに

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震は, 中山間地を中心に多数の土砂災害を引き起こした。特に 芋川流域においては,東竹沢地区や寺野地区をはじめ, 計52箇所において,河川沿いの斜面が崩壊し,崩落土 砂が河道を埋塞して天然ダムが形成された⁰。

一般に災害発生の初期段階においては、危機管理の ため、行政機関が住民に対し、適切な情報を提供する必 要がある。流域の危機管理の視点から、天然ダム形成時 に行政が流域住民等に提供するべき情報としては、①天 然ダム決壊の可能性について、②天然ダムの決壊時期 について、③天然ダムが決壊した場合の下流域におけ る想定浸水区域について、といった事項が考えられる。 上記①の情報を流域住民等へ適切に提供するためには、 天然ダム形成後、天然ダムの湛水位や天然ダムの堤体 形状がどのような状態になった場合に、どのような現象に より天然ダムが決壊する可能性があるのか等を事前に整 理しておく必要がある。

この意味で,現在の天然ダムの決壊メカニズムに関す る解析手法を見ると,以下のことが概観される。まず,天 然ダムの決壊過程は、①越流侵食による決壊、②すべり 破壊による決壊、③進行性破壊(パイピング)による決壊 の3つの型に分類される²。

この中で, 湛水が越流することで堤体が侵食破壊され, これにより天然ダムが決壊するケースに関しては、シミュ レーションが研究されており3,ピーク流量を簡易的に推 算する手法も提案されている 4。一方, すべり破壊により 決壊するケースやパイピングにより決壊するケースは事 例が少ない。一般に, 天然ダムは高さに比べて流下方向 の長さ(天端幅)が長く、下流のり勾配は安息角に等しい かそれよりも緩やかなため,浸透が進んでもすべり破壊 が発生する可能性は低い。また、越流侵食が進行すると、 天然ダムを形成している土砂が粗い場合, 天然ダム下流 に堆積して、すべり破壊についてはより安定な状態へと 変化する。しかし、天然ダムの構成材料が、細かい砂で ある場合や,構成材料が粘着性のある土砂で侵食速度 が速くない場合,または、河床勾配が急で,侵食された 土砂がそのまま土石流として流下するような場合には、 侵食された土砂が天然ダム直下流に堆積せず, 天端幅 が狭くなり、かつ下流のり勾配が急となることが想定され、 侵食の進行と共にすべり破壊が発生し、これにより天然

*1 正会員 財団法人砂防フロンティア整備推進機構 Member, Sabo Frontier Foundation *2 正会員 京都大学大学院 農学研究科 Member, Graduate School of Agriculture, Kyoto University *3 正会員 財団法人建設技術研究所, 筑波試験 所 Member, Civil Engineering Research Laboratory ダムが決壊する危険性が高まる可能性が考えられる。平 成16年に発生した新潟県中越地震時に芋川流域で形成 された天然ダムは、堤体の構成材料の粒径が小さく、一 様な砂なので、越流侵食によって天然ダムの流下方向の 長さ(天端幅)が短くなり、下流のり勾配が急になって、す べり破壊の発生する可能性の高い事例である。このよう な見地から、本報告では、どのような条件下(形状、土質 特性)で天然ダム決壊時にすべり破壊が発生するのか、 計算条件を系統的に変化させて、安全率の変化を見た。

2. 計算の基本方針と計算条件

2.1 計算の基本方針

天然ダムが形成された場合,決壊に対する安定性は, 天然ダムの形状や堤体材料の諸元により変化する。また, 形成後は上流の湛水位の変化によっても,決壊の可能 性が時々刻々と変化すると考えられる。

ここでは、まず、天然ダムの形状および堤体材料の諸 元が、すべり破壊による決壊の可能性に与える影響につ いて、円弧すべり計算によって評価を行った。

次に,天然ダム形成後の湛水位の変化によって,すべ り破壊による決壊の可能性がどの様に変化するのかにつ いて評価を行った。検討フローを図-1に示す。

1. 天然ダムの決壊メカニズムの中で、すべり破壊に				
よる決壊パターンに着目.				
V				
2. 堤体材料が均一で,堤体が完全に飽和した状態				
と仮定.				
3. 堤高, 天端幅, 堤体下流面のり勾配、堤体材料 の土質定数をパラメータとして円弧すべりに対す る安全率を評価.				
V				
 4. 上記3. の検討において、安全率が1以下となったケースを対象として、堤体内が完全には飽和していない状態を想定し、円弧すべりに対する安全率を評価. 				

図ー1 検討フロー Fig.1 Flow chart of examination

2.2 安定計算の計算式

斜面の安定計算に関しては、一般的な土堤の円弧す べり面法による安定計算手法である分割法を採用した。 なお、安全率Fsの算定に用いた計算式は以下のとおり である⁵。なお、安全率はそれが最小となる断面で決定し た。

$$Fs = \frac{\sum \{c \cdot \ell_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cos \theta_i \cdot \tan \varphi\}}{\sum W_i \cdot \sin \theta_i}$$

ここに、W_i:分割片の全重量 u_i:すべり面上の間隙水圧 c:すべり面上の土の粘着力 φ:すべり面上の土の内部摩擦角 ℓ_i :円弧の長さ

b,:スライス幅

 $\dot{ heta_i}$:円弧の中央における法線と鉛直線のなす角

2.3 計算条件

天然ダムの形状や堤体材料に関する諸量のうち,堤体の円弧すべりに対する安定性に影響を与えると考えられる項目としては、①下流のり面勾配、②堤体材料の土質定数、③天端幅、④堤高等が考えられる。

ここでは、上記の堤体の性質を表す各諸量が、堤体の 安定性にどの様に影響するのかについて検討を行った。 計算に用いた天然ダムの諸元を**表-1**に示す。

表一1 計算に用いた天然ダムの諸元 Table 1 List of calculation case of landslide dam's parameter

Parameter of landslide dam	Precondition
Height of landslide dam : $H(m)$	4,8,15,30,60,120
Gradient of landslide dam's down stream slope : ϕ_d (°)	30,35,45,60,75
Gradient of landslide dam's down stream slope : ϕ_u (°)	30,35,45,60,75
Cohesion of landslide dam's material : c (kN/m ²)	10,30,40,50
Internal friction angle : ϕ (°)	10,20,30
Torrent gradient : θ (°)	0.88(1/65)
Unit weight of landslide dam's material : $ ho$ (kN/m ³)	18.0
Crown width of landslide dam : W (m)	1,2,5,10,20,40,80

計算モデルの概要を図-2に示す。安定計算の実施 に際しては、着目するパラメータ以外は一定値として、そ の影響を排除し、着目するパラメーターの影響を堤体の 円弧すべりに対する安全率により評価した。また、堤体高 および堤頂幅は、既往の天然ダム形成事例を参照し、事 例がある範囲の値で検討を行った⁶⁰。さらに、河床勾配は、 10、000分の1の地形図から推定した芋川流域における 東竹沢地区付近の平均河床勾配を参照して決定した。



なお,計算に際しては,以下の仮定を行った。

- ①天然ダム上流側の水位は満水状態で、堤体が完全に飽和した状態、および水位が堤体高の3/4、 1/2、1/4の位置にあり、堤体が完全には飽和していない状態を仮定した。
- ②堤体材料は均一であると仮定し、内部摩擦角、粘着力は土質材料としての一般値を採用した⁷。

3. 堤体形状, 堤体材料に関する検討

上記の計算条件のもとで,安定計算を実施した結果を 以下に示す。

3.1 堤体の下流のり面勾配と安全率の関係

堤体下流のり面勾配と安全率の関係を図-3~図-5 に示す。なお、ここでは堤高を30m、天端幅を150mとし て計算を行った。

図-3に示すように、内部摩擦角が30°の場合、粘着 力が40kN/m²で堤体下流のり面勾配が35°以上の時、 および粘着力が50kN/m²で堤体下流のり面勾配が45° 以上の時に安全率が1以下となる。また、粘着力が30





kN/m²以下で堤体下流のり面勾配が30°以上の時,安全率は1以下となる。

次に,内部摩擦角が20°の場合,粘着力が50kN/m² であれば堤体下流のり面勾配が35°以上で安全率が1 以下となり,粘着力が40kN/m²以下では堤体下流のり面 勾配30°以上の範囲で安全率が1以下となる(図-4)。

最後に,内部摩擦角が10°の場合,斜面は粘着力の 値に関わらず,堤体下流のり面勾配が30°以上のケー スで,安全率が1以下となる(図-5)。



天端幅と堤体の円弧すべりに対する安全率の関係を 図ー6に示す。なお、ここでは下流のり面勾配を30°、 堤高を30m、堤体材料の内部摩擦角を20°、粘着力を 30kN/m²として計算した。図ー6に示すように、この条件 では、天端幅によっては、安全率は大きくは変化せず1 以下となる。

3.3 堤高と安全率の関係

堤高と堤体の円弧すべりに対する安全率の関係を図

-7に示す。なお、ここでは下流のり面勾配を30°、天端幅を1mとして、計算を行った。図-7に示すように、Case-3では堤高が30m以上の高さになると、安全率が1以下となる。また、堤体材料の粘着力が10kN/m²の場合は、堤高が10m以下の範囲でも安全率が1以下となる。



4. 湛水位の影響に関する検討

以上の検討は、上流側の湛水位が満水状態にあり、堤 体が完全に湿潤状態にある場合の計算結果である。

しかし,実際の天然ダムの形成から決壊に至る現象を 考慮した場合,3.で示したような天然ダム上流の水位が 満水状態で,堤体が完全に湿潤状態となった時には,越 流による堤体の侵食が始まり,これが原因となって堤体 が決壊する可能性が高い。一方,すべり破壊による天然 ダムの決壊は、上流側の水位がある程度上昇し、堤体内 部の浸潤線が一定以上の位置に達した場合に発生する 可能性もある。

そこで、ここでは3. での検討において、安全率が1以下となったケースを対象として、堤体内部で様々な浸潤線を想定し、浸潤線がどの様な状況となった時にすべり破壊による天然ダム決壊の可能性があるのかについて検討を行った。



図-8 浸潤線の影響を検討する解析に用いたモデル Fig.8 Calculation model to investigate influence of seepage line on Fs

計算に用いたモデルを図-8に示す。図に示すように、 天然ダムの堤高を4分割し、下流側水位はのり尻に一致 させ、上流側の水位 Huをさまざまに変化させ、堤体内での浸潤線は直線的に変化すると仮定して、3. で検討を行った各計算ケースの中で、安全率が1以下となるケースを主対象として円弧すべり計算を行った。

4.2 浸潤線の位置、天端幅と安全率の関係

まず,堤高を30m,堤体下流のり勾配を30°,堤体材料の粘着力を30kN/m²,内部摩擦角を20°とし,天端幅を変化させた場合の計算結果を図ー9に示す。この図と図ー7に示すように,天端幅が30m以下の範囲では,上流側の湛水位が満水位となった場合に堤体の安全率が1以下の値となる。これに対して天端幅を40mとした場合には,上流側が満水の場合でも安全率が1以上の値となる。







次に天端幅を1m,堤体下流のり勾配30°,堤体材料の粘着力を10kN/m²,内部摩擦角を20°とし,堤高を変化させた場合の計算結果を図ー10に示す。この図に示すように、堤高が15mの場合は天然ダム上流の湛水位が堤高の3/4の位置となった場合に、堤高が8mの場合は天然ダム上流の湛水位が満水となった場合に、安全率が1以下の値となる。

4.4 浸潤線位置,堤高,堤体材料の諸元と安全率の関係

最後に天端幅を1m,堤体下流のり勾配を30°とし, 堤高を30m(黒塗り),60m(灰色),120m(白抜き)と変化 させ、さらに堤体材料の諸元を表-2に示すように変化さ せた場合の計算結果を図-11に示す。この図に示すよ うに、いずれのケースにおいても、上流側の湛水位が満 水位となった場合には、安全率が1以下となる。特に、堤 体材料の内部摩擦角を20°,粘着力を10kN/m²とした場 合、堤高が30m以上の範囲では上流側の湛水位が堤高 01/4の位置に達した時点で、安全率が1以下となる。 また、堤体材料の粘着力、内部摩擦角が大きいケース(C ase-3)は、それらが小さいケース(Case-1, Case-2) に比べて、上流側水位の上昇による安全率の低下が大 きい傾向がある。

表-2 計算に用いた堤体材料の諸元 Table2 List of calculation case of landslide dam parameter

	Case No.	φ	С			
	Case-1 O	20°	30kN/1	n^2		
	Case−2 □	20°	10kN/r	n ²		
	Case -3 Δ	30°	30kN/1	n^2		
1	.8		///· 1m]		
1	.6		μ	, .		
1	4		$\phi_{u}^{i}:30^{\circ}$			
T	.4	A Contraction of the second se				
1	.2					
ري ا	.0					
ц 0	.8Ör		<u>.</u>			
0			<u>ـــــــًا الم</u>			
0	.6 • H: 30m case	H° 30m cas				
0	.4 ▲ <i>H</i> : 30m case	$e^3 \bullet H$: 60m cas	e1			
0	$.2 \bigcirc H: 60 \text{m case}$	$e^2 \blacktriangle H$: 60m cas	e3			
0	$0 \triangle H:120 \text{m case}$	e3				
	0.00 0.25	0.50 0. Hu/H	.75 1.00	1.25		
×	-11 浸潤線の	位置、堤高、堤	体材料の諸元と	安全		
平の関係 Fig 11 Relationship between H_{U}/H_{H} c ϕ and Es						

5. まとめ

今回実施した土質力学的な感度分析により, 天然ダムの円弧すべりに対する安定性に関して, 以下の事項が明らかになった。

- ①粘着力,内部摩擦角,堤体下流のり面勾配,堤高, 天端幅によって,堤体の円弧すべりに対する安全率 がどのように変化するかの感覚を得ることができた。
- ②堤体材料の内部摩擦角や粘着力が小さいと推測される場合,堤体の安定性に対して最も影響が大きいパラメーターは,堤体下流面のり勾配,堤高である。
 ③堤体材料の内部摩擦角や粘着力が小さいと推測された。

れ,天端幅が1mで下流のり勾配が30度の場合,堤

高が30m以上の天然ダムに対しては上流側の湛水 位が堤高の1/4に達する前に、堤高が15m程度の 天然ダムに対しても上流側の湛水位が堤高の3/4 に達する前に、すべり破壊発生の可能性がある。

今回の解析は、天然ダムの形状に関する諸元、堤体 材料の土質定数等を標準的な値と仮定して実施した。実 際に天然ダムが形成された場合、レーザープロファイラ によって天然ダムの堤高や天端幅、堤体積、満水時の湛 水量等を速やかに入手すると共に、堤体材料の土質定 数に関する情報を入手または推定して、すべり破壊が発 生する可能性を判断し、すべり破壊発生の可能性がある 場合には、越流侵食のシミュレーションと組み合わせて すべり破壊の検討を行う必要がある。

天然ダム形成発見の初期段階において、適切な警戒・ 避難体制を構築するためには、迅速かつ正確な解析手 法の開発とともに、天然ダム形成をできるだけ早期の段 階で発見し得る体制を整備することや、堤体材料等の諸 元(粘着力 c,内部摩擦角 ø,透水係数等)を迅速に測定 あるいは他の簡易に計測できる値から推定する手法を開 発することも重要である。もしくは、天然ダムの形成が予 想される地域では、事前に土質力学的な特性を調べて おくことも考えられる。

最後に,本報告の解析に際して,応用地質株式会社 水戸支店の方々に多大なご協力を頂いた。記して謝意 を表する。

参考文献

- 1)国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所:平成1 6年(2004 年)新潟県中越地震による土砂災害と対応, 9pp.,2005
- 2)高橋保, 匡尚富: 天然ダムの決壊による土石流の規 模に関する研究, 京都大学防災研究所年報第31号 B-2, p.601-615,1988
- 3)高橋保・中川一:天然ダムの越流決壊によって形成される洪水・土石流のハイドログラフ,水工学論文集, 第37 巻, p.699-704,1993
- 4)田畑茂清・池島剛・井上公夫・水山高久: 天然ダムの 決壊による洪水ピーク流量の簡易予測に関する研 究, 砂防学会誌, Vol.54, No.4, p.73-76, 2001
- 5)(財)国土開発技術研究センター:河川土工マニュア ル,90pp.,1993
- 6)田畑茂清・井上公夫・早川智也・佐野史織:降雨により群発した天然ダムの形成と決壊に関する事例研究
 一十津川災害(1989)と有田川災害(1953)—,砂防学
 会誌, Vol.53,No.6, p.66-76, 2001
- 7)日本道路公団:設計要領第一集 土工・舗装・排水・ 造園,財団法人道路厚生会, p.1-37, 1999