

土砂ダムの物理的条件の違いによる土石流特性値の変化

Change of debris flow characteristics due to differences in physical conditions of landslide dam

本田尚正^{*1}

Naomasa HONDA^{*1}

* 1 東京農業大学地域環境科学部

Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture, Setagaya 156-8502

要旨：土砂ダム（天然ダム）は大規模な斜面崩壊によって川が堰き止められ、その上流に湛水池が形成されたものである。土砂ダムの決壊による土石流や洪水の発生は、下流に深刻な災害を引き起こす。本研究では土石流の数値解析をもとに、土砂ダムの形状や構成材料といった物理的条件の違いによる土石流特性値の変化について考察した。その結果によれば、土砂ダムの土砂量が同じ場合、土石流の規模はダム高が高いほど、越流水量が多いほど大きい。土石流の規模を精度よく推定するためには、崩土の流動性に大きく影響する諸条件を慎重に設定しなければならない。

キーワード：土砂ダム、ダム決壊、土石流、数値解析、土砂ダムの物理的条件

Abstract: A large-scale collapse can form a landslide dam, which can block a river and create ponding upstream. If a landslide dam outburst occurs, the resulting debris flow and flood can cause serious disasters of the downstream region. We discuss changes in debris flow characteristics due to differences in the landslide dam's physical conditions, such as shape and material, based on a debris-flow numerical simulation. According to the analytical results, if landslide dams have the same sediment volume, the debris flow scale is so large that the dam height will be high or amount of overflow water will be large. In order to predict the scale of a debris flow with sufficient accuracy, we must carefully establish the conditions that significantly influence sediment mobility.

Keywords: Landslide dam, dam outburst, debris flow, landslide dam's physical conditions, numerical simulation

I はじめに

近年、地震や豪雨に起因して大規模な崩壊が発生し、河道閉塞（以後、「土砂ダム（天然ダム）」と称する）が形成される事例が数多くみられる（2004年新潟県中越地震：芋川流域、2008年岩手・宮城内陸地震：迫川流域、2011年9月紀伊半島豪雨：奈良県五條市赤谷など）。土砂ダムの決壊による土石流や洪水の発生は、下流に深刻な災害を引き起こす。そのため土砂ダムの形成、決壊、流動化に関する研究は、これまで現地調査、模型実験、数値解析など、精力的に進められてきた（1, 4, 5）。

一方、発生土石流の規模や性質は、土砂ダムの形状や構成材料の違いにより当然異なるが、河道閉塞自体、第一線の災害現場であり、試料採取等による詳細な検討は困難な場合が多い。そこで本研究では、計算条件を変化させて土石流の流動解析を行い、土砂ダムの物理的条件の違いによる土石流特性値の変化について考察する。

II 土砂ダム決壊と土石流発生との関係

土砂ダムは、大規模な斜面崩壊が発生して河川に落ち

込み、非常に緩い状態でうず高く積み上がり、流水を堰き止めて湛水池を形成するものである（図-1）。日本は地理的条件から地震や豪雨に見舞われやすい上、地形は急峻で地質も脆弱なため、斜面崩壊が発生しやすく、土砂ダムが形成されやすい条件を潜在的に有している。

土砂ダムの決壊過程は、湛水池からの水の浸透によるすべり崩壊、パイピングによる破壊、越流侵食による決



図-1 土砂ダムの例（奈良県五條市赤谷、2011）（注1）

Fig.1 An example of landslide dam
(Akadani, Gojo city, Nara Pref., 2011)

壞の3種類に分類できる。なかでも越流侵食による決壊は湛水池の水位がきわめて高い状態で生じるため、発生土石流の規模が大きく、下流域での被害も甚大である。そのため、土砂ダム形成時には越流防止のためのポンプ排水や仮排水路を一刻も早く整備しなければならない。

それらと併せて、最悪のシナリオである「土砂ダム決壊」を想定した災害予測とそれに基づく警戒避難対策も重要である。土石流や洪水の規模を予測するためには、土砂ダムの形状および崩土量（高さ、延長等）、崩土の物理的性質（密度、含水比、粒径、せん断強度等）、湛水池の状況（湛水量、水位変化等）、流下土石流に対して土砂供給源となる渓床堆積物の状況（堆積厚、粒径、せん断強度等）などを把握する必要がある。

III 解析手法および計算条件

本研究ではモデル渓流を設定し、計算条件を種々変化させて土石流の流動シミュレーションを行う。

1. 土石流の一次元支配方程式 山地河道における土石流の流動過程を一次元支配方程式によって追跡する場合、必要な諸式は次のとおりである（2）。

（水と砂礫の混合物の質量保存則）

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Bvh}{\partial x} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

（砂礫のみの質量保存則）

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial cBvh}{\partial x} = E \quad (2)$$

（運動量保存則）

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \theta - \frac{1}{\rho_m h} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{vE}{c_* h} - \frac{\tau_b}{\rho_m h} \quad (3)$$

$$\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho \quad (4)$$

（河床位方程式）

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = - \frac{E}{c_* \cos \theta_*} \quad (5)$$

（侵食速度式）

$$\frac{E}{v} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (6)$$

$$\theta_e = \tan^{-1} \left\{ \frac{(\sigma/\rho-1)c}{(\sigma/\rho-1)c+1} \tan \phi \right\} \quad (7)$$

ここに、 t ：時間、 x ：最上流端を原点とする流れに沿った座標、 B ：流動幅、 h ：流動深、 v ：断面平均流速、 E ：侵食速度（ $E < 0$ の場合、堆積を示す）、 c ：土砂体積濃度（断面平均濃度）、 c_* ：砂礫の静止堆積濃度、 g ：重力加速度、 θ ：渓床勾配、 ρ_m ：水と砂礫の混合物の密度、 τ_b ：

河床せん断力、 Z_b ：河床高、 θ_e ：濃度 c に対する平衡勾配、 σ ：砂礫粒子の密度、 ρ ：泥水（間隙水）の密度、 ϕ ：砂礫粒子の内部摩擦角である。

式(1)～(6)を閉じるために、河床せん断力 τ_b を与える必要がある。ここでは次式のとおり、江頭・宮本・伊藤の土石流の構成則によるものとする（3）。

（河床せん断力）

$$\tau_b = \tau_y + \rho f v^2 \quad (8)$$

$$\tau_y = \left(\frac{c}{c_*} \right)^{1/5} \rho (\sigma/\rho - 1) c g h \cos \theta \tan \phi \quad (9)$$

$$f = \frac{25}{4} \left\{ k_f \left(\frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} + k_g \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) c^{1/3} \right) \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \right\} \quad (10)$$

ここに、 τ_y ：降伏応力、 f ：抵抗係数、 e ：砂礫の反発係数、 d ：砂礫の代表粒径、 k_f および k_g ：定数 ($k_f=0.16$, $k_g=0.0828$) である。以上の式を差分化し、数値解析により土石流特性値 (h , v , Q : 総流量) を算定する。

2. モデル渓流の設定 実際の渓流では、流動幅や河床勾配は不規則に変化しており、流下土石流への土砂供給源となる渓床堆積物も偏在している。それらの地形条件は、土石流特性値の算定結果にも大きく影響する。ここでは、土砂ダムの物理的条件の差異のみに着目するため、次に示す2つのモデル渓流を設定する。

Case.1：勾配 10°、流動幅 30m（一定）、総延長 1,000m
(水平距離 985m)、比高 174m、渓床堆積物なし。

Case.2：勾配 15°、流動幅 30m（一定）、総延長 1,000m
(水平距離 966m)、比高 259m、渓床堆積物なし。

図-2 にモデル渓流の縦断形状を示す。同図のとおり、ここではモデル渓流の最上流地点に形成された土砂ダムが湛水池からの越流水によって決壊し、崩土が流動して土石流化することを想定する。

3. 計算条件の設定

1) 土砂ダムの形状 土砂ダムの形状は図-3 のように設定する。ここでは土砂ダムを構成する土砂量を 40,000m³ 程度で一定とし、ダム高 (H) 30m, 20m, 10m の 3 種類に対応した延長 (L_1 および L_2) を有する土砂ダムを検討対象とする。

2) 土砂ダムの構成材料 土砂ダムの構成材料の条件は次のとおりとし、数値計算では ϕ と d を変化させる。

- 砂礫の密度： $\sigma=2.70\text{g/cm}^3$ （一定）
- 砂礫の静止堆積濃度： $c_*=0.50$ （一定）（2, 3）
- 内部摩擦角： $\phi=30^\circ, 35^\circ, 39^\circ$ の 3 種類
- 代表粒径： $d=10.0\text{cm}, 5.0\text{cm}, 1.0\text{cm}$ の 3 種類

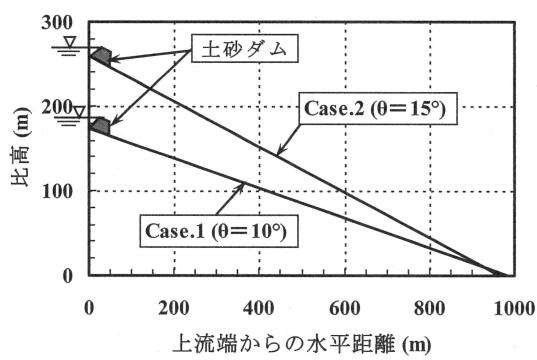


図-2. モデル渓流の河床縦断形状

Fig.2 Bed profile of model torrents

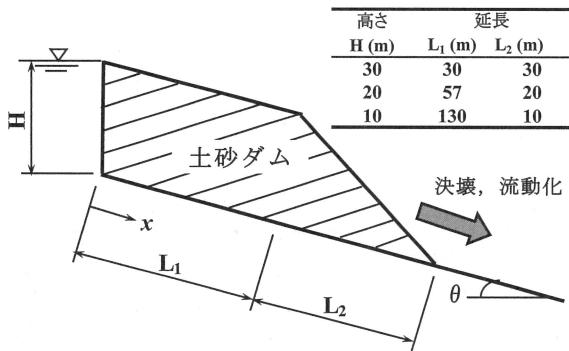


図-3. 土砂ダムの形状

Fig.3 Shape of landslide dam

3) 水の供給条件 ダム背面からの越流水量を次のとおり変化させ、土石流特性値への影響を調べる。

- 供給水量 : $Q_{in} = 10.0, 1.0, 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ の 3 種類
- 4) 間隙水（泥水）の条件 微細砂による泥水の密度上昇と浮力への影響は土石流の流動解析上、無視できない。ここでは微細砂濃度を次のとおり変化させる。

 - 微細砂濃度 : $c_s = 30\%, 20\%, 10\%$ の 3 種類
(泥水の密度 : 1.51, 1.34, 1.17 g/cm³ の 3 種類)

- 5) 数値計算に必要な条件 数値計算は leap-frog 法に拠る。差分条件は $\Delta t = 0.025 \text{ sec}$, $\Delta x = 5.0 \text{ m}$ である。

IV 結果および考察

表-1に計算結果を示す。図-4には表-1中、

- 河床勾配の条件 : $\theta = 15^\circ$ (Case.2)
- 土砂ダムの条件 : $H = 30 \text{ m}$, $\phi = 39^\circ$, $d = 5.0 \text{ cm}$
- 水の条件 : $Q_{in} = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $c_s = 10\%$

の場合の土砂ダム縦断形状および土石流特性値の時間変化を示した。それらに基づき、以下に考察する。

1. 越流侵食によるダム決壊の進行 図-4(a)では、通水開始後ほどなく越流水によって堤頂部の勾配変化点が侵食され始め、侵食面が上流に向かって急速に遡上していく様子が再現されている。

2. ダム形状の違いによる土石流特性値の変化

表-1より、ダムを構成する土砂量が同じであれば、河床勾配が大きく、ダム高が高いほど発生土石流の規模は大きい。図-4(b)～(d)から、土砂ダムは通水開始後ほどなく越流侵食によって流動化し、流速を増しながら下していく様子がわかる。

3. ダム構成材料の違いによる土石流特性値の変化

表-1より、 ϕ および d が小さいほど土石流の流速は大きく、水深は小さい。これは、 ϕ が小さいほどダム堤体の締り具合が緩く、 d が小さいほど式(10)より抵抗係数 f が小さくなることにより、ともに土石流の流動性が高まることによる。ただし、 ϕ が流速に及ぼす影響は、河床勾配が大きくなると小さくなる。

一方、土石流の総流量は、 ϕ では小さい（流速が大きい→水深は小さい）ほど大きいが、 d では大きい（流速が小さい→水深は大きい）ほど大きい。これはモデル渓流では流動幅を一定としており、流速の増減が水深の増減に直接影響することに注意する必要がある。

流動幅一定の条件下では、流速の減少に伴う水深の増加の影響が ϕ よりも d の方が大きく、そのことが総流量（流速と水深と流動幅の積）の変化傾向に影響したものと推察される。実渓流では流動幅は不規則に変化する上、渓床堆積物の侵食取込みもあるため、 ϕ および d の変化が土石流特性値に及ぼす影響についてはそれらを考慮して検討する必要がある。

4. 水の条件の違いによる土石流特性値の変化

表-1より、 Q_{in} および c_s が大きいほど、土石流の水深、流速および総流量は大きい。とくに Q_{in} は水深の変化に、 c_s は流速の変化にそれぞれ大きく影響して総流量を増大させていることがわかる。

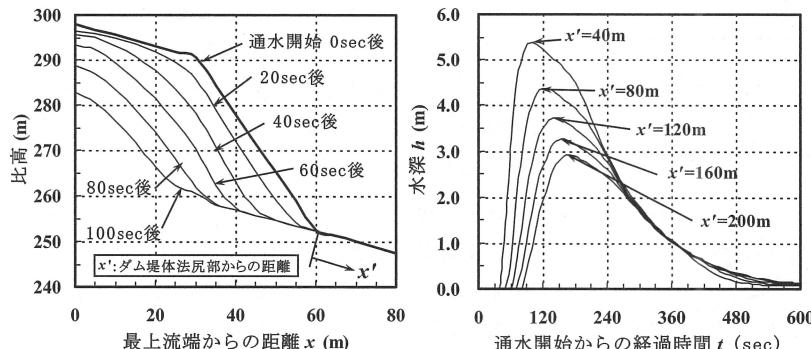
以上の考察をまとめると、表-2のようになる。同表より、土砂量が同じであればダム高が高く、越流水量が多いほど発生土石流の規模は大きいこと、土石流の規模を精度よく推定するためには、崩土の流動性に大きく影響する諸条件 (ϕ , d , Q_{in} , c_s) を現地調査結果等に基づいて慎重に設定する必要があることがわかる。

V おわりに

土砂ダムの形状や湛水池の規模は近年、衛星画像等の判読により、土砂ダム形成直後から詳細な把握や監視が可能である。したがって今後、類似の事例を数多く解析し、計算水深と現地の流下痕跡との比較等によって計算精度の確認を行った上で、 ϕ , d , Q_{in} , c_s といった物理的条件の目安を作つておくことにより、土砂ダム決壊起因の土石流の規模を迅速に推定することが可能となる。

表-1. 土石流の流動解析の結果
Table 1 Results of numerical simulation of debris flow

河床勾配 の条件	ダム高Hを 変化させた場合				内部摩擦角 ϕ を 変化させた場合				代表粒径dを 変化させた場合				供給水量Q _{in} を 変化させた場合				微細砂濃度c _s を 変化させた場合				
	H (m)	h _{max} (m)	V _{max} (m/s)	Q _{max} (m ³ /s)	ϕ (°)	h _{max} (m)	V _{max} (m/s)	Q _{max} (m ³ /s)	d (cm)	h _{max} (m)	V _{max} (m/s)	Q _{max} (m ³ /s)	Q _{in} (m ³ /s)	h _{max} (m)	V _{max} (m/s)	Q _{max} (m ³ /s)	c _s (%)	h _{max} (m)	V _{max} (m/s)	Q _{max} (m ³ /s)	
Case.1 (θ=10°)	30	4.5	3.8	130	30	3.7	5.0	250	1.0	3.0	3.7	120	0.1	4.5	3.8	130	10	4.5	3.8	130	
	20	2.5	3.3	77	35	4.7	4.1	155	5.0	4.5	3.8	130	1.0	5.0	4.1	190	20	5.7	4.9	236	
	10	—	—	—	39	4.5	3.8	130	10.0	5.0	3.4	135	10.0	7.3	5.1	500	30	5.9	5.8	360	
Case.2 (θ=15°)	30	5.7	4.0	215	30	5.4	4.1	330	1.0	5.3	4.5	200	0.1	5.7	4.0	215	10	5.7	4.0	215	
	20	4.5	3.8	170	35	5.7	4.1	265	5.0	5.7	4.0	215	1.0	6.5	4.4	280	20	6.7	5.1	390	
	10	0.2	1.2	6	39	5.7	4.0	215	10.0	6.0	3.8	225	10.0	9.3	5.6	625	30	6.0	6.0	457	
他の条件	$\phi=39^\circ$, d=5.0cm	H=30m				H=30m				H=30m				H=30m				H=30m			
	$Q_{in}=0.1\text{m}^3/\text{s}$, $c_s=10\%$	$Q_{in}=0.1\text{m}^3/\text{s}$, $c_s=10\%$				$Q_{in}=0.1\text{m}^3/\text{s}$, $c_s=10\%$				$Q_{in}=0.1\text{m}^3/\text{s}$, $c_s=10\%$				$Q_{in}=0.1\text{m}^3/\text{s}$							

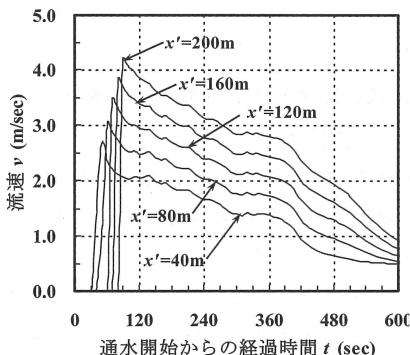


(a) 越流水による土砂ダムの侵食

(a) Landslide dam erosion
due to overflow water

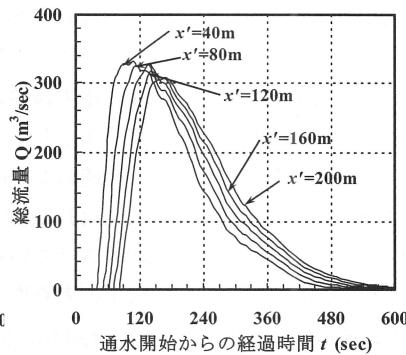
(b) 水深の時間変化

(b) Temporal change of flow depth



(c) 流速の時間変化

(c) Temporal change of flow velocity



(d) 総流量の時間変化

(d) Temporal change of total flow discharge

図-4. 土石流特性値の時間変化の一例
Fig.4 An example of temporal change of debris flow characteristics

引用文献

- (1) 千葉 幹ほか (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 **60**(1) : 43-47
- (2) 江頭進治 (1993) 土石流の停止・堆積のメカニズム(2). 新砂防 **46**(2) : 51-56
- (3) 江頭進治ほか (1997) 掃流砂量の力学的解釈.
- (4) 小田晃ほか (2007) 天然ダム決壊の模型実験. 砂防学会誌 **60**(2) : 33-38
- (5) 内田太郎ほか (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 **62**(3) : 23-29
- (注 1) 朝日航洋株式会社より、斜め航空写真をご提供いただいた。

水工学論文集 **41** : 789-795

- (4) 小田晃ほか (2007) 天然ダム決壊の模型実験. 砂防学会誌 **60**(2) : 33-38
- (5) 内田太郎ほか (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 **62**(3) : 23-29
- (注 1) 朝日航洋株式会社より、斜め航空写真をご提供いただいた。