# 土石流の支配方程式を用いた 天然ダムの形成過程

FORMATION PROCESS OF LANDSLIDE DAM RESULTING FROM LANDSLIDES AND DEBRIS FLOW

## 山崎祐介<sup>1</sup>・江頭進治<sup>2</sup> YAMAZAKI Yusuke and EGASHIRA Shinji

<sup>1</sup>正会員 博士(農学) 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
 <sup>2</sup>正会員 工博 土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

Landslide dams are formed sometimes owing to the occurrence of landslides and debris flows. The present study discusses their formation and breach processes based on the numerical simulation of debris flows. The simulation model employs a depth-averaged two-dimensional form of governing equations which are composed of the mass conservation equations for the flow body, bed sediment and momentum conservation equations for the flow. Bed shear stress and erosion rate terms involved in the governing equations play important roles in debris flow behavior. Phase shifting phenomena from a solid phase to fluid phase is included in evaluating the mobility of debris flows. The numerical model is applied to the landslide dam formed within Ono River in Hita city after heavy rainfall in July 2017. The results suggest that the formation and breach processes of landslide dams are evaluated well by the numerical model.

Key Words : Landslide dam, formation process, debris flow, landslide, numerical simulation

## 1. はじめに

天然ダムは、豪雨や地震に伴う崩壊によって生産され る土砂の移動過程において形成され、その形状や洪水流 の流入条件によっては決壊に伴い急激な水・土砂流出を 生じる.よって、天然ダムの形状の把握は、それに引き 続く洪水による決壊の危険性や、決壊に伴う洪水流を評 価する上で重要であるとともに、応急対策工事のために も重要である.

天然ダムの形状は,崩壊の規模や地形条件によりある 程度決まるものと考えられ,天然ダムの横断形状を台形 近似した場合の形状は,崩壊土砂量・崩壊幅,水路幅・ 勾配によって定式化されている<sup>1)</sup>.さらに,過去の天然 ダムの発生事例から天然ダムの形状に影響を及ぼす因子 を抽出し,それらによる天然ダムの形状の推定式も提案 されており<sup>2)</sup>,天然ダム形状の再現性に改良が見られる.

豪雨に伴う崩壊によって生産される土砂は、水を十分 に含んでおり飽和に近いことから、崩壊土砂は流動化条 件を満たし、その移動過程の解析には土石流の支配方程 式が適用できると考えられる.水深積分2次元支配方程 式に土石流の抵抗則や侵食速度式を導入して,天然ダムの形成過程をシミュレートする試みが行われており,そこで重要な役割を演ずる抵抗則や侵食速度式に違いが見られる<sup>3,4,5</sup>.また,崩壊により生産される土砂は,微細土砂を多量に含有しており,微細土砂は,崩壊に伴う土石流の流動性や規模の決定に重要な役割を果たしていることが知られている<sup>6,7</sup>.

本研究では、2017年7月九州北部豪雨によって大分県 日田市小野地区で形成された天然ダムについて、崩壊土 砂の移動過程に土石流の支配方程式を適用し、その際、 抵抗則に江頭ら(1989)の式<sup>8</sup>、浸食速度式に江頭 (1993)の式<sup>90</sup>を用いて、その形成過程をシミュレート するとともに、同式の汎用性を見るため決壊過程に関す るシミュレーションも行っている.

## 2. 土石流の支配方程式

### (1) 微細土砂の役割

本研究においては、山腹斜面の崩壊により生産された 土砂が流動化し、土石流に遷移して流下して停止するま での過程の解析を行っている.崩壊土砂の流動化につい



図-1 静止状態,流動状態および堆積土砂の模式図

ては、底面摩擦と内部塑性エネルギーによって定式化されており<sup>10</sup>,流動化に必要な距離は、崩壊深の数倍程度である。崩壊により生産された土砂には微細土砂が多く含有されているため、微細土砂が及ぼす土石流への影響を次のように考慮している。

図-1は静止状態、流動状態および堆積土砂の模式図で ある.静止状態においては、粗粒土砂及び微細土砂は固 相として存在し、固相から構成される堆積土砂の間隙は 水で飽和されているものとする. このとき, 堆積土砂の うち粗粒土砂および微細土砂は、それぞれpcc\*および  $p_{\rm f}c_*$ である.ここに、 $c_*$ は静止堆積土砂の体積濃度、 $p_{\rm c}$ は堆積土砂における粗粒土砂の含有率, pfは微細土砂の 含有率で、 $p_{\rm c} + p_{\rm f} = 1$ である.崩壊によって堆積土砂 が流動化条件を満たし、土石流化すると、粗粒土砂は固 相,微細土砂は水とともに液相として振る舞う.よって, 土石流全体の土砂濃度は、 $c_c = p_c c_*$ である.一方、微 細土砂の濃度は,  $c_f = p_f c_* / (1 - c_c) となる. ここに, c_c$ は粗粒土砂の水深平均の体積濃度, cf は液相における微 細土砂の体積濃度である. 堆積過程においては、粗粒土 砂が体積濃度c\*Dで堆積し、その構成する間隙に水と微 細土砂の混合物である流体が取り込まれる. この時の体 積濃度c<sub>\*D</sub>は、流動化前の堆積濃度c<sub>\*</sub>に限りなく近いも のと考えられる.

#### (2) 土石流の質量保存則

侵食過程及び堆積過程における土石流全体,粗粒土砂 および微細土砂の質量保存則は,次のように表される<sup>11)</sup>. 侵食過程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \tag{1}$$

$$\frac{\partial c_{\rm c}h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_{\rm c}uh}{\partial x} + \frac{\partial \gamma c_{\rm c}vh}{\partial y} = p_{\rm c}E \tag{2}$$

$$\frac{\partial c_{\rm f}(1-c_{\rm c})h}{\partial t} + \frac{\partial c_{\rm f}(1-c_{\rm c})uh}{\partial x} + \frac{\partial c_{\rm f}(1-c_{\rm c})vh}{\partial y}$$

堆積過程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_{*\mathrm{D}}}$$
(4)

$$\frac{\partial c_{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_{c}uh}{\partial x} + \frac{\partial \gamma c_{c}vh}{\partial y} = E$$
(5)  
$$\frac{\partial c_{f}(1-c_{c})h}{\partial t} + \frac{\partial c_{f}(1-c_{c})uh}{\partial x} + \frac{\partial c_{f}(1-c_{c})vh}{\partial y}$$
$$= (1/c_{*D} - 1)c_{f}E$$
(6)

ここに、hは水深、tは時間、 $\gamma$ は土砂輸送補正係数、 x,yは直交直線座標でx - y平面は水深平均流速ベクトル が作る面に一致している、u,vはそれぞれ水深平均流速 のx,y成分、Eは侵食・堆積速度である。侵食・堆積速 度は、次式で表される<sup>9</sup>.

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \tag{7}$$

ここに、 $\theta$ は渓床勾配、 $\theta_e$ は土石流の平衡勾配で、次式で表される.

$$\tan \theta_{\rm e} = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_{\rm c}}{(\sigma/\rho - 1)c_{\rm c} + 1} \tan \phi \tag{8}$$

ここに、 $\sigma$ は砂礫の質量密度、 $\rho$ は水と微細土砂からなる間隙流体の質量密度、 $\phi$ は砂礫の内部摩擦角である.

渓床の標高変化は次式で表される.

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{E}{c_* \cos \theta} \tag{9}$$

ここに,zは渓床の標高である.

#### (3) 土石流の運動量保存則

運動量保存則は、次のように表される.

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial \beta uuh}{\partial x} + \frac{\partial \beta vuh}{\partial y} = -gh\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{\rm bx}}{\rho_m} \qquad (10)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial \beta uvh}{\partial x} + \frac{\partial \beta vvh}{\partial y} = -gh\frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{\rm by}}{\rho_{\rm m}}$$
(11)

ここに、 $\beta$ は運動量補正係数、Hは土石流の流れの表面 の標高、 $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$ は、それぞれ、渓床せん断力 $\tau_b$ の x, y方向成分、 $\rho_m$ は土石流の質量密度であり、次式で表さ れる.

$$o_m = (\sigma - \rho)c_c + \rho \tag{12}$$

$$\rho = (\sigma - \rho_{\rm w})c_{\rm f} + \rho_{\rm w} \tag{13}$$

ここに、 $\sigma$ は砂礫の質量密度、 $\rho$ は水と微細土砂からなる間隙流体の質量密度、 $\rho_w$ は水の質量密度である。渓床せん断力 $\tau_b$ とそのx, y成分 $\tau_{bx}, \tau_{by}$ は、それぞれ、次式で表される.

$$\tau_{\rm bx} = \tau_{\rm b} u / \sqrt{u^2 + v^2} \tag{14}$$

$$\tau_{\rm by} = \tau_{\rm b} \nu / \sqrt{u^2 + \nu^2} \tag{15}$$

$$\tau_{\rm b} = \tau_{\rm y} + \rho f_{\rm b} (u^2 + v^2) \tag{16}$$

ここに、 $\tau_y$ はクーロン型の降伏応力、 $f_b$ は流動抵抗係数であって、それぞれ次式で与えられている.

$$\tau_{\rm y} = \left(\frac{c_{\rm c}}{c_{\star}}\right)^{1/5} (\sigma - \rho) c_{\rm c} g h \cos \theta \tan \phi \qquad (17)$$

$$f_{\rm b} = \frac{25}{4} (f_{\rm d} + f_{\rm f}) \left(\frac{h}{d}\right)^{-2}$$
(18)

 $= p_{\rm f} E$  (3)



図-2 崩壊地と天然ダムの空中写真.

$$f_{\rm d} = k_{\rm d} (\sigma/\rho) (1 - e^2) c_{\rm c}^{1/3}$$
(19)

$$f_{\rm f} = k_{\rm f} (1 - c_{\rm c})^{5/3} c_{\rm c}^{-2/3} \tag{20}$$

ここに、dは粗粒土砂の粒径、 $k_f = 0.16$ 、 $k_d = 0.0828$ 、eは砂礫同士における反発係数である。緩勾配や粒径が小さいときには、粒子流動層の上部に乱流層が形成されることがある。これを考慮するために、Julien and Paris<sup>12</sup>の $f_b$ に関する実測値を参考にして、

$$\frac{25}{4}(f_{d}+f_{f})\left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \leq \left(A_{r}-\frac{1}{\kappa}+\frac{1}{\kappa}\ln\frac{h}{\kappa_{s}}\right)^{-2}$$
のとき、 $f_{b}$ を次式によって評価することにしている。  

$$f_{b} = \left(A_{r}-\frac{1}{\kappa}+\frac{1}{\kappa}\ln\frac{h}{\kappa_{s}}\right)^{-2}$$
(21)

ここで、当面 $A_r = 8.5$ 、 $\kappa = 0.4$ 、 $\kappa_s = d$ を採用する.

#### 3. 日田で発生した天然ダムの諸元

2017年九州北部豪雨により日田市の小野地区において, 7月6日午前9時40~50分頃崩壊が発生し,天然ダムが形 成された<sup>13)</sup>.気象庁アメダスによれば,日田の最大24時 間降水量および最大時間降水量はそれぞれ,369.5 mmお よび87.5 mmであり,これらはいずれも崩壊発生の前日 である7月5日に発生している.

図-2は、崩壊発生地点および形成された天然ダムの周辺の7月7日における空中写真である. 天然ダムは河道に沿って500m、河道横断方向に300m程度である. 天然ダム上流には土砂により堰き止められた湛水面が見られる.

図-3,4は、図-2におけるA-A'およびるB-B'の線分における断面図である.これには、災害前後の標高を示している.災害前後の標高データには、それぞれ、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル、航空レーザー測量成果を用いている.それぞれの空間解像度は10 mおよび1 mである.災害前のデータについては、空間解像度が1 mになるように空間内挿補間を行っている.異なる2つの方法によって作成された標高データであるため、それらの差分の精度は満足されるものとは限らない.図-3を



**図-4 図-2**のB-B'の断面図. 崩壊前の地形 (bef) および 崩壊後の地形 (aft)

みると崩壊が発生した斜面の勾配は、25°程度で崩壊に よる最大侵食深は20m程度である.一方河道におけるこ の断面の堆積厚は最大で5m程度である.図-4によると、 河道中央における最大堆積厚は10m程度になっている. 右岸斜面下部において災害後に標高が低下しており、侵 食されたように見えるが、災害前の地形データの精度は、 LPデータとの差分をとるには十分ではなく、実際のと ころは不明である.

#### 4. 天然ダムの形成過程

日田市小野地区で形成された天然ダムの形成過程を検 討するために、土層は水で飽和し、崩壊により生産され た土砂は流動化条件を満たしているものとして、前述の モデルを適用する.

#### (1) 計算条件

計算領域における空間解像度は10 m, 重力加速度g = 9.8 m/s<sup>2</sup>, 砂礫の質量密度 $\sigma = 2650$  kg/m<sup>3</sup>, 水の質量密度 $\rho_w = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, 砂礫の内部摩擦角 $\phi = 37^\circ$ , 砂礫の代表粒径d = 0.1 m, 反発係数e = 0.85, 渓床における土砂の体積濃度 $c_* = 0.6$ , 粗粒土砂含有率 $p_c =$  0.6, 微細土砂含有率 $p_f = 0.4$ , 運動量補正係数 $\beta = 1$ , 土砂輸送補正係数 $\gamma = 1$ としている. 微細土砂含有率については, 福岡県の赤谷川における調査結果<sup>11</sup>) を参考



図-5 計算における流動深(h)の空間分布(1 cm未満は表示していない)





図-6 計算における侵食深(E)および堆積深(D)の空間分布(1 mm未満は表示していない)



図-7 B-B'における断面図

にしている. 初期条件として,崩壊発生領域上端のメッシュ (図-2に示す青色部分) が計算開始時に地表面から 崩壊面までの崩壊深 $D_{ls}$ において流動化するものとし,  $h = D_{ls}, u = 0, v = 0, c_c = p_c c_*, c_f = p_f c_*/(1 - c_c),$  $z = z_{ini} - D_{ls} を与えている. ここに, zは標高, <math>z_{ini}$ は計 算開始時の標高である.

#### (2) 天然ダムの形成過程

図-5,6に,計算開始より20,30,50,3600秒後の流動深 および侵食・堆積深を示す.図-5において,土石流は, 先端部においては流動深が10m程度となり,20秒後時点 で2方向に分離して流下し,30秒後には河道において合 流し下流へ向かって流下している.50秒後には,崩壊に



よって発生した土石流の斜面の流下がほぼ終了して,流 れの主要部分は,河道に沿って流下している.この時の 流動深は,5m程度である.3600秒後には,形成された 天然ダムの上流に滞留している部分はあるが,現象はほ ぼ終了している.図-6を見ると,崩壊部分はほぼ最大浸 食深まで浸食されている.これは,設定している砂礫密 度および微細土砂含有率から式(8)により計算される平衡 勾配が8°程度となることからも明らかである.土石流 が河道へ到達した30秒後には天然ダムは概ね形成されて いるのがわかる.土石流が斜面を2方向に分離して流下 してきたことにより,堆積土砂が上流・下流の2か所に 局所的に多く堆積している.

図-7,8に図-6の3600秒後の図に示すB-B'およびC-C'の



 図-9 B-B'における断面図(sim00は図-6の計算結果, sim01は微細土砂含有率のみ変更, sim02は飽和条 件のみを変更)



図-11,12 計算開始3600秒後の侵食深(E)および堆積深(D) の空間分布(図-11:sim01,図-12:sim02)

線分の災害前後の標高および計算による地形の断面図を 示す.図-7においては、河道における右岸から左岸にお ける堆積勾配は、測量成果および計算結果ともに4°程 度である.図-8において、災害後の測量成果における 100 mから200 mまで区間の水平部分は湛水面であると思 われる.天然ダムの比高について、上流が高く下流へ低 くなっている傾向について計算できているが、その勾配 は測量成果では4°であるが、計算結果では2°程度に なっている.

#### (3) 天然ダム形成における微細土砂と水分状態の影響

天然ダムの形成過程には、崩壊土砂量や河道形状のほかに、崩壊土砂の粒度分布や水分状態が影響を与える.水分状態の影響は、土石流の平衡勾配に現れ、浸透流水深をhsとすると、次式で表される.

$$\tan \theta_{\rm e} = \frac{(\sigma/\rho - h_{\rm s}/D)c_{\rm c}}{(\sigma/\rho - h_{\rm s}/D)c_{\rm c} + h_{\rm s}/D} \tan \phi \qquad (22)$$

微細土砂含有率と水分状態が天然ダムの形状へ及ぼす影響を検討するために、前述の計算条件(sim00)のうち、微細土砂含有率のみを $p_f = 0.2$ とした場合(sim01)と、式(22)において、 $h_s = D_{1s}/2$ すなわち、崩壊深の半分が



 図-10 C-C における断面図 (sim00は図-6の計算結果, sim01は微細土砂含有率のみ変更, sim02は飽和条 件のみを変更)

水で飽和している条件(sim02)について検討している. 図-9,10は図-6に示すB-B'およびC-C'の断面図である. 微細土砂含有率を $p_f = 0.2$ としたケース(sim01)につい て見ると、図-9においては、崩壊発生斜面の右岸側に4 m程度多く堆積し、堆砂勾配は8<sup>°</sup>程度になっており、 図-10においては、上流側に2 m多く堆積するようになっ た反面、下流側で2 m程度堆積が減っており、堆砂勾配 は、4<sup>°</sup>程度になっている。崩壊土砂の半分を飽和とし たケース(sim02)では、図-9,10ともに変化は少ないが、 sim01と同様の傾向を示している。

図-11,12は3600秒後の侵食・堆積深の空間分布である。 微細土砂含有率のみ $p_f = 0.2$ としたケース(sim01)では, 右岸斜面下部における堆積深の増加が確認できる。崩壊 土砂の半分を飽和としたケース(sim02)については, 堆積の増加は見られるものの,天然ダム周囲での明瞭な 違いは見られなかった。

## 5. 天然ダムの決壊に伴う洪水ハイドログラフ

形成された天然ダムについて、その決壊過程を検討す るために、天然ダムに一定流量を与え、天然ダムの下流 地点における流量変化を調べた.与えた流量は、200、 100、50、20 m<sup>3</sup>/sであって、天然ダム上流300 m地点(図-6 の3600秒後の図に示している矢印の地点)から供給して いる.流量200 m<sup>3</sup>/sは、合理式によると、時間雨量30 mm程度に相当している.なお地形条件は、前章の図-6 の3600秒後の地形としている.

図-13は、流量を200 m<sup>3</sup>/s与えたときの天然ダムの侵食 過程である.天然ダムはまず天端から侵食していき、元 地形の最大侵食深まで到達すると、侵食域が下流に移動 していくことがわかる.

図-14は、天然ダム下流地点における越流流量の流入 流量に対する比である。計算開始から立ち上がりまでの 時間は、供給された水が天然ダムに滞留され越流を開始 するまでの時間であり、与えた流量200,100,50,20 m<sup>3</sup>/sに ついて、それぞれが要した時間は、500,600,900,1600秒 である。天然ダム下流の越流流量は、越流開始から増加



図-13 300秒から3540秒まで180秒ごとの天然ダム地形と 水面.時間の経過に色の変化が対応している.(地 形:黒から茶色へ変化,最大水面:青)破線は天然 ダムが形成される前の地形



図-14 天然ダム下流における流量の比

して流入流量を超えるピーク流量に達し、その後減少し て流入流量に等しくなる. ピーク流量は、それぞれ、 270, 150, 100, 50 m<sup>3</sup>/s程度である. 越流開始からピーク流 量までの越流流量の増加は、供給している流量に伴い大 きくなっている. 流入流量に対する越流流量の比は、そ れぞれ1.3, 1.5, 1.9, 2.3となっており、流量が少ないほうが 大きい.

## 5. おわりに

本研究では、2017年7月九州北部豪雨によって日田市 小野地区に出現した天然ダムについて、土石流の支配方 程式を適用して、天然ダムの形成および決壊過程につい て検討した.本研究により得られた結果は、次のようで ある.

・天然ダムの形成について、土石流のシミュレーション モデルを適用した結果、その形成過程をある程度表現で き、解析法の妥当性が示された.

・微細土砂の天然ダムの形成過程における役割について 検討し、微細土砂含有率が小さいと堆積勾配が大きくな ることなどが示され、その重要性が示された.

・崩壊土砂の水分状態が天然ダムの形成過程に及ぼす影

響は、土石流の流下距離が短いため、少ないことが示さ れた.

・本研究により提案している手法により,天然ダムの形成,およびそれに引き続く洪水による決壊に伴う洪水ハイドログラフが計算可能であることが示された.これは,河川整備・管理に有用な情報である.

## 参考文献

- 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, pp.601-615, 1988.
- 原田紹臣,小杉賢一朗,里深好文,水山高久:地形や地質の 違いが天然ダムの堆積形状に与える影響,土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.71, No.4, I\_1267-I\_1272, 2015.
- 3) 宮本邦明:土塊の運動の2次元数値シミュレーション,砂防 学会誌, Vol.55, No.2, pp.5-13, 2002.
- 4) 佐光洋一,森 俊勇,中村浩之,遊佐直樹,大野亮一,福田 睦寿,寺田秀樹:深層崩壊に伴い形成される天然ダム形状の 予測について,砂防学会誌,Vol.68,No.1, pp.44-51, 2015.
- 5) 久保 毅,岩田幸泰,城ヶ崎正人,渡邊 剛,田端泰三,内 田太郎,里深好文:1911稗田山崩れによる河道閉塞形成過程 の再現計算,砂防学会誌,Vol.69,No.5, pp.35-42, 2017.
- 6) 西口幸希,内田太郎,石塚忠範,里深好文,中谷加奈:細粒 土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値 シミュレーション,砂防学会誌,Vol.64,No.3, pp.11-20, 2011.
- 7) 江頭進治,宮本邦明,竹林洋史:崩壊に伴う土石流・泥流の 形成と規模の決定機構,砂防学会誌, Vol.68, No.5, pp.38-42, 2016.
- 紅頭進治,芦田和男,矢島 啓,高濱淳一郎:土石流の構成 則に関する研究,京都大学防災研究所年報,第32号,B-2, pp.487-501,1989.
- 9) 江頭進治:土石流の停止・堆積のメカニズム(1),砂防学 会誌, Vol.46, No.1, pp.45-49, 1993.
- 10) 芦田和男,江頭進治,大槻英樹:山腹崩壊土の流動機構に 関する研究,京都大学防災研究所年報,第26号,B-2, pp.315-327,1983.
- 11) 山崎祐介,江頭進治:豪雨に伴う土砂・流木の生産と流下 過程に関する研究,河川技術論文集,第24巻, pp, 2018.
- 12) Julien P. Y., Paris A.: Mean velocity of mudflows and debris flows, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 136, No. 9, pp.676-679, 2010.
- 13) 平成29年九州北部豪雨災害先遣調査報告4\_日田小野地区(大 規 模 土 砂 崩 壊 と 天 然 ダ ム ) http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/平成29年九州北部 豪雨災害先遣調査報告4\_日田小野地区%28大規模土砂崩壊と 天然ダム%EF%BC%89.pdf

(2019.4.2受付)