

技術ノート

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

An estimation of the shape of landslide dam caused by deep-seated landslide

佐 光 洋 一*1

Youichi SAKO

大 野 亮 一*2

Ryoichi OHNO

森 俊 勇*1

Toshio MORI

福 田 睦 寿*2

Mutsutoshi FUKUDA

中 村 浩 之*1

Hiroyuki NAKAMURA

寺 田 秀 樹*2

Hideki TERADA

遊 佐 直 樹*2

Naoki YUSA

1. はじめに

深層崩壊は発生頻度の低い現象だが、その規模の大きさと社会に与える影響は甚大であり、発生に備えた準備・対策は災害防止の観点から重要である。国土交通省(2012)は、これまでに各地で深層崩壊危険度調査を実施し、深層崩壊発生の恐れの高い単元流域の特定を行い、随時公表してきている。今後は、崩壊発生による災害のみならず、崩壊により形成される天然ダムの決壊等、二次災害の防止に備えた対策の検討が必要となるものと考えられる。そのためには、想定する深層崩壊による移動土砂量と移動形態について事前に予測し、予測結果に基づく対策計画を立案することが重要になってくる。

深層崩壊に伴う天然ダムの堆積形状推定は、一般的に河川縦断方向に堆積長さや上下流の勾配を想定、崩壊幅等を考慮し、発生土砂量見合いでダム高さを設定する。しかしながら、実際には崩土が河道へ流入する角度や河道幅、河道およびその周辺の地形形状など、種々の要素により形成される天然ダムの形状は変化する。崩壊形状や河道部の地形等を考慮して、ダム堆積形状を予測するためには、数値解析ツールの活用が必要となってくる。近年、土砂移動現象の予測に数値解析ツールが多様に使われ始めているが、2012年に紀伊半島で発生したような深層崩壊により天然ダムを形成する場合を想定した一般的な推定手法は示されていない。

深層崩壊のように斜面がそのまま移動土塊となり流下する現象を対象に数値解析を行うツールの1つに、土木研究所(吉松ら, 1992)が開発した崩壊土砂運動シミュレーションプログラムであるLSFLOWがある。LSFLOWは、地すべりの拡散範囲の推定を目的に開発されたが、後述するように、計算を行う際、地すべり土塊の運動は非圧縮性流体として扱うとともに地すべり土塊を構成する土粒子を、各々内部摩擦角を持つ微粒子より構成された流体と考えている。こうしたことから、このプログラムは運動速度が比較的速く、流体状で崩壊していると思われる地すべり、例えば大規模崩壊や流動化した地すべりなどについて良く運動を再現できるとされている(郎

・中村, 1998)。そこで、著者らは、LSFLOWは深層崩壊の流下・堆積過程にも適用可能と考えた。

本稿では、深層崩壊が発生し、天然ダムが形成されるような現象を推定する手法としてLSFLOWが適用可能であるか確認した上で、新規の深層崩壊現象をLSFLOWにより想定する場合の考え方を整理した。

LSFLOWに関する従来の適用は、崩土が平坦地形に氾濫堆積する現象が中心で、河道を閉塞する天然ダムへの適用事例はない。そこで、深層崩壊による天然ダム形成に対するLSFLOWの再現性・適用性を検証するため、平成23年台風12号による紀伊半島の天然ダム等を事例として取り上げ、その再現性を検証した。さらに、深層崩壊に対する対応訓練を含めた事前対策検討に資するため、崩壊予測の観点からLSFLOWを適用した場合の方法、結果とその課題について検証した。

なお、LSFLOWは、すべり面やすべり範囲は既知(入力)条件として与える必要があり、本稿では深層崩壊の発生箇所や規模を推定することは目的としていない。

2. 手法

天然ダムの堆積形状予測に使う計算手法(LSFLOW)は、Nakamura et al.(1989)により開発され、土木研究所(吉松ら, 1992)によりプログラムリストが公開された。その後、郎・中村(1998)、安田ら(1998)により改良が加えられている。地すべり性崩壊や大規模崩壊等により斜面上の土砂が移動を開始し、流下、堆積にいたる一連の過程を、土砂を流体とみなしてシミュレートするコンピュータプログラムである。なお、土砂・水を一体とした流体解析であり、土砂濃度は計算対象に含まれない。

2.1 基礎方程式

Nakamura et al.(1989)では、LSFLOWは流体の運動方程式であるナビエ・ストークス式について、移動層の上面で圧力ゼロの境界条件および鉛直方向の速度変化は水平方向と比べて相対的に小さいため、水平方向への平均流速に置き換えた式(浅水長波式)を離散化し数値的に解く。抵抗則にクーロン則を用い、土塊の動的な内部摩擦角がすべり面の勾配より大きければ流動しないと考

*1 正会員 一般財団法人 砂防フロンティア整備推進機構 Member, Sabo Frontier Foundation (e-mail: kikaku@sff.or.jp)

*2 正会員 国土防災技術株式会社 Member, Japan Conservation Engineers & Co., Ltd.

え、基礎方程式は運動方程式(1)、(2)と連続式(3)で表される。移動土塊を非圧縮性粘性流体と仮定し、簡略化のため運動量補正係数を1としている。

(運動方程式)

$$\rho \frac{\partial M}{\partial t} + \rho \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -\rho gh \frac{\partial H}{\partial x} + \rho hg_x + \mu \nabla^2 M - (c + \rho gh \tan \phi_s) \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} + \rho gh \tan \phi_m \quad \cdots(1)$$

$$\rho \frac{\partial N}{\partial t} + \rho \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -\rho gh \frac{\partial H}{\partial y} + \rho hg_y + \mu \nabla^2 N - (c + \rho gh \tan \phi_s) \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} + \rho gh \tan \phi_m \quad \cdots(2)$$

(連続式)

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \frac{\partial M}{\partial x} + \rho \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \cdots(3)$$

ここで、 ρ ：移動層密度 (kg/m^3)、 h ：移動層の厚さ (m)、 $M = hu$ 、 $N = hv$ ：それぞれ x 、 y 方向の流量フラックス (m^2/s)、 u 、 v 、 w ：それぞれ x 、 y 、 z 方向の流速 (m/s)、 $w = -(u \tan dz/dx + v \tan dz/dy)$ 、 $H = h + z$ ：移動層の標高 (m)、 z ：地盤標高 (m)、 g ：重力加速度 (m/s^2)、 μ ：移動土塊の粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)、 t ：時間 (s)、 g_x 、 g_y ：それぞれ x 、 y 方向の地震外力加速度 (m/s^2)、 c ：すべり面の粘着力 (N/m^2)、 $\tan \phi_s$ ：すべり面の動摩擦係数 (-)、 $\tan \phi_m$ ：土塊の動摩擦係数 (-) を表す。

2.2 計算の準備とながれ

LSFLOW は、方程式の離散化に有限差分法を採用し、地形データは直交格子 (グリッド) で与える。地形グリッドは、地表面グリッドとすべり面グリッドの2種類があり、すべり面グリッドも地表面グリッドと同一範囲、すべり範囲以外には地表面と同じ標高を与える。

解析に用いる計算定数 (パラメータ) は、(1)~(4)式に現れる ρ 、 μ 、 c 、 $\tan \phi_s$ 、 $\tan \phi_m$ の5つである。2種の地形グリッドと計算定数を準備すると、計算可能となる。

2.3 既往の研究とその課題

(1)~(3)式には未知数以外に ρ 、 μ 、 c 、 $\tan \phi_s$ 、 $\tan \phi_m$ の5つの計算定数 (パラメータ) が含まれる。郎・中村 (1998) は、これらの中で、すべり面の動摩擦係数 $\tan \phi_s$ と移動土塊の動摩擦係数 $\tan \phi_m$ が最も重要としている。郎・中村は、地すべり性崩壊20事例を収集し、LSFLOWを用いて再現計算を行った。そして、再現検証により同定された $\tan \phi_s$ 、 $\tan \phi_m$ について詳細な検討を行った。表-1に、20事例の解析条件を抜粋し土砂量と共に示す。

$\tan \phi_s$ 、 $\tan \phi_m$ は動的な摩擦係数であり、 $\tan \phi_c$ は斜面安定問題で扱う静的な摩擦係数となる。郎・中村は20事例について臨界すべり面解析を実施し、すべり面の静的摩擦係数 $\tan \phi_c$ を求め、これをLSFLOWで同定された動摩擦係数 $\tan \phi_s$ 、 $\tan \phi_m$ と比べ、両者の間に

表-1 既往20事例の解析条件

Table 1 The analytical parameter of previous 20 failures

No.	地すべり	所在地	発生日付	誘因	$\tan \phi_s$	$\tan \phi_m$	$\tan \phi_c$	B	土砂量 (m ³)
1	婦雲山	岐阜県	1586.01.18	地震	0.132	0.222	0.613	0.353	1.3 E+07
2	葛老山	栃木県	1683.10.20	地震	0.087	0.176	0.521	0.264	2.1 E+07
3	名立	新潟県	1751.05.21	地震	0.009	0.268	0.344	0.277	9.0 E+06
4	Frank	カナダ	1903.04.29	不明	0.012	0.466	0.839	0.479	3.7 E+07
5	つえ谷	高知県	1946.12.21	地震	0.044	0.268	0.543	0.312	1.4 E+07
6	金剛寺	和歌山県	1952.08.18	降雨	0.044	0.268	0.488	0.312	3.3 E+06
7	Madison	アメリカ	1959.08.17	地震	0.123	0.176	0.445	0.299	3.8 E+07
8	中木	静岡県	1974.05.09	地震	0.141	0.176	0.613	0.317	4.0 E+04
9	一宮	兵庫県	1976.03.13	降雨	0.087	0.176	0.374	0.264	6.0 E+05
10	寿山	宮城県	1978.06.12	地震	0.070	0.158	0.404	0.228	8.0 E+04
11	濁沢	新潟県	1980.12.30	降雨	0.105	0.141	0.268	0.246	9.0 E+05
12	酒勒山	中国	1983.03.07	降雨	0.141	0.176	0.613	0.317	3.1 E+07
13	松越	長野県	1984.09.14	地震	0.044	0.176	0.543	0.220	1.7 E+05
14	地附山	長野県	1985.07.26	降雨	0.105	0.194	0.466	0.299	3.6 E+06
15	焦家	中国	1989.03.15	地下水	0.141	0.249	0.625	0.390	2.0 E+05
16	上灘	中国	1992.03.21	地下水	0.141	0.213	0.625	0.353	1.0 E+05
17	促谷	滋賀県	1992.08.20	降雨	0.158	0.213	0.675	0.371	1.0 E+05
18	仁川	兵庫県	1995.01.17	地震	0.044	0.176	0.325	0.220	1.2 E+05
19	宝塚	兵庫県	1995.01.17	地震	0.070	0.087	0.213	0.157	2.5 E+04
20	党家盆	中国	1920.12.16	地震	0.141	0.194	0.601	0.335	-

$\tan \phi_s$ ：すべり面の動摩擦係数 $\tan \phi_c$ ：すべり面の静的摩擦係数
 $\tan \phi_m$ ：崩土の動摩擦係数 B = $\tan \phi_s + \tan \phi_m$ ：見かけの摩擦係数

式(4)の関係を見出した。

$$\tan \phi_s + \tan \phi_m = 0.41 \tan \phi_c + 0.10 \pm \tan 4^\circ \quad \cdots(4)$$

ここで、末尾の $\pm \tan 4^\circ$ は予測幅のぶれ ($-\tan 4^\circ \sim +\tan 4^\circ$) を表す。(4)式は、LSFLOWの動摩擦係数 $\tan \phi_s$ 、 $\tan \phi_m$ をすべり面の静的摩擦係数 $\tan \phi_c$ につなげる重要な式である。一般に、土砂の動摩擦係数の値はあまり知られておらず、(4)式で動摩擦係数をすべり面の静的摩擦係数に換算して評価できれば、パラメータ設定時の根拠を得ることができる。

一方、郎・中村の対象事例は氾濫域が開けた平坦地形が多く、天然ダムが形成される事例はない。そのため、2012年の紀伊半島の事例のように山地で対岸に斜面があり、崩壊時に天然ダムが形成される場合に(4)式が適用可能か、確認する必要がある。

3. 事例検証：天然ダムの形状予測

3つの事例を用いて、深層崩壊に伴う天然ダム形状予測に関するLSFLOWの適用性を検証する。

取り上げた事例は、平成23年9月の紀伊半島での台風12号災害において発生した赤谷地区、熊野 (いや) 地区および平成20年岩手・宮城内陸地震に伴い発生した迫川上流に位置する湯浜地区の3箇所である。

3.1 3事例のすべり面とすべり範囲の設定

LSFLOWは、土砂の流下および堆積過程を計算する手法であり、すべり面とすべり範囲は、既知の入力条件として与える必要がある。

3つの崩壊事例はそれぞれ崩壊前・後の地形データが作成されており、また、現地調査結果を踏まえたすべり形状が推定されている。これら調査結果に基づくすべり面位置およびすべり範囲を基に、地表面グリッド、すべり面グリッドを作成しLSFLOWに地形条件として与え

た。赤谷地区は崩壊前・後ともにレーザープロファイラー (LP) による地形データ、熊野と湯浜地区は、崩壊後は LP 計測に基づく地形、崩壊前は 10 mDEM (国土地理院発行) に基づく地形である。

3.2 検証の方法

検証は以下の手順で行った。

- ①動的摩擦係数 $\tan \phi_s$ と $\tan \phi_m$ 以外のパラメータについて、土木研究所 (吉松ら, 1992) を参考に一定値を設定する ($\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $c = 0.01 \text{ kN/m}^2$)。
- ②崩壊事例 3 箇所の斜面安定解析を実施し、2 次元断面簡便法により粘着力 c をゼロとして、逆算で静的摩擦係数 $\tan \phi_c$ を得る。
- ③式(4)より $\tan \phi_c$ から $\tan \phi_s + \tan \phi_m$ の値を求める。その上で、3.3 に示す $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ 値が取り得る設定範囲の中で、 $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ それぞれの値を変化させ複数ケースを設定する。
- ④設定ケースについて、LSFLOW 解析を土塊の移動が収まるまで実施、計算結果を整理する。
- ⑤LP データによる崩壊後地形より、実際の堆積形状、土砂到達範囲と計算結果を比較し、最も再現性の高いケースを最適ケースとする。

3.3 $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ の制限条件

$\tan \phi_s + \tan \phi_m$ の合計値が得られても $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ 個別値の組み合わせは無数存在する。既往解析事例から、 $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ 個別値の取り得る範囲を絞り込むこととする。

表-1 に示す 20 事例の内、Frank は誘因が不明であること、土木研究所 (吉松ら, 1992) によると名立、つえ谷は斜面末端が侵食されて発生した可能性があることから、3 事例を除く 17 事例を対象を絞った。

図-1 は横軸 $\tan \phi_s$ 、縦軸 $\tan \phi_m$ とした 17 事例の散布図である。図中の斜線は $\tan \phi_s = \tan \phi_m$ ラインですべてのプロットはこのラインよりも上に位置する。これはすべり面の動的摩擦係数 $\tan \phi_s$ は移動土塊の動的摩擦係数 $\tan \phi_m$ より常に小さいことを示す。これは、一般にすべり面は土塊中の弱線を通ることと整合する結果であり、 $\tan \phi_s \leq \tan \phi_m$ を範囲条件の 1 つとする。また、図

-1 において $\tan \phi_s$ の最小値は、金剛寺、松越、仁川の 3 事例で $\tan \phi_s = 0.044$ ($\phi_s = 2.5^\circ$) となった。このことから、LSFLOW の動摩擦係数 $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ 値の範囲条件として、以下の(5), (6)式を制限条件として個別値を設定することとした。

$$\tan \phi_s \leq \tan \phi_m \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\tan \phi_s \geq 0.044 (\phi_s \geq 2.5^\circ) \quad \dots\dots\dots(6)$$

3.4 検証の結果

各事例において、(4), (5), (6)式に基づき 16~22 ケースの $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ 個別値組み合わせを設定した。計算結果より、崩壊縦断面、河道縦断面での堆砂形状を LP 計測による実測地形 (紀伊半島は平成 23 年 9 月、岩手県宮城県は平成 20 年 6 月計測) と比較し、最適ケースを 1 つ決定している。

図-2~図-4 および図-6~図-8 は、LP 地形と計算の最適ケースを比較した地形変化量の図である。コンター図と断面図の 2 種類を作成した。また、断面図は崩壊地の主測線である“崩壊縦断面”と崩壊地直下の元河床の中心を通る河道沿い (主測線に概ね直交する) “河道縦断面”の 2 種がある。

図-2 および図-6 は赤谷地区の結果である。赤谷地区では、崩壊縦断面図、河道縦断面図、地形変化量の比較とも LP 計測による崩壊後の地形等と計算結果はよく一致している (ただし、河道縦断面の上流側の崩壊後地形には、湛水面が計測されているため確認できない)。

赤谷地区は直下の河道が V 字形状をしており、地形による制約が強いことから、地形効果を考慮できる計算の強みが発揮された事例と考える。最適ケースにおける $\tan \phi_s + \tan \phi_m$ の値は、安定解析より求めた $\phi_c = 34^\circ$ 、(5)式の末尾項を $+\tan 4^\circ$ とした場合であった。動摩擦係数の個別値は $\tan \phi_s = 0.0875$ ($\phi_s = 5.0^\circ$), $\tan \phi_m = 0.3513$ ($\phi_m = 19.4^\circ$) である。

図-3 および図-7 は熊野地区の結果である。熊野地区では、崩壊縦断面における崩土の堆積範囲は比較的よい一致をみるが、地形変化量の比較および河道縦断面図では、計算による堆積範囲が LP 計測による結果に比べ狭い。摩擦係数を小さくすれば、より広い範囲に土砂が到達する結果が得られるが、崩壊縦断面が不整合となる。ここでは、天然ダムの越流・決壊解析への活用を想定し、崩壊縦断面 (天然ダム本体) での適合を優先して、最適ケースとした。

最適ケースにおける $\tan \phi_s + \tan \phi_m$ の値は、安定解析より求めた $\phi_c = 25^\circ$ 、(4)式の末尾項は上限 $+\tan 4^\circ$ のときとなり、個別値は $\tan \phi_s = 0.1405$ ($\phi_s = 8.0^\circ$), $\tan \phi_m = 0.2134$ ($\phi_m = 12.1^\circ$) であった。

図-4 および図-8 は湯浜地区の結果である。湯浜地区においても、LP 計測による結果と計算結果の氾濫堆積範囲はよく一致している (ただし、河道縦断面の上流側

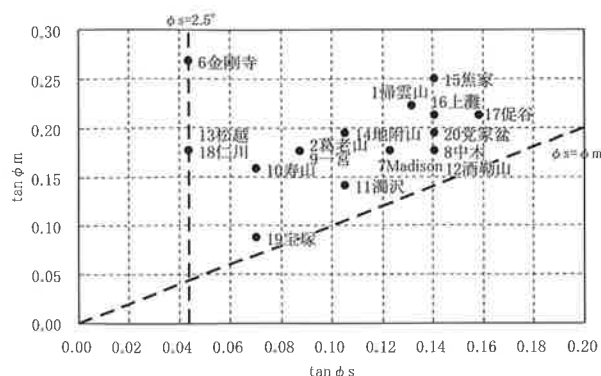


図-1 17 事例による $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ 個別値の散布図
Fig. 1 Scattered plot of 17 failures, $\tan \phi_s$ versus $\tan \phi_m$

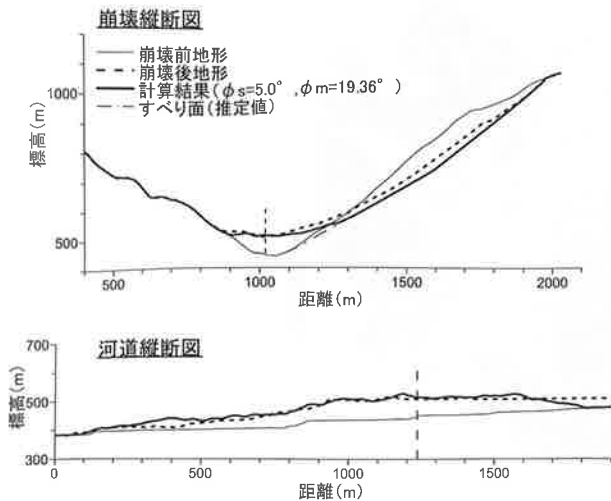


図-2 縦断面図の比較 (赤谷地区)

Fig.2 Comparison of the profile (Akadani district)

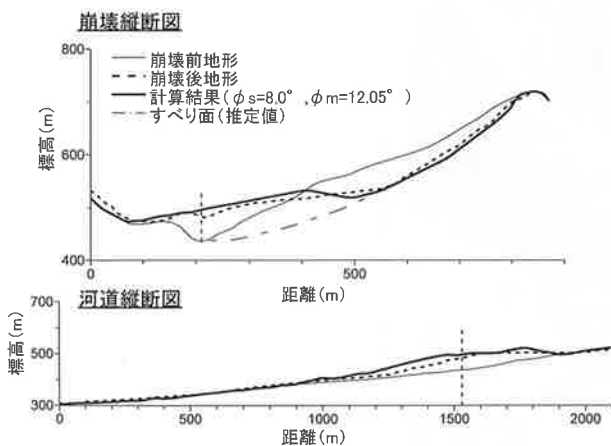


図-3 縦断面図の比較 (熊野地区)

Fig.3 Comparison of the profile (Iya district)

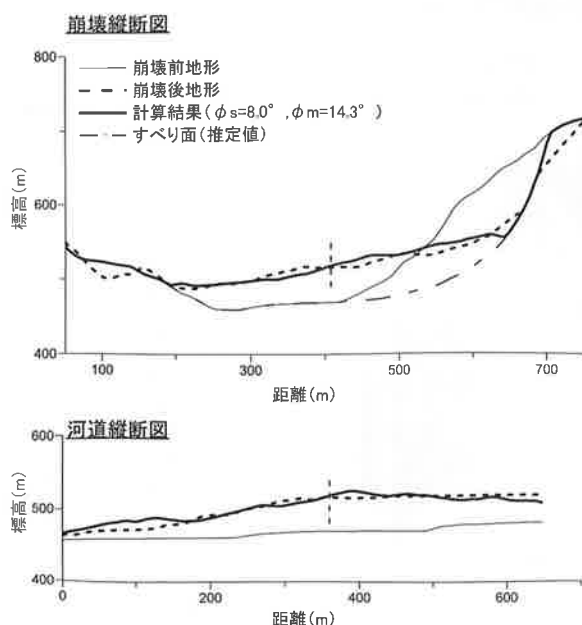


図-4 縦断面図の比較 (湯浜地区)

Fig.4 Comparison of the profile (Yubama district)

の崩壊後地形には、湛水面が計測されているため確認できない。最適ケースにおける $\tan \phi_s + \tan \phi_m$ の値は、安定解析より求めた $\phi_c = 36.5^\circ$ 、(4)式の末尾項は $+\tan 0^\circ$ のときとなり、個別値は $\tan \phi_s = 0.1405$ ($\phi_s = 8.0^\circ$)、 $\tan \phi_m = 0.2550$ ($\phi_m = 14.3^\circ$) であった。

図-5 は、郎・中村 (1998) により提案されたすべり面の静的摩擦係数 $\tan \phi_c$ と動的摩擦係数 ($\tan \phi_s + \tan \phi_m$) の関係図に、3 地区の摩擦係数をプロットしたものである。事例の中には、河道流出後の氾濫範囲の再現で精度を欠くケースもあったが、これについても、パラメータ設定をより詳細とし、種々の計算ケースを準備することで精度の向上が可能である。可能性のある災害事象すべてを網羅することは難しいが、LSFLOW に(4)、(5)、(6)式という簡単な条件式を与えることで、今回示した精度での天然ダム堆積形状を再現できる。

4. 天然ダム形状の予測について

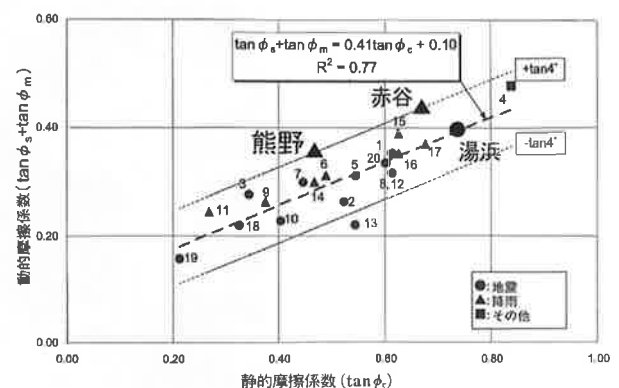
つぎに、LSFLOW を用いて、深層崩壊に伴う天然ダム堆砂形状の事前予測を行い、その適用方法と結果、事前予測における課題について検討する。

4.1 $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ 個別値の設定

3 章で見たように LSFLOW 解析においては、動的摩擦係数 $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ 値の設定が重要である。静的な斜面安定解析で得られる静的摩擦係数 $\tan \phi_c$ を基に、(4)式から $\tan \phi_s + \tan \phi_m$ の合計値を求めた後、 $\tan \phi_s$ と $\tan \phi_m$ の個別値をなんらかの方法で決定する必要がある。

図-9 は、赤谷地区で $\tan \phi_s + \tan \phi_m$ 値を一定とし、 $\tan \phi_s$, $\tan \phi_m$ の個別値を変えて計算したときの、崩壊縦断面である。図-9 を平面で表現したのが図-10 である。図-9 右下の囲い部は河道部を拡大したもので、 ϕ_s 小→大に伴い、堆積河床高さ小→大の関係が、図-10 では、面的範囲 (到達範囲) 大→小が見てとれる。

図-11 は堆積後の崩壊縦断面上での最低標高と ϕ_s の関係である。最低標高は斜面直下の河道横断面における最低標高で、実質的な越流点もしくは流水通過点である



(郎・中村 (1998) に加筆)

図-5 静的摩擦係数と動的摩擦係数の関係

Fig.5 Relationship between coefficient of dynamic friction and coefficient of static friction

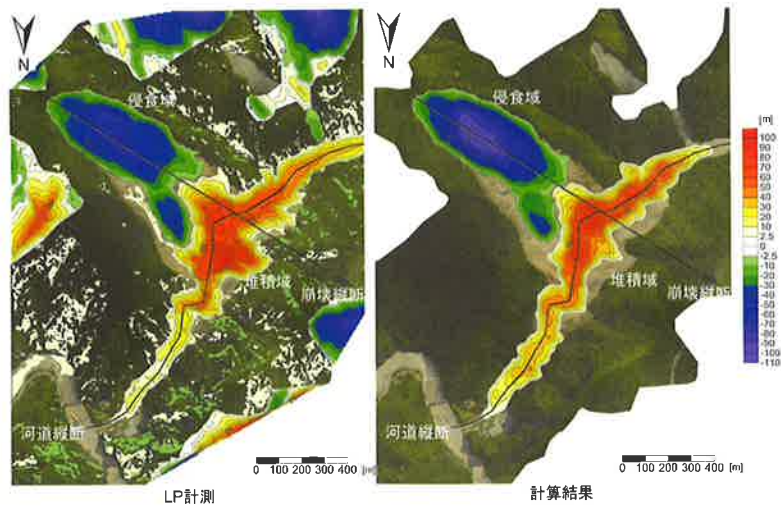


図-6 地形変化量の比較 (赤谷地区)

Fig. 6 Difference of surface elevation before and after the failure (Akadani district)

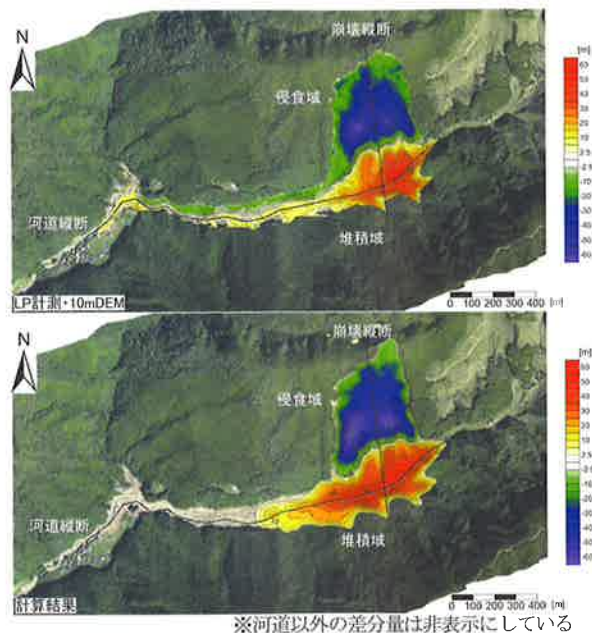


図-7 地形変化量の比較 (熊野地区)

Fig. 7 Difference of surface elevation before and after the failure (Iya district)

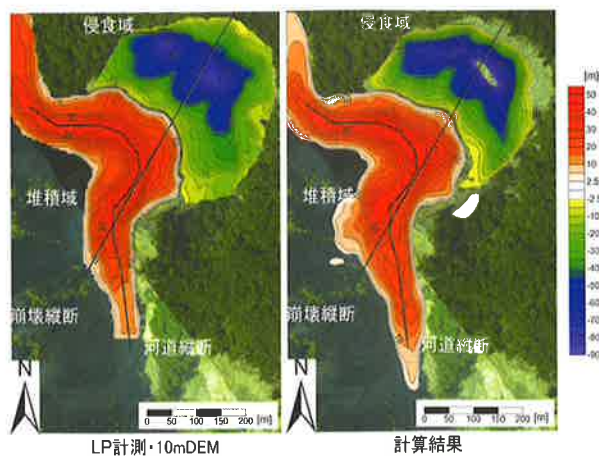


図-8 地形変化量の比較 (湯浜地区)

Fig. 8 Difference of surface elevation before and after the failure (Yubama district)

ことから“越流標高”と呼ぶことにする。ここでも ϕ_s 小→大に伴い、越流標高小→大の傾向が見られ、越流標高（天然ダム高）が最大となるのは $\phi_s \leq \phi_m$ 制限より、 ϕ_s 上限である $\phi_s = \phi_m = 12.4^\circ$ のとき（赤谷の場合）となる。

図-12 は、流れ下った崩土が河道に沿って移動した水平距離を、崩壊縦断面と元河道との交点を起点に測定し、“到達距離”として比較したものである。 ϕ_s 小→大に伴い、到達距離大→小の傾向が見られ、到達距離が最大となるのは、(6)式より ϕ_s 最小値である 2.5° のときとなる。

図-9～図-12 より、すべり面の動的摩擦係数 ϕ_s が大きいと底面でのせん断抵抗力が大きくなり、崩土が流れにくくなる傾向が確認された。つまり、 ϕ_s を大きくすると崩土の流動性が低く、形成される天然ダムは急峻

で高く、到達距離が短くなる。また、このとき ϕ_s の上限値は、(5)式 $\tan \phi_s \leq \tan \phi_m$ より、 $\phi_s = \phi_m$ となる。

4.2 崩土の流動性と動的摩擦係数の設定

4.1 での特徴を踏まえ、崩土の流動性について、次の2通りの考え方を整理した。

4.2.1 崩土の流動性を低くする設定

深層崩壊による二次的な氾濫堆積範囲を予測する場合、一般には形成される天然ダム高が高いほど上流側の湛水範囲や決壊時の氾濫規模が大きいと考えられる。4.1 で述べたように、天然ダムの形成高さは、 ϕ_s が大きいほど高く、その上限は(5)式 $\tan \phi_s \leq \tan \phi_m$ の制限により $\phi_s = \phi_m$ の時である。したがって、動的摩擦係数の設定において、 $\tan \phi_s + \tan \phi_m$ 値に(4)式の上限 $+\tan 4^\circ$ を用い、最大 ϕ_s となる $\phi_s = \phi_m$ とすることで、天然ダム形状の予測計算において最も流動性の低い場合を想定することができる。

4.2.2 崩土の流動性を高くする設定

保全対象が付近に存在するなど、移動土塊の流動性を高めて、崩土の氾濫範囲が広がる場合を想定するときは ϕ_s を小さくする。 ϕ_s の最小値がどの程度であるかは、今のところ明確ではないが、ここでは、(6)式のとおおり、これまでの LSFLOW を用いた再現実績での最小値である $\phi_s = 2.5^\circ$ を目安と考えることにした。今後最小値の設定の考え方については、再現実績を増やすことを含め、さらに検討を進めたい。また、このとき(4)式の末尾項に下限 $-\tan 4^\circ$ を用いると、もう1つの動的摩擦係数 ϕ_m を小さな値に設定され、より流動性を高めることができる。

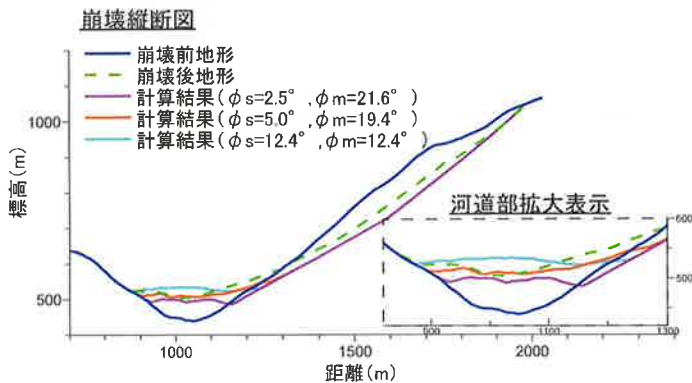


図-9 ϕ_s 設定による堆砂縦断面の比較（赤谷地区）

Fig.9 Sediment profile of different ϕ_s cases

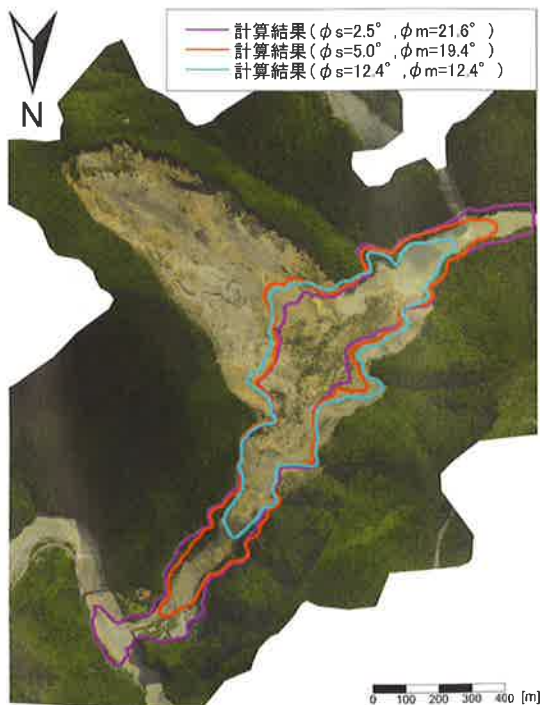


図-10 ϕ_s 設定による面的な堆積範囲の変化

Fig.10 Planar sediment range of different ϕ_s cases

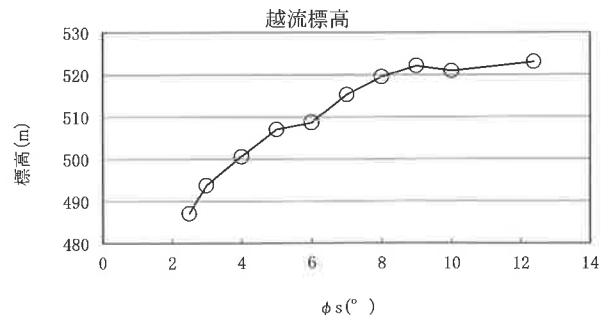


図-11 ϕ_s 設定による越流標高の変化（赤谷地区）

Fig.11 Diagram of dynamic friction ϕ_s versus minimal elevation

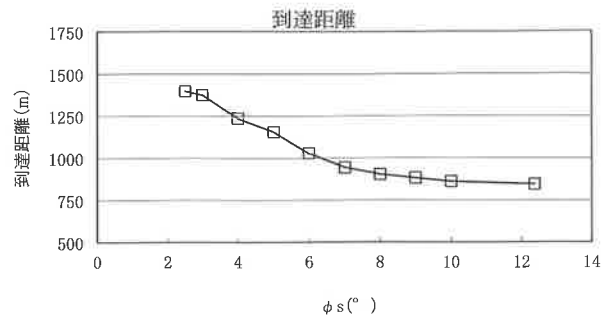


図-12 ϕ_s 設定による到達距離の変化（赤谷地区）

Fig.12 Diagram of dynamic friction ϕ_s versus traveled distance

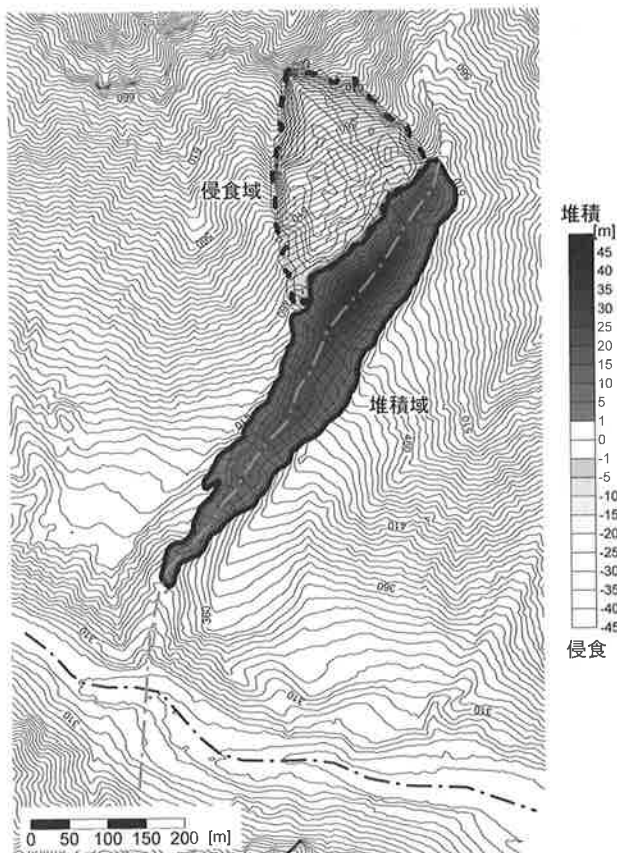


図-13 堆砂量分布図（流動性が低い場合）
Fig. 13 Contour map of sediment (with low fluidity)

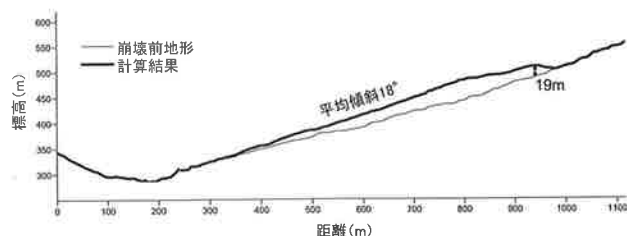


図-14 縦断面図（流動性が低い場合）
Fig. 14 Sediment Profile (with low fluidity)

4.2.3 事前予測における流動性の設定

LSFLOW を用いて事前予測解析を行う場合、崩土の流動性を調整して現象の両極端ケースを調べ、被害範囲や規模の予測、対策計画策定への活用を考える。

- 流動性が低い場合：当該個所で考えられる最大規模の天然ダムを想定することになり、その後考えられる越流決壊現象による二次災害の被災区域を想定する。
- 流動性が高い場合：深層崩壊が発生した場合に直接的な被害を受ける可能性のある区域の最大範囲を示し、流下土砂対応や警戒避難体制の構築を想定する。

4.2.4 考察および課題

事前予測検証として未崩壊箇所に応用した事例の結果を図-13～図-16に示す。

結果は、崩壊斜面直下の支川に形成された天然ダムより、本川で形成された天然ダムの規模が大きなものとなった。流動性が高い場合、崩土の氾濫堆積範囲が広がり、

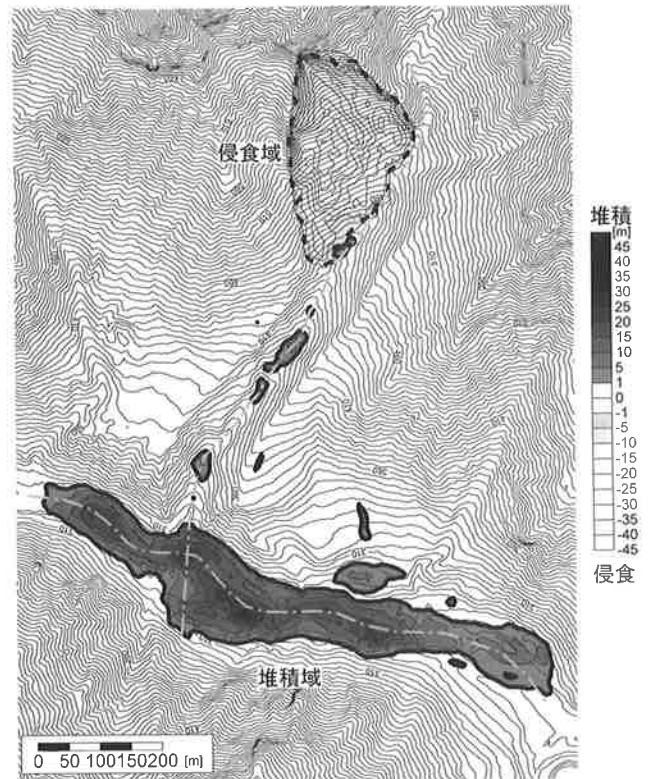


図-15 堆砂量分布図（流動性が高い場合）
Fig. 15 Contour map of sediment (with high fluidity)

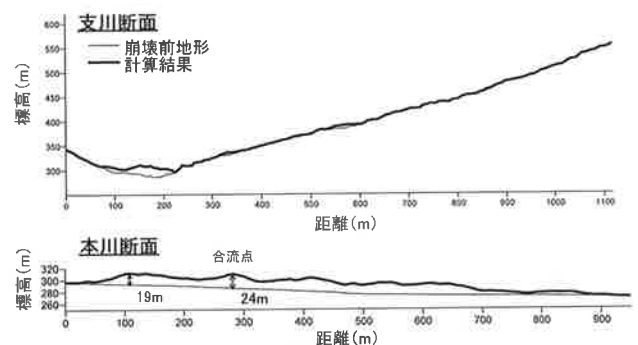


図-16 縦断面図（流動性が高い場合）
Fig. 16 Sediment Profile (with high fluidity)

天然ダムの高さは低くなることを想定していたが、実際の計算では堆砂する場所や地形（特に河床勾配が影響していると考えられる）によっては、必ずしもそうならないことを示す結果となった。この場合、本川で形成される天然ダム高さが最大となるケースについて、さらに複数ケースを実行して絞り込む必要がある。

このように、流動性の両極端のケースを検証することで、深層崩壊により発生する被害形態（深層崩壊土塊の直撃による被害、天然ダム決壊による被害）の事前予測が可能となり、包括的な対策計画や危機管理に対する重要な情報を与えるものと考えられる。

一方、課題としては、今回の結果を見ても、パラメータの調整範囲の中で対象とする流動現象の挙動が大きく変わっており、両極端を調べるだけでは不十分な可能性が指摘される。流動性が中間的なケースであったり、微

小な地形変化が結果を大きく変える可能性も否定できず、最悪ケースを適切に想定するためのアプローチに関しては、いまだ検討の余地が残される。また、冒頭で述べたように、深層崩壊の発生箇所と規模の予測については本稿の対象外としているが、事前予測においてその点が重要であることは論をまたないであろう。

5. おわりに

LSFLOWを用いて、深層崩壊により形成される天然ダムの形状予測計算を行い、以下の知見を得た。

- ・ LSFLOWは、従来適用されてきた平坦地への氾濫解析と同様に、谷地形での堆積現象である天然ダムの再現計算に適用可能である。
- ・ 摩擦係数の設定に関しては、既往事例や計算結果を踏まえると流動性が低い場合は $\tan \phi_s = \tan \phi_m$ 、流動性が高い場合には $\phi_s = 2.5^\circ$ とする方法が適用可能であると考えられる。
- ・ 動的摩擦係数を調整して崩土の流動性を変化させることで、天然ダムの堆積形状が大きく変化する。流動性の低い場合と高い場合の両極端ケースを調べることで、流下挙動の大きく異なる現象が把握でき、発生する被害形態の想定に役立つ可能性があると考えられる。
- ・ 深層崩壊の事前予測に適用する場合、さまざまな天然ダム形状を予測し、事前の被害範囲や規模予測を行うことが可能となり、対策計画の策定や危機管理に活用できると考えられる。

なお、深層崩壊の事前予測においては、崩壊の発生箇所および規模の情報が重要となる。今回は3事例を対象に再現性の確認を行ったが、今後、他の天然ダム事例に

ついて、事前予測の適用性を検証しながら、発生位置や規模予測のアプローチや考え方、本予測法の適用範囲などを整理・検討していきたい。

将来的には、深層崩壊現象にLSFLOWを活用する場合の、より合理的、効率的な方法を模索し、深層崩壊対策に資するツールとしていきたいと考えている。

謝 辞

本稿で用いた事例データは、国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所、東北地方整備局岩手河川国道事務所の皆様に資料提供いただいたものである。ここに記し謝意を申し上げる。

引用文献

- 国土交通省 (2012) : 深層崩壊に関する溪流 (小流域) レベルの調査について, URL : http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo_03_hh_000552.html, 参照 2013-11-01
- Nakamura, H., Tsunaki, R. and Ishihama, S. (1989) : Simulation Model for Debris Movement of Landslides, Proceedings of the Japan-China Symposium on Landslides and Debris Flows, Niigata, p. 81-86
- 安田勇次・本木浩也・伊藤一誠・中村浩之・LANG YU-HUA (1998) : 土石流シミュレーションの開発と解析事例, 砂防学会研究発表会概要集, p. 210-211
- 吉松弘行・近藤観慈・石濱茂・綱木亮介・小嶋伸一・中村浩之 (1992) : 準三次元地すべり運動解析プログラムによる地すべり性崩壊の被害範囲の予測, 土木研究所資料, No. 3057
- 朗煥華・中村浩之 (1998) : 黄土地すべりのすべり面形状の特性と崩土の拡散範囲の予測, 地すべり, Vol. 35, No. 1, p. 9-18

(Received 4 July 2014 ; Accepted 28 January 2015)