# 平成25年伊豆大島豪雨台風26号土砂災害を 対象とした泥流型土石流の流動・堆積域に関する研究 A STUDY ON FLOW AND DEPOSITION AREA OF MUDFLOW TYPE DEBRIS INTENDED FOR LANDSLIDES OF IZUOSHIMA 2013 BY TYPHOON NO.26

松本健作<sup>1</sup>·小澤薫<sup>2</sup>·清水義彦<sup>3</sup>

Kensaku MATSUMOTO, Kaoru OZAWA and Yoshihiko SHIMIZU

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 群馬大学大学院助教 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1) <sup>2</sup>非会員 群馬大学大学院 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1) <sup>3</sup>正会員 博士(工学) 群馬大学大学院教授 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

Mudflows were occurred in Izuoshima Island by typhoon No.26 on 16 October 2013. Izuoshima Island is volcano region formed by the eruption of Mt. Mihara. And the land surface is covered with volcanic ash sediment of 1 meter depth. Because of the volcano ash sediment is fine particle, the layer of ash sediment formed the mud-type debris flow. As a result, the debris flow reached downstream area of Izuoshima with low land gradient. In this study, numerical analysis of the mud-type debris flow in Izuoshima was conducted using the angle of internal friction calculated from laboratory experiment. Results of numerical analysis showed good agreement with the deposition situation in downstream area of Izuoshima.

Key Words : mud flow, angle of internal friction, experiment of Dam breake

# 1. はじめに

平成 25 年 10 月 15 日から 16 日にかけて,伊豆大 島では台風 26 号により 24 時間における降水量が, 824mm という 10 月の月降水量の平均値(329mm)の 2.5 倍に達する豪雨となった<sup>1)</sup>. 16 日未明には 100mm/h を超える猛烈な降水が数時間観測され,数 回の表層崩壊が生じたのち,大規模な土砂災害が発 生した.

伊豆大島は,三原山の噴火により形成された火山 地域であり、特有の地質特性を有している.地盤の 表層およそ 1m には,粒径 2mm 以下の火山灰が堆積 しており,当該豪雨時に発生した表層崩壊により, 細粒分を多く含む高濃度で流動性の高い泥流が形成 された.そのため,泥流は下流域にあたる緩勾配な 市街地にまで侵入し,被災を拡大させる要因になっ たと考えられる.

竹林<sup>2)</sup>は,数値シミュレーションによって泥流の 挙動を良好に再現し,そのメカニズムについて検討 を行っているが,緩勾配域である神達地区から大金 沢下流の元町地区における堆積厚 50cm 程度の明瞭 な土砂の侵入および堆積状況の再現性については改 善の余地を残している.この緩勾配域における土砂 堆積の成因としては,土石流の流動・堆積過程にお ける一連の現象によるものとする考察に加え,堆積 後の豪雨の影響により下流まで再運搬されたとする 可能性も指摘されている.

そこで本研究では、平成25年伊豆大島土石流災害 を対象として、特に下流の緩勾配域における泥流の 堆積状況に着目し、その再現精度の向上と、それに よる被災過程に関する考察を行うこととした.精度 向上の検討には、実際に現地で採取した泥流土石流 の土試料を用いた流動実験を実施した.その実験か ら流動特性、特に泥流の流動後の堆積状態における 内部摩擦角々について検証し、実験結果に基づくパ ラメータ値を数値シミュレーションに適用すること で、緩勾配域の堆積状況を流動・堆積の一連の流動 過程から再現する取り組みを行った.

## 2. 伊豆大島の地質特性と泥流の堆積状況

#### (1)伊豆大島の地質特性

伊豆大島は東京都に属し、周囲 52 km, 面積 91.06 km<sup>2</sup>の伊豆諸島最大の島である.山頂部には直径 3 ~4 kmに達するまゆ型のカルデラがあり, 西半分は地形が明瞭であるが, 東半分は溶岩流などにより埋め立てられたため不明瞭な地形となっている. 被災 エリアとなった元町地区および神達地区は西側斜面に位置し,急傾斜な東側と比べると比較的緩勾配な地域である.地質は,三原山の噴火による火山灰などの降下火砕物による火砕物層とそれ以外の時期に堆積する風成層,主にレスと呼ばれる層が存在し,

互層状態となっている. この2つの層を比較すると, レス層の浸透性は  $10^{-5}$ (cm/sec)程度であり,火砕物層 は  $10^{-4} \sim 10^{-3}$ (cm/sec)程度とレス層の方が 1 オーダー から2 オーダー低いことがわかっている. この層序 構造に加え,両層間の浸透性の差異から,2 つの層 の間に水ミチができ表層崩壊の一因になった可能性 が指摘されている<sup>3</sup>.

## (2) 泥流の流動・堆積状況

図 - 1 に、平成 25 年 10 月 15 日から 16 日にかけ ての 1 時間降水量の経時変化を示す. 土砂災害が発 生したと予測されている時間帯には最大で時間雨量 118.5mm を記録し, 100mm/h を超える豪雨が数時間 に亘って継続していたことがわかる.

上記豪雨によって発生泥流による主な堆積域は図 - 2 に示す.これは大金沢流域における航空写真判 読による堆積範囲であり,伊豆大島土砂災害対策検 討委員会報告書<sup>3)</sup>より抜粋し着色を施したものであ る.赤色で示された領域は,堆積工により捕捉され た堆積域である.黄色で示された領域は,神達地区 から元町地区にかけて,広範に薄く堆積している状 態を表している.また,桃色で示された部分は,堆 積厚 50cm 程の明瞭な堆積域になっており,現地調 査からも確認できる(図 - 3).

竹林の解析では、神達地区までを主要な考察対象 として解析および考察が行われているが、図-2を 見ると大金沢下流の元町地区まで明瞭な堆積域が侵 入していることがわかる.本研究では、大金沢上流 の急勾配域に加え、より下流側の緩勾配域である元 町地区等の市街地エリアも含め、明瞭な堆積を確認 できた領域(図-2の桃色領域)に注目し、堆積状況 の再現性向上を試みることとした.

## 3. 現地土試料を用いた流動・堆積実験

#### (1) 実験背景

伊豆大島豪雨災害では,一般的な土石流である石 礫型土石流とは異なり,火山灰等の細粒分と降雨に よる水分を多く含む不均質性を持った泥流型土石流 が発生した.この泥流型土石流は既往研究が少なく, 解析モデルの適用性等についての検証が十分成され ていない状況にある.そこで本実験では,細粒分を 多量に含んだ泥流型土石流の特性を知るために,実際に伊豆大島の土試料を用いた実験を実施して,そ の流動・堆積特性について考察を行った.特に,内 部摩擦角は流動中における平衡土砂濃度やせん断応 力を算出するために必要なパラメータであり,土塊 の流動・堆積過程に密接に関連すると考えられるこ とから,実際の流動・堆積過程における ¢の パラメータ値を算出することを試みた.



図-1 伊豆大島の1時間降水量の時経変化



図-2 土砂の堆積範囲



図-3 元町地区における土砂堆積の痕跡<sup>3)</sup>

#### (2) 実験概要

本実験に用いた土試料の基礎物性値を表-1に, 粒径加積曲線を図-4に、また図-5に細粒分、砂 分および礫分の成分比率をそれぞれ示す. 試料は撹 乱された状態で採取されたもので、大きな石等は 取り除いたうえで分析を行った.分析結果より, 試料の大部分が砂および細砂分で構成されてい ることがわかる.表-1,図-4および図-5で示 したのは土質特性を考察する上での重要な基礎物 性値であるが,泥流の流動現象の考察にあたっては, その土試料の含水状態が現象に大きく影響するこ とが考えられる. そこで, 流動現象に寄与する重要 なパラメータである粘度に注目し、これが含水比の 変化に伴ってどのような変化を示すかについて事 前に検討を行った.図-6に、伊豆大島の土試料を 用いて,含水比を変化させた場合の粘度を測定した 結果を示す. 横軸は含水比, 縦軸は粘度を示す.



表 - 1 伊豆大島泥流土砂試料の物性値

D20

D50

**図-6**を見ると、含水比の変化によって泥流の粘 度が大きく変化していることがわかる.特に、含水 比 40%前後においては粘度が急激に変化している. そこで本実験では、含水比を40%前後の大きく特性 変化が生じる領域において設定することとした.実 際には複数回の予備実験を実施したうえで、大きく 特性が変化する 40.51, 43.72 の含水比条件を試行錯 誤的に特定し,この両含水比条件における泥流のダ ムブレイク実験を実施することとした.

ダムブレイク実験の概要図を図-7に、ビデオ撮 影状況を図-8にそれぞれ示す.実験は幅40cmの水 路に仕切板を用いて長さ 15cm, 高さ 12cm で泥試料 をせき止め、仕切板を引き抜くことで泥流の流動・ 堆積の一連の過程をビデオ撮影した.床には 1cm 間 隔で目盛が付してあり、毎秒30フレームのビデオカ メラで上および側面から撮影した. ワイヤーには 5mm 間隔に目盛を付してあり、センサ位置の土砂高 さを測り取れるようになっている.



## (3)実験結果

図-9に、ビデオ撮影された泥流の堆積状況の一 例を示す. 撮影されたビデオ画像から, 流動後の堆 積形状について目視で測定した.図-10に、ビデオ 画像から算出した両含水比条件における実験結果の 堆積形状を示す. 横軸はダムブレイク実験において 引き抜いた仕切り板位置を原点に流動方向にとった 流下距離,縦軸は堆積高さである.

この図より、泥流の停止角は部位により様々であ ることから本研究では、次の2パターンから堆積泥 流の停止角を求め,これをモデル式(6)~(11)中の内 砂の先端部を抽出し、角測定点間における勾配の平 均をとった場合(図 - 11). ②先端後方の緩勾配部の



図-9 土砂堆積状況のビデオ画像例



図-10 土砂堆積形状

含水比(%)	① 平均勾配	② 緩勾配部
40.51	<b>0.65</b> (32 座)	<b>0.16</b> (0 库)
	<u>(33 度)</u> 0 26	(9 度)
43.72	0.20 (15度)	0.11 (6度)

表-2 内部摩擦角 φ の 測定結果

場合(図 - 12)である.図 - 10の堆積形状の結果から,先に定義した方法で泥流停止角を算出した結果が表-2である.比較的含水比が少ない条件では,平均勾配は,一般的に用いられている砂質土の内部摩擦角である  $\phi = 35^{\circ}$  に近い値となった.約3.0%の含水比の上昇で,①の勾配で求めた泥流停止角は2/5倍もの違いが出ることがわかった.対して,②の勾配では,それほど大きな差異はなく,どちらも内部摩擦角は10度を下回る値となった.これにより,泥流を扱う際は土石流のフロントの状態が非常に重要であることが考えられる.

またこのことは、含水比と粘度の関係からも土砂のフロントにおける粘性に大きく影響し得ると考えられる.さらに、降雨量の多かった伊豆大島豪雨災害においては、泥流は水分をより多く含んでいたと考えられるため、実験結果から流動性のより高かった43.72%の内部摩擦角を用いて解析することとした.従って、数値解析では、一般的に用いられていた $\phi = 35^\circ$ のときと本実験で得られた $\phi = 15^\circ$ のときの値を適用して、大金沢下流域における堆積状況を比較解析することとする.





図-12 先端後方の緩勾配部を用いる場合(下)

### 4. 数値シミュレーションの概要

#### (1) 基礎方程式

解析手法としては、川池<sup>4)</sup>の非構造格子モデルを 適用した浅水流方程式に基づく平面二次元解析を用 いた.式(1)が連続式,式(2)および(3)が,それぞれ X および Y の平面軸方向における運動方程式である. 本研究では,土砂の洗掘・堆積過程も組み込む必要 があるため,別途土砂の連続条件である式(4)も計算 に組み込んでいる.

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i + r \tag{1}$$

<運動方程式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \hat{\beta} \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \hat{\beta} \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_T} \qquad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \hat{\beta} \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \hat{\beta} \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho_T} \qquad (3)$$

<土砂粒子の連続式>

$$\frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(CM)}{\partial x} + \frac{\partial(CN)}{\partial y} = iC_* \tag{4}$$

ここで、hは流動深、M,Nはフラックス、iは河床 の侵食速度、u,vは流速、 $\beta$ は運動量補正係数、gは 重力加速度、nは Manning の粗度係数、tは時間、 x,yは水平方向にとったデカルト座標系の座標値 である.Hは流れの表面における標高であり、 $z_0$ を 河床の初期標高、 $z_b$ を堆積深とすると、 $H = z_o +$   $z_b + h$ である.  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ はそれぞれx, y方向の底面せん断応力, Cは土砂の体積濃度,  $C_*$ は河床土砂の体積濃度である. ここに,  $\rho_T$ は流れにおける流体と土砂粒子の混合物密度としたとき,  $\rho_m$ は水の密度,  $\sigma$ は土砂粒子の密度とすると,以下の式(5)より与えられる.

$$\rho_T = \sigma \mathcal{C} + (1 - \mathcal{C})\rho_m \tag{5}$$

洗掘・堆積過程は底面の土砂体積中および流体中 の濃度関係から式(6)~(7)を用いて算出する.

<侵食速度式>

$$[C < C_{\infty} \mathcal{O} 場合] \quad i = \delta \frac{C_{\infty} - C}{C_* - C_{\infty}} \sqrt{u^2 + v^2} \qquad (6)$$

$$[C > C_{\infty} \mathcal{O} 場合] \qquad i = \delta' \frac{C_{\infty} - C}{C_{*}} \sqrt{u^{2} + v^{2}}$$
(7)

 $\delta, \delta'$ は定数でありそれぞれ 0.0007 および 0.001 を 用いる<sup>4)</sup>.  $C_{\infty}$ は侵食も堆積も生じさせない状態にあ るとき、つまり平衡状態にあるときの濃度を示す. 本研究では、これを平衡土砂濃度と定義し、流体中 の土砂堆積濃度Cおよび平衡土砂濃度 $C_{\infty}$ の大小関係 から算出している.このとき、 $C_{\infty}$ はエネルギー勾配 tan θ によって次のように式(8)~(10)より求める.

$$\begin{aligned} \tan \theta \ge 0.138 \mathcal{O} \succeq \textcircled{E} \\ \mathcal{C}_{\infty} &= \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \theta - \tan \theta)} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} 0.03 \le \tan \theta < 0.138 \mathcal{O} \succeq \stackrel{\diamond}{\equiv} \end{bmatrix}$$

$$C_{\infty} = 6.7 \left\{ \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \theta - \tan \theta)} \right\}^2 \tag{9}$$

 $\begin{aligned} & \left[\tan\theta < 0.03\mathcal{O} \succeq \grave{\approx} \right] \\ & \mathcal{C}_{\infty} = \frac{(1+5\tan\theta)\rho_m\tan\theta}{\sigma - \rho_m} \left(1 - \bar{\alpha}^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \bar{\alpha} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) (10) \end{aligned}$ 

ここに、 $\phi$ は土砂粒子の内部摩擦角、 $\tau_*$ および $\tau_{*c}$ は それぞれ無次元掃流力および無次元限界掃流力である<sup>4)</sup>.また、土石流の挙動について降伏応力の影響 が支配的であることがわかっている<sup>5)</sup>.河床面せん 断応力において、川池らは速度に依存した式を用い ていたが、土石流の応力が粒子相互の静的な接触に よる速度場に依らない粒子間応力を考慮する必要が あり、次の式より解析に組み込んだ.

$$\tau_y = \frac{1}{1+\alpha} (\sigma - \rho) Cgh \cos \theta \tan \phi \tag{11}$$

$$\alpha = \left(\frac{c}{c_*}\right)^{\frac{1}{5}} \tag{12}$$

## (2)解析条件

解析領域は、図 - 13 に示した領域で、神達地区およ び大金沢を流れた土石流の流動域を通過し、下流域 の緩勾配域(海に到達する領域を含む)までである. 初期地形は、国土地理院より平成17年に計測された 1m メッシュのLP データを用いている.そのため、 既往の研究で使用されている5m メッシュの地形デ



図-13 解析領域



図-14 崩土設置位置

ータよりも詳細に解析に反映することが出来ると考 えられる.解析格子は、東西方向に1500m、南北方 向に2500mとした.実際には、3ヶ所の斜面崩壊が 生じたと地震計からも考察されているが、本研究で は一連の流動過程から大金沢下流域の堆積状況を確 認するために、流動の状況から判断し一番影響を受 けた大金沢本川および左支川の2ヶ所に崩土を設定 した(図-14).崩土は、斜面崩壊箇所に面積およそ 10000m<sup>2</sup>、厚さ0.8m程度とした.

また、ダムブレイク実験より高濃度土砂流の流動 特性として、内部摩擦角々の値を算出し用いた.内 部摩擦角は、土質力学的性質としてもせん断抵抗角 といて用いられ、山の崩壊時や土塊の破壊時に、す べり面を境として滑ることを防ごうとする最大の抵 抗力をいう<sup>の</sup>.一般的に、砂質土などの細粒土は35 度を用いることが多い.しかし、伊豆大島の土石流 は泥流として扱われている.泥流は土粒子と水の間 に生じる飽和度が高いと考えられ、流動現象からも 内部摩擦角は比較的小さいと考えられる.

そこで,実験から内部摩擦角 φ を一般的に用いら れている 35 度および実験から得られた 15 度の 2 つ の Case に分けて解析を行った.

### (3)結果および考察

図 - 15 は、国土地理院による LP データから得ら れた H17 と H25 の地形差分をとったものである.本 解析である図 - 16 と比較すると、大金沢堆積工から 下流までの河道域については定性的によく評価され ている.対して、図中において水色で示されている 浅く侵食作用が生じている領域に関しては、広く評 価されており、侵食および堆積も生じていない場所 に侵食域が広がっている.本解析では、神達地区か ら元町地区までの広範囲で薄い堆積域は再現できて



図-15 H17 および H25 の DEM データの差分



図-16 解析による地盤の侵食・堆積域



図-17 下流域の堆積状況における拡大図

いないが、大金沢本川の流路に沿った明瞭な堆積は 確認できることから、その部分について考察する. 図 - 18 および図 - 19 に示した結果は、ダムブレイク 実験より得られたそれぞれの内部摩擦角 $\phi$ を用いた ときの 30 分後の侵食・堆積域である.  $\phi$ =35°の場合、 流路に沿ってより河口部まで堆積が認められる.ま た、八重沢堆積工にも少し堆積を確認できた.対し て、 $\phi$ =15°の場合は、流路に沿って侵食および堆積 がみられるが、 $\phi$ =35°のときよりも砂防施設等の明 瞭な堆積域における広範な堆積が認められる.

また,図-15から図-19に示した○部分は明瞭な堆 積が確認された場所であり,現地調査でも広く開け た場所にも関わらず流木等で河道閉塞されている箇 所が多く見受けられた.本解析では,土砂のみの崩 壊を行ったが,それでも流路沿いに堆積しやすい場 所となっていることがわかる.そのため今後の災害 対策が必要となる場所であると考えられる.



図-18 *ϕ*=35°のときの侵食・堆積域



図-19 φ=15°のときの侵食・堆積域

# 5. まとめ

- ダムブレイク実験より、伊豆大島の泥流型土石流の土試料を用いて内部摩擦角の計測に試みた結果、数%の含水比変化により大きな差異が生じた。それに伴い、流下距離の差異も大きく表れたことから、含水比や内部摩擦角が堆積過程に大きく影響し得ることがわかった。今後の土石流数値解析において重要なパラメータであると考えられる。
- 2)実験による泥流の流動後の停止角度を求め、これを内部摩擦角 φ として適用した数値解析を実施した結果、緩勾配域の広域な土砂堆積状況を含めた再現ができた.特に、緩勾配市街地において確認されていた50cm 厚の堆積域の再現については、φ = 15°の条件においてより良好に再現できることが確認できた.

#### 参考文献

- 1) 気象庁: 台風 26 号における暴風・大雨速報, 2013
- 竹林洋史, 江頭進治, 藤田正治:2013年10月に伊 豆大島で発生した泥流の平面二次元解析, 河川 技術論文集, 第20巻, pp.391-396, 2014
- 3) 伊豆大島土砂災害対策検討委員会報告書:2014
- 川池健司:都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究,水工学論文集,pp.76-91,2001
- 5) 高濱淳一郎,藤田裕一郎,近藤康弘:土石流シミ ュレーションモデルの比較研究
- 6) 土質工学数式入門:土質工学会,1984, P14,99,102,109

(2016.4.4 受付)