

崩壊土砂の土石流化に関する数値シミュレーション

里深好文*・高橋 保

*京都大学大学院農学研究科

要 旨

山腹斜面の崩壊によって生じた土塊が急勾配の斜面上を滑り落ちるとき、土塊底面には強いせん断力が働くため、土塊の底面が侵食されて流動化し土石流となる場合がある。崩壊土塊の運動は剛体運動と見なせるのに対し、土石流は流動体的な挙動をするため、本研究では土塊を複数の円柱ブロックの集合体として表現し、ブロック間の相互作用ならびにブロックとその下部に存在する流動層（土石流）との相互作用を考慮した数値モデルを開発している。本モデルにより土塊が複数の部分に分裂しながら土石流を生成して、斜面ならびにその下流の溪流へと滑ってゆき、やがて谷底に天然ダムを形成する過程が再現可能となった。

キーワード：山腹崩壊，土石流，流動化，2次元数値シミュレーション

1. はじめに

山腹斜面の崩壊を起因とする土石流には大きく分けて二種類あるといわれている。一つは崩壊土砂が谷を埋めて天然ダムを形成し、その決壊に伴って土石流が発生するケースであり、もう一つは崩壊土砂がそのまま流動化して土石流となるケースである。後者には顕著な前兆現象もなく、時として大きな人的被害をもたらすことが知られている。その事例としては、1996年に長野・新潟県境で発生した蒲原沢災害（山本・石川・三好・水原，1999）や、1997年に鹿児島県出水市で発生した針原川災害（中川ら，1998；山田ら，1998）が挙げられる。

このような災害による被害を防止・軽減するためには、斜面崩壊の発生機構ならびに崩壊土砂が土石流化するメカニズムを解明し、土石流の到達範囲を定量的に予測する手法を開発する必要がある。中川ら（1998）は前述の針原川災害を対象として、土石流の流動と堆積に関する2次元数値解析を行い、斜面崩壊の位置や規模が与えられれば、かなりの精度で土石流の氾濫範囲を予測できることを明らかに

している。しかし、この解析では崩壊発生と同時に崩壊土砂はすべて流動化する（土石流化する）と考えていたため、山田ら（1998）によって報告されているような、流動化していない地山ブロックと土石流とが層序をなして堆積するといった現象までは表現できていない。このような現象を再現するためには、崩壊土砂が徐々に流動化してゆく過程を考慮する必要があると考えられる。

著者らは崩壊土砂が急勾配の斜面上を滑り落ちる過程で次第に流動化する機構に関して、一次元水路を用いた実験を行っている（高橋ら，2000）。その結果、土塊と斜面表面との間に強いせん断が生じると土塊の底面が侵食され、土塊が十分に水を含んでいる場合には侵食された土砂と水が混じり合って流動化し、土石流を形成することが分かった。また、Fig. 1に示されるような山腹崩壊が発生したと考えて、異なる飽和度の材料から構成される崩壊土砂を用いて同様の実験を行ったところ、強度の高い部分（不飽和の部分）がブロック状の土塊となって滑動することも確認された。

本研究では上述のような崩壊土砂の流動化プロ

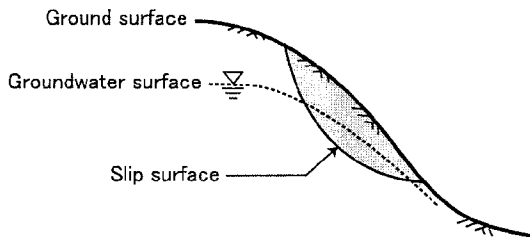


Fig. 1 Actual situation of the earth mass that starts moving

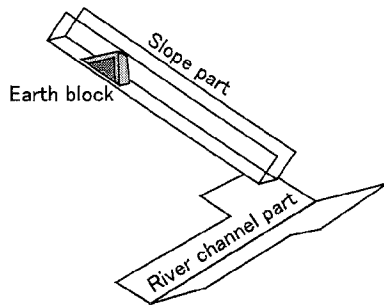


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

セスを従来の土石流の氾濫・堆積モデルに組み込むことにより、斜面崩壊を起因とする土石流が流動・堆積する過程を再現可能な数値シミュレーションモデルを開発している。計算領域としては、急勾配の斜面部とV字断面の溪流部とがつながった2次元的な場を考え、同様の条件下で行った水路実験の結果と計算結果とを比較することにより、計算モデルの妥当性を検証している。

2. 崩壊土砂の土石流化に関する水路実験

2.1 実験装置と実験方法

後述する土石流の計算モデルの妥当性を確かめるためのデータを集積することを目的として、山腹斜面において発生した崩壊土砂が土石流化（流動化）するプロセスに関して水路実験を行った。実験装置はFig. 2に示されるように2本の水路によって構成されている。上流側の水路は崩壊が発生する斜面に相当するもので、水路幅20cm、勾配30°の矩形断面水路である。下流側水路は斜面下部に接続する溪流（谷）を表しており、その断面形状は開き角100°のV字型となっている。下流側水路の縦断勾配は5°、上流側水路と下流側水路とがなす水平角は45°である。

上流側水路の下流端から2m上流の地点にFig. 3に示すような崩壊土砂のモデルを設置し、水路上を滑动させる実験を行った。使用した材料の粒度分布を

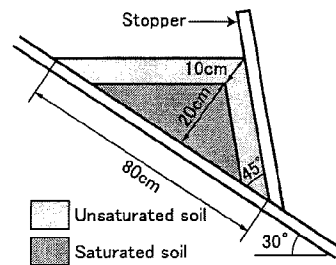


Fig. 3 Initial profile of the earth mass for the experiment

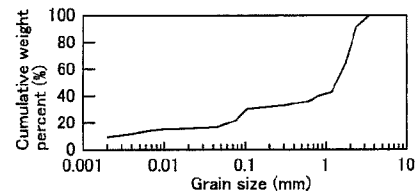


Fig. 4 Grain size distribution in the experimental material

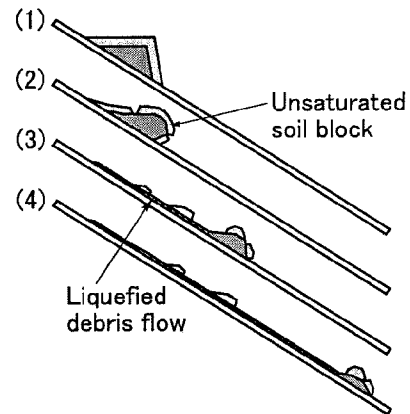


Fig. 5 Motion and deformation of the earth mass on the slope (Time proceeds in sequence from (1) to (4))

Fig. 4に示している。この材料は中国蔣家溝における粘性土石流の構成材料を再現したものであり、低い含水率で流動化し、緩勾配でも流下するという特徴を有している。なお、不飽和土の含水率は11.1%、飽和土の含水率は21.3%である。

2.2 滑动する土塊が土石流化するプロセス

Fig. 5には上流側水路における土塊の変形過程が模式的に示されている。この図から分かるように、土塊の不飽和部はいくつかのブロックに分かれ流下

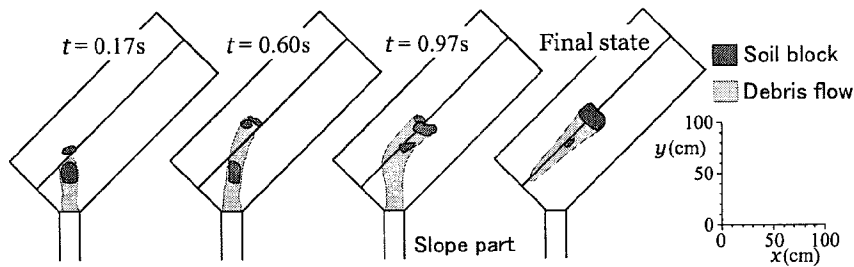


Fig. 6 Processes in the river channel

する。先頭部付近の土塊ブロックのごく一部は前方に崩れて流動層に呑み込まれるが、それ以外の土塊は流動層の上に乗った状態で流下している。土塊が水路を滑動すると、飽和土の部分はせん断を受けて侵食され、侵食された土砂と水の混合物が高さ数cmの流動化層を形成する。上流側水路では土塊の速度が常に流動化層の平均流速を上回っているため、土塊が通過した後は、流動化した層が水路に取り残され、この取り残された流動層は土石流となってそのまま流下し続けることが確認された。

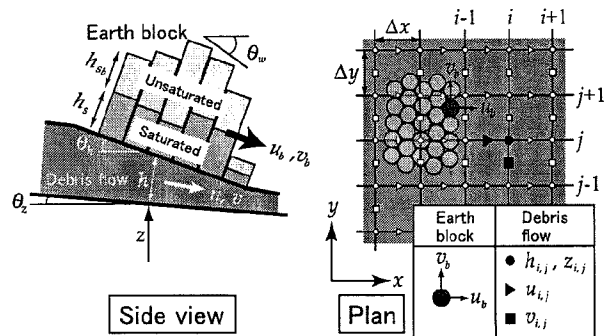


Fig. 7 Plan and side view of the earth block and the liquefied layer

2.3 下流側水路における堆積プロセス

Fig. 6には下流側水路における土砂の平面的な分布状況が示されている、図中の時刻は土塊が上流側水路の出口に到達した時点からの経過時間を示している。なお、実験は同条件で複数回行い、代表的なものを採用している。

崩壊土砂の不飽和土部分は複数のブロックに分かれて下流側水路に進入する。この時、飽和土の大部分はすでに侵食されており、流動化して土塊後方に土石流を形成している。土塊ブロックは谷部分に流入すると、対岸に少しかけあがった後、谷底部に滑り落ちて天然ダムを形成している。また、後続の土石流はこの天然ダムによって堰き止められていることがわかる。この結果からも明らかなように、崩壊を起因とする土石流の氾濫堆積過程には、不飽和土塊の挙動が重要な役割を果たしているといえよう。

3. 崩壊土砂の流動・堆積過程に関する2次元数値シミュレーション

前章の水路実験の結果からも明らかなように、斜面崩壊土砂の堆積範囲を予想するためには、不飽和土の剛体的な運動を追跡し、かつ、流動化した材料の連続体的な運動をも解析する必要がある。そこで、従来の有限差分法による土石流の氾濫・堆積モデルと、土塊の運動をラグランジュ的に解析する手法と

を組み合わせることにより、崩壊を起因とする土石流の流動・堆積に関する新たなモデルを構築する。

3.1 モデルの概要

崩壊土砂が複数のブロックに分かれながら流下する過程を表現するために、Fig. 7に示すように複数の円柱の集合体によって土塊が構成されているものと考え、以下のような条件を設定した。

- Fig. 1のような崩壊が生じた場合を想定して、各円柱ブロックの上部は不飽和層、下部は飽和層とする。
- せん断に伴い飽和層は侵食される（不飽和層は侵食されない）。
- 侵食された土砂は円柱ブロックと河床面との間に流動層（土石流）を形成する。
- 土石流による河床の侵食や堆積は考えない。
- 円柱ブロックの速度が十分に遅くなった場合には堆積したものとして、ブロックの高さを0とし、その分だけ河床上昇させる。
- 土石流の濃度は飽和層の濃度に等しく、変化しない。
- 流動層と土塊の間には速度差に基づくせん断力が働く。
- 土塊と河床面との間に流動層が存在しないとき、土塊底面には動摩擦が作用する。

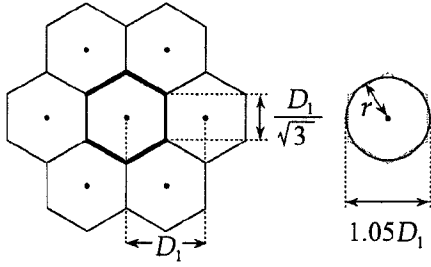


Fig. 8 Plan view of the bundle of unit cylinders of the earth block

- ・各円柱ブロックの間には、互いの距離と相対的な移動方向に応じて引力（or 斥力）と摩擦力が作用する。
- ・個々の円柱ブロックの運動は、底面に働く摩擦力と重力およびブロック間の相互作用とによって決定される。
- ・流動層の運動は土石流の氾濫に関する従来の2次元モデルを用いて解析する。

3.2 円柱ブロックの運動

Fig. 8に示すように、六方最密に配置されている円柱状のブロックによって崩壊土塊が構成されているものとする。初期状態における各円柱ブロックの中心間の距離を D_1 とすると、ひとつの円柱ブロックが支配するエリアは、一辺の長さが $D_1/\sqrt{3}$ の正六角形となる。複数の円柱ブロックの体積の合計を崩壊土塊全体の体積と等しくさせるためには、この六角形の面積と円柱ブロックの底面積 S_0 が等しくなるように、円柱の見かけ上の直径を定める必要がある。このとき円柱底面の直径は約 $1.05D_1$ となり、その半径 r は約 $0.525D_1$ となる。

円柱は下部の飽和層と上部の不飽和層（飽和度 s_b ）で構成されているものとし、それぞれの高さを h_s, h_{sb} とすると、円柱の質量 M_b は、

$$M_b = \rho_T S_0 (\alpha_1 h_{sb} + h_s) \quad (1)$$

と表される。ただし、飽和層と不飽和層の土砂濃度は等しいと考えている。ここに、 ρ_T ：飽和層の密度であり、係数 α_1 は不飽和であることによる密度の差を表し、次のように表される。

$$\alpha_1 = \frac{C\sigma + (1-C)\rho s_b}{C\sigma + (1-C)\rho} \quad (2)$$

2次元的な場における各円柱ブロックの運動方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial u_b}{\partial t} = g \sin \theta_{hx} + \frac{\tau_{sx} S_0}{M_b} + \frac{1}{M_b} \{ \sum f_x + \sum f_{sx} \} \quad (3)$$

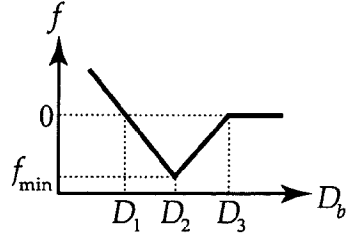


Fig. 9 Attractive or repulsive force working between cylinders (the horizontal axis shows the distance between the centers of two cylinders)

$$\frac{\partial v_b}{\partial t} = g \sin \theta_{hy} + \frac{\tau_{sy} S_0}{M_b} + \frac{1}{M_b} \{ \sum f_y + \sum f_{sy} \} \quad (4)$$

ここに、 u_b, v_b ： x, y 方向の円柱ブロックの速度、 θ_{hx}, θ_{hy} ： x, y 方向の流動層表面の勾配（流動層が存在しないときには河床勾配）、 τ_{sx}, τ_{sy} ：円柱底面に作用するせん断力の x, y 方向成分、 f_x, f_y ：円柱間に働く引力（or 斥力）の x, y 方向成分、 f_{sx}, f_{sy} ：円柱間に働くせん断力の x, y 方向成分である。

2つの円柱ブロックの中心間隔 D_b が初期間隔 D_1 よりも小さいと斥力が働き、 D_1 より大きいと引力が働くと考え、2円柱ブロック間に作用する力 f をFig. 9のように与えている。

（ $D_b < D_2$ のとき）

$$f = \frac{f_{\min}}{D_2 - D_1} (D_b - D_1) \quad (5)$$

（ $D_2 \leq D_b \leq D_3$ のとき）

$$f = \frac{-f_{\min}}{D_3 - D_2} (D_b - D_3) \quad (6)$$

（ $D_3 < D_b$ のとき）

$$f = 0 \quad (7)$$

ここに、 D_2 ：引力が最大となる距離、 D_3 ：引力が作用しなくなる限界の距離である。 f は反発を正とし、 $D_b = D_2$ の時の引力の値 $f_{\min}$ を次のように仮定した。

$$f_{\min} = -2rh_{s,\min} C_b \quad (8)$$

ここに、 $h_{s,\min}$ ：2つの円柱高さのうち小さい方の値、 C_b ：粘着力である。

いま、円柱Aの座標を (x_{ab}, y_{ab}) とし、円柱Bの座標を (x_{bb}, y_{bb}) とすると、円柱Bにより円柱Aに働く力は、

$$f_x = f \frac{(x_{ka} - x_{kb})}{D_b}, \quad f_y = f \frac{(y_{ka} - y_{kb})}{D_b} \quad (9)$$

と表される。ただし、

$$D_b = \sqrt{(x_{ka} - x_{kb})^2 + (y_{ka} - y_{kb})^2} \quad (10)$$

である。

2つの円柱の間に働くせん断力 f_s は、
($f > 0$ のとき)

$$f_s = f \tan \phi + 2rh_{s\min} C_b \quad (11)$$

($f \leq 0$ のとき)

$$f_s = 2rh_{s\min} C_b \quad (12)$$

としている。2つの円柱の相対運動の方向によって、摩擦の作用する向きが決まるので、次のような方法により f_{sx} , f_{sy} を求めている。まず、円柱Aを基準として円柱Bの座標と速度を相対表示すると、

$$x' = x_{kb} - x_{ka}, \quad y' = y_{kb} - y_{ka} \quad (13)$$

$$u_b' = u_{bb} - u_{ba}, \quad v_b' = v_{bb} - v_{ba} \quad (14)$$

となる。この相対座標と相対速度を用いることにより、

$$f_{sx} = \frac{-(v_b' x' - u_b' y')}{|v_b' x' - u_b' y'|} \frac{y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} f_s \quad (15)$$

$$f_{sy} = \frac{(v_b' x' - u_b' y')}{|v_b' x' - u_b' y'|} \frac{x'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} f_s \quad (16)$$

と表される。ただし、 $v_b' x' - u_b' y' = 0$ のとき、 $f_{sx} = f_{sy} = 0$ である。

円柱底面に作用するせん断力に関しては、流動層が存在するか否かによって異なる与え方をしている。流動層が存在する場合には、後述する式(27)と式(28)を用い、存在しない場合には河床面とブロック底面との間に動摩擦が働くものとして、

$$\tau_{sx} = -\mu_m \frac{M_b}{S_0} g \cos \theta_{sx} \frac{u_b}{|u_b|} \quad (17)$$

$$\tau_{sy} = -\mu_m \frac{M_b}{S_0} g \cos \theta_{sy} \frac{v_b}{|v_b|} \quad (18)$$

としている。ここに、 μ_m : 動摩擦係数である。

各円柱ブロックの底面に作用するせん断力を求める際、Fig. 10に示した寄与率を用いている。寄与率とは、土石流の計算に用いられる離散化された各変数の支配領域と各円柱ブロックとの重なり的大小により、両者の関係の程度を表現したものである。例

えば、式(27)を用いて円柱ブロック k の底面に作用するせん断力 τ_{sx} を求めるには、その地点における水深 h_k や流速が必要となる。水深 h_k を例にとると、流動層における水深の評価点 $h_{i,j}$ と円柱ブロック k の間の寄与率 $p_{h_{k,i,j}}$ を用いて、

$$h_k = \sum_{i,j} h_{i,j} \cdot p_{h_{k,i,j}} \quad (19)$$

と表される。また、流速 $u_{i,j}$ を計算する際の土塊と流動層との間に働くせん断力は、

$$\left(\frac{\tau_{sx}}{\rho_T h} \right)_{i,j} = \frac{S_0}{\Delta x \Delta y} \left\{ \sum_k \tau_{sx,k} \cdot p_{u_{k,i,j}} \right\} \frac{2}{\rho_T (h_{i-1,j} + h_{i,j})} \quad (20)$$

と表している。ここに、 $p_{u_{k,i,j}}$: 流速の評価点 $u_{i,j}$ と円柱ブロック k の間の寄与率、 $\Delta x, \Delta y$: x, y 方向のグリッド間隔である。

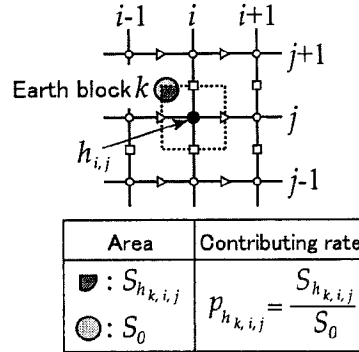


Fig. 10 The contributing rate of cylinders to the boundary shear stress and the grid mesh for calculation

3.3 流動層（土石流）の運動

2次元的な場における流動層の連続式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} - i_s = 0 \quad (21)$$

と表される。流れの x, y 方向の運動方程式は、流動層内の鉛直圧力分布が台形分布であると考えて、水面勾配の代わりに土塊表面の勾配を用い、それぞれ以下のように表している。ただし、この時、土塊の密度と流動層の密度は等しいものと考えている。また、土塊の侵食に伴う土塊と流動層との間の運動量輸送に関しては、侵食速度が小さいこともあって、これを無視している。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \sin \theta_{ux} - \frac{\tau_{sx}}{\rho_T h} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_T h} \quad (22)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g \sin \theta_{wy} - \frac{\tau_{sy}}{\rho_T h} - \frac{\tau_{by}}{\rho_T h} \quad (23)$$

ここに、 h ：流動層の厚さ、 u, v ： x, y 方向の流動層の平均流速、 τ_{sx}, τ_{sy} ：土塊と流動層との間に働くせん断力、 τ_{bx}, τ_{by} ：河床と流動層との間に働くせん断力、 θ_{wx}, θ_{wy} ：土塊表面の x, y 方向勾配、 i_s ：土塊底面の侵食速度、 ρ_T ：流動層の密度であり、

$$\rho_T = C\sigma + (1-C)\rho \quad (24)$$

と表される。ここに、 C ：流動層の容積土砂濃度、 σ ：砂の密度、 ρ ：水の密度である。

河床と流動層との間に働くせん断力は粘性土石流の抵抗則を用いて、次のように表される。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_T h} = \frac{9\mu_a^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{\rho_T^2 g h^4 |\sin \theta_w|} \quad (25)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_T h} = \frac{9\mu_a^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{\rho_T^2 g h^4 |\sin \theta_w|} \quad (26)$$

ここに、 μ_a ：粘性係数である。

土塊と流動層との間に働くせん断力は、流動層と土塊との相対速度を考慮して次のように表している。

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho_T h} = \frac{9\mu_a^2 (u - u_b) \sqrt{(u - u_b)^2 + (v - v_b)^2}}{\rho_T^2 g h^4 |\sin \theta_w|} \quad (27)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho_T h} = \frac{9\mu_a^2 (v - v_b) \sqrt{(u - u_b)^2 + (v - v_b)^2}}{\rho_T^2 g h^4 |\sin \theta_w|} \quad (28)$$

土塊を上部に有する流動層の上面と下面に働くせん断力を式(25)～式(28)のような形式で評価できるのかどうかという点に関しては議論の余地があるかと思う。今後、流動層内の鉛直応力分布等に関して一層の検討を加え、改良を図ってゆく必要があると思われる。

土塊底面の侵食速度に関しては、円柱ブロックごとに次式により計算し、Fig. 10の寄与率を用いて平均化している。

$$i_s = \beta \sqrt{(u - u_b)^2 + (v - v_b)^2} \quad (29)$$

ただし、侵食されるのは飽和層のみである。

3.4 計算条件

上述の基礎方程式を差分化して、数値シミュレーションモデルを作成した後、2.に示した水路実験への適用を図った。Fig. 11には計算領域が模式的

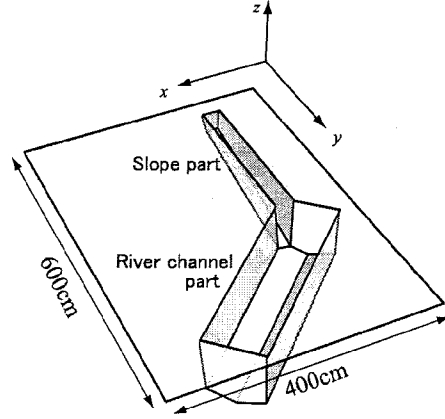


Fig. 11 Bird's-eye view of the calculating area

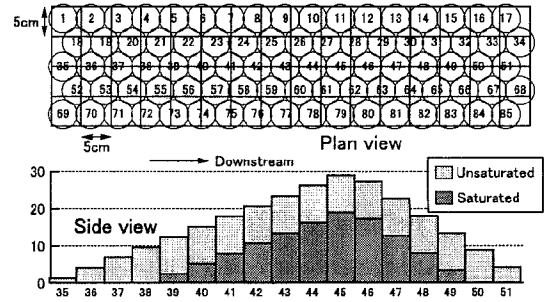


Fig. 12 Initial form and arrangement of the cylinders

に示され、Fig. 12には円柱ブロックの初期形状が示されている。土石流の計算グリッドの大きさは x, y 方向ともに5cm、計算の時間ステップは0.001秒である。円柱ブロック底面の半径 r は2.425cm、円柱ブロックの初期中心間隔 D_1 は4.619cm、 D_2 は4.850cm、 D_3 は5.081cmとした。崩壊土砂や流動層の土砂濃度は0.5、土塊の不飽和部分の不飽和度は0.3、土粒子の比重は2.65、土塊と河床面との間の動摩擦係数 μ_m は0.5、流動層の粘性係数 μ_a は6.2Pa·s、土砂の内部摩擦角 ϕ は30°、土砂の粘着力 C_s は179Paとしている。

3.5 計算結果と考察

Fig. 13には各時刻における円柱ブロックの平面分布と流動層厚さの分布が示されている。ただし、水路実験と同様に、土塊ブロックが斜面部下端に到達した時刻を0としている。これらを見ると、斜面部を流下する間に土塊の底面が侵食され土石流を生成する過程や、土塊が谷の対岸に乗り上げた後に谷底に落ちて堆積する過程が比較的良好に再現できていることが分かる。ただし、この計算においては土塊

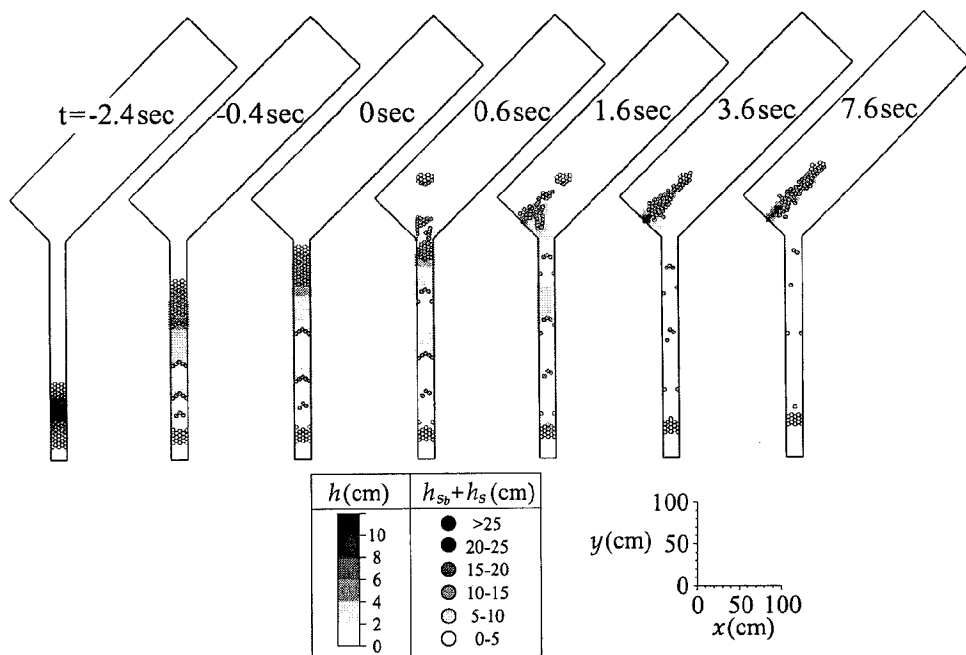


Fig. 13 Results of calculation

の停止条件をブロックの移動速度の絶対値によって与えているために、土塊の停止状況がうまく再現し切れていない。今後この点に関しては改良が必要と思われる。

4. おわりに

本研究では、斜面崩壊土が土石流化し、谷に流れ込んで堆積するプロセスを再現できる数値シミュレーションモデルの開発を行った。このような計算においては、土塊が複数のブロックに分かれながら次第に土石流化してゆく過程を考慮する必要があるため、従来の土石流の2次元数値シミュレーションモデルに対して、複数の円柱型ブロックの集合体として構成される土塊の運動モデルを組み込んでいる。

本モデルを用いて水路実験の再現を試みた結果、土石流を生成しながら土塊が斜面を滑り落ち、谷に入った後に天然ダムを形成する過程が、良好に再現できることが明らかになった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、(株)奥村組の榎本真也氏ならびに京都大学大学院工学研究科の番條敏隆氏にご協力いただいた。ここに記して感謝致し

ます。

参考文献

- 山本 悟司・石川 芳治・三好 岩生・水原 邦夫 (1999)：蒲原沢，針原川，八幡平で発生した土石流の土質特性と流動性，砂防学会誌，vol. 51, No. 5, pp. 28-34.
- 中川 一・高橋 保・里深好文・立川 康人・市川 温・吉田 義則・中村 行雄 (1998)：平成9年鹿児島県出水市針原川で発生した土石流災害について，京都大学防災研究所年報，第41号 B-2, pp. 287-298.
- 山田 孝・南 哲行・小山内 信智・水野 秀明 (1998)：1997年7月10日に鹿児島県針原川で深層崩壊に起因して発生した土石流の流下・堆積状況，砂防学会誌，Vol. 51, No. 1, pp. 46-54.
- 高橋 保・中川 一・里深好文・成沢 光弘・榎本 真也 (2000)：斜面崩壊土の流動化に関する実験的研究，平成12年度土木学会関西支部年次学術講演会，pp. II-35-1-II-35-2.

Numerical Simulation on Landslide-induced Debris Flow

Yoshifumi SATOFUKA* and Tamotsu TAKAHASHI

* Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Synopsis

If a landslide occurs by the ascent of groundwater, the liquefaction of the saturated layer in the moving soil block may be caused by the shear stress at the slip surface. The liquefied layer is successively produced from the solid earth block part, and it flows down as a debris flow. We propose a two-dimensional numerical simulation model that can explain such run out process both of the soil block part and liquefied part. In the model, the solid earth block is considered as a bundle of cohesive cylinders. The calculation includes the liquefaction of the saturated layer, formation of the debris flow and deposition of the solid earth block.

Key Words : Landslide, debris flow, liquefied soil block, two dimensional numerical simulation