底面水抜きスクリーン実験に対する 水と礫の分離挙動シミュレーション

堀口 俊行¹・香月 智²

¹ 学生会員 防衛大学校理工学研究科後期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

E-mail:ed12007@nda.ac.jp

² 正会員 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail:katsuki@nda.ac.jp

本研究は、土石流中の水と礫を分離させることによって、捕捉された巨礫を停止させる底面水抜きスクリーンの実験を行い、個別要素法を用いたシミュレーションで再現解析したものである。実験では、堰堤に堆積した礫の停止位置と形状および流下方向に区分された領域ごとに土石流から分離落下した水量について計測した。次に、礫と水の連成挙動を個別要素法によって解くための擬水滴要素を提案し、実験の再現解析を行った。解析では、礫の堆積過程と区分ごとの水量をシミュレーションし、各要素間の接触力分布や速度ベクトルを時刻歴で分析することにより、土石流の停止機構について検討した。

Key Words: DEM, debris flow, spherical water model, bottom drainage screen

1. 緒 言

近年、気候変化に伴い局地的なゲリラ豪雨や大型台風による集中豪雨が発生し、土石流や地すべり等が頻発している。このため最近の自然災害における豪雨災害の影響は増加傾向にある^{1),2)}。土石流対策の一つに、砂防堰堤が建設されており人命や財産を守っている。砂防堰堤は、不透過型と透過型の二種類に分けられる³⁾。不透過型は、土石流時だけでなく平常時の流出土砂も貯留するものであり、古くから建設されてきた。しかし、堆積した土砂の処理や生態系の分断および下流側の河床低下への影響などの環境に配慮して、建設数は減少傾向にある。一方、透過型は平常時の土砂や流水はそのまま流し、土石流時には先頭部に集中する巨礫を捕捉することで、堰堤の透過部が閉塞され後続流である土砂を捕捉する⁴⁾。このため、最近では透過型砂防堰堤が多く建設される傾向にある⁵⁾。その中で、写真-1のような底面水抜きスクリーンと呼ばれる堰堤も建設されている⁶⁾。底面水抜きスクリーンは、スノコ状のデッキを溪流河床に作り、土石流を堰堤上で礫と水に分離させ、土石流を減速、停止そして堆積させるものである^{7),8)}。

研究上の背景として、橋本⁹⁾は分離方式による砂防工法の一環として本構造が土石と水を分離させることで停止させる作用を簡単な模型実験で再現した。そのうえで、実物大実験として分離堰堤を用いて、実用化に向けて礫

写真-1 底面水抜きスクリーン

と水の分離機構を整理した。また、矢沢ら¹⁰⁾は模型実験に基づき石礫型と泥流型土石流をモデル化し、それぞれの土石流に対して底面水抜きスクリーンによる捕捉状況を考察した。そして、堆積塊に対するスクリーン長やスリット間隔、堰堤の傾斜角度の影響を検討した。そのうえで、捕捉された堆積物に対しても考察しており、土石塊の堆積過程やその安息角の形状、停止距離についても整理し、設計の参考にされている。

榎田ら^{11),14)}は、土石流中の液相と固相における内圧の変化や礫と水の分離について力学モデルを構築し、実験結果と比較・検討した。そこでは、液相の圧力の減少にともなうせん断抵抗力の増加が、スクリーン上における土石流の停止機構に対する支配的要因としている。

一方、数値解析法に基づいて土石流を解析する研究も

図-1 擬水滴要素を用いた土石流モデル

図-2 等価体積

(a) 最密充填

(b) 規則配列

図-3 配列と等価領域の重なり

進んでいる。例えば、清水¹⁵⁾、¹⁶⁾らの間隙水圧を考慮した粒子-流体連成モデルの研究では、固体粒子より小さいスケールで粒子周りの流れ場を解析し、流体力を算出することで、固体粒子の移動を解析している。また、流体および石礫モデルをともにラグランジュ解析する粒子法によって、石礫周りを流れる流体力の評価が検討されている¹⁷⁾。例えば、加藤ら¹⁸⁾は連続体の基礎式のラグランジュ的な離散化を可能にした粒子法により、減勢工モデルである固体粒子周りの流れを再現し、さまざまな流体モデルによりその適用性を検討している。浅井ら¹⁹⁾は、設計時の流体力評価の援用として、数値流体シミュレーションの比較をするため、オイラー型記述によるメッシュ型解析法やラグランジュ型記述による粒子型解析法の特徴を整理し、それぞれの適用性およびその精度を検証した。これらの手法は基礎となる流体解析の条件式を忠実に解釈し、数学的な整合性をもって構成されているので緻密さにおいて長じている。

また、土石流に関する数値解析の一つとして個別要素法を用いた研究がある²⁰⁾、²¹⁾。個別要素法を用いる場合は、土石流の礫を剛体要素として与え、礫に対する流体力については、実験やモデル化された流速を基に、礫の動きとは無関係に抗力として与えることが多い。例えば、渋谷ら²²⁾、²³⁾は円柱形要素を用いて流木混じり土石流モデルを開発し、実験との再現解析を行っている。また、捕捉後の堆積した流木塊や流木混じり土石流の捕捉率の再現性は高いものとなっている。しかし、礫の挙動に連成しない流速分布を基に流体力を評価していることから、流下過程において実験との再現性は高いが、堆積後の礫塊に対して、礫間を流れる水の動きは再現できていない。また、別府²⁴⁾らは、礫と水の連成解析のために個別要素法と粒子法を連成解析している。そこでは、水を粒子法により連続的に解き、礫を個別要素法で解析するモデルを提案した。しかし、不連続体を前提として剛体の運動を解く個別要素法と、連続体を前提とする粒子法を連成させるため、固体と流体の連続性の取扱いについて検討の余地が残されている。

本研究は、個別要素法でのモデル化の誤差を受容したうえで、水の動きを表現するための擬水滴要素を用いた個別要素法を提案し、礫と水の連成解析を行えるように

工夫した。そして、提案手法を用いて底面水抜きスクリーン実験を解析し、水と礫の分離による土石流の停止機構についてその再現性を検討したものである。

2. 擬水滴要素

(1) 混相流のモデル化

土石流は、固体の礫または土砂と水との混合流であるが、従来の個別要素法による解析は、この固体部分のみをP.A. Cundall²⁵⁾の提案した剛体要素にモデル化して解いている²⁶⁾、²⁷⁾。本研究では、水の領域も図-1のような水滴を模した球形の擬水滴要素の集まりとする。以下に、個別要素法に組み込むための擬水滴要素の解法について述べる。

(2) 質量と体積

擬水滴要素 i の体積および質量は、球形を仮定しているので次式によって与える。

$$V_{wi} = \frac{4}{3} \pi r_{wi}^3 \quad (1)$$

$$m_{wi} = \frac{4}{3} \rho_{wei} \pi r_{wi}^3 \quad (2)$$

ここで、 V_{wi} ：擬水滴要素 i の体積、 r_{wi} ：擬水滴要素 i の半径、 m_{wi} ：擬水滴要素 i の質量、 ρ_{wei} ：擬水滴要素 i の比重である。

ただし、水の密度 ρ_w については球形要素の表現すべき領域を図-2に示すような立方体と考え、その質量を同じになるように与えている。すなわち、

$$\rho_{wei} = \frac{8r_{wi}^3}{4/3\pi r_{wi}^3} \rho_w = \frac{6}{\pi} \rho_w \quad (3)$$

ここで、 ρ_w ：水の密度 (10^3 kg/m^3)。

なお、後述する等価領域の重なりが全領域の質量表現において現実の水の質量と矛盾することが予めわかっている場合には、整合するように決定する。

また、流体解析における質量保存則については、個々の要素の質量が無変化であることによって成立していることになる。しかし、個々の要素は等価体積としているため、体積の収縮と圧力の増大の関係については厳密に

図4 要素の位置と変位

図5 接触している周辺要素

図6 圧力勾配力 $\mathbf{f}_{ij}$ のモデル

成立することはできない。以下に、この点を詳述する。

図-3には、2次元における2種類の配列を示している。なお、図-3(a)は最密充填、図-3(b)は規則配列と呼ばれるものである。規則配列は、最密充填に比して間隙部分が大きくなっている。これらに、図-2で示した等価領域を描くと、明らかに最密充填の方が、多くの重複領域が生じている。後述する処理法ではこの二つの配列において、いずれも球形要素の重なりがないと仮定して解析を行うが、このように等価領域の体積には相違が生じる。

個別要素法解析では、個々の要素は時々刻々に移動し、相互の位置関係は多様に変化するので、図-3(a), (b)でもない中間的な重なり状態を形成することになるが球形部分の重なり以外は体積変化として評価することができない。この点において「擬」モデルと呼ばざるをえない。ただし、球を球形とし、剛体とするなどのモデル誤差を考慮すると、連成モデルとしては適用問題によって妥当であることも考えられる。

(3) 運動量保存則

流体解析においてNavier-Stokesの式は、次のように表される²⁸⁾。

$$\frac{D\mathbf{w}}{Dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad} \mathbf{p} + \nu \Delta^2 \mathbf{w} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{w}$ ：流水の速度ベクトルを表し、右辺の第1項は外力、第2項は圧力、第3項は粘性力を表している。

仮に、擬水滴要素の個別要素内において密度が一定であるとして、個々の要素 i において運動量保存則を要素の運動方程式として表わすと次式となる。

$$\mathbf{M}_{wi} \ddot{\mathbf{u}}_{wi}(t) + \sum_j \mathbf{f}_{Dij}(\dot{\mathbf{u}}_{wi}(t)) + \sum_j \mathbf{f}_{Kij}(\mathbf{u}_{wi}(t)) = \mathbf{f}_{ex}(t) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{M}_{wi}$ ：質量マトリクス、 $\mathbf{f}_{ex}$ ：外力ベクトル、 $\mathbf{f}_{Dij}$ ：要素 i と隣接する要素 j に働く人工減衰力ベクトル、 $\mathbf{f}_{Kij}$ ：要素 i と隣接する要素 j に働く圧力勾配による力ベクトル、 $\mathbf{u}_{wi}$ ：擬水滴要素 i の変位ベクトル、 $(\cdot), (\ddot{\cdot})$ ：時間に関する1, 2次微分を表す。また、式(5)の前提として、要素内の変位、速度、加速度は一定であるとの仮定を用いている。

また、 $\mathbf{M}_{wi}$ は図-4に示すように並進方向成分だけを扱うので次式となる。つまり、要素の回転自由度によって生じる角運動量は生じない。

$$\mathbf{M}_{wi} = \begin{bmatrix} m_{wi} & 0 \\ 0 & m_{wi} \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

なお外力ベクトルは、後述する重力、粘性力および抗力ベクトルによって構成されている。

次に、図-4に示す要素の位置と変位は、次のように表す。

$$\mathbf{L}_{wi} = \mathbf{L}_{wi}^0 + \mathbf{u}_{wi} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{L}_{wi}$ ：擬水滴要素 i の重心の全体座標系に対する位置ベクトル、 $\mathbf{L}_{wi}^0$ ：擬水滴要素 i の初期の位置ベクトルである。

また、運動方程式の解法は、厳密性に劣るが計算効率の良い中心差分法を用いた。ただし、速度に対しては、後進差分法を用いた。

$$\ddot{\mathbf{u}}_{wi}(t) = \frac{\mathbf{u}_{wi}(t + \Delta t) - 2\mathbf{u}_{wi}(t) + \mathbf{u}_{wi}(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{wi}(t) = \frac{\mathbf{u}_{wi}(t) - \mathbf{u}_{wi}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (9)$$

以上より、式(8), (9)式を式(5)に代入して、時間 $(t + \Delta t)$ における変位 $\mathbf{u}_{wi}(t + \Delta t)$ は、次式により求まる。

$$\mathbf{u}_{wi}(t + \Delta t) = \mathbf{M}_{wi}^{-1} \left\{ \mathbf{f}_{ex}(t) - \sum_j \mathbf{f}_{Dij}(\dot{\mathbf{u}}_{wi}(t)) - \sum_j \mathbf{f}_{Kij}(\mathbf{u}_{wi}(t)) \right\} \Delta t^2 + 2\mathbf{u}_{wi}(t) - \mathbf{u}_{wi}(t - \Delta t) \quad (10)$$

なお、式(10)は剛体要素の運動方程式^{26), 27)}と同じ形となり、擬水滴要素も従来の個別要素法と同じ解法で取扱える。

(4) 圧力勾配による力

水中にある擬水滴要素 i は、図-5に示すようにいくつかの要素 j によって囲まれている。この要素間に提案する個別要素法では、図-6に示すように法線方向ばねの接触力に相当する水圧勾配力ベクトル $\mathbf{f}_{ij}$ を設ける。

図-7 圧力勾配モデル

図-8 擬水滴要素の接触処理

図-9 擬水滴要素の接触面積の算出

図-10 理論値と近似値

図-11 内圧のための接触点処理モデル

この圧力勾配力については、圧力と接触面積を乗じて求めるものとする。

$$\mathbf{f}_{pij} = A_{cij} \mathbf{p}_{ij} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{f}_{pij}$ ：要素 i, j 間の圧力勾配による水圧力ベクトル、 $\mathbf{p}_{ij}$ ：要素 i, j 間の圧力ベクトル、 A_{cij} ：要素 i, j 間の接触面積である。

なお、 A_{cij} は後述する式(18)を基に次式によって与える。

$$A_{cij} = \frac{A_{ci} + A_{cj}}{2} \quad (12)$$

また、 p_{ij} は要素 i と j の内圧 p_i, p_j の平均値を用いる。

$$p_{ij} = \frac{p_i + p_j}{2} \quad (13)$$

よって、図-7に示すような連続する擬水滴要素において、各擬水滴内の圧力は平均化されているが、隣接する要素間に圧力差があるので、要素 i の左右の要素との圧力勾配により、並進方向に動かす力が生ずる。

(5) 内 圧

擬水滴要素 i の内圧は、図-8に示すように隣接する要素間の重複体積 ΔV_{ij} を用いて次式によって求める。

$$p_i = E_{wi} \frac{\Delta V_i}{V_i} \quad (14)$$

$$\Delta V_i = \sum_{j=1}^{n_i} \Delta V_{ij} \quad (15)$$

ここで、 n_i ：要素 i に隣接する要素数（配位数）。

なお、 E_{wi} は体積収縮に伴う圧力係数であり、基本値として音速伝播速度を用いて与える²⁹⁾。

$$E_{wi} = \rho_w C_w^2 \quad (16)$$

ここで、 C_w ：水の音速伝播速度。

ΔV_{ij} については、図-9に示すように接触に伴う重複半径 δ_{ij} を用いて次のように求める。

まず、接触面積 A_{cij} を厳密に求めると次式になる。

$$A_{cij} = \pi r_i^2 \times \sin^2 \left[\cos^{-1} \left(r_i - \frac{\delta_{ij}}{2r_i} \right) \right] \quad (17)$$

これを多項式で近似して次のようにした。

$$A_{cij} = \pi r_i^2 \left(-0.935 \left(\frac{\delta_{ij}}{r_i} \right)^2 + 1.935 \left(\frac{\delta_{ij}}{r_i} \right) \right) \quad (18)$$

参考までに、式(17)と式(18)の近似式の比較を図-10に示す。

なお、 δ_{ij} は次式によって与えられる。

$$\delta_{ij} = \frac{r_i + r_j - l_{ij}}{2} \quad (19)$$

ここで、 l_{ij} ：2要素の中心点間距離である。

よって、 ΔV_{ij} は式(18)を積分して次式で与える。

$$\Delta V_{ij} = \pi r_i^3 \left(-0.312 \left(\frac{\delta_{ij}}{r_i} \right)^3 + 0.968 \left(\frac{\delta_{ij}}{r_i} \right)^2 \right) \quad (20)$$

なお、体積膨張にも対応するため、式(18)については、絶対値処理をするものとする。そのうえで、式(20)について引張力に対応するため負値領域にも適用する。よっ

図-12 人工減衰モデル

図-13 粘性モデル

(a) 剛体要素と擬水滴要素

ドラッグフォースモデル

(c) 平面と擬水滴要素

図-14 擬水滴要素との連成

図-15 フローチャート

て、接触面積および重複体積の関数モデルは、図-11のようになる。なお、重複体積の膨張側を距距離反距離 δ_{cc} でカットオフするのは、自由水面からの離反をコントロールするためである。

(6) 減衰と粘性力

式(5)において、左辺第2項 ($\mathbf{f}_{Dij}$) は、解析上の安定のために人工減衰として与える。つまり、図-12のように法線方向と接線方向のダッシュポットとなるが、2つ係数は、レイリー減衰モデル³⁰⁾によって与える。一方、流水の粘性については、図-13で示すモデルによって式(5)の右辺の一節として扱い、ニュートン流体モデルを基礎として次式で与える。

$$\tilde{f}_{wij}^{s1} = \eta_w A_{Cij} (v_i^{s1} - v_j^{s1}) \quad (21-a)$$

$$\tilde{f}_{wij}^{s2} = \eta_w A_{Cij} (v_i^{s2} - v_j^{s2}) \quad (21-b)$$

ここで、 η_w : 擬水滴要素間の減衰係数、 v_i, v_j : i, j 要素の流速、 s_1, s_2 : 直交する接線方向。

(7) 擬水滴要素以外との連成

擬水滴要素と球体もしくは円柱形の剛体要素間には、図-14(a)に示すような人工減衰モデルと図-14(b)に示すような抗力モデルを設ける。この抗力モデルに生じる局所座標系における $\tilde{f}_{Drag}$ は、次式によって与える。

$$\tilde{f}_{Drag} = \frac{1}{2} C_D \rho_w A_{Cij} |\tilde{v}_i^n - \tilde{v}_j^n|^2 \quad (22)$$

ここで、 C_D : 抗力係数、 $\tilde{v}_i^n, \tilde{v}_j^n$: 局所座標系における要素 i, j の速度。

よって、擬水滴要素は流速差が小さいと抗力を失い、剛体要素をすり抜けられる。

一方、図-14(c)に示す平面要素との間には、擬水滴要

写真-2 実験水路

写真-3 三角形棧粗度

写真-4 底面水抜きスクリーン

写真-5 供試体 単位(mm)

表-1 供試体の諸元

区分	粒径(mm)	比重	色	体積(l)
I	25~20	1.2	緑	1.0
II	20~15		黄	1.5
III	15~10		赤	1.5

素間に設けた減衰モデルを用いた。圧力勾配によるものと人工減衰と粘性力を働かせる。この際、圧力勾配に相当する水圧については、擬水滴要素の内圧とする。

$$p_{ij} = p_i \quad (24)$$

ここで、 i : 擬水滴要素番号, j : 平面要素番号。

(8) 座標変換と外力ベクトル

以上の接触点における抗力モデルに生じる力 $\tilde{\mathbf{f}}$ とすると、座標変換マトリクス $\mathbf{T}^T$ を用いて全体座標系 (x, y, z) における力 $\mathbf{f}$ と変換される。

$$\mathbf{f} = \mathbf{T}^T \tilde{\mathbf{f}} \quad (25)$$

また、外力ベクトル $\mathbf{f}_a$ は、次式で与える。

$$\mathbf{f}_{ex} = \begin{bmatrix} f_{ex-x} \\ f_{ex-y} \\ f_{ex-z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_i g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (\rho-1)V_{ij}g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{s-x} \\ f_{s-y} \\ f_{s-z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{Drag-x} \\ f_{Drag-y} \\ f_{Drag-z} \end{bmatrix} \quad (26)$$

ここで、添字の x, y, z は一般座標の方向を表し、第1項は自重、第2項は浮力であり剛体要素のみに適用される。第3項、第4項はそれぞれ粘性力および抗力ベクトルである。

(9) 解析手順

以上の基本式に基づく計算手順は、図-15に示すようにばね力の計算、剛体要素の運動、擬水滴要素の運動の処理に区分されて行われる。

3. 底面水抜きスクリーン実験

(1) 実験装置の概要

a) 実験水路

実験に用いた水路の概要を写真-2に示す。装置は、勾配が可変 ($0 \sim 20^\circ$) の流下水路、扇状地水路、貯水槽、ゲートおよびラインポンプから構成されている。流下水

表-2 実験ケース

実験条件	勾配($^\circ$)	流量(l)	備考
流水のみ 礫混じり	15	8	各5回 ずつ実施
	17	9	
		10	

路の寸法は、長さ4.35 m、幅0.3 m、深さ0.5 mであり、底面はステンレス、側面はガラスで内部観察できるようになっている。この水路の扇状地水路部分に、水抜き構造部のため水路幅を25 cmに狭めて設置した。

なお、流下水路底面には、写真-3に示すような三角形粗度³¹⁾ (棧高さ4 mm、棧間隔32 mm) を配している。

b) 底面水抜きスクリーン模型

写真-4に、底面水抜きスクリーン模型を示す。幅10 mm、長さ600 mmの木材を10 mmの間隔を空けて並べている。なお、木材にあたる部分をスクリーン、間隙をスリットと呼んでいる。スリットから流れ落ちる水は、写真-4(b)に示す区分1を上流側とし、区分6を下流側とする6つの水槽に流れ落ちる。その後、分岐した経路を通して対応する水槽に水が貯まる機構となっている。よって、各区間の落下する水量を計測することができる。

c) 供試体

礫材は、写真-5および表-1に示す3種類の擬石を混合したものである。なお、この材料は文献26)の研究との連続性を持たせるために選定したものである。なお、礫材は事前に水に浸けている。各供試体の体積は、別府らの研究²⁴⁾を参考に、大粒径となる供試体Iとそれ以外の供試体II、IIIの比率を同じになるように作成し、供試体Iが1 l、供試体II、IIIを1.5 lとした。

なお、礫塊の初期位置はスクリーンから2.5 m上流に置いたうえで、さらに1.0 m上流から水を一気に開放・流下させて、水と礫とが混じり合った土石流を生成する。

図-16 勾配 17°の実験結果 (流水のみ)

図-17 勾配 17°と 15°の実験結果 (流量 9L)

(a) 分水量～水槽区分関係

(b) 堆積高さ～停止位置関係

図-18 勾配 17°の実験結果 (礫混じり)

図-19 勾配 17°と 15°の実験結果 (礫混じり+流量 9L)

(2) 実験条件

表-2に、実験ケースを示す。勾配を $\theta=15, 17^\circ$ の2種類とし、スクリーンまで到達できる最低水量を基準として8, 9, 10Lの3ケースの流量を与える。比較のため水のみを流下させ、スクリーンを抜ける水量を計測する実験も行った。なお、堰堤のスクリーンを塞ぐと礫材は堰堤上に停止せず流下してしまうことも確認した。

(3) 実験結果

a) 流水の実験

図-16は、勾配 17°で流量 8, 9, 10Lの流水のみを流した場合の各水槽に流下した水量の分布を示している。まず、流量の影響により水槽区分に分けられる傾向が異なることがわかる。流量が増すにつれて水の到達する位置が遠く下流まで到達している。よって、水槽1で

は、流量が最小である8Lにおけるケースが最も多く、逆に、水槽2～5以降では、流量が多く増すにつれて分水量が増える傾向にある。つまり、流量が増すと流速が大きくなりスクリーン上の流水の流下距離が長くなる。図-17には、流量 9Lで勾配 15°と小さくした場合との比較を示す。参考までに映像から計測された流速は、勾配 15°が2.1 m/sであり、勾配 17°が2.5 m/sである。ここでも、流速が増すと流下距離が伸びている。

b) 礫混じりの実験

図-18に、礫混じり土石流の勾配 17°における分水量と堆積形状を示す。図-18(a)は、各水槽の分水量を示している。流量が増えるにつれて下流域まで水が到達している。ただし、図-16と比較すると礫が混じっているため、上流側の水槽に多くの水が落下している。図-18(b)は、写真から堆積した礫塊の形状を描いたものであるが、流量が多くなると、到達位置が下流部まで到達して堆積塊の長さが伸びている。つまり必要堰堤長が伸びることになる。図-19は、流量 9Lで、勾配 15°と 17°との比較を示している。勾配が 15°と小さくなると礫材の停止位置が10 cmほど短くなる。また各水槽の水は、15°の方が上流側で落下した分水量が大きくなっている。

(4) 堰堤部における堆積過程

写真-6に、勾配 17°で流量 9Lのスクリーン堰堤への堆積過程を時系列に示す。まず、 $t=t_0$ で堰堤部に流下す

(a) $t=t_0$

(b) $t=t_0+0.3\text{ s}$

(c) $t=t_0+0.6\text{ s}$

(d) $t=t_0+0.9\text{ s}$

写真-6 勾配 17°の堆積過程

る土石流が到達し、 $t=t_0+0.3\text{ s}$ には、大半の礫が堰堤部に停止している。 $t=t_0+0.6\text{ s}$ には、後続の礫と水が堰堤部に乗りかかり、上流側の勾配が急になっている。 $t=t_0+0.9\text{ s}$ では、完全に停止した礫塊中に水が流れ続けており、分水効果により礫が停止している。すなわち、スクリーンに土石流が到達することで河床面に対するせん断抵抗力が増加することで減速・停止している。また、堆積過程から考察すると、堆積した礫の間隙を水が流れることにより、下流側の堆積勾配は、安息角よりも小さくなっているものと考えられる。つまり、礫間に働く間隙水圧が有効応力を小さくするために、礫材の内部で働くせん断抵抗力が低下し、礫塊の下流勾配を緩やかにしている。

4. 底面水抜きスクリーンのシミュレーション

(1) 計算条件

a) 解析モデル

図-20 に、解析開始時の礫要素および擬水滴要素の配置と底面水抜きスクリーンモデルを示す。側面、底面および堰堤部は、平面要素²⁰⁾を用いてモデル化した。流下区間における底面は、実験における三角形栈粗度を表現

図-20 解析モデル

表-3 解析基本値

項 目		値
礫要素	比 重 ρ_g	1.2
	要素数	1890(11340)
擬水滴要素	比 重 ρ_w	1.0
	要素数 (直径 $r_w=1.0$)	8000~10000
斜路	円柱形要素	62
	平面要素	1
堰堤部	円柱形要素	24
	平面要素	48
要素間ばね (礫要素)	法線方向 $K_n(\text{N/m})$	1.0×10^6
	接線方向 $K_s(\text{N/m})$	3.5×10^5
	要素間摩擦係数 $\tan \phi$	0.57745
	減衰定数 h	0.2
水ばね (擬水滴)	法線方向 $E_w(\text{N/m}^2)$	2.25×10^9
	擬水滴-礫間 $C_{D_{w-g}}$	0.4
	擬水滴要素間 η_w	7.0
時間条件	時間刻み Δt	1.0×10^{-7}

するため、径が同じ円柱形要素²⁰⁾を実験と同間隔で配置している。また、水槽への流水の分岐についての表現は、水槽を深くして擬水滴要素が溜まるようにしている。擬水滴要素は、堰堤からの距離 3.0~4.0 m の間に落下法²⁶⁾を用いて初期配置した。ここで落下法は、下流端に直立する平面要素を立てて、その上流側に要素をランダムに自由落下させ、要素が移動せず安定した状態を初期位置とするものである。土石流に混在する礫要素は、実験の礫径と粒度分布を一致させた。ただし、礫要素は集合体要素モデルを用いて、6 個の等球径からなる要素を用いた。なお、要素モデルの凸度は、実験で使用した礫の安息角を測り、これと一致するように定めた²⁷⁾。

擬水滴要素と礫要素は、流下開始時点での速度はすべて零としている。

流路の底面と側面は、固体の平面要素を配置して、擬水滴要素との相互作用は、図-14(c)に示したモデルで処理をした。また、スクリーンを構成している面も同様に平面要素とするので、図-14(c)のモデルで処理するが、端部は円柱形要素を配置し、図-14(b)のモデルによって処理した。

参考までに、確認解析として礫材を球形要素でモデル

図-21 流水のみの解析結果 (勾配 17°)

図-22 勾配 17°と 15°の解析結果 (流量 9 l)

図-23 勾配 17°と 15°の解析結果 (礫混じり+流量 9 l)

化すると要素表面に凹凸がないためにスクリーン上で停止せずに流下してしまう。

b) 解析パラメータ

表-3に、文献22), 26)の土石流解析を参考に決定された解析基本値を示す。要素間摩擦係数は、文献32)の傾斜法により決定した。また、剛体要素の減衰定数は、0.2を用いた²⁹⁾。

ところで、擬水滴要素の粒径は、最小礫径と同じものとした。これは、事前解析によりスクリーン間隔とスムーズに抜ける最大粒径サイズとなることを確認し、計算負担を考慮して決定した。

人工減衰は、擬水滴要素間においては、要素が深さ10 mの静水安定解析においても発散せずに安定するものとした。また、礫と水の抗力係数を文献33)を参考にし、別途行った1.0 m程度の透水試験をモデル化した解析を行い、実験で通過した水の時刻歴を合せることで決定した。

なお、日本工業規格の土の透水試験方法³⁴⁾によると、礫における透水係数は約100 cm/sであるが、これと同程度の値となっている。

(2) 流水のみの解析

図-21 は、勾配 17°で流水のみの解析結果を示す。実験で得られた各水槽への分水量と比較すると5%ほど誤

差はあるが、ほぼ一致する。また、流量8, 9, 10 lと多くすると水が遠方に到達している傾向も表現できている。なお、実験と解析の初期位置から堰堤に到達するまでの時間が一致することも確認している。図-22 には、流量 9 l と同条件として、勾配の影響を比較しているが実験と同様の結果となっている。

(3) 礫混じりの解析

図-23は、勾配17°と15°における分水量と堆積形状を示す。各水槽区分における分水量にやや違いがあり、礫塊の堆積高さにも違いがある。これは、礫間における流水の影響や流下中における礫の流れの影響が大きい。しかし、水路勾配の影響により分水量が変化することや礫塊の堆積位置の影響が勾配の高さで下流側に押し出されることについては、実験と同傾向を再現できている。つまり、礫と水に働く水圧と間隙を通り抜ける水の効果を概ね再現できている。

(4) 堆積過程の解析的検討

a) 接触力分布

ここからは、勾配17°、流量9 lにおける解析を基に内部のメカニズムを検討する。図-24に、要素間の接触力分布図を示す。図中の赤色の円柱で表示されているのは、礫-礫要素間の接触力であり、径が太いほど大きな力を示している。また、礫と擬水滴要素の接触力は水色で表示しており、擬水滴-擬水滴要素間は表示していない。図-24(a)の $t = t_0$ は土石流の先頭部が堰堤直前の時間である。図-24(b)の $t = t_0 + 0.3$ sは、礫の先端で大きな接触力が底面と礫間に生じており、礫に制動力が働いている。一方、後方から追いついた擬水滴要素は礫要素を前方に押しているが、その力は先端にある礫の制動力より弱いいため、礫塊が停止し始めている様子がわかる。

次に、図-24(c)の $t = t_0 + 0.6$ sでは先端部の制動力がさらに大きく働き、礫群がその場にとどまろうとしている。

図-24(d)の $t = t_0 + 0.9$ sでは、礫の接触力がさらに明瞭となり安定した堆積物が生じたことで礫要素が停止してい

図-24 堆積過程における接触力分布図

図-25 速度ベクトル表示

(a) 平均配位数～時間関係 (勾配 17°)

(b) 各領域の状態

図-26 平均配位数と堆積過程

る。一方、擬水滴群は水槽へ流れ落ちるので礫群を前方へ押す力が失われている。つまり、完全に礫が停止した後も擬水滴要素は礫間を流れており、擬水滴要素と礫要素の接触力は小さいながらも継続している。

b) 水の水速度ベクトル評価

図-25は、要素の水速度ベクトルを擬水滴要素については水色の線で、礫については青色で示したものである。ここで、 t_0 とは堰堤に土石流の先端が到達したときであり、土石流の先端の速度が最も大きいときでもある。 $t=t_0+0.3$ sでは、礫が先頭部に集中し、流速の速い流水が礫と混じりながら流れている。 $t=t_0+0.6$ sでは、礫が急激に減速し、擬水滴要素が礫間を抜けながら流れている。 t

$= t_0+0.9$ sでは、礫塊が完全に停止状態に入り、後続流が流れ続けている。礫塊が停止するとその礫間を水が抜ける隙間に抗力が生じるため、水の流速も減速する。やがて礫は停止するが、擬水滴要素の抗力は礫を動かすほど大きくないため、間隙を通り抜け続けていることがわかる。

c) 平均配位数の推移

図-26(a)には、平均配位数～時間関係を示す。配位数とは、個別要素法で時々刻々にカウントされる接触点数である。構造解析的な視点において、骨格構造の不静定次数に相当しており、配位数が増えると、より安定した骨格構造になる。状態 I ($t=\tilde{t}_0+1.3$ s)は、図-26(b)に示す

礫塊が初期位置から流れ始めた状態である。初期位置では、礫のみであり固体化しているため、最も大きい平均配位数が10.5である。これが流れ始めて流動化が進むと、この平均配位数は4.5にまで低下している。

次に、状態Ⅱ ($t = \tilde{t}_0 + 3.0s$) は、図-26(b)に示している土石流の先頭部が堰堤に到達したときであり、配位数が6.2と増加途中である。状態Ⅲ ($t = \tilde{t}_0 + 3.1s \sim \tilde{t}_0 + 3.8s$) では、礫塊が急激に減速している時であるが、平均配位数が8.4を示し、増加傾向にある。つまり完全に停止しているわけではない。状態Ⅳ ($t = \tilde{t}_0 + 5.0s$) は礫塊が停止状態であり、平均配位数は9.3に達しており停止に伴って骨格構造が再度安定化したことがわかる。

このように、土石流の礫群が粒状体としても固体化→液体化→固体化と変化する過程に対応して、剛体要素間の配位数が大→小→大と変化する様子がわかる。

5. 結 言

本研究は、個別要素法を応用した擬水滴要素を提案し、底面水抜きスクリーンを対象に礫と水の分離によって生じる土石流の停止機構の再現解析を試みたものである。

- 1) 実験によると底面水抜きスクリーンのスリットによって、土石流内部の礫間に働く間隙水圧により有効応力を小さくすることで、礫塊が形成し減速・停止している。
- 2) 土石流が堰堤部に到達すると礫と水に分離されるため水の押し出す力が失われることで、礫と底面に働く制動力が相対的に大きくなる。
- 3) 流水のみの解析において、提案する擬水滴要素によって、実験と同様に底面水抜きスクリーンのスリットで抜ける水量と上流から到達した擬水滴群の流速が再現できる。
- 4) 礫混じりの解析においても、流れの過程や礫と水の混合状態と分離挙動は、実験のものと概ね一致している。
- 5) 本解析では擬水滴要素と礫要素の接触力図を用いて礫と礫間を流れる水との分析が可能である。
- 6) 提案手法は、厳密解な水の振舞いを表現するには、多くの課題が残されており、改善および検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 一般社団法人 砂防・地すべり技術センター：土砂災害の実態 平成24年度版, pp.1-31, 2013.7.
- 2) 荻原幸男監修：日本の自然災害 1995～2009年 ―世界の大自然災害も収録―, 日本専門図書出版, pp.320, 2009.7.
- 3) 砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物委員会：平成21年版 鋼製砂防構造物設計便覧, 2010.9.
- 4) 水山高久, 鈴木宏, 及川義朗, 森田昭宏：透過型砂防ダムに関する実験的研究, 新砂防, Vol.41, No.2(157), pp.21-25,

1988.7.

- 5) 田畑茂清, 守山浩史：鋼製透過型えん堤工法・設計法の変遷と課題, 砂防学会誌, Vol.64, No.6, pp.47-51, 2010.3.
- 6) H. Suwa, K. Okano, T. Takahashi : Behavior of debris flows monitored on test slopes of Kamikamihorizawa Creek, Mount Yakedake, Japan, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.2, No.2, pp.33-45, 2009.7.
- 7) 清野雅雄, 宮越英紀, 上原信司, 水山高久：底面水抜きスクリーンの現地試験, 新砂防, Vol.39, No.3(146), pp.16-20, 1986.9.
- 8) 今井一之, 宮本登, 水山高久：底面水抜きスクリーンの現地試験(続報), 新砂防, Vol.42, No.2(163), pp.23-28, 1989.9.
- 9) 橋本規明：新河川工法, 森川出版(株), pp.224-231, 1956.7.
- 10) 矢澤昭夫, 水山高久, 森田昭宏：土石流を制御する構造物に関する実験, 土木技術資料 Vol.28, No.8, pp.9-14, 1986.8.
- 11) 榎田豊, 長谷川泰亮, 山本仁志, 松崎健：底面水抜きスクリーン上での土石流の停止機構に関する検討, 平成12年度砂防学会研究発表会講演集, pp.38-39, 2000.5.
- 12) 榎田豊, 深澤宣代, 松崎健, 山本仁志, 長谷川泰亮：底面水抜きスクリーン上での土石流の停止機構に関する検討(2), 平成13年度砂防学会研究発表会講演集, pp.86-87, 2001.5.
- 13) 榎田豊, 富田耕司, 松崎健, 山本仁志：底面水抜きスクリーン上での土石流の停止機構に関する検討(3), 平成14年度砂防学会研究発表会講演集, pp.48-49, 2002.5.
- 14) 榎田豊, 上岡秀之, 山本仁志, 川邊洋：土砂が堆積した底面水抜きスクリーン上での土石流の挙動, 平成15年度砂防学会研究発表会概要集, pp.112-113, 2003.5.
- 15) 清水賀之, 落合博貴, 岡田康彦：間隙水圧を考慮した粒子-流体連成モデルを用いた個別要素法による土石流シミュレーション, 土木学会論文集C, Vol.65, No.3, pp.633-643, 2009.7.
- 16) 清水賀之, 稲川雄宣：間隙水圧を考慮した粒子-流体連成モデルを用いた個別要素法による液状化解析, 土木学会論文集C, Vol.66, No.4, pp.800-813, 2010.11.
- 17) 福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦：水流による石礫粒子群の移動機構とそのモデル, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_937-I_942, 2012.2.
- 18) 加藤宏隆, 大槻政哉, 斎藤佳彦, 清水康行, 木村一郎：MPS法を用いた雪崩シミュレーションモデルの実用化に向けた検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4, I_1231-I_1236, 2011.2.
- 19) 浅井光輝, 別府万寿博, 石川信隆, 眞鍋慶生, 齋藤展, 丹羽一邦：数値流体シミュレーションによる流体衝撃力評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol.58A, pp.1021-1028, 2012.3.
- 20) 福岡雅俊, 前田健一, 湯浅知英：石礫流れ中の分級と跳返りのメカニズムに関する考察, 実務利用を目指すマイクロジオメカニクスに関するシンポジウム, pp.1-6, 2008.11.

- 21) 前田健一, 舘井恵, 福岡雅俊: 個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.6
- 22) 渋谷一, 原木大輔, 香月智: 3元個別要素法による透過型砂防えん堤の流木混じり土石流の捕捉シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.12, pp.449-460, 2009.8
- 23) 渋谷一, 堀口俊行, 香月智, 大隅久, 石川信隆: 円柱形集合体要素を用いた個別要素法による根付き流木の捕捉シミュレーション, 土木学会論文集 A2(応用力学)特集号, Vol.67, No.2, pp.1_323-1_334, 2011.8
- 24) 別府万寿博, 井上隆太, 石川信隆, 長谷川祐治, 水山高久: 修正 MPS による土石流段波モデルのシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.63, No.6, pp.32-42, 2011.3
- 25) P.A.Cundall: A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock system, Proc. Symp. ISRM, Nancy France, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 26) 香月智, 渋谷一, 大隅久, 國領ひろし, 石川信隆: 個別要素法による透過型砂防堰堤の流木混じり土石流捕捉解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.69, No.1, pp.16-29, 2013.2.
- 27) 堀口俊行, 渋谷一, 香月智, 田附正文: 集合体要素の形状特性が安息角に及ぼす影響に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.136-146, 2011.3.
- 28) 池田駿介: 水理学, 技報堂出版, 1999.1.
- 29) G.R.Liu, M.B.Liu: Smoothed Particle Hydrodynamics: a meshfree Particle method, World Scientific, 2003.
- 30) 小坪清真: 土木振動学, 森北出版, pp.204-222, 1973.4.
- 31) 富永章宏, 田本典秀: 三角形断面稜型粗度を有する開水路流れの乱流構造, 応用力学論文集, Vol.5, pp.727-734, 2002.8.
- 32) 田中久一郎: 摩擦のおはなし, 日本規格協会, pp.133-134, 1985.3.
- 33) 池田駿介: 水理学, 技報堂出版, 1991.1
- 34) (公社) 地盤工学会: 土質試験 基本と手引き 第二回改訂版, 2010.3.

(2014. 6. 20 受付)

DEM SIMULATION ON DEHYDRANT BEHAVIOR OF DEBRIS FLOW CAPTURED BY BOTTOM DRAINAGE SCREEN DAM

Toshiyuki HORIGUCHI, and Satoshi KATSUKI

This paper presents a new Distinct Element Method to simulate coupled behavior of water and gravels. A spherical shape water element is proposed. The element has an isotropic pressure controlled by shrinkage volume of its body, and transfers the pressure to adjacent elements in proportion to the contact section area. Combining the water elements and conventional element, i.e., spherical or aggregate rigid body experiments, debris flow behavior obtained by experiment are simulated. The experiments are performed on the dehydrate behavior of debris flow captured by a bottom drainage screen dam. Draining out water from debris flow, the gravels lose its fluidity on the screen. The proposed method simulates such behaviors very well, and the coupled mechanism is analyzed in viewpoints of reaction force between rigid and water elements, and coordination number transition in the rigid elements.