

円柱形要素を用いた個別要素法による流木混じり土石流の捕捉シミュレーション

防衛大学校 学生会員 ○原木 大輔 学生会員 澁谷 一 正会員 香月 智

1. 緒言

石礫型土石流に対する透過型砂防えん堤の捕捉性能は、透過部断面を構成する部材の純間隔(l)と土石流に含まれる巨礫の最大粒径(d_{95})の比によって決定できるものとされている¹⁾。しかし、上流域の植生によっては、土石流中に流木が多く含まれることも報告されており、透過型砂防えん堤の捕捉性能に影響を与えることが考えられる。このような観点から、本研究は土石流中に含まれる流木の割合が捕捉性能に与えるメカニズムを解明する基礎的段階として、模型実験を個別要素法を用いてシミュレーション解析するものである。

2. 土石流解析における基本式

本解析では、図-1に示すように土石流の礫は球形要素、流木は円柱形要素を用いて表現し、要素が接触する場合にばねを並進方向に設け接触力を表現する。なお、接触ばねは基本的に線形とし、法線方向の引張に対しては抵抗しない、接線方向はモール・クーロンの破壊基準に達すると塑性的に滑るものである。

各要素の運動方程式は、回転に伴う主軸の方向の変化を考慮して次のように表す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{f}_k(\mathbf{u}(t)) + \mathbf{f}_w = \mathbf{f}(t) + \mathbf{f}_a(t) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$: 質量マトリクス、 $\mathbf{D}$: 減衰マトリクス、 $\mathbf{f}_k$: 接触力の総和に対応する重心点等価力ベクトル、 $\mathbf{f}_w$: 流体力ベクトル、 $(\cdot)$: 時間に関する1次微分、 $\mathbf{f}$: 外力ベクトル、 $\mathbf{f}_a$: オイラーの公式から得られる要素の回転主軸の変化により生ずる力。

球形要素、円柱形要素、平面要素と接触位置の組み合わせによりさまざまな接触状態が生じ、それぞれの接触状態によって接触判定および力のつり合い(接触ばねの姿勢)を定義する必要がある。本報告では省略するが、その組み合わせを列挙すると、①球形-球形、②球形-円柱形側面、③球形-円柱形底面、④球形-平面、⑤円柱形側面-円柱形側面、⑥円柱形側面-円柱形底面、⑦円柱形底面-円柱形底面、⑧円柱形底面-平面の8つである。

本来、流体力は土石流中の流速分布に基づき、そこから作用する流体力を求めて作用させることが望ましいが、本解析においては捕捉性能解析を目的としているため、図-2のように簡略化して各要素に流体力を与える²⁾。なお、要素が水深 h よりも上方にある場合は、

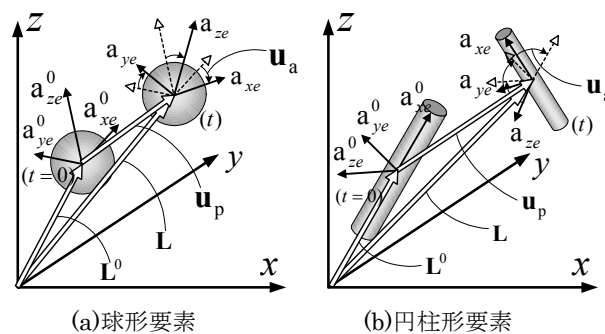


図-1 剛体要素

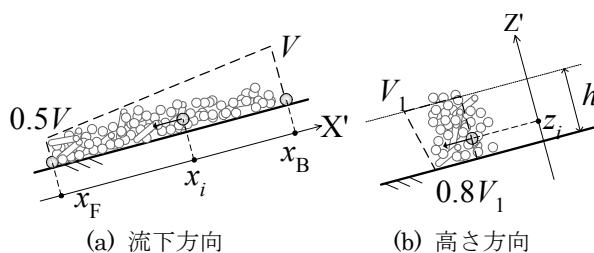


図-2 流体力モデル

空気中にあるものとし、流体力を与えない。

$$\mathbf{V}_1 = \frac{x_i - x_F}{x_B - x_F} \frac{\mathbf{V}}{2} + \frac{\mathbf{V}}{2} \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_2 = \frac{z_i}{h} \frac{\mathbf{V}_1}{5} + \frac{4}{5} \mathbf{V}_1 \quad (0 \leq z_i \leq h) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{V}$: 基準となる流速、 $\mathbf{V}_1$: x' 軸方向の分布に対して与える流速、 $\mathbf{V}_2$: 要素に与える流速 (z' 軸方向の分布に対して与える流速)、 x_i : x' 軸上の要素 i の座標、 x_F : x' 軸上の先頭の要素の座標、 x_B : x' 軸上の最後尾の要素の座標、 z_i : z' 軸上の要素 i の座標 (水路床からの高さ)、 h : 水深。

要素が水から受ける流体力を、式(4)で得られた各要素に与える流速をもとに、次式で表す。

$$\mathbf{f}_w = \frac{1}{2} C_D \rho A_i |\mathbf{V}_2 - \mathbf{v}_i| (\mathbf{V}_2 - \mathbf{v}_i) \quad (5)$$

ここで、 C_D : 抗力係数、 ρ : 水の密度、 A_i : 要素 i の流れ方向への断面積、 $\mathbf{v}_i$: 要素 i の速度である。

3. 模型実験

シミュレーションに先立ち、実験水路を用いて、透過型砂防えん堤の土石流捕捉効果に関する実験を行った。用いた水路は図-3に示す長さ4.35m、幅0.3m、高さ0.5mの河床勾配可変の矩形水路である。透過型砂防

キーワード 3次元個別要素法、円柱形要素、流木混じり土石流、捕捉解析

連絡先 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL : 046-841-3810

E-mail : g45076@nda.ac.jp

えん堤模型は、 $\phi 18\text{mm}$ の木製円柱を使用して作製し、縦方向柱を最大礫径の 2.5 倍 ($\ell_H/d_{\max}=2.5$) として、中間横梁のみ純間隔を 30 ($\ell_V/d_{\max}=1.5$)、40 (同 2.0)、50mm (同 2.5) に変更することができるものであり、図-3 に示す扇状地水路の上流側に設置した。

実験に使用した礫モデルは、粒径 20, 15, 10, 5mm の 4 種類の粒状石炭灰(比重 1.9) を用い、木材には、 $\phi 10 \times 100\text{mm}$ の木材を使用した。これらを混合し土石流供試体とした。水路勾配は 15° で固定し、土石流供試体を水路上流の図-3 に示す位置に配置し、約 4.3l/s の流量を約 6 秒間供給して流下させた。流木容積率と $\ell_V/d_{\max}$ を変化させて、各ケース 3 回ずつ行い、えん堤模型が土石流供試体を捕捉する割合を調べた。流木容積率は、20, 15, 10, 5%と、流木を含めない場合 (0%) の計 5 ケースについて実験を行った。

4. シミュレーション解析

(1) 解析モデル

本解析では平面要素を組み合わせる実験水路を再現し、最上流部に配置した礫要素および流木要素に図-2 に示す流体力を作用させた。礫要素および流木要素の諸元を表-1 に示す。

(2) 解析結果

図-4 には、流下開始から 3.0 秒後、水路流下方向に 3.5m 流下したときの状態(流木容積率 20%)を実験と比較して示している。実験と同様、土石流先頭部の盛り上がりや先頭部の流木の集中が見られ定性的であるが流下状況を概ね再現できている。

図-5 には、土石流がえん堤に到達後 0.8 秒の捕捉状況を実験と比較して示している。解析では、粒径 5, 10mm の礫要素がないため、捕捉した量に大きな違いがあるが、先頭部に集中していた流木によってえん堤が閉塞しその後、礫要素が堆積する状況が再現できている。

図-6 に、 $\ell_V/d_{\max}=2.0$ のときの砂防えん堤によって捕捉された土石流の捕捉率と流木容積率の関係を示す。実験結果より、流木容積率 20%では捕捉率が 92%であったが、流木容積率が小さくなるにつれて捕捉率がほぼ比例的に低下し、流木容積率 0%では捕捉率が 51.7%となった。一方、解析結果では、実験結果と比較すると捕捉率はやや過大に評価されているが、流木容積率が小さくなるにつれて捕捉率が比例的に低下する傾向は再現できている。ただし、流木容積率 0%では捕捉率が 1%となり、実験結果と異なる。これは、粒径の小さい粒子がないため、礫粒子による砂防えん堤の閉塞が完全には表現できていないためと考えられる。

参考文献

- 国土交通省砂防部, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編) 及び

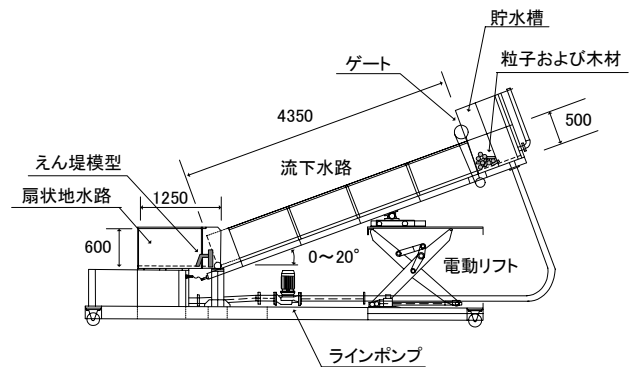


図-3 石流実験装置

表-1 礫要素および流木要素の諸元

		粒子数	
		実験	解析
粒子径	20 mm	39	50
	15 mm	276	250
	10 mm	852	0
	5 mm	3452	0
流木容積率	20%	150	150
	15%	106	106
	10%	67	67
	5%	30	30
	0%	0	0

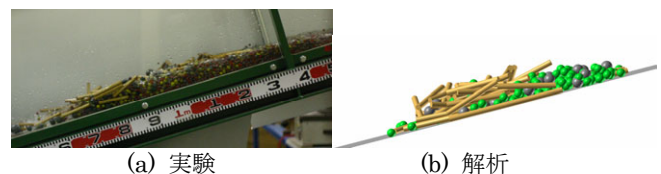


図-4 流下状況の比較



図-5 捕捉状況の比較

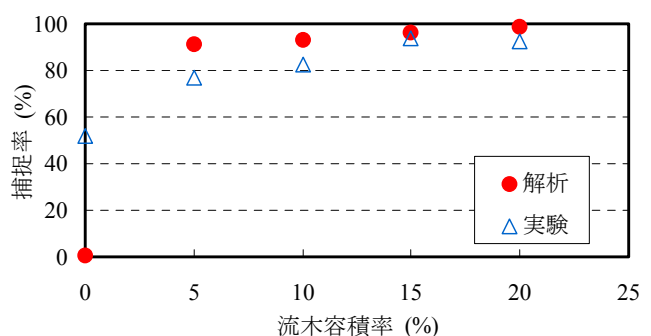


図-6 流木容積率と捕捉率($\ell_V/d_{\max}=2.0$)

同解説 土石流・流木対策設計技術指針及び同解説, 平成 19 年 11 月

- 深和岳人, 香月智, 石川信隆, 山田正: 3 次元個別要素法によるオープン型鋼製砂防堰堤の土石流捕捉効果解析, 土木学会論文集 No.738/I-64, pp.97-112, 2003.7.