

円柱形要素を導入した個別要素法による 透過型砂防えん堤の流木混じり土石流の捕捉性能解析

防衛大学校 学生会員 ○渋谷 一 原木 大輔 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)と土石流中に含まれる巨礫の最大礫径(d_{max})の比(l/d_{max})により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、土石流中に多量の流木が含まれることがあり、土石流中の流木の有無が透過型砂防えん堤の捕捉形態に大きな影響を及ぼすことが指摘されている²⁾。

そこで本研究は、土石流中に含まれる流木の割合の変化が透過型砂防えん堤の捕捉性能に与える影響について検討する基礎的段階として、個別要素法を用いたシミュレーション解析を行い、別途行った模型実験と比較・検討を行ったものである。

2. 解析手法

本解析では、流木混じり土石流の石礫を球形要素、流木および透過型砂防えん堤の鋼管を円柱形要素、水路を三角形の平面要素を用いてモデル化し、土石流中の水の流れは流速分布モデルを用いて表現した。

2.1 運動方程式

系全体の運動方程式を、次のように表す。

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

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{M}\mathbf{g} + \mathbf{f}_w(t) \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{M} ：質量マトリクス、 \mathbf{D} ：減衰マトリクス、 \mathbf{f}_k ：ばね力の重心点等価力ベクトル、 \mathbf{f} ：要素に作用する外力の総和、 \mathbf{g} ：重力加速度ベクトル、 \mathbf{f}_w ：流体力ベクトル、 (\cdot) ：時間に関する1次微分である。

なお、減衰項については、比例減衰モデル³⁾の構造減衰項のみを取り扱うものとし、要素間ばねに並行して設置したダッシュポットにより生じる力の重心点等価力ベクトル \mathbf{f}_D によって表わされるものとする。よって、式(1)は次のように表せる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \{\sum \mathbf{f}_D(\dot{\mathbf{u}}(t)) + \sum \mathbf{f}_k(\mathbf{u}(t))\} = \mathbf{f}(t) \quad (3)$$

2.2 接触判定と接触力の算定

要素が接触する場合は、接触点間に要素間ばねを設け、接触力を表現した。なお、要素間ばねの構成則は、まず法線方向については圧縮に対して弾性挙動をし、引張には抵抗しないものとした。また接線方向については基本的に線形とし、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とした。

2.3 流速分布モデル

本解析においては計算負担を軽減するため、以下のように簡略化して各要素に流体力を与えるものとした。

まず、流下時においては、図-1(a)に示すように、流下方向の鉛直方向の分布に対し、基準となる流速 U と水深 h を与えたとき、各要素の高さ z_i から要素に与え

る流速 U_i を変化させた。

一方、捕捉時においては、えん堤に捕捉された礫および流木により湛水が生じることを考慮し、えん堤直上流部にある最も高い要素座標を基準として水深 h_D を定めた。この水深変化に応じて、常に流量が保存されるように図-1(b)、(c)に示す台形分布の流速の係数 α 、 β を定め、各要素の高さ z_i から要素に与える流速 U_i を次式により定めた。

$$U_i = \left((\beta - \alpha) \frac{z_i}{h_D} + \alpha \right) U \quad (4)$$

なお、水深よりも上方にある要素は空気中にあるものとして、流体力を与えていない。

要素が水から受ける流体力は、各要素に与える流速 U_i をもとに、次式で表す。

$$\mathbf{f}_w^T = [\mathbf{f}_{wp} \quad \mathbf{f}_{wa}] \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_{wp} = \frac{1}{2} C_D \rho A_i |U_i - \dot{\mathbf{u}}_{pi}| (U_i - \dot{\mathbf{u}}_{pi}) + \mathbf{f}_B \quad (6)$$

$$\mathbf{f}_B^T = [0 \quad 0 \quad \rho V_i g] \quad (7)$$

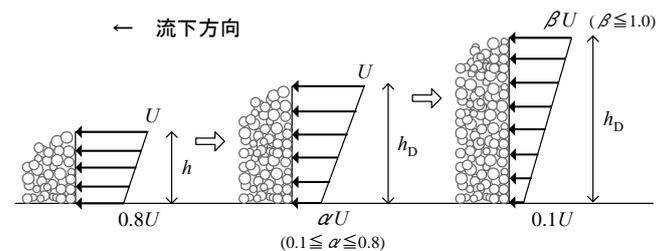
ここで、 \mathbf{f}_{wp} ：流体力の並進方向成分、 \mathbf{f}_{wa} ：流体力の回転方向成分、 \mathbf{f}_B ：要素にかかる浮力、 C_D ：抗力係数、 ρ ：水の密度、 A_i ：要素 i の流れ方向への投影面積、 V_i ：要素 i の体積、 g ：重力加速度である。なお、本解析においては回転方向に対する流体力は与えない($\mathbf{f}_{wa} = \mathbf{0}$)ものとした。

3. 模型実験概要⁴⁾

解析に先立ち、実験水路を用いて透過型砂防えん堤の土石流捕捉実験を行った。実験水路は、図-2に示す長さ4.35m、幅0.3m、高さ0.5mの矩形水路である。

実験に用いた土石流は、土砂試料に直径20、15、10、5mmの4種類の粒状石炭灰を、流木試料に直径10mm、長さ100mmの木製円柱を用いた。

実験に用いたえん堤模型は、 $\phi 18\text{mm}$ の木製円柱を用いて作製し、縦柱間隔を50mm($l_H/d_{max} = 2.5$)で固定し、



(a) 流下時 ($h=30\text{mm}$) (b) $h < h_D \leq 49\text{mm}$ (c) $49\text{mm} < h_D$

図-1 流体力モデル

中間の横梁間隔を 30, 40, 50mm ($l_v/d_{max} = 1.5, 2.0, 2.5$) に変更することができるものとした。

実験条件は表-1 に示すように、流木容積率と l_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を捕捉する割合を調べた。

4. 解析結果及び考察

4.1 流下状況

図-3 は、流木容積率 20% における実験と解析結果の流下状況を示したものである。一般に土石流に流木が混じると、流木が先端部に集中することが観測されているが、実験と解析の双方において同じ傾向を示していることがわかる。また、土石流の流下方向に対する長さについては、実験では約 1.1m に対し、解析は約 1.0m と、ほぼ同じであった。

4.2 捕捉状況

$l_v/d_{max} = 2.0$ における流木容積率 20% の捕捉状況について、実験および解析結果の一例を図-4 に示す。

まず、実験においては、透過部断面はほぼ流木のみにより閉塞されており、後続の土砂は捕捉された流木の堆積物により捕捉されていることがわかる。これに対し、解析においては、堆積高さが実験よりも高いものの、流木が前部に集中し、その後方に巨礫、中小礫と続いて捕捉されており、実験と近い状況となっていることがわかる。

4.3 捕捉率と流木容積率の関係

図-5 は、 $l_v/d_{max} = 2.0$ における捕捉率と流木容積率の関係について、実験および解析結果の捕捉率をプロットしたものである。

実験においては、流木容積率の増加に伴い、捕捉率が上昇する傾向があるが、解析においても捕捉率が実験よりやや高いものの、同様の傾向を示しており、実験結果を良好に再現できていることがわかる。

5. 結言

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 流木混じり土石流の流下状況について、おおむねシミュレートすることができた。
- (2) 流木混じり土石流の捕捉状況について、堆積高さが実験よりもやや高いものの、おおむねシミュレートすることができた。
- (3) 捕捉率と流木容積率の関係については、解析結果が実験結果をやや上回っているものの、流木容積率の変化が捕捉率に与える影響について傾向を捉えており、再現することができた。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部，国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防計画策定指針（土石流・流木対策編）及び同解説，平成 19 年 11 月
- 2) 葛西俊一郎，嶋丈示，中野博志，山口健太郎：鋼製透過型ダムの土石流捕捉形態，神戸製鋼技報，vol.49, No.2, p.65 - 68, 1999
- 3) 戸川隼人：有限要素法による振動解析，サイエンス社，pp.23-27, 1997

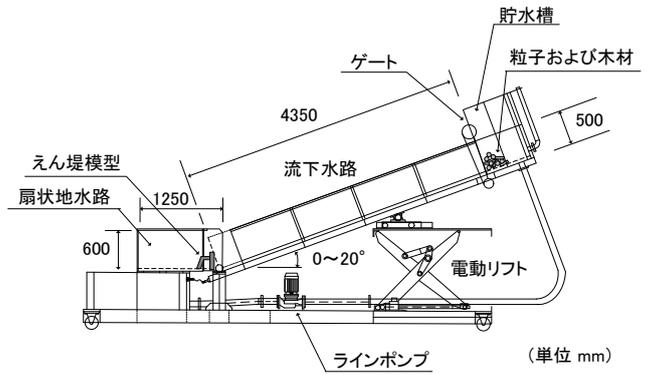


図-2 実験水路の概要

表-1 実験条件

l/d_{max} (横梁間隔)	流木容積率(%)	総ケース数
1.5(30mm)	0 (流木なし)	20
2.0(40mm)	5	
2.5(50mm)	10	
5.9(横梁なし)	15	
	20	

実験結果

解析結果

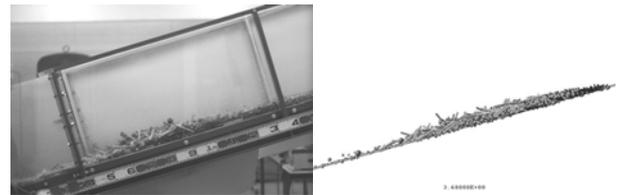


図-3 捕捉状況の一例

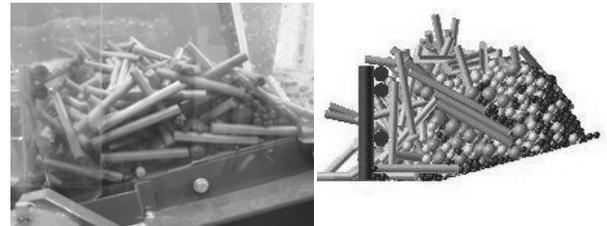


図-4 捕捉状況の一例

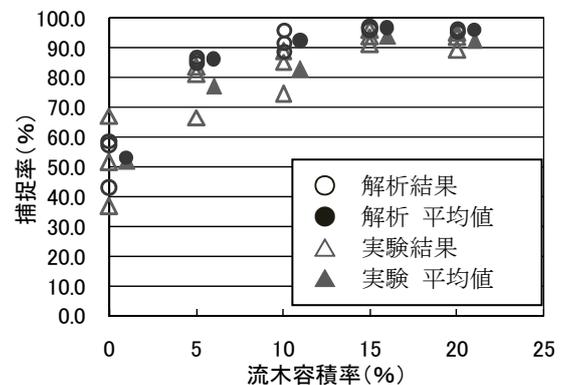


図-5 捕捉率～流木容積率関係