

## 個別要素法による流木混じり土石流の捕捉効果に関する解析的検討

防衛大学校 学生会員○瀧谷 一  
防衛大学校 学生会員 原木 大輔  
防衛大学校 正会員 香月 智

### 1. 緒 言

現在、透過型砂防えん堤の設計においては、透過部断面を構成する部材の純間隔( $\ell$ )と土石流中に含まれる巨礫の最大礫径( $d_{max}$ )の比( $\ell/d_{max}$ )を  $1.0 \leq \ell/d_{max} \leq 1.5$  とするよう推奨されている<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。

そこで本研究は、透過型砂防えん堤による流木混じり土石流の捕捉効果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。

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

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{Mg} + \mathbf{f}_W(t) \quad (2)$$

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<sup>3)</sup>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  $\mathbf{U}$  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  $\mathbf{U}_i$  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  $\alpha$ ,  $\beta$  を定め、各要素の高さ  $z_i$  から要素に与える流速  $\mathbf{U}_i$  を次式により定めた。

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

なお、水深よりも上方にある要素は空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  $\mathbf{U}_i$  をもとに、次式で表す。

$$\mathbf{f}_W^T = [\mathbf{f}_{Wp} \quad \mathbf{f}_{Wa}] \quad (5)$$

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

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 ( $\mathbf{f}_B^T = [0, 0, \rho V g]$ )、 $C_D$ ：抗力係数、 $\rho$ ：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。

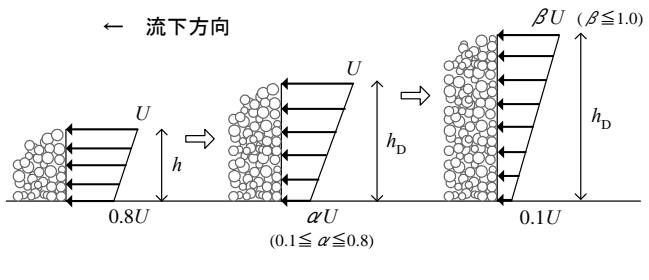


図-1 流体力モデル

キーワード 個別要素法、流木混じり土石流、透過型砂防えん堤

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 : g47049@nda.ac.jp

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

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、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、直径 20, 15, 10, 5mm の 4 種類の粒状石炭灰と、直径 10mm、長さ 100mm の木製円柱を混合して用いた。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 ( $\ell_H/d_{max} = 2.5$ ) で固定し、中間の横梁間隔を 30, 40, 50mm ( $\ell_V/d_{max} = 1.5, 2.0, 2.5$ ) 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  $\ell_V/d_{max}$  を変化させて、各ケース 3 回ずつを行い、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-2 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おり、実験でも同様の流下状況となっているが、解析結果についても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

$\ell_V/d_{max} = 2.0$ 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-3 に示す。

この図から、実験と解析の双方において、流下時に先端部を流下する流木により透過部断面が閉塞され、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。これにより、土石流中に流木が含まれると現行の設計基準<sup>1)</sup>よりも間隔の広い  $\ell_V/d_{max} = 2.0$  においても高い捕捉効果を示すことがわかる。

#### 4.3 捕捉率と流木容積率の関係

図-4 は、 $\ell_V/d_{max} = 2.0$ 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グラフである。

まず、流木容積率 0%と 5%を比較すると、土石流中に流木が含まれることにより捕捉率が明瞭に上昇することがわかる。また、流木容積率 15%以上では頭打ちになるものの、流木容積率の増加に伴い、捕捉率が上昇することがわかる。

### 5. 結 言

本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- (1) 流木混じり土石流の流下においては、流木が先頭部に集中しながら流下する様子を解析的に表現できた。
- (2) 流木混じり土石流の捕捉においては、流木による透過部断面の閉塞により土石流の捕捉効果が上昇することを解析的に表現できた。
- (3) 捕捉率と流木容積率の関係については、土石流中に

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

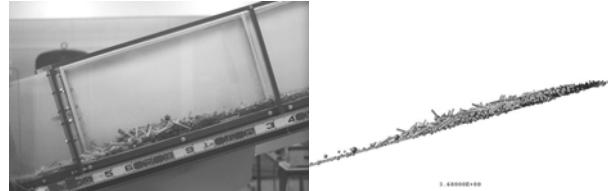


図-2 捕捉状況の一例

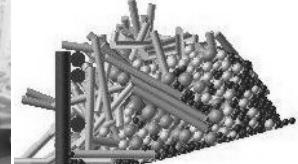


図-3 捕捉状況の一例

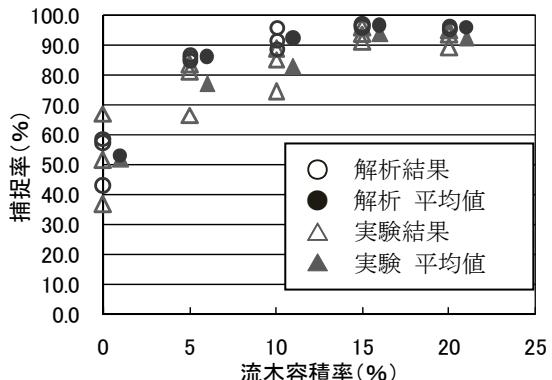


図-4 捕捉率～流木容積率関係

流木が含まれると捕捉率が明瞭に上昇し、流木容積率の増加が捕捉率の上昇と相関性があることを解析的に表現できた。

### 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