

三次元個別要素法による流木と礫混合土石流の捕捉解析

防衛大学校 学生会員 金子 鉄兵, 堀口 俊行, 澁谷 一
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(ℓ)と土石流中に含まれる巨礫の最大礫径(d_{95})の比(ℓ/d_{95})を 1.0 ℓ/d_{95} 1.5 とするよう推奨されている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, 透過型砂防えん堤による流木混じりの土石流の捕捉性能評価に資する解析法として, 個別要素法を用いて, 模型実験の解析を行い, その適用性の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³⁾

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) , $(\ddot{\cdot})$: 時間に関する 1 次微分および 2 次微分である.

なお, 減衰項については, 比例減衰モデル⁴⁾の構造減衰項のみを取り扱うものとする.

2.2 流体力モデル³⁾

本来, 流体力は水の流れと流木の運動との相互作用により変化する流れを解析し, その流体力を求めて, 作用させる方法が望ましい. しかし, その趣旨に沿った流木捕捉率に影響する流体運動を解析するには, 高度で膨大な計算量を必要となる. よって, 本解析では, このような複雑な流れを解くことなく流下付近を一意に定めた解析を行うことにする. そこで, 円柱形要素に作用する流体力, 流下時の流速分布モデルの基本式は以下のようにする. そこで, 円柱形要素が受ける流体力は, 円柱の中心軸上にある5点を代表点(積分点)とし, 各代表点における速度と流水の速度との相対速度からそれぞれ流体力を算出し, Gaussの積分公式を用いて積分することにより, 円柱形要素の重心点に作用する流体力として評価した. 次に, 要素*i*の局所座標系に

おける, 積分点*j*に作用する流体力 $\mathbf{f}_{w_{ij}}$ は, 後述の流速分布モデルを用いて算定した流速 $\mathbf{U}_{ij}(\mathbf{U}_{ij}^T = [U_{xij}, U_{yij}, U_{zij}])$ をもとに, 次式により表す.

$$\mathbf{f}_{w_{ij}} = \frac{1}{2} C_D \rho w_j A_{ij} \begin{bmatrix} \dot{u}_{Rxij} & \dot{u}_{Rxij} \\ \dot{u}_{Ryij} & \dot{u}_{Ryij} \\ \dot{u}_{Rzij} & \dot{u}_{Rzij} \end{bmatrix} + \mathbf{f}_{Bij} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{Rxij} \\ \dot{u}_{Ryij} \\ \dot{u}_{Rzij} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_{ij} - \left(\dot{\mathbf{u}}_{pi} + \begin{bmatrix} 0 \\ l_{Gij} \dot{u}_{azi} \\ -l_{Gij} \dot{u}_{ayi} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_{Bij} = \rho g w_j V_i \quad (5)$$

ここで, C_D : 抗力係数, ρ : 水の密度, w_j : 積分点*j*の重み, A_{ij} : 要素*i*の積分点*j*における流れ方向への投影面積, \dot{u}_{Rxij} , \dot{u}_{Ryij} , \dot{u}_{Rzij} : それぞれ要素*i*の局所座標系における積分点*j*の速度と流速との相対速度ベクトルの*x*, *y*, *z*軸方向成分, $\dot{\mathbf{u}}_{pi}$: 要素*i*の局所座標系における並進方向速度ベクトル, \dot{u}_{ayi} , \dot{u}_{azi} : それぞれ要素*i*の局所座標系における*y*, *z*軸回りの角速度, l_{Gij} : 要素中心を0とする円柱形要素の中心軸上における積分点*j*の位置 ($-l_i/2 \leq l_{Gij} \leq l_i/2$), l_i : 要素*i*の長さ, \mathbf{f}_{Bij} : 要素*i*の積分点*j*における浮力ベクトル, V_i : 要素*i*の体積, g : 重力加速度である.

なお, 図-1 に示すように流体力の流速分布モデルは, 流下方向の鉛直方向(*Z'*軸方向)の分布に対し, 基準となる初期流速ベクトル \mathbf{U}_0 と初期水深 h_0 を与えたとき, 水面上の流速を \mathbf{U}_0 で, 水路床上の流速をその8割の速度となるよう, 水深に応じて線形的に低下させ, 各要素の積分点の高さ z_{ij} に応じて \mathbf{U}_{ij} を求めた.

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{ij} = 0.2 \frac{z_{ij}}{h_0} \mathbf{U}_0 + 0.8 \mathbf{U}_0 & (0 \leq z_{ij} \leq h_0) \\ \mathbf{U}_{ij} = 0 & (z_{ij} > h_0) \end{cases} \quad (6)$$

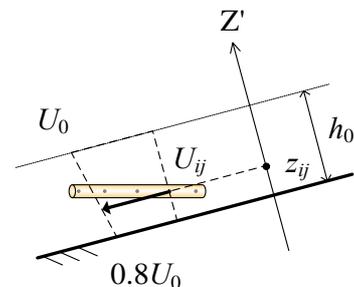


図-1 流下時の流速分布モデル

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(内 3518)

3. 模型実験概要

実験は、水路上流に供試体を配置し、約 4.4 /s の流量を供給しつつ流下させた。表-1 に実験ケースを示す。勾配、間隔比および流木容積率を変化させて、計 17 ケースの実験を行った。

ここでは、実際の土石流においては流木の容積率が 20% 前後の値を示すことが報告⁵⁾されていることを参考に、実験の流木容積率は 20, 10% と、比較のため流木を含めない場合(0%)の 3 種類とした。ここで、流木容積率 $K_w(\%)$ とは次式で表される。

$$K_w = \frac{V_t}{V_g + V_t} \times 100 \quad (7)$$

ここで、 V_g : 礫モデルの容積、 V_t : 流木モデルの容積。

4. 解析結果及び考察

4.1 流下状況

流木容積率 10% における実験と解析結果の流下状況を図-2 示す。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、実験と解析結果を比較すると、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 1.5 ~ 2.0m に対し、解析は約 1.0 ~ 1.7m と、やや短くなっている。

4.2 捕捉状況

図-3 に、間隔比 $W/d_{95} = 1.0$ における流木容積率 10% の捕捉状況について、実験および解析結果の一例を示す。これより、左岸側から観察される堆積形状までは再現できていないものの、透過部断面が主として流木で閉塞し、径の小さい礫がその上流側に堆積している様子は再現できている。

4.3 捕捉率と流木容積率の関係

図-4 に、実験および解析結果における流木混じり土石流の捕捉率 P_c と流木容積率関係 K_w を示す。この図から、実験と解析結果を比較すると、同様な傾向を示し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) 簡易流速分布モデルでは、砂防えん堤透過部を閉鎖する要素の割合や状況を概ね表現できる。
- (3) 流木容積率や間隔比が土石流全体の捕捉率に与える影響について、その傾向を良くシミュレートできることを示した。

なお、堆積形状や流下状況において実験を再現しておらず、今後の検討が必要である。

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: 土石流・流木対策設計技術指針及び同解説, 2007.11
- 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,

表-1 実験ケース

勾配 θ (°)	純間隔 W	流木本数(本) (流木容積率 K_w)	ケース数
10	1.0× d_{95} (27mm)	0 (0%)	8
12	1.5× d_{95} (40.5mm)	270 (10%)	
15	1.0× d_{95} (27mm)	0 (0%)	9
	1.5× d_{95} (40.5mm)	270 (10%)	
	2.0× d_{95} (54mm)	608 (20%)	



(a) 実験 (b) 解析

図-2 流下状況の一例

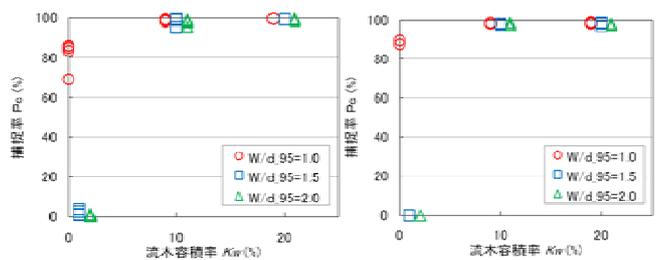


(a) 実験, 左岸側 (b) 解析, 左岸側



(c) 実験, 下流側 (d) 解析, 下流側

図-3 捕捉状況の一例



(a) 実験結果 (b) 解析結果

図-4 捕捉率 ~ 流木容積率関係

No.2, p.65-68, 1999.11

- 3) 澁谷一, 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), Vol.67, No.2, (応用力学論文集 Vol.14), pp.I_323-L_324, 2011.9
- 4) 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, 1997.1
- 5) 小山内信智, 平松晋也, 石川芳治: 流木対策施設の効果と維持管理体制の現状, 砂防学会誌(新砂防), vol.50, No.6, pp.48-51, 1998.3