

流木捕捉工の個別要素法による捕捉解析

防衛大学校 ○渋谷 一, 香月 智
砂防鋼構造物研究会 大隅 久, 石川信隆

1 緒言

流木捕捉工の設計においては、捕捉工の純間隔(W)と最大流木長(l_{\max})の比(W/l_{\max})が 1/2 以下となるよう設計することと指針¹⁾により定められている。しかし、その捕捉メカニズムについての研究はあまり見当たらず、よって基準の背景となるメカニズムを考察できない現状にある。

そこで本研究は、流木捕捉工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シミュレーション解析を行い、別途行った模型実験²⁾と比較し、その適用性を検討したものである。

2 解析手法

2.1 解析手法の概要

本解析では、個別要素法に円柱形要素を導入³⁾することで流木および捕捉工柱材をモデル化し、水路を三角形の平面要素を用いてモデル化した。水の流れは次の流体力モデルを用いて表現した。本解析における運動方程式の解法や接触判定の要領は、既報³⁾のとおりである。表-1 に解析で用いた主要なパラメータを示す。

2.2 流体力モデル

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、円柱形要素が流水から受ける流体力は、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-Legendre 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。すなわち、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}_{Wij} 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。

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

ここで、 C_D : 抗力係数、 ρ : 水の密度、 A_{ij} : 積分点 j の重み w_j をかけた要素 i の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 の積分点 j における流水の速度 \mathbf{U}_{ij} との相対速度ベクトルの x, y, z 軸方向成分、 \mathbf{f}_{Bij} : 要素 i の積分点 j に作用する浮力。

2.3 流速分布モデル

流木の捕捉時においては、捕捉工および捕捉された流木により堰上げが生じることや、射流から常流に移行することによる乱れが発生することから、次の手順により流速を与えるものとした。

表-1 解析パラメータ

項目	値	
流水	初期流速 U_0	0.8 m/s
	初期水深 h_0	8 mm
	抗力係数 C_D	1.0
要素間ばね	法線方向ばね定数 K_n	1.0×10^6 N/m
	接線方向ばね定数 K_s	1.5×10^5 N/m
	減衰定数 h	0.2
	粘着力 c	0 N
計算条件	摩擦角 $\tan\phi$	0.404
	時間刻み Δt	1.0×10^{-7} s

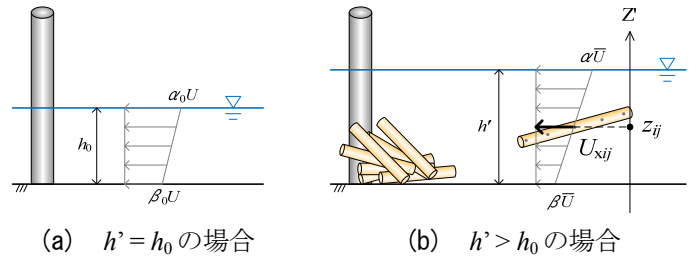


図-1 流速分布モデルの概要

まず、流木捕捉による水深 h' は次式により算定する。

$$h' = \frac{H - h_0}{1.3} \left(\frac{\sum A_{di}}{A_0} - 0.2 \right) + h_0 \quad (2)$$

ここで、 H : 捕捉工高さ、 h_0 : 初期水深、 $\sum A_{di}$: 捕捉された流木の投影面積の総和、 A_0 : 流路断面積 ($A_0 = WH$)。

次に、流水の乱れや波打ちを考慮し、堰上げ水深 h_s を算定した。堰上げ水深 h_s は正規分布に従うものとし、 $[h', h' + \Delta h]$ において平均値が $h' + \Delta h/2$ で標準偏差が $\Delta h/4$ として、乱数を用いて定めることとした。ここで、せき上げ高 Δh は、指針¹⁾に示されている堰上げ水位の計算式を元に、概略値として次式より算定した。

$$\Delta h = \frac{U_0^2}{4g} \quad (3)$$

ここで、 U_0 : 初期流速。

要素の各積分点に作用する流速 \mathbf{U}_{ij} の x 軸方向(流下方向)成分 U_{xij} は、図-1 に示す流速分布モデルを用いて、次式により与えるものとした。

$$U_{xij} = \frac{z_{ij}}{h'} (\alpha - \beta) \bar{U} + \beta \bar{U} \quad (4)$$

ここで、 z_{ij} : 積分点の水路床からの高さ、 \bar{U} : 水深 h' の変化に対応して流量保存より求まる流速、 α, β : 流速分布を決める係数であり、図-1 に示すように、流量保存に基づき、次式により算定した。

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{h_0}{h'} \right) (\alpha_0 + \beta_0) \quad (5)$$

$$\beta = \beta_0 - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{h_0}{h'} \right) (\alpha_0 + \beta_0) \quad (6)$$

実験における捕捉の状況を観察すると、水流に乱れが生じ、流木塊が上下に動揺する。このため、流下方向の鉛直方向に対しランダムな乱れ成分ベクトルを与えることとした。すなわち、流速 U_{ij} のうち z 軸方向（流下方向の鉛直方向）成分 U_{zij} は、正規分布に従うものとし、 $[0.3U_{xij}, -0.3U_{xij}]$ において平均値が $0.15U_{xij}$ で標準偏差が $0.3U_{xij}/4$ として、乱数を用いて定めることとした。なお、流速 U_{ij} の y 軸方向（流下方向の河川横断方向）成分 U_{yij} については、実験において横断方向の動きがほとんど見られなかったことから、 $U_{yij} = 0$ として扱うこととした。また、水深 h' が、限界水深 h_c 以下の範囲において乱れを与え、 $h' > h_c$ においては乱れを与えないこととした。

2.4 解析ケース

解析ケースは、模型実験²⁾と同じく、流木直径は3mmとして、間隙最大流木長比 $W/\ell_{max} = 1/5, 1/3, 1/2, 3/4$ について、それぞれ流木長を6, 12, 18cmと変化させて、捕捉シミュレーションを行った。

3 シミュレーション結果

3.1 捕捉状況

図-2に、 $\ell = 12\text{cm}$, $W/\ell_{max} = 1/2, 3/4$ における解析結果の捕捉状況を、実験結果と比較して示す。解析結果は、実験と同様に W/ℓ_{max} の増加に伴い捕捉される本数が減少している。また、流木の堆積した形状や流木同士の絡み合いを全体的に良く表現できている。

3.2 捕捉率と間隙最大流木長比 W/ℓ_{max} の関係

図-3に、捕捉率 $\sim W/\ell_{max}$ 関係について、実験結果と解析結果をそれぞれ示す。これより同じケースでの捕捉率は概ね5~30ポイント程度の差異があるが、実験結果と同様に、概して W/ℓ_{max} の増大に伴って捕捉率の低下傾向がある。また、流木長 $\ell = 12$ および 18cm の捕捉率と W/ℓ_{max} の関係に比して、 $\ell = 6\text{cm}$ では全体的に低捕捉率の傾向となる様子も再現できている。

また、平均値で比較すると、実験結果との差が大きいところでも、 $\ell_{max} = 18\text{cm}$ で $W/\ell_{max} = 1/2$ における15.0%程度であり、全体的に良好にシミュレートできている。

4 結言

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 流速分布モデルを適切に表現することで、流木捕捉時の流木の複雑な動きや絡み合いを、概ね再現することができた。
- (2) 捕捉率 $\sim W/\ell_{max}$ 関係について、流木長および間隙最大流木長比の変化に伴う捕捉率の変化を概ね良好に再現することができた。

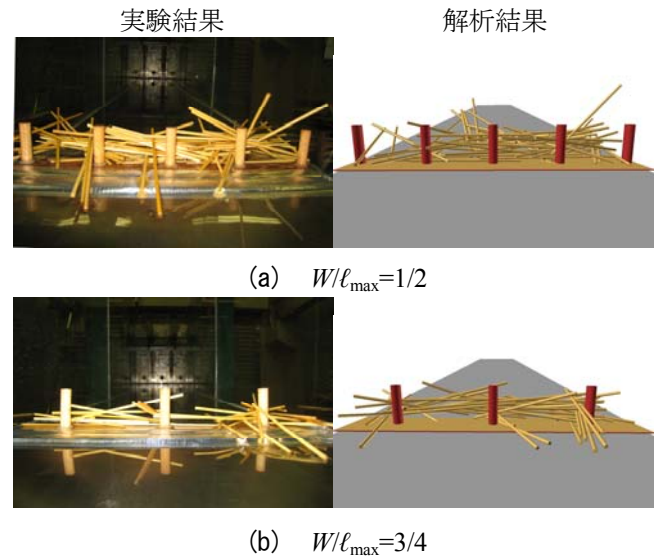
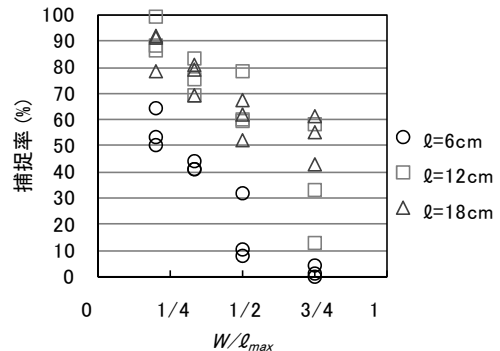
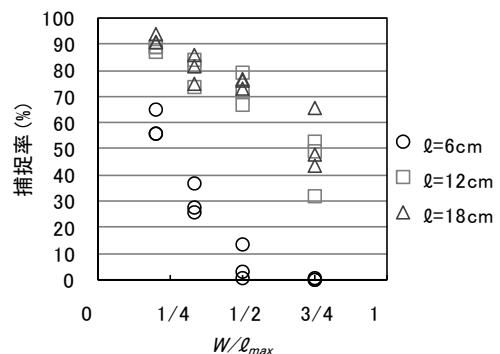


図-2 捕捉状況の比較 ($\ell_{max} = 12\text{cm}$)



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図-3 捕捉率 $\sim W/\ell_{max}$ 関係

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) 西田政隆, 渋谷一, 香月智, 大隅久: 流木捕捉工による流木長の混在する流木群の捕捉性能に関する実験的研究, 第36回土木学会関東支部技術発表会講演概要集, I-59, 2009.3
- 3) 渋谷一, 原木大輔, 香月智: 3次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, 土木学会, Vol.12, pp.449-460, 2009.8