

3D-DEMによる流木捕捉工の捕捉シミュレーション解析

3D-DEM Simulation on trap performance of drift wood capturing structure

渋谷 一*¹ 香月 智*²
Hajime Shibuya Satoshi Katsuki
大隅 久*³ 石川 信隆*³
Hisashi Ohsumi Nobutaka Ishikawa

Abstract

This paper proposes an application of the distinct element method on damming up performance of drift wood capturing structures subjected to woody debris. In order to simulate the performance of drift woods, a column shape element is developed. The debris flow experiments, with various combinations of the length of drift wood and the interval of vertical columns of the structure, are carried out in advance. Those results are simulated by proposed method and defined a flow velocity model in this study. The flow velocity model considered the turbulence of water flow occurred in this experiment. The simulation results by using flow velocity model that ignores the turbulence effect cannot express the experimental results quantitatively. However, the simulation results by using flow velocity model that includes the turbulence model show good agreement from the view point of debris capturing mechanism and debris flow capturing probability.

Key Words : drift wood, DEM, cylindrical element, drift wood capturing structure

1. 緒言

わが国の山々の多くは人工林で覆われているが、近年の過疎化により森林管理が困難になり、山地荒廃が拡大している。このため、台風などの強風により大量の風倒木が産出される。これらは豪雨時に流木として土砂とともに大量に河川に流出し、橋脚に堰き止められることにより橋梁を破壊したり、不要な水位上昇を招き氾濫したり、家屋に衝突して破壊するなど、様々な災害を引き起こす要因となっている^{1),2)}。

流木被害を抑制するための対策施設としては、透過型砂防堰堤や流木捕捉工などがあり、これらの設計の考え方は、国土交通省の土石流・流木対策設計技術指針³⁾(以下、指針と呼ぶ)に定められている。その中で流木捕捉工は、写真-1に示すような主として鋼管製の構造物であり、流木のみを捕捉を目的として、掃流区間に設置される構造物である。

流木対策施設に関する既往研究としては、不透過型砂防堰堤の堤体や副堤上に設置される流木止スクリーンによる流木捕捉に関する研究^{4),5)}などが多く見受けられる。しかし、掃流区間において単独設置される流木捕捉工の研究については少なく、縦部材間隔または横部材間隔と流木長との比が、流木の捕捉に与える影響について考察した松村らの研究⁶⁾以降あまりなされておらず、その捕捉メカニズムについては明らかにされていない。



写真-1 河床上に単独設置された流木捕捉工



写真-2 流木捕捉工による流木の捕捉事例

一方、流木災害に対する解析技術に関する研究も進んでいる。例えば、中川ら^{7),8)}は、平面2次元場において、流れ場をオイラー的に解析しつつ、流木の運動をラグランジュ的に追跡することで、流木の流動過程について検討している。また後藤ら⁹⁾は、MPS法¹⁰⁾に剛体連結モデル¹¹⁾を組み込んだ手法により、鉛直2次元場における橋梁による流木の捕捉過程についてシミュレーションを行

*1 学生会員 防衛大学校理工学研究科 Graduate school of science and engineering, National Defense Academy (ed10006@nda.ac.jp)

*2 正会員 防衛大学校システム工学群建設環境工学科 Department of Civil and Environmental Engineering, School of Systems Engineering, National Defense Academy *3 正会員 砂防鋼構造物研究会 Research Association for Steel Sabo Structures

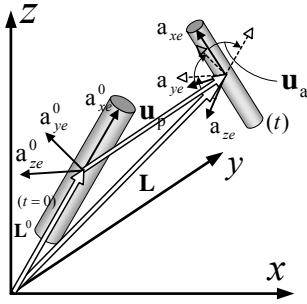


図-1 要素の位置と変位、姿勢

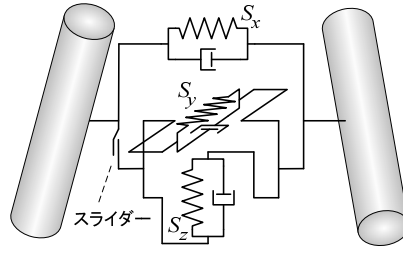


図-2 要素間ばね

表-1 積分点 j の位置と重み
(5点積分の場合)²⁰⁾

j	位置 l_{Gij}	重み w_{Gj}
1	$-0.9061798l_i/2$	0.1184634
2	$-0.5384693l_i/2$	0.2393143
3	0	0.2844444
4	$0.5384693l_i/2$	0.2393143
5	$0.9061798l_i/2$	0.1184634

っている。清水らは、個別要素法¹²⁾を用いて、河道内における流木の流動・集積過程の表現を試みる¹³⁾とともに、枝付き形状の流木モデルについても検討を行っている¹⁴⁾。しかし、これらの研究は2次元計算であるため、写真-2で見られる流木の立体的な捕捉現象を再現できない。すなわち、流木捕捉工の解析には3次元の解析手法が不可欠と考えられるが、後藤ら¹⁵⁾の、流木の挙動を3次元的に表現した橋梁の閉塞に関する研究が見当たらないのみである。しかし、既往研究の流木モデルは球要素を連結して棒状要素とするものであるが、球の凹凸により捕捉工と流木、もしくは流木と流木とのすべり抵抗が過大に評価される問題がある。

そこで本研究は、流木捕捉工の性能評価に資する解析法の開発をするために、流木を円柱形要素によってモデル化した個別要素法^{16),17)}を用いて、流木捕捉工周辺における流木の流れおよび捕捉工閉塞挙動を解析したものである。この際、捕捉工周りの水流モデルの変化が捕捉率に与える影響について検討し、解析の妥当性検証に資する模型実験¹⁸⁾と比較することで実現象の表現力を高め、捕捉効果のシミュレーション解析を行ったものである。

2. 解析手法

本解析では、流木および捕捉工柱材を円柱形要素、水路を三角形の平面要素を用いてモデル化し、水の流れは円柱周りの流速分布モデルを用いて表現した。

2.1 運動方程式

全要素の運動方程式は、次のように表される¹⁶⁾。

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

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

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{u} : 変位ベクトル、 \mathbf{f} : 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¹⁹⁾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。

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

式(3)の運動方程式を中心差分法を用いて解く。ただし、速度項は後進差分とした。

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t+\Delta t) - 2\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t-\Delta t))}{\Delta t^2} \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-\Delta t))}{\Delta t} \quad (5)$$

以上より、時間 $(t+\Delta t)$ における変位 $\mathbf{u}(t+\Delta t)$ は次式により求まる。

$$\mathbf{u}(t+\Delta t) = \mathbf{M}^{-1} \{ \mathbf{f}(t) - \sum \mathbf{f}_D(\dot{\mathbf{u}}(t)) - \sum \mathbf{f}_K(\mathbf{u}(t)) \} \Delta t^2 + 2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-\Delta t) \quad (6)$$

2.2 剛体の変位と姿勢¹⁶⁾

3次元空間において、個々の要素は図-1に示すように、計算開始時からの変位・回転角によって要素の位置、姿勢が変化する。この要素の位置と変位、姿勢を次のように表す。

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}^0 + \mathbf{u}_p \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^0 + \Delta\mathbf{A}(\mathbf{u}_a) \quad (8)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p \\ \mathbf{u}_a \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{L} : 要素重心の全体座標系に対する位置ベクトル、 \mathbf{L}^0 : 初期の位置ベクトル、 \mathbf{u}_p : 並進方向の変位ベクトル ($\mathbf{u}_p^T = [u_{px}, u_{py}, u_{pz}]$)、 \mathbf{A} : 要素の重心を中心とする全体座標系への回転角を表す姿勢マトリクス、 \mathbf{A}^0 : 初期の姿勢マトリクス、 $\Delta\mathbf{A}$: 姿勢マトリクスの変化量、 \mathbf{u}_a : 回転角ベクトル ($\mathbf{u}_a^T = [u_{ax}, u_{ay}, u_{az}]$) である。

2.3 要素間ばねとばね力¹⁶⁾

要素間ばねは、図-2に示すように、ばねの姿勢によって定まる局所座標系(法線方向: x_s , 接線方向: y_s, z_s)に対応した3次元のばねであり、接線方向ばねにはモール・クーロンの破壊基準により塑性的に滑るスライダを設けている。またそれぞれに並行したダッシュポットを設置している。このダッシュポットにより生じる力 \mathbf{f}_D

については、以下で述べるばね力 \mathbf{f}_k の算定と同様の手続きにより求めることができる。

図-2 の局所座標系におけるばね力と要素に作用する力のつり合い式は次式によって求まる。

$$\mathbf{f}_k = \mathbf{T}_G \mathbf{C}^T \mathbf{T}_s \mathbf{S} \quad (10)$$

ここで、 \mathbf{C}^T ：つり合いマトリクス、 \mathbf{S} ：要素間ばねの局所の姿勢マトリクス \mathbf{A}_s に従う内力ベクトル、 \mathbf{T}_G ：要素の局所の姿勢マトリクス \mathbf{A} に従う局所座標系から全体座標系へ変換する座標変換マトリクス、 \mathbf{T}_s ：要素間ばねの姿勢マトリクス \mathbf{A}_s に従う局所座標系から要素の局所の姿勢マトリクス \mathbf{A} に従う局所座標系へ変換する座標変換マトリクスである。

要素間ばねの内力は、次式によって求まる。

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{S}(t - \Delta t) + \mathbf{k} \Delta \mathbf{q}(t) \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{S}(t)$ ：時刻 t における要素間ばねの局所の姿勢マトリクス \mathbf{A}_s に従う内力ベクトル、 $\Delta \mathbf{q}(t)$ ： $\mathbf{S}(t)$ ベクトルに対応する要素間ばねの局所の姿勢マトリクス \mathbf{A}_s に従う Δt 間の増分変形量ベクトル、 \mathbf{k} ：増分間の剛性マトリクスである。

変形適合条件式は次式によって表わされる。

$$\Delta \mathbf{q}(t) = \sum_{i=1}^2 \mathbf{T}_s^T \mathbf{C}_i \mathbf{T}_{G_i}^T \Delta \mathbf{u}_i(t) \quad (12)$$

ここで、 \mathbf{C}_i ：変形適合マトリクス、 $\Delta \mathbf{u}_i$ ：全体座標系における要素 i の Δt 間の増分変位ベクトルである。

2.4 接触判定

個別要素法では接触力の計算のために、各要素の接触状態を計算する必要がある。ここでは、新たに円柱形要素を導入することにより円柱形要素側面、円柱形要素底面および三角形要素との各接触状態を考慮する必要があるが、その判定要領については既報¹⁷⁾のとおりである。

3. 流体力モデル

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、これを作用させることが望ましい。ただしその場合、趣旨に沿った流体運動を解析するには絡まりあう流木の中を通り抜ける流体を解く必要があり、高度な解析となるため膨大な計算量を要する。そこで、計算負担を軽減するため、以下のように流木群周辺の流れを流下時と捕捉時において簡略化したモデルにしたうえで各要素に流体力を与えるものとした。

3.1 円柱形要素に作用する流体力の基本式

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 の積分公式²⁰⁾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。

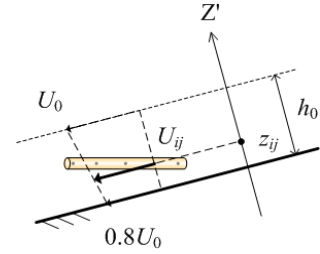


図-3 流下時の流速分布モデル

まず、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。

$$\mathbf{f}_{Wij} = \frac{1}{2} C_D \rho w_j A_{ij} \begin{bmatrix} \dot{u}_{Rxij} \dot{u}_{Rxij} \\ \dot{u}_{Ryij} \dot{u}_{Ryij} \\ \dot{u}_{Rzij} \dot{u}_{Rzij} \end{bmatrix} + \mathbf{f}_{Bij} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{Rxij} \\ \dot{u}_{Ryij} \\ \dot{u}_{Rzij} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_{ij} - \left(\dot{\mathbf{u}}_{pi} + \begin{bmatrix} 0 \\ l_{Gij} \dot{u}_{azi} \\ -l_{Gij} \dot{u}_{ayi} \end{bmatrix} \right) \quad (14)$$

$$|\mathbf{f}_{Bij}| = \rho g w_j V_{ij} \quad (15)$$

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_{ij} ：要素 i の積分点 j における体積、 g ：重力加速度である。

なお、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_{Gij} と重み w_{Gj} について、本解析で用いた5点積分の場合の値は、表-1のとおりである。

以上より、要素 i の局所座標系における、重心点に作用する流体力 \mathbf{f}_{Wi} は、次式により表される。

$$\mathbf{f}_{Wi} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_{Gij} \\ 0 & l_{Gij} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{f}_{Wij} \quad (16)$$

3.2 流下時の流速分布モデル

図-3に示すように、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。

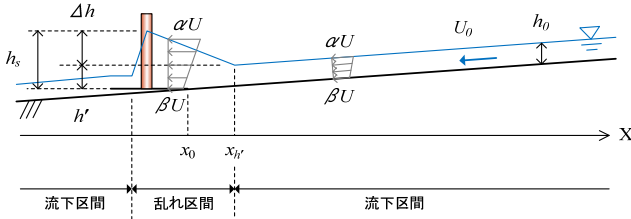


図-4 捕捉時の流速分布モデルの概要

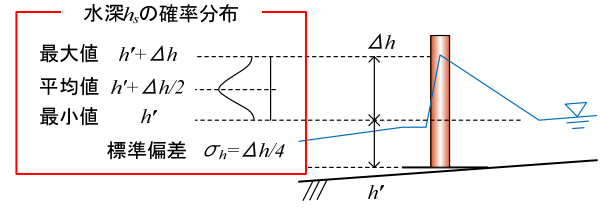


図-5 堰上げ水深 h_s の確率分布

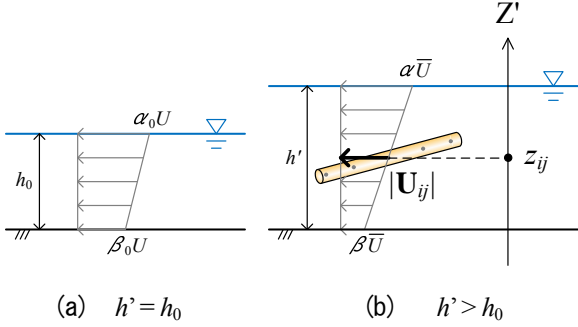


図-6 捕捉時の流速分布モデル

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{ij} = 0.2 \frac{z_{ij}}{h_0} \mathbf{U}_0 + 0.8 \mathbf{U}_0 & (0 \leq z_{ij} \leq h_0) \\ \mathbf{U}_{ij} = 0 & (z_{ij} > h_0) \end{cases} \quad (17)$$

3.3 捕捉工周辺の流速分布モデル

図-4 に捕捉工周辺の流速分布モデルの概要を示す。ここでは、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、流速が急激に低下することによる乱れが発生することから、以下の手順により流速を与えるものとした。

- 1) 流木捕捉による基本水深 h' の算定
- 2) 堰上げ水深 h_s の算定
- 3) 流木に作用する基準流速ベクトルの算定
- 4) 捕捉工回避流れの流速ベクトルの算定
- 5) 流速の乱れ成分ベクトルの算定

以下、上記手順に従い、それぞれの算定要領について述べる。

3.3.1 流木捕捉に伴う基本水深 h' の算定

流木の捕捉により流水の透過断面積が減少すると、流量が保存されるために、捕捉された流木量に応じて水深を変化させることとした。

本研究では、流水の透過断面積の減少は捕捉された流木の投影面積の総和によって表わすものとした。その際、簡略化のため重なりを許して積算するものとし、投影面積の総和が流路断面積 A_0 の 1.5 倍となった時に、捕捉工高さまで水位が上がるものと仮定し、それ以上の捕捉流木量では一定に保たれるものとした。また、流木の投影面積が $0.2A_0$ 以下においては水位変化が起こらないものとした。すなわち、流木捕捉による基本水深 h' は次式により算定する。

$$\begin{cases} h' = h_0 & (\sum A_{di}/A_0 < 0.2) \\ h' = \frac{H - h_0}{1.3} \left(\frac{\sum A_{di}}{A_0} - 0.2 \right) + h_0 & (0.2 \leq \sum A_{di}/A_0 \leq 1.5) \\ h' = H & (1.5 < \sum A_{di}/A_0) \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 H : 捕捉工高さ、 $\sum A_{di}$: 捕捉された流木の投影面積の総和、 A_0 : 水路の断面積 ($A_0 = BH$)、 B : 水路幅である。

また、 h' の変化に伴い、捕捉工付近の基準流速 \bar{U} を、流量の保存則に基づき次式により与えた。

$$\bar{U} = \frac{h_0}{h'} U_0 \quad (19)$$

なお、捕捉された流木とは、図-4 中における乱れの開始点 x_0 と捕捉工の間にある流木のことであり、 x_r は次式により算定する。

$$x_r = \frac{h' - h_0}{\tan \theta} + x_0 \quad (20)$$

ここで、 θ : 水路勾配、 x_0 : 勾配変曲点の x 座標である。

3.3.2 堰上げ水深 h_s の算定

ここでは、指針に示されている堰上げ水位の計算式を用いて、せき上げ高 Δh を算定するものとした。

$$\Delta h = k_m \sin \theta_m \left(\frac{D}{W} \right) \frac{U_h^2}{2g} \quad (21)$$

ここで、 k_m : 断面係数 (鋼管で $k_m \doteq 2.0$)、 θ_m : 縦部材の下流河床面に対する傾斜角、 D : 縦部材の直径、 W : 縦部材の純間隔、 U_h : 上流側の流速である。

実験観察によると、捕捉工周辺の水面高は場所と時間で激しく変化する。この流水の乱れや波打ちを考慮し、堰上げ水深 h_s は図-5 に示すように正規分布に従う確率変数と仮定し、基本水深 h' より上部において平均値が $h' + \Delta h/2$ で標準偏差を $\Delta h/4$ とする乱数を用いて与えた。

3.3.3 流木に作用する基準流速ベクトル

要素の各積分点に作用する流速ベクトル \mathbf{U}_{ij} の大きさ $|\mathbf{U}_{ij}|$ は、図-6 に示す流速分布モデルにより与えるものとした。

まず、図-6(a) に示す $h' = h_0$ となる場所では、流下時の流速分布モデルと同じである。そのうえで基本水深 h' の増加に伴って、図-6(b) に示す α 、 β を次式により算定した。

$$\alpha = \alpha_0 - \gamma \quad (22)$$

$$\beta = \beta_0 - 2\gamma \quad (23)$$

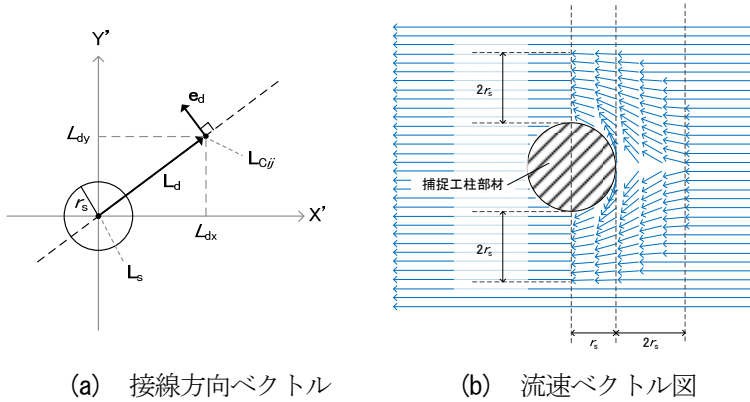


図-7 捕捉工付近の流速分布

ここで、 α ：基準流速に対する水面での変化係数、 β ：同様に基準流速に対する河床での変化係数、 $\alpha_0=1.0$ 、 $\beta_0=0.8$ である。係数 γ は、流量の保存則に基づき、次式により与えるものとした。

$$\gamma = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{h_0}{h'} \right) (\alpha_0 + \beta_0) \quad (24)$$

以上の係数 α 、 β を用いて、要素 i の積分点 j における流速の大きさ $|\mathbf{U}_{ij}|$ は、式(19)で求めた基準流速 \bar{U} と積分点の水路床からの高さ z_{ij} により、次式で算定する。

$$|\mathbf{U}_{ij}| = \frac{z_{ij}}{h'} (\alpha - \beta) \bar{U} + \beta \bar{U} \quad (25)$$

3.3.4 捕捉工回避流れの流速ベクトルの算定

実験では捕捉工付近において柱部材を避ける横断方向の流れが見られたことから、図-7に示すような捕捉工柱を回避する流速成分が生起するものとした。すなわち、次式を用いて流速ベクトル \mathbf{U}_{ij} の x, y 軸方向(流下方向および流下方向の河川横断方向)成分 U_{xij}, U_{yij} を算定した。

$$\mathbf{L}_d = \mathbf{L}_{Cij} - \mathbf{L}_s \quad (26)$$

$$\mathbf{e}_d = \begin{bmatrix} e_{dx} \\ e_{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{|L_{dy}|}{|\mathbf{L}_d|} \\ \text{sign}(L_{dy}) \frac{|L_{dx}|}{|\mathbf{L}_d|} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} U_{xij} \\ U_{yij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - (\eta e_{dy})^2} |\mathbf{U}_{ij}| \\ \eta e_{dy} |\mathbf{U}_{ij}| \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{2r_s} (|\mathbf{L}_d| - r_s) \quad (\text{ただし}, r_s \leq |\mathbf{L}_d| \leq 3r_s) \quad (29)$$

ここで、 \mathbf{L}_{Cij} ：要素 i の積分点 j の座標 ($\mathbf{L}_{Cij}^T = [L_{Cxij}, L_{Cyij}]$)、 \mathbf{L}_s ：捕捉工柱部材の中心座標 ($\mathbf{L}_s^T = [L_{sx}, L_{sy}]$)、 \mathbf{L}_d ：捕捉工柱部材の中心座標から見た要素 i の積分点 j の相対座標 ($\mathbf{L}_d^T = [L_{dx}, L_{dy}]$)、 L_{dx}, L_{dy} ：それぞれ相対座標 \mathbf{L}_d の x, y 軸方向成分、 \mathbf{e}_d ：捕捉工柱部材を中心に見たとき下流側に向く柱部材の接線方向単位ベクトル、 r_s ：捕捉工柱部材の半径である。また、 η は柱部材から遠ざかるほど捕捉工の柱を避ける流れが弱くなることを表す係数である。

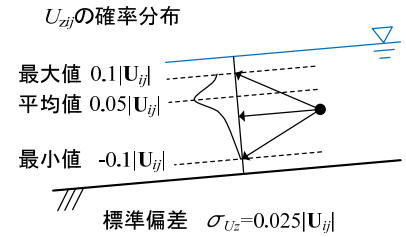


図-8 乱れ成分 U_{zij} の確率分布

3.3.5 流速の乱れ成分ベクトル

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、流木塊が激しく上下に動揺する。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 \mathbf{U}_{ij} のうち z 軸方向(流下方向の鉛直方向)成分 U_{zij} を、図-8に示すように正規分布に従う確率変数とした。すなわち、その最大値は $|\mathbf{U}_{ij}|$ の1割 ($0.1|\mathbf{U}_{ij}|$)、また最小値も負値の1割 ($-0.1|\mathbf{U}_{ij}|$)であるものとしたうえで、平均値が $0.05|\mathbf{U}_{ij}|$ で標準偏差が $0.025|\mathbf{U}_{ij}|$ とする、正規確率分布に従う乱数を用いて与えることとした。

なお、水深が十分にあると流れが穏やかになるので、式(18)より算定する水深 h' が限界水深 h_c 以下の範囲においてのみ乱れを与えるものとした。

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{(h_0 U_0)^2}{g}} \quad (30)$$

4. 解析結果

本研究では、文献(18)に示した実験結果の中で流木長が均一な実験について解析する。特に、流木長 $l=6\text{cm}$ では、従来の経験的予測式より顕著に低い捕捉率を示したので、そこに焦点を当てて考察する。表-2, 3に対象とする実験パラメータの要約を示す。

4.1 計算条件

表-4に解析条件を示す。水路諸元および要素の条件については実験と同条件とし、初期流速 U_0 や初期水深 h_0 についても実験における流速、水深を用いた。

抗力係数 C_D については、レイノルズ数が概ね $Re=1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$ の範囲で、 $C_D \approx 1.0$ が得られている²¹⁾ことから、 $C_D=1.0$ を用いるものとした。

法線方向ばね定数 K_n は、実験の流木試料に用いた木材に対し、別途行った载荷試験の荷重～変形関係をもとに、 $K_n=1.0 \times 10^6 \text{ N/m}$ とした。また、接線方向ばね定数 K_s は、以下の要領により算定した。

まず、個別要素法におけるばね定数は、1次元の波動論による近似法から、弾性波の伝播速度を用いて次式に

表-2 実験条件

項目	実物	模型	備考
水路	勾配 θ	3°	3°
	長さ	150 m	2.5 m
捕捉工模型	高さ H	2 m	4 cm
	捕捉工間隔 W	$W/\ell_{\max}=1/5, 1/3, 1/2, 3/4$ および ℓ_{\max} に応じて設定	
流木模型	流木長 ℓ_{\max}	3, 6, 9 m	6, 12, 18 cm
	直径 d	15 cm	3 mm
	本数	100本	100本
	投入要領	100本/35秒	100本/5秒

表-4 解析条件

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	要素数	100
	密度 ρ	950 kg/m ³
要素間ばね	ばね定数	法線方向 K_n 1.0×10 ⁶ N/m 接線方向 K_s 1.5×10 ⁵ N/m
	減衰定数 h	0.2
	粘着力 c	0 N
	摩擦角 $\tan\phi$	0.404
	計算条件	時間刻み Δt 1.0×10 ⁻⁷ s

表-3 実験ケース

W/ℓ_{\max}	流木長 ℓ (cm)	ケース数
1/5	18 12 6	12
1/3		
1/2		
3/4		

表-5 流速分布モデルの各成分の組合せ

項目	解析モデル					本文中の関連する項および図
	1	2	3	4	5	
流木捕捉に伴う水位上昇	●	●	●	●	●	3.3.1項
捕捉工直上流部での堰上げ水深の乱れ	×	●	●	●	●	3.3.2項, 図-5
捕捉工柱を回避する流れ	×	×	●	×	●	3.3.4項, 図-7
水中における上下の乱れ	×	×	×	●	●	3.3.5項, 図-8

● : 含む, × : 含まない

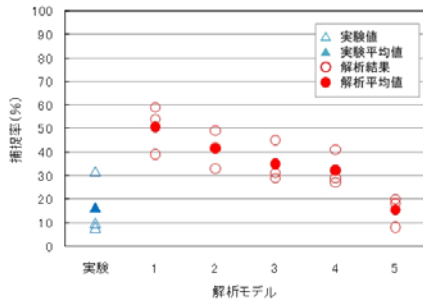


図-9 各解析モデルの捕捉率 ($l=6\text{cm}$, $W/l_{\max}=1/2$)

より簡易に試算できる²²⁾。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (31)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (32)$$

$$K_n = \frac{1}{4}\pi\rho V_p^2, \quad K_s = \frac{1}{4}\pi\rho V_s^2 \quad (33)$$

ここで, G, λ : Lamé の定数, E : ヤング率, ν : ポアソン比, V_p : P 波速度, V_s : S 波速度, ρ : 要素の密度である。

式(31)~(33)より, 接線方向ばね定数 K_s と法線方向ばね定数 K_n の比 K_s/K_n は, 次式のようにポアソン比のみによって表すことができる。

$$\frac{K_s}{K_n} = \frac{G}{\lambda+2G} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \quad (34)$$

一般に杉材のポアソン比は $\nu=0.4$ が得られている²³⁾ことから, 式(34)より $K_s/K_n=0.15$ として, 法線方向ばね定数 K_n より K_s を算定した。

要素間ばねの減衰については, 要素接触時に発生する振動を抑えて計算を安定させるため, 減衰定数を $h=0.2$ とし, 次式により流木長ごとに減衰係数 c_n, c_s を与えた。

$$c_n = 2h\sqrt{\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}}K_n, \quad c_s = 2h\sqrt{\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}}K_s \quad (35)$$

ここで, m_1, m_2 : 接触する円柱形要素の質量である。

また粘着力および摩擦角は, 実験の流木試料をもとに $c=0\text{ N}$, $\tan\phi=0.404$ ($\phi=22^\circ$)とした。

時間刻み Δt は, 次式により求まる Δt の 1/10 以下²²⁾とした。

$$\Delta t = 2\sqrt{\frac{m}{K_n}} \quad (36)$$

4.2 流速分布モデルの違いが捕捉率に及ぼす影響

表-5 に, 3.3 節で述べた流速分布モデルの各成分の組合せを示す。ここでは全実験結果の解析に先立ち, 流速分布モデルの各成分が捕捉率に対しどのような影響を及ぼすかについて, $l=6\text{cm}$, $W/l_{\max}=1/2$ のケースを対象として分析した。

図-9 に, 横軸の一番左に実験結果を示し, その他は表-5 に対応する各解析モデルを用いた場合の捕捉率を示す。これより, 乱れを全く考慮しない解析モデル 1 では実験結果の平均捕捉率が約 17% に対し, 約 50% と非常に大きくなっていることがわかる。これに対し, 捕捉工直上流部での堰上げを考慮した解析モデル 2 では, 平均捕捉率が約 41% まで下がるが, やはり実験結果とは大きく異なっている。解析モデル 2 に対し, 捕捉工柱を避ける流れまたは水中における上下の乱れを加えた解析モデル 3, 4 では, 解析モデル 2 に比して約 5~10% 程度の捕捉率の減少が見られるが, それでも実験結果と比較すると 15% 程度大きな値となっている。これに対し, 解析モデル 5 では水中における上下の乱れと捕捉工柱を避ける流れが相乗的な効果となって現れ, 実験結果をよく表現で

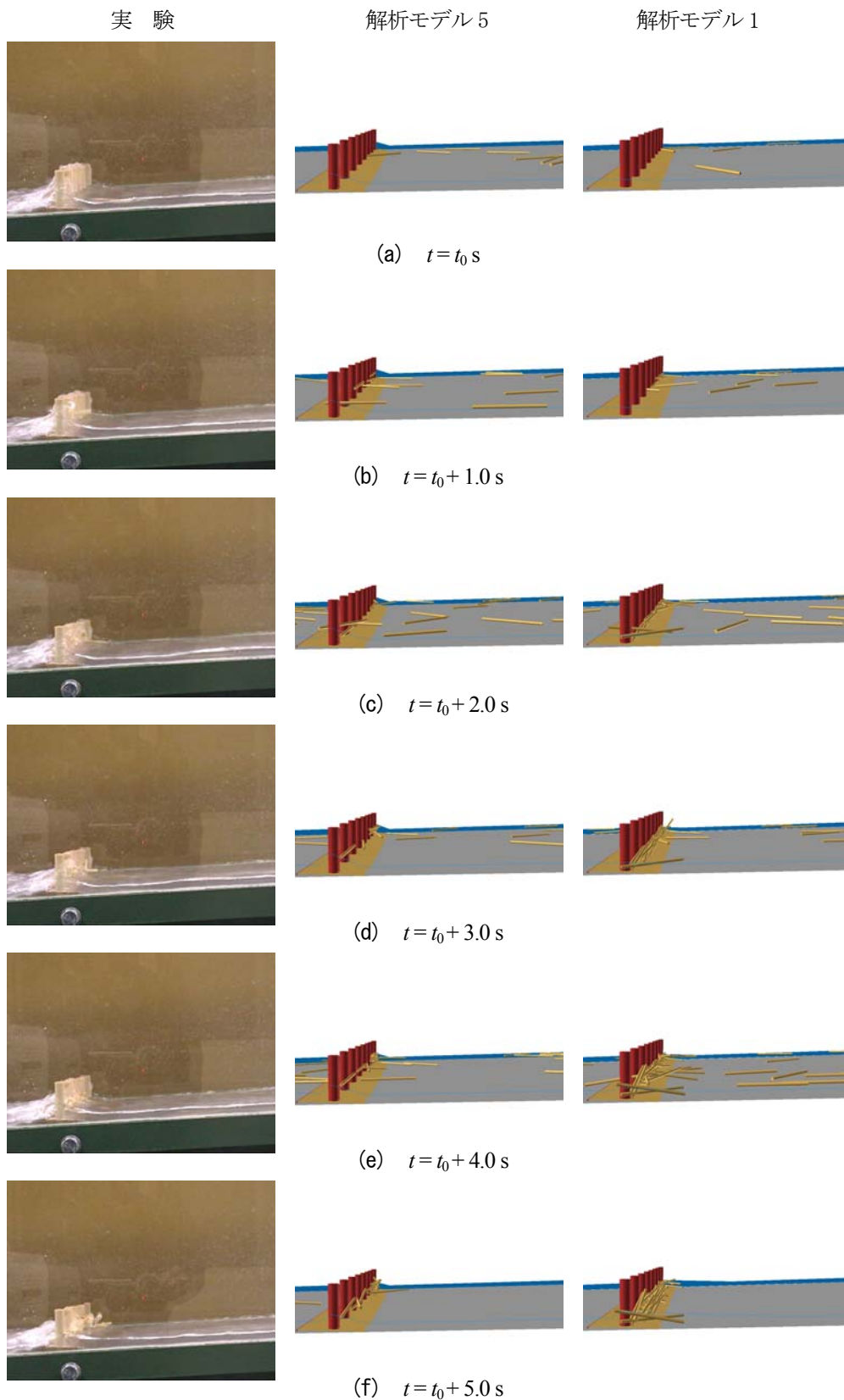


図-10 捕捉時の状況の比較 ($l=6\text{cm}$, $W/l_{\max}=1/2$)

きていることがわかる。

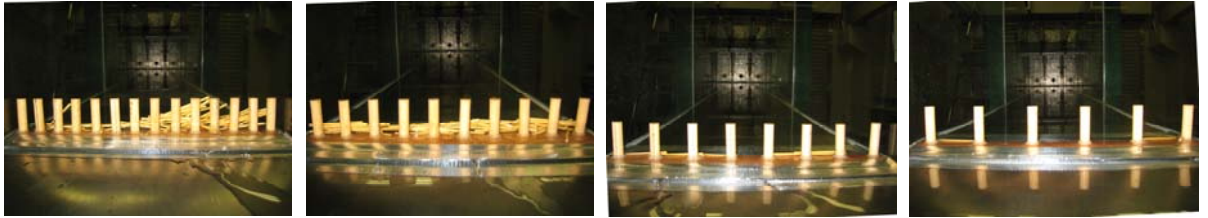
4.3 捕捉状況の比較

ここでは前節の考察に基づき、実験結果をよりよく表現できる解析モデル5と、水流の乱れを考慮しない解析モデル1の捕捉状況について、実験結果との比較を行う。

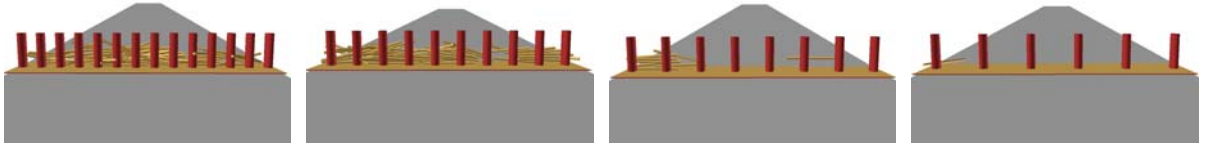
4.3.1 捕捉時の状況の比較

図-10に、流木長 $l=6\text{cm}$, $W/l_{\max}=1/2$ における捕捉時の状況を、実験結果と比較して、0.5秒間隔で示す。ここで、図中の t_0 秒とは、最初の流木が捕捉工に到達した時間である。

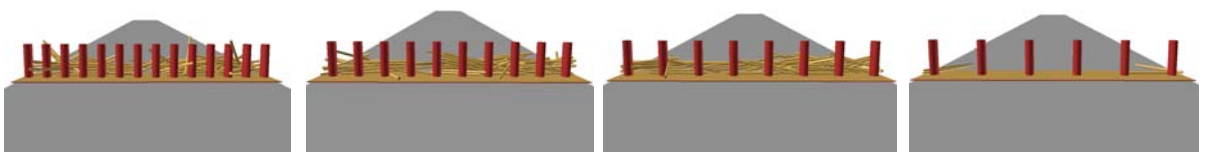
実験



解析
モデル5



解析
モデル1



(a) $W/l_{\max}=1/5$

(b) $W/l_{\max}=1/3$

(c) $W/l_{\max}=1/2$

(d) $W/l_{\max}=3/4$

図-11 捕捉後の状況の比較 ($l=6\text{cm}$)

まず実験では、先頭部の流木は捕捉工柱に衝突するものの、後続の流木が来る前に回転して流出している(図-10(a)~(c))。後続の流木のうち一部は、2本の捕捉工柱に跨って衝突し捕捉されかかるものの、水流の乱れにより一端が外れることで流出している(図-10(c)~(d))。その後、これらの繰り返しの中で先に捕捉工に止められた流木が流れ出す前に後続の流木が絡まると構造が安定し、その後の流木が捕捉されている(図-10(e)~(f))。

次に、水流の乱れを全て考慮した解析モデル5では、実験とほぼ同様に、先頭部付近の流木は捕捉工柱に衝突するものの回転して流出し(図-10(a)~(c))、後続の流木の2本の捕捉工柱に跨って捕捉されかかるものが発生するが、水流の乱れにより一端が外れることで流出している(図-10(b)~(d))。その後、徐々に後続の流木が捕捉されている(図-10(d)~(f))。

一方、水流の乱れがない解析モデル1では、先頭部付近を流下する流木の中で2本の捕捉工柱に跨ると、そのまま捕捉され続けるので(図-10(b)~(d))、後続の流木は捕捉工のみならず先に捕捉された流木などにも跨る架橋構造を形成し、一気に捕捉される流木が増える(図-10(d)~(f))。よって、実験の捕捉状況を表現できない。

4.3.2 捕捉後の状況の比較

図-11に、流木長 $l=6\text{cm}$ 、間隙最大流木長比 $W/l_{\max}=1/5, 1/3, 1/2, 3/4$ における捕捉後の状況を、実験結果と比較して示す。

まず実験結果は、間隙最大流木長比 W/l_{\max} の増加に伴い捕捉される本数が減少しており、図-11(c), (d)の

$W/l_{\max}=1/2, 3/4$ では、ほとんど捕捉されていない。

次に、解析モデル5では、実験結果と同様に、間隙最大流木長比 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、図-11(a), (b)の $W/l_{\max}=1/5, 1/3$ では、流木の堆積した形状や流木同士の絡み合いも全体的に良く似たものとなっている。

一方、解析モデル1では、間隙最大流木長比 W/l_{\max} の増加に伴い捕捉される本数が減少するものの、図-11(b), (c)の $W/l_{\max}=1/3$ と $1/2$ において、捕捉される流木が実験結果よりも多くなっている。

4.4 乱れを考慮しないモデルによる全解析結果

図-12に、3.3.2~3.3.5項で述べた乱れモデルを用いず、3.3.1項で述べた流木捕捉に伴う水位の上昇のみを考慮した場合(解析モデル1)の、解析結果の平均捕捉率(3回の結果の平均値)と間隙最大流木長比 W/l_{\max} の関係を、実験結果と比較して示す。これより、流木長の違いにかかわらず、 W/l_{\max} の増加に伴って捕捉率が低下する傾向は現れるが、図-10に示す実験結果のように、流木長 $l=6\text{cm}$ の捕捉率が低捕捉率となる傾向について、全ての W/l_{\max} において表現できないことがわかる。

4.5 乱れを考慮したモデルによる全解析結果

図-13に、3.3.2~3.3.5項で述べた乱れモデルを用いた場合(解析モデル5)の、解析結果の平均捕捉率と間隙最大流木長比 W/l_{\max} の関係を、実験結果と比較して示す。これより、 W/l_{\max} の増加に伴い実験結果と同様の捕捉率の低下傾向が見受けられ、図-10に示す実験結果と同様に、流木長 $l=12$ および 18cm の捕捉率と W/l_{\max} の関係に

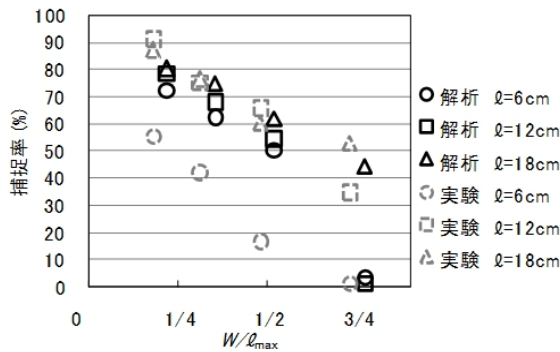


図-12 解析結果と実験結果の比較
(乱れなし：解析モデル1)

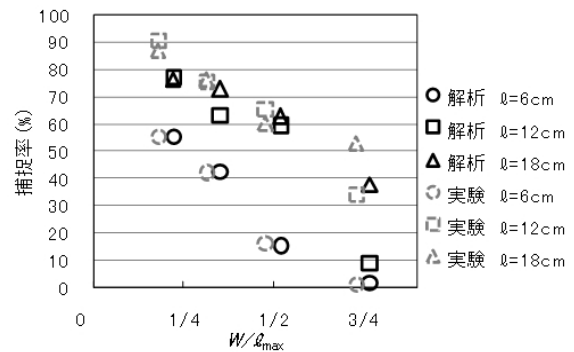


図-13 解析結果と実験結果の比較
(乱れあり：解析モデル5)

比して、 $l=6\text{cm}$ では全体的に低捕捉率となることも含めて再現できている。これは、実験結果で観察される捕捉工付近における水流の乱れにより、 $l=6\text{cm}$ は大きく上下に跳ねあげられる運動が、解析においても再現されるからである。この運動によって不完全な絡み合いが解け、捕捉される本数が少なくなる。しかし、乱れを考慮しないモデルでは、不完全な絡み合いであっても後続流木が捕捉されて安定化していくので捕捉率が高まり、実験とは異なるシミュレーション結果となる。つまり、流木捕捉工の捕捉効果は、捕捉工周辺の水流の乱れに大きな影響を受け、同じ W/l_{max} であっても捕捉工間への架橋構造における余長が小さくなるほど水流の乱れの効果を受けやすいことがわかった。

5. 結言

本研究では、流木捕捉工による捕捉について、円柱形要素を導入した3次元個別要素法を適用し、流木捕捉工の捕捉効果を解析する手法の開発を試みた。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再現するとともに、その水面形の変化についても概ねシミュレートすることができた。
- (2) 流木長および間隙最大流木長比の変化に伴う捕捉状況や捕捉率の変化を概ね良好にシミュレートすることができた。
- (3) 捕捉工周辺の流水の乱れは、流木捕捉工の捕捉効果に大きな影響を与える。また、短い流木ほど水流の乱れの影響を受け、捕捉率が低下しやすい。

参考文献

- 1) 土木学会：平成16年度7月北陸豪雨災害調査報告書，pp.206-220，2005。
- 2) 防災科学技術研究所：主要災害調査40号，pp.33-75，2006.3。
- 3) 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。
- 4) 水山高久，石川芳治，矢島重美：透過型砂防ダムによる流

- 木捕捉効果，土木技術資料，Vol.30，No.11，pp.47-52，1988。
- 5) 石川芳治，水山高久，福澤誠：砂防ダムおよび流木止スクリーンによる流木捕捉効果，土木技術資料，Vol.31，No.9，pp.41-47，1989。
- 6) 松村和樹，橋田芳朗，葛西俊一郎：格子型砂防ダムによる流木捕捉効果，新砂防，Vol.43，No.3，pp.9-12，1990.7。
- 7) 中川一，高橋保，池口正晃：洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究，水工学論文集，Vol.37，pp.379-384，1993.2。
- 8) 中川一，井上和也，池口正晃，坪野考樹：流木群の流動と堰止めに関する研究，水工学論文集，Vol.38，pp.543-550，1994.2。
- 9) 後藤仁志，酒井哲郎，林稔：粒子法による流木群の堰止め過程のLagrange解析，水工学論文集，Vol.45，pp.919-924，2001.2。
- 10) Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y.: A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, Computational Fluid Dynamics J., Vol.4, No.1, pp.29-46, 1995.
- 11) Koshizuka, S., Nobe, A. and Oka, Y.: Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol.26, pp.751-769, 1988.
- 12) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock system, Proc. Symp. ISRM, Nancy France, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 13) 清水義彦，長田健吾，高梨智子：個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面2次元数値解析，水工学論文集，Vol.50，pp.787-792，2006.2。
- 14) 清水義彦，長田健吾：流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験，水工学論文集，Vol.51，pp.829-834，2007.2。
- 15) 後藤仁志，五十里洋行，酒井哲郎，奥謙介：山地橋梁の流木閉塞過程の3次元シミュレーション，水工学論文集，Vol.51，pp.835-840，2007.2。
- 16) 原木大輔，香月智：円柱形鉄筋要素導入型三次元個別要素法によるRCはりの衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1238-1249，2009.3。
- 17) 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。
- 18) 渋谷一，香月智，大隅久，石川信隆，水山高久：流木捕捉工の捕捉性能に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.63，No.3（掲載予定）
- 19) 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。
- 20) 柴垣和三雄：実用数学，共立出版，pp.149-152，1955。
- 21) 吉川秀夫：水理学，技報堂出版，pp.87-88，1976。
- 22) 伯野元彦：破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー，森北出版，pp.40-53，1997。
- 23) 森林総合研究所：改訂4版 木材工業ハンドブック，丸善，pp.134-135，2004