

個別要素法による透過型砂防堰堤の 流木混じり土石流捕捉解析

香月 智¹・渋谷 一²・大隅 久³・國領 ひろし³・石川 信隆⁴

¹正会員 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail: katsuki@nda.ac.jp

²学生会員 防衛大学校理工学研究科後期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail: ed10006@nda.ac.jp

³非会員 砂防鋼構造物研究会 日鐵住金建材株式会社 (〒135-0042 東京都江東区木場2-17-12)

E-mail: hohsumi@n-kenzai-kaiatsu.jp

⁴フェロー 防衛大学校名誉教授 砂防鋼構造物研究会 (〒102-0093 東京都千代田区平河町2-7-5)

E-mail: cgishikawa@m4.dion.ne.jp

研究は、個別要素法を用いて透過型砂防堰堤による流木混じり土石流の捕捉性能を解析する手法について提案するものである。すなわち、事前に土石流中に含まれる流木の割合を変化させることにより、流木の有無や混合割合が透過型砂防堰堤の土石流捕捉性能に与える影響について模型実験により検討した。続いて、円柱形要素により流木を、球形要素により礫材をモデル化した三次元個別要素法を用いて実験結果の再現解析を行い、適用性について検討した。その結果、水路内での流下過程で観察された土石流中における流木と礫、大礫と小礫間に生ずる分級現象を表現できることを示した。また、堰堤による流木および礫の捕捉過程および最終形態について、実験結果を再現でき捕捉工間隔によって変化する捕捉率についても、良好に推定できることを示した。

Key Words : woody debris, debris flow, DEM, cylindrical element, grid shape check dam

1. 緒言

我が国の土石流対策は長年にわたって行われ、減災に寄与しているものの、災害は未だに少なくない頻度で発生している。参考までに、平成 22 年から過去 20 年間の土砂災害(土石流、地すべり、がけ崩れ)の発生件数^{1),2)}は、土砂災害全体では年平均で 1,000 件程度であり、大きな変化は見られないが、土石流災害については、平成 3 年からの 10 年間では 195 件/年であるのに対し、平成 13 年からの 10 年間では 590 件/年と、約 3 倍に増えている。

ところで、終戦後の緑化運動によって、我が国の多くの山々が人工林で覆われている。しかし、木材価格の低下や過疎化によって、森林管理が困難になったため、間伐材が搬出されず、山地に残置されたり、風倒木も斜面に放置されたりすることが多い。これらは、豪雨時に流木となって、土砂に混じって河川に流入し、流下する。流木を含んだ土石流は、流下の際に河川狭窄部や橋梁等に詰まることにより、土石流や洪水氾濫

となり被害を増大させる³⁾。

平成 18 年までの土砂災害対策は、土石流対策技術指針⁴⁾と流木対策指針⁵⁾として個別に示され、分離した対策が講じられていた。しかし、土石流災害と流木災害は不可分なものとする認識が広まり、現在は、「砂防基本計画策定指針(以後、土石流・流木対策編と呼ぶ。)」⁶⁾と「土石流・流木対策設計技術指針」⁷⁾に統合された。

この結果、土石流および流木対策施設は、土石流および流木の発生抑制、捕捉、その他の 3 つの機能に分類され、その中で捕捉機能を持つ土石流・流木捕捉工が対策の基本となった⁸⁾。

この土石流・流木捕捉工は、土石流および土砂とともに流出する流木等を捕捉するための施設であり、従来の砂防堰堤等を用いるものとされている。砂防堰堤の型式には透過型、不透過型、部分透過型の 3 種類があるが、本来は不透過型砂防堰堤が主として建設されてきた。しかし、不透過型砂防堰堤は開口部がないため、常時および中小出水時に流出する土砂を全て捕捉

してしまうにもかかわらず、大出水時は流木が浮かんで越流するため、その捕捉効果はほとんど期待できない⁸⁾。一方、透過型砂防堰堤による流木の捕捉事例については数多く報告されている。例えば、流木の捕捉量が総土砂捕捉量の約 20%に達していたという事例もある⁸⁾。このため、透過型砂防堰堤が土石流・流木対策施設の基本構造として位置付けられている⁹⁾。研究面では、透過型砂防堰堤による土石流中の巨礫捕捉に関する実験的な研究が数多くなされている^{10)~13)}。その焦点は、透過型砂防堰堤の格子間隔と最大礫径との比によって決定される捕捉率におかれている⁷⁾。実験を補完するため、数値解析的なアプローチも数多く行われている。その多くは、水と砂粒子との混合物の連続体モデルに基づくものである^{14), 15)}。しかし、連続体モデルでは、礫の絡み合いに基づく閉塞メカニズムを表現することが難しいため、個別要素法など離散体の解析手法を活用した研究も多く見受けられるようになってきた。

例えば、前田ら¹⁶⁾は、礫のみが流下する石礫型土石流の流動に関して、粒状体の流動構造や、巨礫の浮き上がりメカニズムについて検討している。また、透過型砂防堰堤による土石流の捕捉に関する研究^{17)~21)}や、杭や壁面などに及ぼす土石流流体力に関する研究^{22), 23)}などにも応用されている。

しかしこれらは、礫のみ、もしくは流木だけのシミュレーションであり、流木混じり土石流に関する研究例についてはあまり見当たらない。文献 24) の流木混じり土石流の捕捉に関する個別要素法の適用・検討の研究が見当たる程度である。しかし、この時点での推定捕捉量は実験と異なっており、課題が残されたままであった。そこで著者らは、より基礎的な流木だけの捕捉効果についての実験と個別要素法による解析を行ってきた^{25)~27)}。

以上の背景より、本研究は、文献 24) の手法に水流乱れ効果等の改良を施した、文献 27) で提案した流木捕捉に関する解析法を拡張して、透過型砂防堰堤による流木混じり土石流の捕捉性能評価に資する解析法を開発したうえで、流木混じり土石流捕捉に関する模型実験のシミュレーション解析を行い、その適用性について検討するものである。

2. 解析手法

(1) 解析手法の概要

著者らは、文献 27) において、流木捕捉工のシミュレーションに、個別要素法が適用可能であることを示

した。その手法の特徴は次のようなものである。

- a) 流木は、円柱形の要素モデルで表わす。
- b) 河床、河岸は三角形要素で、捕捉工は円柱形要素で表わす。
- c) 円柱 - 円柱間および円柱 - 三角形要素間で接触判定を行い、接触バネにより接触力を表現する。
- d) 流路には、場に応じた流速分布を与える。
- e) 円柱要素には、接触力のほかに、重力、浮力、および流体との相対速度によって生じる流体力を与える。なお、流体力は、円柱上の 5 点(ガウスポイント)において与える。
- f) 円柱要素は、三次元空間における並進運動と回転運動を生じるものとする。その際、回転運動はオイラーの回転運動方程式を解いて求める。

以上の詳細は文献 27) に示している。その多くが一般の個別要素法の解析式等とも重複するので、本論文での記述は省略する。本研究ではこれに加えて、土石流中の礫を球形要素でモデル化し、混在させる点が異なる。このため、球形要素と円柱要素との接触判定が文献 27) に対して新しく加わるが、この点については、文献 24) に述べており、球形要素については、多くの論文があるので省略する。

ただし、流速分布モデルについては、本研究における考察の重要部分であるので、以下に述べる。

(2) 流速分布モデル

本手法では、計算負担を実用範囲(高性能 PC で 3 日程度)に抑えるため、個体要素周辺の水 flow を簡略にモデル化した²⁷⁾。

a) 土石流流下時の流速分布モデル

捕捉工の水路内流下時の流速分布モデルは、図-1 に示すように、底面に対して鉛直方向に線形的に変化する分布モデルとした。すなわち、水面上の流速を \mathbf{U}_0 で与え、底面上の流速はその 8 割となるように水深に応じて線形的に減少させる。なお、実験観察を踏まえて、水流は礫や流木の先頭から 10cm 後方の領域のみ存在するものと仮定した。以上の仮定に基づいて流速は、次式で与えられる。

$$\begin{cases} \mathbf{U} = \left(0.2 \frac{z}{h_0} + 0.8 \right) \mathbf{U}_s & (0 \leq z \leq h_0) \\ \mathbf{U} = 0 & (z > h_0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 z : 水路からの高さ(底面鉛直)、 \mathbf{U} : 速度ベクトル、 \mathbf{U}_s : 表面の速度ベクトル、 h_0 : 水深。

b) 堰堤周辺の水深

図-2 に、礫や流木の捕捉に伴って変化する水深とその流速分布モデルの概要を示す。堰堤に礫または流木

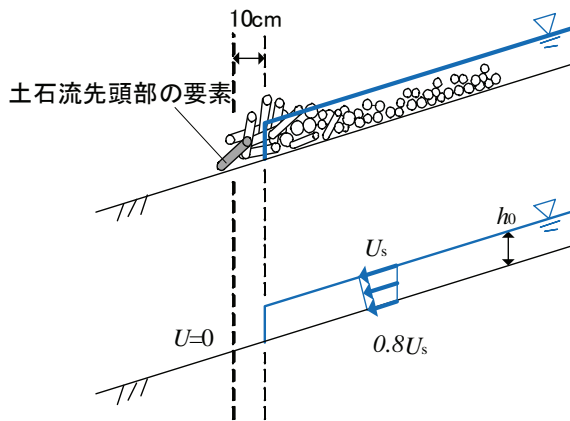


図-1 土石流流下時の流速分布モデル

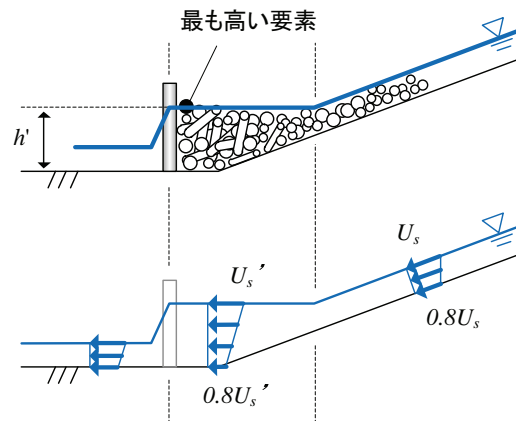


図-2 土石流捕捉時の水深の算定

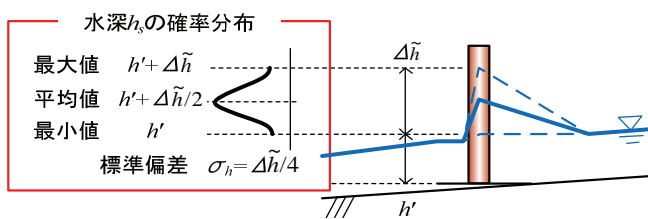


図-3 堰上げ水深の確率分布

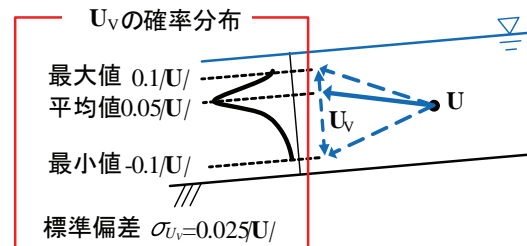


図-4 捕捉工付近の水平方向の流速分布

が捕捉されると湛水が生じるため、水深を増加させる。その水深は次の計算式を用いて算定した。

$$h_s = h' + \Delta\tilde{h} \quad (2)$$

ここで、 h_s : 堰上げ水深、 h' : 基本水深、 $\Delta\tilde{h}$: ランダムな堰上げ高。

式(2)における基本水深については、図-2に示すように、堰堤の直上流部で捕捉された流木もしくは、礫の重心位置の最高点と同じ高さとなるように設定し、流入水深と水平に結ぶ線で交わるように設定する。

ところで、実験観察によると、堰堤柱部材に堰上がる流れが観察されるが、その水面形は、時々刻々に、また空間的にも激しく変化する。この流水の乱れを考慮するために、図-3に示すように正規分布に従う確率変数に従う堰上げ高を用いる。すなわち、

$$\Delta\tilde{h} = N\left(\frac{\Delta\bar{h}}{2}, \frac{\Delta\bar{h}}{4}\right) \quad (3)$$

ただし、 $0 \leq \Delta\tilde{h} \leq \Delta\bar{h}$

ここで、 $N(a,b)$: a を平均、 b を標準偏差とする正規確率変数、 $\Delta\bar{h}$: 確定的な推定堰上げ高²⁷⁾であり次式で与えられる。

$$\Delta\bar{h} = k_m \sin \theta_m \left(\frac{D}{W}\right) \frac{U_h^2}{2g} \quad (4)$$

ここで、 k_m : 断面係数(鋼管 : $k_m \approx 2.0$)、 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。

c) 流速分布

上述の水深変化に伴って、流速ベクトルを変化させる。この際、次の3点を考慮している。

- 1) 流量は保存される。
- 2) 水面の流速に対して、河底は 0.8 倍の流速となるように、線形的に変化させる。
- 3) 流木と礫が流路断面を塞ぐため、有効断面が減少する効果は、流水進行方向単位幅当りの礫個数密度の関数として考慮する。

さらに、流水速度ベクトルに、図-4に示すような鉛直方向の乱れを与える。具体的には、上述のようにして求めた速度ベクトル \mathbf{U} に垂直方向の速度ベクトル \mathbf{U}_v を加える。その大きさは、その点の \mathbf{U} (水平方向速度)の±1割の範囲であり、平均値は 0、標準偏差は \mathbf{U} の大きさの 2.5%とした。

d) 柱部材回避流れ²⁷⁾

実験では、砂防堰堤付近において柱部材を避けるような方向の流れが生ずる。よって、図-5に示すような堰堤柱部材を回避する流速を与える。すなわち、静止円柱周りに生ずる完全流体における一様流を仮定し、複素速度ポテンシャル W_U と円柱周りの極座標 $z_U (= re^{i\theta})$ を用いて、次式により流速ベクトル \mathbf{U} の x, y 軸方向(流下方向および河川横断方向)成分 U_x, U_y を算定した。

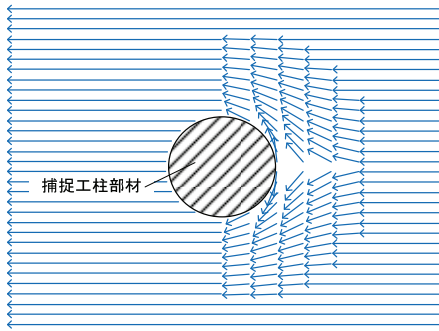


図-5 捕捉工付近の水平方向の流速分布

$$W_U = \left| \mathbf{U} \right| z_U + \frac{\left| \mathbf{U} \right| r_s^2}{z_U} \quad (5)$$

$$\frac{dW_U}{dz_U} = U_x - iU_y \quad (6)$$

ここで、 W_U ：堰堤柱部材周りの流れの複素速度ポテンシャル、 z_U ：堰堤柱部材の中心を原点とする極座標(= $re^{i\theta}$)、 r ：堰堤柱部材中心からの距離、 θ ：回転角、 i ：虚数、 r_s ：堰堤柱部材の半径である。

式(5)を z_U で微分することにより、式(6)の関係から U_x, U_y は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \left(1 - \frac{r_s^2}{r^2} \cos 2\theta \right) \\ -U \frac{r_s^2}{r^2} \sin 2\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

以上の捕捉工周辺の水流モデル、特にランダムモデルを文献 24) において用いた確定的な流れモデルに加えたことによって、流木捕捉工の周辺における捕捉シミュレーションが、実験で観察された流木の絡み合いとその解除メカニズムを適切に表現できることとなった。

e) 解析手順

解析手順を図-6に示す。すなわち、

- 1) 不動の三角形要素を配置して流路を、円柱形要素を用いて捕捉工を構成する。この際、底面粗度を円柱形要素で与える。
- 2) 流路上流の適当な区間に、球形と流木位置と姿勢をランダムに発生させ、重力を与えることにより、水路床上に配置する。
- 3) 流速分布モデルを発生させ、流下シミュレーションする。その結果、堰堤直上流部における土石流中の礫群および流木群の位置と姿勢が決定される。
- 4) 捕捉工周辺の流水モデルに切り替えて、捕捉シミュレーションを行う。指定時間を経過したら、流水

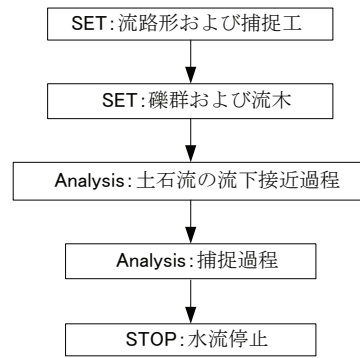


図-6 解析手順

を止めた状態にしてシミュレーションを終了する。

なお、本解析ではランダムなパラメータが使用される。また、実現象自体が初期位置や礫径などのランダム性に支配される。このため、初期配置と流下接近過程については、同一基本条件においても、複数回行うことにより、捕捉過程の初期状態を複数準備するだけでなく、同じ捕捉過程の初期状態に対しても複数回の捕捉解析を行った。

3. 流木混じり土石流の捕捉実験

(1) 実験の概要

a) 実験装置等の概要

図-7に、実験に用いた実験水路の概要を示す。流下水路の寸法は、長さ 4.35m、幅 0.3m、高さ 0.5m であり、側面はガラス製で、側面からの観察が可能となっている。なお、流下水路の水路床は、金属製平滑面のままでは土石流特有の段波形状を形成しないので、文献 28), 29) を参考に棧粗度(棧幅 10mm、棧高さ 5mm、設置間隔 20mm)を配した。

礫流木混合モデルは、写真-1に示すような粒子および木材によって構成される。礫モデルには粒状固化石灰炭灰(比重 1.9)を用い、粒径ごとの捕捉状況を観察するため、粒径 30, 15, 10, 5mm の 4 種類の礫径にふるい分けし、それぞれ灰色、緑色、黄色、赤色に着色した。表-1に礫モデルの諸元を示す。また、礫モデルの粒径加積曲線は図-8の通りであり、最大礫径 $d_{max}=35\text{mm}$ 、95%礫径 $d_{95}=27\text{mm}$ 、平均礫径 $d_{50}=13\text{mm}$ である。流木モデルは、著者らの行った現地災害調査結果³⁰⁾(流出した流木の平均長 6m、平均直径 25cm)を参考にして、1/50の縮尺で $\phi 6 \times 120\text{mm}$ の木材(比重 0.95)を使用した。

写真-2に、実験に用いた透過型砂防堰堤模型を示す。ここでは、一般的に用いられる鋼管直径 50cm に対応する $\phi 10\text{mm}$ として、木製円柱を使用して作製した。

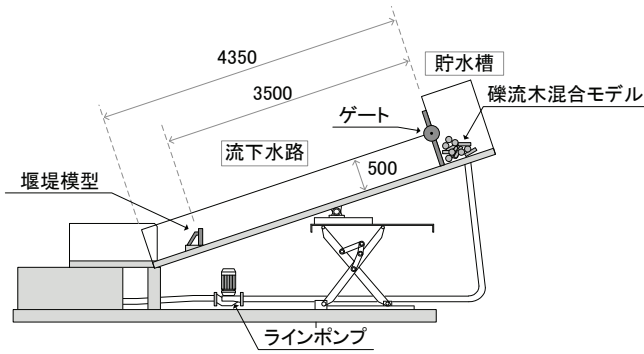


図-7 実験装置の概要

表-1 礫モデルの諸元

粒径 (mm)	粒径範囲 (mm)	実験に用いた容積 (l)	着色
30	30~35	1.5	灰色
15	15~20	3.0	緑色
10	10~15	3.0	黄色
5	5~10	3.0	赤色



(a) 礫モデル(左から粒径 5, 10, 15, 30mm)



(b) 流木モデル(φ6×120mm)

写真-1 礫・流木モデル

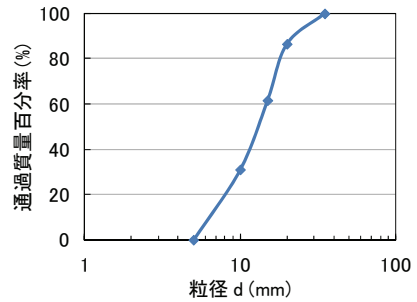


図-8 礫モデルの粒径加積曲線

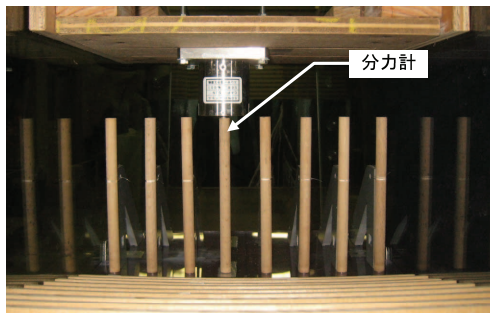


写真-2 堰堤モデルと分力計の設置状況

間隔 W については、現行基準⁷⁾で採用されている鋼管間隔と 95% 礫径の比 W/d_{95} を、 $1.0(W=27\text{mm})$ を基準に、 $1.5(W=40.5\text{mm})$ 、 $2.0(W=54\text{mm})$ の 3 種類を用いた。また、中央の 1 本は分力計である。

b) 実験条件

実験は、図-7 に示す礫と流木のモデルを混合して水路の上流に配置し、約 4.4 l/s の流量を供給しつつ流下させた。表-2 に実験ケースを示す。間隔比と流木容積率を変化させて、各ケース 5 回ずつの実験を行った。

ここでは、実際の土石流調査において、流木の容積率が 20% 前後の値を示す⁸⁾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。なお、流木容積率 K_w とは次式で表される。

$$K_w = \frac{V_t}{V_g + V_t} \times 100 \quad (\%) \quad (8)$$

ここで、 V_g : 礫モデルの容積、 V_t : 流木モデルの容積。

表-2 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
15	$1.0 \times d_{95}$ (27mm)	0 (0%)	9
	$1.5 \times d_{95}$ (40.5mm)	270 (10%)	
	$2.0 \times d_{95}$ (54mm)	608 (20%)	

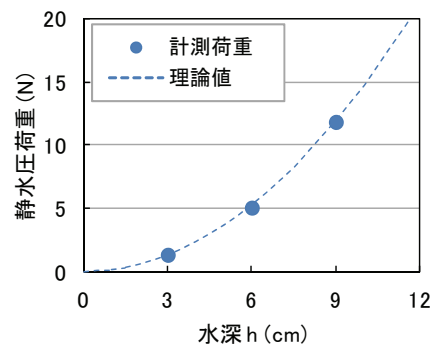
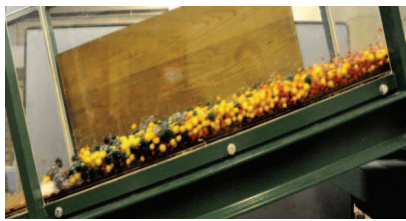


図-9 静水圧荷重の測定結果

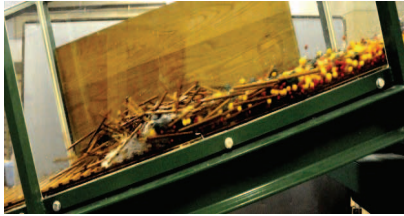
なお実験では、表-1 に示す土砂量を一定とし、流木量を変化させて実験を行った。

c) 荷重測定

写真-2 に、分力計の設置状況を示す。ここでは、堰堤モデルの柱部材のうち、中心に位置する 1 本に作用する荷重を分力計(ひずみゲージ式、容量: 50N)により測定した。なお、実験に先立ち、写真-2 に示すように上述の分力計を用いて静水圧荷重を測定し、測定値の検定を行った。ここでは、実験で用いる 50N 分力計と、もう一つ 10N 分力計の 2 つを用いて、2 本の分力計柱の前面に水路幅分の板を立てて堰堤とし、板の上



(a) 流木容積率 0%



(b) 流木容積率 10%



(c) 流木容積率 20%

写真-3 土石流の流下状況



(a) 流木容積率 0%, 左岸側



(b) 流木容積率 10%, 左岸側



(c) 流木容積率 20%, 左岸側



(d) 流木容積率 0%, 下流側



(e) 流木容積率 10%, 下流側



(f) 流木容積率 20%, 下流側

写真-4 土石流の捕捉状況($W/d_{95}=1.0$)

流側を満水にした時の静水圧を測定した。なお、板の高さは3, 6, 9cmの3種類を用いた。

図-9に測定結果を示す。ここで、計測荷重とは2つの分力計で計測された荷重の合計値である。測定結果と理論値の曲線は同じ値になっており、分力計の信頼性を確認した。

(2) 土石流の流下・捕捉状況

a) 土石流の流下状況

写真-3に、土石流の流下状況の流木容積率ごとの違いを示す。まず、写真-3(a)に示す流木を含まない場合には、礫の順序が概ね灰(30mm)ー緑・黄(15, 10mm)ー赤(5mm)の順で流下しており、巨礫が先頭部に集中しながら流下している。さらに、写真-3(b), (c)に示す流木容積率 10%, 20%では、礫よりも先に流木が流下している。これより、流木や巨礫が先頭部に集中すると言われている流木混じり土石流の流下特性を、再現できていることがわかる。なお、土石流中の流木は、流木容積率によらず、ほぼ 2.5m 流下した時点で土石流先頭部に集中した。

b) 土石流の捕捉状況

写真-4に、間隔比 $W/d_{95}=1.0$ のケースにおける土石流の捕捉状況を流木容積率ごとに示す。なお、写真中には、流水の水面を点線で表している。まず、流木を

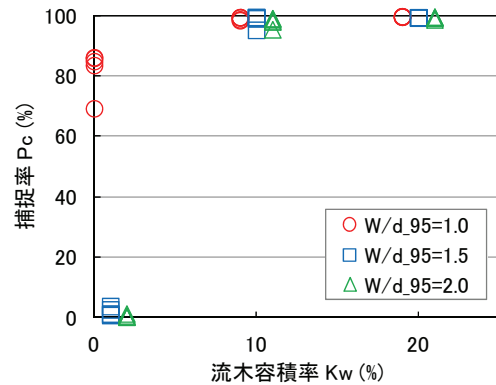


図-10 捕捉率~流木容積率関係

含まない場合には、透過部に灰・緑・黄(30, 15, 10mm)の礫が多くみられ、赤(5mm)の礫がその上流側に捕捉されている。また、捕捉後の水深は、捕捉された礫の最も高い位置まで湛水している。一方、流木容積率 10%では、透過部がまず流木で閉塞され、その間に塞まっている礫が見受けられ、その後方に礫が堆積している。さらに、流木容積率 20%になると、透過部は全て流木で閉塞し、その後方に礫が堆積する。また、流木混じり土石流の堆積塊中の水深は、礫が堆積している場所では礫と同等の高さになっているが、流木の堆積している場所では流木塊よりも水深が低くなっている。これは、礫に比べて流木が疎に堆積し、透水性が大きいためである。

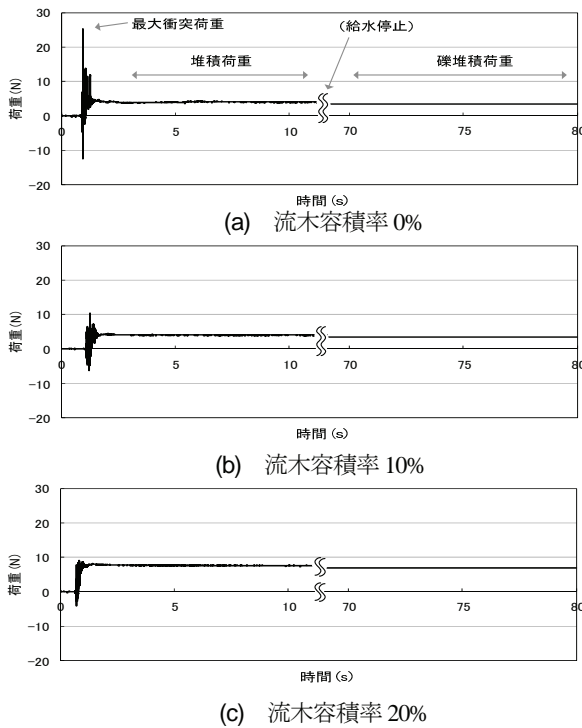


図-11 荷重～時間関係の一例($W/d_{95}=1.0$)

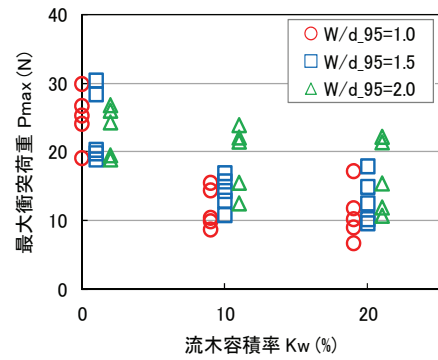


図-12 最大衝突荷重～流木容積率関係

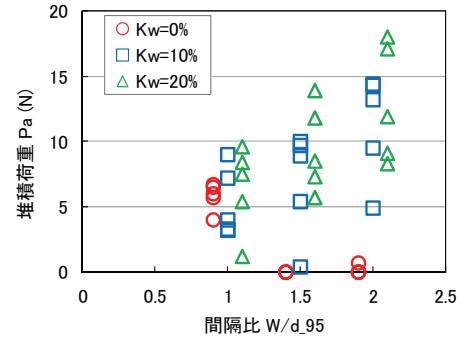


図-13 堆積荷重～間隔比関係

c) 捕捉率と流木容積率の関係

図-10 に、捕捉率と流木容積率の関係を示す。ここで捕捉率とは、流木を含む土石流全体の容積に対する捕捉された土石流の容積であり、次式で表される。

$$P_c = \frac{\sum V_{g-i}^{trap} + V_t^{trap}}{V_g + V_t} \times 100 \quad (\%) \quad (9)$$

ここで、 i : 粒径 30, 15, 10 または 5mm を表す記号, V_{g-i}^{trap} : 捕捉された粒径 i の礫モデルの容積, V_t^{trap} : 捕捉された流木モデルの容積。

まず、間隔比 $W/d_{95} = 1.0$ の流木を含まない場合には捕捉率が約 69~86% となっている。さらに、流木容積率が 10, 20% と増加すると、捕捉率が 98.5% 以上となり、ほとんど全部が捕捉される。一方、間隔比 $W/d_{95} = 1.5$ や 2.0 では、流木を含まないと、捕捉率はほぼ零である。一般的に格子型の砂防堰堤では、間隔比が 1.5 でも礫は捕捉され、間隔比 2.0 ではピーク流量を軽減させる効果があることが既往研究¹⁰⁾により示されている。しかし、本実験では、捕捉面での閉塞状況を観察するために細砂や土砂を混合していないため、このように捕捉されなかったものである。これに対し、流木容積率が 10, 20% に増加すると、先端部の流木が捕捉されるため、後続の礫も捕捉され、捕捉率は 95% 以上となっている。これより、流木が土石流中に含まれると、捕捉率が顕著に上昇することがわかる。なお、本実験の流木長は $l=12\text{cm}$ の一定であるが、部材間隔と流木長の比 W/l から見ると、 $W/l = 0.23$ ($W/d_{95} = 1.0$), 0.34 (同

1.5), 0.45 (同 2.0) と異なった条件となる。

(3) 堰堤部材に対する荷重

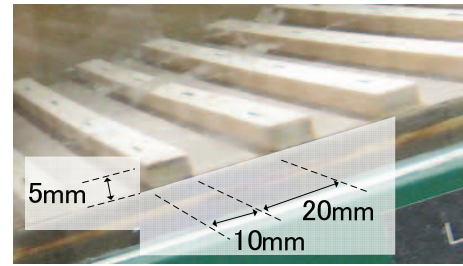
a) 荷重～時間関係

図-11 に、間隔比 $W/d_{95} = 1.0$ のケースにおける流木・礫捕捉時の荷重～時間関係を示す。図-11(a)の流木を含まない場合には、礫到達直後に荷重の大きな増減が生じる。これは礫の衝突によるものと考えられ、衝突荷重と呼ぶものとする。図-11(a)の最大衝突荷重は、 $P_{max} = 25.3\text{N}$ となり、以後の衝突荷重は徐々に小さくなっていく。続いて、衝突から 1.0 秒後には荷重が 4.0 N に収束し、ほぼ一定となる。この状態では、礫荷重と水流の荷重が同時に複合して作用しているが、本研究ではこれを堆積荷重と呼ぶものとする。さらに、時刻約 60 秒後には給水を停止するため、水流の影響のない礫堆積荷重となる。図-11(a)の礫堆積荷重は 3.5N であり、給水の停止に伴い 0.5N ほど荷重が低下している。

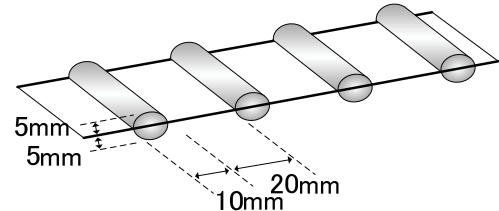
一方、図-11(b)の流木容積率 10% の場合、最大衝突荷重 $P_{max} = 10.4\text{N}$ となり、堆積荷重は 4.0N、礫堆積荷重は 3.5N となっている。さらに、図-11(c)の流木容積率 20% では、最大衝突荷重が $P_{max} = 9.0\text{N}$ となり、堆積荷重は、7.5N、礫堆積荷重は 7.0N であり、このケースも給水の停止に伴い 0.5N ほど荷重が低下している。以上、流木を含まない場合には大きな最大衝突荷重が生じるのに対し、流木が含まれると、最大衝突荷重は小さくなる。一方、堆積荷重に占める水圧成分はあま

表-3 解析基本値

項目		値	
水路	勾配 θ	15°	
	長さ	3.5 m	
	幅	0.3 m	
流水	初期流速 U_0	1.2 m/s	
	初期水深 h_0	50 mm	
	抗力係数 C_D	球	0.49
		円柱	1.0
要素	要素数	球	9199
		円柱	0, 270, 608
	密度 ρ	球	1900 kg/m ³
		円柱	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 ⁻⁶ s	



(a) 実験水路の栈粗度



(b) 解析における栈モデル

図-14 栈粗度のモデル化

り大きくない。よって、構造物の設計の観点から、堆積荷重について分析する。

b) 最大衝突荷重と流木容積率との関係

図-12 に、最大衝突荷重と流木容積率の関係を示す。

まず、間隔比 $W/d_{95} = 1.0$ では、流木を含まない場合の最大衝突荷重は約 19~30 N となっている。流木容積率が $K_w = 10\%$ になると 8~16N, $K_w = 20\%$ では 6~17N となり、流木容積率の増加に伴い最大衝突荷重が明らかに小さくなる。この傾向は、間隔比 $W/d_{95} = 1.5, 2.0$ においても同じである。特に、流木容積率が 0%と、10%との差が大きく、土石流中に流木が混じり、先行することにより、最大衝突荷重が小さくなるのがわかる。この点について、写真-4 に示す流木挙動のビデオ観察によると、礫よりも質量の軽い流木が先に衝突し、捕捉された疎な流木塊を形成したところへ礫が衝突すると、流木塊の堆積形状が変わることによる緩衝効果を発揮していることがわかる。

ところで、どの流木容積率においても同一ケースにおける最大衝突荷重のばらつきが大きい。これは、礫や流木の衝突速度や衝突角度などのばらつきが影響しているためである。

c) 堆積荷重と間隔比との関係

図-13 に、堆積荷重と間隔比の関係を示す。

まず、流木を含まず、間隔比が $W/d_{95} = 1.0$ の場合には堆積荷重が約 4~7 N となっているが、 $W/d_{95} = 1.5, 2.0$ では堆積荷重が生じない。これは、図-10 で示したように、礫が捕捉されないためである。一方、流木容積率が 10, 20% の場合には、間隔比の増加に伴い堆積荷

重が大きくなる傾向が見られる。これは、間隔 W が広くなると柱部材 1 本の受け持つ正面幅が大きくなるためである。

ところで、図-13 ではどの流木容積率においてもばらつきが大きい。これは、流木の堆積塊を介して荷重が作用すると流木塊の構造形によって荷重伝達に変化する影響が表れたものと考えられる。よって、流木を含まない実験結果($K_w = 0\%$)では、ほとんどばらつきが見られない。

4. 個別要素法による流木混じり土石流の捕捉シミュレーション

(1) 解析条件

a) 計算条件

表-3 に解析基本値を示す。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た。初期流速 U_0 についても、実験における流速が約 1.2m/s であったことから、1.2m/s として設定した。初期水深 h_0 についてはパラメトリックに検討し、実験に近い流下状況となる $h_0 = 5\text{cm}$ とした。

球形要素の抗力係数 C_D については橋本らが行った実験³¹⁾において、 $Re = 1.3 \times 10^4 \sim 3.2 \times 10^4$ の範囲で $C_D = 0.49$ が得られているので、この値を用いた。また、円柱形要素の抗力係数 C_D については、概ね $Re = 1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$ に対応する $C_D = 1.0$ とした³¹⁾。

法線方向ばね定数 K_n は、実験の礫モデルに載荷試

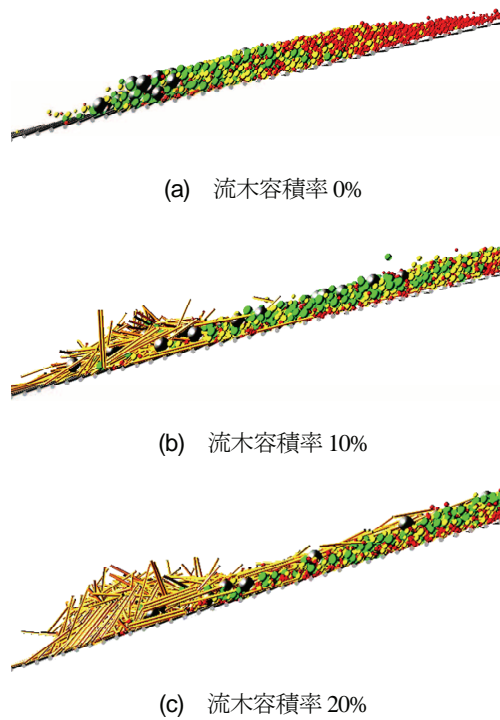


図-15 土石流の流下状況(解析結果)

験を行い、その荷重～変形関係をもとに、 $K_n=1.0 \times 10^6$ N/mとした。また、接線方向ばね定数 K_s は、法線方向ばね定数 K_n を基に次式で求めた²⁴⁾。

$$K_s = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} K_n \quad (10)$$

ここで、 ν : ポアソン比。

その他のパラメータについては、文献 27)に基づき設定した。

b) 水路床の粗度

実験において水路床に設置した棧(棧幅 10mm, 棧高さ 5mm, 設置間隔 20mm)を表現するため、本解析では円柱形要素を水路床に設置した。すなわち、図-14に示すように直径 10mm の円柱形要素を水路床から半径分だけ埋め込み、20mm 間隔で固定し、棧粗度をモデル化した。

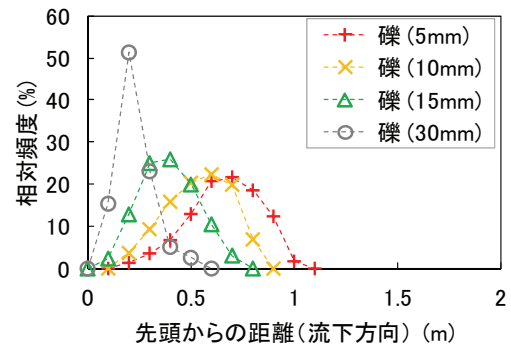
c) 解析ケース

解析ケースは、表-2 に示す実験ケースと同様に、間隔比 W/d_{95} と流木容積率 K_w を変化させて解析を行った。

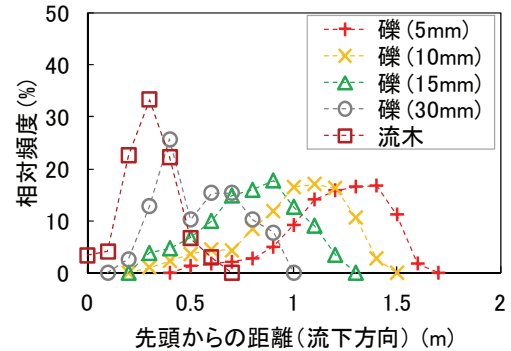
(2) 流木混じり土石流の流下・捕捉シミュレーション

a) 土石流の流下状況

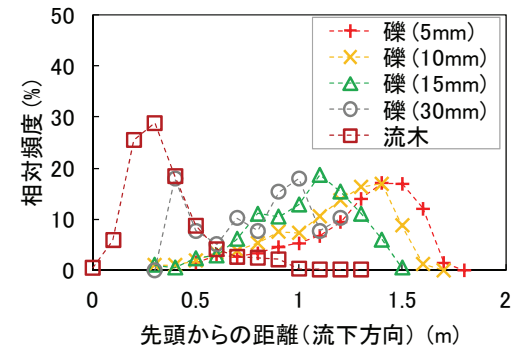
図-15 に、解析によって得られた土石流の流下状況を示す。また、図-16 には解析から得られた土石流流下時の、流下方向距離に対する要素の頻度分布を、流木および礫の粒径ごとに示す。まず、写真-4(a)に示す流木を含まない実験では、礫の順序が概ね灰(30mm)ー



(a) 流木容積率 0%



(b) 流木容積率 10%



(c) 流木容積率 20%

図-16 土石流流下時の要素の頻度分布

緑・黄(15, 10mm)ー赤(5mm)の順で流下しており、粒径の大きな礫が先頭部に集中しながら流下している。一方、図-15(a)に示す解析結果においても、初期にランダムに混合されたものが、概ね同様の流下順序となっている。具体的には、図-16(a)によると、径の大きい 30mm の礫が土石流先頭 0.5m の範囲に集中し、ついで 15, 10, 5mm と径が小さくなるにつれて、頻度分布が土石流の後方に位置している。

一方、写真-4(b), (c)に示す流木を含む実験では、礫よりも前に流木が流下しているが、図-15(b), (c)に示す解析結果においても、流木が土石流先頭部に集中している。また、図-16(b), (c)より、流木が土石流先頭 0.5m の範囲に集中し、次に径の大きい 30mm の礫が 1.0m までの範囲に、最後に 15, 10, 5mm の礫がその後方を流下していることがわかる。これより、流木や巨

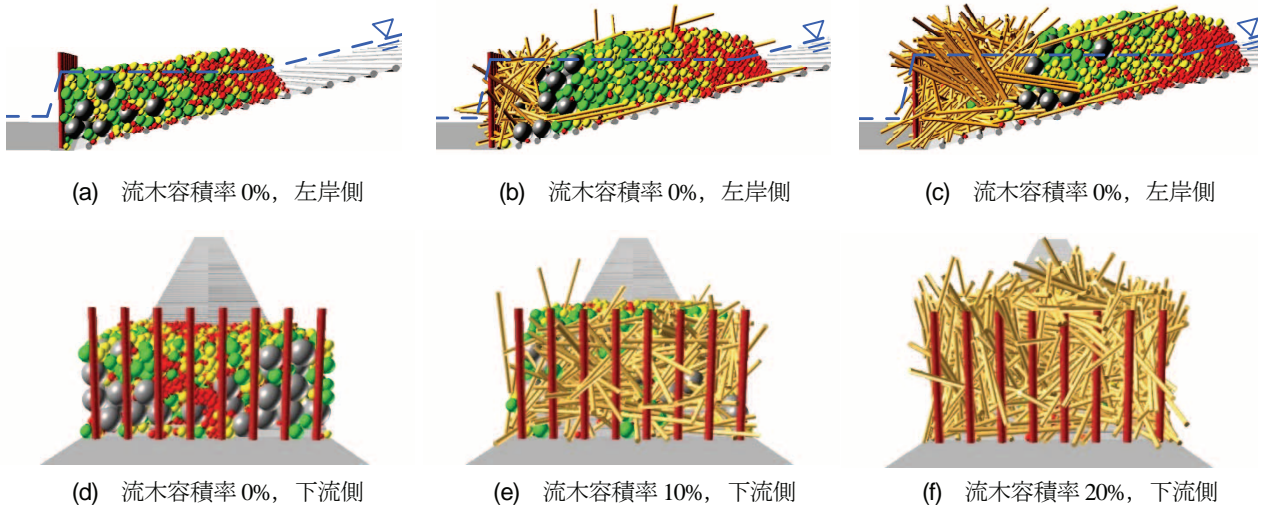


図-17 土石流の捕捉状況(解析結果)

礫が先頭部に集中する流木混じり土石流の流下特性を、再現できることがわかる。

ただし、流下する土石流の先頭部から後端部までの長さは、実験では、約 1.5~2.0m であったのに対し解析結果では約 1.0~1.7m であり、やや短くなっている。

b) 土石流の捕捉状況

図-17 に、間隔比 $W/d_{95}=1.0$ における流木容積率ごとの土石流の捕捉状況を示す。なお、図中に示す点線は、流水の水面を表している。

まず、流木を含まない場合を、写真-4(a), (d)に示す実験と比較すると、実験では、透過部が 30mm(灰)や 15mm(緑)のような径の大きい礫によって閉塞され、10mm(黄)や 5mm(赤)のように径の小さい礫がその上流側に堆積している。これに対し、図-17(a), (d)に示す解析結果は、径の大きい礫が透過部を閉塞し、上流側に径の小さい礫が堆積する様子を再現できている。しかし、堆積形状は異なっている。これは、本解析の簡易的な流速分布モデルでは、堆積塊の中を流れる水流に表現できていないためである。

次に、流木容積率 10%の場合の解析結果は、流木を含まないケースと同様、礫の上流部の堆積形状が必ずしも良く再現できていないが、透過部断面が流木で閉塞されていることや、その間を礫が塞まっていること、さらに、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。これは、流木容積率 20%の場合も、同様である。

以上より、本研究で提案する流速分布モデルでは、堰堤から離れた場所の礫などの堆積形状を正確に再現することは難しいが、透過部の閉塞の大局的なメカニズム、流下と礫の配置については実験結果を概ね表現できることがわかる。

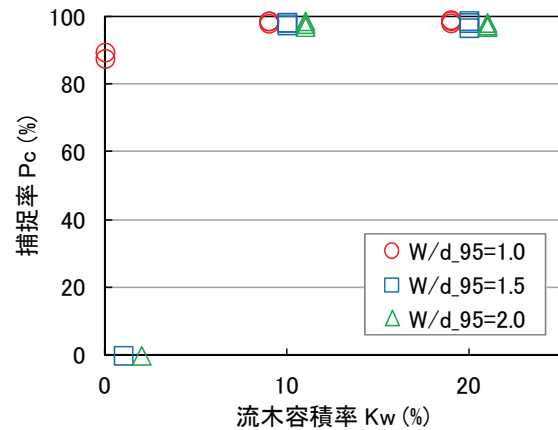


図-18 捕捉率～流木容積率関係の解析結果

c) 捕捉率

図-18 に、解析から得られた流木混じり土石流の捕捉率と流木容積率の関係を示す。まず、間隔比 $W/d_{95}=1.0$ のケースを比較すると、図-10 に示す実験結果においては、流木容積率が 0%の場合、捕捉率が 1点だけ 69%とやや低い点があるものの、その他は概ね 80~90%となっている。また流木容積率 10%, 20%では捕捉率がいずれも 98.5%以上であった。一方、図-18 の解析結果では、流木容積率 0%では捕捉率が 85~90%となり、また流木容積率 10%, 20%では捕捉率がいずれも 97%以上となっており、実験結果と同様の傾向を表現できている。

また、間隔比が 1.5 や 2.0 のケースを比較すると、流木を含まない場合には礫がほとんど捕捉されないものの、土石流中に流木が含まれると捕捉率がいずれも約 95%以上となる様子も再現できている。

以上より本解析方法は、捕捉率という観点からは実験の再現性が高いことがわかった。これは、流木混じり土石流において流木が先行するメカニズムを表現で

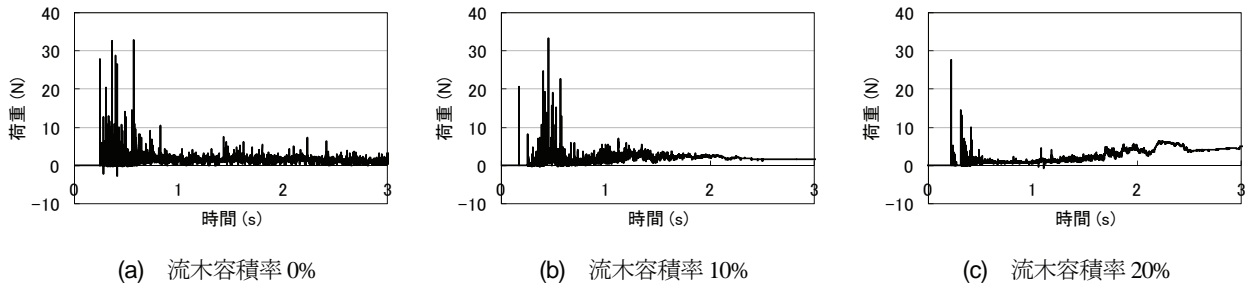
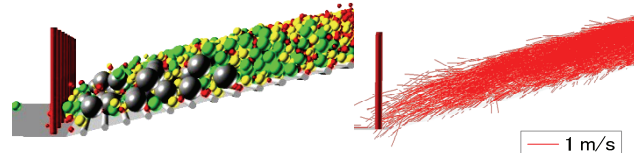
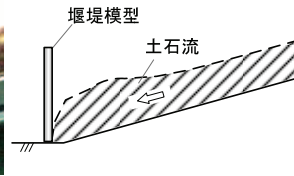


図-19 荷重～時間関係の解析結果($W/d_{95}=1.0$ のケース)



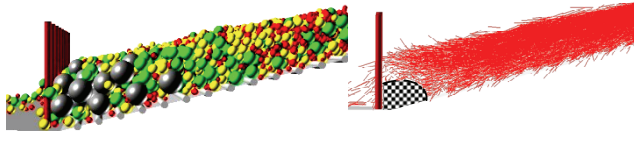
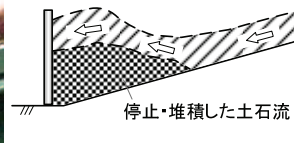
(a) $t = t_0 + 0.0$ s



(a) $t = t_0 + 0.0$ s



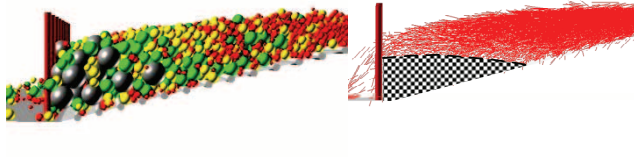
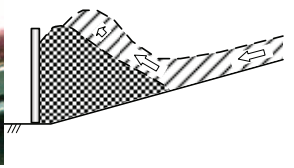
(b) $t = t_0 + 0.2$ s



(b) $t = t_0 + 0.2$ s



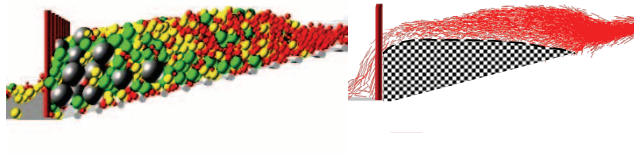
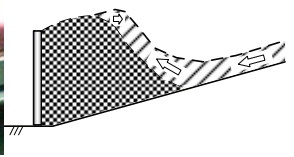
(c) $t = t_0 + 0.4$ s



(c) $t = t_0 + 0.4$ s



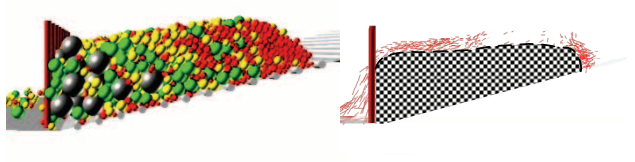
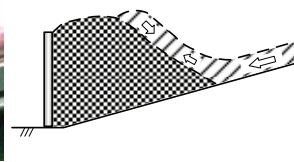
(d) $t = t_0 + 0.6$ s



(d) $t = t_0 + 0.6$ s



(e) $t = t_0 + 0.8$ s



(e) $t = t_0 + 0.8$ s

図-20 実験の土石流捕捉時の状況
($W/d_{95}=1.0$, 流木容積率 0%のケース)

図-21 解析の土石流捕捉時の状況
($W/d_{95}=1.0$, 流木容積率 0%のケース)

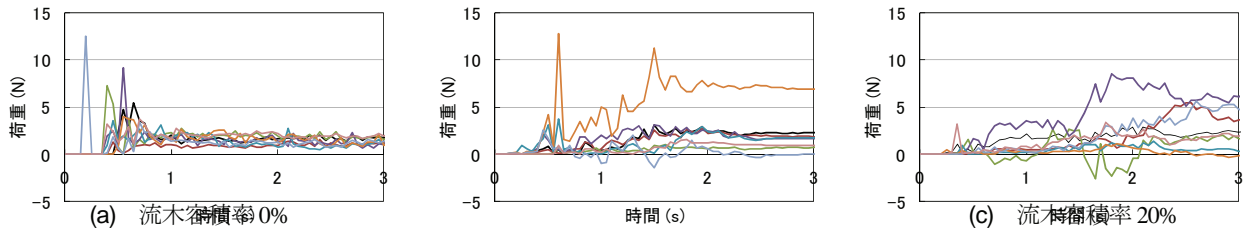


図-22 各部材に作用する荷重～時間関係($W/d_{95}=1.0$ のケース)

きる文献 27)における工夫が効果的であることを示している。

(3) 砂防堰堤柱部材に作用する土石流荷重に関する検討

a) 荷重～時間関係

図-19 に、解析から得られた荷重～時間関係を示す。まず流木を含まない場合について比較すると、実験では礫到達直後に 25.3N を生じ、その後の衝突荷重は徐々に小さくなり、最初の衝突から 1.0 秒後には荷重が 4.0 N に収束して、ほぼ変動がなくなっている。一方、解析では衝突時に 32.9N の荷重が生じ、その後も荷重は大きく変動し続けており、実験結果のように収束しない。また、堆積荷重を見ても、実験では 4.0N に対し、解析結果は 1.1N とかなり小さくなっている。

次に、流木容積率 10%、20%のケースを比較すると、実験では流木到達直後に 10N 程度の荷重を生じ、その後の衝突荷重は小さくなり、最初の衝突から 1.0 秒後には荷重が収束して、ほぼ変動がなくなっている。一方、解析では、30N 前後の明瞭な衝突荷重が計測され、また荷重はその後にも変動し続けており、実験とは異なる傾向を示している。

b) 土石流捕捉過程の比較

図-20, 21 に、間隔比 $W/d_{95}=1.0$ 、流木容積率 0%のケースにおける、実験および解析から得られた土石流捕捉時の状況を、0.2 秒間隔で示す。ここで、図-20 の右側は、ビデオから観察される礫の運動の様子を概略図で示したものである。また、図-21 の右側は、要素の速度ベクトル図である。まず実験では、土石流衝突直後の 0.2s で先頭部の礫が停止・堆積し始め、約 0.4s で砂防堰堤上端まで礫が到達する。これ以降、後続の礫が停止・堆積している礫に乗り上げるように捕捉されている。これを、図-11(a)の荷重～時間関係と比較すると、土石流捕捉時の衝撃荷重は、土石流先頭部の到達から 0.4s ほどの間で大きく作用し、図-20(d), (e)に示す後続の礫の到達に伴う荷重は、砂防堰堤に大きな影響を与えていないことがわかる。

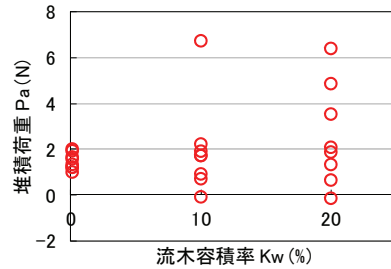


図-23 各部材に作用する堆積荷重～流木容積率関係($W/d_{95}=1.0$ のケース)

一方、解析では、礫の堆積面がほぼ水平の堆積面を保ったまま時間とともに徐々に上昇しており、実験のような急激な閉塞過程とは異なる。これは、図-2 に示すように、流速を水面に対して平行に与え、また水深の増加に伴って流速が遅くなるモデルを用いていることから、実験で観察されるような停止・堆積した礫へ乗り上げる方向の流速成分を表現できていないためである。このように、解析が図-19 の荷重～時間関係を表現しきれていないのは、土石流の捕捉過程を支配する流速場を緻密に表現できないためと考えられる。

c) 流木の有無が堆積荷重のばらつきに与える影響

ところで実験では、土石流中に流木が含まれることで、堆積荷重に大きなばらつきが生じることを明らかにした。実験では装置の制約上、水路中央部に位置する 1 本の柱部材に作用する荷重のみを計測していたため、このばらつきの原因は、流木の堆積塊を介して柱部材に荷重が作用するために荷重の偏りが生じたものであると思われる。ここでは流木の有無が土石流の堆積荷重のばらつきに与える影響について検討する。

図-22 に、間隔比 $W/d_{95}=1.0$ のケースにおける、砂防堰堤の各部材に作用する荷重～時間関係の解析結果を、0.05s 間隔で示す。また、図-23 に、各部材に作用する堆積荷重～流木容積率関係を示す。流木容積率 0%では堆積荷重の標準偏差が 0.4N であるのに対し、流木容積率 10%では 2.0N、流木容積率 20%では 2.4N となっている。

解析においても流木が混じるとばらつきは大きくなっているが、図-13 の実験値に比べると全般的に小さ

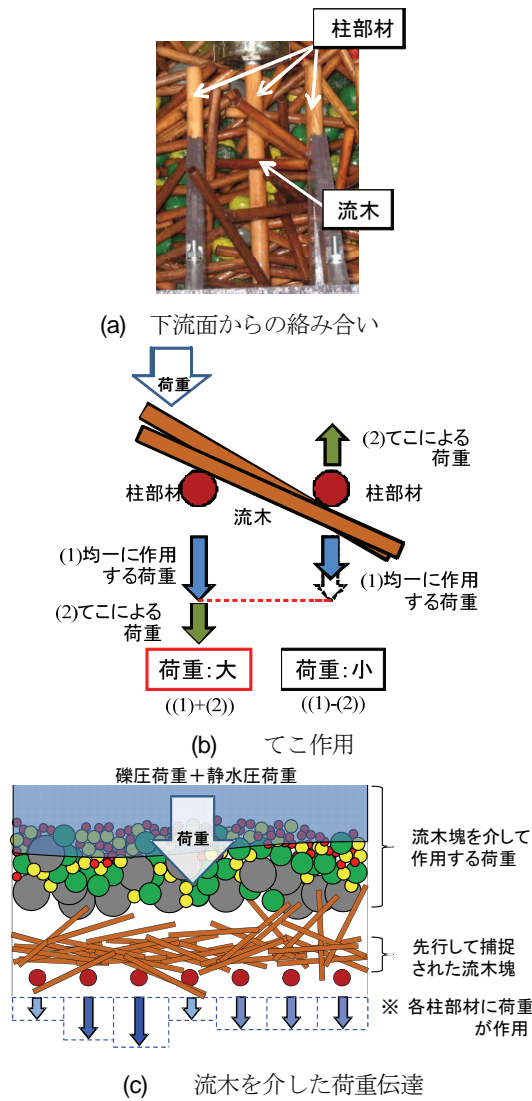


図-24 流木混じりによる不均一性

い。この点について、改めて実験との比較をするために、図-24(a)に流木容積率 20%での堰堤柱部材と流木との絡み合いを示す拡大写真を示す。一部の流木が、図-24(b)に示すように、流木がてこのように柱部材に架構しており、もしも上流側にある礫材が図-24(b)の左端に強く働けば、右端側の柱に上流側へ荷重が発生することが判る。すなわち、図-24(c)に示すように、全般として、柱部材に、流木が絡まり、その上流側に礫材が堆積する場合には、柱一流木-礫の配列のばらつきが、柱部材に生ずる荷重のばらつきを増幅させることが考えられる。この効果は、流木の立体的な架構とその間に挟まっている礫材の配置によって荷重が支配されることになる。解析においても図-24(b)のような解が生ずる場合もあるが必ずしも実験のようにはなっていない。流木の配置には、流木混じり土石流の堰堤近接時の配列構造と捕捉直前の流体力による流木の姿勢決定が重要な因子となるが、提案手法では、この点について改善する必要がある。

5. 結 言

本研究は、流木混じり土石流を受ける透過型砂防堰堤の捕捉性能評価に資する解析法の開発を目的としたものである。すなわち、三次元個別要素法を用いて模型実験のシミュレーション解析を行い、その適用性について検討した。本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- (1) 提案手法は、流木混じり土石流の流下状況について、流木や径の大きい礫が先頭部に集中する分級現象を良く再現できる。
- (2) 提案手法は、先行して到達する流木の架構式構造形成メカニズムと、その構造による後続の土石に対する捕捉メカニズムを良く再現できる。
- (3) 提案手法は、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、良くシミュレーションできる。
- (4) 土石流中に流木が含まれると、捕捉された流木塊の架構メカニズムを介して捕捉工の柱部材に荷重が作用するため、個々の柱部材に生ずる荷重に大きな偏りが生じることを明らかにした。
- (5) なお、提案手法は、堰堤に捕捉された流木や礫による堆積塊の形状については実験と若干の差異がある。このため、堰堤に作用する荷重に関する定量的推定の適用性については、今後の検討課題である。
- (6) また、本研究では、土石や流木の周辺にある水流について、簡易な流速分布モデルを使用している。これは実験における土石、流木塊の観察から得られたものであるが、本来は流水は礫や流木の運動と連成して流れの状態が決定されるものである。この点については、より精緻な解析手法の検討が必要である。

参考文献

- 1) 財団法人 砂防・地すべり技術センター：平成 22 年土砂災害の実態，財団法人 砂防・地すべり技術センター，p.22, 2011.5.
- 2) 財団法人 砂防・地すべり技術センター：平成 12 年土砂災害の実態，財団法人 砂防・地すべり技術センター，p.14, 2001.5.
- 3) 水山高久，石川芳治，福澤誠：流木の運動・堆積機構と対策工に関する研究，土木研究所報告，Vol.183, No.3, pp.71-156, 1991.3.
- 4) 建設省砂防部：土石流対策技術指針(案)，2000.7.
- 5) 建設省砂防部：流木対策指針(案)，2000.7.
- 6) 国土交通省砂防部，国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)及び同解説，社団法人 全国治水砂防協会，2007.11.
- 7) 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，

- 社団法人 全国治水砂防協会, 2007.11.
- 8) 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, Vol.50, No.6, pp.48-51, 1998.3.
 - 9) 田畑茂清, 守山浩史: 鋼製透過型えん堤工法・設計法の変遷と課題, 砂防学会誌, Vol.62, No.6, pp.47-51, 2010.3.
 - 10) 芦田和男, 高橋保: 土石流の調節制御に関する研究ー立体格子型砂防堰堤の水利機能ー, 京都大学防災研究所年報, Vol.23B-2, pp.433-441, 1980.4.
 - 11) 渡辺正幸, 水山高久, 上原信司: 土石流対策砂防施設に関する検討, 砂防学会誌(新砂防), Vol.32, No.4, pp.40-45, 1980.5.
 - 12) 水山高久, 小橋澄治, 水野秀明: 格子型ダムのピーク流量減少率に関する研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.47, No.5, pp.8-13, 1995.1.
 - 13) 水山高久, 鈴木宏, 及川義朗, 森田昭宏: 透過型砂防ダムに関する実験的研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.41, No.2, pp.21-25, 1988.7.
 - 14) 里深好文, 水山高久: 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌(新砂防), Vol.58, No.1, pp.14-19, 2005.5.
 - 15) 和田孝志, 里深好文, 水山高久: 土石流の1次元・2次元シミュレーションモデルの結合, 砂防学会誌(新砂防), Vol.61, No.2, pp.36-40, 2008.7.
 - 16) 前田健一, 舘井恵, 福間雅俊: 個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.9.
 - 17) Hakuno, M. and Uchida, Y.: Application of the Distinct Element Method to The Numerical Analysis of Debris Flow, *Proc. of JSCE*, No.432/I-16, pp.31-41, 1991.7.
 - 18) 水野秀明, 水山高久, 南哲行, 倉岡千郎: 個別要素法を用いた鋼管製透過型砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.52, No.6, pp.4-11, 2000.3.
 - 19) 深和岳人, 香月智, 石川信隆, 山田正: オープン型鋼製砂防ダムの礫捕捉効果に関する個別要素法と確率的評価, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.165-176, 2002.4.
 - 20) 深和岳人, 香月智, 石川信隆, 山田正: 3次元個別要素法によるオープン型鋼製砂防堰堤の土石流捕捉効果解析, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.97-112, 2003.7.
 - 21) 後藤仁志, 原田英治, 酒井哲郎: 三次元個別要素法による数値移動床の一般化, 水工学論文集, Vol.46, pp.613-618, 2001.10.
 - 22) 佐藤和正: 土石流の流体力に及ぼす粒子物性の影響, 筑波大学修士論文, 2006.2.
 - 23) 別府万寿博, 井上隆太, 石川信隆, 長谷川祐治, 水山高久: 修正 MPS 法による土石流段波モデルのシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.63, No.6, pp.32-42, 2011.3.
 - 24) 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解析シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.12, pp.449-460, 2009.8.
 - 25) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 石川信隆: 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, pp.34-41, 2010.9.
 - 26) 渋谷一, 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)特集号, I-323-334, 2011.8.
 - 27) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 石川信隆: 円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.67, No.1, pp.113-132, 2011.10.
 - 28) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究ー栈型粗度と溝型粗度ー, 京都大学防災研究所年報, Vol.4, pp.185-193, 1961.3.
 - 29) 社団法人 砂防学会, 財団法人 建設技術研究所: 平成21年度砂防水理模型実験講習会講義集, p.2, 2009.
 - 30) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 國領ひろし: 平成22年7月16日に広島県庄原市で発生した豪雨災害における流木実態調査, 砂防学会誌, Vol.64, No.1, pp.34-39, 2011.5.
 - 31) 橋本晴行, 村上浩史, 平野宗夫, 鳥野清: 土石流・乾燥粒子流の流体力に関する研究, 土木学会論文集, No.565/I-39, pp.85-98, 1997.5.
 - 32) 吉川秀夫: 水理学, pp.87-88, 技報堂出版, 1976.4.

(2012. 7. 9 受付)

TRAP PERFORMANCE ANALYSIS OF STEEL CHECK DAM SUBJECTED TO WOODY DEBRIS BY USING 3-D DEM

Satoshi KATSUKI, Hajime SHIBUYA, Hisashi OHSUMI and Nobutaka ISHIKAWA

This paper proposes a simulation method on trap performance on the steel check dam subjected to woody debris flow by using 3 dimension distinct element method. The proposed method uses cylindrical elements for woody debris, and sphere elements for rock debris, respectively. Trap performance experiments are carried out by using water way and modeled structures, in advance. Segregation mechanism between woody debris and gravels, or large gravels and small gravels were observed. And trap performance of steel check dams, which have an intervals of pipe members, are checked with respect to contain ratio of woody debris, different ratio of gravel size and structural members interval. The proposed method shows reliable simulation of segregation mechanism and, trap mechanism of the structures as well as trap ratio of the debris.