応用力学論文集 Vol.12, pp.449-460 （2009 年 8 月） 土木学会

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

Trap simulation of grid shape check dam on debris flow containing woody debris by using 3-D Distinct Element Method

渋谷一[*]・原木大輔[**]・香月智[***]
Hajime SHIBUYA, Daisuke HARAKI and Satoshi KATSUKI

[*]学生会員 防衛大学校理工学研究科前期課程 建設環境工学科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
[**]学生会員 修(工) 防衛大学校理工学研究科後期課程 建設環境工学科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
[***]正会員 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

This paper proposes an application of 3-D Distinct Element Method on daming up performance of the grid shape check dam subjected to a debris flow containing with huge rocks and drift woods. In order to simulate the woody drift performance in debris flow, the column shape element is proposed, and the contact judgment equations between 'column element and sphere element', 'column element and column element', and 'column element and triangular element' are formulated. The sealed debris flow experiments associated with several woody debris containment ratio and several gap of horizontal beams of grid dam are carried out in advance, and those are simulated by proposed method. Simulation results are in good agreement with the experimental results from the viewpoints of debris flow shape and the capture mechanism of grid check dam.

Key Words: *3-D Distinct Element Method, grid shape check dam, woody debris*

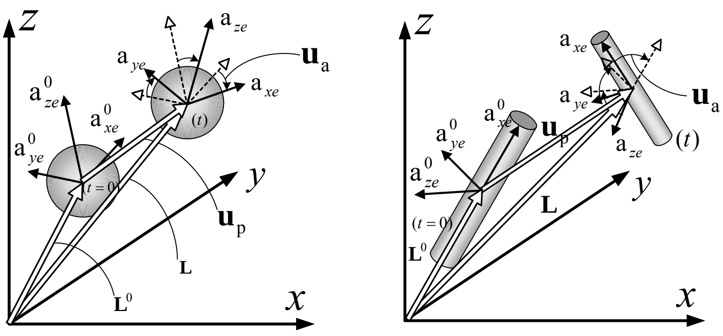
1. 緒 言

流域内に生じる土砂生産，流出，堆積の現象とそれに関わる問題を総合的にみる「流砂系」[1]という新しい概念が導入され，その一環として透過型の砂防えん堤が多く建設されている．透過型砂防えん堤に求められる機能は，①通常時や中小出水時には土砂を通過させ，下流部の自然な流砂系を維持する，②土石流発生時には巨礫群が開口部に詰まることにより，土石流をせき止めることである．石礫型土石流に対する透過型砂防えん堤の捕捉性能は，透過部断面を構成する部材の純間隔と土石流中に含まれる巨礫の最大礫径の比により決定できるものとされている[2]．しかし，土石流中に流木が含まれると，流木は巨礫とともに土石流先端部に集中する傾向があることから[3]，流木が捕捉性能に無視し難い影響を及ぼすものと考えられるようになってきた[4]．

流木混じりの土石流についての既往の研究としては，不透過型の砂防えん堤での捕捉実験の研究[5]や，せき上げ型のコンクリートスリットダムでの捕捉実験の研究[6]がなされている．また，流木の捕捉に関する研究としては，石川ら[7]は狭窄部における流木の捕捉率に関する関係式をまとめ，水山ら[8]や石川ら[9]は，土石流と共に流下してくる流木の捕捉について，透過型砂防ダムを用いた実験を行ない，流木と土砂を分離して捕捉する方法を用いて，流木の捕捉効果を推定する式を明らかにしている．しかし，透過型砂防えん堤での流木混じり土石流の捕捉についてはあまり研究がなされておらず，特に流木混じり土石流に対して透過型砂防えん堤の横梁が捕捉効果に与える影響は未解明なままである．

一方，透過型砂防えん堤の土砂堆積機構や土砂流調整機能に関する解析的研究についてみると，芦田，江頭ら[10]は土砂通過量を確率的に決める閉塞モデルにより土石流の捕捉を解析している．また，水山ら[11]は部材間隔と礫の最大礫径の比および土砂濃度などのパラメータが土石流の捕捉に与える影響を検討している．さらに，閉塞モデルを立体モデルに拡張し，粒径選別機能と組み合わせて，土石流の発生，発達，透過部の閉塞による堆積過程を一貫して計算できるモデルも提案されている[12]．これらは水と砂粒子からなる混合物流れに対して，運動方程式と連続式を鉛直方向に積分して表した連続体モデルを適用しているが，礫の個々の挙動による閉塞を表現することは難しい．

このような観点から，Hakuno, Uchida[13]によって土石流の巨礫群の流れを解析的に表現可能であることが示された個別要素法を用いて，水野ら[14]は捕捉機能を良好に表現できることを2次元解析で示した．深和ら[15]は2次元解析において捕捉効果のばらつきを確率的に評価したうえで，3 次元に拡張して透過型砂防えん堤の捕捉シミュレーション[16]を行っている．また，後藤らは，移動床水理学の観



(a)　球形要素　　　　(b)　円柱形要素

図-1　要素の変位と姿勢

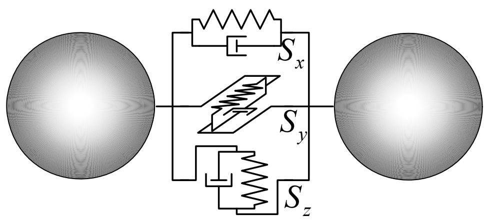


図-2　要素間ばね

点から 3 次元個別要素法を適用し円柱障害物群による崩壊土砂流の堰止め過程の解析を試みている[17]．しかし，流木を含んだ土石流の解析については，見当たらない．

そこで本研究は，透過型砂防えん堤を用いた流木混じり土石流の捕捉実験を行い，流木が透過型砂防えん堤の捕捉性能に与える影響について検討したうえで，円柱形要素を導入した 3 次元個別要素法を流木混じり土石流に適用し，模型実験のシミュレーション解析を試みるものである．

2. 解析手法

個別要素法は，まず各要素が接触状態にあることを判定し，要素間に設定した要素間ばねの接触力を算定し，時々刻々，個々の要素ごとに運動方程式を解くことにより変位を求め，個々の要素の運動を追跡するものである．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体力モデルを用いて表現した．

以下，各要素の運動を表す変位・姿勢の計算方法，運動方程式の解法について示すとともに，ばね力の計算方法，接触判定の要領，流体力のモデル化の要領について示す．

2.1　剛体の変位と姿勢

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[18]．

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}^0 + \mathbf{u}_{\mathrm{p}} \tag{1}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^0 + \Delta\mathbf{A}(\mathbf{u}_{\mathrm{a}}) \tag{2}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{\mathrm{p}} \\ \mathbf{u}_{\mathrm{a}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

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，$\mathbf{u}_{\mathrm{p}}$：変位ベクトル（$\mathbf{u}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{T}} = [\,u_{\mathrm{px}}, u_{\mathrm{py}}, u_{\mathrm{pz}}\,]$），$\mathbf{A}$：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，$\mathbf{u}$：全体座標系における変位ベクトル，$\mathbf{u}_{\mathrm{a}}$：全体座標系における回転角ベクトル（$\mathbf{u}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}} = [\,u_{\mathrm{ax}}, u_{\mathrm{ay}}, u_{\mathrm{az}}\,]$）である．

2.2　運動方程式

(1)　運動方程式

系全体の運動方程式を，次のように表す．

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}(t) + \sum \mathbf{f}_{\mathrm{K}}(\mathbf{u}(t)) = \mathbf{f}(t) \tag{4}$$

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{M}\mathbf{g} + \mathbf{f}_{\mathrm{W}}(t) \tag{5}$$

ここで，$\mathbf{M}$：質量マトリクス，$\mathbf{D}$：減衰マトリクス，$\mathbf{f}_{\mathrm{K}}$：ばね力の重心点等価力ベクトル，$\mathbf{f}$：外力の総和，$\mathbf{g}$：重力加速度ベクトル，$\mathbf{f}_{\mathrm{W}}$：流体力ベクトル，$(\dot{\ })$：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 $\mathbf{f}_{\mathrm{D}}$ によって表わされるものとする．よって，式(4)は次のように表せる．

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \left\{\sum \mathbf{f}_{\mathrm{D}}(\dot{\mathbf{u}}(t)) + \sum \mathbf{f}_{\mathrm{K}}(\mathbf{u}(t))\right\} = \mathbf{f}(t) \tag{6}$$

(2)　運動方程式の解法

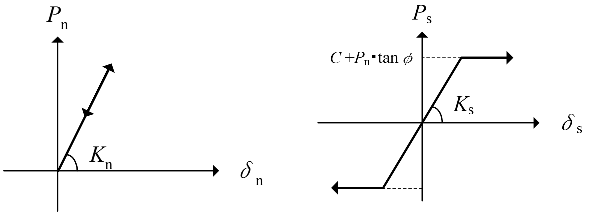
本解析では，3 次元における運動方程式を中心差分法を用いて解く[18]．ただし，速度項は後進差分とした．

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t+\Delta t) - 2\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t-\Delta t)}{\Delta t^2} \tag{7}$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-\Delta t)}{\Delta t} \tag{8}$$

以上より，時間$(t+\Delta t)$における変位は次式により求まる．

$$\mathbf{u}(t+\Delta t) = \mathbf{M}^{-1}\left\{\mathbf{f}(t) - \sum \mathbf{f}_{\mathrm{D}}(\dot{\mathbf{u}}(t)) - \sum \mathbf{f}_{\mathrm{K}}(\mathbf{u}(t))\right\}\Delta t^2 + 2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-\Delta t) \tag{9}$$

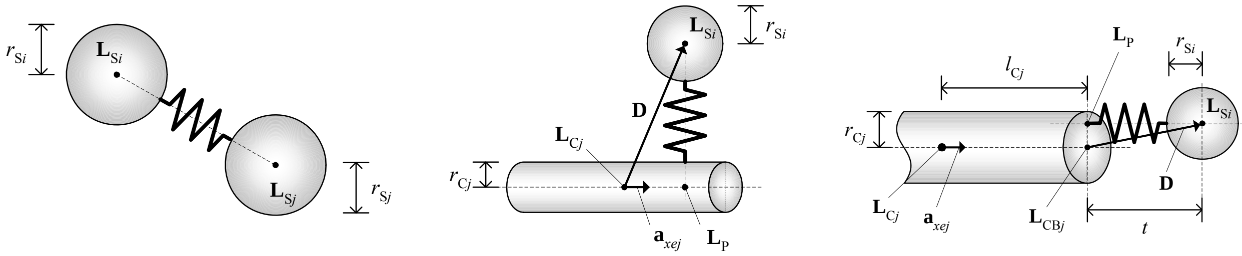


(a)　法線方向ばね　　(b)　接線方向ばね

図-3　要素間ばねの応力～ひずみ関係

表-1　接触判定の種類

種類	接触要素		図-4との対応
1	球要素	球要素	(a)
2	球要素	円柱形要素の側面	(b)
3-1	球要素	円柱形要素の底面	(c)
3-2	球要素	円柱形要素の底面外縁	(d)
4	球要素	三角形要素	(e)
5	円柱形要素の側面	円柱形要素の側面	(f)
6	円柱形要素の側面	円柱形要素の底面	(g)
7	円柱形要素の底面	円柱形要素の底面	(h)
8	円柱形要素の底面	三角形要素	(i)



(a)　球と球の接触　　(b)　球と円柱側面の接触　　(c)　球と円柱底面の接触（case-1）

図-4　接触判定

2.3　要素間ばねとばね力

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，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[18]. 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.

$$\mathbf{f}_K = \mathbf{T}_G \tilde{\mathbf{C}}^T \mathbf{T}_s \mathbf{S} \tag{10}$$

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，$\mathbf{T}_s$: 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.

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

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，$\Delta\mathbf{q}$: $\mathbf{S}(t)$ 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.
なお要素間ばねの構成則は，法線方向については**図-3**(a)のように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**図-3**(b)に示すモール・クーロンの破壊基準を設けた．ここで，**図-3** の記号は，P_n, P_s : それぞれ法線方向および接線方向のばね力，δ_n, δ_s : それぞれ法線方向および接線方向の変形量，K_n, K_s : それぞれ法線方向および接線方向のばね定数である.

変形適合条件式は反傾関係[20]より，次式によって表わされる.

$$\Delta\mathbf{q} = \sum_{i=1}^{2} \mathbf{T}_s^T \tilde{\mathbf{C}}_i \mathbf{T}_{Gi}^T \Delta\mathbf{u}_i \tag{12}$$

ここで，$\mathbf{C}_i$: 変形適合マトリクス，$\Delta\mathbf{u}$: 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

表-1 に，各要素間の接触判定の種類を示す．球形，円柱形要素および三角形要素の接触においては，それぞれの組み合わせにより計 8 通りの判定要領があり，以下，各接触判定の要領について示す.

(1)　球と球の接触

図-4(a)に示すような 2 つの球形要素の接触判定は，次式によってなされ，次式を満たす場合に接触と判定する.

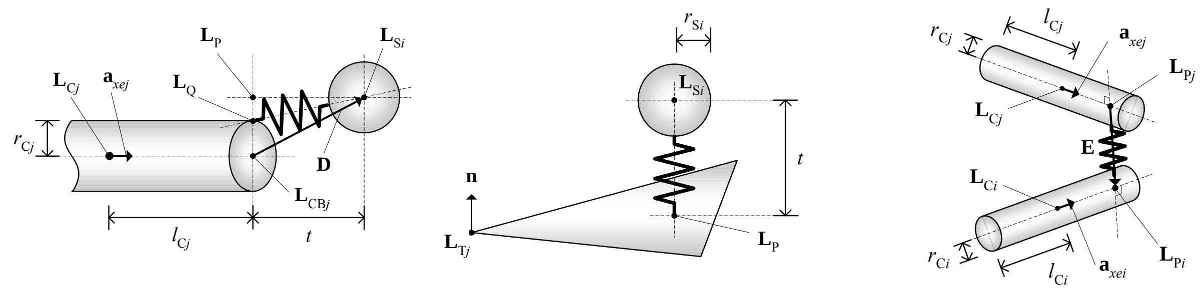
$$\left|\mathbf{L}_{Si} - \mathbf{L}_{Sj}\right| \le r_{Si} + r_{Sj} \tag{13}$$

ここで，$\mathbf{L}_{Si}$: 球形要素 i の中心座標ベクトル，$\mathbf{L}_{Sj}$: 球形要素 j の中心座標ベクトル，r_{Si} : 球形要素 i の半径，r_{Sj} : 球形要素 j の半径である.

また，要素間ばねの法線方向は，［$\mathbf{L}_{Si}-\mathbf{L}_{Sj}$］と同一方向とした.

(2)　球と円柱側面の接触

図-4(b)に示すような球形要素と円柱形要素の側面との



(d)　球と円柱底面の接触（case-2）　(e)　球と三角形要素の接触　(f)　円柱側面と円柱側面の接触

図-4　接触判定（つづき）

接触判定は，次式によってなされ，式(16)を満たす場合に接触と判定する．

$$\mathbf{D} = \mathbf{L}_{\mathrm{S}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{C}j} \tag{14}$$

$$\mathbf{L}_{\mathrm{P}} = \mathbf{L}_{\mathrm{C}j} + (\mathbf{D} \cdot \mathbf{a}_{xej})\mathbf{a}_{xej} \tag{15}$$

$$|\mathbf{L}_{\mathrm{S}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{P}}| \le r_{\mathrm{S}i} + r_{\mathrm{C}j} \tag{16}$$

ここで，$\mathbf{L}_{\mathrm{C}j}$：円柱形要素jの中心座標ベクトル，$\mathbf{D}$：要素i, jの各中心座標を結ぶベクトル，$\mathbf{a}_{xej}$：円柱形要素jの中心軸方向を表す単位ベクトル，$\mathbf{L}_{\mathrm{P}}$：円柱形要素jの中心軸上にある球形要素iとの接触基準点Pの座標ベクトル，$r_{\mathrm{C}j}$：円柱形要素jの半径である．

また，要素間ばねの法線方向は，［$\mathbf{L}_{\mathrm{S}i}-\mathbf{L}_{\mathrm{P}}$］と同一方向とした．

(3)　球と円柱底面の接触

図-4(c)，(d)に示すような球形要素と円柱形要素の底面との接触判定は，まず，次式によって場合分けされる．

$$\mathbf{L}_{\mathrm{CB}j} = \mathbf{L}_{\mathrm{C}j} + l_{\mathrm{C}j}\mathbf{a}_{xej} \tag{17}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{L}_{\mathrm{S}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{CB}j} \tag{18}$$

$$t = \mathbf{D} \cdot \mathbf{a}_{xej} \tag{19}$$

$$\mathbf{L}_{\mathrm{P}} = \mathbf{L}_{\mathrm{S}j} - t\mathbf{a}_{xej} \tag{20}$$

$$\begin{cases} |\mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{P}}| \le r_{\mathrm{C}j} & (case-1) \\ r_{\mathrm{C}j} < |\mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{P}}| \le r_{\mathrm{S}i} + r_{\mathrm{C}j} & (case-2) \end{cases} \tag{21}$$

ここで，$\mathbf{L}_{\mathrm{CB}j}$：円柱形要素$j$の底面中心の座標ベクトル，$l_{\mathrm{C}j}$：円柱形要素$j$の長さの半分，$\mathbf{D}$：球形要素$i$の中心座標と円柱形要素の底面中心座標を結ぶベクトル，$\mathbf{L}_{\mathrm{P}}$：円柱形要素jの底面を含む面上にある球形要素iとの接触点Pの座標ベクトルである．

図-4(c)に示す，*case*-1においては，次式を満たす場合に接触と判定される．

$$t \le r_{\mathrm{S}i} \tag{22}$$

また，要素間ばねの法線方向は，$\mathbf{a}_{xej}$と同一方向とした．

図-4(d)に示す，*case*-2においては，式(24)を満たす場合に接触と判定される．

$$\mathbf{L}_{\mathrm{Q}} = \mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} + r_{\mathrm{C}j}\frac{(\mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{P}})}{|\mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{P}}|} \tag{23}$$

$$|\mathbf{L}_{\mathrm{S}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{Q}}| \le r_{\mathrm{S}i} \tag{24}$$

ここで，$\mathbf{L}_{\mathrm{Q}}$：*case*-2における円柱形要素jの底面上にある接触点Qを表すベクトルである．

また，要素間ばねの法線方向は，［$\mathbf{L}_{\mathrm{S}i}-\mathbf{L}_{\mathrm{Q}}$］と同一方向とした．

(4)　球と三角形要素の接触

図-4(e)に示すような球形要素と三角形要素の接触判定は，次式によってなされ，式(27)を満たす場合に接触と判定される．

$$t = (\mathbf{L}_{\mathrm{S}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{T}j}) \cdot \mathbf{n} \tag{25}$$

$$\mathbf{L}_{\mathrm{P}} = \mathbf{L}_{\mathrm{S}i} - t\mathbf{n} \tag{26}$$

$$t \le r_{\mathrm{S}i} \tag{27}$$

ここで，$\mathbf{L}_{\mathrm{T}j}$：三角形要素j上の任意の点の座標ベクトル，$\mathbf{n}$：三角形要素jの単位法線ベクトル，$\mathbf{L}_{\mathrm{P}}$：三角形要素j上にある球形要素iとの接触点Pの座標ベクトルである．

また，要素間ばねの法線方向は，$\mathbf{n}$と同一方向とした．

(5)　円柱側面と円柱側面の接触

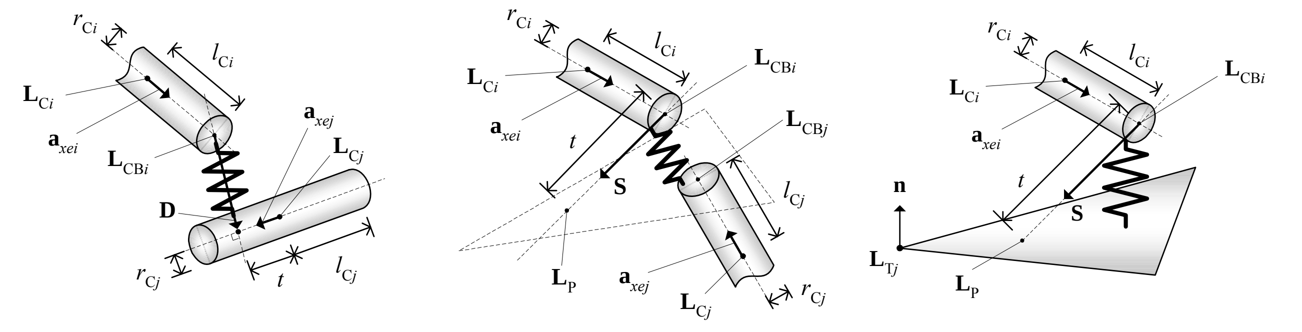
図-4(f)に示すような円柱形要素の側面と円柱形要素の側面との接触判定は，まず次式を満足するt_i, t_jを求める．

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{\mathrm{P}i} = \mathbf{L}_{\mathrm{C}i} + t_i\mathbf{a}_{xei} \\ \mathbf{L}_{\mathrm{P}j} = \mathbf{L}_{\mathrm{C}j} + t_j\mathbf{a}_{xej} \end{cases} \tag{28}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{L}_{\mathrm{P}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{P}j} \tag{29}$$

$$\begin{cases} \mathbf{a}_{xei} \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \mathbf{a}_{xej} \cdot \mathbf{E} = 0 \end{cases} \tag{30}$$

ここで，$\mathbf{L}_{\mathrm{P}i}$：円柱形要素iの中心軸上にある接触基準点



(g) 円柱側面と円柱底面の接触　(h) 円柱底面と円柱底面の接触　(i) 円柱底面と三角形要素の接触

図-4　接触判定（つづき）

P_iの座標ベクトル，$\mathbf{L}_{\mathrm{P}j}$: 円柱形要素jの中心軸上にある接触基準点P_jの座標ベクトル，$\mathbf{E}$: 点P_i, P_jを通り円柱形要素i, jの中心軸ベクトルに互いに直交するベクトル，t_i, t_j : 円柱形要素i, jの中心から点P_i, P_jまでの距離である．

そのうえで, t_i, t_jが次式を満たす場合に接触と判定する．

$$\begin{cases} |t_i| \le l_{\mathrm{C}i} \\ |t_j| \le l_{\mathrm{C}j} \end{cases} \quad \mathit{and} \quad |\mathbf{E}| \le r_{\mathrm{C}i} + r_{\mathrm{C}j} \tag{31}$$

また，要素間ばねの法線方向は，$\mathbf{E}$と同一方向とした．

(6)　円柱側面と円柱底面の接触

図-4(g)に示すような円柱形要素の側面と円柱形要素の底面との接触判定は，式(35)を満たす場合に接触と判定される．

$$\mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} = \mathbf{L}_{\mathrm{C}i} + l_{\mathrm{C}i}\mathbf{a}_{xei} \tag{32}$$

$$t = \left(\mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{C}j}\right) \cdot \mathbf{a}_{xej} \tag{33}$$

$$\mathbf{D} = \left(\mathbf{L}_{\mathrm{C}j} + t\mathbf{a}_{xej}\right) - \mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} \tag{34}$$

$$|\mathbf{D}| \le r_{\mathrm{C}j} + r_{\mathrm{C}i}\sqrt{1 - \left(\frac{\mathbf{a}_{xei} \cdot \mathbf{D}}{|\mathbf{D}|}\right)^2} \tag{35}$$

ここで，$\mathbf{D}$: 円柱形要素iの底面中心座標と円柱形要素jの中心軸上にある接触基準点を結ぶベクトルである．

なお，要素間ばねの法線方向は，$\mathbf{D}$と同一方向とした．

(7)　円柱底面と円柱底面の接触

図-4(h)に示すような円柱形要素の底面と円柱形要素の底面との接触判定は，次式によってなされる．

$$\mathbf{S} = \left(\mathbf{a}_{xej} \times \mathbf{a}_{xei}\right) \times \mathbf{a}_{xei} \tag{36}$$

$$\mathbf{L}_{\mathrm{P}} = \mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} + t\frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \tag{37}$$

$$\mathbf{a}_{xej} \cdot \left(\mathbf{L}_{\mathrm{P}} - \mathbf{L}_{\mathrm{CB}j}\right) = 0 \tag{38}$$

ここで，$\mathbf{L}_{\mathrm{P}}$: 円柱形要素jの底面を含む面上にある接触基準点Pの座標ベクトル，$\mathbf{S}$: 円柱形要素iの底面と平行し円柱形要素iの底面中心座標と接触基準点Pを結ぶベクトルである．

式(36)~(38)を満たす解であるtが次式を満たす場合に接触と判定される．

$$|t| \le r_{\mathrm{C}i} \quad \mathit{and} \quad \left|\mathbf{L}_{\mathrm{P}} - \mathbf{L}_{\mathrm{CB}j}\right| \le r_{\mathrm{C}j} \tag{39}$$

また, 要素間ばねの法線方向は, $\mathbf{a}_{xej}$と同一方向とした．

(8)　円柱底面と三角形要素の接触

図-4(i)に示すような円柱形要素の底面と三角形要素の接触判定は，次式によってなされる．

$$\mathbf{S} = \left(\mathbf{n} \times \mathbf{a}_{xei}\right) \times \mathbf{a}_{xei} \tag{40}$$

$$\mathbf{L}_{\mathrm{P}} = \mathbf{L}_{\mathrm{CB}i} + t\frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \tag{41}$$

$$\mathbf{n} \cdot \left(\mathbf{L}_{\mathrm{P}} - \mathbf{L}_{\mathrm{T}j}\right) = 0 \tag{42}$$

ここで, $\mathbf{S}$: 円柱形要素iの底面と平行し円柱形要素iの底面中心座標と三角形要素上にある接触基準点Pを結ぶベクトルである．

式(40)~(42)を満たす解であるtが次式を満たす場合に接触と判定される．

$$|t| \le r_{\mathrm{C}i} \tag{43}$$

また，要素間ばねの法線方向は，$\mathbf{n}$と同一方向とした．

(9)　接触判定の工夫

要素の数が多いと要素間の接触判定の計算に大半の時間を要し，計算負担が莫大なものとなるため，近傍要素抽出[16]を行った．これは，各接触判定において仮想の余長を設けることにより, ある一定の時間間隔で接触の可能性のある候補のみを抽出し, 各タイムステップではその抽出した要素のみ接触判定を行うことにより, 計算負担を軽減するものである．

また，接触判定に要する時間をさらに短縮するため，接触判定を行う前に要素間の中心間距離を求めて, 一定の範囲内にあるときのみ接触判定を行うものとし, 計算効率を向上させる工夫を行った．例えば，球と円柱側面の接触の

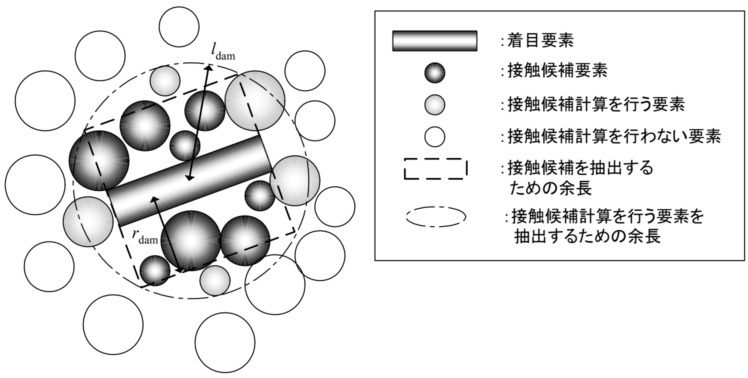


図-5　接触候補の抽出

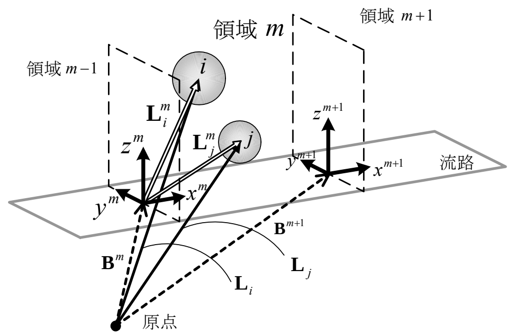


図-6　位置座標の領域分割

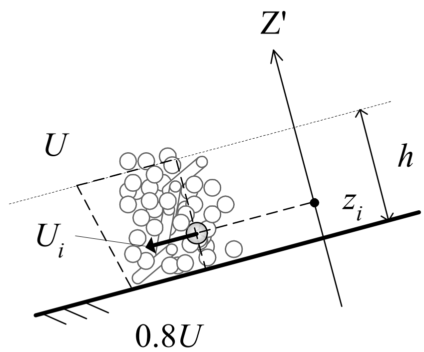


図-7　流下時の流速分布

判定においては図-5 のようになり，次式で表わされる.

$$\left|\mathbf{L}_{\mathrm{S}i} - \mathbf{L}_{\mathrm{P}}\right| \le l_{dam} \tag{44}$$

ここで，l_{dam}：接触候補として計算を行う要素を抽出するための余長である.

これにより本解析においては，近傍要素抽出のみを行った時に比べ，さらに計算時間で 0.4~16.0%ほど短縮することができた.

(10)　位置座標データ取扱い上の工夫

本解析における数値計算上の問題として，前述の接触判定の計算にはベクトルで表した位置座標を用いているが，解析では流下方向の移動距離が約 4m であるのに対し，接触判定に用いる半径等は 5mm 程度であるため，桁落ちが問題となる場合がある．例えば式(13)の左辺と右辺では 4 桁程度の差が出ることになる.

そこで，本研究では図-6 に示すように領域を分割して各領域に原点を設け，要素 i の位置ベクトル $\mathbf{L}_i$ を，式(45)に示すように，領域 m の原点を表すベクトル $\mathbf{B}^m$ と，領域 m における要素 i の位置ベクトル $\mathbf{L}_i^m$ に分け，$\mathbf{L}_i^m$ を用いて接触判定を行うことにより，桁落ちを防ぐ工夫を行った.

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{B}^m + \mathbf{L}_i^m \tag{45}$$

また，領域 m から領域 m+1 に変化する際の位置ベクトルの変換は次式で表される.

$$\mathbf{L}_i^{m+1} = \mathbf{L}_i^m - \left(\mathbf{B}^{m+1} - \mathbf{B}^m\right) \tag{46}$$

2.5　流体力モデル

本来，流体力は土石流中の水の流れと礫および流木の運動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．しかし，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．この際，土石流の流下時と捕捉時において流れの性状が異なることから，それぞれ以下のようにモデル化を行った.

(1)　流体力の基本式

要素が水から受ける流体力を，後述の流体力モデルを用いて算定した流速 $\mathbf{U}_i$ をもとに，次式で表す.

$$\mathbf{f}_{\mathrm{W}} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\mathrm{Wp}} \\ \mathbf{f}_{\mathrm{Wa}} \end{bmatrix} \tag{47}$$

$$\mathbf{f}_{\mathrm{Wp}} = \frac{1}{2} C_{\mathrm{D}} \rho A_i \left|\mathbf{U}_i - \dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{p}i}\right| \left(\mathbf{U}_i - \dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{p}i}\right) + \mathbf{f}_{\mathrm{B}} \tag{48}$$

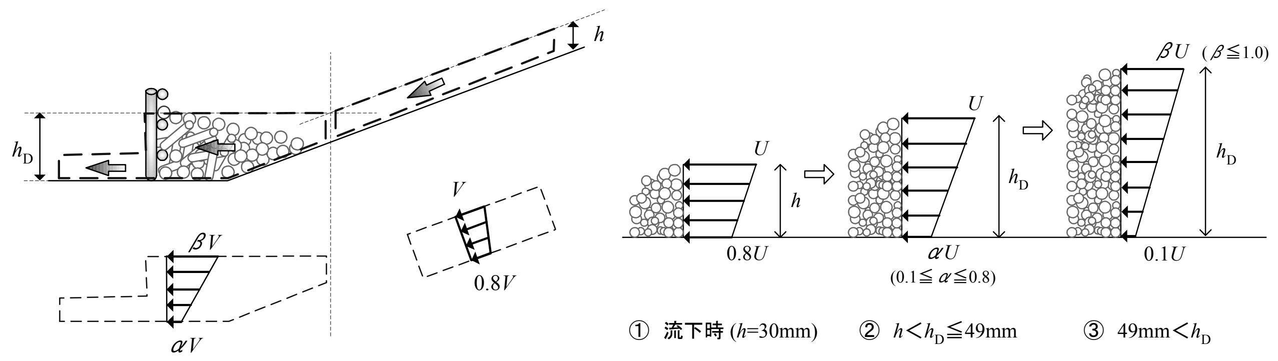
$$\mathbf{f}_{\mathrm{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho V_i g \end{bmatrix} \tag{49}$$

ここで，$\mathbf{f}_{\mathrm{Wp}}$：流体力の並進方向成分，$\mathbf{f}_{\mathrm{Wa}}$：流体力の回転方向成分，$\mathbf{f}_{\mathrm{B}}$：要素にかかる浮力，C_{D}：抗力係数，ρ：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．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（$\mathbf{f}_{\mathrm{Wa}} = \mathbf{0}$）ものとした.

また，円柱にかかる流体力の並進方向成分 $\mathbf{f}_{\mathrm{Wp}}$ のうち浮力を除く部分については，円柱と投影面積が等価な球にかかる流体力と等しいものとして，球にかかる流体力を式(48)より求めて与えるものとした.

(2)　流下時の流体力モデル

図-7 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，基準となる流速 $\mathbf{U}$ と水深 h を与えたとき，水面上の流速を $\mathbf{U}$ で，水路床上の流速を 0.8$\mathbf{U}$ で与えるものとして，各要素の高さから要素に与える流速 $\mathbf{U}_i$ を変化させた．すなわち，各要素に与える流速 $\mathbf{U}_i$ は次式で表わされる.



(a) 捕捉時の流体力モデルの概要　　(b) えん堤直上流部の流速モデル

図-8　土石流捕捉時の流体力モデル

$$\mathbf{U}_i = \frac{z_i}{h}\frac{\mathbf{U}}{5} + \frac{4}{5}\mathbf{U} \quad (0 \le z_i \le h) \tag{50}$$

ここで，$\mathbf{U}$: 基準となる流速ベクトル，$\mathbf{U}_i$: 要素に与える流速ベクトル，z_i : Z'軸上の要素 i の座標（水路床からの高さ），h : 水深である．

なお, 水深 h よりも上方にある要素は空気中にあるものとして，流体力を与えていない．

(3) 捕捉時の流体力モデル

捕捉時の流体力モデルの概要を**図-8 (a)** に示す．土石流の捕捉時においては, 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，**図-8 (b)** に示す流量の保存に基づくモデルにより流速を与えるものとした. この際, 射流から常流に移行する際に生ずる渦（跳水）については無視するものとした．

まず，えん堤直上流部にある要素のうち，最も高い位置にある要素座標を基準としてえん堤直上流部の水深 h_D を定めた．よって，捕捉開始時は水深は小さいが，石礫が捕捉されるにつれて水深は増してくる. この水深変化に応じて，常に流量が保存されるように**図-8 (b)** に示す台形分布の流速の係数 α，β を式(51),(52)より定め，各要素の高さ z_iから，各要素に与える流速 $\mathbf{U}_i$を式(53)により定めた．

$$\begin{cases} \alpha = 1.8 \times \dfrac{h}{h_D} - 1 \\ \beta = 1 \end{cases} \tag{51}$$

$$if \quad \alpha \le 0.1 \quad then \quad \begin{cases} \alpha = 0.1 \\ \beta = 1.8 \times \dfrac{h}{h_D} - \alpha \end{cases} \tag{52}$$

$$\mathbf{U}_i = \left((\beta - \alpha)\frac{z_i}{h_D} + \alpha \right)\mathbf{U} \tag{53}$$

3. 実験概要[21)]

解析に先立ち，実験水路を用いて，透過型砂防えん堤の流木混じり土石流の捕捉に関する実験を行った．

3.1 実験装置概要

実験に用いた土石流実験装置の概要を**図-9** に示す．この実験装置は，長さ 4.35m，幅 0.3m，高さ 0.5m の勾配可変（0~20°）の矩形水路であり，底面はステンレス製，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段波形状を形成しないので, 実際の土石流流下時に見られる段波形状を再現するため，長軸長 7～45mm の砕石を不規則に貼りつけて粗度抵抗を与えた．

実験に用いた土石・流木試料は，**写真-1** に示すような粒子および木材からなる．粒子には粒状石炭灰（比重 1.9）を用い，それぞれ灰色，緑色，黄色，赤色に色分けした 20，15，10，5mm の 4 種類の粒径を，各粒径について 1.5ℓ 枡 1 杯分ずつを混ぜ合せた．その粒径分布は**図-10** に示すものとなり，合計 4,619 個（6ℓ）となっている．木材には，φ10×100mm の木材（比重 0.8）を使用した．

実験に用いた透過型砂防えん堤模型は**図-11** に示すように，φ18mm の木製円柱を使用して作製した．縦方向柱は現行の基準[2)]よりも広くすることにより，礫材のみでは良好な捕捉性能が期待できないパラメータである最大礫径の 2.5 倍（ℓ_H/d_{max}）で固定し，中間横梁のみ純間隔を 30（ℓ_V/d_{max}=1.5），40（同 2.0），50mm（同 2.5）に変更することができる．

3.2 流木混じり土石流捕捉実験

(1) 実験条件

実験においては，水路勾配を 15°で固定し，水路上流から約 4.3ℓ/s の流量を約 6 秒間供給することにより土石・流木試料を流下させた．実験条件は**表-2** に示すように，流木容積率と ℓ_V/d_{max} を変化させて, 各ケース 3 回ずつ行い，えん堤模型が土石・流木試料を捕捉する割合を調べた．ここで，流木容積率（K_w）とは次式で表される．

$$K_w = \frac{V_t}{V + V_t} \tag{54}$$

ここで，V : 粒子の容積（=6ℓ），V_t : 木材の容積である．

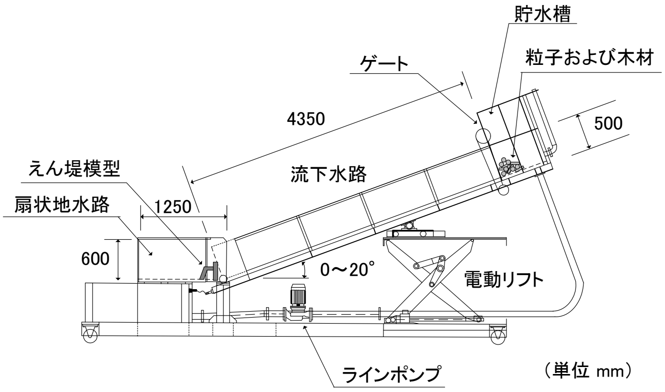


図-9 土石流実験装置の概要

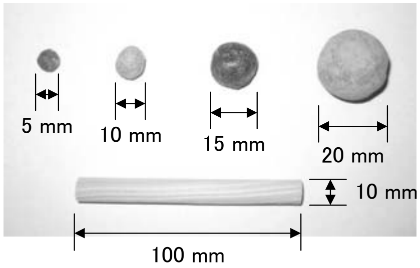


写真-1 粒子及び流木

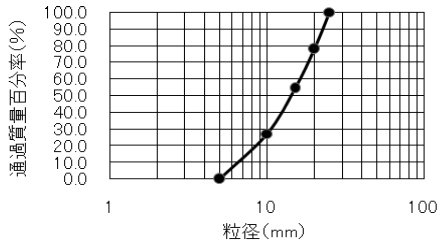


図-10 粒子の粒径加積曲線

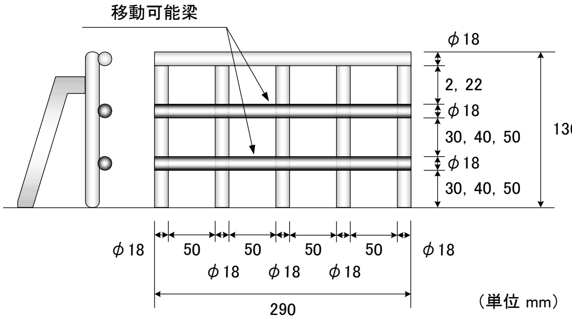


図-11 透過型砂防えん堤模型の概要

表-2 実験条件

l/d_{max}（横梁間隔）	流木容積率(%)	総ケース数
1.5(30mm) 2.0(40mm) 2.5(50mm) 5.9(横梁なし)	0（流木なし） 5 10 15 20	20

(2) 捕捉率の計測・算定要領

本実験においては，えん堤模型が土石・流木試料を捕捉する割合を調べるため，流下後にえん堤模型を通過した土石・流木試料の数量（粒径ごとの粒子数および木材の本数）を計測した．この数量をもとに 1.5ℓ 時の数量との比から容積を換算して，次式により捕捉率を算定した．

$$P_V = \frac{\sum_i V_{ic} + V_{tc}}{V + V_t} \tag{55}$$

ここで，P_V：容積から見た捕捉率，i：粒径 5,10,15 または 20mm を表す，V_{ic}：えん堤に捕捉された粒径 i の容積，V_{tc}：えん堤に捕捉された流木の容積である．

4. 解析結果および考察

4.1 計算条件

(1) 解析手順

本解析は，土石流の流下から捕捉までの一連の過程を次の三過程に分けて解いた．まず流下解析に先立ち，実験の貯水槽に貯まった状態を作るために，要素のパッキングを行う．続いて，流体力を与えて，流下および捕捉の解析を行う．

まず，パッキングについては各要素が落下して，要素の動きが 1mm/s 以下に安定する 2 秒間とした．次に，パッキング過程でゲートとしていた三角形の平面要素を取り払って流下させ，一番先頭の要素が水路勾配の変換点に至るまでを流下過程として計算した．最後に，流下過程に引き続いて流下させた要素がえん堤に捕捉され，捕捉された要素の挙動が落ち着く時間までを捕捉過程として計算した．

(2) 要素のパッキング

要素のパッキングにおいては，まず，棄却法[22]により全要素を空間上に不規則に配置し，これを落下法[22]により水路床，側壁およびゲートに囲まれた空間に自由落下させ，天然ダムのような形状にパッキングを行った．

(3) 解析パラメータ

表-3 に解析条件を示す．ここで，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，基準流速 U 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．水深 h 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=0.03m とした．

抗力係数 C_D については橋本らが行った実験[23]において，$Re=1.3\times10^4 \sim 3.2\times10^4$ の範囲で，C_D=0.49 が得られており，これを用いるものとした．

ばね定数は，深和らの解析[16]と同様に，$\Delta t=1.0\times10^{-5}$ s で

表-3　解析条件

項目			値
水路	勾配		15°
	長さ		4 m
	幅		0.3 m
水	基準流速　U		1.2 m/s
	水深 h		0.03 m
	抗力係数　C_D		0.49
要素	要素数	球形要素（φ5~20 mm）	4619 個
		円柱形要素（φ10×100 mm）	0, 32, 67, 106, または150個
	比重	球形要素	1.9
		円柱形要素	0.8
要素間ばね	ばね定数	法線方向　K_n	1.0×10^4 N/m
		接線方向　K_s	4.0×10^3 N/m
	接線方向ばねの限界値 ($C+P_n$・$\tan\varphi$)		$0.404P_n$
	減衰定数　h		0.2
	粘着力　c		0 N
	摩擦角　$\tan\varphi$		0.404
計算条件	時間刻み　Δt		1.0×10^{-5} s
	接触候補計算を行う時間間隔 t_{reset}		1.0×10^{-3} s
	接触候補をとる余長　r_{dam}		5.0×10^{-3} m

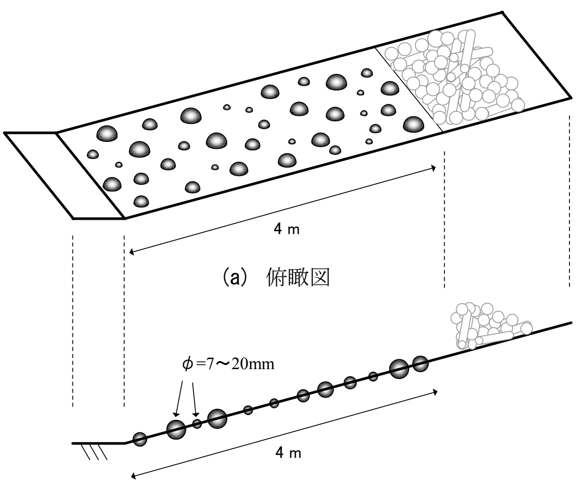
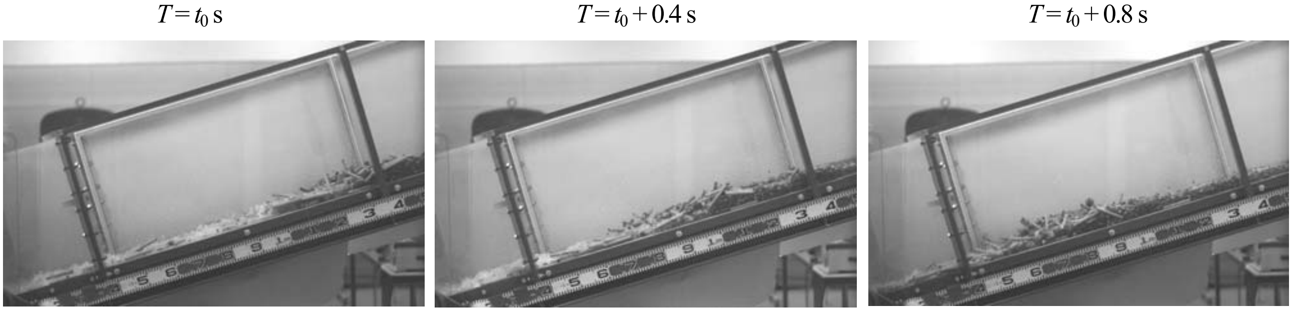


図-12　水路床の抵抗



(a)　実験の流下状況

(b)　解析の流下状況

図-13　K_w=20%における流下状況の一例
（えん堤手前1m付近において）

発散しないパラメータを用いることとした．すなわち，ばねの固有周期Tに対し$T/\Delta t$=50程度となるようにばね定数を定めた．なお，このばね定数については，いろいろな値を試行したうえで，上記方法により定めた値を用いることにより捕捉時の要素間の過剰な振動や反発を抑えて，礫の噛み合いを表現できる値であるものを選定した．減衰については要素間ばねのみに与えるものとして，深和らの解析と同様にh=0.2とし，粒子径毎に減衰係数c_n，c_sを与えるものとした[16]．また粘着力および摩擦角は，実験に用いた試料を基にc=0 N，$\tan\varphi$=0.404 (φ=22°)とした．

(4)　水路床の抵抗

実験と同様に，実際の土石流が流下する路床の凹凸を表現するため，本解析においては，図-12に示すように直径7〜20mmの球形要素を，水路床から半径分だけ埋め込んだ状態で固定し，河床の粗度抵抗を表現するものとした．

(5)　解析ケース

解析ケースは表-2に示す通り，実験と同じケースで流木容積率とℓ_V/d_{max}を変化させて解析を行った．

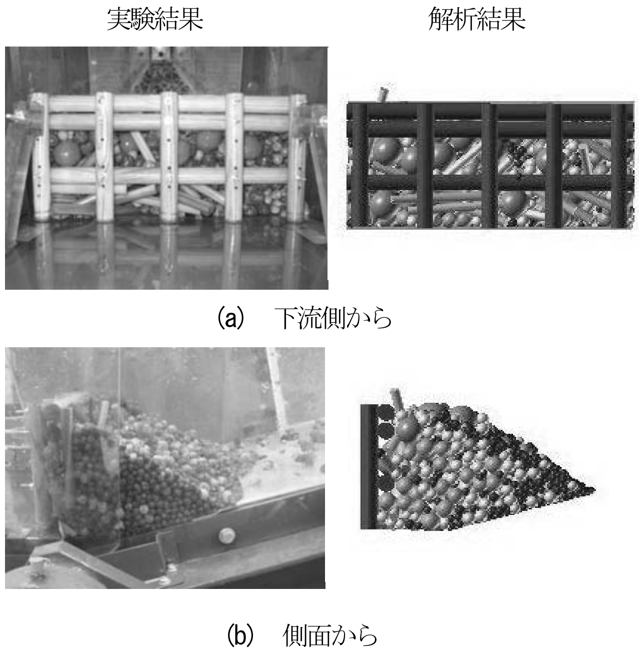


図-14 実験・解析における捕捉状況の一例
(ℓ_V/d_{max} =2.0, K_w = 5 %)

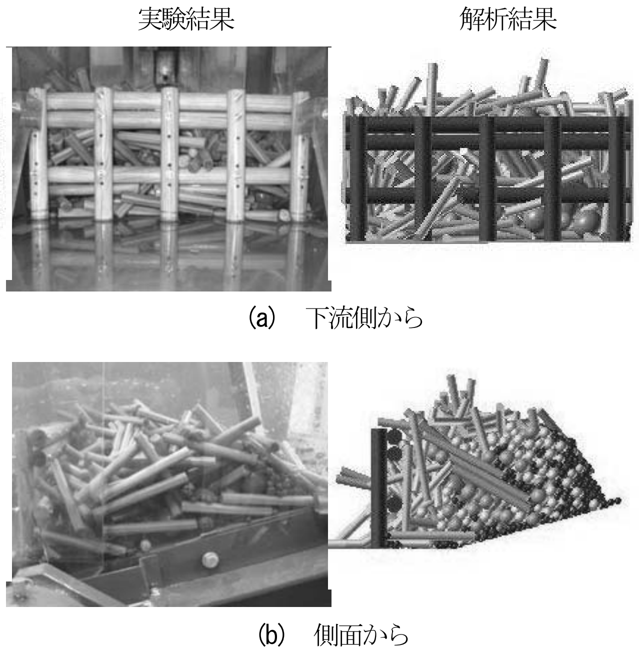


図-15 実験・解析における捕捉状況の一例
(ℓ_V/d_{max} =2.0, K_w = 20 %)

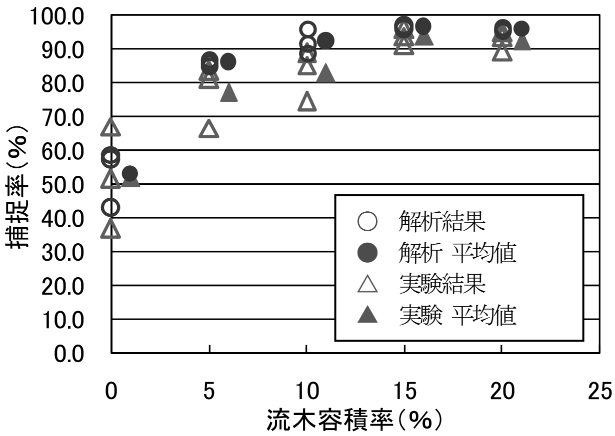


図-16 捕捉率～流木容積率関係 (ℓ_V/d_{max}=2.0)

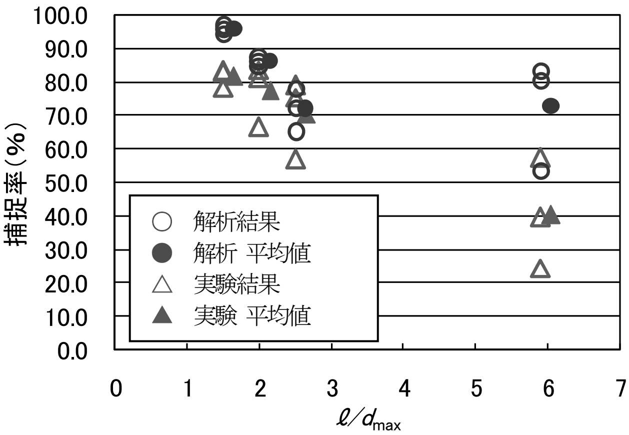


図-17 捕捉率～ℓ_V/d_{max} 関係 (流木容積率 5%)

4.2 土石流シミュレーション

(1) 土石流の流下状況

図-13 は，流木容積率 20%における実験と解析結果の流下状況を 0.4 秒間隔で示したものである．一般に土石流の流下においては，先端部がやや盛り上がる段波状の流れとなり，また，流木が先端部に集中することが観測[24]されているが，この実験においても同じ傾向を示していることがわかる．しかし，解析においては，流木は同じく先端部に集中しているものの，段波の山が実験ほど明瞭には表れていない．ただし，土石流の流下方向に対する長さについては，実験においては約 1.1m に対し，解析においても約 1.0m と，ほぼ同じであり，実験をおおむねシミュレートできていることがわかる．

(2) 土石流の捕捉形態

ℓ_V/d_{max} =2.0 における流木容積率5%と 20%の捕捉状況について，実験および解析結果の一例をそれぞれ**図-14, 15** に示す．

まず，実験においては，流木容積率 5%では流木と礫が半分ずつ透過部断面を閉塞しているが，流木容積率 20%では，ほぼ流木のみにより透過部断面が閉塞されており，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．一方，解析では，堆積高さが実験よりも高いものの，透過部断面を閉塞する要素の割合や形状が実験と近い状況となっていることがわかる．

4.3 流木容積率と捕捉率の関係

(1) ℓ_V/d_{max}=2.0 における捕捉率と流木容積率の関係

図-16 は，ℓ_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ものである．なお，結果は各ケース 3 回行った捕捉率とその平均値をそれぞれ示している．

まず，実験においては，流木容積率の増加に伴い，捕捉率が上昇する傾向があるが，解析においても同様の傾向を示しており，実験結果を良好に再現できていることがわかる．このことは，4.2(2)で示したように，流木容積率が増えると透過部断面を閉塞する流木の割合が増え，流木の堆積の後方に土砂が捕捉されるため，流木容積率の増加が捕捉率の上昇につながっていると考えられる．

(2) 流木容積率 5%における捕捉率と ℓ_V/d_{max} の関係

図-17 は，流木容積率 5%における捕捉率と ℓ_V/d_{max} 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ものである．

まず，実験においては，ℓ_V/d_{max} の増加に伴い，捕捉率が減少していることがわかる．一方，解析においても同様の傾向を示しているが，(1)と同様に，解析の捕捉率はいずれも実験結果のものよりも大きくなっている．特に，ℓ_V/d_{max}=5.9 における捕捉率は，実験のものよりも著しく大きい．この点について，実験と解析それぞれについて動画で比較すると，土石流がえん堤に捕捉され始める瞬間における土石流の流速が，実験よりも解析の方がやや遅くなっているため，解析の方が捕捉における流失の量が少なく，このことが解析の捕捉率が実験よりも大きくなる原因であることが認められた．すなわち，図-8 で示した捕捉時の流体力モデルについては，今後も改良検討が必要である．

5. 結 言

本研究は，透過型砂防えん堤を用いた流木混じり土石流の捕捉について，円柱形要素を導入した 3 次元個別要素法を適用し，模型実験のシミュレーション解析を試みたものである．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過程について，段波形状の再現は難しいものの，おおむねシミュレートすることができた．

(2) 流木混じり土石流の捕捉過程については，解析結果が実験結果をすべて上回っているものの，流木容積率や ℓ_V/d_{max} の変化が捕捉率に与える影響について傾向を捉えている．

(3) 土石流捕捉時の流体力モデルをより適切に表現すれば，流木混じり土石流の捕捉率を定量的にも精度よく再現することができる可能性がある．

(4) 以上の成果は，連続体解析では難しいとされる礫や流木の噛み合いによる閉塞メカニズムを個別要素法が効果的に表現できることを示している．ただし，要素間ばねの構成則パラメータの決定法など，今後も検討を進める必要がある，

参考文献

1) 高橋保：流砂系の総合的な土砂管理に向けて，河川, pp.3-7, 1998.11.
2) 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 土石流・流木対策設計技術指針及び同解説, 平成 19 年 11 月
3) 尾崎幸忠，鴨川義宣，水山高久，葛西俊一郎，嶋丈示：流木が混入した土石流の鋼製透過型ダムによる捕捉形態の調査, 砂防学会誌, vol.51, No.2, p.39-44, 1998.
4) 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.
5) 土井康弘，南哲行，山田孝，天田高白：満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉機構に関する実験的研究―土石流とともに流下する流木―，砂防学会誌, Vol.52，No.6，p.49－55，2000
6) 片谷昌寛，山田孝：流木によるスリット断面の閉塞を軽減できる透過型砂防堰堤に関する実験的研究, 砂防学会誌，Vol.59，No.3，p.23－31，2006
7) 石川芳治，水山高久，福澤誠：土石流に伴う流木の発生及び流下機構, 砂防学会誌（新砂防）, Vol.42, No.3, p.4－10，1989
8) 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，p.47－52，1988
9) 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，p.47－52，1989
10) 芦田和男, 江頭進治, 栗田三津雄, 荒牧浩：透過性砂防ダムの土石流調整機構, 京都大学防災研究所年報, 第 30 号 B-2, pp.441-456, 1987.
11) 水山高久，小橋澄治，水野秀明：格子型ダムのピーク流砂量減率に関する研究，新砂防，Vol.47，No.5(196), pp.8-13, 1995.1.
12) 高橋保, 中川一, 深里好文, 王浩民：立体格子型砂防ダムによる土石流調節のシミュレーション，水工学論文集，第 46 巻, pp.689-694, 2001.10.
13) M. Hakuno, Y. Uchida : 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.
14) 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, p.4-11, 2000.3.
15) 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.
16) 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.
17) 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, 第 46 巻, pp.613-618, 2001.10.
18) 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
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) 青山博之, 上村智彦:マトリックス法による構造解析, 培風館, pp.34-40, 1998
21) 渋谷一, 西田政隆, 原木大輔, 香月智：流木容積率の変化が透過型砂防えん堤の土石流捕捉性能に与える影響. 第 36 回関東支部技術研究発表会講演概要集, I-57, 2009.3
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, 森北出版株式会社, pp.51-53, 1997
23) 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
24) 水山高久：講座　土石流, 土と基礎, Vol.48, No.5, pp.53-58, 2000

（2009 年 4 月 9 日受付）