

風倒木の溪流斜面崩壊過程に及ぼす影響

EFFECT OF FALLEN TREES ON LANDSLIDES AT MOUNTAIN STREAM

後藤仁志¹・原田英治²・酒井哲郎³

Hitoshi GOTOH, Eiji HARADA and Tetsuo SAKAI

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生会員 工修 京都大学大学院博士後期課程 工学研究科土木工学専攻 (同上)

³フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

Great number of fallen trees due to a gale caused by typhoon are the source of the drift timbers, which sometimes make damages to the river structures. The artificial forest of Japanese cedar and cypress, which are easy to be fallen by a gale, increases in the steep mountainside. Hence the production of fallen trees increases. To estimate the amount of the drift timbers, the deposition configuration of the soil-timber mixture is the essential knowledge. Here, the process of the landslides and the resultant deposition of soil-timber mixture are simulated by the Distinct Element Method. The standard code of the Distinct Element Method is extended for the simultaneous analysis of distinct soil elements and the rigid body, as the model of timbers. The soil-timber interaction in the landslides and the difference of the deposition configuration due to the existence of timbers are found in the series of calculation.

Key Words: *fallen tree, drift timber, soil-timber mixture, Distinct Element Method, rigid body tracking*

1. 緒言

台風による強風は、山地斜面に時として大量の風倒木を産出し、豪雨時に斜面崩壊が生じると倒木も崩壊土砂に追従して溪流に堆積する。その後に豪雨が継続して溪流の流量が増加すると、堆積土砂の流出とともに倒木も流出し、河川を流下して流木となる。この種の流木がダム湖に大量に漂着したり、山地河川を横断する橋梁の橋脚に捕捉されて水位上昇を引き起こし、さらには橋梁を破損させるなどの問題が生じている。流木の問題の顕在化の背景に、山地斜面の人工林の存在があることは、しばしば指摘されるところである。杉・檜などの人工林が山腹上部の急傾斜地に多く植林されるようになり、根系の未発達な幼令林が強風が直接的に吹き付ける山腹上部に多く存在するようになったことが、森林の風に対する抵抗力を低下させ、風倒木を多く発生させるようになったという指摘である。これに加えて、除間伐の遅れが、樹木の根系の発達を阻害するという森林管理上の問題点も指摘されている。

森林管理の面から、風倒木自体を減少させる努力が重要なことは言うまでもないが、既往の台風に

よって生じた風倒木が未だ多く残されており、斜面崩壊・堆積による貯留・豪雨による再流出という一連の過程を経た倒木の流木化は、当分の間継続するものと考えられる。本研究では、これらの一連の過程の中で、斜面崩壊と溪流への堆積過程を検討するためのシミュレーションモデルを提案する。崩壊土砂の流動過程はCundall¹⁾の個別要素法による粒状体モデルを用いて追跡し、倒木は球状要素を連結して剛体的に挙動させることによりモデル化する。これにより、堆積域における倒木の分布状態や倒木の混入による崩壊面積・堆積域の変化など、斜面崩壊による土砂生産と倒木群との相互作用を陽に取り扱うことが可能となる。

2. 倒木・土砂相互作用モデル

(1) 解析対象の設定

ここでは、斜面崩壊により生産された倒木を含む土砂流が溪流に堆積するまでの過程を取り扱うので、解析対象領域は、図-1に示すような、溪流を横断する鉛直2次元断面とする。崩壊土砂の流動過程はCundall¹⁾の個別要素法を用いて追跡し、倒

木は球状要素を連結して構成し、各倒木の構成要素の相対的位置関係を変化させないための補正計算を追加して、剛体的に挙動させる。

(2) 個々の要素の支配方程式

崩壊斜面は、均一径の球（土塊のモデル）から成るものとし、倒木は土塊より小さい径の球要素を剛体的に連結して表現する。樹木のモデルとしては、剛体棒、枝付き剛体棒の2種を用いる。樹木構成粒子の剛体連結に関しては後述するが、土塊、樹木の区別無く、全ての球要素について個別要素法で追跡計算を行う。

要素の運動方程式は、

$$\sigma_m A_3 d_m^3 \frac{du_{pi}}{dt} = \sum_j \{ -f_n \cos \alpha_{ij} + f_s \sin \alpha_{ij} \}_j \quad (1)$$

$$\sigma_m A_3 d_m^3 \frac{dv_{pi}}{dt} = \sum_j \{ -f_n \sin \alpha_{ij} + f_s \cos \alpha_{ij} \}_j - \sigma_m A_3 d_m^3 g \quad (2)$$

$$\frac{\pi d_m^5}{32} \frac{d\omega_{pi}}{dt} = \frac{d_m}{2} \sum_j \{ f_s \}_j \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 σ_m ：要素の密度、 A_3 ：要素粒子の3次元形状係数（球を想定し $A_3 = \pi/6$ ）、 d_m ：要素径、 u_{pi}, v_{pi} ：要素 i の x, y 方向（ x, y ：水平方向の座標軸とそれに直交する座標軸）の移動速度、 f_n, f_s ：要素 ij 間の法線(n)および接線(s)方向の作用力、 α_{ij} ：要素 ij の接触角、 g ：重力加速度、 ω_{pi} ：要素 i の角速度である。

各要素の接点には、法線方向および接線方向に弾性スプリング（バネ定数 k_n, k_s ）および粘性ダッシュポット（粘性定数 η_n, η_s ）を配置して相互作用を表現する。要素 ij 間の法線および接線方向の作用力 f_n, f_s は、

$$\begin{cases} f_n(t) = e_n(t) + d_n(t) \\ f_s(t) = e_s(t) + d_s(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} e_n(t) = e_n(t - \Delta t) + k_n \cdot \Delta \xi_n & ; & d_n(t) = \eta_n \cdot \Delta \dot{\xi}_n \\ e_s(t) = e_s(t - \Delta t) + k_s \cdot \Delta \xi_s & ; & d_s(t) = \eta_s \cdot \Delta \dot{\xi}_s \end{cases} \quad (5)$$

と書ける。ここに、 e_n, e_s ：法線および接線方向のバネによる抗力、 d_n, d_s ：法線および接線方向のダッシュポットによる抗力、 $\Delta \xi_n, \Delta \xi_s$ ：時間 Δt 間の法線および接線方向変位である。また、非粘着性材料を対象とすることから、法線方向には引っ張りに抵抗しないジョイントを、接線方向には一定の限界を越える力が作用すると滑動するジョイントをそれぞれ配置した。

個別要素法では、一般に要素間接触を表現するために少なくとも5個の定数が必要とされ、これ

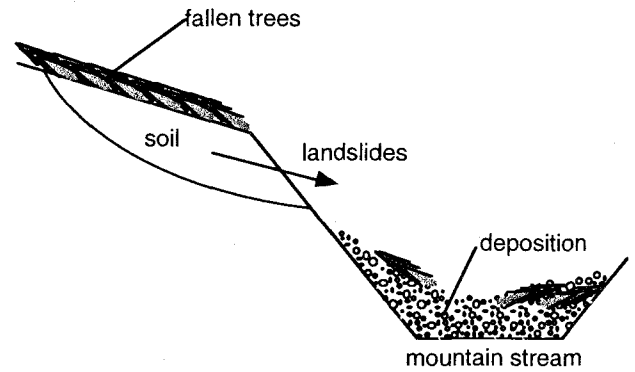


図-1 解析対象領域

らに加えて、塑性バネの導入に伴うバネの圧縮限界や、要素間の異常反発を抑制し計算を安定化させるための反発係数の導入など、要素間接触の記述に多くの定数が必要となる。なお、本研究では、モデルの構成を単純化してモデル定数を最小限の5個とした後藤ら²⁾の粒子コードを用いた。モデル定数の設定に関して後藤ら²⁾は、追跡時間間隔を既知としてVoigt系が過減衰的挙動を示す条件を選択することにより、短時間で安定した粒子層の静止状態が実現できる定数選択の方法を示した。ここでもその方法を用いて、モデル定数を $k_n = 8.56 \times 10^7$ (N/m) ; $k_s = 3.29 \times 10^7$ (N/m) ; $\eta_n = 5.01 \times 10^6$ (Ns/m) ; $\eta_s = 3.11 \times 10^6$ (Ns/m) ; $\mu = 0.58$ 、計算時間間隔を $\Delta t = 2.0 \times 10^{-5}$ s と設定した。なお、この方法では、モデル定数は要素質量に依存するが、要素が均一径でない場合には最大径を対象に定数設定すれば安定であることが知られている。

(3) 倒木に対する剛体連結モデル

樹木は厳密には剛体ではないが、土砂流の変形抵抗と比較すると特に樹幹は近似的に剛体と見なしても問題ない。ここでは、Koshizukaら³⁾が、MPS法で流体中を自由に移動する剛体（浮体等）の計算に用いたのと同様の方法を用いて、土砂流中の倒木を追跡する。

土塊要素、倒木構成要素を区別せず、倒木構成要素間の特殊な連結関係も無いものとして、全要素の運動を個別要素法で追跡する。個別要素法による追跡後には、倒木構成要素は変形し、相対位置に変化が生じる（図-2参照）。そこで、以下の方法で倒木構成要素のみに対して座標修正計算を実施し、倒木構成要素間の相対位置を変化させないようにする。

倒木構成要素の仮速度と仮座標を用いて、倒木 k の時刻 $t + \Delta t$ における重心の位置 $\mathbf{r}_{kg}$ を求め、倒木 k の重心の並進速度ベクトル $\mathbf{T}_k$ および重心周りの倒木 k の構成要素の角速度ベクトル $\mathbf{R}_k$

$$\mathbf{T}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{u}_{ki} \quad (6)$$

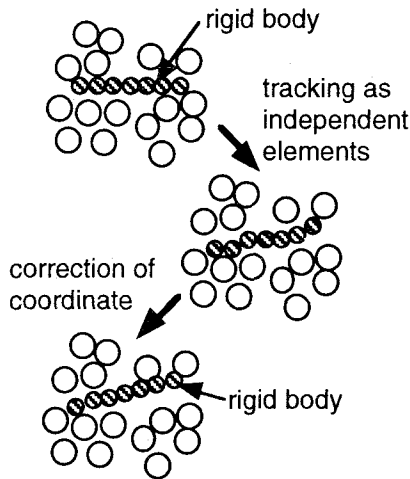


図-2 剛体に対する座標補正

$$\mathbf{R}_k = \frac{1}{I_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{u}_{ki} \times (\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}) \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_{kg} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{r}_{ki} ; \quad I_k = \sum_{i=1}^{N_k} |\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}|^2 \quad (8)$$

を算定する．ここに、 I_k ：倒木の重心周りの慣性モーメント、 N_k ：倒木構成要素の総数である．並進速度ベクトル、角速度ベクトルを用いて、剛体的挙動を満足するための倒木 k の構成要素 i の移動速度は

$$\tilde{\mathbf{u}}_{ki} = \mathbf{T}_k + (\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}) \times \mathbf{R}_k \quad (9)$$

と記述され、これを用いて倒木 k の構成要素 i の座標は、

$$\mathbf{r}_{ki}(t + \Delta t) = \mathbf{r}_{ki}(t) + \tilde{\mathbf{u}}_{ki} \Delta t \quad (10)$$

と修正される．

個別要素法による要素の座標の更新が行われる度に、倒木構成要素に対してのみ上記の座標修正を施すことにより、土塊要素と相互干渉しつつ流動する倒木の運動が追跡できる．

(4) 計算条件

崖状の斜面の上部に倒木堆積があり、雨水浸透等の影響で崖自体が自立できずに崩壊に至った際に表層の倒木が渓流への土砂堆積にどのような影響を及ぼすのかを検討対象とした．崖の地盤は直径 $d=50.0\text{cm}$ の球状粒子を鉛直2次元場で細密に積み重ねて構成し、始めに崖の左側面に鉛直壁を仮設置してパッキング計算を行い、その後この鉛直壁を瞬間的に取り除いて崖の崩壊を誘発し、崩壊から渓流堆積に至る一連の過程を追跡した．また、比較の対象として、崖上部が裸地の場合と樹木（立木）が存在する場合についても検討した．倒木は、直径

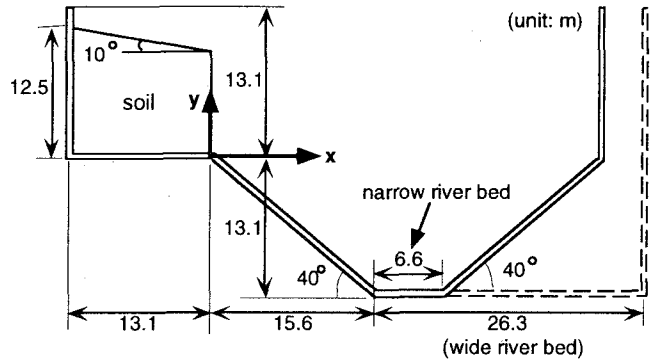


図-3 計算領域

$d=25.0\text{cm}$ の球状粒子を12個直列して構成し、樹木に関しては倒木要素に枝および根を付けて合計22個の球状粒子を剛体的に連結することとした．なお、崖の地盤を構成する粒子（土塊）の比重は、空隙の存在を考慮して、 $\sigma\rho=1.85$ とし、倒木、樹木に関しては、 $\sigma\rho=1.0$ と設定した（ ρ ：水の密度）．

計算対象領域を図-3に示す．渓流側岸は40度の斜面とし、渓流の川幅が狭く、堆積が対岸にまで達する場合を基準としたが、比較の対象として、川幅が十分に広く、堆積が対岸にまで達しない場合についても検討した．

3. 斜面崩壊土砂と倒木の流動過程

(1) 崩壊・堆積過程（時間的发展過程）

倒木に覆われた崖の崩壊過程のシミュレーション結果を図-4に示す．時刻 $t=0\text{s}$ に崩壊を開始した斜面の挙動が2秒間隔の瞬間像として示されている．時刻 $t=2\text{s}$ を見ると、崩壊過程では倒木は流動土砂層の表層に留まり、流動土砂層を覆いつつ移動している．時刻 $t=4\text{s}$ に流動土砂層が渓床に達すると倒木の内では流動層の先端部の表層に存在したものは対岸に押しつけられるようにして土砂堆積層の下部に停止し、それより遅れて渓床に到達した倒木は土砂堆積層の表面に停止する．崩壊土砂の主要部分が渓床に堆積した後も主要部分に続く2次的崩壊が継続し、小規模な土塊が斜面を流下する．時刻 $t=6\text{s}$ には、斜面表層の継続的剥落によって斜面頂部に取り残されていた倒木が不安定化し、時刻 $t=8\text{s}$ には斜面を流下し始める．時刻 $t=10\text{s}$ には、この倒木の運動に誘発された副次的斜面崩壊の様子が斜面下端部付近に見られる．

堆積は、時刻 $t=14\text{s}$ までに完了するが、主要部分の崩壊で渓床が埋まり、その後の副次的剥落の継続で崩壊の発生した斜面側で上部に向かって薄く伸びた堆積層を形成する．倒木自体の堆積は、崩壊斜面の対岸側に偏って生じ、崩壊時に先端にあった倒木は土砂堆積層の下部に埋没し、それ以外の倒木は土

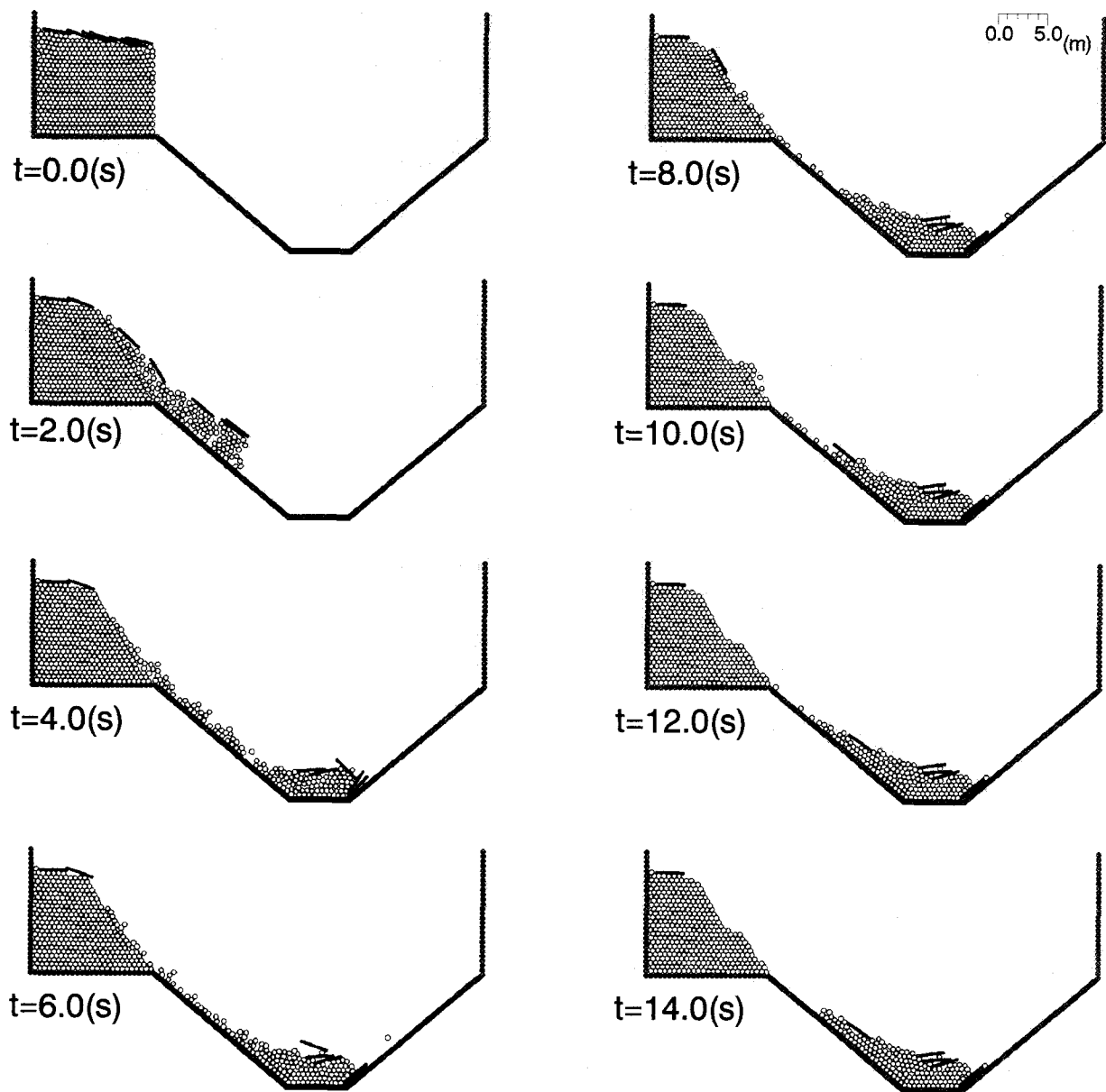


図-4 倒木を有する斜面の崩壊過程

砂堆積層の表層に分布する。このような堆積形式は、堆積以後に生じた大規模流出の際には、初期に流木を伴った土砂の流出が生じ、その後暫く土砂のみの流出が主となってから再び流木が流出するという時間的経緯を辿ることを示唆している。

(2) 倒木および樹木の効果

図-4 で示した渓床堆積の過程を通じて、最終堆積形状が倒木の存在によってどのように影響されているのかは、溪流の水位上昇に伴う堆積物の再流出に関して論じる上での基礎的知見となる。そこで、裸地斜面、倒木に覆われた斜面、樹木を有する斜面の3者について、崩壊の過程を比較したのが、図-5,6 である。裸地の場合について見ると、主要部分の崩壊による渓床堆積、その後の副次的剥落の継続による崩壊発生斜面上の薄い堆積層の形成という倒木混

入状態で見られた基本的特性が確認できる。倒木の存在する場合と裸地の場合で、最終堆積域に関して注意深く比較すると、倒木の存在する場合には対岸部の表層付近にくびれが見られ、崩壊斜面側で斜面上方に向かう堆積層も若干ではあるが長くなっている。このような堆積形状の変化は、堆積層の先端部に集積した倒木が土砂の流動を阻害したことによるものと考えられ、結果として生じる堆積域は裸地の崩壊時より崩壊斜面側に偏ることとなる。

次に、樹木が存在する場合には、まず崩壊過程（時刻 $t=2s$ ）において倒木の場合とは大きく異なっている。計算における樹木は崖上の斜面に自立した根および幹に相当する突起を有する剛体としてモデル化されており、根系による土の拘束などの微視的機構は無視している。樹木は崩壊の進行による地盤支持力の喪失により僅かに流動土砂層に沈み込ん

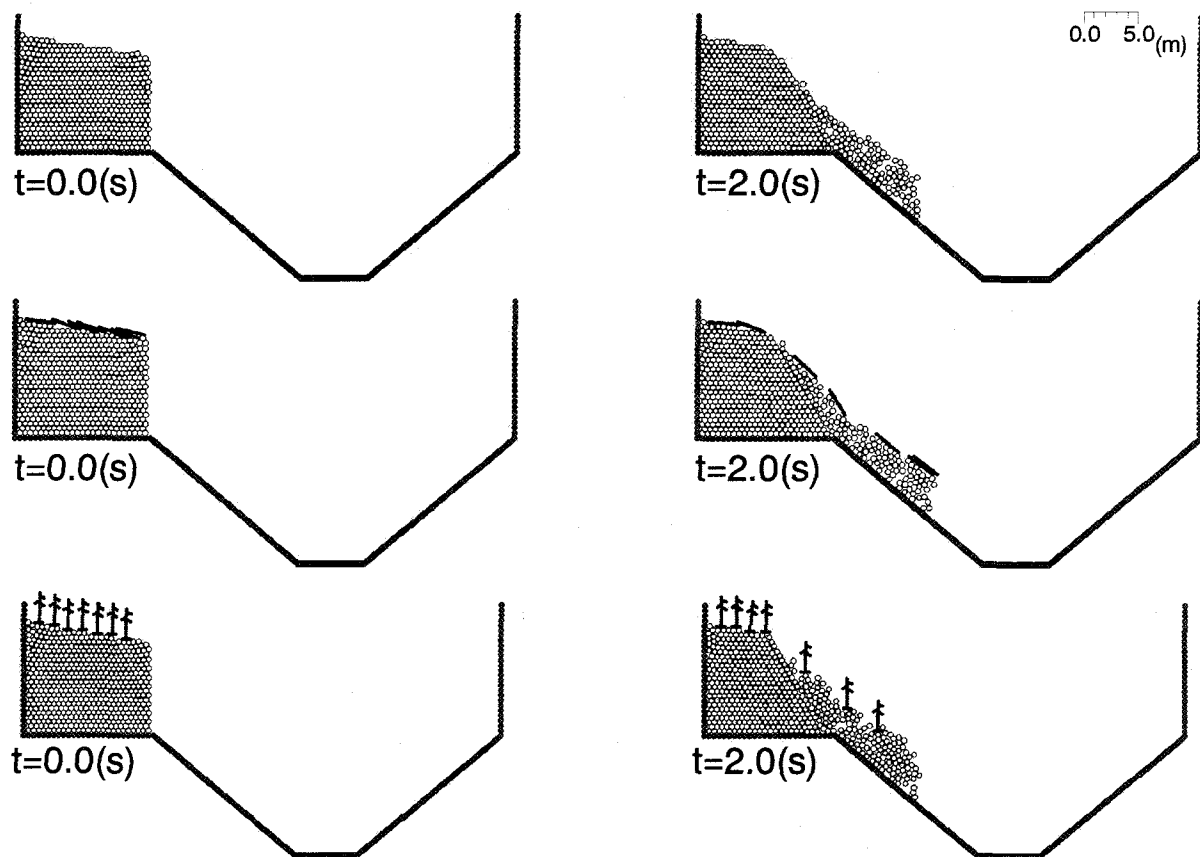


図-5 倒木・樹木の存在による崩壊過程の変化（1）

で、直立姿勢を保持しつつ土砂層とともに流下する。主要部分の崩壊では3本の樹木が落下するが、その後の斜面剥落によって4本目の樹木が不安定化し、主要部分の溪床堆積以降に単独で落下し、時刻 $t=6$ s に転倒した状態で堆積層の斜面付近に停止する。4本目の樹木はそれ以前に溪床に半埋没状態で堆積していた樹木に寄りかかるようにして停止し、その後に斜面を剥落する土砂の流下を阻止している。

倒木と樹木の相違は、倒木が先端部の表層に偏って堆積するのに対して、樹木は堆積域の中央付近に分散し、土砂に半埋没の直立に近い状態で存在することである。土砂堆積以降の降雨による再流出の際には、倒木が流出初期にある程度集中して流木化するのに対して、樹木の場合には、ある程度土砂流出が生じて後に、再流出（流木化）が活発となると考えられる。

溪床堆積域の変化を定量的に把握するため、土砂層及び倒木・樹木の重心を図示したのが、図-7である。なお、図中には、溪流の川幅が広く、対岸の堆積域への影響が無視できる場合（図-8参照）についても併示した。裸地・倒木被覆・樹木繁茂の3つの条件間の土砂堆積の重心の相対的位置関係は大略的には川幅に依存しない（○を基準とした△□の位置は、●を基準とした▲■の位置とほぼ等しい）ことが分かる。これに対して、倒木及び樹木の堆積域の

重心は川幅の影響を明確に受ける。すなわち、川幅が広い場合の倒木・樹木の重心は、川幅が狭い場合より斜面から遠い位置にある。さらに、川幅に依らず、倒木の堆積域の重心は樹木のそれより下方にあり、図-4,5,6に見られた土砂流先端部を流下する倒木の堆積土砂層下への埋没の結果が反映されたものとなっている。

4. 結 語

本研究では、流木の生成過程の中で、斜面崩壊及び溪流への堆積過程を検討するためのシミュレーションを実施した。崩壊土砂の流動過程を個別要素法による粒状体モデルを用いて追跡し、倒木を球状要素を連結して剛体的に挙動させることによりモデル化して、崩壊土砂と倒木・樹木の相互作用を陽に表現できるモデルを構築した。本モデルにより、堆積域における倒木の分布状態や倒木の混入による堆積域の変化など、斜面崩壊による土砂生産と倒木群との相互作用に起因する現象の詳細が計算された。計算は、崖の上部が裸地、倒木被覆・樹木繁茂の3つの異なる状態について実施され、倒木・樹木の存在が崩壊・堆積過程に与える影響が議論された。現地踏査の報告などに見られる流木の溪流表層への集積傾向と少なくとも定性的には一致する計算結果が

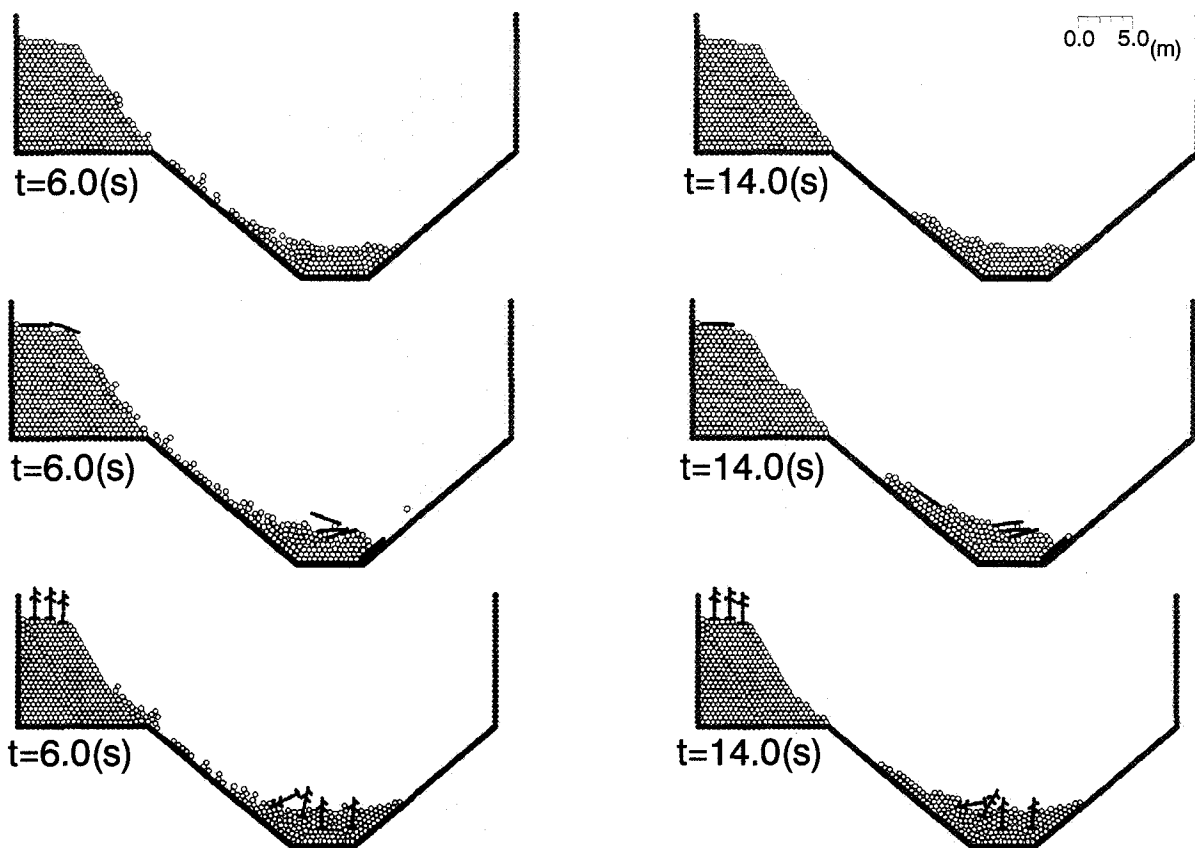


図-6 倒木・樹木の存在による崩壊過程の変化 (2)

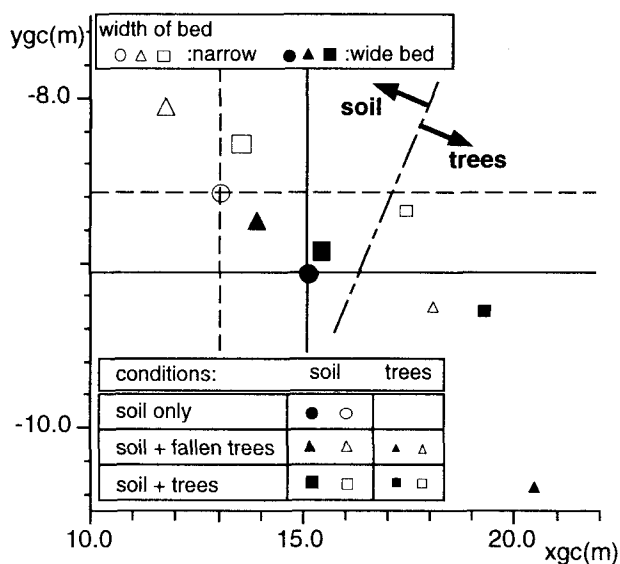


図-7 崩壊域の重心

得られたが、定量的な検証は今後の課題である。

本モデルは鉛直2次元場を対象としているが、将来的にはハードウェアの進歩により3次元計算が可能となり、現地条件を対象とした計算も可能となるものと期待される。それまでに、倒木の堆積厚の影響、溪流斜面特性（勾配、斜面長）の影響、さらに

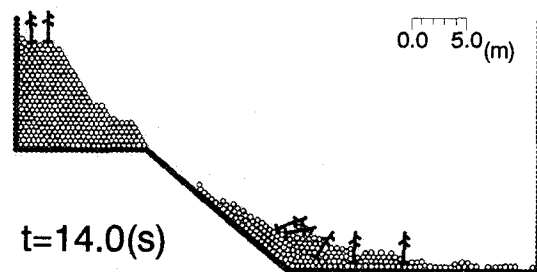


図-8 川幅が広い場合の堆積

は樹木の根系の影響や地盤の粘着性の効果など、現実の場の特性をより多く取り込んだサブモデルの開発を進めたい。

参考文献

- 1) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol. 2, pp. 129-136, 1971.
- 2) 後藤仁志, 原田英治, 酒井哲郎: 数値移動床による混合粒径流砂の流送過程のシミュレーション, 水工学論文集, 第44巻, pp. 665-670, 2000.
- 3) 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.

(2000. 10. 2受付)