

倒木を伴う急傾斜地崩壊災害の 3次元個別要素法による数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION FOR LANDSLIDE WITH FALLEN TREES USING 3D DISTINCT ELEMENT METHOD

原田英治¹・後藤仁志²・酒井哲郎³・合田健一⁴

Eiji HARADA, Hitoshi GOTOHT, Tetsuo SAKAI and Kenichi GOUDA

¹ 正会員 工博 豊田工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒471-8525 豊田市栄生町2-1)

² 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³ フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁴ 学生会員 京都大学大学院修士課程 都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

To reduce damages of recurrent disasters of landslide in mountainside towns, a constant awareness of the disaster prevention is important. A dynamic and visual representation of a disaster would play an effective role to explain a danger of a landslide disaster. In the present study, numerical simulation of a landslide was performed using the three-dimensional Distinct Element Method, and an eloquent performance of this kind of simulator was represented by showing various angle of snapshots. Especially, a landslide considered with fallen trees modeled by the passively-moving-solid model was simulated because a usual landslide disaster contains fallen trees, and the simulation result showed a good agreement with an actual landslide in a tendency of accumulation form.

Key Words : landslide disaster, fallen trees, passively moving solid model, 3D Distinct Element Method

1. はじめに

都市近郊斜面での急傾斜地崩壊による甚大な災害は毎年報告されている。急傾斜地崩壊の主な素因は台風等の継続的集中豪雨による地下水位上昇に伴う地盤強度の減少であるが、国道整備・高速道路・ダム等の山間部への近年の建設域の拡大は、地盤の不安定性を誘発する原因となっており、人為開発に対する適切な急傾斜地崩壊災害防止工の検討は被害抑制には不可欠である。同時に、危険地域の設定、避難体制の確立といったソフト面での災害回避の対応策も重要であり、ハザードマップの作成や物理的根拠に基づいて開発された数値シミュレーションによる適切な被災域予測や住民に対する分かり易い土砂災害の説明が求められている。

従来、土石流等の流動土砂挙動予測には、平面2次元漸変流としての運動方程式・連続式およびクーロン摩擦に代表される抵抗則を連立して解く Euler

型の手法が実スケール問題に対して頻繁に用いられてきた(例えば、高橋ら¹⁾)。ところで、近年の急速なパーソナルコンピュータの演算処理能力向上の恩恵から、Lagrange型のシミュレーション手法の一つである3次元個別要素法型の粒状体モデルによる数十メートルオーダーの大規模計算が並列計算技術と併せて実施されている(後藤ら²⁾)。このような個別要素法型のモデルによる実スケール規模を対象とした数値シミュレーション結果のアニメーションは、被災状況を静的ではなく動的に認識し易く、常日頃から土砂災害危険区域の住民が防災の意識を持ち続けるための支援ツールとして有効であると考えられる。

これまで、3次元個別要素法ベースの粒状体モデルによる急傾斜地崩壊を対象とした数値シミュレーションとしては、伯野ら³⁾による崖崩れのシミュレーション等があるものの、崩壊斜面表面に繁茂している樹木を考慮した数値シミュレーションを対象とした研究例は見当たらない。急傾斜地崩壊後の映像に

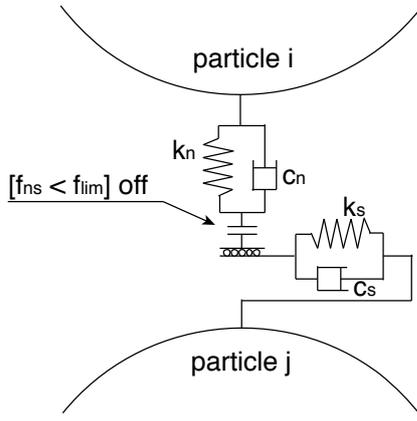


図-1 バネ-ダッシュポット系

は崩壊した土砂・石礫のみならず、流木群の散乱した状況が確認される事実からも、斜面に繁茂していた樹木を含めた斜面崩壊挙動の評価は必要であろう。また、樹木を含めた崩壊予測は、実際の災害のリアリティーを追求することに繋がるため、住民に対して分かり易い説明資料の提供に貢献すると期待される。

ここでは、防災意識向上支援ツール開発への取り組みの一環として、3次元個別要素法型の粒状体モデルによる、流木を含む急傾斜地崩壊挙動を予測するための数値シミュレーションコードの開発に取り組んだ成果を示す。

2. シミュレーションの概要

(1) 3次元個別要素法

個々の砂粒子レベルまで数値シミュレーションの解像度を上げて追跡することは不可能であるので、ここでは計算対象領域の崩壊土を直径1メートルの代表球形要素の塊に分割し、それらの挙動を個別要素法型の粒状体モデル⁴⁾を用いてLagrange的に評価した。個々の代表球形要素の運動は、隣接要素との接触力に起因する並進および回転の運動方程式

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \frac{\mathbf{F}_i}{M_i} + \mathbf{g} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \boldsymbol{\phi}}{dt^2} = \frac{\mathbf{T}}{I_i} \quad (2)$$

$$M_i = \sigma_i \frac{\pi}{6} d_i^3 ; I_i = \frac{\sigma_i \pi d_i^5}{60} \quad (3)$$

によって記述される。ここに、 $\mathbf{r}_i=(x_i, y_i, z_i)$ 、 $\boldsymbol{\phi}_i=(\phi_{xi}, \phi_{yi}, \phi_{zi})$ ：グローバル座標系 (x, y, z) 上での要素 i の位置と回転角、 $\mathbf{F}_i=(F_{xi}, F_{yi}, F_{zi})$ ：グローバル座標系上での要素間接触力、 M_i ：要素 i の質量、 $\mathbf{T}_i=(T_{xi}, T_{yi}, T_{zi})$ ：グローバル座標系上での要素間作用モーメント、 I_i ：要素 i の慣性モーメント、 \mathbf{g} ：重力加速度ベクトル、 σ ：要素 i の要素比重、 d_i ：要素 i の直径で

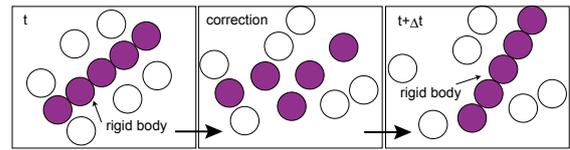


図-2 剛体モデル

ある。

要素間接触力の評価は、接触点におけるローカル座標系 (ξ, η, ζ) において、2要素間接平面の法線方向および接平面内の2つの成分について、Voigtモデル(バネ-ダッシュポット系；図-1参照)を配置してモデル化される。バネおよびダッシュポットのモデル定数は、木山・藤村⁵⁾や重松ら⁶⁾と同様にHertzの弾性接触理論に基づき決定したが、モデル定数群の設定時に基準となるヤング係数 E は、本研究で実施した計算領域程度の被災現場の写真-1を参照しつつ崩壊土砂の堆積範囲を概ね再現するように $E=1.0 \times 10^7$ Paとした。土石流のように流動距離が長く、土砂礫と水が十分に混合された状態で、平衡流動区間が観測される場合には、平衡区間における流動則等との比較からモデル定数の妥当性が検討できるが、急傾斜地崩壊のように勾配急変部での現象が対象である場合、流動区間が短く、十分に崩壊土塊が混合していないため、崩壊土塊の非均質性が強い。しかも、非定常性の強い場を取り扱うため平衡流動則の再現性の観点からの設定は不都合である。そこで本研究では、倒木を含む急傾斜地崩壊の最終形状を概ね良好に再現するようにモデル定数を設定した。

崩壊土要素間には、粘着力を模擬するため引っ張りに対する抵抗力を持たせた。引っ張り抵抗力は以下の式で表現した。

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{0} \text{ when } f_{ns} < f_{lim} \quad (4)$$

$$f_{lim} = -d_i \cdot T_{mi} \cdot k_n \quad (5)$$

ここに、 f_{lim} ：引っ張り抵抗力、 T_{mi} ：引っ張り抵抗力を規定する係数(本研究では $T_{mi}=0.01$ に設定した)、 k_n ：法線方向のバネ定数、 f_{ns} ：法線方向のバネによる力である。

(2) 剛体モデル

倒木は、5つの球形要素の中心が一直線上に並ぶように剛体連結して形成した。また、その挙動は、Koshizukaら⁷⁾のPassively Moving Solid Modelを準用し、剛体の重心回りの角運動量および並進運動量を保存するように相対回転角および並進移動量を算定し、座標修正を施して剛体挙動させている。シミュレーションでは、最初に倒木構成要素間の連結関係はないものとして、全要素を3次元個別要素法で追跡する。その結果、倒木構成要素は初期の相対位置

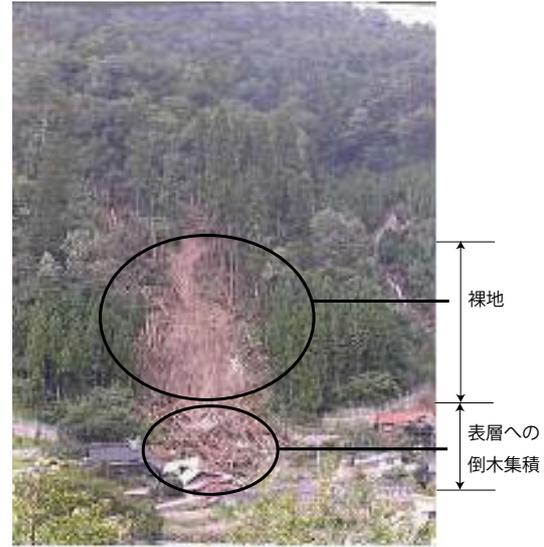


写真-1 静岡県伊豆市浜井場地区 (左), 広島県山県郡筒賀村坂原地区 (右)

<写真提供:(社) 全国治水砂防協会>

関係が崩れ変形するが、倒木構成要素間の初期の相対位置を変化させないよう、直後に座標修正計算を施す(図-2参照)。座標修正計算は以下の通りである。まず、倒木構成要素の時刻 $t+\Delta t$ での仮速度と仮座標より重心座標 r_g と重心座標での並進速度ベクトル t 、重心回りの角速度ベクトル R を算定する。

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (6)$$

$$R = I_i^{-1} \sum_{i=1}^n q_i \times u_i \quad (7)$$

$$q_i = r_i - r_g \quad (8)$$

$$r_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (9)$$

ここに、 I_i :倒木構成要素の重心回りの慣性テンソル、 n :倒木構成要素数、 r_i :位置ベクトルである。以上を用いて、倒木構成要素 i の位置ベクトルは、オイラー法によって時間積分され、

$$r_i = r_{pre\ i} + (t + q_i \times R) \Delta t \quad (10)$$

と修正される。ここに、 $r_{pre\ i}$:1ステップ前の要素 i の位置ベクトルである。角速度 R が大きくなければオイラー法によって倒木の姿勢は上手く追跡できるが、他の要素から強い接触力が剛体構成要素に作用すると、角速度 R が大きくなり、倒木構成要素の相対位置に顕著なズレが現れ易くなる。そのため、回転による変位は剛体姿勢の記述に頻用されるクォータニオン(例えば、越塚⁸⁾)を用いて以下のように算定した。個々の倒木の重心 r_g を原点とする回転軸 $R/|R|$ 周りに回転角 $|R|\Delta t$ ほど回転するクォータニオン Q とその共役クォータニオン Q^* および修正前の

座標のクォータニオン $Q_B(0; q_i)$ から修正後の座標のクォータニオン $Q_A(0; q_i)$ は、

$$Q(|R|\Delta t; R/|R|) = \cos\left(\frac{|R|\Delta t}{2}\right) + A' \sin\left(\frac{|R|\Delta t}{2}\right) \quad (11)$$

$$A' = i' \frac{R_x}{|R|} + j' \frac{R_y}{|R|} + k' \frac{R_z}{|R|} \quad (12)$$

$$Q^*(|R|\Delta t; R/|R|) = \cos\left(\frac{|R|\Delta t}{2}\right) - A' \sin\left(\frac{|R|\Delta t}{2}\right) \quad (13)$$

$$Q_A(0; q_i) = Q^*(|R|\Delta t; R/|R|) Q_B(0; q_i) Q(|R|\Delta t; R/|R|) \quad (14)$$

となり、樹木の各構成要素の位置 r_i は、

$$r_i = r_{pre\ i} + t \Delta t + q_i \quad (15)$$

と評価される。ここに i', j', k' :虚数単位である。

(3) 初期条件

対象計算領域を図-3に示す。計算領域は直径 $d=1.0\text{m}$ の均一球形要素 77,635 個(移動要素:14,469 個,固定要素:63,166 個)を用いて形成した。移動要素は計算領域中程の $z=35.0\text{m} - 69.0\text{m}$ の領域(崩壊斜面)であり、その他の領域は固定要素である。

移動要素で構成された崩壊斜面には球形要素 5つを直連結し構成された総計 88 本の樹木を等間隔で斜面土塊表層に埋め込むように配置した。

要素の比重は、崩壊土および固定要素が $\sigma=2.65$ とし、樹木については根部での土粒子との絡みを考慮して、図のように根部では $\sigma=2.65$ 、その他の 4 つの要素は $\sigma=0.9$ とした。

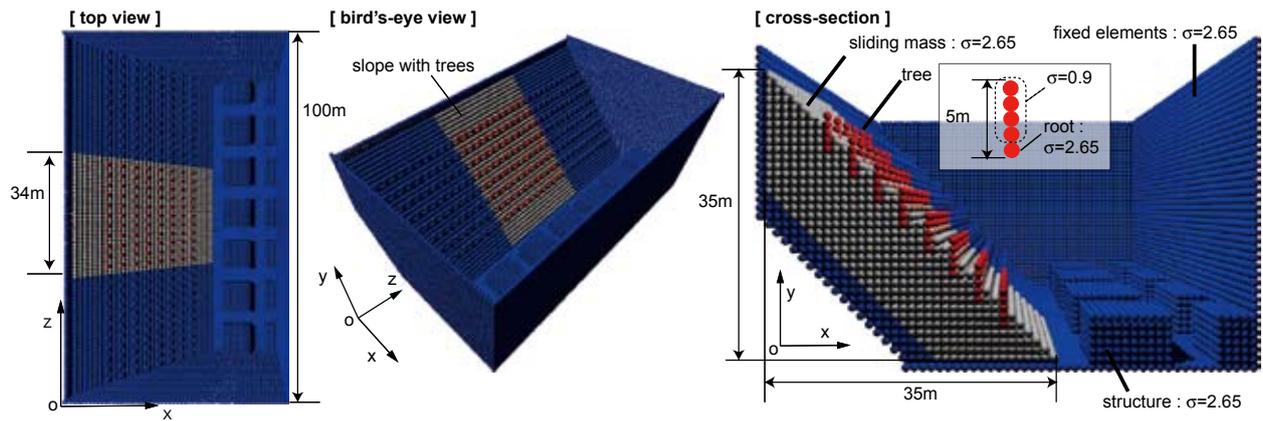


図-3 計算領域：上方図・鳥瞰図・横断面図

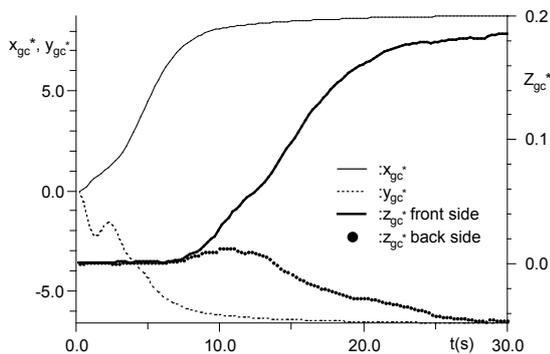


図-4 濃度重心時系列

一方、固定要素を用いて滑り面と構造物（家屋のモデル）を含む水平床を形成したが、構造物は $x \times y \times z = 10\text{m} \times 6\text{m} \times 10\text{m}$ の直方体を等間隔に配置した。なお、固定境界面上の粗度は粒径程度である。

崩壊斜面構成要素には、計算開始と同時に瞬間的に x 軸方向に約 $1,500 \text{ cm/s}^2$ (Gal) の加速度を作用させ斜面崩壊のトリガーとした。初期の崩壊土塊要素配列が symple cubic packing array（最疎充填）であるため要素間の噛み合わせが緩く、瞬間的な加速度の作用でも斜面崩壊を引き起こすことができる。

3. シミュレーション結果

斜面崩壊過程の崩壊土塊の濃度重心の時系列を図-4に示す。奥行き (z 軸方向) については、 $z \geq 50.0\text{m}$ の要素 (z_{gc}^* back side) と $z < 50.0\text{m}$ (z_{gc}^* front side) の要素に分けて濃度重心を示した。 x 軸方向の濃度重心からおおよそ時刻 $t=5.0\text{--}8.0\text{s}$ に顕著な崩壊土塊の x 軸方向への伸びが示されている。また、それに伴う y 軸方向の濃度重心の下降が示されており、急激な斜面崩壊の発生が窺える。奥行き (z 軸方向) への崩壊土塊の拡がりについては、 x, y 軸方向の濃度重心の変化率と比較して僅かではあるものの、 x 軸方向への崩壊土塊の進行過程が鈍化する

につれて活発化し時刻 $t=30.0\text{s}$ 付近で崩壊過程が収束する様子が見て取れる。

瞬間像を図-5に示す。崩壊状況を空間的に認識できるように上面図・正面図・横断面図 (x - y 平面, $z=50.0\text{m}$) を併示した。崩壊開始後、時刻 $t=4.0\text{s}$ では、崩壊土塊のフロントの前方 (x 軸正方向) への伸びが示されている。正面図からは、崩壊土塊が背面固定壁付近で斜面全域に渡って大きく沈下している様子が樹木の初期位置からの相対変化より確認できる。また、横断面図からも固定背面付近での土塊の顕著な沈下とそれに伴う前方 (x 軸正方向) への土塊の滑り状況が明瞭に理解できる。このような斜面崩壊形態は室内実験⁹⁾でも確認されており(図-6参照)、本シミュレーションで与えた崩壊トリガーの妥当性の一端を示していると考えられる。また、崩壊土塊フロント部付近では、固定床からの移動抵抗による崩壊土塊の僅かな隆起が見て取れる。樹木についてはこの時点では傾倒することなく崩壊土塊の運動に連動して斜面を下降している。時刻 $t=8.0\text{s}$ では、崩壊土塊のフロントの前方 (x 軸正方向) への伸びが進行し、一部のフロントの構造物への到達や構造物間の路地への侵入が確認できる。正面図からは崩壊土塊と構造物の衝突による崩壊土塊要素の不規則な流動の影響を受けて、樹木が傾倒する様子が窺える。この様子は、横断面図からも見て取れるが、一部の構造物に乗り上げる樹木や土塊内部での樹木の様子等、樹木傾倒状況を詳細に理解することができる。また、崩壊土塊の前方 (x 軸正方向) への流動が構造物によって遮蔽されるため、斜面と構造物間では層厚の継続した増加が確認できる。時刻 $t=12.0\text{s}$ になると、樹木の殆どが傾倒しているのが3枚の図から分かる。上面図からは崩壊土塊の前方 (x 軸正方向) への進行とともに、斜面と構造物間の路地において奥行き方向 (z 軸方向) への側方流動による崩壊土塊の堆積域の拡大も見て取れる。一方、横断面図からは、斜面と構造物間の崩壊土塊の堆積層厚

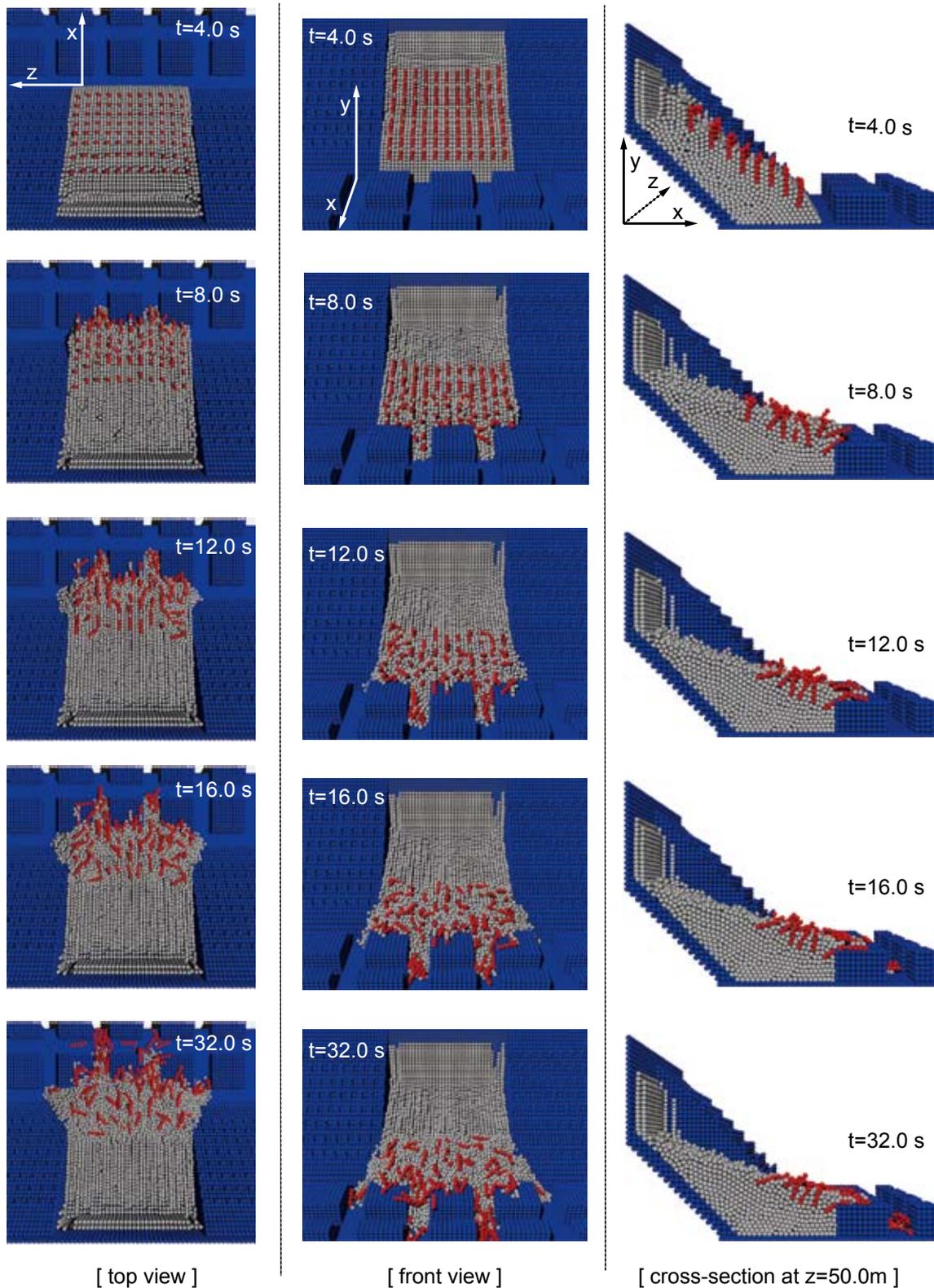


図-5 瞬間像：上面図・正面図・横断面図

の増加傾向が収束しつつある様子や樹木の傾倒が促進されている状況が見て取れる。時刻 $t=16.0s$ では、崩壊土塊の前方 (x 軸正方向) への堆積域拡大はほぼ収束していることが図-4 の時系列や時刻 $t=12.0s$ の上面図との比較から分かる。側方 (z 軸方向) へは継続して、僅かながら堆積域を拡大している様子

が窺える。時刻 $t=32.0s$ は本シミュレーションの最終堆積形状を示す図である。崩壊土塊が放射状に伸びて堆積し、フロント前縁部に倒木集積している様子が確認できる。この傾向は、先に示した写真-1 の被災状況傾向を良好に再現していることが分かる。

このように3次元個別要素法を基礎とした粒状体

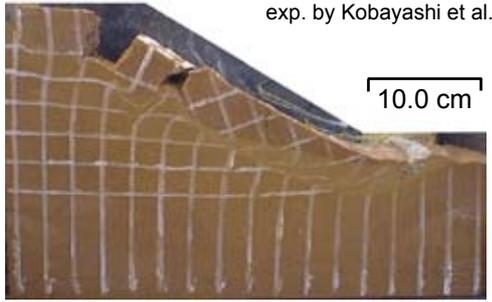


図-6 斜面崩壊実験画像

モデルを用いたシミュレーション結果は、急傾斜地崩壊過程を視覚的に分かり易く表示することが可能であり、さらに様々な角度から被災状況にアプローチすることが可能であるため、住民や施主に対する土砂災害の説明に対して有効な手段になると期待される。

4. おわりに

本研究では、斜面の流動性崩壊災害を対象に、3次元個別要素法型の粒状体モデルを用いて検討した。また、斜面に繁茂する樹木は剛体として取り扱い、その挙動は3次元の剛体姿勢を追跡可能な移動剛体モデルを導入して評価した。

今後は、現地観測データとの比較から本シミュレーションの再現性を詳細に確認するとともに、樹木の根による移動抵抗力や樹木の弾塑性挙動といったモデル化、浸透流等、今回のモデルで考慮されていない箇所の検討を進めて、シミュレーションモデルの精度向上に努めたい。また、崩壊土砂による家屋崩壊過程をも含めたシミュレーションの実施を進め、さらにイメージしやすい、実現象に近い防災支援ツールの開発を目指したい。

謝辞：本研究は、文部科学省科学研究費（若手研究（B）、『固液混相流モデルによる急傾斜地液化地滑り災害の計算力学的研究』、代表者：原田英治）の補助を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高橋 保・中川 一・山路昭彦：土石流氾濫危険範囲の指定法に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 30 号 B-2, pp.611-626, 1987.
- 2) 後藤仁志・五十里洋行・原田英治・酒井哲郎：大規模土砂流動シミュレーションのための 3 次元並列型数値移動床，水工学論文集，第 49 巻, pp.607-612, 2005.
- 3) 伯野元彦：破壊のシミュレーション - 拡張個別要素法で破壊を追う -, 森北出版株式会社, 230p, 1997.
- 4) 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, 2002.
- 5) 木山英郎・藤山 尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，第 333 号, pp.137-146, 1983.
- 6) 重松孝昌・小田一紀・田野雅彦・廣瀬真由：個別要素法による水中沈降粒子群の 3 次元挙動に関する研究，海岸工学論文集，第 47 巻, pp.996-1000, 2000.
- 7) Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka: Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi implicit method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 26, pp. 751-769, 1988.
- 8) 越塚誠一：計算力学レクチャーシリーズ 5 粒子法，丸善株式会社, 144p, 2005.
- 9) 小林 睦・廣岡明彦・永瀬英生・清水恵助・片山亮・織掛晴弘：法先排水工ならびにジオテキスタイルによる補強工を施した盛土の降雨時安定性に関する遠心模型実験，土木構造・材料論文集 第 17 号, pp.97-104, 2001.

(2006.9.30 受付)