

個別要素法における粒子の回転と転がり摩擦が 土石流の流動・堆積過程に及ぼす影響

EFFECTS OF GRAIN ROTATIONAL MOTION AND ROLLING FRICTION ON
DEBRIS FLOW SIMULATION BY THE DISTINCT ELEMENT METHOD

長田健吾¹・清水義彦²・若井明彦²

Kengo OSADA, Yoshihiko SHIMIZU and Akihiko WAKAI

¹学生会員 群馬大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

²正会員 博士 (工学) 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

In flow and sedimentation processes of the debris flow, an approach by considering particles motion and motion of water individually is more appropriate. This study has presented such a numerical calculation method by using the distinct element method (DEM) coupled with flow analysis and has analyzed the development of debris flow through the erosion process of bed-layer caused by the dam break. Especially, we focus on the effects of grain rotational motion and its friction on the debris flow simulation and find that when rotational motion of particles is not considered, total erosion volume in bed layer decreases. It is also shown that the appropriate spin motion considering rolling friction was indispensable for the DEM simulation of debris flow.

Key Words : *The distinct element method, debris flow, grain rotational motion, spin friction, dam break*

1. はじめに

従来, 土石流を含む流砂に関する多くの研究は混相流としての扱いによる連続体力学の観点からなされ, 数多くの成果が得られてきた¹⁾. 一方, 後藤らは流体系(連続系)と粒子系(離散系)の相互干渉を組み込んだEuler-Lagrangeカップリングモデルを構築し^{2), 3)}, なかでも粒子群の衝突を考慮できる個別要素法 (Distinct Element Method ; DEM)^{4), 5)} と流体計算を組み込んだ数値モデルを提案して, 流体・粒子間, 粒子間の相互干渉が掃流砂の流砂構造に及ぼす影響を検討している⁶⁾. 著者らも^{7), 8)} 個別要素法とオイラー的流体解析を連成させた解析手法により, 掃流力の高い平衡流砂場を対象として, 流速・粒子速度分布や濃度分布などを求め, 高濃度平衡流砂場の構成則を検討する上でのモデルの有効性を示した.

しかし, このような流砂の解析を進めるにあたり, 個別要素法に関するいくつかの問題点が出てきた. 著者ら⁹⁾ は, この中でも重要であると思われる2点の問題点を取り上げ, 流砂解析に与える影響について考察を行った. 1点は, 個別要素法では粒子間の衝突時間が非常に短くなることを示し, そのことが粒子軌跡等に与える影響を

述べた. もう1点は, 円形要素を用いると粒子間衝突が点接触となり, 転がり時に発生する抵抗が考慮できないため, 粒子の回転が過剰になることを示した. 著者ら^{7), 8)} の計算においては, このような過剰な回転を避けるために, 回転を完全に拘束して解析を行った. この解析は, 急勾配で固定床上の流砂を対象にしていたため, 粒子が離散的に流下しており, 回転を拘束しても問題は起こらなかった. ところが, 粒子堆積層を伴う流砂の解析において回転を拘束すると, 著者ら⁹⁾ が計算結果で示したように, 下流側にある粒子を乗り越えることが困難となり, 粒子群が一体化して流下する現象が現れる. 粒子堆積層からの流砂の離脱に関しては, 中川ら¹⁰⁾ により流体力が弱い場合は転動離脱が重要であることが指摘されている. 以上のことより, 回転運動に何らかの抵抗を入れる必要がある. 実際の砂礫は歪な形状をしており, 砂礫同士が衝突する際には多点接触となり, これが回転運動の抑制に繋がっている. 近年, 個別要素法を用いた液状化解析や, 二軸圧縮試験の解析等においては, 粒子間の多点接触を考慮するために, 楕円要素や正多角形要素が使用されている¹¹⁾. このような形状の粒子を流砂解析に用いることも有効な手段と考えられるが, 円形要素に比べ粒子間の接触判定に膨大な計算時間を要し, 流体との相互干渉のモデル化も複雑となる. 著者ら⁹⁾ は, 円形要

素における有効な回転抑制方法として、転がり摩擦モデル^{1,2)}を挙げている。本モデルは、回転運動の前面にわずかな突起を設けることで砂礫の凹凸を模擬し、回転を抑制するものである。しかし、本モデルを適用することによる粒子の回転抑制効果については検討していない。

本論文では、砂防ダムのダムブレイクを起因とする土石流の流動・堆積の解析を通して、粒子の回転有無が、渓床堆積層からの巻上げ量および堆積形状に及ぼす影響を検討する。また、転がり摩擦モデルを適用した場合の解析も行い、モデルによる回転抑制効果を検討する。さらに、渓床堆積層からの巻上げ量および堆積形状が、転がり摩擦モデルを導入しない場合および回転を拘束した場合（回転なし）と比較して、どのように変化したかを考察する。

2. 解析の概要

(1) 解析モデル

DEMでは⁴⁾、剛体要素と見なした粒子間の力の伝達が接触点を介して行われるものとして、各粒子ごとの運動方程式を前進差分で解き、時々刻々と変化する粒子の位置を求めている。粒子間接触面における法線方向の力 f_n と接線方向の力 f_s は、それぞれ接触してからの相対変位量に比例する抗力(e) (バネモデル)と相対速度に比例する粘性抵抗力(d) (ダッシュポットモデル)から構成する。

$$f_n = e'_n + d_n = e'_n{}^{-1} + k_n \Delta u_n \Delta t + \eta_n \Delta u_n \quad (1)$$

$$f_s = e'_s + d_s = e'_s{}^{-1} + k_s \Delta u_s \Delta t + \eta_s \Delta u_s \quad (2)$$

ここに、添え字の n, s は接触面における法線、接線方向を意味し、 k はバネ定数、 η はダッシュポット粘性係数、 Δu は粒子 ij の相対速度である。 f_s を構成する接線方向バネ力については累積変位量から算定し、一定以上の力(τ_c)が働けば滑動する条件を与えた。

$$e'_s = \text{sign}(\tau_c) \left(|e'_s| \geq \tau_c \right) \quad (3)$$

τ_c は粒子レベルのせん断強度で、クローン摩擦が適用できるとした(c :粒子レベルの粘着力、 ϕ :粒子レベルの内部摩擦角)。

$$\tau_c = c + e_n \tan \phi \quad (4)$$

上記の粒子間干渉(着目粒子 i に接触するすべての粒子 j からの作用力の総和)と、粒子に作用する重力、流れから受ける駆動力を組み込んだ粒子 i の運動方程式(並進および回転)は次式のように書ける。

$$\begin{aligned} m_i \frac{du_{pi}}{dt} &= \sum_j \left[-f_n \cos \alpha_{ij} + f_s \sin \alpha_{ij} \right] \\ &+ \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 \sqrt{(U - u_{pi})^2 + (V - v_{pi})^2} (U - u_{pi}) \\ &+ (m_i - \rho V_i) g \sin \theta \end{aligned} \quad (5)$$

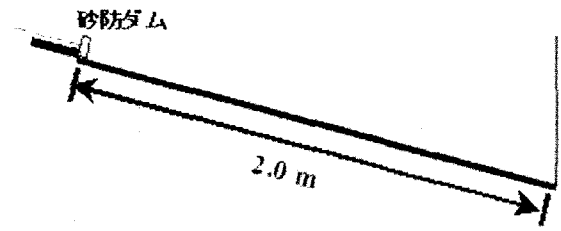


図-1 初期形状 (解析区間の全体像)

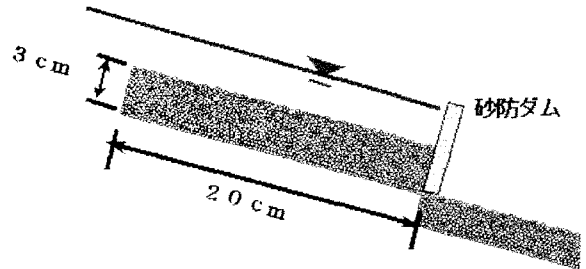


図-2 初期形状 (砂防ダム周辺を拡大)

$$\begin{aligned} m_i \frac{dv_{pi}}{dt} &= \sum_j \left[-f_n \sin \alpha_{ij} + f_s \cos \alpha_{ij} \right] \\ &+ \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 \sqrt{(U - u_{pi})^2 + (V - v_{pi})^2} (V - v_{pi}) \\ &- (m_i - \rho V_i) g \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

$$I_i \frac{d\omega_{pi}}{dt} = \frac{d}{2} \sum_j \left[-f_s \right] \quad (7)$$

ここに、 $m_i = \rho [\sigma / \rho + C_M] A_3 d^3$ 、 ρ :流体密度、 σ :粒子密度、 C_M :付加質量係数(=0.5)、 A_2, A_3 :粒子の2次元、3次元形状係数、 d :粒子径、 u_{pi}, v_{pi} :粒子の流下・鉛直速度、 U, V :水流の流下・鉛直速度、 C_D :抗力係数、 m_i :粒子質量、 V_i :粒子体積、 g :重力加速度、 I :慣性モーメント、 ω_{pi} :粒子 i の回転速度である。

流体場の計算は、1次元流とし、数値粘性の少ないCIP法^{1,3)}を適用した。ただし簡単化のため、本解析では粒子系から流体系への作用力は考慮していない。

(2) 解析条件

解析には、平均粒径0.2cm、密度2.62g/cm³の粒子を用いた。DEMの各パラメータ値は、清水らの研究^{7), 8)}を参考に設定した($k_n=200\text{N/cm}$ 、 $k_s=15\text{N/cm}$ 、 $\eta_n=0.001\text{N}\cdot\text{s/cm}$ 、 $\eta_s=0.0001\text{N}\cdot\text{s/cm}$ 、 $c=0$ 、 $\phi=25^\circ$)。

図-1に解析区間の全体像を示す。一樣な傾斜角(15度)を有する渓床堆積層(200cm×2cm)の上流端に図-2に示すような砂防ダムを配置する。砂防ダムには、20cm×3cmの粒子群と、それよりも多い40cm×5cmの水塊が溜められている。また、渓床堆積層の下側は、平均粒径0.2cmの粒子を貼り付けた粗面固定床としている。時刻 $t=0$ に、ダムブレイクが生じるものとし、回転あり・なしや、転がり摩擦モデルを導入した条件下で、土石流の流動・堆積過程の解析を行った。ただし、完全な連成解

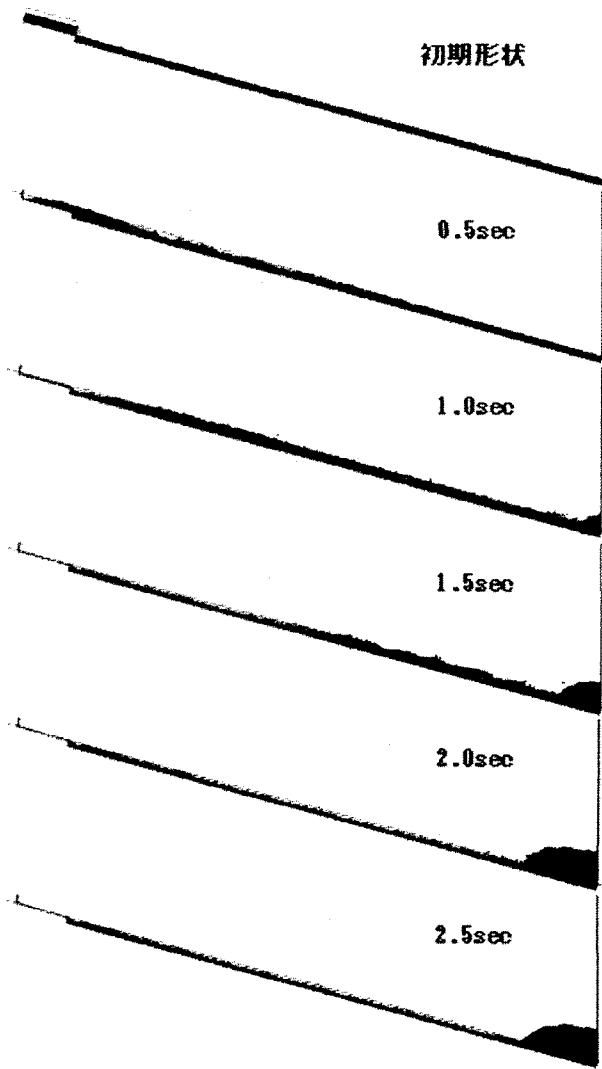


図-3 粒子の回転なしでの流動・堆積過程

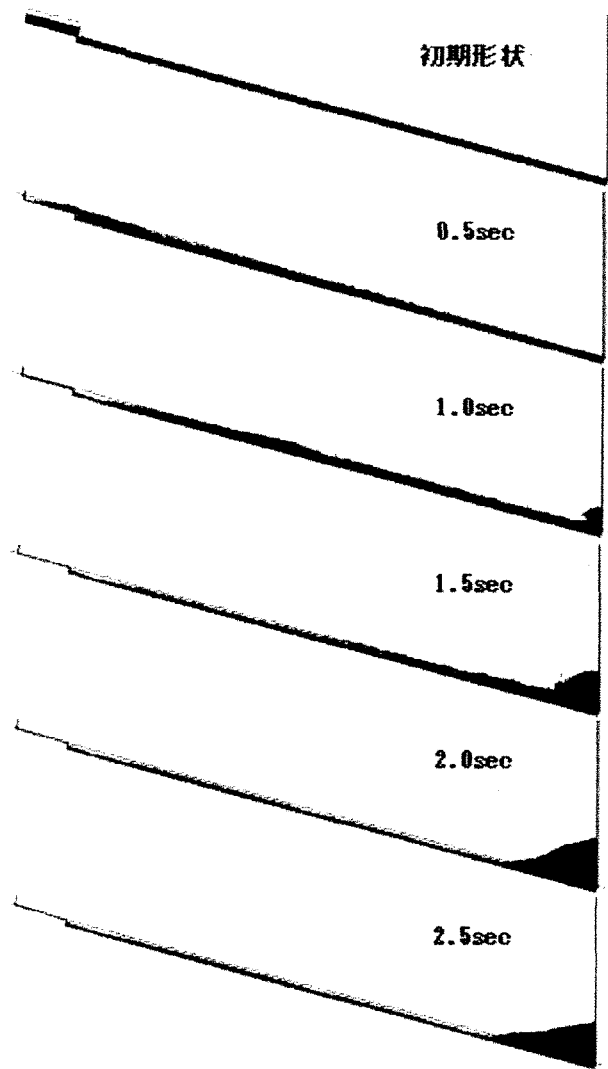


図-4 粒子の回転ありでの流動・堆積過程

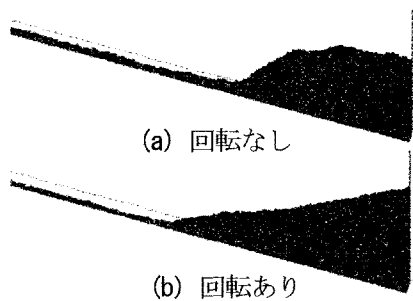


図-5 最終堆積形状 (2.5秒) の比較

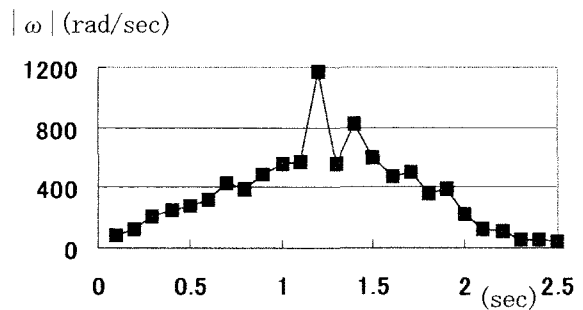


図-6 最大角速度の時系列 (角速度は絶対値で表示)

析ではなく、また、簡略のため水流は下流端のダムを透過することとした。

3. 粒子の回転有無が解析結果に及ぼす影響

まず、粒子の回転を拘束した場合と回転を入れた場合の解析をそれぞれ行い、回転運動が流動・堆積過程に及ぼす影響を考察する。図-3および図-4に、それぞれの解

析結果から得られた粒子の流動・堆積過程の時系列を示した。図中の灰色のラインは、水表面を表している。上述したように、水流は下流端の砂防ダムを透過する条件になっているので、2.0秒の段階で水流は粒子の計算領域から完全に抜けている。図-5に示した、両者の最終的な堆積形状 (2.5秒) を比較したのを見ると、回転を拘束した方 (回転なし) の堆積形状は、粒子間のせん断力が十分に発揮されるため、上流側に切り立った形状が見られる。全体的に見ても、はっきりとした凹凸が付い

ていることがわかる。一方、回転を入れた方の堆積形状は、回転を拘束した時の形状に見られたような切り立った形状や凹凸は見られず、堆積部の上面は、緩やかな形状で停止している。これは、粒子間衝突がすべて点接触で計算されるため、十分にせん断力が発揮されず、粒子群に骨格的な支えが出来るまで動き続けることが要因で、結果として緩い勾配でしか形状を保つことが出来ないことを示している。土砂の一般的な内部摩擦角は38度程度であるが、粒子間に回転運動が入ると、このような角度を得ることは難しくなる。

次に、両者の最終堆積形状における堆砂量（単位幅あたり）を算定してみた。結果は、回転なしの場合が約144.0cm³、回転ありの場合が約173.0cm³であった。初期の砂防ダムに堆砂していた量が60.0cm³（20cm×3cm）であるので、土石流が流動する過程で溪床堆積層から巻上げられた量は、回転なしの場合が約84.0cm³、回転ありの場合が約113.0cm³となる。回転なしの場合は、溪床堆積層内においても粒子間のせん断抵抗が強いいため、堆積層からの巻上げ量が少なくなっている。逆に、回転を入れた場合は、転動離脱が可能となり、さらに円形要素であるため回転を起こしやすく、少しの力でも粒子が移動するため、堆積層からの巻上げ量が多くなったと考えられる。

次に、粒子の回転量について考察する。図-6には、各時刻において(7)式の角速度 ω が、全粒子の中で最大値（絶対値で表示）になるものを表示した。これを見ると、1.2秒で約1200rad/secという値を示している。これは、1秒間に約190回転していることに相当する。上述したように、円形要素を用いると粒子間衝突がすべて点接触となり、転がり時に発生する抵抗が考慮できない。このことが、粒子の過剰な回転を引き起こす要因となっている。

このような粒子の過剰な回転は、粒子間の反発係数を変化させ、流層高さや粒子速度等に影響を与える⁹⁾。著者ら^{7)、8)}が既往の研究で行った高濃度平衡流砂場の計算においては、粒子の回転を拘束して計算を行い、良好な計算結果を得ている。この計算において粒子に回転を入れたら、やはり過剰な回転をする粒子が現れ、底面付近において粒子速度が大きくなり実験値に近い結果は得られなかった。ただし、その際の計算条件は、急勾配で固定床上の粒子流であったため、全ての粒子が離散的に流下しており、回転を拘束しても問題は起こらなかった。しかし、粒子堆積層を伴う解析において、粒子の回転を拘束すると、粒子は堆積層からの抜け出しが困難になり、粒子群が一体化して流下する現象が現れた⁹⁾。粒子堆積層からの流砂の離脱に関しては、中川ら¹⁰⁾により流体力が弱い場合は転動離脱（回転運動）が重要であることが指摘されており、回転運動は流砂の解析において不可欠なものである。よって、このような粒子の過剰な回転を抑制するモデルを個別要素法に組み込むことを考える必要がある。転がり摩擦モデル¹²⁾は、その回転抑制の1手法であり、以下にモデルの概要と、その回転抑制の効果を考察する。

4. 転がり摩擦モデルによる回転抑制の効果

(1) 転がり摩擦モデル¹²⁾の概要

転がり摩擦モデルを用いた回転の抑制方法について説明する。図-7に示すように、粒子が接触している場合に

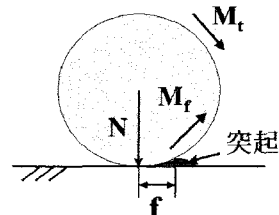


図-7 転がり摩擦の原理

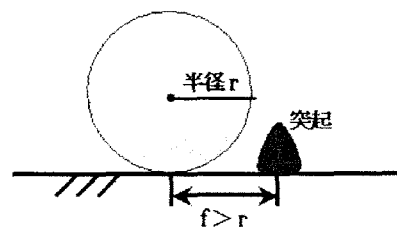


図-8 (10)式の説明

はせん断抵抗と圧縮力Nが作用している。通常の計算では、このせん断抵抗を用いて回転モーメント M_r が計算されるだけである。転がり摩擦モデルは、回転運動する粒子の前面にわずかな突起を設け、この突起により回転モーメント M_t とは逆向きの抵抗モーメント M_r を発生させる。抵抗モーメント M_r は、(8)式を用いて算出する。

$$M_r = -f \cdot N \cdot \text{sign}(M_t) \quad (8)$$

ここに、 f :長さの単位を持つ転がり摩擦係数であり、粒子間の接触幅（重なり幅） b を用いて(9)式で表される。

$$f = f' \cdot b \quad (9)$$

この(9)式に含まれている係数 f' （無次元）の値が、回転抑制の度合いを決める重要なパラメータとなる。また、転がり摩擦係数 f に対して、(10)式に示す条件を課した。

$$f \leq r \quad (10)$$

ここに、 r :粒子の半径である。この条件は、図-8に示すように、転がり摩擦係数 f が粒子の半径よりも大きくなると、粒子に突起が当らなくなるため、それを防ぐためのものである。

(2) 転がり摩擦モデルの効果

転がり摩擦モデルによる回転抑制の効果を検証するため、 f' の値を5.0・10.0・20.0・30.0と変化させた4ケースの解析を行った。図-9および図-10には、 $f'=10.0$ および $f'=30.0$ における粒子挙動の時系列を示した。また、図-11には最終堆積形状（2.5秒）の比較を示している。転がり摩擦が入っていない（ $f'=0.0$ に相当）図-5(b)と比較すると、図-11(a)は堆積部の上面が図-5(b)の

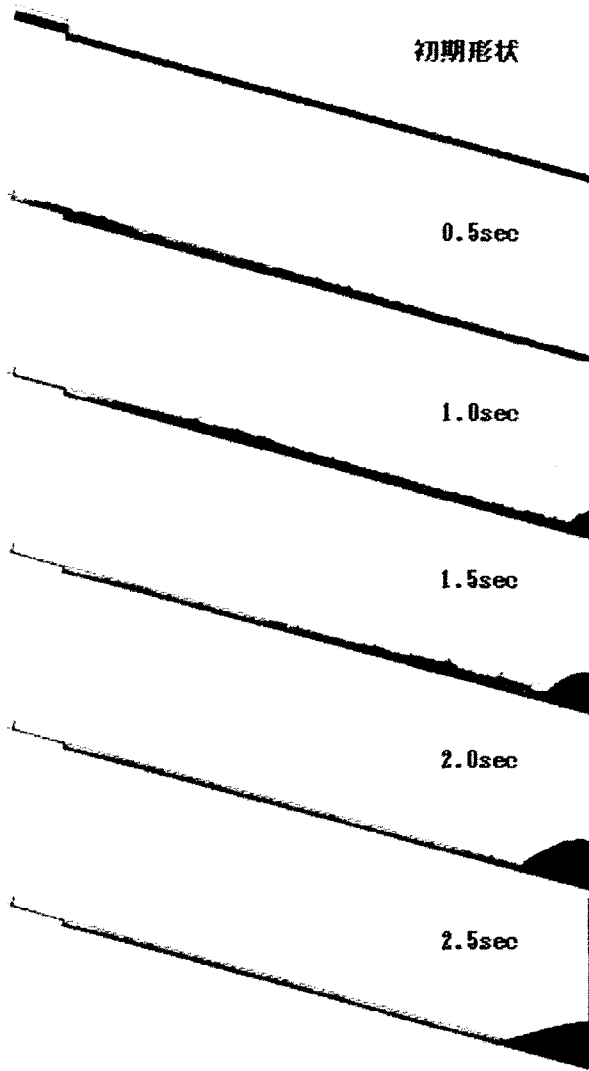


図-9 粒子挙動の時系列 (転がり摩擦 $f=10.0$)

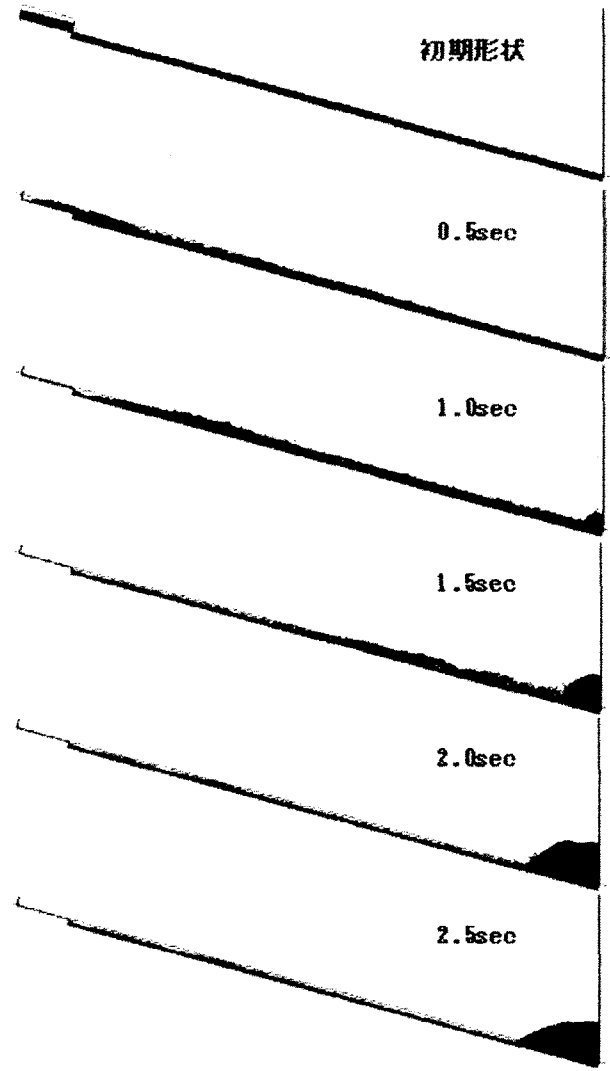


図-10 粒子挙動の時系列 (転がり摩擦 $f=30.0$)

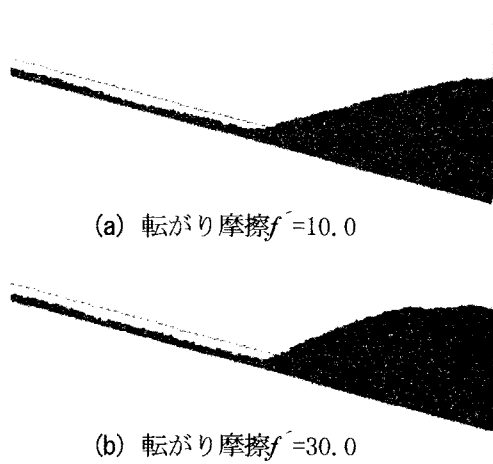


図-11 最終堆積形状の比較

傾斜角よりも若干きつくなっているものの、余り凹凸が見られず、図-5(b)に近い堆積形状となった。 $f=30.0$ の堆積形状では、堆積部の上流側が少し切り立ったような形状になっており、さらに凹凸も見られる。 $f=30.0$ の堆積形状は、回転なしの堆積形状(図-5(a))に近いも

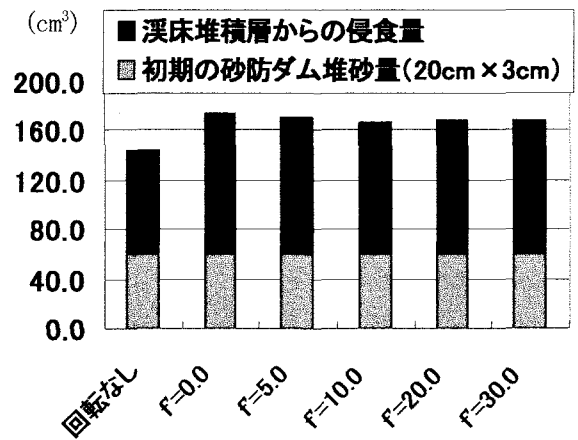


図-12 最終形状における堆砂量の比較とその内訳

のとなっている。

次に、最終堆積形状における堆砂量について考察する。図-12にそれぞれの係数における堆砂量の比較を示した。同図に回転なしと転がり摩擦を導入していない($f=0.0$)ケースの堆砂量も併せて示した。また、初期に砂

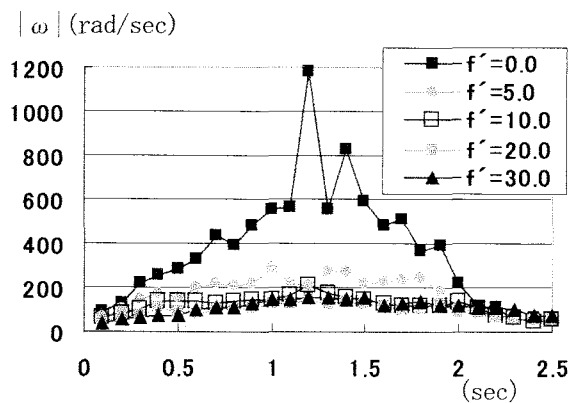


図-13 最大角速度時系列の比較

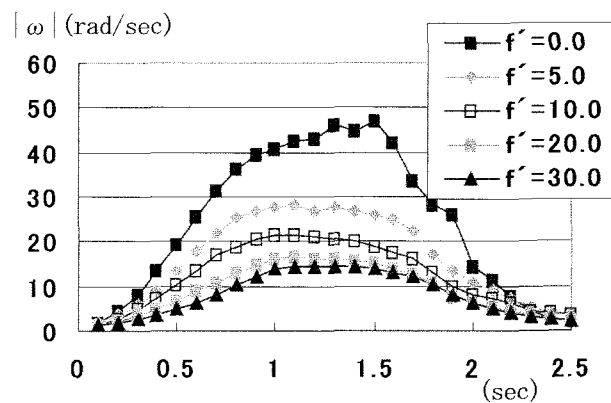


図-14 平均角速度時系列の比較

防ダムに堆砂していた分 (60cm³) を灰色、溪床堆積層から巻上げられた分を黒で色分けしている。転がり摩擦を入れた4ケースは、 $f'=0.0$ のケースより堆砂量 (溪床堆積層からの巻上げ量) が減少している。しかし、4ケースとも、ほぼ横ばいの値となっており、係数が大きくなるにつれて堆砂量が減るといったことは見られなかった。

図-13には、転がり摩擦を入れた4ケースと転がり摩擦を導入していない ($f'=0.0$) ケースの、各時刻における最大角速度の時系列を示した。転がり摩擦を導入していない ($f'=0.0$) ケースでは、最大で約1200rad/secという非常に大きな値が発生していたのに対して、 $f'=5.0$ で最大約300rad/sec、他のケースでは最大で約200rad/sec程度に抑えられている。また、図-14には全ての粒子の角速度を各時刻で平均化したものを示している。この結果を見ると、転がり摩擦の係数が大きくなるにつれて、角速度が抑えられていることが顕著に表れている。しかし、 $f'=20.0$ と $f'=30.0$ では、差が小さくなってきている。これは、(10)式の条件を課しているため、粒子がある程度重なると、 f' が大きいために f が半径 r をすぐに超えてしまい、結果的に両者の回転抑制効果に余り差が出なくなっているものと考えられる。

以上のことより、転がり摩擦モデルを導入すれば、問題となっていた粒子の過剰な回転は、十分に抑えられることが分かった。

5. あとがき

本論文では、個別要素法を用いた土石流の流動・堆積の計算を、回転あり・なしおよび、転がり摩擦モデルを導入した場合について解析を行った。まず、回転有無の結果を比較し、堆積形状および堆砂量にどのような影響が出るのかを検討した。また、粒子に回転を入れた場合転がりに対する抵抗が無いために、粒子が過剰に回転することを示した。また、転がり摩擦モデルを導入した場合の回転抑制効果について検討を行い、粒子の過剰な回転を抑えられることを示した。今後、基礎的な実験との比較等を行い、さらに詳細な検討を進めていく予定であ

る。

参考文献

- 1) 例えば、江頭進治：土石流の流動機構と氾濫・堆積域の解析 (基礎理論からハザードマップまで)，土木学会，第35回水工学に関する夏季研修会講義集，Aコース，A-6-1～A-6-18,1999.
- 2) 後藤仁志・辻本哲郎・中川博次：流体・粒子相互作用系としての掃流層の数値解析，土木学会論文集，No.485/II-26，pp.11-19, 1994.
- 3) 後藤仁志・Abbas YEGANEH-BAKHTIARY・酒井哲郎：混相流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析，土木学会論文集，No.649/II-51,pp.17-26,2000.
- 4) Cundall, P.A. (1979) : A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol. 29, No.1, pp.47-65.
- 5) 伯野元彦：粒状体の運動—数値シミュレーション，地学雑誌，98-6,pp.112-120,1989
- 6) 後藤仁志・酒井哲郎：表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析，土木学会論文集，No.521/II-32,pp.101-112,1995.
- 7) 清水義彦・若井明彦・長田健吾：個別要素法と流れの数値解析を組み合わせた高濃度平衡流砂場の数値実験，水工学論文集，第47巻，pp.559-564,2003.
- 8) 清水義彦・長田健吾：個別要素法を用いた土石流の構成則に関する考察，水工学論文集，第48巻，pp.901-906,2004.
- 9) 長田健吾・清水義彦・若井明彦：個別要素法を用いた流砂解析における問題点に関する考察，応用力学論文集，第7巻，pp.1033-1041,2004.
- 10) 中川博次・辻本哲郎：水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No.244,pp.71-80, 1979
- 11) 例えば，澤田純男・ブラダン テージ B.S.・岩崎好規：個別要素法による粒状体の単純せん断挙動，第27回土質工学研究発表会，pp.573-576, 1991
- 12) 阪口秀・尾崎叡司：円形要素を用いたDEMにおける回転の抑制に関する研究，第27回土質工学研究発表会，pp.571-572, 1991
- 13) 矢部孝・観山正見・梶島成治：パソコンによるシミュレーション物理，朝倉書店，1992

(2004.9.30 受付)