

土塊の運動機構と1次元数値計算法

MECHANISM OF SOIL BLOCK MOVEMENT AND THE ONE DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION

道上正規¹・宮本邦明²・片嶋啓介³・植村植⁴

¹フェロー会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 工博 鳥取大学助教授 地域共同研究センター (〒680鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 工修 住鋁コンサルタント (〒160東京都新宿区歌舞伎町2-16-9)

⁴学生会員 鳥取大学大学院工学研究科 (〒680鳥取市湖山町南4-101)

The present study treated the mechanism of soil block movement and the one dimensional numerical analysis of the movement.

The constitutive equation for the debris flow proposed by Egashira and Miyamoto was enhanced, and the constitutive equation for the flow of not only saturated material but dry one was concerned through theoretical and experimental investigations. For the soil block movement, inter granular solid friction is also important, and the typical difference from the debris flow is that the concentration of solid should not be change in case of soil block movement.

This may cause some difficulty to treat the solid friction in the numerical simulation. That is, the stop condition of movement of soil block should be taken into account in the finite differentiation of equation of motion. The results of numerical calculations were compared with experimental one, and we found that the calculation results were very closed to the experimental one. And, more over, several important characteristics of the soil block movement was investigated by numerical calculations.

Key Words : soil block movement, granular flow, numerical simulation

1. はじめに

火山活動や地震,あるいは豪雨に伴い山体崩壊や地すべりなどの規模の大きな土塊の滑動を生じることがある。このような土塊の滑動それ自体,大規模な災害を生じさせる原因となるが,さらにその滑動土塊が高速で水域に突入したりすると,高い段波を生じ,はるかに規模の大きな災害に結びつくことがある。たとえば,1963年10月,イタリア北部ピアベ川のバイオントダム左岸の地すべりが原因となって発生した段波による大規模な災害や,1792年長崎県の島原眉山が崩壊した際に生じた段波による我が国史上最大級の災害のひとつである「島原大変肥後迷惑」と呼ばれている災害など,その代表的な例としてあげることができる。これらの災害予測を行おうとするとき,段波の形成過程を支配している崩壊土塊の到達範囲や水域に突入する際の速度などを知ることが重要となる。

また,昨年末より崩壊や地すべりに伴う土石流災

害が,1996年12月6日に長野県姫川左支川の蒲原沢件,1997年5月11日には秋田県米代川水系熊沢川件,また1997年7月10日には鹿児島県出水市針原川で,連続的に発生しているが,このような崩壊土塊の流動化による土石流発生メカニズムを検討する際にも崩壊土塊の運動と到達範囲を把握しておくことが重要である。

ところで,崩壊土塊の運動は,従来,主に土塊全体をひとつの質点か剛体としてとらえて取り扱われるか¹⁾,あるいは,個別の離散化された要素の集合体として取り扱われてきた²⁾。前者の取り扱いでは,土塊の重心の運動については解析することが可能であるがその変形を議論することはできない。また,剛体,あるいは質点の運動に対する抵抗力は速度に依存しない固体摩擦と速度の関数で表される流体摩擦の和で表わすことが多いが,流体摩擦を表す関数形は理論的に定まらない。一方,後者の取り扱いでは土塊の変形を議論することができるものの,離散化された要素およびその要素間の相互作用

を支配しているパラメータが、マクロな運動を表す運動学的なパラメータと力学的パラメータとの間の関係をどのように支配しているかを表現することが難しい。

一方、崩壊土塊と同様に土砂を高濃度に含む固液混相流である土石流の流動機構に関する研究では、粒子と流体との混合物をひとつの連続体とみなして、その応力-歪速度の関係式、構成方程式、を導く研究が行われ成果を上げてきている。この研究の立場に立てば、崩壊土塊の運動は、土砂濃度を高濃度に一定に保ったまま運動する固液混相流としてとらえることができる。

また、崩壊土塊としての土砂の集合体を粒状体としてとらえると、その間隙が水で飽和されていない場合や、水を全く含んでいない乾燥している場合についても考える必要がある。

そこで、本研究では、崩壊土塊を粒状体からなる連続体として取り扱い、土石流の構成方程式に関する江頭・宮本らの研究成果³⁾をもとに、間隙に水を含まない乾燥粒子流の構成方程式について検討を加えるとともに、1次元の固定床実験と数値解析結果を比較することにより運動機構について考察する。

2. 土塊の運動の構成方程式

(1) 飽和土塊の構成方程式

江頭・宮本らは砂礫粒子を高濃度に含む流れの応力を流れのエネルギー収支と等価な応力構造を持つものとして与え、特に粒子相互の接触による固体摩擦が重要な役割を果たすことを示し、エネルギー散逸空間の独立性を考慮して構成方程式として

$$p = p_s + p_d + p_f \quad (1)$$

$$\tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f \quad (2)$$

$$\tau_s = p_s \tan \phi_s \quad (3)$$

$$p_s = \alpha(p_s + p_d) \quad , \quad \alpha = \left(\frac{C}{C_*} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (4)$$

$$p_d = k_g e^2 C^{\frac{1}{3}} \alpha d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (5)$$

$$\tau_d = k_g (1 - e^2) C^{\frac{1}{3}} \alpha d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (6)$$

$$\tau_f = k_f \rho d \frac{(1 - C)^{\frac{5}{3}}}{C^{\frac{2}{3}}} \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (7)$$

を提案している。ここに、 p, τ は、流れの圧力とせん断応力、 p_s, τ_s はそれぞれ粒子相互の接触による粒子間圧力と粒子間圧力が作用している場において粒子が互いに接触を保って相対運動することにより生じる固体摩擦応力、 p_d, τ_d は粒子の非弾性衝突により生じる保存力としての圧力と散逸力としてのせん断力、 p_f は静水圧で近似される間隙流体の圧力

表-1 実験条件

	勾配(°)	流量(kg/s)
CASE A1-1	38	22.45
CASE A1-2	38	15.64
CASE A1-3	38	7.76
CASE A2-1	42	22.45
CASE A2-2	42	15.64
CASE A2-3	42	7.76
CASE A3-1	45	22.45
CASE A3-2	45	15.64
CASE A3-3	45	7.76

τ_f は粒子が相対運動することにより間隙流体がせん断を受けることにより生じるせん断応力である。また、 ϕ_s は粒状体の内部摩擦角、 C は粒子の体積濃度、 C_* は停止時の粒子の体積濃度、 σ, ρ はそれぞれ粒子と間隙流体の質量密度、 d は粒径、 e は粒子の反発係数、 k_g, k_f はそれぞれ定数で、 $k_g = 0.0828, k_f = 0.25$ である。

この構成方程式のもとでは移動床、固定床とも理論河床などの境界条件を合理的に定めることができるため、固定床上の流れの評価が容易である。したがって、この構成方程式を用いると飽和状態の崩壊土塊の運動は、粒子濃度を一定とおいた固定床上の流れとして表現することができる。

乾燥粒子流の場合も同様の考察が可能で、この場合粒子の間隙の流体による応力を無視することができるので式(1)、(2)の流体相の応力を消去して同様の取り扱いを行えばいいことになる。

間隙が水で飽和している場合については、数多くの土石流の移動床、固定床実験と構成方程式が比較され、その妥当性が確かめられているが、乾燥粒子流の場合については確認されていない。そこで、改めて乾燥粒子流の構成則に関する実験を行う。

(2) 乾燥粒子流の構成則に関する実験

実験は、長さ7m、幅20cm、高さ50cmの可変勾配水路を用いて行った。実験に用いた砂は粒径5mmの一樣砂である。水路床には実験に用いたのと同じの砂を粗度として張り付けてある。

実験条件を表-1に示す。砂は水路下流端から4.5mの地点でホッパーを用い一定流量を保つよう供給された。計測は、流動表面の縦断形と下流端から0.7mの地点における流速分布について高速ビデオおよびデジタルビデオを用いて行なわれた。

実験から得られた流速分布は、深さ方向に濃度変化がない条件のもとで式(2)を積分して得られる定常等流時の流速分布である3/2乗則を満たしていた。そこで、式(2)を濃度一定のもとで積分した抵抗則、

$$\frac{u_m}{u_*} = f(\theta) \left(\frac{h}{d} \right) = \frac{2}{5} C^{\frac{1}{3}} \left\{ \frac{1 - \alpha(\tan \phi_s / \tan \theta)}{k_g (1 - e^2)} \right\}^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{d} \right) \quad (8)$$

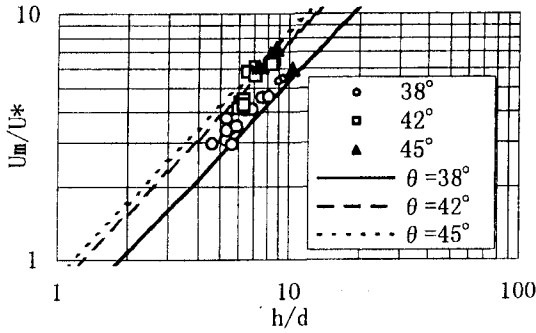


図-1 流速係数と相対水深

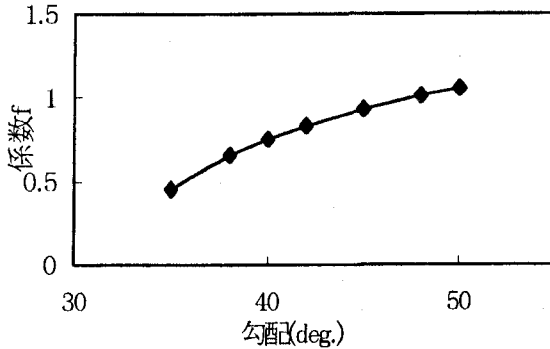


図-2 係数と勾配の関係

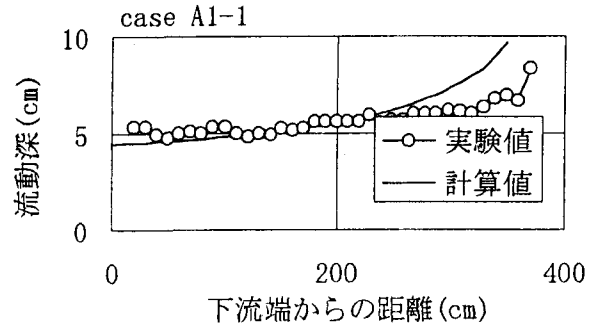
で実験と比較し、図-1に示す。なお、 u_m 、 u_* は、それぞれ $u_m = \int_0^h u dz / h$ 、 $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_m}$ と定義される。ここに、 τ_0 は底面せん断力、 ρ_m は式(11)で定義される質量密度である。

図-1より両者は良い一致をみており、乾燥粒子流でも土石流と同様の取り扱いが可能であることを示している。なお、 C_* は土石流の場合と同じ0.52を、 C は実験の平均値0.3を用いている。

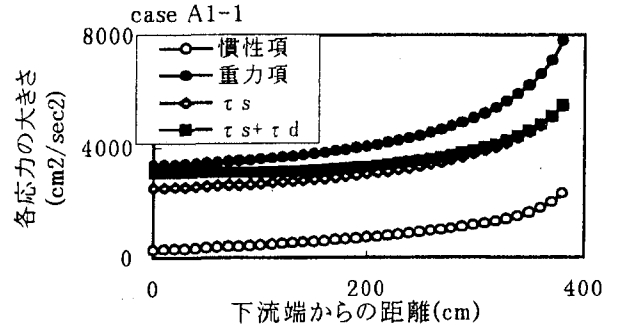
式(8)から流速係数は相対流動深に比例するほか、粒子濃度が一定であれば勾配の関数であることがわかる。式(8)の h/d の係数 ($f(\theta)$) の勾配への依存性を図-2に示すが、勾配の増大とともに若干係数は増加し抵抗が小さくなることがわかる。

さて、ここでの検討結果を基に次章で崩土の1次元解析を行うが、この1次元解析手法を用いて実験における流動表面の縦断形と不等流の影響を調べておこう。図-3は、流動表面の縦断形の実験結果と計算結果の比較および、計算から得られる式(10)の各項の大きさの比較を一例としてcase A1-1について示したものである。流動表面の縦断形の実験と計算結果は計算の境界条件を与えている最上流端をのぞけばほぼ一致している。また、流速分布などを計測した $x = 0.7m$ を含む下流端近傍では、計算から求めた外力である重力項とせん断応力がほぼつりあっており、ほぼ等流が達成されていることが理解される。

3. 崩壊土塊の運動の1次元解析



(a) 流動深縦断の計算値と実験値の比較



(b) 各応力の流下方向の変化

図-3 定常流実験における水面形と応力

(1) 1次元支配方程式

1次元の支配方程式、連続式と運動方程式は、それぞれ次のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial u_m M}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho_m} \quad (10)$$

ここに、 h は流動深、 $M = u_m h$ はフラックス、 β は運動量補正係数、 τ_0 は底面せん断力、 ρ_m は見かけの質量密度で、土塊が乾燥していれば、

$$\rho_m = C\sigma \quad (11)$$

また、飽和していれば、

$$\rho_m = C\sigma + (1-C)\rho \quad (12)$$

で与えられる。ところで、底面せん断力は、土塊が乾燥状態にあるか飽和しているか、また、運動中か停止中かでその評価が異なる。表-2に、乾燥と飽和、および、運動中と停止中での底面せん断力を示す。また、固体摩擦は運動中は常に運動の方向と反対方向に働き、停止中は他の外力の合力と反対方向に同じ大きさで働くので、運動が停止するときや、急な逆勾配を上って運動方向を反対方向に反転させて継続させるような場合は、その前後で固体摩擦の取り扱いをかえる必要がある。すなわち、このような場合、固体摩擦の大きさや方向が運動の停止や反転を契機として変わるため、そのプロセスを計算に反映させてやる必要がある。一般的には計算有限差分時間 Δt の間に停止や運動方向の反転をむか

表-2 運動状態による固体摩擦力の変化

		τ_s	τ_d	τ_f
乾燥状態	流動中	作用方向は流れの 方向と逆方向 $ \tau_s = p_s \cdot \tan \phi_s$	$\frac{25}{4} \rho_m k_g \sigma (1-e^2) C^{1/3} \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \cdot u_m^2$	—————
	停止中	静的なつり合いを保つ $\tau_s = -\rho_m g h \frac{\partial H}{\partial x}$ $ \tau_{s(\max)} = p_s \cdot \tan \phi_s$	—————	—————
飽和状態	流動中	作用方向は流れの 方向と逆方向 $ \tau_s = p_s \cdot \tan \phi_s$	$\frac{25}{4} \rho_m k_g \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) C^{1/3} \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \cdot u_m^2$	$\frac{25}{4} \rho_m k_f \frac{(1-C)^{3/5}}{C^{2/3}} \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \cdot u_m^2$
	停止中	静的なつり合いを保つ $\tau_s = -\rho_m g h \frac{\partial H}{\partial x}$ $ \tau_{s(\max)} = p_s \cdot \tan \phi_s$	—————	—————

えるため、まず、この条件の判別を差分計算の中に導入し、停止や反転が生じる場合は固体摩擦の方向と大きさを変えてやらなければならない。

ところで、運動方向の反転は、一旦、停止した後、反対方向へ運動を開始するというように取り扱うことができるので、結局、計算の中では図-4に示すように停止条件として取り扱うことができる。

すなわち、有限差分時間 Δt 内で停止する条件がみたされると、固体摩擦による過剰な力積が反対方向の運動量となってあらわれるので、運動方程式の時間差分式

$$M^{n+1} = M^n + \left[-\beta \frac{\partial u_m M^n}{\partial x} - g h \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} (\tau_s + \tau_d) \right] \Delta t \quad (13)$$

から得られる Δt 時間後のフラックスと今の時刻のフラックスとの積が必ず負になって現れる。したがって、

$$M^n \cdot M^{n+1} < 0 \quad (14)$$

が、停止条件となる。有限差分時間内に停止した後、反対方向に運動を再開するか停止し続けるかは、停止した時刻において外力の合力の大きさと固体摩擦力の大きさの大小関係で定まる。外力の方が大きければ反対方向に続けて運動し、小さければそのまま停止する。

(2) 有限な土塊の実験と1次元解析

長さ7m、幅20cm、高さ50cmの可変勾配水路の下流端に勾配3°の水路を接続し、底辺50cm、高さ15cmの二等辺三角形の形状に整形した粒径5mmの均一砂か

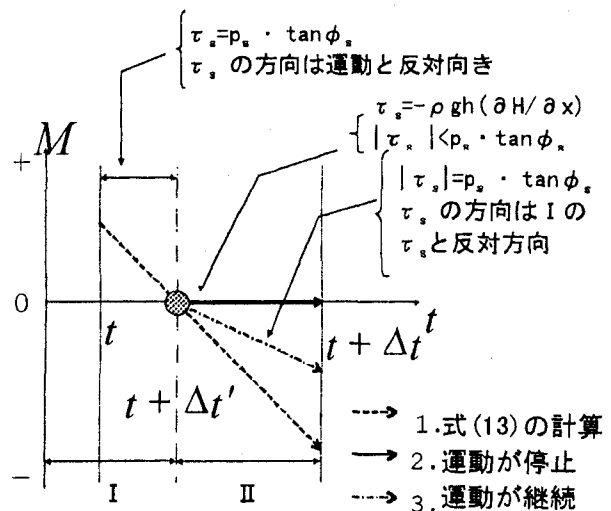


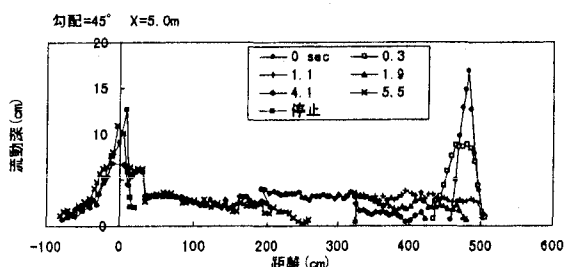
図-4 停止条件の模式図

らなる土塊を下流端から1m、3m、5mとその位置を変化させて設置し滑動させた。同一の条件で1次元解析を行い結果を比較する。

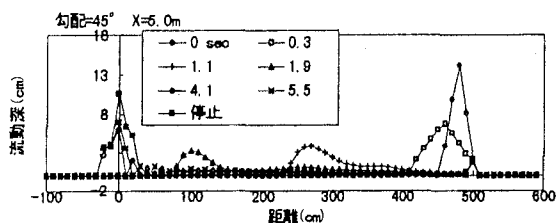
土塊は時間とともにその重心の位置を変えながら変形してゆく。

まず、土塊の変形過程について実験結果と計算結果を比較する。図-5にその一例を示すが、どちらも、運動開始直後に大きく変形し、その後ほぼ一定の形状を保って流下してゆく。計算結果の変形のプロセスが若干早いものの、ほぼ、同じような変形のしかたをしているのがわかる。

この急速な変形は重心位置の時間的变化に影響を及ぼしている。図-6は重心位置の時間的变化を実験、計算、および摩擦角が等しい剛体について示したものである。運動開始すぐの段階で実験、計算結



(a) 実験結果



(b) 計算結果

図-5 土塊形状の時間的变化

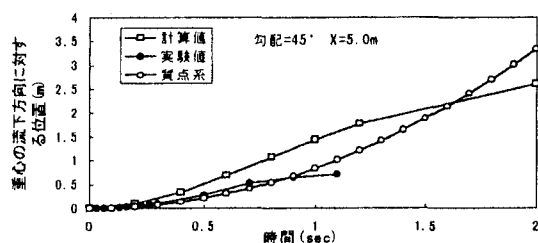


図-6 重心位置の時間変化に関する実験結果、計算結果、および質点系の比較

果とも剛体より大きな加速を受けているのが分かる。また、その傾向は変形が早い計算結果に顕著に現れている。これは、土塊の変形によって重心位置が下がり重心の移動軌跡からみた勾配が斜面勾配より大きくなるためである。また、速度が大きくなるにつれ流動による応力が大きくなり、加速度が小さくなって等速で運動するようになるのがみてとれる。

図-7に最終の停止・堆積形状の比較を示す。この両者の比較はよく一致しているといえよう。

さて、崩壊土塊は、常に、乾燥しているかあるいは飽和しているかのどちらかであるとは限らない。むしろ、その中間であることが一般的であろう。間隙水の存在は土塊の運動に2つの形で影響をおよぼす。一つは土塊の粒子に対しては中立応力として作用し、かつまた、質量力を増加させるため、見かけの摩擦係数を減少させることであり、もう一つはせん断に伴う流体の流動応力を増加させることである。この両者の影響はどちらが大きいであろうか。今、飽和した土塊と、摩擦角が飽和土塊の見かけの摩擦角に等しい乾燥粒子流の運動を比較してみよう。まず、定常等流状態での動的応力をそれぞれ見かけの質量密度で割って加速度で表現し、その勾配に対する変化を調べる。図-8は、勾配に対す

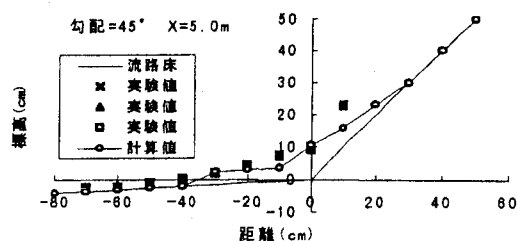


図-7 堆積形状の計算値と実験値の比較

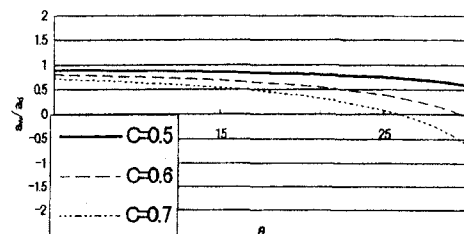


図-8 勾配による a_w/a_d の変化

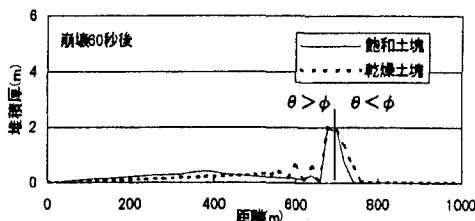
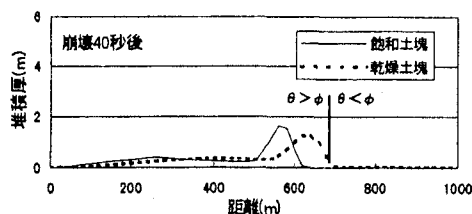
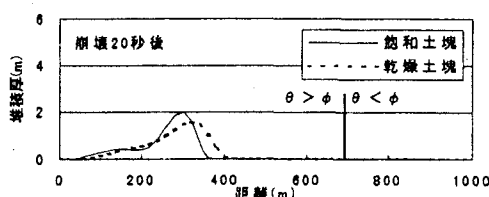


図-9 乾燥土塊と飽和土塊の運動の比較

る飽和状態の乾燥状態に対する比で表している。すなわち、乾燥状態、飽和状態の加速度をそれぞれ、 a_d 、 a_w としてその比、

$$\frac{a_w}{a_d} = \frac{g\{\sin\theta(C\sigma + (1-C)\rho) - C(\sigma - \rho)\cos\theta \cdot \tan\phi\}}{g(\sin\theta - \cos\theta \cdot \tan\phi)} \quad (15)$$

と勾配の関係を表している。図-8からは、若干、飽和土のほうが加速度が小さく出ているものの、さほど変わらないことがみてとれる。図-9は実際に適当な

斜面を作って数値実験を行った結果であるが、多少乾燥砂の方が早いもののほとんど変わらないのがわかる。

4. 結論

崩壊土塊を運動に伴い粒子濃度が変化しない粒状体からなる連続体としてとらえ、その運動を、固定床上の運動としてとりあつかった。

そして、乾燥状態の流れに対して新たに構成方程式について理論的、実験的検討を加えるとともに1次元の数値解析手法について検討し、実験と比較し手法の妥当性の検証を行った。

また、1次元解析の結果、いくつかの崩壊土塊の運動に関する特徴的な特性が明らかとなった。

主な結論は以下のようである。

- (1) 崩壊土塊の運動を土砂濃度が変化しない固定床上の粒子流として取り扱うことが有効である。その際、構成則として運動特性に対して固体摩擦が重要な役割をはたす。
- (2) 数値解析を行うとき、固体摩擦による停止条件を差分式の中に表現することが重要である。
- (3) 崩壊土塊は運動の開始の時点で大きな変形を伴うとき、変形に伴う加速度を受ける。
- (4) 速度が大きくなると一定の定常速度に漸近す

る。

- (5) 飽和している土塊と、摩擦角が飽和土塊のみかけの摩擦角に等しい乾燥土塊の運動は若干乾燥土塊の方が早いがそれほど大きくは異なる。

謝辞：本研究の一部は、平成8年度文部省科学研究費（基盤C，一般，課題番号08650608）および、（財）砂防・地すべり技術センターとの共同研究としてなされたものである。記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 芦田和男，江頭進治，神矢弘，佐々木浩：流動土塊の堆積機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，Vol.29, B-2, pp.329-342, 1986.
- 2) Uchida, Y. and M. Hakuno: Distinct element analysis of dry rock avalanches, Structural Eng. / Earthquake Eng., Vol.7, No.2, pp.203-214, October 1990.
- 3) 江頭進治，宮本邦明，伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，Vol.41, pp.789-800, 1992.2

(1997. 9. 30受付)