

粒状体シミュレーションによる 岩屑流・土石流の解析

JR. 東海 内田 吉彦
東京大学地震研究所 伯野 元彦

(平成元年4月28日受理)

要 旨

本研究は、粒状体運動のシミュレーション手法の一種である個別要素法 (DEM—Distinct Element Method—) を用いて、大変形問題である岩屑流・土石流の解析を試みたものである。DEM は、媒質を非連続体として取り扱う手法である。したがって、石や礫などで構成されている岩屑流・土石流の解析には非常に適している。このため、従来からこの種の研究で DEM が用いられてきたが、そこでは土石流に含まれる連続体である泥水の存在が無視されてきた。この泥水の影響を考慮するために、今回は既往の DEM に新しく水を媒体とする粒状体の相互干渉項を取り入れたプログラムを作り、既往の DEM と改良した DEM の2種類の手法を用いて解析を行なった。岩屑流・土石流は3次元の流れであるが、本研究では数値解析上の制約から2次元にモデル化した。解析モデルは、岩屑流・土石流を進行方向に対して平行に切った縦断面モデルと垂直に切った横断面モデルの2種類とした。縦断面モデルでは、既往の DEM を用いて水の影響を考慮しない岩屑流の解析と、水の影響を考慮した DEM を用いての土石流の解析の2種類を行なった。共に DEM の適用性が認められるような結果を得ることが出来た。横断面モデルでは、土石流中で半径の大きいものは上へ、小さいものは下へ移動すると云う逆グレイディング現象 (inverse grading) をシミュレーションすることが出来た。また、この2つの2次元モデルを考え合わせることにより、実際の3次元の土石流で起こるような先端部分に巨礫が集まる現象の発生機構について推察した。

以上より、土石流解析の新しい手法として DEM は効果的であることが分かった。

1. はじめに

現在、地盤等の媒質における破壊解析手法は、以下の二種類に大別することができる。

- I) 媒質を連続体として取り扱う手法
- II) 媒質を非連続体として取り扱う手法

I) の解析手法の例としては、有限要素法 (FEM) や境界要素法 (BEM) などがある。これらの手法は、地盤が破壊するまでの解析には適しているが、それ以後の解析には困難が生じる。II) の解析手法例としては、個別要素法 (DEM—Distinct Element Method—) がある。この手法は、破壊発生までの解析に加えてそれ以後の解析も行なうことができる。

本解析で用いた DEM は、粒状体解析の一種である。この粒状体解析は、媒質を粒体の集合として取り扱う手法である。たとえば、地盤などを土砂や岩石といった非連続な要素 (ブロック) からなりたっていると考える。そして、要素に加わる内部応力は接触点を通して伝達されるとし、ひとつひとつの要素に対して運動方程式をたて、各要素の挙動

を動的に時間領域で追跡する手法である。

本研究の解析対象は岩屑流並びに土石流である。これらは毎年各地で発生し災害をもたらしている。以前はその実態に不明なところが多く幻の災害とも言われていた。最近になり、その動態が VTR や 8 ミリに収められ、実態が明らかになりつつある。また、理論的・実験的研究も進み、その機構も解明されつつある。今まで、DEM による岩屑流、土石流の解析は殆ど行なわれていない。それには、ハードな部分では電子計算機の容量不足や膨大な計算時間などの問題、ソフトな部分では DEM のプログラム自体に岩屑流、土石流に対する有効な改良・修正が行なわれていなかったなどの理由が考えられる。電子計算機は毎年その性能が進み問題は解消されてきている。このような問題が改善されれば、DEM は岩屑流、土石流を解析する手法として重要な位置を占めると思われる。土石流は礫・石などの固体と泥水の混合流動現象である。つまり、礫・石などの非連続な粒状体と連続な泥水が土石流を構成しているのである。もともと DEM は粒状体解析の手法であるので、これに水の影響を考慮すれば土石流に対する解析手法として、その適応性は大きいに認められる。

今回は、二次元で解析を行なうのでそのモデルは、岩屑流、土石流の流れ方向に対して平行に切った断面と垂直に切った断面の二種類である。そして、その解析は流動現象（例えば流速分布や巨礫の挙動など）だけにとどまらず、その後の堆積過程に至るまでのシミュレーションを試みたものである。

2. 本研究の目的

2.1 個別要素法による既往の研究

この節では、個別要素法に関する研究についてほぼ年代順に追って行く。個別要素法は、粒状体解析の一種である。粒状体解析とは媒質を粒体の集合として取り扱う手法であるが、このような手法は最上 (1965) の統計力学的手法をはじめとしていろいろと提案されてきた (伯野・平尾, 1973; 岸野, 1986; 岸野, 1987; 荒木・佐武・岸野, 1987)。また、シミュレーション手法としては、CUNDALL (1971) が提案した離散剛要素法 (Discrete Block Method) が先駆的な手法とされている。この CUNDALL (1971) の DBM は、不連続面で区切られた要素の集合体に対し、個々の要素が運動方程式を満足し、要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件として、集合体の動力学的挙動を数値解析する新しい提案だった。当初、個別要素法では二次元で多角形要素を用いていたが、これらの要素を用いると接触判定や力を作用させる点を計算するのに大変困難が生じるので、要素数の多い粒状体解析には不向きであった。そこで、接触判定などが容易にできる円要素を用いることが提案された (CUNCALL & STRACK, 1979)。日本でも、木山・藤村 (1982) らが、等しい半径の円要素を用い、トンネルの掘削による地盤沈下の解析やサイロ内における岩質粒状体の重力流動の解析 (木山・藤村, 1982, 1983) などを行なった。また、川崎・木山 (1986) らは、楕円形要素をもちいて円形要素では作り得なかった不規則な間隙を含む DEM 解析も行なった。

植村・伯野 (1987) は、従来とは違い半径の異なった要素を用い、また数百であった要

素数を数千個にまで拡張し、斜面崩壊・杭貫入時の挙動・構造物基礎の振動応答・地盤の振動圧密などを解析した。

カサベルデ・岩下・垂水・伯野(1989)は、斜面崩壊の解析を行ない、垂水・伯野(1988)は、それまで殆ど行なわれていなかった粒体間の空隙に水が飽和されている状態について解析を行なった。これは、二次元粒体に水圧を考慮することによって、地震時の砂の液状化と大雨の場合の空隙水圧上昇によるクィックサンド現象のシミュレーションを試みたものである。

岩下・伯野(1988, 1989)は、要素間をつないでいる物質の効果を空隙バネを導入することにより表わし、地盤などの連続体から非連続体までの解析をDEMのみで行なうことを試みた。また、今まで2次元領域で定式化されていたDEMを、ベクトル定式化により3次元領域に拡張した。さらに、パラメーターの決定法やパッキングの方法などを提案した。解析例としては、2次元領域と3次元領域における崖の動的崩壊解析を行なった。

目黒・伯野(1988, 1989)は、それまでのDEMでは均一モデルが対象であったのに対し、多層モデルを導入した。これにより、地盤層や鉄筋コンクリートへの対応が可能になり、多層地盤における地中液状化による地表の大変形解析、及びコンクリートの破壊解析を行なった。

2.2 岩屑流・土石流とは

(1) 実態

岩屑流とは、土・石・礫・軽石といった水分を多くは含まない粒体が斜面を流れる状態をいう。このような現象は、それ程、多く起こるわけではないが、地震時の山腹崩壊の場合の初期には、水分が少ない場合もあるだろう。その時は、岩屑流といえよう。また、火山噴火の際に見られる火砕流も、礫から、ガスを噴出している点多少異なるが、その流れとしての性質には、似ている所もあると思われる。一方、土石流には、比較的に石・礫の割合が多いものから細粒分の多い泥流的なものまでいろいろあるが、概して土・石・礫・軽石と云った固体と水の混合物の重力に基づく連続体と見なせるような流動現象である。その特徴は、一般に広い粒径範囲を持ち、集合運搬を保ちうる高い濃度で、段波状の形態を保ちながら、かなりの距離をかなりの速度で流動することである。土石流による災害としては、最近においてだけでも昭和43年8月18日の国道41号線での飛驒川バス転落事故、昭和47年7月6日の天草豪雨、昭和57年7月23日の長崎豪雨などがある。土石流災害の顕著な特徴は、その強大な破壊力のために、家屋の全壊や人命の犠牲が非常に多いことと、被害を与える外力がかなりの距離を伝播することである。このため、被害の範囲は崖崩れによるものに比べて非常に広がる。したがって、土石流がどこでどのような条件で発生し、どのように伝播し、どこでどのように消滅するかを知ることは、防災上きわめて重要である。土石流の発生原因は、水と土砂礫の一体化による流動化である。例えば、急勾配の溪床上に堆積している土砂礫に豪雨や急激な融雪などによって水が供給され流動するものや、崩壊土が一時溪流をせきとめて天然ダムをつくり、上流の貯水による天然ダムの越流浸食あるいは崩壊によって土石流となるものなどがある。これらの原因を力学的にみて

Table 1. Observed velocity of debris flow.

Place of occurrence	Velocity (m/s)	Year
Mt. Tokachi (Japan)	40 ~ 2.9	1926
Urakawa (Japan)	8 ~ 6	1975
Mt. Sakurajima (Japan)	13.6~ 7.8	1975
Mt. Yakedake (Japan)	16.5~ 0.76	1976
Mt. Usu (Japan)	8 ~ 7	1978
Shiratagiri River (Japan)	21 ~17	1978
Termile Range (USA)	16 ~15	1961
Wrightwood (USA)	3 ~ 2.7	1941
Enterbach (USA)	16 ~11	

Table 2. Observed density of debris flow.

Density (kg/m ³)	Observation site	Presenter
1300	Volcano Yakedake	Okuda et al.
1610	Urakawa	Yamazaki et at.
1800~1900	Volcano Sakurajima	Tahara
1720~2230	Wrightwood	Morton et al.
2400	Wrightwood	Sharp et al.

みると次の2つに大別することができる。1つは静止している土砂礫に水が供給され、その静的な構造が破壊されて水と土砂礫の一体化が生じる場合、もう1つは崩壊のように運動を開始した土塊に水が供給されて一体化する場合である。土石流が起りやすい地質は一番目が花崗岩地帯、次が変成岩地帯で両地帯で発生率のほぼ50%を占める結果がでている(武井・水原, 1982)。土石流の流出堆積土砂量は大体 $10^4 \sim 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ のオーダーであり、発生領域の勾配はだいたい $15^\circ \sim 30^\circ$ である。土石流の流動形態は、大きい石ほど流れの表面や先端部に集り、先端部は段波状に膨らんでいる。そして、その先端部が通過した後は、比較的濃度の低い小さな礫を含んだ流れが続く。表面に見える石礫の進行速度は平均流速よりも速く、底面から表面にいくほど速くなるような流速分布をしている。土石流の流速は、発生地点からの距離や、巨礫が多く含まれているかまたは細粒分の多い泥流的なものかなどによって異なるので、測定されている値はかなりばらついているが、参考の為に Table 1 に示しておく(芦田・高橋, 1983)。単位重量も先端部と後続部では異なるので値を直接比較することはあまり参考にならないが、実測例を Table 2 に示しておく(芦田・高橋, 1983)。土石流は谷の出口のように勾配が緩くなり、かつ幅が広がった部分に流出すると、堆積して土石流扇状地を形成する。その溪床勾配は、大体 $3^\circ \sim 4^\circ$ ぐらいである。土石流堆積物の粒度分布は、先端部および周辺部に巨礫が集中する傾向である(諏訪, 1988)。深さ方向には顕著な特徴は見られないが下から上へ粒径が大きくなる場合もある。

(2) 機構

岩屑流は、大雨の後、起こる土石流と違って、地震などを引き金として起こることが多

いため、その発生場所、時刻を予想することが難しく、ビデオなどに記録された例はない。一方、土石流は流れの状況を記録された例もある。土石流の機構を大別すると、発生の機構・流動の機構・停止及び堆積の機構の3つに分けることができる。今回のDEMによる土石流の解析では、このうちの流動の機構に主眼を置いているので、ここでも流動を中心に述べていく。

現在、土石流の流動機構を説明する為のモデルとしては、ビンガム流体モデルに代表される粘塑性流体モデルとBAGNOLD (1954)の研究に始まるダイラタント流体モデルが用いられている。ここではこの両モデルの違いを、土石流の特徴的な性質である巨礫の挙動を例に示してみる。ビンガム流体モデルでは、水面近傍において剛体のような土の板があたかもいかにのように移動している栓流が生じ、その部分のもっている支持力によって巨礫は地盤上に置かれているかのように支持されるとみなす。一方、ダイラタント流体モデルでは、巨礫の下には多くの石礫が相対速度をもって流動しており、それが巨礫と衝突して生ずる反発力によって巨礫が支えられていると考えるのである。ビンガム流体の栓流の部分構成している粒子は互いに衝突しないから、この場合流れの基本的な機構をつかさどっているのは、粒子を取り巻いている泥の部分である。ところが、我が国で発生している土石流あるいは泥流では、粘土分の含有率はせいぜい数%であり、粘土の凝集力に基づく降伏強度は巨礫を支えられるほど大きくなり得ない。また、巨礫を支えることのできるほど大きな強度を持っている流体が3°~4°程度の緩勾配地点まで輸送されている巨礫の直径よりも薄いような流動層厚で、どうして流れることができるのかという理論的困難も存在する。このようなことから、以下の機構の説明にはダイラタント流体モデルをもって説明を行なう。

Bagnoldの分散応力の概念を土石流に適用した理論流速分布形の一例をFig. 1に示す。また、流速分布式を積分して断面平均流速Uを求めると、

$$U = \frac{2}{5} \left[\frac{1}{a \sin \alpha} \left\{ C_d + (1 - C_d) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right\} \left(\frac{h}{d} \right) (gh \sin \theta)^{1/2} \quad (2.1)$$

となる。これは、土石流段波の流下速度に等しい。ただし、 C_d : 土石流中の砂礫濃度、 C_* : 静止堆積層の濃度、 $a \sin \alpha = \text{定数} (=0.02)$ 、 ρ : 水の密度、 σ : 砂礫の密度、 θ : 勾

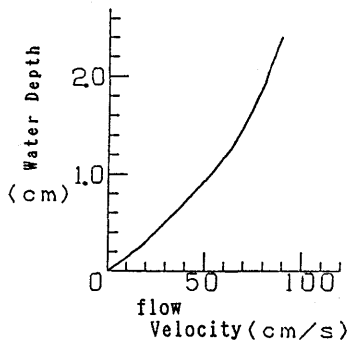


Fig. 1. Ideal velocity distribution of debris flow.

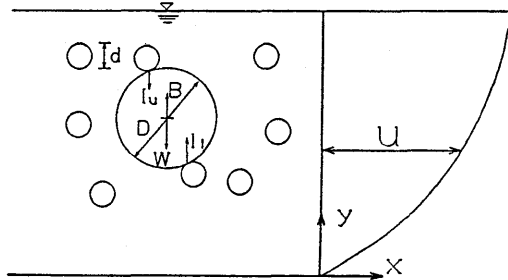


Fig. 2. Acting force on great piece of rock.

配, h : 水深, d : 粒径, g : 重力加速度である. 式 (2.1) から明らかのように, 土石流を構成する粒径が大きいほど, また, 濃度が高いほど, 同一水深, 同一勾配では流速が小さくなる.

次に, 先にも述べたが巨礫の輸送機構とその先端部への集中機構についてダイラタント流体モデルをもちいて説明してみる. まず, その現象は土石流の中で非常に大きい石礫が流動の表面から突出してあたかも浮いて流れているように流動すること, 及び段波先端部に近い部分ほど大きい石が集中しており, 後方になるにつれて水分の多い泥流的性質を呈することである. Fig. 2 は, 均等な粒子から構成されている土石流中に1個の巨礫が存在する場合, その礫に主流と直角方向に作用する力とその付近の平均流速の分布を示している. 礫に作用する力は, 礫自身の重量 W , 浮力 B による力, 礫の上層と下層において他の粒子と衝突することによって加えられる下向きの反発力 I_u と上向きの反発力 I_l , 及び礫の運動方向と反対に作用する抗力 F である. 高濃度の泥水中とはいえども, W は B より大きく, 上下層の粒子との衝突がなければ礫は下方へと移動する. ところが, 着目している巨礫は主流方向へ移動する際に上下層の粒子と相対速度を持っているために衝突を繰返すことになる. 前述のように, 衝突による分散応力は速度分布の二乗に比例するが, この付近の速度分布は Fig. 2 に示したように速度勾配が下層で大きくなっている. また, 単位時間当りの衝突回数も粒子がほぼ均等に分布しているものとすれば, 下層の方が上層よりも多くなり, 結局, $I_l > I_u$ となる. 各作用力の大きさを評価すれば巨礫と周辺粒子との粒径の差が大きいほど I_l が I_u を上回る程度が大きく, 礫の自重に抗して上向きの運動をし, しかも, その速度が大きくなる. すなわち, 大きい礫ほど容易に上方へ移動するのである. このようにして, 堆積層上に土石流が発生し, 堆積層中に含まれていた巨礫が土石流に取り込まれると, それは, すぐに流動の表面に顔をだして流れる. 表面付近の流速は底面付近より速いから, 巨礫は前へ前へと輸送され, ついに段波先端部へ到達する. 段波先端部では底面へ落下して土石流の中へのみこまれてしまうこともあるが, その後, その礫が周辺の礫よりも大きければ間もなく流動表面に顔を出し, 再び前方へ輸送されることになる. このような過程を繰り返すうちに, 段波先端部には流動物中の最大級の礫が集中することになり, 逆に後続部では微細な粒子が集ることになる.

最後に, 土石流の衝撃力について説明する. 土石流の衝撃力には二種類のものがある. 一つは土石流が障害物に衝突し, その前面で流体として運動量を失うことによる圧力である. これは, 水理学の知識を活用すれば比較的容易に見積もることができるのである. しかしながら, 実際にはこのような圧力よりも, むしろ土石流中の巨石が衝突する時に生ずる集中荷重が重要である. これがどの程度の大きさになりうるか, まだ十分な解明が進んでいないが, コンクリート壁面と石塊が完全弾性衝突するという仮定のもとにおける試算では石塊の直径 1 m, 速度 1 m/s として 100 t 重にもなる (OKUDA, 1978). 焼岳上々掘沢に埋め込んだ 15×15 cm の圧痕板では 6 t 重が計測されている.

2.3 本研究の位置づけ

DEM を用いての岩屑流・土石流のような流動現象の解析例は, 植村・伯野 (1987) による斜面崩壊の解析や岩下・伯野 (1987) による 2 次元および 3 次元領域での崖の動的崩

壊解析などがある。植村・伯野(1987)の解析は、1984年の長野県西部地震でおきた御岳崩れをシミュレートしたものであるが、要素数も少なく解析モデルとしては小規模なものだった。結果では要素の運動に対する有効な抵抗がなかったため、要素が予想以上の速度をもってしまった。今回の解析のうち土石流ではこの抵抗として水の影響を考慮することにした。過去における水の影響を考慮した解析例としては、垂水・伯野(1988)による液状化の解析などがあるが、この解析では計算する際にワンステップごとにその間隙の面積を求め間隙水圧を計算し解析を行なっていたので、膨大な計算時間を費やしてしまった。本解析は水の影響をより効率的であり、また現実的なモデルにすることで、解析対象物の大型化を試み、実際の土石流により近い流動現象をシミュレートすることを目的としている。また、『2.2 岩屑粒・土石流とは』で述べたような従来の土石流の解析手法とは全く異なった DEM を用いて解析を行なうので、その粒状体解析の特徴を生かした結果を導いて行きたい。粒状体解析である DEM の特徴としては、要素ひとつひとつに対してそのデータが容易に数値で表わせると云うことがある。そのデータとは、例えば要素の座標位置や速度、2つの要素間に働いている力などである。そして、これから流速分布や一個の要素または数個の要素が及ぼす衝撃力などを計算することができる。このような計算結果を導き、これまでの土石流のデータと比較することも目的の一つである。そして、岩屑流・土石流の特徴的な性質である巨礫の挙動についてもシミュレーションを行なった。

3. 個別要素法の理論

3.1 個別要素法の概要

個別要素法 (Distinct Element Method 略 DEM) は、粒状体解析の一種である。粒状体解析とは、有限要素法 (FEM) や境界要素法 (BEM) 等の様に媒質を連続体としてではなく、非連続体として考える手法である。つまり、媒質が粒体要素の集合体から成り立っているという仮定のもとに解析していく。要素は接触判定や力の作用点を求めやすくするために円形を用い、破壊するということは考えず剛体として取り扱っている。また、要素の変形は別の要素との接触点のみで生じるとし、この接触点を通して粒子間の力が伝達されるものとしている。接触点の力学的モデルには、基本的には弾性スプリングと粘性ダッシュポットからなる Voight 型モデルを用いている。

計算過程を極めて簡単に言ってしまうと、各々の要素に加わっている接触力や重力を独立に求め、その力から運動方程式をたて、時刻歴でステップ・バイ・ステップで前進的に解き、要素の運動を追跡していくものである。DEM は、数値シミュレーションである。したがって、解析にはコンピュータが必要不可欠なものとなっている。そのプログラムのフローチャートを Fig. 3 に示した。以下、DEM の解析手法を具体的に説明する。

3.2 接触判定

任意の円形要素 I ・ J 間の接触判定について示す。時刻 t における I ・ J の座標を (x_i, z_i) ・ (x_j, z_j) 、半径を r_i ・ r_j とする。Fig. 4 に示す様に、要素 I ・ J の接触判定は、 ε の

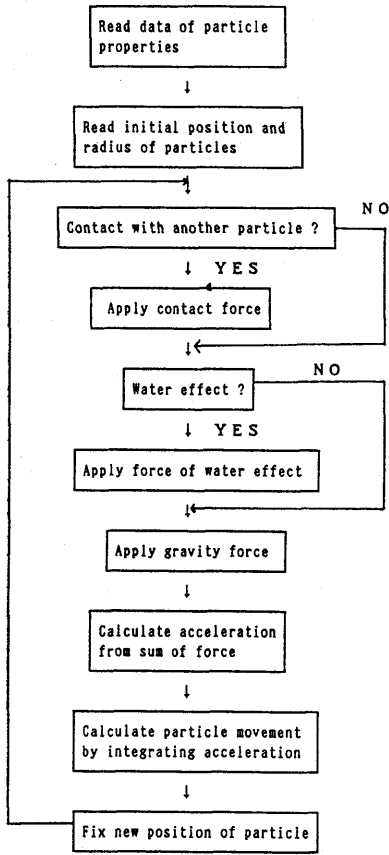


Fig. 3. Flow of DEM computation.

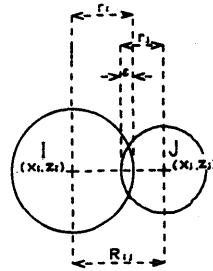


Fig. 4. Contact judgement of particles.

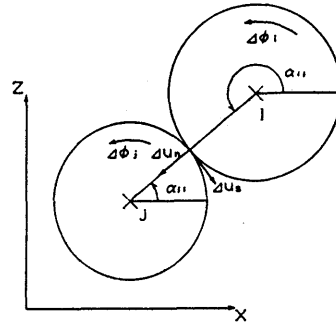


Fig. 5. Relative displacement at contact.

正負によって決り以下の様に表示る。

☆接 触

$$0 \leq \varepsilon = r_i + r_j - R_{ij} \tag{3.1}$$

☆非接触

$$0 > \varepsilon = r_i + r_j - R_{ij} \tag{3.2}$$

$$\text{但し, } R_{ij} = (x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \tag{3.3}$$

3.3 接触による力

まず、接触による力の評価を行なうにあたって、要素 $I \cdot J$ の中心を結んだ線を要素衝突の直方向とし、Fig. 5 に示す様に、この線と x 軸とのなす角を α_{ij} とする。 α_{ij} は反時計周りを正とする。

α_{ij} の正弦と余弦は、次の様に与えられる。

$$\sin\alpha_{ij} = -\frac{(z_i - z_j)}{R_{ij}} \quad (3.4)$$

$$\cos\alpha_{ij} = -\frac{(x_i - x_j)}{R_{ij}} \quad (3.5)$$

時間増分 Δt における、接触する 2 要素 $I \cdot J$ の $x \cdot z$ 回転方向の変位を $(\Delta x_i, \Delta z_i, \Delta\Phi_i) \cdot (\Delta x_j, \Delta z_j, \Delta\Phi_j)$ と置けば、直方向及びせん断方向の相対変位増分 Δu_n (接近を正) $\cdot \Delta u_s$ (反時計周りを正) は、以下の式で与えられる。

$$\Delta u_n = (\Delta x_i - \Delta x_j) \cos\alpha_{ij} + (\Delta z_i - \Delta z_j) \sin\alpha_{ij} \quad (3.6)$$

$$\Delta u_s = -(\Delta x_i - \Delta x_j) \sin\alpha_{ij} + (\Delta z_i - \Delta z_j) \cos\alpha_{ij} + (r_i \Delta\Phi_i + r_j \Delta\Phi_j) \quad (3.7)$$

接触点に想定する力学モデルを Fig. 6 に示す。まず、直方向に作用する力を求める。 Δu_n による直方向の弾性スプリングの力の増力を Δe_n 、粘性ダッシュポットの力を Δd_n とする。直方向のバネ定数を K_n 、粘性係数を η_n とすれば、Fig. 6 の配置により、以下の関係が求まる。尚、圧縮を正としている。

$$\Delta e_n = k_n \Delta u_n \quad (3.8)$$

$$\Delta d_n = \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t} \quad (3.9)$$

従って、時刻 t における直方向のバネの弾性抗力 $[e_n]_t$ とダッシュポットの粘性抗力 $[d_n]_t$ は、以下の様になる。

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + \Delta e_n \quad (3.10)$$

$$[d_n]_t = \Delta d_n \quad (3.11)$$

ここで、粒子間の引張り力を認めず、粒子間が離れた場合には、力は働かなくする。そこで、以下の様な条件を付加する。

$$[e_n]_t < 0 \text{ のとき}$$

$$[e_n]_t = [d_n]_t = 0 \quad (3.12)$$

以上より時刻 t における 2 要素間に作用する直方向の力 $[f_n]_t$ は、以下の式で求める。

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t \quad (3.13)$$

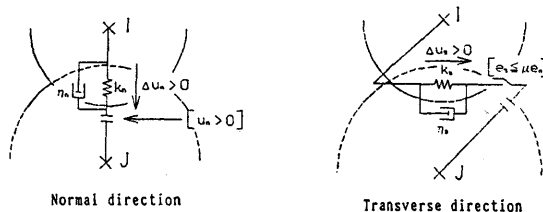


Fig. 6. Mechanical model at contact point.

次に、接触による接線方向の力を求める。これも、Fig. 6 のモデルに従い以下の様になる。接線方向変位増分 Δu_s による接線方向の弾性スプリングの力の増分を Δe_s 、粘性ダッシュポットの力の増分を Δd_s とする。バネ定数を K_s 、粘性係数を η_s とすれば、以下の関係が求まる。尚、要素 I に関して時計周りを正としている。

$$\Delta e_s = k_s \Delta u_s \quad (3.14)$$

$$\Delta d_s = \eta_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t} \quad (3.15)$$

従って、時刻 t における接線方向のバネの弾性抗力 $[e_s]_t$ とダッシュポットの粘性抗力 $[d_s]_t$ は、以下の様になる。

$$[e_s]_t = [e_s]_{t-\Delta t} + \Delta e_s \quad (3.16)$$

$$[d_s]_t = \Delta d_s \quad (3.17)$$

ここで、粒子間が離れた場合には、せん断力も働かなくなる。また、接触点付近のせん断変形は主として摩擦力によると考え、動摩擦力の制限を考える。そこで、以下の様な条件を付加する。

$[e_n]_t < 0$ のとき

$$[e_s]_t = [d_s]_t = 0 \quad (3.18)$$

$|[e_s]_t| > \mu [e_n]_t$ のとき、

$$[e_s]_t = \mu [e_n]_t \times \text{SIGN}([e_s]_t) \quad (3.19)$$

$$[d_s]_t = 0 \quad (3.20)$$

但し、 μ は粒子間の摩擦係数

SIGN (A) は変数 A の正負を表わす

以上により時刻 t における 2 要素間に作用するせん断方向の力 $[f_n]_t$ は、以下の式で求まる。この力も時計周りを正とする。

$$[f_s]_t = [e_s]_t + [d_s]_t \quad (3.21)$$

3.4 水の影響

本解析では、土石流のシミュレーションを試みるわけだが、土石流と云うのは石礫と一緒に水も流れてくる現象である。そこで、今回はこの水の影響を水を媒介とした粒子間の相互干渉力として次の様にモデル化して DEM に取り入れる。

土石流中の要素（石礫）のまわりには水が存在している。この要素どうしが近づこうとすると、間にある水が圧力を受け、それぞれの要素が近づかない様に遠ざける方向へ力を与える。逆に遠ざかろうとすると、近づく方向へ力を与える。このモデルを定式化してみる。まず要素のすきまを計算し、どの程度のすきままで間隙の水の影響を考慮するかを決める。ここで、すきまの程度を決める定数として EWA という無次元量を用い、要素 I ・ J の中心座標・半径をそれぞれ $(x_i, z_i) \cdot r_i$ ・ $(x_j, z_j) \cdot r_j$ とすると、以下の式で判定する。

☆水の影響を考慮する

$$(r_i+r_j) \times EWA > R_{ij} \quad (3.22)$$

☆水の影響を考慮しない

$$(r_i+r_j) \times EWA \leq R_{ij} \quad (3.23)$$

$$\text{但し, } R_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \quad (3.24)$$

時刻 t における要素間の直方向の相対速度 $[V_n]_t$ (接近を正)・せん断方向の相対速度 $[V_s]_t$ (反時計回りを正) は, 要素 $I \cdot J$ の $X \cdot Z$ 方向の速度成分を $[\dot{x}_i]_t \cdot [\dot{z}_i]_t \cdot [\dot{x}_j]_t \cdot [\dot{z}_j]_t$ とすると次の式になる.

$$[V_n]_t = ([\dot{x}_i]_t - [\dot{x}_j]_t) \cos \alpha_{ij} + ([\dot{z}_i]_t - [\dot{z}_j]_t) \sin \alpha_{ij} \quad (3.25)$$

$$[V_s]_t = -([\dot{x}_i]_t - [\dot{x}_j]_t) \sin \alpha_{ij} + ([\dot{z}_i]_t - [\dot{z}_j]_t) \cos \alpha_{ij} \quad (3.26)$$

ここで, $\sin \alpha_{ij}$ と $\cos \alpha_{ij}$ は式 (3.4) 及び (3.5) によって与える. そして, それぞれの要素に加える水を媒介とした粒状体間の相互干渉力の大きさ $|[fv_n]_t|$ および $|[fv_s]_t|$ は次の式で与える.

$$|[fv_n]_t| = C_D a \frac{\rho [V_n]_t^2}{2} \quad (3.27)$$

$$|[fv_s]_t| = C_D a \frac{\rho [V_s]_t^2}{2} \quad (3.28)$$

但し, C_D は抗力係数

a は物体の流れ方向への投影面積

ρ は水の密度 (半径は小さい方を用いる)

また, これらの力の大きさに方向を加えると次の式になる.

$$[fv_n]_t = C_D a \frac{\rho [V_n]_t^2}{2} \times \{-\text{SIGN}([V_n]_t)\} \quad (3.29)$$

$$[fv_s]_t = C_D a \frac{\rho [V_s]_t^2}{2} \times \{-\text{SIGN}([V_s]_t)\} \quad (3.30)$$

3.5 力の総和

要素 I にかかる力の総和を求めるには, 局座標系から全体系へ変換し合力を求めればよい. これまでに述べた接触力 $[f_n]_t \cdot [f_s]_t$, 水を媒介とした粒状体間の相互干渉力 $[fv_n]_t \cdot [fv_s]_t$ を使って, X 方向の合力 Fx_i ・ Z 方向の合力 Fz_i ・中心周りのモーメント Fm_i (反時計回りを正) を求めると次の式になる. 但し, \sum_j は要素 I に接触する全ての要素 J についての総和を表わし, \sum_k は要素 I に対して水の影響を作用させる全ての要素 K についての総和を表わす.

$$[Fx_i]_t = \sum_j \{-[f_n]_t \cos \alpha_{ij} + [f_s]_t \sin \alpha_{ij}\} \\ + \sum_k \{[fv_n]_t \cos \alpha_{ij} - [fv_s]_t \sin \alpha_{ij}\} \quad (3.31)$$

$$[Fz_i]_t = \sum_j \{-[f_n]_t \sin \alpha_{ij} - [f_s]_t \cos \alpha_{ij}\} \\ + \sum_k \{[fv_n]_t \sin \alpha_{ij} + [fv_s]_t \cos \alpha_{ij}\} - m_i g \quad (3.32)$$

$$[Fm_i]_t = -r_i \sum_j \{[f_s]_t\} \quad (3.33)$$

ここでは、 m_i は要素 I の質量であり $m_i g$ の項は重力が Z 軸方向に作用していることを示す。

3.6 加速度・速度・変位の求め方

要素 I の X 軸方向変位を k_i 、 Z 軸方向変位を z_i 、回転方向変位を Φ_i とし、加速度を時間増分 Δt で差分近似すれば、時刻 t での加速度を次の式で表わせる。

$$[\ddot{x}_i]_t = \frac{[Fx_i]_t}{m_i} \quad (3.34)$$

$$[\ddot{z}_i]_t = \frac{[Fz_i]_t}{m_i} \quad (3.35)$$

$$[\ddot{\Phi}_i]_t = \frac{[Fm_i]_t}{I_i} \quad (3.36)$$

ここで、 I_i は要素 I の慣性モーメントとする。2次元解析では要素の密度を ρ とすると、 $m_i \cdot I_i$ は以下の式になる。

$$m_i = \rho \pi r_i^2 \quad (3.37)$$

$$I_i = \frac{1}{2} \rho \pi r_i^4 \quad (3.38)$$

時刻 t での速度は、上式の加速度を積分することによって求められる。

$$[\dot{x}_i]_t = [\dot{x}_i]_{t-\Delta t} + [\ddot{x}_i]_t \Delta t \quad (3.39)$$

$$[\dot{z}_i]_t = [\dot{z}_i]_{t-\Delta t} + [\ddot{z}_i]_t \Delta t \quad (3.40)$$

$$[\dot{\Phi}_i]_t = [\dot{\Phi}_i]_{t-\Delta t} + [\ddot{\Phi}_i]_t \Delta t \quad (3.41)$$

これらを台形則をもって積分することによって、変位増分が求められる。

$$[\Delta x_i]_t = \frac{1}{2} \{[\dot{x}_i]_{t-\Delta t} + [\dot{x}_i]_t\} \Delta t \quad (3.42)$$

$$[\Delta z_i]_t = \frac{1}{2} \{[\dot{z}_i]_{t-\Delta t} + [\dot{z}_i]_t\} \Delta t \quad (3.43)$$

$$[\Delta \Phi_i]_t = \frac{1}{2} \{[\dot{\Phi}_i]_{t-\Delta t} + [\dot{\Phi}_i]_t\} \Delta t \quad (3.44)$$

変位は以下の式で求められる。

$$[x_i]_t = [x_i]_{t-\Delta t} + [\Delta x_i]_t \quad (3.45)$$

$$[z_i]_t = [z_i]_{t-\Delta t} + [\Delta z_i]_t \quad (3.46)$$

$$[\Phi_i]_t = [\Phi_i]_{t-\Delta t} + [\Delta \Phi_i]_t \quad (3.47)$$

これらの時刻 t での変位増分を用いて、同様に時刻 $t + \Delta t$ の変位増分を求めることができ、 Δt ごとの解析を進めていくことができる。

3.7 速度の調整

DEM 解析の差分近似法の収束性は時間増分 Δt に極めて敏感である。今回用いた DEM プログラムでは Δt の間、各要素は等加速度運動する。したがって、 Δt が大きすぎると要素どうしの重なりが大きくなり次のステップで非常に大きな力が作用し、運動が発散してしまう。だからと云って、 Δt を小さくすればある時間まで解析を行なうのにステップ数が多く必要となり、計算時間が長くなったり丸め誤差が大きくなったりする。そこで、次の様な調整を行なう。

2つの要素 $I \cdot J$ が衝突後、短時間（数ステップ）で離れ、要素 I がフリーの状態（他の要素とまったく接していない状態）になった場合、時間増分 Δt が大きかったりすると、離れた後の要素 I の速度が極端に大きくなり、飛散ってしまうことがある。これは、2つの要素 $I \cdot J$ 衝突時の法線方向の相対速度を Vn_{ij} 、離れる時の法線方向の相対速度を Vn_{ij}' とおくと（いずれも接近を正）、

$$-Vn_{ij}' / Vn_{ij} \gg 1 \quad (3.48)$$

という不自然な現象が起こるためである。これを解消するために Vn_{ij}' の値を次式の様に補正する。

$$-Vn_{ij}'' / Vn_{ij} = e \quad (3.49)$$

ここで、 Vn_{ij}'' は Vn_{ij}' を補正した値であり、 e は跳ね返り係数である。

接線方向力（摩擦力）の限界値は定められているので、式 (3.49) をフリーになった要素の法線方向速度を調整することによって満足させることにする。ある要素 I が1つまたは複数の要素と接していて、ある瞬間にフリーの状態になったとする。フリーになるパターンは多々考えられるが、大きく分けると Fig. 7(a)~(b) に示す4つの場合がある。

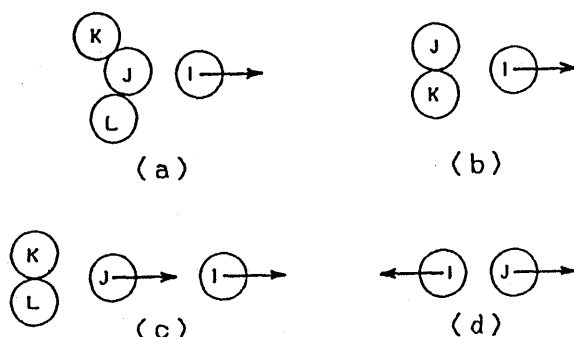


Fig. 7. Patterns for particle separation.

(a) は要素 I が要素 J から離れ、要素 I のみがフリーになった場合、(b) は要素 I が要素 J, K から同時に離れ、要素 I のみがフリーになった場合、(c) は要素 I が要素 J から離れ、同時に要素 J も要素 K, L から離れ、要素 $I \cdot J$ の2つがフリーになった場合、(d) は要素 I が要素 J から離れ、また要素 J は要素 I としか接していなかった場合である。実際におこるのは殆んどが (a) または (d) のケースである。

調整にあたってはあらかじめ Vn_{ij} を求めておく必要がある。Fig. 8 に示すように、要素 $I \cdot J$ の衝突時の法線方向絶対速度をそれぞれ $Vn_i \cdot Vn_j$ (接近を正) とおくと次式で計算される。

$$Vn_i = Vx_i \cos \alpha_{ij} + Vz_i \sin \alpha_{ij} \quad (3.50)$$

$$Vn_j = -Vx_j \cos \alpha_{ij} - Vz_j \sin \alpha_{ij} \quad (3.51)$$

ここで、 $Vx \cdot Vz$ はそれぞれ $X \cdot Z$ 方向の速度成分、 $\cos \alpha_{ij}$ 、 $\sin \alpha_{ij}$ は式 (3.4)・(3.5) に示すとおりである。

$Vn_i \cdot Vn_j$ を用いると Vn_{ij} は次式で表わせる (接近を正)。

$$Vn_{ij} = Vn_i + Vn_j \quad (3.52)$$

次に、離れた後の速度の調整を (a)~(d) の場合についてそれぞれ行う。ただし以下の式において添字 (') は離れる時の値を、添字 (") は離れた後 (1 ステップ後) の値を表わすものである。

(a) の場合

$$Vn_{ij}'' = Rk_i \times Vn_i' + Vn_j' \quad (3.53)$$

となるような補正係数 Rk_i を求め、これを用いると $Vx_i'' \cdot Vz_i''$ は次式で計算される。

$$Vx_i'' = Vx_i' - (1 - Rk_i) Vn_i' \cos \alpha_{ij}' \quad (3.54)$$

$$Vz_i'' = Vz_i' - (1 - Rk_i) Vn_i' \sin \alpha_{ij}' \quad (3.55)$$

(b) の場合、要素 $J \cdot K$ に対して式 (3.53) より Rk_i を求め、小さいほうの値を用い式 (3.54)・(3.55) の計算を行う。

(c) の場合、先に式 (3.53) と同様に Rk_j を求め要素 J の速度を決定し、それを基準にして式 (3.53) および式 (3.54)・(3.55) の計算を行う。

(d) の場合、式 (3.53) を次のように修正する。

$$Vn_{ij}'' = Rk_j \times Vn_i' + Rk_j \times Vn_j' \quad (3.56)$$

$$\begin{aligned} m_i Vn_i - m_j Vn_j &= m_i Rk_i Vn_i' \\ -m_j Rk_j Vn_j' & \end{aligned} \quad (3.57)$$

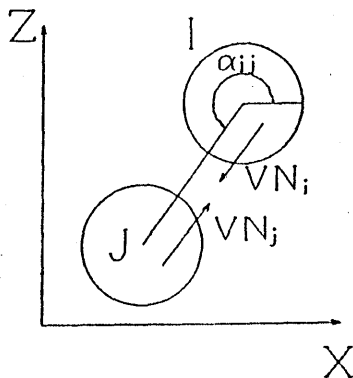


Fig. 8. Collision of two particles.

後者は運動量保存則であり、この2式を解いて

$Rk_i \cdot Rk_j$ を求め、式 (3.53)・(3.54) を用いて要素 $I \cdot J$ の速度調整を行う。

DEM は、要素には重力以外には内力のみが働くので、全体として運動量は保存される。上記の方法は、速度調整する要素は全体としては極くわずかなので運動量保存をほぼ満足するものであり、特に大変形問題やパッキング問題など要素が激しく動く場合には有効である。

3.8 パッキングの方法 —初期状態の作成法—

個別要素法は先にも述べたように数値シミュレーションである。したがって解析を始める前に解析対象となるモデルを作成しなければならない。本解析では要素に円形を用いているが、これらの円形要素の半径が一定である場合とそうでない場合とではそのパッキング方法は違ってくる。

半径が一定でない場合にはランダムパッキングを行なう。伯野・平尾 (1973) は粒状体のランダムパッキングについて以下の様に分類している。

1) 棄却法 (rejection method)

- ・乱数により粒子の位置を発生させ、他の粒子と重なりが生じたら棄却していき、パッキングを得るという方法。

2) 局所移動法 (method of local displacement)

- ・粒子を格子状に配置しておき、その後一定の微小範囲をランダムに動かしていき配置を得るという方法。

3) 割込法 (intrusion method)

- ・液体のシミュレーションのために ROUND と NEWTON (1963) が用いた方法。

4) 落下法 (method of dropping particles)

- ・粒子を格子状に配置してから重力をかけて粒子を下に落とすという方法。

5) 成長法 (method of particle growth)

- ・ランダムの中から粒子の半径を成長させて周囲の粒子に接しさせるという方法。

次に、今回用いたランダムパッキングについて説明する。まず、粒子を配置する領域と粒子の粒度分布に関するデータを入力する。粒子の中心座標は一様乱数で発生させ領域に納まるように処理し、半径は一様乱数を確率変数として対数正規分布に取り入れ、平均粒径・標準偏差・最小及び最大粒径はあらかじめ入力してあるので、これで粒度分布は決定されるが、この状態では粒子間に重なりが生じ内部応力が発生するので半径を小さくするなどの処理を行ない、重なり部分を解消する。この方法により、座標位置及び半径がランダムなパッキングが出来ることになる。今回はこの状態では、間隙が大きすぎたため解析に支障をきたすので、DEM のプログラムを用いて重力をかけ、締め固めを行ない、より安定な状態を作成した。

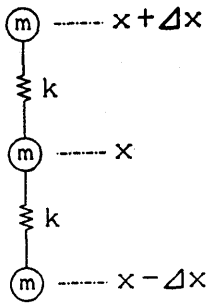


Fig. 9. Mass spring one dimensional model.

3.9 パラメーターの決め方

DEM 解析のパラメーター (直方向のバネ定数・粘性定数等) は, 相当する実物質をそのまま用いることはできないので, これらの値の物理的性質を考えながら決定することを試みる.

(1) バネのパラメーターの決め方

Fig. 9 に示すモデルを考える. 要素質量 m ・ヤング率 E ・波動速度 C とすれば, 振動の運動方程式と波動方程式は以下の様に表せる.

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (3.59)$$

振動の式より以下の式を考える. ただし, 要素間の距離を Δx ・時間刻みを Δt とする.

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = k(y_{x-\Delta x} - y_x) - k(y_x - y_{x+\Delta x}) \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{k}{m}(y_{x-\Delta x} - 2y_x + y_{x+\Delta x}) \quad (3.61)$$

波動方程式を差分近似して以下の式が求まる.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \doteq \frac{1}{\Delta t^2}(y_{x-\Delta x} - 2y_x + y_{x+\Delta x}) = \left(\frac{C}{\Delta x}\right)^2 (y_{x-\Delta x} - 2y_x + y_{x+\Delta x}) \quad (3.62)$$

式 (3.61) と (3.62) より以下の関係が求まる.

$$k = m \frac{C^2}{\Delta x} \quad (3.63)$$

この式よりバネ定数を定めることができる.

次に, 一般的な物性値を用いての決め方を示す. 与えるパラメーターは, ヤング率 E ・ポアソン比 ν ・密度 γ で, これらよりラメの定数 $\mu \cdot \lambda$ が以下の様に決まる.

$$\mu = G = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (3.64)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.65)$$

ここでラメの定数 μ は, 剛性率 G と同じものである. これらより S 波速度 V_s と P 波速度 V_p は, 以下の様になる.

$$V_s = \left(\frac{G}{\gamma}\right)^{1/2} \quad (3.66)$$

$$V_p = \left(\frac{\lambda + 2G}{\gamma}\right)^{1/2} \quad (3.67)$$

要素の半径が r の円とすれば, m と Δx は以下のようになる.

$$m = \pi r^2 \gamma \quad (3.68)$$

$$\Delta x = 2r \quad (3.69)$$

ここで, 直方向のバネ定数には V_p が, せん断方向のバネ定数には V_s が関与すると思われるので, 式 (3.63) に代入すれば $k_n \cdot k_s$ が求まる.

$$k_n = \frac{1}{2} \pi \gamma V_p^2 \quad (3.70)$$

$$k_s = \frac{1}{2} \pi \gamma V_s^2 \quad (3.71)$$

(2) Δt の決め方

DEM 解析では, 時間領域で数値積分をおこなうので, タイムステップ Δt によって解析結果が大きく左右される. Δt が適当な値でない場合には, いろいろな問題が生じてくる. 例えば, Δt が大きすぎた場合には, 1 回のタイムステップの間に要素が動きすぎてしまい, 要素どうしに大きな重なりが生まれ, お互いに及ぼす力が非常に大きくなり次のタイムステップでは要素が発散してしまうことになる. また, 離散化の誤差も生じやすい. 逆に, Δt が小さすぎた場合には, ある時間まで解析するためにタイムステップが小さい分だけ多くの計算時間を要することになる. また, 計算機による丸め誤差が蓄積していく危険がある. 以上の様な問題が生じる為に適当な Δt を求める必要がある.

1 回のタイムステップ中に波動が隣接する要素を通り過ぎてしまい次の要素まで伝わってしまうと解析に支障が生じる. これは, DEM 解析が要素の接触により力や波動を伝播させる方法である為に, 接触する要素からの反力が求まる前に波動が先まで伝わってしまうと反力の評価がうまくいかない為である. この考えによる Δt の条件は次式の様に表わせる.

$$\Delta t < \frac{\Delta x_{\min}}{V} \quad (3.72)$$

この式は, 時間 Δt の間に波動が伝播する距離が, 隣接する要素の中心間距離のうちの最小値 Δx_{\min} より小さければ良いという意味である.

以上の様に安定条件を導いたが, これらにより決めた Δt を用いて DEM 解析をおこなってみても, 解析結果が安定せず発散してしまう場合がある. これは, DEM のモデルがバネとダッシュポットの複合モデルであるのに対し, 本章では 1 次元系で考えたからだと思われる. DEM のモデルではバネが多数配置されているため, 1 次元系より全体系のみかけのバネの方が固くなり, 波動伝播の速度も速くなる. このため Δt を上記の安定条件で求まる値より小さくしなければならないことになる. 解決法は, ひとつひとつのバネ定数をもっと小さくすることであろう. バネ定数を小さくすると媒質の波動伝播が遅くなり, Δt を大きくしてもよいことになる. よって DEM 解析で実際に用いるバネ定数は, 本章で求めた値より小さくとることとする.

以上 DEM におけるパラメーターの決定法を述べてきたが, DEM モデルは多質点系の

モデルであるので、全体系の特性を解析的に求めるのは得策ではないし大変困難である。より厳密なパラメーターを決めるには、モデルに衝撃力を与え弾性波探査などを行なうのが良いと思われる。

4. 岩屑流・土石流のモデル化

個別要素法では、解析する媒質をいかに実現に近い状態でモデル化するかが、解析する上で重要な問題である。自然現象と云うのは、やはり3次元領域に属しているものが大多数である。土石流にしても例外ではない。土石流が流れてくる谷は、上下には凹凸があり、左右には蛇行している。もちろん DEM も実験の一種であるので、3次元で行なうのが良いのではあるが、3次元で解析を行なうといろいろな問題が生じてくる。岩下・伯野 (1988) は、3次元領域での DEM による崖崩壊の解析を試みた。この解析によると、3次元領域では、要素数を増やしても解析領域があまり大きくはならない。これは2次元ではその解析領域が面積であるのに対し、3次元では体積である。したがって、要素が多少増えても、その領域はあまり大きくならないのである。また、要素数を増やして領域を大きくしても、それだけ計算機の CPU タイムが増え、記憶容量も相当量を必要とし、効率的な解析にはならない。もう一つの問題点は、解析結果の表現の仕方である。DEM は数値解析であるので、その結果は数値で表わされる。これを目で見て分かりやすくするために図化するのである。DEM の特徴の一つに目で見てわかりやすいということがある。3次元では、その図化が大変困難で一見してわかるというものは望めない。以上のような問題点から今回は、2次元領域で解析することにした。

3次元での土石流をどのように2次元モデルに還元するかは、次のような2種類のモデルを使うことによって行なった。一つ目のモデルは、土石流の流れ方向に対して平行に切った断面を想定した。Fig. 10 では、流れ方向が X 軸なので X・Z 平面で切ったことになる。このモデルの解析では、斜面の上部に石礫（内部要素）を配置し、外部応力としては重力だけを与えて解析した。もう一つのモデルは、流れ方向に対して垂直に切った断面

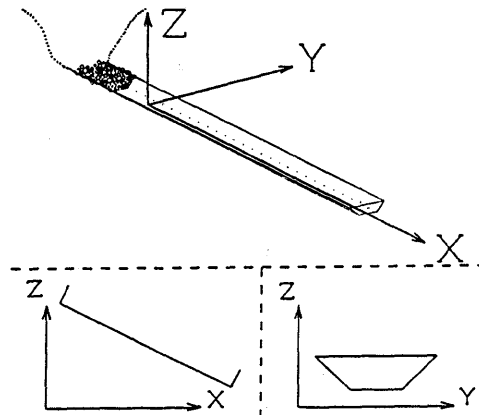


Fig. 10. Idealization of debris flow.

である。Fig. 10 では、Y・Z 平面で切ったことになる。解析では、土石流の流れてくる谷の凹凸を、石礫の入った器を振動させることによって表現した。この2種類のモデル結果は、それぞれにも考察できるが、両方の結果を考え合わせることによって、3次元領域における土石流の挙動も推測してみる。尚、斜面を用いて解析を行なったモデルの結果は第5章に、振動を用いて解析を行なったモデルの結果は第6章に示した。

5. 斜面を用いての岩屑流・土石流の解析

5.1 解析モデルの説明

(1) 斜面（壁要素）のモデル説明

斜面には、壁要素を使った。壁要素とは、内部要素と同じように力を計算していくが、座標に変位を加える段階で、その過程を行なわず、最初から最後まで座標が変わらない要素のことである。

まず、土石流の流動現象をシミュレーションするために、Fig. 11・Fig. 12 に示すように2種類の斜面を用意した。Fig. 11 を Model slope 1、Fig. 12 を Model slope 2 とする。Model slope 1 の斜面は、最初に平らな部分が約 100 m、そのあとランダムな凹凸の部分が約 200 m、最後に平らな部分が約 100 m で、全長は約 400 m である。壁要素の個数は1046個である。Model slope 2 の斜面は、最初から最後まで平らな部分が続き、全長は約 450 m である。壁要素の個数は 979 個である。両斜面とも平滑な部分の傾斜角度は30度で、要素は円形を用い半径は 25 cm である。

次に、土石流が壁に衝突した時にどのくらいの力を及ぼすかを見るために、Fig. 13 に示す斜面を用意した。これを Model slope 3 とする。Model slope 3 は、Model slope 1 の斜面の途中に高さ 60 m の壁を垂直に立てたものである。壁要素の個数は 555 個で半径は 25 cm である。さらに、土石流の堆積状態を観るために Model slope 1 の途中から水平な部分を有する斜面 (Fig. 14) を作った。これを Model slope 4 とする。要素の個数は 635 個で半径は 25 cm である。

(2) 石礫（内部要素）のモデル説明

石礫（内部要素）モデルの作成について述べる。粒子を配置する範囲は、Fig. 15 に示すように、幅約 50 m・高さ約 20 m で、この範囲内にランダムな座標で粒子を配置する。

半径は、最大 75 cm・最小 25 cm・その他標準偏差などを与え、対数正規分布で発生させたが、交わり部分が発生したので、半径を小さくした。結局、粒子の半径は、Table 3 に示すように、最大 4.8 cm・最小 25.0 cm・平均 33.8 cm・分散 135.6 になり、その確率密度分布は Fig. 16 に示すようになった。要素数は 1595 個である。そして、巨礫の挙動をみるために、半径 150 cm の要素を深さ 10 m のところに 5 個配置した。この石礫のモデルを Model rock 1 とする。間隙率は概算で 36.3% である。この Model rock 1 の要素を Model slope 1 の斜面の左上の部分に配置し解析を行なった。しかし、Model rock 1 の間隙が余りにも大きかったので、計算が発散してしまった。そこで、Fig. 15 の状態で下方向に重力をかけ、絞め固めを行ない要素を衛定な状態にした。その結果、Fig. 17 に示すように、高さが 15.2 m となった。間隙率は概算で 16.3% である。これを Model rock 2 とする。

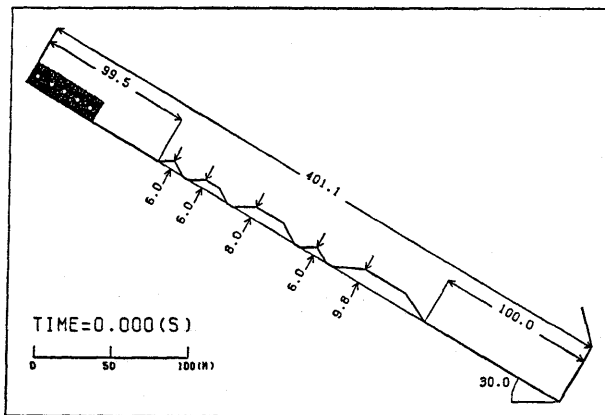


Fig. 11. Rough slope (Model slope 1) [Unit: Length(m)·Angle (Degrees)]

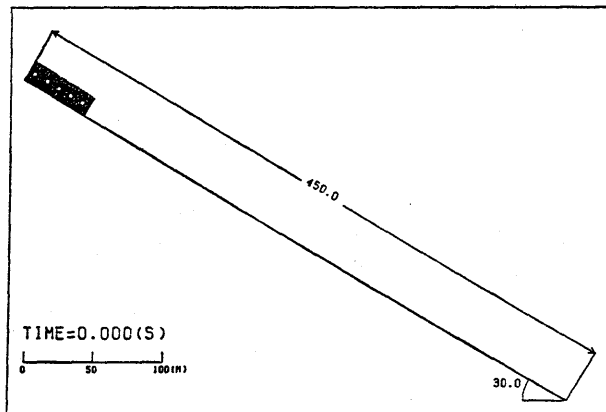


Fig. 12. Even slope (Model slope 2) [Unit: Length(m)·Angle (Degrees)]

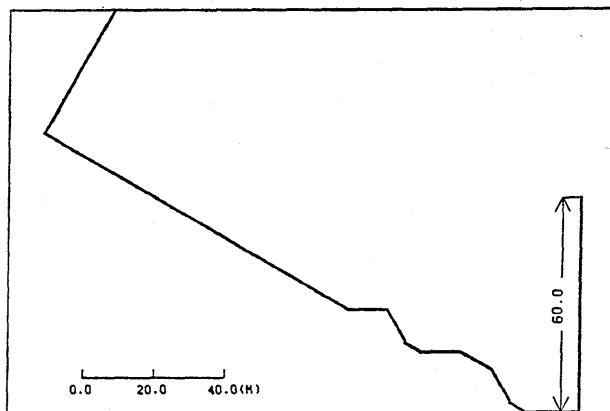


Fig. 13. Model slope for impulsive force analysis [Length(m)]

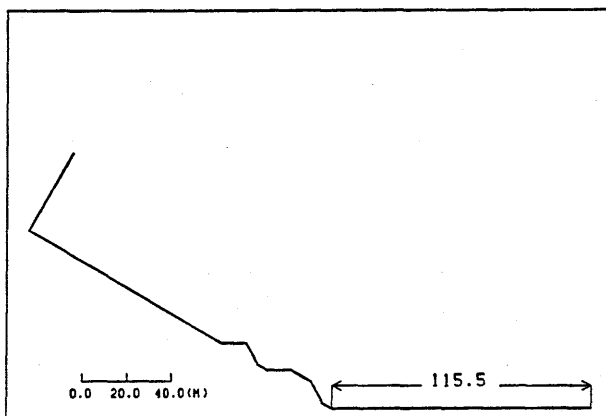


Fig. 14. Model slope for deposit process analysis [Length(m)]

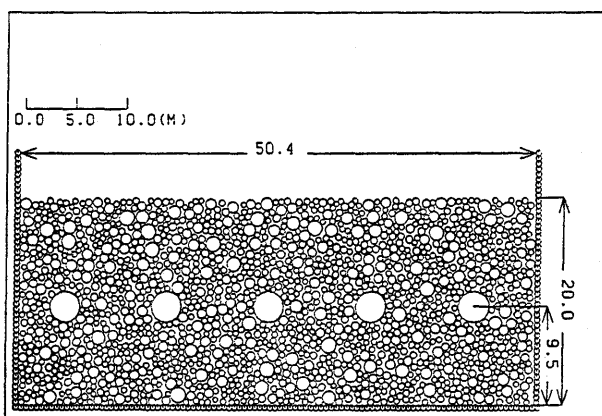


Fig. 15. Granular assembly model before compaction [Length(m)]

Table 3. Data for particles assembly.

Number of particles		1595
Radius of particles	Maximum	74.8 cm
	Minimum	25.0 cm
	Average	33.8 cm
	Deviation	135.6
Number of great rock piece		5
Radius of great rock piece		150.0 cm

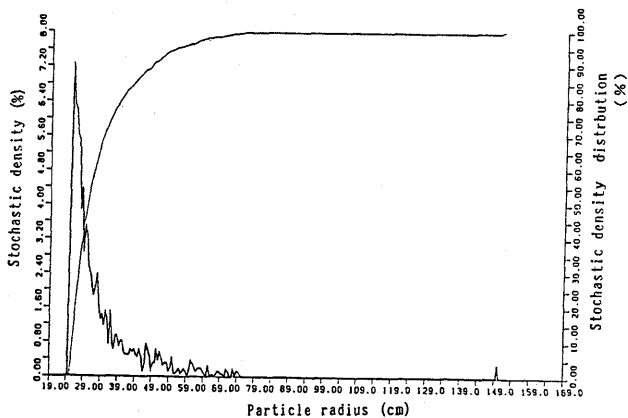


Fig. 16. Stochastic density distribution of particle radius.

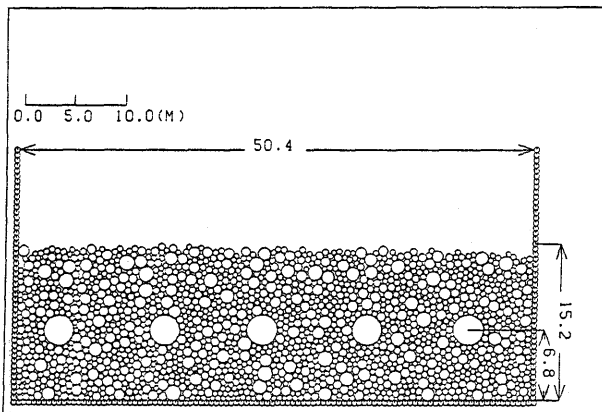


Fig. 17. Granular assembly model after compaction [Length(m)]

Table 4. Case of simulation (no water effect).

		Model slope	
		Model slope 1	Model slope 2
Particle assembly model	Model rock 1	Case 5.1	—
	Model rock 2	Case 5.2	Case 5.3

Table 5. Case of simulation (with water effect).

		Model slope		
		Model slope 1	Model slope 3	Model slope 4
Particle assembly model	Model rock 2	Case 5.4	Case 5.5	Case 5.6

Table 6. Mechanical parameters of particle.

K_n	Normal spring constant of particle (N/m)
K_s	Shear spring constant of particle (N/m)
η_n	Normal damping coefficient (N sec/m)
η_s	Transverse damping coefficient (N sec/m)
ρ_s	Density of particle (Kg/m ³)
ρ_w	Density of water (Kg/m ³)
Δt	Time step for computation (sec)
e	Restitution coefficient
μ	Friction coefficient
EWA	Water effect coefficient
C_D	Water resistant coefficient to particle

Table 7. Parameters used for Case 5.1.

k_n	9.0×10^6 (N/m)
k_s	3.0×10^6 (N/m)
η_n	2.0×10^3 (N scc/m)
η_s	1.0×10^3 (N scc/m)
ρ_s	2.5×10^3 (kg/m ³)
Δt	2.5×10^{-4} (sec)
e	0.2
μ	0.05

Table 8. Parameters used for Cases 5.2 and 5.3.

k_n	9.0×10^6 (N/m)
k_s	3.0×10^6 (N/m)
η_n	2.0×10^3 (N scc/m)
η_s	1.0×10^3 (N sec/m)
ρ_s	2.5×10^3 (kg/m ³)
Δt	2.5×10^{-4} (sec)
e	0.05
μ	0.1

Table 9. Parameters used for Cases 5.4, 5.5 and 5.6.

k_n	9.0×10^6 (N/m)
k_s	3.0×10^6 (N/m)
η_n	2.0×10^3 (N sec/m)
η_s	1.0×10^3 (N sec/m)
ρ_s	2.5×10^3 (kg/m ³)
ρ_w	1.5×10^3 (kg/m ³)
Δt	2.5×10^{-4} (sec)
e	0.05
μ	0.1
EWA	1.30
C_D	0.70 Radius < 0.50 m
	0.66 0.50 m < Radius < 0.75 m
	0.60 0.75 m < Radius

を Model rock 2 とする。

(3) Case 番号の設定と各 Case のパラメーター

この章での『斜面を使つての岩屑流・土石流の解析』では、前2節に述べた斜面のモデルと石礫のモデルを組合せ、幾つかの岩屑流・土石流モデルを作った。そして、今回のDEMプログラムに新たに加えた水の影響を入れるか否かによって、それぞれの解析を行なった。斜面のモデル・石礫のモデル・水の影響の組合せによる Case 番号の設定は、Table 4 および Table 5 に示す。

各パラメーター記号と名称は、Table 6 に示す通りである。Case 5.1 のパラメーターを Table 7 に示す。また、Case 5.2 および Case 5.3 のパラメーターを Table 8 に示す。前節でも述べたが、Case 5.1 の計算は変位が大きくなり過ぎてしまったので、絞め固めを行ない安定な状態にしたのだが、Table 7 と Table 8 をみても分かるように、跳ね返り係数 e を 0.2 から 0.05 へ、摩擦係数 μ も 0.05 から 0.1 にし、より粒子を安定な状態にした。水の影響を考えた Case 5.4・5.5・5.6 のパラメーターの値は、Table 9 に示した。

5.2 解析結果

(1) 凹凸斜面 (Model slopel) 上の圧密前の石礫 (Model rock 1) の解析

—Case 5.1—

この項では、Fig. 15 に示した圧密前の石礫を、Fig. 11 の凹凸な斜面の左上の部分に配置したモデル (Case 5.1) の解析結果を示す。

この解析は、0.0 秒から 7.5 秒まで行なった。その結果を Fig. 18 に示す (図の中の右上に全体のどの部分かを示す)。Model rock 1 の石礫は、圧密をする前の状態なので間隙が大きい。その影響で 0.0 秒から 1.0 秒では長方形に配置した石礫が、上から圧縮されたような状態になり、全体の厚さが初期状態より薄くなっている。その後、その反動により 2.5 及び 3.0 秒のように飛び上がってしまった。速度も Fig. 19 に示すように 2.5 秒の時には、ばらばらな方向に向き、石礫中の最高速度もすでに 45.93(m/s) に達している。やがて、岩屑流の先端が最初の山の部分に差し掛かり、石礫がジャンプする。各粒子 (石礫) は相当の速度を持っているので空中に飛び散り、ますます速度があがり 7.5 秒後には Fig. 20 に示すように石礫中の最高速度は 53.68(m/s) に達した。また、Fig. 21 にその全体図を示すように石礫は散乱してしまい、実際の岩屑流の流れとは異なるものとなってしまった。コンピューターでの計算に於いても、速度が速くなってしまったために、粒子があらかじめ決めておいた計算領域から外れてしまったり、斜面 (壁要素) を突き抜けてしまうなどの支障が生じた。そこで、この解析は 7.5 秒で止めることにした。

このように計算が途中で発散してしまった原因として、初期状態があまりにも疎であったことが挙げられる。この原因のために、粒子と斜面と平行な方向とは別に間隙を埋める方向に速度を持ってしまい、わずかに数秒の間に大きな速度となってしまった。この解析で用いた DEM プログラムでは、一度大きな速度を持ってしまると、それを制御する抵抗がないため、速度は大きくなる一方で、やがて計算は発散し実際の岩屑流の流れとは異なる

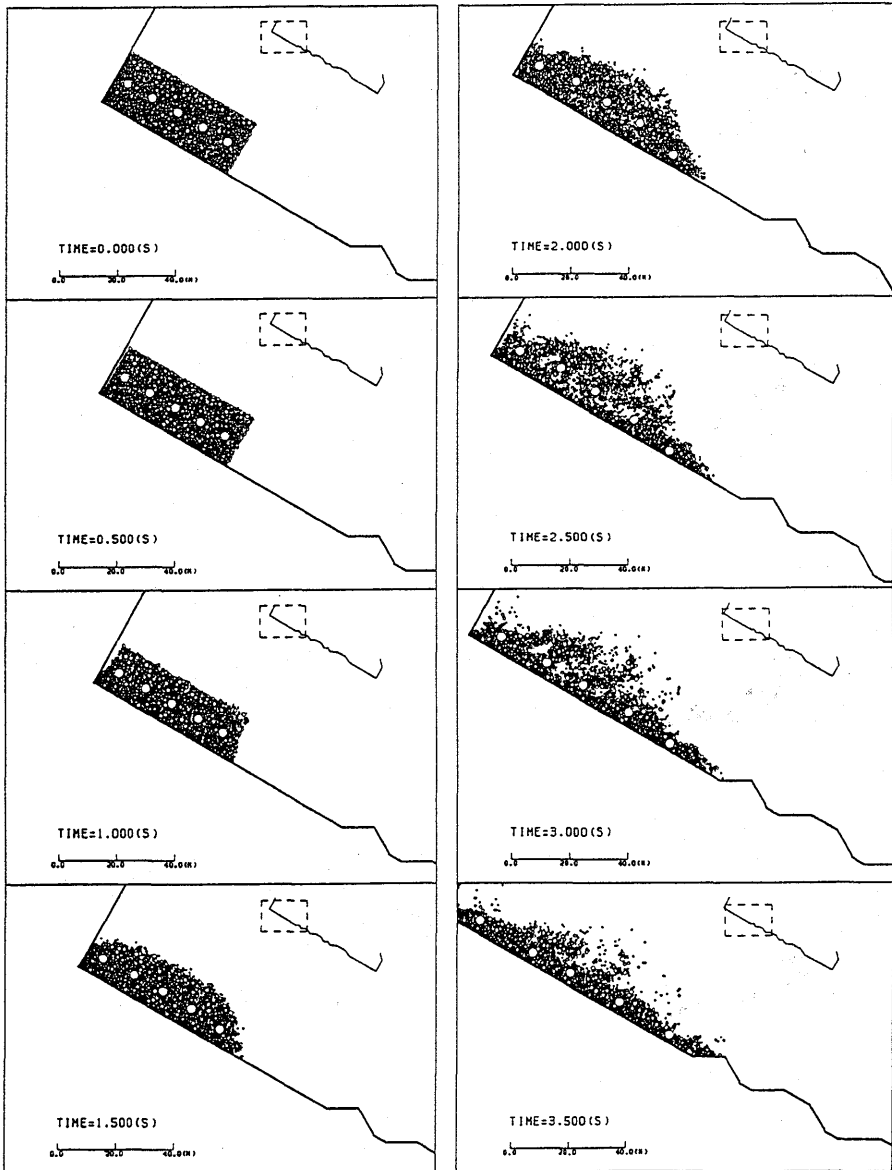


Fig. 18.1. Simulation results of dry avalanche for uncompacted assembly and rough slope (1) (0s~3.5s). Case 5.1 —Model slope 1+Model rock 1—

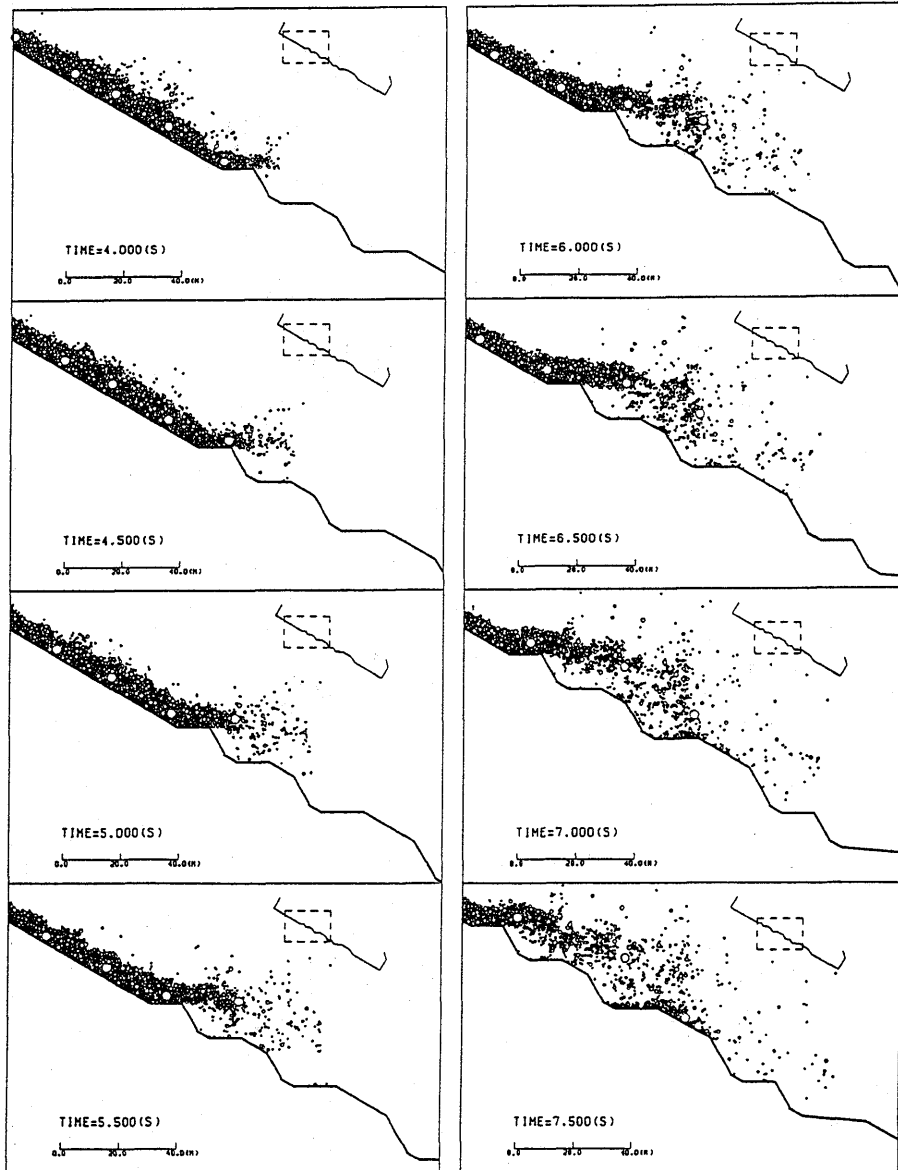


Fig. 18.2. Simulation results of dry avalanche for uncompact assembly and rough slope (2) (4.0s~7.5s). Case 5.1 -Model slope 1+Model rock 1-

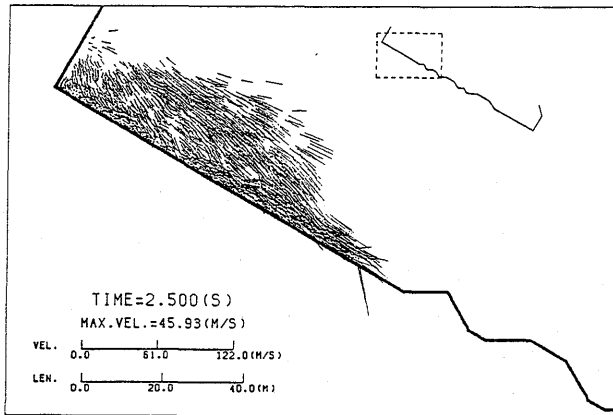


Fig. 19. Velocity distribution of dry avalanche at 2.5sec in case 5.1.

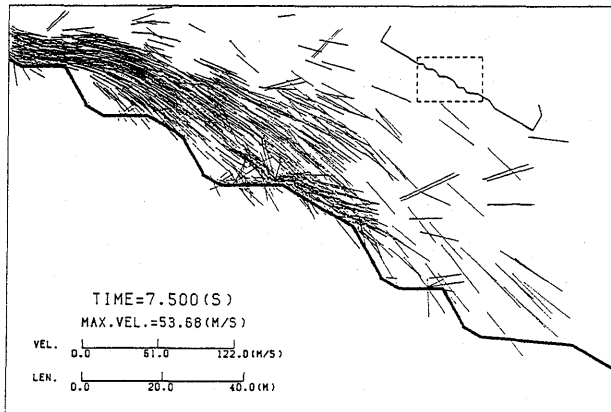


Fig. 20. Velocity distribution of dry avalanche at 7.5sec in case 5.1.

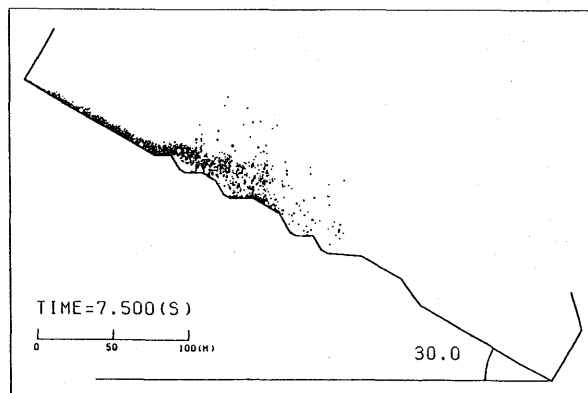


Fig. 21. Computed dry avalanche at 7.5sec in case 5.1.

ってしまった。次の項では、初期状態の間隙に注目し解析を行なうことにした。

(2) 凹凸斜面 (Model slope 1) 上の圧密後の石礫 (Model rock 2) の解析
—Case 5.2—

前項では、石礫を疎に配置したことから計算に支障をきたしたので、この項の解析では、まず最初に Fig. 15 の状態での石礫に DEM を使って下方向に重力をかけ圧密し、間隙を小さくするを行なった。その結果 Fig. 16 のようになり、石礫全体の厚さが 20 m から 15.2 m となった。この圧密後の石礫と Fig. 11 の凹凸な斜面を組合せたのが、この項のモデル (Case 5.2) である。

解析時間は 0.0 秒から 13.0 秒までで、解析結果の全体図を Fig. 22.1~4 に、流れの先端部分の拡大図を Fig. 23.1~4 に示す。前項 (Case 5.1) と比べると、0.0 秒から 1.0 秒までにみられた粒子の散らばりが、この項ではみられずに流れがスムーズになっている。速度も Fig. 24 と Fig. 19 を比べると、最高速度は遅くなり、方向も水の流れのように一方向へ向っている。Fig. 25 と Fig. 20 を比べてみても、最高速度こそ同じような値になってきているが、方向は統一性を持ったものとなっている。以上のように、明らかに圧密の効果が現われている。本解析では、その後流れが用意された斜面 (Model slope 1) の末端に達するまで解析を行なった。Fig. 26 と Fig. 27 に 10 秒と 13 秒の速度の図を示した。最高速度は大きなものとなってきているが、一度山で飛び上がった粒子が落下し斜面と激突し、跳ね返っていく様子が良く現われている。また、10 秒から 13 秒までの全体図 (Fig. 22.3~4) 及び拡大図 (Fig. 23.3~4) をみると、大きな半径の粒子 (半径: 75 cm) が流れの先端部分に出てきている。この現象は岩屑流・土石流の顕著な特長の一つである。大きな半径の粒子は、10 秒ぐらいから周りの小さな粒子を蹴散らすようにして進み、流れの前の方へ現われてきている。

1970 年のペルー地震ではワスカラン山に大規模な山崩れが発生し、その山崩れの中で火花が散っていたのが目撃されている。この火花は、山崩れの中で石どうしがぶつかりあうことによって生じたと思われる。DEM のプログラムの中では、粒子がぶつかりあうとその間には、バネによって力が生じることになる。この力を図に描けば山崩れの中の火花がシミュレート出来るのではないかと思ひ、粒子間の直力を現わしたのが Fig. 28 である。この図をみると、火花が散っているのは一度空中に飛んだ粒子が再び斜面と衝突する山の左側の部分に集中していることがわかる。

この解析で用いた DEM プログラムには、水の影響は含まれていない。したがって、岩屑流をイメージしたことになる。しかし、流れのシミュレートとして、上記したようなことがわかり、DEM の大変形問題への適応性が証明された。

(3) 平らな斜面 (Model slope 2) 上の圧密後の石礫 (Model rock 2) の解析
—Case 5.3—

この項は、圧密後の石礫 (Fig. 16) を平らな斜面 (Fig. 12) の左上の部分に配置したモデル (Case 5.3) についての解析である。

本解析の解析時間は 0.0 秒から 7.5 秒までで、解析結果の全体図を Fig. 29.1~2 に、流れの先端部分の拡大図を Fig. 30.1~2 に示す。解析の前半では、中央部分が先端部や後続部に比べて厚くなっているが、この差が解析時間が進むにつれて少なくなり、6 秒以

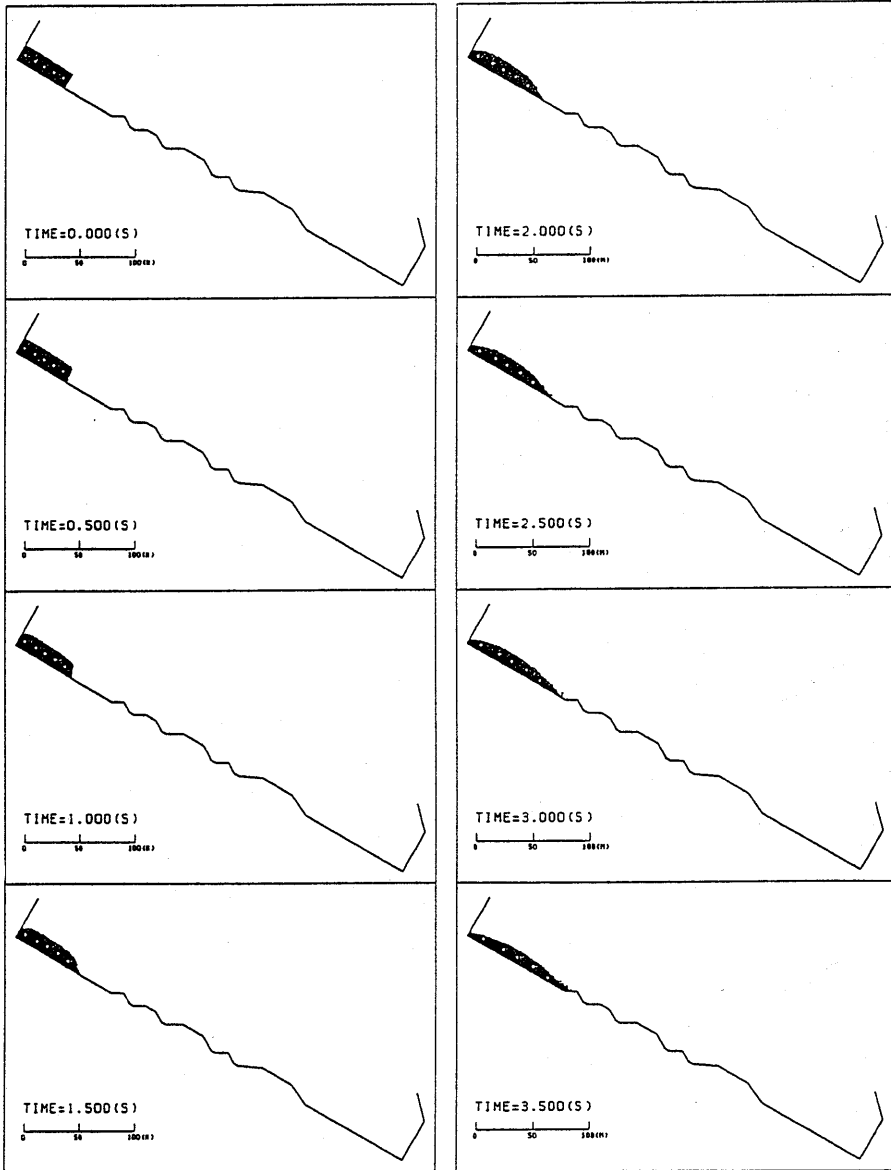


Fig. 22.1. Simulation results of dry avalanche for compacted assembly and rough slope (1) (0s~3.5s). Case 5.2 —Model slope 1+Model rock 2—

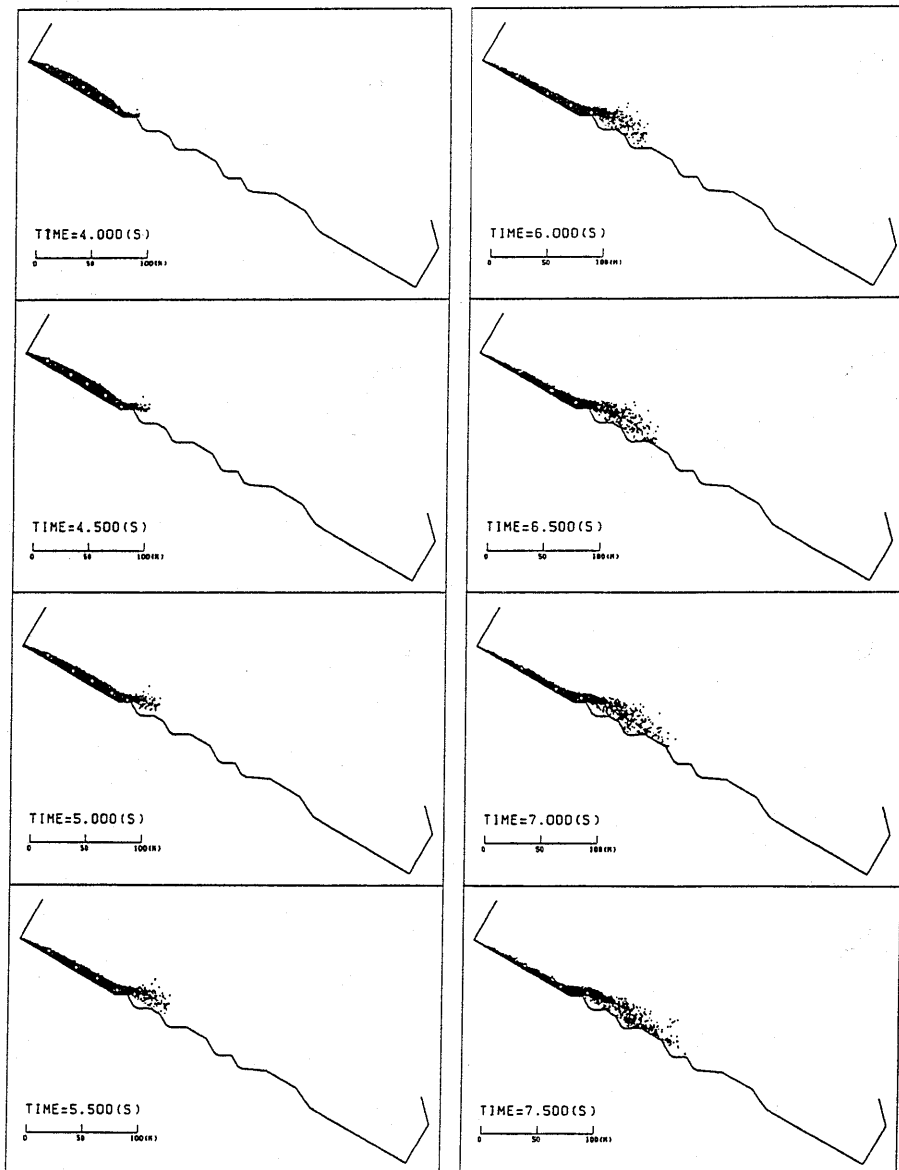


Fig. 22.2. Simulation results of dry avalanche for compacted assembly and rough slope (2) (4.0s~7.5s). Case 5.2 —Model slope 1+Model rock 2—

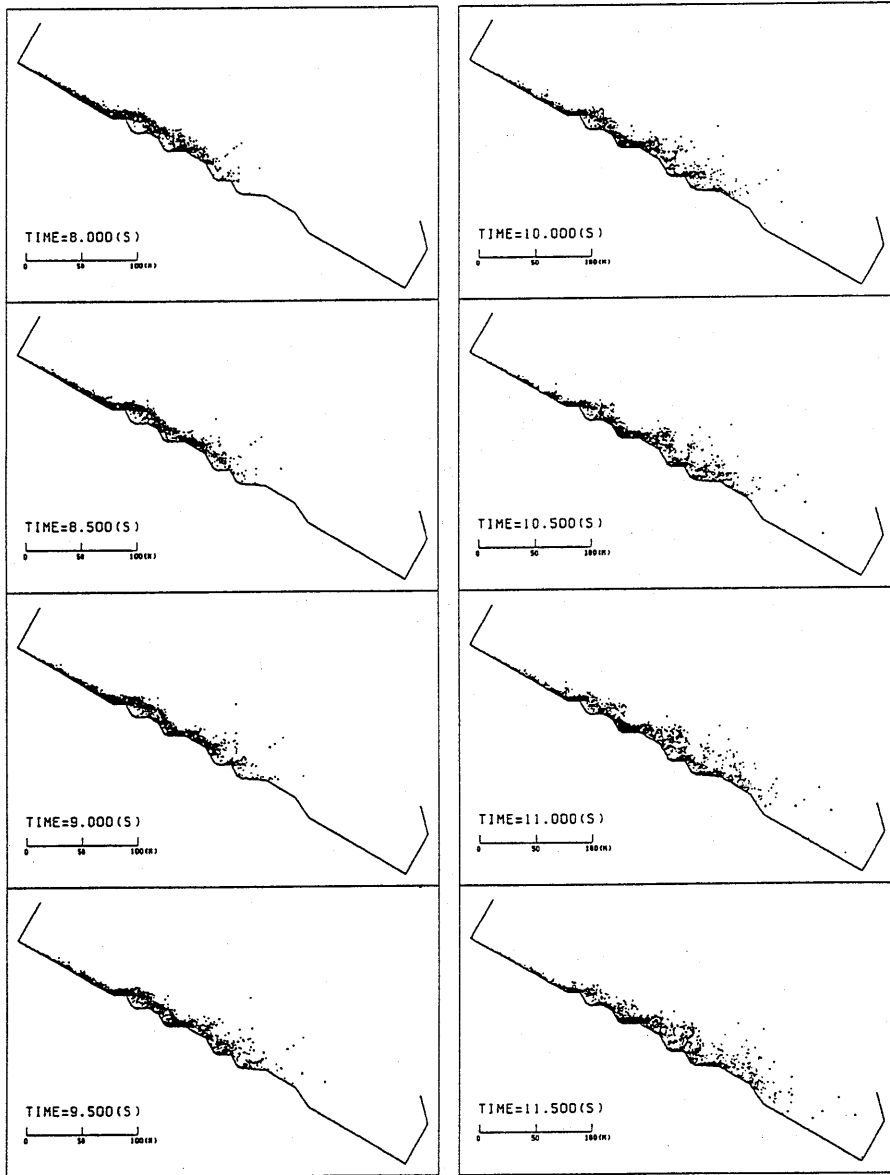


Fig. 22.3. Simulation results of dry avalanche for compacted assembly and rough slope (3) (8.0s~11.5s). Case 5.2 —Model slope 1+Model rock 2—

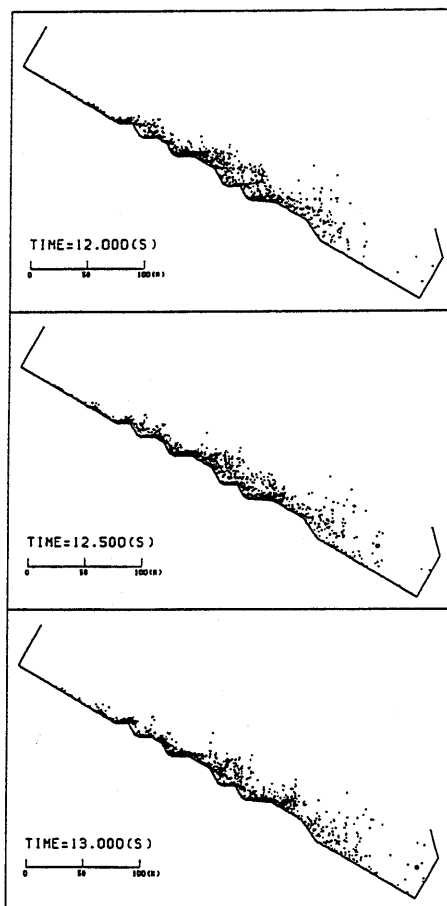


Fig. 22.4. Simulation results of dry avalanche for compacted assembly and rough slope (4) (12.0s~13.0s). Case 5.2 —Model slope 1+Model rock 2—

降はほぼ全体が定常な厚さになっている。3.5秒と7.0秒の速度の図を Fig. 31 と Fig. 32 に示す。3.5秒と7.0秒を比べると、3.5秒の方が全体の乱れが少ない、これは流れの速さ（流速）が7.0秒より3.5秒の方が遅いためだと思われる。やはり速い流速中の粒子間に衝突が起きれば、遅い場合よりも大きな力を及ぼしあい、流れから飛び出す粒子が多く現われることになるからである。次に、0.5・2.0・3.5・5.0秒の流速分布を Fig. 33 に示す。この流速分布は、流れ方向に対して一番先頭にある大きな半径の粒子（半径：75 cm）を中心に前後 10 m ずつの幅をとり、その範囲に含まれる粒子の斜面と平行な速度について計算したものである。STAGE 1 (0.5 秒) では、流れの表面と底面の流速が中央部分に比べて遅い。STAGE 2 (2.0 秒) になると、表面の相対的な速度が増し、底面より表面の方が、表面よりも中央の方が速いという状態になる。STAGE 3 (3.5 秒) では、表面と中央部分とがほぼ同じ流速となり、底面ではそれらより遅くなっている。STAGE 4

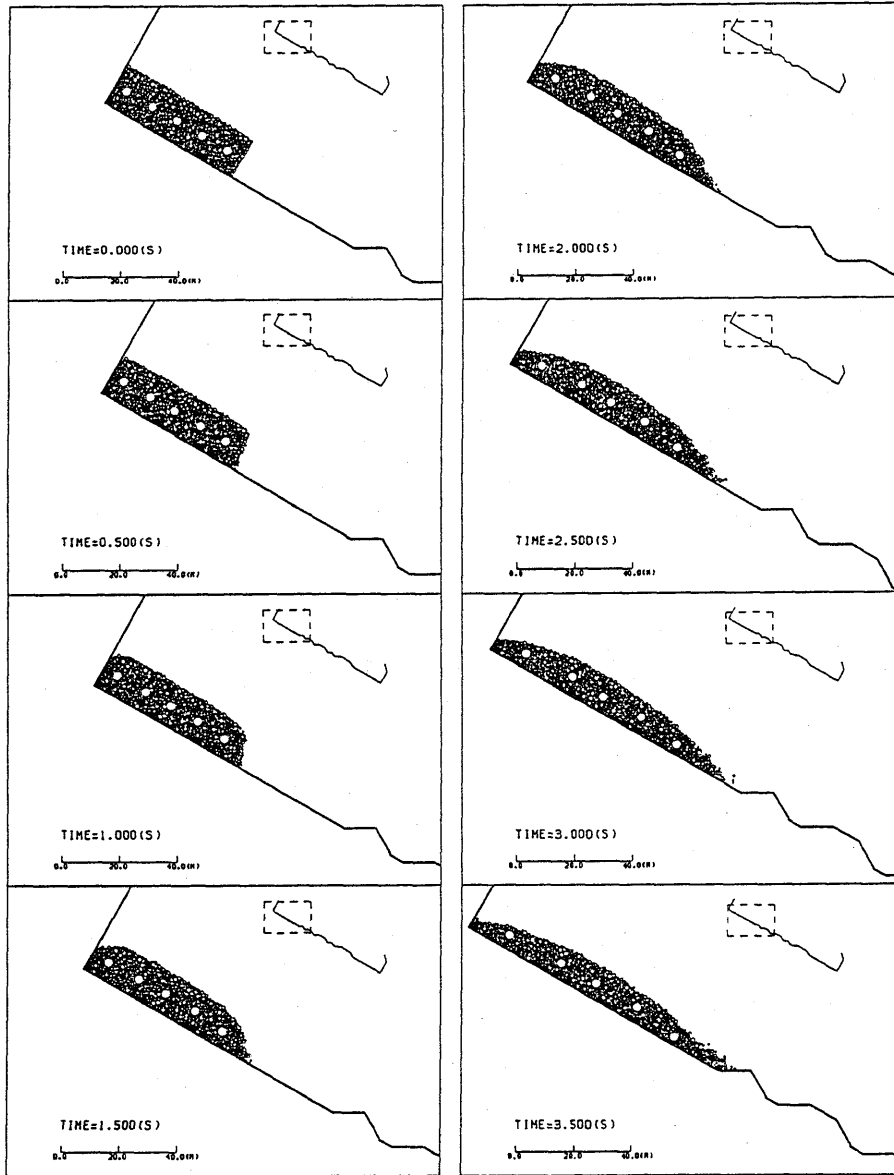


Fig. 23.1. Close-up of simulation results of dry avalanche for compacted assembly and rough slope (1) (0s~3.5s). Case 5.2 —Model slope 1+Model rock 2—

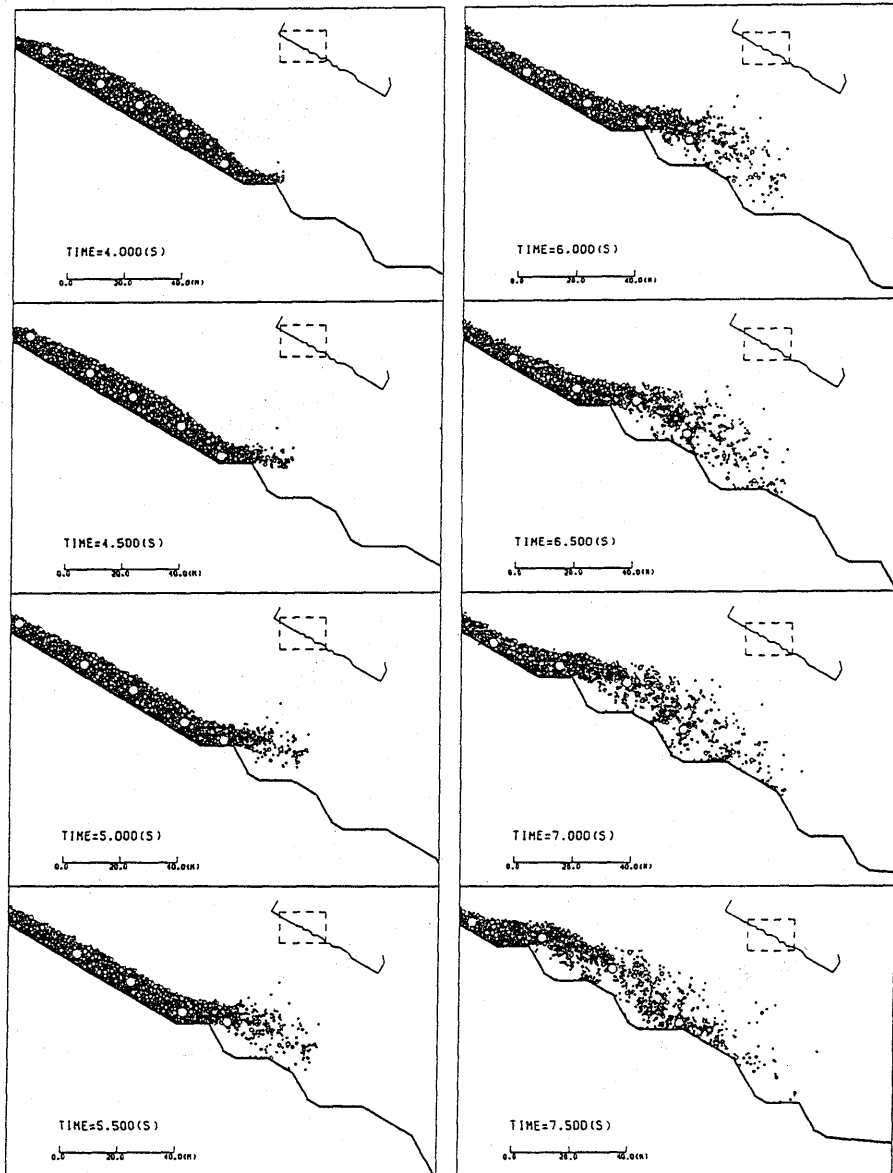


Fig. 23.2. Close-up of simulation results of dry avalanche for compacted assembly and rough slope (2) (4.0s~7.5s). Case 5.2 -Model slope 1+Model rock 2-

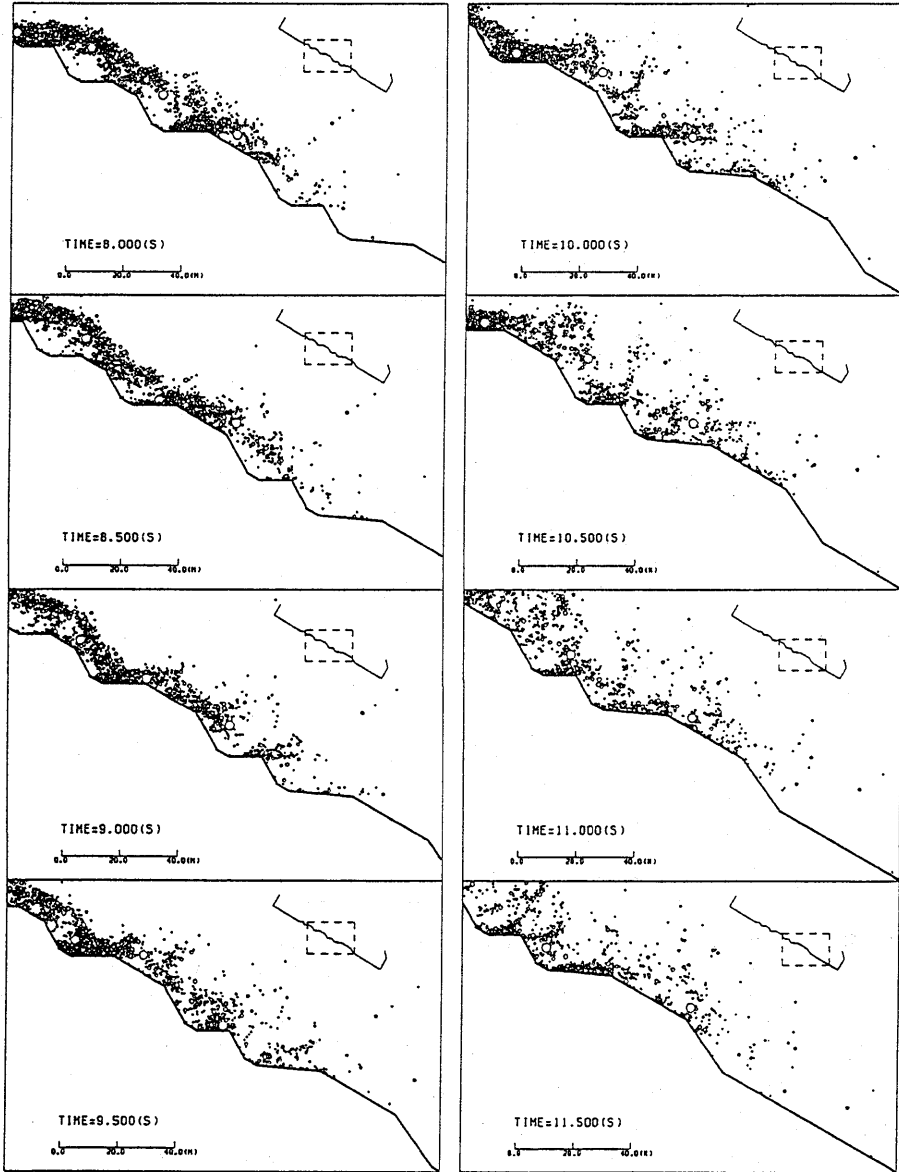


Fig. 23.3. Close-up of simulation results of dry avalanche for compacted assembly and rough slope (3) (8.0s~11.5s). Case 5.2 —Model slope 1+Model rock 2—

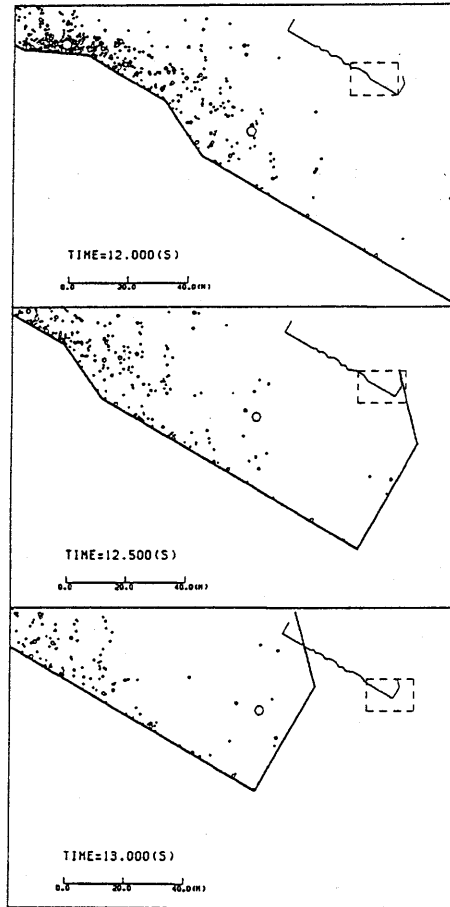


Fig. 23.4. Close-up of simulation results of dry avalanche for compacted assembly and rough slope (4) (12.0s~13.0s). Case 5.2 —Model slope 1+Model rock 2—

(5.0 秒) になると、表面が一番速く、次が中央部、一番遅いのが底面となり、Fig. 1 と類似した形となった。これは、斜面の抵抗が底面の部分では大きく作用しているので流速が遅く、表面に向かうにつれて小さく作用することになるからである。流れの先端部分では、ブルドーザーなどのキャタピラのように、石礫が巻き込まれながら斜面を下っていく現象がみられた。この現象は、パソコン上で Fig. 29.1~2 のような図を連続的に画面に映し出し、いかにも石礫が動いているかのようにみせる動画によってわかった。この論文の中では、Fig. 34 に示すように、ある要素を黒く塗り 0.1 秒おきに追跡した図を載せてみた。

本解析のモデルは、前項と石礫の部分は同じで、斜面を凹凸なものから平なものに置き換えている。平な斜面を用いると、流れのなかに凹凸の影響が含まれてこないので、流速分布や先端部で石礫が巻き込まれながら進んでいく現象など流れ自体の特徴を現わすこと

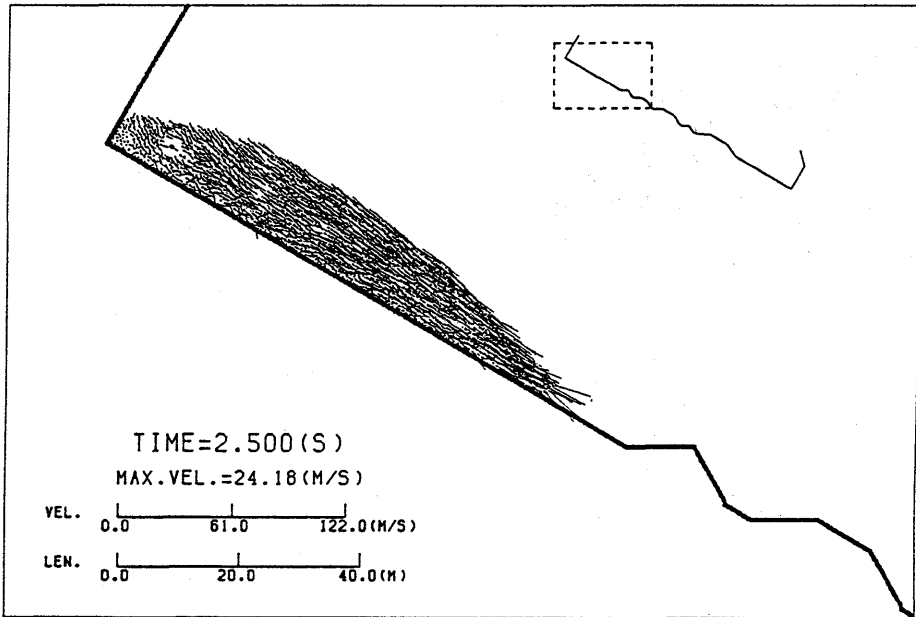


Fig. 24. Velocity distribution at 2.5sec after sliding of compacted dry assembly.

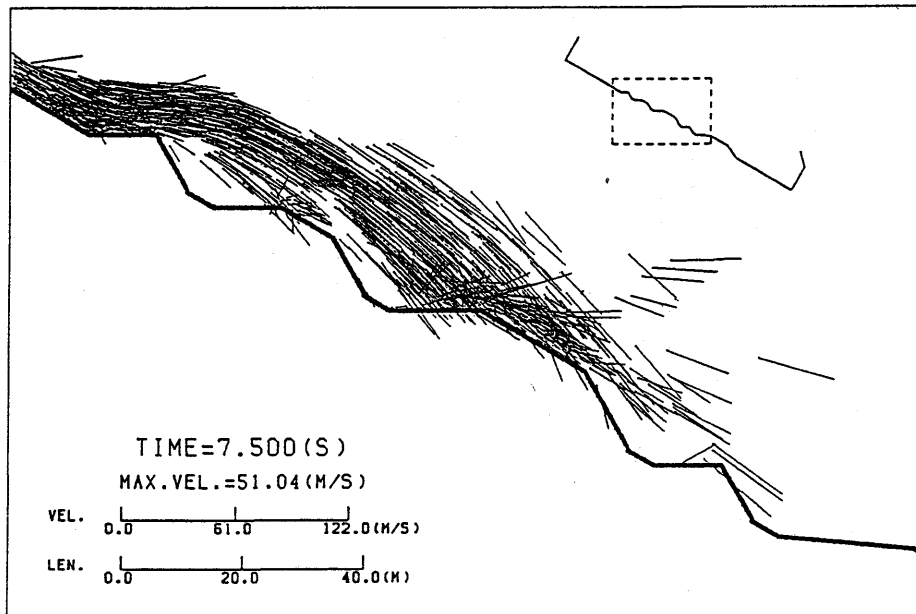


Fig. 25. Velocity distribution at 7.5sec after sliding of compacted dry assembly.

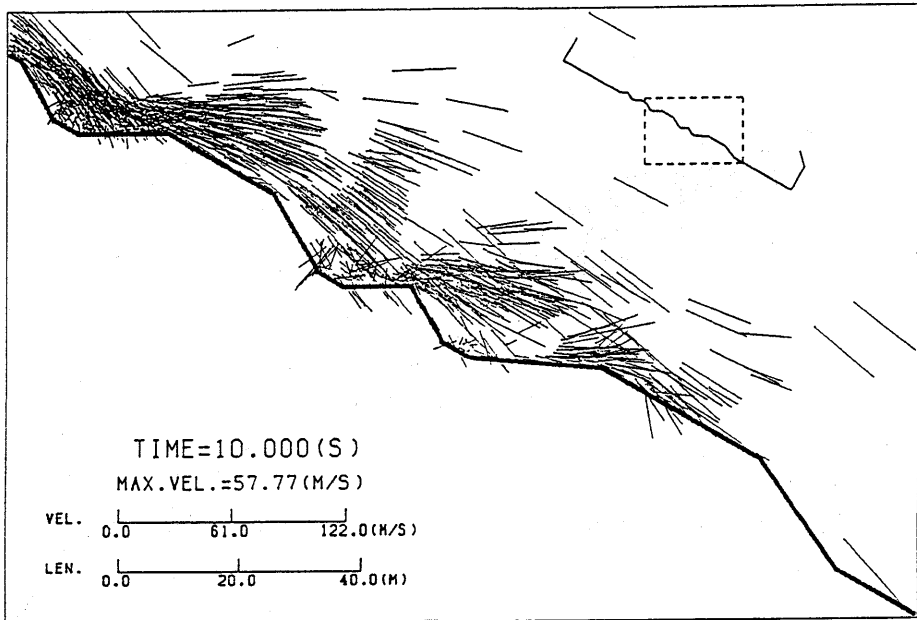


Fig. 26. Velocity distribution at 10.0sec after sliding of compacted dry assembly.

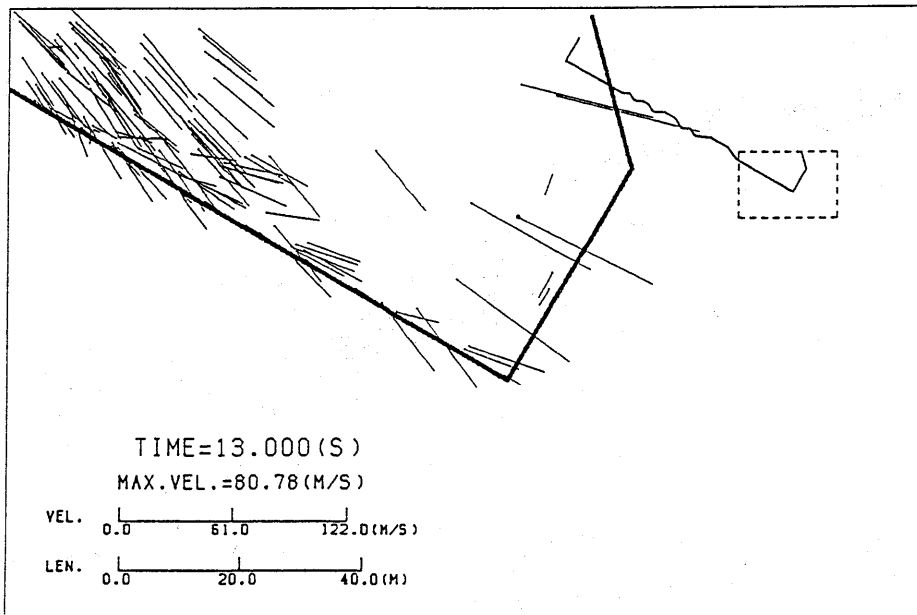


Fig. 27. Velocity distribution at 13.0sec after sliding of compacted dry assembly.

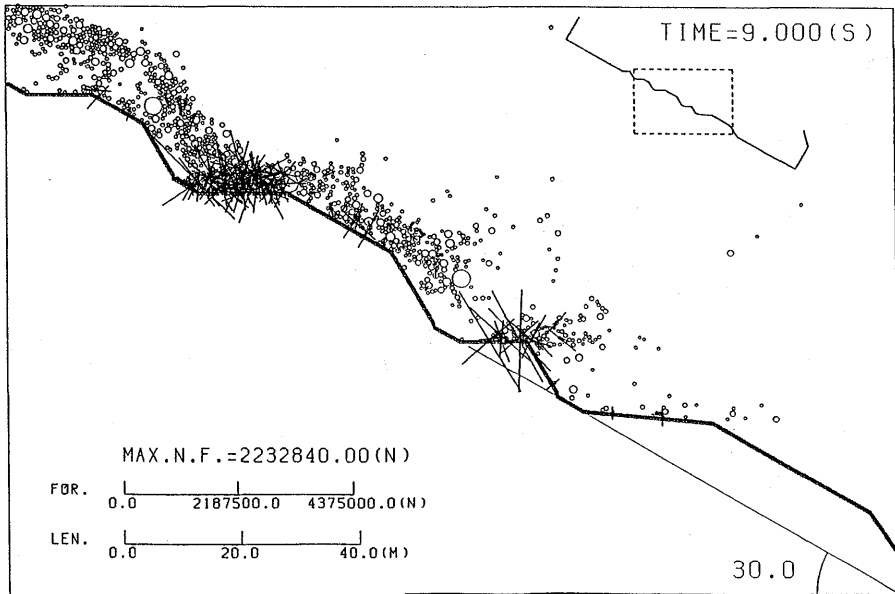


Fig. 28. Normal force distribution at 9.0sec after sliding of compacted dry avalanche.

ができた。

(4) 水の影響を考慮した凹凸斜面 (Model slope 1) 上の圧密後の石礫 (Model rock 2) の解析

—Case 5.4—

この項では、初期状態のモデルとしては Case 5.2 と同じものを設定し、解析に使う DEM プログラムに今回新しく取り入れた水を媒介とした粒状体間の相互干渉力を含んだものを用いた。

解析時間は、0.0 秒から 19.5 秒である。解析結果は、その全体図を Fig. 35.1~5 に、流れの先端部の拡大図を Fig. 36.1~5 に示す。水の影響がどのように現われているかをみるために、初期状態が同じ Case 5.2 及び 5.3 と比較してみる。2.0 秒の先端部分の拡大図をみると、Case 5.4 では流れの最先端が斜面に対して、垂直方向に切り立っているように見える。また、本解析においての凹凸の影響が入る前の流速分布 (Fig. 37) と Case 5.3 の流速分布 (Fig. 32) を比較すると、その形状は類似しているようではあるが、横軸の目盛をしてみると全体的な速度は Case 5.4 の方で遅く、Fig. 37 の STAGE 5 を見ると斜面に近い部分の速度が、他の部分に比べ非常に遅くなっている。これらは、水の影響により石礫どうし又は石礫と斜面の間に粘性が生じたためである。Case 5.2 では、最初の山で石礫が飛び上がった後、流れが乱れはじめ、二つ目・三つ目と山を越えて行くにつれ、ますます乱れが大きくなっていく。これに対し、Case 5.4 では一つ目の山を越えても流れには殆ど乱れがなく、少し飛び上がった粒子もすぐにまた流れの中に吸収されている。8 秒から 12 秒位までをみてみると、9 秒のときに最先端が波のように盛り上が

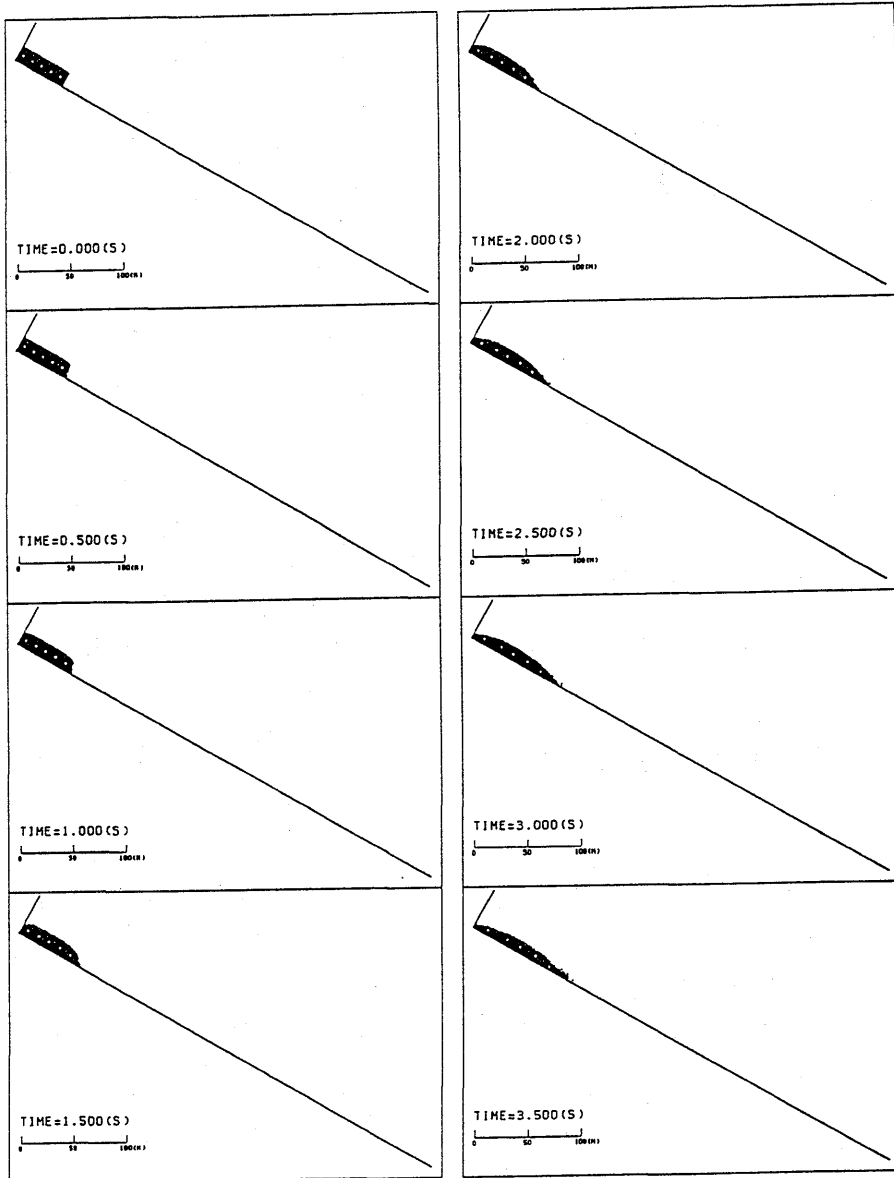


Fig. 29.1. Simulation results of dry avalanche for compacted assembly and even slope (1) (0s~3.5s). Case 5.3 -Model slope 2+Model rock 2-

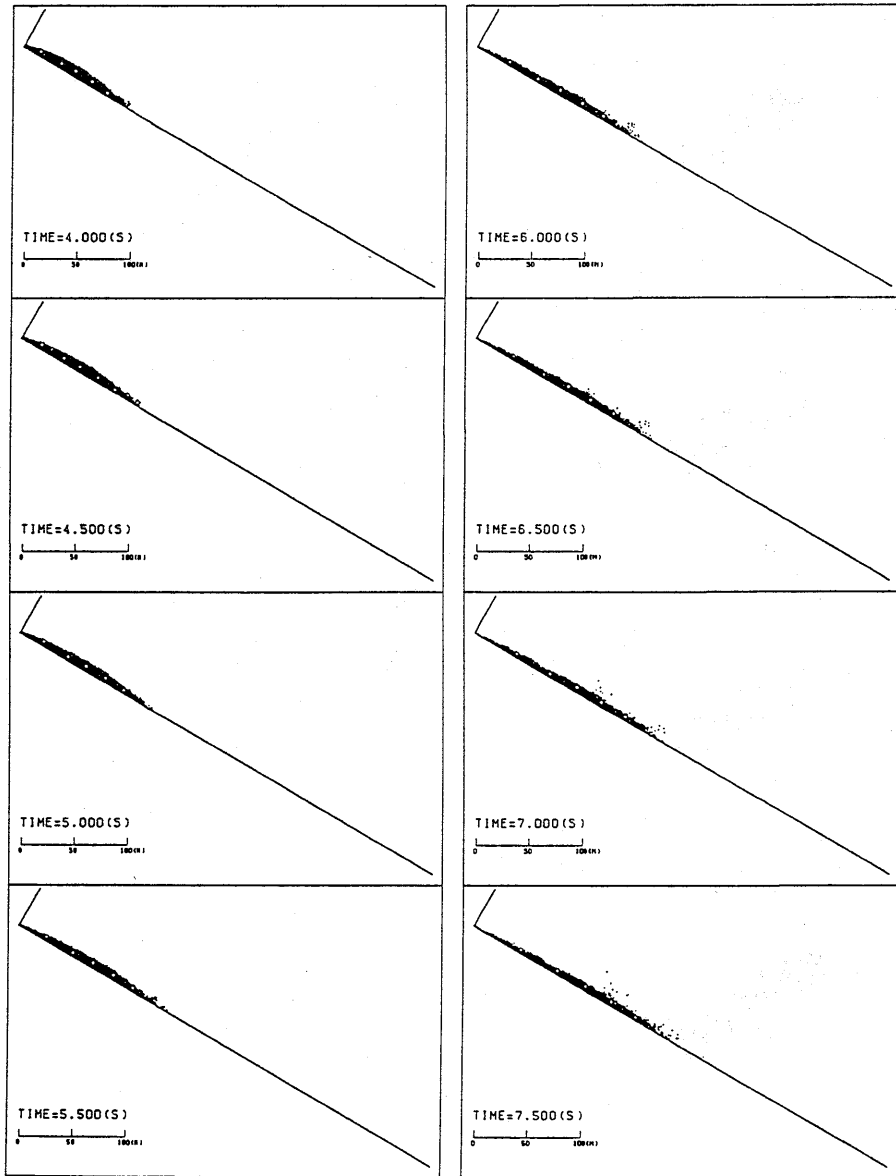


Fig. 29.2. Simulation results of dry avalanche for compacted assembly and even slope (2) (4.0s~7.5s). Case 5.3 —Model slope 2+Model rock 2—

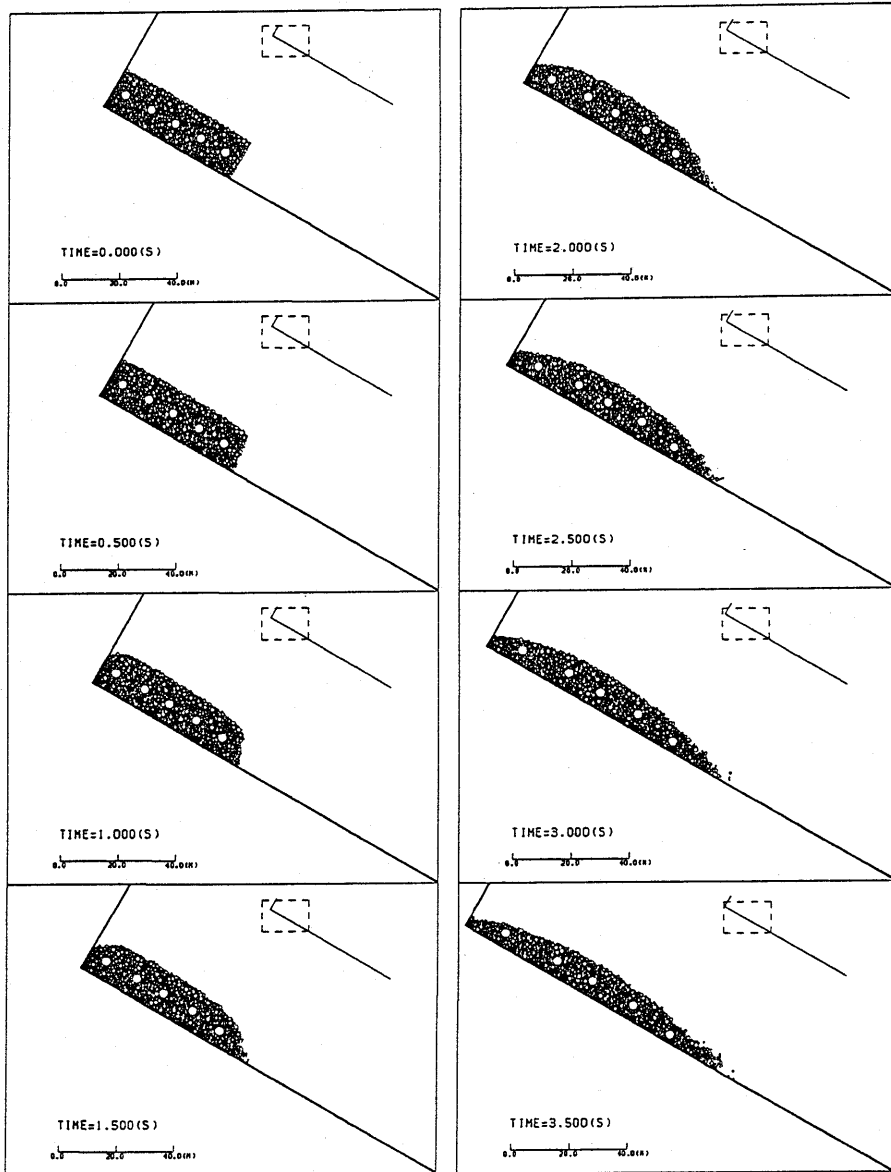


Fig. 30.1. Close-up of simulation results of dry avalanche for compacted assembly and even slope (1) (0s~3.5s). Case 5.3 —Model slope 2+Model rock 2—

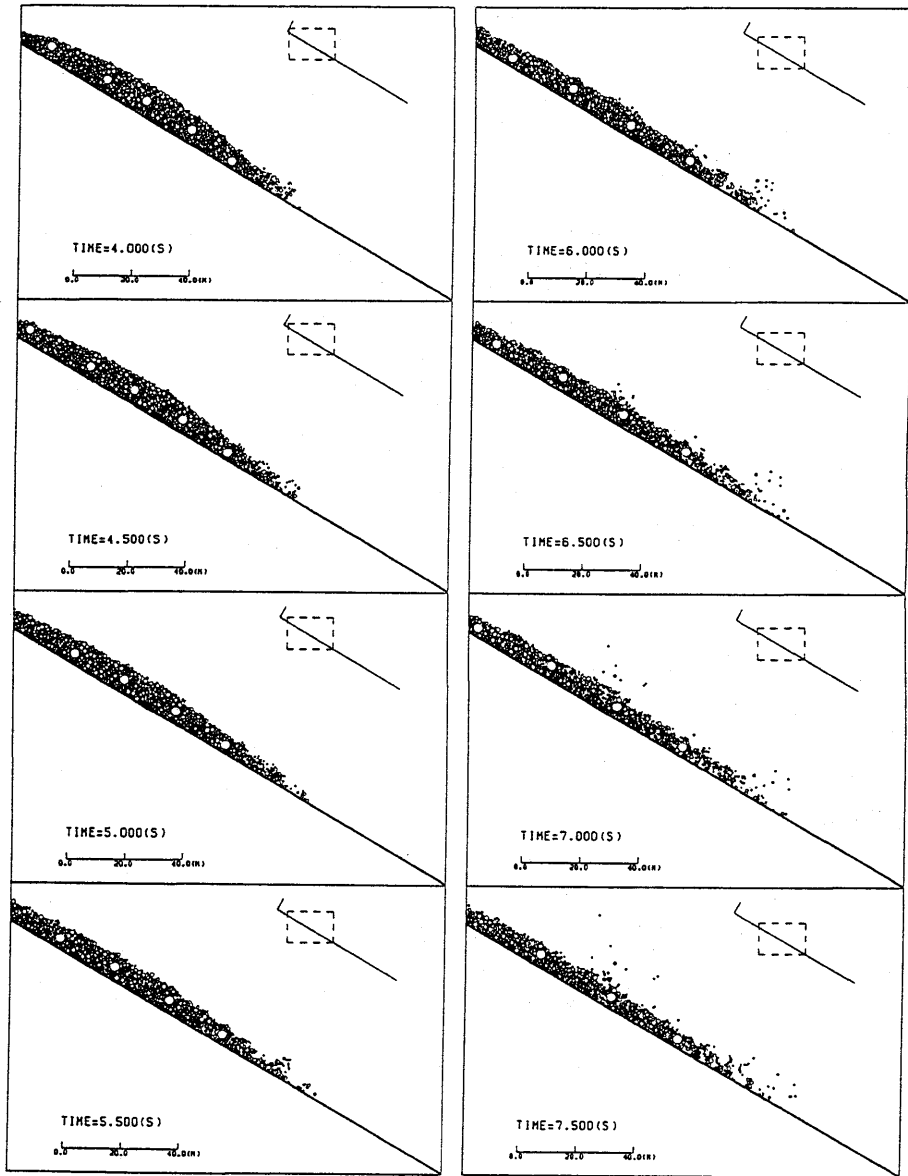


Fig. 30.2. Close-up of simulation results of dry avalanche for compacted assembly and even slope (2) (4.0s~7.5s). Case 5.3 —Model slope 2+Model rock 2—

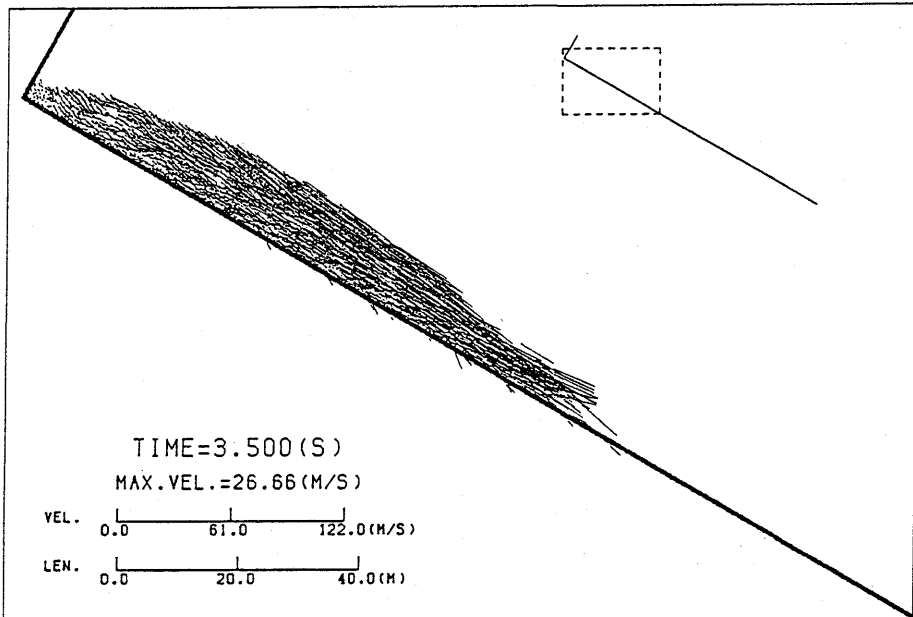


Fig. 31. Velocity distribution at 3.5sec after sliding of compacted dry avalanche.

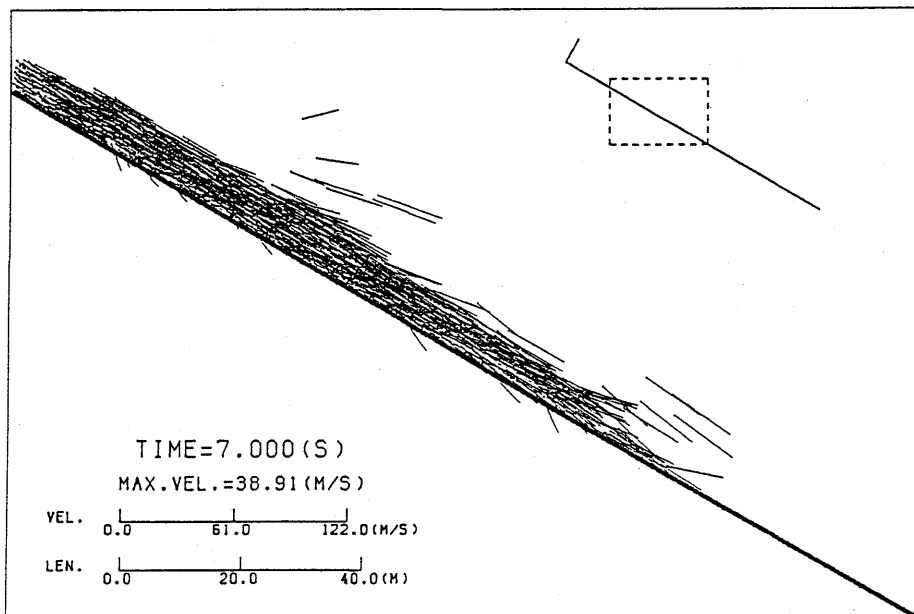


Fig. 32. Velocity distribution at 7.0sec after sliding of compacted dry avalanche.

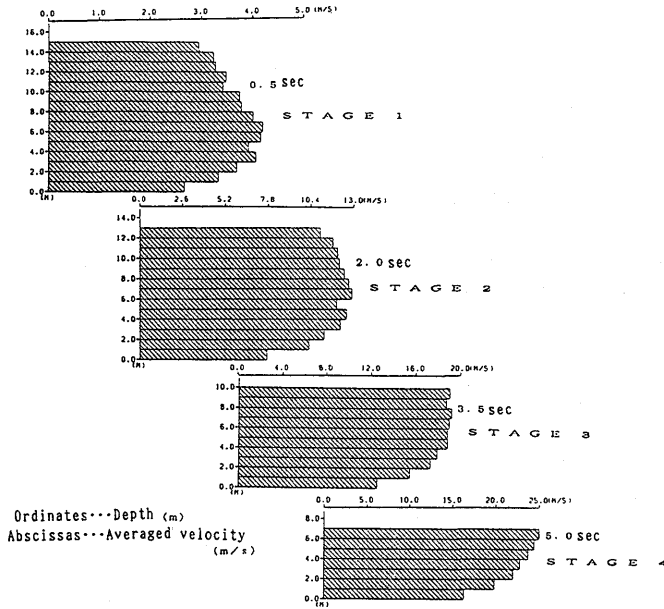


Fig. 33. Flow velocity at each depth for compacted dry avalanche.

り、10秒・11秒と先端部分は乱れているが、12秒から後では、その乱れがなくなりまた全体が斜面に沿った流れとなっている。これは、先にも述べた粘性の影響もあるが、飛び上がった粒子が斜面にぶつかる時に水がクッションになり、跳ね返りを弱めていることも考えられる。速度についても、同じ7.5秒の解析時間である Fig. 38 (Case 5.4) と Fig. 25 (Case 5.2) を比べると、Case 5.4の方がはるかに乱れが少なく、まるで速度の線が流体の流線を現わし、水の流れのようである。13秒 (Fig. 39)・16秒 (Fig. 40)・19.5秒 (Fig. 41) と解析時間が経っていても速度の線は乱れず、最高速度に至っては16秒より19.5秒の方が遅いという結果がでた。Case 5.4 と Case 5.2 の粒子全体の平均速度を比較したのが Fig. 42 である。最初の0秒から2秒ぐらいまでは、両方の線はほぼ重なっているが、それ以後 Case 5.4の方は水を媒介とした粒状体間の相互干渉力が働き、平均速度が Case 5.2より遅くなっていった。そして、頭打ちの状態になり、8秒以降は減少していった。最後に、Case 5.4 と Case 5.2 の解析終了時の粒子の分布を Fig. 43 に示す。これを見ても、Case 5.4の方が乱れが少なく流れがおだやかで水の影響を感じさせる。

第1章などで述べたように、土石流は石や礫などの固体と泥水との混合流動現象である。今までの DEM では、Case 5.2のように、石だけの流れ (岩屑流) しか解析することが出来なかった。しかし、ここで得た結果から、この水の影響を考慮した DEM は、今までの DEM よりも、土石流の解析に対して非常に効果的であることが分った。

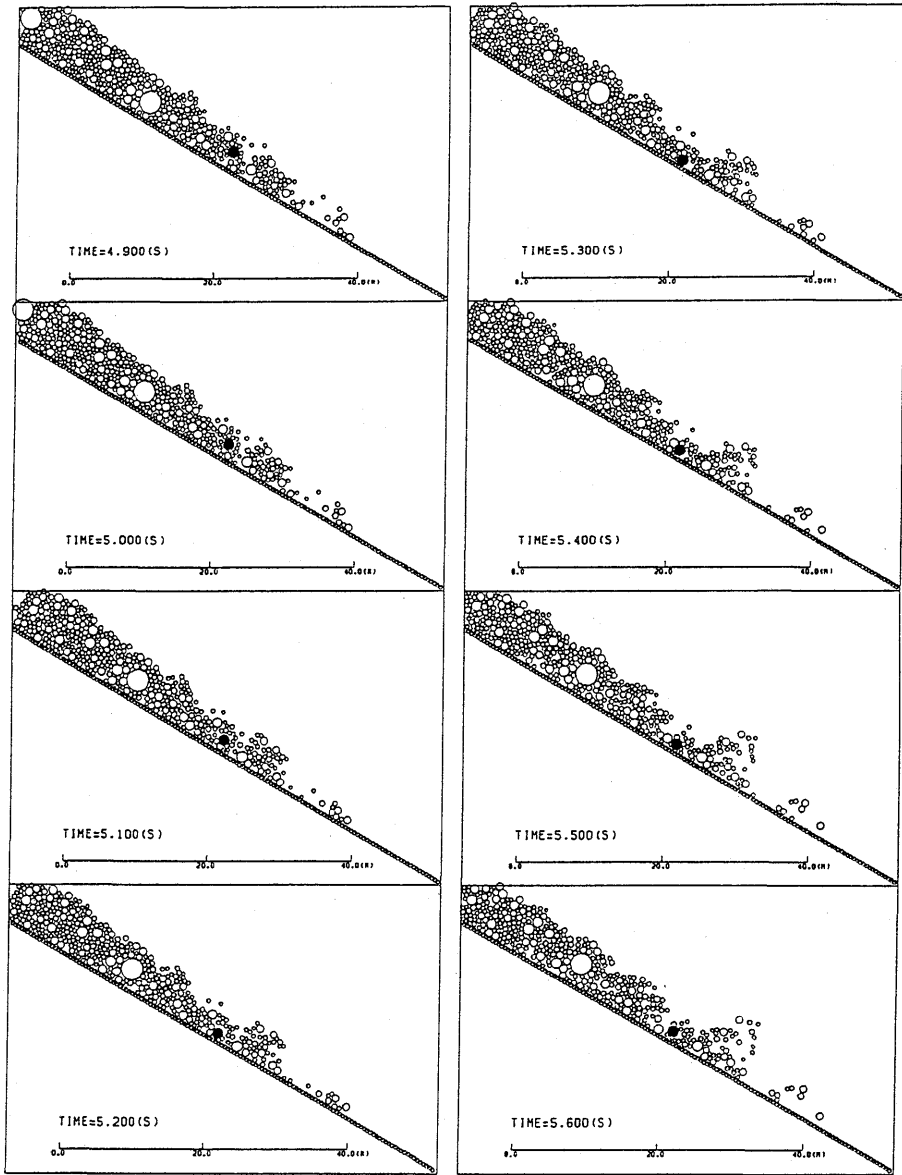


Fig. 34. Rolling phenomenon of flow at the front.

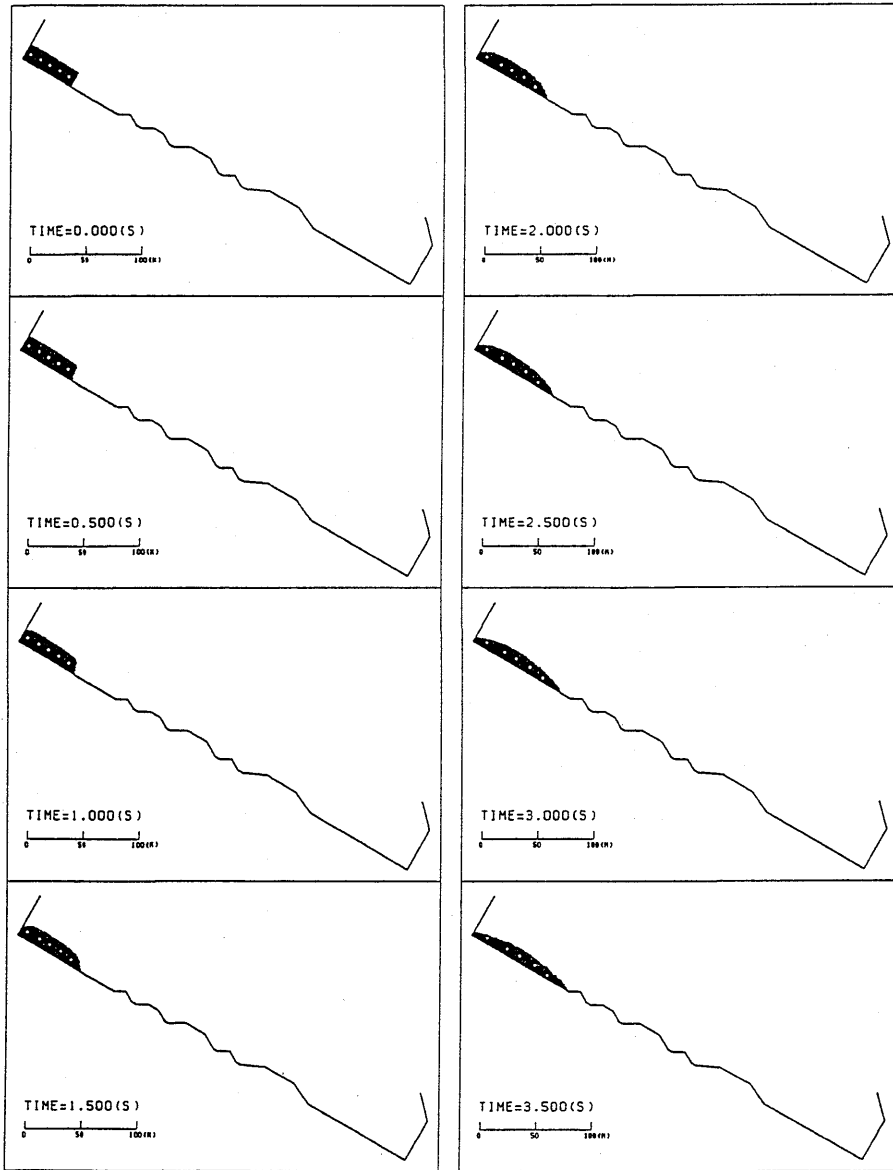


Fig. 35.1. Simulation results of debris flow with water effect (1) (0s~3.5s). Case 5.4 —Model slope 1+Model rock 2—

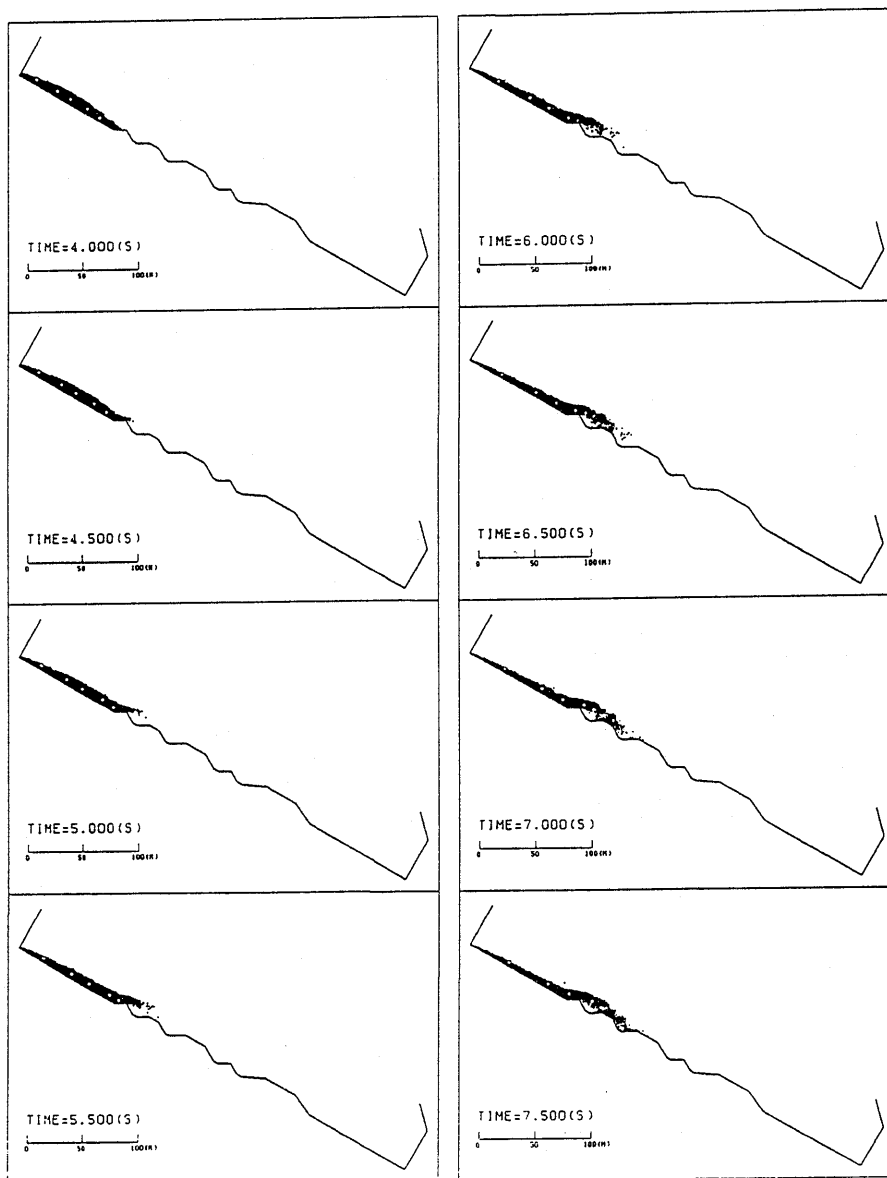


Fig. 35.2. Simulation results of debris flow with water effect (2) (4.0s~7.5s). Case 5.4 —Model slope 1+Model rock 2—

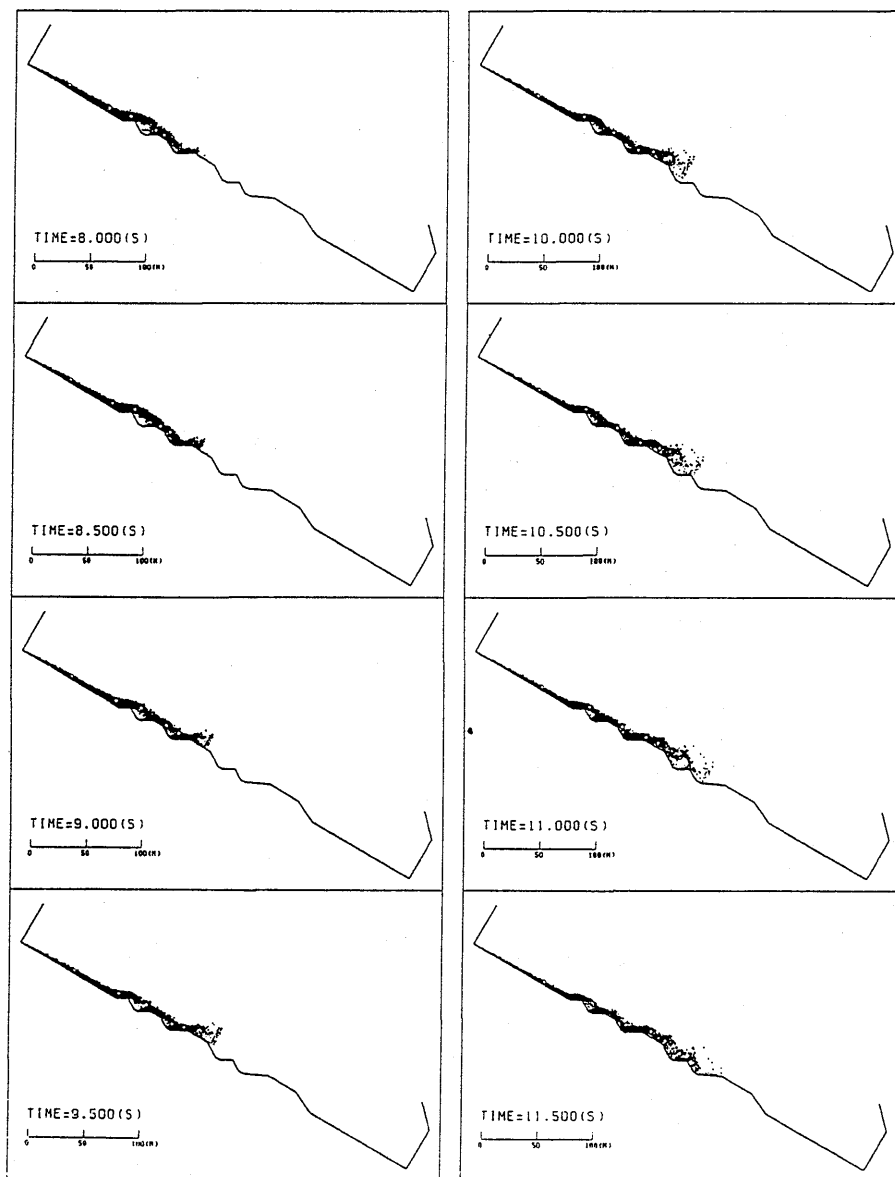


Fig. 35.3. Simulation results of debris flow with water effect (3) (8.0s~11.5s). Case 5.4 —Model slope 1+Model rock 2—

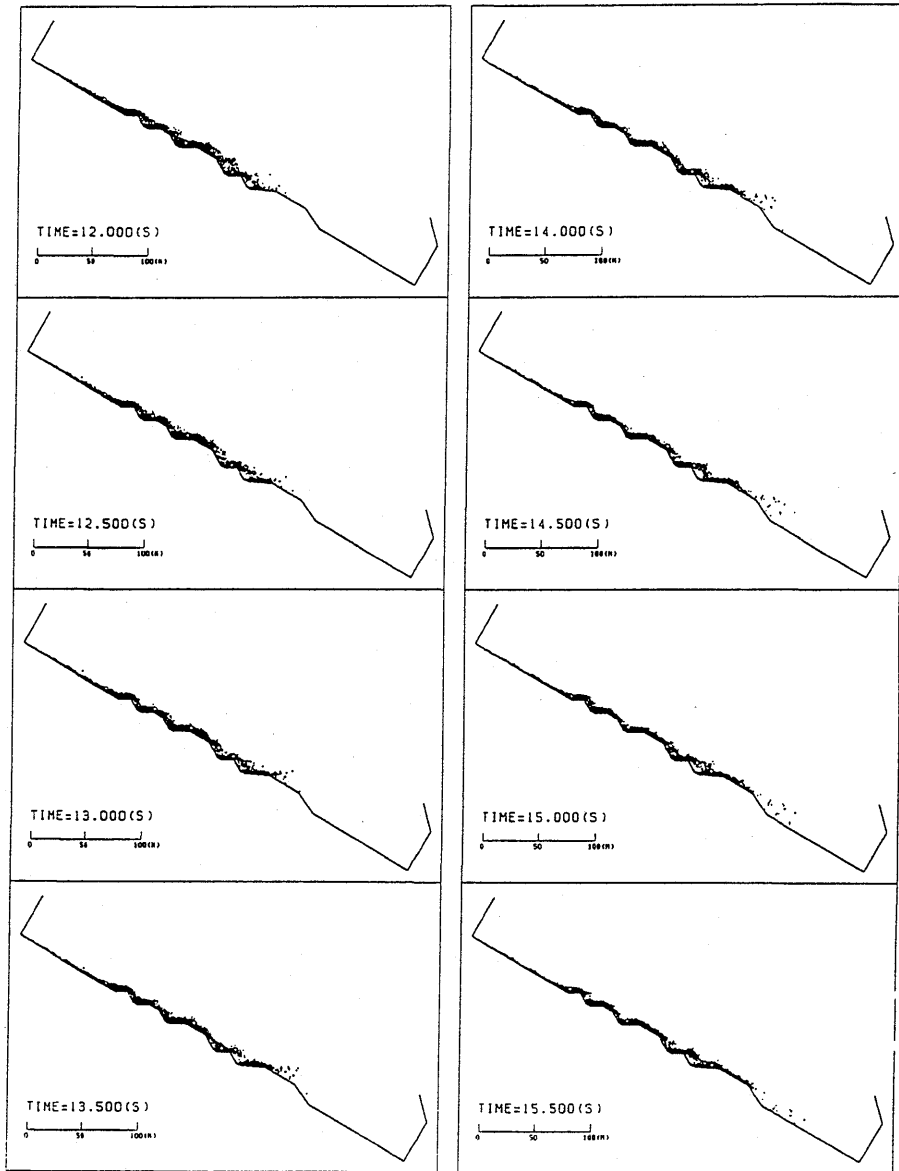


Fig. 35.4. Simulation results of debris flow with water effect (4) (12.0s~15.5s). Case 5.4 —Model slope 1+Model rock 2—

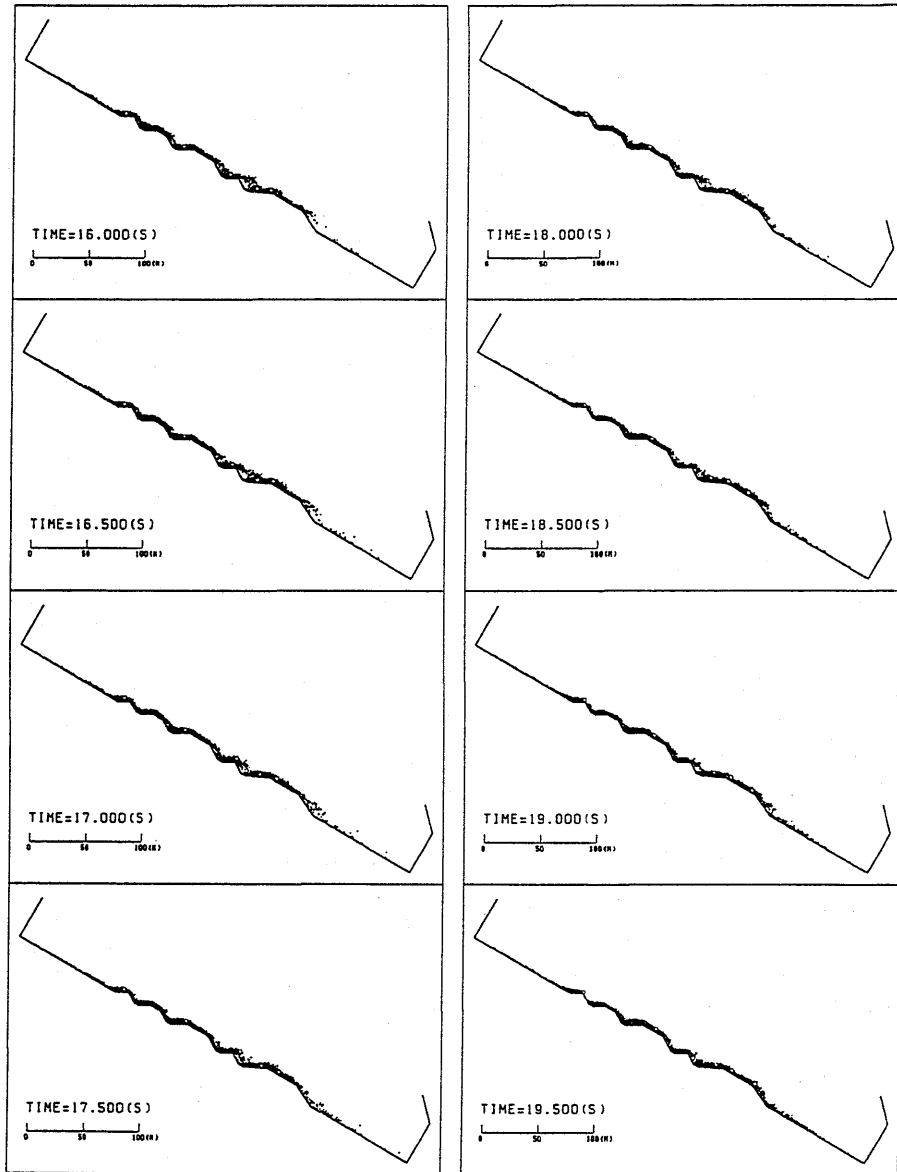


Fig. 35.5. Simulation results of debris flow with water effect (5) (16.0s~19.5s). Case 5.4 —Model slope 1+Model rock 2—

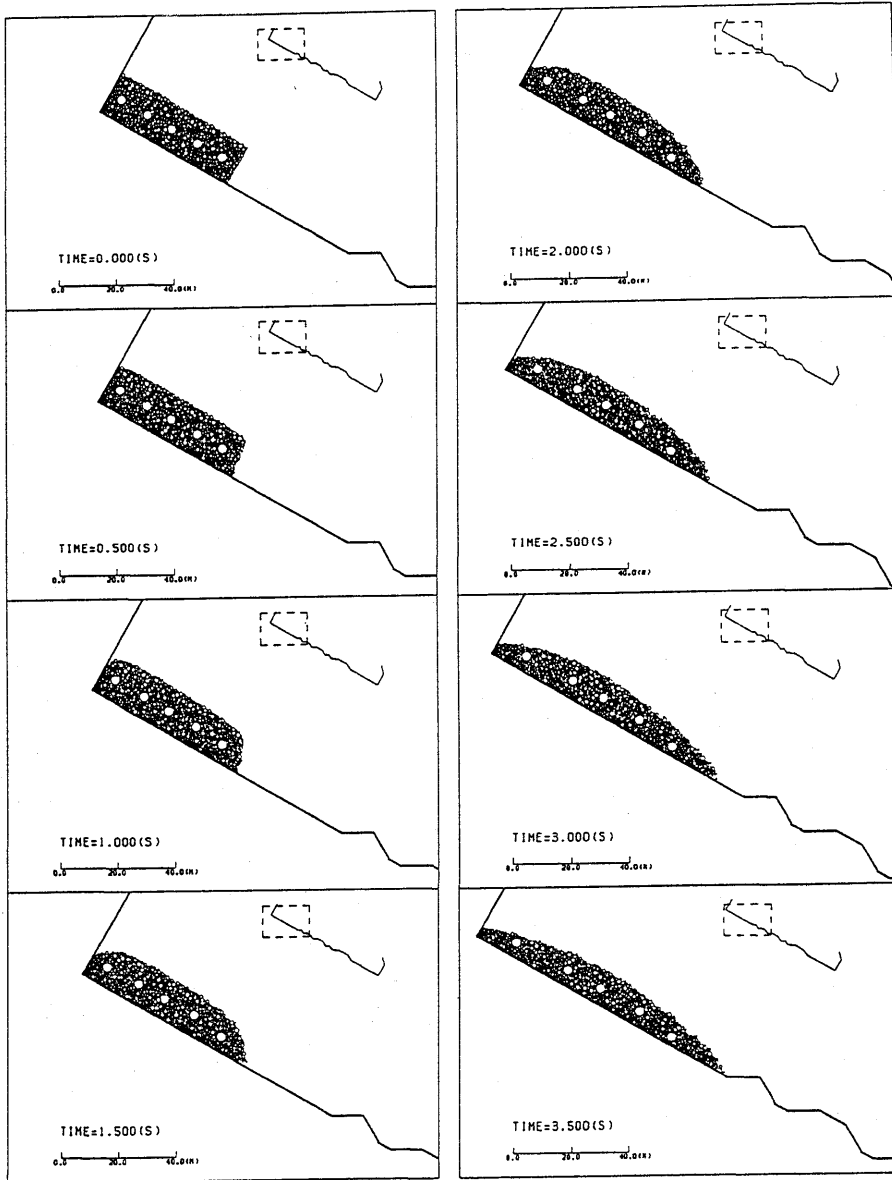


Fig. 36.1. Close-up of debris flow with water effect (1) (0s~3.5s). Case 5.4 —Model slope 1+Model rock 2—

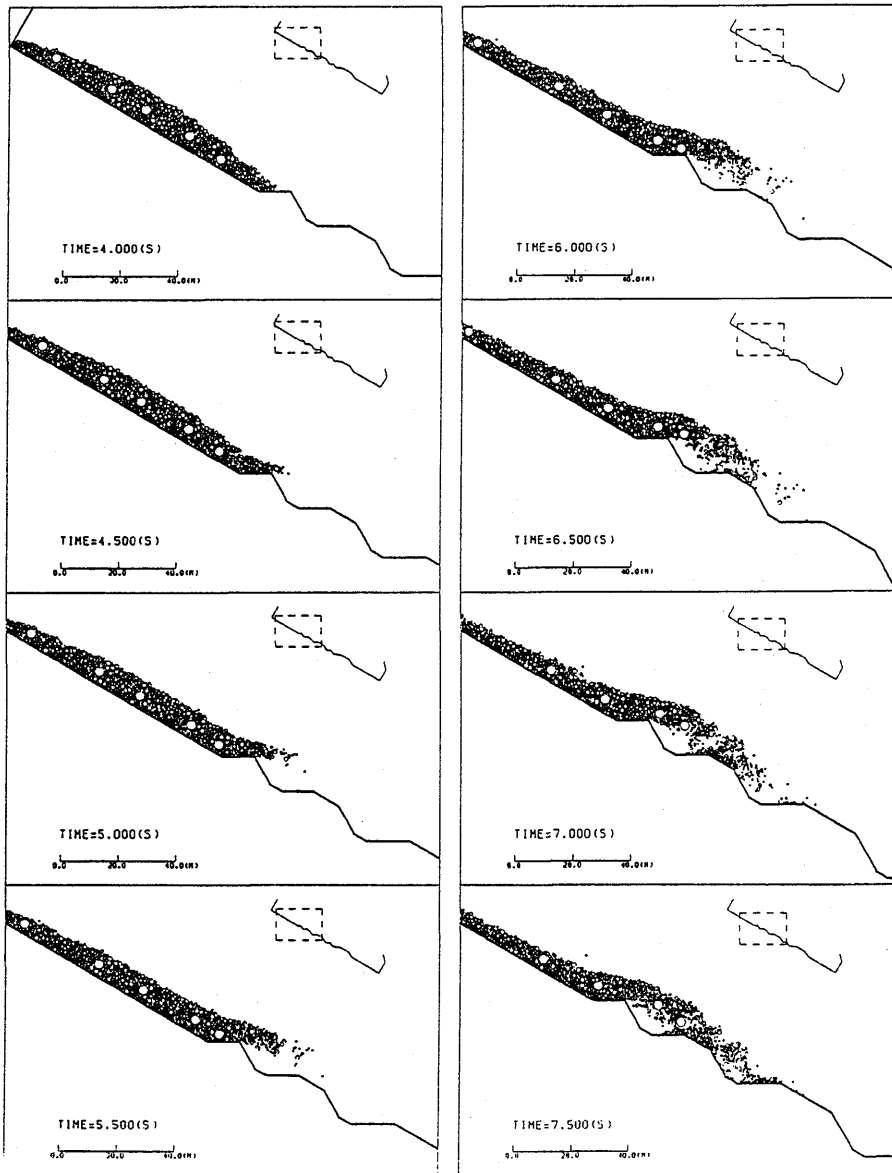


Fig. 36.2. Close-up of debris flow with water effect (2) (4.0s~7.5s). Case 5.4 —Model slope 1+Model rock 2—

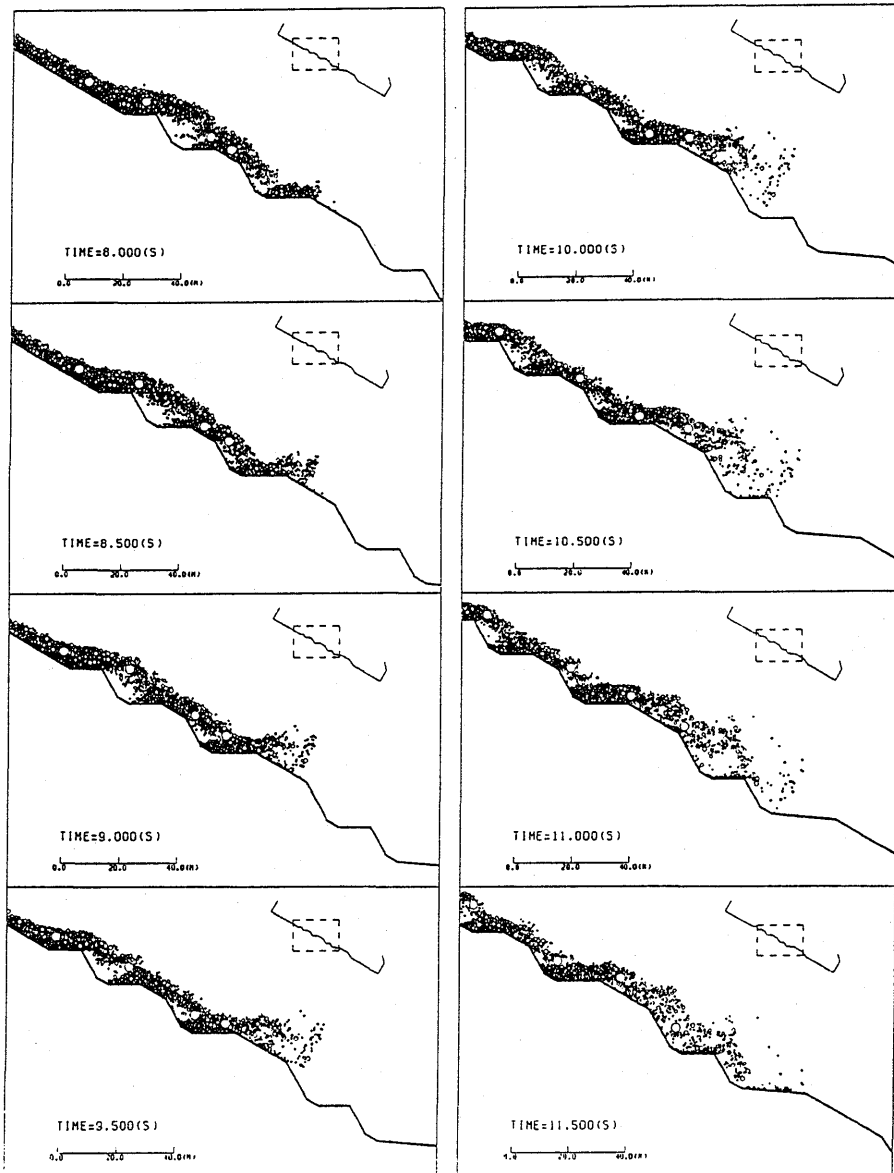


Fig. 36.3. Close-up of debris flow with water effect (3) (8.0s~11.5s). Case 5.4 —Model slope 1+Model rock 2—

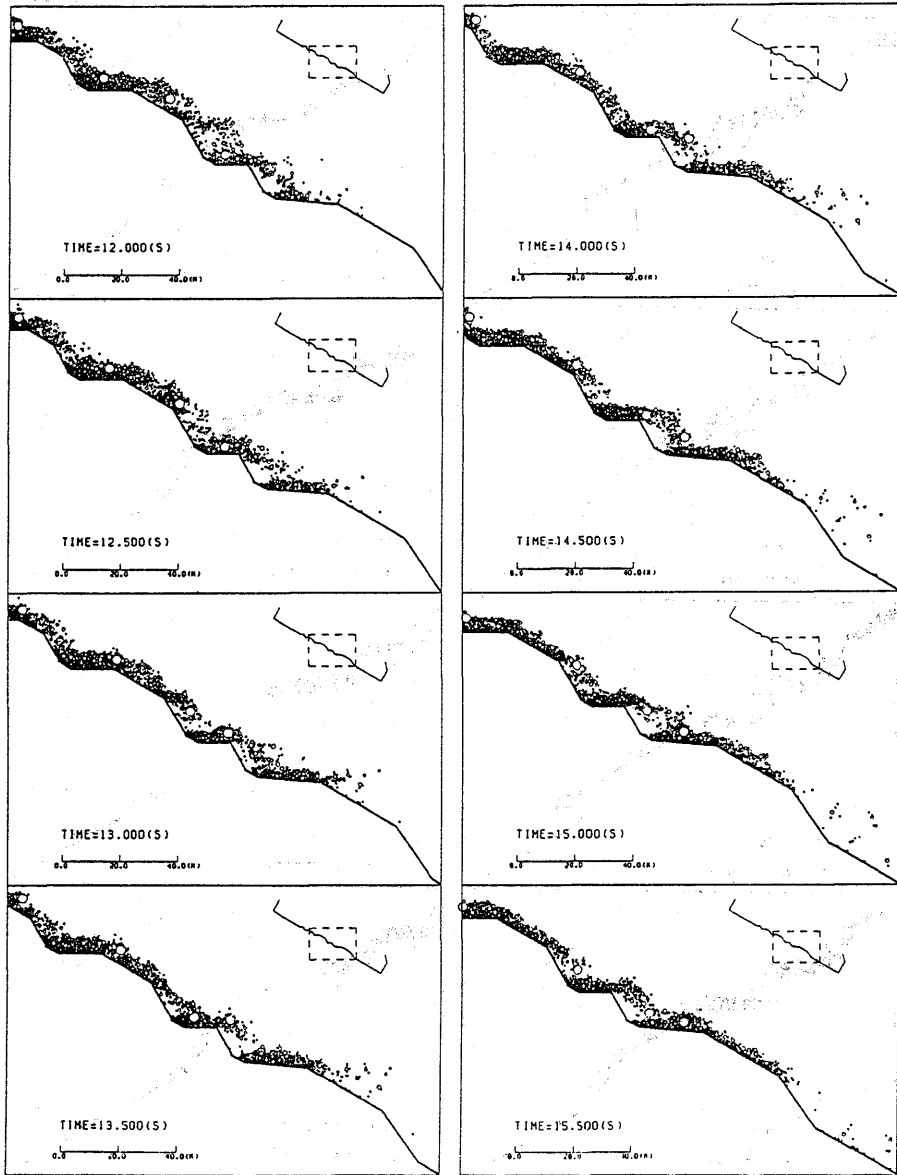


Fig. 36.4. Close-up of debris flow with water effect (4) (12.0s~15.5s). Case 5.4
—Model slope 1+Model rock 2—

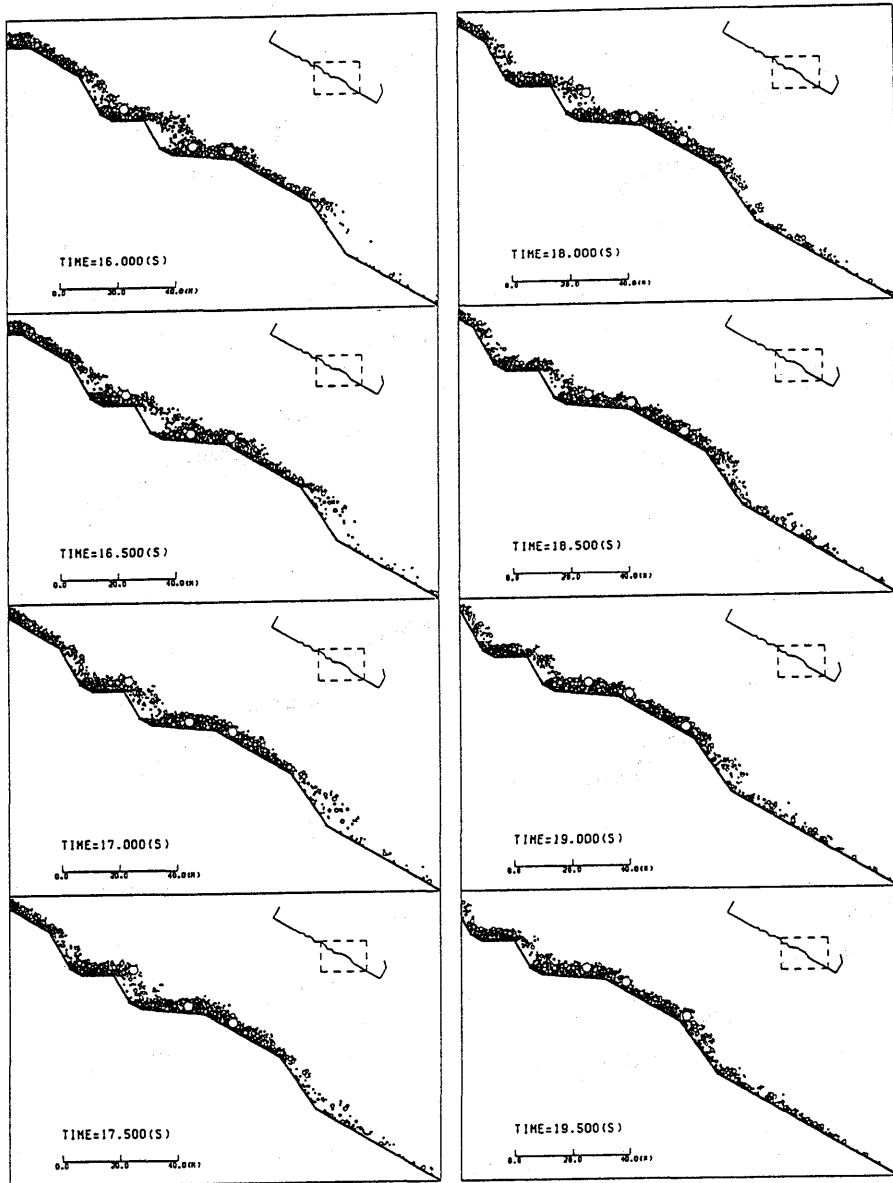


Fig. 36.5. Close-up of debris flow with water effect (5) (16.0s~19.5s). Case 5.4
—Model slope 1+Model rock 2—

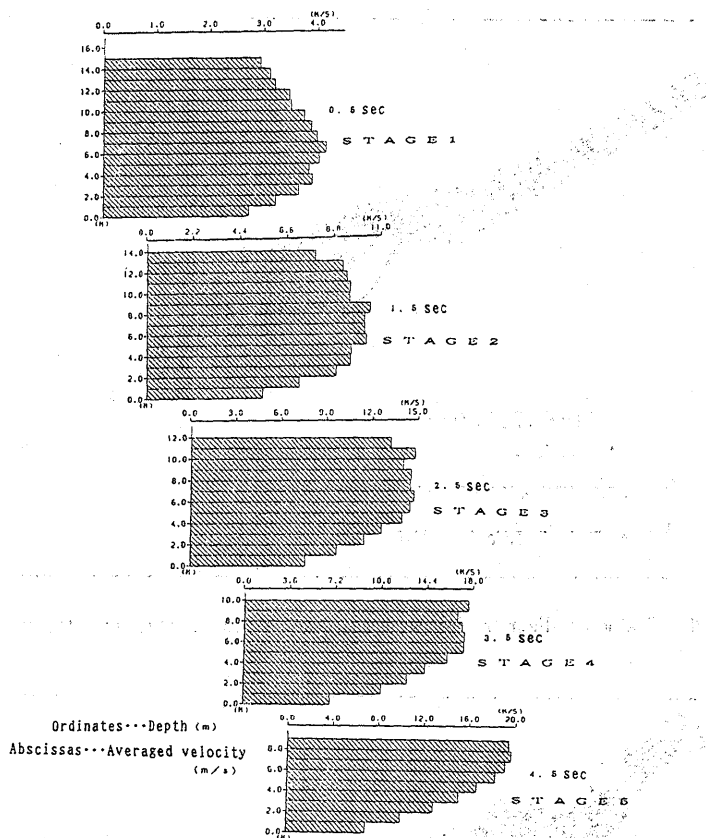


Fig. 37. Flow velocity at each depth for debris flow with water effect.

(5) 衝撃力解析

—Case 5.5—

前項で水の影響を考慮した DEM により、土石流の流れ自体のシミュレーションを行なったので、この項ではその流れを使って、土石流が砂防ダムなど鉛直な壁に衝突した時にどのくらいの衝撃力を及ぼすかを解析してみる。用いた斜面は Fig. 13 に示したように、前項の斜面 (Fig. 11) の途中に高さ 60 m の鉛直壁を付けたものなので、計算結果も 6.5 秒までは Case 5.4 の結果を使い、それ以後を壁の付いた斜面を用いて解析した。

解析時間は 6.5 秒から 15 秒までで、解析結果の粒子の分布および速度を Fig. 44.1~5 に示す。解析時間で粒子の動きを追っていくと、斜面を下ってきた土石流は 7 秒の時にはその先端部分が擁壁に達し粒子は貯まっていく。貯まっていた粒子は後続の粒子に押され壁際を上の方へ動き、9 秒から 11 秒の間では、上に動いた粒子が流れて来た方向とは逆の方向に反り返っている。12 秒では、反り返った粒子群と斜面から流れて来た粒子群が衝突し、12.5 秒で数個の粒子が衝突により空中に飛んでいる。そして、その後壁際の粒子

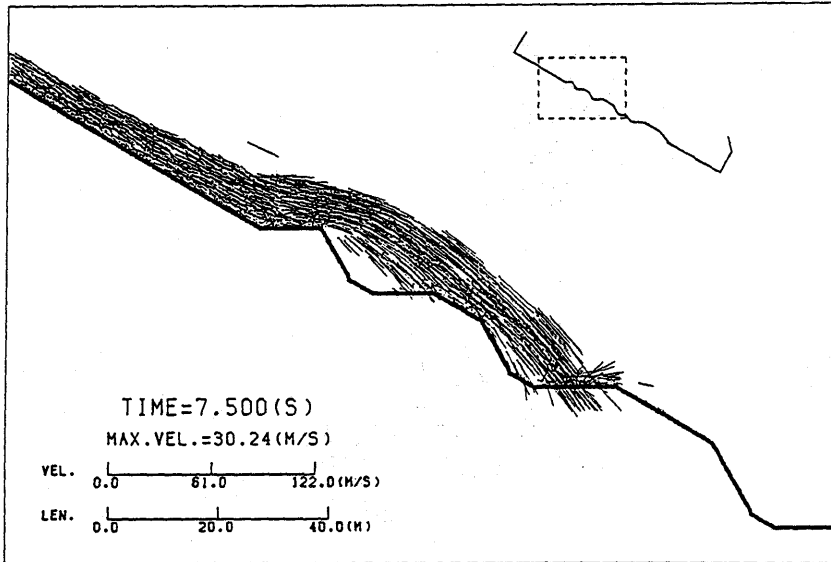


Fig. 38. Velocity distribution at 7.5sec after sliding of debris flow with water effect.

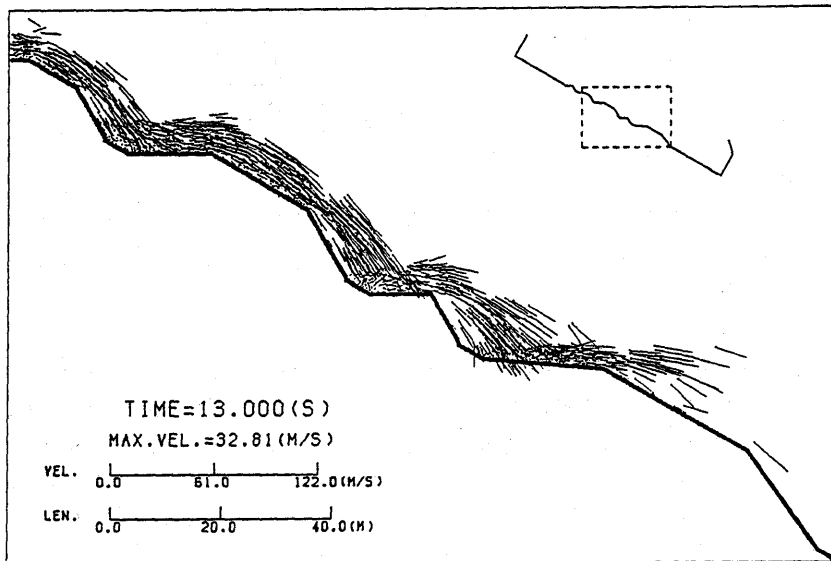


Fig. 39. Velocity distribution at 13.0sec after sliding of debris flow with water effect.

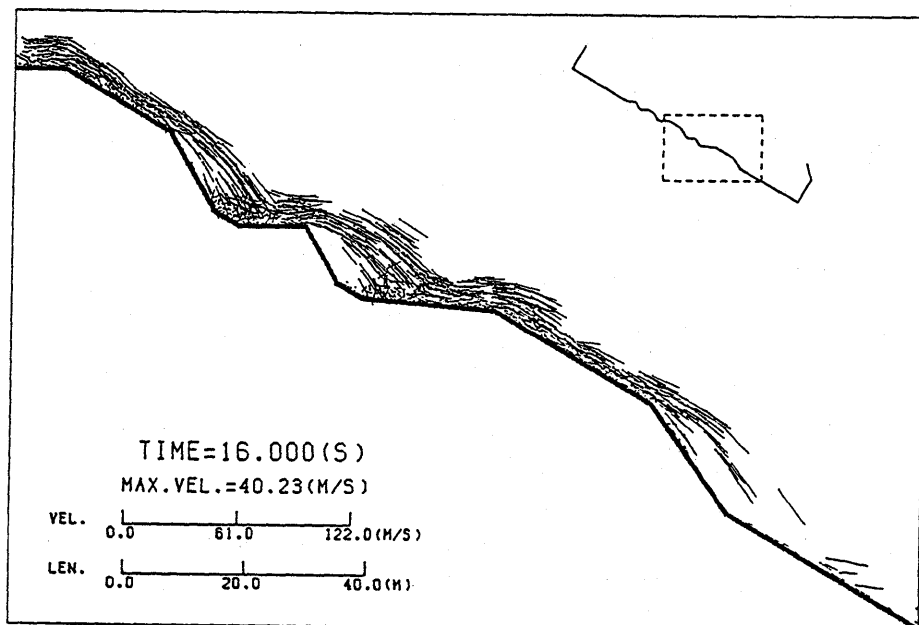


Fig. 40. Velocity distribution at 16.0sec of debris flow with water effect.

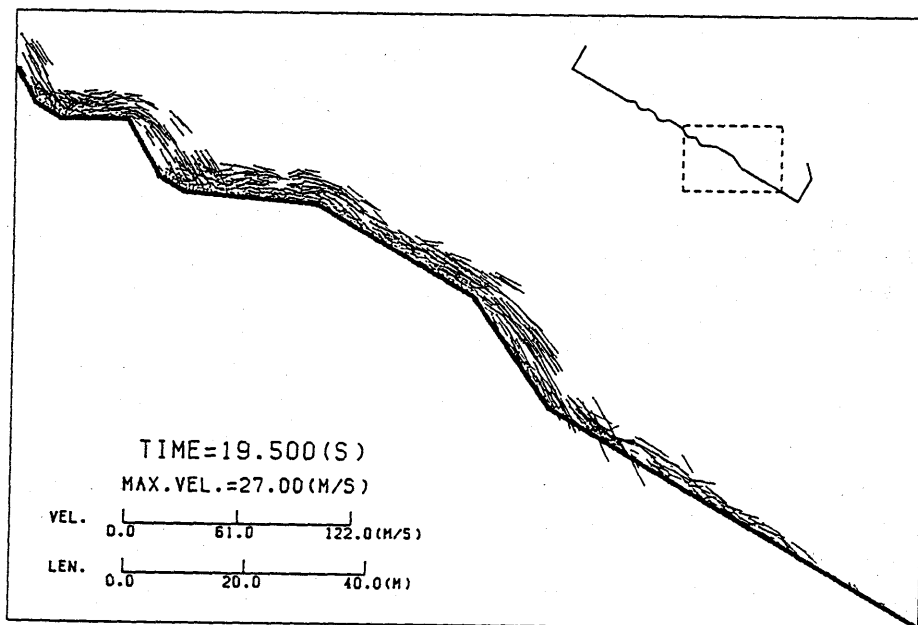


Fig. 41. Velocity distribution at 19.5sec of debris flow with water effect.

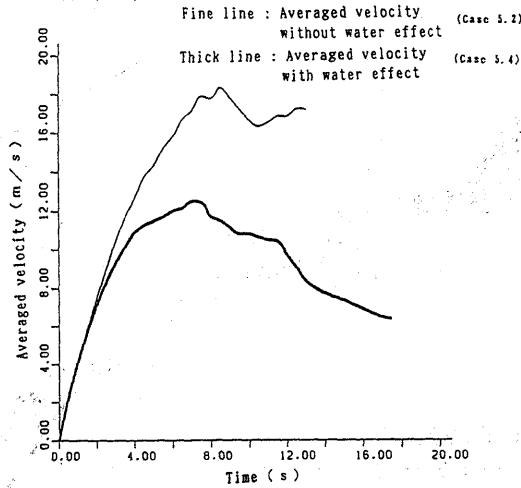


Fig. 42. Averaged flow velocity of dry avalanche and debris flow with water effect.

は速度をほとんど持たなくなり堆積していく。この壁に衝突してから堆積していくまでの一連の動きは、水などの流体の動きに非常に類似している。特に、壁際で流れがそり返り、斜面からの流れと衝突し合う現象などは、波が防波堤などにぶつかった時に見られるものに非常に良く似ている。つまり、これまでの DEM は非連続体の解析に適したものであったが、この水の影響を取り入れた DEM により連続性を持った流体の解析にも適応性があることが分かった。

Fig. 45~48 は、土石流によりどのような力が壁に加わったかを示している。Fig. 45・46 は、解析時間 9 秒と 15 秒の各壁要素に加わる力の方向と大きさを線で表わしたものである。この壁に加わる力を解析時間で追跡したのが Fig. 47・48 である。Fig. 47 は、縦軸に擁壁に対して横方向に加わる力、横軸に解析時間を、Fig. 48 は、縦軸に擁壁の根元を中心にしたモーメント、横軸に解析時間をとった図である。壁に対する圧力は、粒子が衝突する時に生じる集中荷重と、壁に堆積するための静的な圧力の 2 種類の力がある。Fig. 47 と Fig. 48 は、これらの 2 種類の力をたし合わせたものになる。解析の最初は、粒子が擁壁に衝突することによる力なので集中荷重である。その波形は、パルス的なものになっている。その後、壁際に粒子が堆積することによる圧力も加わり、擁壁に加わる衝撃力は増加していく。粒子が堆積することによる圧力の波形は、滑らかなものだと考えられるので、Fig. 47 と Fig. 48 の波形のように上下に激しく揺れる波は、集中荷重によるものが大きく作用していることが分かる。解析の終盤になると波形はだんだん落ち着いてくる。これは、擁壁の周りに堆積した粒子が集り、直後に粒子が壁に衝突することが少なくなるためである。しかし、波形の上下の揺れが続いていることから、堆積した粒子に別の粒子が衝突した集中荷重が、粒子間を伝し擁壁まで伝わっていることも分かる。

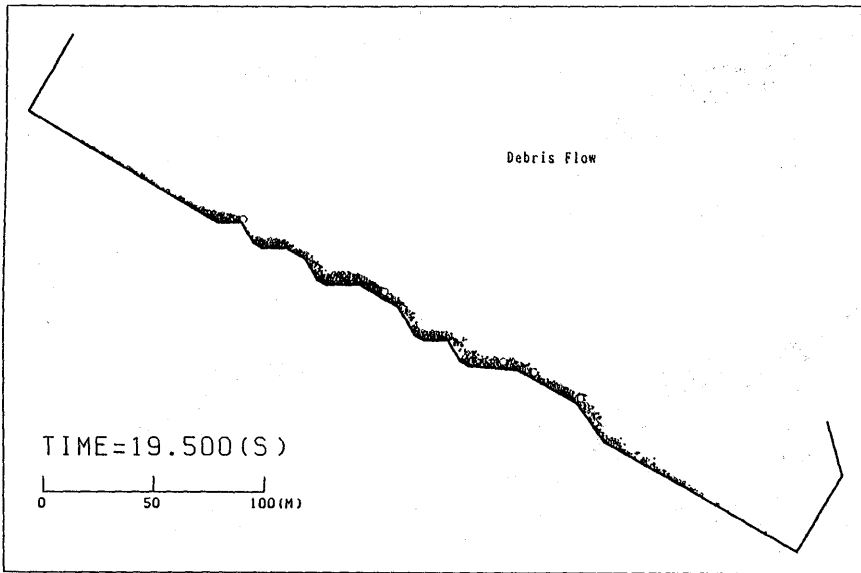
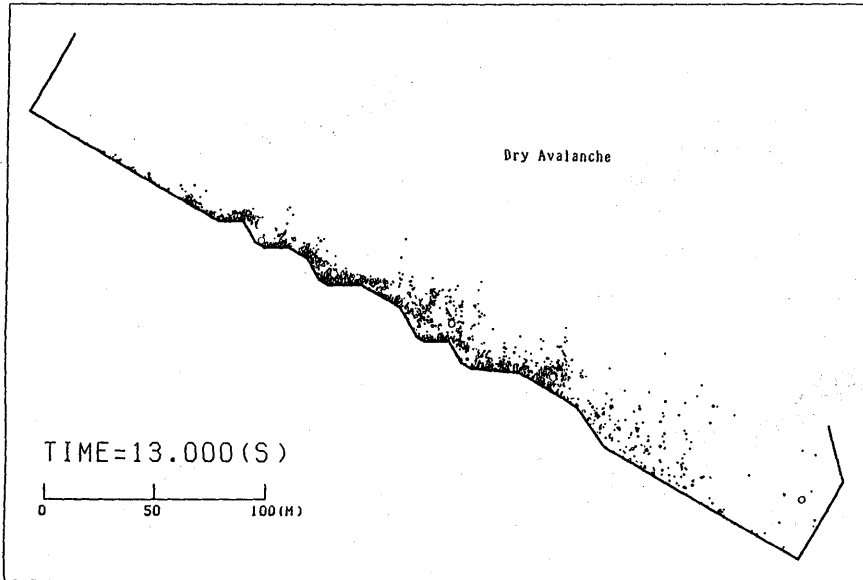


Fig. 43. Dry avalanche and debris flow.

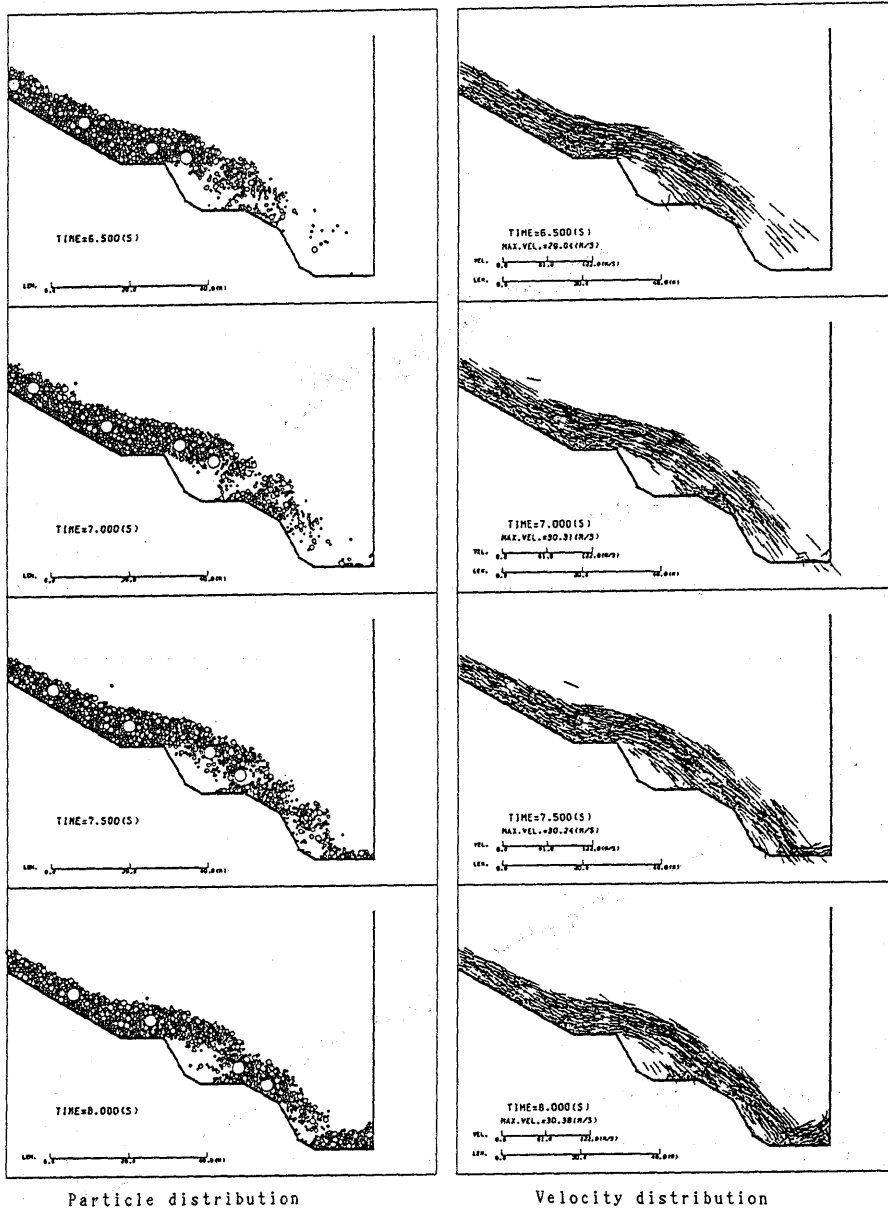
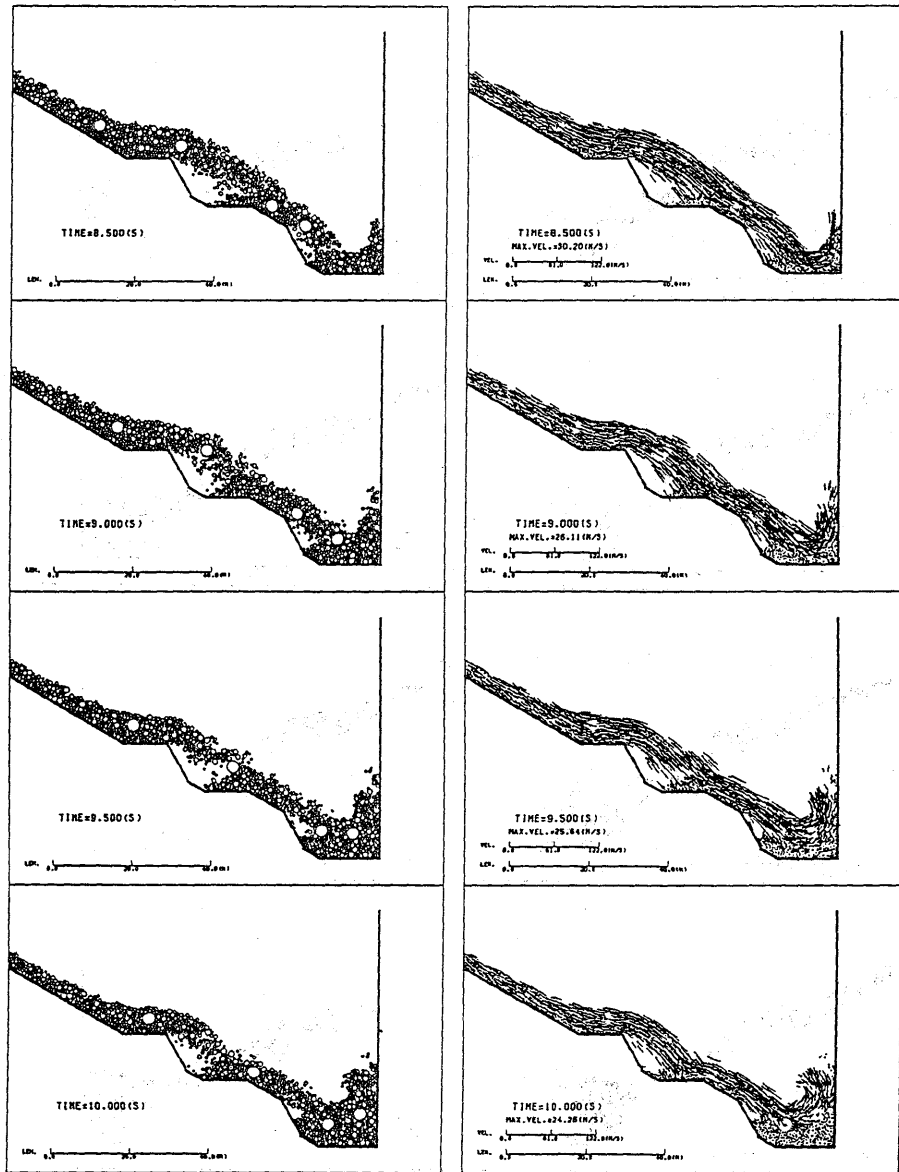


Fig. 44.1. An impact of debris flow on a wall (1) (6.5s~8.0s).



Particle distribution

Velocity distribution

Fig. 44.2. An impact of debris flow on a wall (2) (8.5s~10.0s).

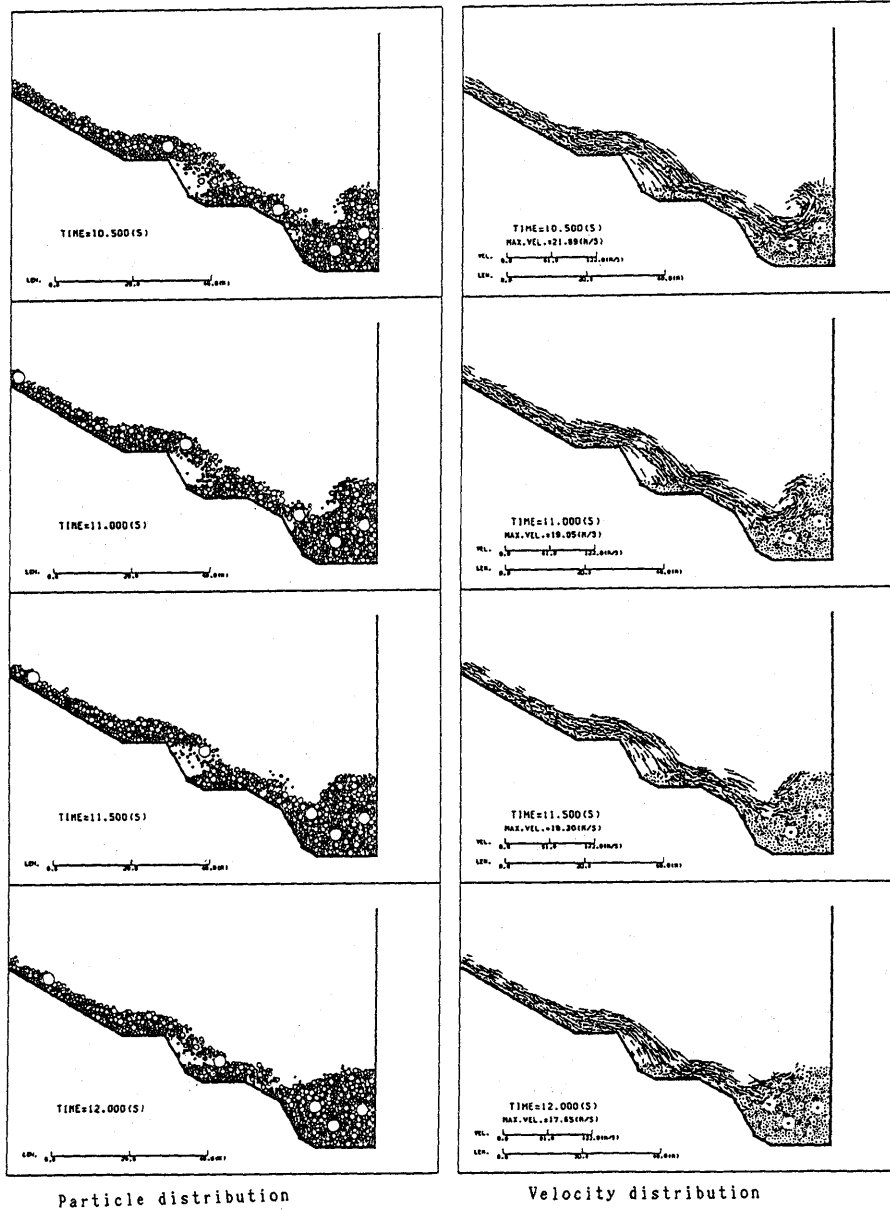
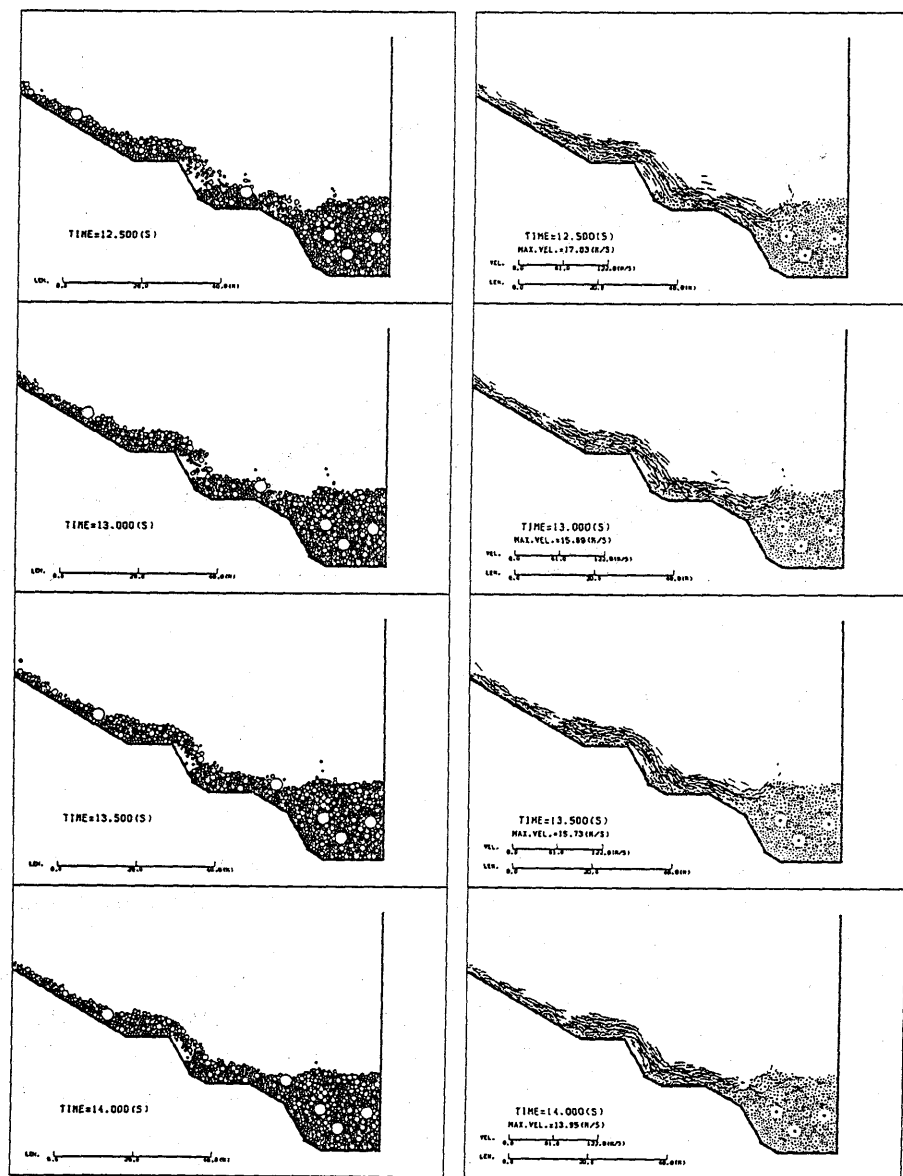


Fig. 44.3. An impact of debris flow on a wall (3) (10.5s~12.0s).



Particle distribution

Velocity distribution

Fig. 44.4. An impact of debris flow on a wall (4) (12.5s~14.0s).

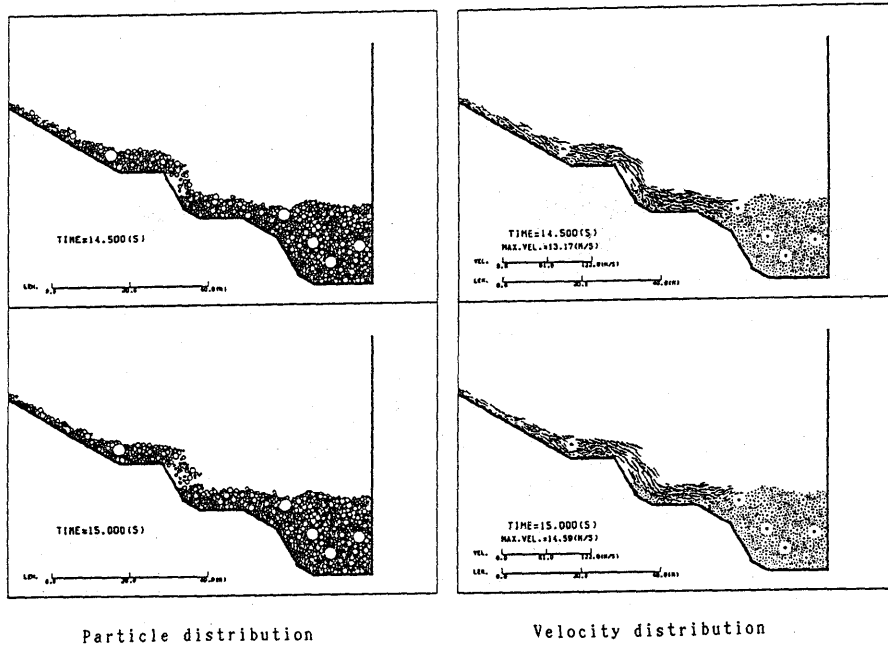


Fig. 44.5. An impact of debris flow on a wall (5) (14.5s~15.0s).

(6) 推積解析

—Case 5.6—

この項では、第4項での流れを使って、土石流がどのように堆積していくかを解析する。前項と同じように6.5秒まではCase 5.4の計算結果を用い、それ以降は水平な部分を有する斜面 (Fig. 14) を使って解析を行なった。

解析時間は6.5秒から18秒までで、解析結果の粒子分布を Fig. 49.1~3 に示す。流れの先端部分の粒子は、水平な地面に衝突すると跳ね返り、まるで台風の際に波が防波堤に覆い被さるような形になっている。Fig. 50 の8.5秒の速度の図を見てもその様子が分かる。しかし、その散らばった粒子も何度か地面と衝突している間に、後続の流れに呑み込まれ、Fig. 51 の11.5秒の速度の図のようにまた元の地面に沿った一団の流れになっている。Fig. 49.1~3 では、分かりづらいかもかもしれないが、この一団の流れの先端部分では、Case 5.3 のときにも見られたブルトナーなどのキャタピラのような粒子同士の巻き込み現象が見られた。Fig. 52.1~3 は、地面が水平な部分に入って来た粒子の中の前から3分の2の粒子、つまり90個の粒子が水平な部分に入っているのなら先頭から60番目までの粒子を対象として、その粒子の地面と平行な速度について求めた流速分布である。12.5~13.5秒までの形状は理論上のもの (Fig. 1) と類似している。解析時間が経つにつれて、速度は小さくなり地面に近い部分と遠い部分の差が少なくなり全体的に0 m/s に近づいている。Fig. 53 は、Fig. 52.1~2 の各解析時間の流速を平均し、解析時間を横軸

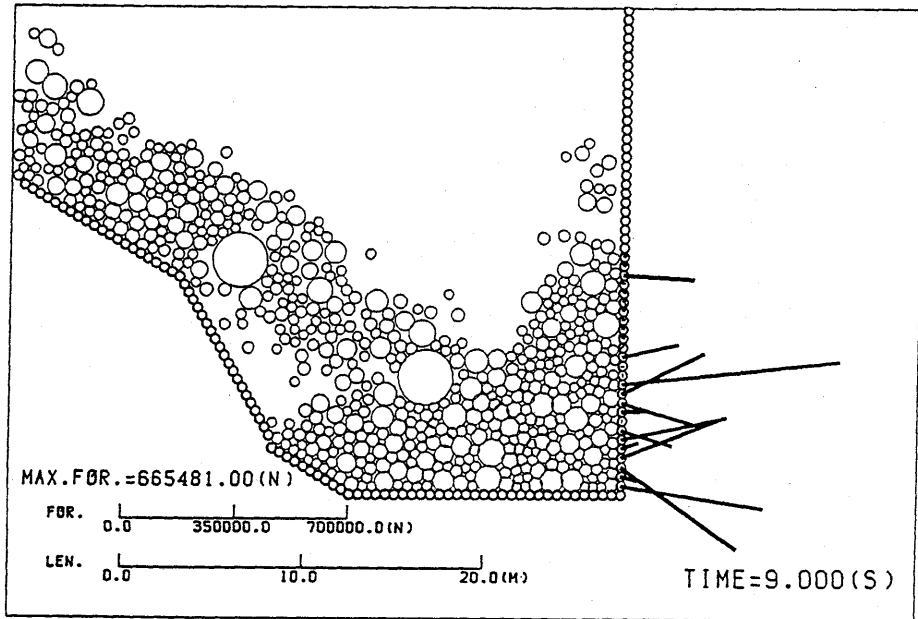


Fig. 45. Impulsive force vector on a wall due to debris flow (9.0s).

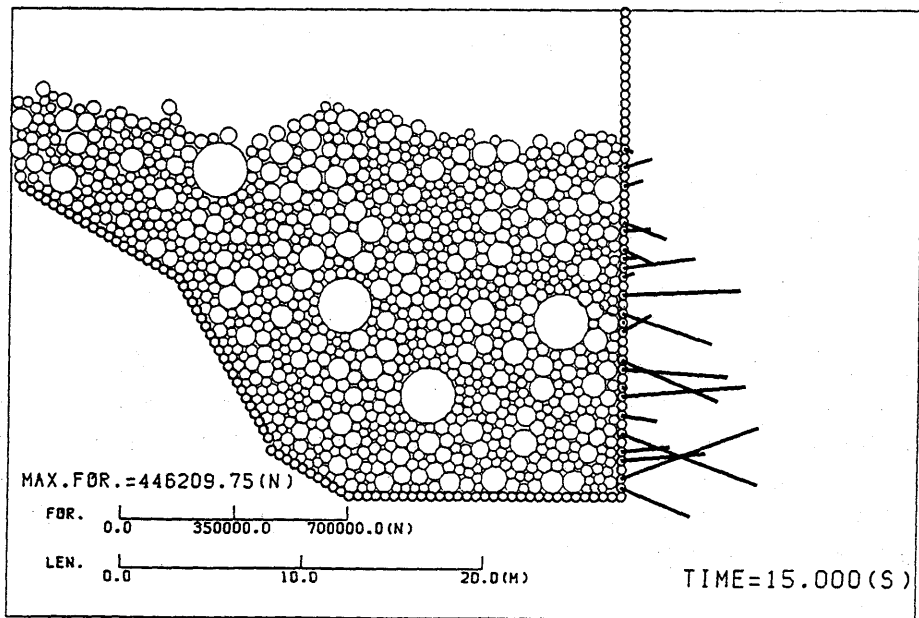


Fig. 46. Impulsive force vector on a wall due to debris flow (15.0s).

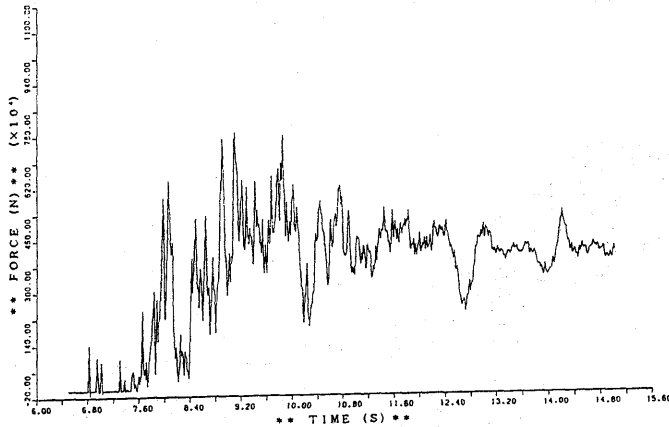


Fig. 47. Total impulsive normal force on a wall due to debris flow.

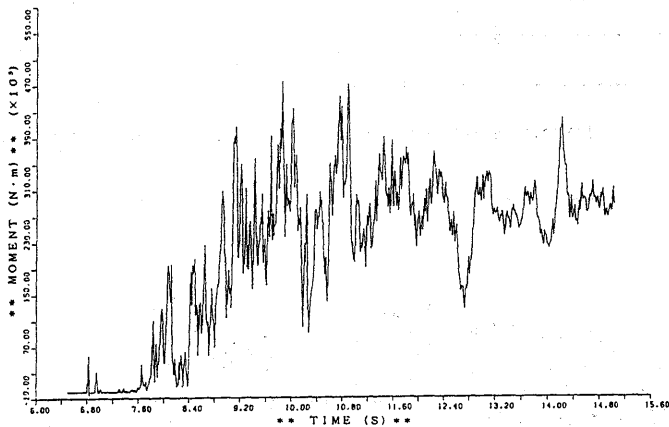


Fig. 48. Total impulsive moment on a wall base due to debris flow.

にとってグラフにしてみたものである。最初の数秒は対象となった粒子の数が少なかったためもあり少し乱れているが、それ以後は時間が経つにつれて、平均流速は 0 m/s に収束してゆき18秒ではほぼ 0 m/s になっている。Fig. 54 には、解析終了時 (18秒) の粒子の分布と速度を示す。堆積した粒子の長さは、 86.8 m 、厚さは最大で 10.7 m となった。速度の図では地面が水平な部分に入った粒子は後続から流れ込んでくるものを除いて大体ゼロになったことが分かる。

5.3 考察

まず、巨礫の先端部分への集中機構について考察してみる。

Fig. 55 は、半径がある範囲に含まれている粒子 (例えば半径が $25 \text{ cm} \sim 30 \text{ cm}$ の範囲

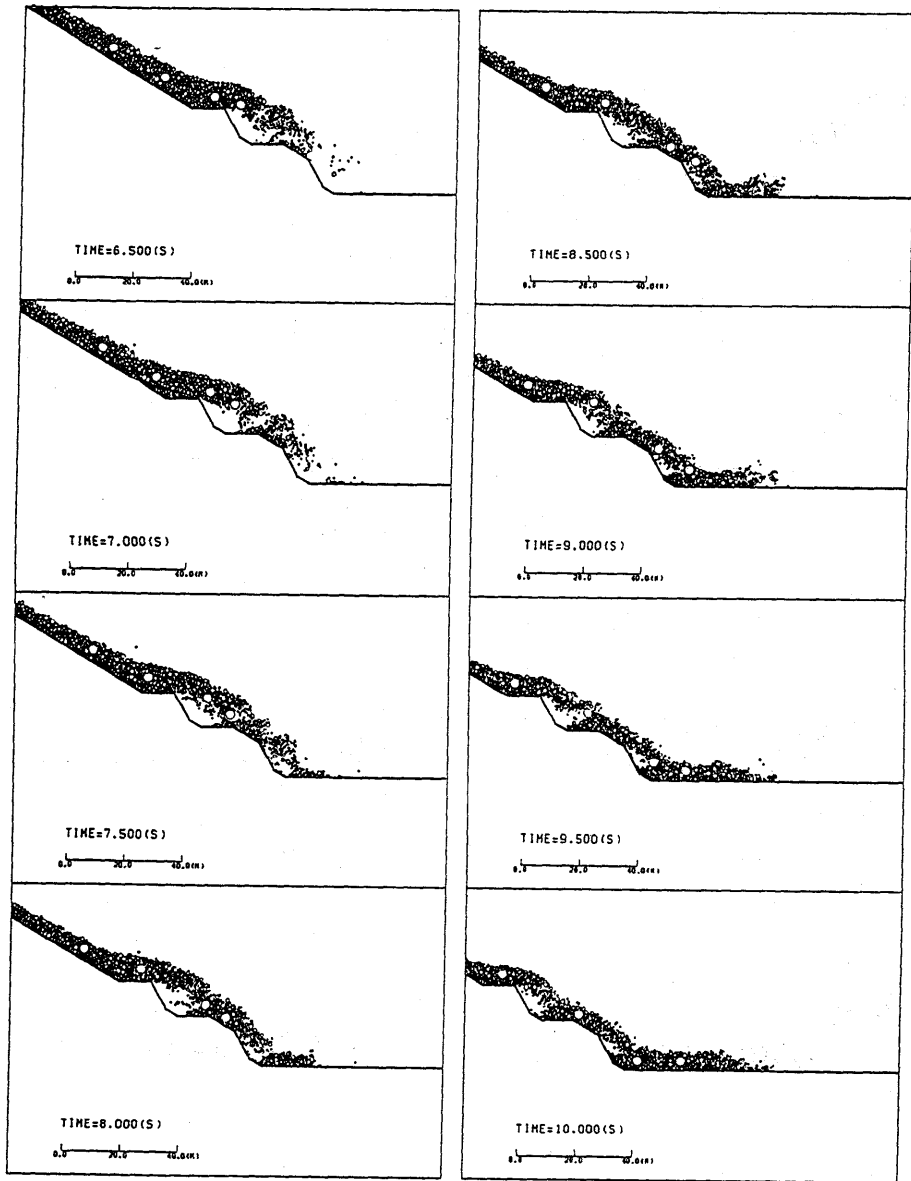


Fig. 49.1. Sedimentation process of debris flow (1) in case 5.6 (6.5s~10.0s).

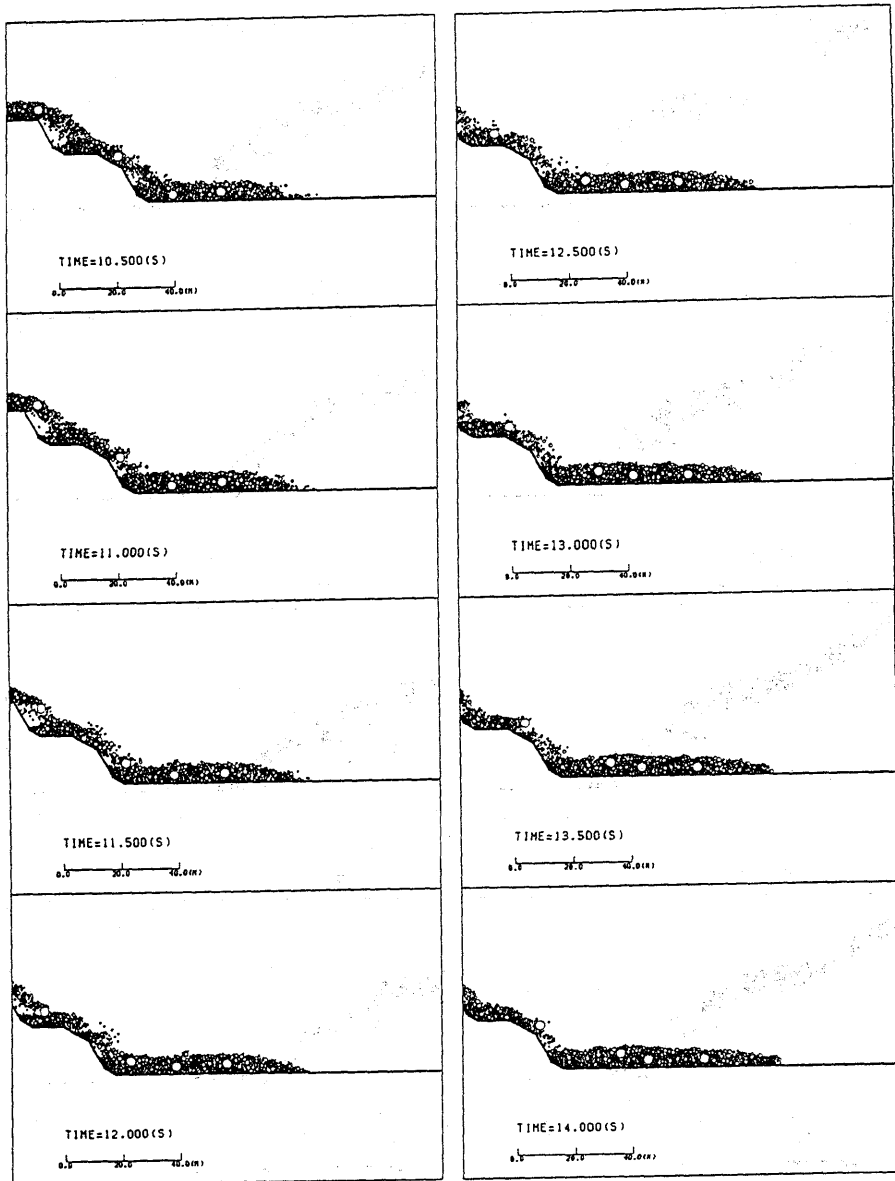


Fig. 49.2. Sedimentation process of debris flow (2) (10.5s~14.0s).

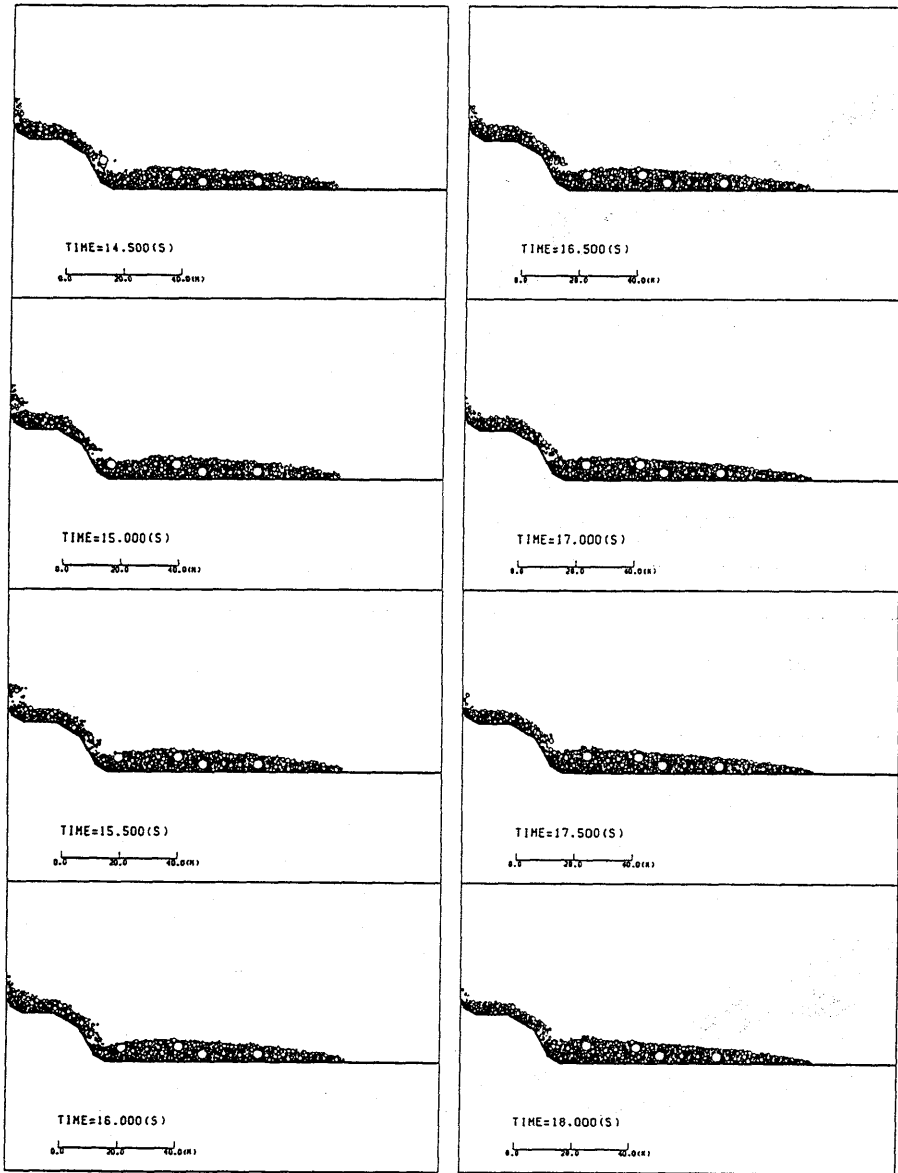


Fig. 49.3. Sedimentation process of debris flow (3) (14.5s~18.0s).

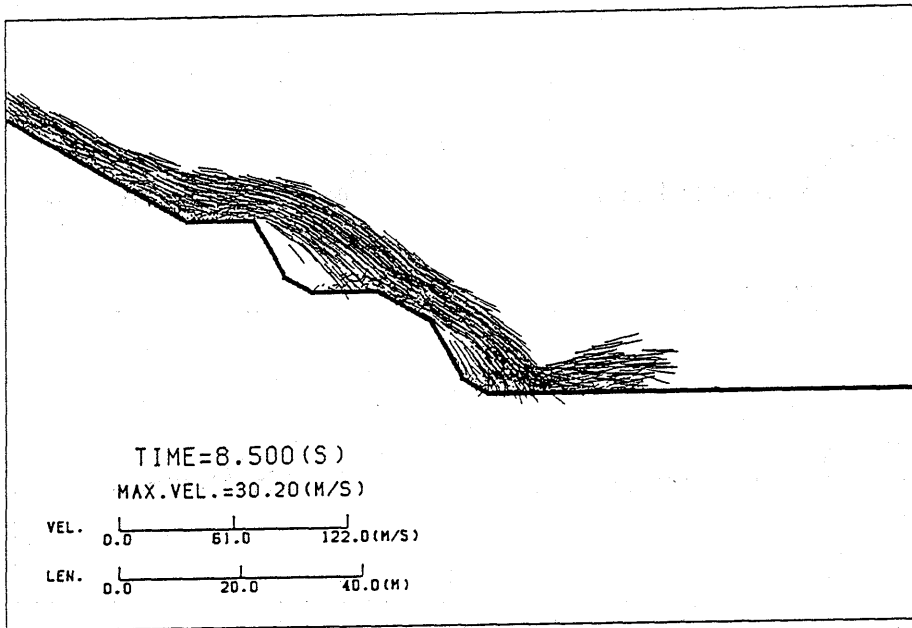


Fig. 50. Particle velocity at 8.5sec in sedimentation process in Case 5.6.

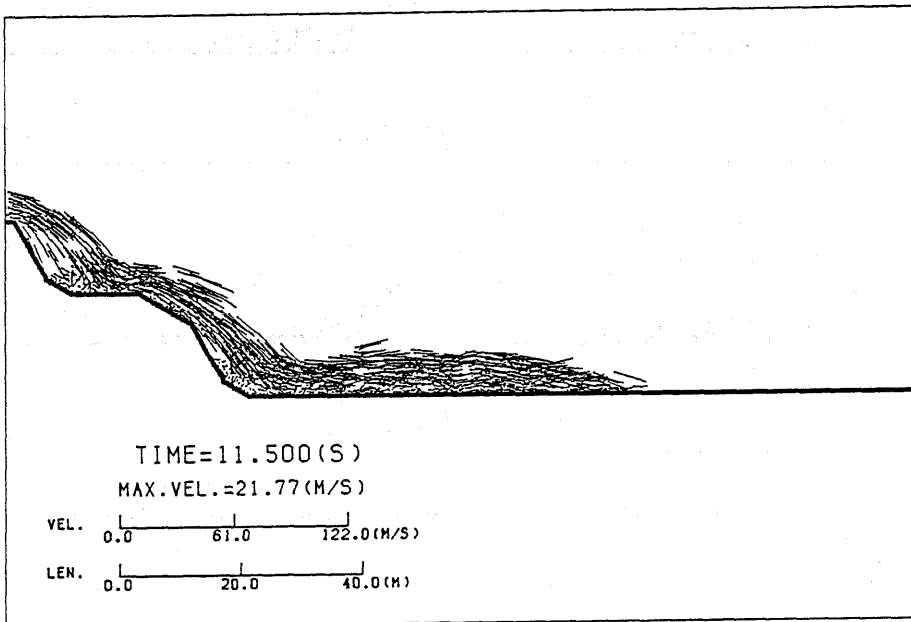


Fig. 51. Particle velocity at 11.5sec in sedimentation process in Case 5.6.

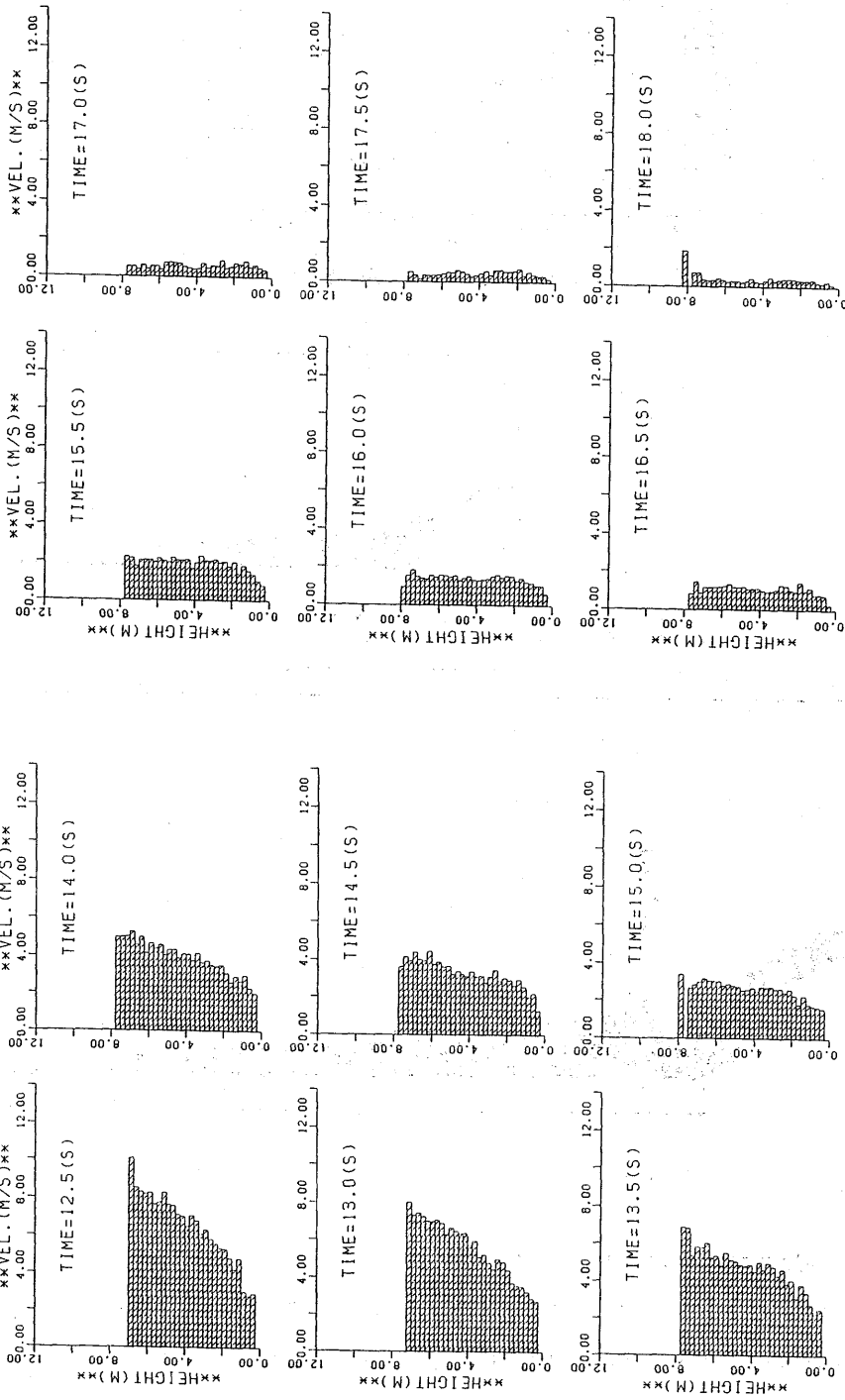


Fig. 52.1. Velocity distribution at each height from bottom (1) in Case 5.6 (12.5s~15.0s).

Fig. 52.2. Velocity distribution at each height from bottom (2) in Case 5.6 (15.5s~18.0s).

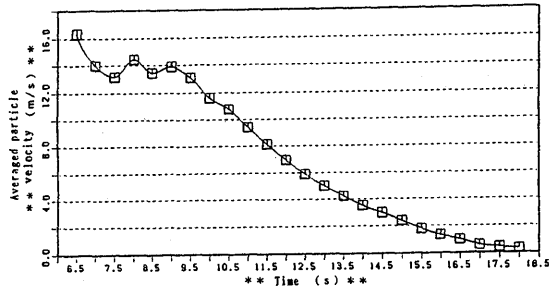


Fig. 53. Averaged particle velocity vs. Time.

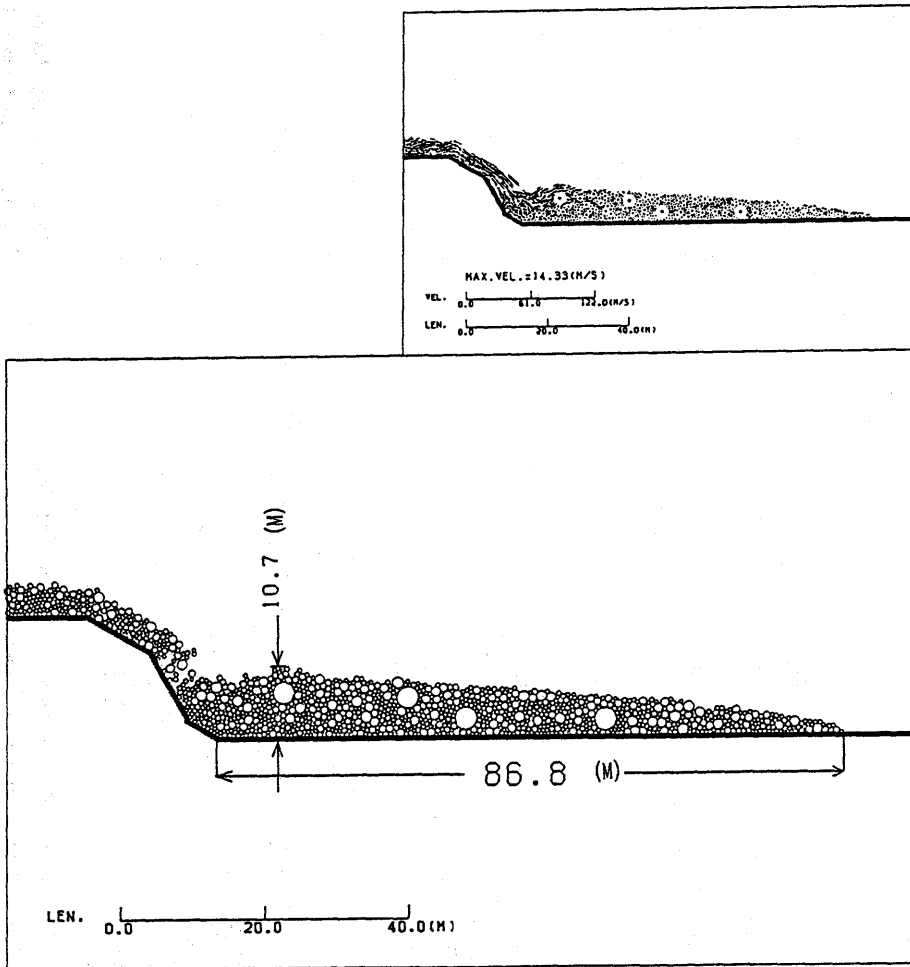


Fig. 54. Particle and velocity distribution at 18.0sec in Case 5.6.

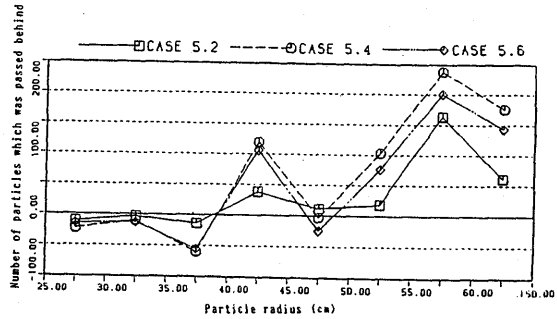


Fig. 55. How many particles does a particle get ahead of ?

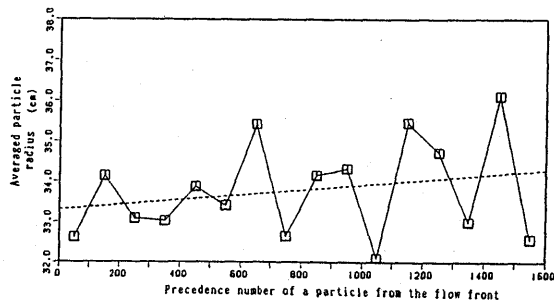


Fig. 56. Particle radius distribution of compacted model at initial condition (0.0sec).

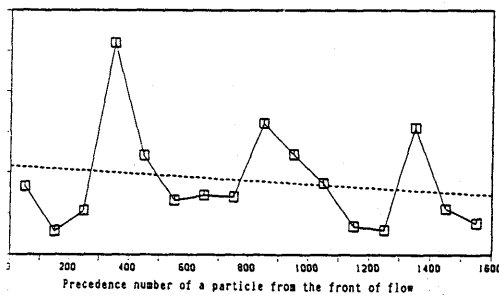


Fig. 57. Particle radius distribution at 13.0sec in Case 5.2.

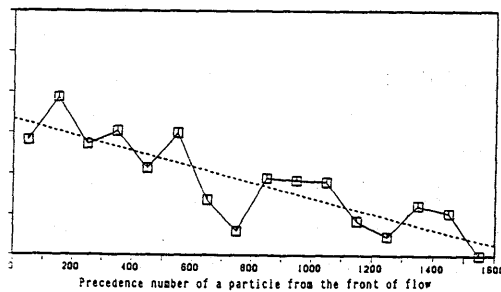


Fig. 58. Particle radius distribution at 19.5sec in Case 5.4.

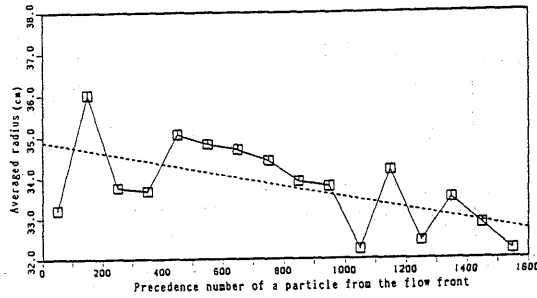


Fig. 59. Particle radius distribution in sedimentation process at 18sec.

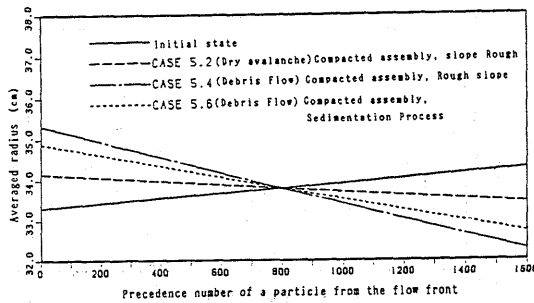


Fig. 60. Particle radius distribution in Cases 5.2, 5.4 and 5.6.

に含まれている粒子)が、初期状態から解析終了時までに流れの先端部分からの順位をいくつ上げたかを示した図である。縦軸は上昇した順位を、横軸は半径で、Case 5.2・5.4・5.6の3種類について描いてみた。3種類のケースとも同じような形状を示し、半径が大きい粒子ほど順位を上げていることが分かる。3種類の中でも、Case 5.4がその傾向を一番顕著に現わしている。Fig. 56~59は、流れの先頭から100個ずつの平均粒径を①初期状態、②Case 5.2の解析終了時、③Case 5.4の解析終了時、④Case 5.6の解析終了時の4種類について描いてみたものである。図の中の点線は最小二乗法で求めた回帰直線で、この直線が左下がりなら先頭に向うほど粒径が小さいということになる。Fig. 56の初期状態の場合をみると、回帰直線は左下がりにはなっているが、各プロットとは相当の距離をもっている。初期状態では各粒子の座標位置と半径をランダムに与えたので当然の結果である。Fig. 57のCase 5.2では、回帰直線こそ左上がりになり、先頭へ向うほど粒径は大きいと云うことになるが、直線と各プロットとの距離はかなり離れているので、粒径の大きなものが流れの先端に移動したと一概に言うことはできない。Fig. 58のCase 5.4では、回帰直線は初期状態に比べ大きく左上がりになり、各プロットもこの直線に沿ったかたちとなっている。つまり初期状態から解析終了までの間に流れの中の粒径分布が変わり、粒径の大きなものが先頭の方に集まってきたことが分かる。Fig. 59のCase 5.6では、回帰直線は前のCase 5.4の場合ほど左上がりには傾いてはいないが、ある程度左上がりになり、各プロットも沿っているので、先端部分に粒径の大きな粒子が集

まってきたことが分かる。以上の Fig. 56~59 回帰直線をまとめて描いたのが、Fig. 60 である。3種類のケースとも初期状態に比べて、先端部分に向うほど粒径が大きいという傾向はみせているが、Case 5.4 が最も傾きが急である。Case 5.2 と Case 5.4 とは、内部要素および壁要素とも全く同じモデルで、解析に用いた DEM プログラムにおいて、水の影響を考慮したか否かの違いである。全体の平均流速は Fig. 42 から分かるように、Case 5.4 の方が Case 5.2 より遅い。しかし、Fig. 37 と Fig. 33 の各流速分布の図をみると、高さの高い部分と低い部分の速度の差、つまり流れの上下層の相対速度が Case 5.4 の方が大きい。第2章の2-4 ページに述べたような、ダイラタント流体モデルによって、巨礫の輸送機構を説明すれば、この相対速度が大きいほど、巨礫は流れの表面上に現われやすくなり、表面付近の流速は底面付近より速いので、先端部分に集まると言うことになる。よって、Case 5.4 の方が粒径の大きな粒子が先端部に集まるという結果が理由付けられる。また、ダイラタント流体モデルによれば、巨礫の輸送機構は粒子同士の衝突によって生じるので、粒子がばらばらになる Case 5.2 の方がこの機構が生じにくいのも理解できる。

本章『斜面を用いての岩屑流・土石流の解析』では、岩屑流と土石流という二種類の流体を解析したと言うことが出来る。

《岩屑流》の解析では、次のような結果を得ることが出来た。

- ①流れの先端部分への巨礫の移動 (Case 5.2)
- ②山崩れの時に起こる火花の現象 (Case 5.2)
- ③厚さが一定となる定常な流れ (Case 5.3)
- ④流速分布の妥当性 (Case 5.3)
- ⑤先端部での石礫の巻き込み現象 (Case 5.3)

《岩屑流》は粘性のない大変形をとまなう流動現象である。既往の DEM を用いてこのような現象の解析を行なった例は、過去に於いて殆どなかったが、上記の結果からこのような流体への DEM の適応性が認められたことになる。

一方《土石流》の解析では、次のような結果を得ることが出来た。

- ①流れの先端部への巨礫の集中 (Case 5.4)
- ②粒子間に粘性抵抗を持った流れ (Case 5.4)
- ③粒子が斜面に衝突する時の水のクッション (Case 5.4)
- ④流速に限界値がある。(Case 5.4)
- ⑤速度の方向に乱れがない。(Case 5.4)
- ⑥凹凸に沿った流れ (Case 5.4)
- ⑦擁壁付近での流れの跳ね返り現象 (Case 5.5)
- ⑧擁壁付近での流れと流れの衝突現象 (Case 5.5)
- ⑨先端部での石礫の巻き込み現象 (Case 5.6)

《土石流》は石や礫などの固体と泥水との混合物であるので、水の影響を考慮した DEM を用いたのだが、この DEM は水を媒介とした粒状体間の相互干渉項を含んでいるので、粒子間に粘性をもたらすことになる。上記の結果を得たことから改良した DEM の粘性流体への適応の可能性が認められたことになる。

以上より非粘性流体および粘性流体、つまり流体全体への DEM の適応の可能性が得られたことになる。今回はこの解析の応用例として、今まで容易に説明することが出来なかった土石流の衝撃力や堆積の解析を行なったが、その結果に於いても信頼性のあるものを得ることができ、さらにこの解析の妥当性を証明した。

尚、CPU タイムは、各ケースによって少し違うが 0.5 秒分の解析で、HITAC M-280H (17 MIPS, 16MB) を用いて 60 分位であった。

6. 振動を用いての岩屑流の解析

6.1 解析モデルの説明

本章でのモデルは、岩屑流を進行方向と垂直に切った断面をイメージした横断面モデルである。岩屑流の流れてくる谷は、左右には蛇行し上下には凹凸がある。本章の解析は、これらの変化を粒子が入っている器を上下左右に揺らすことで表わし、器の中の粒子がどのような状態になるかをみるものである。

石礫を入れる器（壁要素）は Fig. 61 に示すように、下辺が 10 m の台形の器を用意した。半径は 10 cm である。そして、その中に『3.8 パッキングの方法』に述べたようにして要素を配置した。要素の半径は Table 10 に示すように、最大 29.6 cm・最小 8.0

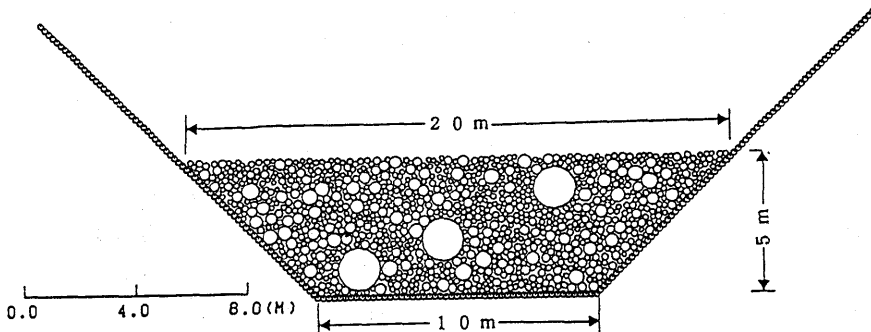


Fig. 61. Assembly model of cross-sectional debris flow under shaking.

Table 10. Assembly element data.

Number of particles with log-normally distributed radius		997
Radius of particles	Maximum	29.6 cm
	Minimum	8.0 cm
	Average	11.3 cm
	Deviation	5.12
Number of great rock pieces		3
Radius of great rock piece		75.0 cm

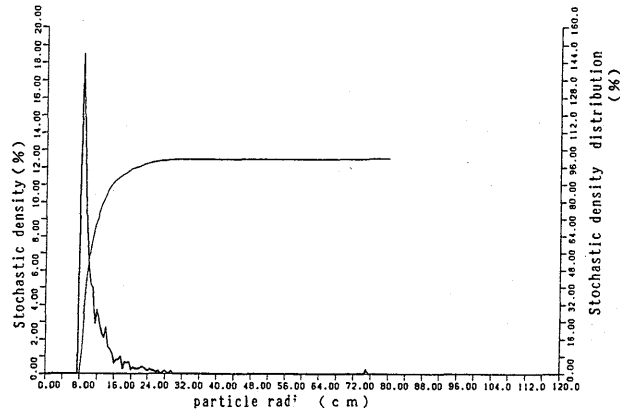


Fig. 62. Stochastic density distribution of particle radius.

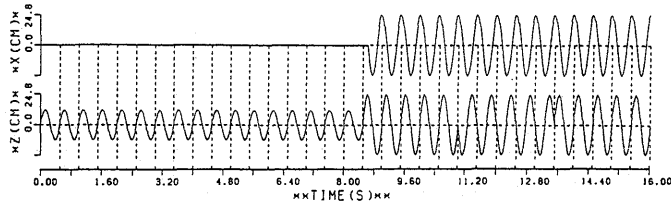


Fig. 63. Input sinusoidal displacement to sand box.

Table 11. Simulation parameters.

k_n	9.0×10^6	(N/m)
k_s	3.0×10^6	(N/m)
η_n	2.0×10^3	(N sec/m)
η_s	1.0×10^3	(N sec/m)
ρ_s	2.5×10^3	(kg/m ³)
Δt	2.5×10^{-4}	(sec)
e	0.05	
μ	0.1	

cm・平均 11.3 cm・分散 5.13 であり、その確率密度分布は Fig. 62 に示した。要素数は 997 個である。また、巨礫の挙動をみるために半径 75 cm の要素を 3 個その中に配置した。このモデルを Model rock 3 とする。

解析手法は、台形の器を正弦波によって上下左右に動かし、中に入っている粒子がどのような挙動を示すかをみるものである。入力した正弦波は、Fig. 63 に示した。上下方向を Z 軸、左右方向を X 軸としている。最初の 8.5 秒間は Z 軸方向だけに、最大加速度 $2G$ ($G=9.8 \text{ m/s}^2$) で周期が 0.5 秒の正弦波を入力した。8.5 秒以後は、Z 軸方向の最大加速度を $4G$ とし、X 軸方向にも同じ最大加速度・周期の正弦波を 4 分の 1 周期ずらして入

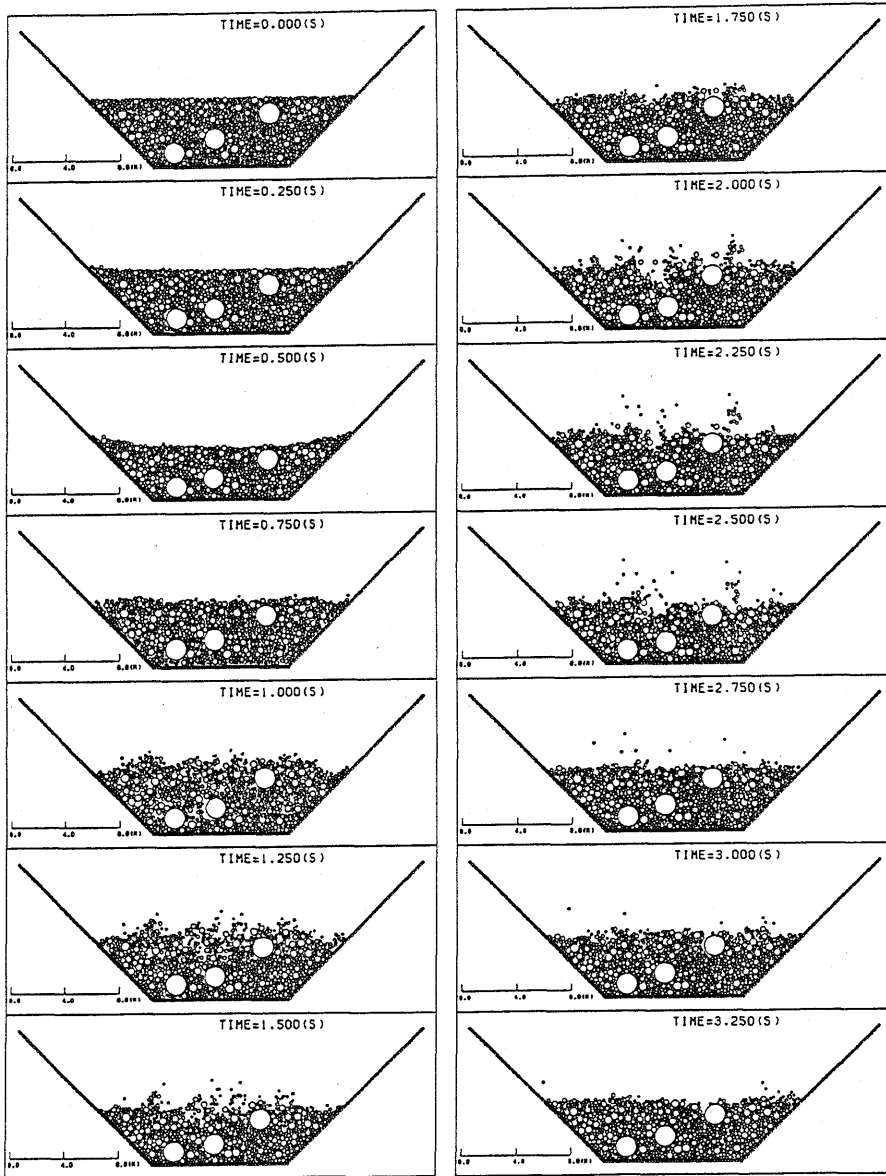


Fig. 64.1. Shaking of cross section of dry avalanche (1) (0.0s~3.25s).

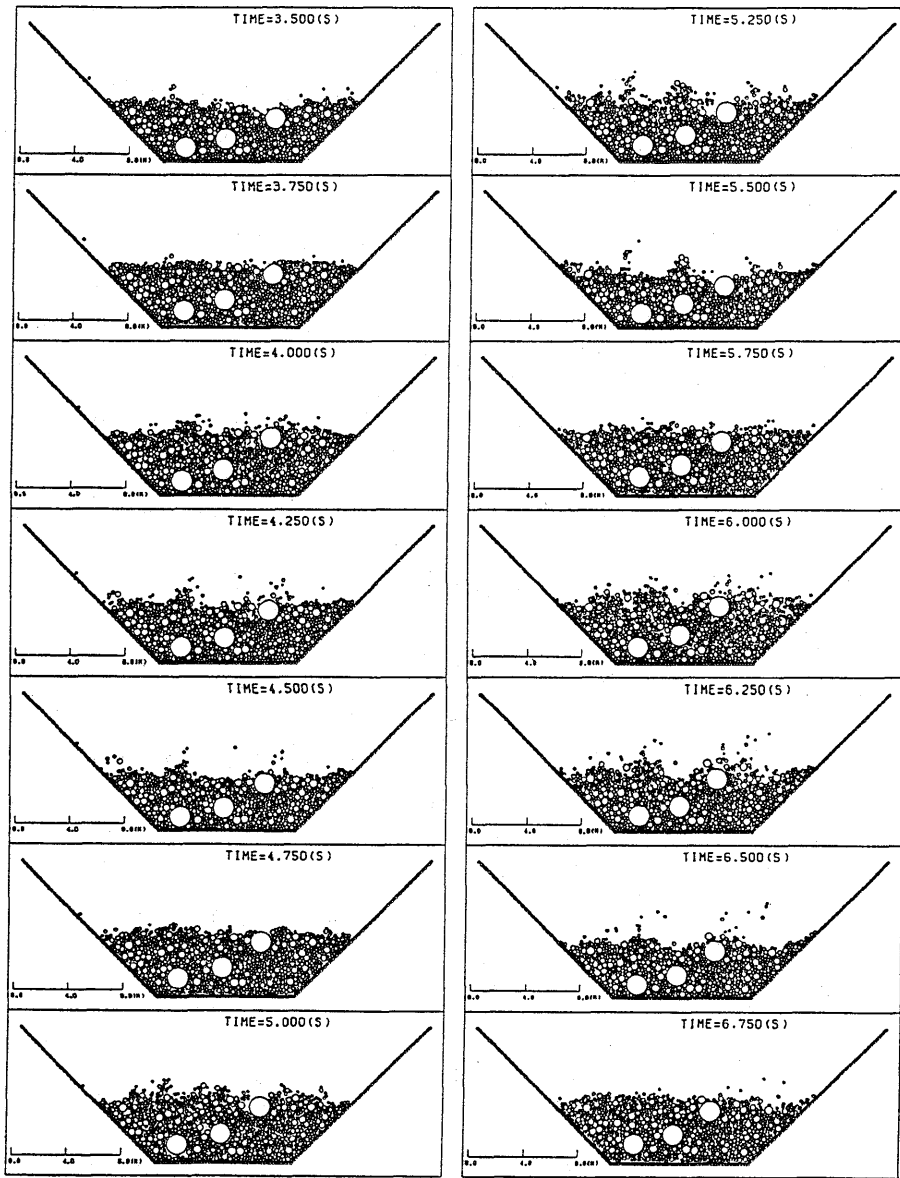


Fig. 64.2. Shaking of cross section of dry avalanche (2) (3.5s~6.75s).

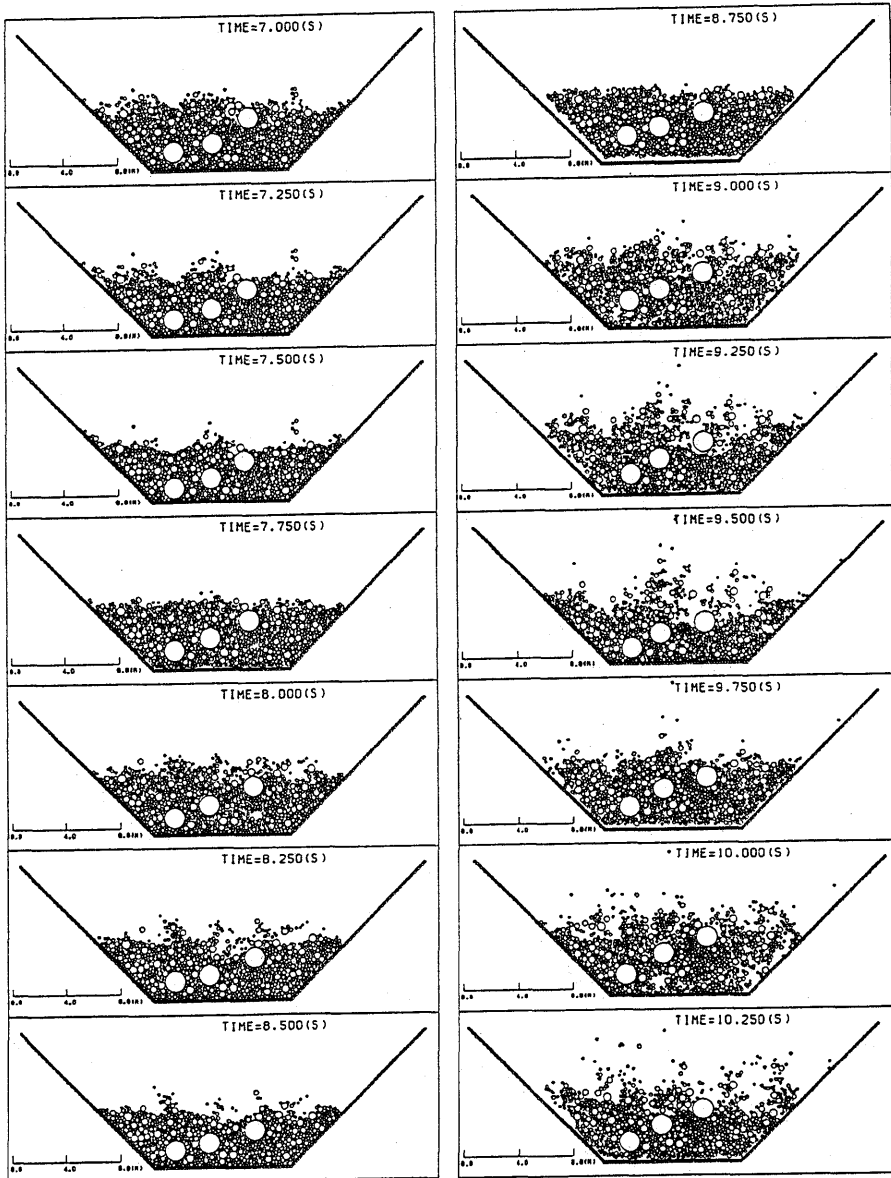


Fig. 64.3. Shaking of cross section of dry avalanche (3) (7.0s~10.25s).

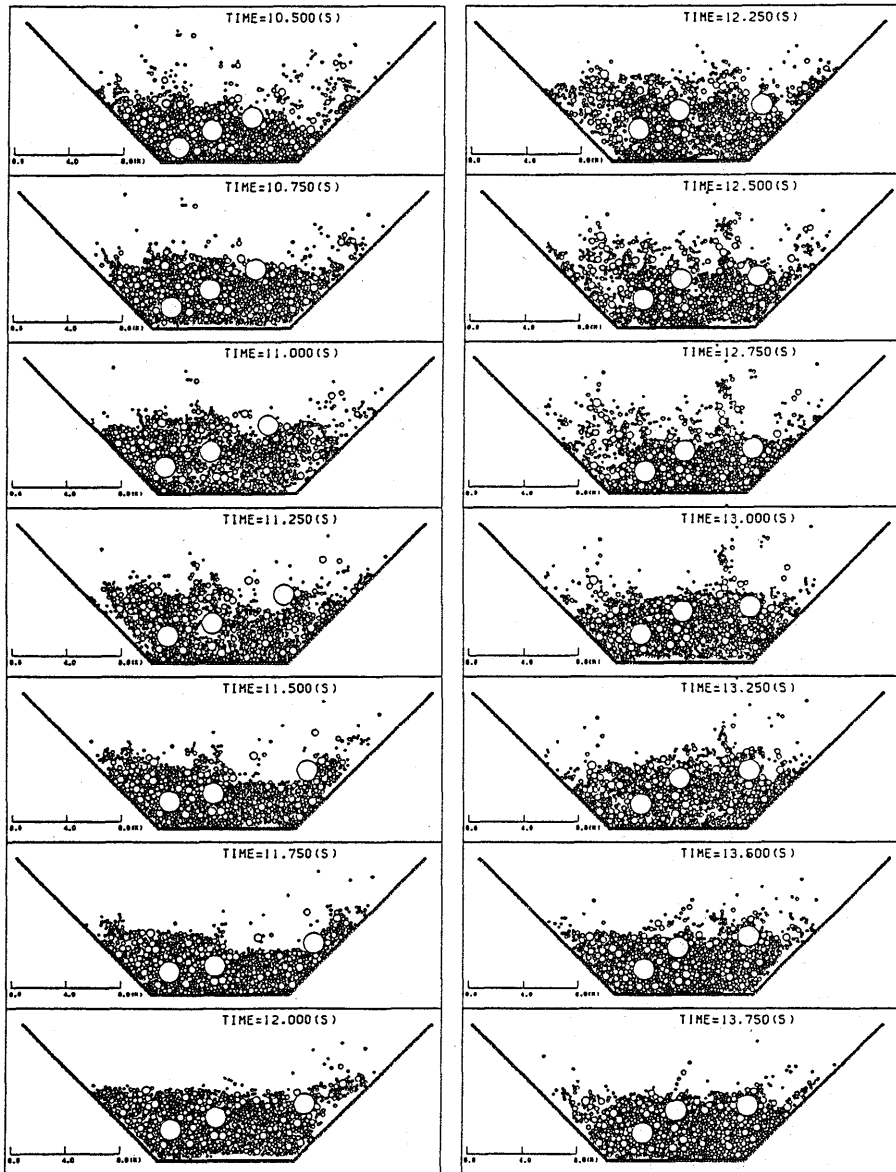


Fig. 64.4. Shaking of cross section of dry avalanche (4) (10.5s~13.75s).

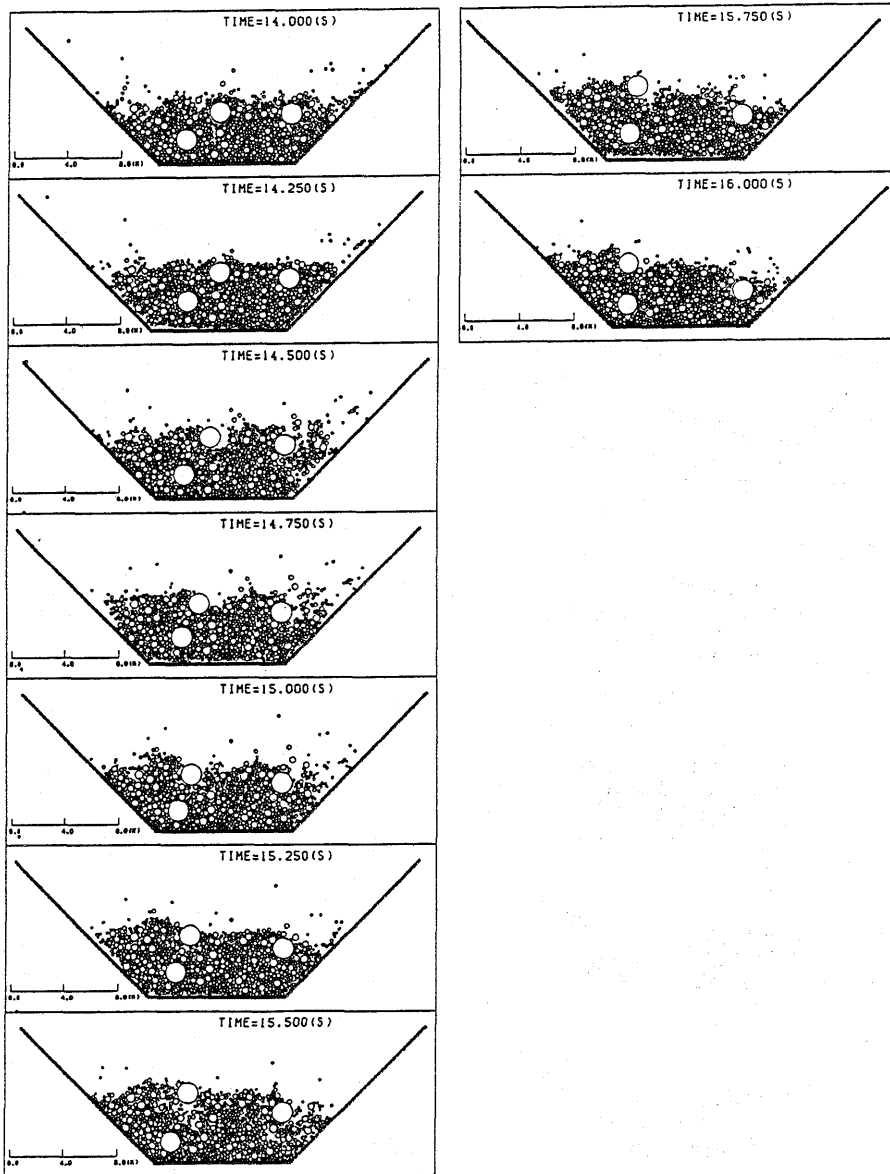


Fig. 64.5. Shaking of cross section of dry avalanche (5) (14.0s~16.0s).

力した。したがって、粒子を入れた器は時計と逆回りに円を描いて動くことになる。11秒からはZ軸方向の入力波を2分の1周期ずらし、器は時計方向に円を描き、13.5秒からはまた元の反時計回りに動くようにした。この解析で用いたDEMのプログラムは水の影響を考慮していないもので、パラメーターはTable 11に示す。

6.2 解析結果

解析時間は、0.0秒から16.0秒までで、解析結果はその全体図を0.25秒おきにFig. 64.1~5に示す。また、3個の巨礫(半径:75cm)の上下方向(Z軸)の絶対座標を解析時間で追ってみた図をFig. 65に示す。以下、3個の巨礫を区別するために、初期状態(Fig. 61)において、一番低い位置にあるものを巨礫①、真ん中のものを巨礫②、一番高い位置にあるものを巨礫③とする。

Fig. 64.1~5を見てみると、0.5秒までは最初の粒子の配置において間隙が大きかったため、器の振動には関係なく中央部を中心に沈み込んでいる。ここで粒子の間隙が詰ったことにより、粒子はばらばらになったりまとまったりを繰り返す。4.0秒ぐらいになると、巨礫③が表面上に現われてくる。Fig. 65をみると、この粒子の絶対的な座標は最初の位置とそれほど変わっていないが、周りの粒子との相対的な位置関係により表面上に現われたのである。8.5秒からは入力波の最大加速度を4Gとし、X方向にも同じ波を入力したので、器が円運動を始め、中の粒子の挙動もそれまでのものより激しく動き、ほとんど上下方向にしか動いていなかった粒子は左右にも揺さぶられるようになった。10.5秒から11.75秒の間の巨礫①の挙動を見てみる。この巨礫はそれまで上に載っている粒子が多いためそれほど大きな動きはみられなかったが、10.75秒で上に飛び上がりその下には粒子の密度の薄い部分ができる。その部分に周りの小さな粒子が流れ込み、11.25秒ではこの

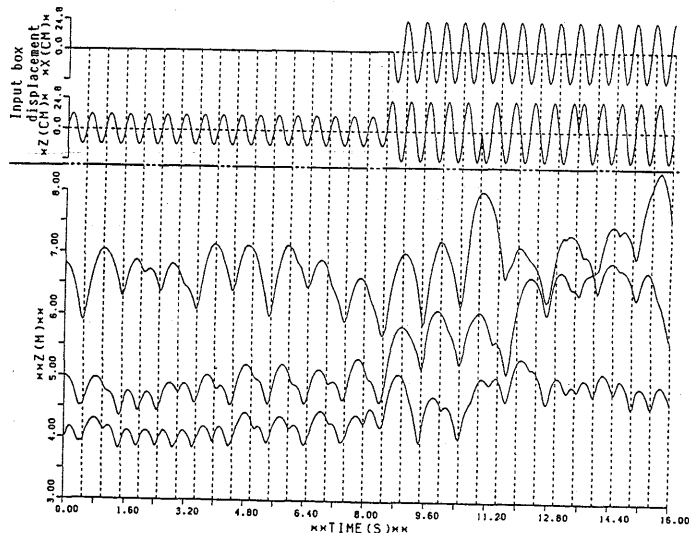


Fig. 65. Time histories of positions of great rock pieces.

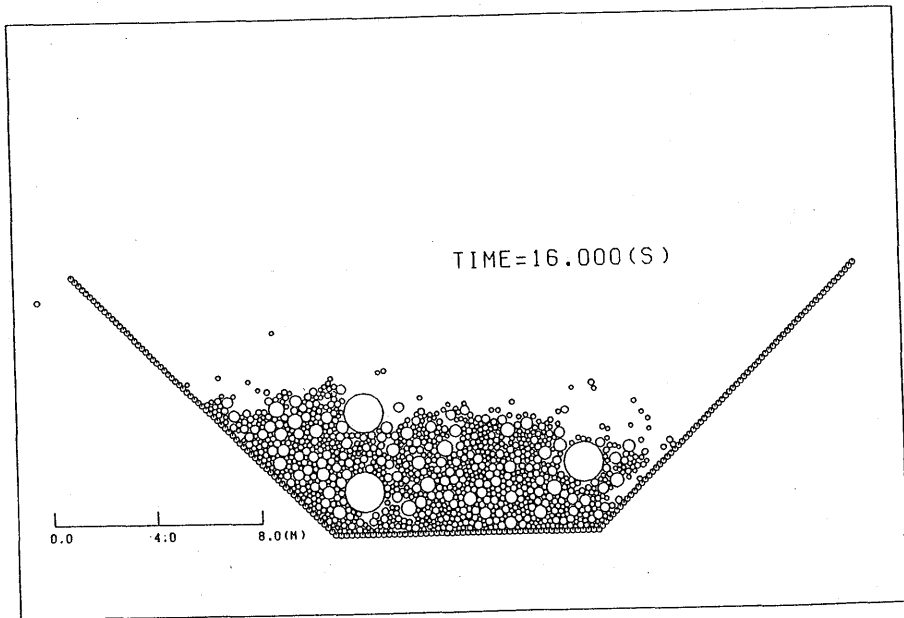


Fig. 66. Particle distribution at 16.0sec in shaking a box.

巨礫が下に行きにくい状態となっている。10.5秒と11.75秒を比べるみると、この巨礫の下部分は同じように詰まっているが、明らかに11.75秒の方が上に位置している。Fig. 65をみても上の方に移動しているのが分かる。巨礫②の上昇運動は明確である。Fig. 64.1~5の相対的な位置関係をもても、12秒ぐらいからは明らかに上方向に動き、14秒ではそれまで3個の巨礫の中で一番上に位置していた巨礫③とほぼ同じ高さになり、14.5秒からあとでは完全に表面上に頭をだし、巨礫のうち一番上に位置するようになっていく。Fig. 65でも、上昇運動は明らかで、特に入力波を大きくした8.5秒以後はその動きが顕著に現われている。巨礫③は、4.0秒ぐらいで表面に現われてから、再び粒子中に潜っていくという動きはみせず、11.5・11.75秒では、表面に載っているような状態もみ

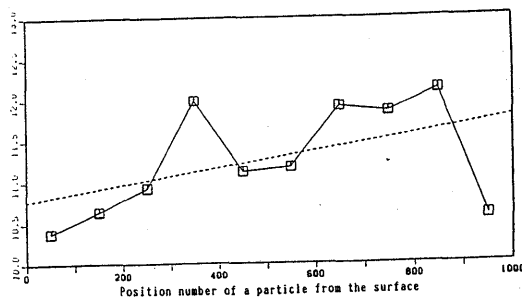


Fig. 67. Initial particle radius distribution of cross section assembly of dry avalanche.

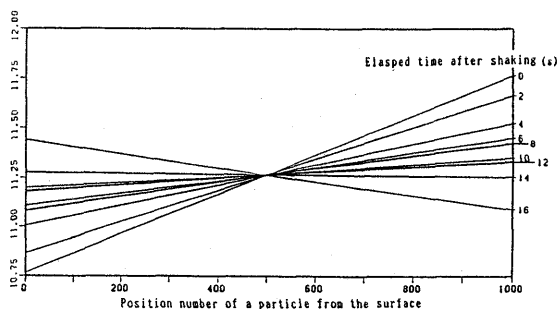


Fig. 68. Change of particle radius distribution dependent on shaking time.

せた。Fig. 65 をみると、振動によると思われる上下運動はあるが、全体的な傾向として上下に動いて行くという挙動はみられなかった。Fig. 66 には解析終了時 (16秒) の粒子の分布を示す。

Fig. 67 に本章で用いた石礫モデル (Model rock 3) の初期状態の粒径分布を示す。まず、この図の見方を説明する。Fig. 61 の石礫モデルは要素数が1000個である。この1000個の要素に Z 座標の大きい方から (Fig. 61 では上の方から) 順番に番号を付けていく。そして、1番から100番までの粒子の平均半径、101番から200番までの平均半径と、100番おきに1000番まで計算し、縦軸に平均半径・横軸に順位をとってプロットしたのが Fig. 67 である。したがって、一番左側のプロットは一番上にある粒子から100番目までの粒子の平均半径である。図の中の点線は、最小二乗法で求めた回帰直線で、この直線が左下がりなら、上にいくほど粒径の小さい粒子が集まっていることになる。Fig. 67 でも左下がりの直線になっているので初期状態では下より上の方に粒径の小さい粒子がたくさんあることが分かる。このようにして2秒おきに0秒から16秒まで粒径分布を求め、その回帰直線を一つの図にまとめたのが Fig. 68 である。図の右側に書いてあるのが解析時間である。この解析時間をみると上から順に、0, 2, 4, ..., 16秒と秒と並んでいる。つまり、器を揺らしている間に、中の粒子は、半径の大きいものは上へ、小さいものは下へ移動すると云う逆グレイディング現象 (inverse grading) が起こったことが分かる。

6.3 考察

本章での横断面モデルでは、半径の大きな粒子 (巨礫) は上へ、小さな粒子は下へ動くという逆グレイディング現象をみることができた。この現象は、第2章に述べたダイラタント流体モデルを用いて説明することはできない。なぜなら、ダイラタント流体モデルでは、巨礫が流れの主流方向へ移動することを仮定して説明しているが、この横断面モデルでは、巨礫の主流方向への移動は考えていないからである。この横断面モデルの巨礫の挙動を説明するためには、Naylor の動的篩い (Kinetic Sieving) (NAYLOR, M. A. 1980) と云う概念を用いることにする。この動的篩いというのは、大きな粒子の間隙が振動などによって広げられ、その間隙を小さな粒子が落下していき、逆グレイディング現象が起こるといえるものである。ただ、この動的篩い理論によれば、小さい粒子は落下はするが、大

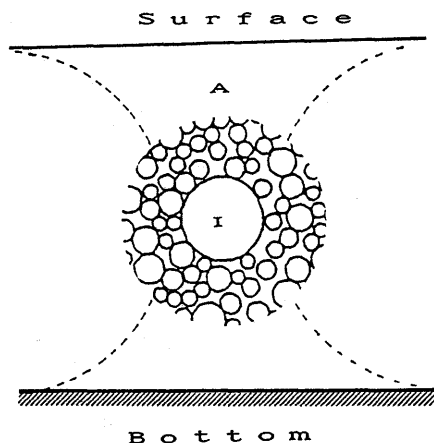


Fig. 69. Illustration of floating up process of a great particle.

大きな粒子が上昇する説明がつかない。大きな粒子の上昇する理由は、次のように考えた。Fig. 69 に示すように大きな粒子 I が上へ移動するためには A 領域の粒子全体を持ち上げる位の抵抗を受けるであろう。一方、下へ移動するためには、剛い底面があるので上に移動するより大きな抵抗を受けると思われる。結局、上に移動する方がどちらかという抵抗は少ない。したがって粒子は振動とか衝突とか何らかの外力によって抵抗力の少ない上方へ移動して行く。粒子が表面に近い所であれば、ある程、上方からの抵抗力は少なくなるから、それだけ浮上しやすい。極端な場合、表面に大粒子があれば、下からのみ抵抗を受けるので、自重はその抵抗力で支えられてしまい下方へは沈まない。ただし、以上の考え方は、大粒子の場合のみ成り立つもので小粒子の場合には、動的篩い理論により、粒子の間隙を下方へ沈下して行く事になる。

尚、CPU タイムは、0.25秒分の解析で、HITAC M-280H を用いて50分位であった。

7. 結 論

この章では、本論文に対する全体的な考察、および今後の展望や問題点などについて述べてみる。

本論文では、2種類のモデルについて解析した。一つは進行方向に対して平行な断面をイメージした縦断面モデル、もう一つは進行方向に対して垂直な断面をイメージした横断面モデルである。縦断面モデルによる『5. 斜面を用いての岩屑流・土石流の解析』では、既往のDEMを用いての《岩屑流》の解析と、水の影響を考慮したDEMを用いての《土石流》の解析を行なった。この二つの解析からDEMの非粘性流体への適応性、つまり流体全体への適応の可能性が証明された。横断面モデルによる『6. 振動を用いての岩屑流の解析』では、岩屑流中で大きな粒子は上へ、小さな粒子は下へと云う逆グレイディング現象 (inverse grading) についてシミュレーションすることが出来た。この2種類のモデ

ルは、共に2次元での解析である。今回は解析時間や結果の表現方法などの制約により3次元での解析は行なわなかったが、この2次元での解析を考え合わせることによって、3次元の土石流で起こるような先端部分に巨礫が集まる現象の発生機構について推察してみる。岩屑流・土石流中に巨礫が取り込まれると、縦断面モデルで取り入れた概念である“ダイヤラント流体モデルに於ける分散応力の作用”、または横断面モデルで取り入れた概念である“動的篩い (Kinetic Sieving) の作用” (表面の巨礫はスキーのように細粒中には潜らない) によって巨礫は表面に現われてくる。土石流の流体分布は、Fig. 32 の STAGE 4 や Fig. 36 の STAGE 5 に示したように、表面に近いほど速くなっている。したがって、表面に現われた巨礫は、流れの先端方向へ移動していく。流れの先端部分では、Fig. 33 で示したように、粒子を巻き込む現象が起きているので、巨礫は岩屑流・土石流中へ呑み込まれる。しかし、そこで周りの粒子よりも大きければ、再び表面上に現われ先端部分へ移動する。この様な過程を繰り返すうちに土石流中の巨礫は先端部分に集り、後続部にいくにつれて細かい粒子が集るようになるのである。

今回の解析では、第1に乾燥した岩石の集合である岩屑が水も無しに斜面の上を流体のように流れることが可能であるかを知ることが目的であった。その目的は30°という急勾配上であったが、流体のように流れ得るということが知られた。また、岩屑流・土石流の流れに力点を置いて一連の動きのシミュレーションを試みたのだが、岩屑流・土石流の発生機構については、十分にシミュレートすることが出来なかった。岩屑流・土石流の発生原因は、『2.2 岩屑流・土石流とは』で述べたように解明されているので、この原因をもとにDEMを改良しその機構をシミュレート出来れば、土石流の発生から堆積までの解析が可能となる。また、これからのコンピューターの進歩により3次元解析の問題点が解消されれば、今回のような解析を3次元で行なうことができ、分散応力の作用と動的篩いの作用のシミュレーションが同じモデルで出来ることになる。そうなれば、これらとは別の逆グレイディング現象の要因を見つけることが出来るかもしれない。

今回は、流れ自体の解析だけではなく、応用例として、『5.2.5 衝撃力解析』と『5.2.6 堆積解析』の2種類を行なってみた。この他、現在のDEMによって可能な応用例としては、土石流によって凸な部分が削られる様子を解析する「浸食解析」、家屋などを粒状体で作りこれに土石流の衝撃力を加え家屋が破壊する様子を解析する「破壊解析」などがある。

DEMのプログラムの中では、衝突の機構で基本的には弾性スプリングと粘性ダッシュポットからなるVoight型モデルを用いているが、これは非常に簡略化されたモデルである。CPUタイムの問題もあるので、あまり細かい衝突の機構を取り入れることは出来ないかもしれないが、効率的に実現に近い衝突の機構を組み込むことが出来れば、より正確なシミュレーションを行なうことが出来る。

以上、本論文の全体的な考察・今後の展望および問題点などについて述べてきたが、今回の解析結果により、DEMは土石流解析の新しい手法として効果的であることが分かった。今後のコンピューターの進歩により、DEMの計算領域は広がり汎用性を増すので、この解析法がどれほど発展していくかは分からないが、それが前進的であり、また今の時代にあった解析法であることは確かである。

参 考 文 献

- 芦田和男・高橋 保, 1983. 6, 土石流の実態とそのメカニズム, 土木学会誌, 2-17.
- 荒木一司・佐武正雄・岸野佑次, 1987, 任意方向荷重を受ける粒状体モデルの解析, 土木学会第42回
年次学術講演会概要集, III部門, 256-257.
- BAGNOLD, R. A., 1954, Experiments on a Gravity-free Dispersion of Large Solid Spheres
in a Newtonian Fluid under Shear, *Proc. Roy. Soc. London, A*, 49-63.
- CASAVARDE, A. L., K. IWASHITA, Y. TARUMI and M. HAKUNO, 1989, Granular Assembly
Simulation for Slope Slide, *Structural Eng./Earthquake Eng. Proc. of Japan Society
of Civil Engineers*, 6, No. 1, 131s-140s.
- CUNDALL, P. A., 1971, A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale
Movement in Blocky Rocksystem, *Symp. ISRM, Nancy, France, Proc.*, 2, 129-136.
- CUNDALL, P. A., 1974, Rational Design of Tunnel Supports—A Computer Model for Rock
Mass Behavior Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical
Data, Technical Report MRD-2-74, Missouri River Division, U.S. Army Corps. of
Engineers.
- CUNDALL, P. A. and O. D. L. STRACK, 1979, A Discrete Numerical Model for Granular
Assemblies, *Geotechnique*, 2, No. 1, 47-65.
- 伯野元彦・平尾寿雄, 1973, 粒状体のランダムパッキングに関する一つの試み, 土木学会論文報告集
219, 55-63.
- IWASHITA, K. and M. HAKUNO, 1988, Granular Assembly simulation for Dynamic Cliff
Collapse due to Earthquake, *Proc. 9th World Conf. on Earthquake Eng.*, III-175-
180.
- IWASHITA, K. and M. HAKUNO, 1990, Granular Assembly Simulation for Collapse of
Cohesive Materials, *Structural Eng./Earthquake Eng. Proc. JSCE* 7, No. 1, 133s-
142s.
- 川崎 了・木山英郎・藤村 尚, 1986, 楕円形要素の DEM 解析に関する検討, 土木学会第41回
年次学術講演会概要集.
- 岸野佑次, 1986, 粒状体の新しいシミュレーション解析法とその応用, 土木学会第41回
年次学術講演会概要集, III部門, 243-244.
- 岸野佑次, 1987, シミュレーションによる粒状体の散逸機構の解析, 土木学会第42回
年次学術講演会概要集, III部門 252-253.
- 木山英郎・藤村 尚・西村 強, 1982, Cundall モデルによる地表沈下の解析 —地下浅所のトン
ネル掘削に伴う地表沈下—, 土木学会第37回年次学術講演会概要集, III部門, 309~310.
- 木山英郎・藤村 尚, 1982, 岩質粒状体の重力流動に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, 322,
101-110.
- 木山英郎・藤村 尚, 1983, 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, 333, 137-146.
- MEGURO, K., IWASHITA, K. and M. HAKUNO, 1988, Fracture Tests of Masonry Concrete
Elements by Granular Assembly Simulation, *Proc. 9th World Conf. on Earthquake
Eng.* VI-181-186.
- 目黒公郎・伯野元彦, 1989, 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 地震研究
所彙報, 63, 409-468.
- MOGAMI, T., 1965, A Statistical Approach to the Mechanics of Granular Materials, *Soil
and Foundation*, 5, No. 2, 26-36.
- NAKAGAWA, M., 1987, Rapid Deformation of Granular Materials: Exact Binary Collision
Model, 土木学会第42回年次学術講演会概要集, III部門, 138-139.
- NAYLOR, M. A., 1980, The Origin of Inverse Grading in Muddy Debris Flow Deposits,
Review, *Jour. Sed. Petrology*, 50-4, 1111-1116.
- OKUDA, S., 1978, Mud-flow Dynamics, *Proc. of Symposium on Mudflow in Japan and
Indonesia*, 23-38.
- ROUND and NEWTON, 1963, Random Packing of Equal Spheres on a Plane Surface, *Nature*.

- 諏訪 浩, 1988, 土石流先端への大岩塊の集中機構, 地形, 9, 3, 151-178.
- TARUMI, Y. and M. HAKUNO, 1988, A Granular Assembly Simulation for the Seismic Liquefaction of Sand, *Structural Eng./Earthquake Eng. Proc. Japan Society of Civil Engineers*, 5, No. 2, 333s-342s.
- 武井有恒・水原邦夫, 1982, 8, 扇状地における土砂堆積の実態, 文部省科学研究費自然災害特別研究班研究成果, 扇状地における洪水・土砂災害の発生とその防止軽減に関する研究(研究代表者, 芦田和男).
- 内田吉彦・伯野元彦, 1988, 個別要素法による土石流のシミュレーション, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, II部門, 240-241.
- 内田吉彦・伯野元彦, 1988, 岩なだれのDEM解析, 第7回日本自然災害学会学術講演会要旨集, 28-29.
- UEMURA, D. and M. HAKUNO, 1987, Granular Assembly Simulation for Ground Collapse, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 62, 19-59.
- UEMURA, D. and M. HAKUNO, 1987, Granular Assembly Simulation with Cundall's Model for the Dynamic Collapse of the Structural Foundation, *Structural Eng./Earthquake Eng., Proc. Japan Society of Civil Engineers* 4, No. 1, 155-164.

*Analyses of Dry Rock Avalanches and Debris Flows
by Granular Assembly Simulation*

Yoshihiko UCHIDA

Central Japan Railway Company

Motohiko HAKUNO

Earthquake Research Institute

Slope slides, dry rock avalanches and debris flows frequently take place in mountainous areas following strong earthquakes. Various types of flow analysis have been done in the laboratory that are based on a continuous medium. But, as the rocks and soil which compose the slopes, and are contained in rock avalanches and debris flows, are discontinuous, not continuous materials, it is difficult to analyze their behavior correctly when continuous material is used.

The distinct element method (DEM), in which the medium is treated as an aggregation of individual particles, has been used in geotechnical engineering studies.

We have developed a modification of this method in which the effect of water present between particles is taken into account by the use of a resistance force proportional to the square of the relative velocity of the particles and have applied it to debris flow analysis.

By using the conventional DEM to analyze dry rock avalanches and the modified DEM for debris flows, we could follow their flow processes. In addition, we obtained simulation results that explain why the largest rocks float up to the flow surface and gather at the front of the flow.