

# 粒状体シミュレーションによる地盤の 動的破壊解析

—その 1—

地震研究所 岩下和義

(昭和63年3月29日受理)

## 要 旨

現在、地盤の動的解析の手法として、主に地盤を連続体と近似した解析法が用いられている。これらの手法は、破壊に至るまでの解析を主眼としており、破壊後の解析には多くの困難が伴い、土の非連続体に近い挙動を再現するにはきわめて不適當である。

これまでの DEM では、要素間は接触しない限り完全に不連続として取り扱われてきた。水分を含んだ砂や粘性土など一般的な土のマクロな挙動を、完全な非連続体で表すのは不適當である。そのため、DEM を地盤の解析手法に用いると多くの問題が生じる。例えば、初期条件としての力学的に安定したモデルの作製に長い時間がかかる。また、盛土やロックフィルダム、斜面といった不整形な形状のものは解析できない。土の粘性やロックフィル材料の噛みあいの効果を表せないからである。

本研究では、DEM を基に、要素間をつないでいる物質の効果を法線方向と接線方向の2本の間隙バネでとりいれた方法を提案した。これにより、地盤や土質材料の持つ連続体としての性質と非連続体としての性質の両方を表せることを示した。また、DEM で使用されるパラメータの決定法やパッキングの方法などを提案した。さらに、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3次元解析を実施した。

解析例として、2次元領域と3次元領域で崖の動的崩壊解析を行なった。崖モデルに亀裂が生じ、そこから要素がブロック状に崩れており、その後、支えを失った土塊がすべり線をつくって崩れている。間隙バネの分布図にはすべり線と亀裂、一体となった土塊がはっきりと表現された。間隙バネを設定することで、地山の破壊していない部分、破壊して崩れた部分や亀裂、すべり線を的確に表現することができる。この他各パラメータの影響も確認した。

これらの解析結果より、間隙バネを取り入れた DEM 解析法は、連続及び非連続な媒質の性質をともに扱えることがわかった。特に、従来は行えなかった地盤解析に効果的であることがわかった。また、3次元 DEM 解析が可能であることを示した。

## 1. 序

現在、地盤の挙動の動的解析の手法として、主に地盤を連続体と近似しての解析法 (FEM, BEM 等) が用いられている。これらの手法は、地盤等が破壊に至るまでの解析を主眼としており、破壊した後の解析には困難が伴う。

これに対して、媒質を粒状体の集合として取り扱う粒状体解析法が用いられるようになってきた。今までに粒状体解析法は、最上 (1969) の統計力学的手法を始めとしているものと提案されているが、シミュレーション手法としては、CUNDAL (1971) が提案した

DEM (Distinct Element Method) がある。DEM は地盤などの媒質を土砂や岩石といった非連続な要素（ブロック）からなる集合体と考えての非連続体解析法であり、各々の要素の運動方程式を考え、要素同士の接触点を通して力が伝達されるとして、各要素の挙動を動的に時間領域で追跡する手法である。この方法では、破壊の発生から進行に至るまでの連続的な解析が可能である。また、数値シミュレーションであるので、実験では再現できないような条件を容易に設定でき、欲しい情報を直接に取り出せるという長所をもつ。

最初、DEM は 2 次元で多角形要素を用いていたが、要素の接触判定が複雑であり、多くの情報を必要とするため、大規模なシミュレーションには向かなかった。その後、接触判定が容易な円要素を用いることが提案された (CUNDALL ら, 1979)。日本でも、木山・藤村ら (1982, 1983) 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、サイロ内の岩質粒状体の重力流動の解析などを行なった。また植村・伯野 (1986) は、乱雑な半径の要素を用い要素数を数千個に拡張し、土砂崩壊や地震時土圧の解析を行ない、ルシア・伯野 (1986) は、斜面崩壊の解析に応用した。さらに垂水・伯野 (1987) は、砂粒子レベルで間隙水の移動も考慮した DEM を用いて液状化解析を行なっている。

従来の DEM では、要素間は接触しない限り完全に不連続である。しかし、水分を含んだ砂や粘性土など一般的な土をマクロに考えると、完全な非連続体ではあられない。そのため、DEM を地盤の解析手法として用いる際には多くの問題が生じる。例えば、モデルを作成しても力学的に安定させる前処理に長い時間がかかる。また、盛土やロックフィルダム、斜面などの不整形な形状のモデルを作製できず、解析をおこなえない、ロックフィル材料の噛みあいの効果を表せないなどの問題を含んでいる。

また今までの DEM は 2 次元領域で定式化されているが、3 次元形状まで考えないと表せない問題も多い。

本研究では、DEM 解析法に剛体要素間の直接の接触による力の他に、要素間に働くつなぎの力の影響を法線方向と接線方向のバネにより表現し、つなぎの効果はひずみがある限界の値を越えれば破壊することで地盤のもつ連続的な性格と非連続的な性格の両方を表現する手法を提案する。また、DEM をベクトルを用いて定式化し 3 次元領域に拡張した球要素の DEM 解析も提案する。そして、2 次元領域で崖の進行性破壊の解析を試みる。

## 2. DEM による動的解析

### 2-1 DEM の修正

#### (1) ベクトルを用いた定式化

DEM は、変位増分を用いて定式化されているが、ベクトルを用いて定式化することもできる。この方が、3 次元への拡張にも向いていると思われる。そこで、2 次元でベクトルを用いた方法を提案する。ここでは、以前のタイムステップより接触している要素 I, J について具体的に示す。

Fig. 1 に示すように、片方の要素 I を基準とした要素 J の相対位置をベクトルとしてもちいる。時刻  $t - \Delta t$  の位置ベクトルを  $\vec{a}$ 、時刻  $t$  のものを  $\vec{b}$  とする。  $\Delta t$  の間の要素 J の

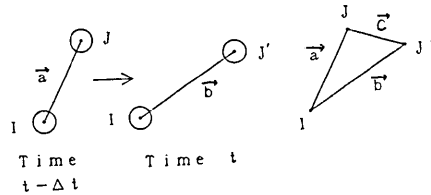


Fig. 1. Relative displacement between element I and J during sample time  $\Delta t$ .

移動  $\vec{c}$  は,

$$\vec{c} = \vec{b} - \vec{a} \tag{2.1}$$

で表される. ベクトル  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  からなる角を  $\theta$  とすれば,

$$|\vec{a}| |\vec{b}| \cos \theta = a_1 b_1 + a_2 b_2 \tag{2.2}$$

という関係があるので, 余弦  $\cos \theta$  がもとまる.

$$\cos \theta = \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \tag{2.3}$$

Fig. 2 に要素 I, J の位置の変化を示す. 1 ステップ前よりも接近する場合と, 離れる場合がある.  $\vec{c}$  を,  $\vec{b}$  と平行な成分  $\Delta \vec{u}_n$  と垂直な成分  $\Delta \vec{u}_s$  とに分離して考える.

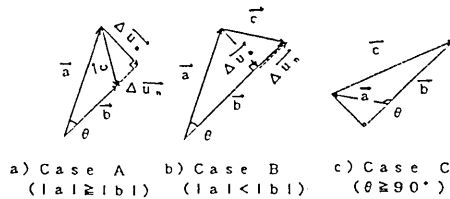


Fig. 2. Components of relative displacement between elements I and J.

$$\vec{c} = \Delta \vec{u}_n + \Delta \vec{u}_s \tag{2.4}$$

つまり,  $\Delta \vec{u}_n$  は法線方向の,  $\Delta \vec{u}_s$  は接線方向の相対変位ベクトルの増分である. ここで, Fig. 2 からわかるように以下のような関係がある.

$$|\vec{b} - \Delta \vec{u}_n| = |\vec{a}| \cos \theta \tag{2.5}$$

要素 I, J が離れる場合, つまり Case A では,

$$|\vec{b} - \Delta \vec{u}_n| < |\vec{b}| \tag{2.6}$$

では,  $\vec{b}$  と  $\Delta \vec{u}_n$  は同じ向きとなり,  $\Delta \vec{u}_n$  は以下の式で求まる.

$$\Delta \vec{u}_n = \frac{||\vec{b} - \Delta \vec{u}_n| - |\vec{b}||}{|\vec{b}|} \vec{b} \tag{2.7}$$

要素 I, J が近づく場合, つまり Case B では,

$$|\vec{b} - \Delta\vec{u}_n| > |\vec{b}| \quad (2.8)$$

では,  $\vec{b}$  と  $\Delta\vec{u}_n$  は逆向きとなり,  $\Delta\vec{u}_n$  は以下の式で求まる.

$$\Delta\vec{u}_n = -\frac{|\vec{b} - \Delta\vec{u}_n| - |\vec{b}|}{|\vec{b}|} \vec{b} \quad (2.9)$$

$\Delta\vec{u}_s$  は (2.1) と (2.4) より求まる.

$$\Delta\vec{u}_s = \vec{c} - \Delta\vec{u}_n = \vec{b} - \vec{a} - \Delta\vec{u}_n \quad (2.10)$$

法線方向及び接線方向の相対変位ベクトル  $[\vec{u}_n]_t$  と  $[\vec{u}_s]_t$  は, 以下の式で求まる.

$$[\vec{u}_n]_t = [\vec{u}_n]_{t-\Delta t} + \Delta\vec{u}_n \quad (2.11)$$

$$[\vec{u}_s]_t = [\vec{u}_s]_{t-\Delta t} + \Delta\vec{u}_s \quad (2.12)$$

尚, 今回のタイムステップで初めて, 接触した場合には, 以下のように考える.

$$[\vec{u}_n]_t = -\frac{|r_i + r_j - |\vec{b}||}{|\vec{b}|} \vec{b} \quad (2.13)$$

$$[\vec{u}_s]_t = \vec{0} \quad (2.14)$$

接触が切れた場合には, 以下のようにする.

$$[\vec{u}_n]_t = \vec{0} \quad (2.15)$$

$$[\vec{u}_s]_t = \vec{0} \quad (2.16)$$

力と変位の関係は, 法線方向の弾性バネの力を  $\vec{e}_n$ , 粘性ダッシュポットの力を  $\vec{d}_n$  とすれば以下のようになる.

$$\vec{e}_n = k_n [\vec{u}_n]_t \quad (2.17)$$

$$\vec{d}_n = \eta_n \frac{[\vec{u}_n]_t}{\Delta t} \quad (2.18)$$

時刻  $t$  における 2 要素間の法線方向の力  $\vec{f}_n$  は, 以下のようになる.

$$\vec{f}_n = \vec{e}_n + \vec{d}_n \quad (2.19)$$

Fig. 2 の Case C のように,  $\theta$  が  $90^\circ$  より大きい場合には別の場合分けが必要になるのだが,  $\Delta t$  の間に大きく変形するのは許さないことにし, 考慮しないことにする. (2.3) で  $\cos \theta$  を求めているので, もし  $\Delta t$  が大きくて 1 回の変形量が大きすぎる場合には, その旨のメッセージを出し, 解析をストップするようにしている. その場合は,  $\Delta t$  を小さくして再び解析すればよい.

以上は, 要素の回転を考えない場合である. 次に回転について示す. Fig. 3 のように要素 I, J の相対位置ベクトル  $\vec{b}$  と X 軸のなす角を  $\alpha$  とすると, 反時計方向の接線方向

単位ベクトル  $\vec{s}$  は以下の式で表される.

$$\vec{s} = (-\sin \alpha, \cos \alpha) \tag{2.20}$$

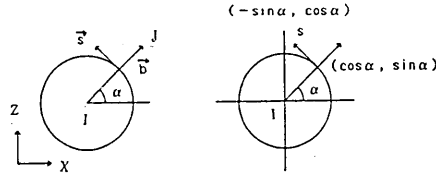


Fig. 3. Unit vectors in normal and tangential directions at the contacts.

Fig. 4 のように、回転の効果を  $\vec{s}$  方向の並進運動に置き換えて考える。要素の回転の影響は、要素の接線方向だけに働くとする。そこで、法線方向の関係は、回転を考えない場合と同じになる。回転による接線方向の相対変位の増分を  $\Delta \vec{u}_r$  で表すと、以下のようになる。

$$\Delta \vec{u}_r = r_j \cdot \Delta \theta \cdot \vec{s} - r_i \cdot \Delta \theta \cdot \vec{s} \tag{2.21}$$

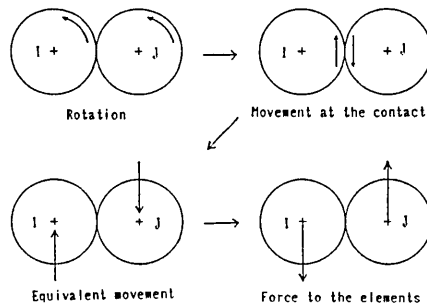


Fig. 4. The relation of particle rotation and force to the elements.

接線方向の相対変位増分  $\Delta \vec{u}_{sr}$  は、並進運動による増分  $\Delta \vec{u}_s$  と回転運動の  $\Delta \vec{u}_r$  の和となる。

$$\Delta \vec{u}_{sr} = \Delta \vec{u}_s + \Delta \vec{u}_r \tag{2.22}$$

時刻  $t$  での接線方向の相対変位は以下の式で求められる。

$$[\vec{u}_{sr}]_t = [\vec{u}_{sr}]_{t-\Delta t} + \Delta \vec{u}_{sr} \tag{2.23}$$

弾性バネの力  $\vec{e}_{sr}$  と粘性ダッシュポットの力  $\vec{d}_{sr}$  は、以下のようになる。

$$\vec{e}_{sr} = k_s [-\vec{u}_{sr}]_t \tag{2.24}$$

$$\vec{d}_{sr} = \eta_s \frac{[\vec{u}_{sr}]_t}{\Delta t} \tag{2.25}$$

摩擦力の制限を考え、以下の条件を加える。

$$|\vec{e}_{sr}| > \mu |\vec{e}_n| \quad \text{のとき} \quad \vec{e}_{sr} = \frac{\mu |\vec{e}_n|}{|\vec{e}_{sr}|} \vec{e}_{rs} \quad (2.26)$$

以上より時刻  $t$  における 2 要素間のせん断方向の力  $f_{sr}$  は以下のようになる.

$$\vec{f}_{sr} = \vec{e}_{sr} + \vec{d}_{sr} \quad (2.27)$$

要素にかかる力の総和は, 以下のようになる.

$$\vec{F}_i = \sum_j \vec{f}_n + \sum_j \vec{f}_{sr} - m_i g(0, 1) \quad (2.28)$$

$$\vec{F}_j = -\sum_i \vec{f}_n - \sum_i \vec{f}_{sr} - m_j g(0, 1) \quad (2.29)$$

ここで,  $m_i g(0, 1)$ ,  $m_j g(0, 1)$  は重力が Z 方向にかかることを示している. 回転を考えない場合には, 上式の  $\vec{e}_{sr}$  の項を  $\vec{e}_s$  で置き換えればよい.

接線方向の力による要素 I, J のモーメントを  $Fm_i$ ,  $Fm_j$  とする. Fig. 5 に示すように, 要素 I にとり  $\vec{f}_{sr}$  が時計方向の場合,

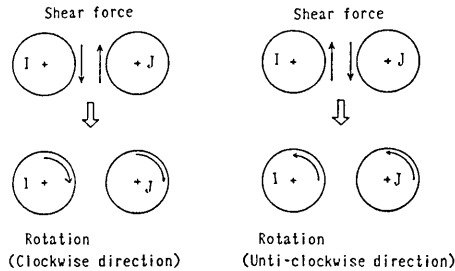


Fig. 5. Particle rotation due to shear force at the contacts.

$$Fm_i = -\sum_j |\vec{f}_{sr}| \cdot r_i \quad (2.30)$$

$$Fm_j = -\sum_i |\vec{f}_{sr}| \cdot r_j \quad (2.31)$$

反時計方向の場合,

$$Fm_i = \sum_j |\vec{f}_{sr}| \cdot r_j \quad (2.32)$$

$$Fm_j = \sum_i |\vec{f}_{sr}| \cdot r_j \quad (2.33)$$

要素と壁の接触についても同様に求まる.

## (2) 運動エネルギーの消費

一般的に物質が衝突をする際に, 様々な形で運動エネルギーが消費される. たとえば, 要素の接触点付近が粉碎される, 要素が二つに割れる, 非弾性衝突をする, などのためにエネルギーが消費される. この効果を反発係数に置き換えて DEM 解析に取り入れる.

本来は, 衝突の前後の速度で考えなければならないのだが, 多数の要素を扱い, 厳密に求めることは不可能なので, 以下の方法を便宜的に用いた. 2つの要素が接触している間

は完全弾性体の挙動をすると考え、離れるまでにはエネルギーの消費は生じないことにする。そして要素の接触がはずれた時に速度を小さくすることで、まとめて運動エネルギーの消費を考慮する。

Fig. 6 に示すように要素 I, J の接触がはずれたタイムステップにおける相対速度ベクトル  $\vec{v}$  を  $\vec{b}$  と平行な成分  $\vec{v}_n$  と垂直な  $\vec{v}_s$  とに分離する。

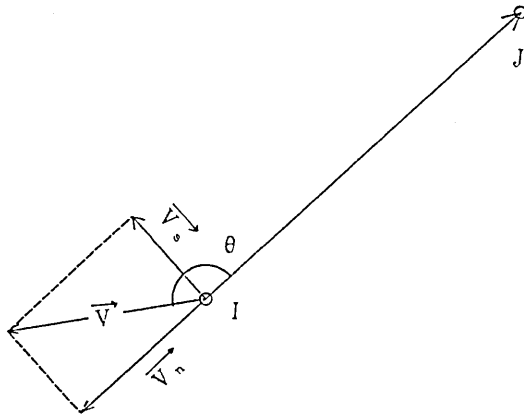


Fig. 6. Components of relative velocity vector between I and J.

$$\vec{v} = \vec{v}_n + \vec{v}_s \tag{2.34}$$

$\vec{b}$  と  $\vec{v}$  のなす角を  $\theta$  とすると、 $\vec{v}_n$  の長さは、

$$|\vec{v}_n| = |\vec{v}| \cdot \cos \theta \tag{2.35}$$

これより、 $\vec{v}_n$  と  $\vec{v}_s$  を以下のように求める。

$$\vec{v}_n = \frac{|\vec{v}_n|}{|\vec{b}|} \cdot \vec{b} \tag{2.36}$$

$$\vec{v}_s = \vec{v} - \vec{v}_n \tag{2.37}$$

弾性体の衝突の際に反発係数の影響を受けるのは、衝突方向の速度成分である。そこで、速度  $\vec{v}$  のうち  $\vec{v}_s$  は衝突の前後で変化がないとし  $\vec{v}_n$  のみが変わるとする。反発係数を  $e$  とし、衝突後の速度を  $\vec{v}'$ ,  $\vec{v}'_n$  とすると、

$$\vec{v}'_n = e \cdot \vec{v}_n \tag{2.38}$$

$$\vec{v}' = \vec{v}'_n + \vec{v}_s \tag{2.39}$$

以上より、衝突後の速度  $\vec{v}'$  が求まる。尚、ここで考慮しなかった接線方向成分  $\vec{v}_s$  も、要素の衝突中に摩擦力の上限を越えた場合にはすべりを生じてエネルギーを失っている。

以上の方法では、運動量保存則を考えていない。接触している要素が2つとか3つ4つなど少ない場合には、場合分けをして質量を求め、運動量保存則と弾性体衝突の式の双方を成り立たせることができる(垂水ら, 1987)。しかし、大きな塊から1つの要素がはずれる等の一般的な場合を総合的に扱うことは困難である。そこで、以上のような方法を便

宜的に用いることにした。一般に物体がなんらかの変形をする際には必ずエネルギーの消費を伴っている。DEMでのモデルの変形とは、要素が動き、接触状態が変わることである。そこで要素が他の要素との接触を切るたびに速度を変えることで運動エネルギーの消費を表すことにする。運動量保存則を考慮していない方法ではあるが、要素のパッキングのように早く安定させたい場合や、大変形問題、材質の非線型性の強い問題などに用いることができる。

本研究では、基本的には、運動量保存則も成り立たせる方法を用いている。そして、パッキングの際などに上記の方法を用いることにする。

## 2-2 パッキングの方法

粒状体解析を行うためには、まず解析用のモデルを作成する必要がある。有限要素法における要素分割と同様な前処理といえる。DEMでは、要素を解析対象の領域にあわせて、必要な形状に詰め(パッキング)、成形することでモデルを作成する。まず長方形もしくは直方体の領域に粒子を配置し、不要な要素を取り除いてモデルを作成する。本研究では、DEM要素に円体と球体を用いる。円もしくは球の半径が一定の場合とそうでない場合で粒子の配置の方法は違って来る。半径が一定でない場合にはランダムパッキングする必要がある。等半径要素の場合は、幾何学的に配置することもランダムに置くこともできる。まずランダムパッキングについて考察する。

伯野・平尾(1973)は粒状体のランダムパッキングの方法を以下のように分類している。

1. 棄却法 (rejection method)
2. 局所移動法 (method of local displacement)
3. 割込法 (intrusion method)
4. 落下法 (method of falling particles)
5. 成長法 (method of particle growth)

1の棄却法は、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である。2の局所移動法は、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である。3の割込法は、液体シミュレーションのためにROUND and NEWTON(1963)が用いた方法である。4の落下法は、粒子を格子状に配置してから重力をかけて粒子を下におとすという方法である。5の成長法は、ランダムを中心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である。

落下法は、DEM解析のプログラムをそのまま変更なしに用いることができる長所がある。また土の生成や、構造物(ロックフィルダム、盛土等)の建設など実際の現象にも近いと思われる。モデル内部の力の状態、静止土圧の分布なども適切に表せられると思われる。以上の理由より、本研究では落下法を用いることにする。

実際の落下法によるパッキングを説明する。粒子の中心を格子状に決め、つぎに半径を乱数的に与える。本研究では粒径分布を対数正規分布で表すことにする。

モデルに重力を作用させDEM解析を行う。粒子はポテンシャルの低い方へ移動つまり落下していき領域の下の方にだんだんたまっていく。粒子同士が衝突する際には、非弾性



衝突として反発係数をあたえ、エネルギーが消費されるとする。また粒子の接触点のダッシュポットによりエネルギーが消費される。このためだんだんとモデルは安定化に向かっていく。

こうして落下法により作られたモデルは、まだ空隙が多く、外力を加えなくても動いてしまい、解析の際にノイズを発生してしまう。故にモデルをより安定させる必要がある。そのためには現実の地盤改良法と同様な方法を用いることができる。ここでは粒子の配置をより安定させるために振動外力を用いてモデルを締め固める方法を用いる。これを振動法によるパッキングと呼ぶことにする。

落下法の問題点として、粒子の数が多き場合、最初上のほうの格子に配置した粒子が落ちていき、それ以上動かなくなり安定するまでに時間がかかることがあげられる。解決法としては、粒子を格子状に配置した際に、水平方向に何段も壁を設定しておき、その壁に落下させ、少し落ち着いた後、壁の数を減らし、すきまが無くなるように粒子を平行移動し、再び重力をかけ落下させる。そして一番下の壁にたまるまで繰り返す。この改良により、大量の粒子のパッキングが、少し早く行えるようになる。

粒子モデルの縮尺を変える場合、たとえば砂質土としてパッキングしたモデルをロックフィルとして用いたい場合など、粒子の半径と中心点の座標をある定数倍するだけでは、解析はうまくいかない。これは、粒子間の力は粒子の重なりで決めているためと思われる。大きい粒子を小さくする際にはまだ良いのだが、小さい粒子を大きくすると、粒子にかかる力が過大になり発散してしまう。これを避ける方法として、粒子の半径を少し変えるという方法がある。半径を操作して、重なりのないような粒子間距離にする。これにより発散させるような力は生じなくなる。それから重力を加えて安定させる方法である。これは一種の成長法といえよう。モデルを成形した後に、力の解放を行いたいときなどに用いることができる。2次元解析で重力が面外方向に作用する場合は、要素間に重力による力が作用していないモデルが必要である。落下法とこの成長法を併せて用いることにより力がかかっていないモデルを作成することができる。

等しい半径の粒子を幾何学的に配置する場合には、中心点を幾何学的に式で決めればよい。そのあと、重力を作用させた初期状態を得ることができる。この場合にも粒子配置の安定化のために振動法や成長法を用いることができる。

### 3. 要素間を填す物質の影響

#### 3-1 要素間を填す物質の影響

今までの DEM では、要素同士が接触しないと力が作用しない形になっていた。サイロの中のとらもろこしのような完全な非連続体では、この通りだと思われる。また、土質材料でも砂や礫などでは非連続体に近い挙動をするので、いままでの DEM で問題なく解析できると思われる。しかし、濡れた砂や粘土混じりの土など一般的な土質材料をマクロ的にみると、完全な非連続体として挙動していると考えるのは困難であり、DEM をそのまま適用するには無理があると思われる。

今までの DEM では以下のような問題が生じる。

土、とくに粘性の強い土はある程度まで引張りに抵抗できるが、DEM では引張りを考えていない。DEM のバネを圧縮時だけでなく、ある歪までの引張りに耐えられるようにしても、土の挙動をうまく表現できない。解析用のモデルがなかなか安定せず、いつまでも振動し続ける。このため、解析に至るまでの前処理に長い時間と手間がかかる。実際の土は、長い時間をかけて構造的にある程度安定した状態になっており、外力を加えて変位させようとすると思われすが、この効果を表せない。自然の崖は自立しているのに、DEM モデルで作る崖は自立しない。壁を用いてバックキングした後、壁を外して転がるように崩壊させる解析しかできない。振動外力などで安定していた崖が破壊するといった解析ができない。DEM モデルの一部が変位すると全体の配置も変わってしまう。これは、安定しないためであり、自然の土の挙動と異なる。

金属のように連続性の高い物質ではわざわざ DEM 解析法を用いる必要はない。逆に、コーンや大豆のような粒状体には、今までの DEM を用いて問題ない。DEM を改良して用いたいのは、両者の中間の範囲である。土は微視的に捉えると粒状体であるが完全な球体ではなく、媒質としては連続体と非連続体の両方の性質をそなえていると思われる。そこで、この方向で DEM の改良を考える。

接触時に作用する要素間のスプリングとダッシュポットはそのままにし手は加えない。そうでないと大変形時に挙動を追跡できなくなる。要素のバネを変化させるかわりに、新たに別のバネを導入することにする。土の粒子と粒子の間隙には、なにかつなぎの役をする物質があるため、全体としてある程度の連続性を持つと思われる。このつなぎの物質はより小さい粒子普通の土では粘土粒子や水分であると思われる。これらの効果を DEM に採り入れることにする。DEM モデルで、より小さな要素を大きな要素の間隙に設置することはできるが、つなぎの効果は表せないと思われるので、要素間に新たに力学モデルを導入し、この効果を表すことにする。

この新たに導入するスプリングによる力は、粒子レベルでの水分のメニスカス(吸着水)による吸着力や、粒子同志のかみ合わせによるひっかかり、光弾性実験で表れる接触点周囲の微小な領域が塑性化する効果、土粒子が集って形成するクラスター内の結合力やクラスター間のかみ合わせ効果等の表現にも応用できると思われる。

つなぎの物質の効果を表すための力学モデルは、いろいろ考えられる。粘土の挙動を表す力学モデルとして、スプリングとダッシュポット、スライダーを用いた Bingham モデルや、スプリングとスライダーからなる St. Venant モデルなどが適するといわれている(山口・西村, 1967)が、一番簡単にスプリングのみを用いることにする。

このスプリングは、線型とする。要素間の法線方向と接線方向に配置する。まず、解析の初期の DEM 要素モデルに設定する。接触している要素間および、近くにある要素間に配置する。モデルは安定状態にあると考え、バネの自然長は初期の要素の中心間距離とし、これから伸びても縮んでも抵抗する。圧縮時にはどこまでも抵抗するが、引張り時には、ある限界のひずみの値を越えれば破壊され、それ以降働かなくなる。接線方向のスプリングも同様で、破壊基準は、せん断ひずみの限界とする。法線方向または、せん断方向のどちらか一方で歪限界を越えれば、間隙の物質は破壊され、両方のスプリングとも働かなくなることにする。このモデルの概要を Fig. 7 に示す。

要素間には接触点に於けるスプリングと間隙の物質の効果を表すスプリングの2種類のスプリングが設定されることになる。並列に配置される為、要素間の見かけのバネ定数は2本のバネ定数の和となる。要素本体のバネ定数の方が間隙成分のバネ定数よりかなり大きい為、接触時には、見かけのバネ定数=要素本体のバネ定数となる。また非接触時には間隙成分のバネ一本のみとなる。

新たに加えたスプリングにより、要素のモデルは自立できるようになり、外力が作用して初めて破壊するという解析が可能となる。また、要素間の連続性が表せ、連続体解析と非連続体解析の中間的な解法となる。要素間のひずみレベルが低い間は、連続体的挙動を解析し、ひずみレベルが高くなると破壊し、非連続体として挙動するのを解析できる。

連続体と非連続体の中間的な解析手法として、他に川井ら(1985)の提案した剛体・バネモデル(Rigid Body Spring Model, RBSM)がある。この方法は、連続体解法であるFEMをもとにした方法で、要素が完全に離れると解析できなくなる。これに対して本方法は、非連続体解法であるDEMをもとにしているので、要素が完全に離れた後は、もとのDEM解析となり、その後も解析できる。

### 3-2 間隙間を埋す物質の定式化

要素と要素の間隙にある物質の効果を表すために Fig. 8 に示すように、法線方向と接線方向にバネを一本づつ系に取り入れる。バネの扱いは、基本的に第2章2-2に示したベクトルによる方法を用いる。これらのバネは、DEMモデルに設定する際には、伸び縮みしていない、つまりひずみのない中立な長さになったりとする。つまり、もとの要素間の距離が間隙バネの自然な長さであり、DEMモデルは、この状態で安定に達しているとする。要素の相対位置がこの状態から変化するとバネが働き、抵抗力がかかる。間隙のバネを導入する前にDEMモデルが完全に静止し安定していれば、外力を加えなければ変位しないので、バネを設定しても変位せず、反力を生じないので、安定している。まだDEMモデルが安定しておらず振動している場合には、要素間の相対変位により間隙バネも変位し、反力を生じ振動を打ち消す方に

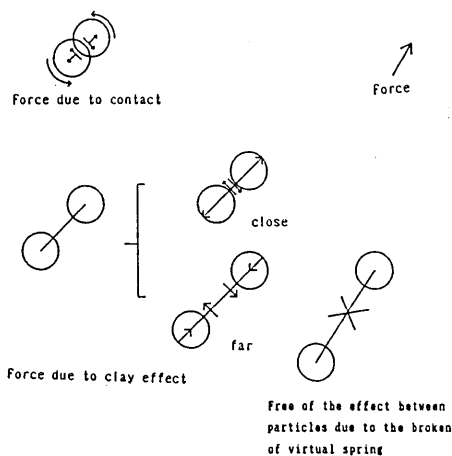


Fig. 7. Outline of the model including clay effect.

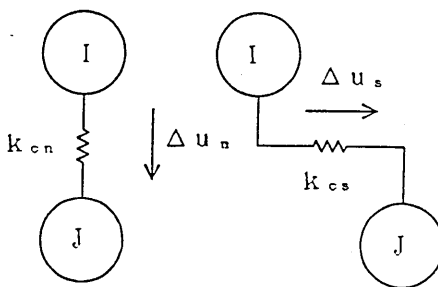


Fig. 8. Elastic spring assumed as clay between two elements.

作用する。そのため、要素モデルが変形しようとしても、安定状態つまりもとの要素配置に戻す方向に間隙バネが働き、新たな安定状態をめざして収束していくことになる。モデルが安定した後、いろいろな解析をするのだが、その際要素間の相対変位が変ると間隙のバネが働き抵抗する。要素間のひずみがある程度以上になれば、間隙の物質が破壊されつなぎの効果を失うと思われるので、ひずみ限界を越えた間隙バネは以降、法線及び接線方向とも働かなくなるとする。また、間隙の物質として粘性土を想定しているのでせん断破壊の条件もとりにれる。土の破壊は主にせん断破壊であり、ある部分でせん断応力が増加しせん断強度に達すると塑性的すべりを生じ、すべり面ができる。このモデルでも、間隙にバネにかかるせん断方向の力が、せん断強度に達すると、間隙のバネを無くすことで要素間でのすべりを許すことにする。このためすべり面が表れる。尚、間隙のバネは、要素と壁の間には用いないことにする。

以下、2つの要素 I, J のあいだの間隙について 2次元モデルで説明する。3次元解析に用いる場合でも同様である。要素間のすきま、つまり間隙が大きくなければ接触していなくても、粘土分が充填されており変形に抵抗すると思われる。要素が接している場合には、接触点の周囲に粘土分がついていると思われる。そこで、間隙のバネは I と J が接してなくても近くにあれば、設定することにする。

要素のすきまの大きさの判定、すなわち間隙バネの設定の基準には、以下の式を用いる。ただし、要素 I, J の半径、中心座標を  $r_i, (x_i, z_i)$ ,  $r_j, (x_j, z_j)$  とし、近いかどうかの指標の係数として  $DCR1$  を用いる。

$$(r_i + r_j) \times DCR1 \geq R_{ij} \quad (3.1)$$

ここで、

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (3.2)$$

(3.1) は、要素の中心間距離が、要素の半径の和の  $DCR1$  倍以内なら、要素間は近いと考え間隙の効果を考えようというものである。この式により要素の半径が大きい場合でも小さな場合でも対応できる。 $DCR1$  の値は、基本的に 1.0 以上であるが、あまり大きくすると、要素 I, J の間に半径の小さな要素 K があっても成り立ってしまうことがある。この場合には、I-J, I-K, J-K の3箇所の間隙バネが設定され、各バネの表す間隙が大きく重なり、不適切と思われる。この場合には、 $DCR1$  を小さくとるようにする。

間隙バネを設定する場合には、要素の相対位置を記憶しておく。要素 I の位置を基準としたベクトルで扱う。間隙バネの設定時つまり、時刻 0 での相対位置ベクトルを  $\vec{d} = (d_1, d_2)$  とする。

$$d_1 = x_j - x_i \quad (3.3)$$

$$d_2 = z_j - z_i \quad (3.4)$$

この  $\vec{d}$  が、要素 I, J の間隙バネにとって中立な、自然な向きを表すベクトルとなる。時刻  $t$  における要素 I, J の中心の座標を  $(x'_i, z'_i)$ ,  $(x'_j, z'_j)$  とする。この時の相対位置ベクトルを  $\vec{b} = (b_1, b_2)$  とする。

$$b_1 = x'_j - x'_i \quad (3.5)$$

$$b_2 = z'_j - z'_i \quad (3.6)$$

間隙にあるつなぎの物質はいつまでも変形に耐えるわけではないので、引張り時には、ひずみによる破壊基準をもうける。ここで定数  $DCR2$  を用い要素間のひずみ限界を  $DCR2-1$  で表わすことにすれば、基準は以下ようになる。

$$|\vec{b}| \geq DCR2 \times |\vec{d}| \quad (3.7)$$

$|\vec{d}|$  はバネの自然長である。この式が成立すると、以後 I-J の間隙バネの効果を法線方向・接線方向ともに考えるのをやめる。せん断破壊の判定は、あとでおこなう。

時刻 0 から時刻  $t$  までの間の要素の相対変位の変化を  $\vec{c}_u$  とする。

$$\vec{c}_u = \vec{b} - \vec{d} \quad (3.8)$$

間隙のバネは、要素 I-J の相対位置関係を  $\vec{d}$  に戻そうとするが、その力の方向は、 $-\vec{c}_u$  となる。この  $\vec{c}_u$  を  $\vec{b}$  と平行な成分  $\vec{c}_{un}$  と  $\vec{c}_{us}$  とに分離して考える。平行な成分  $\vec{c}_{un}$  は、間隙の法線方向のバネの変位であり、垂直成分  $\vec{c}_{us}$  は接線方向の変位である。以下の式により  $\vec{c}_{un}$  と  $\vec{c}_{us}$  を求める。

$$\vec{c}_{un} = (|\vec{b}| - |\vec{d}|) \times \frac{\vec{b}}{|\vec{b}|} \quad (3.9)$$

$$\vec{c}_{us} = \vec{c}_u - \vec{c}_{un} \quad (3.10)$$

弾性スプリングにかかる反力の法線方向成分  $\vec{e}_{cn}$  と接線方向成分  $\vec{e}_{cs}$  は、以下のようになる。

$$\vec{e}_{cn} = k_{cn} \times \vec{c}_{un} \quad (3.11)$$

$$\vec{e}_{cs} = k_{cs} \times \vec{c}_{us} \quad (3.12)$$

次に、せん断破壊の判定を行なう。接線方向の力の絶対値  $|\vec{e}_{cs}|$  がせん断強度を越えた場合に破壊すると仮定する。破壊基準としてクーロンの基準を用いる。 $\tau_c$  をせん断強度、 $\sigma$  をすべり面上の全直応力、 $c$  を粘着力、 $\varphi$  を摩擦角とすれば、以下のように表される。

$$\tau_c = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (3.13)$$

この式は本来、応力レベルでの条件であるが、DEM では応力でなく力で解析しているので、(3.13) を力の式でも成り立つと仮定して用いる。

要素 I-J の間隙が圧縮されている場合、つまり

$$|\vec{b}| < |\vec{d}|$$

には、破壊は、(3.13) と同じ形式の以下の条件でおこるとする。

$$|\vec{e}_{cs}| \geq c_{DEM} + |\vec{e}_{cn}| \times \tan \varphi \quad (3.14)$$

ただし、 $c_{DEM}$  は DEM における粘着力に相当する力とする。

(3.14) の右辺第 2 項は圧縮時の固体摩擦と考えられるので、I-J が引張りとなっている時に作用するとは思われない。そこで、引張り時、すなわち

$$|\vec{b}| > |\vec{d}|$$

には、粘着力  $c_{DEM}$  のみが残ると考え、破壊基準は以下のようになる。

$$|e_{cs}| \geq c_{DEM} \quad (3.15)$$

ひずみによる破壊やせん断破壊が生じた後は、要素の間隙バネは働かなくなる。要素間が圧縮され接触している場合には、間隙バネがなくても本体の接触時のバネ・ダッシュポットが働き、反力を生じる。要素本体が接していない場合には、つなぐバネはなくなり、自由に行動するようになる。また、接線方向にすべりやすくなるが、要素同士が接触すれば、その分の接触方向の反力が作用する。

間隙のバネにより、要素 I, J が受ける力の総和  $\vec{F}_{ci}$ ,  $\vec{F}_{cj}$  は、以下の式で与えられる。

$$\vec{F}_{ci} = \sum_j \vec{e}_{cn} + \sum_j \vec{e}_{cs} \quad (3.16)$$

$$\vec{F}_{cj} = -\sum_i \vec{e}_{cn} - \sum_i \vec{e}_{cs} \quad (3.17)$$

これらの  $\vec{F}_{ci}$ ,  $\vec{F}_{cj}$  がいままでの力に加えて要素にかかることになる。

間隙にある物質として粘性土を想定しており、モーメントは伝達しないと思われるので、間隙のバネによるモーメントや要素の回転は考えない。なお、本解析では簡単のためスプリングしか用いながったが、複雑な力学モデルを仮定しても容易に採り入れられる。

ひずみによる破壊やせん断破壊がおこらないようにすれば、モデルは連続体として挙動するようになる。またすぐに破壊するようにすれば、非連続体として挙動することになる。このモデルは、連続体解析からみると、バネが条件により破壊される質点・バネモデルに近いものであるといえよう。この方法により連続体として挙動していた構造が、塑性化し、破壊していく様子を一貫して解析できるとと思われる。

### 3-3 DEM パラメータの決め方

DEM 解析をおこなう前に、DEM のパラメータ、例えば法線方向のバネ定数、粘性ダッシュポットの粘性係数などを決める必要がある。そこでこれらの値の決め方について考察する。DEM 解析のパラメータは、相当する実物質の物性値をそのまま用いるわけにはいかない。そこで、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) 要素バネのパラメータの決め方

要素についてのパラメータ、弾性スプリングのバネ定数  $k_n$ ,  $k_s$ , 粘性ダッシュポットの粘性係数  $\eta_n$ ,  $\eta_s$  などを決定する必要がある。これらは、要素同士の接触、要素一壁の接触という本来の DEM の定数である。これらの定数が決まらないとパッキングも行えないことになる。 $k_n$ ,  $k_s$  は要素本体のヤング率、ポアソン比と関係しており、要素のヤング率が大きければ  $k_n$ ,  $k_s$  の値も大きくなる。木山・藤村ら (1983) は要素を円筒で考えた場合の定数の決定法を提案している。また、実際にサンプルピースを落下させる実際と DEM 解析を平行して行い、パラメータを決める研究も行われている (藤村ら, 1986)。本研究では、木山・藤村の提案した円筒理論を用いた方法を用いることにする。

要素間の接触時に生じる振動は解析の安定のさまたげとなる。安定させる為に、臨界減衰状態にし、振動をすみやかに吸収させることにする。これによりダッシュポットは主に系の安定の為に用いる事になるが、内部減衰や要素触点での塑性変形によるエネルギー消耗などの効果も含まれている。

間隙比  $e$  は要素の密度としており、 $e$  が大きければ要素の見かけの密度が小さくなる。

(2) 間隙バネのパラメータの決め方

次に、要素の間隔に設定するパラメータ、バネ定数  $k_{cn}$ ,  $k_{cs}$  と破壊基準の粘着力  $c_{DEM}$ , 摩擦係数  $\mu$  を決定する。これらのパラメータは有限要素法のように系を連続体として考えた際の媒質のパラメータと関係する。

Fig. 9 に示すモデルを考える。要素の質量を  $m$ , ヤング率を  $E$ , 波動の速度を  $c$  とすれば、振動の運動方程式と波動方程式は以下のように表せる。

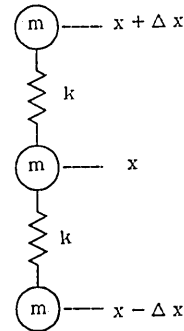


Fig. 9. 1-dimensional spring-mass model.

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{3.24}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{3.25}$$

振動の式より以下の式を考える。ただし、要素間の距離を  $\Delta x$ , 時間増分を  $\Delta t$  とする。

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = k(y_{x-\Delta x} - y_x) - k(y_x - y_{x+\Delta x}) \tag{3.26}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{k}{m} (y_{x-\Delta x} - 2y_x + y_{x+\Delta x}) \tag{3.27}$$

波動方程式を差分近似して、以下の式が求まる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{1}{\Delta t^2} (y_{t-\Delta t} - 2y_t + y_{t+\Delta t}) = \left(\frac{c}{\Delta x}\right)^2 (y_{x-\Delta x} - 2y_x + y_{x+\Delta x}) \tag{3.28}$$

(3.27) と (3.28) より以下の関係が求まる。

$$k = m \cdot \frac{c^2}{\Delta x^2} \tag{3.29}$$

この式より間隙のバネ定数を定めることができる、一般的な物性値を用いての決め方を示す。与えるパラメータは、 $E$ ,  $\nu$ , 密度  $\gamma$  とする。これらより、ラムエの定数  $\mu$ ,  $\lambda$  が以下のように定まる。

$$\mu = G = \frac{E}{2(1-\nu)} \tag{3.30}$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{3.31}$$

ここで  $\mu$  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、以下のようになる。

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\gamma}} \quad (3.32)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\gamma}} \quad (3.33)$$

要素が半径  $r$  の円とすれば、 $m$  と  $\Delta x$  は以下のようになる。

$$m = 2\pi r^2 \gamma \quad (3.34)$$

$$\Delta x = 2r \quad (3.35)$$

ここで、法線方向のバネ定数には  $V_p$  が、接線方向のバネ定数には  $V_s$  が関与すると思われるので、(3.29) に代入すれば、 $k_{cn}$ 、 $k_{cs}$  が求まる。

$$k_{cn} = \frac{1}{2} \pi \gamma V_p^2 \quad (3.36)$$

$$k_{cs} = \frac{1}{2} \pi \gamma V_s^2 \quad (3.37)$$

次に、間隙を充填する物質の他のパラメータを決める。Fig. 10 に示すように、半径  $r$  の2つの要素が接している場合で考える。重なり距離を  $\delta$ 、幅を  $b_w$  とすれば、

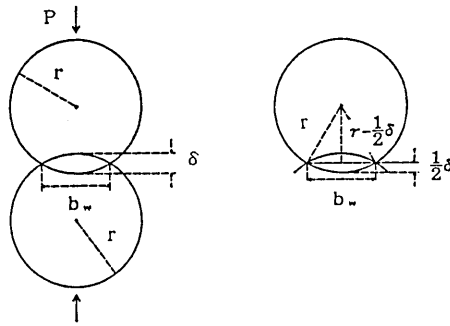


Fig. 10. Elastic contact of two cylinders.

$$b_w = \sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{2}\delta\right)^2} = \sqrt{r\delta - \frac{1}{4}\delta^2} \quad (3.38)$$

という関係がある。2次元の場合、要素は円筒なので接触面は、長方形となり、面積  $s_i$  は奥行き 1m を考えれば、

$$s_i = 1 \times b_w \quad (3.39)$$

3次元の球要素では直径  $b_w$  の円形となり、 $s_i$  が求まる。

$$s_i = \pi \cdot \left(\frac{1}{2}b_w\right)^2 = \frac{1}{4} \pi b_w^2 \quad (3.40)$$



本研究では、破壊基準にクーロンの基準を用いることにする。破壊時の応力状態を直応力  $\sigma$ 、せん断応力  $\tau_c$ 、粘着力  $c$ 、摩擦角を  $\phi$  とすれば、以下のように表すことができる。

$$\tau_c = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (3.41)$$

接触面全体にかかっているせん断力、この場合は破壊せん断力  $F_{sc}$  は、次式で与えられる。

$$F_{sc} = \tau_c \cdot s_i = s_i c + s_i \sigma \cdot \tan \phi \quad (3.42)$$

接触面に作用する法線方向力  $F_n$  と  $\sigma$  の関係は、以下のようになる。

$$F_n = s_i \sigma \quad (3.43)$$

これにより、(3.42) は、次のようになる。

$$F_{sc} = s_i c + F_n \cdot \tan \phi \quad (3.44)$$

一方、DEM 解析の破壊基準は、動摩擦係数を  $\mu_D$ 、粘着力に相当するものを  $c_{DEM}$  とすれば以下のようになる。

$$F_{sc} = c_{DEM} + F_n \cdot \mu_D \quad (3.45)$$

(3.44) と (3.45) を比較して、 $\phi$  と  $\mu_D$  の関係を次のようにきめる。

$$\mu_D = \tan \phi \quad (4.46)$$

粘着力の関係を以下のように決める。

$$c_{DEM} = s \cdot c \quad (3.47)$$

要素が円筒の場合は、以下のようになる。

$$c_{DEM} = b_w \cdot c \quad (3.48)$$

次に、2次元の  $b_w$  の値を決定する。要素が幾何学的に配置された場合で考える。Fig. 11 に示すように、DEM 要素を連続体の有限要素と比較して決める。隣接した要素間の接触部の長さを  $b_w$  とする。つまり、要素の配置法により、一つの要素が接する要素の数の正多角形の一辺の長さを  $b_w$  とすることにする。ここで、接する要素が多くなるほど間隙率が減り、粘着力が増えるという性質があるので、要素に内接する正多角形を用いることにする。これにより、接する要素が増えるほど個々の  $b_w$  は小さくなり、 $b_w$  の総和は反対に大きくなる。そして粘着力  $c_{DEM}$  の総和も大きくなる。

以上より、Fig. 11 の Case 1 に示すよう

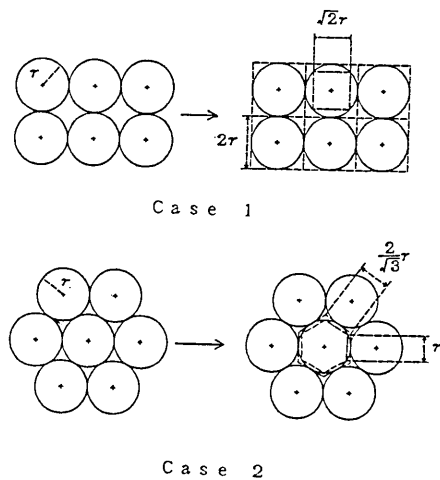


Fig. 11. Equivalent continuous medium model to DEM model.

に隣接する3要素の中心をむすぶ線のなす角が $90^\circ$ をなす配置では $b_w$ は以下のようになる。

$$b_w = \sqrt{2}r \quad (3.49)$$

Case 2のように $60^\circ$ をなすに配置した場合は、次のようになる。

$$b_w = r \quad (3.50)$$

要素の配置が幾何学的な場合には、同様に $b_w$ を決めることができるが、そうでない場合にはこの2つのケースから内挿、外挿して求めることにする。そのさいに共通のパラメータとして間隙比 $e$ を用いる。DEMモデルを作成し、 $e$ を求めパラメータ $b_w$ や $c_{DEM}$ を決定することにする。

### (3) $\Delta t$ の決め方

CUNDALL (1974) は、差分近似解を得る際の解の収束性と安定性を得るための条件から、 $\Delta t$ を次のようにすることを推奨した。

$$\Delta t < 2\sqrt{\frac{m}{k_n}} \quad (3.51)$$

また、要素が等径で幾何学的に配置されている場合には、弾性波動論で差分法を用いる際用いる安定条件も用いることができると思われる。要素が規則正しく格子状に並んでいる場合には、差分法と近似しても問題はないと思われる。DEMの場合、面内には2種類の波が存在すると考えられ、S波とP波の2種類の波動が伝播する場合の差分法の安定条件は以下のように表せる。

$$V_p^2 \cdot \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} < \left(1 + \frac{V_s^2}{V_p^2}\right)^{-1} \quad (3.52)$$

ただし、 $V_s$ 、 $V_p$ はS波、P波の伝播速度とし、 $\Delta x$ は隣接する要素の中心間距離とする。

1回のタイムステップ中に、波動が隣接する要素を通り越してずっと先の要素まで伝わってしまうと、DEM解析はうまく働かなくなる。これは、DEMは要素の接触により力や波動を伝播させてしまう為、隣接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ことにより反力の評価が正確に行なえないためと思われる。この考えにもとずいた、 $\Delta t$ の安定条件は次のようになる。

$$\Delta t \cdot V < \Delta x_{min} \quad (3.53)$$

この式は、時間 $\Delta t$ の間に波動が伝播する距離が、隣接する要素間の中心間距離のうちの最小値 $\Delta x_{min}$ より小さければ良いという意味である。

以上のように、幾つかの安定条件を導いたが、これにより決めた $\Delta t$ を用いて実際にDEM解析をしても、解析が安定せず発散してしまう場合がある。これは、DEMのモデルはバネとダッシュポットの複合モデルであり、本章での1質点系で考えた場合と異なるためと思われる。バネが多数配置されているため、1質点系より全体系のみかけのバネの方が固くなり、波動伝播の速度も早くなる。このため $\Delta t$ 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。もっと小さく設定しても全体系のバネ定数は大きくなり問題はない。バネ定数を小さくすると媒質の波動伝播が遅くなるので、 $\Delta t$  を大きくしてよいことになる。よつて DEM 解析で実際に用いるスプリングのバネ定数は、本章で求めた値より小さくとることとする。

#### 4. 解析例

この章では、間隙の物質の効果を取入れた DEM を用いた解析を試み、その効果を検証する。

##### 4-1 崖の崩壊の2次元解析

要素の間隙にバネを用いることで改良した DEM を用いて、崖崩れの解析を2次元で行ない、今までの DEM による結果とどのように異なるかを調べ、本方法の適用性を調べる。

DEM を改造したことにより、崖のモデルの強度を自由に換えられるようになり、自立している崖も作成できるようになった。そこで、崖が外力なしに崩壊する場合や、振動外力を加えることにより崩れる場合について解析してみる。前者は雨により地盤がゆるんで地滑りを生じる場合を想定しており、後者は地震による崖崩れや山崩れを想定している。その際には、DEM のパラメータをいろいろと変化させてその効果も確かめることとする。

モデルの強度の違いは、主に間隙のバネ定数と破壊時すびずみ限界  $DCR2$  の2つのパラメータにより決まる。実際の物質同様、バネ定数が小さいとぶよぶよになり、大きければ堅固になる。すびずみの限界値が小さければもろくなり、大きければじん性にともよようになる。本解析では、おもに  $DCR2$  を変えることで、崖の強度を変え、バネ定数は変えないこととする。バネ定数を変えると解析の安定のために  $\Delta t$  を変える必要があるかもしれないが、また精度にかかわってくると思われるので変化させないこととする。

##### (1) 外力を加えない場合

用いる DEM モデルのパラメータを Table 1 に示す。要素数は1000個、半径は15~5cm とする。モデルの粒径加積曲線を Fig. 12 に示す。ただし、この図で縦軸は数量パーセントで示してある。崖の大きさは高さ3m、奥行き10m とする。モデルの概略を Fig. 13 に示す。崖の片側と下方に壁を設定したケース1と、崖の下方のみに壁を置き側面は自由なケース2を設定する。解析可能な領域は崖から10mのところまで確保しておく。尚、壁は変位を固定した要素を配置して用いることとする。壁要素の半径は、10cm とする。解析は、時刻0秒で片側もしくは、両側の側壁をはずした場合について行なう。

間隙バネを用いない場合の各時刻の全要素の位置と速度の分布を Fig. 14 に示す。0.2秒にははずした壁側の要素が動き出している。速度の図でみると、くさび型の部分が動き出し崖の奥の方は動いていない。0.6秒では、全体が丸くなり、崖の前面が崩れている。その後、表面から崩れていき奥の要素も流れるように崩れていき、だんだん斜面が

Table 1. Data of the 2-dimensional cliff model.

Particles		1000
Radius	max	15.0 cm
	min	5.0 cm
	mean	10.0 cm
	$\sigma$	0.15
Width	(X)	10 m
Height	(Z)	3 m

$k_n$	$6.0 \times 10^6$ (N/m)	$\rho$	2000.0 (kg/m <sup>3</sup> )
$k_s$	$1.5 \times 10^6$ (N/m)	$\Delta t$	0.001 (sec)
$\eta_n$	0.0 (NSec/m)	DCR1	1.2
$\eta_s$	0.0 (NSec/m)	$c_{DEM}$	1000 (N)
$\mu$	0.2	$k_{CN}$	$1.2 \times 10^6$ (N/m)
$e$	0.2	$k_{CS}$	$1.0 \times 10^6$ (N/m)

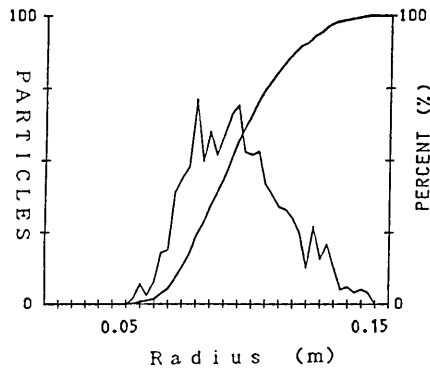


Fig. 12. Physical properties of 2-D DEM model.

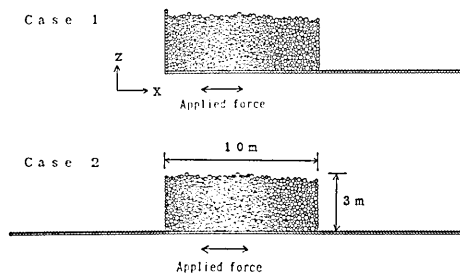


Fig. 13. DEM model used for dynamic cliff collapse simulation.

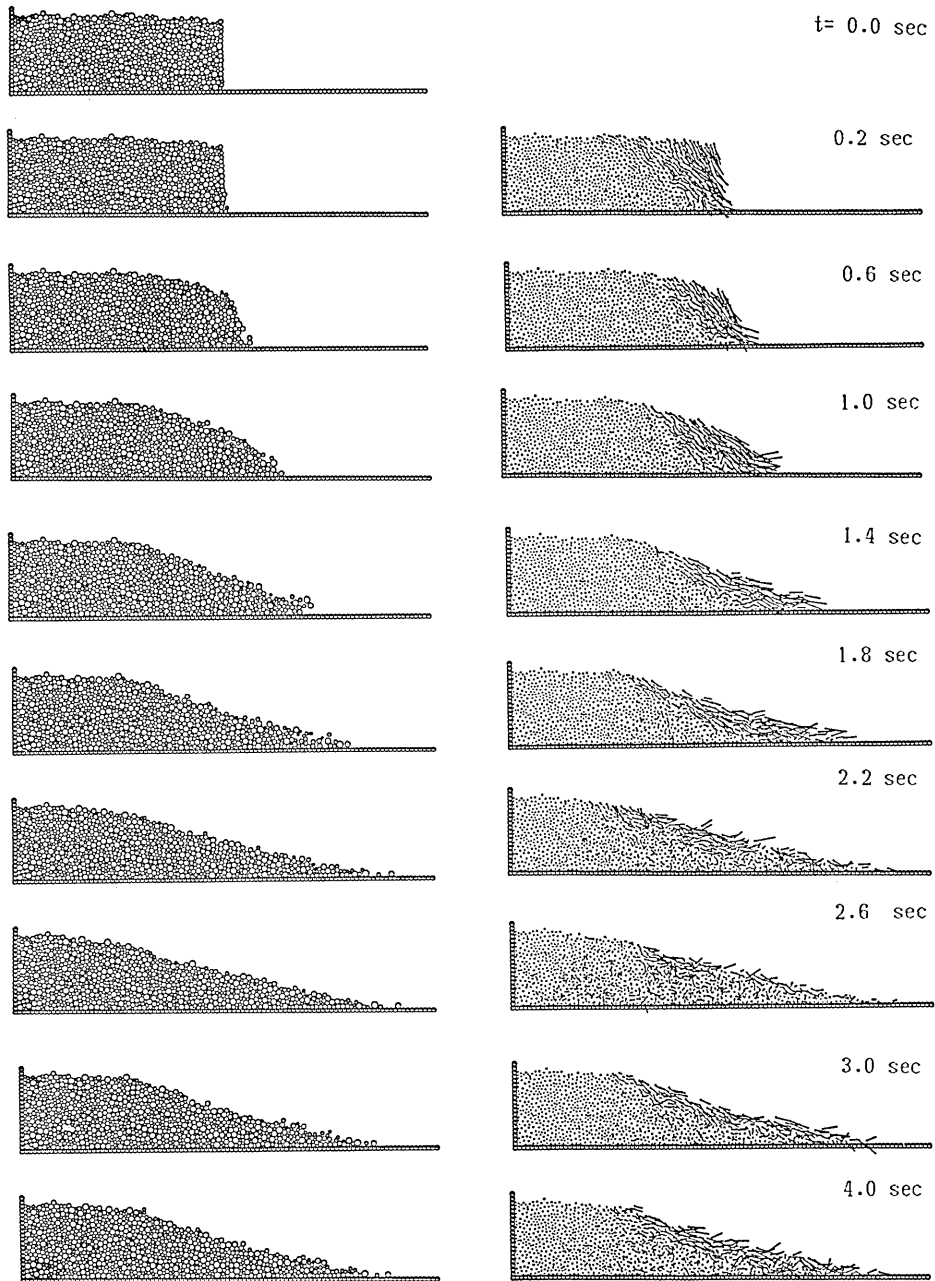


Fig. 14. Movement of particles and distribution of velocity. (Case 1, not considered the effect of clay, without applied vibration)

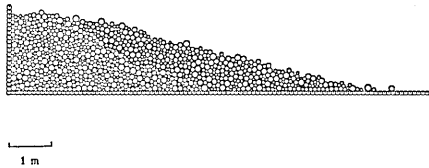


Fig. 15. Movement of particles at 4 sec.  
(Bold lined particles move more than 20 cm)

平らになっていく。

4秒までに動いた要素を Fig. 15 に示す。この図で濃く表示した要素は、初期状態と比較して 20 cm 以上動いたものである。動いた部分ははっきりと層になっており崖の壁側の要素がなんの抵抗もなく流れるように崩れていることがわかる。

次に、粘土分を考えた場合の結果を示す。

ひずみの限界を 1% とした解析例の 4 秒までの全要素の位置と速度の分布を Fig. 16 に示す。0.2 秒では前の例と同様、はずした壁側の上部のくさび内の要素が動き出している。しかし、0.6 秒以降の結果は、まったく異なっている。速度の分布図をみると、崩れていく部分と崩れずに残る部分とははっきりとわかれている。崩れていく部分と崩れない部分の境界にある間隙のバネが破壊されている。要素の図でみると、崖に亀裂がはいり、そこを境として崩れていく様子がよくわかる。崩れていく部分の内部では、間隙のバネは残っており、一体なブロックとして挙動している。その後、崩れていくブロックは地山との衝突で複数のブロックに砕けながら落ちていき、地山の端のブロックが崩れて支えを失った部分が新たに塊りごと崩れていく様子が表れている。

地山の崩壊は 2 秒ほどで終り、それ以降は崩れた土砂が砕けながら転がっている。地山の残った露出面は、かなり急な角度になっているが、崩れは終っており、自立している。長野市の地附山の地滑り現場でも、このように崩壊後、急な斜面が露出していた。ランダムパッキングにより作成したので DEM モデル内には強い部分と弱い部分があり、弱いところが破壊し亀裂が入り崩れ、強い部分がそのまま残り表面に露出したものと思われる。崩れていく部分も内部は堅固であり、衝突で破壊されるまでブロックのまま一体で挙動している。Fig. 17 に 20 cm 以上動いた要素を濃く表示した図、要素と 4 秒まで残った間隙バネの分布図、間隙バネだけの分布図、初期状態の間隙バネの分布図の 4 つを示す。これらの図から、崩れなかった地山の部分と崩れて堆積した部分とははっきりと区別できる。間隙バネの図より、連続な部分と非連続になっている部分とははっきり区別できる。崩れて堆積した部分には、間隙バネはほとんど残っておらず、粉々になっている。崩落物のつくる斜面の角度は、間隙バネを用いない場合の角度とほぼ同じ  $15^\circ$  になっている。またひずみの限界が異なる場合でも角度は同じになっている。これは、崩落物の中では間隙バネの多くが破壊されており、元来の DEM 解析での要素が安定する斜面の角度  $\phi$  (安息角  $\phi = 11^\circ$ ) が表れるためと思われる。このことより、間隙バネを用いない場合には、崖がこの角度になるまで崩れ続けるとと思われる。崩れずに残った部分は垂直線と  $30^\circ$  をなしており、 $\pi/4 - \phi/2 = 40^\circ$  とはなっていない。

次に Fig. 18 に 0.2, 0.4, 1.0 秒までにすべり (間隙バネの破壊) を生じた場所を示す。右側には各時刻の速度分布を示す。崩れる部分ですべりが多数生じ、0.4 秒には左上がりで破壊が連続し、そこを境にブロックとなったまま崩れている。この境の線がいわゆるすべり線にあたると思われる。しかし、崩壊したブロック内の砂埃にまぎれてしまい、明確には表れていない。この事より、崖崩れでも岩石の破壊実験の AE 法でみられるのと

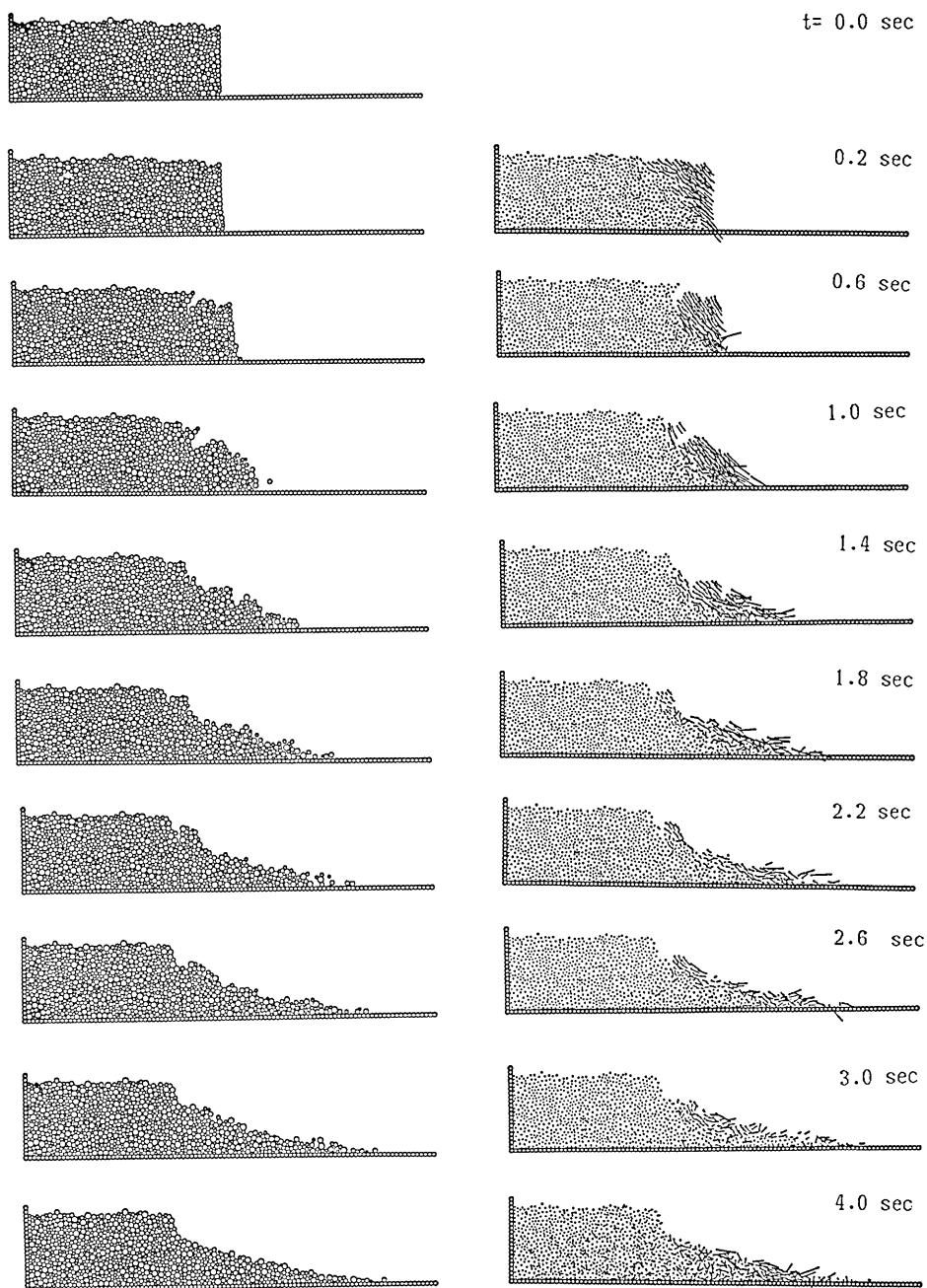


Fig. 16. Movement of particles and distribution of velocity. (Case 1, considered the effect of clay, without applied vibration,  $\text{DCR2}=1\%$ )

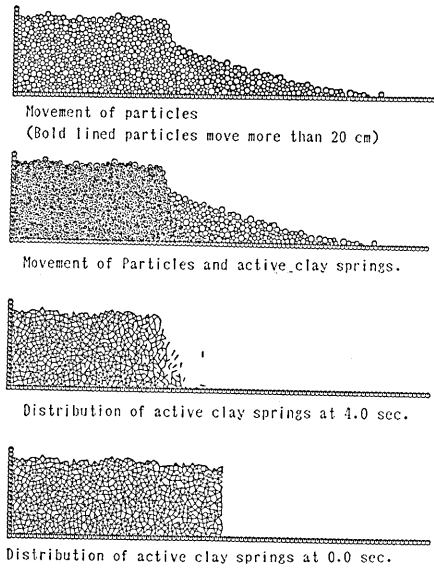


Fig. 17. Movement of particles and distribution of active spring.

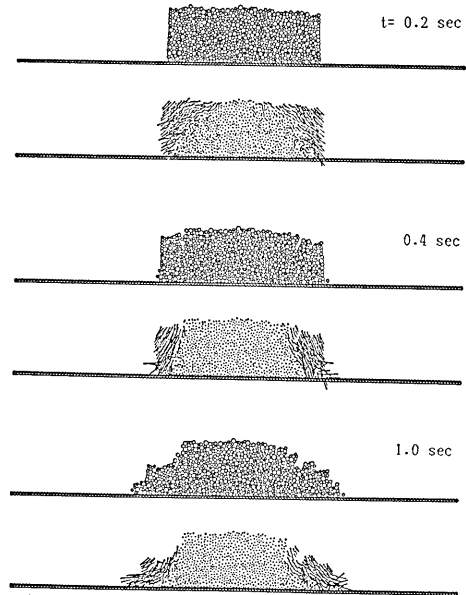


Fig. 19. Movement of particles and velocity. (Case 2, DCR2=1%, without vibration)

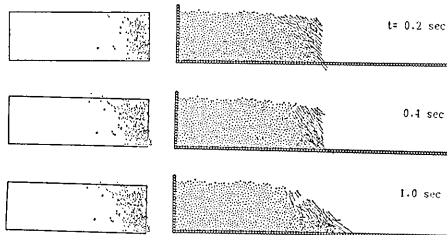


Fig. 18. Distribution of sliding points and distribution of velocity.

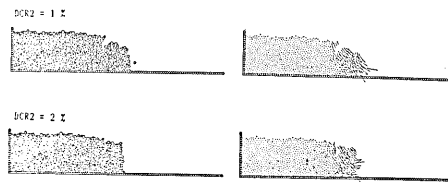


Fig. 20. Movement of particles and distribution of velocity at 0.8 sec.

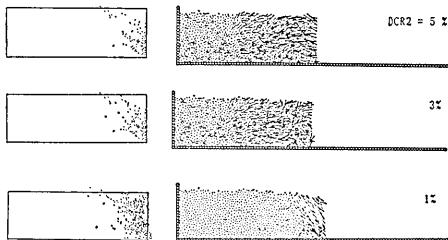


Fig. 21. Distribution of sliding points and distribution of velocity at 0.4 sec.

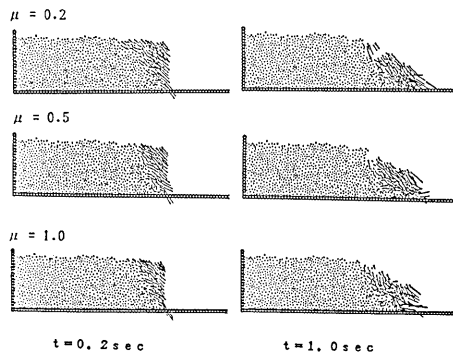


Fig. 22. Distribution of velocity of particles. (DCR2=1%)



同様、まずあちこちで小さな破壊が多数生じ、その内から大破壊の面が形成されそがすべり崩壊する、と思われる。

次に、崖の両側を自由にしたケース2の結果を1例示す。ひずみの限界を1%とした場合の全要素の分布と速度の分布を Fig. 19 に示す。右側の崖に注目すると、Fig. 21 の結果と亀裂の入り方、崩れるブロックの形、崩れる時刻などだいたい同じになっている。外力を加えずに静的に崩壊させる場合には、モデルの形状をケース1と2のように変化させても、あまり影響はないようである。左側の崖の崩れ方は右側の崩れ方と、とくに違いはないと思われる。

次にパラメータの影響を調べる。間隙の粘土分のひずみ限界値を1%と2%とした場合の0.8秒での要素の分布と速度の分布を Fig. 25 に示す。また、Fig. 21 にひずみの限界を1%、3%、5%としたときの0.4秒までにすべりを生じた点の分布と0.4秒での速度の分布を示す。ひずみ限界値を大きくした方が要素間隙す粘土分のつなぎの効果が強くずれにくくなる。外力を加えない場合、この崖モデルはひずみ限界が2%までは崩れるが、3%を越すと崩れなくなる。Fig. 21 のすべりの分布図で、どのケースでも共通した箇所が破壊している。ひずみの限界を大きくするにつれ、破壊されない間隙バネが多くなり、これらのバネが抵抗するために崩壊しなくなる。3%や5%の場合でも、幾つかの間隙バネは破壊されているので速度分布は少し異なっているが、どちらも崖のモデル全体で同じような速度になっており、亀裂が入ったり、大きなすべりを生じている様子はない。

動摩擦係数  $\mu_D$  を0.2、0.5、1.0と変えた場合の0.2秒と1.0秒での速度の分布を Fig. 22 に示す。 $\mu_D$  が大きいほど崩壊はゆっくりになるが、崩れる部分の面積、形状に大きな違いはみられない。亀裂が入った後に要素や要素の塊りが転がり落ちていく際には、 $\mu_D$  が大きいほどゆっくりになっている。パラメータ  $\mu_D$  は、せん断破壊基準に用いているが、この例では引張り破壊の方が多いためか、あまり結果に影響を与えていない。

次に、破壊基準の粘着力項  $c_{DEM}$  を変えた例を Fig. 23 と Fig. 24 に示す。粘着力  $c_{DEM}$  を大きくすると、せん断破壊が生じにくくな

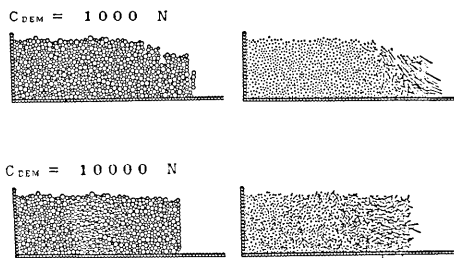


Fig. 23. Movement of particles and distribution of their velocity at 1.0 sec. (DCR2=2%)

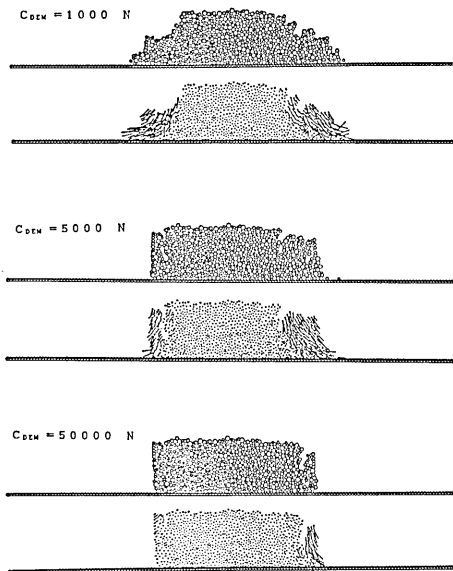


Fig. 24. Movement of particles and distribution of their velocity at 1.0 sec. (DCR2=1%)

り、崖は崩壊しにくくなるのが結果にも表われている。また、 $c_{DEM}$  を大きくするにつれ剥離するように崩れるようになる。この理由を以下のように考える。間隙パネの破壊の状態としてせん断破壊と引張りによる破壊の2通りを想定している。このうち、せん断破壊は粘着力項  $c_{DEM}$  を大きくしたためにおこりにくくなり、引張りひずみによる破壊のみが生じるようになる。崖には重力が作用しており、自由な側面は、なにもない前方に崩れやすく、垂直な面で引張り破壊が生じ垂直に剥がれるように崩れるのだと思われる。

## (2) 振動外力を加える場合

次に、外力が加わらない状態では自立している崖モデルに、地震動つまり振動外力が作用する場合の崩壊解析を行なう。(1)と同じモデルとする。要素間にある粘土分の効果を表す間隙パネのひずみの限界値  $DCR2$  を3%より大きくすれば崖は外力を加えなければ自重で崩壊することはないので、 $DCR2$  は3%と5%とする。振動外力は Fig. 13 に示すように、壁要素を振動させることでモデルに入力する。入力波には、簡単のため正弦波を用いることにする。

ひずみの限界値  $DCR2$  を5%とした場合の結果を Fig. 25 に示す。0.2秒から0.6秒の間に崩れ始めている。ひずみの限界を3%とした場合に較べて、崩れたブロックが大

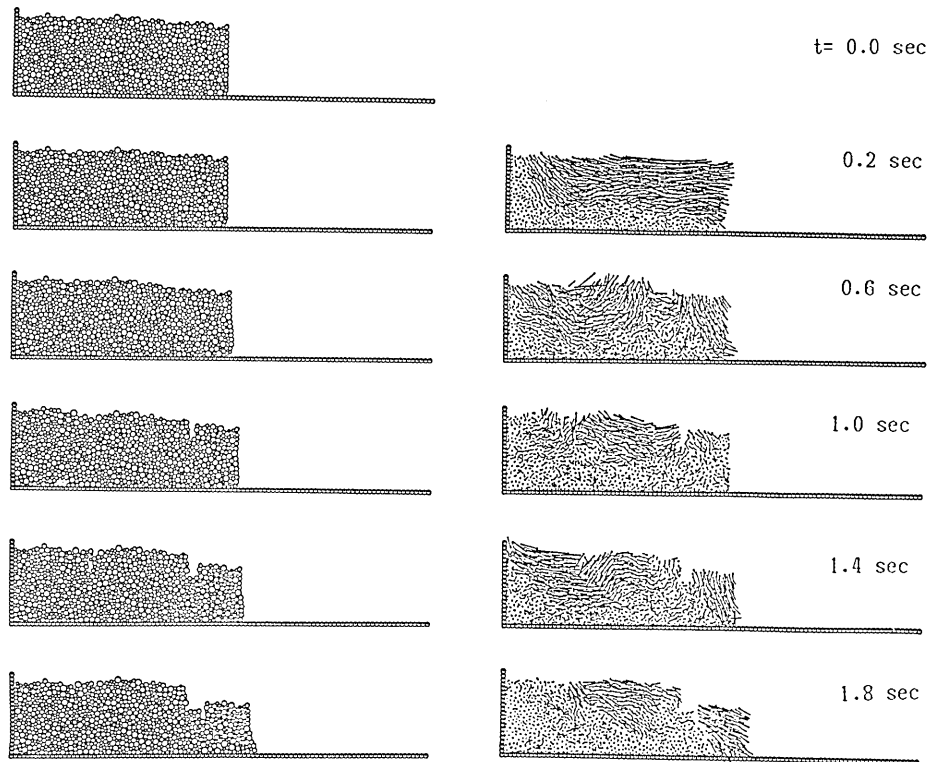


Fig. 25. Movement of particles and velocity. (Case 1,  $DCR2=5\%$ , input sinusoidal, 2Hz, 800 gal)

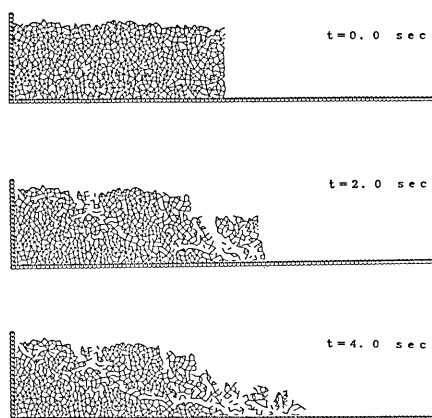


Fig. 26. Distribution of active clay springs. (Case 1, DCR2=5%, input sinusoidal, 2Hz, 800gal)

きくなり、ブロックが転落しても碎けにくくなった。また、1.4 秒では崖モデルの中央部に亀裂が生じているがすべり初めてはいない。1.8 秒には閉じている。この解析結果を間隙バネの分布図により表示すると Fig. 26 のようになる。この図のほうが、すべりの発生状況を明確に捉える事ができる。2 秒の分布図より左上から右下にかけてすべり線が生じかけていることがわかる。また、右側の崩れ落ちた部分は完全に崖本体とのつながりは失っている。4 秒になるとすべり線は一層明確になる。他にも 1 本表れている。解析を続ければすべり線上の間隙バネが全て破壊され、この線ですべり始めると思われる。

すべり線の付近では要素間にずれが生じ、

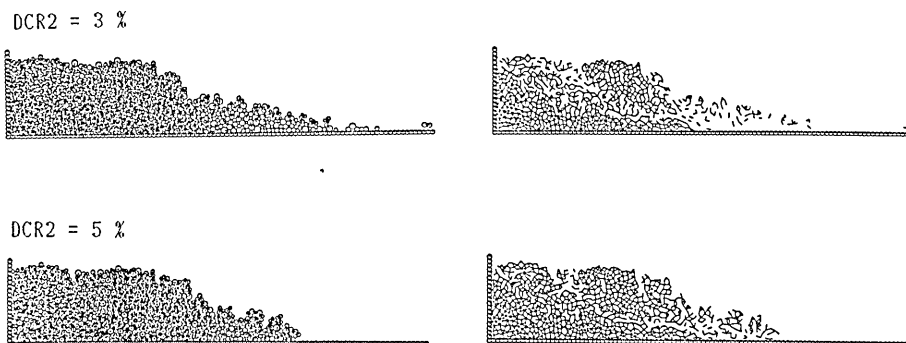


Fig. 27. Movement of particles and distribution of active clay springs at 4.0 sec. (Case 1, DCR2=5%, input sinusoidal, 2Hz, 800gal)

見かけの体積が増えている。これはダイランシーが表れていると解釈することができる。

Fig. 27 にひずみの限界を 3%, 5% としたときの 4 秒での要素の分布と間隙バネの分布を示す。3% のほうがすべり線は太く表れ、5% では細いがはっきりと表れている。

Fig. 28 に間隙バネなし外力なしの例と、間隙バネあり外力なしの例と、間隙バネあり振動外力ありの例の結果を示す。4 秒での要素の分布を示す。外力を加えると加えない場合に比べてずっと奥の要素まで変位していることがわかる。また、自重で崩れないようにモデルを堅固にしたため、崩落物のなかに間隙バネで結合したままの要素の塊が多く残り、斜面の角度は他の 2 例と異なっている。これは他の例では崩落物は間隙のバネなしで挙動しているのに、この例では塊りのまま挙動しているためと思われる。

Fig. 29 にケース 2 での崖の崩壊例を示す下の。壁近くの間隙バネが入力動により破壊

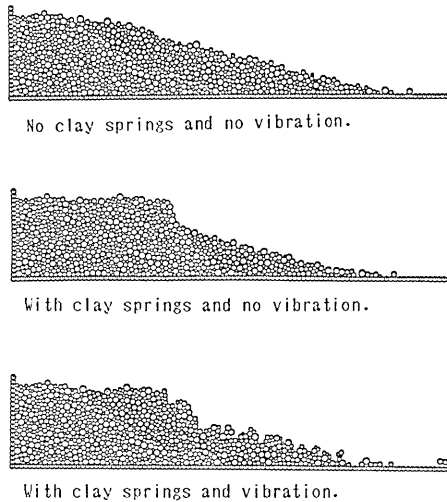


Fig. 28. Movement of particles at 4 sec.  
(Bold lined particles move more than  
20 cm)

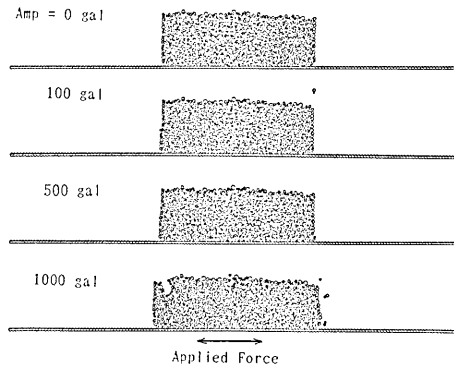


Fig. 30. Movement of particles and distribution of active clay springs at 1.0 sec. (Case 2,  $DCR2=1.5\%$ , input sinusoidal, 2Hz)

正弦波とする。このモデルでは 500gal を越えると破壊する。

DEM に間隙のバネを加えることにより、崖の崩壊解析を動的に行なうことが可能になった。崖の進行性破壊も再現することができ、すべり線を捉え、表すことが可能になった。本方法により、いままで不可能であった解析を行なうことができるようになったと思われる。

問題点としては、崖のモデルはランダムパッキングで作成するが、このパッキングにより破壊しやすい場所が決まってしまう、モデル全体の強度も左右される。このため以後の解析でこの弱い箇所ばかり破壊することがある。これをさけるために、いろいろとパッキ

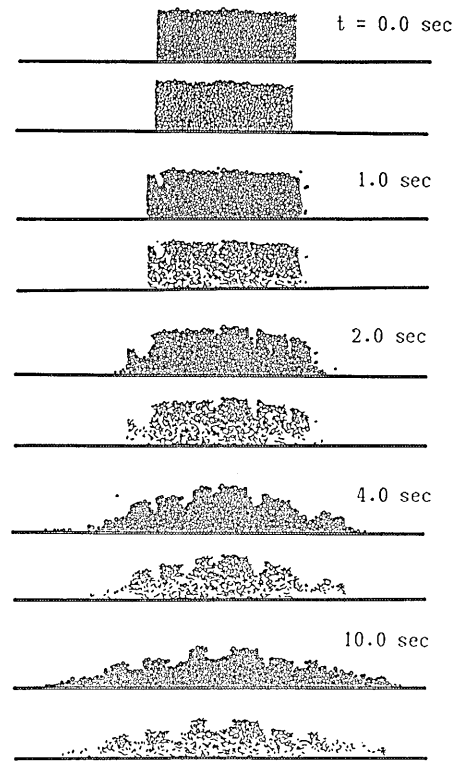


Fig. 29. Movement of particles and distribution of active clay springs.  
(Case 2,  $DCR2=1.5\%$ , input sinusoidal 2Hz, 1000gal)

されている。入力波の振幅が大きすぎたためと思われる。10秒までには上部も破壊され、塊りのまま崩れている。

Fig. 30 にケース 2 で入力する加速度の振幅を変えた例を示す。粘土分のひずみ限界  $DCR2$  を  $1.5\%$  とし、入力波は 2Hz の

ングを変えたモデルを作成し解析してみる必要があると思われる。

また、間隙パネのひずみのレベルが実際の地盤のひずみのレベルに較べて大きいという問題もある。これは、DEM 要素を土のブロックに相当させているためと思われる。連続体を離散化して要素の中心間距離でひずみを考えているが、空間のひずみを完全に表せていないためと思われる。

尚、CPU タイムは 2000 ステップ、2 秒分の解析を行なうのに HITAC M-280H で 25 分であった。

#### 4-2 崖の崩壊 3 次元解析

崖の崩壊解析は、3 次元で解析するほうが望ましいと思われる。崖の形状は崩壊に大きく関与すると思われる、2 次元解析ではわからなかったこともあらわれると思われる。崖のどの部分から崩れ始めるのかなど立体的な崩壊の進行の様子も表せられると思われる。ただし、本解析においては間隙のパネを考えていない。

解析用の領域とモデルの概略図を Fig. 31 に示す。崖の DEM モデルの大きさは幅 30 m、奥行き 20 m、高さ 18 m とする。モデルの周囲に平面からなる壁を設定しておき、まずはモデルを安定させる。それから、時刻 0 で一つの壁、図で手前の Y-Z 平面壁を消去する。外力は加えないことにし、崩れていく状態を解析する。解析領域は X 軸方向に 60 m まで設定しておく。

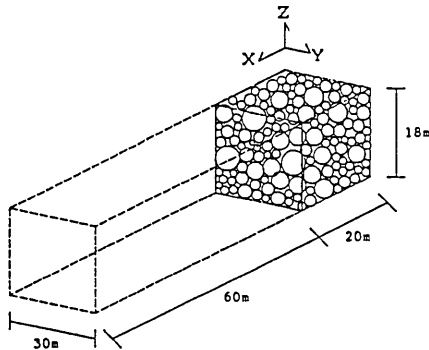


Fig. 31. Illustration of 3-D DEM model used for cliff collapse simulation.

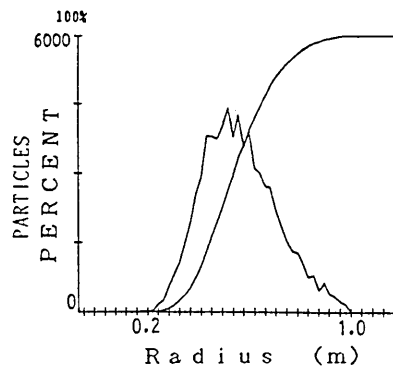


Fig. 32. Physical sizes of particles of 3-D DEM model.

解析に用いるモデルはランダムパッキングにより作成する。球要素の半径は対数正規分布に従い発生させる。その際のパラメータを Table 2 に示し、粒径加積曲線を Fig. 32 に示す。要素ブロックの半径は、20 cm~1 m とし、これらのブロックが地盤の構成単位となっていると仮定する。本来は、構成単位はこれより小さいと思われるが、小さくすると現在の計算機の能力を越えてしまい、解析不可能になるためこの値を用いることにする。要素数の 6000 個は、メモリー的にはもっと増やせるのだが、増やすと解析の速度が遅くなるのでこの程度とした。DEM モデルの安定にはまず落下法を用い、Z 軸方向に重力を作用させ落下させる。それから全要素に水平方向の振動外力を加え、締め固めをおこな

Table 2. Data of the 3-dimensional cliff model.

Particles		6000
Radius	max	1.0 m
	min	0.2 m
	mean	0.6 m
	$\sigma$	0.15
Width	(X)	20 m
Width	(Y)	30 m
Height	(Z)	18 m

$k_n$	$6.0 \times 10^6$	(N/m)	$\rho$	2500.0	(kg/m <sup>3</sup> )
$k_s$	$1.5 \times 10^6$	(N/m)	$e$	0.1	
$\eta_n$	0.0	(NSec/m)	$\mu$	0.2	
$\eta_s$	0.0	(NSec/m)	$\Delta t$	0.0025	(sec)
$k_{nw}$	$1.2 \times 10^7$	(N/m)			
$k_{sw}$	$3.0 \times 10^6$	(N/m)			

う。

このようにしてモデルをパッキングした後、壁をはずして DEM 解析する。その際の要素のパネ定数などの解析用パラメータを Table 2 に示す。粘性減衰項は用いないことにし、法線・接線方向ともに  $\eta=0$  とした。また回転項も考えないことにした。

反発係数を用いて、すべての要素の接触の際にエネルギーを消失させる方法を用いている。減衰項によりエネルギーが消費されることはないが、反発係数を用いた方法により衝突時のエネルギーの変化を表せると考える。反発係数  $e$  は 0.1、動摩擦係数  $\mu_D$  は 0.2 とする。要素の密度とパネ定数は、2次元での崖崩壊解析の値と同じ値を用いることにする。平面壁のパネ定数は要素のパネ定数の2倍とした。

解析の時間増分  $\Delta t$  は 0.0025 秒とし、20000 ステップ、つまり 50秒分の解析をおこなう。

壁をはずしてから 0~50 秒間の結果を Fig. 33, 34 に示す。全体の形状の変化を表面の位置で考えることにする。それらの点を包絡して描いている。領域全体に XY 平面のメッシュをかけ、各メッシュ内の要素の Z 座標の最大値をむすんだ図である。0~8 秒は、詳しく示すために表示する領域を狭くとり (Fig. 33)、8~50 秒は、広い範囲を表示している (Fig. 34)。この図より崩壊の概略を知ることができる。崩壊の細部を知るために断面図を用いる。Fig. 35 に  $0 < Y < 1$  に中心を持つ要素のみを示した図を示す。0~7 秒まで示す。こちらの図からは個々の要素の挙動をみることができる。

まず、はずした壁側の要素が前にずれ、崖の中腹部分がはずれ、これにともない崖の上方が崩れ落ちている。1 秒には崩壊は、崖の前面中央から奥に向かって進行していく。Fig. 35 に要素が全体的にずれていく様子がとらえられている。崩壊は崖の横 (Y 軸) 方

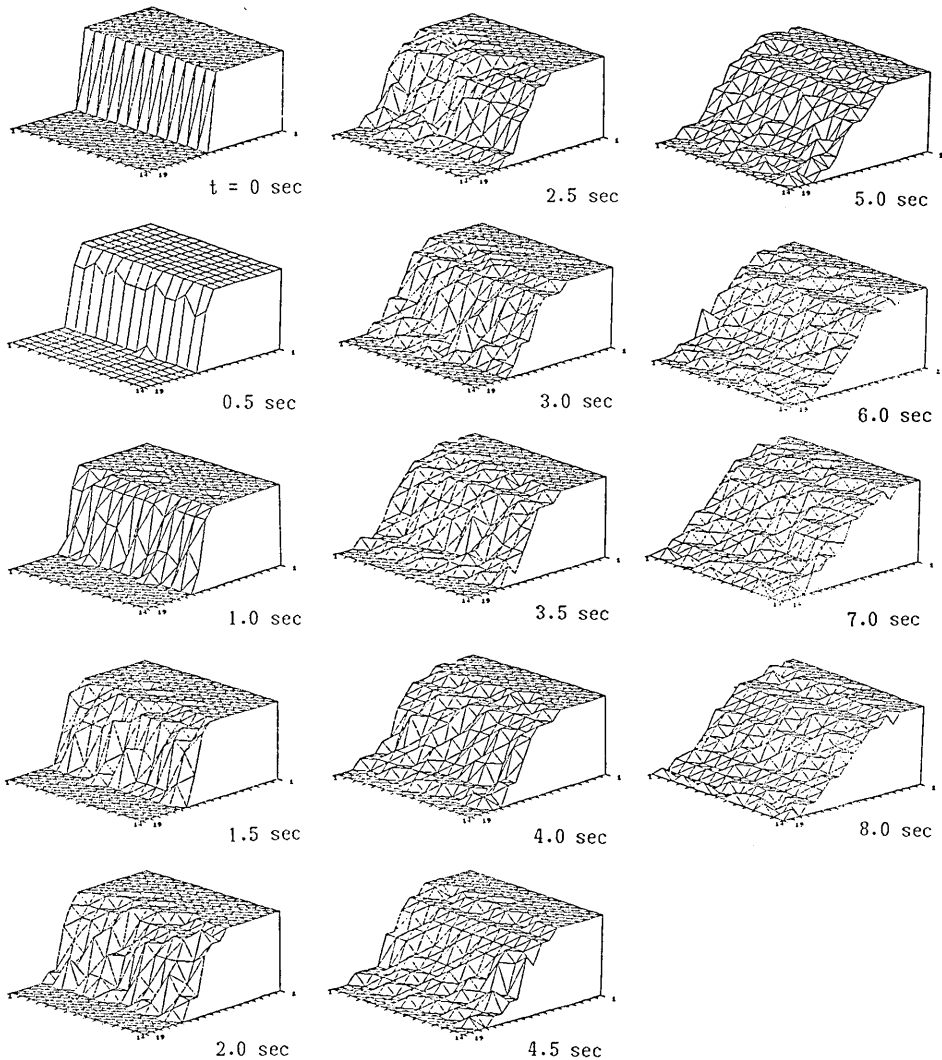


Fig. 33. 3-D cliff collapse.

向にも進み、しだいに崩れていく。崩れの斜面には、水平方向に平らな面が表れ、崖の前面全体で平行して崩れるようになる。8秒程度で崖から崩れた要素が表している領域の端に達したため、表示領域を広く設定しなおす。この時、崖上面の破壊はX軸方向のモデルの端に達している。反発係数を用いて運動エネルギーを消費させているのと、要素の回転の効果を考えていないために、崩れて前どころがった要素はすでに速度を殆ど失っている。これ以降は、後から崩れてくる要素が前にある要素を押し進めている。

22秒目には、崖全体の上面が初期状態より2m沈下している。モデルのX-Y平面での切断面はどこでもほぼ、同様な形状になっている。この傾向は、解析を打ち切るまで続

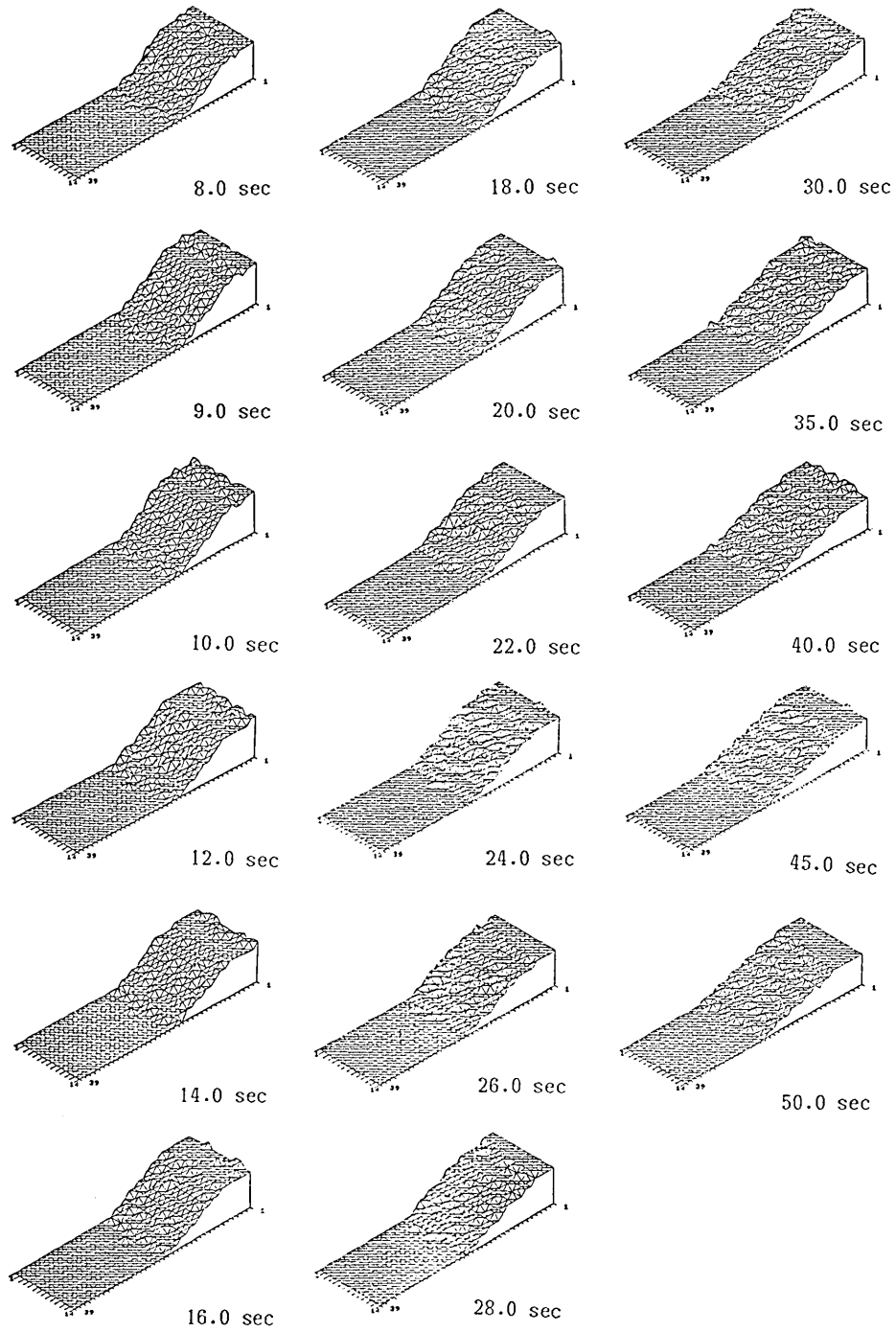


Fig. 34. 3-D cliff collapse.



いている。崩壊初期のように崖の周囲より中央部のほうが崩壊が奥まで進行するという事はない。その後も同じ傾向で進み、崖は段々と平らになだらかになっていく様子が表れている。50秒には、崖上面の沈下は4.5mとなっている。崩壊前面の段ははっきりしており、一番先までころがった要素は崖から30mのところまで達している。

尚、CPU タイムは、50秒分の解析で、HITAC M-280H を用いて720分間、使用したメモリーは7メガバイトであった。

### 5. 終 章

本研究では、CUNDALL の提案した DEM (Distinct Element Method) を基に、要素間をつないでいる物質の効果を法線方向と接線方向の2本のバネ、間隙バネでとりいれた方法を提案した。この改良により、地盤や土質材料の持つ連続体としての性格と非連続体としての性格の両方を表せることを示した。また、DEM のパラメータの決定法やパッキングの方法なども提案した。さらに、今まで2次元領域で定式化されていた DEM を3次元領域用に増分型でなくベクトルを用いて定式化し、実際に3次元解析用プログラムを製作した。

解析例として、まず2次元領域で崖の崩壊解析を要素数1000個のモデルで静的に破壊する場合と、地震動による場合について行なった。その結果、崖モデルに亀裂が生じ、すべり線にそって塊りとなったまま崩壊する進行性破壊を再現することができた。また各パラメータの影響も確認することができた。本方法によりすべり線をはっきり捉え表現できることが判明した。次に、3次元領域で6000個の球体要素を用いて崖の崩壊解析を試み、破壊の進行状況が再現できた。

これらの解析結果より、3次元解析が可能となることが示された。今後、本方法を用いるこ

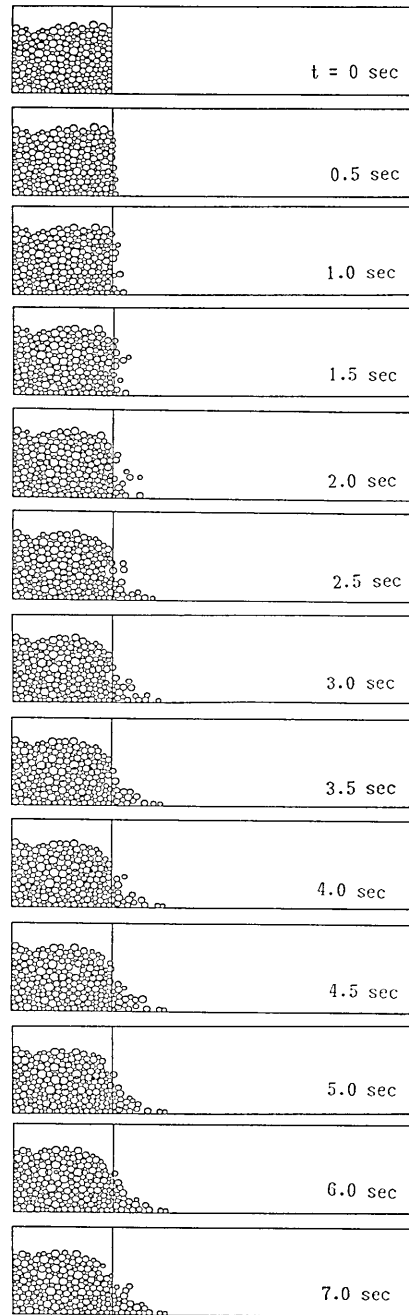


Fig. 35. 3-D cliff collapse.  
(cross section  $y=1.0$  m)

とにより、連続体、非連続体、連続体と非連続体の中間的な物質など様々な媒質の解析が可能になると思われる。

## 謝 辞

本研究を行なうにあたって、東京大学地震研究所の伯野元彦教授には常に貴重な御助言と御指導を賜わった。また東京大学工学部土木工学科の石原研而教授、東京大学生産技術研究所の田村重四郎教授、片山恒雄教授と龍岡文夫助教授に大変有益な御教授を戴いた。また、伯野研究室の飯田昌弘助手にも多くの御助言を戴いた。伯野研究室技官の井本良子さん、秘書の高田由美子さんと元秘書の手嶋香さん、現在日本道路公団の垂水祐二氏、日本設計のルシア・カサヴェルデさん、目黒公郎氏にも大変お世話になりました。とくにDEMのパラメータの決定法は、目黒氏との協力から生まれました。3次元崖崩壊の3-D表示には東京大学大学院の赤松隆氏の作製したプログラムを用いました。ここに記して謝意を表します。

解析には東京大学地震研究所共用システム室のHITAC M-280Hを用いました。研究室からは地震研のENET回線を介して、PC-9801を端末として解析を行ないました。その際には、共用システム室の瀧瀬一起氏と鷹野澄彦氏作製の端末用プログラム'ETERM'を用いました。ここに記して謝意を表します。

尚、本研究は博士論文として1988年3月に東京大学工学系研究科に提出した論文の前半部です。

## 参 考 文 献

- 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 D. D. L., STRACK, 1979, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, 2, 47-65.
- 藤村 尚・木山英郎・西村 強・池添保雄, 1988, 岩石のDEM定数決定のための落下反発試験, 土木学会第41回年次学術講演会概要集, III部門, pp. 369-370.
- 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.
- 伯野元彦・植村大輔, 1986, 粒状体シュミレーションによる地震時の地盤の挙動の解析, 土木学会第41回年次学術講演会概要集, III部門, 245-246.
- 伊藤 學・亀田弘行, 訳, 1976, 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 96-109.
- 川井忠彦・竹内則雄・三藤正明, 1985, 長野県西部地震による御岳崩壊の計算機シュミレーション, 東京大学生産技術研究所水曜懇話会資料.
- 川井忠彦, 1986, 新離散化モデルによる地盤基礎の動的極限解析プログラム RBSM 利用の手引, 東京大学大型計算機センター.
- 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.
- 最上武雄, 1969, 土質力学, 技報堂.
- 西村 強・木山英郎・藤村 尚, 1986, 粒状体の DEM 定数の決定—せん断試験の解析—, 土木学会第41回学術講演会概要集, III部門, 547-548.
- ROUND and NEWTON, 1963, Random packing of equal spheres on a plane surface, Nature.
- 佐藤泰夫, 1978, 弾性波動論, 岩波書店, 412-450.
- 垂水祐二・岩下和義・Lucia A. CASAVARDE・植村大輔・伯野元彦, 1986, 粒状体シミュレーションによる構造物基礎の動的解析, 第7回日本地震工学シンポジウム, 787-792.
- 垂水祐二・伯野元彦, 1987, 粒状体シミュレーションによる液状化解析, 土木学会第42回年次学術講演会概要集, III部門, 136-137.
- 植村大輔・伯野元彦, 1986, 粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析, 第21回土質工学研究発表会概要集, 881-882.
- 山口梅太郎・西村裕一, 1967, 岩石力学入門, 東大出版会.

---

*Dynamic Fracture Analysis of Ground by Granular  
Assembly Simulation I*

Kazuyoshi IWASHITA

Earthquake Research Institute

The present study aims to simulate the dynamic fracture process of soil and soil structure by developing Cundall's Distinct Element Method (*DEM*) in which soil is represented as a system of numerous discrete particles and dynamic behavior of all those particles is calculated individually. This method is based on the idea that each particle satisfies the equation of motion and the interaction among them simply. This method could not consider, however, some important problems: continuity of the medium and wave propagation. Many problems which have not been solved by conventional continuous mechanics are treated with this method. The present paper improves this method so as to solve these problems.

The new *DEM* consists of two structures: primary structure and secondary structure. The primary structure is the conventional *DEM* and is used to transmit the force through the contact points and to calculate particle movement. The secondary structure is used to present the continuity of the medium. For instance the first structure corresponds to rock or gravel and the second structure to internal clay. As a consequence, it can simulate wave propagation as well as dynamic fracture.

For test, the presented method is applied to dynamic fracture of cliffs caused by an earthquake and succeeds in simulating the fracture process of the cliffs. At an early stage, small cracks appear and grow up to long ones. Finally the cracks form fracture lines, and blocks of soil begin to slide down. The second structure of the model detects the crack lines and discriminates broken area from stable area.

These results suggest the applicability of the presented method to the study of the fracture problems of the soil and soil structures.