

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 2—

地震研究所 岩下和義*

(平成元年 1 月 30 日受理)

要 旨

最近の計算機の性能の急速な向上により、地盤の挙動の動的解析の手法として、粒状体シミュレーションが可能になった。それは、媒質を粒状体の集合として取り扱うものであり、CUNDALL が提案した DEM (Distinct Element Method) が代表的なものである。今までの地盤を連続体と近似しての解析法と異なり、この方法では初期の破壊の発生から大きな破壊に至るまでの一連のプロセスを扱うことが可能である。また、実験では再現できないさまざまな条件を容易に設定できる。

前報では、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、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。

本報では、この方法を盛土の崩壊解析 (2 次元)、礫の流れ解析 (3 次元)、波動伝播解析 (2 次元・3 次元)、断層運動の解析 (2 次元) に適用した。

盛土の崩壊解析では盛土の円弧すべりによる破壊が再現され、円弧すべりと直角な亀裂の発生や、斜面の角度がきつくなると崩れやすくなる、軟弱な材料の盛土は崩れやすい事などが示された。

礫の流れの解析では、パラメータの影響が大きい事が判明した。

波動伝播解析では、本来の DEM は解析に向きであるが、改良された DEM により解析可能な事が示された。崖のような不整形地盤では、端で応答が大きく麓では小さくなり、連続体解析での結果と一致した。また、ダッシュポット等を考えなくても内部減衰が現われた。

断層運動の解析より、不均質な地盤では群発性地震が生じ、均質な地盤では、本震・余震のパターンで生じるという結果が得られた。これは地震学での結果と一致する。

これらの結果より、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、従来は行なえなかった地盤の波動伝播解析や断層運動の解明に適用できることがわかった。

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。また、土は非連続体に近い挙動もするので、媒質を非線形として連続体解析を行なっても土の挙動は再現しにくいと思われる。

近年、計算速度の高速化、容量の巨大化が毎年のように進み、粒状体解析が可能になった。この方法は、媒質を粒状体の集合として取り扱う方法である。粒状体シミュレーション手法としては、1971 年 CUNDALL (1971) が提案した DEM (Distinct Element Method)

* 現在 埼玉大学工学部

が知られている。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。

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かわせない。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。ロックフィルの噛みあいの効果を表せないなどの問題を含んでいる。前報（1988）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、要素間を繋いでいる物質（水、粘土等）の影響を法線方向と接線方向のバネ要素（間隙バネ）を用いて表す方法を提案した。この力の効果はひずみがある限界の値を越えれば破壊するとした。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質の両方を表せるようになった。なお、剛体要素の接触力の系を **Primary Structure**、つなぎの力の系を **Secondary Structure** と呼ぶことにする。そして崖の地震による動的崩壊解析を行ない、すべり破壊の発生過程を再現した。また、球要素を用いた 3 次元粒状体解析法も提案した。

本報では、改良した DEM を用いて以下の解析を行なった。盛土の崩壊解析を 2 次元で行ない、盛土の地震時のすべり破壊の発生の過程を追跡する。3 次元領域で礫の流れ解析を行ない、土石流のメカニズムを粒状体シミュレーションで再現することを試みる。今までの DEM では困難だった波動伝播解析を、2 次元と 3 次元領域で試み連続体解析法の結果と比較する。地盤の大変形・破壊運動である断層運動を 2 次元 DEM で扱うことを試みる。

2. 盛土の崩壊解析

地震の際に、地盤が軟弱な地域で多くの盛土がすべりや沈下等の被害を受けている。盛土は他の構造物に比べ被害を受けやすい。静的な解析は行なわれているが、動的な破壊解析はあまり行なわれていない。これは連続体解析法では地震時の土構造物の挙動を正確に追跡することが困難であり、すべり破壊という大変形が始まると解析不可能になる為である。そこで、非連続体を扱うことができる改良された DEM を用いて、地震時の盛土の挙動を動的解析しすべり破壊の発生の再現を 2 次元領域で試みる。

盛土のモデルは、長方形の崖モデル（要素数 1000 個）から作成する。Fig. 1 のように、元の DEM モデルをある角度で切り取り、不要な要素を消去し、成形する。斜面の角度は、 45° と 30° の 2 ケースとする。斜面を作るために要素を取り去るが、これにより残った要素モデルの応力状態は変化する。元のモデルの z 軸方向に重力が作用しているので、下方の要素に土圧が作用した状態で要素が接触し安定している。そのため、成形して要素を取り去ってしまうと、応力解放が生じ自由になった要素が配列を崩し動き出してしまう。この現象を避けるために、本解析をする前にモデルを安定させる必要が生じる。しかし、安

定化には、長い時間がかかり、その過程でモデルの形状は崩れてしまう。そこで成形後、要素間に空隙バネ要素を設定し、このバネ要素は盛土に粘性を持たせている粘土分の効果を表す。安定の為、空隙バネを設定後、モデルに重力のみを加える。この過程に必要な時間は、空隙バネを用いない場合よりずっと少なくて済む。この解析の間に、応力解放する分の力を空隙のバネに吸収させ、モデルを安定させるわけである。こうして安定した盛土モデルを作成した後、振動外力を加える解析を行なう。外力として正弦波加速度をモデル下方の壁要素に水平 x 軸方向に入力する。

作成した盛土のモデルを Fig. 2 に DEM 要素の配置と空隙バネの配置で示す。Table 1 に 45° 斜面の盛土モデルの概要を、Table 2 に 30° の概要を示す。解析用のパラメータのうち、共通な値を Table 3 に示す。解析で変化させるパラメータは Table 4 と Table 5 に示す。ひずみの限界値 DCR 2 を変化させ、傾向を調べる。

45° 斜面で振動外力を加えず、粘土分つまり空隙バネのひずみ限界を 2% とした場合、空隙バネの一部は引張りを生じて破壊しているが、全体は崩れず、自重に耐えた。Fig. 3 に振動外力として 2 Hz, 1000 Gal の正弦波加速度を入力したケース 5 の結果を左側に各時刻の要素の分布図、右側に空隙バネの分布図で示す。盛土には完全なすべり線は表れていない。つまり、空隙バネの破壊点が線状につながり、そこを境に別々の挙動を始めるといった現象は起こらなかった。モ

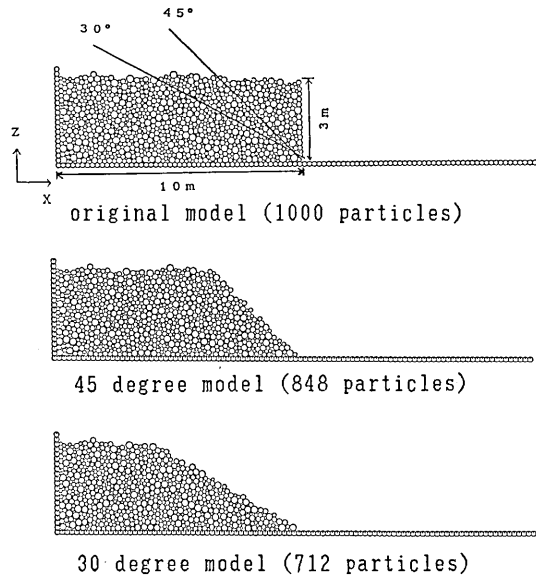


Fig. 1. The 2-dimensional bank model.

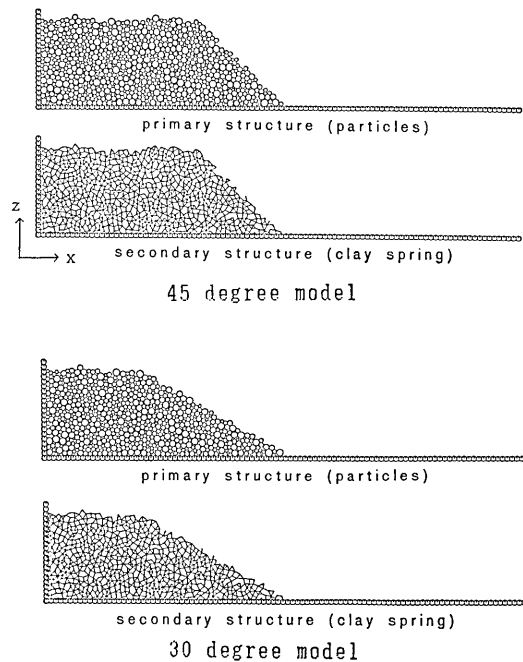


Fig. 2. Bank models.

Table 1. Data of the 2-dimensional bank model (45 degree).

Particles		848
Radius	Max	15.0 cm
	Min	5.0 cm
	Mean	10.0 cm
	σ	0.15
Width	(X)	10 m
Height	(Z)	3 m

Table 2. Data of the 2-dimensional bank model (30 degree).

Particles		712
Radius	Max	15.0 cm
	Min	5.0 cm
	Mean	10.0 cm
	σ	0.15
Width	(X)	10 m
Height	(Z)	3 m

Table 3. Parameters for 2-dimensional bank model.

k_n	6.0×10^6	(N/m)	ρ	2000.0	(kg/m ³)
k_s	1.5×10^6	(N/m)	Δt	0.001	(sec)
η_n	0.0	(NSec/m)	e	0.2	
η_s	0.0	(NSec/m)	μ	0.2	
DCR 1	1.03				

Table 4. Case of parameters of 45 degree bank model.

Case	DCR2	c_{DEM} (N)	k_{CN} (N/m)	k_{CS} (N/m)	Amp. (Gal)	Freq. (Hz)
1	1.015	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	0.0	0.0
2	1.015	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	0.0	0.0
3	1.015	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	1000.0	2.0
4	1.015	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	0.0	0.0
5	1.02	1000	6.0×10^6	5.0×10^6	1000.0	2.0
6	1.018	1000	6.0×10^6	5.0×10^6	1000.0	2.0
7	1.017	1000	6.0×10^6	5.0×10^6	0.0	0.0
8	1.017	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	1000.0	2.0
9	1.016	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	1000.0	2.0

Table 5. Case of parameters of 30 degree bank model.

Case	DCR2	C_{DEM} (N)	k_{CN} (N/m)	k_{CS} (N/m)	Amp. (Gal)	Freq. (Hz)
10	1.015	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	0.0	0.0
11	1.015	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	1000.0	2.0
12	1.015	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	1000.0	2.0
13	1.012	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	0.0	0.0
14	1.012	1000	6.0×10^6	5.0×10^5	1000.0	2.0

デルの右下から左上にかけて円弧すべりが生じかけているが盛土の他の部分とのつながりは完全には切れておらず、大きくすべりだすには至っていない。それでも7秒の解析で、盛土の上面は全体的に20 cm以上も沈下している。これは、部分的な円弧すべりにより少しすべったための沈下である。沈下した分、盛土の斜面は前にすべりだしている。

引張りひずみの限界値を変化させ解析した結果、この45°のモデルでは1.6%以下に

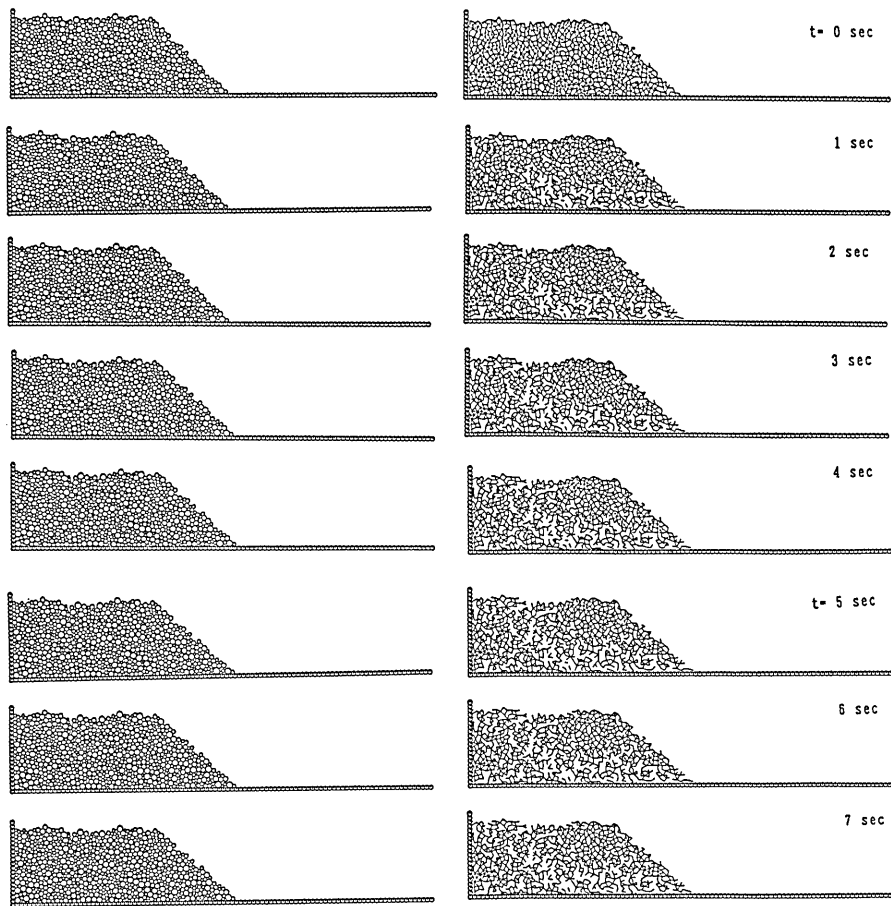


Fig. 3. Dynamics of bank collapse caused by an earthquake (slope angle 45° , case 5).

すると自重を支えきれずすべりだし、1.7% 以上にすると原形を保つことがわかった。

Fig. 4 と Fig. 5 にひずみの限界値を 1.6% とするケース 9 の結果を示す。Fig. 4 には各時刻の要素の分布図と間隙バネの分布図を、Fig. 5 には要素と間隙バネの分布図と速度の分布図を示す。入力波は 2 Hz, 1000 Gal とし、8 秒分の解析を行なった。

結果をみると、複数のすべり線が表れている。顕著なのは、右下から左上にかけての円弧すべりと斜面と直角方向に表れた亀裂である。円弧すべりは間隙バネの分布図にも表われている。解析の初めの 1 秒で、円弧すべりが表れ、3 秒には大きくすべり初めている。すべるのに従い、円弧すべりと直角方向にいくつかの亀裂が生じている。そのため、すべり落ちていく部分はいくつかのブロックに砕けている。円弧すべりは 1 本の線ではなく、幅をもった曲線となっている。8 秒ごろにはすべり線と多くの亀裂により盛土は段々状になり前面に 3 m ほどすべりだし膨らんでいる。これは、盛土でよくみられる被害状況と

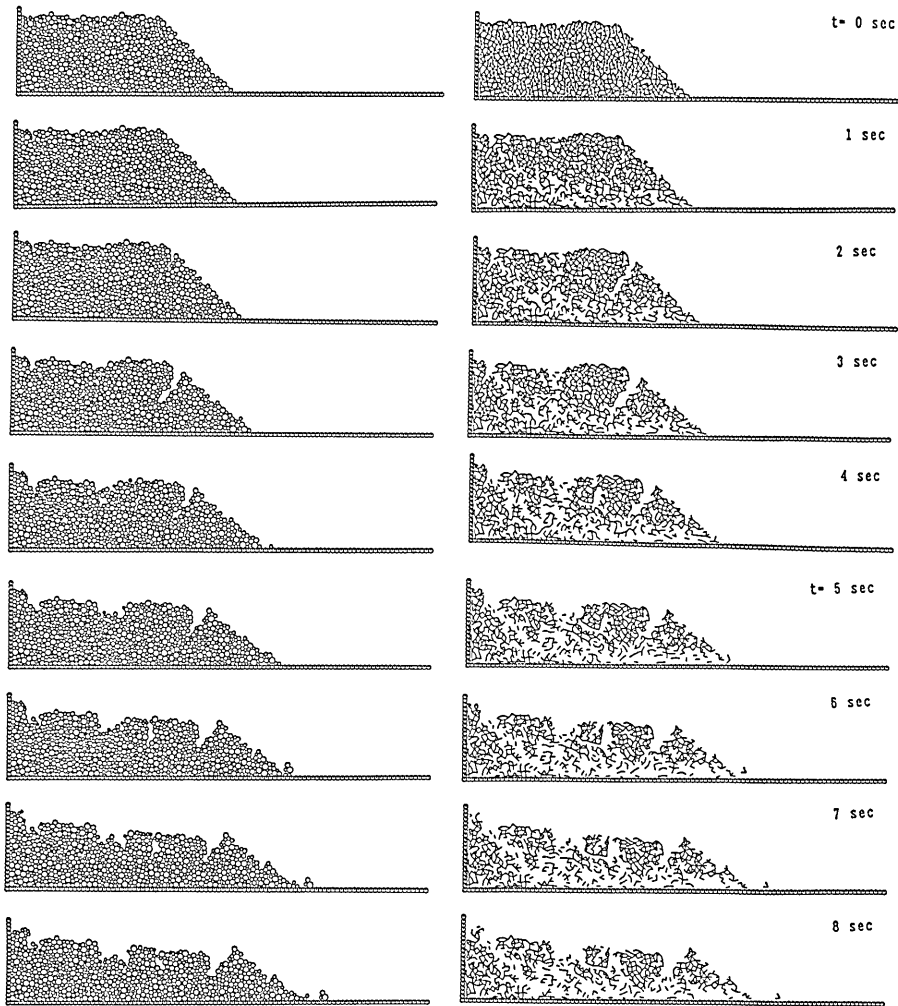


Fig. 4. Dynamics of bank collapse caused by an earthquake (slope angle 45° , case 9).

一致している。1~2秒であらわれた斜面と直角方向の亀裂より右側のブロックは前方 x 軸方向にすべり、左側のブロックは沈下している。盛土上面は70cmほども沈下している。速度の分布図より、要素が沈下する様子や円弧すべりの部分がいくつかのブロックに分離し、それぞれのブロックが一体となって運動している様子を見ることができる。この例では、すべり線は下方の壁要素と接しており、壁要素の影響を受けた。

次に、斜面の角度を 30° とした場合の結果を示す。Fig. 6 にひずみの限界値を1.5%としたケース10の結果を示す。ここで、 30° 斜面モデルは、 45° 斜面のモデルに比べると安定しており、ひずみの限界を1.2%と小さくしても自立している。

この例でも、円弧すべりのすべり線が表れている。解析を初めて1~2秒に表れ始め、

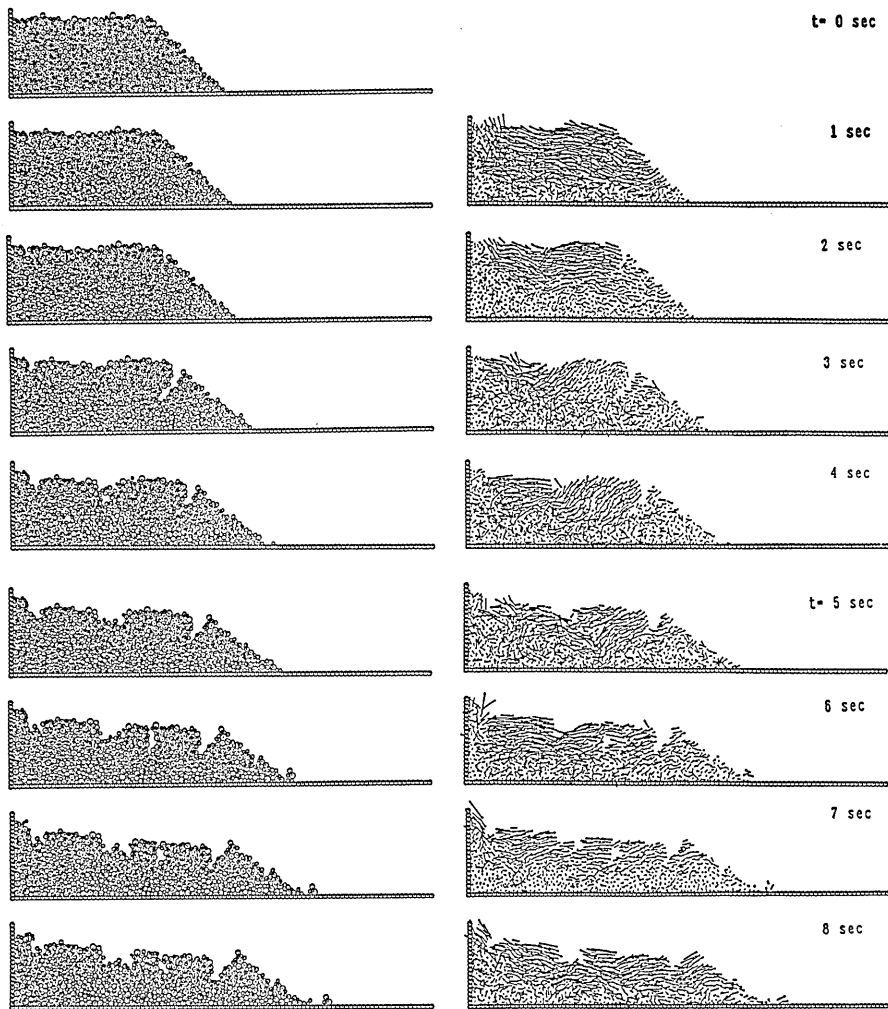


Fig. 5. Dynamics of bank collapse caused by an earthquake (slope angle 45° , case 9).

6秒ぐらいから大きくすべりだしている。すべり線の表れた位置は、 45° 斜面の場合と大体同じ位置であり、特定の間隙バネが破壊されている。これは、モデルに最初から相対的に弱い箇所があり、それらがつながって大きなすべり線に成長したためである。また円弧すべりと直角方向の亀裂が生じている。この原因は、円弧すべりの上のブロックがすべる際に、ブロック内に引張り力が生じ、弱い箇所の間隙バネが破壊され亀裂が生じるためと思われる。尚、盛土は 10 秒間で上面が 50 cm ほど沈下し、その分 2 m ほど前面にすべりだしている。

Fig. 7 に斜面の角度が 30° でひずみの限界値を 1.2% としたケース 14 の結果を示す。限界値を 1.5% とした前例に比べ、軟弱な土質材料を用いた場合を表しており、結果

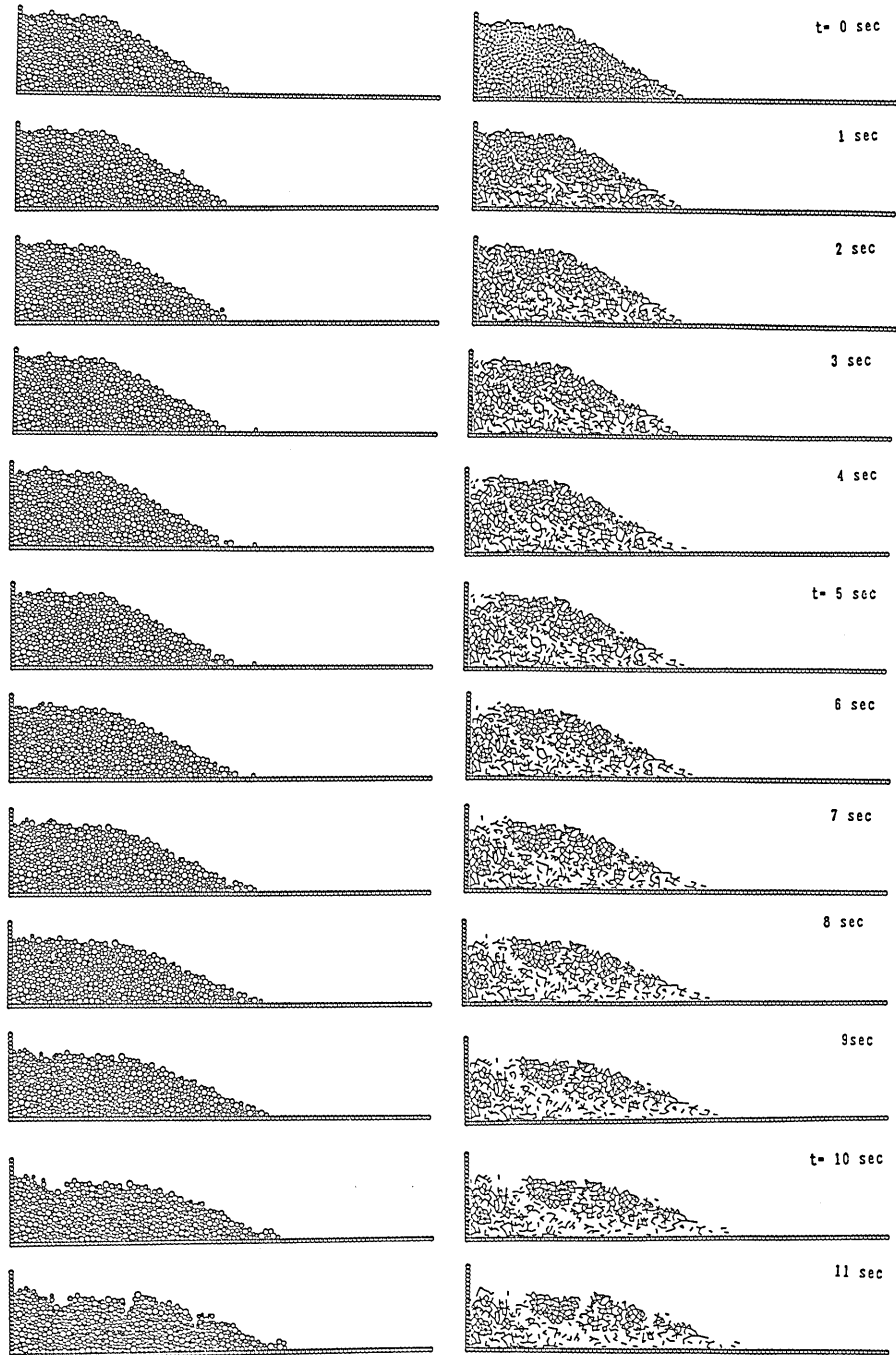


Fig. 6. Dynamics of bank collapse caused by an earthquake (slope angle 30° , case 10).

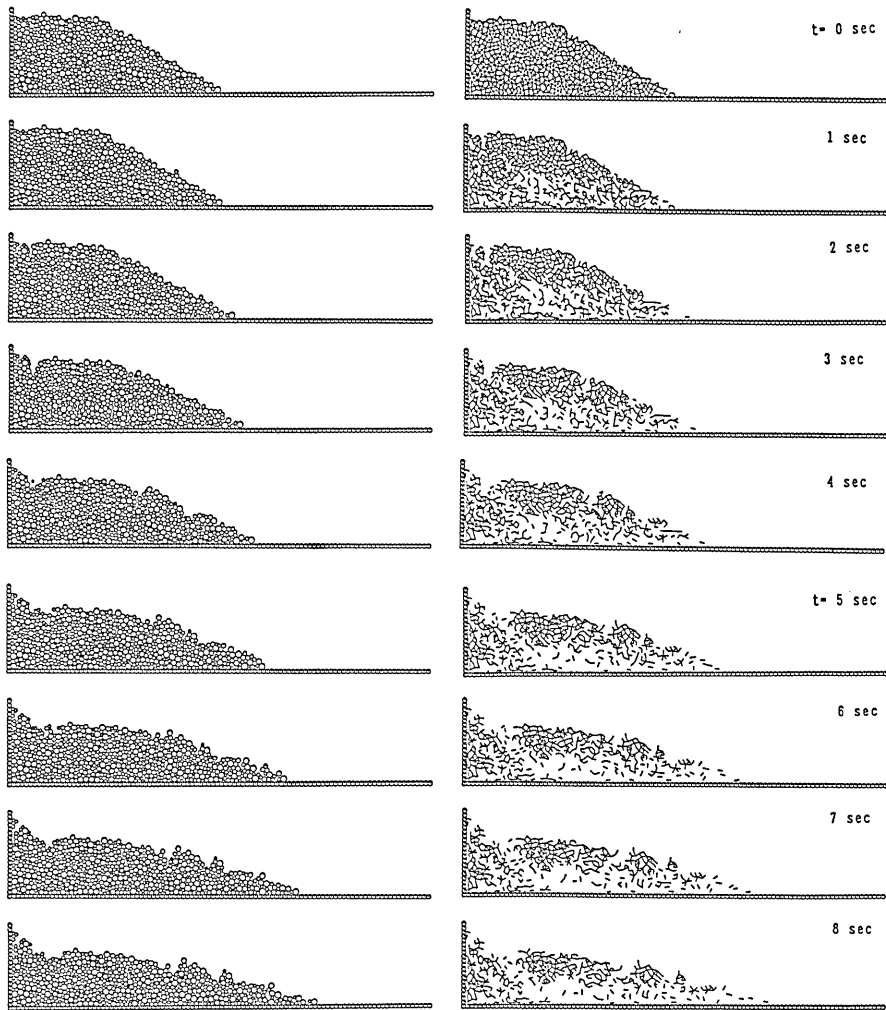


Fig. 7. Dynamics of bank collapse caused by an earthquake (slope angle 30° , case 14).

は早くすべりだしている。2秒には大きくすべりだしている。円弧すべりと、それと直角方向の亀裂によりいくつものブロックにわかれすべっている。盛土上面の沈下量は8秒分の解析で1m以上、前面へのすべりだしは3mで他の解析例より大きく、軟弱な材料を用いると簡単にすべってしまうことがわかる。

本解析例では、剛体要素間の粘土分の影響を間隙バネによりDEMに採り入れることで、盛土のすべり破壊が再現可能な事を示した。盛土に振動外力が作用して、すべり線が生じ、円弧すべりが発生し、盛土に亀裂が入り、すべり、沈下していく状態を明確に再現されている。その際に、円弧すべりと直角方向に亀裂が生じ、盛土が崩壊して段状になる過程も表現することができた。また、斜面の角度、つまり法面が急なほどすべりやすくなり、軟弱な土質材料を用いるほど、盛土の崩壊は激しく、沈下やすべりだしが大きくなる

という結果も得られた。

3. 礫の流れ解析

DEM 解析法は、礫とか岩、土石流、とうもろこし、大豆などの固体、粒状体の流れを解析するのに適した方法であり、幾つかの2次元解析の例がある。木山・藤村 (1983) はサイロの中の岩質粒状体の流れを解析しており、植村・伯野 (1987) は長野県西部地震の際の御岳崩れをモデル化し岩石流の解析を行っている。また、椿・橋本・末次 (1982) は粒子間応力を考慮した粒状体解析法により土石流内での粒子の移動問題を扱っている。本解析では、要素間に水や圧縮された気体、粘土等を含んでいない礫の流れを、要素の移動の自由度が大きい3次元シミュレーションで試みる。

Fig. 8 にモデルの概略を示す。解析は直方体につめた DEM モデルを $X-Z$ 平面で θ° 傾け、斜面下方向に崩れさせる。直方体の大きさは $10 \times 10 \times 10$ と $20 \times 5 \times 10$ (m^3) の2通りとする。解析可能な領域は、 $200 \times 10 \times 10$ (m^3) とした。礫の流れていく途中の状態を調べるため、全粒子に斜面方向に同じ初速度を持たせる。ここで斜面の角度 θ は、要素にかかる重力の方向を変えることで表す。すなわち、要素の X, Y, Z 方向に以下の力を加える。

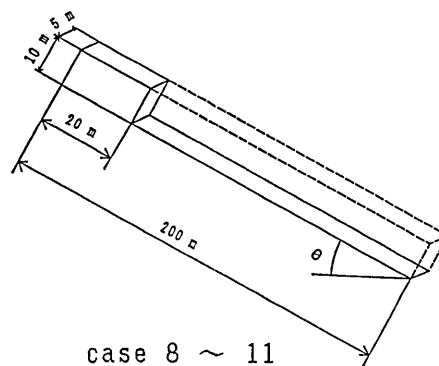
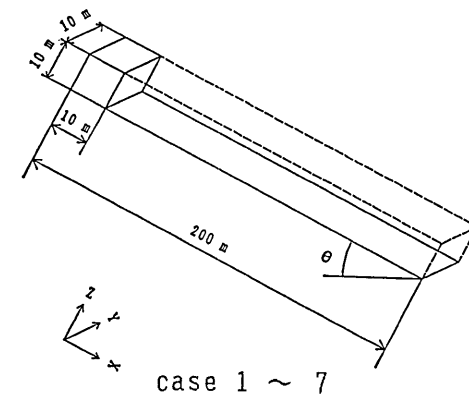


Fig. 8. Particle flow model (dotted lines show the valley).

$$F_x = m_1 g \times \sin \theta \quad (1)$$

$$F_y = 0 \quad (2)$$

$$F_z = m_1 g \times \cos \theta \quad (3)$$

ただし、 m_1 は要素の質量、 g は重力加速度とする。この力を用いることにより、実際に傾いたモデルを作成しなくてもよいことになる。要素に与える初速度は、斜面下向き、つまり X 軸方向に加える。

DEM モデルのデータと共通なパラメータを Table 6 に示す。粒径分布は半径 20 cm ~ 1 m、要素数は 683 個とする。斜面の角度 θ° 、反発係数 e 、動摩擦係数 μ 、粒子に与える

Table 6. Data of particle flow.

Partilces		663
Radius	Max	1.0 m
	Min	0.2 m
	Mean	0.6 m
	σ	0.15
Case 1~7		
Width	(X)	10 m
Width	(Y)	10 m
Height	(Z)	10 m
Case 8~11		
Width	(X)	20 m
Width	(Y)	5 m
Height	(Z)	10 m

k_n	6.0×10^8	(N/m)	ρ	2500.0	(kg/m ³)
k_s	1.5×10^8	(N/m)	Δt	0.0025	(sec)
η_n	0.0	(NSec/m)	k_{sw}	1.2×10^7	(N/m)
η_s	0.0	(NSec/m)	k_{sw}	3.0×10^8	(N/m)

Table 7. Case of parameters of particle flow.

Case	θ ($^\circ$)	V_0 (m/sec)	e	μ
1	30.0	2.0	0.8	0.2
2	30.0	2.0	0.2	0.2
3	30.0	10.0	0.8	0.2
4	30.0	30.0	0.8	0.2
5	10.0	2.0	0.8	0.2
6	10.0	10.0	0.8	0.2
7	10.0	30.0	0.8	0.2
8	10.0	5.0	0.8	0.2
9	10.0	20.0	0.8	0.2
10	10.0	20.0	1.0	0.2
11	10.0	5.0	1.0	0.1

初速度 V_0 m/sec の 4 つのパラメータを変化させる。設定したパラメータの組合せ、11 ケースを Table 7 に示す。

Fig. 9 にケース 1 の結果を、 XZ 平面の切断面で図示する。要素の中心点の Y 座標で場合わけして各区間毎に表示した。 $0 < Y < 1.1$ が壁際で、 $4.4 < Y < 5.5$ が流れの中央付近となる。 $0 \sim 30$ 秒までの各断面を 10 秒毎に表示した。要素が重なって表示されているのは 3 次元の球を平面に投影したためである。どの断面でも流れの位置・形状がほぼ同じなので、以降モデルの中央付近の $4.4 < Y < 5.5$ の断面だけを示す事にする。 Fig. 10 に残りのケースを示す。

ケース 1 で早い要素は 20 m/sec 程の速度で転がり、流れの本体は、与えた初速度と同じ 2 m/sec で流れている。20 秒までは本体といえる塊が残る、その後だんだん分解していく様子があらわれている。30 秒には塊りはほぼなくなり、40 秒で解析領域の境界に達して止まった。大きな要素が小さい要素の上に着いているものもあるが、上層に集中する傾向は表れていない。また、どの断面を見ても、流れの形状にそれほどの違いはなく側方の壁の影響は小さい。要素は横つまり Y 軸方向にはあまり動いていない。

次に、反発係数 e を 0.2 にしたケース 2 では、礫は少ししか流れていない。これは、本方法での e の評価が適切でないと思われる。

V_0 を 10 m/sec ケース 3 は、礫が塊りとなったまま流れ、20 秒以降に分解している。流れは混然としており大きな要素が上層に浮上してくるといった傾向はやはりみあたらない。

V_0 を 30 m/sec にしたケース 4 では、流れが最初から分解してしまい、形状を保たない。

θ を 10° 、 V_0 を 2 m/sec としたケース 5 では、すぐに止まった。 V_0 を 10 m/sec としたケース 6 でも 5 秒目に止まっている。ケース 7 で V_0 を 30 m/sec としたが、最初に要素の塊りが壊れるが、すぐに止まってしまった。

次に流れがすぐに崩れるのは要素が少ないためとも思われるので、同じ 683 個の要素を縦長に配置したケース 8~11 を行った。斜面の角度 θ は 10° とする。その結果を Fig. 11 に示す。

ケース 8, 9 は、 e が 0.8 で等しく、 V_0 が 5 m/sec と 20 m/sec である。結果は要素はほとんど流れず、要素の数が増え重量が増したが、自重で流れ落ちることはなかった。

次に、反発係数 e を 0.8 から 1 にして解析した。これにより、要素が衝突しても運動エネルギーの損失がなくなる。ケース 10 では、 V_0 を 20/sec、11 では 5 m/sec とした。初速度が早すぎたためケース 10 では 10 秒で要素が解析領域の境界に達している。11 では、流れが塊りとなりながら流れていく状態が表れている。塊りの本体は、5 秒ごろに 2 つに分離し、20 秒に最初の塊りが境界に達し、25 秒に後の塊りも達している。この結果でも、大きな要素が流れの上層にも下層にもあり、とくに分布に特徴は表れなかった。

動摩擦係数 μ を変えたケースも解析した。結果は、 μ を小さくすれば流れやすくなる。大きな要素が上層に集中する傾向は表れなかった。

パラメータの影響は、初速度を早くすると流れの形状が保たず、遅いと塊りのまま流れる。反発係数 e を小さくすると流れなくなり、改良する余地があると思われる。3 次元解析では要素数をより多くする必要がある。

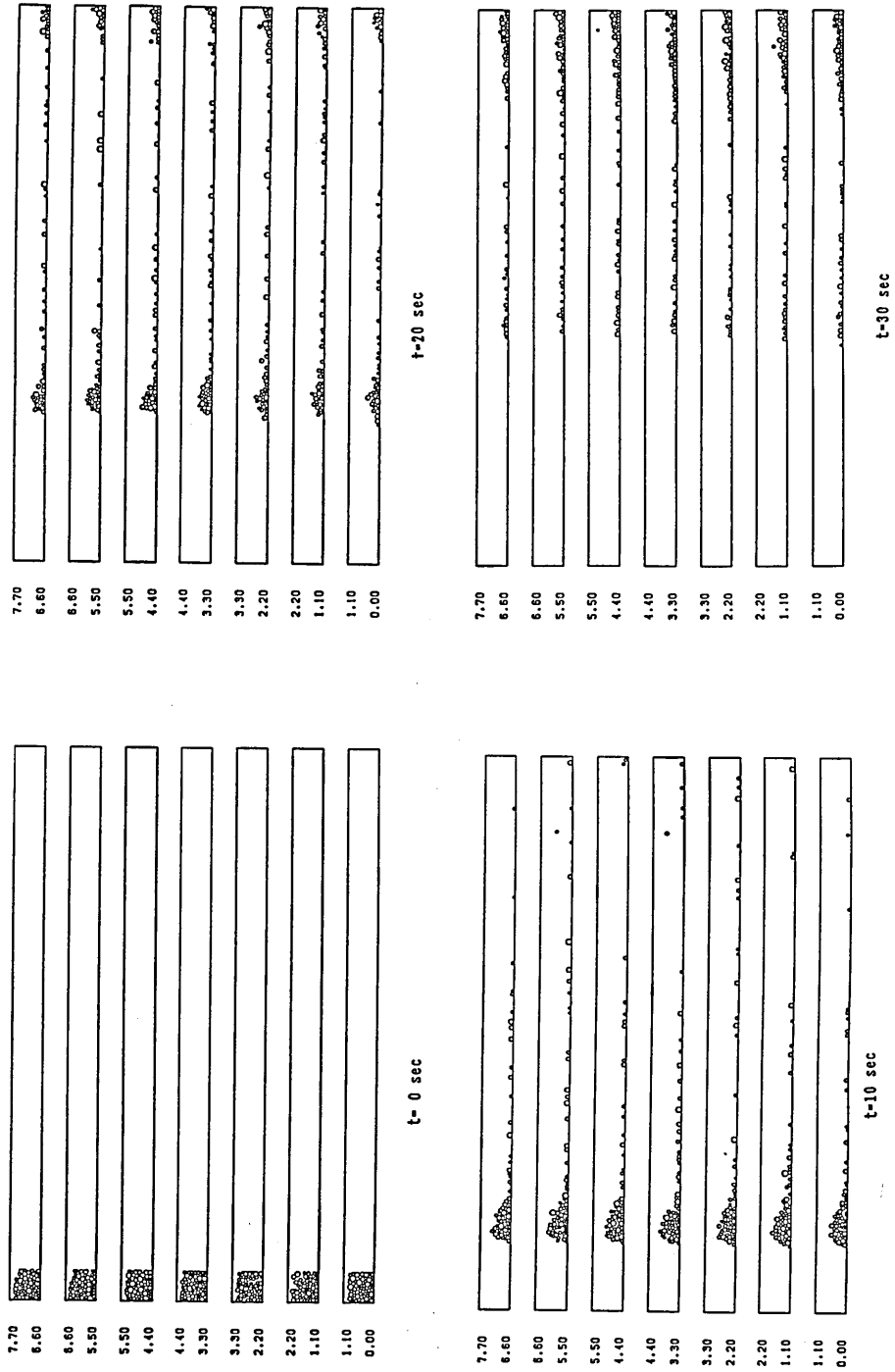
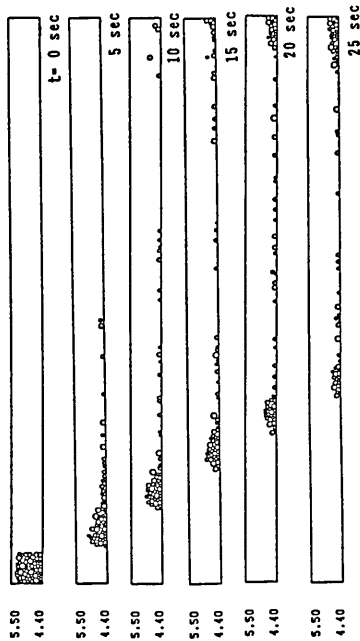
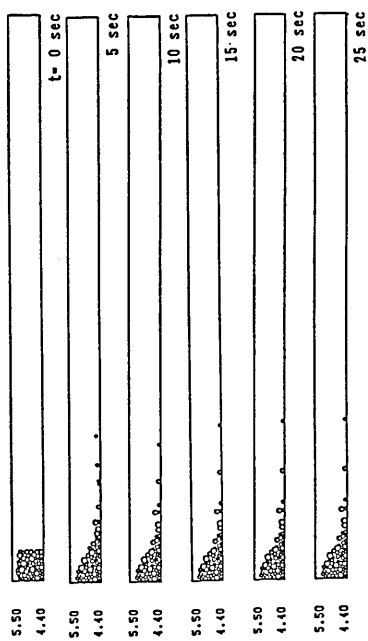


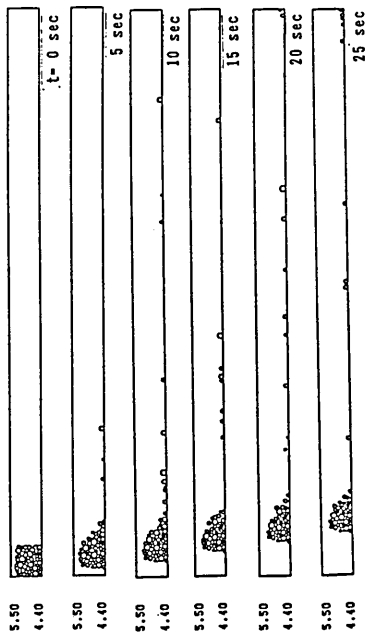
Fig. 9. Particle flow (case 1).



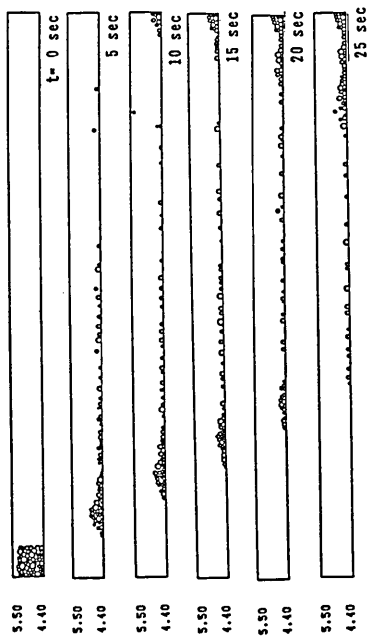
($\theta = 30^\circ$, $V_0 = 10m/s$, $e = 0.8$, $\mu = 0.2$)



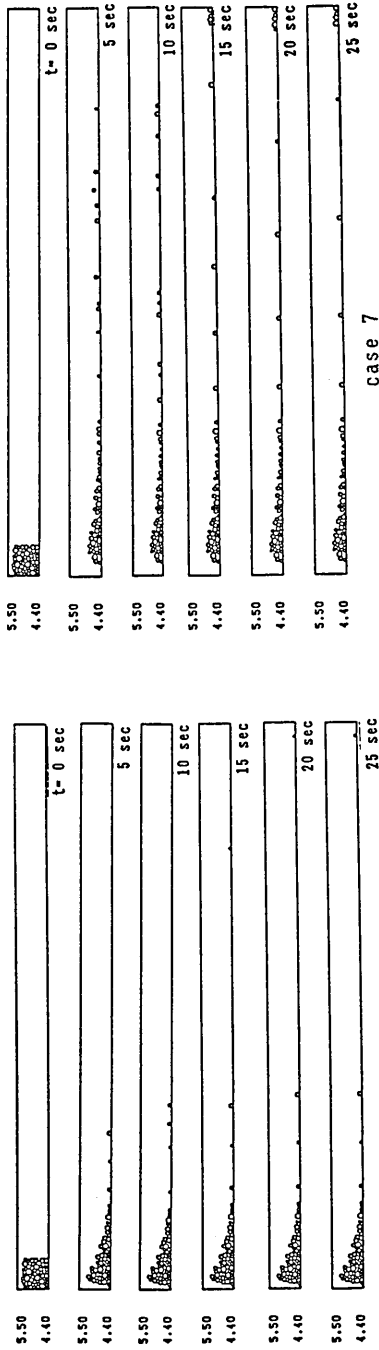
($\theta = 10^\circ$, $V_0 = 2m/s$, $e = 0.8$, $\mu = 0.2$)



($\theta = 30^\circ$, $V_0 = 2m/s$, $e = 0.2$, $\mu = 0.2$)



($\theta = 30^\circ$, $V_0 = 30m/s$, $e = 0.8$, $\mu = 0.2$)



($\theta = 10^\circ$, $V_0 = 10\text{m/s}$, $e = 0.8$, $\mu = 0.2$)

($\theta = 10^\circ$, $V_0 = 30\text{m/s}$, $e = 0.8$, $\mu = 0.2$)

Fig. 10. Particle flows (case 2-7).

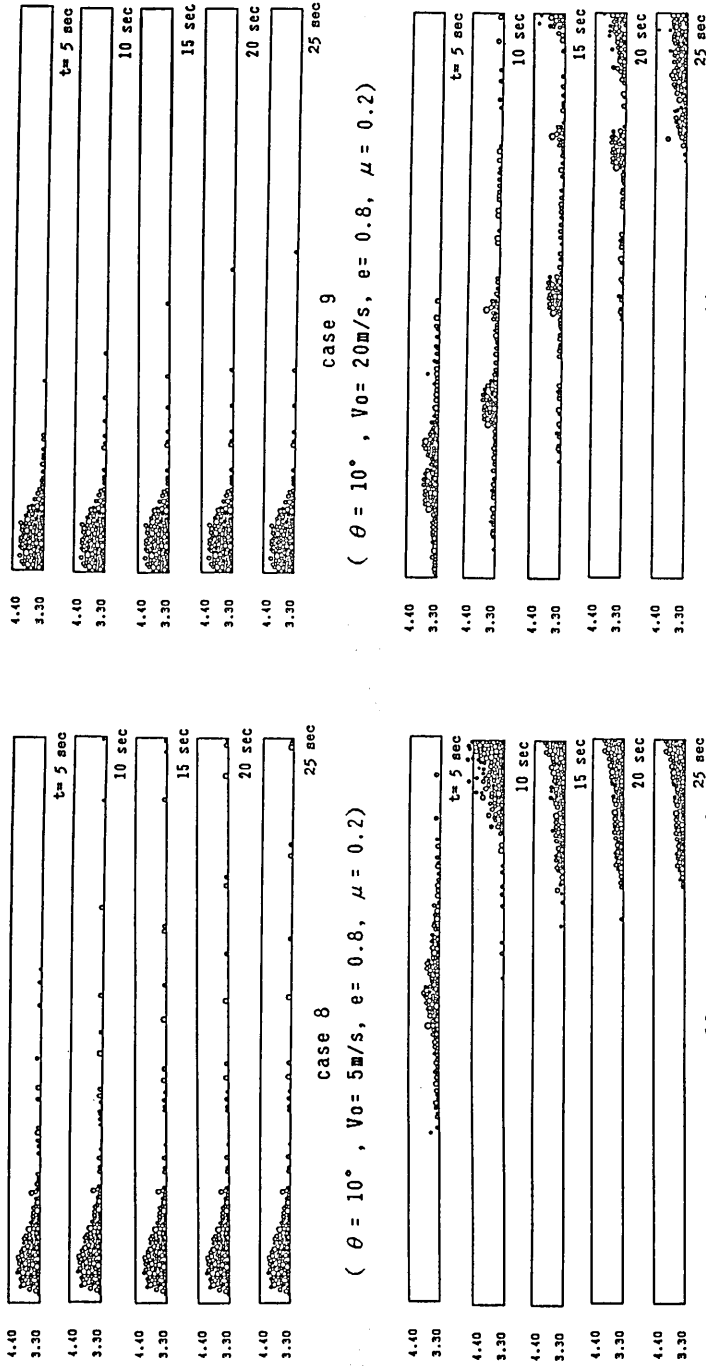


Fig. 11. Particle flows (case 8-11).

本解析では、単純な形状の谷での礫の流れを取り扱った。この場合には奥行きが浅い為、どの断面でもほぼ同様な流れをしており、要素の流れと垂直横方向の移動はほとんど生じていない。そのため次元解析の効果はあまり発揮されていない。そこで、将来は左右に蛇行する谷の土石流や要素が横方向に拡散する場合など3次元の効果が高い問題の解析を行ないたいと思う。

4. 2次元波動伝播解析

今までのDEM解析では、要素間の結合が緩く、波動を伝達することができなかった。これはある要素に波動を入力しても、疎密波は伝わるが剪断波は要素同士のすべりにより伝達されにくい。また入力動により要素が動き、配列が変わるなどの問題が生じ解析は困難であった。

これらの問題は、間隙のバネを採り入れることで解決できる。要素相互の変形を伝える間隙バネにより要素の結合は堅固になり、疎密波だけでなく剪断波も伝達すると思われる。また、自重で壊れないモデルを作成できるので、形状が複雑な場合でもモデル化可能で

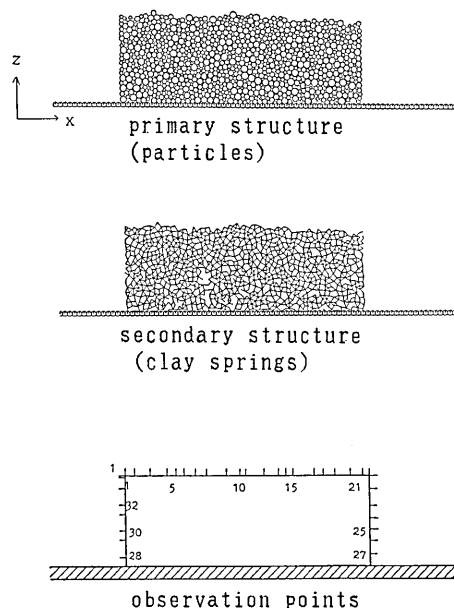


Fig. 12. 2-dimensional cliff model and observation points (case 1).

Table 8. Data of the wave propagation model (2 dimensional model).

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

k_n	6.0×10^6	(N/m)	ρ	2000.0	(kg/m ³)
k_s	1.5×10^6	(N/m)	Δt	0.001	(sec)
η_n	0.0	(NSec/m)	DCR 1	1.2	
η_s	0.0	(NSec/m)	c_{DME}	1000	(N)
μ	0.2		k_{CN}	1.2×10^6	(N/m)
e	0.2		k_{CS}	1.0×10^6	(N/m)

Table 9. Wave propagation parameters (single side is free).

Case	DCR2	c_{DEM} (N)	k_{CN} (N/m)	k_{CS} (N/m)	Amp. (Gal)	Freq. (Hz)
1	1.05	1000	1.2×10^9	1.0×10^5	160.0	2.0
2	1.05	1000	1.2×10^7	1.0×10^5	160.0	2.0
3	1.05	1000	1.2×10^7	1.0×10^5	400.0	2.0
4	1.05	1000	6.0×10^9	5.0×10^5	640.0	4.0

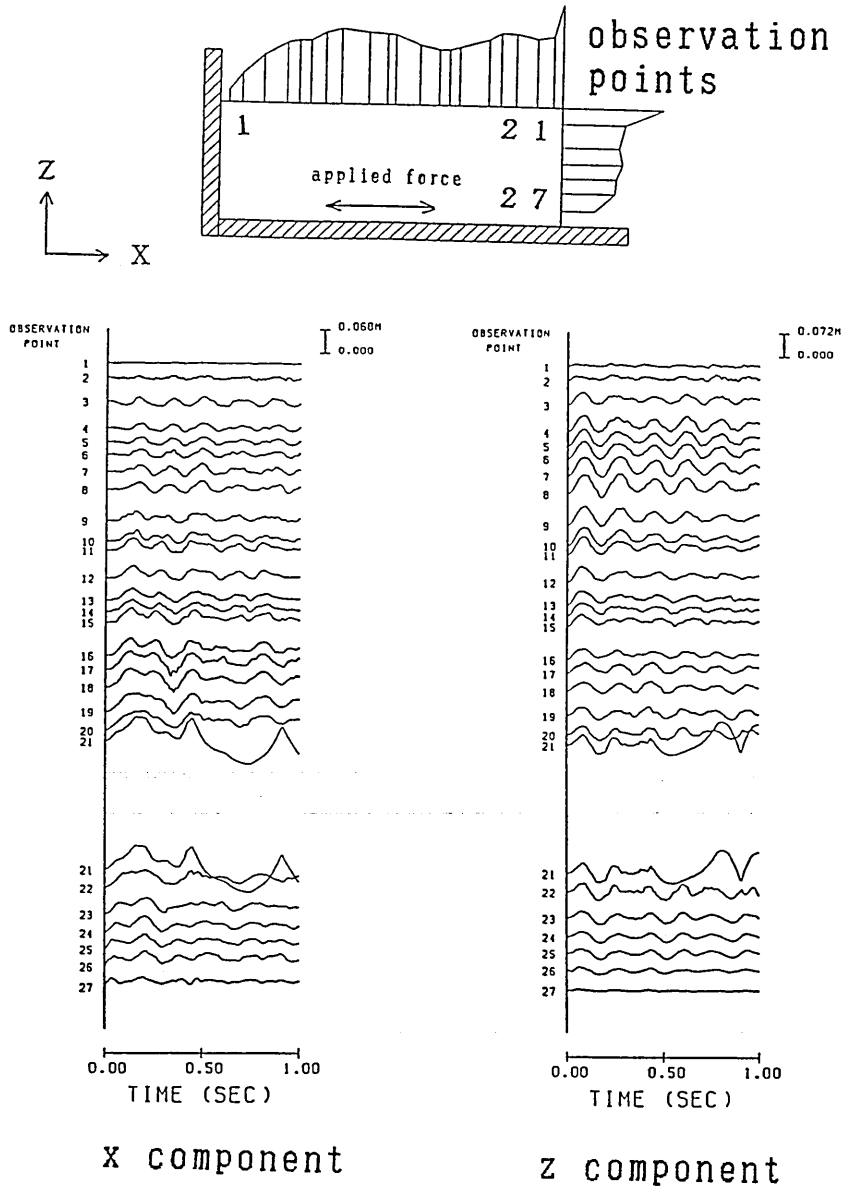


Fig. 13. Response displacement (input horizontal acceleration sine wave, 2 Hz, 1600 gal).

解析できると思われる。そこで、解析例として2次元解析で崖の振動特性の解析をDEMで試みる。

モデルは、側方を自由表面にし重力を作用させても崩れないようにする。また、入力波の振幅は大きくすると要素の結合が切れ飛び跳ねてしまうため、小さめに設定する。DEMモデルは、要素数1000個、奥行き10m、高さ3mのものとする。Fig. 12に要素モデル図とその間隙バネの分布図、観測点の配置を示す。解析のパラメータをTable 8に示す。変化させるパラメータはTable 9に示す。 Δt を大きくし、解析を安定させるために間隙のバネ定数 k_{CN} , k_{CS} は小さめに設定した。モデル表面にある27個の要素を観測点とし、応答変位の時刻歴を求める。波動は、下方の壁要素から水平方向(X軸方向)の加速度として加える。波形は、簡単のため正弦波とする。

Fig. 13に2Hz, 160Galの正弦波加速度をx軸方向に入力したケース1の場合の各観測点の応答変位のx, z成分の時刻歴と2秒間の各観測点での応答変位の絶対値の最大値を崖モデルの概略図上にプロットし示す。波形より波動が伝播していることがわかる。各観測点の応答をみると、観測点1から21に近づくにつれ絶対値が大きくなっているのがx軸方向では崖に近づくにつれ応答が大きくなることわかる。また崖の垂直Z軸方向でも、崖の下の方(観測27)点から崖の上の方(観測点21)に上がるにつれ応答が大きくなる傾向が表れている。この傾向は水平・垂直の両成分とも表れている。有限要素法による解析結果でも、崖の端に近づくほど応答倍率が高くなるという傾向があり、本解析の結果と一致している。応答が一番大きかった観測点21ではx軸方向に8cm, z軸方向に4cm変位している。各観測点での卓越周期はx成分で約2.5Hz, z成分で5.0Hzとなっており、入力波の2Hzと異なっている。これは、系の卓越振動数が表れたためと思われる。実際の地震時より振幅が大きいのは、間隙のバネ定数 k_{CN} , k_{CS} が小さめなためと思われる。

各観測点は減衰振動している。本解析では、要素の接触点の粘性ダッシュポットの係数を0としているので、この減衰は要素間での接線方向のすべりや、要素同士の衝突による運動エネルギーの消費を表している。減衰は、水平動成分で大きく、上下動成分では小さくなっている。

次に、間隙のバネ定数を5倍にしたケース4の結果をFig. 14に

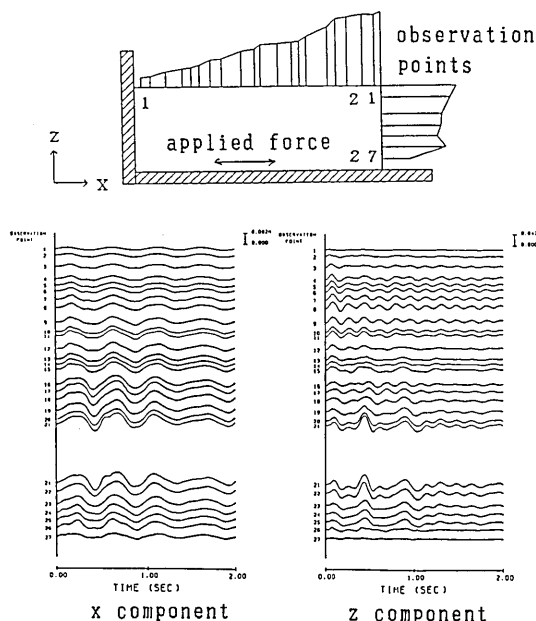


Fig. 14. Response displacement (input horizontal acceleration sine wave, 4 Hz, 640 gal).

示す。 Δt は 0.001 秒のままで解析可能であり、以後 k_{CN} と k_{CS} にこの値を用いる。入力正弦波加速度の周波数は 4 Hz、振幅は 640 Gal とした。結果は、 x 軸方向の卓越振動数は 5 Hz、 z 軸方向でも約 5 Hz となっている。変位の振幅は、崖の端の観測点 21 で一番大きく、水平方向に 6 cm、上下方向に 8 cm であった。しかし観測点 21 の波形は、他に較べ振幅が大きく卓越振動数や位相が異なっている。これは、波動により要素が外れ、跳ね飛んだためと思われる。よって、観測点 21 の結果は他の観測点での値と区別すべきであろう。変位の最大振幅の分布は、Fig. 13 の結果と異なり崖の上面では似たような値になっており、崖の近くで振動が大きくなるという傾向はとくにみられない。理由は、前の例より大きな振幅の波動を入力したので、モデル全体の要素の配置がずれ、永久変位を生じたためと思われる。水平 x 軸方向の応答変位をみると、1 点から 21 点に向かって波動が進行し、点 21 の崖の面で反射していることがわかる。解析の結果は、崖は自由表面なので境界条件としては自由端となり同じ位相の波動を反射する事と一致している。崖の垂直方向に配置した 27 点から点 21 の応答波形にも、同様に進行波と反射波がみられる。上下動成分では、境界に近い点 1, 2, 27 を除いて、どの観測点でも約 5 Hz で同じ位の振幅で振動している。また、この結果で

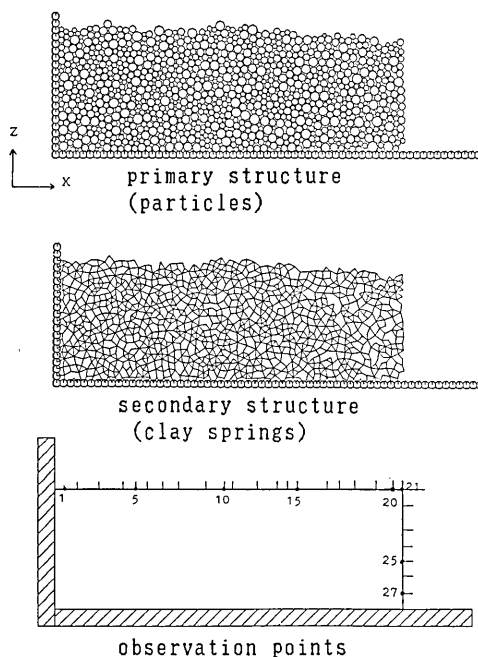


Fig. 15. 2-dimensional cliff model and observation points (case 2).

Table 10. Wave propagation parameters (both sides are free).

Case	DCR2	c_{DEM} (N)	k_{CN} (N/m)	k_{CS} (N/m)	Amp. (Gal)	Freq. (Hz)
5	1.10	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	4.0
6	1.01	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	4.0
7	1.03	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	0.0	0.0
8	1.03	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	2.0
9	1.03	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	2.0
10	1.02	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	0.0	0.0
11	1.02	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	2.0
12	1.015	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	2.0
13	1.015	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	2.0
14	1.015	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	2.0
15	1.015	1000	6.0×10^8	5.0×10^5	1000.0	2.0

も水平動より上下動の方が減衰が少なくなっている。

次に、Fig. 15 に両側面を自由な崖とするモデルの結果を要素の配置と間隙パネの配置、観測点の配置で示す。観測点は 34 個の要素とする。このモデルは、元のモデルの左側の壁要素を無くしたものに相当する。設定したジョブのパラメータを、Table 10 に示す。

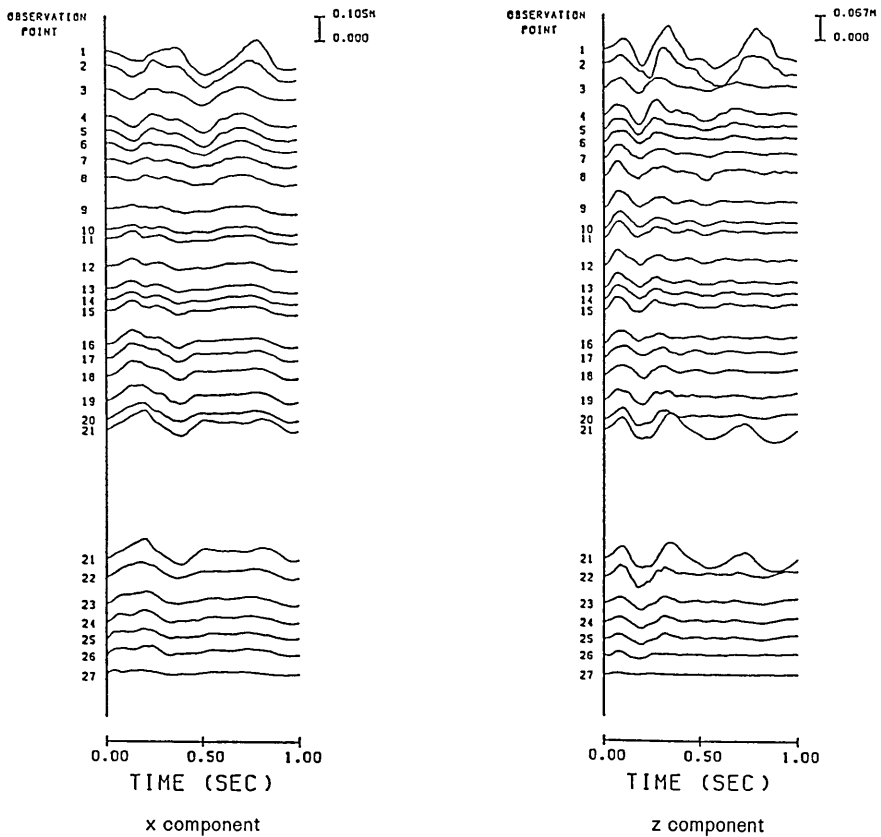
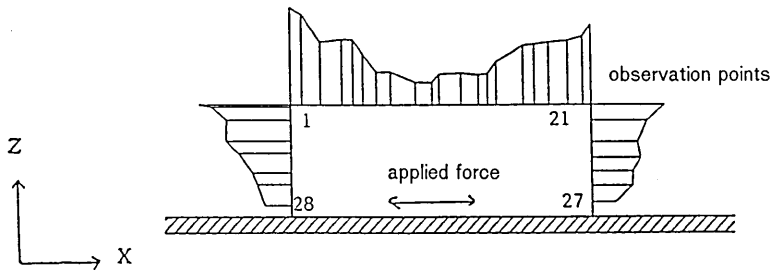


Fig. 16. Response displacement (input horizontal acceleration sine wave, 4 Hz, 100 gal).

Fig. 16 に 2 Hz, 100 Gal の正弦波加速度を入力した結果を示す。各観測点の応答変位の x 成分 (水平方向) をみると、両側の端、観測点 1 や 21 に近づくほど振幅が大きく、中央付近、点 12 で小さくなっている。どの点も水平方向に同じ位相で振動するのではなく、中央の点 12 が節となり位相が反転し、両端の点 1 と 21 が逆位相になっている。この崖モデルは、同時に左右に揺れるのではなく中央を軸として振動している。水平方向の変形の卓越振動数は 2 Hz となっており、入力波の周期と同じになっている。上下動でも、崖の中央の観測点 12 の位相が両端の点 1, 21 の位相よりすすんでいるが、卓越振動数は 4 Hz となっている。応答変位の最大値の分布は、崖の両側で大きく、下や中央に向かい小さくなっている。一番よく揺れたのは崖端の観測点 1 で、最大で水平方向に 10 cm, 上下方向に 7 cm 動いている。

本解析により、以下のことが判明した。崖の端に近づくほど応答は大きくなり、崖の上部で大きくなる。これは、FEM などの連続体解析による結果と一致している。要素の接触点のバネと間隙のバネは線形とし、粘性ダッシュポットを用いないのに、系の挙動は非線形なものとなった。これは、要素間のすべりや、衝突によるエネルギーの消費を考えているためと思われる。このため、波動は減衰し、永久変位を生じる。また、入力する波動を強くするとモデルが破壊してしまう。

いままで連続体解析法でなければ扱えなかった波動伝播解析に、非連続体解法である解析法を適用する可能性が示された。間隙バネを用いることにより連続体と非連続体にまたがる問題を扱えると思われる。

5. 3次元波動電波解析

次に3次元解析を試みる。間隙のバネを用いない場合と用いる場合の両方を行い、間隙の物質のバネの効果も調べる。

まず、改良を加えていない、間隙バネを設定していない DEM で解析する。モデルの概略を Fig. 17 に、パラメータを Table 11 に示す。減衰項は考えない。立方体に詰めた DEM 要素を用い、Z 軸方向に重力を作用させる。683 要素のモデルを用いる。このままでは自立しないので、下方と側方の 5 方向に平面壁を設定して、要素が崩れないようにする。加振点はモデル上面の中央付近の要素とする。入力波は、2.5 Hz の正弦波半波とし、

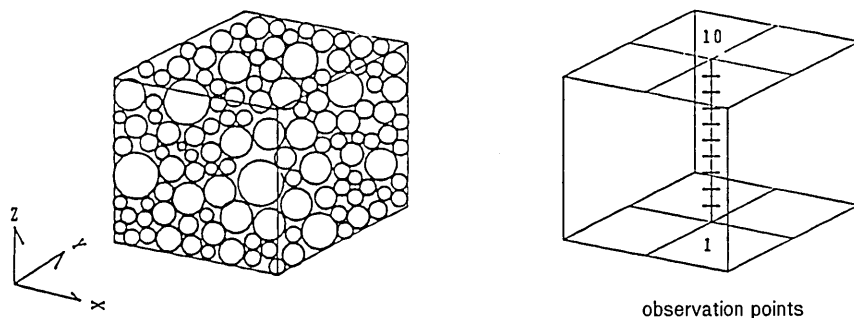


Fig. 17. 3-dimensional cliff model and observation points.

Table 11. Data of wave propagation model (3 dimensional model).

Particles		683
Radius	Max	1.0 m
	Min	0.2 m
	Mean	0.6 m
	σ	0.15
Width	(X)	10 m
Width	(Y)	10 m
Height	(Z)	10 m

k_n	6.0×10^8	(N/m)	ρ	2500.0	(kg/m ³)
k_s	1.5×10^8	(N/m)	e	0.8	
η_a	0.0	(NSec/m)	μ	0.2	
η_s	0.0	(N/m)	Δt	0.0025	(sec)
k_{nx}	1.2×10^7	(N/m)	k_{sw}	3.0×10^8	(N/m)

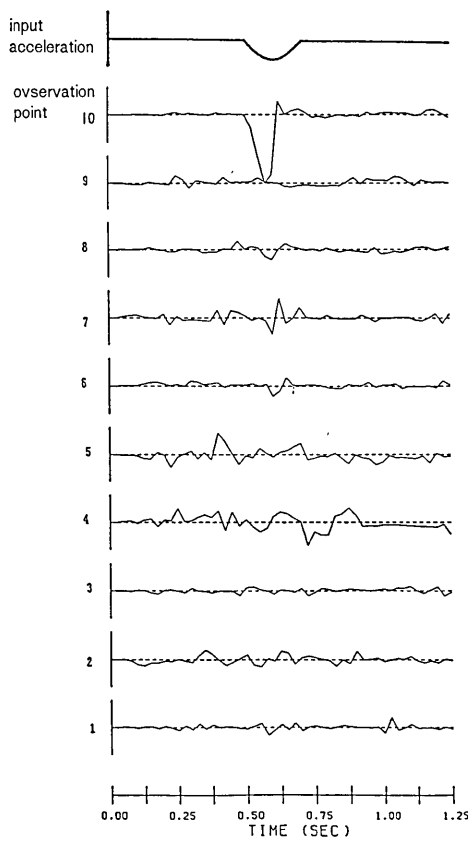


Fig. 18. Response displacement (z-component) (input z-component acceleration sine wave, 2.5 Hz).

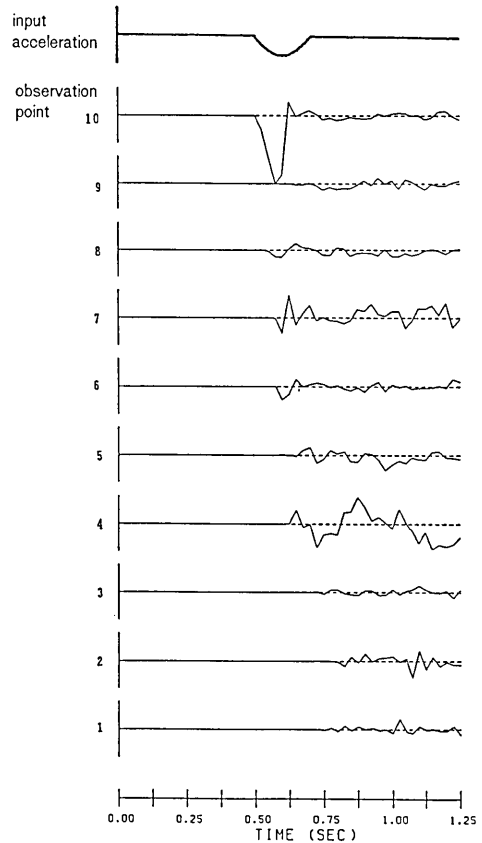


Fig. 19. Modified response displacement (z-component) (input z-component acceleration sine wave, 2.5 Hz).

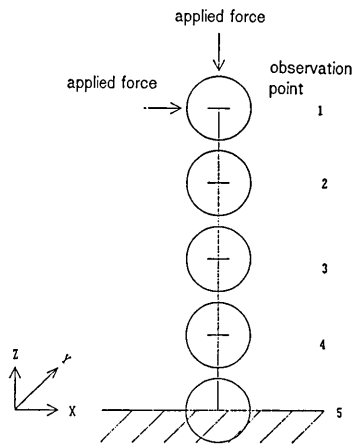


Fig. 20. 3-dimensional test model and observation points.

2番の変位には正弦波らしいものは表れていない。他の観測点でも判別できない。全体にノイズが多すぎ、伝播する波動が見分けられない。加振点から離れた観測点 6, 7 がよく変位しているが、局所的に要素が移動したためと思われる。他に入力波の振幅を変えて解析してみたが、ノイズの中から波動伝播を分離することはできなかった。振幅をあまり大きくすると要素が跳ねてしまい、波動伝播解析にならなかった。

次に同じモデルを加振しない場合の各観測点の変位を求め、要素間のノイズを打消すため Fig. 18 の結果から差し引いたものを Fig. 19 に示す。各観測点の変位は途中まで真っ直ぐになっている。各点の変位がはじまるところが、外力の影響が伝播してきた時刻である。しかし、波動の波形は伝わらず、複数の波が存在していても判別できない。また加振点から離れるのに従って振幅が減衰するということはない。伝播してくる時刻も観測点 2 より 3, 4, 5 の方がはやく、伝播の経路にも問題がある。

結局、もとの DEM 解析法では、要素間は接触していなければ力を伝えず、結合が緩く、波動は隣接した要素にもあまり伝わらない。圧縮波は伝えるが、せん断波を伝えるににくい。また、入力波により要素の配置までが簡単に崩れてしまい解析が困難である。波動の形が崩れてしまい判別が困難であるなど多くの不都合がおきた。外力を加えない場合の結果を用いて調節することにより波動の伝播をある程度は表せるが、波形や位相は変わらず細かいことはわからない。よって、波動伝播解析に向くとは思われない。

次に要素間に間隙バネを設定した簡単なモデルを用いる。Fig. 20 にモデルを示す。5つの球要素を直列につないだもので、各要素間は少し離れており接触していないので要素本体のバネにひずみは生じていない。間隙の物質を表すバネは法線・接線方向ともに設定してある。そのため、いわゆる、質点・バネモデルに似たものになっている。重力は作用させない。要素番号は、上から 1~5 とし、観測点とする。要素 5 は、境界条件として固定とする。固定の方法は壁要素と同様である。そのため 4 質点系となる。加振点は一番上の要素 1 とし、水平 (X) 方向と、垂直 (Z) 方向、つまり接線方向と法線方向に加振する。

Z 軸方向つまり上下動成分で力として入力する。波動の観測点は、図の右に示した 10 要素とし、要素の変位を観測する。一番上の観測点は加振点を兼ねている。

Fig. 18 に結果を示す。観測点の変位の上下動成分で示してある。入力の正弦波は解析の途中 0.5 sec から加えているが、それ以前から変位は揺れ動いている。要素の配置が不安定で、外力を加えなくても動いてしまう。加振点 (観測点 1) では、入力により、顕著に下方に変位しているが上方にはほとんど動いていない。その下の

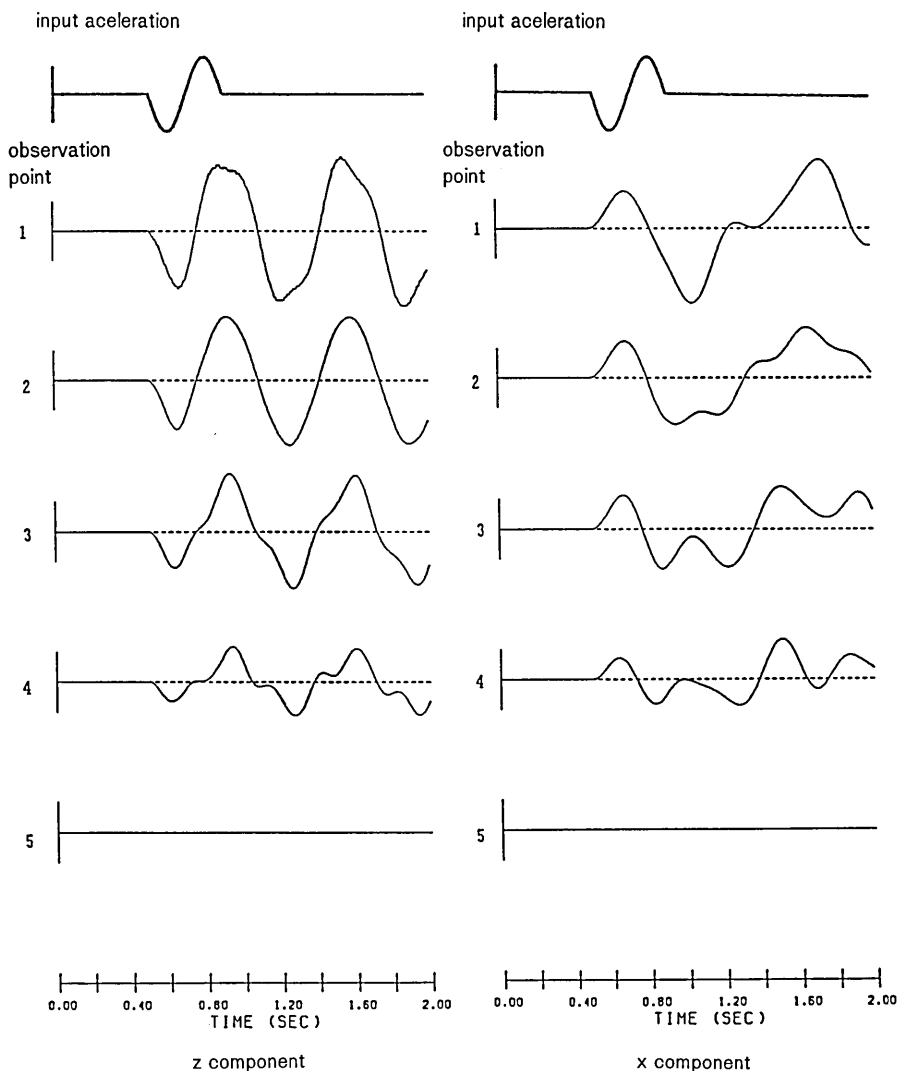


Fig. 21. Input acceleration and response displacement (input acceleration sine wave, 2.5 Hz in x and z direction).

入力波は 2.5 Hz の正弦波一波とする。

結果を Fig. 21 に示す。左図が Z 方向に加振したときの各観測点の Z 方向変位、右図は X 方向に加振したときの X 方向変位である。どちらも、2.5 sec より加振しているが、それ以前は振動していない。加振後、要素は自由振動している。法線方向に加振した結果では、入力波は 2.5 Hz に対し、約 1.6 Hz で振動しており、系の卓越振動数にあたると思われる。改良前の結果と異なり、はっきりとした波形が伝播している。固定した要素 5 からの反射波もみられる。接線方向に加振した結果では、加振後の自由振動では 1.8~

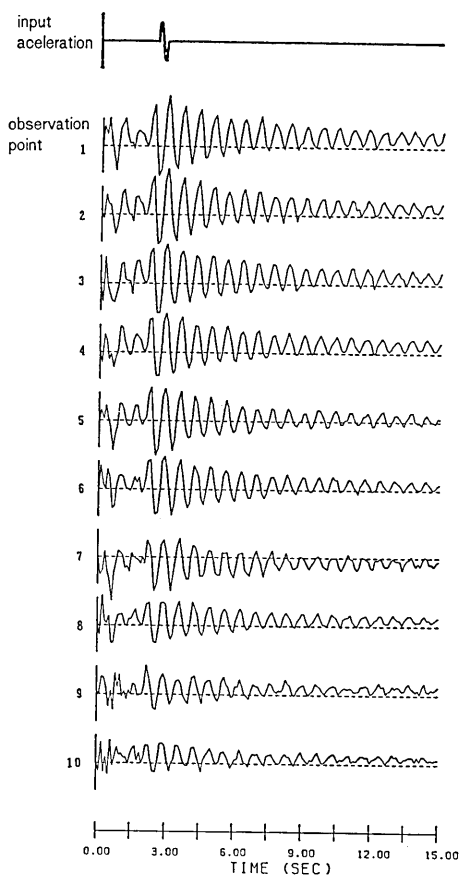


Fig. 22. Response displacement (x -component) (input acceleration sine wave, 2.5 Hz, 100 gal in x -direction).

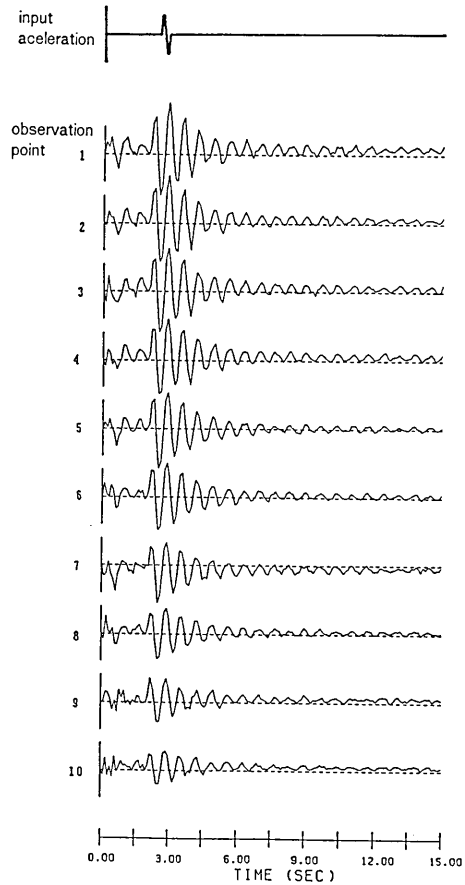


Fig. 23. Response displacement (x -component) (input acceleration sine wave, 2.5 Hz, 200 gal in x -direction).

2.0 Hz が卓越している。法線方向同様、入力した波動や反射波の伝播の様子が表れている。

この結果より、間隙バネを用いて改良した DEM を用いることで波動伝播の問題を扱えることが示された。これは、新たにもうけたバネにより DEM モデルが質点・バネモデルに近いものになったためであろう。

次に 683 要素のモデルで解析する。用いる要素モデルは間隙バネなしの解析のものと同じとし、 Z 方向には重力をかける。このモデルに間隙のバネをつけ、側面に壁をつけなくても自立しているようにした。観測点と入力方向は間隙バネの無い場合と同じとする。粘性減衰は考えない。

接線方向に加振した結果を Fig. 22 に示す。各観測点の変位の X 方向成分である。正弦波入力を途中 2.5 sec から行なったが、入力前からモデルが振動している。間隙のバネ

を用いてもノイズが全て消えるわけではない。これは、モデルがバネの連成系であり、重力を受け振動しているためである。この振動を完全に止めるのは不可能だと思われる。入力とともに大きく揺れ、加振後には約 1.6 Hz で減衰振動している。これは、要素間ですべりがおこり、運動エネルギーが消費されるためと思われる。変位波形は、各観測点とも基線ずれをおこし、永久変位が生じている。DEM では、要素が移動するので、基本的に非線形な挙動を示す。下方の要素より、上の方の要素の方がよく揺れており、どの観測点でも卓越周期はほぼ 1.6 Hz と等しくなっている。モデルが一体となって振動している。

次に入力の方の大きさを2倍にし、他の条件を同じとし、接線方向に加振した結果を Fig. 23 に示す。正弦波を入力するまでのノイズ的振動は、当然同じである。卓越振動数は、 1.6 Hz でさきほどの値と同じである。しかし、減衰がより強くなり、応答変位がすぐに小さくなっている。この理由は、要素と要素の接触及び、要素間の間隙のバネにおいて、接線方向にかかる力が大きくなり、前のケースより多くの場所でせん断破壊がおき、すべりが生じたためであろう。そのため、エネルギーの多くを破壊で失い、波動の減衰が大きくなったと思われる。

これらの解析例では、間隙に設定したバネ定数が大きかったのとひずみの限界が大きかったため、要素がはずれて跳ぶことはなかった。減衰用の粘性ダッシュポットを用いなくても、DEM 解析では波動の減衰がおこる。理由は、要素間のすべりやせん断破壊を考えているためと思われる。地盤での減衰の原因は、土の塑性変形や粒子同士のすべる、局所的破壊のためにおこると思われる。間隙にバネを設定した DEM では、速度に比例する減衰力より物理的イメージにあった形で減衰を採り入れることができる。なお、土の動的実験であられる、ひずみと減衰比の関係、ひずみと剛性との関係、拘束圧と応力・ひずみの関係、ひずみ速度の影響など重要な関係を本方法により解析することができると思われるので、今後試みたいと思う。

6. 断層運動の解析

地震は断層が運動するために発生するといわれている。地震をより深く理解するためには原因である断層の運動を理解する必要がある。そのため、断層の運動を調べる研究がいろいろと行なわれている。主に、実際の地震記録を用いて断層の諸元を求め、破壊の特徴を解明する研究が行なわれている。また岩石の破壊実験により、断層運動を解明する研究も行なわれている。

こういった方法の他に、数値解析法により直接断層の運動をシミュレーションしようという試みも行なわれている。一例としては、ジョイント要素を持つ有限要素法を用いる方法である。これは、活断層を想定した解析で、あらかじめ断層面にジョイント要素を配置し、地盤のひずみを高めていったときに、断層がどのように挙動するかを解析している。

本節では、DEM を断層の運動の解析に応用することを試みる。DEM 解析法は大変形問題や非線形性の高い問題に適しているため、断層運動という破壊問題に適用可能と思われる。そして断層の生成や、活断層の運動のシミュレーションを2次元解析として試みる。

本解析では、断層を水平平面すなわち地表面 (xy 平面) で考えることにする。この面内

には、重力は作用していないことになる。解析の前提として地盤は、単位要素(ブロック)から構成され、各単位要素は破壊されず一体として挙動すると仮定する。この単位要素を DEM の円形要素に対応させる。そして、地盤の持つ連続性は DEM の間隙バネにより表し、大変形は DEM 解析で表すことにする。この地盤を x 軸方向に圧縮し、応力をかけ破壊する解析を試みる。断層の破壊は、圧縮時のせん断破壊、つまりすべり破壊と考えられる。DEM 解析では、要素間の間隙バネはせん断破壊するとすべりを生じるようになっており、この破壊を断層の小破壊と考えることにする。そして、これらの小破壊が大破壊に成長するか調べてみる。

解析を行なう前に、間隙バネの破壊基準を少し複雑なものにする。今まで間隙バネの破壊は、要素間の引張りひずみが限界値 (DCR 2) を越えた場合と、せん断力がクーロン型の破壊基準値を越えた場合に生じるとしている。そして、間隙バネが破壊される、すなわち要素の間隙を満たしている物質が破壊されると、以後間隙バネは効果を失い要素本体が接触しないかぎり力が作用しないことにしている。しかし、間隙を満たす物質は破壊後も両方の粒子にこびりついていて、圧縮時には再び抵抗すると思われこの効果を採用入れることにする。そのために、間隙バネに 3 つの状態を考えることにする。

最初の状態 1 では、間隙の物質には亀裂が生じていない状態で、要素間が圧縮や引張りになればそれに抵抗する。接線方向に変形すれば、やはり抵抗する。

間隙の物質に破壊が生じ次の状態 2 になると、圧縮時には抵抗するが、引張り時では何の抵抗もしない。接線方向には、圧縮力が作用しているときには変形に抵抗するが、引張りを受けているときには抵抗しない。

破壊がより進行した状態 3 では、要素間を満たしていた物質は完全に破壊され、つなぎとしての効果を失っている。そのため、要素間が圧縮されても間隙のバネは働かず、抵抗しないことにする。

初期設定により、全ての間隙バネは最初は状態 1 とする。状態が 2, 3 に変わるのは間隙の物質が破壊された場合とする。状態 1 から状態 2 に移る破壊条件として以下のものを考える。まず、要素の間隙が引張り時に法線方向のひずみが限界値を越えたため破壊する場合と、接線方向の力つまりせん断力が破壊基準を越えた場合、接線方向のひずみが限界値 (DCR 3 とする) を越えた場合の 3 通りとする。せん断力の破壊基準にクーロンの破壊基準を用いる。これらの条件を満足すると、状態 2 に遷移する。

状態 2 では、要素間の圧縮時にしか間隙バネは働かない。圧縮時に間隙の法線方向のひずみが限界値 (DCR 4 とする) を越えた場合と、接線方向の力が破壊基準を越えた場合に状態 3、すなわち完全に破壊された状態に遷移する。せん断力の破壊基準は、間隙の物質にすでに亀裂が生じているので粘着力成分 e_{DEM} は寄与しないことにする。すなわち以下の式を破壊基準として用いることにする。

$$|e_{cs}| = |e_{cn}| \times \tan \phi \quad (4)$$

地盤のモデルの概要を Table 12 に示す。モデルの大きさは $50 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ とする。単位要素の大きさは対数正規分布によりランダムに設定し、最大半径は 1000 m 、最小半径は 200 m とする。要素数は 1018 個とする。

Table 12. Data of the fault movement model (Ground is not uniform).

Particles			1018		
Radius	Max		1000 m		
	Min		200 m		
	Mean		500 m		
Width	(X)		50 km		
Width	(Y)		25 km		

k_n	1.0×10^9	(N/m)	ρ	2000.0	(kg/m ³)
k_s	5.0×10^8	(N/m)	Δt	0.1	(sec)
η_n	0.0	(NSec/m)	e	0.2	
η_s	0.0	(NSec/m)	μ	0.2	
k_{CN}	1.0×10^9	(N/m)	k_{NSP}	1.0×10^9	(N/m)
k_{CS}	1.0×10^9	(N/m)	k_{SSP}	0.5×10^9	(N/m)
c_{CEN}	1.0×10^3	(N)	v_{COMP}	0.1	(mm/sec)
DCR 1	1.10				

要素モデルと間隙バネの分布を Fig. 24 に示す。この地盤モデルを x 軸方向に圧縮する。圧縮するためにモデルの端の要素を用いる。図で左右両側の濃く表示した要素である。これらの要素を壁要素とし、一定速度で移動させ内部の要素に圧縮力を作用させる。また、 y 軸方向の端の要素も、内部要素から外して境界要素とする。 y 軸方向に地盤は無限に続いていると考えているので、境界要素をバネで支持し、内部から押されるとそれに応じた反力を作用させることにする。支持するバネは、線形スプリングとし、境界要素の法線方向と接線方向に配置し、バネ定数は法線方向で k_{NSP} 、接線方向で k_{SSP} とする。

地盤モデルの外側を取り囲むように四角形に配置した要素は、内部要素の飛出し防止用の壁要素である。内部要素が大きく跳ね、解析領域から出てしまうと解析不能になるので、壁要素を配置して飛出さないようにする。また間隙バネの図で図で、太い線で示した要素が圧縮に用いる壁要素、上下の要素が側方拘束圧を加える為の要素である。

実際の地盤では、ひずみのたまる速度は大変ゆっくりしている。大陸の移動速度は早くても年に数 cm といったオーダーで、この程度の値を用いた解析を行なうべきなのだが、数値解析であるため、有効数字の枠内での解析しかできない。倍精度や4倍精度として解析すれば圧縮速度を遅くできるのだが、現在の計算機の容量と計算速度の制限により不可能に近い。また、要素の半径はかなり大きいので、それに応じて Δt を大きく設定できるのだが、そうすると破壊時の挙動を細かい時間刻みで追跡することができなくなる。そこで時間を縮めて解析する。時間刻み Δt は安定限界の値より小さく設定し、壁要素を移動させる速度は 1 mm/秒と大きく設定して解析を行なう。

DEM 解析に用いるパラメータを Table 12 に示す。まず、地盤にまだ活断層がない場合で、断層の生成過程の再現を試みる。

Fig. 25 に結果の一例を示す。ひずみの限界値を 0.05% とした場合の、50 秒めと 100 秒めの間隙バネの分布図とすべりの分布図を示す。間隙バネの図で、実線で示したバネは状態 1 のバネ、点線で示すバネは状態 2 のバネとする。完全に破壊された状態 3 のバネは

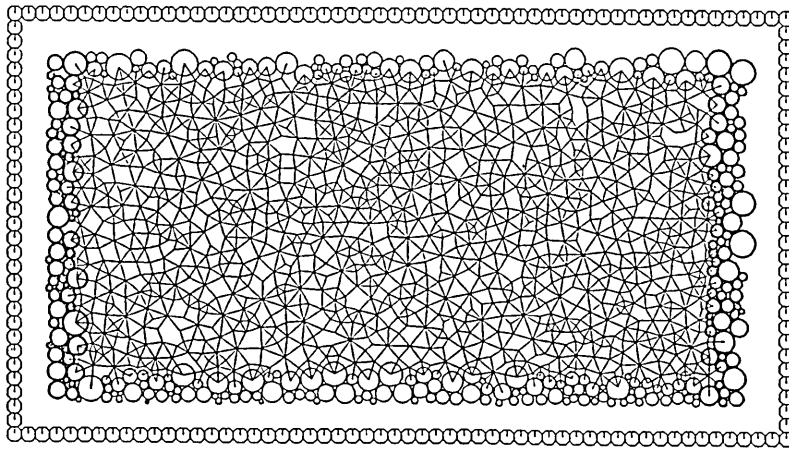
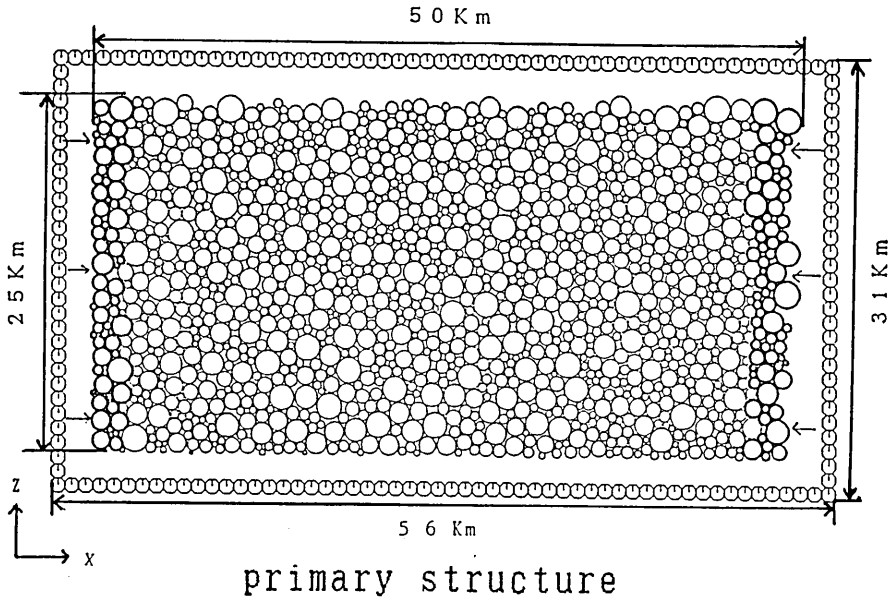
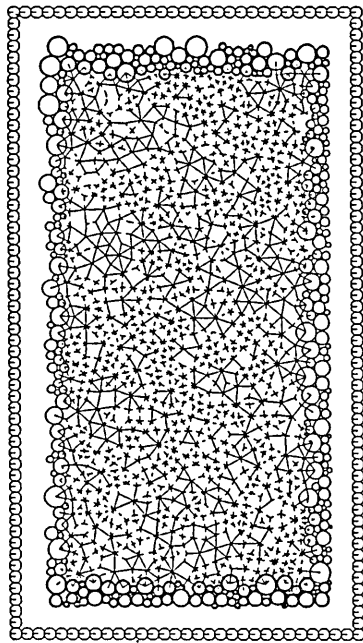


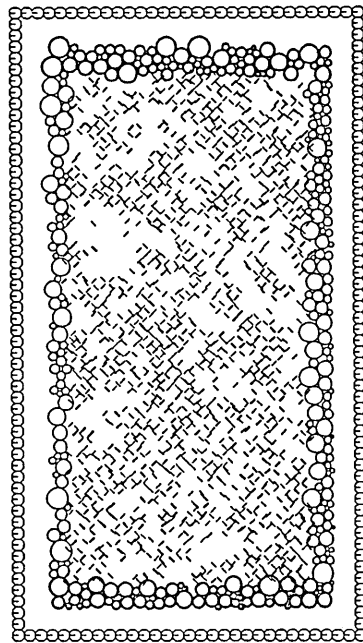
Fig. 24. Ground model.

表示していない。この例では、長さ 50 km の地盤を 5 mm と 10 mm 圧縮している。

ひずみのオーダーは、 10^{-7} である。全体としてのひずみのレベルは、限界値の 0.05% つまり 10^{-4} のオーダーより小さいのだが多くの箇所ですべり破壊が生じている。これ以降の解析では、残った間隙バネが全面的に破壊し、破壊が線状につながることはおこらなかった。破壊の生じた場所は生じていない場所を取り囲むようになっていく。周囲より多少堅固な部分が残る、弱い部分から破壊している。

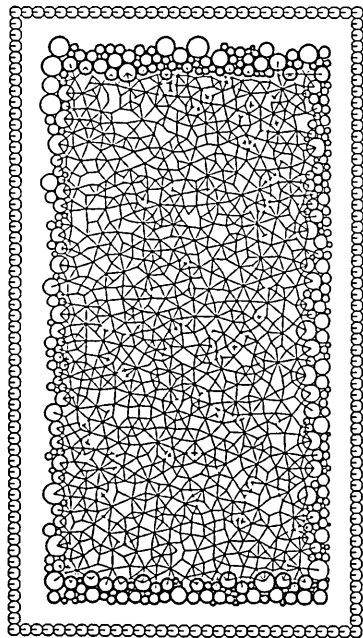


secondary structure

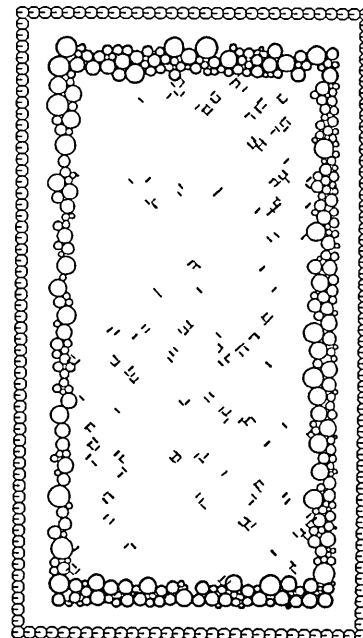


distribution of small cracks

t=50 sec



secondary structure



distribution of small cracks

t=100 sec

Fig. 25. Distributions of secondary structure and small cracks (without fault, DCR 2=0.05, 50 sec and 100 sec).

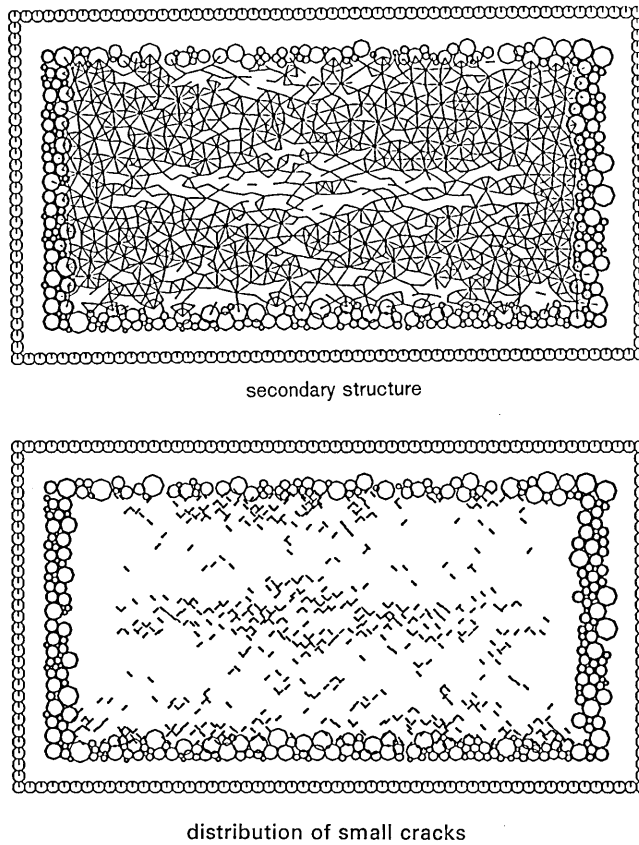


Fig. 26. Distributions of secondary structure and small cracks (without fault coefficient of side spring is 1/10 of Fig. 25's, DCR 2=0.05, 50 sec).

次に、 Y 方向の境界条件として用いるバネ支持要素のバネ定数を変化させた。 k_{NSP} , k_{SSP} を前例の1/10にした例を Fig. 26 に示す。他の条件は Table 12 と同じとする。時刻 50 秒での間隙バネの分布とすべりの分布を示す。地盤モデルの中央にすべり破壊が集中している。これは、岩石実験で試験体の側圧を低くした場合の結果と一致している。側圧が低いため圧縮力を受けたモデルの中央が裂け、両側に膨らんだものと思われる。

次に、すでに断層が存在している場合、すなわち活断層の挙動の解析を試みる。活断層は、過去にすべった断層で周辺地盤より強度が弱くすべりやすくなっている。そのため、地盤全体に圧縮応力が作用した場合にここだけが崩れる。DEM シミュレーションでは、断層を想定する部分の間隙バネのひずみ限界値を周辺地盤より小さく設定することですべりやすくし、活断層を表す。間隙のバネ定数や破壊基準のパラメータは基本的に周辺地盤と同じ値を用いる。

Fig. 27 に活断層を設定する場所を示す。 x 軸と 45° と 60° をなす方向に 2 ケース設定する。この線と交わる間隙バネを弱く設定する。

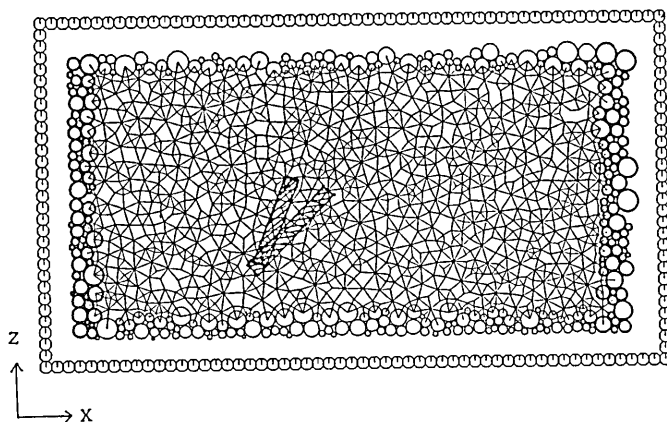
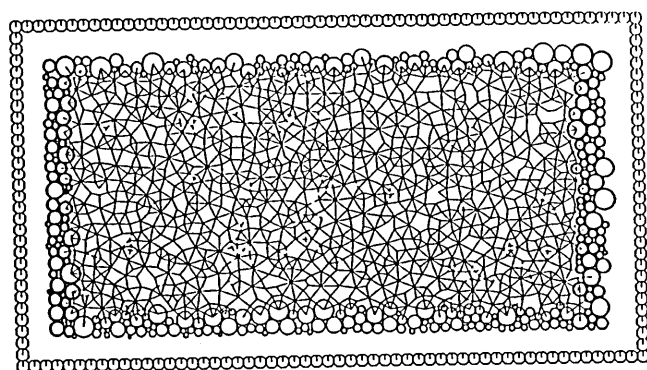
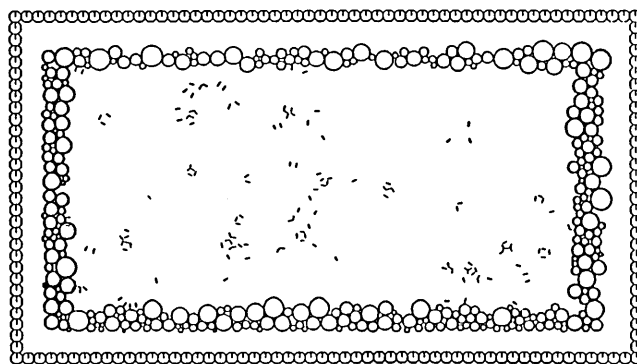


Fig. 27. Ground model with fault (case 1; fault allocated in 45° degrees; case 2, fault allocated in 60 degrees to horizon).

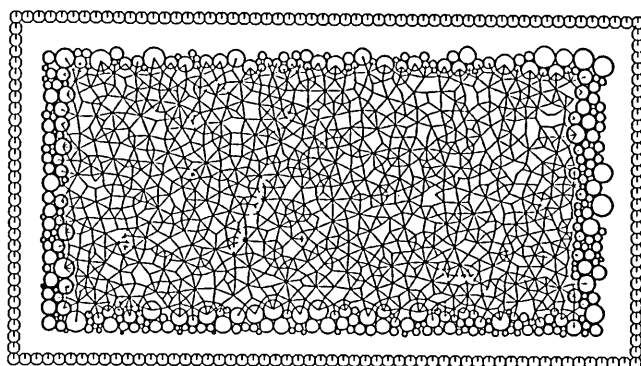


secondary structure

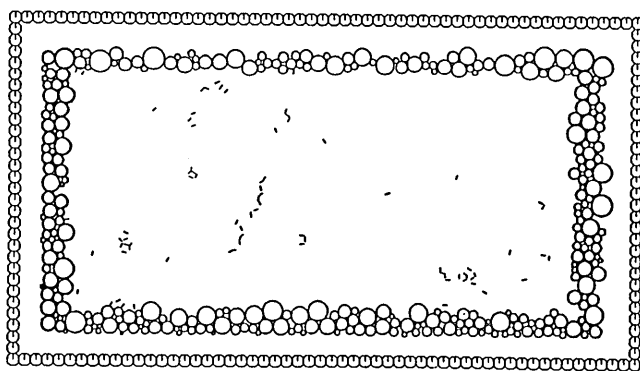


distribution of small cracks

Fig. 28. Distributions of secondary structure and small cracks (with 45° fault, $DCR 2=0.05$, 50 sec).



secondary structure

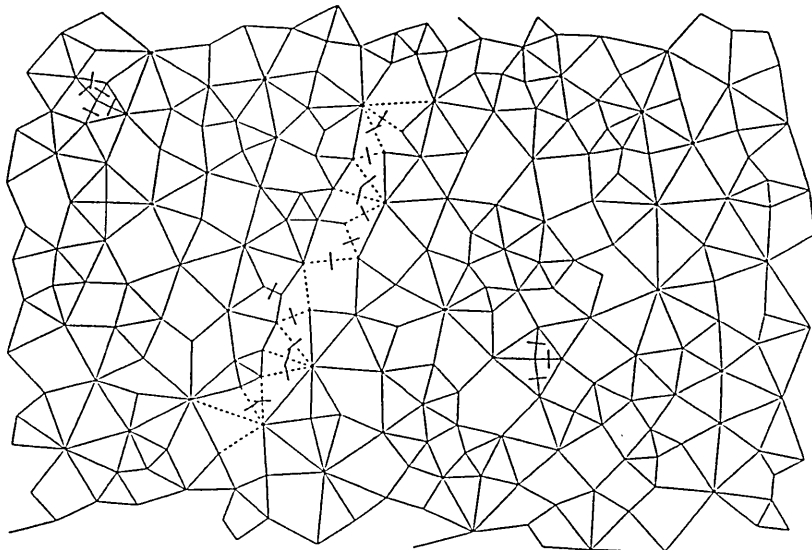


distribution of small cracks

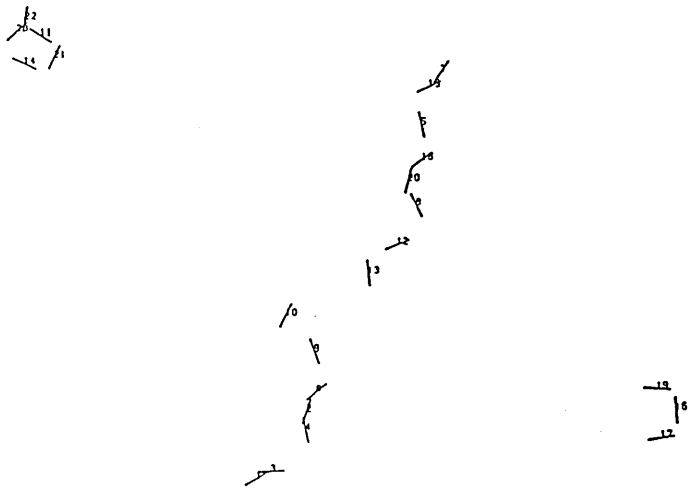
Fig. 29. Distributions of secondary structure and small cracks (with 60° fault, $DCR 2=0.05$, 50 sec).

Fig. 28 に断層が 45° 方向にある場合の結果を示す。周辺地盤のひずみ限界は 0.5% 、活断層での限界値は 0.1% とした。活断層とした箇所はすべっているが、他の場所でもすべりは生じ、活断層に破壊が集中しているわけではない。

Fig. 29 に 60° の場合の結果を示す。50 秒めの間隙バネの状態とすべりの分布を示す。地盤のひずみ限界は 0.2% 、活断層では 0.01% とした例である。この例でも活断層以外の箇所も破壊しているが、周囲に比べて $1/20$ の強度に設定した活断層上のバネが主に破壊されている。活断層の周囲の間隙バネの分布の拡大図と破壊の順番を Fig. 30 に示す。図で実線で示したバネは周辺地盤の間隙バネ、点線は活断層線として弱く設定した間隙バネとする。これらの線の交点に要素の中心がある。太線は、すべりを生じた箇所を示す。活断層のバネの多くが破壊されているのがよくわかる。破壊は左下から始まっているが、右上に直線的に伝播しているわけではない。また、すべりは一度に発生するわけではなく、



secondary structure and cracks



order of cracks

Fig. 30. Enlarged graph, order of cracks and its time (with 60° fault, DCR 2=0.05, 50 sec).

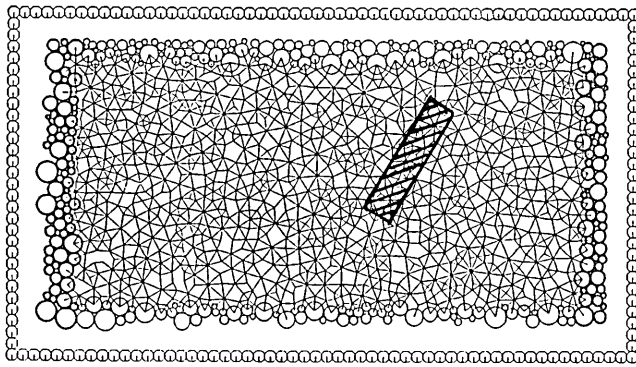


Fig. 31. Ground model with broad fault.

散発的に発生している。他に、側方の拘束圧を変えた例や、活断層のひずみ限界と周辺地盤のひずみ限界の比を大きくした例を解析したが、傾向は変わらず、岩石実験のようにせん断破壊が直線状に生ずるには至らなかった。

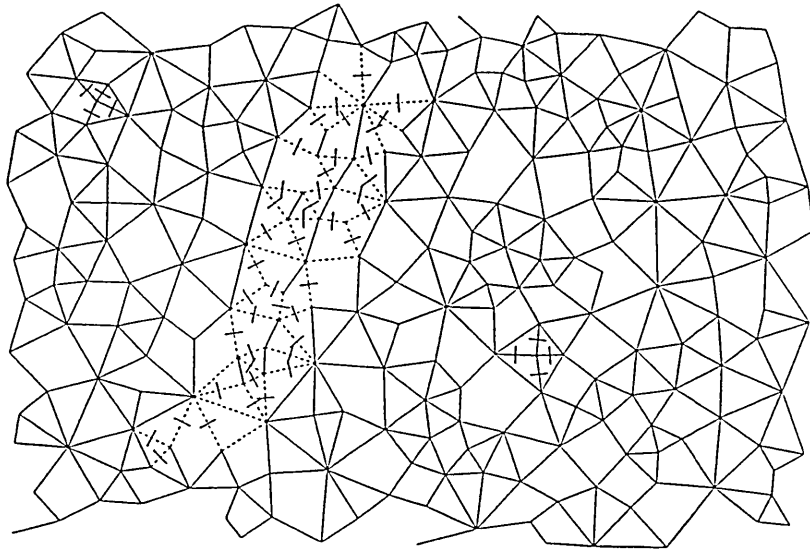
Fig. 31 に活断層の幅を広くしたモデルを示す。図でハッチングした部分の間隙バネを弱くし圧縮する。結果を Fig. 32 に 50 秒めの拡大図とすべりの順番の図で示す。この結果においても、小さな破壊は弱くした範囲のなかでとびとびに生じている。一ヶ所から発生し、周囲に伝播しているわけではない。破壊の発生の頻度分布は最初はとびとびに発生しているのが、途中からまとまって発生するようになる。この後は、特にピークなしに破壊が続いている。

以上は、半径が乱雑な、非一様要素を用いた場合である。要素の配列が乱雑な影響が入っているかもしれないので、次に同一半径の要素を幾何学的に配置したモデルを用いた解析を試みることにする。

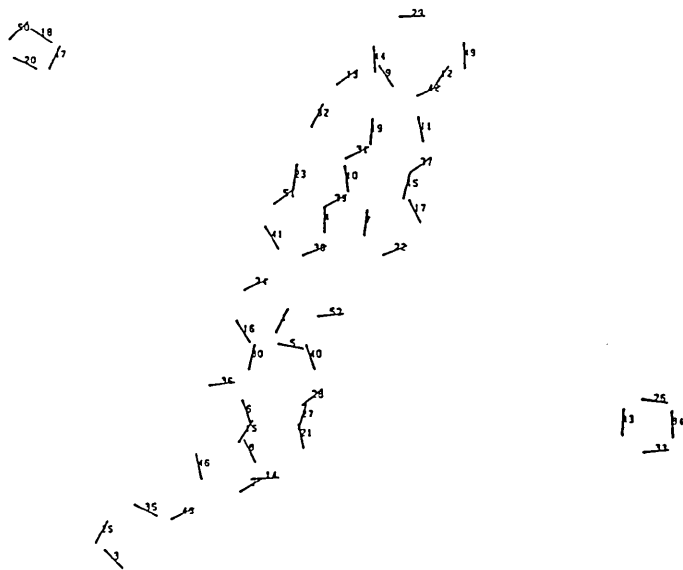
Fig. 33 に要素モデルを 5 通り示す。それぞれモデル 1, 2, 3 とする。各モデルの概要を Table 13 に示す。要素の半径は均一で 500 m とし、地盤モデルの大きさはモデル 1, 2, 3 でそれぞれ 45×20 (km²), 36×22 (km²), 42×22 (km²) とする。隣接する要素との位置関係は、モデル 1 で 45° 、モデル 2 で 60° 、モデル 3 で 90° となっている。モデル 3 はモデル 1 の配列を 45° 異なる角度で切った要素配置になっている。ちなみに、各モデルの間隙比 e はモデル 1 で 27.3%、モデル 2 で 10.3%、モデル 3 で 7.3% となっている。モデル 2 は二次元領域で円を配置するときの最密充填配置となっている。

図で太線で示した要素を壁要素とし、時間とともに移動させ内部要素を圧縮する解析を行なう。一様なモデルを用いた場合、Y 軸方向の境界の列の要素をバネ支持した場合としない場合とで、結果がそれほど異ならないのでバネ支持は行なわない。これは要素の位置が整然としており、モデル内は均一で特に弱いところがないためと思われる。圧縮する速度は、半径が乱雑な場合と同様 0.1 mm/sec とする。DEM 解析に用いるパラメータを Table 14 に示す。

Fig. 34 に 0~1600 秒の要素と間隙バネの分布を重ねた図によりモデル 1 の解析結果を



secondary structure and cracks



order of cracks

Fig. 32. Enlarged graph, order of cracks and its time (with broad fault, DCR2=0.05, 50 sec).

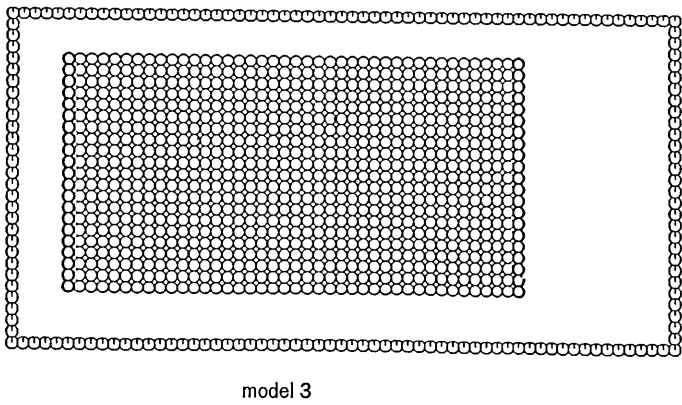
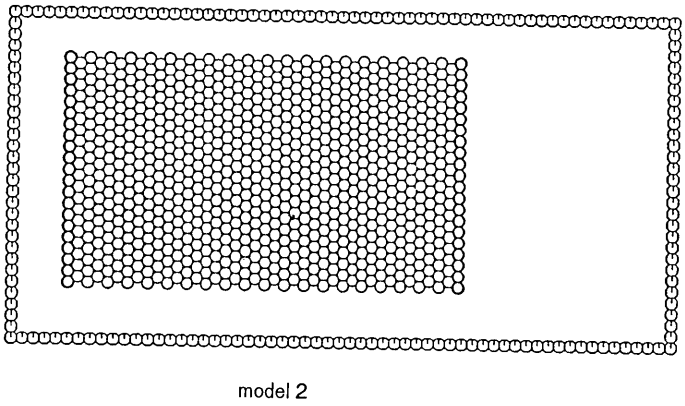
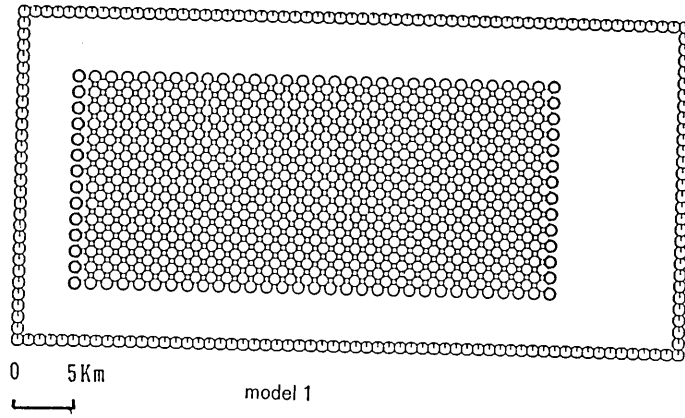


Fig. 33. 3 Ground models with homogeneity particles.

Table 13. Data of the fault movement model (Ground is uniform).

Model 1	Particles	796
	Radius	500 m
	Width (X)	45 km
	Width (Y)	20 km
Model 2	Particles	799
	Radius	500 m
	Width (X)	36 km
	Width (Y)	22 km
Model 3	Particles	819
	Radius	500 m
	Width (X)	42 km
	Width (Y)	22 km

Table 14. Data of the fault movement model (Ground is uniform.).

k_n	2.0×10^9	(N/m)	ρ	2800.0	(kg/m ³)
k_s	1.0×10^9	(N/m)	Δt	0.1	(sec)
η_n	0.0	(NSec/m)	e	0.2	
η_s	0.0	(NSec/m)	μ	0.2	
k_{CN}	1.0×10^9	(N/m)	v_{COMP}	0.1	(mm/sec)
k_{CS}	1.0×10^9	(N/m)	DCR 2	1.002	
c_{DEM}	1.0×10^5	(N)	DCR 3	0.005	
DCR 1	1.10		DCR 4	1.04	

示す。モデルの配列が一樣なため、間隙バネもモデル内で一樣に設定されている。圧縮を始めてから 200 秒めに、モデルの壁近くで左下から右上に向かって破壊が生じている。この時の破壊の生じた箇所と破壊の順番を Fig. 35 に示す。破壊は左下から右上にかけて進行しているが、連続的にはなくとびとびに発生している。その後、破壊は多数生じモデルの 45° 方向に亀裂が生じている。この方向は隣接する要素との関係で動きやすい方向である。

モデル 2 の結果を Fig. 36 に示す。この結果ではモデルは 60° の方向にせん断破壊している。圧縮する壁のちかくにコーン状の破壊されていない領域が表れている。岩石実験の結果と一致している。このモデルの方がモデル 1 より破壊の発生と進行がはやくなっている。

モデル 3 の解析結果を Fig. 37 に示す。モデル 3 は破壊が発生するのは他の 2 モデルより遅いが、破壊が生じたあと進行するのは早くなっている。破壊の線は、圧縮軸方向となっており、700 秒には粉々に粉碎している。モデル 3 では圧縮軸方向に要素の中心が並んでおり、圧縮力を受けてもすべりにくくなっている。そのため破壊の発生は遅くなり、いったん破壊すると、圧縮軸と要素の中心同士の方がずれ、蓄積していた応力が一挙に解放され、粉碎するのだと思われる。モデル 1 や 2 のように要素の中心を結ぶ方向と圧縮軸の方向が異なっている場合には、同じ場合のモデル 3 より破壊しやすしい。

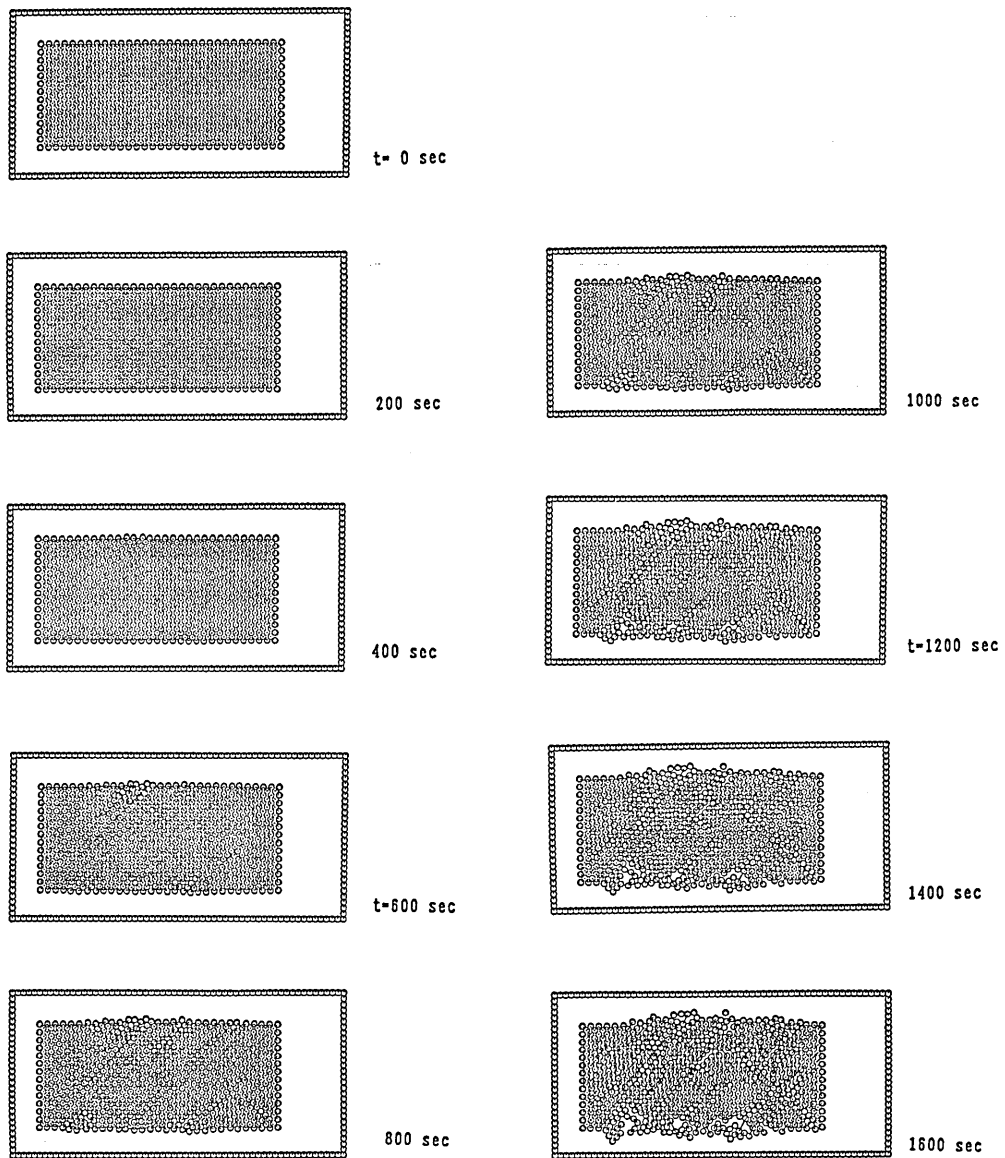
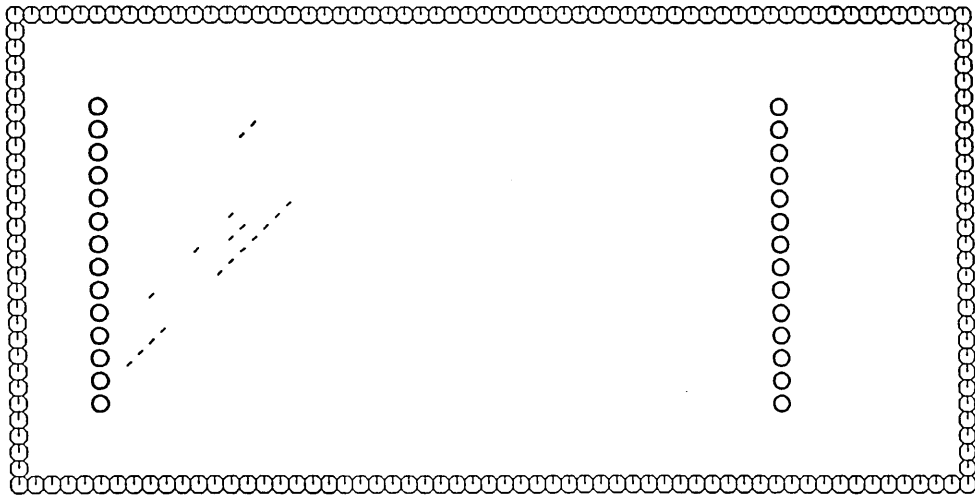
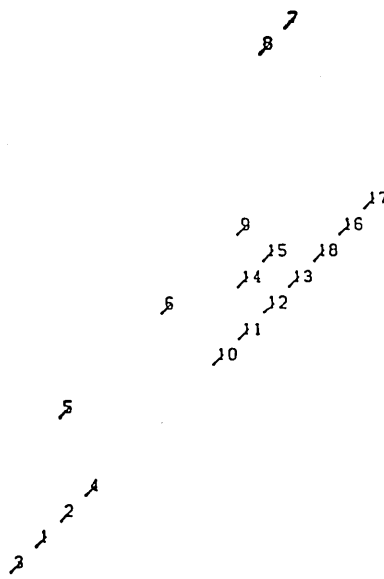


Fig. 34. Distribution of particles and secondary structure (model 1, DCR 2=0.05).



distribution of cracks



order of cracks

Fig. 35. Distribution of cracks and order of cracks (model 1, DCR 2=0.05).

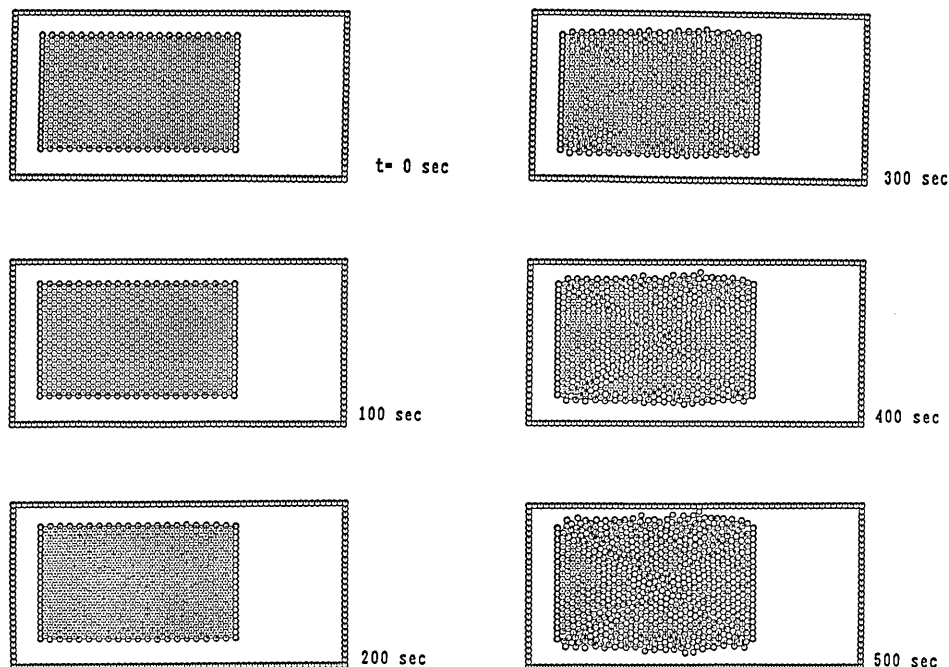


Fig. 36. Distribution of particles and secondary structure (model 2, DCR 2=0.05).

次に、モデル地盤内に活断層がある場合について解析を試みる。以下モデル1を用い、活断層は周辺地盤の2倍すべりやすいとし、減衰定数 h を50%とした。活断層として弱く設定した部分と破壊の生じた箇所、破壊の発生の順番をFig. 38に示す。活断層を設定した位置は、活断層なしのケースで最初に破壊が生じた位置、つまり地盤モデルの左下から右上にかけての 45° の方向とする。破壊は設定した活断層にそって生じており、左下から右上にかけてほぼ連続的に伝播している。

活断層の長さを半分にして解析した結果をFig. 39に示す。破壊は設定した断層内でのみ生じ、断層の延長線上に伝播しなかった。破壊の生じた順序は活断層が長いときと同じであった。

Fig. 40に隣接して2つの小断層が存在する場合の結果を示す。2つの断層をつなぐような破壊は生じず、断層内のみで破壊が生じた。

以上の解析より、改良されたDEMを用い、地盤の構成単位とDEM要素を対応させることで断層運動のシミュレーションを行なえることがわかった。これは、要素の間隙にバネを設定することにより地盤の非線形な連続性のある程度表現できるためと思われる。

断層と地震には以下のような関係がある。地盤の媒質の均質性が高い場合、最初に大きな破壊が生じ、その後小さいものが生じる、つまり本震・余震のパターンとなる。

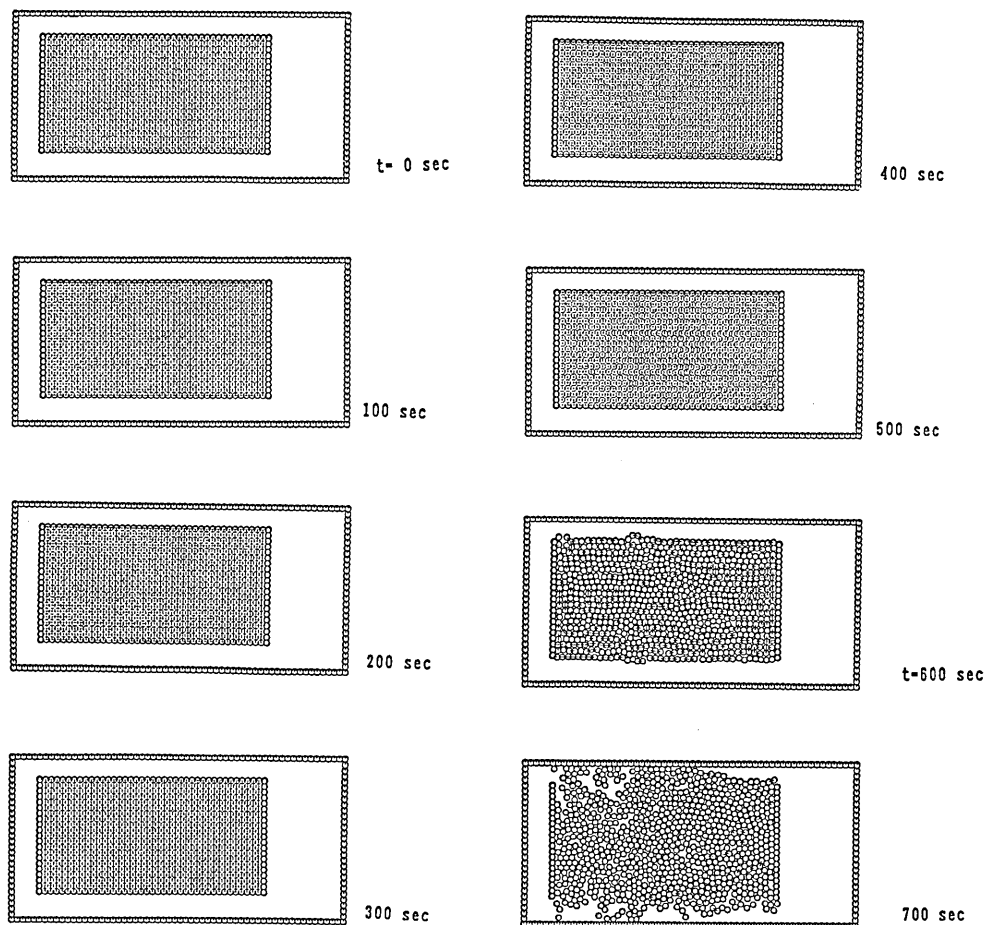
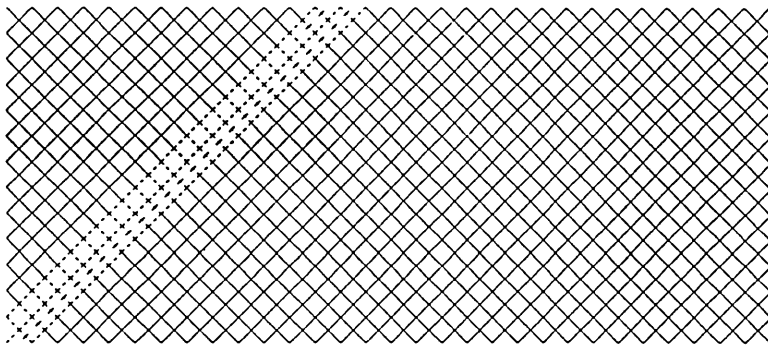
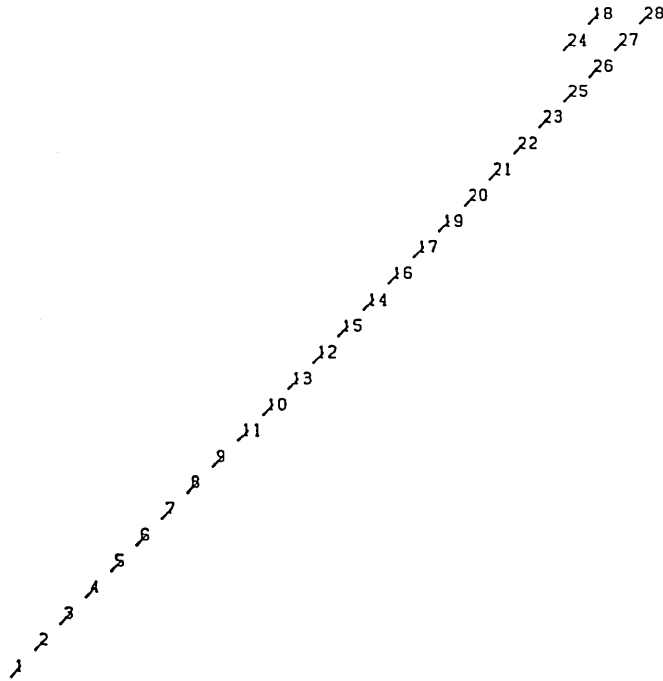


Fig. 37. Distribution of particles and secondary structure (model 3, DCR 2=0.05).

媒質の均質性が中程度の場合には、小さい破壊、大きな破壊、小さい破壊の順、つまり前震・本震・余震のパターンで生じる。これに対して、媒質の均質性が低い場合には大きな破壊は生じず、小さな破壊ばかりが生じる、すなわち群発性地震となる。これらをDEMによる解析と比較すると、異なる半径の要素を用いた場合は、均質性の低い場合に相当し、解析結果はモデル一面で破壊が生じており群発性地震が再現されている。また等半径要素を用いる場合は、均質性の高い場合に相当する。DEM解析では、まず一直線に大きな破壊が生じ、その後他の所が破壊する結果となっており、本震・余震のパターンを再現しているといえよう。このように、DEM解析法は、地盤の条件による地震の性格の差を表すことができる。

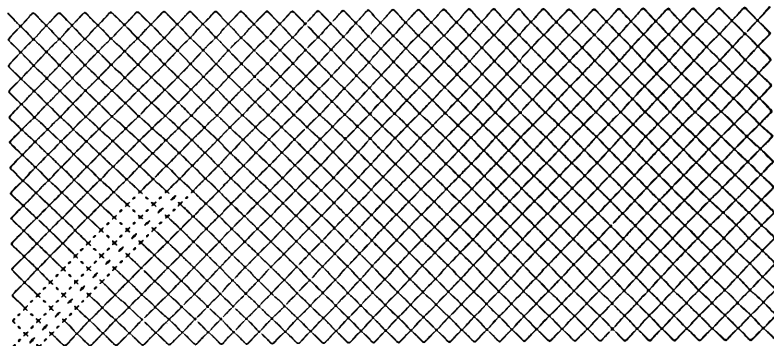


secondary structure and cracks

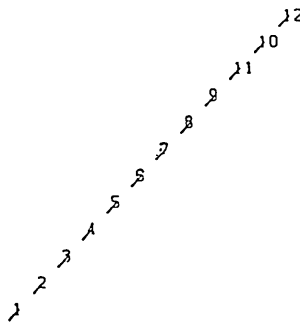


order of cracks

Fig. 38. Distribution of cracks and order of cracks (model 1 with fault, DCR 2=0.05).



secondary structure and cracks

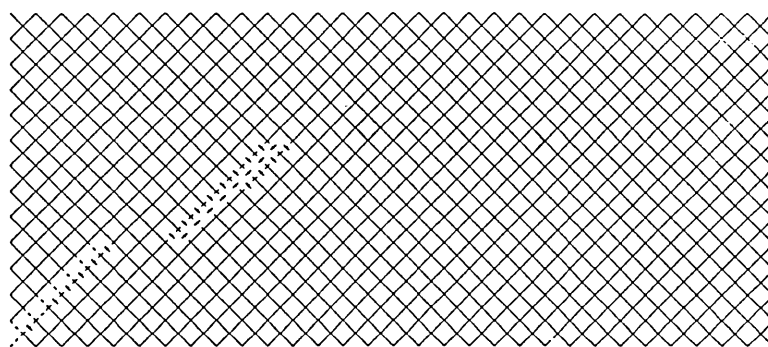


order of cracks

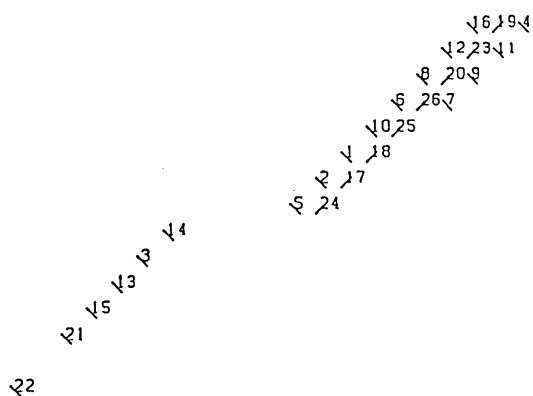
Fig. 39. Distribution of particles and secondary structure (model 1 with fault, DCR 2=0.05).

しかし、同じ大きさの要素を幾何学的に配置すると、配置の持つ弱い方向が卓越してしまい、他の方法には破壊なくなってしまうという問題も生じた。今後、より適切なモデルを作成し解析する必要があると思われる。

また断層は、本来周辺の地盤よりずっと強度が低いのに、せいぜい 1/20 にしか設定できない、計算機の有効数字のためにタイムスケールを圧縮して計算せざるを得ない、などの問題点も含んでいる。これらの点を改良すれば、より明確に断層の運動を捉えることができると思われる。



secondary structure and cracks



order of cracks

Fig. 40. Distribution of cracks and order of cracks (model 1 with fault, DCR 2=0.05).

7. 考 察

本研究では、Cundall の提案した DEM (Distunct 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用いている。これにより、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すことができる。

本報では、盛土の崩壊解析 (2 次元)、礫の流れ解析 (3 次元)、波動伝播解析 (2 次元・3 次元)、断層運動の解析 (2 次元) という地盤の大変形・破壊問題に改良された DEM を適用し、成果を得た。

盛土の崩壊解析では盛土の円弧すべりによる破壊が再現され、円弧すべりと直角な亀裂

の発生や、斜面の角度がきつくなると崩れやすくなる、軟弱な材料の盛土は崩れやすい事などが示された。

波動伝播解析は今までは連続体解析法でのみ扱われており、DEM は解析に不向きであったが、改良された DEM により解析可能な事が示された。その際、崖のような不整形地盤では、端で応答が大きく麓では小さくなり、連続体解析での結果と一致した。また、要素間にダッシュポットを用いなくても内部減衰が現わされる事が判明した。

断層運動の解析より、不均質な地盤では群発性地震が生じ、均質な地盤では、本震・余震のパターンで生じるという結果が得られた。これは地震学での実際地盤での結果と一致する。

解析結果より、間隙バネをとりいれた DEM 解析法は、媒質の連続性と非連続性の両方の性質を扱えることが示された。今後、本方法を用いることにより、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。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-280 H 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、共用システム室の額額一起氏と鷹野澄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。

なお、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後半部です。

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., Vol. 2, pp. 129-136.
- 岩下和義, 1988, 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, 地震研究所彙報, 63, 201-235.
- 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.
- UEMURA, D. and M. HAKUNO, 1987, Granular assembly simulation for ground collapse *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 62, 19-59.
- 椿 東一郎・橋本晴行・末次忠司, 1982, 土石流における粒子間応力と流動特性, 土木学会論文報告集, 317, 79-91.

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

Kazuyoshi IWASHITA*

Earthquake Research Institute

The present study aims to simulate the dynamic fracture process of soil and soil structure by developing the Cundall's Distinct Element Method (DEM) in which soil is represented as an assembly of numerous discrete particles and the dynamic behavior of the system is derived from consideration of the behavior of individual particles. Each particle satisfies the equation of motion and the law of action and reaction.

In the former paper, a new DEM was proposed. It consists of two structures: primary structure and secondary structure. The primary structure is used to transmit the force through the contact points and to calculate the movement of the particles. The secondary structure is used to represent 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, the model can simulate wave propagation as well as dynamic fracture.

The method is applied to 4 dynamic fracture problems: bank collapse, flow of particles, wave propagation and fault movement.

The results of bank collapse show the process of fracture lines and rectangular cracks. The steep bank collapses soon.

The original DEM cannot transmit shear waves, but the new one can simulate wave propagation. The wave is attenuated by particle collisions in this method.

The results of DEM simulation for fault movement show the relationship between the homogeneity of the ground and pattern of earthquake: the earthquake swarm occurs on homogeneous ground, and the pattern, which is mainly shock and aftershock, occurs on heterogeneous ground.

These results are suggesting the applicability of the method to the study of fracture problems of soil and soil structures.

* Now at the Faculty of Engineering, Saitama University.