

京都大学工学部 大西 有三
同 堀田 政國
京都大学大学院 ○ 田中 美和

1 まえがき

Cundallにより提案された個別要素法(以下DEM)は、剛体で表される各要素の境界部分の接触力、及びそれによって引き起こされる要素の変位を運動方程式の時間差分によって各時間毎に追跡していくものである。このことから動的問題や大変形問題に対して非常に有効である。

ところが、従来から処理速度等の問題に基因して、その計算は大型計算機によって行われ、パーソナルコンピュータ(以下パソコン)によるDEM解析は、ほとんど行われていなかった。しかしながら、安定性、経済性の面において、パソコンは大型計算機に比べ、優れたところがある。そして、モデルの基本的性質を調べるときや、DEMを用いた新しいモデルを開発する際には時間やコストを考えなくてもよいパソコンの利用は極めて合理的で、かつ教育訓練用としても利用価値が大きい。このことから今回では市販のパソコンを用いていくつかのモデルの計算を行い、その利用の可能性を検討した。

2 手法

2.1 解析手法

DEMにおいては、その各要素の接点において、1) 圧縮力に対しては、図-1.(a)の voigt モデル、2) せん断力に対しては、図-1.(b)の slider-voigt モデルを適用している。また、3) 接点の引張力はゼロである。

2.2 岩盤モデル

本解析において用いられた材料定数は、表-1のとおりである。ただし、摩擦角 ϕ
 μ (摩擦係数 $\tan(\phi)$)とタイムステップ Δt については、モデルによって異なり、それは表-2のようになっている。これらの値は従来の研究を参考にして経験的に

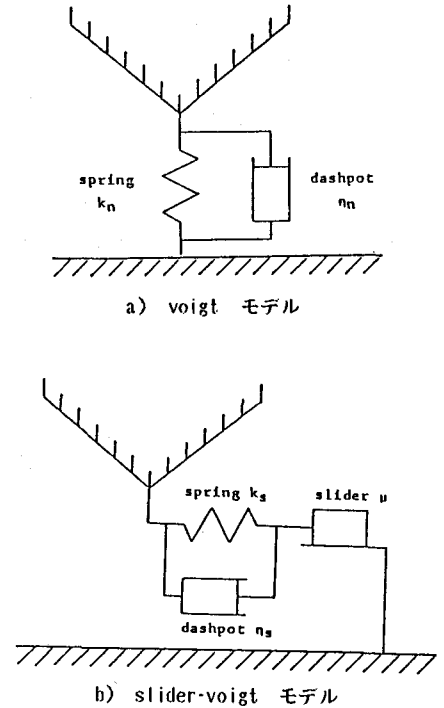


図-1 接触モデル

表-1 材料定数

質量	ρ	=	2000(kg/m ³)
剛性(垂直方向)	k_n	=	2.5×10^3 (kN/m ²)
(せん断方向)	k_s	=	2.5×10^3 (kN/m ²)
減衰定数(垂直方向)	η_n	=	3.98×10^4 (kN/m ² ·sec)
(せん断方向)	η_s	=	3.98×10^4 (kN/m ² ·sec)
重力加速度	g	=	9.81(m/sec ²)

決定したものである。

表-2 摩擦角 ϕ とタイムステップ Δt

円板モデル	$\tan(\phi \mu) =$	0.8
	$\Delta t =$	$4.0 \times 10^{-4}(\text{sec})$
ブロックモデル	$\phi \mu =$	10°
	$=$	15°
	$=$	20°
	$=$	25°
	$\Delta t =$	$1.136 \times 10^{-4}(\text{sec})$
ポロノイモデル	$\phi \mu =$	25°
	$\Delta t =$	$9.98 \times 10^{-4}(\text{sec})$

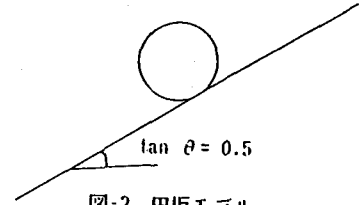


図-2 円板モデル

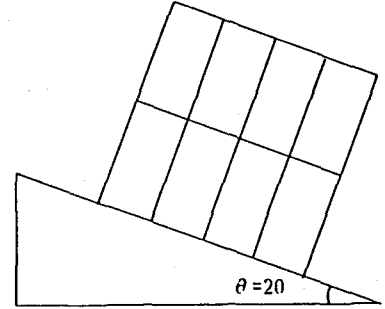
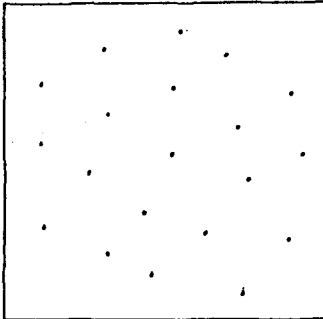
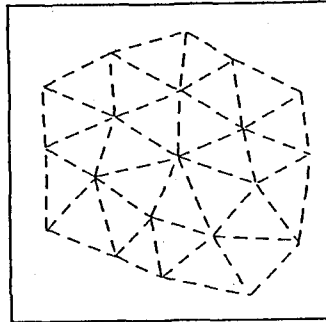


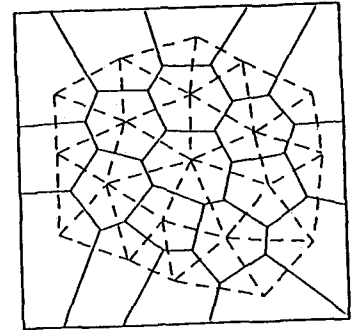
図-3 ブロックモデル



a) 粒子の設定



b) ドロネイ三角形網



c) ポロノイ多角形

図-4 ポロノイ分割の手法

円板モデルについては、図-2のような斜面に静かに円板をおいたときの円板の転がる様子を追っている。

ブロックモデルについては、図-3のような斜面に縦と横の長さの比が 2:1 の直方体ブロック 8個を静かに積んだとき、摩擦角 $\phi \mu$ を表-2の値ごとにどのようにブロックが崩壊するかを追っている。

ポロノイモデルについては、その分割方法は図-4に示すように、まず、a) 乱数の発生に

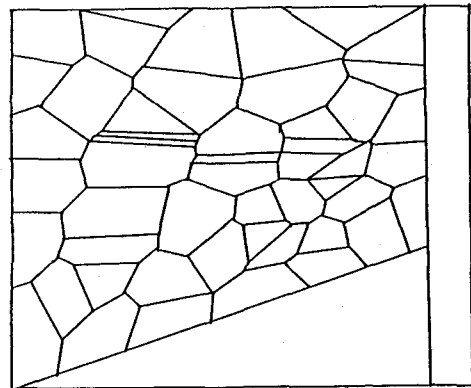


図-5 ポロノイモデル

より領域内に特定の数(要素数に相当)の核を発生させる。つづいて、b) 各点を結び三角形網を作る。これをドロネイ三角形網という。つぎに、c) 各辺の垂直二等分線により領域を多角形に分割する。この分割をボロノイ分割という。今回のボロノイモデルは、図-5のように安定した斜面(傾斜角 20°)上を、ボロノイ分割(要素数 50個)したものである。この 50個のブロックの動きをDEM解析によってシュミレートしている。

3 解析結果及び考察

3.1 円板モデル

解析結果(円板の転がる様子)は、図-6に示している。最初の円板をふくめて6個の円板が描かれているが、これは0.4秒おきに円板がどの位置にあるかを示したものである。しだいに円板の速度が大きくなっているのがわかる。この解析によって求められた円板の加速度は、解析中(円板が転がっている間)はほぼ一定で約 $2.6(\text{m/s}^2)$ であった。

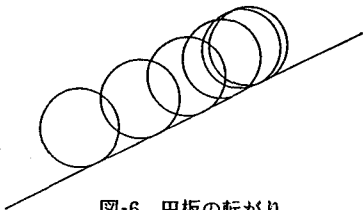


図-6 円板の転がり

力学的にこの問題を解くと、円板の加速度は約 $2.9(\text{m/s}^2)$ となる。この差はプログラム実行中に求めた慣性モーメントの誤差と思われる。しかしこの点を除けば、DEM解析によって定量的にこの円板の挙動を十分表し得るだろう。

3.2 ブロックモデル

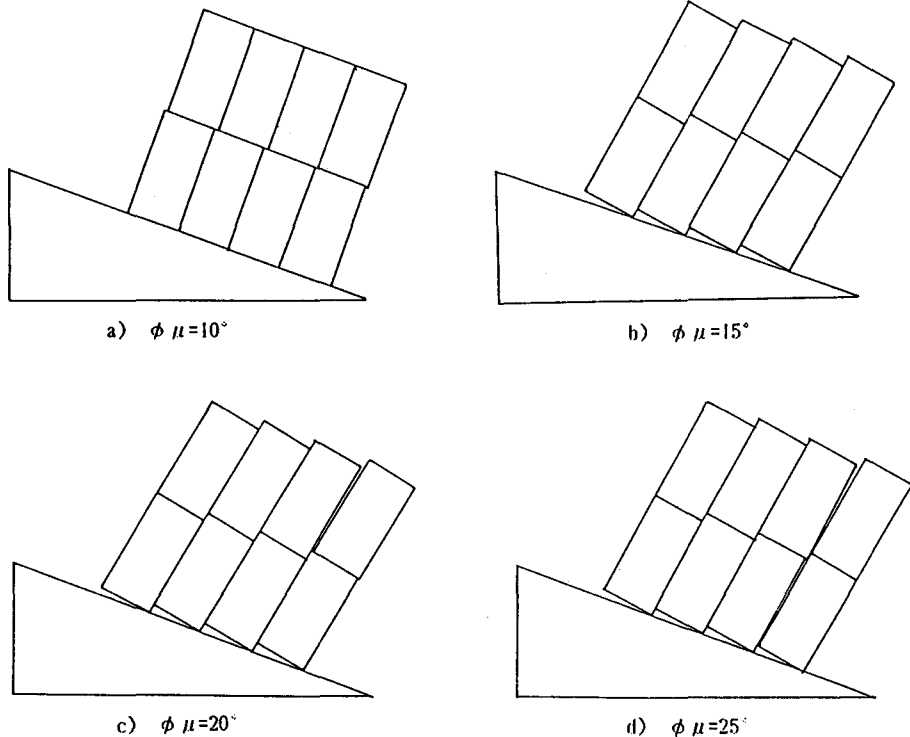


図-7 ブロックの破壊モード
(ブロックモデル)

解析結果(ブロック崩壊の様子)は、それぞれ図-7に示している。これは、計算を開始して 1.136秒後(DEN解析において 10000サイクル後)の図である。図-7.(a)は、摩擦角 $\phi = 10^\circ$ のときである。この場合、ブロックは倒れずそのまま斜面上にそって滑っているのがわかる。 $\phi = 15^\circ$ (図-7.(b))のとき、ブロックはほとんど滑らず斜面上で倒れている。 $\phi = 20^\circ, 25^\circ$ (図-7.(c),(d))のときも、ブロックはほとんど滑らず斜面上で倒れ、なおかつ右端の上側のブロックが他のブロックから剝離している。また、 $\phi = 25^\circ$ の場合のブロックの変位量は 20° の場合に比べわずかに小さい。

以上の結果は、大型計算機を用いて図-3と同じモデルのDEN解析を行った河野¹⁾の結果によく一致している。このことから、このような簡単なモデルの破壊モードはパソコンによるDEN解析により十分表し得るといえる。

3.3 ボロノイモデル

解析結果(ブロックの動き)は、図-8に示している。これは、計算を開始して 0.7秒後(DEN解析において 7000サイクル後)の図である。ブロックの左半分は崩れていて右半分は安定している(変位がほとんどない。)ことがわかる。斜面の傾斜角が 20° で摩擦角が 25° なので滑らないが、左半分の領域は力学的に不安定で強いモーメントが働くので崩れ落ちたのであろう。このことは、前節のブロックモデルの場合とよくにている。

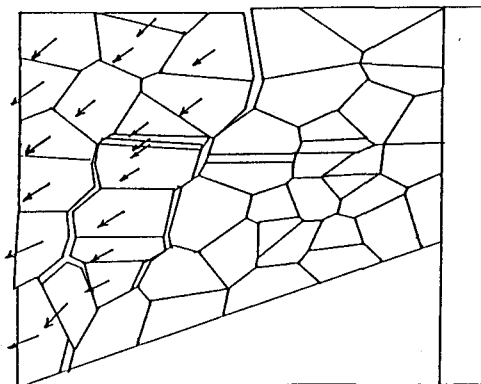


図-8 ブロックの破壊モード
(ボロノイモデル)

4 結論

DEN解析は処理速度等の問題から、その計算のほとんどが大型計算機によるものだったが、今回のような簡単なモデルに対しては、市販のパソコンで十分その挙動を表し得ることがわかった。しかし、もう少しモデルが複雑になると、パソコンでは処理速度の問題から仕事の能率が悪くなる。(例えば、今回のボロノイモデルの場合で約 7時間かかる。) この点については、モデルの単純化とパソコンの今後の発達に期待するところである。

参考文献

- 1) 河野正雄 「個別要素法による節理性岩盤の挙動解析に関する研究」 1986年 京都大学修士論文 P9-22 P48-52
- 2) Peter Cundall: UDEC-A GENERALISED DISTINCT ELEMENT PROGRAM FOR MODELLING JOINTED ROCK, 1980, P.42-44

(105) DISTINCT ELEMENT ANALYSIS ON FRACTURED ROCK
BY PERSONAL COMPUTER

Yuzo Ohnishi
Masakuni Horita
and
Yoshikazu Tanaka
(School of Civil Eng., Kyoto Univ.)

It is a very promising subject to analyze the behavior of a fractured rock mass. The distinct element method (DEM) proposed by P. Cundall is a powerful approach to it. However, the method requires much calculation, and only large computer could handle it. Lately, with the development of high-capacity personal computers, it becomes possible to implement a DEM code in a micro-computer.

In this paper, the capability of a DEM code in a microcomputer is verified with two simple examples of slopes. One example is a rolling ball on a slope. The other is a rectangular-block model on a slope. The rolling ball analysis shows a good simulation of the acceleration of a ball on a slope. On the other hand, the rectangular model demonstrates two different modes of slope failure, a sliding mode with a small friction angle between a slope and rectangular blocks, and a toppling mode with a large friction angle.

After the verification of the DEM code, the code is applied to an analysis of the behavior of a fractured rock mass on a slope using the Volonoi tessellation for element discretization. The Volonoi tessellation can divide an analytical region into elements in consideration of random fractures in a rock mass. The DEM has a merit to handle any shape of elements and fits for the Volonoi tessellation which creates convex polygons, mainly, pentagons and hexagons. The result of the analysis shows a clear failure surface and a toppling mode.

In this research it becomes clear that even a microcomputer can handle a distinct element analysis on the behavior of a rather complicated fractured rock mass though we may run our microcomputer overnight.