

実際に個別要素法プログラムを動かしてみよう

筑波大学 松島亘志

I. 基礎編

1. プログラム(DEMseg)の概要
2. まずは使ってみよう
3. 制御粒子の設定
4. 弾性波速度とバネ定数 k
5. ダッシュポットの粘性定数 c と反発係数 eb の関係
6. 時間増分の決め方 ～差分方程式の解の安定性～
7. 粒子間摩擦係数 μ と内部摩擦角(集合体としての摩擦角)
8. 粒子サイズについて
9. 本編のまとめ

II. 岩盤解析編

1. はじめに：岩盤解析の概要
2. DEMseg における接触判定アルゴリズムの概要
3. 不連続面の力学的性質の表現
4. 不連続面の幾何学的性質の表現
5. 本編のまとめ

☆プログラム DEMseg の利用について

DEM プログラム(フォートランソースと実行ファイル)、例題の入力ファイル、ビューワープログラム(VB)は、以下のサイトからダウンロードできます。

<http://granular.kz.tsukuba.ac.jp/dem/demseg/>

プログラムの著作権は、作成者(松島)にあります。

個人的に使用する際には、許可は不要です。

論文等に利用する際には、email にてご一報いただき、謝辞または参考文献に以下を入れて下さい。

Matsushima, T. and Saomoto, H.: Discrete Element Modeling for Irregularly-shaped Sand Grains, Proc. NUMGE2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat (ed.), pp. 239-246, 2002.

プログラムの利用に関わる一切のトラブルには責任を負いかねます。ご了承下さい。実際に研究で用いているものなので、かなり色々なことができますが、逆にプログラムはとて読みにくくなっています。DEM のアルゴリズムを勉強するには向かないと思います。

I. 基礎編

1. 配布プログラム(DEMseg)の概要

2次元個別要素法プログラム...円形要素の剛接粒子、線分要素の剛接粒子が扱える

■入力ファイル

in_gm.dat	粒子情報の入力データファイル
in_bc.dat	境界条件、計算条件の入力データファイル
in_cf.dat	継続計算を行う際の、接触点情報データ

■出力ファイル

output.dat	ビューワーで結果を図示する為の情報(粒子位置情報)
cont.dat, cont2.dat	粒子接触力の情報(ビューワーで表示できる)
energy.dat	エネルギー収支
new_in_gm.dat, new_in_bc.dat, new_in_cf.dat, new_in_cf0.dat	継続計算用

以降では、簡単な計算例をもとに、DEMの各種パラメータの設定方法について説明する。

2. まずは使ってみよう

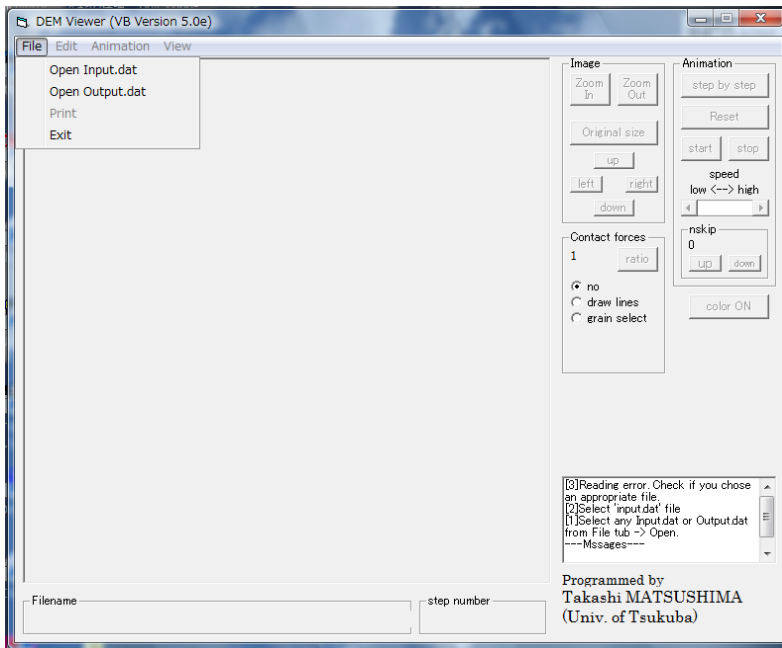
2-1. ex01-1: 1つの円粒子の跳ね返り

2-1-1. in_gm.dat の中身

<pre> 1 0 0 5.0d-5 0.0 -980.0d0 1 2.5d0 1.0d8 0.25d8 0.0d0 0.0d0 0.0d0 -10.0d0 10.0d0 0.0d0 10.0d0 0.0d0 1 0 0 1 1 1 0.0d0 0.0d0 0.0d0 1 2.0d0 0.0d0 5.0d0 0.0d0 </pre>	<pre> mode mode2 mode3 dt gx gy nmat rho(i) kn(i) ks(i) cn(i) cs(i) mu(i) x1 x2 y1 y2 ncir nseg1 nseg2 ic imat nelm vx(ic) vy(ic) vw(ic) ielm rad(ielm) xc(ielm) yc(ielm) wc(ielm) </pre>
---	---

mode	0...random particle generation, 1...normal
mode2	0...default
mode3	0...default
dt	time increment
(gx, gy)	gravitational acceleration
nmat	材料の数
rho(i) kn(i) ks(i) cn(i) cs(i) mu(i)	密度、バネ定数、粘性係数、粒子間摩擦角(deg)
(x1, y1)-(x2, y2)	計算領域
ncir nseg1 nseg2	円粒子の数、セグメント粒子の数、(nseg2=0とする)
ic imat nelm	粒子番号, 材料番号, 剛接円要素数
vx(ic) vy(ic) vw(ic)	速度(x, y, 回転(rad))
ielm rad(ielm)	円要素番号, 半径
xc(ielm) yc(ielm) wc(ielm)	要素中心, 角度(rad)

これをDEM Viewer (DEMview_semi.exe)で確認する。¹



File →Open Input.dat で in_gm.dat を選択

●その他の DEM Viewer の機能：

右側の Image グループのボタンで画像の移動、拡大・縮小

in_gm.dat を表示しているときは、その他のグループのボタンは無効

Edit タブ →copy でクリップボードに画像がコピーされる(下図のように)

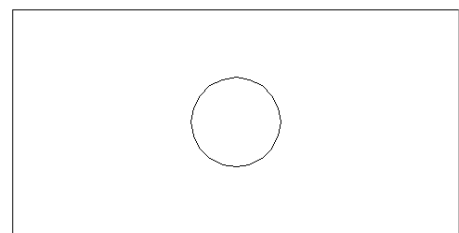


図 1 DEMViewer の画面(上)と copy により取得された画像(右)

2-1-2. in_bc.dat の中身

0	0	20000	100	10	jclid, iloop, nstep, nprn1, nprn2
0					npfd
0					npbd

jclid	=0 (no in_cf.dat), =1 (with in_cf.dat : 継続計算)
iloop	継続計算での今までのトータル計算ステップ数
nstep	今回の計算での計算ステップ数
nprn1	output.dat などの容量の大きい出力ファイルを何ステップおきに出力するか
nprn2	energy.dat などの容量の少ない出力ファイルを何ステップおきに出力するか
npfd	f-d_curve.dat で力と変位を出力する粒子数
npbd	力または変位を制御する粒子数

2-1-3. DEM プログラム(demseg_semi2.exe)の実行

ダブルクリックでも動くが、エラーメッセージなどを見たい場合には、コマンドプロンプトから実行する。

2-1-4. 結果の表示

DEM Viewer で、File タブ→Open output.dat で output.dat を選択する。

右側 Image グループの Zoom out で全体を表示させる

右側の Animation グループで Start ボタンを押すと動画が見られる。

¹ DEM Viewer は VisualBasic program なので、VisualBasic がインストールされていない PC で用いるにはランタイムライブラリが必要。これはフリーソフトで”VB ランタイムライブラリ”などとして検索すれば web で見つけられる。

2-3. 剛接続円要素を用いた計算(ex01-2)

以下の in_gm.dat を用いて計算してみよう。

```

1      0      0
5.0d-5 0.0 -980.0d0
1
2.5d0 1.0d8 0.25d8 0.0d0 0.0d0 0.0d0
-10.0d0 10.0d0 0.0d0 10.0d0 0.0d0
1      0      0
1      1      2
0.0d0 0.0d0 0.0d0
1      2.0d0
0.0d0 5.0d0 0.0d0
2      1.0d0
2.0d0 6.0d0 0.0d0
    
```

太字イタリックの部分が変更点であり、粒子 No.1 が2つの円要素から構成されている。

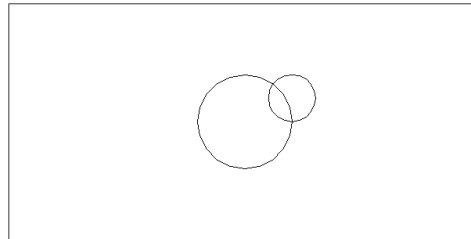


図2 初期配置



図3 計算結果

2-4. セグメント要素を用いた計算

以下の in_gm.dat を用いて計算してみよう。

```

1      0      0
2.0d-5 0.0 -980.0d0
1
2.5d0 1.0d8 0.25d8 0.0d0 0.0d0 0.0d0
-10.0d0 10.0d0 0.0d0 10.0d0 0.0d0
0      1      0
1      1      1
0.0d0 0.0d0 0.0d0
1      -2.0d0 2.0d0
2.0d0 4.0d0
    
```

segment 要素の場合は、2つの端部座標を入力データとする。接触速度が速いので、dt はより小さく取る必要がある。

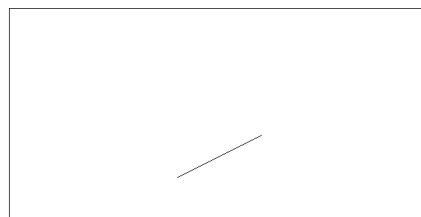


図4 初期配置



図5 計算結果

系全体のエネルギー収支は energy.dat から得られる(図6)。

- enrg...ポテンシャルエネルギー
- enva...粒子の速度エネルギー
- enka...接触点でのひずみエネルギー
- enca...接触点ダッシュポットによるエネルギー損失
- enfr...接触点摩擦によるエネルギー損失
- enxd...変位制御粒子によって系に加えられた仕事
- enxf...力制御粒子によって系に加えられた仕事
- err...トータルの収支誤差

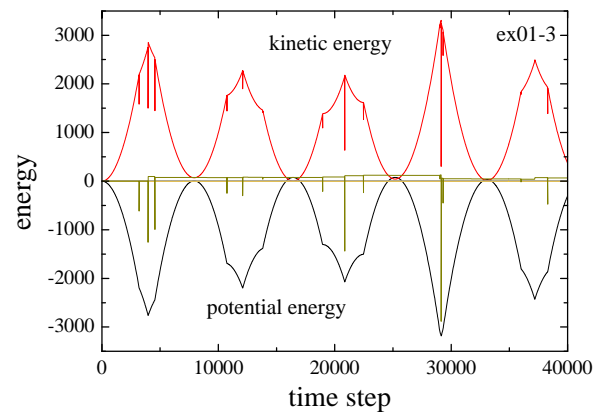


図6 エネルギー収支

2-5. 剛接続セグメントを用いた計算

以下の in_gm.dat を用いる。

```

1      0      0
2.0d-5  0.0  -980.0d0
1
2.5d0  1.0d8  0.25d8  0.0d0  0.0d0  0.0d0
-10.0d0 10.0d0  0.0d0 10.0d0  0.0d0
0      1      0
1      1      3
0.0d0  0.0d0  0.0d0
1     -2.0d0  2.0d0
      2.0d0  4.0d0
2     2.0d0  4.0d0
      1.0d0  7.0d0
3     1.0d0  7.0d0
      -2.0d0  2.0d0

```

このように各セグメント要素の端部がつながっており、採取的に閉塞しているとき、これは多角形粒子として扱われ、質量や重心、慣性モーメント等が自動的に求められる。

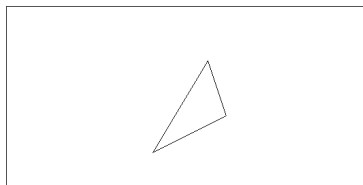


図7 初期配置

上述の例は、全て粒子間のダンピングや摩擦係数が0になっていたため、十分小さな時間増分を与えれば系のエネルギーは保存され、粒子は衝突しながら運動し続ける。時間増分に関する議論は後述する。

3. 制御粒子の設定

以下の in_gm.dat を用いる。

```

1      0      0
2.0d-5  0.0  -980.0d0
1
2.5d0  1.0d8  0.25d8  0.0d0  0.0d0  0.0d0
-10.0d0 10.0d0  0.0d0 10.0d0  0.0d0
1      1      0
1      1      1
0.0d0  0.0d0  0.0d0
1     2.0d0
0.0d0  5.0d0  0.0d0
2      1      1
0.0d0  0.0d0  0.0d0
1     -3.0d0  1.0d0
      -3.0d0  6.0d0

```

```

ncr=1   nseg1=1   0
円粒子の情報 (粒子 No. 1)

```

```

segment 粒子の情報 (粒子 No. 2)

```

ここで、以下の in_bc.dat において、segment 粒子の制御を行う。

```

0      0      20000  100  10
0
1
2     1     3.0d0   1     0.0d0   1     0.0d0

```

```

1 制御粒子の数
2 1 3.0d0 1 0.0d0 1 0.0d0
粒子 No. 2 を制御する。
x 方向に最終変位 3.0d0
y 方向に最終変位 0.0d0
z 方向に最終変位 0.0d0

```

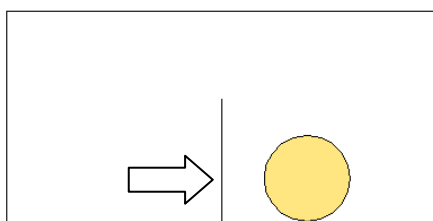


図8 初期配置

これで、segment 粒子である粒子 No.2 を変位制御で動かすことができる。

一方、力制御の場合には以下のように設定する。

```
0 0 20000 100 10
0
1
2 0 1.0d4 1 0.0d0 1 0.0d0
```

ここに 1.0d4 は粒子に作用する設定力である。

粒子の変位と作用する力を出力したい時には、in_bc.dat を以下のように修正する

```
0 0 20000 100 10
1
2
1
2 0 1.0d4 1 0.0d0 1 0.0d0
```

変位と力を f-d_curve.dat に出力する粒子数
その粒子番号

得られる f-d_curve.dat のフォーマットは次の通り。

```
f-d_curve.dat
1 2 0 -3 0 3.5 0 1.5708
10 2 0 -2.99982 0 3.5 0 1.5708
20 2 0 -2.99933 0 3.5 0 1.57082
....

time step 数、粒子番号、x 方向変位、x 方向の力、y 方向変位、y 方向力、回轉變位、モーメント
```

応用として、以下のようなシミュレーションも可能である。

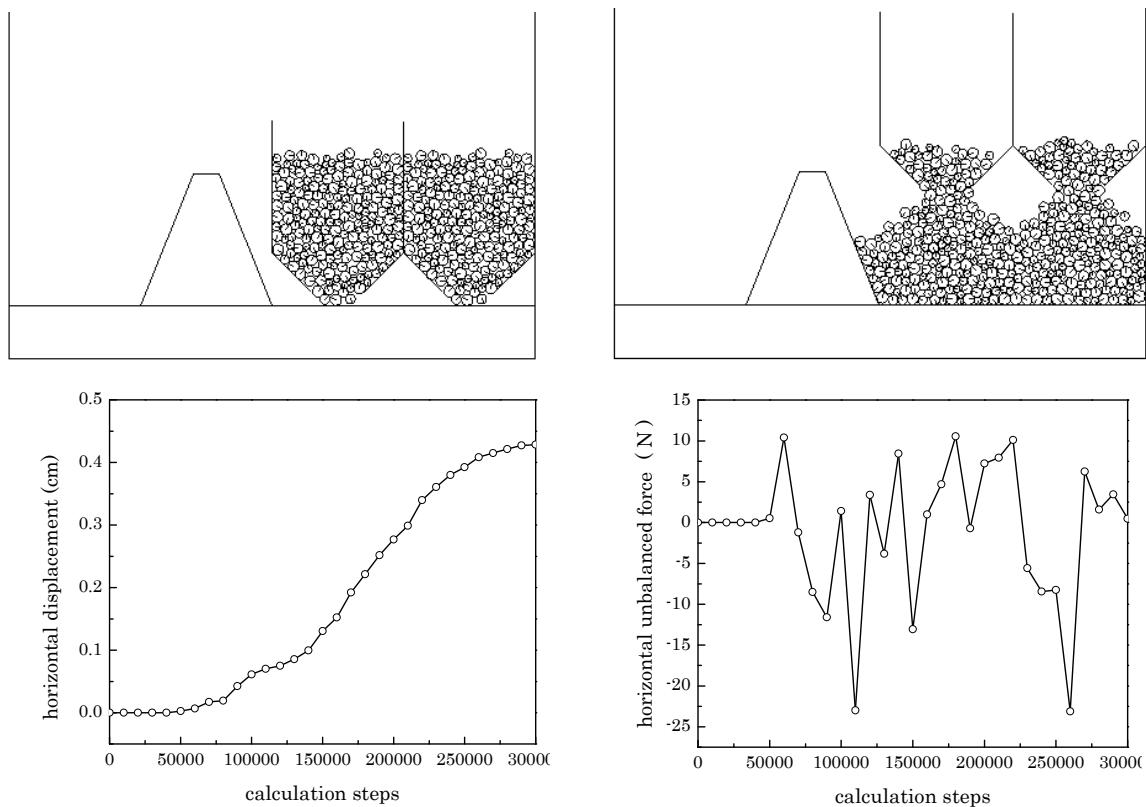


図9 土圧によって堤体が側方に動き出すシミュレーション。堤体底面と基盤の間に摩擦が作用している。

4. 弾性波速度とバネ定数 k

図 10(a)のような配置を作成する。粒子の接触深さを十分とり、粒子の横振動によって接触点が失われなようにする。両端は固定壁面である。中央粒子に横方向の初速を与えると、波動が左右へ広がっていく。その様子は f-d_curve.dat の粒子間力または粒子変位の変化で、図 10(b)のように見ることができる。中央の粒子が No.11 で右へ No.13, 15, 17 と続く。この波の伝播速度は、バネ定数によって変化する。ここでの DEM 計算での粒子 i の振動方程式は

$$m \frac{d^2 u_i}{dt^2} = k(u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1})$$

一方、連続体の波動問題を差分法で解く場合の運動方程式は

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{より} \quad \frac{d^2 u}{dt^2} = V^2 \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(dx)^2}$$

2 式の等価性より $V = \sqrt{\frac{k}{m}} dx$

本計算例では、 $dx=2.0$, $k=1.0e8$, $m = \rho_s(\pi r^2) = 2.5 \cdot \pi \cdot 1.1^2 = 9.50$ より $V=6487$ となる。図 10(b)の波の伝播速度を調べると、 $\Delta x=4.0$ の距離の粒子への波の伝播が $70e-5$ 程度で行われていることから、伝播速度は $4/70e-5=5700$ となる。理論値との差は、空間に対する離散化の精度が悪い(つまり波の波長に対して dx が大きすぎる)ことによると思われる。

以上は規則的に配列させた 2 次元問題にも適用可能であり、その場合、 $V_p^2 : V_s^2 = k_n : k_s$ という関係より k_s が決められるが、不規則な接触点方位を設定した場合の等価バネ定数については、より詳細な理論が必要となる(Chang et al, 1990)。また、弾性円や弾性球に対する等価バネ定数に対しては、Hertz-Mindlin 理論が有名であるが、バネが非線形となる(Johnson, 1985)。

一方、粒状体が全体として大きく塑性変形する問題では、微視的に見れば、粒子そのものが変形して

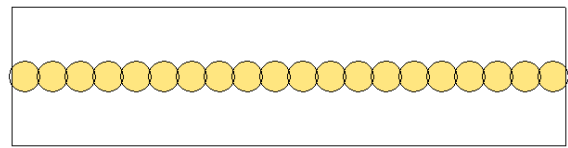


図 10(a) 粒子の 1 次元配置

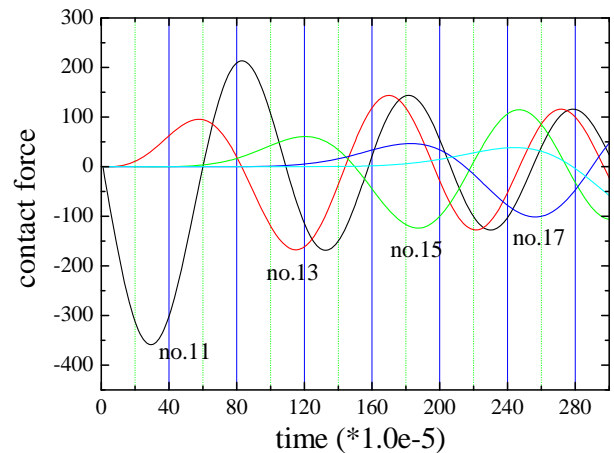


図 10(b) 振動波形

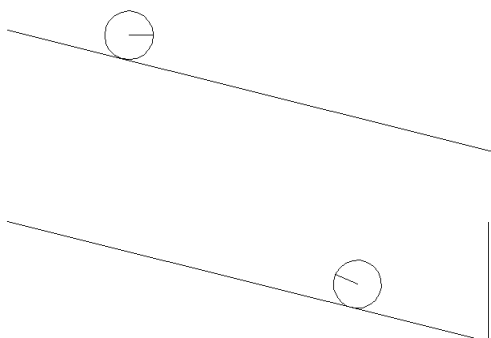


図 11 粒子の転がり問題

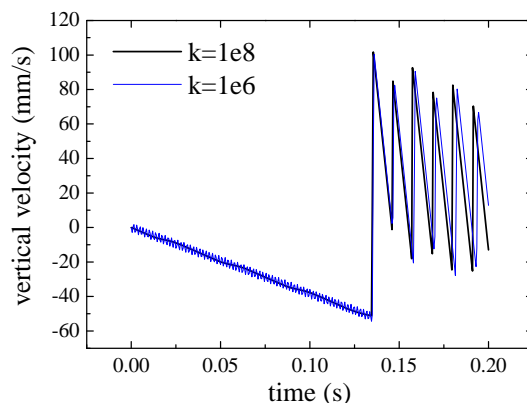


図 12 粒子の鉛直方向速度(velocity_y.dat より)

いるのではなく、粒子同士の相対運動(滑り&回転)によって変形が生じている。このようなケースでは、粒子の剛性の値は支配的でない事が多い。例えば粒子が傾斜面に沿って転がり落ちるような問題(図11&12)の場合、バネ定数が100倍違っていても、結果にはほとんど影響しない。

5. ダッシュポットの粘性定数 c と反発係数 e_b の関係

ダッシュポットの粘性係数についても、上記のようなマクロな減衰との等価性を議論できるが、砂のような粒状体のマクロな減衰については、詳細な実験により周波数依存性があり見られないという結果が得られている(例えば、石原:土質動力学の基礎)。これは、粒状体におけるエネルギー散逸が、ダッシュポットのような「粘性」によるものではなく、粒子間の摩擦など、時間依存性の少ないメカニズムで生じていることを意味している。そのような立場から、DEMにおけるダッシュポットを、物性的な機構ではなく、数値解析的な原因で現れる振動と、それによる計算の発散を抑えるような、非物性的な位置づけで捉える考え方もある。

一方、2球の衝突問題における反発係数 e_b は、速度依存のエネルギー散逸を表す物性値である。垂直衝突の場合には、衝突開始時より分離までの簡単な振動解析により、法線方向ダッシュポットの粘性係数 c_n と以下のような関係があることを導くことができる(図13)。

$$e_b = \exp\left(-\frac{h}{\sqrt{1-h^2}}\pi\right), \quad h = \frac{c_n}{2\sqrt{k_n \cdot m}}$$

ここに、 h は減衰定数、 k_n は法線方向バネ定数、 m は粒子質量である。粒子流れなど、低濃度で高速に運動する粒状体内では、このような関係からダッシュポットの粘性係数を与えるのが妥当であると考えられる。

図14は、粒子を水平な床面に落下させたときの粒子の鉛直方向座標をプロットしたものである。 $e_b=1$ のときはエネルギー損失なし、 $e_b=0.5$ のときは、1回の衝突で速度が1/2になるため、奇跡の頂点の高さは1/4になる。

(ここで用いたパラメータ： $k=1.0e8(g/s^2)$, $r=1.0(mm)$, $\rho_s=0.025(g/mm^2)$ 、 $m=\rho_s(\pi r^2)=0.07854(g)$ より $e_b=0$ ($h=1$) 臨界減衰では $c_n=0.5605e4$ 、 $e_b=0.5$ ($h=0.215$) では $c_n=0.1205e4$)

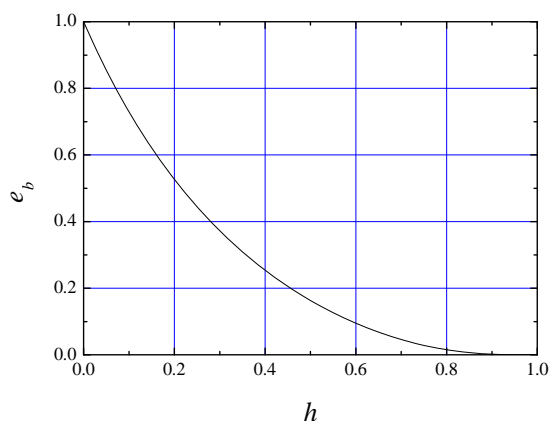


図13 減衰定数と反発係数の関係

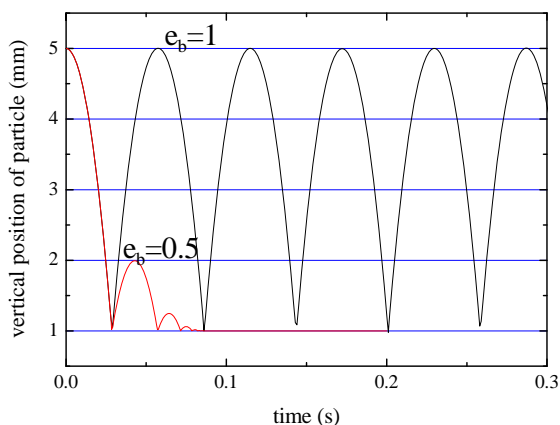


図14 粒子の床での跳ね返り

6. 時間増分の決め方 ～差分方程式の解の安定性～

差分方程式において、ステップ数が増加しても数値解の絶対値が発散しないとき、その数値解は「安定」であるという。安定性の判定法には(1)エネルギー法、(2)Von Neumann 法、(3)マトリックス法などがあるが、ここではマトリックス法を用いて、右図のような一質点系(つまり粒子の跳ね返り問題)を、DEM でよく用いられる蛙跳び法(leap frog 法)で解く場合の安定性を調べる。

運動方程式は

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + ku = 0$$

これを蛙跳び法で書き直すと

$$m \frac{u(2) - 2u(1) + u(0)}{(\Delta t)^2} + c \frac{u(1) - u(0)}{\Delta t} + ku(1) = 0 \quad ^2$$

これを次のような連立方程式の形(漸化式の形)に書く。

$$\begin{pmatrix} u(2) \\ u(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 - \frac{c}{m} \Delta t - \frac{k}{m} \Delta t^2 & \frac{c}{m} \Delta t - 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(1) \\ u(0) \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} u(1) \\ u(0) \end{pmatrix}$$

このマトリックス A の固有値を調べると

$$|A - \lambda I| = \lambda^2 - \lambda \left(2 - \frac{c}{m} \Delta t - \frac{k}{m} \Delta t^2 \right) - \left(\frac{c}{m} \Delta t - 1 \right) = 0$$

$$\therefore \lambda = \frac{1}{2} \left[\left(2 - \frac{c}{m} \Delta t - \frac{k}{m} \Delta t^2 \right) \pm \sqrt{\left(2 - \frac{c}{m} \Delta t - \frac{k}{m} \Delta t^2 \right)^2 + 4 \left(\frac{c}{m} \Delta t - 1 \right)} \right] = \lambda_1, \lambda_2$$

この場合、対角化により

$$A = R^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} R$$

と変形できるから

$$\begin{pmatrix} u(n+2) \\ u(n+1) \end{pmatrix} = R^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}^n R \begin{pmatrix} u(1) \\ u(0) \end{pmatrix} = R^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_1^n & 0 \\ 0 & \lambda_2^n \end{pmatrix} R \begin{pmatrix} u(1) \\ u(0) \end{pmatrix}$$

となり、 $\lambda_1^\infty, \lambda_2^\infty$ が発散しないためには、 $|\lambda_1, \lambda_2| < 1$ が条件となり、これが安定性の条件となる。

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left[\left(2 - \frac{c}{m} \Delta t - \frac{k}{m} \Delta t^2 \right) + \sqrt{\left(2 - \frac{c}{m} \Delta t - \frac{k}{m} \Delta t^2 \right)^2 + 4 \left(\frac{c}{m} \Delta t - 1 \right)} \right]$$

の解では $\lambda_1 < 1$ が critical だから、これを計算すると $\frac{k}{m} \Delta t^2 > 0$

となり、常に成立する。一方、

² なお中央差分法の場合には $m \frac{u(2) - 2u(1) + u(0)}{(\Delta t)^2} + c \frac{u(2) - u(0)}{2\Delta t} + ku(1) = 0$ であるから、結果が変わってくる。

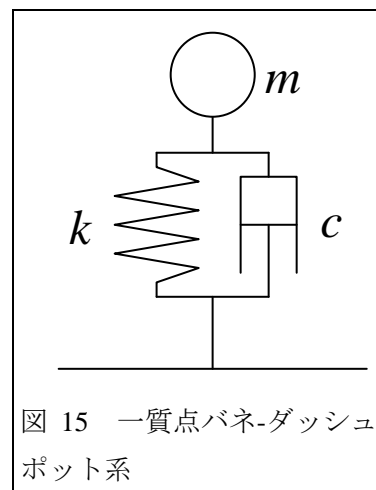


図 15 一質点バネ-ダッシュポット系

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left[\left(2 - \frac{c}{m} \Delta t - \frac{k}{m} \Delta t^2 \right) - \sqrt{\left(2 - \frac{c}{m} \Delta t - \frac{k}{m} \Delta t^2 \right)^2 + 4 \left(\frac{c}{m} \Delta t - 1 \right)} \right]$$

の解では $\lambda_2 > -1$ の条件が critical だから、これを計算すると

$$\Delta t^2 + 2 \frac{c}{k} \Delta t - \frac{4m}{k} < 0$$

従って、安定限界の時間刻み Δt_{cr} は

$$\Delta t < \Delta t_{cr} = -\frac{c}{k} - \sqrt{\left(\frac{c}{k} \right)^2 + \frac{4m}{k}} = 2 \sqrt{\frac{m}{k} \{ \sqrt{h^2 + 1} - h \}}$$

となる³。ただし、 $h = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ は減衰定数である。

上述の一質点系のプログラムを作成してチェックした結果を図 16 に示す。 $\Delta t_{cr} = 1.236068$ のケースで $\Delta t = 1.23$ なら安定、 $\Delta t = 1.24$ だと発散している。

一般に波動方程式の差分法における安定性条件(クーラン条件または CFL: Courant-Friedrich-Lewy 条件)は

$$\Delta t < (\Delta t_{cr})^{CFL} = \sqrt{\frac{m}{k}}$$

となり、上述の収束条件で $h=0$ とした結果

$$\Delta t < (\Delta t_{cr})_{h=0} = 2 \sqrt{\frac{m}{k}}$$

より厳しくなる(図 17)。しかし減衰のある系では、図 18 のように減衰定数の影響を受け、 $h > 0.75$ の条件では、CFL 条件より厳しい条件となることがわかる。

また、上記の閾値は、あくまでも接触の分離が生じない条件での理論値である。実際の個別要素法においては、粒子接触点の生滅が発生し、そのシステム状態変化時に計算誤差が積み重なる。そのため、ex01-1 の粒子の跳ね返り問題でも、理論的な閾値は $\Delta t_{cr} = 1.123e-3(s)$ であるにも関わらず、 $\Delta t = \Delta t_{cr} / 2$ でも発散が生じる。出力されたエネルギー収支 energy.dat を確認すると、 $\Delta t = \Delta t_{cr} / 10$ 程度でようやくトータルのエネルギー誤差が十分小さくなるのが分かる。この理論との差は、粒子の衝突速度の上昇とともに大きくなると考えられる。

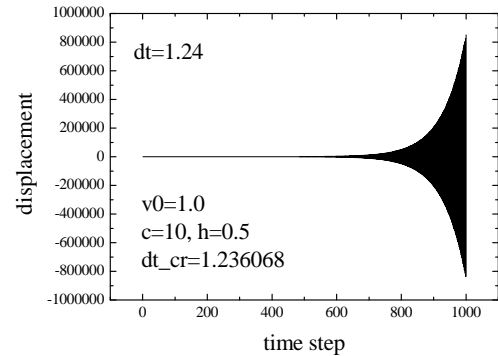
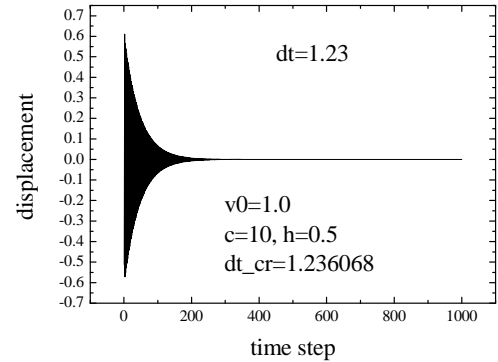


図 16 安定性チェック結果

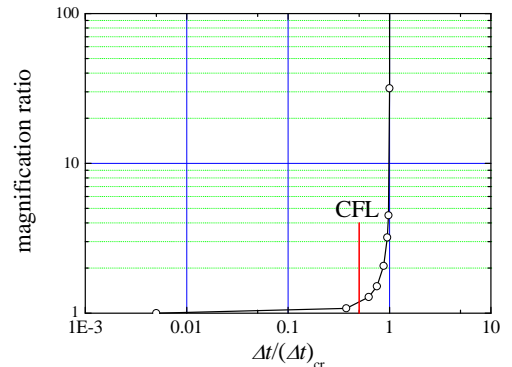


図 17 CFL 条件との関係

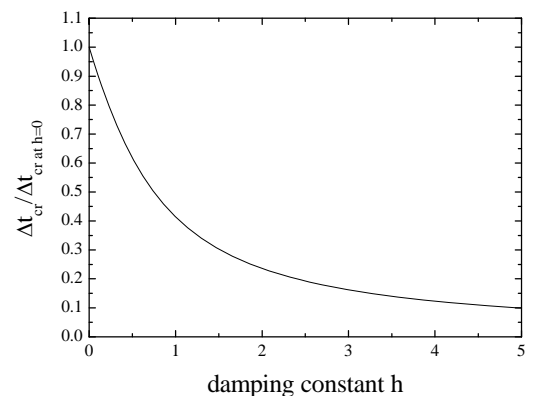


図 18 減衰定数の影響

³ 上記の議論はルート内が正(つまり固有値が実数)と仮定した。固有値が実数となる条件は、

$\Delta t > 2 \sqrt{\frac{m}{k}} (1-h)$ であるが、これより小さくなくても不安定化はしない。

7. 粒子間摩擦係数 μ と内部摩擦角(集合体としての摩擦角)

粒子間(要素間)摩擦係数 μ は、前述の通り接触点で滑り(塑性変形)が発生する閾値を与えるものであり、材料の降伏(弾性域から塑性域への発展)基準に対応する。 μ は、 $(\phi_\mu = \tan^{-1} \mu)$ のように粒子間摩擦角で表すこともあるが、これをいわゆる粒状材料の内部摩擦角(せん断抵抗角) ϕ と混同する例が多く見られる。古くは Saw-blade(のこぎり歯)モデルなどでも説明されるように、粒子集合体としての内部摩擦角は、ダイレタンシー(せん断に伴う体積膨張)の影響を含んでおり、粒子間摩擦角と1対1に対応しない。このことは、全く同じ粒子の集合体でも、密づめか、ゆるづめかによって内部摩擦角が変化することを考えれば明らかである。DEM 解析において、要素をランダムに配置する場合、ダイレタンシーの影響は自然と含まれることになり、やはり設定した粒子間摩擦角は、集合体としての内部摩擦角とは異なってくる。特に円や球要素の場合には、要素間の滑りよりも転がり(卓越することから、粒子間摩擦角をいくら大きくしても、内部摩擦角はある程度以上は大きくならない、という点に注意が必要である。つまり、内部摩擦角をある程度現実に即した値($35^\circ \sim 40^\circ$ 以上)に設定するためには、非円形、非球形粒子を用いる必要がある。

なお、円形や球形要素で、せん断抵抗を大きくした解析を行うために、粒子の回転を拘束した解析が行われることがある。その場合、粒子の接触点での相対回転(転がり)を拘束する手法は妥当であるが、安易に「粒子が回転しない」(つまり回転の運動方程式を解かない)という解析を行うと、集合体が相対位置を変えずに剛体回転するような場合にも粒子間力が作用するという不合理が生じるため、一般的な境界値問題には適用すべきでない。

また、粒子間摩擦角を非現実的に大きな値に設定すると、粒子間の接触挙動も非現実的になり、エネルギー収支も誤差が増大する。最上(1969)によってまとめられた粒子間摩擦角に関する既往の研究では、材料の種類や表面の粗さによってばらつきはあるものの、自然の砂で $23^\circ \sim 27^\circ$ 程度となっている。鋼球やガラスビーズなどの人工研磨された材料では 20° 以下になりうる。

図 19 は、582 個の円要素を積み上げ、一方の側壁を取り除くことによって粒子を流動させ、最終的な斜面角度(安息角)を求めた解析例である。はじめに以下のような in_gm.dat によって、円粒子をランダム発生させる。

in_gm.dat	in_bc.dat
0 0 0	0 0 2000 100 10
5.0d-5 0.0 -980.0d0	0
1	0
2.5d0 1.0d8 0.25d8 1.0d2 0.5d2 27.0d0	
0.0d0 80.0d0 0.0d0 80.0d0 0.0d0	
1.0 2.0 発生させる粒子半径の幅	
1 その材料番号	
0.5 間隙比	

プログラムを走らせると、粒子発生用のメッセージがいくつか出るので、適当な数字を入力する。粒子数は粒子サイズと、設定間隙比によって決まるようになっている。最初の発生時には粒子間に大きな overlap が発生しているが、ダッシュポットと粒子間摩擦係数を与えることで、2000step 後には粒子のランダム運動はほとんどなくなり、重力落下運動が支配的になる。この継続計算を 10000step 行うことで、粒子堆積構造が作成できる。

次に、右側の境界壁面を取り除き、安息角実験を行う。その際、最底面の粒子の流動を抑えるために、高さ 4cm の爪を残しておく(図 19 参照)。また、ここで壁面形成のために導入するセグメント要素は、円粒子に比べて大きな幅を持っているため、これまで 0 にしていた nseg2(type 2 のセグメント要素)として追加すると、計算時間を短縮できる^{4 5}。なお、セグメント要素は、厚さ thick=0.1 の分を考慮して位置を設定する。

in_bc.dat に関しては、新たに要素を追加したので継続計算とはせず、jcl=0 とする。そして、新たに追加したセグメント要素(要素番号 583 番)は変位制御要素として設定し、その変位=0 とする。以上の処理を行った in_gm.dat および in_bc.dat を下記に示す。

```

in_gm.dat
      1      0      0
5.0E-05 0.0E+00 -980.0
      1
0.25E+01 0.1E+09 0.25E+08 0.1E+03 0.5E+02 0.27000E+02
0.0d0 150.0d0 -100.0d0 100.0d0 0.1E+00
      582      0      1
      1      1      1
0.1035450206E+01 0.1222129013E+01 0.2372639011E+00
      1 1.12319367786502
0.5367001457E+02 0.4787937515E+02 0.5662937285E+01
      2      1      1
0.6352910982E+00 -0.5095746771E+00 -0.1661386006E+00
      1 1.32551257103480
0.2230672795E+02 0.3265676805E+02 -0.1244595628E+01
途中省略
583 1 2
0.0d0 0.0d0 0.0d0
1 0.0d0 -0.1d0
80.1d0 -0.1d0
2 80.1d0 -0.1d0
80.1d0 4.0d0

```

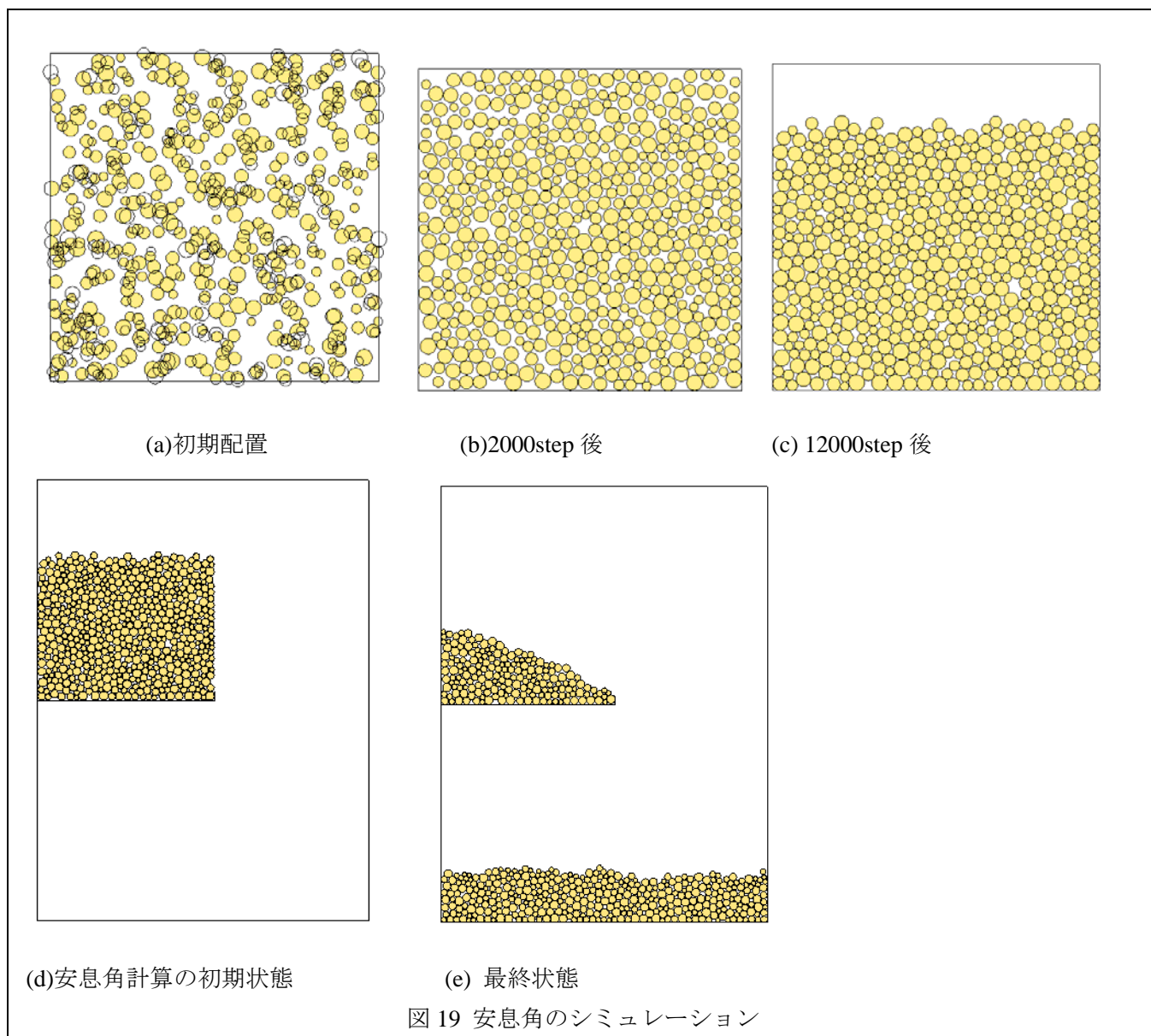
```

in_bc.dat
0 12000 100000 1000 100
0
1
583 1 0.0 1 0.0 1 0.0

```

⁴ 本プログラムでは、円要素および nseg1(type 1 のセグメント要素)の最大値から空間に格子を切り、それぞれの格子内の粒子番号を基に接触判定を行うことで、接触判定に要する計算時間の短縮を図っている。そのため、nseg1 に大きな長さのセグメントを与えると、格子サイズが大きくなり、計算が非効率になる。これを避けるため、容器や壁面などを表すセグメント要素は nseg2(type2)として設定することになっている。nseg2 は、格子とは別に、全ての要素と接触判定を行う。

⁵ type2 のセグメント用いずに計算時間を短縮するもう一つの方法は、壁面を円粒子と同程度の短いセグメントのつなぎ合わせとして表現することである。



8. 粒子サイズについて

DEMで土木構造物に関わる地盤の解析などを行う場合、要素のサイズを土粒子一粒に対応させることは、現在の計算機の能力から不可能である⁶。したがって、DEM要素はあくまでも地盤のある程度の範囲の「離散化」要素と考えることになるが、その際に「粒子は剛体で変形しない」といったDEMの仮定が成立しないのでは、といった指摘がある。ある程度の数のDEM要素の集合体の挙動が、対象とする地盤の要素試験結果をきちんと説明できるのであれば、あとは変形の局所化問題さえ顕著に出ない問題であれば、要素を大きくしても問題ないと考えられる。つまり、ある程度の量のDEM要素集合体が、FEMなどの構成モデル(1 積分点での応力-ひずみ関係)に相当し、その集合体サイズが、構造全体、あるいは変形の代表サイズに対して十分小さければ、DEM解析は「マクロな構成モデルを必要としない連続体の離散化手法」として機能する。たとえば、豊浦砂の大型3軸圧縮試験結果は、豊浦砂と全く同じ粒子物性で粒子サイズだけ10倍の砂の結果と一致するはずである。これは3軸圧縮試験が(少なくともpeak強度

⁶ 現在のスーパーコンピュータで10億要素程度が限界。0.1mmの粒子10立方cm分に相当。

までは変形の局所化の影響が顕著に出ないような境界条件だからである。一方、1面せん断試験などでは、粒子のサイズが余り大きくなると、せん断面上の粒子そのものをせん断破壊しているような状態となり、せん断強度が増大する問題が生じる。同様の傾向が、一般の境界値問題でも現れる可能性もあるので、注意が必要である。

9. 本編のまとめ

DEMでは粒子間の接触点にバネ-ダッシュポット-スライダシステムを仮定するが、このパラメータの与え方についての基礎的事項を説明した。前述の通りDEM解析においては、問題によって、あるパラメータの感度がそれほど高くない(つまりそのパラメータの値を変えても、全体の挙動に影響を及ぼさない)場合も多く、いたずらに物理モデルとしての物性値を追求する必要はない。一方で、粒度分布や粒子形状、破碎性などについては、物性的にきちんとモデル化しないと実際の材料挙動を適切に(定量的に)表現できない場合も多い。

DEMと連続体の等価性については、近年、堀らによって数理的に厳密な定式化がなされている(Hori, et al. 2006)が、そこではバネ定数がDEM要素形状に依存して決まるなど、連続体の「離散化手法」としての側面が強い。元々不連続な粒子の集合体をモデル化する場合には、上述の物理モデルをそのまま用いる、という方法も用いられるが、前述の通り粒子サイズの影響が問題となる場合も多い。そのような背景のもとに、近年は粒子法と呼ばれる、連続体とDEMの中間的な解析手法も各種研究され、一部は汎用コード化されてきている。今後はこのような手法との棲み分けの基準も必要となってくるだろう。

本編の参考文献

- [1] Cundall, P. A. 1971 A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. Symp. ISRM, Nancy, France. Proc., 2: 129-136.
- [2] M. Hori, K. Oguni and H. Sakaguchi (2006) Proposal of FEM implemented with particle discretization for analysis of failure phenomena, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 53, 3, 681-703.
- [3] Horn, H. M. and Deere, D. U., Friction Characteristics of Minerals, Geotechnique, Vol.12, pp.319-335, 1962.
- [4] P. W. Rowe: The Stress-Dilatancy Relations for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Royal Soc.London, Series A, Vol. 269, pp.117-141, 1962.
- [5] 最上武雄：土質力学，技報堂出版，1969.
- [6] Johnson, K.L.: Contact mechanics, Cambridge University Press, 1985.
- [6] Mindlin, R.D. & Deresiewicz, H.: Elastic spheres in contact under varying oblique forces, Journal of Applied Mechanics (ASME), 20, 327, 221-227, 1953.
- [7] Chang et al.: Journal of Eng. Mech. ASCE, 116, 5, 1077-1093, 1990.
- [8] 石原研而：土質力学の基礎，鹿島出版会。

II. 岩盤解析編

1. はじめに：岩盤解析の概要

砂などの粒状体と異なり、岩盤は拘束圧のない状態でも固体として自立している。すなわち、見かけ上岩盤は連続体的にふるまい、その物性も連続的に与えられることが多い。したがって、その解析においても、通常は FEM などの連続体的な解析手法が多く用いられる。

一方、地表付近の多くの堆積岩は、もともと固体粒子が堆積し、上載圧や長い年月の固結作用によって固体化したものである。また、火成岩・変成岩などでも、地表や地下水による風化作用によって亀裂が生じたり、粒子化するなどして、不連続体としての性質を持つ場合も多い。このような岩盤の力学挙動においては、母岩(固体部分)の物性よりも、不連続面の物性が支配的となる[1][2][3]。不連続面の物性としては、(1)方位、(2)間隔、(3)系列の数、(4)連続性、(5)開口幅、(6)面の表面粗さ、(7)すき間の充填物、などが挙げられるが、(1)-(4)は比較的巨視的な不連続面の幾何学的性質、(5)-(7)はいわゆる不連続面の力学的性質に関わるものと考えられる。特に不連続面の連続性などの幾何学特性は、岩盤のバルクの力学特性に大きな影響を及ぼすが、現地調査は困難であり、またそのような情報を適切に取り込んだ解析モデル構築の方法論も確立していない。

岩盤内の亀裂が進展し、その結果大きな塑性変形が生じて、最終的に破壊するに至るまでを解析しようとする場合、途中の段階で既に著しい不連続性が現れることから、これを通常の FEM などで解析することは多くの困難を伴う。一方、近年多くの研究蓄積のある SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)[4][5]や EFGM (Element-Free Galerkin Method)[6]などのメッシュレス解析法を用いて解析しようとしても、亀裂の構成則といった連続体的モデルを与える必要があり、また不連続性を十分な精度で解析するためには相当数の離散粒子(計算点)を配置する必要があるため、多大な計算時間を要することになる。

これに対し、個別要素法(Discrete Element Method, DEM)[7]-[10]などの不連続体解析手法は、岩盤変形を不連続面の変形のみで表現することから、不連続面での変形が支配的であるような亀裂性岩盤の解析を、少ない計算資源で実現できる。ただし、最も計算効率の高い円要素や球要素では、亀裂の幾何学的特性と塑性時の体積変化を正しく表現できるかが不明であることから、多角形や多面体要素などが多く用いられてきている。しかしながら、このような要素を用いた場合の計算時間の増大は著しく、またこれらの要素間の接触判定は、角-角、角-線、角-面、線-線、線-面、面-面といった接触形態に応じて異なる判定ルーチンを必要とすることに加え、尖り部での singularity の問題から、計算が不安定になったり、処理方法によって結果が大きく左右される、といった問題を抱えている。更に、前述の不連続面の物性を以下に解析に反映させるかの方法論については、今後の更なる研究が待たれるところである。

これらの現状を踏まえ、以降の章では配布したプログラム DEMseg を用いて、個別要素法による岩盤解析の基礎を学ぶ。

2. DEMseg における接触判定アルゴリズムの概要

前編で用いたプログラム DEMseg を本編でも用いる。前編では、入力データの作成方法など、プログラムを用いて実際に計算を行う場合の手順を説明したが、ここでは、プログラムで採用されている接触判定アルゴリズムについて若干の解説を行う。

本プログラムは二次元の円要素及び線分要素と、それぞれの剛体接合粒子を取り扱うことができる[2]。

接触判定ルーチンは(1)円要素同士、(2)円要素と線分要素、(3)線分要素同士、の3つを準備している。(1)は通常の場合と同様である。(2)については、以下のような流れで計算を進める(図-20参照)。

[1] まず円の中心から、線分を含む直線におろした垂線の方
向ベクトル(法線ベクトル) \vec{n} を次の式で求める。

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\vec{s}_2 - \vec{s}_1}{|\vec{s}_2 - \vec{s}_1|} \quad (1)$$

ここに、 \vec{s}_1, \vec{s}_2 は線分の両端の位置ベクトルである。

[2] 円中心と線分の垂直距離は

$$\alpha = (\vec{x}_2 - \vec{x}_1) \cdot \vec{n} \quad (2)$$

ここに、 \vec{x}_1 は円要素中心の位置ベクトル、 \vec{x}_2 は線分要素中心の位置ベクトルである。ただし、 $\alpha < 0$ のとき、 \vec{x}_1 は $\vec{s}_2 - \vec{s}_1$ のベクトルを上向きに見たときの左側にある。

[3] 垂線の足の位置ベクトルは

$$\vec{p} = \vec{x}_1 + \alpha \vec{n} \quad (3)$$

[4] α が円要素の半径 r よりも小さいとき、接触幅の半分は

$$l = \sqrt{r^2 - \alpha^2} \quad (4)$$

と表される。

[5] 線分が有限幅を有していることを考慮し、接触点の位置ベクトル \vec{c} 、および接触深さ $\delta < 0$ を、以下の場合分けで決定する。

$$(\vec{s}_1 - \vec{x}_2) \cdot (\vec{p} - \vec{x}_2) > 0 \quad \text{なら } \vec{p} \text{ は } \vec{s}_1 \text{ 寄り } k=1$$

$$(\vec{s}_1 - \vec{x}_2) \cdot (\vec{p} - \vec{x}_2) < 0 \quad \text{なら } \vec{p} \text{ は } \vec{s}_2 \text{ 寄り } k=2$$

とし、また

$$h_p = |\vec{p} - \vec{x}_2|, \quad h_s = |\vec{s}_k - \vec{x}_2| \quad (5)$$

とにおいて

(i) $h_p > h_s + l$ のとき接触無し

$$\delta = |\vec{s}_k - \vec{x}_1| > 0 \quad (6)$$

(ii) $h_s + l > h_p > h_s$ のとき

$$\vec{c} = \vec{s}_1, \quad \delta = |\vec{s}_k - \vec{x}_1| < 0 \quad (7)$$

(iii) $h_s > h_p > h_s - l$ のとき

$$\vec{c} = \vec{p}, \quad \delta = (|\alpha| - r) \frac{|\vec{s}_k - \vec{p}|}{l} \quad (8)$$

(iv) $h_s - l > h_p$ のとき

$$\vec{c} = \vec{p}, \quad \delta = |\alpha| - r < 0 \quad (9)$$

一方、(3)線分同士の接触判定については、一方の線分のそれぞれの端に厚さ t の円を設定し、もう一方の線分との接触を(2)のルーチンで行い、計4つのケースのうち接触しているものに関する合力として接触力ベクトルを定義し、また重み付き平均で接触点位置を定義する(図-21,22 参照)。したがって、1つ

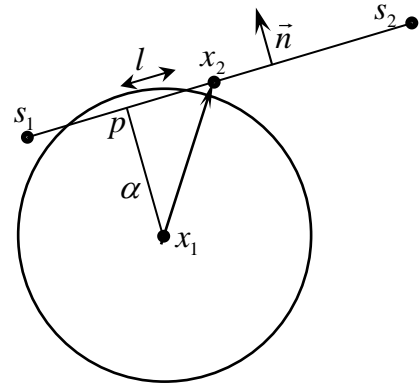


図-20 円要素と線分要素の接触判定

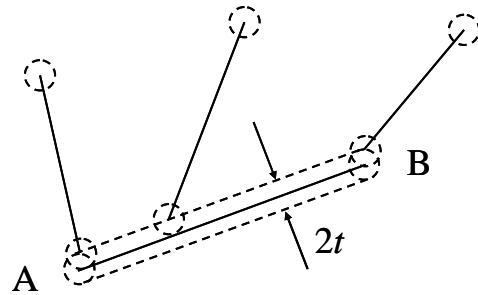


図-21 線分要素における厚さtの設定

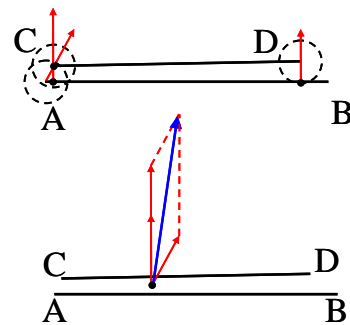
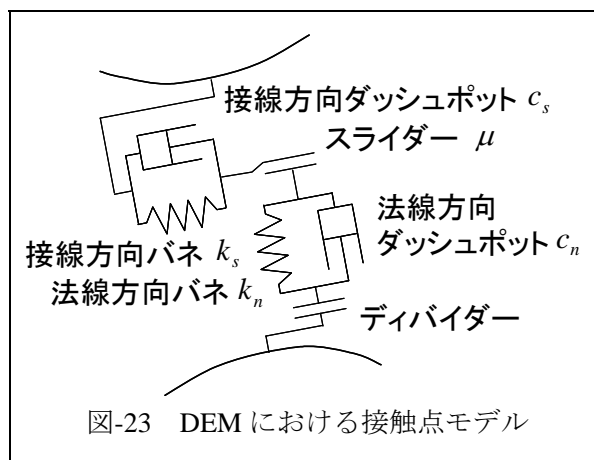


図-22 接触点位置の設定

の線分が単独で粒子として振る舞う場合、その厚さは $2t$ と設定していることになる。また、接触判定は、線分要素毎に独立に行うため、複数の線分の剛接続で作成した多角形粒子は、角部では辺部の2倍の剛性を有することになる。

3. 不連続面の力学的性質の表現

個別要素法(DEM)で亀裂性岩盤の解析を行う場合、母岩(要素)は形状不変であるから、その力学特性は不連続面(要素間接触)の物性に依存することになる。通常のDEMでは接触点にバネ-ダッシュポットシステムが仮定され、更に、接線方向には摩擦滑りを表現するスライダ、法線方向には要素の分離を表現するディバイダーが設定される(図-23)。これらは完全に分離した不連続面の再接触時の相互作用を表現するのに不可欠である。さらに、岩盤の不連続面は、不完全亀裂や固着物質によって付加的な引張り剛性や引張り強度を有する。DEMでは多くの場合、これらを表現するバネ-ダッシュポットシステムを追加で設定し、引張り破壊の発生後にこれを無効とするモデル化を行うことが多い。この場合、この追加システムの物性値の設定が必要で、破壊前の剛性は、破壊後の剛性より大きくなる。



一方、本プログラムのように、追加のバネは設定せず、初期の内部拘束力を与える方法もある。そこでは、通常の粒状体モデルに拘束圧を与えて圧縮した状態で、粒子間に作用している接触点圧縮力をキャンセルする力(ここでは背引張接触力 f_b と呼ぶ)を、いわゆる背応力(back stress)のように与えることで、付加的なバネなしで岩盤のモデル化を行う。この場合、引張り破壊前後の接触点剛性は同じとなる。また、引張り破壊強度は、背引張接触力導入時の食い込み深さに引張りバネ剛性をかけ合わせたものとなる。すなわち、本モデル化では引張り破壊物性に関する条件設定の自由度がない代わりに、追加に与えるパラメータが不要となっている簡便モデルであると言える。

ここでは、図-10における1次元配置を例にとった計算例を示す。この状態で左右の境界を広げると、通常は粒子が反発して分離する(図-24(a))が、その際、in_bc.datの最初のパラメータ(継続計算用パラメータ)を3と設定すると、自動的に粒子間に背引張接触力が設定され、粒子群は動かない(図-25(a))。ただし、その際、背引張接触力の情報が書き込まれているin_cf0.datが必要である。初期計算の際には、このファイルがないため、まずdtを十分小さくして1stepの計算を行い、その際に発生する継続計算用ファイルnew_in_cf0.datをin_cf0.datにrenameして用いればよい。

in_cf0.datのデータの並びは、各粒子に設定されている背引張接触力の数、およびそれぞれの対象要素番号、背引張接触力の値の順となる。

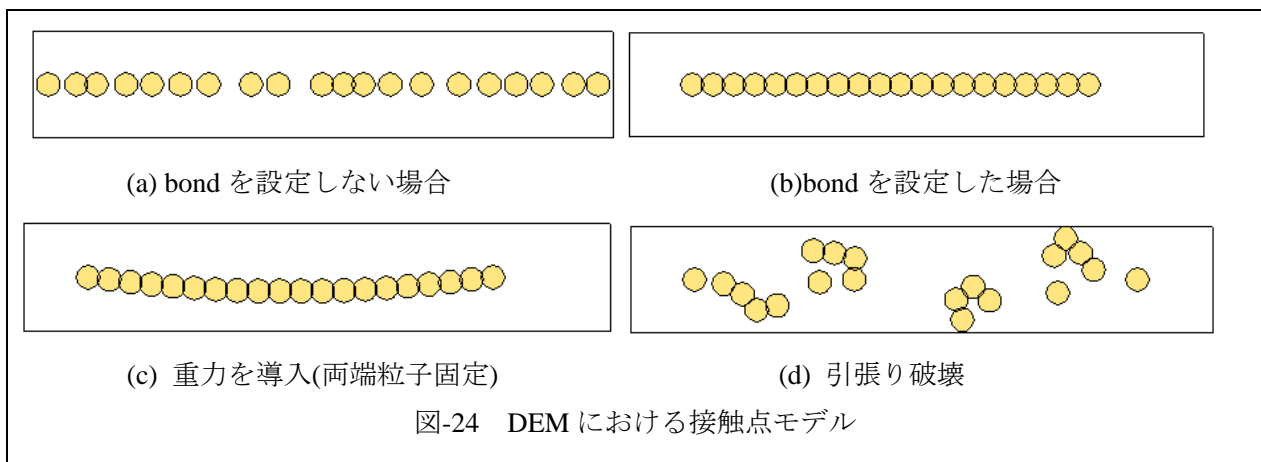
in_bc.dat				
3	1	10000	100	10
		0		
		0		

in_cf0.dat	
1	1
2	-20000000.0000000
2	2
1	-20000000.0000000
3	-20000000.0000000
3	2
2	-20000000.0000000
4	-20000000.0000000

この1次元粒子鎖の端部粒子(no.1 & no.20)を固定して重力を加えると、懸垂線を描いて安定化する(図-24(c))⁷。

一方、1端の粒子(no.1)を固定し、もう一端の粒子(no.2)に引張り変位を加えると、ある程度の伸びを示した後、粒子鎖は分離する(図-24(d))⁸。破断強度は、背引張接触力と等しく、引張りバネ定数に初期食い込み深さを乗じた値となる。

背引張接触力は、計算領域を規定する境界との間には導入されないことに注意が必要である。すなわち、計算領域境界および他の粒子と接した状態であり合っている粒子が存在する場合、他の粒子との間の斥力は背引張接触力導入によって0となるが、計算領域から受ける力は0にならないため、不釣り合い力が発生する。このため、背引張接触力導入後に粒子が新しいつり合い位置を探して移動することになる。



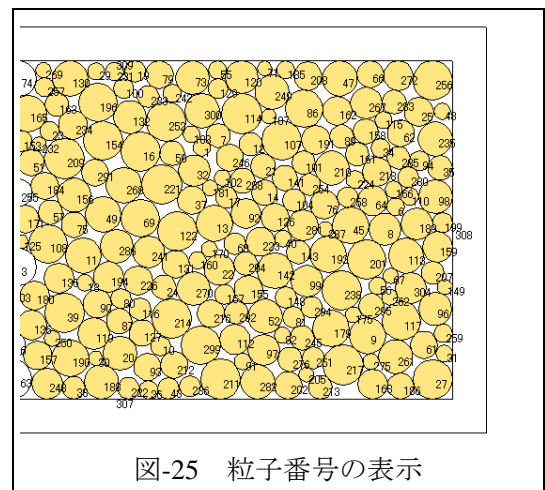
4. 不連続面の幾何学的性質の表現

4-1. 円要素による解析

個別要素法(DEM)で亀裂性岩盤の解析を行う場合、不連続面の幾何学的情報をあらかじめ要素データとして準備しなければならない。円要素や球要素を接続して岩盤をモデル化する場合には、まずパッキングを行い、その後前節で述べた方法で背引張接触力を導入すればよい。前節で述べたように、背引張接触力を導入すると同時に、計算領域境界を広げてやる必要がある。

岩盤要素の圧縮試験などをシミュレーションする場合、端部の要素を変位制御要素とし、強制変位を与えるか、または segment 要素などで圧縮板を追加して載荷する。前者の場合には、Viewer で

View タブ→grain number→ON

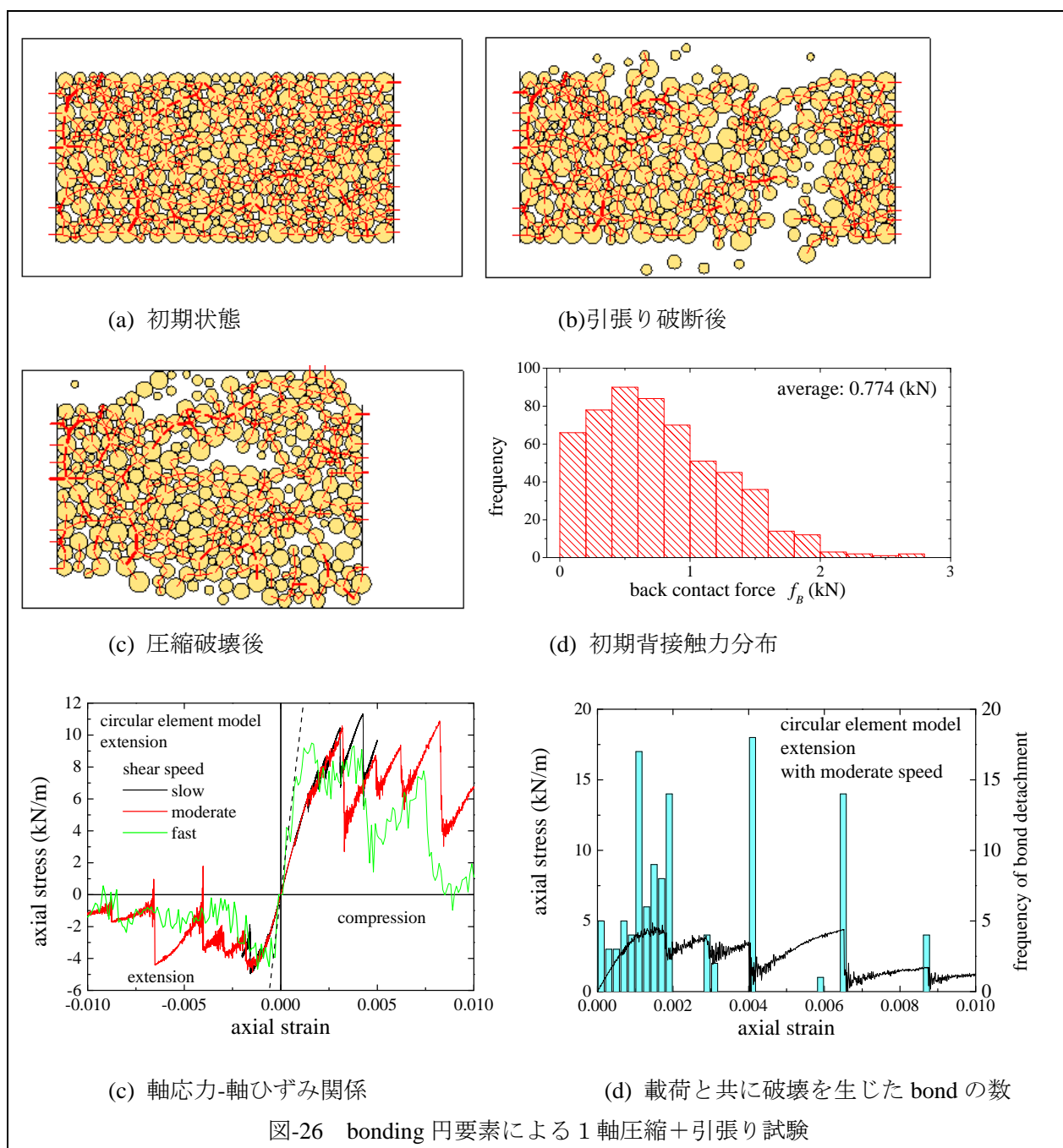


⁷ ただし、安定化させるには、damping をかなり大きく取らなければならない、それに伴って dt も小さくしなければならない。

⁸ 重力を与えないで引っ張ると、粒子鎖はほぼ全ての箇所と同時に切れる。重力を与えておくと、粒子鎖の幾何学的な乱れにより、同時に切れにくくなる。それでも何カ所かで切れる原因としては、一箇所ですら切れた際の衝撃波が伝播して他の鎖を切るためである。粒子数が十分多ければ、鎖の幾何学的な乱れで圧縮波の伝播が抑制され、結果的に1箇所ですら切れるようになると考えられる。

を選択して、粒子番号をチェックし、これを in_bc.dat の制御粒子として設定すればよい(図-25)。後者の場合には、計算領域境界を segment 要素に置き換えて安定化させ(このとき in_bc.dat では継続計算にしない)、その後、bond を設定する。すると、設置した segment 要素も一緒に bonding されるから、その後、それらの一方を固定し、もう一方を変位させればよい。図-26 はそのようにして引張り試験および圧縮試験を行った結果である。ここでの法線方向接触バネ係数が $k_n=1e7(N/m)$ であり、初期背接触力の平均値が 0.774(kN) である(図-26(c))ことから、初期平均食い込み量は $0.774e-2(cm)$ となり、平均要素径 4.0(cm) の 0.0019 となっている。従って、これが引張り破壊の限界ひずみになると考えられ、その時の限界引張り応力は $0.774(kN)/4(cm)=19.4(kN/m)$ と見積もられる。

図-26(c)は、左右境界の plate で計測された軸応力-軸ひずみ関係である。これによれば、前述の概算と比べ、剛性として約半分、引張り強度は約 1/4 程度、圧縮強度は約 1/2 程度となっていることがわかる。



これは、軸と垂直な方向の変形自由度、接線方向バネ係数 $k_s = k_n/4$ の影響、供試体の不均質性によって、弱い部分に変形が集中する影響、要素の回転自由度の影響など、様々な要因が考えられる。なお、圧縮破壊強度は、引張り破壊強度の2倍程度となっているが、これは載荷板の摩擦や供試体形状などの影響も受けると考えられる。

更に、図-27(d)は、載荷と共に **bonding** 破壊を起こした接触点の数の例(引張り載荷、中程度の引張り速度)を表しているが、これは物理試験での AE(Acoustic Emission)と同じような計測値であると言える。図-27(c)と比較してみると、大きな強度低下を起こしている部分と、**bonding** 破壊が対応していることがわかる。

本手法を三次元に拡張した研究例として参考文献[12]がある。

4-2. 線分要素による解析

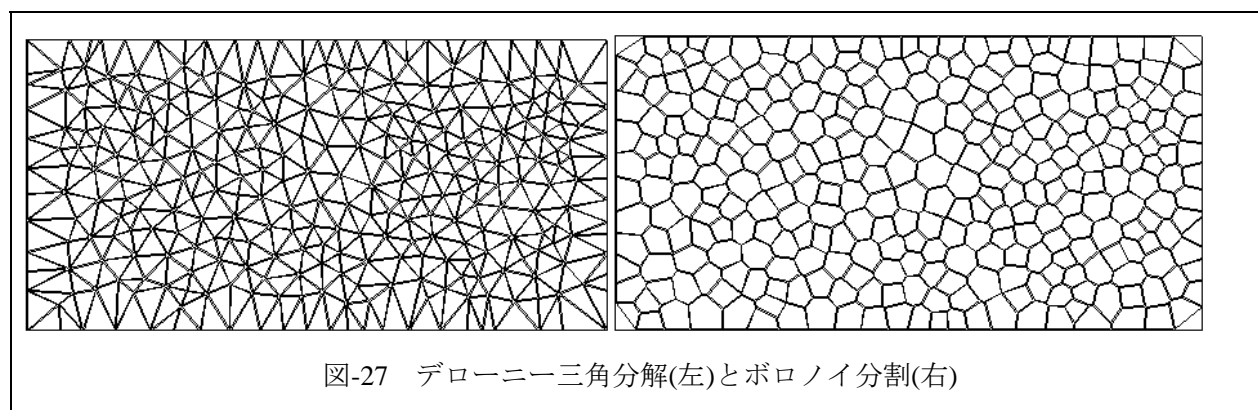
前述のように、本プログラムでは、線分を剛接続して任意の多角形要素を作成することができる。これによって、円要素のように内部空隙のない、密実な岩盤モデルを作成することができる。その際の、要素分割に関しては、有限要素法などで用いる自動メッシュ分割を用いる方法が最も一般的であるが、この場合、分割はあくまでも数値解析における離散化の役割以上ものではない。DEM における岩盤の要素分割は、破壊後のみならず破壊前の力学的特性にも影響を及ぼすため、その物理的位置づけを考えながら行う必要がある。

ここでは、本プログラムを用いて図-26(a)のように円要素をパッキングした結果を利用し、そこからボロノイ分割プログラム `volonoi.f` を用いて、円要素パッキングと1対1対応する2種類の要素分割(デローニー3角分割およびボロノイ分割)を作成する。`volonoi.f` に用いる入力データは `in_gm.dat` であり、出力は `in_gm_tri.dat`(デローニー3角分割)および `in_gm_volo.dat`(ボロノイ分割)である。それぞれの結果を図-27に示す。

ボロノイ分割とは、空間上に撒かれた点(seed)のそれぞれから、等速度で領域を等方拡大させていき、他の点からの領域と衝突したところで領域を固定することによって生成される。物理的には結晶成長のメカニズムを考えればよい。これにより、近傍の seed との二等分線をつなげた領域境界が形成される。

一方、デローニー三角分解は、上記の近傍 seed 同士を結んで形成される三角形によって領域を分割する。その際、得られる三角形内に他の seed が含まれない、という条件を課すことによって、領域が重複なく分割される。デローニー三角分解の境界線とボロノイ分割の境界線は一対一に対応し、互いに直交する。

これらの分割では、初期 seed の分布が不均一であると領域形状がいびつになったり、正しく分割でき



ないという問題が発生する。そこで、ここではパッキングした円要素の中心を *seed* として分割を行う。これが *volonoi.f* の中身である。

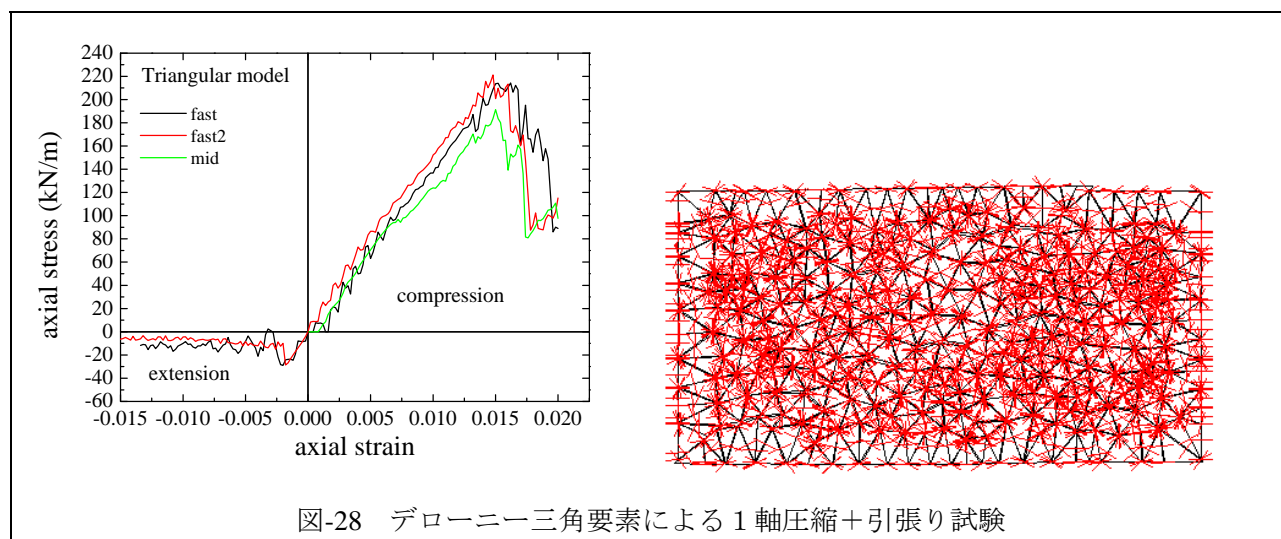
この場合、分割する試験体(あるいは構造物)の境界の処理が問題となる。ここでは、計算領域境界近傍の要素を、領域境界を中心として反転させて仮要素を生成させ、それらを含んだ分割を行うことで、設定領域と整合する分割を実現している。

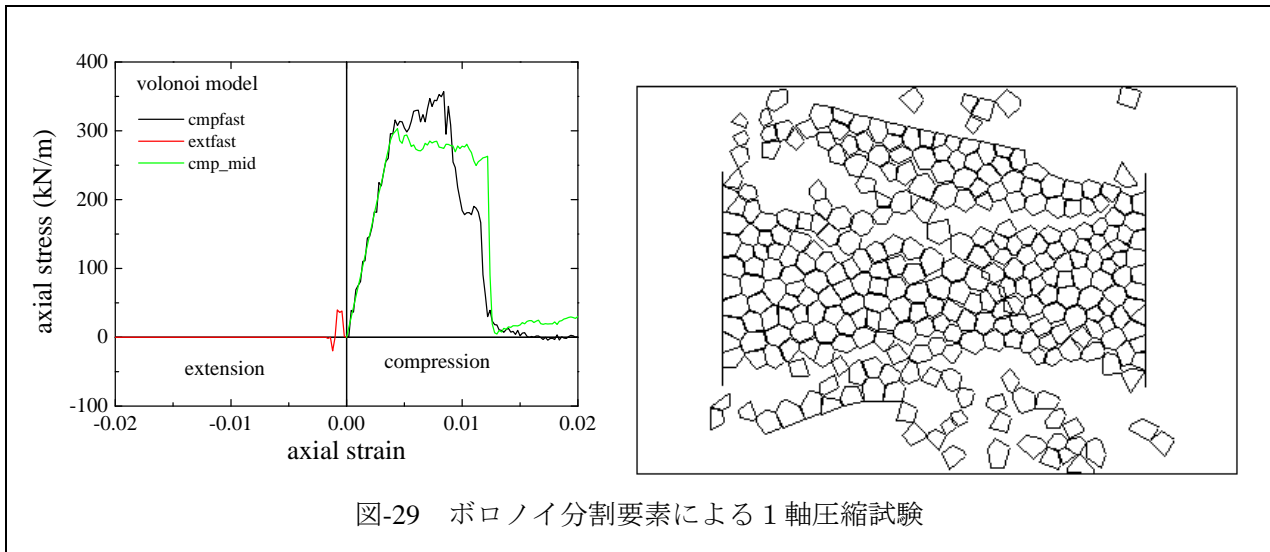
更に、前述のように *segment* 要素同士の接触では、完全に重なった状態を回避するために、*segment* 厚さ *t* を仮定する。これに対応して、各要素も、要素間距離を、入力 *in_gm.dat* 内で設定する *thick* だけ離して生成される。したがって、このあと、要素を *bonding* したときには、*thick* の値を大きくすれば、その分だけが初期接触深さとなる。以後の解析では、分割時は *thick*=0.1(cm)、その後の *bonding* 時には *thick*=0.108(cm)としている。この場合、辺の隣り合った *segment* 間の初期接触深さは 0.008(cm)であるが、それ以外の *segment* 同士では 0.008(cm)より小さな接触深さを持つ場合もある。また、端-端接触の場合には、前述の通り二倍の剛性によって背引張接触力が面-端接触部の二倍となっている。それらの平均として初期背接触力の平均値は 0.753(kN)となり、円要素 *bonding* モデルとほぼ等しい値となる。

円要素モデルの作成と同様、載荷板を設置した状態で *bonding* し、載荷板の変位を制御して引張りおよび圧縮試験を行う。円要素と比べて *dt* をやや小さく取らないと発散する。これは要素回転に対する振動が原因と考えられる。

デローニー三角分解モデルの場合、三角形粒子数が 537 個、*segment* 数が 1611 個で円要素の 304 個の 5 倍以上である。また密につまっております、接触可能な *segment* 数が多い。更に 1 回の接触判定アルゴリズムにも時間がかかるため、最終的に計算時間は円要素の 100 倍近くかかる。得られた軸応力-軸ひずみ関係を図-28 に示す。接触点数が円要素モデルに比べて 10 倍程度異なることから、剛性は $\sqrt{10}$ 倍程度異なることが予想されるが、図-26(c)と比べてみると、大体そのようになっている。引張り強度に関しては、引張り限界ひずみを円形要素モデルとほぼ合わせたことから、0.002 程度になっており、これも整合している。一方、圧縮強度に関しては、引張り強度の 10 倍程度の極めて大きな強度を示している。これは一般の岩石の圧縮/引張り強度比と同程度の値である。このような圧縮強度は、要素の幾何学的な配置に大きく依存すると考えられる。

最後にボロノイ分割モデルの結果を図-29 に示す。デローニー三角分解モデルよりも更に大きな圧縮強度が得られている。接触点数は 1.2 倍程度であるから、この差は、やはり要素の幾何学的配置による





ものであると考えられる。

5. 本編のまとめ

DEM で亀裂性岩盤をモデル化するには、要素の幾何学形状や配置が重要な因子であることが明らかとなった。これらのメカニズムについて検討することに加え、実際の岩盤の亀裂情報を、どのように解析モデルに反映させるかの方法論の確立が必要である。

本編の参考文献

- [1] 地盤工学会：設計用地盤定数の決めかた-岩盤編-, p.5, 2007.
- [2] 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，第5章岩盤力学，1999.
- [3] 川本,吉中,日比野: 岩盤力学, 土木学会編新体系土木工学, 20, 1985.
- [4] Lucy, L.B., 1977, "A numerical approach to the testing of the fission hypothesis", *Astronomical Journal*, 82, 1013.
- [5] Gingold, R.A. and Monaghan, J.J., 1977, "Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 375.
- [6] T. Belytschko, Y. Y. Lu, and L. Gu, "Element free Galerkin methods," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37, 229–256, 1994.
- [7] Cundall P.A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. In: *Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics*, vol. 1, Nancy: France; 1971.
- [8] P.A. Cundall, O.D.L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29, 47–65, 1979.
- [9] 木山英郎, 藤村尚: 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, 1983.
- [10] Potyondy, D.O., Cundall, P.A.: A bonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 1329-1364, 2004.
- [11] T. Matsushima: Documentation of DEMseg, 2001.
- [12] 松島亘志, 池間健仁, 山田恭央: コンクリートガラ粒子の破碎特性に関する実験と DEM 解析, 応用

力学論文集 Vol.12, 土木学会, 489-496, 2009.