

個別要素法における円形を基にした任意の要素形状の表現

鳥取大学大学院 住田緒里江 鳥取大学工学部 木山英郎
鳥取大学工学部 西村 強

1. はじめに

個別要素法(DEM)¹⁾において、岩塊や粒状体の形状をなるべく忠実に表現するには、多角形要素を用いることが考えられる。しかし、多角形要素の場合は、頂点付近の接触の処理などを要するため、演算時間の面から見れば、円形に比べ不利である。さらに、凹部を有するような任意形状を多角形要素を用いて表現することは、プログラムの複雑化を招き、現実的ではない。そこで、要素間接触力に引張力の発生を認めるとともに、円形要素を結合させて1つの塊(クラスターと呼ぶことにする)として、任意の形状を表現することを試みた。本文では、モデルの概要と単純せん断解析結果を一例として示す。

2. 円形要素による任意形状の表現

図-1(a)は砂などの粒子の概形を表しており、(b)のように1つの円要素で厳密にモデル化するのは難しい。そこで、(c)のように複数の円要素を組み合わせることによって粒子の概形を表現することを考える。図-2は、要素間の接触力-変位関係を表す。DEMでは、粒子個々は剛体であるとし、接触点にバネ-ダッシュポット系を仮定して、接触力を求める。この接触力には、図-2中の点線で例示するように、法線方向力には引張の発生($e_n < 0$)を認めない、および、接線方向力には摩擦則($e_s \leq \mu e_n$)の2条件が、通常付加されている。本研究では、図-1(c)に示すクラスター内の要素間接触力には、この2条件を無視する。すなわち図-2中、実線のような関係を与えて、“塊”としての運動を表現する。円形要素間の接触判定がそのまま使えるなど、プログラムの変更は少なくて済む。後述の解析では、図-3のような3要素を一クラスターとして用い、その形状を、要素間接触角 α によって変化させている。

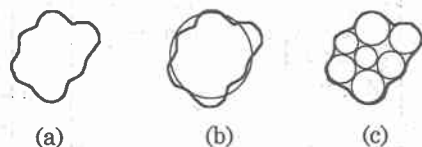
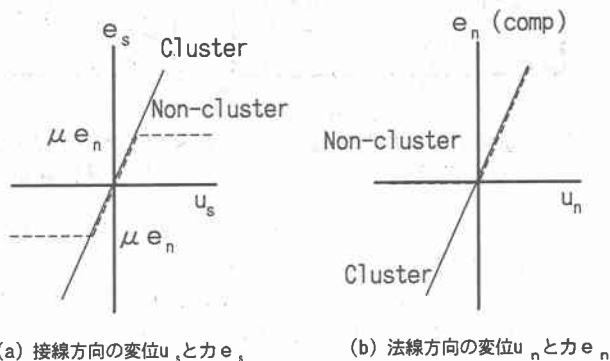


図-1 任意形状の表現方法



(a) 接線方向の変位 u_s と力 e_s (b) 法線方向の変位 u_n と力 e_n

図-2 要素間接触力

3. 単純せん断解析

(1) 解析領域と手順 図-4のように、円要素(半径 $r=1\text{cm}$)を、高さ $h=20\text{cm}$ 、幅 $b=40\text{cm}$ の領域内に規則的に配置して解析モデルとする。この図中の円要素の中心を結ぶ三角形は、当該3要素が一クラスターを形成することを意味している。圧縮、せん断過程を通じて、上辺は圧縮荷重に相当する自重を有する剛板要素として導入し、上下方向に可動である。図-5は、上辺に $F_x/\rho g=1500(\text{cm}^3)$ (ここに、

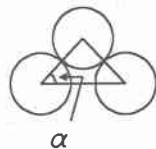


図-3 要素間接触角 α

ρ :密度)なる荷重を加えた状態を示しており、この荷重は図中の円要素の単位奥行き当たり重量の和の約2倍に相当している。接触点における線分は接触力を表わしており、接点を挟んで作用力・反作用力を意味する。せん断過程では、左辺と右辺が平行を保ちつつ、それぞれの下端を中心として $\dot{\theta}_{xy}=0.05(\text{rad/s})$ なる速度で回転する。このとき、上辺は両辺の回転とともに、水平移動するが、回転は拘束されているとした。解析モデルに作用する垂直応力 σ_x 、せん断応力 τ_{xy} は、モデル内に水平せん断面を仮定して、そ

の面に働く平均的な値として次のように求める。まず、図-5中 y 方向に接触点を連ねて仮想的なせん断面とし(この図では、計 11)、この面上の接触力の x 方向成分の総和、および y 方向成分の総和を求め、これらそれぞれを幅 b で除して、その面に作用する σ_x , τ_{xy} とする。これを全仮想せん断面について求めたのち、平均化して、解析モデルに作用する垂直応力、せん断応力(σ_x , τ_{xy})とする。用いた接触剛性係数 k_n 等を表-1に示す。

(2) 解析結果 図-6(a)は、図-4 のようにクラスターを含む場合の解析例($\alpha=58^\circ$, $\gamma_{xy}=5\%$)である。これと比較するため、同(b)図にクラスターを含まない例を示した。(a) 図においては(b)図より接触力の発現が大きく、せん断抵抗が大きくなることが予想される。このような解析より、上記したように σ_x , τ_{xy} を求め、 α の値でまとめたものが図-7である。これらの図より、クラスター要素を含まないとき、 α の減少すなわち各層間のかみ合わせが大きい程、せん断抵抗が大きくなる、クラスター要素を含む例では、含まない例に比べ、せん断抵抗が大きくなる等が示されている。

参考文献 1)Cundall, P.A.:Symp.ISRM, Nancy, France, Proceedings, Vol-2, pp129-136, 1971.

表-1 解析定数

normal spring:	$k_n/\rho g=3.64 \times 10^4(\text{cm})$
normal dashpot:	$\eta_n/\rho g=1.53 \times 10(\text{cm}\cdot\text{s})$
shear spring:	$k_s/\rho g=0.91 \times 10^4(\text{cm})$
shear dashpot:	$\eta_s/\rho g=0.76 \times 10(\text{cm}\cdot\text{s})$
time step:	$\Delta t=1.0 \times 10^{-4}(\text{sec})$

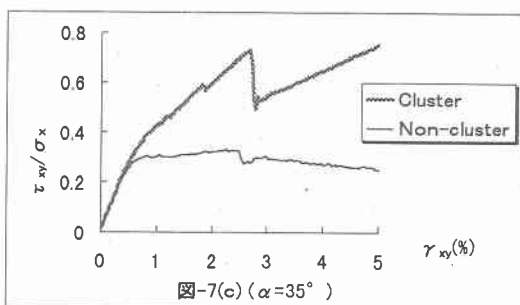
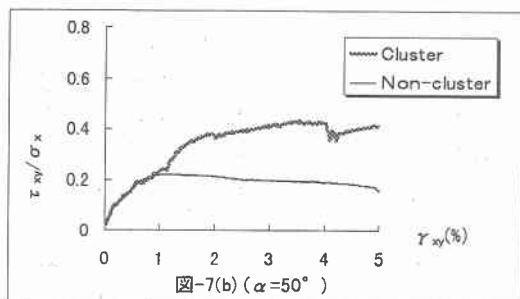
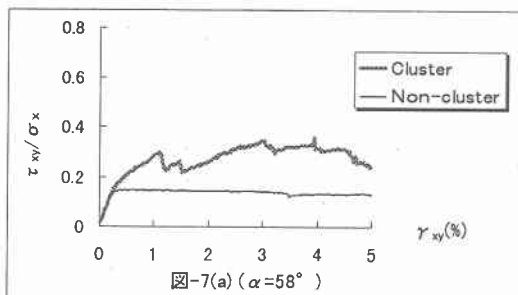


図-7 応力比 τ_{xy}/σ_x - せん断ひずみ γ_{xy} 関係

