

# 自然石の不規則形状をモデル化した粒状要素解析

前橋工科大学 学生員 ○後藤 伸旭  
前橋工科大学 正会員 土倉 泰

**1. はじめに**：1992年に北海道古平町豊浜トンネルで起きたように、岩盤崩落・落石事故など各地で起こっている。それにより、落石の危険性に関する調査が頻繁に行われ、種々の数値解析がなされている。個別要素法に代表される粒子法は粒子集合体の挙動を直接扱えるので、そのような解析に用いられることが多い。しかし、従来円要素が用いられることが多く、パラメータ設定法が不明確なため現実的な解析ができていないと考えられる。そこで、本文では、自然石の形状測定をもとにして、粒子法で不規則形状をモデル化する手法を提案する。そして、個別要素法で必須の粘性項と時間項を排除することによって見通しよいパラメータ設定を可能とした粒状要素法で、実際の自然石の積み重ねを想定した計算を行う。

**2. 粒状要素法**：粒状要素法は個別要素法と同様の粒子法であるが、剛性マトリックスに基づいて要素を動かす点が個別要素法とは異なる。準静的解析を行う場合には、粘性項と時間項を用いないで解析を進めることができる。以下に剛性評価の考え方をまとめる。1) 要素の接触力に関する弾性的な性質を、粒子間および粒子と境界の間の接触点において、法線方向および接触面内の仮想バネを設けることにより考慮することとし、要素自体は剛体であると仮定する。2) 要素同士や、要素と境界は互いに重なり合うことができ、かつそのときに、接触力が生じると仮定する。通常重なり量は要素の径に比べて十分小さく、要素の集合体の変形は主として要素の動きによって生じる。なお、接線方向の接触力には摩擦角で決まる限界値を設ける。3) 逐次解析の過程において生じる粒子の不釣り合い力とモーメントは、剛性マトリックスに基づく要素の移動、回転により解消される。剛性マトリックスは、各粒子とそれに隣接している粒子や境界との相対的關係に応じて時々刻々改訂される。

**3. モデルの作成方法**：自然石を  $1\text{ cm}^3$  の正六面体を密集させた形状に置き換えた上でモデル化する。モデル作成手順をまとめると以下の通りである。

図1の実線のように基準となるXZ断面をとる。この断面に垂直なXY断面の外周を下向きから0.5 cm、1.5 cm、2.5 cmと1 cmごとに順に計測する(図1の破線)。計測したXY断面に辺の長さ1 cmの正方形からなる格子状の枠をあてはめる(図2)。Zの値を変え、これを順に格子枠の位置を変えずに繰り返し、各断面を重ねて正六面体の集合体とする(図3)。別の石との接触を簡便に判定するため、半径0.5 cmの球の集合体を作成する。このとき、球は図2のように正六面体に内接するように配置する。

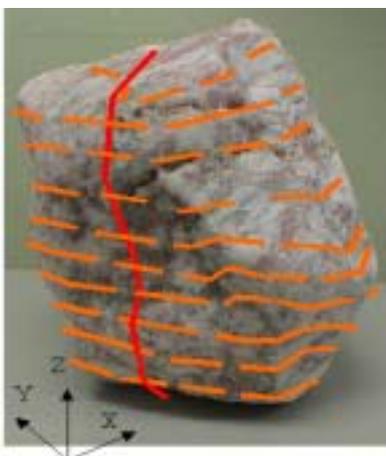


図1 自然石の形状測定

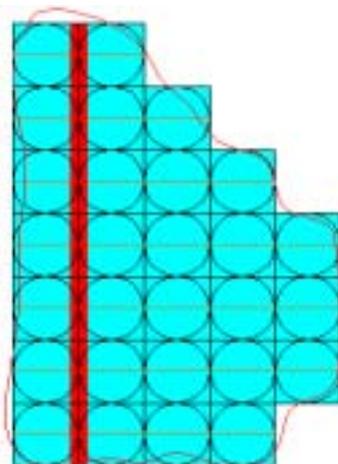


図2 XY断面のモデル化

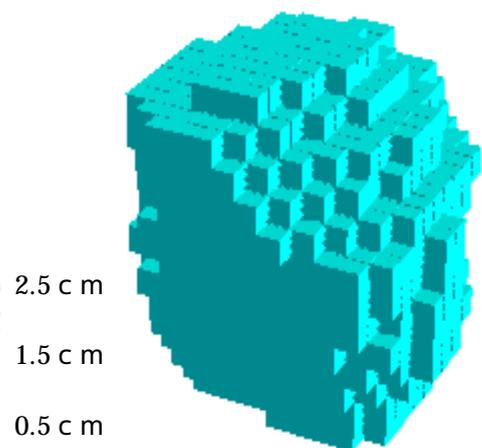


図3 形状の置き換え

キーワード 粒状要素法、不規則形状、自然石、3次元

連絡先 〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 461-3 TEL 027-265-0111

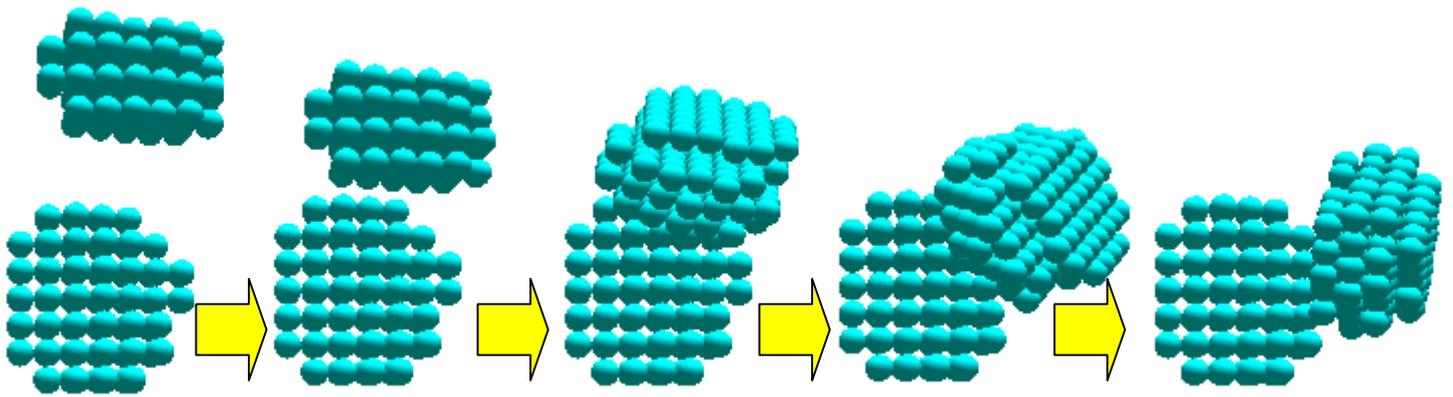


図4 正六面体に内接する球のみのモデル

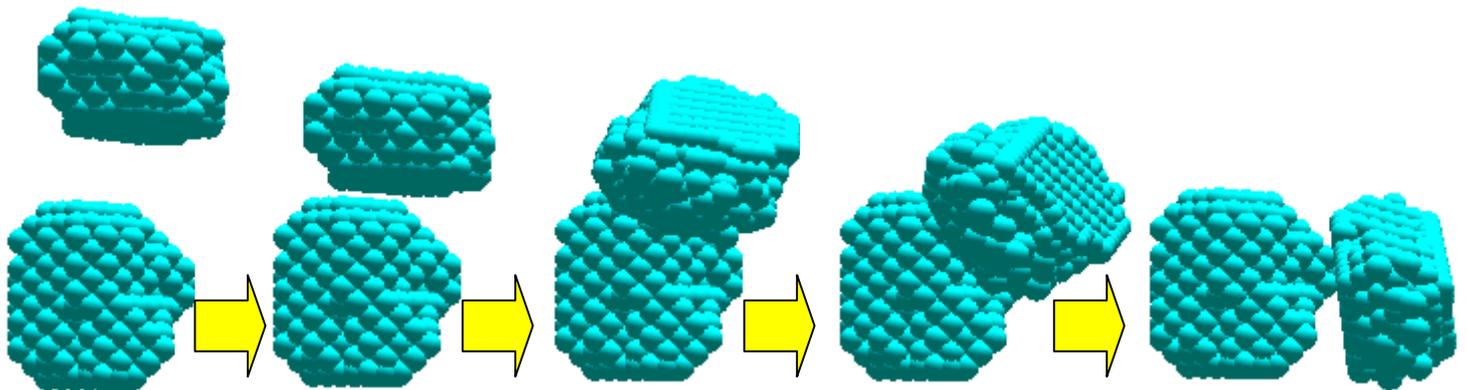


図7 隙間にも球を配置したモデル

**4.球の配置に関する検討：**粒状要素法を用いて、重力の作用している状態を想定し、床の上に置いた自然石の上から別の自然石を接触させる計算を行った。そしてモデルの判定における球の配置方法について検討した。パラメータは摩擦角  $20^\circ$ 、ヤング係数  $6 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比  $0.2$ 、力のつり合いの精度は  $0.001 \text{kgf}$ 、上の石の質量は  $0.54 \text{kg}$ 、下の石の質量は  $0.46 \text{kg}$  である。その計算結果をもとに図を作成した。図4のように要素表面の凹凸が大きいため、石と石のかみ合いが生じ、その結果、上から接触させた石が下の石とかみ合ったまま力のつり合いの精度が満たされた状態となった。これでは実際の自然石の積み重ねを再現できていないと考えられる。そこで、モデルでのかみ合わせを解消させるため、隣接する球が作る凹部や段差の隙間に新たな球を挿入する。図5のような隣接4要素の中心には凹部ができるので、その部分に図中でぬりつぶした新たな球を配置する。また図6のような隣接3要素では段差ができるので、その部分に図中でぬりつぶした新たな球を配置する。どちらも球は重なりを許すものとする。図7は新たな球を挿入して接触判定した計算結果で、2つの石の極端なかみ合いは解消されることが確認できた。

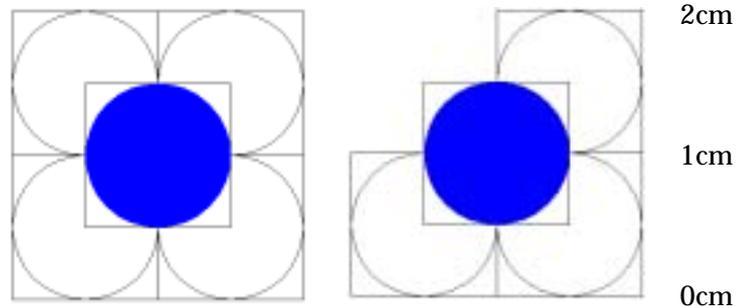


図5 凹部への球の挿入

図6 段差部への球の挿入

**5.おわりに：**自然石の形状測定結果に正六面体を密着させた形状をあてはめ、これをもとに球の集合体で不規則形状をモデル化する手法を提案した。本文では、重力作用のもとで2つの石を積み重ねる計算を行い、球を配置する場合には隙間ができないようにする必要があることがわかった。

参考文献

岸野祐次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析、土木学会論文集論文集、第406号、-11、pp.97-106、1989