

## 粒状要素法を用いた石積みのシミュレーション

前橋工科大学 学生会員 ○堀川 慶人

前橋工科大学 正 会 員 土倉 泰

1. はじめに 石積み構造物は石の積み方によって安定性が著しく変化することが知られている. このことを石積み構造中の接触点分布をもとに数値化してとらえることを最終目的として, 個別要素法的一种である粒状要素法<sup>1)</sup>で石積みをシミュレートすることとした. 従来, 自然石の不規則形状を多数の球を密着させてモデル化する手法が提案されているが<sup>2)</sup>, ここではモデル化を確実にするための手順をまとめるとともに, 研究の第一段階として実際の自然石の積み上げを再現した.

2. 粒状要素法 粒状要素法は個別要素法の一手法と考えることができる. しかし, 個別要素法は粒状集合体の動的挙動を扱うもので, 各要素の運動方程式をもとに解析を進めるものである. 一方, 粒状要素法は粒状集合体の準静的挙動を解析するためのシミュレーション手法であり, 各要素の位置データおよび要素間の構成則に基づいて剛性行列を構成して解析を進めるという点で個別要素法とは異なる. 石積みなどの場合, 各要素が接触することで要素間に不釣り合い力が生じる. この時の接触状況から剛性行列が算出され, それをもとに各要素は移動・回転を繰り返し, 力が釣り合う状態, つまり安定状態が求められる.

### 3. 自然石のモデル化

3.1 XY断面の形状測定 自然石のモデルは, 接触状況を容易に判定できることから, 球の集合体で表すものとする. 本研究では大きさが20cm程度の自然石を測定し, これをモデル化する. 球は半径0.5cmのものを使用する. まず, 図1のようにもとなる自然石に対しX,Y,Z座標をもうける. XY断面を下から0.5cm, 1.5cm, 2.5cm…のように1cmごとに形状測定をする. その形状に一边が1cmの立方体格子枠を当てはめ, それに内接する球を配置する(図2). 全ての断面を図1の実線のような基準に合わせて重ねることで立体的なモデルとなる. また, 接触状況を判定できれば良いので球はモデル表面にのみ配置する. そして, 噛み合わせを避けるために, 図2に示す通り段差にはそれを埋める球を入れるものとする.

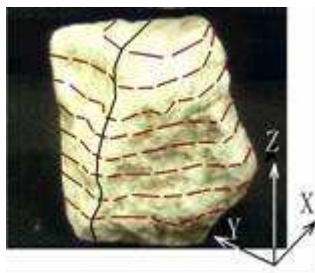


図1 自然石の形状測定

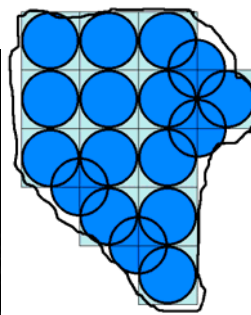


図2 球の配置

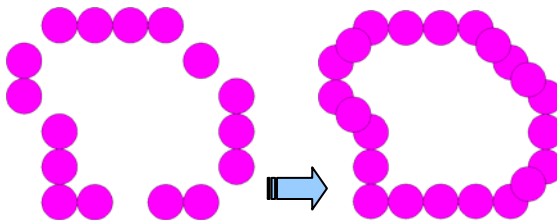


図3 段差や隙間のある断面の修正



図4 実際の自然石とモデルの比較

### 3.2 XZ, YZ断面によるモデル修正

3.1の作業ではXY断面には隙間の無いモデルができるが, 石の形状が著しく変化する所においてはXZ断面, YZ断面で見たとき図3のように球が配置されていない隙間ができる恐れがある. また, 段差も存在する. そこで, 3.1と同様にXZ断面, YZ断面についても1cmごとに形状を確認しながら, 図3のように段差や隙間があれば, その位置に新たな球のデータを付け加える作業を行った. これにより, どの断面で見ても隙間の無いモデルに仕上げた. 図4のモデルの場合は球の総数890個である.

キーワード 石積み, 粒状要素法, 3次元, 自然石

連絡先 〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1 前橋工科大学 Tel027-265-7305 E-mail:tsuchi@maebashi-it.ac.jp

#### 4. CAD ソフトを援用したモデルの位置決めと解析例

積み上げる自然石モデルの位置や向きの調整を3次元で連続的に確認しながら行うために、CAD ソフトを援用した。モデルに図5のように移動、回転という操作を繰り返し与えていく。なお、この時各モデルの重心の位置を座標上で正確にとらえるため、動かすときは移動量、回転量を記録しておく。また、回転するときは常に重心を通る直線を軸とする。以上のことを考慮した上で、図6のようにモデル同士が重なり合わないよう、さまざまな角度から石の位置を確認しつつ、下になるモデルの位置を決める。そして、上に重なるモデルを、石を積み上げるように移動する。図7はモデルの初期配置を表したものである。これに粒状要素法を適用する。解析の条件は、密度  $2700\text{kg/m}^3$ 、摩擦角  $20^\circ$ 、接触は Hertz 式にヤング係数  $60\text{GPa}$ 、ポアソン比  $0.2$  を適用して計算することとし、モデルは床( $Z=0$ )の上に置くものとする。重心の位置は別に求めておく。解析を行った結果が図8である。下にある二つの石の上に石が積み重なっている様子がわかる。これは、実際の自然石を積み重ねた写真1をよく再現している。このことから CAD ソフトでモデルを自由に移動・回転して粒状要素法を適用すると、石積みを再現するのに役立つことがわかった。そして、要素間に生じる接触を図9のように表した。石同士が接触している点と石が床に接している点ができる。上の石は下の石と4点で接している。この図では3点で接しているように見えるが、CAD ソフト上ではモデルを連続的に回転させることによって、4点で接していることを明確にとらえることができる。

#### 5. おわりに

多数の球を密着させることによって自然石の不規則な形状をモデル化し、このモデルに粒状要素解析を適用して、石積みをシミュレートする手法を提案した。本文では、積み上げる自然石モデルの位置や向きを3次元で連続して把握するために CAD ソフトを援用した。そして、モデル化に用いた実際の自然石の積み重ねを解析で再現できること、解析結果を用いれば個々の自然石の間に作用する接触状況を視覚的にも把握できることを確認した。

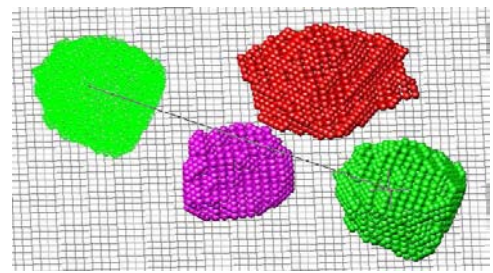


図5 モデルの移動

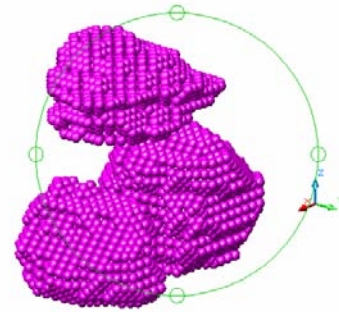


図6 3次元のあらゆる方向からの位置確認

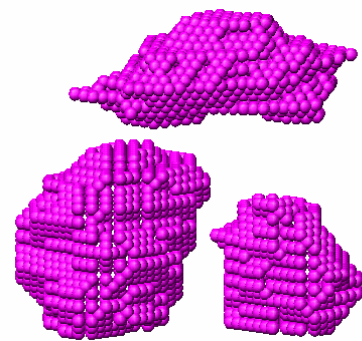


図7 モデルの初期配置

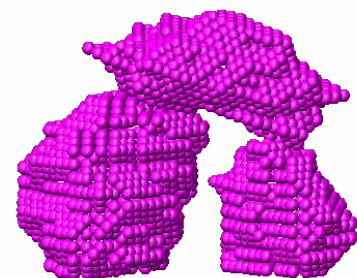


図8 石積み解析結果

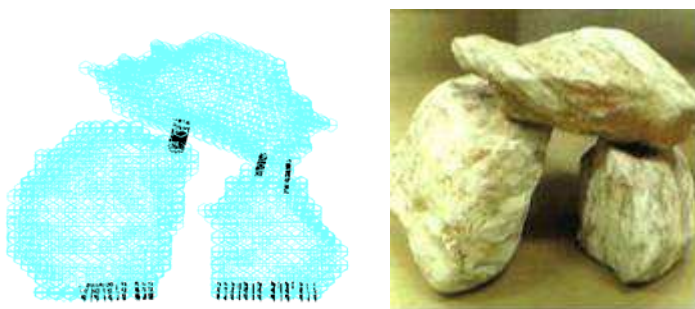


図9 接触力の表示



写真1 実際の自然石の積み重ね

#### 参考文献

- 1) 土倉泰: 全体剛性行列を用いた粒状要素解析, 応用力学論文集 Vol.8 pp.549 - 556, 2005.
- 2) 後藤伸旭, 土倉泰: 自然石の不規則形状をモデル化した粒状要素解析, 第31回 土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 第3部門-76, 2004.