

石の積み方に着目した石積み構造物の安定性評価のための数値計算

前橋工科大学 学生会員 ○千原 正嗣
前橋工科大学 正会員 土倉 泰

1. はじめに

石積みはあらゆる土木施設に古くから利用されてきている。石積み構造物の例として、防波堤、砂防堰堤などがあり、砂防堰堤は土砂災害の防止を目的として造られる（写真1）。石積み構造物は、職人の経験をもとに積み上げられたもので安定感はあるが、安定性を定量的に評価できていないという現状がある。そこで、実際の自然石をモデル化した数値計算を行って、簡単な石積みの安定性評価を試みることにした。ここでは、群馬県鬼石地域の石丸積み工法を想定した石積みの安定性を検討する。なお、安定性解析には粒状要素法を適用する。



写真1 石丸積による砂防堰堤

2. 粒状要素法

粒状要素法とは、各要素を移動・回転ができる剛体と仮定し、その剛体要素の集合体における準静的な挙動を解析する手法である。要素間には非常に小さな重なりを許し、そのとき、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い。接触力の算定には、接触部分に仮想バネを設けることにより、Hertz の理論を用いて、材料の弾性係数を反映させた計算が可能である。この粒状要素法を適用する際に、要素を球として扱うことで、接触状況を容易に判定できるため、自然石を球の集合体としてモデル化することができる¹⁾。

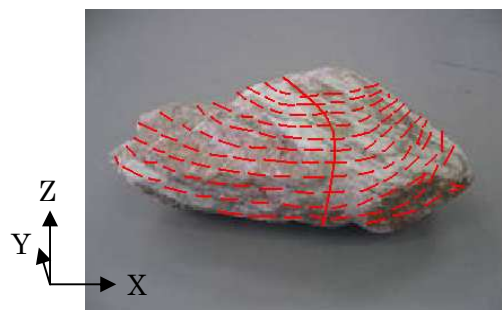


図1 自然石の形状計測

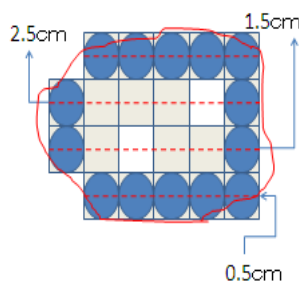


図2 YZ断面

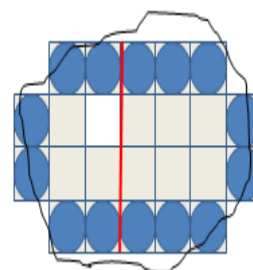


図3 XZ断面

3. 自然石のモデル化方法

実際の自然石をモデル化するにあたって、石の形状を測定する。ここでは、20cm程度の自然石を例に説明する。自然石モデルは直径1 cmの球の集合体とする。測定にあたり、図1のように自然石にX, Y, Z座標を与え、Z軸に平行なYZ断面を実線のように測定する（図2）。次に、図1の破線のように、Z軸に垂直なXY断面を下から0.5 cm、1.5 cm、2.5 cmのように、1 cmごとに計測する（図3）。こうして計測したXY断面に1 cm四方の格子枠を当てはめて、枠内に球を内接させる。これらの球を密着させることによって自然石モデルをつくる（図4）。

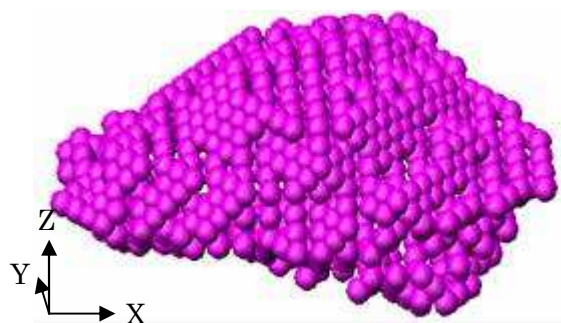


図4 自然石モデル

キーワード：石丸積、粒状要素法、自然石モデル、数値解析

連絡先：〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1 電話番号027-265-7305

4. 自然石モデルの配置と安定性の評価

自然石モデルを積み上げることにより石積みの安定性の評価を行う。図5は既往の研究結果²⁾で、台に載せた石積みを傾けて崩壊したときの台の傾斜角を示しており、実験と数値計算の結果は比較的よく一致している。横軸は台に傾斜を与えた方向である。あらかじめ石積みに座標系をあてはめ、台の表面に対応するXY面において、Y軸から反時計まわりに角度をとり、その角度に相当する軸を、正の向きに見て反時計まわりに回転するように台を傾斜させた。実験値は5回行った平均値である。数値計算値は全く同一の石積みモデルで得られたものである。

ところで、群馬県石積協同組合では「石丸積」と呼ぶ比較的容易に石積み構造物の安定性を確保できると考えられる石の積み方を考案している。この積み方においては、石はクサビを打ち込むように積み上げていく。

本研究では、「石丸積」を意識した石積みと、これを実験しない石積みとで安定性を比較したいと考えた。そこで、CADソフトを援用して自然石モデルの配置を決定する。CADソフト上では、石モデルの3次元的な移動・回転を視覚的に確認しながらその配置を決めることができるからである。配置する際には、図6に示すように、無造作に石を配置したモデルと、図7のような石丸積を再現するためクサビ状に石を配置したモデルを作成する。そこへ粒状要素法を適用し、重力作用下でつりあい状態を求め、これを繰り返して石積み構造を作成していく。この石積みを傾けたときに崩壊する角度を調べる。なお、数値解析におけるパラメータは、図5の計算で用いたときと同じパラメータとして、密度を 2.39 g/cm^3 、摩擦角を 34° とし、接触力の計算にはHertz式にヤング係数 60 GPa とポアソン比 0.2 を用いる。

5. おわりに

実際の自然石を計測して石をモデル化し、粒状要素法で石積みの安定性を解析する手順を説明した。石積みの際、石をクサビ状に積み上げれば安定性は高くなると考えられる。どの程度の安定性が得られるのかを定量的に示すために数値計算を役立たせたい。

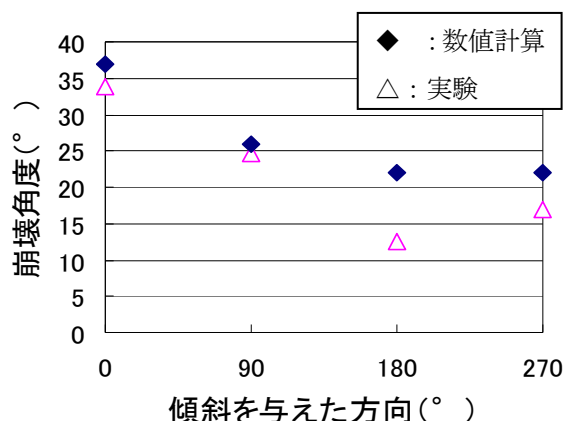


図5 実験と数値計算の結果の比較

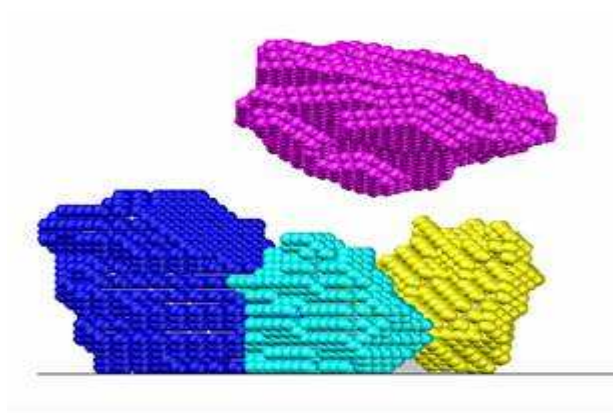


図6 自然石を無造作に配置する場合の例示

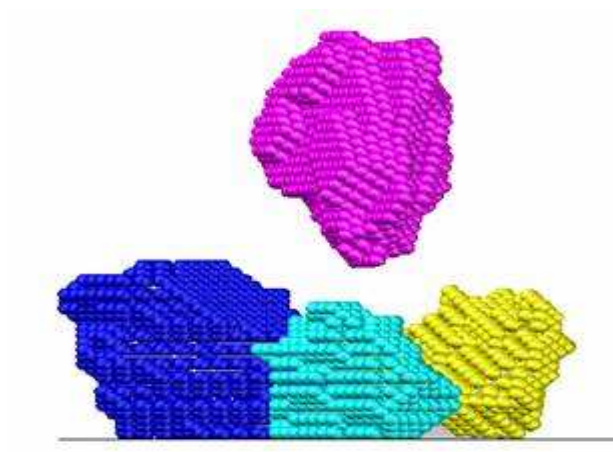


図7 石丸積のように配置する場合の例示

参考文献

- 1) 土倉泰: 自然石の形状をモデル化した粒状要素解析、応用力学論文集 Vol. 9, pp. 615-622, 2006.
- 2) 藤原由起、土倉泰: 自然石を積み上げた構造の崩壊に関する粒状要素法による再現、第33回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 第III部門-49, 2006.