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

前橋工科大学　学生会員　○藤原　由起
前橋工科大学　正 会 員　　土倉　　泰

１．はじめに

近年，砂防ダムや堤防の建設，護岸工事などに石積みを積極的に取り入れようとする動きがある．石積み構造物は，周辺の自然と調和のとれた景観をつくり出す．また，生態系を乱さない上，ろ過作用による水質浄化も見込めるなど環境にもやさしい．しかし，経験上安定した積み方がされているものの，力学的な安定性は示されていないという現状もある．そこで，自然石をモデル化し，それらを積み上げて簡単な石積みをつくり，崩壊させるというシミュレーションを行うことによって，石積みの安定性解析へとつなげることを考える．ここでは，自然石のモデル化の方法 [1]を見直すとともに，解析結果 [2]からモデル化の改良を検討する．なお，解析には粒状要素法を適用する．

２．自然石のモデル化

大きさ 20 ㎝程度の自然石に X,Y,Z 座標を与え(図 1)，Z 軸について下から 1 ㎝ごとに XY 断面の形状を測定する．各断面に 1 ㎝四方の格子枠を当てはめ，枠内に輪郭部が半分以上含まれるとき，半径 0.5 ㎝の球を当てはめる（図 2)．このとき球を用いるのは，粒状要素法が各要素の接触力から力のつり合いを求めるものであり，計算の過程で石と石の接触状況を判定する必要があるからである. 球であれば, 容易に判定ができる. 球を配置した XY 断面を全て重ね合わせることで球による自然石モデルができる．しかし，この球の配置だけでは形状が荒くなり，解析にも影響を及ぼすことが考えられるため, 輪郭部の隙間に球を配置する (図 2)．

一方，XY 断面における上記作業の完了後に，XZ, YZ 断面を見ると, Z 方向の形状急変部に球が抜けていて輪郭が形成されていなかったり，隙間ができている場合がある．そこで，それらの隙間にも球を配置する（図 3)．3 方向から球の配置状況を確認して，図 1 の自然石をモデル化すると，図 4 のように隙間の少ないモデルができる．

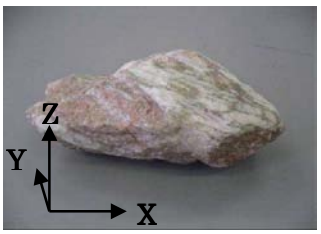


図 1　自然石

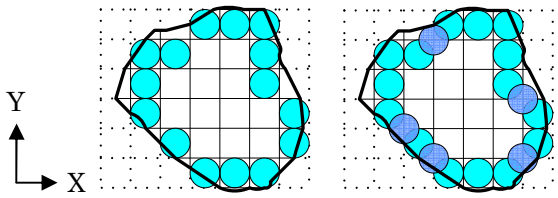


図 2　XY 断面における球の配置と輪郭部修正

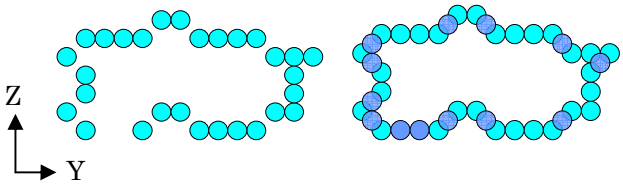


図 3　YZ（XZ）断面の輪郭部修正

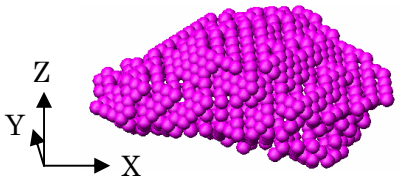


図 4　自然石モデル

３．傾斜実験のシミュレーション

3 つの自然石を積み上げた石積みについて実験と解析を行う．実験では台車に石板を載せ，その上に石積みをつくる．台車をジャッキアップすることによって傾斜を与えて石積みを崩壊させ，そのときの角度を角度測定器で測定する．

一方，解析では CAD ソフトを援用して，3 つの自然石モデルの配置を決定した．そこへ粒状要素法を適用し，重力作用下でのつり合い状態を求めることによっ

キーワード　石積み　粒状要素法　安定性解析
連絡先　〒371－0816　群馬県前橋市上佐鳥町 460－1　前橋工科大学　℡：027－265－7305

て石積みが崩壊する角度を調べる．なお，密度 2.39 g/cm³，摩擦角 24°とし，接触力の計算には Hertz 式にヤング係数 60GPa，ポアソン比 0.2 を用いる．

解析結果は比較的良好に石積みを再現していたが，実験結果を大きく上回った角度で崩壊した場合があった．その原因としては，球と球の間にできる隙間に，隣接する要素の表面の球がかみ合うことが考えられる．

４．モデル化の改良と解析結果

図 5 と図 6 は球のかみ合わせを考慮して，隙間を小さくするために考えたモデル化を示している．両図は隣り合う上下 2 つの断面を重ねたものである．両図の左図を見ると，上下 2 つの断面積が大きく異なるとき，大きい方の断面には格子枠の交わる部分に隙間ができることがわかる．そこで，右図のように新たな球を配置する方法（図 5）と，半径 0.25 ㎝の球を用いてモデル化を行う方法（図 6）を採用した．なお，図 6 では隙間に球を配置していないが，球の半径を 1/2 にすることにより自然石の細部までモデルとして表現でき，また 2 倍以上の球を必要とするからである（表 1）．

図 5 のようにモデル化した石積みを用いて解析を行うと，33°の傾斜で石積みが崩壊した．図 7 はその崩壊過程を表したものである．実験では 25°，3 の解析では 40°で崩壊している．実験結果とずれがあるものの，内部の隙間に球を配置したモデルを用いた方が実験結果に近づくことがわかる．

５．おわりに

自然石を球によってモデル化する手法を確認し，隙間のないモデルを作成することができた．また，石積みの傾斜実験の結果から，球のかみ合わせによる影響を考え，球の配置や半径を変えてモデル化することを提案した．そして，モデル内の隙間を埋めたものは，球のかみ合いを減らすのに有効であることがわかった．今後，半径 0.25 ㎝の球でモデル化したものについて解析を行い，これまでの解析結果と比較していきたい．

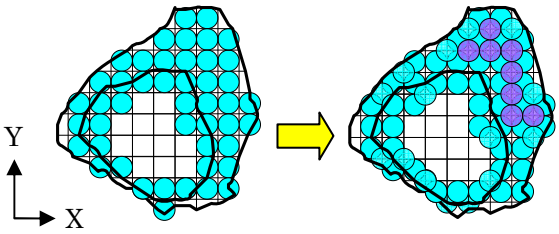


図 5　内部の隙間への球の配置

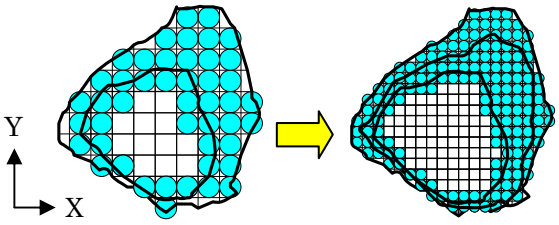
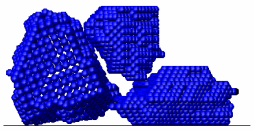


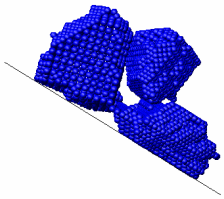
図 6　半径 0.25 ㎝の球によるモデル化

表 1　使用した球の数の比較

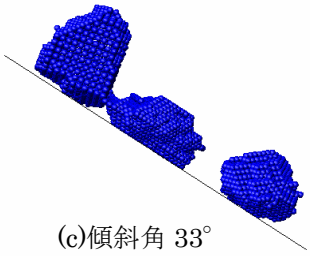
球の半径(㎝)	0.5	0.5	0.25
隙間への球の配置	輪郭部	輪郭部と内部	なし
球の数	890	1101	2190
図	図 2	図 5	図 6



(a)傾斜角 0°



(b)傾斜角 32°



(c)傾斜角 33°

図 7　石積みの崩壊

参考文献
1) 堀川慶人，土倉泰：粒状要素法を用いた石積みのシミュレーション，第 33 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－49，2006.
2) 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.
3) 群馬・石積協同組合ホームページ：http://www.isizumi.jp/