

粒状要素法のパラメータに関する検討と岩盤斜面の安定解析

前橋工科大学 学生会員 ○杉本耕太郎
前橋工科大学 正 会 員 土 倉 泰

1.はじめに：巨大岩塊とみなすことのできる図 - 1 のような岩盤斜面を対象として、地震等を想定した外力に対する安定性を粒状要素解析で検討するために、岩塊の不規則形状を、球を密着させた要素で表現する手法が用いられる。本研究では、球を密着させた要素を用いる場合のパラメータ設定に関して検討するとともに、解析手法を、岩盤斜面の安定性の評価に適用した結果を示す。

2.粒状要素法とバネ定数：粒状要素法とは、剛体モデルを要素として、要素間の接触状況をもとに各要素を力のつり合いが満たされるように移動・回転させる計算法である。扱う剛体要素には、図 - 2 のように球を密着させて不規則形状を表現したものを用いることもできる。この解析では、接触力や接触剛性を算定するため、要素間にバネを仮定する必要がある。球や円柱のような単純な形状の要素であれば、ヘルツの理論を適用し、バネ定数を材料定数と関連させて設定することができるが、不規則形状要素の接触問題にヘルツ理論を適用することはできない。それは、ヘルツ理論が図 - 3 のように接触する 2 球の接触長と接触力の関係を表すものであって、これをそのまま不規則形状要素表面の球の接触問題にあてはめることはできないからである。しかしながら、要素表面に配置された球に対して、形式的にヘルツ理論を適用すれば、材料定数の入力によってバネ定数が決まることになる。計算に用いるバネ定数を、材料定数の入力で決定できるとすれば、合理的と考えられる。そこで不規則形状要素を大きな 1 つの球と見なした場合にヘルツの理論から得られるバネ定数が、不規則形状要素のバネ定数として妥当な値であると仮定し、ヘルツ理論において、球の径や材料定数（ヤング率）を変えたときに、バネ定数が妥当な値からどの程度ずれるかを調べ、バネ定数の決定法を検討した。



図 - 1 施工後の岩盤斜面

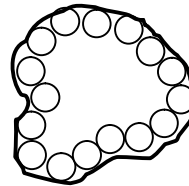


図 - 2 球を密着させたモデル

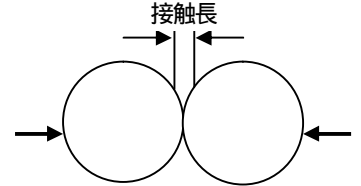


図 - 3 ヘルツの理論

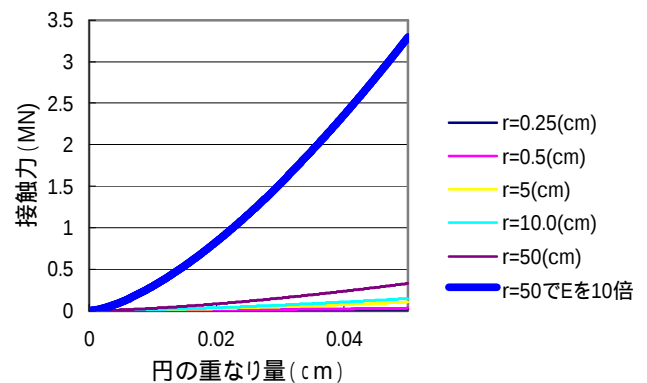


図 - 4 半径の違いによる円の重なり量と接触力の関係

3.ヘルツの理論の検討：ヘルツの理論に、一般的な石の値であるヤング率 60 GPa、ポアソン比 0.2 という値を用いて、50.0 cm の球状の石を仮定したものと、半径が 0.25、0.5、5.0、10.0 cm という球を 50 cm の石の表面に配置することを考えた値を設定し、それぞれ接触力を算定する。球の重なり量については、0.25 cm の球が重なりきらない範囲で適当な値を用いた。そこに球の半径 50.0 cm、ヤング率を 10 倍にしたものも計算する。ヘルツの接触力算定式は下式の Pn に示す。剛性については Pn を微分した kn である。

$$Pn = \frac{1}{\sqrt{\frac{9}{16r} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad kn = \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{\frac{9}{16r} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}} \delta^{\frac{1}{2}}$$

Pn: 接触力 (N) E: 弾性係数 (Pa)
r: 円の半径 (cm) δ: 円の重なり量 (cm)
ν: ポアソン比

計算結果は図 - 4 となり、このように球の半径を変えたとしてもヤング率を 10 倍したものに比べれば、その差はごく小さく、その剛性の差についても同じことが言える。この結果より、不規則な形状をもつ巨大岩塊をモデル化する際、小さい球の集合体と考えても、ヘルツ理論が適用できると考えた。

キーワード：粒状要素法、ヘルツ理論、安定解析

5. モデルの作成：実際の工事のなされた岩塊の測量データをもとに、水平断面の小さいところで岩塊が壊れることを想定し、クラック位置と水平断面の小さいところで岩塊を切りとって浮石とみなしたモデル化を行った。モデルは高さ方向に1 mおきに測量されたデータを、断面ごとに1 m²の正方形格子に区分し、岩塊の輪郭部に50%以上はいるものを採用して球を配置して作成する。斜面のモデルにおいても測量データをもとに浮石に接するように作成を行う。既存の研究¹⁾では極端に単純化されたモデルを用いていたので、ここではより現実に近いような形状でモデル化した。

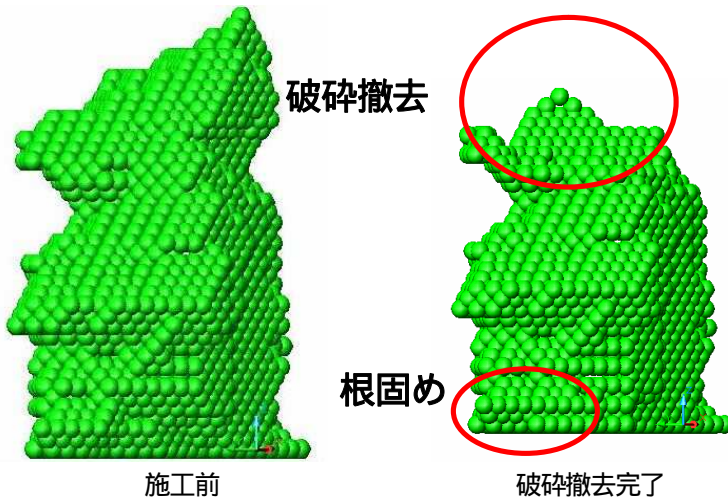


図 - 5 施工前と破碎撤去後のモデル形状の変化

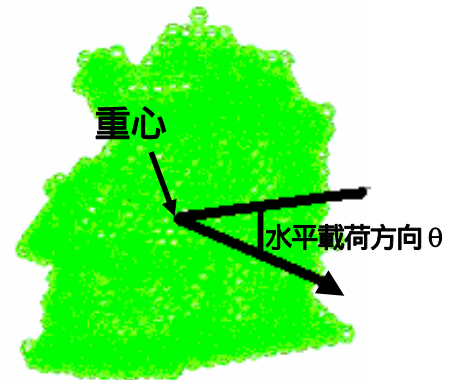


図 - 6 図心と水平载荷方向のとり方

6. 安定性の評価：構造物の設計に用いる震度法を用い、モデル化した浮石に地震荷重などを想定した静的水平力 H を与え、安定が保てるかどうかを粒状要素法で解析する。 H の値を大きくすると、浮石が不安定になり、底部の接触面積が少なくなる。接触面積が少なくなると接触点に力が集中し、岩の強度 (2 MPa を想定^{2) 3)}) を超過すると岩塊が破壊して、浮石が不安定になったと評価する。安定を維持できる最大水平力を H_{max} とし、式 (1) の係数 α を、安定性を評価する指標に用いる。

$$H_{max} = \alpha \times W \quad (1)$$

α は浮石が耐えうる最大水平力 H を浮石の重量 W で割った値で、大きいほど浮石は安定と評価できる。図 - 7 は岩盤

斜面の施工前と施工後について、水平力に図 - 6 の θ (斜面に平行する方向から谷側にとった角度) をかけて安定解析を行ったものであるが、どちらの結果も 110 度前後で係数 α が低くなっており危険である。しかし、その係数については、0.15 から 0.38 と安定性が高まったことが分かる。施工段階についても解析を行い、施工を安全に行うことが可能であるか、施工によりどの程度安定性の向上をみられるか、といったことを調べることも可能である。

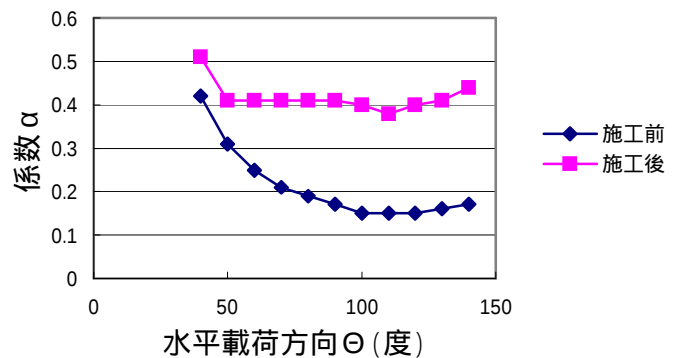


図 - 7 水平载荷方向による係数 α の変化

7. おわりに：球の接触に関するヘルツ理論から算出されるバネ定数は、ヤング率に応じて大きく変化するが、球の半径を変えてもそれほど変化しないことから、粒状要素解析において不規則形状表面に配置した小さな球にヘルツ理論を適用してバネ定数を設定した場合、材料定数を反映させた接触計算ができると判断した。次に、実際に岩盤斜面を安定解析ができることを確認した。本工事では安定性の向上を目的として破碎撤去作業が行われた。このような工事では破碎途中で岩のバランスが不安定になることも考えられる。粒状要素法による球のモデルは、要素の追加・削除が容易にできるので、施工計画の各段階における安定解析にも適用できる。

参考文献：1) 元沢智聡，土倉泰：巨大岩塊の部分除去工事における安定・施工管理と成果評価のための安定計算，第31回土木学会関東支部研究発表会講演概要集，第3部門—77，2004

2) 社団法人日本材料学会：ロックメカニクス，pp. 73 - 101，2002

3) J.A.Hudson：図で学ぶ岩盤工学の基礎，pp. 13 - 73，1991