

第Ⅲ部門

個別要素法による岩盤斜面の崩壊シミュレーション

関西大学大学院
 関西大学大学院
 関西大学工学部

学生員 ○大野 善考
 学生員 大槻 敏
 フェロー 楠見 晴重

1. はじめに

岩盤斜面の崩壊は、1995年に発生した豊浜トンネル坑口での岩盤崩壊以後、社会的にも大きく注目されている。その後も多くの研究がなされているが、崩壊メカニズムに関しては、未解明な部分が残されている。本研究は、岩盤崩壊のメカニズムを解明するために、ボンディング理論を導入した個別要素法による、シミュレーション解析を行った。解析対象は1997年に発生した第2白糸トンネル岩盤斜面崩壊とした。とくに、崩壊時における不連続面の亀裂進展を可視化することを試みた。

2. 斜面の概要

本研究では、北海道南西部に位置する国道229号第2白糸トンネル岩盤斜面崩壊を取り上げた。図1は崩壊後の斜面の写真である。この斜面は1997年8月25日午後2時28分頃、山側の岩盤が高さ約70m、幅約40m、厚さ約10mの規模で崩壊し、トンネルのコンクリート巻き出し部、約110mが埋まった。

3. 個別要素法 (Distinct Element Method:DEM)

個別要素法とは、P.A.Cundallによって考案された解析手法であり、数値シミュレーション対象の構造体を粒子形状の要素からなる集合体でモデル化し、粒子毎に運動方程式をたてる。また粒子間作用力は、フックの法則を適用して、作用反作用の法則から求めている。そして粒子毎の運動方程式を差分近似し、時間領域で前進的に解くことにより粒子の力学的挙動の追跡を可能としている。さらに、これらの粒子を巨視的に観察することにより、集合体としての動的挙動を把握することが可能になる。図2は重なり合った粒子を示したもので、運動方程式は式(1)により求まる(Cは減衰係数)。

$$m \cdot \ddot{u} + C \dot{u} + F = 0 \quad (1)$$

また、粒子間の作用力は式(2)から求める(kはばね定数、 $\angle n$ はオーバーラップ)。

$$F_{ij} = -F_{ji} = k \cdot \angle n \quad (2)$$

4. ボンディング理論

岩盤のような固体に対して粒状体のモデルを適用する場合、粒子間に作用する力は反発力だけではない。岩盤やコンクリートなどを考えたとき、隣接する粒子にはなんらかの要因で接着されており、粒子間には引張力が作用すると考えられる。そこで、本研究ではボンディング理論を導入することにより、引張力を表現した。図3に示すように、 r_{b1} と r_{b2} の2種類のボンディング半径を定義する。 r_{b1} は引張力が降伏に至る距離、 r_{b2} はボンディングが破断する距離を示している。つま

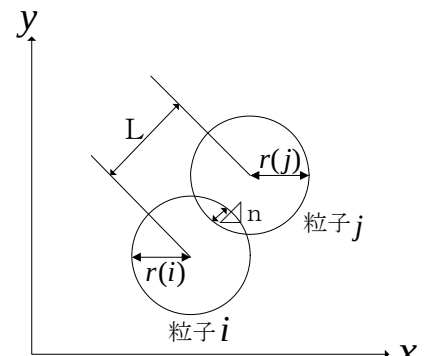
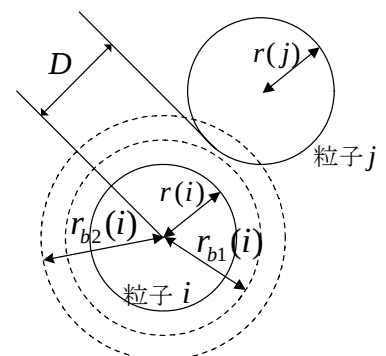
図1 斜面の写真(崩壊後)¹⁾図2 重なり合った粒子の関係^X

図3 ボンディング半径の定義

り、接触点である r から r_{b1} まで引張力は一次的に増加し、 r_{b1} を境に r_{b2} まで一次的に減少する。さらに、 r_{b2} に至るとボンディングは破断し、引張力は 0 となる。図 4 は、粒子間に作用する力の大きさと粒子間の距離の関係を表わしたものである。以上のように定義されたボンディング力 F_{ij} は、式 (3) のように定式化できる。

$$F_{ij} = \begin{cases} K_{b1} \cdot (D - r_{b1}) & (r(i) < D < r_{b1}(i)) \\ K_{b2} \cdot (D - r_{b2}) & (r_{b1}(i) \leq D < r_{b2}(i)) \\ 0 & (r_{b2}(i) \leq D) \end{cases} \quad (3)$$

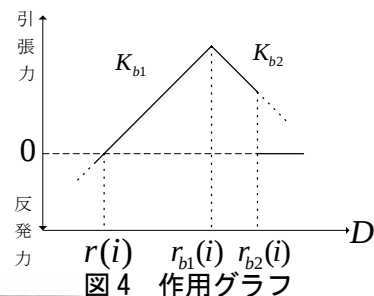


図4 作用グラフ

5. 解析モデルの作成

図 5 は崩壊現場の代表的な断面図を示している。代表断面図をもとに座標を割り出し、粒子群から斜面の形を切り取ることによって作成した。崩壊岩体の挙動を再現するため、崩壊岩体のみ粒子で表現した。図 6 に作成した解析モデルを示す。

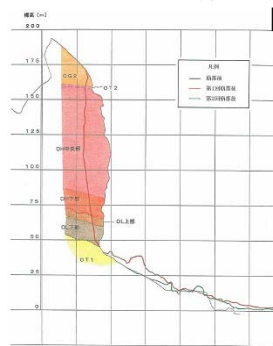
図5 代表断面図¹⁾

図6 解析モデル

6. 既存の不連続面の作成

本研究における不連続面とは、割り出した座標上の粒子のボンディングを強制的に解除することで、粒子間の引張力を無効化し、これを擬似的に不連続面と見なしている。

7. 亀裂進展の可視化及び崩壊挙動の再現

斜面の崩壊過程において、粒子間に作用するボンディング力の破断が増加していくことを利用し、これを視覚的に表現することによって、崩壊中の亀裂の進展の可視化を試みた。つまり、タイムステップ毎にボンディング力が破断した粒子の色を変化させ、これを巨視的に捉えることにより、その粒子の位置を亀裂の発生ポイントと見なしている。

図 7 に解析で得られた崩壊挙動を示す。初期状態における赤色の粒子はボンディングを強制的に解除し、既存の不連続面と見なしている。崩壊面の上部から亀裂が開き、既存の不連続面から下方へ破壊面に沿って徐々にボンディングが破断していき、崩壊が進行していく様子が見て取れる。崩壊を完全に再現するには至らなかったが、ボンディングが破断した粒子の色を変化させることにより、亀裂の進展を可視化することが可能となった。

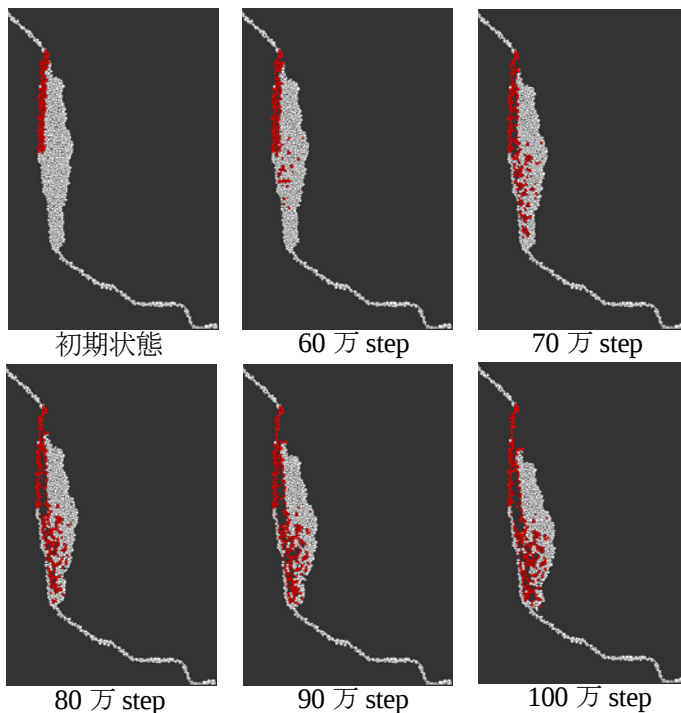


図7 解析結果

8. まとめ

ボンディング理論を導入した個別要素法を用い、崩壊シミュレーション及び、亀裂進展の可視化を試みた。任意の斜面形状あるいは、任意の不連続面の位置を解析モデルに反映することには可能となった。ボンディングが破断した粒子の色を変化させることにより崩壊中の斜面内部の亀裂が進展し崩壊が進行していく様子を視覚的に捉えることには、一定の成果があったと考える。

【参考文献】

- 1) 岩盤斜面の考え方 - 現状と将来展望 - [実務者の手引き], 土木学会, 2004.