

3次元個別要素法による岩盤斜面の 滑り崩壊シミュレーション解析

大槻 敏^{1*}・楠見 晴重²・松岡 俊文³

¹関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

²関西大学 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

³京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂C-1-109)

*E-mail: gj5m520@edu.kansai-u.ac.jp

岩盤斜面内部には多くの亀裂が存在しており、それらの亀裂はしばしば崩壊の原因となる。特に、岩盤斜面の滑り崩壊のメカニズムは亀裂に依存すると考えられる。本論文は、個別要素法によって滑り崩壊の3次元シミュレーション解析および視覚化を行なったものである。このシミュレーション解析の中では、岩盤内の引張力は、ボンディング理論によって表現している。本解析における斜面モデルは、斜面形状および亀裂の位置を任意に設定することが可能である。モデルにおける亀裂の位置は、現場調査の結果に基づいている。また、亀裂はボンディング力を取り除くことで表現した。解析の結果、このシミュレーションは、滑り崩壊現象を再現しうることが確認された。さらに、崩壊過程を視覚化することが可能となった。

Key Words : rock slope, distinct element method, simulation analysis, bonding force

1. はじめに

連続体を仮定した数値解析には有限要素法や境界要素法などがあり岩盤や地盤に対しても広く利用されている。しかし、有限要素法や境界要素法による解析では、大規模な変形や破壊を扱う際に困難が生じる。これに対し個別要素法は、Cundall¹⁾によって考案された解析手法であり不連続体解析に対して有用性が高いとされ、特に破壊を伴う大変形問題に対しての解決策として注目を浴びている。この個別要素法に関する研究は、Cundall, 伯野²⁾, 久武³⁾など多くの研究者によって行われている。Cundall は 1971 年にブロック挙動を追跡する数値解析⁴⁾により個別要素法の端を発した。しかし、この手法では要素間の力の伝達は反発力のみであり、コンクリートや岩盤などの連続体解析への適用は困難であった。伯野は要素の間隙物質を考慮できるように、従来のばねとは別に独立した間隙ばねを設定した拡張個別要素法を提案している。地盤やコンクリートなどの粒状物質の集合体において見られるダイランシー効果や、応力やひずみの局所化の効果を自然に取り込むことができるなどの点に優れている。久武らは個別要素法の考え方を発展させ、CEM (Contact Element Method) を開発した。これは、粘性地盤への適用を想定したものである。このように、個別要素法はより洗練されたものとなり、近年のコンピュ

ータ技術の発達により膨大な要素数の解析も可能となった。

一方、岩盤斜面内部には多くの不連続面が存在しており、それらの不連続面はしばしば崩壊の原因となる。特に、滑り崩壊は流れ盤方向の不連続面に支配されているが、その複雑な崩壊メカニズムが完全に解明されているとは言えない。また、既往の研究では、基礎的実験や単純形状のモデルによる解析が行なわれていることが多い。

以上のような背景から、複雑な岩盤斜面の挙動をシミュレートできる解析技術の開発が望まれている。そこで本研究では、滑り崩壊の3次元シミュレーション解析および視覚化を可能とする個別要素法プログラムの開発を行なった。このシミュレーション解析の中では、岩盤内の引張力は、ボンディング力⁵⁾によって表現している。本解析における斜面モデルは、斜面形状および亀裂の位置を任意に設定することが可能である。モデルにおける亀裂の位置は、現場調査の結果に基づいている。また、既存の亀裂はボンディング力を取り除くことで表現した。この解析モデルを用いて、実現象をシミュレートすることを試みた。解析の結果、このシミュレーションは、滑り崩壊現象を再現しうることが確認された。さらに、崩壊過程を視覚化することが可能となった。

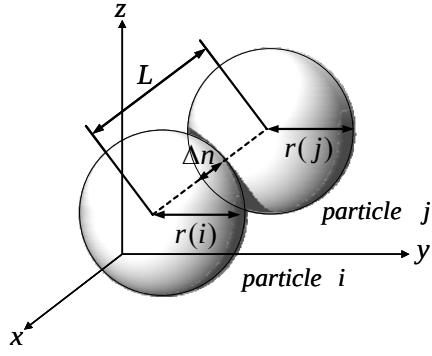


図-1 微視的な粒子の関係

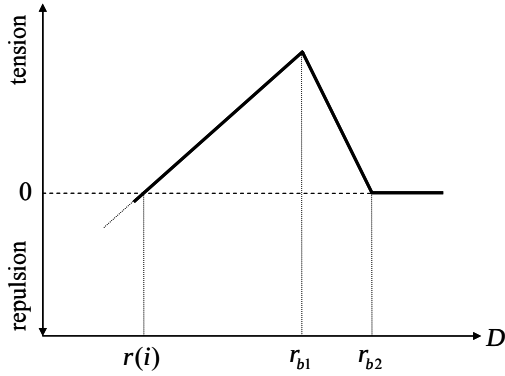


図-3 粒子間作用力

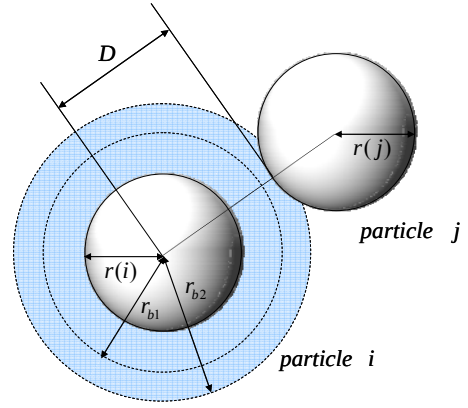


図-2 ボンディング力の作用領域



(a) えりも側

(b) 正面

図-4 崩壊状況（平成 16 年 1 月 15 日撮影）

2. 解析手法

(1) 個別要素法

個別要素法とは、岩盤や地盤といった不連続体を微小な粒子の集合体として、その動力学的挙動を捉えることが可能な解析手法である。つまり、個々の粒子間には仮想のばねが配置され、その作用力から加速度、速度、変位を算出し粒子の挙動を追跡する解析手法である。図-1 に、粒子モデルの微視的な関係を示す。本解析手法では、ばね定数を接触距離（ Δn ）に乘ずることによって、粒子間の反発力を算出している。

(2) ボンディング力

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のみではない。そこで、本研究ではボンディング力を導入することにより、引張力を表現した。

図-2 に示すように、ボンディング半径 1（ r_{b1} ）とボンディング半径 2（ 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（図-3）。以上のように定義された反発力およびボンディング力は、次のように定式化できる。

$$F_{ij} = \begin{cases} K \cdot \Delta n & (D < r(i)) \\ K \cdot (D - r(i)) & (r(i) < D \leq r_{b1}) \\ K \cdot (r_{b2} - D) & (r_{b1} < D \leq r_{b2}) \\ 0 & (D > r_{b2}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 F_{ij} ：粒子 i と粒子 j に作用する接触力、 K ：ばね定数、 Δn ：接触距離、 r_{b1} ：ボンディング半径 1、 r_{b2} ：ボンディング半径 2 である。

3. 解析対象とした斜面崩壊

本研究では、平成 16 年 1 月 13 日午後 10 時 25 分頃に北海道幌泉郡えりも町庶野で発生した大規模な岩盤斜面崩壊を取り上げた。崩壊規模は、斜面高さ約 100m、斜面長約 120m、最大幅約 90m、最大崩壊厚さ約 17m、崩壊土量は約 42,000m³である（図-4）。崩壊面の傾斜は、上部～中央部で約 45°、中央部～下部で約 50～60°であった。

また、その直前には 2 回の小崩壊が確認されており、図中の○印は小崩壊箇所を示している。この崩壊の規模は、それぞれ崩壊土量 200～400m³（右）、100m³程度（左）であった。

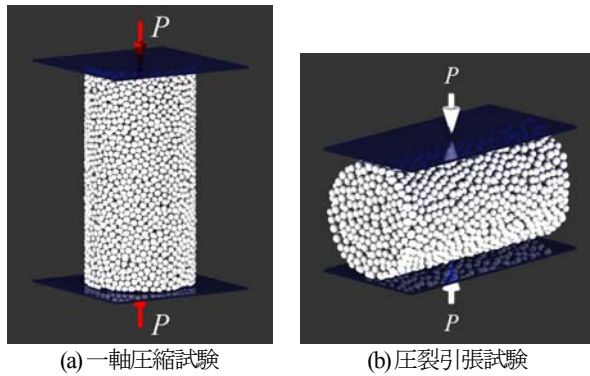


図-5 室内試験シミュレーションモデル

4. 岩盤材料の力学定数の決定手法

個別要素法では、シミュレーション対象の物性値（マクロパラメータ）は粒子間のパラメータ（マイクロパラメータ）に支配される。しかし、本解析手法におけるマイクロパラメータ決定手法は未だ確立されていないのが現状である。そこで、崩壊シミュレーションに先立って個別要素法で一軸圧縮試験および圧裂引張試験（Brazilian test）のシミュレーションを行ない（図-5）、解析対象とした岩盤斜面の物性値を表現できるマイクロパラメータを検討した。

(1) 調査・試験結果

崩壊箇所の地質は、受け盤および流れ盤系の亀裂および脈の多い泥質ホルンフェルスである。この泥質ホルンフェルスの物性値を求めるために、崩積土岩塊と崩壊面深部の岩石について室内岩石試験が実施された⁶⁾。崩積土岩塊の一軸圧縮強度と圧裂引張強度の頻度分布を整理した結果を図-6、図-7に示す。試験の結果より、一軸圧縮強度は、約30MPa（インタクトロック以外；弱部）および約100MPa（インタクトロック）をピークとするグループに分類できる。また、圧裂引張強度は、約4MPa（インタクトロック以外；弱部）および約14MPa（インタクトロック）をピークとするグループに分類できる。さらに崩壊面深部におけるボーリングコアの一軸圧縮強度と圧裂引張強度も、崩積土岩塊と同様、一軸圧縮強度は、約20～40MPaおよび約100MPaを、圧裂引張強度は、約4MPaおよび約14MPaをピークとするグループに分類できる。

(2) パラメータの決定

前述のように解析対象とした岩盤斜面の圧縮強度および引張強度は、インタクトロックを主体とする強度の大きなグループとインタクトロック以外の強度の小さなグループに大別できる。そこで、マイクロパラメータ、特にばね定数とボンディング半径を変化させてマクロパラメータを求める予備解析を行ない、それぞれの強度を発現

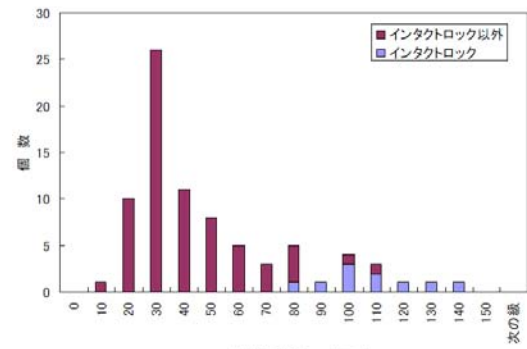


図-6 一軸圧縮強度のヒストグラム σ_c (MPa) ⁶⁾

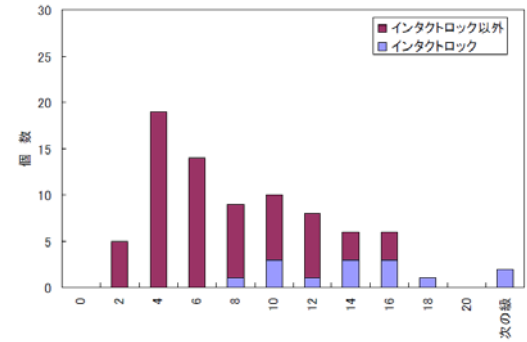


図-7 圧裂引張強度のヒストグラム σ_t (MPa) ⁶⁾

しうる2種類のマイクロパラメータを決定した。

5. 解析結果

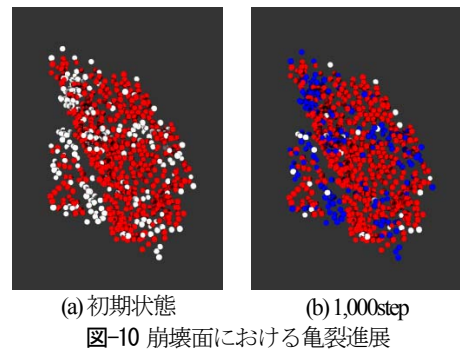
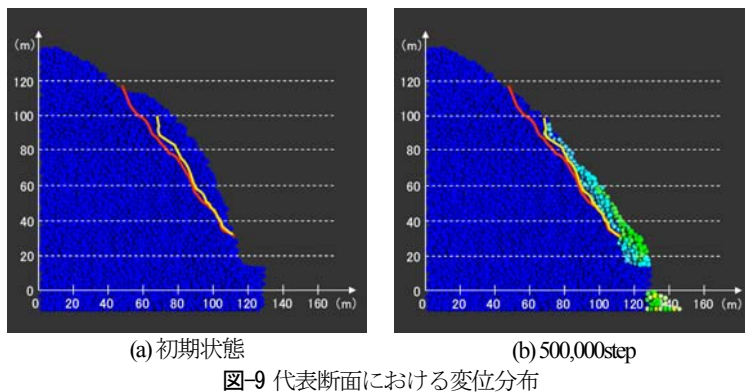
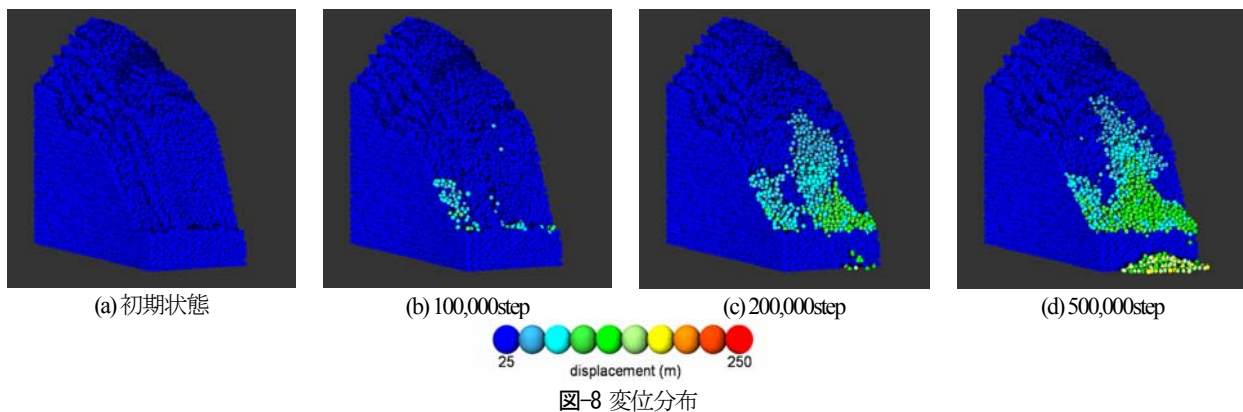
(1) 変位分布

図-8に解析モデル全体の変位分布を示す。初期段階で実現象と同じく、小規模な崩壊岩体の変位を確認することができる（えりも側）。その後、斜面中央部において崩壊岩体の大規模な変位がみられた。

さらに図-9に代表断面における変位分布を示す。ここでの代表断面とは、崩壊岩体の重心を含む断面を意味する。また図中の赤色・黄色の線は実現象および解析から得られた崩壊面を示している。実現象と解析で得られた崩壊面を比較すると、標高70m以下では非常に一致している。しかし標高が高くなるにつれて、解析における崩壊は浅い箇所で行進する結果となった。

(2) 亀裂進展

図-10に崩壊面における亀裂の進展状況を示す。これは崩壊面付近に位置する粒子のみを抽出したものであり、初期状態における赤色粒子は地質調査から明らかになった連続性の良い亀裂の位置に該当するものである。この赤色粒子のボンディング力は、解析開始時に取り外し、これを亀裂とみなすことにした。また、青色粒子は解析時にボンディング力が破断した粒子であり、1,000stepに達した時点で、崩壊面全体に亀裂進展が拡大したことを確認できる。この崩壊面における亀裂進展によって、滑



り崩壊が発生したものと推測される。

6. まとめ

本研究は、ボンディング力を導入した個別要素法を用いて岩盤斜面の崩壊シミュレーション解析を行ない、本解析手法の斜面崩壊への有用性を検討したものである。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) 個別要素法はマイクロパラメータの決定手法が未確立であるため、一軸圧縮試験と圧裂引張試験のシミュレーションによって、解析対象とした岩盤を表現できるパラメータを設定することができた。
- 2) ボンディング力を強制的に破断させることにより、既存の不連続面のモデル化が可能となった。
- 3) ミクロパラメータの組み合わせを複数設定すること

によって、インタクト部と弱部をモデルに反映させることができた。

- 4) 崩壊中にボンディングが破断した粒子を着色することで、亀裂の進展の可視化を可能とした。

参考文献

- 1) Candall, P.A. and Strack, O.D.L. : A Discrete numerical model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, 29(1), pp.47-65, 1979.
- 2) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション-拡張個別要素法で破壊を追う-, 森北出版, pp.14-15, 1997.
- 3) 久武勝保, 村上敏夫: 地盤の連続体・不連続体の一解析手法, 土木学会論文集, No.523, III-32, pp.175-180, 1995.
- 4) Candall, P.A. : A Computer model for simulation progressive, Large scale movement in blocky rocksystem, Symp. ISRM Nancy France Proc., Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 5) F.Donze, P.Mora and S.Magnier : Numerical simulation of faults and shear zones, *Geophys.J.Int.* Vol.116, pp.46-52, 1979.
- 6) 一般国道 336 号えりも町斜面崩壊調査委員会報告書: 一般国道 336 号えりも町斜面崩壊調査委員会, 2004.

3D SIMULATION ANALYSIS OF SLIDING FAILURE OF ROCK SLOPE BY DEM

Satoshi OHTSUKI, Harushige KUSUMI and Toshifumi MATSUOKA

As is known, there are many fractures in rock slope, and these fractures are often the cause of failure. Especially, the mechanism of sliding failure depends on fractures in rock slope. In this paper, Three-dimensional simulation analysis and visualization for sliding failure by distinct element method are carried out. In relation to this simulation analysis, the tensile force of rock mass can be tried to be expressed by bonding theory. It is tried to be simulated an actual sliding failure of rock slope. As the results of this analysis, it is recognized that this simulation can be expressed on this sliding failure phenomena. Moreover, the process of sliding failure can be visualized.