

個別要素法による岩盤斜面の 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学生会員 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)

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

²フェロー 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正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

岩盤中には節理や断層などの亀裂が多数存在し、分離した岩塊の集合体として取り扱わなければならない挙動を示すことが多い。本研究では、個別要素法を用いて岩盤斜面の2次元崩壊シミュレーション解析を行なった。不連続体解析手法である個別要素法に引張力であるボンディング力を導入し、連続体から不連続体へ移行する挙動に対して適用可能な解析手法とした。すなわち本手法は、解析中にボンディング力が破断した箇所において、亀裂が進展したと考えることができる。また、任意の斜面形状と不連続面の位置を有する解析モデルを作成し、これに本解析手法を用いることによって、実際に発生した斜面崩壊の崩壊メカニズムについての研究を行なった。これによって、崩壊中の亀裂の進展の可視化が可能となった。

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

1. 緒言

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レタンシー効果や、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。しかし、岩盤斜面の解析において既存の不連続面あるいは新たに発生した不連続面、いわゆる亀裂の進展の双方を表現できる解析手法として個別要素法が用いられた報告はない。

以上のような背景から、本研究では、不連続面を有する岩盤斜面を、個別要素法を用いてモデル化することで、斜面の崩壊メカニズムを解明することを試みた。本研究での解析対象は、不連続面においては不連続体であるが岩質部は連続体であるため、従来の個別要素法では表現不可能であった。そこで、本研究では不連続体解析手法である個別要素法にボンディング力⁵⁾の概念を導入し、連続体に対して適用可能な解析手法とした。本解析手法を用いてシミュレーションを行うことにより、岩盤斜面内部における亀裂の進展を考察することが可能となった。

2. 解析手法

(1) 個別要素法

個別要素法とは、Cundallによって考案された解析手法であり、主に岩盤や地盤と言った不連続体を対象としている。数値シミュレーション対象を微小な粒子を集合体

として巨視的に捉えることにより、岩盤などの動力学的挙動を解析する方法である。個々の粒子間に仮想のばねを配し、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) に乗ずることによって、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、 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-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、以下のように定式化できる。

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

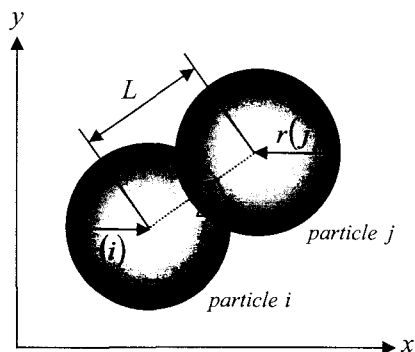


図-1 微視的な粒子の関係

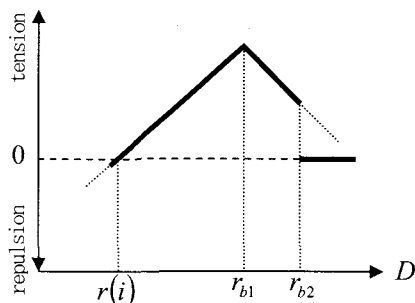


図-3 粒子間作用力

3. 解析対象とした斜面崩壊

本研究では、和歌山県天鳥橋西地区で発生した岩盤斜面崩壊を取り上げた。この斜面は海岸沿いの国道を挟んだ山側の急崖であり、全岩体は最大高さ約 17m の砂岩で、前面ブロックとの亀裂は大きく開口していた (図-4)。1999 年 3 月、ブロック・トップリングの様相を呈して転倒崩壊したことが確認されている⁶⁾。

4. 岩盤材料の力学定数の決定手法

(1) 二軸圧縮試験シミュレーション

個別要素法では、シミュレーション対象の物性値は粒子間のパラメータに支配される。しかし、本解析手法におけるパラメータ決定方法は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二軸圧縮試験のシミュレーションを行ない、解析対象とした砂岩を表現できるパラメータを検討した。

a) パッキング

平均粒径 0.5mm のランダム径粒子をおよそ 5000 個用いて解析モデルを作成する。このランダム径粒子を六角形格子状に発生させ、重力落下によりパッキングを行なう。減衰関数により粒子の振動が停止状態に入った後、高さ 10cm、幅 5cm となるように粒子群を切り取った。

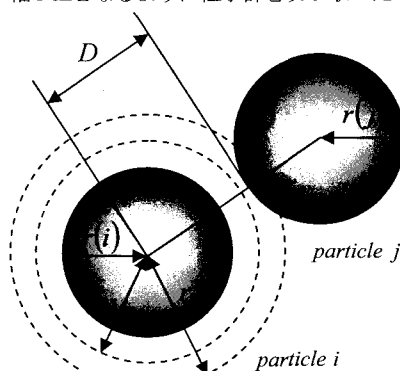


図-2 ボンディング力の作用領域

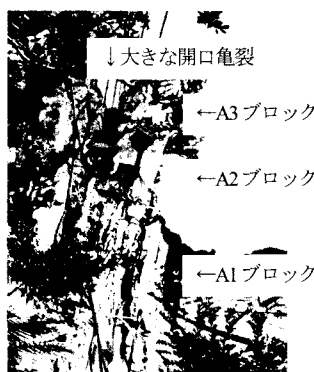


図-4 斜面の側面図⁶⁾

b) シミュレーションの概要

図-5 に二軸圧縮試験シミュレーションの模式図を示す。拘束圧を作用させる粒子を選定し、その粒子に拘束圧に見合う水平力を作用させた。その後、圧縮壁を一定のひずみ速度で降下させ、供試体モデルを圧縮する。

c) 解析条件

ボンディング力と岩盤の物性値、特に粘着力との間には、何らかの相関関係があると考えられる。そこで、ボンディング半径および粒子間の摩擦係数を変化させ、粘着力にどのような影響を与えるかを検討した。ただし、ばね定数の値は固定値とする。表-1 は、解析条件並びに解析結果をまとめたものである。

d) 解析結果

二軸圧縮試験シミュレーションで得られた結果を図-6 に示す。どの摩擦係数のケースにおいても、ボンディング半径の増加に伴い、粘着力の大きさが上昇する結果となった。よって、ボンディング力と粘着力との間には比例関係があり、ボンディング半径を変化させることによって、様々な粘着力の岩盤を表現できると考える。

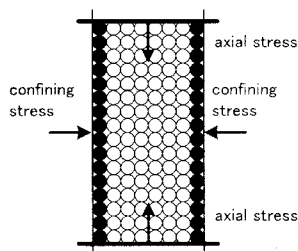


図-5 二軸圧縮試験模式図

表-1 解析条件および解析結果

case	ボンディング半径 (%)	摩擦係数	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (deg)
1	br1 = 5.0	0.10	3.196	1.398
2		0.25	4.032	13.342
3		0.50	6.414	27.587
4	br1 = 10.0	0.10	5.831	1.398
5		0.25	8.683	4.615
6		0.50	11.166	24.586
7	br1 = 15.0	0.10	9.535	2.729
8		0.25	11.804	8.035
9		0.50	22.091	5.216

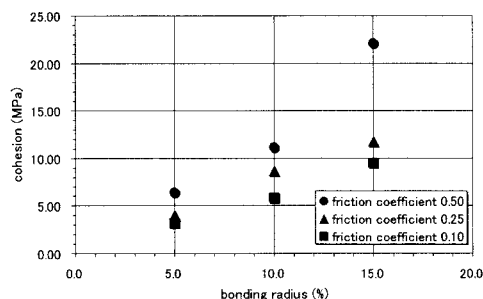


図-6 ボンディング半径と粘着力の関係

(2) パラメータの決定

一般に、解析対象である砂岩の粘着力および内部摩擦角は、それぞれ 1~20 (MPa) , 25~35 (deg) である⁷⁾。そこで、先に述べたシミュレーション結果より、最も砂岩に適する case3 のパラメータを崩壊シミュレーションに用いることにした。

5. 亀裂の表現

斜面モデルは、二軸圧縮試験シミュレーション同様、パッキングした粒子群（およそ 12000 個、平均粒径 5.7 cm）を斜面形状に切り取り作成した。さらに、崩壊シミュレーションにおける亀裂の取り扱いについて、以下に述べる。

(1) 既存の亀裂

本研究では、解析モデルにおいて、既存の亀裂の位置に相当する粒子のボンディング力を強制的に解除することにより、粒子間の引張力を無効化し、この部分を既存の亀裂と見なしている（図-7）。

(2) 亀裂の進展

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数が増加することを利用し、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-8は、ボンディング力が破断し、粒子の

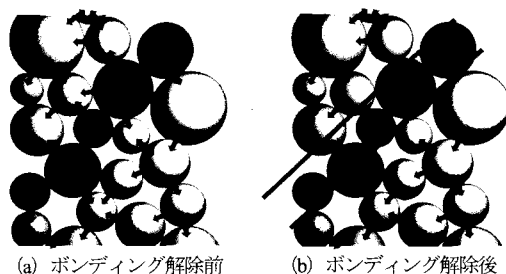


図-7 既存の亀裂の表現

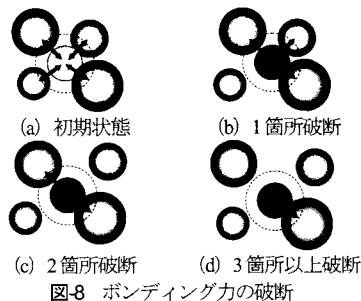


図-8 ボンディング力の破断

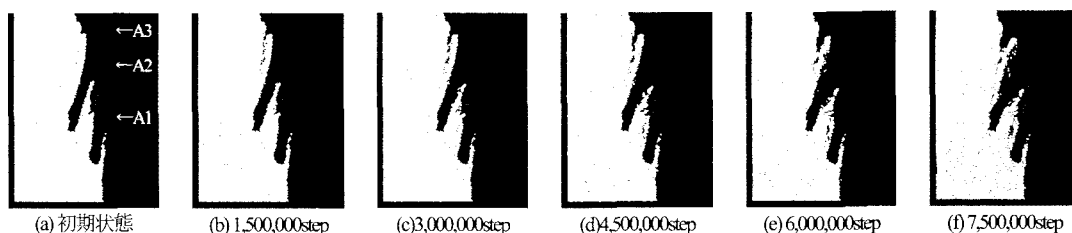


図-10 崩壊挙動

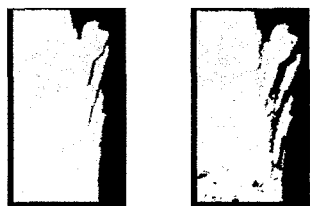


図-11 亀裂の進展

色が変化することを示した模式図である。(a)は、初期状態を示しており、粒子は白色である。(b)～(d)は、それぞれ着目粒子のボンディング力が1箇所、2箇所、3箇所以上で破断した状態であり、粒子は青色から緑色、さらに赤色に変化する。

6. 崩壊シミュレーション結果

(1) 崩壊挙動

図-10に解析で得られた崩壊挙動を示す。崩壊を完全に収束させるには至っていないが、A3ブロック背後の亀裂の開口幅が徐々に大きくなり、傾動している。また、A3ブロックの転倒とともにA1ブロック前面の薄い岩体が剥離していく様子を確認することができる。

(2) 亀裂の進展

図-11に亀裂の進展を示す。A1ブロックの周辺に著しく亀裂が発生しており、この部分から崩壊が進行していると考えられる。

7. まとめ

本研究は、個別要素法を用いて岩盤斜面崩壊のシミュレーション解析を行なったものである。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) ボンディング力を定義し、解析モデルにおける擬似的な粘着力を表していることを明らかにした。
- 2) ボンディング力を定義し、これを強制的に破断させることにより、不連続面のモデル化が可能となった。
- 3) 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) 岩盤斜面の考え方-現状と将来展望- [実務者の手引き] (CD-ROM), 土木学会, 2004.
- 7) Hoek, Bray : 岩盤斜面工学, 朝倉書店, pp.13, 1979.

SIMULATION ANALYSIS OF FAILURE OF ROCK SLOPE BY DISTINCT ELEMENT METHOD

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, Mechanism of Toppling failure depends on fractures in rock slope.

In this paper, Two-dimensional simulation analysis and visualization for rock slope toppling failure by distinct element method are carried out. In related with this simulation, the tensile stress of rock mass can be tried to be expressed by bonding theory. The rock slope model with this analysis can be freely setting the slope shape and the location of joints. Using this analytical model, it is tried to be simulated an actual toppling failure of rock slope. As the results of this analysis, it is recognized that this simulation can be expressed on this toppling failure phenomena. Moreover, the process of toppling failure can be visualized.