

個別要素法による層状岩盤の不連続面進展シミュレーション解析

伊世 健太郎^{1*}・楠見 晴重²・山本 剛³

¹関西大学大学院 工学研究科 ソーシャルデザイン専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²関西大学 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

³国土交通省 近畿地方整備局 (〒540-8586 大阪府大阪市中央区大手前1-5-44 大阪合同庁舎1号館)

*E-mail: ua8m514@ipcku.kansai-u.ac.jp

岩盤斜面内部には多数の亀裂が存在し、それらの亀裂はしばしば崩壊の原因となる。本論文は、個別要素法によって層理面を有する岩盤斜面の不連続面の進展シミュレーション解析及び視覚化を試みたものである。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、斜面形状および不連続面の位置を任意に設定することが可能である。対象斜面は砂岩と泥岩から構成されており、それぞれに異なるボンディング半径を設定することによってその違いを表現した。解析の結果、岩盤斜面の表面と内部に大規模な不連続面が形成されることが確認され、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, bedding plane

1. はじめに

我が国では高度成長期以降、道路やエネルギー施設、廃棄物処分場などの社会基盤の多くが山間部に建設され、岩盤を対象とする工事が増加してきた。しかし、岩盤斜面は常に厳しい自然環境に直面し、不安定になる要素を有している。そして、1996年北海道豊浜トンネル坑口岩盤斜面崩壊をきっかけに、岩盤斜面の安定や落石問題に社会の関心が集まるようになり、社会生活の安全確保の施策として岩盤崩落問題への取組み、解決が危急の問題となっている¹⁾。

そこで本研究では、複数の層理面を有する岩盤斜面を解析対象とし、個別要素法によって不連続面の進展シミュレーション解析及び視覚化を試みた。このシミュレーション解析の中では、岩盤内の引張力は、ボンディング理論²⁾によって表現している。また、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。対象斜面は主に砂岩と泥岩から構成され、それぞれに異なるボンディング半径を設定することでその違いを表現し、シミュレーション解析を実施した。

2. 解析手法

(1) 個別要素法

個別要素法はP.Cundall³⁾によって考案された解析手法であり、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。すなわち、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、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、次式で表される。

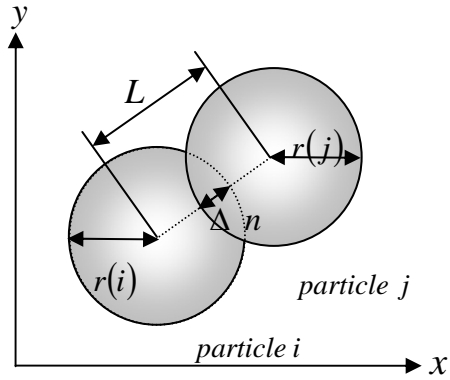


図-1 微視的な関係

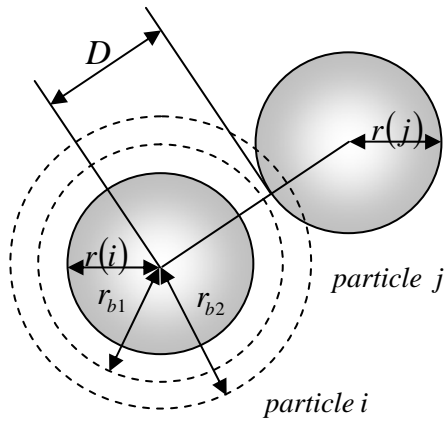


図-2 ボンディング力の作用領域

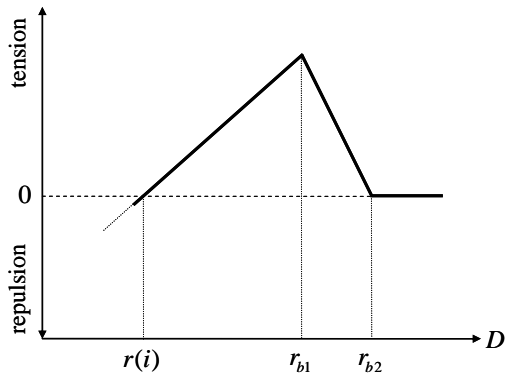


図-3 粒子間作用力

$$\begin{aligned} r_{b1} &= r(1 + B_1) \\ r_{b2} &= r(1 + B_2) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 r ：粒子半径、 B_1 ：ボンディング定数1、 B_2 ：ボンディング定数2である。

ボンディング力は接触点である r から r_{b1} まで一時的に増加し、 r_{b1} から r_{b2} まで一時的に減少する。 r_{b2} に至るとボンディング力は破断し、0になる（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、次のよう

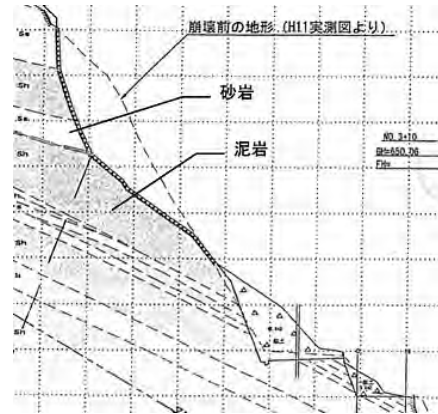


図-4 地質断面図



写真-1 崩壊後の状況

に定式化できる。

$$F_{ij} = \begin{cases} K \cdot \Delta n & (D < r(i)) \\ K \cdot (D - r(i)) & (r(i) < D \leq r_{b1}) \\ K \cdot (r_{b2} - D) & (r_{b1} < D \leq r_{b2}) \\ 0 & (D > r_{b2}) \end{cases} \quad (2)$$

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。

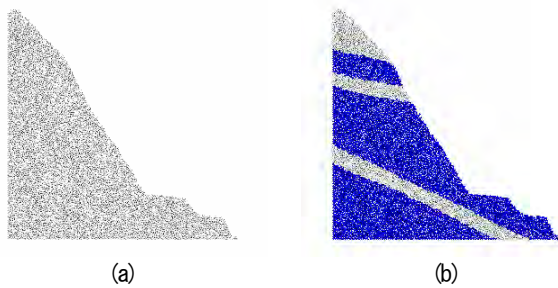


図-5 解析モデル

表-1 解析モデルのデータ

粒子総数	8133
最大粒径	0.25 [m]
最小粒径	0.11 [m]
X方向	47.387 [m]
Y方向	47.892 [m]

3. 解析対象とした岩盤斜面

図-4 は、本研究でシミュレーション対象とした岩盤斜面の地質断面図であり、写真-1 は、崩壊後の状況を示したものである。崩壊は3回に分かれて発生し、その規模は1回目：100 m³（幅 20m，高さ 30m），2回目：80 m³（幅 18m，高さ 25m），3回目：1100 m³（幅 30m，高さ 35m）である。1回目及び2回目の崩壊面よりも3回目の岩盤すべり面は深くなっており、2回目の崩壊が生じた後に3回目の崩壊を予測することは、困難であったと判断される。本研究では最も規模が大きく、発生要因が不明確な3回目の崩壊について、シミュレーション解析を行なうことにした。なお、当該斜面は主に砂岩と泥岩から構成され、複数の層理面を有している。層理面の傾斜角は約 20° ～40° である。

4. 解析概要

(1) 解析モデルの作成

本研究では、層理面が斜面崩壊に及ぼす影響を検討するために、2つの解析モデルを作成した（図-5）。解析モデル中の白い粒子は引張強度の大きな砂岩を示し、青い粒子は引張強度の小さな泥岩を示している。すなわち、解析モデル(a)は、引張強度の大きな砂岩のみで構成された斜面を想定したものであり、解析モデル(b)は砂岩と泥岩から構成される、実斜面を想定したものである。解析モデルは、重力下における自然落下によって粒子を

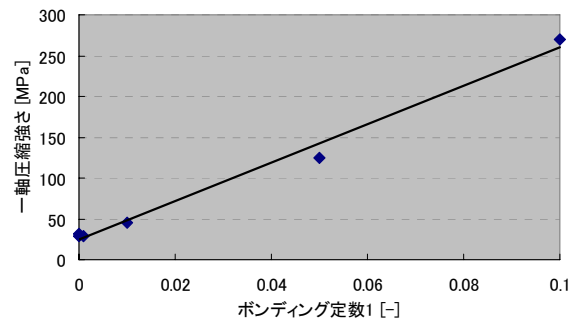


図-6 一軸圧縮強さとボンディング定数の関係

解析領域に重鎮し、それを斜面形状に切り取ることによって作成した。

(2) ボンディング半径の決定

砂岩と泥岩は、それぞれ異なる引張強度を有している。そこで本研究では、それぞれの層に異なるボンディング半径を設定することにより、その違いを表現することにした。

最適なボンディング半径を決定するために、まず一軸圧縮試験シミュレーション解析を実施した。ボンディング定数のみを変化させた6ケースを試み、得られた結果を図-6に示す。この結果から、一軸圧縮強さとボンディング定数には正の相関関係があることが確認され、次の関係式が得られた。

$$q_u = 2364B_1 + 24.55 \quad (3)$$

ここに、 q_u ：一軸圧縮強さ、 B_1 ：ボンディング定数 1 である。なお、本研究では B_2 は B_1 の 2 倍に固定している。

本研究では、シミュレーション対象とする岩盤斜面の一軸圧縮強さを、砂岩：100MPa、泥岩：50MPa と設定している。よって、これらの値を式(3)に代入することにより、砂岩のボンディング定数を B_1 ：0.03、 B_2 ：0.06、泥岩のボンディング定数を B_1 ：0.01、 B_2 ：0.02 とし、各層のボンディング半径を決定した。

5. 解析結果

作成した解析モデルと、一軸圧縮試験シミュレーション解析によって決定したボンディング半径を用いて、岩盤斜面のシミュレーション解析を実施した。Case01 は解析モデル(a)、Case02 は解析モデル(b)を用いたシミュレーション解析である。この2ケースを実施し、層理面が斜面崩壊に及ぼす影響を検討することにした。なお、本研究では地質断面図およびその他の資料から、既存の亀

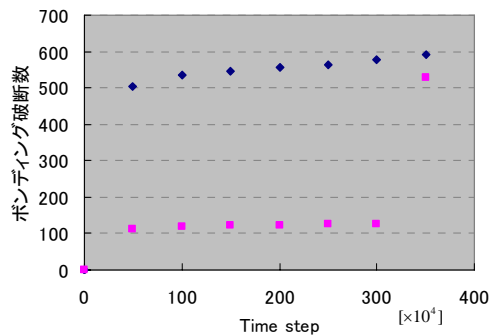


図-7 粒子間のボンディング破断数

裂の位置を特定することが困難であったため、新たに形成される不連続面についての進展シミュレーション解析を試みている。

(1) ボンディング破断数

Case01 と Case02 において、ボンディング破断数に違いが生じた。図-7 は、時間経過に伴うそれぞれのケースのボンディング破断数を示したものである。図より、全体的には Case01 のボンディング破断数の方が多いが、Case02 では 3,000,000step を過ぎた後に、急激にボンディング破断数が上昇していることがわかる。この結果から、Case02 ではこのときに、大規模な不連続面が形成されたと考えられる。

(2) 不連続面の進展の可視化

a) 可視化プログラムの概略

ボンディング破断数だけでは、解析モデルのどの位置に不連続面が形成されるか判断することができない。そこで、各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、その粒子の位置を不連続面の形成箇所とみなし、可視化を試みた。

ここで、不連続面の進展の可視化に使用したプログラムの概略を述べる。あらかじめ粒子の初期接触データ（ボンディングテーブル）を読み込み、各粒子について、近傍粒子との接触数を数えておく。解析が進行するにつれてボンディング力が破断し、接触数が減少していく。この減少した数がボンディング破断数であり、これを視覚的に表現した。図-8 はボンディング力が破断し、粒子の色が変化する様子を示している。図-8(a)は、初期状態を示したものであり、図-8(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と、そのときの粒子の色を示したものである。それ以外の粒子は白色で表現している。なお、粒

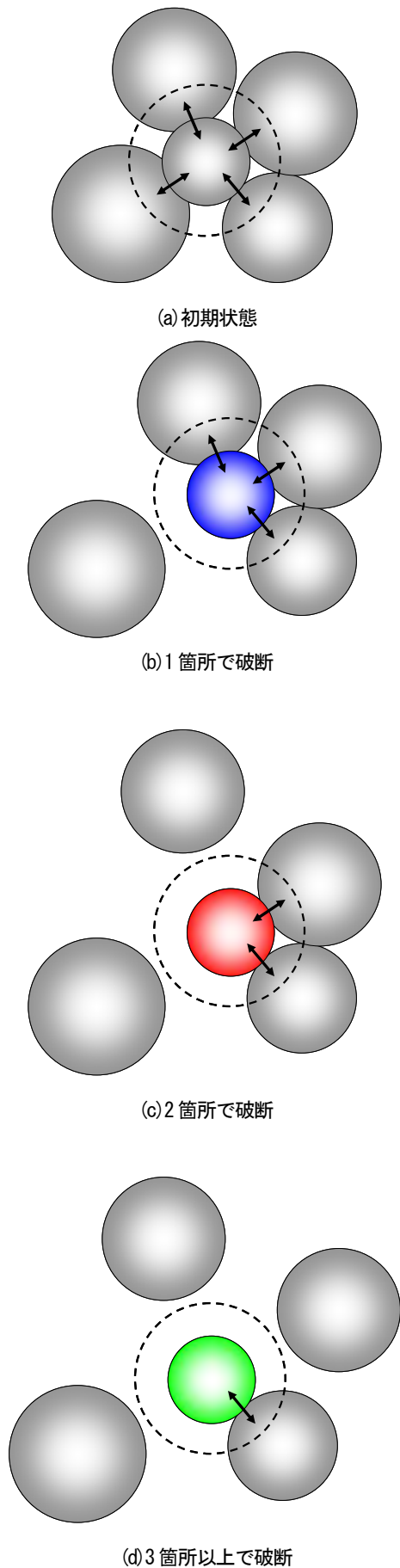
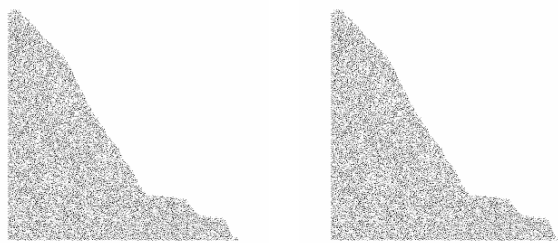
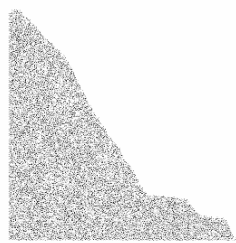


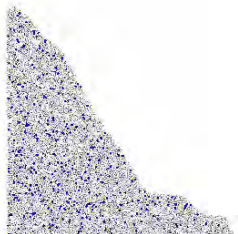
図-8 ボンディング力の破断



(a) 初期状態



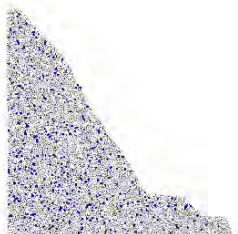
(a) 初期状態



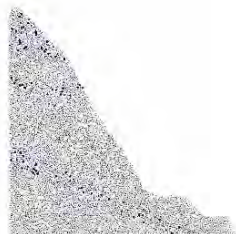
(b) 1, 000, 000step



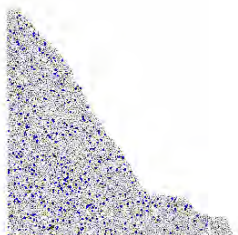
(b) 1, 000, 000step



(c) 2, 000, 000step



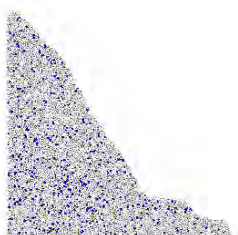
(c) 2, 000, 000step



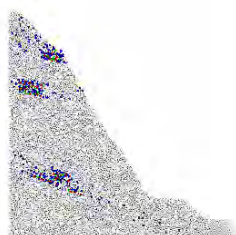
(d) 3, 000, 000step



(d) 3, 000, 000step



(e) 3, 500, 000step



(e) 3, 500, 000step

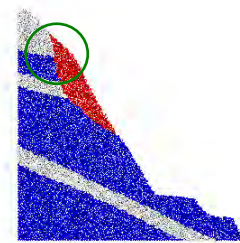
図-9 解析結果 (Case01)

図-10 解析結果 (Case02)

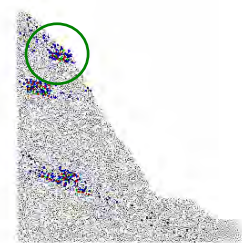
子間の矢印はボンディング力を示している。

b) 不連続面の進展

図-9 は Case01, 図-10 は Case02 の解析結果である。Case01 では、解析モデル全体にわたってボンディング力



(a) 実現象



(b) シミュレーション解析

図-11 実現象と解析結果の比較

が破断しているが、2 箇所以上での破断はほとんど見られない。一方、Case02 では、層理面付近で多数のボンディング力が破断し、3,500,000step では解析モデルの表面と内部に、破断の集中している箇所が存在することがわかる。この結果から、3,000,000step から 3,500,000step にかけて、この位置に大規模な不連続面が形成されたと考えられる。したがって、対象斜面の特有の地質構造、すなわち複数の層理面が時間経過とともに大規模な不連続面を形成し、斜面崩壊の要因の 1 つになったと考えられる。

(3) 実現象との比較および崩壊挙動の推測

図-11 は、実現象と Case02 のシミュレーション解析結果を比較したものである。図-11 (a) の赤い粒子は、実現象の崩壊岩塊を示している。これより、崩壊岩塊の上部と解析モデルの表面に形成された不連続面とが一致し、実現象に近いシミュレーション解析が実施できたと言える。

また、崩壊挙動は以下のように推測される。

- 1) 対象斜面の有する複数の層理面と自重により、時間経過とともに、層理面付近と法面に大規模な不連続面が形成された。
- 2) 新たに形成された大規模な不連続面と、既存の亀裂の影響により、崩壊が生じた。

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、層理面を有する岩盤斜面の不連続面の進展シミュレーション解析及び視覚化を試みたものである。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) 砂岩の層と泥岩の層を異なる色の粒子で表現することにより、層理面を有する岩盤斜面をモデル化することができた。
- 2) また、それぞれの層に異なるボンディング半径を設

定することにより、層理面を表現することが可能となった。

- 3) 一軸圧縮試験シミュレーション解析を実施することにより、最適なボンディング半径を決定し、実現象に近いシミュレーション解析を実施することができた。
- 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により、不連続面の進展および形成位置を可視化することが可能となった。

参考文献

- 1) 土木学会 岩盤力学委員会 岩盤崩落問題研究小委員会：岩盤斜面の考え方 - 現状と将来展望 - [実務者の手引き]，2004.
- 2) F.Donze, P.Mora and S.Magnier : Numerical simulation of faults and shear zones, Geophys.J.Int. Vol.116, pp.46-52, 1979.
- 3) Cundall, 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.

SIMULATION ANALYSIS OF DISCONTINUITY PROGRESS OF STRATIFIED ROCK MASS BY DEM

Kentaro ISE, Harushige KUSUMI and Tsuyoshi YAMAMOTO

As is known, there are many fractures and discontinuities in rock slope, and these are often the cause of failure. In this paper, we attempt simulation analysis and visualization of discontinuity by DEM. However, it is difficult for DEM to express both of the continuum and discontinuities. So, we introduce the concept of bonding force, and it is made to be an applicable analysis method for the continuum. Using this analysis method, we try to simulate a failure rock slope, and to visible progress of discontinuities. As the results of this analysis, it is recognized that the discontinuities are formed surface and internally the rock slope. Moreover, the factors of failure can be visualized.