

# 岩盤斜面の崩壊シミュレーションへの個別要素法の適用

堀内宏信・田中義成\*

## 1. はじめに

亀裂性岩盤における岩石崩壊は、発生メカニズムや崩壊後の岩盤ブロックの挙動が複雑であることから、崩壊の規模や危険性の程度を事前に把握することは極めて難しい。またひとたび崩壊が発生すると、岩塊の移動速度が非常に速いことから、大きな被害につながることも多い。1989年に福井県越前海岸の国道305号で発生した崩落事故や、1996年に北海道古平町の国道229号豊浜トンネルで発生した崩落事故による大惨事は記憶に新しい。

このような岩盤ブロックの挙動を解析するための数値解析手法として、個別要素法 (Distinct Element Method) が挙げられる。個別要素法は、1971年にCundallが亀裂性地盤の解析のために開発、発表された解析手法であり、岩盤ブロックを始めとする粒状体の解析に現在広く利用されている。これは、ブロックや粒状体などの離散体を、個別要素と呼ばれる剛体要素にモデル化し、各要素の接触面について接触力を求め、その結果得られた各要素毎の運動方程式を時間積分することにより、動的解析を行う方法である。

## 2. 本報告で用いた解析手法

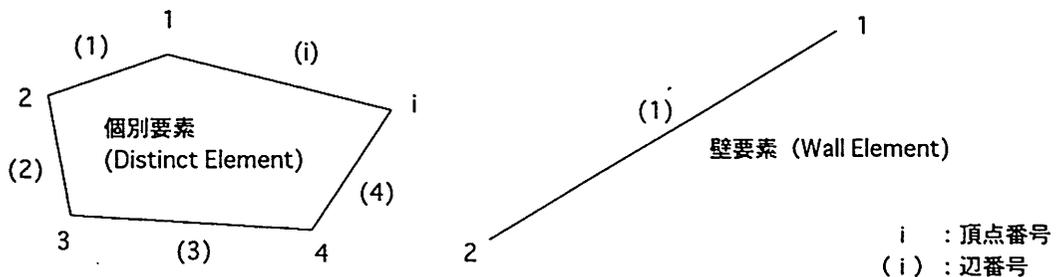
### 2. 1 解析対象

亀裂性岩盤の解析を対象として、2次元個別要素法プログラムの開発を行った。このプログラムでは、主に崩壊過程の岩盤ブロックのシミュレーションを扱うことから、現時点では間隙水圧の影響は考慮していない。

### 2. 2 解析方法

#### (1) 要素モデル

要素モデルは、基盤斜面の表面を表現する壁要素 (wall element) と、個々の岩塊ブロックを表現する個別要素 (distinct element) から構成されており、いずれも剛体要素である。壁要素は線要素であり、基本的には不動であるため、FEMのような拘束条件は特に指定する必要はない。一方、個別要素は任意多角形要素である。



※ 株式会社 キタック

要素間の破壊は、要素間の法線方向強度 ( $f_n$ )、接線方向強度 ( $f_s$ )、及び摩擦係数 ( $\mu$ ) から、Coulomb (クーロン) の破壊基準により判定する。

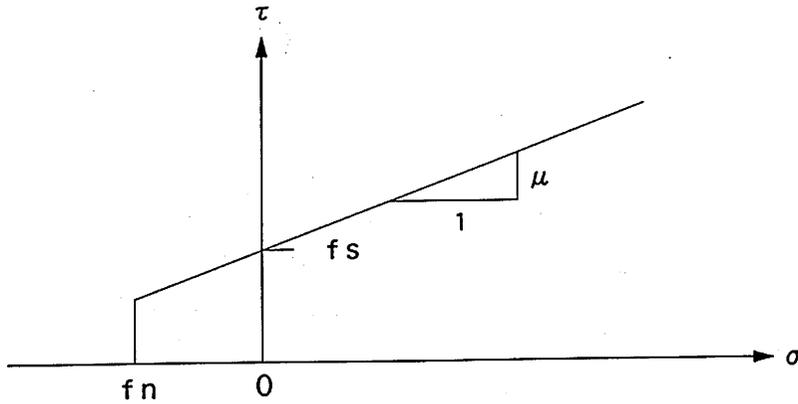


図-2 破壊基準

要素間の接触レオロジーモデルは、法線方向・接線方向のバネ ( $K_n$ ,  $K_s$ ) とダッシュポット (粘性  $\eta_n$ ,  $\eta_s$ ) と摩擦係数 ( $\mu'$ ) で表現している。ここで、破壊前の摩擦係数 ( $\mu$ ) と破壊後の摩擦係数 ( $\mu'$ ) には違った値を設定できるようにしている。また破壊後には、要素間の法線方向強度 ( $f_n$ ) 及び接線方向強度 ( $f_s$ ) は作用しないものとして扱っている。

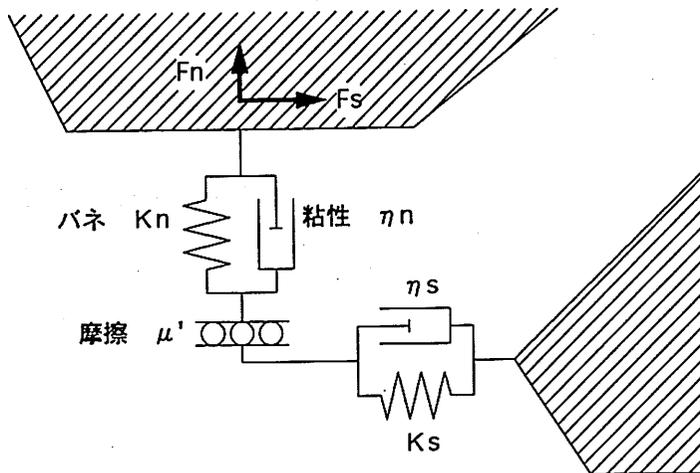


図-3 接触レオロジー

個別要素は複数の辺と頂点から構成されている。各個別要素の全ての辺について、破壊に関するパラメータ ( $f_n$ ,  $f_s$ ,  $\mu$ ) を任意に設定することができる。また、接触に関するパラメータは各要素の辺 ( $K_n$ ,  $K_s$ ,  $\eta_n$ ,  $\eta_s$ ) と頂点 ( $K$ ,  $\eta$ ) の2種類について設定が可能であり、摩擦係数 ( $\mu'$ ) は1つの個別要素の全ての辺と頂点で共通としている。

また1つの壁要素は、1辺のみから構成されているため、この辺に対して破壊 ( $f_n$ ,  $f_s$ ,  $\mu$ ) 及び接触 ( $K_n$ ,  $K_s$ ,  $\eta_n$ ,  $\eta_s$ ,  $\mu'$ ) に関する各パラメータを設定する。

### (2) 地震時解析

また、地震時の解析を行うため、時刻歴解析の機能を付加している。壁要素に各解析時間 (1) における変位 ( $\delta x$ ,  $\delta y$ ) をデータとして入力することにより、地震動による岩盤斜面の変位が各個別要素の移動に与える影響を加味している。全ての壁要素に共通する変位を直接与えているため、地盤による地震動の増幅や減衰等の影響を扱うことはできないが、これらの影響が小さい岩盤地域を対象としているため、工学的には意味を持つ解を得ることが可能であると考えている。また、地震時の変位データは、地表面や基盤深度で観測された加速度波形を初期値ゼロで2階積分することにより作成する。

### (3) その他

現在は開発したプログラムを利用して、既往の事例をモデルとした解析により物性値の検証を行っている。

## 3. 解析の事例

### (1) 解析モデル

当該地は、地震による落石を始め、過去に付近で数度の落石が発生した箇所である。今後の風化の進行により、岩盤ブロック間の亀裂強度が全体に低下した場合を想定したモデル解析を実施した。

現地における亀裂調査の結果を基に解析モデルを作成した。

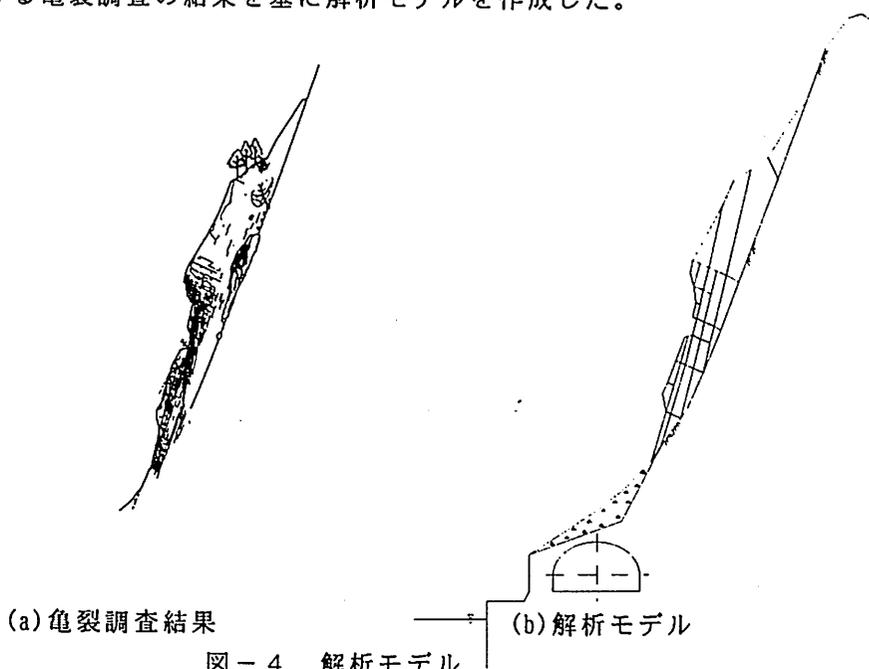


図-4 解析モデル

(2) 設定パラメータ

本解析で設定した各パラメータは以下の通り。

表-1 設定パラメータ

パラメータ	風化岩	崖 錐
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2500	---
法線方向強度 $f_n$ (Pa)	$1.0 \times 10^5$	0.0
接線方向強度 $f_s$ (Pa)	$1.0 \times 10^5$	0.0
破壊前の摩擦角 $\mu$	0.84	0.70
法線方向バネ定数 $K_n$ (N/m)	$1.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^6$
接線方向バネ定数 $K_s$ (N/m)	$2.5 \times 10^7$	$2.5 \times 10^6$
法線方向粘性係数 $\eta_n$ (N·s/m)	$2.4 \times 10^5$	$2.2 \times 10^5$
接線方向粘性係数 $\eta_s$ (N·s/m)	$2.4 \times 10^5$	$2.2 \times 10^5$
破壊後の摩擦角 $\mu'$	0.84	0.70

※辺と頂点のバネ定数及び粘性係数は同値とした。

また、解析時間は  $t = 15$  (sec)、時間増分は  $\delta t = 1.0 \times 10^{-4}$  (sec) とした。

(3) 解析結果

解析結果を以下に示す。

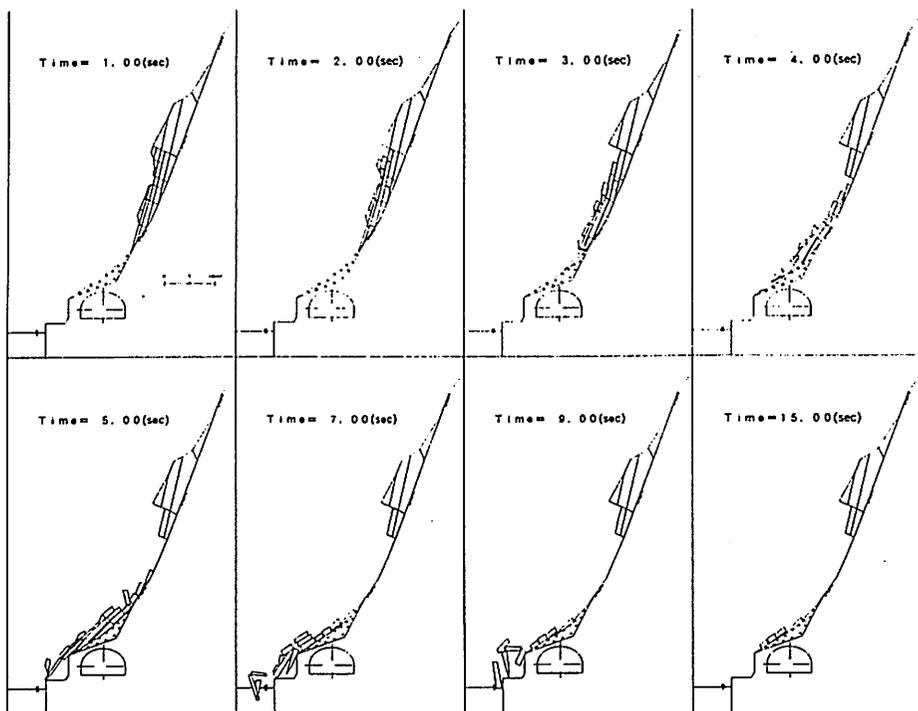


図-5 経時変化図

この解析の結果から、重力によって要素間に引張力が発生する水平方向の亀裂が多い範囲から崩壊が始まる様子が伺える。水平方向の亀裂の少ない範囲は同じ強度設定であるにも係わらず崩壊を免れ、オーバーハングとして斜面に残っている。

この現象は、実際の落石パターンと比較しても矛盾のない解析結果であると考えられる。但し本解析の強度パラメータは、トライアルにより崩壊が始まる値を逆算して入力しているため、特に根拠のある数値ではない。

また、各岩塊ブロックの移動速度は下図の通りである。各ブロックの最大速度は概ね  $v = 10$  (m/s) 程度であるが、なかには  $v = 20$  (m/s) を越えるブロックもあり、斜面や岩塊の規模や形状から判断すると、全体に速い傾向を示していると考えられる。

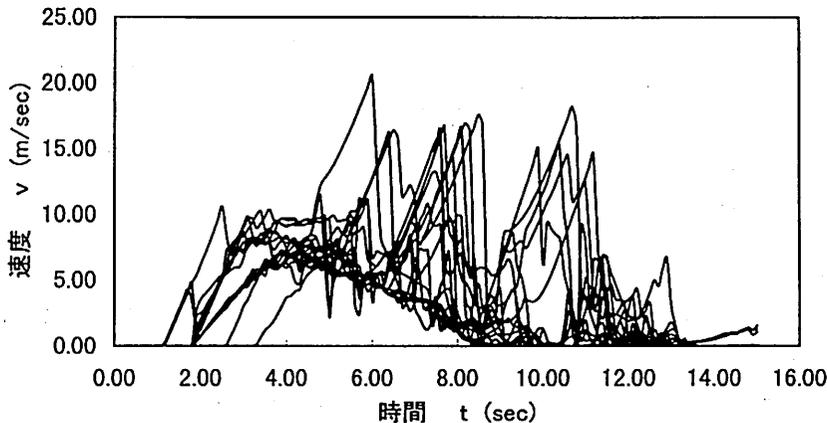


図-6 岩塊の移動速度

#### 4. 問題点と今後の取り組み

##### (1) 問題点

解析上の問題として、個別要素法におけるパラメータの設定の難しさが挙げられる。これは、①各パラメータを材料実験などの結果を基に合理的に設定する手法が未だ確立されていないこと、②要素の大きさ、バネ定数、時間増分の間には密接な関係があり、実際の物性値を単純に入力することが難しいこと、などの理由による。例えば要素の大きさやバネ定数に比較して時間増分の値を十分に小さくとらないと、要素のすり抜けや異常な速度といった現象が生じるため、岩盤のバネ定数の値をそのまま入力すると、計算時間が膨大になる、などである。

また、実際の岩盤ブロックや岩盤斜面は、多くの場合3次的に非常に複雑な形状を有している。このため実際の落石現象では、斜面の同じ位置から同じ石を落としても、僅かな初期条件の違いから、すべて違った軌道を描いて落下する。

これらの問題点は、個別要素法を実用的に使用していく上で解決しなければならない重要な課題となっている。

## (2) 今後の取り組み

これらの課題の根本的な解決は非常に難しいが、以下の取り組みを進めていくことが、現地調査の結果を斜面の安定性の定量的な評価に結びつけ、今後の実用化へ向けた足掛かりになると考えている。

- ① 既往の事例及び落石実験等のデータの蓄積を図り、パラメータの検証を行っていく。
- ② モンテカルロシミュレーション等の手法を導入し、落石を確率的な現象として取り扱う。

このうち②については、吉田（金沢大学土木建設工学科名誉教授）らが既に多くの論文を発表している。また、ShiとGoodmanによって1985年に発表された不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis）や同じくShiとGoodmanにより1991年に発表されたマニフォールド法（Manifold Method）は、未だ研究段階にあるといえるが、要素内部の応力状態まで取り扱うことが可能な新しい数値解析法であり、これらについても現在導入に向けた調査を行っている。

## 5. おわりに

パーソナルコンピューターやワークステーションの急激な性能向上により、膨大な計算量を必要とする個別要素法などの数値解析を、比較的手軽に効率よく行うことが可能となってきた。パラメータの設定を始めとして、実際の業務に適用するためには解決しなければならない課題は多いが、これらの解析ツールを利用することによって、これまで詳細な現地調査を実施しても、定量的な評価が困難であった岩盤斜面の安定性について、一応の解を得ることが可能となりつつある。

今後はデータの蓄積とプログラムの改良などを進め、実用的な解析の実現に向けての環境の整備を進めていきたい。

謝 辞：本プログラムの開発に協力していただいた、新潟大学工学部建設学科阿部助教授に深く感謝致します。また落石や岩石崩壊の危険の下で現地調査を担当したスタッフをはじめ、本報告を作成するにあたり協力していただいた皆様に感謝致します。なお、本報告の解析の一部にはMKLinuxとGNUソフトウェアを使用しています。

## 参考文献

- 吉田 博・榎谷 浩・今井和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析，  
土木学会論文集 No. 392 / I -9 1988-4
- 西村 強・池添保雄・藤村 尚・木山英郎：DEMによる岩盤斜面崩壊の一考察，  
鳥取大学工学部研究報告第21巻 1990-1
- 吉田 博・榎谷 浩・右城 猛・柴田健次：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ，  
土木学会論文集 No. 421 / IV-13, 1990-9
- 吉田 博・榎谷 浩・藤井智弘：斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価，  
構造工学論文集 Vol. 37A, 1991-3
- 阿部和久：個別要素法による連続体解析におけるバネ定数の設定，  
土木学会論文集 No. 543 / I -36 1996-7