

# 拡張個別要素法による覆道への落石破壊シミュレーション

Simulation of destruction for Rock Fall on Rock shed by Extended Distinct Element Method

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 谷口祐介 (Yusuke Taniguchi)  
 (株)ドーコン 正員 小池明夫 (Akio Koike)  
 北海道大学大学院工学研究科 正員 佐藤太裕 (Motohiro Sato)  
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆 (Takashi Mikami)

## 1. はじめに

本研究では、連続体が非連続体に至るまでの破壊現象を再現できる拡張個別要素法<sup>1)</sup>を用いて解析を行った。この手法は従来の非連続体しか取り扱えなかった個別要素法に新たに間隙ばねを導入し連続体まで取り扱えるように拡張したものである。これにより、破壊した後要素同士が完全に離れて大きな変形を生じたり、初期と違った要素と接触したりする非連続体挙動の解析が可能となる。はじめに、波動伝播速度からばね定数の妥当性を確認し、さらにひずみ速度効果による強度の増加率を考慮して覆道への落石シミュレーションを行った。

## 2. 解析手法

本解析では、要素は等径の2次元円盤剛体要素で規則配列を考え、各要素間には要素間の接触力を伝える要素ばね、モルタルなどの間隙物質による力を伝える間隙ばねを配置する。

質量  $m_i$ 、慣性モーメント  $I_i$ 、のある円形要素  $i$  について次の連立方程式が成り立つ。

$$m_i \cdot \ddot{\mathbf{u}} + C_i \cdot \dot{\mathbf{u}} + F_i = 0 \quad (1)$$

$$I_i \cdot \ddot{\phi} + D_i \cdot \dot{\phi} + M_i = 0 \quad (2)$$

ここに、 $F_i$  : 要素に働く合力、 $M_i$  : 要素に働く合モーメント、 $C_i, D_i$  : 減衰定数、 $\mathbf{u}$  : 要素の変位ベクトル、 $\phi$  : 要素の回転変位である。

変位ベクトル  $\mathbf{u}$  と回転変位  $\phi$  は(1), (2)を時刻歴で数値積分することによって求められる。

間隙ばねについては、破壊過程を次のように分類する。

Stage1 : 間隙ばねは健全な状態で、圧縮、引張り、せん断いずれの力が作用してもそれらに抵抗する。

Stage2 : 間隙ばねに亀裂が入っている状態。間隙ばねは圧縮力が作用しているときにのみ有効で、引張りには抵抗しない。Stage1 から Stage2 へ移行する要因としては、次の2つがある。

(1) 引張りが原因で間隙ばねが破壊する場合。

(2) せん断変形が原因で間隙ばねが破壊する場合。

初期状態では、全間隙ばねは Stage1 にあり、これが引張強度及び Mohr-Coulomb の破壊基準により Stage2 へと移行する。Stage2 の間隙ばねは、要素間に圧縮力が作用する場合には Stage1 と同様に力の伝達を行うものとするが、要素間に引張力が作用する場合は引張りにもせん断変形にも抵抗しないものとする。

## 3. 解析パラメータの決定法

拡張個別要素法において設定すべきパラメータとしては、要素半径  $r$ 、要素ばね定数  $k_{en}, k_{es}$  ( $n$ :法線方向,  $s$ :接線方向)、間隙ばね定数  $k_{pm}, k_{ps}$ 、粘性減衰定数  $\eta_{en}, \eta_{es}, \eta_{pm}, \eta_{ps}$ 、Mohr-Coulomb の破壊基準で用いる粘着力  $C$ 、内部摩擦角  $\phi$ 、引張強度  $F_t$  がある。また、高速なひずみ速度が生じる現象を解析する場合に重要となるひずみ速度の関数である動的強度増加率 (DIF) を考慮

する必要がある。

### 3.1 要素ばね定数

要素ばねのばね定数を決定するにあたり図-1 に示す2要素間について考える。まず、応力とひずみの関係から(3)が、また、フックの法則より(4)が得られる。

$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

$$f = k\Delta x \quad (4)$$

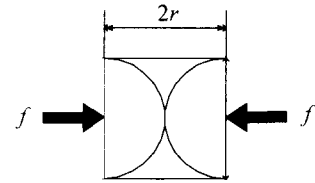


図-1 2要素の接触

断面積は、幅  $2r$ 、奥行きを単位奥行きとすると  $2r \cdot 1$  となり、(3)は以下のように変形できる。

$$f = E\Delta x \quad (5)$$

(4)と(5)を比較すると  $k = E$  となることから、要素ばねのばね定数にはヤング率を採用した。

### 3.2 間隙ばね定数

円盤要素の集合体は巨視的にみれば、均質性を持っているとみなすことができるので、等径要素が規則的に配置される非連続体の質点-ばね系を弾性的に等価な連続体に置換し、その構成則要素間ばねを等置することで以下のようにばね定数を求める<sup>2)</sup>。

$$k_n = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{E}{1-\nu} \quad (6)$$

$$k_s = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{(1-3\nu)E}{(1-\nu)^2} \quad (7)$$

### 3.3 破壊基準パラメータ

破壊基準値である引張強度  $F_t$ 、粘着力  $C$  は、円盤要素直径  $D$  とひずみ速度効果による強度の増加率(DIF)により、単位面積あたりの静的引張強度  $f_t$ 、粘着力  $c$  を用いて次式で求める。

$$C = (\text{DIF})_c \cdot c \cdot D \quad (8)$$

$$F_t = (\text{DIF})_t \cdot f_t \cdot D \quad (9)$$

また、(DIF)は次式のように求める<sup>3)</sup>。

$$(\text{DIF})_t = 0.8267 + 0.02987 \cdot \log(\dot{\epsilon}_t \times 10^6) + 0.04379 \cdot \left[ \log(\dot{\epsilon}_t \times 10^6) \right]^2 \quad (10)$$

$$(\text{DIF})_c = 1.021 - 0.05076 \cdot \log(\dot{\epsilon}_c \times 10^6) + 0.02583 \cdot \left[ \log(\dot{\epsilon}_c \times 10^6) \right]^2 \quad (11)$$

粘着力  $c$  とその(DIF)は静的圧縮強度  $f_c$ 、引張強度  $f_t$  から次式で表される。

$$c = 0.5 \sqrt{f_c \cdot f_t} \quad (12)$$

$$(\text{DIF})_s = \sqrt{(\text{DIF})_t \cdot (\text{DIF})_c} \quad (13)$$

#### 4. 間隙ばね定数の検討

前章で示した間隙ばね定数の妥当性を検討するために細長い棒のモデルを作成し、一端に衝撃を与え粒子の運動がどのように伝播するか(図-2)また、モデルを構成する要素数を変えその影響を調べた。解析パラメータを表-1に示す。

ここで、媒質の密度 $\gamma$ 、ヤング率 $E$ 、ポアソン比 $\nu$ とすると2次元平面応力状態での縦波の伝播速度は次式で表される。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\gamma(1-\nu^2)}} \quad (14)$$

棒を構成する要素の重心移動速度のピーク値から得られる伝播速度 $V$ と2次元平面応力状態の縦波の伝播速度 $V_p$ を比較すると、表-2となる。これは(14)から求まる理論解とほぼ一致しており、また構成要素を細かくするほど理論解に近づいている。この結果から、前章で定めた間隙ばね定数(6)(7)は妥当であるといえ、以下このばね定数を用いて落石シミュレーションを行う。

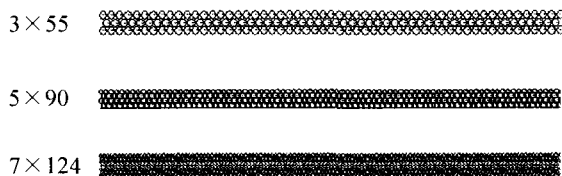


図-2 要素配置

表-1 解析パラメータ 単位: tf, m

パラメータ名	パラメータ値	備考	
要素半径	3×55	0.366	$E = 1.0 \times 10^6$ $\nu = 0.3$ 式(17)(18)
	5×90	0.224	
	7×124	0.161	
間隙ばね定数 $k_{pm}$	$8.25 \times 10^5$	$\gamma = 1.7282$	
間隙ばね定数 $k_{ps}$	$1.18 \times 10^5$		
要素密度 $\rho$	1.9062		

表-2 波動伝播速度の比較 単位: m/sec

	$V$	$V_p$
3×55 要素	743.976	797.411
5×90 要素	756.109	797.411
7×124 要素	769.557	797.411

#### 5. 落石シミュレーション

解析対象は、図-3に示すように覆道をモデル化し、表-3の解析パラメータを用い落石シミュレーションを行った。落石要素は上方から速度 $V_0 = 5.0$  [m/sec]、角度 $\theta = 60^\circ$ で落下するものとする。解析パラメータを表-3に、破壊性状を図-4に示す。

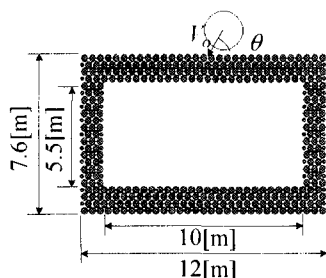


図-3 覆道モデル図

表-3 解析パラメータ

(コンクリート)

単位: tf, m

パラメータ名	パラメータ値	備考
要素半径 $r$	0.2	
要素ばね定数 $k_{cn}$	$2.3 \times 10^6$	$E = 2.3 \times 10^6$ $\nu = 0.17$
要素ばね定数 $k_{cs}$	$9.5 \times 10^5$	
間隙ばね定数 $k_{pm}$	$1.6 \times 10^6$	(9)式
間隙ばね定数 $k_{ps}$	$9.4 \times 10^5$	(10)式
引張強度	240	
粘着力	380	(15)式
内部摩擦角	$26.6^\circ$	$\mu = 0.5$
要素密度	2.54	$\gamma_c = 2.3$

(落石)

単位: tf, m

要素半径 $r$	1.0	
要素ばね定数 $k_{cn}$	$5.6 \times 10^6$	$E = 5.6 \times 10^6$ $\nu = 0.25$
要素ばね定数 $k_{cs}$	$2.1 \times 10^6$	
要素密度	3.34	$\gamma_r = 2.62$

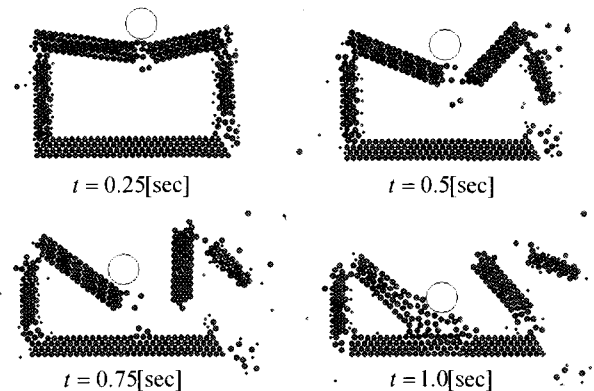


図-4 破壊性状

0.25[sec]では落石の衝突により覆道上部、脚部に破壊が生じている。その後、上部要素は落下し続け、1.0[sec]では下部要素と衝突し新たな破壊を再現できている。

#### 6. まとめ

- 1) 本研究では拡張個別要素法において重要なパラメータであるばね定数について、弾性波速度の面から検討した。その結果、波動伝播速度が理論解とほぼ一致し、ばね定数の妥当性が確認された。
- 2) 拡張個別要素法の利点を活かし、連続体为非連続体に至るまでの破壊挙動をシミュレートした。
- 3) 今後は、落石を単一の要素としてではなく、要素の集合としてモデル化し解析を行う。また、斜面や裏込め土をモデルに取り入れた落石シミュレーションを行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 伯野元彦:破壊のシミュレーション, 森北出版, 1997
- 2) 森川博司, 澤本佳和, 小鹿紀英:個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第473号, pp.127-135, 1995.7
- 3) 山口弘, 藤本一男:鉄筋コンクリート版の衝撃応答に及ぼすひずみ速度効果, 日本建築学会構造系論文報告集, 第406号, pp25-35, 1989.12