斜面微地形が落石軌跡に与える影響に関する数値実験[†]

西村 強* 福田 毅** 木山 英郎*

Numerical Simulation of Effects of Slope Micro-Topography on Rockfall Trajectories

by

Tsuyoshi NISHIMURA^{*}, Tsuyoshi FUKUDA^{**} and Hideo KIYAMA^{*}

Rockfall hazard zoning is not simple to achieve in practice. It involves the different factors: rock block shape and size, characteristics of the topography, and the occurrence of rockfall which depends on some triggering events that cause a change in the forces acting a rock block. Rockfall hazard maps are often replaced with figures which show the frequency and the corresponding intensity of a predefined rock magnitude. Some attempts are introducing the results of the three-dimensional numerical modeling to get the objective zoning based on the mechanical parameters (e.g. kinetic energy). In such attempts, it is important to recognize that the mechanical parameters may be affected by modeling of the physical factors mentioned above. The most important role of the three-dimensional simulation is to display the lateral dispersion of trajectories. In this paper, the influence of controlling factors on the dispersion has been evaluated by conducting 3D simulation. Parametric simulations have been performed at different spatial resolutions using sets of synthetic biplanar slopes characterized by mean inclination and local asperities. The results of the lateral dispersion of trajectories are explained with the width of computed trajectories and the fixed distance along the slope surface from the block launch position.

Key words : Distinct element method, Rockfall, Trajectory, Lateral dispersion

1 緒 言

わが国は山地が多く、主要道路が山間部を縫うように走っている。もろい地盤が広く分布しているため、降雨や地震等により崩壊・落石が発生し道路が寸断されることがある。さらに、何の前触れもなく突如として落石が発生し、通行車両に当たるなど重大な事故に繋がるケースもある。しかしながら、崩落の時期の予測は難しく、また、想定外の区域に崩土や落石が到達する例も存在するであろう。点検に基づいた危険地域指定・対策が重要であると考えられる。このような危険地域内の影響域、本研究の対象である落石に絞ると落石到達域の評価に際しては、落石の落下軌跡や到達距離を予測し、かつ、対策工の位置における運動エネルギーも解析しておく必要がある。^{1), 2)}これらの量は、以下に列記する因子の影響を受けるものとなる。

- 岩塊に関する事項、
体積、密度、形状、初期位置・姿勢、初速度等
- 地表面に関する事項、
斜面地形、斜面勾配の変化、接線および法線方向速度比、摩擦係数等

力学的手法に基づく落石軌跡解析に際して、上述の因子の確定は言うまでもなく至難の問題であり、不確実性かつ空間的な分布を考慮してモンテカルロ法を併用した解析結果を示すのが現実的である。

斜面上を運動中の岩塊は、回転あるいは地表面との衝突によって、その運動方向が、たとえば斜面最急勾配線を含む鉛直断面内から逸脱することが予想され、また、その逸脱は、衝突毎に増幅され、斜面長が長くなるにつれ、逸脱は大きくなる可能性がある。このような事象を、特定の断面内に落石経路を限定した2次元解析では表現できず、岩塊がその断面内から逸脱しないように拘束していることになる。このことは、到達域の評価に対しては不十分であり、対策工の設置位置等の決定にも支障を生じることになる。最近では、3次元解析を実施する例^{3)~5)}が多いが、解析結果である運動軌跡を水平面に投影すれば、それらは落石初期位置を頂点とした扇形内に描かれる。この“扇形”が水平方向への軌跡の拡がりを表しており、地形を考慮した到達域の推定が可能となる。さらに、この“扇形”に運動エネルギーを重ね書きすれば、落石に対するハザード評価に有効な資料となると考えられる。なお、3次元モデル化による軌跡解析では、摩擦係数や速度比などの運動に関連する因子のみならず、斜面地形や斜面勾配などの幾何学的因子にも影響を受けている。数値解析結果の現地に対する食い違い(誤差)は、衝突の度に加算されることになり、数値解析、実験、さらには事例との比較検討による解析結果の評価が必要である。

本研究では、著者らが開発した解析プログラム⁶⁾を用

[†] 原稿受理 平成21年7月10日 Received July 10, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 鳥取大学大学院工学研究科 〒680-8552 鳥取市湖山町南, Tottori Univ., Minami, Koyama, Tottori, 680-8552

** (株)地層科学研究所東京事務所 〒112-0004 東京都文京区後楽, Geoscience Lab. Koraku, Bunkyo, Tokyo, 112-0004

いて、地形や斜面表面などの幾何学的要因が与える影響について3次元解析を実施した。すなわち、2面から成る地形を設定し、それらの面は平均勾配によって表現し(1つの面は、水平面と一致)、さらに、各々の面には凹凸があるとして、細かく格子状に分割の上、斜面上の格子点の座標(標高)を設定する斜面モデルである。平均勾配、凹凸(roughness)と格子の大きさに注目した解析を実施した。このように条件を系統的に変化させて解析法の性能を表示しておくことは、技術者が解析法を選択し、その結果に基づいて工学的判断を行う際に重要であると考えている。このことは、他の解析手法においても例外ではないと考えられる。

2 3次元落石軌跡解析の概要

2.1 運動方程式の時間差分

ここで用いる計算モデルは、剛体の運動方程式の時間差分法⁷⁾に基づいた完全に動力学的な3次元モデルである。1つのブロックの並進に関する運動方程式は次のように表せる。

$$\ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}_i^c / m_i + \mathbf{g}_i \quad (1)$$

ブロックの重心の加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_i$ で示し、 $\mathbf{F}_i^c$ は地表面との接触力、 m_i はブロックの質量、 $\mathbf{g}_i$ は重力加速度ベクトルである。 i は1~3の範囲で、地形座標のベクトルの成分を表す。このモデルでは、重力方向と x_3 軸が一致する(Fig. 1)。

剛体の回転運動はオイラー式で表され、ブロックの慣性主軸 (ξ, η, ζ) に対して表される。

$$\begin{aligned} I_\xi \dot{\omega}_\xi + (I_\xi - I_\eta) \omega_\xi \omega_\eta &= M_\xi \\ I_\eta \dot{\omega}_\eta + (I_\xi - I_\zeta) \omega_\xi \omega_\zeta &= M_\eta \\ I_\zeta \dot{\omega}_\zeta + (I_\eta - I_\xi) \omega_\eta \omega_\xi &= M_\zeta \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 I_ξ, I_η, I_ζ は慣性主軸モーメント、 $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ は主軸に対する回転速度、 M_ξ, M_η, M_ζ はブロックの主軸周りのモーメントである。なお、本解析法では、直方体と正六角柱を用いた解析が可能である。

次式は、それぞれ時刻 t のブロック重心の移動速度と回転速度を表す。

$$\dot{\mathbf{x}}_i^{(t)} = \dot{\mathbf{x}}_i^{(t-\Delta t)} + \ddot{\mathbf{x}}_i^{(t)} \Delta t \quad (3)$$

$$\omega_a^{(t)} = \omega_a^{(t-\Delta t)} + \dot{\omega}_a^{(t)} \Delta t \quad (a = \xi, \eta, \zeta) \quad (4)$$

変位増分と重心位置は以下のように表される。

$$\Delta \mathbf{x}_i^{(t)} = \dot{\mathbf{x}}_i^{(t)} \Delta t \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_i^{(t+\Delta t)} = \mathbf{x}_i^{(t)} + \Delta \mathbf{x}_i^{(t)} \quad (6)$$

次式より、回転角増分が求まる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ -\cos \theta_3 / \sin \theta_1 & \sin \theta_3 / \sin \theta_1 & 0 \\ \cot \theta_1 \cos \theta_3 & -\cot \theta_1 \sin \theta_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \omega_\xi \\ \omega_\eta \\ \omega_\zeta \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\Delta \theta_1 = \dot{\theta}_1 \Delta t \quad (8)$$

ここで、 θ は地形座標(固定座標)と回転後の座標の角度、すなわちオイラー角を表す。ここに、固定座標系 (x_1, x_2, x_3) と慣性主軸系 (ξ, η, ζ) には、次のような変換が可能である。

$$(\xi \ \eta \ \zeta)^T = [T](x_1 \ x_2 \ x_3)^T \quad (9)$$

ブロックの頂点の新たな位置は(10)式となる。

$$\mathbf{x}_i^{v(t)} = \mathbf{x}_i^{(t)} + [T_{ij}] \mathbf{x}_j^v \quad (10)$$

ここに、 $\mathbf{x}_j^v$ は慣性主軸座標系内の頂点座標である。また、 $[T]$ は慣性主軸座標系と全体座標系間の変換を表すものである。成分の記述は既報⁶⁾に譲り省略する。

2.2 地表面との接触と接触力

地表面は三角形要素の分割し、できるだけ原地形に近づける。剛体要素1頂点 $P(x_1^v, x_2^v, x_3^v)$ の三角形要素への接触は、三角形要素の頂点座標を (x_1-x_2) 面に投影した後、次のように判定する。まず、投影した三角形内に (x_1^v, x_2^v) が存在すること、そして、三角形の3頂点を含む平面の方程式を $Z(x_1, x_2, x_3) = 0$ として、

$$Z(x_1^v, x_2^v, x_3^v) < 0 \quad (11)$$

となるとき、頂点 P が地表面に接していると判定する。1頂点の時間増分内の変位増分は次式で算定される。

$$\Delta U_i = \mathbf{x}_i^{v(t)} - \mathbf{x}_i^{v(t-\Delta t)} \quad (12)$$

接触力は、まず、接触していると判定した三角形要素に設けた局所座標系 (n, s, t) 内で算定される。この座標系では接触点を原点に、 n 軸をその面の法線方向に、 s および t 軸は三角形要素面上にとる。 ΔU_i は面に沿う接線成分と法線成分に分解される。

$$(\Delta u_s \ \Delta u_t \ \Delta u_n)^T = [Q][\Delta U_i] \quad (13)$$

$[Q]$ は全体座標系から局所座標系 (n, s, t) への座標変換マトリックスである。接触変位増分は接触力増分の算定に用いられる。接触力はバネ-ダッシュポットの並列配置により評価され、バネによる弾性成分 f_n^e, f_s^e, f_t^e (バネ係数 $k_n, k_s (=k_t)$)と粘性ダッシュポットによる成分 f_n^d, f_s^d, f_t^d (粘性係数 $\eta_n, \eta_s (= \eta_t)$)の和として次式となる。

$$\begin{aligned} f_n &= f_n^e + f_n^d \\ f_s &= f_s^e + f_s^d \\ f_t &= f_t^e + f_t^d \end{aligned} \quad (14)$$

当然、地表面との接触に際しては、摩擦角 ϕ を与えて、 f_s^d, f_t^d には摩擦に関する条件がつけられる。そののち、式(1)中の $\mathbf{F}_i^c$ は、

$$\mathbf{F}_i^c = [Q]^{-1}(f_s \ f_t \ f_n)^T \quad (15)$$

と求められる。 $\mathbf{F}_i^c$ は以下のように、重心回りのモーメントの計算に用いられる。

$$\mathbf{M}_a := \mathbf{M}_a - e_{abc} \mathbf{F}_c^c \mathbf{x}_b^v \quad (16)$$

e_{abc} は、交代記号である。

3 落石軌跡解析モデルの設定

3.1 斜面勾配と凹凸の設定

1章で述べたように、異なる平均勾配を有する2つの面からなる解析モデルを設定した。Fig. 1に一例を示す。まず、平均勾配 β と一致する傾斜を有する2つの平面を設定した後(この内、一面は水平面 (x_1-x_2) と一致させている)、水平面上に生成した一辺 d の正方形格子を斜面上に投影して斜面を小区画に分割する。斜面上の区画線交点には平均勾配により算出する高さに、局所的な凹凸

を表現する調整量を加えて、交点の標高 x_3 を決定する。凹凸の算出に際しては、正規分布（平均値 0, 標準偏差 σ ）より抽出した、平均勾配と局所的な凹凸で斜面を作成し、データ取得間隔の差が水平方向の軌跡の拡がりを与える影響を数値解析により表現する試みである。平均勾配 β と凹凸の指標 σ が同一であっても、 d により局所的には地形が異なることになる。

Table 1 と Fig. 1 に斜面モデルの平均勾配 β 、格子長 d および標準偏差 σ を記載している。解析全領域は、水平面 (x_1 - x_2) 上で $500\text{m} \times 250\text{m}$ の範囲とし、Fig. 1 に示すように、斜面部および水平部の長さをそれぞれ 250m とした。斜面上の小区画は、当然のことながら、長方形であり、 d が同一の値であっても、この長方形小区画の長辺の長さは、勾配により変化することになる。なお、解析においては、この小区画は、接触判定用の三角形に分割されている。落石岩塊を表現する剛体要素の基本形状には、立方体を選び、その 1 辺を 1m とした。この一辺長と対応させて、水平面上の正方形格子長 d を 2m , 5m , 10m を採用し、凹凸の程度を表現した。初期位置（初期重心位置 $(x_1, x_2, x_3) = (0, 125\text{m}, 250.5\text{m})$ ）において慣性主軸系 (ξ, η, ζ) は固定座標系 (x_1, x_2, x_3) に対して平行であるとし、初速度は 0 とした。計算に際して必要となる諸量は Table 1 の通りである。摩擦角 ϕ および反発係数 e_n は全領域一定とし、解析においては、前述の平均勾配 β 、小地形の変化ならびに要素形状に注目することにした。なお、Table 1 に示す e_n に対して、次式によって、粘性係数 η を算出した。⁸⁾

$$\eta = \frac{|\ln e_n| \cdot \eta_0}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e_n)^2}} \quad (17)$$

Table 1 Characteristics of block and slope model.

Block	Shape: Cubic, Hexagonal prism Density: 2.220Mg/m^3 Volume: 1m^3 Initial velocity: 0 (at rest)
Ground surface	Contact stiffness: $k_n=10\text{MN/m}$ $k_s=10\text{MN/m}$ Cohesion $c=0$, Friction angle $\phi=25^\circ$ Restitution coefficient $e_n=0.3$
Time step:	$\Delta t=1.0 \times 10^{-4}\text{s}$

Fig. 1 View of biplanar slope model.

e_n は、衝突面（接触面）法線方向の（衝突前後の）速度変化を表わす指標である。式 (14) の第 2 および 3 式に用いられる接線方向の粘性係数に、そのまま使用するのには注意が必要である。本解析法では、接触点における反力の算出を法線方向と接線方向に独立に行っているが、接触力の弾性成分間には摩擦の条件を適用している。摩擦の条件が適用されたとき、ダッシュボットの抗力は 0 となる。このような条件を与えた計算過程では、衝突後の接線方向速度は、入射角と摩擦角 ϕ の影響を受けることになる。すなわち、衝突前後の速度比の観点からすれば、 e_n を一定値として与えても、摩擦角に応じて、速度比は変化することになる。速度比を用いて、衝突前後のエネルギー損失を表現する手法もある⁹⁾が、多面体剛体要素の 1 頂点ごとに平面への接触を取り扱う場合には、接触頂点ごとに速度比に基づいてエネルギー損失を求めた後、要素全体についてその総和などを求める、あるいは、速度比を重心位置の速度に対して用いた後、落石要素を剛体と仮定して回転運動を考慮して各頂点の並進速度を決定する等の手順を考えざるを得ないと考えられる。いずれにせよ、摩擦角などの入力値と解析アルゴリズムが影響を与えることは間違いない。第 1 章にも述べたように、解析法の特徴（性能）を知って、それを利用することが重要であると理解している。

3・2 要素の初期姿勢と形状、反発係数、摩擦角

斜面平均勾配および局所的勾配変化に加えて、以下の条件について解析を実施した。地形情報以外の入力条件が軌跡の拡がりを与える影響を示すためである。

(1) 要素形状

要素形状に正六角柱（体積は 1m^3 ）を採用し、 $\beta=45^\circ$, $\sigma=0.2\text{m}$ とした。

(2) 要素初期姿勢

初期重心位置（一定）を与えた後、慣性主軸系 (ξ, η, ζ) が固定座標系 (x_1, x_2, x_3) に対して傾きを有するとして解析を実施した。 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の初期値は、 $-\pi/2 < \theta_1, \theta_2, \theta_3 < \pi/2$ に一様分布するとして試行ごとに決定した。要素形状は立方体のみである。 $\beta=45^\circ$, $\sigma=0$ として斜面は一様勾配の平面であり、局所的な変化はないとした。

(3) 要素寸法

(2) の条件において、立方体の一辺を 2m として解析を実施した。

(4) 反発係数および摩擦角

(2) の条件において、 $\phi=20^\circ, 30^\circ$ あるいは $e_n=0.5$ として解析を実施した。

4 解析条件の水平方向への軌跡の拡がりへの影響

4・1 斜面勾配と凹凸

Table 2 に示したように、立方体要素について、計 18 例の解析を実施した。実施に際しては、要素を斜面上部の境界線上に静置した状態（初速度 0）から、重力を作用させて運動を開始させた。平均勾配 β と偏差 σ を固定して斜面に対して 1000 回の試行を実施したが、その一試行ごとに斜面表面の凹凸を前述のように変化させている。軌跡の拡がりには、平均勾配 $\beta=30^\circ$ のときの斜面長

Table 2 Summary of the simulations for different values of σ/d using cubic and hexagonal prism element and the dispersion in terms of W/L .

			Grid size d (m)		
			2	5	10
Element	Roughness σ (m)	Average slope angle β (°)	W/L		
Cubic	0.1	30	0.183	0.041	0.039
	0.2	30	0.317	0.103	0.077
	0.1	45	0.119	0.042	0.032
	0.2	45	0.308	0.092	0.056
	0.1	60	0.071	0.029	0.023
	0.2	60	0.203	0.060	0.042
Hex.P.	0.1	45	0.097	0.040	0.030
	0.2	45	0.285	0.079	0.056

($L = 288\text{m}$) を基準として, $x_1 = L \cos \beta$ を落石要素が通過するときの 1000 回の試行における x_2 の最大値と最小値の差 W で表すことにした (Fig. 2).

Fig. 3 は, 格子長の差異が軌跡の拡がりに与える影響を $\beta = 45^\circ$ としたときの, $d = 2, 5, 10\text{m}$ について示している. $d = 2\text{m}$ では, $L = 288\text{m}$ において $W = 88.79\text{m}$ であり, $W/L = 0.308$ になる. 一方, $d = 10\text{m}$ では, $W/L = 0.056$ となっており, σ が一定のとき d の値が大きくなるにつれ, つまり, σ/d が小さくなるにつれ W/L が小さくなるのがわかる.

Fig. 4 は, β と d を一定としたときの結果である. ここでも, σ/d が小さくなるにつれ, W/L も小さくなる傾向にある. また, この図の凡例からもわかるように, 速度を読み取れるようにしている. なお, Fig. 4 では, 各色の表示している速度の範囲が, Fig. 3 および 5 とは異なっている. 速度について言えることは, 以下のようなである.

Fig. 2 Measurement of lateral dispersion W at a fixed travel distance L for $\beta = 30^\circ$ of the slope angle.

- σ/d が小さいほど, W/L は小さくなるが, 逆に, 斜面下端での速度は大きくなる傾向にある.
- Fig. 3 と Fig. 4 の比較は, 斜面傾斜角が大きいほど, 斜面下端の速度は大きくなることを示している.

σ の値が同一であっても, メッシュ間隔が変われば, 軌跡の拡がりは大きく変化することになり, 原地形をモデル化するには, 地形データの取得間隔に配慮する必要があるといえる. Fig. 3 (a) と Fig. 4 (a) を比較すると, 斜面下端における軌跡の拡がりは同程度となっているが, $\beta = 30^\circ$ のときの斜面長 $L = 288\text{m}$ であるのに対し, $\beta = 60^\circ$ では斜面長は 500m であり, 斜面長が長くなっていることに注意を要する. 各解析ケースにおいて, $x_1 = L \cos \beta$ となる地点において W を求め, 結果をまとめると Table 2 となる.

Fig. 3 Projected trajectories computed for synthetic slopes with mean angle of $\beta = 45^\circ$ for different cell size d . (element : cubic, $\sigma = 0.2\text{m}$).

Fig. 4 Projected trajectories computed for synthetic slopes with mean angle of $\beta = 60^\circ$ for different roughness σ . (Element : cubic, $d = 2\text{m}$).

Fig. 5 Projected trajectories computed for synthetic slopes with mean angle of $\beta = 45^\circ$ for different cell size d . (Element : Hexagonal prism, $\sigma = 0.2\text{m}$).

4・2 他の条件の影響と解析結果のまとめ

Fig. 5 は、要素形状の影響を表現するために実施した正六角柱の解析例である。この図より、立方体の解析結果と比べると W/L はやや小さいが、速度については大きな差は認められない、などの特徴が読み取れる。正六角柱の W/L は、Table 2 に示した。3・2 節に記述した条件変更の影響は Table 3 に示した。Table 2 中の $\beta = 45^\circ$ の場合の W/L の最小値 0.032 ($\sigma = 0.1\text{m}$, $d = 10\text{m}$) に比べ、 W/L は小さく、要素形状と要素寸法ならびに斜面表面の条件が同一であれば、斜面表面の凹凸の影響が最も大きいことがわかる。

以上の結果を総合して、 $\sigma/d-W/L$ 関係としてまとめたものが Fig. 6 である。この図から、以下のようなことがわかる。

- σ/d が大きいほど W/L は大きくなっており、軌跡の水平方向の拡がりが大きくなる傾向にある。
- 要素形状の影響を $\beta = 45^\circ$ の場合についてみると、立方体の W/L が正六角柱のそれに比べて大きくなるが、大きな影響は認めにくい。
- 傾斜の影響をみると β が大きいほど W/L が小さくなっていることがわかる。重力の斜面法線成分および斜面平行下向き成分の大小の影響と考えられる。

Fig. 6 Dependence of W/L on the normalized roughness σ/d .

Table 3 The dispersion in terms of W/L using cubic element with different values of input parameters.

Input parameter	Table 2	Used	W/L
Block orientation θ (°)	0	$-\pi/2 < \theta_1$, $\theta_2, \theta_3 < \pi/2$	0.019
Block size (m)	1	2	0.027
Frictional angle (°)	25	20 30	0.023 0.016
Restitution coefficient	0.3	0.5	0.025

($\beta=45^\circ$, $\sigma=0$, Element = Cubic)

このような解析法の系統的な解析例による検討は、Crosta⁴⁾らも実施している。Crosta は、彼らが開発した落石軌跡解析ソフト STONE を用いている。STONE は、質点系の解析ソフトであるので、本結果との一概な比較は避けなければならないが、 $d=2\text{m}$ 、 $\sigma=0.2\text{m}$ の場合を例示すると、 $\beta=30^\circ$ のとき、本解析では $W/L=0.317$ 、STONE では、 $W/L=0.098$ であり、また、 $\beta=60^\circ$ のとき、本解析では $W/L=0.203$ 、STONE では、 $W/L=0.048$ となっており、剛体を用いている本解析法が大きな W/L を示している。解析法の選択に際しては、解析モデルの特徴と入力条件に配慮することの必要性を示す事例と考えられる。

5 結 語

落石岩塊の形状が球形であり、また、斜面が凹凸のない、一様勾配の連続として存在するならば、落石の運動は鉛直断面内の解析で十分であろう。実際には、岩塊形状や斜面状態（地形およびその微視的部分（凹凸））の空間的变化による軌跡の水平方向の拡がりを知るため 3 次元解析が必要となる。

本解析では、模擬斜面を設定して、斜面の平均勾配と微小な地形変化が水平方向の拡がりを与える影響を例示した。入力値は解析上想定したものであるため、ここに示した結果に対しては定性的な評価しか実施できないが、

地形に関する情報の収集と解析モデルにおける再現が重要であることがわかる。実現場における検証は次段階の課題とするが、地形情報を精緻に求めても、解析モデル化の段階で粗く読み取ってしまうと、軌跡の推定精度は低下する、また、粗く地形情報を収集してしまうと、モデル化をいくら精緻に行っても推定精度は向上しないことを示せたと考える。また、ここでは、系統的な解析を通じて解析法の特徴・性能を検討することも重要であることを指摘したい。

参 考 文 献

- 1) K. S. Neil and G. V. Steven, "Probabilistic rockfall hazard assessment for roadways in mountainous terrain", Proceedings of the 3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards, pp.253-260 (2003).
- 2) M. Jaboyedoff, J. P. Dudt and V. Labiouse, "An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree", Natural Hazards and Earth Sciences, Vol.5, No.5, pp.621-632 (2005).
- 3) F. Desceudres and T. Zimmermann, "Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls", Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, pp.337-342 (1987).
- 4) G. B. Crosta and F. Agliardi, "Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories", Natural Hazards and Earth Sciences, Vol.4, No.4, pp.583-598 (2004).
- 5) J. P. Dudt and B. Heidenreich, "Treatment of the uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model for rock falls", Proceedings of the International Conference on Landslides, Davos, pp.507-514 (2001).
- 6) T. Nishimura, T. Seiyama, H. Kiyama and Y. Taniguchi, "A three-dimensional simulation model for rockfall using distinct element method", Proceedings of the 3rd International Symposium on Rock Stress, pp.449-454 (2003).
- 7) P. A. Cundall, "A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems", Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics, II-8, pp.129-136 (1971).
- 8) T. Omachi and Y. Arai, "How to determine mechanical properties for Distinct Element Method", Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.32A, pp.715-723 (1986).
- 9) T. Shimauchi, Y. Ohnishi, S. Nishiyama and N. Sakai, "Study on verification of rockfall simulation using improved DDA considering the characteristics of velocity ratio at impact", Journal of JSCE, JSCE, Vol.62-3, pp.707-721 (2006).