

3次元軌跡解析結果を用いた 落石遭遇確率の算定手順

西村 強^{1*}・橋本 純成¹・木山 英郎²

¹鳥取大学工学部 土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²鳥取大学名誉教授 (同上)

*E-mail:tnishi@cv.tottori-u.ac.jp

本研究では、3次元個別要素法による落石軌跡解析結果を用いて、道路通行車両が落石に遭遇する確率を算定する手法を提案する。まず、落石の軌跡や到達域を求めることにより、落石が道路に至る可能性を検討する。次に、落石軌跡が集中する部分において、車両と落石が同時に存在する確率を求めるのが本算定手順である。岩盤斜面崩壊や落石は、強度の不足などの素因に、(降雨や地下水浸透などによる)水圧の上昇や地震などの誘因が重なって発生するとされるが、ここで述べる手法では、そのような素因、誘因の発生確率は考慮していない。このため、求める数値は、当該地点に対する定量的な値とすることは出来ないが、複数の地点の危険度を比較する相対的な数値としては利用できると考えられる。

Key Words : Rockfall, Three-dimensional analysis, Frequency, Encounter

1. はじめに

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。また、脆い地盤が広く分布しているため、降雨や地震等により落石が発生し道路が寸断されることがある。また、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。防災の観点から対策工を講ずる必要がある。落石対策工を行う際には、落石の落下軌跡や到達距離を解析によって予測することが有効である。このようなことが、対策工の位置や規模の決定に重要な資料を与える。

本研究では、3次元個別要素法による落石軌跡解析結果を用いて、道路通行車両が落石に遭遇する確率を算定する手法を提案する。その手法では、まず、落石の軌跡や到達域を求めることにより、道路に岩塊が至る可能性を検討する。次に、落石軌跡が集中する部分において、車両と落石が同時に存在する確率を求める手法である。

岩盤斜面崩壊や落石は、強度の不足などの素因に、(降雨や地下水浸透などによる)水圧の上昇や地震などの誘因が重なって発生するとされるが、ここで述べる手法では、そのような素因、誘因の発生確率は考慮していない。それは、要因個々の発生確率の把握することが難しいからである。これに代わり、岩盤崩壊や落石の規模と発生頻度を想定し、3次元解析および遭遇解析の入力データと

している。素因、誘因の発生頻度よりも、それらの発生の結果である落石の発生頻度と地形によって左右される落石軌跡の予測によって、到達区間内における遭遇確率を求める手法である。算定される数値(確率)は、素因および誘因の発生確率の評価に基づいた解とはなっていないが、複数の地点の危険度を比較する相対的な数値としては利用できると考えられる。

2. 3次元落石軌跡解析の概要

(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¹⁾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運動方程式は次のように表せる。

$$\ddot{x}_i = F_i^c / m_i + g_i \quad (1)$$

ブロックの重心の加速度 $\ddot{x}_i$ で示し、 F_i^c は地表面との接触力、 m_i はブロックの質量、 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。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に対して表される。

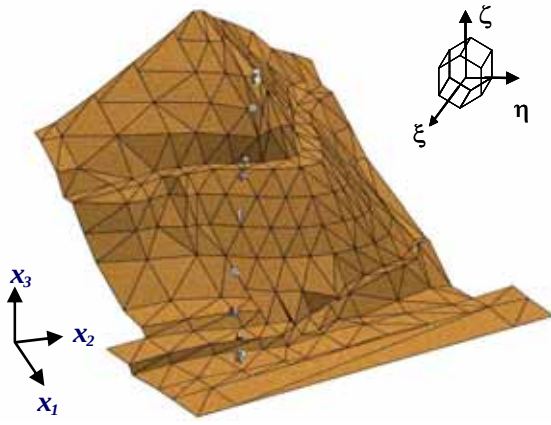


図-1 地形の3三角形分割と座標系

$$I_\alpha \dot{\omega}_\alpha + (I_\gamma - I_\eta) \omega_\gamma \omega_\eta = M_\alpha \quad (2)$$

I_α は慣性主軸モーメント、 ω_α は主軸に対する回転速度、 M_α 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。

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

$$\omega_\alpha^{(t)} = \omega_\alpha^{(t-\Delta t)} + \dot{\omega}_\alpha^{(t)} \Delta t \quad (\alpha = \xi, \eta, \zeta) \quad (4)$$

変位増分と重心位置は以下のように表される。

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

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \Delta x_i^{(t)} \quad (6)$$

次式より、回転角増分が求まる。

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

$$\Delta \theta_i = \dot{\theta}_i \Delta t \quad (8)$$

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。

$$\begin{pmatrix} \xi & \eta & \zeta \end{pmatrix}^T = [T] \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \end{pmatrix}^T \quad (9)$$

ブロックの頂点の新たな位置は(10)式となる。

$$x_i^{v(t)} = x_i^{(t)} + [T_{ij}] x_j^v \quad (10)$$

ここに、 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。成分の記述は省略する。

(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(図-1)。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。

$$\Delta U_i = x_i^{v(t)} - x_i^{v(t-\Delta t)} \quad (12)$$

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。

$$\begin{pmatrix} \Delta u_s & \Delta u_t & \Delta u_n \end{pmatrix}^T = [Q] \{ \Delta U_i \} \quad (13)$$

$[Q]$ 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。接触力は弾性成分 e_n, e_s, e_t と粘性ダッシュポット d_n, d_s, d_t による成分の和として次式となる。

$$\begin{aligned} f_n &= e_n + d_n, \\ f_s &= e_s + d_s, \\ f_t &= e_t + d_t. \end{aligned} \quad (14)$$

当然、地表面との接触に際しては、摩擦角 ϕ を与えて、 e_s, e_t には摩擦に関する条件がつけられる。そのうち、式(1)中の F_i^c は、

$$F_i^c = [Q]^{-1} \begin{pmatrix} f_s & f_t & f_n \end{pmatrix}^T \quad (15)$$

と求められる。 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。

$$M_\alpha := M_\alpha - e_{\alpha\beta\gamma} F_\gamma^c x_\beta^v \quad (16)$$

$e_{\alpha\beta\gamma}$ は、交代テンソルである。

3. 遭遇確率の算定手順

(1) 算定のための準備と手順の限界

ここに示す遭遇確率算定の手順は、図-2 に示すように、道路通行車両が遭遇するというシナリオによるものである。ここで、遭遇するとは、次のようなこととしてい

る．

- (i) 通行中の車両に落下してきた岩塊が衝突する，
- (ii) 道路上に落下していた岩塊を通行車両が避けきれず，衝突する．

従って，何らかの事由で駐停車中の車両への衝突は考慮していない．この図によれば，Branch 1 において，崩壊の大きさ（落石の体積）と年発生頻度の資料，Branch 3 で該地点の交通量に関する資料，そして，Branch 4 において，通行車両などの財産に関する資料を加味すれば，被害の想定ができることになる．解析の役割は，Branch 2 において，たとえば，落石が道路に至るかを示すことである．Branch 1 において，斜面上の岩塊の不安定度を定量的に把握できることが望まれるが，これは容易な問題ではない．このことから，最近の落石や岩盤斜面崩壊に関する研究は，むしろ，過去の落石や崩壊の履歴情報に基づいたハザードの評価とリスク分析の観点から進められることが多い．しかしながら，必要となる崩壊の履歴情報すら，ほとんど存在していないのが現状のようである．たとえば，Guzzetti の報告²⁾には，イタリア国内で発生した地すべりや岩盤崩壊による災害事例を過去数世紀にもわたって調査した例をまとめている．Stoffel³⁾は，1 地点における落石の発生履歴を知ることを目的として，年輪年代学（dendrogeomorphology）を利用して，立ち木に残る落石の衝撃痕をもとに，発生頻度を求める研究を実施している．一方，Singh⁴⁾らは，数年間の現地計測と文献調査に基づいて，崩壊規模 - 年発生回数関係を推定した後，複数の地点の崩壊遭遇危険度を推定している．彼らの求めた崩壊規模 - 年発生回数の関係は，地震学で用いられる Gutenberg-Richter 式と同様の形となっている．以上のように，崩壊規模—頻度関係の導入は，リスク評価の観点からは，重要な項目である．本文では，遭遇確率算定の手順を示す範囲に限定して，岩塊体積等の入力

値を解析上の値と仮定して，次章の解析を実施している．なお，過去の資料に基づいて遭遇確率を算定すれば，その資料の確からしさの影響を受けること，さらに，本例では，数値解析法に導入されている仮定や係数の値にも影響されることを認識しておく必要がある．このようなことから，算出される数値は，その地点の遭遇確率を定量的に示す値として用いることには問題があるが，複数の地点の危険度を比較し，対策の優先順位を決定する際等の利用には有効であると考えている．

(2)算定手順

質量 m_i を有する岩塊の落下発生回数を年 F_i 回であると想定して遭遇確率の算定手順を述べる．図-2 で言えば，Branch 3 に相当する部分の記述となる．落石がある対象区間に時間 ΔT だけ存在する確率は次のようになる．

$$P(R_i) = \frac{F_i \Delta T}{365 \times 24 \times 3600} \quad (17)$$

一台の車両の占有長さ L_{min} と定義して，試行回数 N の軌跡解析結果より，図-3, 4 中 A-A' 線上で長さ L_{min} を移動させて，区間長 L_{min} 内を通過軌跡数 N_p が最高となる位置を求める．この区間に対する $P[R_i]$ は次式となる．

$$P(R_i) = \frac{F_i \Delta T}{365 \times 24 \times 3600} \times \frac{N_p}{N} \quad (18)$$

ここで，車両の平均時速を V_{avg} (km/h) として ΔT 間の移動距離を 1 台の車両に対する L_{min} としして用いる．当該地点の一日あたりの交通量を ADT (台/日) とすれば，この一区間に車両が存在する確率は，

$$P(V) = \frac{ADT \times L_{min}}{24 \times V_{avg} \times 1000} \quad (19)$$

この式より，車両が存在する確率は，平均時速をもとに 1 台の車両の移動距離に対して交通量を勘案した車両の空

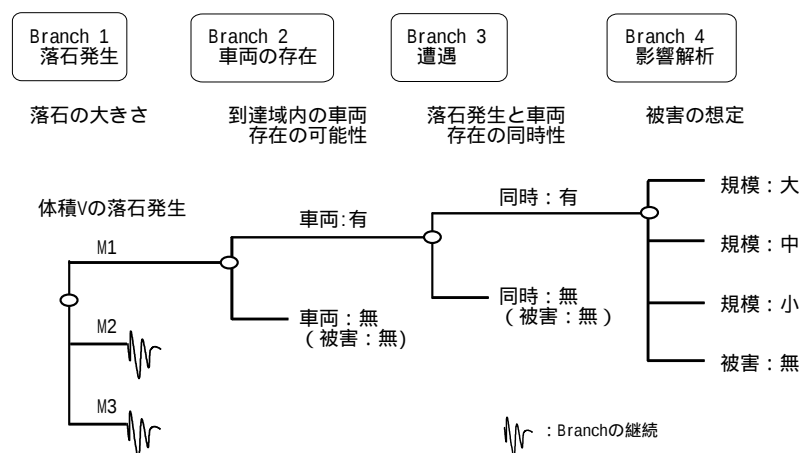


図-2 落石遭遇確率の算定手順

間的存在割合として求めていることになる．車両の存在と落石の発生は独立の事象と考えるので，遭遇確率 $P(E)$ および年発生回数 E は次式によって求められる．

$$P(E) = P(R_i) \times P(V) \quad (20)$$

$$E = P(E) \times ADT \times 365 \quad (21)$$

4. 遭遇解析例

(1) 解析定数の設定

落石の解析を図-3 および 4 に示す尾根および谷地形の 2 つの地形について実施した．解析においては，正六角柱の 1 辺の長さが 1m (体積 2.6m^3) の岩塊の落下発生回数が 1 年 1 回すなわち $F_f=1$ (回/年)であると仮定している．また，立方体要素の場合は，この体積に等しくなるように，1 辺の長さを決めている．地表面と岩塊の接触に関する係数 k_n , k_s , ϕ には，次のような値を用いた．

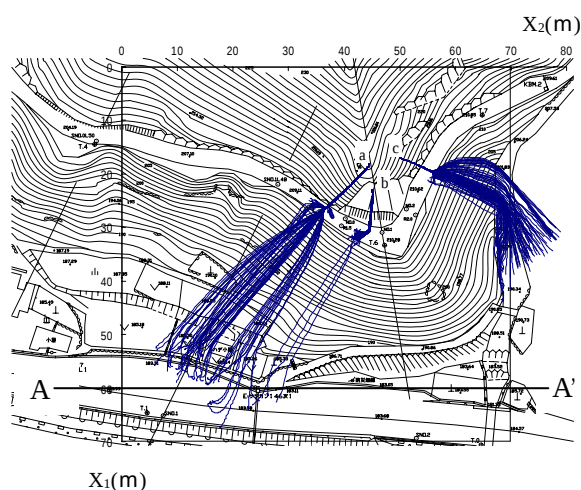
$$k_n = k_s : 1.0 \times 10^7 (\text{N/m})$$

$$\phi=30^\circ$$

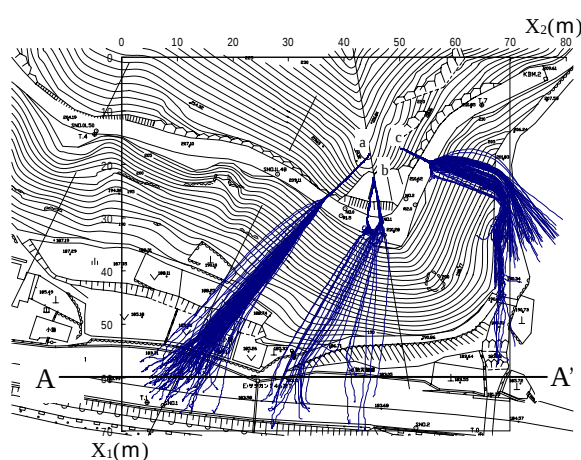
このうち k_n , k_s の数値は計測や実験等に基づく値でなく，ブロックを静的に地盤上に置いたとき，地盤への食い込み量が大きくなる(この例では，要素の 1 辺長に対して，食い込み量が 1% 程度になるように設定している)ように配慮したものである．落石に関する解析では，地表面への衝突を法線方向および接線方向速度比によって表現する場合が多い．このように衝突前後の速度変化に注目すれば，ここで述べた接触モデルでは， k_n , k_s の絶対値そのものよりも，ダッシュボットの係数に注目すべきである．そこで，臨界減衰係数に対して，どの程度の減衰係数を用いるか(すなわち，減衰定数)との観点からダッシュボットの減衰係数 η と反発係数 e を関係付ける式として次式を導入した⁵⁾．

$$\eta = \frac{|\ln e| \cdot \eta_0}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (22)$$

ここに， η_0 は臨界減衰係数である．そして，モンテカル

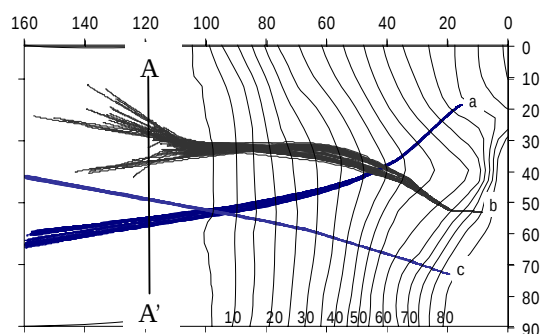


(a) Cubic

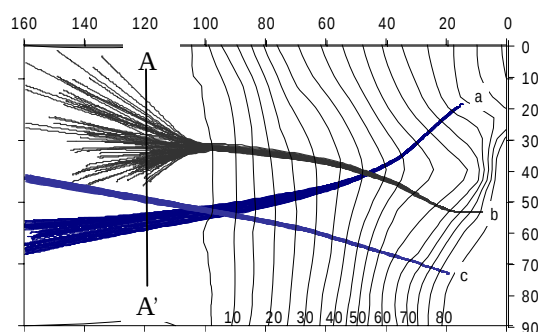


(b) Hexagonal prisms

図-3 軌跡の水平面への投影図
(尾根地形)



(a) Cubic



(b) Hexagonal prisms

図-4 軌跡の水平面への投影図
(谷地形)

口法を導入して接触の度に反発係数を決定し、式(22)により η の値を求めた。すなわち、図-3 および 4 に示す解析領域内における値は、 0.1 ± 0.02 の区間内に一様分布すると仮定して、乱数を用いて反発係数を決定した。なお、この0.1という値は、崖錘や敷砂等の地表面への剛体の衝突に相当する値と考えられる^{6),7)}。また、立ち木等の障害物は考慮していない。

(2)遭遇確率の算出

図-3 は尾根地形、図-4 は谷地形での落石要素の重心軌跡の水平面への投影図を示している。落石要素の初期位置は、いずれの地形においても、上部の a～c 点の3箇所を仮定して、各点ごとに1000回の試行を実施した。図中の軌跡は、100例を描いたものである。図より、尾根地形、谷地形のどちらも初期位置によって落下方向に差異が生じているが、全て最大傾斜方向に落下している。また、尾根地形では到達域幅が広くなりやすく、谷地形では集中しやすい傾向が見られる。要素形状で比較すると、どの初期位置に関しても正六角柱の方が停止するまでの距離が長くなる傾向が見られる。特に、図-3 では a 点より運動を開始させると、図(a)の立方体では、A-A'線を通することはないが、図(b)の正六角柱では、A-A'線を通していることから、要素の形状に依存しやすいことがわかる。これは、頂点が増えたことにより立方体に比べて転がりやすくなったためと考えられる。

$ADT=200$ (台/日)、 $V_{avg}=50$ (km/h)として、3.に述べた手順に従い、算出した落石遭遇確率を表-1 に示す。なお、本例では、 ΔT を自動車走行時に運転者が危険察知して制動をかけ始めるまでの時間として考え、1秒とした。そして、 $V_{avg}=50$ (km/h)走行時の $\Delta T=1$ (sec)の車両の移動距離として、 $L_{min}=14$ m を採用した。以上より、注目線分上の通過幅という観点からみれば、尾根状地形の幅が広がっているが、遭遇確率でみれば、軌跡が集中する傾向にある谷地形において、その数値は高くなることが示されている。

5. まとめ

本文に述べた解析例では、遭遇確率を該当地点の落石発生頻度と車両の存在確率に依存するものとして算出した。その手順では、崩壊高さや斜面の平均勾配をもとに、経験的に崩壊土や落石の到達域を求める手法に代わり、3次元軌跡解析法を用いて、より定量的に到達域を推定することを行った。素因・誘因の発生確率を考慮した手順ではないことから算出した遭遇確率は、対象地点の'真の遭遇確率'ではなく、むしろ、過去の落石発生頻度に基づいて他の地点と危険性を比較する、いわば、相対的な数値としての利

表-1 遭遇確率の算定結果

(a) Vertex-shaped slope

Block		P(Ri)	P(V)	P(E)	E
Cubic	a	2.73×10^{-9}	0.004	6.36×10^{-12}	4.65×10^{-7}
	b	1.59×10^{-9}	0.004	3.70×10^{-12}	2.70×10^{-7}
	c	0	0.004	0	0
Hexagonal prisms	a	1.12×10^{-8}	0.004	2.60×10^{-11}	1.90×10^{-6}
	b	5.33×10^{-9}	0.004	1.24×10^{-11}	9.07×10^{-7}
	c	1.59×10^{-10}	0.004	3.70×10^{-13}	2.70×10^{-8}

(b) Valley-shaped slope

Block		P(Ri)	P(V)	P(E)	E
Cubic	a	3.17×10^{-8}	0.004	7.40×10^{-11}	5.40×10^{-6}
	b	1.89×10^{-8}	0.004	4.40×10^{-11}	3.21×10^{-6}
	c	3.17×10^{-8}	0.004	7.40×10^{-11}	5.40×10^{-6}
Hexagonal prisms	a	3.17×10^{-8}	0.004	7.40×10^{-11}	5.40×10^{-6}
	b	7.64×10^{-9}	0.004	1.78×10^{-11}	1.30×10^{-6}
	c	3.17×10^{-8}	0.004	7.40×10^{-11}	5.40×10^{-6}

用価値があると考えらるべきである。また、斜面に生じる変化(地形変化、外力や強度劣化など)を考慮して、結果を逐次見直していく必要性など、注意点もあるが、複数の地点の対策の必要性を取り扱うとき、優先的に対策を施すべき地点の選定には有用な情報を得ることはできる。今後、3次元解析に用いる仮定やパラメーターの値の選択への資料の蓄積と活用を実施していく必要がある。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. *Symposium on rock mechanics*, Nancy, Vol. 2, pp.129-136, 1971.
- 2) Guzzetti, F. : Landslide fatalities and the evaluation of risk in Italy, *Engineering geology*, Vol. 58, pp. 89-107, 2000.
- 3) Stoffel, M. : A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: The role of dendrogeomorphology in natural hazard research, *Natural Hazards*, Vol. 39, pp.51-70, 2006.
- 4) Neil, K. S. and Steven, G. V. : Probabilistic rockfall hazard assessment for roadways in mountainous terrain, *3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazard*, 2003.
- 5) Nishimura, T., Seiyama, T., Kiyama, H. and Taniguchi, Y. : A three-dimensional simulation model for rockfall using distinct element method, *Proceedings of the 3rd international symposium on rock stress*, RS Kumamoto 03, pp.449-454, 2003.
- 6) (社)日本道路協会 : 落石対策便覧に関する参考資料 - 落石シミュレーション手法の調査研究資料, pp.351-375, 2002.
- 7) Heidenreich, B. and Labiouse, V. : Small scale experimental study of

PROBABILISTIC ROCKFALL ENCOUNTER MODEL USING A THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION METHOD

Tsuyoshi NISHIMURA, Junsei HASHIMOTO and Hideo KIYAMA

A probabilistic rockfall encounter model using a three-dimensional numerical simulation is presented to study the traffic safety for roadways in mountainous terrain. The model consists of a rockfall path analysis and an encounter analysis. The three-dimensional rockfall path analysis, which is based on the equation of motion of rigid body, produces all possible trajectories and end points of potential falling rocks to delimit the endangered zone on the road at a given site. The probability of encounter is dependent on the probability that a vehicle and a falling rock will be in a same trial-segment in the zone. In this paper, the probability of encounter is calculated at two roadways in mountainous terrain.