

(31) シミュレーションによる落石の危険度判定手法について

STUDY ON THE SIMULATION TO EVALUATE THE RISK OF ROCK FALLS

照井真司*, 榎谷浩**
Shinji Terui, Hiroshi Masuya

*金沢大学大学院自然科学研究科修士課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間)

**工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間)

キーワード: 落石, 衝突, 植生
(Rock Fall, Collision, Vegetation)

1. まえがき

日本は国土の4分の3が山岳, 丘陵地で占められている上, 地質は度重なる造山運動の結果, 極めて脆弱かつ複雑なものになっている. さらに, 台風や梅雨前線による集中豪雨, 冬における積雪・凍結などの厳しい気象条件にあること, また環太平洋造山帯に属した世界でも有数の地震国である. このため, 落石, 土石流, 雪崩などによる道路災害が毎年あとを絶たず, 時には人命・財産を奪い, 交通を遮断し, 地域住民の生活が脅かされることもある.¹⁾

また, 交通量の多い道路が山間部にも建設されるようになったため, 従来は落石が発生しても災害に至らなかったものが落石災害となり, 大きな問題として取り上げられるようになってきた.

環境条件が厳しいこと, 生活基盤の整備に伴って新たな災害の可能性が発生したことなどから, 近年では落石災害防止の必要性が高まり, 落石に関する研究開発が求められるようになってきた.

落石の速度が明らかになれば, 落石防護柵の設計に必要な落石の運動エネルギーや落石覆工の設計に必要な衝撃力を算定することができる. また, 跳躍量(飛翔量)が明らかになれば落石防護柵の高さを決定することができる. さらに, 落石の落下経路が判明すれば, 落石防護施設の設置位置を確定することができる. 以上のように, 対象とする落石の規模や発生位置などの予測, 斜面上の落石の運動形態, 防護施設位置における衝撃力, 運動エネルギーなどが必要とされており近年積極的な研究が行われている.²⁾

そこで本研究においては, 効果的に落石防護施設設置に必要な落石挙動の解析手法を提示し, その後, 植生を考慮した解析手法について説明している. 最後に基本的なシミュレーション例と, 実際の斜面での適用例を示す.

2. アプローチ

2.1 落石挙動の解析手法

(1) 斜面のモデル化

落石の運動を解析する場合, 実際の斜面には大小様々な凹凸が存在するが, これを完全にモデル化するのは困難であるため, 本研究においては図-1のように, 小さな凹凸は無視をして, 大きな変化点のみに着目し斜面を三角形の平面に分割してモデル化した. すなわち, 本研究においては図-1に示されるように, 実際の斜面は n_s 個の三角形平面と n_p 個の節点で表されるものとする.

このとき, 斜面のある任意の一つの三角形平面Sは次式で表される.

$$aX + bY + Z = d \tag{1}$$

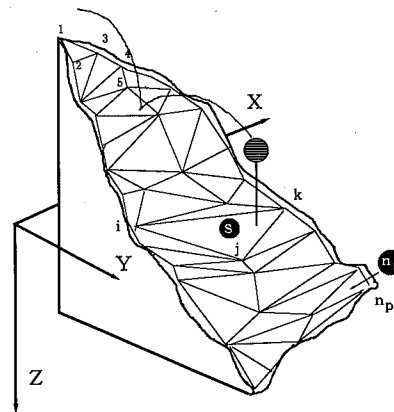


図-1 解析における斜面平面要素と節点

(2) 落石のモデル化

様々な形状の落石を忠実に反映できる運動方程式をつくる事は非常に困難である. また一つの形状とすることについても問題はある. しかし, 本研究においては落石を球と仮定して, その方程式を用いることにした. 球であると回転運動を考える時に回転の中心が一つであることや, 斜面の垂直抗力が落石の重心方向を向くことから

方程式をつくる事が容易であるため、球であるという仮定を用いた。

(3) 落石位置判定

落石の運動を解析するためには、考えている時刻にその落石がどの斜面上にあるかを判定しなければならない。そこで図-2に示すように落石がある斜面上にある時、その斜面の三角形平面にモデル化した平面Sと節点*i*, *j*, *k*のX-Y平面への投影を面S'と点*i'*, *j'*, *k'*とすると、*i'*から*j'*への変位ベクトルをu, *i'*から*k'*への変位ベクトルをvとすると次式のようになる。

$$\mathbf{u} = (X_j - X_i, Y_j - Y_i) \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = (X_k - X_i, Y_k - Y_i) \quad (3)$$

また*i'*から落石位置までの変位ベクトルをPとすると次式を満たせば落石は斜面のモデル化した平面S内SあるいはS上にあると判定できる。

$$\mathbf{P} = s\mathbf{u} + (1-s)\mathbf{v} \quad (4)$$

ただし $0 \leq s \leq 1$ 。

さらに、ある斜面上に落石が存在することが上式より確認できた場合、その斜面に落石が接しているかどうかは、落石の半径*r*を球と仮定すると次式で判定できる。

$$\frac{|aX_r + bY_r + Z_r - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \leq r \quad (5)$$

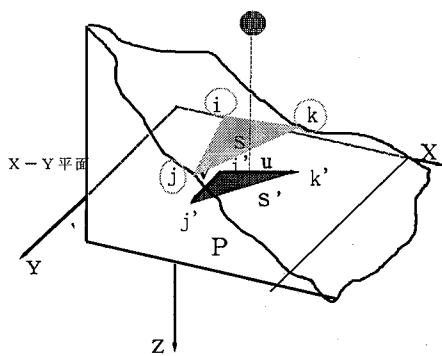


図-2 落石の位置判定

右辺は落石中心から斜面までの垂直距離であるため、これが半径*r*より小さい場合には、落石が斜面に接触していると考えられる。ここで*X_r*, *Y_r*, *Z_r*は落石中心の座標である。

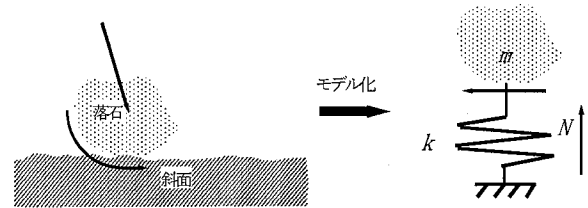
(4) 落石と斜面の接触

従来のシミュレーション手法では、落石と斜面の衝突が瞬時に起こり、衝突後の落石の運動変化は反発係数と低減係数、あるいは速度エネルギー比を用いて取り扱われている。しかしながら、このような手法では落石の回転運動の変化を説明することができない。

本研究では、落石の回転運動に大きく影響を与える落石

に対する接線方向力を重要と考え、衝突時に落石が斜面よりある摩擦力を受けると考えた。これにより落石の回転運動に変化が生じ、結果として跳躍運動にも影響を与える。

そこで、図-3に示すように落石の衝突時に斜面地盤との間に接触バネを仮定した。バネ定数を*K*としバネは線形弾性で圧縮力だけを伝えるものとし、落石を剛体であると仮定すると、斜面地盤をモデル化したことになる。



落石と斜面との接触

k: 地盤(斜面)の等価ばね

N: 斜面法線方向抗力

μ : 落石と地盤間の摩擦係数

m: 落石の質量

図-3 落石と斜面の接触

(5) 落石挙動の基本解析方法のフローチャート

(1)から(4)で示した事柄を用いた、落石挙動解析の流れを図-4のフローチャートに示す。

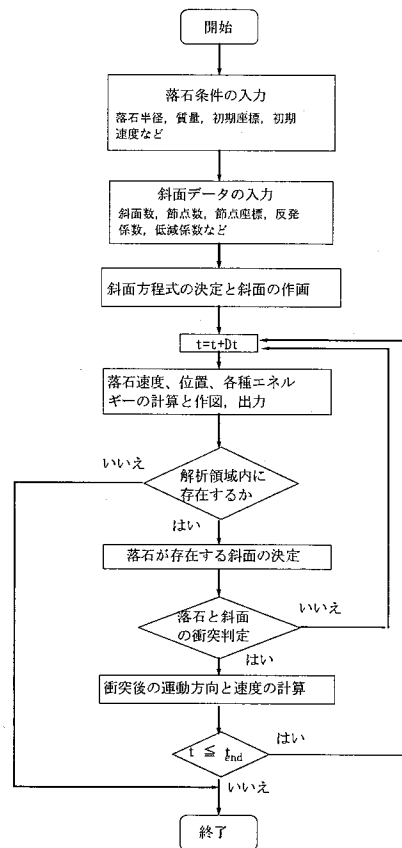


図-4 落石挙動の基本解析方法のフローチャート

2. 2 植生を考慮した解析

(1) 植生のモデル化

図-5に示すように、実際の斜面における落石の運動を解析するには、植生の影響を考慮する必要がある。実際の植生には、枝葉が存在し、幹の太さも一定ではないが、これをモデル化するのは困難なため、本研究では、枝葉は考慮せず、木立の幹の太さを一定とした。また、すべての木立は全体座標系においてX-Y平面に垂直に立っているものと仮定する。図-5に木立のモデル化を示す。木立は高さ h_i (m)、幹の太さ(木立の直径) ϕ_i (m)、X-Y平面へ投影した単位面積あたりの木の本数(樹木密度)を ρ_0 (本/m²)とした。

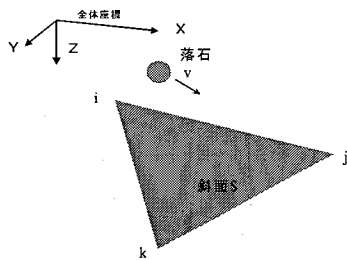


図-5 斜面上での植生の存在

(2) 木と落石の衝突判定

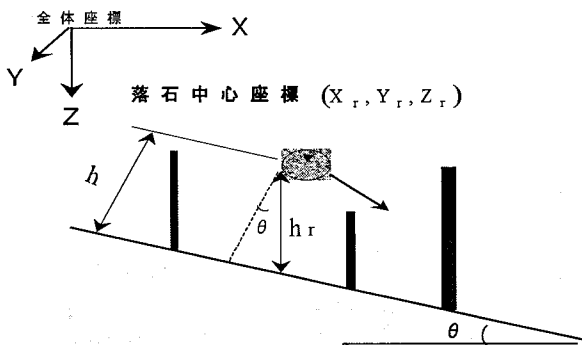


図-6 斜面と落石の位置関係

ある斜面上に落石が存在するとき、落石の跳躍量を h とすると、

$$h = \frac{|aX_r + bY_r + Z_r - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (6)$$

と表すことができる。ここに、 X_r, Y_r, Z_r は落石の中心座標、 a, b, d は落石鉛直下方の斜面方程式の係数である。この斜面からの落石の鉛直距離を h_r とすると、 h_r は、

$$h_r = \frac{h}{\cos \theta} \quad (7)$$

と表すことができる。図-6に落石と斜面の位置関係を示す。落石の跳躍高さより木の高さが高いとき、落石は木に衝突する。そこで密度 ρ_0 のうち、落石の高さ h_r 以上の木の密度を求める必要がある。高さ h_r 以上の木立の密度 ρ は、次式のように表わされる

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \int_{h_r}^{\infty} f_x(h) dh \\ &= \rho_0 \frac{1}{\sigma_{h_i} \sqrt{2\pi}} \int_{h_r}^{\infty} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h - M_{h_i}}{\sigma_{h_i}} \right)^2 \right] dh \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、落石の直径を ϕ_r 、樹木の直径を ϕ_t とし、落石が Δt 秒間に v (m/s)の速度で Δl (m)進むとすると、 Δt 秒間に落石が衝突する樹木の本数は、図-7に示す衝突可能領域を考慮することにより、

$$(\phi_r + \phi_t) \Delta l \rho \quad (9)$$

となり、これは落石が樹木にあたる衝突確率となる。³⁾

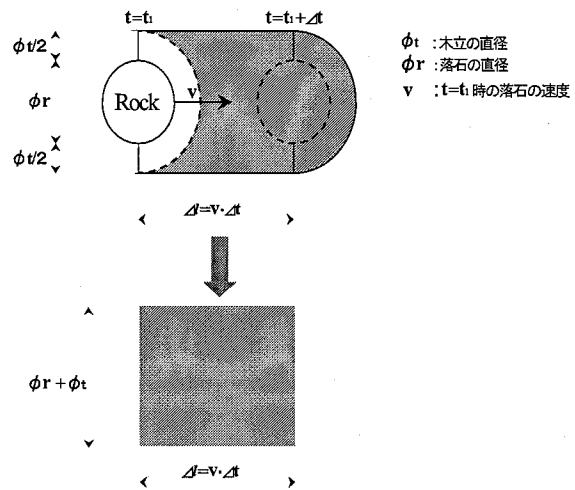


図-7 木立への衝突可能領域

本解析では、この衝突確率に基づき乱数によって衝突判定することとする⁴⁾。

(3) 3次元平面斜面を用いた解析

a) 木の高さの影響

長方形の斜面(図-8参照)を用いて、木の高さを20m、5mと変化させた場合について解析した。解析条件として、木の半径0.1m、落石半径は0.3m、質量1000kg、斜面の反発係数は0.8、摩擦係数は0.1、ばね定数 $k=10^6$ (N/m)、木と落石の反発係数は0.2、摩擦係数は0.1、樹木密度は0.2(本/m²)とした。

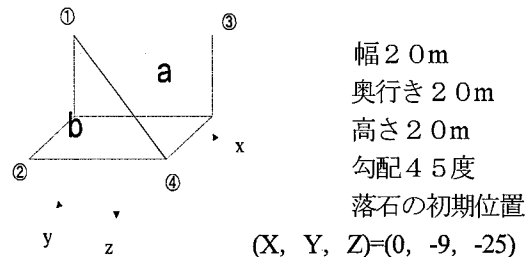


図-8 植生の基本的シミュレーションに用いた平面斜面

図-9 は木の高さ 20m の場合の軌跡 (x-y 平面) であり, 図-10 は木の高さ 5m の場合の軌跡 (x-y 平面) である。図-6 に示したように, 落石は跳躍しながら斜面を落下してくるため, 木の高さが高いほうが衝突しやすい。この場合は木の高さを 20m にしたときの衝突回数が 3 回, 5m にしたときは衝突回数が 2 回となっている。しかし, これだけでは単純に比較できない。そこでそれぞれ同じ条件で 10 回ずつ解析を行なってみた。すると木の高さを 20m にしたときは平均衝突回数 2.3 回, 5m にしたときは 0.8 回となり, 20m のほうが木に当たる回数が多くなり, 予想される現象をよく再現している。

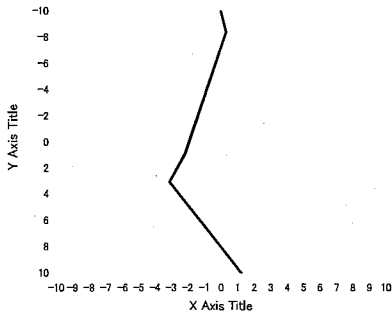


図-9 木の高さ 20m の場合の軌跡 (x-y 平面)

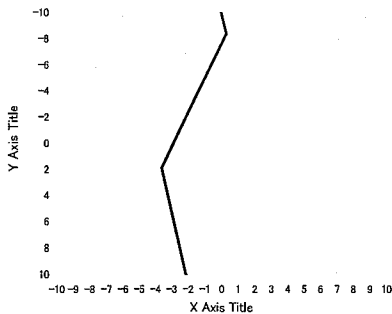


図-10 木の高さ 5m の場合の軌跡 (x-y 平面)

b) 木の半径の影響

斜面を 2 等分した斜面 (図-8 参照) を用いて木の半径を 1.2m, 0.2m と変化させた場合を解析した。解析条件として, 木の長さ 10m, 落石半径は 0.3m, 質量 1000kg, 斜面の反発係数は 0.8, 摩擦係数は 0.1, ばね定数 $k=10^6$ (N/m), 木と落石の反発係数は 0.2, 摩擦係数は 0.1, 樹木密度は 0.2 (本/m²) とした。

図-11 は木の半径 1.2m の場合の軌跡 (x-y 平面) であり, 図-12 木の半径 0.2m の場合の軌跡 (x-y 平面) である, 木の半径が大きいくほど衝突可能領域が大きくなる, つまり衝突確率が大きくなるため衝突回数が増加する。この場合は木の半径が 1.2m の時, 衝突回数が 17 回で, 0.2m の時が 6 回となっている。なお, (9) の式から求められる理論値は 1.2m の時 16.97 回, 0.2m の時

5.66 になる。高さの影響を調べた時と同様に, 同じ条件でそれぞれ 10 回ずつ解析を行なってみる。すると半径が 1.2m の時は平均衝突回数 16.5 回, 0.2m の時は 6.2 回となり半径が大きいくほど衝突回数が増えるという現象が再現されている。

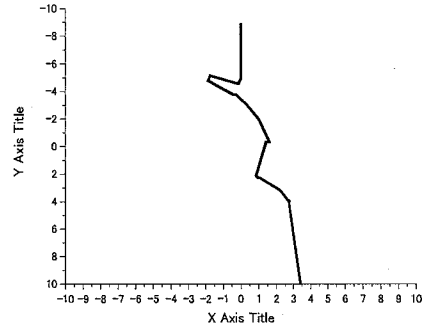


図-11 木の半径 1.2m の場合の軌跡 (x-y 平面)

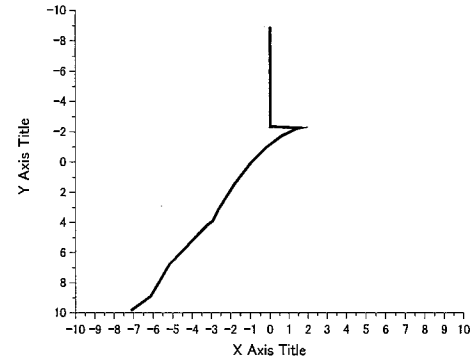


図-12 木の半径 0.2m の場合の軌跡 (x-y 平面)

3. 実際の斜面への適用事例

解析場所は白山市山間地で, 解析理由は新しく橋梁を建設するため, それにあたって危の険度評価を試みた (図-13 参照)。条件は落石半径 0.4 (m), 落石密度 1000 (Kg/m³), 落石質量 1000 (kg), 斜面と落石の反発係数 0.3, 斜面と落石の標準偏差 0.15 とした。

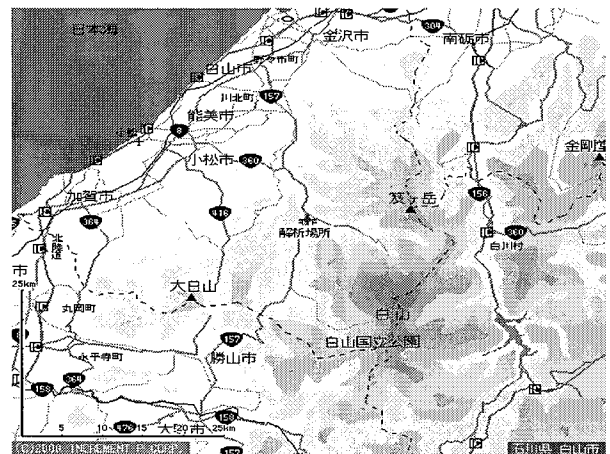
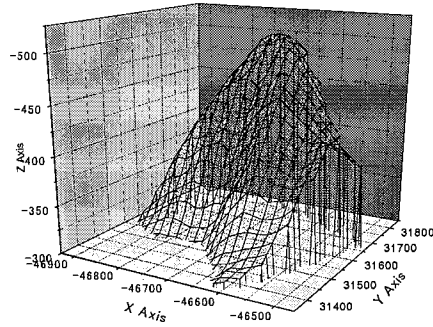


図-13 解析対象とした斜面の位置



対象幅 475m 対象奥行き 475m 対象高さ 200m

図-14 解析斜面の3次元図

表-1 植生条件・落石初期位置

	木の 高さ	木の 半径	樹木密度	落石初期位置 (X, Y, Z)
植生 なし	—	—	—	(-46688, 31780, 490)
植生 あり	10 (m)	0.2 (m)	0.01 (本/m ²)	(-46688, 31780, 490)

図-14は解析場所の3次元図で、対象幅475m、対象奥行き475m、対象高さ200mである。表-1は、植生条件・落石初期位置を示したものである。図-15は植生のない場合の軌跡(x-y平面)を、図-16は、植生がある場合の軌跡(x-y平面)を、図-17は、植生のない場合の3次元軌跡を、図-18は、植生がある場合の3次元軌跡を、図-19は、植生のない場合の落石の落下終了地点x分布を、図-20は、植生のない場合の落石の落下終了地点x分布を示したものである。

図-15と図-16から植生がある場合には、落下経路が複雑になることが分かる。図-19と図-20から最終落下位置は植生がある場合も、無い場合も平均位置はさほど変わらないが、標準偏差が大きく違い植生がある場合の落下最終位置の分布が広がっていることが分かる。

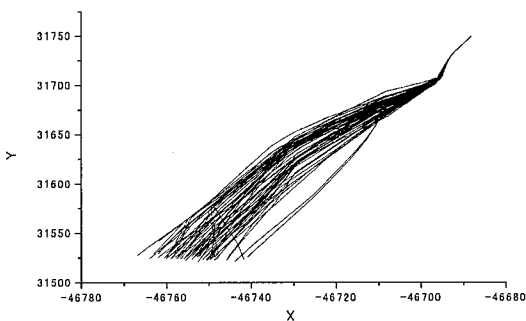


図-15 植生のない場合の軌跡 (x-y平面)

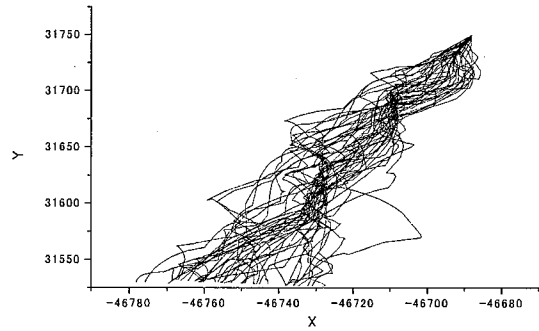


図-16 植生がある場合の軌跡 (x-y平面)

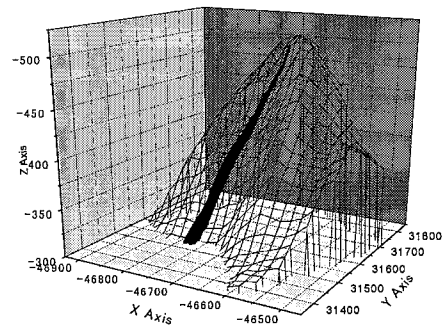


図-17 植生のない場合の3次元軌跡

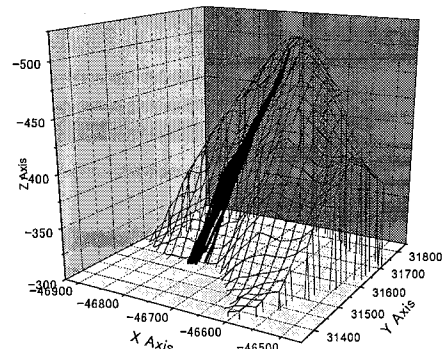
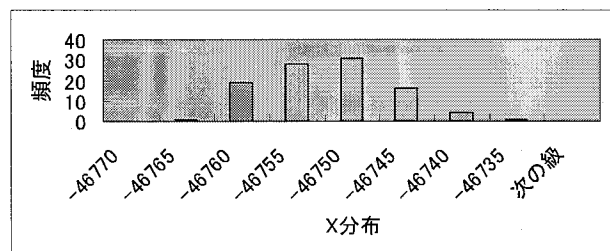
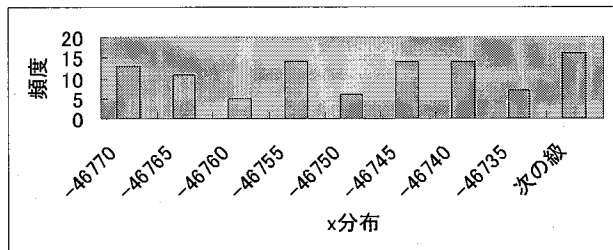


図-18 植生がある場合の3次元軌跡



平均-46754.5m 標準偏差5.9m

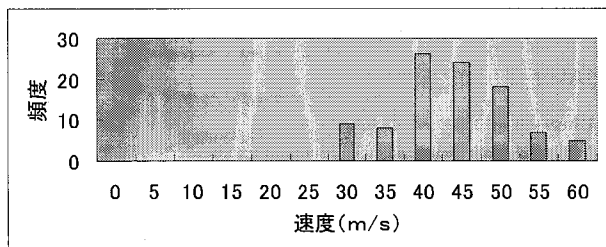
図-19 植生のない場合の落石の落下終了地点 x 分布



平均-46754.2m 標準偏差 17.5m

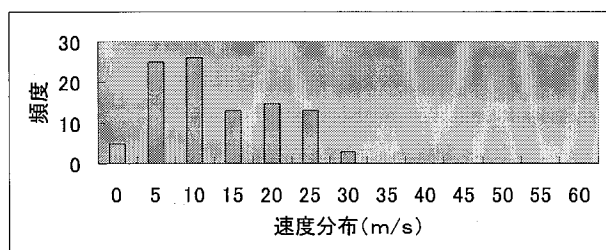
図-20 植生のない場合の落石の落下終了地点 x 分布

図-21 は、植生の無い場合の最終落下速度分布を、図-22 は、植生があるばあいの最終落下速度分布を示したものである。図-21 と図-22 のグラフと落下終了速度平均と標準偏差を用いて植生が無い場合と植生がある場合を比べると、グラフからは速度分布位置の違いがわかり、標準偏差はさほど変わらないが、植生がある場合は、無い場合に比べて落下終了速度平均が早いことが分かる。これは植生に衝突することにより落石のエネルギーを吸収していることが原因である。



平均 37.5 (m/s) 標準偏差 7.4 (m/s)

図-21 植生の無い場合の最終落下速度分布



平均 11.5 (m/s) 標準偏差 6.6 (m/s)

図-22 植生がある場合の速度分布

4. まとめ

本論文では、3次元斜面における落石運動シミュレーション手法について解説し、植生の影響の考慮方法について提示した。またいくつかのシミュレーションを行いその結果を提示した。植生の影響があっても最終落下位置の平均値は変わらないということと、植生の影響から最終落下位置分布が広がるということと、植生により落石のエネルギーを吸収させ最終速度を低下することを示

した。これらの研究から、落石防護施設をより効果的に設置するために必要な落石の挙動と植生の影響の把握が可能となった。これにより、落石対策を効率的に実施することができる。今後の課題として、実斜面における木の衝突に対しての合理的なパラメーター設定などがあげられる。

謝辞

実際の斜面への適用事例では、斜面に関する情報について中井良彰氏（朝日エンジニアリング株式会社）に多大なご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 榎谷浩：落石対策の現状，第4回金沢大学自然科学研究科，博士前期課程環境基盤工学専攻，pp39-40，2003年
- 2) 園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案，構造工学論文集，Vol. 39A，pp1563-1572，1992年
- 3) 伊藤学，亀田弘行：土木・建築のための確率・統計の基礎，1977年6月
- 4) 榎谷浩，落石対策の現状 4. 落石運動のメカニズムと予測（その1），p61-71 2003年5月