

(5) 斜面における落石挙動に関する研究

STUDY OF THE MOTION OF FALLING ROCKS ON THE SLOPES

堤下克彦*, 田中志人**, 榎谷浩***, 音田奨****

Katsuhiko TSUTSUMISHITA, Yukihito TANAKA, Hiroshi MASUYA, Masaru ONDA

* 金沢大学大学院 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

* 金沢大学大学院 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

*** 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)

**** 日本サミコン株式会社 (〒950 新潟市弁天橋通り 1 丁目)

キーワード: 落石、斜面、衝撃、落石の運動形態
(falling rocks, slopes, impact, motion of falling rocks)

1. はじめに

落石は斜面や岩の切れ目の風化により自然に起こる斜面崩壊の一現象である。落石に対する研究、技術開発の要望はますます高まっている。特に、落石防護施設の設計は落石の問題の中で最も重要な位置を占めているが、落石の運動の予測法のみが確立されておらず、技術者の判断に委ねられている。落石の速度が判明すれば、運動エネルギーが分かり、衝撃力の算定が可能となる。また、落石の跳躍量、落下経路が判明すれば、落石防護施設の設置位置や設置規模を決定することができる。

本研究においては特に不十分とみなされる落石の運動形態についてより実用的なシミュレーション手法の開発の確立を目指し、また実際の運動を正確に捉えるために跳躍運動、回転運動、滑り運動のいずれかまたは組み合わせが多いたることを考慮して落石がどのような挙動をとるか解析することにする。

2. 落石の挙動解析手法

2. 1 斜面のモデル化と落石の位置判定

小さな凹凸は無視して、大きな変化点のみに着目にし、図-1のように斜面を三角形の平面に分割しモデル化する。この時、斜面は n_s 個の三角形平面

と n_p 個の節点で表すことができる。また、落石の運動解析を行う場合、考えている時刻に落石がどの斜面にあるかを判定しなければならない。そこで落石が斜面上にある時、その斜面 S と接点 i, j, k の $X-Y$ 平面への投影を面 S' と点 i', j', k' とし、落石の現座標の位置ベクトルを $\mathbf{P}=[X \ Y]$ とするとベクトル $\mathbf{u}=[X_j-X_i \ Y_j-Y_i]$ 、 $\mathbf{v}=[X_k-X_i \ Y_k-Y_i]$ が次式を満たせば、落石は斜面 S 内あるいは S 上にあると判定できる。

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

(ただし $0 \leq s \leq 1$)

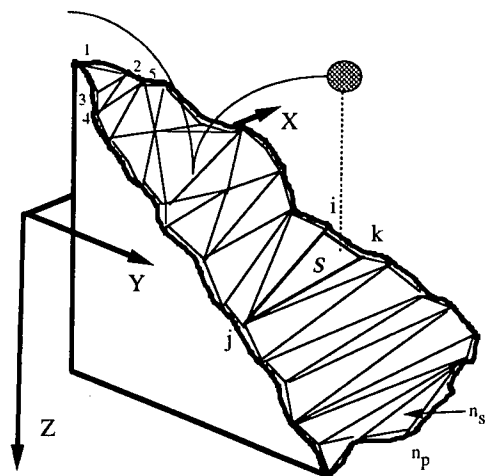


図-1 斜面のモデル化

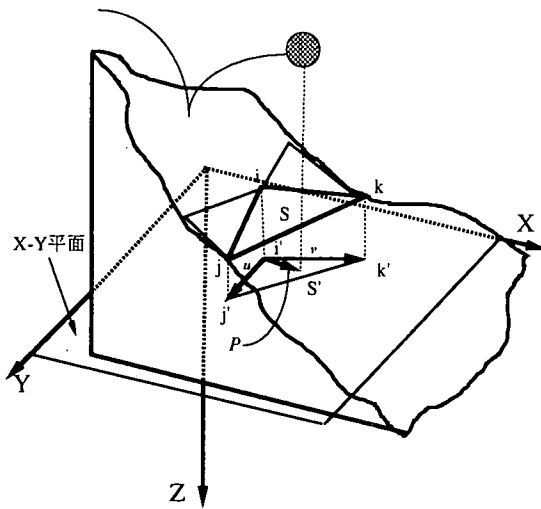
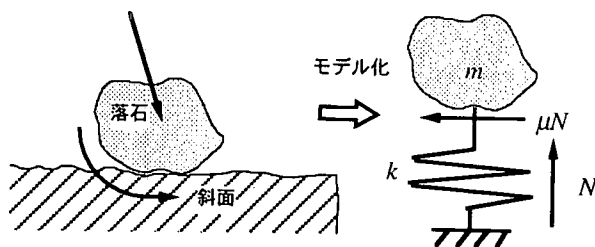


図-2 落石の位置判定

2. 2 落石と接触時の取り扱い

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

図-4 は回転している落石が斜面に接触している場合について、接触点における落石の相対速度と摩擦力の働く方向を示したものである。この場合、斜面 x 方向について示してあるが、 y 方向についてもまったく同様である。この場合、落石の半径 r の球と仮定するのでその回転慣性 I は

$$I = \frac{2}{5}mr^2 \quad (2)$$

となり、落石の運動方程式、落石の回転に関する運動方程式は次式で表される。

$$m \frac{dV}{dt} = f \quad (3)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = hr \quad (4)$$

ここに、

r : 球の半径, I : 回転慣性モーメント

V : 落石の速度ベクトル

ω : 球の重心に対する角速度ベクトル

h : 接触点における作用力ベクトル

t : 時間

この運動方程式は、衝突時の落石の初期条件を用いて、数値解析的に時間積分を行うことができ、衝突時の滑りを伴う回転の変化を求めることができる。

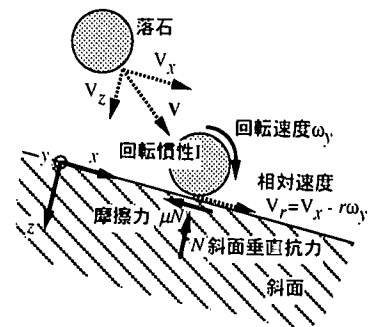


図-4 相対速度と摩擦係数

3. 解析結果と考察

図-5 は質量 600kg、半径 0.35m の落石を高さ 3.54m から鉛直自由落下させたときの蕁原の落石実験斜面における落石の落下経路と実験での落石の落下経路を示したものである¹⁾。表 1 の運動特性値より反発係数は $e=0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3$ 摩擦係数は $\mu=0.2$ と一定にした。斜面の凹凸が大きいので、反発係数の大きいからといって跳躍量が大きいとは限らないことがわかる。図-5 において実験値と比較すると、実験値に近い落下経路は $e=0.6$ と考えられる。

次に図-6 反発係数を $e=0.6$ と一定にし、摩擦係数を変化させて解析を行った落石の落下経路と実験での落石の落下経路を示したものである。図-7 は図-6 と同じ条件における垂直距離と速度変化であ

る。図中の α は速度残存係数を示している。図-6より摩擦係数を変化させたときは $\mu=0.2$ のときが実験値をうまくとらえている。したがって、反発係数 $e=0.6$ 、摩擦係数 $\mu=0.2$ のときもとも実験値をうまく捕らえられていると考えられる。また、図-7より実験での速度と比較すると、ほぼ同じような速度が得られ、速度残存係数の値がおよそ0.8から0.6の間に落石が衝突を繰り返し、変化する速度が収まっている。このことにより、運動エネルギー等の範囲がわかり落石防護施設の設計に役立つと考えられる。

表1 菌原の現場落石実験の概要一覧

斜面特性					
種類	岩質土質	立木	硬度	凹凸	傾斜面(θ)
自然斜面	軟岩	なし(投探)	450±90(kg/cm ²)	大	55°

落石特性	
形状	石質
丸状	河床岩

運動特性値		
μ	α	e
0.15	0.95	0.48±0.26

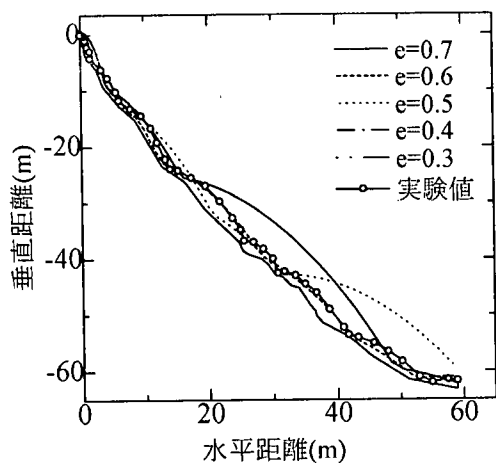


図-5 実験斜面における落下経路 1

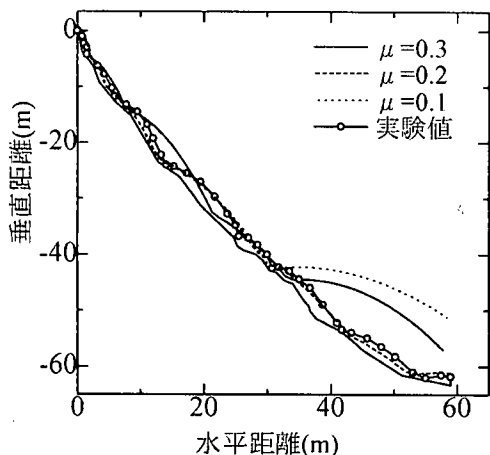


図-6 実験斜面における落下経路 2

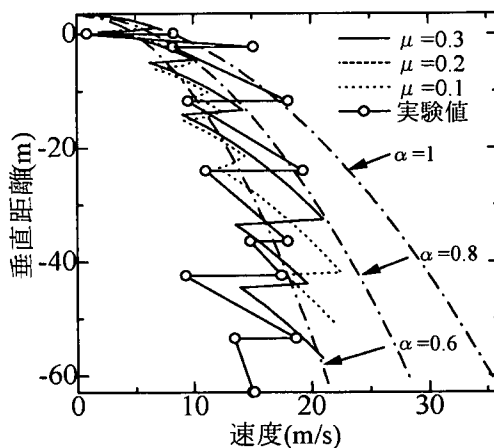


図-7 落石の速度比較

図-8は凹型斜面(沢型斜面)上に質量1000kg、半径1.0mの落石を高さ20mから鉛直落下させたときの3次元斜面における落石の落下経路であり、この時の反発係数 $e=0.8$ 、ばね定数 $k=10^6(N/m)$ 、摩擦係数 $\mu=0.2$ である。図-9は $X-Y$ 平面における落石の落下経路、図-10は落石の落下におけるエネルギーと時間の変化を表したものである。図-9より凹型斜面であるものは谷筋に落石の軌跡が集中すると経験的によく知られた現象がうまく再現されていることがわかる。また、図-10より谷筋から離れた所で落石が発生した場合は斜面との衝突の回数が多く、その衝突で回転エネルギーが増加する。一方、谷筋に近い所で落石が発生した場合は回転エネルギーの増加が谷筋から離れた所で落石が発生した場合より少ない。したがって、落石が斜面の衝突により回転エネルギーが生じ、運動エネルギーが減少していくことから谷筋から離れた所から落石が落下した方が衝突回数が多く、落石の落下していく速度が小さくなることが分かる。

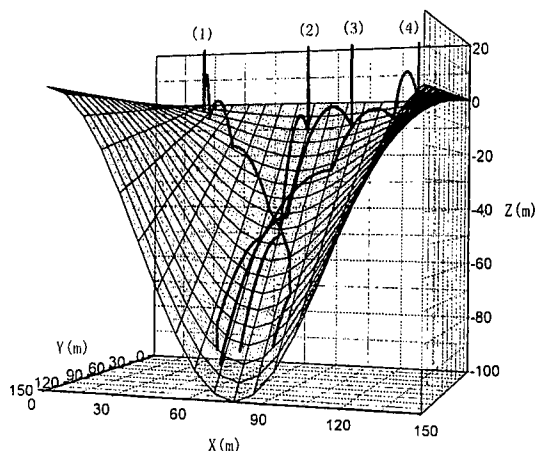


図-8 3次元斜面における解析例(1)

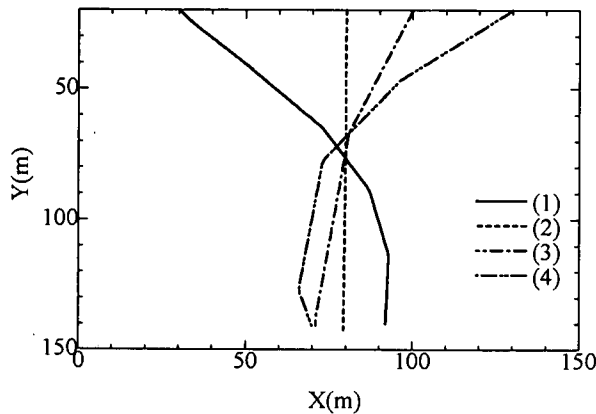


図-9 X-Y平面における落石の落下経路(1)

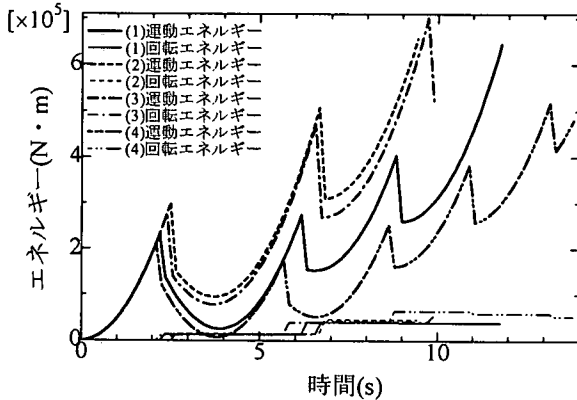


図-10 エネルギーと時間変化(1)

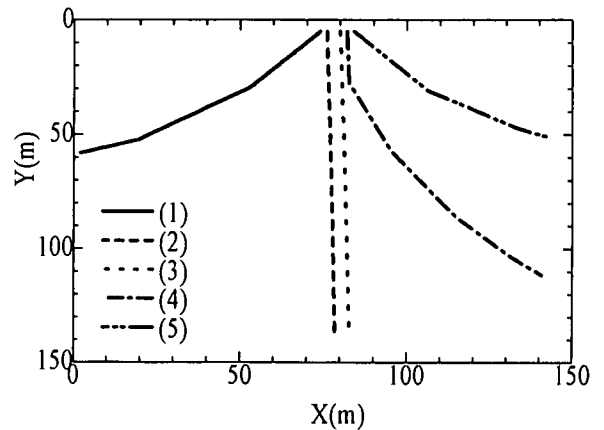


図-12 X-Y平面における落石の落下経路(2)

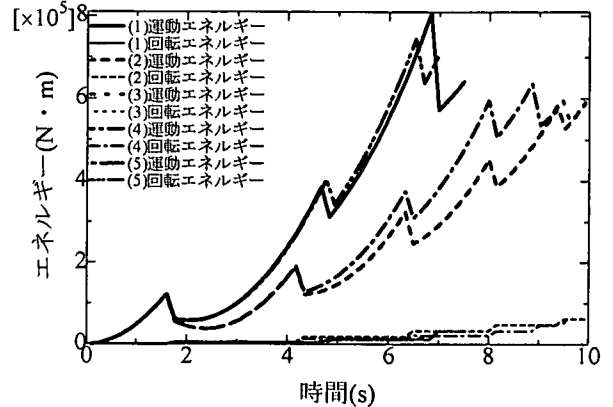


図-13 エネルギーと時間変化(2)

図-11 は図-8 と同条件で凸型斜面(尾根型斜面)上に落石を落下させたときの3次元斜面における落石の落下経路である。また、図-12 はX-Y平面における落石の落下経路であり、図-13 はエネルギーと時間変化である。図-12 より凸型斜面においては落石が分散して落下するのをうまくとらえている。また、図-13 より落石が急な勾配を落下しているときは衝突回数が少ない。そのことにより、回転エネルギーの増加が少なく運動エネルギーの減少が少なく斜面の最終地点での運動エネルギーは大きいことがわかり、またその場所での衝撃エネルギーも大きいことが分かる。

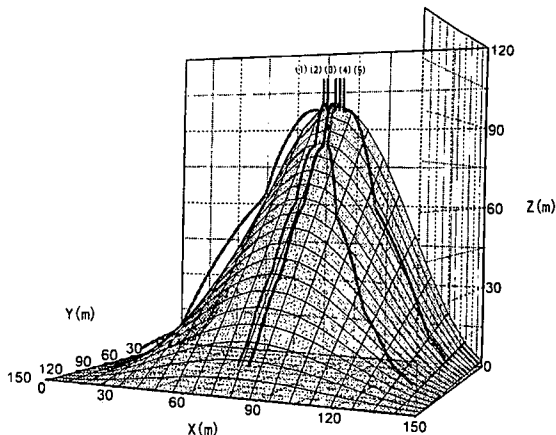


図-11 3次元斜面における解析例(2)

4. まとめ

本研究の内容は次のようにまとめられる。

- 1) 3次元斜面における落石の挙動について基本的解析手法を示した。
- 2) 本解析理論においては滑りを伴う回転運動を考慮したより現実的な落石の挙動の取り扱いが可能となった。
- 3) 落石の衝撃を受ける防護施設の設置位置および防護施設の規模の検討に本解析を役立てることが可能であることを示した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983
- 2) 右城猛：剛性擁壁の合理的な土圧評価法と落石の運動に関する研究，平成9年7月
- 3) 土木学会衝撃問題小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法，土木学会，構造工学シリーズ6，1994年1月
- 4) 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