

質点系落石シミュレーションにおける 落石経路予測のためのパラメトリックスタディ

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○石原 寛也
中村 拓郎
畠山 乃

設計業務で使用されている落石経路などを予測する方法のひとつとして、質点系落石シミュレーションが挙げられる。この方法は解析のコストが低い一方で、落石を質点として捉えるため、パラメータの入力値によっては危険側の判定結果となる可能性がある。本研究では、すべり摩擦係数、法線方向速度比、接線方向速度比などについてパラメトリックスタディを実施し、各入力値が解析結果に及ぼす影響を整理し、本解析における留意点について検討を行った。

キーワード：落石シミュレーション、斜面防災、維持管理

1. はじめに

近年、気候変動などにより激甚化する自然災害が問題となっている。その中でも、斜面からの落石は、直接的に人命に影響を及ぼすほか、道路の通行止めなど、間接的にも人々の生活へと影響を及ぼしており、その対策が重要となっている。落石対策工の設計には、斜面の現地調査により落石の発生位置や規模を推測することや、落石履歴などから落石の経路・到達位置等を予測することが必要となる。

現地調査により得られた情報から落石の経路を予測する方法として、数値解析シミュレーションが挙げられる。数値解析には個別要素法や粒子法など様々な手法があるが、中でも二次元の質点系シミュレーションは、解析のコストが低く、実施しやすい方法である。質点系シミュレーションの手法の一つに、吉田らの手法¹⁾がある。この手法では、落石を質点とみなして解析を行うため、解析にかかる時間が少なく、コンピュータの性能もさほど必要ないその一方で、落石の回転の影響などを直接見込むことができず、実設計に用いる場合、係数の入力を選択的に行わなければ、危険側の設計になる可能性があるため注意が必要である。

本研究では、吉田らの手法が適用されている落石シミュレーションソフトを用いて、計算に使われる係数の入力値を変化させたパラメトリックスタディによる感度分析を実施し、各入力値が解析結果に及ぼす影響をまとめた。

2. 解析概要

(1) 解析手法

本研究で使用する質点系落石シミュレーションに適用されている「吉田らの手法」について概説する。詳細については参考文献^{1,2,3)}を参照されたい。

解析の概要を図-1に示す。解析には斜面形状を線分の座標として入力し、斜面条件として各線分ごとに、等価摩擦係数 μ 、すべり摩擦係数 μ_f 、法線方向速度比 e 、接線方向速度比 ρ 、飛び出し限界速度 V_{cr} 、最大飛び出し角度 ψ_{max} を入力する。落石条件には、落石半径 R 、落石質量 m 、初期位置 (x_0, y_0) 、初速度 V_0 を入力し、その他には解析条件として、時間刻み(単位時間) Δt 、試行回数 N を入力する。落石の運動は、滑り運動と転がり運動で表される線運動と、

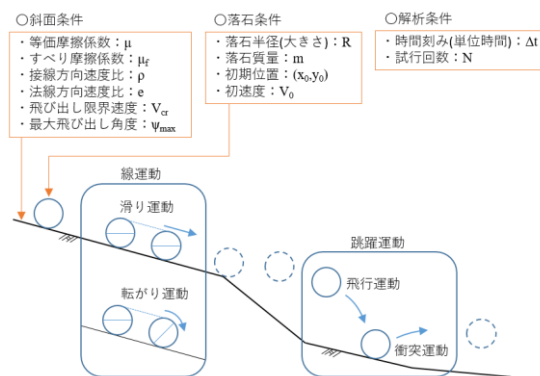


図-1 解析概要

飛行運動と衝突運動で表される跳躍運動で表現され、落石の大きさや速度などと斜面の係数によってこれらの運動状態が決定される。解析ではこれらの運動が時間刻みごとに繰り返され、落石の経路が一つシミュレートされる。

吉田らの手法は、斜面の凹凸や、落石の形状等による落石運動の不確かさを、乱数を用いて再現するモンテカルロシミュレーションの一種であり、斜面のパラメータであるすべり摩擦係数や、各方向の速度比などに対し乱数を用いている。本研究で使したソフトでは、それらの係数の設定に平均値と標準偏差を与え、正規分布に従うように乱数を発生させ、計算を行うごとに数値が決定されている。

(2) 解析ケース

解析ケースの一覧を表-1に示す。本研究では、入力値が解析結果にどの程度影響するのかを調べるために感度分析として、(i)斜面条件を変化させた解析、(ii)解析条件である時間刻みおよび試行回数を変化させた解析、(iii)斜面の勾配を途中で変化させた解析を行った。これらの解析において落石経路への影響を比較するための指標として照査位置を設け、試行回数に対する照査位置への到達数の整理を行う。

基準ケースは、図-2の一樣斜面に対して、斜面条件に後述の標準値を用い、試行回数1000回、時間刻み0.05secの解析条件のもと、それぞれの斜面について斜面上および空中からの落石とした計6パターンの解析である。

斜面形状は図-2、3のようになっている。 (i)と(ii)のケースでは、図-2に示す勾配が一樣な斜面部と平

坦部で構成される斜面で解析を行った。勾配が30度、45度、60度の3種類の斜面に対し、それぞれ落石の初期位置を斜面上と空中の2種類とした計6パターンの解析を実施した。(iii)のケースでは図-3の様な斜面になっており、平均勾配が30度、45度、60度となるような斜面に対して解析を行った。斜面は高さ10m、20mの位置で勾配が10度程度変化しており、それぞれの平均勾配で凹凸の形状が異なる斜面を2種類の、計6パターンの解析を実施した。

斜面条件は(i)のケースで、 μ_t , e , ρ の平均値(mean), および標準偏差(S.D.)をそれぞれ0~1まで0.05刻みで変化させ、それらの影響を比較する。変化させる係数以外は、標準値を与えた。(ii)と(iii)のケースでは係数を変化させず、基準ケースと同様に標準値を使用している。各ケースの入力値の詳細は後述する。

解析条件は(i), (iii)のケースにおいて、時間刻みを0.05sec, 試行回数を1000回とした。(ii)の解析条件の比較のケースでは、時間刻みと試行回数の入力値を変化させた。時間刻みは0.005sec, 0.01sec, 0.02sec, 0.05sec, 0.1sec, 0.2sec, 0.5sec, 1secとした。試行回数は、50回および、100回から1000回までを100回ごとに増やした解析を実施した。

いずれのケースにおいても落石条件は、初速度が 0m/s^2 の自由落下とし、落石の初期位置は高さ30mを基本とした。水平位置は斜面上に接する位置と、空中から落下する位置とした(斜面衝突までに10m落下)。なお、空中からの落石のケースは、初期に跳躍が卓越し、落石経路の変化が顕著となることを想定し、このような設定とした。落石半径は0.62m, 落石質量は2.5tonである。

表-1 解析ケース一覧

	斜面形状	斜面条件	解析条件	落石条件(水平位置)
基準ケース	30度, 45度, 60度の一樣斜面(図-2)	参考文献 ²⁾ による標準値	N=1000回, $\Delta t=0.05\text{sec}$	斜面上から, 空中から
(i) 斜面条件の変化のケース	30度, 45度, 60度の一樣斜面(図-2)	μ_t , e , ρ を変化	N=1000回, $\Delta t=0.05\text{sec}$	斜面上から, 空中から
(ii) 計算条件の変化のケース	30度, 45度, 60度の一樣斜面(図-2)	参考文献 ²⁾ による標準値	N, Δt を変化	斜面上から, 空中から
(iii) 斜面形状の変化のケース	平均勾配が30度, 45度, 60度となるような斜面(図-3)	参考文献 ²⁾ による標準値	N=1000回, $\Delta t=0.05\text{sec}$	斜面上から

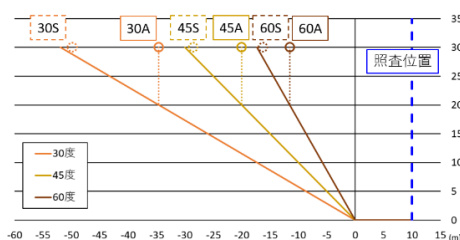


図-2 解析斜面(一樣斜面)

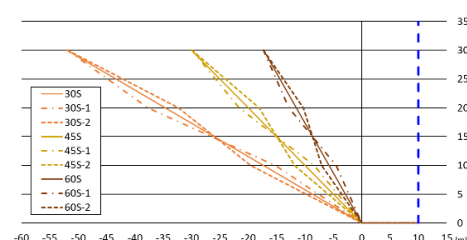


図-3 解析斜面(斜面形状の変化)

(3) 係数の入力値について

計算に用いられる係数の入力値の一覧を表-2に示す。表-2には参考文献²⁾に記載されている標準値も併せて示しており、それらの値は、風化流紋岩でできた勾配 38 度の斜面での実験から得られた数値となっている。

斜面衝突時の速度および、法線方向速度比 e と接線方向速度比 ρ は図-4のように定義されており、斜面に対して鉛直と水平な成分で表される。これらの値は斜面の土壌や植生、勾配などによって変化させるべきであるが、本研究では簡単のため、どの勾配の斜面においても同じ値(標準値)を与えている。また、斜面条件の変化の解析で使用する値は、パラメトリックスタディのための数値設定であり、実現象とは異なる値であることに留意されたい。吉田らの手法で与える速度比は、見かけの速度に対して設定するため、各方向の速度比が 1 を超える場合がある。その場合、運動エネルギー保存の観点から $V_2^2/V_1^2 \leq 1$ となるように乱数を再発生させている。

感度分析の対象とした係数は、吉田らの手法において、滑り運動と転がり運動の遷移に用いられるすべり摩擦係数と、衝突後の速度の決定に用いられている各方向の速度比であり、落石経路の決定に大きく関与していると考えられる。その他の係数に関しては、本研究では取り上げないが、同様に感度解析を行い、妥当性を検証することが望ましい。

3. 解析結果の整理および考察

(1) シミュレーション結果の扱い

解析結果の例を図-5に示す。図-5では標準値を使用した場合の落石の経路を表示している(赤線の経路は、照査位置での最高到達点に至る経路)。落石経路のモンテカルロシミュレーションでは、図-5のように多数の経路がシミュレートされる。これらの結果は統計的に与えられ、以下の結果の整理では斜面から 10m の位置(照査位置、図-5の青線位置)での到達数を確率として整理することができる。

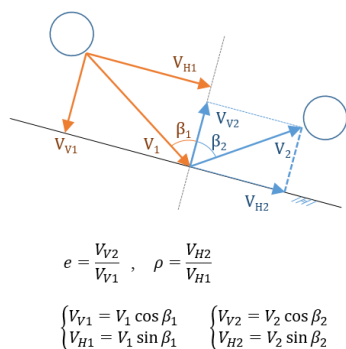
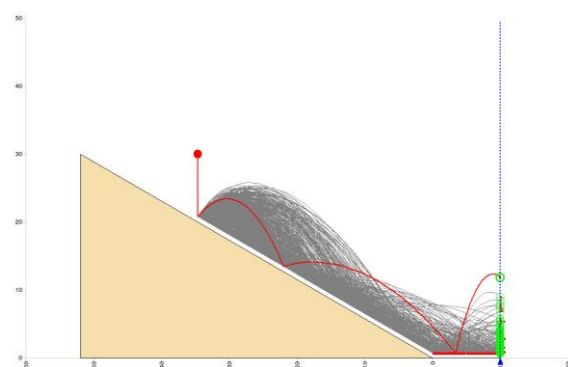


図-4 斜面衝突時の各方向速度比の定義

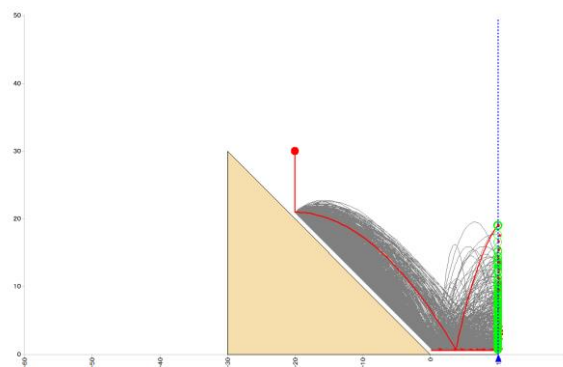
表-2 斜面条件入力値

係数入力項目			標準値※	入力幅
すべり	μ_f	平均値	0.69	0.00 から 1.00 まで 0.05 刻み で変化
摩擦係数		標準偏差	0.18	
法線方向	e	平均値	0.54	
速度比		標準偏差	0.28	
接線方向	ρ	平均値	0.58	
速度比		標準偏差	0.25	
飛び出し	V_{cr}	平均値	4.69	一定
限界速度		標準偏差	2.02	
最大飛び出し角度 ψ_{max}			45	

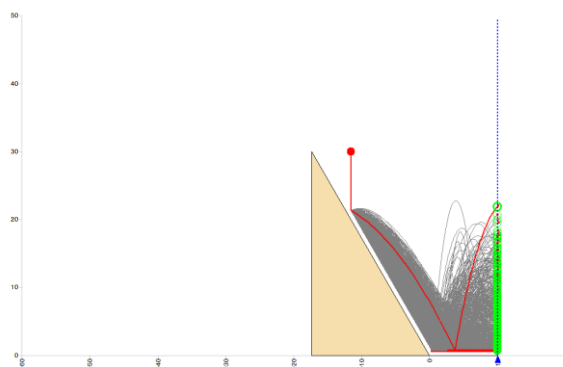
※標準値は参考文献²⁾による



(a) 30A



(b) 45A



(c) 60A

図-5 落石経路シミュレーション結果例
(基準ケース、空中からの落石)

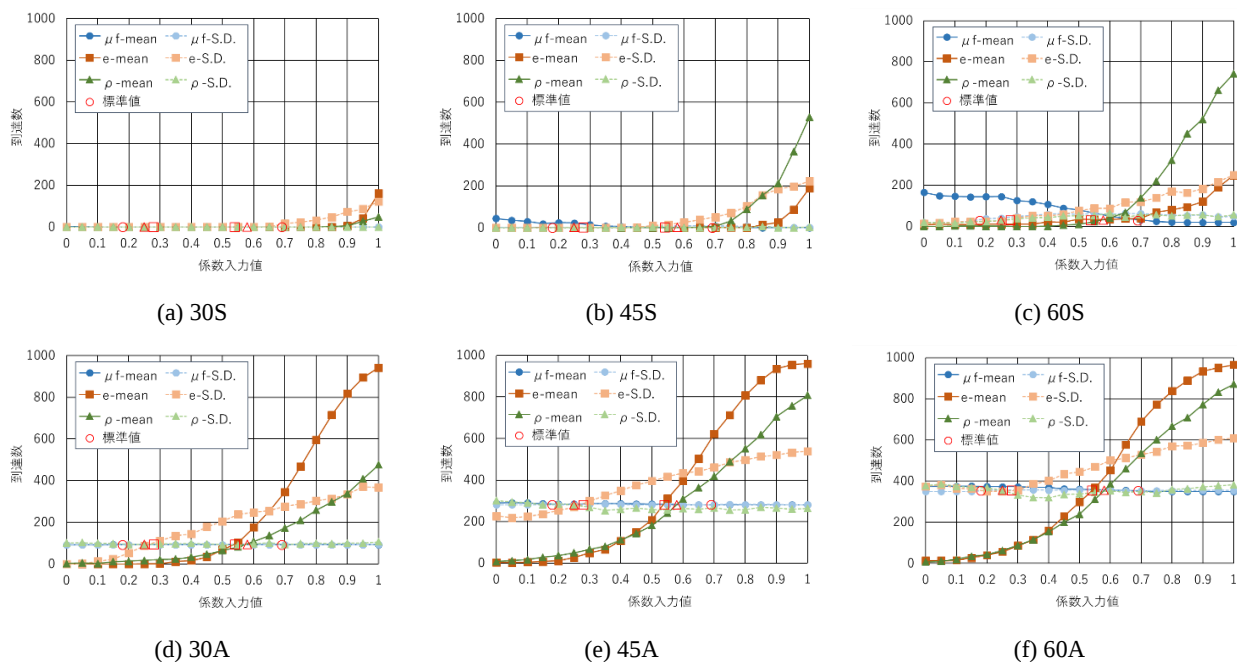


図-6 斜面条件の入力値が解析結果に与える影響

(2) 斜面条件が与える影響

斜面条件を変化させた場合の解析集計結果を図-6に示す。

a) すべり摩擦係数 μ_f が与える影響

すべり摩擦係数の影響に関して、図-6 の μ_f -mean および μ_f -S.D. からいずれのケースにおいても、すべり摩擦係数の入力値が落石の到達数に与える影響は他の係数と比べて、あまり大きくないことが分かる。

斜面からの落石のケース(30S, 45S, 60S)において、斜面勾配が大きく、すべり摩擦係数が小さい場合、到達数が多くなっている。これは線運動において、斜面から受ける抵抗が少なくなることが影響していると考えられる。また、空中からの落石のケース(30A, 45A, 60A)において、すべり摩擦係数の影響があまり見られないのは図-5 の様に落石運動のほとんどが跳躍であり、すべり摩擦係数が関係しない運動であるためと考えられる。

b) 速度比 ρ , e が与える影響

各方向の速度比が与える影響について、図-6(a), (b), (c)の空中からの落石のケースにおいては、法線方向速度比の平均値が与える影響が大きく、図-6(d), (e), (f)の斜面からの落石のケースにおいては、接線方向速度比の影響が大きくなっている。また、斜面勾配が大きいほど各方向の速度比が与える影響が大きくなっていることが分かる。これは速度比が衝突運動に影響する係数であるため、空中からの落石や、斜面勾配が大きいなど跳躍運動が主となる落石に対して、影響が大きいものと考えられる。

吉田らの手法においてその定義から、法線方向速

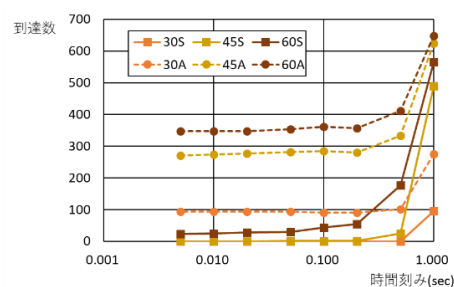


図-7 時間刻みが到達数に与える変化

度比の平均値 e -mean と接線方向速度比の平均値 ρ -mean の比率は落石の大まかな反発方向を決定づけており、例えば比率が e -mean : ρ -mean = 1 : 1 の場合は斜面に対して平均的に入射角=反射角となるような経路をとる確率が高くなる。したがって、落石経路の推定において、それらの比率を適切に設定することが重要であると考えられる。また、2-(3)でも触れたように勾配などに応じて速度比は与えることが望ましく、特に平坦部においては、文献⁴⁾の実験結果によると接線方向速度比に比べて、法線方向速度比(反発係数)はかなり小さな値になると考えられる。

(3) 計算条件が与える影響

a) 時間刻み Δt が与える影響

時間刻み(計算単位時間)が与える影響について、図-7 より、時間刻みが大きくなるほど、到達数が多くなっている。図-8(a)の落石の軌跡を確認すると、時間刻みが大きい方が直線的な軌跡となっていることが分かる。放物線の形状がうまく再現されず、水

平方向に大きく進むため、このような結果になったものと考えられる。

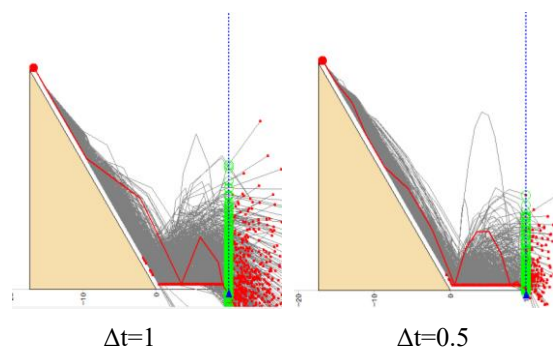
吉田らの手法では速度を計算後、その速度(一定)で単位時間分進んだものを描画するので、時間刻みが大きい場合、一つの速度での移動量(直線)が多くなるため、直線的な軌跡となる。また、速度の更新回数が少ないため、落下などの曲線がうまく再現されていない。軌跡の曲線の再現度を高めるという点では、時間刻みは短い方が良いが、単位時間が短い場合は計算回数が増加するため、計算のコストが高くなる。また、時間刻みが過大な場合、斜面との衝突判定や停止の判定位置を大きく超えるため、場合によっては計算結果が発散する可能性がある。したがって、落石の軌跡を近似的に再現するだけの細かさがあり、かつ、大きすぎない時間刻みが適切であると考えられる。

時間刻みの上限については、一回の計算での移動量が落石直径よりも小さくすることで結果の異常を防ぐことができると考えられる。本解析において、落石半径を R とした時、最大速度を $V_{\max}$ とすると、 $\Delta t \times V_{\max} < 2R$ 程度となるように Δt を設定することで、計算の異常を防ぐことができた。ここでの計算の異常とは、図-8(b)の様な軌跡が発生することである(空中で反発している様な軌跡)。なお、最大速度 $V_{\max}$ はエネルギーのつり合いから $\sqrt{2gH_0}$ (g 重力加速度, H_0 落石初期高さ)としている。今回のケースでは $R=0.62\text{m}$, $V_{\max}=\sqrt{2 \times 9.8 \times 30} \div 24.2\text{m/s}$ であるので、 $2R/V_{\max} = 1.24/24.2 = 0.051$ より $\Delta t=0.05\text{sec}$ 程度とすると異常な軌跡は見られなかった。本研究で使ったソフトではデフォルトの時間刻みが 0.05sec となっており、本研究の範囲ではデフォルト値を使用できると考えられる。また、本解析よりも落石径が小さい場合や、落下高さが大きい場合は、これよりも小さな値とすると異常な軌跡は発生しにくくなると考えられる。

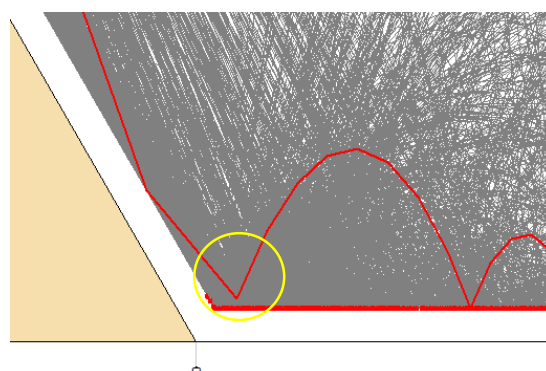
b) 試行回数 N が与える影響

試行回数が与える影響について、図-9 にその到達数の変化を示す。斜面上からのケースではほとんど照査位置に到達しなかったため、空中からのケースのみを示している。図-9(a)より今回のケースにおいて、到達数はおおよそ比例関係にあることが分かる。これは偏りなく正規分布に従って乱数が生成されている為であると考えられる。しかし、試行回数に対する到達割合(=到達数/試行回数)は図-9(b)より、概ね一定ではあるが、試行回数が少ない場合にややばらつきがあり、いずれの斜面においても 500 回程度で収束することが分かる。

再現する落石や、検討する落石の到達確率などにもよるが、ばらつきなども考慮し、少なくとも 300 回程度の試行が必要であると考えられる。^{3,5,6)}

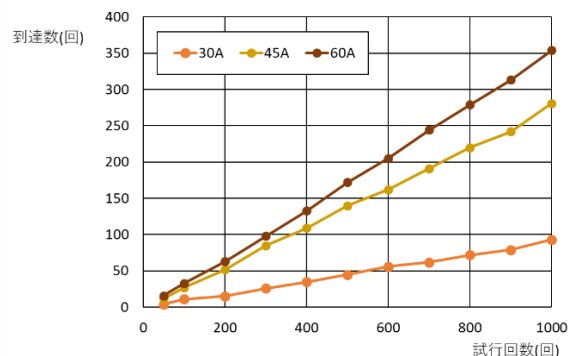


(a) 時間刻みの変化による軌跡の違い

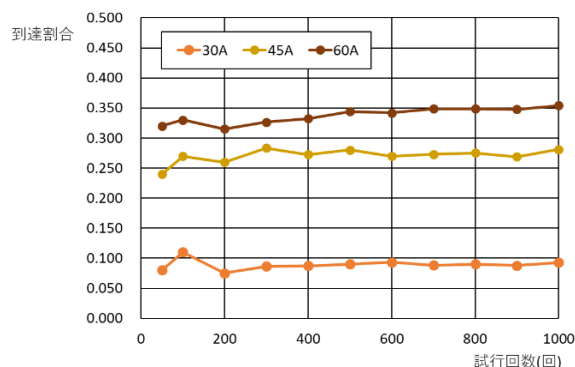


(b) 時間刻みを大きくしたときに見られる軌跡
(60度斜面拡大, $\Delta t=0.2$)

図-8 時間刻みによる軌跡への影響



(a) 試行回数に対する到達数



(b) 試行回数に対する到達割合

図-9 試行回数が到達数に与える影響

(4) 斜面形状の変化が与える影響

本項では斜面変化の影響を確認する。図-10 より各ケースで到達数の変化が見られるが、30度の斜面の場合は到達数に変化はなく、45度、60度の斜面ではいずれの斜面でも到達数が増加していることが分かる。図-11のように、斜面の形状によって大きく跳ねるケースが生じるため、跳躍運動での衝突時の勾配の違いによる影響があったものと考えられる。

この様に、平均勾配が同じでも到達確率に影響を及ぼすため、解析を行う際は、斜面形状によって解析結果が大きく変化しないことを確認することが望ましい。また、どの程度の勾配変化を入力するべきかは今後も検討が必要な項目であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、吉田らの手法が適用されている落石シミュレーションソフトを用いて、計算に使われる係数の入力値を変化させたパラメトリックスタディによる感度分析を実施し、以下の知見を得た。

- (1)斜面条件において、跳躍運動が主である時は接線方向速度比が到達数に与える影響が大きい。
- (2)計算条件において、時間刻みはある程度短い方がよく、今回のケースでは $\Delta t=0.05\text{sec}$ 程度が適当であった。
- (3)試行回数に対する到達割合は試行回数が少ない時にばらつきが見られ、そのばらつきは 500 回程度で収束する。
- (4)斜面勾配の変化が 10 度程度でも到達数に変化があり、平均勾配が大きいほどその変化は顕著である。

本研究で得られた傾向は、吉田らの手法が適用されているシミュレーションソフトのひとつであり、シミュレートの際の離散化手法や乱数の生成手法によっては異なる傾向を示す場合がある。また、落石の回転運動による落石経路の変化なども考慮できないことなど、使用するソフトウェアの特性や解析手法を理解し、入力値と結果に対する検討を行うことが重要である。本研究では照査位置での到達数のみを扱ったが、落石防護施設の設計に際しては、到達高さや到達時の速度などに関して統計的に危険率を定め、別途検討を行うことが望ましい。^{3,5,6)}

参考文献

- 1)吉田博，右城猛，梶谷浩，藤井智弘：斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価，構造工学論文集 Vol.37A, pp.1603-1616, 1991 年 3 月
- 2)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-，平成 14 年
- 3)地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例，2014 年

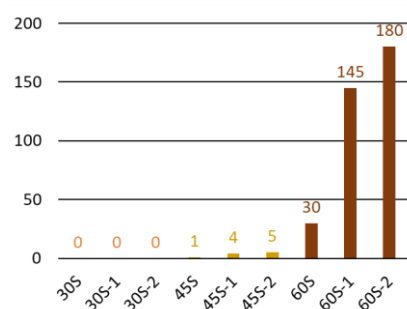
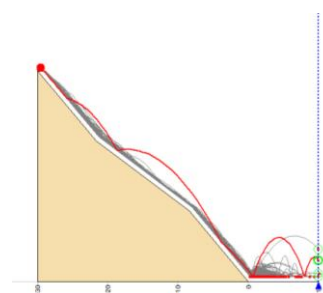


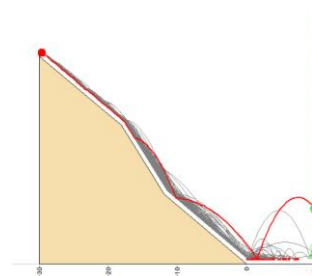
図-10 勾配変化による到達数の変化



(a) 45S



(b) 45S-1



(c) 45S-2

図-11 斜面勾配変化による軌跡の違い
(平均 45 度斜面のケース)

- 4)杉山直優，前田健一，鈴木健太郎，今野久志，峯祐貴，磯合凌弥：落石捕捉性能把握に向けた実規模落石防護土堤の落体衝突実験，構造工学論文集 Vol.67A, 2021 年 3 月
- 5)星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，1986 年，pp82
- 6)元田敏和：モンテカルロ法によるシステムの統計的評価，宇宙航空研究開発機構研究発表報告 JAXA-RR-，2007 年 12 月