

速度比と地形モデルが落石シミュレーションの結果に与える影響

島内哲哉^{1*}・鄭 惟¹・中村公一²・西山哲³・大西有三⁴

¹正会員 明治コンサルタント株式会社 技術統括部東川口分室 (〒333-0801 埼玉県川口市東川口1-22-4)

²正会員 鳥取大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取県鳥取市胡山町南4-101)

³正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 京都大学 理事・副学長(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:shimauchi-t@meicon.co.jp

落石の挙動は、斜面の傾斜や性状、落石の形状や規模など、さまざまな条件によって複雑に変化する。その不確実性の要因の一つに速度比や地盤の凹凸の影響がある。本研究では、既往実験結果の再現解析を通じて、速度比と地形モデルに凹凸を与えた場合の結果に与える影響について検討した。速度比については、法線方向入射速度依存性を考慮するためにSF曲線に乱数を適用する方法を、また地形の凹凸については三次元モデルの地表面を構成する個々の要素の頂点高さに乱数を与えた。そして、解析結果を基に、落下速度の再現には速度比の性質が、また落下軌跡の再現には地形モデルの凹凸(ラフネス)の考慮が重要であることを述べた。

Key Words : rockfall, velocity ratio, DDA, Roughness

1. はじめに

落石シミュレーションは、災害範囲の予測、あるいは対策計画位置での速度、跳躍高さ、分布範囲の予測などを目的として行われる。しかし、落石の挙動は、規模や形状、地形などの影響を受けて複雑に変化する。このような落石挙動の不確実性をシミュレーションで考慮する目的で、物性や地形要素に乱数を設定してばらつきを考慮する方法が導入される^{1,2,4}。しかし、ばらつきを考慮する項目や設定した乱数がシミュレーション結果に与える影響については、今でも不明な部分が多い。このため、現場の状況に応じた、入力値の決定や最適なモデルの作成は今でも難しい問題である。

本検討では、まず速度比と地形の凹凸に着目し、それぞれに乱数を与える方法とその影響について検討を行った。なお、本解析では三次元球要素剛体DDA(DDAball)を用いており、落石形状の影響については考慮していない。

2. 検討に用いた既往実験の概要

検討にあたって参考としたのは、1980年に旧建設省が高松(四国)で行った現場実験である(以後高松実験と呼

ぶ)³。この実験では、図-1に示すA,B地点において岩塊を落としている。落下高さは、A地点では3,6,9m、B地点では9mである。落下地点の傾斜はA地点が60°、B地点が30°の吹き付けコンクリート斜面である。なお、斜面の中～下方では岩盤斜面となる。落下岩塊は現地で切り出した花崗岩で、大きさは径0.09~1.15mの塊状、板状とされるが、本検討では、このうちの塊状岩塊のデータを用いている。

検討では、B地点における実験記録をもとに、その速度と軌跡の再現シミュレーションを行った。図-1は、岩塊を傾斜30°のB地点上に落下させた実験の軌跡図である。この図中に記録されたすべての軌跡の最も外側を結んだ線を包絡線と呼んでいる。ただし、図をみればわかるように、すべての軌跡が包絡線の下で一様に分布する訳ではない。多くの軌跡が集中する区間もあれば、希に飛び跳ねた軌跡の部分もある。

3. 速度比(Rv)へのばらつきの導入

表-1には、A,B地点での法線方向速度比(Rn)と入射角度(α)の計測値および速度比(Rv)を示した。ただし、速度比(Rv)は記録にないため、図-1の軌跡図から反射角度を読みとった後反射速度を求めて換算した。

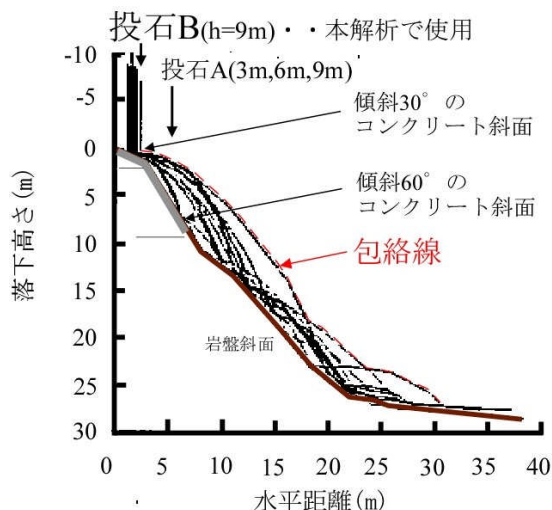


図-1 高松実験(B地点軌跡図)

ところで、速度比(Rv)も、法線方向速度比(Rn)同様に、法線方向入射速度に依存する性質がある。この性質を解析上で考慮するために、我々は式(1)に示すスケールファクター曲線(SF曲線)と呼ばれる近似曲線を用いる方法を提案している⁵⁾。

図-2は、表-1に示したAB地点での速度比(Rv)を法線方向入射速度との関係でプロットしたもので、その最大値と最小値を結ぶSF曲線を合わせて示している。反射速度は、このSF曲線を用いて式(2)で予測される。

$$SF = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{nin}}{K}\right)^2} \quad (1)$$

$$V_{out} = Rv(scaled) \times SF \times V_{in} \quad (2)$$

ここに、 V_{nin} は法線方向入射速度、 K は補正速度(SF曲線の傾きを表す)、 V_{in} は入射速度、 V_{out} は反射速度、 $Rv(scaled)$ はSF曲線の起点を表す。

ところで、このような衝突時の係数にばらつきを導入する場合通常は、速度比(Rv)自体に直接、平均 m 、標準偏差 σ の乱数が導入される。しかし、前述のような速度比(Rv)の法線方向入射速度依存性は、反発現象における重要な性質であり、ばらつきを考慮する場合にも無視できない。そこで、本検討では式(1)に示したSF曲線そのものに乱数を導入した。具体的には、図-2中のSF曲線の $Rv(scaled)$ と K の2つのパラメータを確率変数として扱った。なお、分布は正規分布としている。

$$Rv(scaled) = 0.95 \quad \text{標準偏差} \pm 0.05$$

$$K = 9.0 \quad \text{標準偏差} \pm 1.0$$

表-1 AB地点の反発データ

	入射角 (α)	Rn	反射速度 (V_{out})	Rv(換算値)
A	60	0.49	7.8~9.4	0.59~0.73
B	30	0.26	3.6~5.2	0.27~0.39

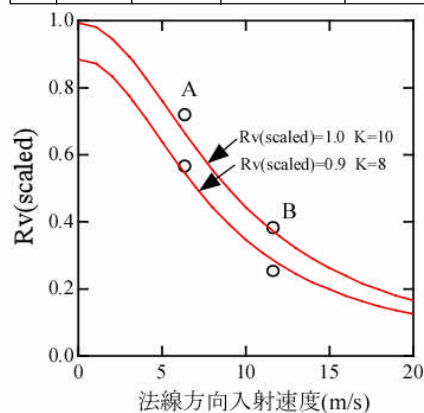


図-2 AB地点データとSF曲線

これにより、速度比の法線方向入射速度依存性を考慮したばらつきを考慮することが可能となる。

4. 単純地形モデルでのシミュレーション

最初の解析に用いた地形モデルは、図-1の地形図をトレースして作成した。落石解析にかぎらず、通常の測量結果から得られる断面は、地形のある程度大きな傾斜の変化をとらえた結果として得られ、小さな起伏は無視されることが多い。この意味では、解析断面は通常の落石調査から得られる断面図よりも粗いが、オーダー的には一般的な測量断面とほぼ同じとみてよい。ここでは、これを単純地形モデルと呼ぶ。

なお、DDAballは三次元解析コードであるため、モデル作成にあたっては、断面を奥行き方向に5m押し出して作成している。このモデルを用いて、3で述べた方法で速度比のSF曲線にばらつきを与えて解析を行った。解析数は100回である。解析結果を図-3に示す。

図-2(a)の解析軌跡図右側には速度軌跡を示した。この速度軌跡図中の×印は実験記録(速度)である。本図から、速度については高さ0~5m間をのぞいておおよそ再現できていることがわかる。ただし、斜面b,cの付近で解析結果が実験記録を下回っているのは、落下地点から斜面dまで到達する落石がほとんどなく、そのほとんどが小段付近の斜面b,cに集中し、そこで速度が減衰したためである。逆に、のり尻付近で速度が上回ったのは、

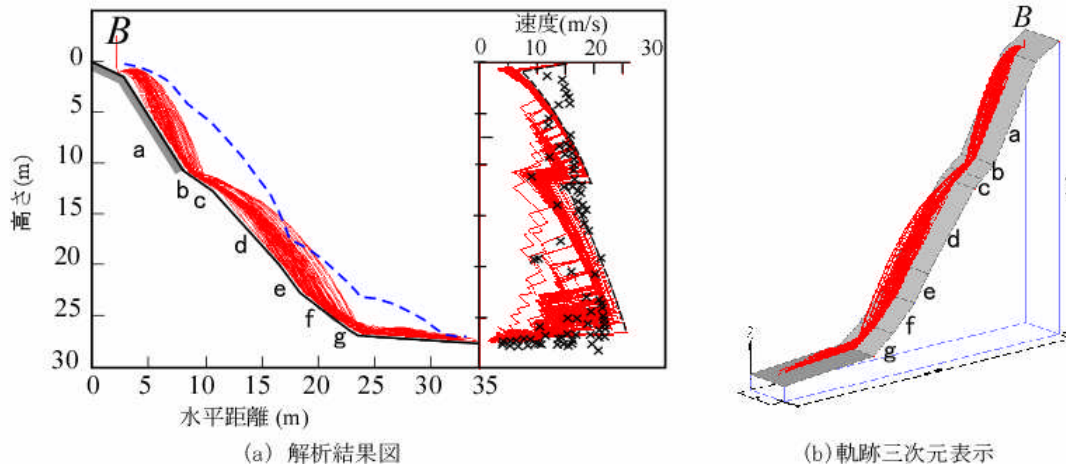


図-3 単純地形モデルでのシミュレーション結果図

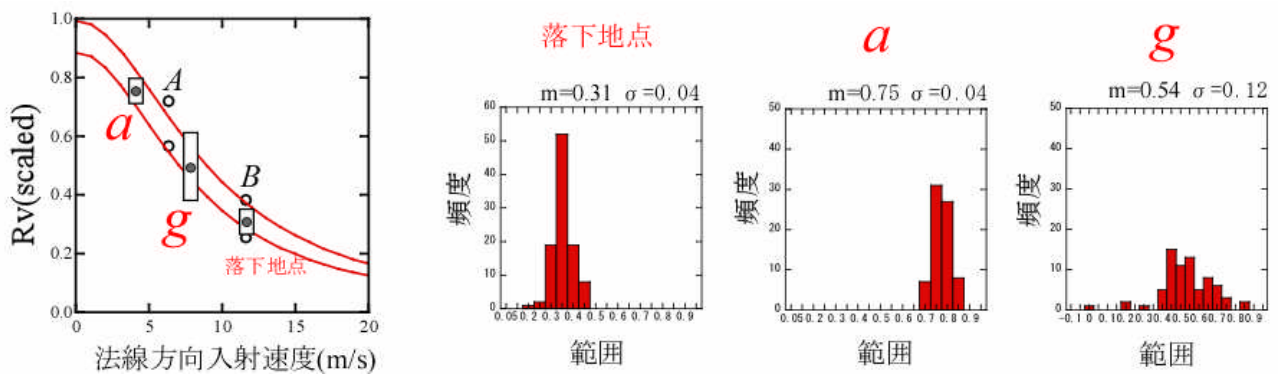


図-4 単純地形モデル(解析結果から得られた速度比の分布)

小段付近の斜面b,cで跳ねた落石がそのままのり尻まで到達して速度が増加したためである。なお、0~5m間で記録が解析結果より大きいのは落下高さが9mを超えているためで、これについては考察から除外した。

一方、軌跡も速度と同様で、最初の落下地点では法線方向入射速度依存性により小さな速度比で反発した後、そのほとんどが斜面b,cに軌跡が集中する。また、斜面b,cで跳躍後の落石についてもその大半が斜面e,f,gに集中するため、軌跡も単調なものとなっている。これは、傾斜の同じ長い斜面に衝突が集中するため、入射角度のばらつきも狭い範囲に集中しがちで、このことが反発の集中する区間とそうでない区間を生む原因になっているためとみられる。結果として、小段下付近やのり尻でのやや大きな軌跡は再現できていない。

図-4は、解析結果のうち落下地点と直線区間(a,f)で得られた速度比の平均値と偏差(68.26%値)を、入力したSF曲線上にプロットした図である。右側にはそのヒストグラムを示した。法線方向入射速度は、各計測区間の平均値で代表している。本図から、速度比はほぼ期待どおりにばらついており、法線方向入射速度に対する依存性も考慮されていることがわかる。最初の落下地点や斜面a

での速度分布範囲は狭いものの、のり尻の斜面gでは適当な幅をもったばらつき分布になっている。

速度比(R_v)は、衝突時の入射角度と入射速度に依存し、なかでも入射角度に対する依存性が特に強い。このためばらつき範囲の狭さはそのまま軌跡の単調さにつながる。このため、SF曲線に考慮する偏差の幅を広げた検討も行ったが、結果はそれほど改善されない。

これらのことから、軌跡のばらつきの再現性が悪かった主な原因は、地形モデルを長い直線区間で作成したことにあると考えられる。

5. 凹凸のある地形モデルでのシミュレーション

4章での結果から、速度比にばらつきを考慮しただけでは、速度はともかく軌跡まで再現することは難しいことがわかった。

一方、既往現場実験の報告では、測量点間の直線に伏在する小さな起伏(ラフネス)が法線方向速度比(R_n)の計測結果のばらつきにつながる事が指摘されている⁴⁾。この問題に対応するため、入射角度にばらつきを与える、

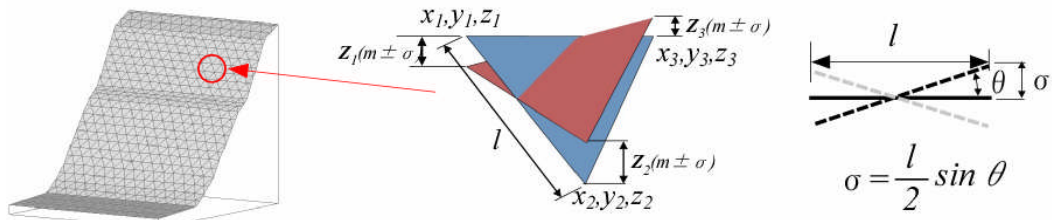


図-5 三角形要素頂点にばらつきを与える方法

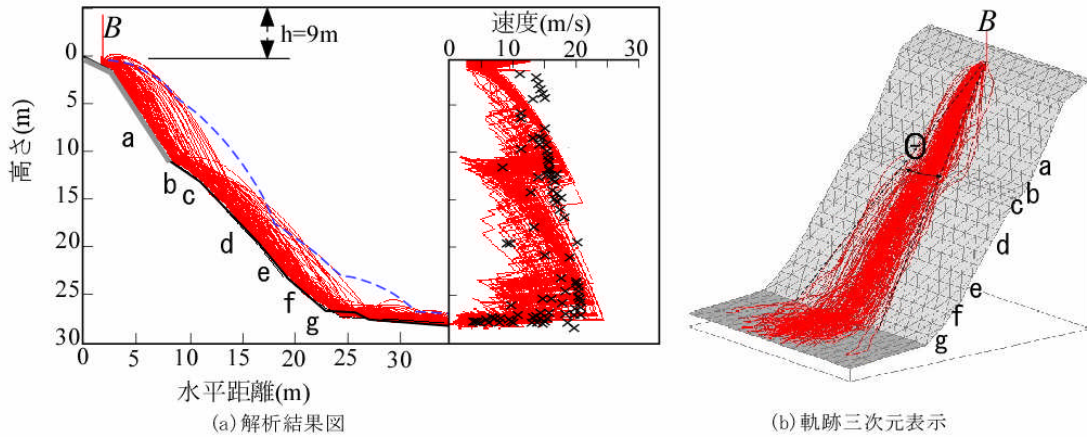


図-6 凹凸のある地形モデルでのシミュレーション結果

あるいは地形モデル自体にばらつきを与えるなどの方法が提案されている¹⁶⁾。ここでは、後者の方法を用いて、DDAballによる軌跡のばらつきの再現可能性について検討した。

検討モデルは、図-3(b)の単純地形モデルを、奥行き方向(y方向)に30m押し出し、地表面を一边が約1.8mの三角形メッシュで分割したモデルである(図-5)。検討では、この一つ一つの三角形メッシュの各頂点の高さ(Z)に、平均値を $m=0$ 、標準偏差を σ とする正規乱数を与えた。

ここで問題となるのが頂点高さに与える標準偏差 σ の決定方法である。高松実験の報告では、法線方向速度比(Rn)がばらつく原因のすべてが傾斜角度の読みとり誤差にあると仮定すると、落下地点である傾斜 30° のコンクリート斜面における入射角度の標準偏差は $\sigma = 0.374 \theta$ ($\theta = 30^\circ$)と報告されている(すなわち $\sigma = \pm 11.22^\circ$ である)⁹⁾。この報告をもとに、検討モデルを構成する三角形メッシュの平均辺長(1.8m)から、頂点の上下方向の変動幅の標準偏差を $\sigma = \pm 0.18m$ と求めた。このようにして、要素の頂点に正規乱数を与えたモデルを100個作成し、解析を行った。なお速度比(Rv)についても4章同様の方法でばらつきを与えている。

解析結果を図-6に示す。本図と図-3の解析結果図とを比較するとわかるように、速度比のみにばらつきを考慮した場合に比べて速度も軌跡のばらつきも広がる。軌跡断面図は、落下地点はもちろんのこと斜面aや斜面dなど

の長い直線区間では斜面途中からの跳躍も増える。小段付近(斜面b,c)や斜面d上部での跳躍高さも増したためのり尻まで到達する落石の数も増している。実験軌跡の記録と対比すると、解析結果が包絡線に及ばない部分もあるものの、軌跡の大部分が集中する範囲はほぼ同じであり、小段下やのり尻付近の軌跡も包絡線に近づいている。また、軌跡を三次元表示した図-3(b)と図-6(b)図の比較で明らかなように、地形モデルに凹凸を考慮したことで、落下地点からの軌跡に広がりを生じている。

速度の分布も、単純地形モデル(図-3)の場合に比べると実験記録(図-1)に近い。

図-7は、図-4同様、落下地点と直線ag区間で得られた速度比の平均値と偏差(68.26%値)をSF曲線上にプロットした図であり、右側はそのヒストグラムである。法線方向入射速度は、各計測区間の平均値の代表である。本図からも、解析において速度比(Rv)はほぼ期待どおりに分布していることがわかる。しかし、落下地点、斜面agでのばらつきを比較すると、長い直線区間を用いた単純地形モデルでのそれに比べて、あきらかに広がっている。特に、最初の反発区間である斜面aでのばらつきの増加が顕著で、その結果が下方斜面に影響し、のり尻斜面gでの分布の広がりにつながっていったものとみられる。この結果から、斜面に与えた凹凸は、軌跡の再現に大きく寄与することがわかる。

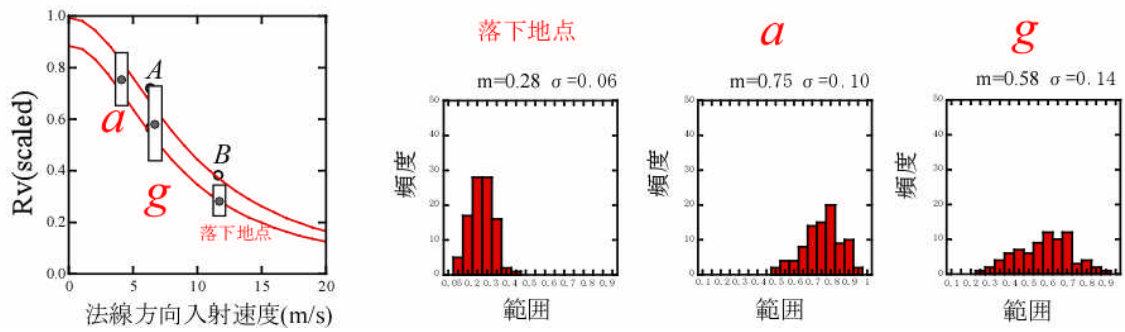


図-7 凹凸のある地形モデル(解析結果から得られた速度比の分布)

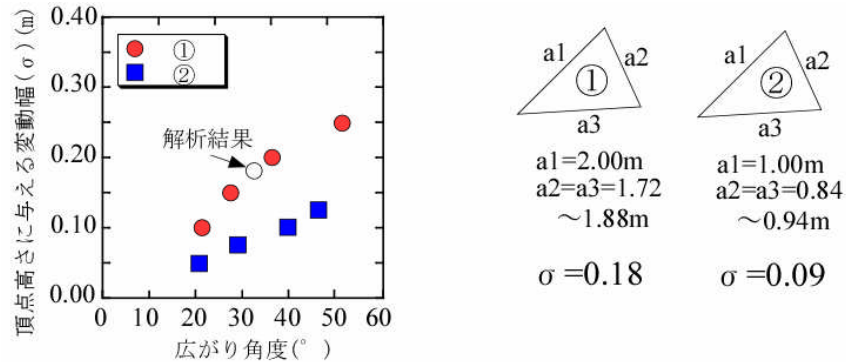


図-8 頂点に与えるばらつきと広がり角度との関係

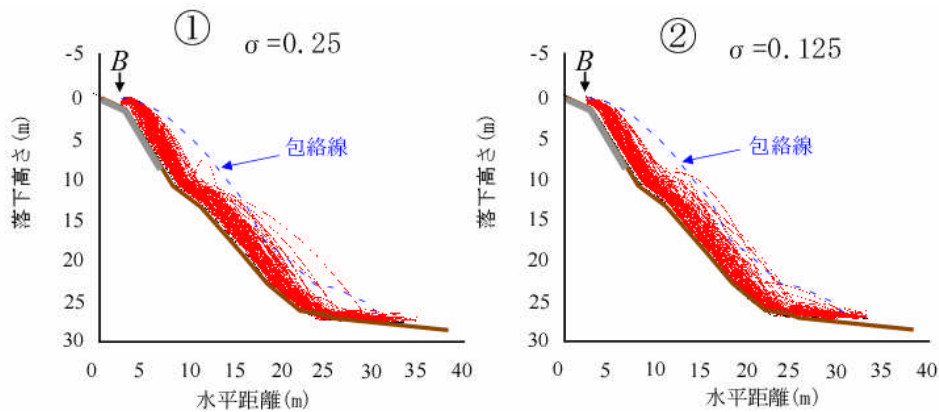


図-9 要素の大きさがばらつきに与える影響(断面)

ところで、このような検討に際して常に問題となるのが、ばらつきとモデルの要素の大きさの関係である。そこで、まず三角形要素の頂点に与える高さとの関係を調べるために、頂点高さの値 σ を $\pm 0.05\text{m}$ 、 $\pm 0.10\text{m}$ 、 $\pm 0.20\text{m}$ 、 $\pm 0.25\text{m}$ と変え、図-6(b)と同様にのり尻での広がり角度をまとめた。結果は、図-8に示すとおりであり、頂点高さに与える変動幅が増加すると落下地点からの広がり角度も増加する。その関係は、ほぼ直線的であり、斜面の凹凸を大きくするほどひろがり角度も増加する。実験記録では落下地点からの広がり角は約 40° と報告されており、本解析結果の 32° はやや狭いことになる。そこで、次に図-8右側に示すように要素の大きさを①から②

へと半分にして、頂点高さの変動を ± 0.05 、 $\pm 0.10\text{m}$ 、 ± 0.125 、 $\pm 0.15\text{m}$ とした場合について同様の解析を行った。解析結果からは、要素の大きさが半分なら頂点高さもほぼ半分となることがわかる。ただし、頂点高さの入力方法と解析結果の広がり角度との関係は、同じ図-5の方法で検討した結果でも 10° 近く異なる場合もあり、要素の大きさによっても変化する。現段階では、要素の大きさや計算回数などに対する検討は不足しているものの、要素①と②のケースでは、小さい要素②の方がその関係は直線的といえる。

一方、図-9は、図-8のケース①の $\sigma=0.25$ と②の $\sigma=0.125$ の解析結果軌跡図を比較した断面図である。要素

の大きさを半分にして凹凸の高さを2倍にしたためか、包絡線をオーバーする部分が目立つ。しかし、要素の大きさを半分にした②の方が、特に下方の斜面e,f,g付近での軌跡が、包絡線のイメージに近づく。

解析モデルの最適な要素の大きさの決定法は、今後の重要な課題の一つでもあるが、跳躍のばらつきを再現するためには、要素の大きさを小さくとる方が良いと思われる。

6. まとめ

1989年に旧建設省が四国、高松で行った落石実験結果をもとに、DDAballを用いた再現実験を行った。再現実験は、2段階に分けて行った。最初は、傾斜一様な区間を長い直線で表したモデルを用い、法線方向入射速度に対する依存性のばらつき効果を、次に、斜面上の起伏を考慮したモデルを作成して検討を行った。その結果は以下にまとめるとおりである。

- (1)速度比(R_v)にばらつきを導入するために、スケールファクター(SF曲線)自体に乱数を導入した。これにより、速度比の法線方向入射速度依存性を考慮したばらつきを考慮を可能にした。
- (2)この結果をもとに、地形を長い直線で表した単純地形モデルと、モデルを細かい三角形で表した凹凸のあるモデルを用いて、速度と軌跡の再現性を比較した。この結果から、軌跡を再現するためには地形の凹凸(ラフネス)を考慮する必要があることを示した。
- (3)斜面の凹凸に与える乱数は、入射角度のばらつきを

参考に決定した。この方法では、地形モデルを構成する三角形要素の大きさによらず変動幅の目安を得ることが可能である。

- (4)断面軌跡は、凹凸が大きいほど跳躍高さの高い方にばらつきがでる。このようなばらつきの再現には、地形モデルの要素は小さい方が有利と考えられる。

なお、本論文では触れなかったが、落石の発生位置や初速が結果に与える影響も意外なほど大きい。この点を含めて、今後も地形要素と軌跡の関係についてさらに系統的に分析していく必要があるものと考えている。

参考文献

- 1) 細谷昭悟, 中根昌士, 松本直樹, 氏平増之, 樋口澄志: 落石の三次元数値シミュレーションに関する研究(続報)凹凸のある採石場の斜面へ適用した場合, 応用地質, Vol.45, No.1, pp2-12, 2004.
- 2) 西村強, 福田毅, 橋本純成, 木山英郎: 3次元落石運動解析における軌跡の広がりに関する検討, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp141-146, 2008.
- 3) 布川哲也, 楊萌, 大西有三, 西山哲, 三木茂: 不連続変形法(DDA)を用いた3次元落石解析に関する研究, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp469-474, 2004.
- 4) 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-, 2002.
- 5) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 中村公一, 酒井直樹: 速度比の基礎的性質に着目した不連続変形法(DDA)による落石シミュレーション, 土木学会論文集, C集, pp53-65, 2009.
- 6) 右城猛, 篠原昌二, 谷田幸治, 八木則男: 落石の斜面衝突運動に関する研究, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.91-96, 2000.

CONCERNING THE INFLUENCE OF VELOCITY RATIO AND TOPOGRAPHY MODEL ON THE RESULT OF ROCKFALL SIMULATION

Tetsuya SHIMAUCHI, Wei, ZHENG, Koichi NAKAMURA, Satoshi NISHIYAMA and Yuzo OHNISHI

Concerning the rockfall experimental result performed by the former ministry of construction in Takamatsu of Japan(1980), a reproductive analysis was carried out using DDAball.

The result are shown as follows:

- (1) There is a dependency of the incident velocity of normal component on the velocity ratio. It is important to consider this property for the reproducibility of velocity.
- (2) In order to consider the standard deviation of the trajectory, it is important to take account of the small roughness in the topographical model; the more roughness in the model, the greatly the scattering of the trajectory.

In the practical rockfall simulation, it is necessary to consider both (1) and (2).