# 落石運動に及ぼす斜面形状と入射角の影響に関する二次元個別要素法解析

# 1. はじめに

我が国では、気象変動に伴う集中豪雨の増加や地震 の多発も起因して落石の発生件数は増加傾向にある. そのような環境下では、落石防護工の合理的な維持管 理が必要であり、落石外力を適切に評価することが重 要課題となっている.種々の斜面形状における落石の 運動特性を把握し、落石シミュレーションの精度向上 を図る必要がある.

そこで本研究では、斜面条件と落石の運動特性の関係を明らかにするために、二次元個別要素法(Discrete Element Method,以下DEMと略す)解析を実施した.一般的に計算コスト縮小のため、斜面は粒子固定でモデル化することが多いが、今回は斜面が粒子固定の条件に加え、堆積層の条件でも実施した.そして、斜面勾配と落石の入射角が、落石の衝突前後の速度比に及ぼす影響について検討した.

#### 2. DEM解析条件

本研究では、既往の研究<sup>1)</sup>における解析パラメータを 使用した.ただし、土粒子密度 $\rho_{s}$ を2700(kg/m<sup>3</sup>)とした.

斜面は図-1の斜面 A と、図-2の斜面 B の 2 種類検討した. 斜面 A は斜面勾配  $\theta$  を変化させ、落石を所定の位置から落下 させた. 斜面 B は、斜面勾配を途中で $\theta_1$ から $\theta_2$ へ変化させ、 初期位置が(-60,60)となる位置から、落石を落下させた.以下、  $\theta_1 \ge \theta_2$ の差を斜面 B の斜面勾配  $\theta$ 'とする. 落石は図-1 に示 す、円礫型の落石を使用した.また、斜面 A は反発係数 e=0.01 $\ge 0.50$ 、斜面 B は反発係数  $e=0.50 \ge 1$ 、落石径より十分小 さい粒子を並べて固定することでモデル化している.

### 3. DEM 解析による落石運動に及ぼす要因検討

#### 3.1 斜面勾配と入射角度の影響

図-3(a)に、斜面 A, B の反発係数が e=0.50 の場合の、斜面 勾配 θ, θ'と入射角 α の関係を示す。斜面 A における入射角



名古屋工業大学

名古屋工業大学

名古屋工業大学

学生会員

正会員

学生会員

○田中

前田

内藤

敬大

健一

直人

図-3 斜面形状が落石の運動に及ばす影響 斜面 A と斜面 B の比較

とは水平面への初期衝突時の入射角のことである.また,斜面 Bにおける入射角とは、 $\theta_1$ の斜面から転がり始めた落石が、初めて $\theta_2$ の斜面へ衝突するときの入射角である.この図-3(a)より、斜面勾配が大きくなるほど、入射角が大きくなることがわかる.また、近似直線を描くと、斜面 Aの斜面勾配 $\theta$ と入射角 $\alpha$ の間には、傾き0.79の直線関係があることが分かった.両者の近似曲線は傾きが非常に似ていることが分かる.

図-3(b)には、斜面 A と B における入射角 a と速度比 V'/V

キーワード	落石,斜面	形状, 個別要素法,	堆積層		
連絡先	$\mp 466$ -8555	愛知県名古屋市昭和国	区御器所町	名古屋工業大学 16 号館 227 号室	TEL052-735-5497



の関係を示す。斜面Aにおける速度比とは、水平面への初期 衝突前後の合成速度の比である。斜面Bにおける速度比とは、  $\theta_1$ の斜面から転がり始めた落石が、初めて $\theta_2$ の斜面へ 衝突する前後の合成速度の比である。

これより,斜面 A, B 共に入射角が大きくなるほど速度比 が小さくなり,両者の傾向は概ね一致することが分かった.

## 3.2 粒子固定斜面における反発係数の影響

図-4(a)に、斜面Aの反発係数が e=0.01 の場合の斜面勾配 θ と入射角 αの関係を示す.比較のために、斜面Aの反発係数 e=0.50 の場合の結果も示す.これより、反発係数 e=0.50 の時 と同様に斜面勾配が大きくなるほど、入射角が大きくなるこ とが分かった.また、斜面勾配 θ と入射角 α の間には傾き 1.10 の直線関係があることが分かった.さらに、反発係数 e=0.50 の場合に比べて、ばらつきが小さいことが分かる.これは、 反発係数が小さく、跳躍高が小さいことが影響していると考 えられる.

また,図-4(b)に斜面 A の反発係数が e=0.01 の場合の,入射 角 α と速度比 V/V の関係を示す.比較のために,斜面 A の反 発係数が e=0.50 の場合の結果も示す.これより,反発係数が e=0.50 の場合と同様に,入射角が大きくなるほど,速度比が 小さくなることが分かった.また,ここでも e=0.01 の方がば らつきは小さくなっている.

以上より,斜面勾配θが大きいと,入射角αが線形に大き くなり,合成速度の減衰が大きくなる可能性が示された.こ の傾向は斜面形状の異なる斜面A,斜面Bに共通して見ら れたことから,落石運動には斜面勾配よりも,落石の入 射角の方が支配的な要因であると考えられる

## 3.3 堆積層のモデル化に伴う落石貫入の影響

前節までは、粒子を固定した斜面で解析を実施した.ここでは、図-5のような厚さ0.7m、幅3.0mの砂の堆積層を作成し、ここに、円礫型の落石を入射させた.なお、入射時の合成速度と入射角度は、斜面Aの反発係数*e*=0.01の解析結果を





用いている.

図-6 に、砂の堆積層へ落石を入射させた場合の入射角αと 衝突前後の全エネルギー比 E'E の関係を示す.また、比較の ため斜面 A で反発係数 e=0.01 に設定した場合の結果も同図 に示す.これより、堆積層の方が粒子固定斜面に比べて全エ ネルギー比が小さいことが分かる.

これは、堆積層が塑性変形することで落石の貫入を許し、 落石の運動エネルギーを吸収したためだと考えられる.

#### 4.まとめ

斜面勾配の増加に伴い,落石の入射角は線形に増加する ことが分かった.また,落石の速度比は,斜面勾配に依らず 落石の入射角に強く依存し,入射角が大きいほど速度比が小 さくなることが明らかとなった.さらに,斜面を堆積層でモ デル化した方が,反発係数e=0.01の粒子固定斜面に比べてエ ネルギー減衰が大きいことが分かった.

従って,落石対策工の維持管理の合理化を図るためには, 斜面表土や崖錐堆積物を詳細にモデル化して,落石外力を適切に評価する必要があると考えられる.

#### 参考文献

 内藤直人,前田健一,牛渡裕二,鈴木健太郎,川瀬良司: 堆積層を有する斜面における衝突条件が異なる落石の運 動挙動,構造工学論文集,Vol.62A,pp.1031-1042,2016.