

屋内落石実験の実測値を用いた落石シミュレーションに関する検討

土木研究所 寒地土木研究所 正会員 ○表 真也
 国土交通省 北海道開発局 正会員 岡田 慎哉
 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 石川 博之
 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 日下部祐基
 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 伊東 佳彦

1. 目的

ここでは、個別要素法を用いた落石シミュレーションにおける解析定数の設定法について屋内実験を行い検討したので報告する。

2. 屋内実験 (自由落下試験)

写真-1には、屋内実験状況を示す。本実験は落下試験体の落下高さを任意に変えて平盤試験体に衝突させ、跳ね返り係数を求める自由落下試験である。

a) 屋内実験試験体の形状・寸法

落下試験体および平盤試験体は、後述の落石挙動解析を行う研究対象斜面と地質条件・地質構成が類似している斜面から岩を採取し作製した。落下試験体は岩体と岩球体の2種類とし、岩球体については3種類を作製した。その直径および質量はそれぞれ φ10cm 1.3kg, φ20cm 10.8kg, φ30cm 35.5kgである。また、平盤試験体は岩盤(一軸圧縮強さ 63 N/mm²)と写真-1のモルタル盤(一軸圧縮強さ 35 N/mm²)の2種類とした。

b) 落下試験と計測方法

落下試験は、落下高さをパラメータとし任意に変化させ、衝突前後の速度を計測し跳ね返り係数を求めた。なお、岩球体の跳ね返り係数は落下高さ、落下速度が精度よく算定できる2回目、3回目の跳躍時について



写真-1 屋内実験状況 (自由落下試験)

表-1 屋内実験結果

| | 平盤材質 | 落体 | | | 落下高さ (m) | 計測時の跳躍回数 | 跳ね返り係数 | | 平均 | 採用値 |
|------------|-------|------|-----------|-----------|----------|----------|--------|------|------|-----|
| | | 形状 | 重量 (kg) | 寸法 (cm) | | | 計測値 e | 採用値 | | |
| 岩球体の室内実験条件 | 岩盤 | 岩球体 | 1.3 | φ10 | 0.5 | 3 | 0.68 | 0.66 | 0.60 | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 1.3 | φ10 | 1.0 | 3 | 0.64 | | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 1.3 | φ10 | 2.0 | 2 | 0.60 | | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 10.8 | φ10 | 3.0 | 2 | 0.70 | 0.61 | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 10.8 | φ20 | 0.5 | 3 | 0.70 | | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 10.8 | φ20 | 0.5 | 3 | 0.73 | | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 10.8 | φ20 | 1.0 | 2 | 0.48 | 0.47 | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 10.8 | φ20 | 2.0 | 3 | 0.53 | | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 10.8 | φ20 | 3.0 | 1 | 0.61 | | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 35.5 | φ30 | 0.5 | 3 | 0.60 | 0.53 | | |
| | 岩盤 | 岩球体 | 35.5 | φ30 | 1.0 | 2 | 0.34 | | | |
| | モルタル盤 | 岩球体 | 1.3 | φ10 | 0.5 | 3 | 0.51 | | | |
| | モルタル盤 | 岩球体 | 1.3 | φ10 | 1.0 | 3 | 0.61 | 0.46 | | |
| | モルタル盤 | 岩球体 | 1.3 | φ10 | 2.0 | 2 | 0.49 | | | |
| | モルタル盤 | 岩球体 | 1.3 | φ10 | 3.0 | 3 | 0.49 | | | |
| | モルタル盤 | 岩球体 | 10.8 | φ20 | 0.5 | 2 | 0.48 | 0.52 | | |
| モルタル盤 | 岩球体 | 10.8 | φ20 | 1.0 | 2 | 0.44 | | | | |
| モルタル盤 | 岩球体 | 10.8 | φ20 | 2.0 | 3 | 0.63 | | | | |
| モルタル盤 | 岩球体 | 35.5 | φ30 | 0.5 | 1 | 0.25 | 0.26 | | | |
| モルタル盤 | 岩球体 | 35.5 | φ30 | 1.0 | 1 | 0.27 | | | | |
| 岩体の室内実験条件 | 岩盤 | 岩体 | 1.9 | □12×10×13 | 1.0 | 1 | 0.24 | 0.34 | 0.24 | |
| | 岩盤 | 岩体 | 1.6 | □9×8×19 | 1.0 | 1 | 0.34 | | | |
| | 岩盤 | 岩体 | 4.7 | □13×12×20 | 1.0 | 1 | 0.44 | | | |
| | 岩盤 | 岩体 | 4.6 | □13×8×30 | 1.0 | 1 | 0.33 | | | |
| | 岩盤 | 岩体 | 10.5 | □20×20×22 | 1.0 | 1 | 0.31 | | | |
| | 岩盤 | 岩体 | 3.6 | □9×14×16 | 1.0 | 1 | 0.31 | | | |
| | 岩盤 | 岩体 | 6.5 | □16×18×23 | 1.0 | 1 | 0.43 | 0.29 | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 1.6 | □9×8×19 | 1.0 | 1 | 0.30 | | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 1.9 | □12×10×13 | 1.0 | 1 | 0.27 | | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 3.6 | □9×14×16 | 1.0 | 1 | 0.31 | | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 4.7 | □13×12×20 | 1.0 | 1 | 0.24 | | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 2.3 | □16×7×17 | 1.0 | 1 | 0.16 | | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 5.8 | □17×15×23 | 1.0 | 1 | 0.30 | | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 6.0 | □14×21×22 | 1.0 | 1 | 0.29 | | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 3.0 | □13×13×22 | 1.0 | 1 | 0.38 | | | |
| | モルタル盤 | 岩体 | 2.7 | □13×10×14 | 1.0 | 1 | 0.34 | | | |
| モルタル盤 | 岩体 | 3.8 | □16×13×20 | 1.0 | 1 | 0.15 | | | | |
| モルタル盤 | 岩体 | 1.5 | □10×8×16 | 1.0 | 1 | 0.38 | | | | |
| モルタル盤 | 岩体 | 2.8 | □15×10×19 | 1.0 | 1 | 0.35 | | | | |

検討することとした。

c) 屋内実験のまとめ

表-1には、落下実験により得られた屋内実験結果を示す。岩体は、岩球体と比較して低い跳ね返り係数になる傾向がみられる。岩体の跳ね返り係数が岩球体に比べ低い値となったのは、岩体が平盤試験体と衝突

キーワード 個別要素法, 落石シミュレーション, DEM, 落石

連絡先 〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 寒地土木研究所 TEL011-841-1698

した時にその形状により反発エネルギーの一部が回転力に変換されたことや、衝突時に局所的な破碎や欠損、変形やめり込みによりエネルギーが消失したためと推察される。

これらの屋内実験の結果から、実験を行った範囲内では落下実験体の材質及び被接触面の材質が同じであっても、落体の形状によって跳ね返り係数が異なる結果が得られた。

3. 当該斜面のDEM落石シミュレーション

(1) 斜面および落石のモデル化

屋内実験結果を用いて、研究対象斜面での落石シミュレーションを行った。対象斜面は、高さ200mを越える急崖斜面で、3mの落石防護工およびその背面に5~20mの落石防護溝を有する。落石岩体は現地調査から直方体形状とし、シミュレーションでは落石の経路、落石防護工に対する落石岩体の衝突の有無、および衝突した場合の落石エネルギーを求めること目的として行った。

(2) 3次元DEMの解析ケース

表-2に本解析にて実施した解析ケースの一覧を示す。跳ね返り係数は屋内実験結果(表-1)に示した採用値を用いた。落石岩体は直方体として斜面との衝突時に受ける抵抗を再現するため、転がり摩擦係数¹⁾1.0を設定した。また、要素の直径を1.0m、重量を104kNとし、バネ係数は岩片の超音波伝播速度から導き、法線方向 8.0×10^{10} N/m、接線方向 2.0×10^9 N/mとした。なお、粘性減衰係数は反発係数から導いた²⁾。

(3) 3次元DEMによる落石到達範囲

図-1には、3次元DEM落石シミュレーションにより得られた岩球体の跳ね返り係数を用いた落下軌跡の過程を示す。

図-2には、図-1の岩球体の跳ね返り係数を用いた場合の落石停止位置を示す。落石岩体の一部は落石防護工を通過するものが生じた。

(4) 3次元DEMの落石エネルギーの算定

表-3に落石防護工の位置を落石岩体が通過した時点での鉛直速度、落石エネルギーを示す。図-2に示すように落石防護工の位置を通過した落石岩体は2岩体である。なお、それぞれの落石岩体の鉛直速度は15.8 m/s、12.2 m/s、落石最大エネルギーは1,300 kJ、774 kJであった。

表-2 解析ケース一覧

| 落石岩体 | 落体 | 斜面 | 跳ね返り係数 | 落体直径 | 落体重量 | バネ係数 (N/m) | | 転がり摩擦係数 |
|------|-----|----|--------|------|--------|----------------------|-------------------|---------|
| | | | | | | 法線方向 | 接線方向 | |
| 岩球体 | 安山岩 | | 0.60 | 1.0m | 104kN | 8.0×10^{10} | 2.0×10^9 | 1.0 |
| | 火砕岩 | | 0.46 | | | | | |
| | 崖錐部 | | 0.01 | | | | | |
| 岩体 | 安山岩 | | 0.24 | 1.0m | 104 kN | 8.0×10^{10} | 2.0×10^9 | 1.0 |
| | 火砕岩 | | 0.15 | | | | | |
| | 崖錐部 | | 0.01 | | | | | |

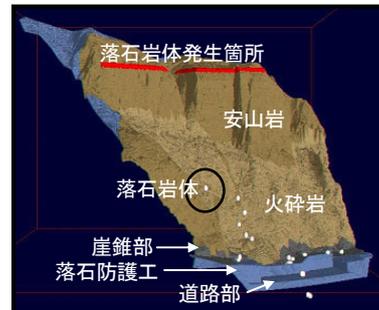


図-1 岩球体の跳ね返り係数を用いた場合の落下軌跡の過程



図-2 岩球体の跳ね返り係数を用いた場合の落石停止位置

表-3 落石防護工への落石エネルギー (岩球体)

| 落石岩体 | 斜面 | 跳ね返り係数 | 落体直径 | 落体重量 | 落下高さ | 鉛直速度 | 落石エネルギー |
|------|-----|--------|------|-------|------|----------|---------|
| 岩球体 | 安山岩 | 0.60 | 1.0m | 104kN | 176m | 15.8 m/s | 1300kJ |
| | 火砕岩 | 0.46 | | | | | |
| | 崖錐部 | 0.01 | | | | | |
| 岩球体 | 安山岩 | 0.24 | 1.0m | 104kN | 175m | 12.2 m/s | 774kJ |
| | 火砕岩 | 0.15 | | | | | |
| | 崖錐部 | 0.01 | | | | | |

4. まとめ

結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 落下試験体の材質及び被接触面の材質が同じであっても、落下試験体の形状で跳ね返り係数が大きく異なる。
- (2) 3次元DEMでは、落石の挙動や落石エネルギーおよび到達範囲が推定できることから、道路防災に有効な手法であると考えられる。

参考文献

- 1) 阪口秀, 岩下和義, 中瀬仁, 本田中, 西野隆之: 土の構造とメカニクス-ミクロからマクロへ 4, 数値粒子法による土の微視的挙動の追跡 (その4), 社団法人地盤工学会, pp. 53-58, 2002
- 2) 大町達夫, 荒井靖博: 個別要素法で用いる要素定数の決め方について, 構造工学論文集Vol. 32A, 1986