

二次元個別要素法を用いた落石シミュレーションに関する数値解析的検討

土木研究所	寒地土木研究所	正会員	○表	真也
土木研究所	寒地土木研究所	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

本検討では、2次元個別要素法を用いた落石シミュレーション手法の確立を目的として、岩盤斜面上から岩塊が落下した場合についての落石シミュレーションを行い、その適用性について検討した。

2. 落石シミュレーション概要

2.1 斜面および落石のモデル化

図-1に、DEMに用いた解析モデルを示す。本解析モデルでは地山を要素の集合体として表現することで、落石の衝突による地山の破碎の再現や、要素間の結合を切ることによる崖錐部の再現を行い、落石が地山の表面性状から受ける影響を再現可能なモデルとした。また、落下衝撃による落下岩体の破碎・分離も組み込んだモデルとなっている。

斜面モデルに関しては落石挙動解析を行う調査箇所の地質調査結果と岩石試験結果をもとに地質区分を行っている。

落石岩体モデルの要素径は、節理間隔および過去の落石事例、内部亀裂、破碎の再現性などから、最大 1.0 m から、最小 0.5 m とした。また、モデルは最大要素から最小要素までの要素数の割合が一樣となるように作成した。

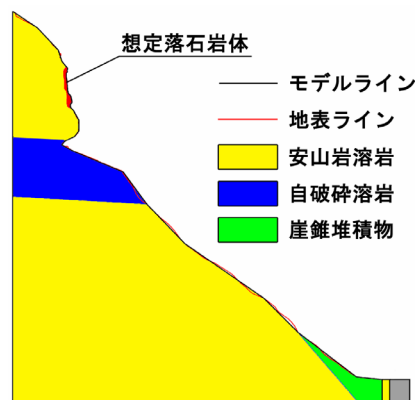


図-1 2次元DEMモデル図

2.2 解析条件の設定

解析に用いる要素間バネ係数は、地質調査により得られた岩片の弾性波速度を用い、以下の(式-1)、(式-2)の算出式より法線方向のバネ定数 $k_n = 2.41 \times 10^7 \text{ kN/m}$ 、接線方向のバネ定数 $k_s = 6.36 \times 10^6 \text{ kN/m}$ を算出した¹⁾。

$$k_n = \frac{1}{4} \pi \rho V_p^2 \quad (\text{式-1})$$

ここで、 k_n : 法線方向バネ定数

ρ : 密度

V_p : 縦弾性波速度

$$k_s = \frac{1}{4} \pi \rho V_s^2 \quad (\text{式-2})$$

ここで、 k_s : 接線方向バネ定数

V_s : せん断弾性波速度

解析に用いる要素間の引張強度は、解析対象斜面の地質調査と岩石試験結果を基に、本解析手法を用いた逆解析的方法により求めた。すなわち、採取試料の一軸圧縮試験を、引張強度をパラメータとしたDEMにより再現し、試験結果と解析結果が概ね一致するような引張強度を実際の引張強度と仮定して設定した。これにより得られた引張強度は、 $f_t = 420 \text{ MPa}$ であった。

解析においては、岩石試験結果と実規模斜面との寸法の違いによる見かけの強度の差異が生じること、すなわち寸法効果^{2), 3)}を考慮し、一軸圧縮試験により得られた引張強度に対して、その寸法差より3分の1程度の見かけ強度になるものと仮定し、引張強度 $f_t = 140 \text{ MPa}$ の場合についても同様に検討することとした。

キーワード 2次元個別要素法、落石シミュレーション手法

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

2. 3 解析ケース

表－1に、実施した解析ケースの一覧を示す。表中の解析ケース名の第1項目は解析手法を、第2項目は減衰定数を示している。第3項目は寸法効果の考慮の有無を示し、Aは寸法効果を考慮した場合、Nは考慮していない場合とする。減衰定数は室内試験より反発係数を求め、これより減衰定数を算出し、 $h=0.4, 0.5, 1.0$ の3つを設定した。これに寸法効果の考慮の有無を組み合わせた計6ケースについて解析を実施した。

3. 解析結果

3. 1 DEMによる落石軌跡

図－2に、DEMより得られた落石軌跡の一例を示す。

(a) 図に示すような寸法効果を考慮した3ケースにおいては、いずれの場合にも最初の緩斜面との衝突により落石岩体に破砕が発生し分離した。その後、分離した落石岩体が各々落下し解析モデルの範囲を超えた。

(b) 図に示すような寸法効果を考慮しない3ケースにおいては、落下開始直後に落石岩体は半回転し、岩体上部が緩斜面に衝突して回転を生じながら大きくバウンドした。その後、衝突を繰返しながら斜面に沿って落下し、解析モデルの崖錐堆積物上で停止した。落石岩体の破砕は生じなかった。

これらのことより、DEMにおいて落石岩体の破砕が解析結果に与える影響は大きく、的確に破砕を考慮して再現することが肝要といえる。

3. 2 落石衝突エネルギーの推定

表－2に、各解析ケースにおける落石状況および衝突エネルギーの一覧を示す。衝突エネルギーは想定した道路脇を通過した時点での落石岩体重量と通過速度より算定した。

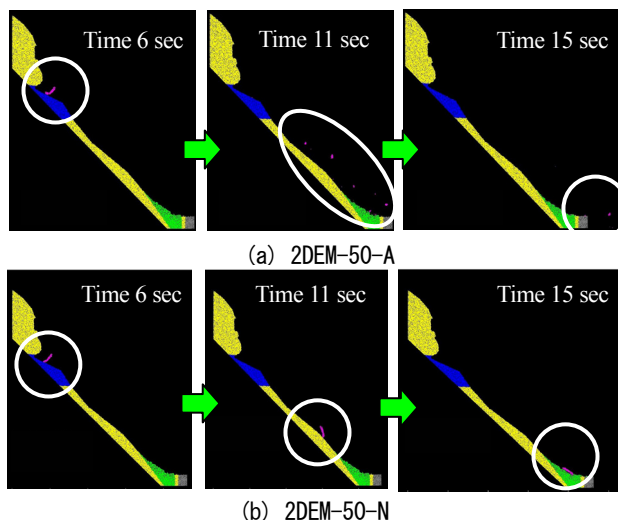
表より、寸法効果を考慮した場合には、落石岩体が破砕したことにより個々の落石岩体の重量が軽減され、結果として衝突エネルギーが相対的に小さな評価となっている。

寸法効果を考慮せず減衰定数が大きいケースは、落石岩体が大きなまま衝突するため、衝突エネルギーが大きな評価となっている。また、減衰定数が小さいケースでは崖錐部で停止するケースも見られた。

これらのことより落石岩体の破砕の状況や、地山の評価を適切に再現することによって、落石状況や衝突エネルギーを実現現象に即した形で評価が可能になると考えられる。

表－1 2次元DEMの解析ケース一覧

ケース	減衰定数 h	法線方向 バネ定数 k_n (kN/m)	接線方向 バネ定数 k_s (kN/m)	引張強度 f_t (MPa)
DEM-100-A	1.00	2.41×10^7	6.36×10^6	140 (寸法効果考慮)
DEM- 50-A	0.50			
DEM- 40-A	0.40			
DEM-100-N	1.00			420
DEM- 50-N	0.50			
DEM- 40-N	0.40			



図－2 2次元DEM解析結果の落石軌跡の例

表－2 落石到達範囲および落石エネルギー一覧

ケース	衝突速度 (m/s)	落石岩体重量 (tf)	衝突エネルギー (kJ)	落石到達範囲
DEM-100-A	5.2	10	135	覆道に衝突後、解析範囲外へ
DEM- 50-A	17.7	13	2060	覆道に衝突後、解析範囲外へ
DEM- 40-A	12.0	13	940	覆道に衝突後、解析範囲外へ
DEM-100-N	10.0	46	2300	覆道に衝突後、解析範囲外へ
DEM- 50-N	—	46	—	崖錐部に停止
DEM- 40-N	—	46	—	崖錐部に停止

4. まとめ

結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 地山を要素の集合体として表現することで地山の影響が表現でき、破砕現象や崖錐の緩衝効果を表現することができた。
- 2) 落石岩体の破砕を適切に考慮することで、落石衝突エネルギーを実現現象に即した形で評価可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 伯野元彦：破壊のシミュレーション、森北出版、pp.39-45、2004
- 2) 川本眺万、吉本龍之進、日比野敏：新体系土木工学 20 岩盤力学、技法堂出版、pp.121-125、1985
- 3) I.W.ファーマ著（江崎哲郎、松井紀久男 訳）：岩盤工学の基礎と応用、鹿島出版会、pp.22-23、1988