

三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

Numerical Study for Rockfall Simulation Using 3Dimension Distinct Element Method

土木研究所	寒地土木研究所	○正 員	表 真也 (Shin-ya Omote)
土木研究所	寒地土木研究所	正 員	岡田慎哉 (Okada shin-ya)
土木研究所	寒地土木研究所	正 員	石川博之 (Hiroyuki Ishikawa)
土木研究所	寒地土木研究所	正 員	日下部祐基 (Yuki Kusakabe)
土木研究所	寒地土木研究所	正 員	伊東佳彦 (Yoshihiko Ito)

1. はじめに

我が国の国土は、狭く細長い上に脊梁に山脈が縦断する急峻な地形を呈している。そのため、道路は海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って建設されている箇所が多い。通常、斜面沿いに建設される道路の場合には、そのルート選定の際に斜面の安全に関しても十分な検討が成されており、斜面災害の危険性はほとんどないといえる。しかしながら、長期に渡る凍結・融解による岩盤斜面の風化などの斜面の経時変化により、その状態が計画・設計時と変化する場合があります、場合によっては落石等の斜面災害の可能性が考えられる。このような場合には、道路防災の観点から、その安全性に対する検討が必要になるものと考えられる。

しかしながら、落石は暴風雨や積雪後の融雪時における斜面の緩み、斜面の凍結融解などに起因して突発的に発生する自然現象であり、不規則性が強く、事前にその発生時期を予測することは極めて難しい。そのため、必要に応じて防護工による落石対策を行うことが現実的である。

ここで、このような落石に対して、発生源の危険度評価や、落石経路や到達範囲、衝突エネルギー等を精度よく推定することができれば、より適切な道路防災計画が可能となり、これによって効率的な資金投入が実施できる。結果として、コスト縮減および安全性の向上を図ることができるようになるものと推察される。

これらの落石の評価手法の一つとして、個別要素法（以後、DEM とする）による落石シミュレーションが挙げられる。DEM は、落石のような固体の運動をシミュレートするのに適した数値解析手法である。本研究では3次元DEMを用いて、落石の運動をシミュレートすることとした。3次元DEMでは岩盤斜面の沢や尾根地形などを考慮することができるため、複雑な落石挙動を推定することが可能であること、落石の破碎や跳躍による影響範囲や到達範囲を3次元的に検討できることから、防護工の必要延長を決定するのに有効である。

しかしながら、数値解析的な手法は、その計算の精度にある程度の信頼性が伴わなければ、実際に計画・設計に適用することは難しい。

そこで本検討では、DEM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



図-1 実験における岩塊の軌跡
(●は 1/6 秒毎の位置)

下した場合について落石シミュレーション手法を用い、その適用性について検討したものである。本検討では落石の挙動を精度よく再現するため、予備落石実験を実施し実際の定数を得た。これを基に落石経路や到達範囲の推定、落石が構造物に到達した時点でのエネルギーや衝撃力の推定を行った。

2. 3次元DEM落石シミュレーション

2.1 予備落石実験と3次元DEMによる再現解析

本検討では、落石挙動解析を行う前に予備落石実験を行い、DEM 手法の検証を行うこととした。予備実験は、落石挙動解析を行う当該崖斜面と地質条件・地質構成が類似している斜面を選定し、直径 40 cm 程度の岩塊試験体を、斜面頂部から自由落下させることで行った。予備実験で対象とした斜面の比高はおよそ 200 m であった。試験体は投下後、最初の露岩部との衝突によって破碎し、落下した。図-1 には、落石の軌跡を斜面の写真に重ねて示している。

(1) 斜面のモデル化および解析条件の設定

落石実験を行った当該崖斜面は、事前に航空レーザ測量により、詳細な斜面データを得ている。この測量データを規則配置に変換し、点群位置に三角形板要素を配置することによりモデル化した。

要素間のバネ定数については、実験結果を最も良く再現した $k_n = 36,700 \text{ kN/m}$ 、 $k_s = 918 \text{ kN/m}$ を用いることとした。

また、粘性減衰係数の設定については、簡易な測定試験を実施し、その結果から値を算定することとした。図-2には、試験の状況を示している。試験は、落石実験に使用した岩塊を74 cmの高さからコンクリート面に落下させ、衝突時の跳ね返りを計測するものである。この試験により、反発係数 $R = 0.25$ を得た。

粘性減衰係数 η は、1自由度系の運動方程式から、反発係数 R と減衰定数 h との関係をを用いることで導かれる¹⁾。これを下式に示す。

$$h = \sqrt{\frac{(\ln R)^2}{(\ln R)^2 + \pi^2}} \quad (\text{式-1})$$

ここで、 h ：減衰定数

R ：反発係数

上式より減衰定数 $h = 0.40$ が得られ、粘性減衰係数 η はこれを用いて下式で算定される。

$$\eta = 2h\sqrt{m \cdot K} \quad (\text{式-2})$$

ここで、 η ：粘性減衰係数

m ：岩体質量

K ：要素間バネ定数

これより、粘性減衰係数が得られる。

(2) 予備実験の再現解析ケース

当該崖斜面では、実験状況に関して法尻から高さ50～60m程度の高さまでしかビデオ撮影が出来なかったことから、斜面下部を解析対象とすることとした。

表-1には、解析ケース一覧を示している。本解析では、実験において計測範囲に落石が到達した時点で、既に落石は落下による速度を持っている状態のため、初期条件として初速度を与えることとした。入力した初速度は、正確な計測区間到達速度が不明のため、 $V = 0.0, 6.0, 12.0$ m/sの3ケースとし、その差異について検討することとした。

また、反発係数 R については、その解析結果に与える影響を調べることを目的として、求められた反発係数 $R = 0.25$ の前後として、 $R = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ の4ケース設定し、検討を行うこととした。

(3) 予備実験の再現解析結果

図-3には、初速度と落下状況の関係を、縦軸に高さ、横軸に落下時間として示している。なお、比較のため、斜面の影響を一切排除し、岩塊が自由落下した場合についても併せて示している。

図より、初速度が大きいほど、斜面を落ちきるまでに必要な時間が短くなっていることが分かる。

しかしながら、初速度と落下時間の間には、明瞭な相関関係は見出せず、斜面との衝突の状況によっても結果に大きな差異が発生しているものと考えられる。

図-4には、反発係数と落下時間の関係を示している。なお、図は図-3と同様の表示となっている。

図より、反発係数と落下時間には相関は特に見られない。これは、反発係数の違いにより、岩塊の跳躍状況が大きく変化しているものと考えられ、これより落石の経路が大きく異なるために落下時間の差異が発生したものと思われる。

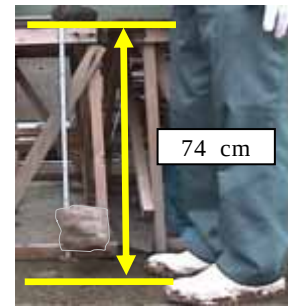


図-2 測定試験状況

表-1 予備実験解析ケース一覧

ケース	反発係数 R	減衰定数 h	粘性減衰 η (N・sec/m)	初速度 V (m/s)
R15-V12	0.15	0.52	76,900	12.0
R20-V12	0.20	0.46	67,800	12.0
R25-V12	0.25	0.40	60,100	12.0
R30-V12	0.30	0.36	53,200	12.0
R25-V0	0.25	0.40	60,100	0.0
R25-V6				6.0

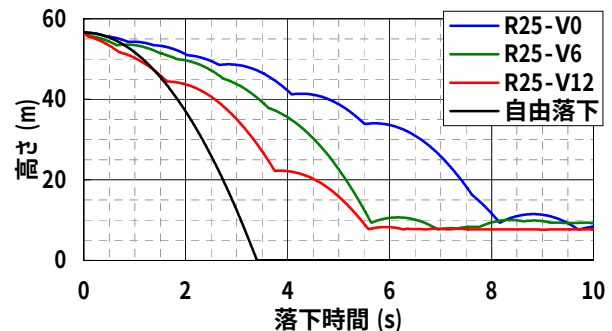


図-3 初速度の違いによる落下時間の比較

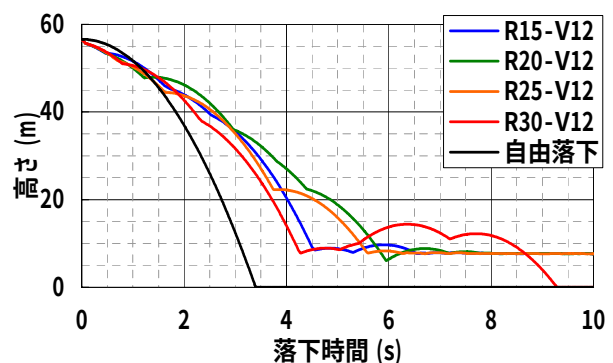


図-4 反発係数の違いによる落下時間の比較

図-5には、反発係数の異なる4ケースについて、それぞれの落石軌跡を示している。図より、 $R = 0.15$ および $R = 0.30$ の場合には、上部において落石岩塊が一度斜面に接触し、大きく跳躍したのちに下の緩斜面で再度接触し、跳躍している。その後は、落下速度を増してほぼ直線的にころがる様な運動をしており、落石実験(図-1)の軌跡と良く合っている。

しかしながら、 $R = 0.20$ および $R = 0.25$ の場合には衝突により左右に跳躍する経路を辿り、実験の軌跡と大きく異なる。これらのことより、起伏に富んだ自然斜面では反発係数の影響を大きく受け、岩塊の跳躍状況が大きく変化することが明らかとなった。よって、本解析においては反発係数に関して、ある程度の幅を考慮し、パラメータとして取り扱うこととした。

2.2 当該斜面の3次元DEM落石シミュレーション

(1) 斜面および落石のモデル化

図-6には、3次元DEMに用いた解析モデルを示している。3次元シミュレーションを行う当該崖斜面については、3D-CADの測量データを基に、予備解析と同様の手順にて作成することとした。斜面モデルについては、約151,000個の三角形板要素によってモデル化した。落石岩体については、3D-CADデータをもとに球要素の六方最密配置によりモデル化した。

(2) 解析条件の設定

本解析手法においては通常、減衰として質量と比例関係にある粘性減衰を用いている。

しかしながら、今回の予備実験のような落石岩体の破砕が発生する場合には、破砕によって岩塊質量が変化するため、質量に依存する粘性減衰係数(式-2)では安定した解を得ることは難しい。そのため、減衰項の式を変換し、力に依存する形に変更することで、破砕による質量の変化に対して安定した減衰が生じるように改良した。

すなわち、(式-3)は、粘性減衰係数を用いる場合の微小要素間に生じる相対力を算出する式であるが、粘性減衰係数が質量に依存するため、減衰項である右辺の第二項は質量に依存することとなる。

$$f = K \cdot x - \eta \cdot V \quad (\text{式-3})$$

ここで、 f ：落石と斜面間の接触力

K ：要素間のバネ定数

x ：要素間距離

η ：粘性減衰係数

V ：要素移動速度

そこで、減衰項をバネ定数の中に内包する形に変換し、別の減衰定数を用いる形に(式-3)を変換すると、以下のようになる。

$$f = (1 - \alpha)K \cdot x \quad (\text{式-4})$$

ここで、 α ：減衰定数

このようにすることで、落石の質量に依存しない、安定した減衰を作用させることが出来る。ここで、 α を「グローバル減衰」と称することとする。本解析では、このグローバル減衰を用いて解析を実施することとした。

(3) 引張強度の設定

当該崖斜面においては、予備実験結果より落石岩塊の破砕が想定される。DEM解析において、岩塊の破砕を再現するためには、落石岩体をモデル化している要素間に、引張強度を設定する必要がある。

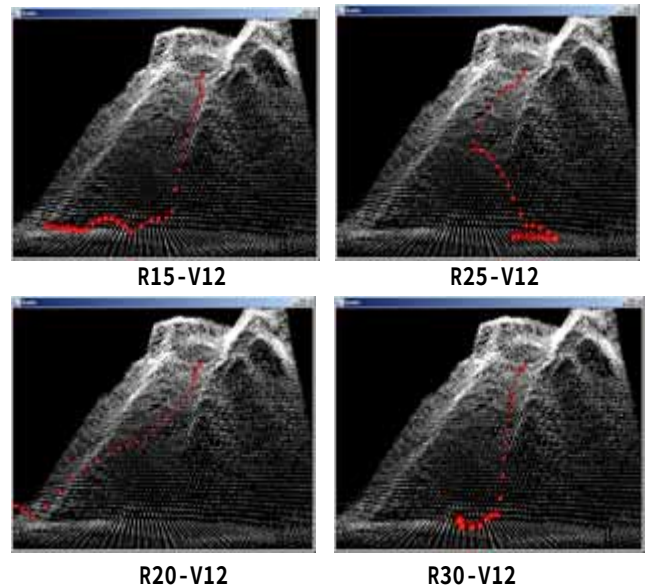


図-5 解析結果の落下軌跡の例

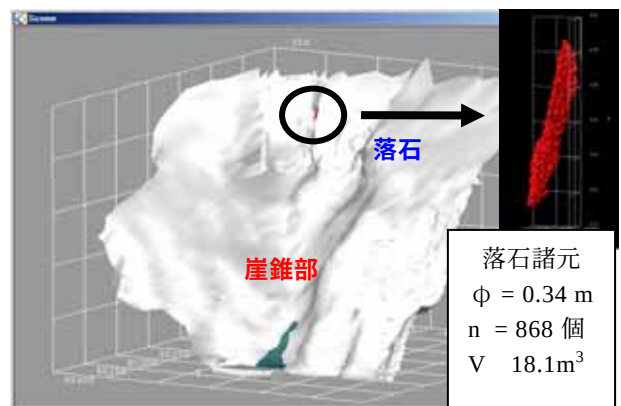


図-6 3次元DEMにおける解析モデル

表-2 3次元DEM解析の解析ケース一覧

ケース	反発係数 R	減衰定数 h	グローバル減衰 α	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 (kN)
3DEM-52-N	0.15	0.52	0.95	36,700	918	—
3DEM-52-A						1,620
3DEM-46-N	0.20	0.46	0.92			—
3DEM-40-N	0.25	0.40	0.88			1,620
3DEM-40-A						—
3DEM-36-N	0.30	0.36	0.83			—

引張強度については、現地岩盤の割裂試験の再現解析を本解析手法を用いて実施し、引張強度をパラメータとした逆解析の手法により求めた。すなわち、引張強度を漸増させた解析を繰返し、実験結果の再現性が最も高い、実際の引張強度と仮定する方法である。これにより得られた引張強度は、 $f_t = 1,620$ kNであった。

(4) 解析ケース

表-2には、本解析にて実施した解析ケースの一覧を示している。本解析では、予備実験およびその再現解析の結果を踏まえ、反発係数に関しては $R = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ の4ケースについて解析を実施することとし

た。なお、減衰定数 h 、 α についても、反発係数を用いた計算式により算定されることより、併せて値が変更される。さらに、想定されている落石岩塊の破碎に関して、解析上で破碎を考慮した場合と考慮しない場合との比較を行うため、落石岩体の破碎の有無を組み合わせ、計 6 ケースの解析を実施した。表中の解析ケース名の第 1 項目は解析手法である 3DEM とし、第 2 項には減衰定数 h の値を示し、第 3 項には破碎の有無を、破碎を考慮する場合を A、破碎を考慮しない場合を N として示している。

(5)解析結果

図-7 には、三次元 DEM による落石シミュレーションにより得られた落石軌跡の一例を示している。図より、破碎を考慮しないいずれのケースにおいても、岩塊は斜面の沢地形に沿ってほぼ直線的に落下する傾向が見られる。落下時の落石挙動に着目すると、落下開始直後に横倒しに近い状態となって落下し、その状態のまま緩斜面部分に衝突し、大きくバウンドしている。その際に岩塊に大きな回転モーメントが作用し回転運動を始め、すぐには落下に至らない。特に、反発係数が大きい場合にその傾向が顕著となっている。

また、破碎を考慮した場合には、最初の緩斜面部分との衝突で岩塊が破碎し、幾つかの岩塊に分離した状態で沢地形に沿って落下していく傾向が分かる。

これらのことより、破碎の考慮の有無により解析結果に大きな差異が現れており、的確に破碎を考慮し、再現することが肝要であることが示された。

3. 落石の衝突エネルギー推定

当該崖斜面に対して落石シミュレーション手法より得られた解析結果を用いて、斜面法尻に落石防護覆道が設置してあると仮定した場合における、覆道に対する落石岩塊の衝突の有無および、衝突した場合の衝突エネルギーの評価を行った。

表-3 には、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している。なお、衝突エネルギーは想定した覆道位置を通過した時点での岩塊重量と通過速度より算定している。

表より、岩塊が破碎しない場合には、岩塊が大きなまま衝突していることに起因し、衝突エネルギーが大きな評価となっている。岩塊の破碎を考慮した場合には、岩塊が破碎したことにより、岩塊重量が軽減され、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。

また、落石の到達範囲に関して、破碎を考慮した場合にはより広範囲に落石が分布することが明らかとなった。

これらのことより、破碎を適切に再現することで、破碎を考慮しない場合と比較して衝突エネルギーを小さく評価でき、より合理的な落石評価が可能になると考えられる。さらに、破碎を考慮することで落石到達範囲を評価可能であると考えられる。しかしながら、過剰に破碎を考慮すると落石岩塊が破碎により過剰に細分化され、衝突エネルギーが過小に評価される危険性がある。

表-3 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)	岩塊重量 (tf)	衝突エネルギー (kJ)	落石到達範囲
3DEM-52-N	27.1	46	16,900	覆道に衝突後、解析範囲外へ
3DEM-52-A	23.6	16	4,440	覆道に衝突後、解析範囲外へ
3DEM-46-N	41.0	46	38,600	覆道に衝突
3DEM-40-N	27.3	46	17,200	覆道に衝突
3DEM-40-A	25.7	12	3,967	覆道に衝突後、解析範囲外へ
3DEM-36-N	26.9	46	16,600	覆道に衝突

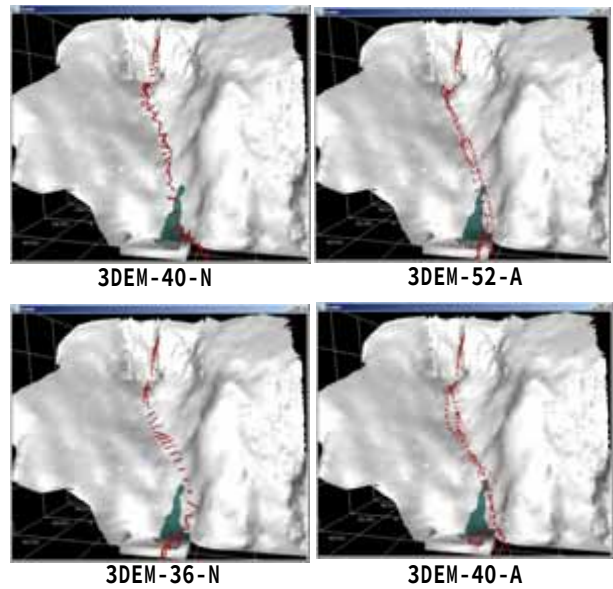


図-7 3次元 DEM 結果の落石軌跡の例

4. まとめ

本検討は、DEM 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落石シミュレーション手法を用い、その適用性について比較検討したものである。結果をまとめると、以下のようなものである。

- 1) 反発係数が解析結果に与える影響は大きく、その設定には注意を必要とする。
- 2) 落石岩塊の破碎を適切に考慮することで、落石到達範囲、落石衝突エネルギーともに精度よく評価可能であると考えられる。
- 3) 岩盤斜面の細かな勾配や凹凸がモデル化され、複雑な落石運動が捉えられた。
- 4) 力に依存した減衰（グローバル減衰）を導入することで、破碎を考慮した落石挙動が得られ、実現象に即した結果が得られた。

今後は、別の斜面を対象とした同様の検討を実施し、手法の適用性や解析パラメータの決定方法などの検討を深め、解析手法の改良を進める予定である。

参考文献

- 1) 大町達夫他：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。