

2次元および3次元DEMを用いた 落石シミュレーションに関する検討

表真也^{1*}・岡田慎哉¹・石川博之¹・伊東佳彦²・日下部祐基²

¹土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム（〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34号）

²土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム（〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34号）

*E-mail: omote@ceri.go.jp

本検討は落石対策工の合理的な計画や設計，コスト縮減に寄与するための基礎資料を得ることを目的として，岩盤斜面上から岩塊が落下した場合について2種類の落石シミュレーション解析手法（2次元DEM・3次元DEM）を用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，現地で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．

Key Words : 2D-distinct element method, 3D-distinct element method, rockfall, rockfalling test, simulation method

1. はじめに

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．このような落石に対しての，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る．

本検討では，落石対策工の合理的な計画や設計，コスト縮減に寄与するための基礎資料を得ることを目的として，岩盤斜面上から岩塊が落下した場合について2種類の落石シミュレーション手法（2次元DEM・3次元DEM）を用い，その適用性について比較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，現地で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．

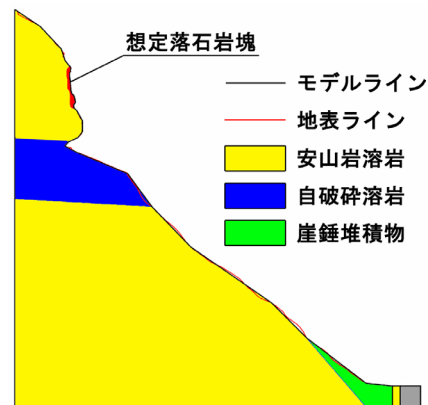


図-1 2次元DEMモデル図

を要素の集合体として表現することとした．これにより地山の表面形状による影響が再現でき，さらに，衝突による地山の破碎や，要素間の結合を切ることで崖錘部の土砂を再現した．なお，斜面の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および密度に関しては，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，最大要素を1.0mとし，最小要素を0.5m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様となるように作成した．

2. 2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-1には，2次元DEMに用いた解析モデルを示している．落石の運動は，地山の表面形状に強く影響を受ける．本解析モデルでは，これを再現するために地山

(2) 2次元DEMの解析条件の設定

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)

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)	引張強さ f_t (MPa)
2DEM-100-A	1.00	2.41×10^7	6.36×10^6	140 (寸法効果考慮)
2DEM-50-A	0.50			
2DEM-40-A	0.40			
2DEM-100-N	1.00			420
2DEM-50-N	0.50			
2DEM-40-N	0.40			

の算出式より法線方向のバネ定数 $k_n = 2.46 \times 10^7$ kN/m, 接線方向のバネ定数 $k_s = 6.36 \times 10^6$ kN/mを算出した¹⁾.

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

ここで, k_n : 法線方向バネ定数

ρ : 密度

V_p : 縦弾性波速度

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

ここで, k_s : 接線方向バネ定数

V_s : せん断弾性波速度

また, 解析に用いる要素間の引張強さは, 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, 引張強さをパラメータとした2次元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さを実際の引張強さと仮定して設定した. これにより得られた引張強さは, $f_t = 420$ MPaであった.

また, 2次元DEM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寸法効果が生じる^{2), 3)}ことを考慮し, 一軸圧縮試験により得られた引張強さに対して, 文献2), 3)より, 3割程度の見かけ強度になるものと仮定し, 引張強さ $f_t = 140$ MPaの場合についても同様に検討することとした.

(3) 2次元DEMの解析ケース

表-1には, 2次元DEMにおいて実施した解析ケースの一覧を示している. なお, 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. また, 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.

2次元DEMにおいては, 後述の予備実験およびその解析結果を踏まえ, 減衰係数を $h = 0.4, 0.5, 1.0$ の3ケースとし, 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.

(4) 2次元DEMの落石軌跡

図-2には, 2次元DEMより得られた落石軌跡の一例を示している.

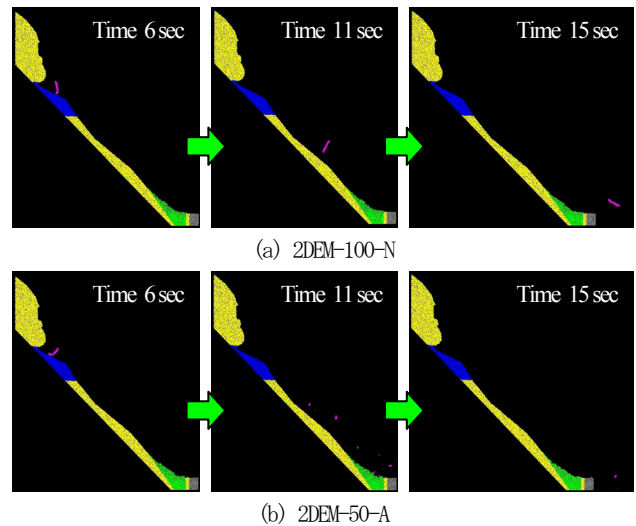


図-2 2次元DEM解析結果の落石軌跡の例



図-3 実験における岩塊の軌跡

(●は1/6秒毎の位置)

(a) 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, 落石岩体は, 落下開始直後に横倒しに近い状態となり, その状態で落下し緩斜面に衝突した. その際, 回転を生じながら大きくバウンドした. その後, 衝突を繰り返しながら斜面に沿って落下し, 解析モデル化範囲を超えた. 岩塊の破碎は生じなかった.

(b) 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岩塊に破碎が発生し, 分離した. その後, 分離した岩塊が各々落下し, すべて解析モデル化範囲を超えた.

これらのことより, 2次元DEMにおいて岩塊の破碎が解析結果に与える影響は大きく, 的確に破碎を考慮し, 再現することが肝要といえる.

3. 3次元DEM落石シミュレーション

(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40cm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

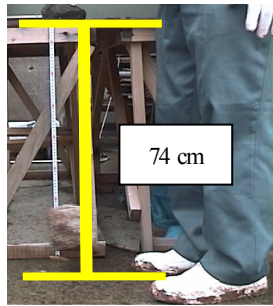


図-4 測定試験状況

た．予備試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-3 には，落石の軌跡を斜面の写真に重ねて示している．

a) 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取得している．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 $k_n=36,700 \text{ kN/m}$ を用いることとした．

また，粘性減衰定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-4 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j用いることで導かれる⁴⁾．これを下式に示す．

$$h = \sqrt{\frac{(\ln R)^2}{(\ln R)^2 + \pi^2}} \quad (3)$$

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．

$$\eta = 2h\sqrt{m \cdot K} \quad (4)$$

ここで， η ：粘性減衰定数
 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．

b) 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 ～60 m 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-2 には，解析ケース一覧を示している．落石シミ

表-2 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

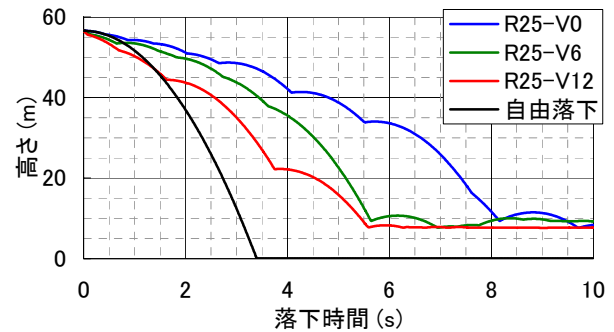


図-5 初速度の違いによる落下時間の比較

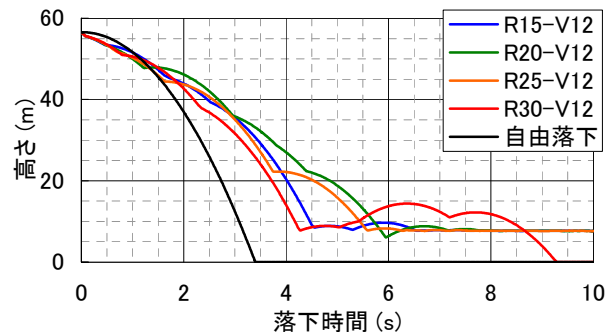


図-6 反発係数の違いによる落下時間の比較

ュレーションでは本来，実験時の投下の状態に合わせて，解析に初速度等の初期条件を与える．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， $V=0.0, 6.0, 12.0 \text{ m/s}$ 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．

C) 予備実験の再現解析結果

図-5 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

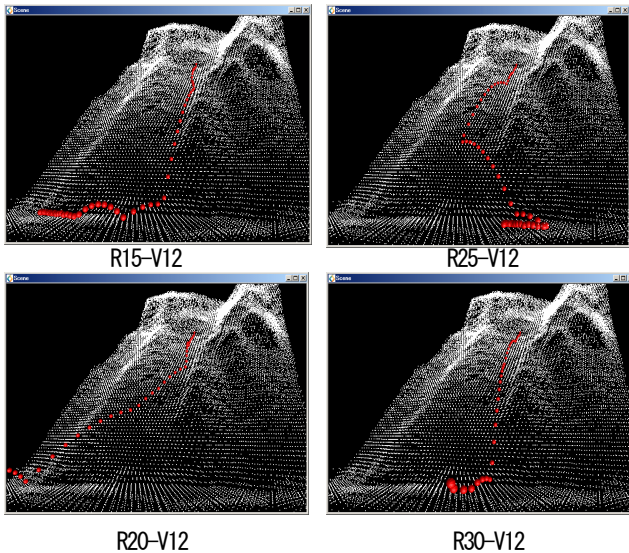


図-7 解析結果の落下軌跡の例

きな差異が発生しているものと考えられる。

図-6 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-5 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は見られない。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-7 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) 3次元DEM落石シミュレーション

a) 斜面および落石のモデル化

図-8 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。

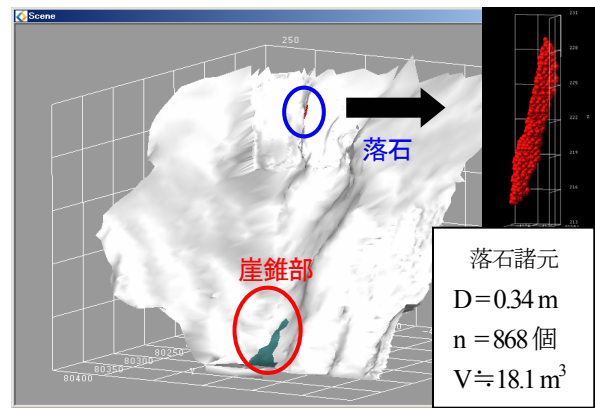


図-8 3次元DEMにおける解析モデル

b) 3次元DEMの解析条件の設定

本解析手法においては、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碎が発生する場合には、破碎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定数（式-4）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、破碎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-5）は、粘性減衰定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、粘性減衰定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。

$$f = K \cdot x - \eta \cdot V \quad (5)$$

ここで、 f ：落石と斜面間の接触力

K ：バネ定数

x ：要素間距離

η ：粘性減衰定数

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-5）を変換すると、以下のようにできる。

$$f = (1 - \alpha) K \cdot x \quad (6)$$

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。

表-3 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 α	法線方向 バネ定数 k_n (kN/m)	接線方向 バネ定数 k_t (kN/m)	引張強さ f_t (kN)
3DEM-52-N	0.15	0.95	36,700	918	—
3DEM-52-A					1,620
3DEM-46-N	0.20	0.92			—
3DEM-40-N					0.25
3DEM-40-A	0.30	0.83			
3DEM-36-N					

c) 3次元DEMの引張強さ

当該崖斜面においては、予備実験結果より落石岩塊の破碎が想定される。DEM解析において、岩塊の破碎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、引張強さを設定する必要がある。

引張強さについては、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、引張強さ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、引張強さ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引張強さを、実際の引張強さと仮定する方法である。これにより得られた引張強さは、 $f_t = 1,620$ kNであった。

d) 3次元DEMの解析ケース

表-3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。

(e) 3次元DEMの解析結果

図-9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。

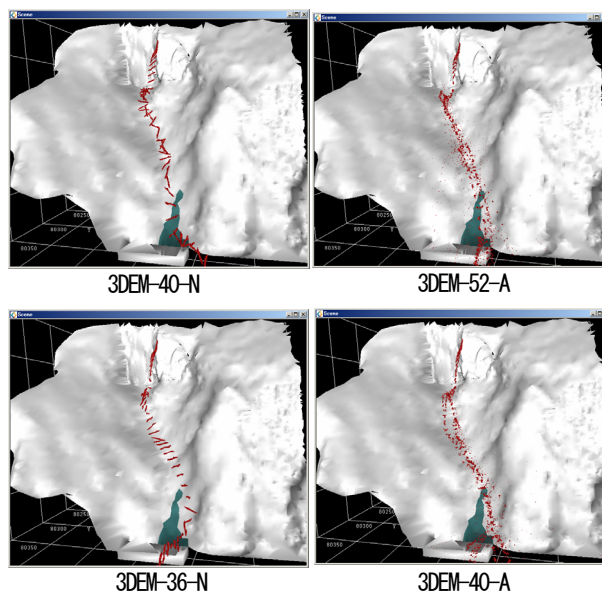


図-9 3次元DEM結果の落石軌跡の例

表-4 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
2DEM-100-A	5.2	10	135	覆道に衝突後、解析範囲外へ
2DEM-50-A	17.7	13	2060	覆道に衝突後、解析範囲外へ
2DEM-40-A	12.0	13	940	覆道に衝突後、解析範囲外へ
2DEM-100-N	10.0	46	2300	覆道に衝突後、解析範囲外へ
2DEM-50-N	—	—	—	崖縁部に停止
2DEM-40-N	—	—	—	崖縁部に停止
3DEM-52-N	27.1	46	16900	覆道に衝突後、解析範囲外へ
3DEM-52-A	23.6	16	4440	覆道に衝突後、解析範囲外へ
3DEM-46-N	41.0	46	38600	覆道に衝突
3DEM-40-N	27.3	46	17200	覆道に衝突
3DEM-40-A	25.7	12	3967	覆道に衝突後、解析範囲外へ
3DEM-36-N	26.9	46	16600	覆道に衝突

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。

4. 落石の衝突エネルギー推定

当該崖斜面に対して二種類の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-4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、解析手法を問わず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。また、2次元DEM

の場合には崖錘部で停止するケースが見られた。これは、2次元DEMにおいては崖錘部を土砂としてモデル化していることによるものと推察される。

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、3次元DEMの場合には落石の到達範囲に関しても評価可能であり、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、3次元DEMにおいては、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。

5. 解析次元・解析手法の違いに関する考察

2種類の落石シミュレーション手法について、その解析手法の差異について考察する。

2次元DEMの場合には、空間を1次元縮退していることで解析コストが大きく低減されており、より複雑なモデル化を適用することができる。これにより、複雑な斜面の状態の再現や、複雑な条件の設定が可能であり、事前におおよその落石経路を推定できる場合には、より精度よく落石を評価できるものと考えられる。

一方、3次元DEMの場合には、地形の影響を受け落石経路が大きく変化する状態が再現できるため、落石到達範囲の推定が可能となる。これにより、複雑な表面形状を有する斜面のような落石経路の推定が難しい場合においても、落石経路および到達範囲を推定することが可

能である。しかしながら、解析空間が3次元であることより、解析コストの増大は避けられず、実用的な解析を実施する場合には、手法の簡略化が必要であると思われる。

これらの手法に関して、いずれの手法を用いた場合にも、解析結果の傾向は大略類似しており、入力条件が整えばほぼ同等な結果が得られるものと推察される。

これらのことより、これらの2種類の手法の適用範囲を明確にし、使い分けを行うことでより精度よく落石をシミュレートできるものと考えられる。

6. まとめ

本検討は、当該崖斜面に対して2次元DEMと3次元DEMを用いて落石シミュレーションを実施し、その結果に関して考察したものである。結果をまとめると、以下のようである。

- 1) 反発係数が解析結果に与える影響は大きい。
- 2) 手法を問わず、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) 2次元DEMと3次元DEMの適用範囲を明確にし、適切に使い分けることでより効率よく精度のよい落石シミュレーションが可能になると思われる。

参考文献

- 1) 古今書院：岩の力学的性質 I, 1989.
- 2) 川本眺万, 吉本龍之進, 日比野敏：新体系土工学 20 岩盤力学, pp.121-125, 技法堂出版, 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, pp.22-23, 鹿島出版会 1988
- 4) 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.

NUMERICAL STUDY FOR ROCKFALL SIMULATION USING 2D AND 3D DEM

Shin-ya OMOTE, Shin-ya OKADA, Hiroyuki ISHIKAWA, Yoshihiko ITO
and Yuki KUSAKABE

This study aims to obtain basic data necessary for optimum planning, designing and cost-reduction of rockfall countermeasures. Two rockfall simulation methods were used: 2D distinct element method (DEM), and 3D DEM. To simulate the behavior of rockfall from cliff appropriately, onsite rockfall experiments were performed to investigate and parameters of such behavior was obtained. Those parameters were used to calculate the rockfall path, the rock travel distance, and the energy and impact force of rockfall that reaches a road structure.