

個別要素法を用いた落石シミュレーションの 定数設定法に関する検討

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

落石対策は道路防災計画にとって大きな課題のひとつである。本検討は落石対策工の合理的な計画や設計、安全性の向上、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、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検討を行ったものである。

本検討では、屋内実験及び現地実験を行い定数の設定に関して検討を行った。この結果を基に、落石シミュレーションによる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試みた。

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

1. はじめに

落石は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、落石軌跡や到達範囲、落石エネルギー等を精度よく推定することができれば、より適切な防災計画が可能となる。

落石の落下挙動を推定する手法の一つとして、DEMを用いた落石シミュレーションがある。この手法においては斜面勾配や地形の変化を精度よく再現できるため、解析定数を精度よく設定することができれば、精度の高い落石エネルギーを推定することができるものと考えられる。

これらのことより、本検討では精度よい解析定数の設定手法を確立することを目的として、設定根拠としての岩盤の実反発係数を算定するため、岩体を球体に整形し

破碎や回転等を除いた純粋な反発係数を屋内試験により把握した。また、落石速度、落石軌跡、落石エネルギーを推定するため実斜面での現地実験を行い、この再現解析において設定した反発係数について検討を行っている。また、今回検討した手法を用いて実斜面の落石シミュレーションによる検討を試みている。

2. 屋内実験による個別要素法の定数設定

起伏に富んだ自然斜面での落石の挙動をDEMにより再現する場合には、斜面の反発係数の影響により岩塊の跳躍状況が大きく変化し、結果に大きな差異が生じることが明らかとなっている。本検討では、反発係数の設定に関して予備実験として屋内実験を行い、個別要素法に用いる定数を実験により得られた結果から設定することとした。

(1) 屋内実験（自由落下試験）

写真-1 には、屋内試験状況を示す。屋内試験で用いた落下試験体と平盤試験体は、後述の現地実験や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から採取した岩から試験体を作製した。

a) 落下試験体形状・寸法

写真-2 には、予備実験で用いた試験体を示す。屋内実験に用いた岩の球体は3種類であり、直径および質量



写真-1 屋内試験状況（自由落下試験）

はそれぞれ $\phi 10\text{ cm}$ 1.3kg, $\phi 20\text{ cm}$ 10.8kg, $\phi 30\text{ cm}$ 35.5kg である。また、平盤試験体は岩盤およびモルタル盤 (20 N/mm^2) を作製した。

b) 落下試験と計測方法

落下試験の落下高さは任意に変化させ、衝突前後の速度を計測し反発係数を求めた。なお、岩球体の反発係数は落下高さ、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検討している。

c) 岩球体の落下試験結果

表-1 には、落下実験により得られた屋内実験結果を示す。実験結果より、大きさの異なる 3 種類の岩球体を落下させた場合および、自然岩体を落下させた場合の反発係数を求めた。

図-1 には、質量と反発係数との関係を示す。岩球体を岩盤へ落下させた場合には、岩球体が大きくなるのに伴い、反発係数は低くなる傾向がみられる。なお、下部の平盤試験体には損傷は生じていない。

図-2 には、岩球体をモルタル盤に落下させた場合の質量と反発係数との関係を示す。岩盤に落下させた場合と同様に岩球体が大きくなるにつれて反発係数は低くなる傾向がみられる。なお、本実験においてはモルタル盤に衝突痕が残っている。

図-3 には、衝突速度と反発係数との関係を示す。岩球体を岩盤に落下させた場合、一部例外となる箇所も見られるが結果のばらつきと判断できる程度であり、実験を行った範囲では衝突速度が大きいほど反発係数は低くなり、衝突速度が増しても反発係数の増加は低く一定の範囲内で収束する傾向がみられる。

図-4 には、岩球体をモルタル盤に落下させた場合の衝突速度と反発係数との関係を示す。岩盤に落下させた場合と同様に衝突速度が増加するほど反発係数が低くなり、反発係数は一定の範囲内で収束する傾向がみられる。

d) 岩体の落下試験の結果

図-5 には、自然岩体の質量と反発係数との関係を示す。質量の変化に対して反発係数には相関はみられず、一定の範囲内に収束する傾向を示している。

図-6 には、衝突速度と反発係数との関係を示す。衝突速度の変化に対して反発係数には相関はみられず、こちらも一定の範囲内に収束する傾向を示す。

また、自然岩体の結果は岩球体と比較して低い反発係数となっていることが分かる。反発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の衝突時に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ものと推察される。

e) 屋内試験のまとめ

これらの屋内試験の結果から、試験を行った範囲内では落下試験体の材質及び被接触面の材質が同じであって



写真-2 落下試験体

表-1 屋内実験結果

	平板 材質	落 体			落下 高さ (m)	バウ ンド	反発 係数 e	平均	採用値
		形状	重量 (kg)	寸法 (cm)					
岩 球 体 の 反 発 係 数	岩盤	球体	1.3	φ 10	0.5	3	0.68	0.63	0.60
	岩盤	球体	1.3	φ 10	1.0	3	0.65		
	岩盤	球体	1.3	φ 10	2.0	2	0.60		
	岩盤	球体	1.3	φ 10	3.0	2	0.70		
	岩盤	球体	10.8	φ 20	0.5	3	0.71	0.62	
	岩盤	球体	10.8	φ 20	0.5	3	0.73		
	岩盤	球体	10.8	φ 20	1.0	2	0.49		
	岩盤	球体	10.8	φ 20	2.0	3	0.54		
	岩盤	球体	10.8	φ 20	3.0	1	0.61	0.47	
	岩盤	球体	35.5	φ 30	0.5	3	0.60		
	岩盤	球体	35.5	φ 30	1.0	2	0.35		
	モルタル盤	球体	1.3	φ 10	0.5	3	0.51	0.53	
	モルタル盤	球体	1.3	φ 10	1.0	3	0.61		
	モルタル盤	球体	1.3	φ 10	2.0	2	0.50		
	モルタル盤	球体	1.3	φ 10	3.0	3	0.50		
	モルタル盤	球体	10.8	φ 20	0.5	2	0.48	0.52	
	モルタル盤	球体	10.8	φ 20	1.0	2	0.44		
	モルタル盤	球体	10.8	φ 20	2.0	3	0.63		
	モルタル盤	球体	35.5	φ 30	0.5	1	0.26		
モルタル盤	球体	35.5	φ 30	1.0	1	0.27	0.26		
岩 体 の 反 発 係 数	岩盤	岩体	1.9	□12×10×13	1.0	1	0.25	0.35	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	0.45		
	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	0.32		
	岩盤	岩体	3.6	□9×14×16	1.0	1	0.32		
	岩盤	岩体	6.5	□16×18×23	1.0	1	0.44	0.29	0.15
	モルタル盤	岩体	1.6	□9×8×19	1.0	1	0.31		
	モルタル盤	岩体	1.9	□12×10×13	1.0	1	0.28		
	モルタル盤	岩体	3.6	□9×14×16	1.0	1	0.32		
	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	0.30		
	モルタル盤	岩体	3.0	□13×13×22	1.0	1	0.39		
	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	0.16		
	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	0.36		

も、落体の形状によって反発係数が異なる結果が得られた。また、落下試験体の材質が同じであっても反発係数は、岩球体では質量や衝突速度が増すほど反発係数は低くなる傾向が得られ、岩体では一定の範囲内に収束する傾向がみられた。

結論として、理論的な反発係数を用いることが必ずし

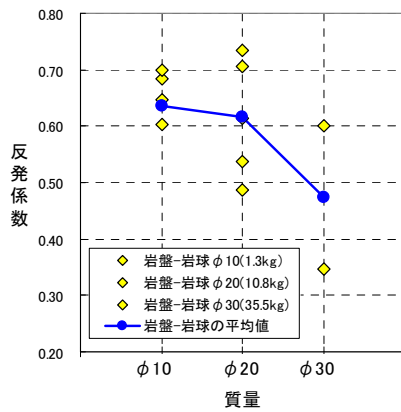


図-1 岩盤と岩球体の質量と反発係数

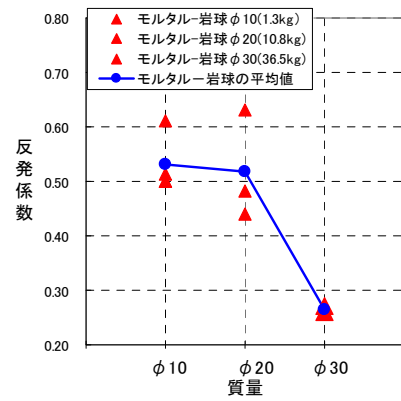


図-2 モルタル盤と岩球の質量と反発係数

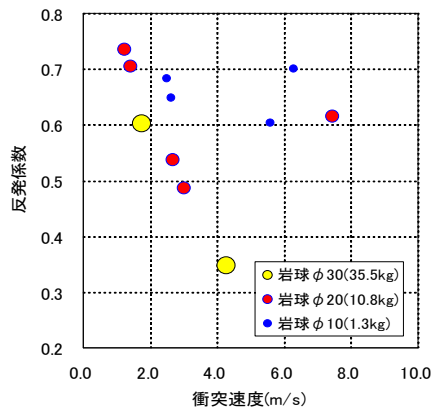


図-3 衝突速度と反発係数 (岩盤)

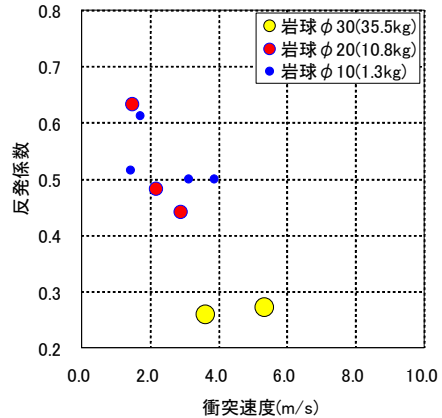


図-4 衝突速度と反発係数 (モルタル盤)

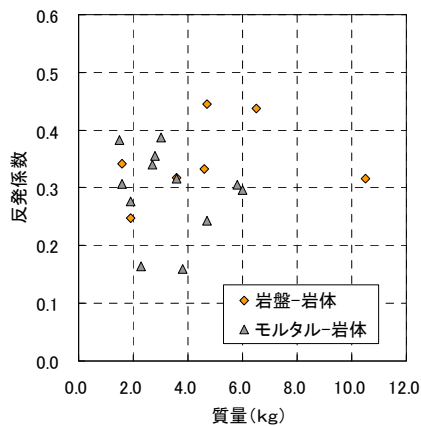


図-5 岩体質量と反発係数

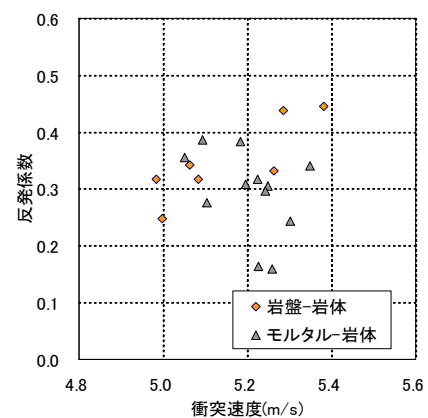


図-6 衝突速度と反発係数

も良好な結果を得ることにはならないものと推察される。よって、実際の斜面にて落石実験を行い、その結果をもとに解析結果を照査することとした。

3. 現地実験 (実斜面を用いた落石実験)

本検討では、DEM手法の検証を行なうために実斜面での落石実験を行った。落石実験は、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た。

写真-3 には現地試験で用いた試験体を示す。落石岩



写真-3 現地落石実験の落石岩体試験体

体は直径 30 cm 程度、ゴムボールは直径 30cm と 20cm である。現地実験は 2 箇所で行った。落下試験体を斜面頂部から自由落下させた。この試験で対象とした斜

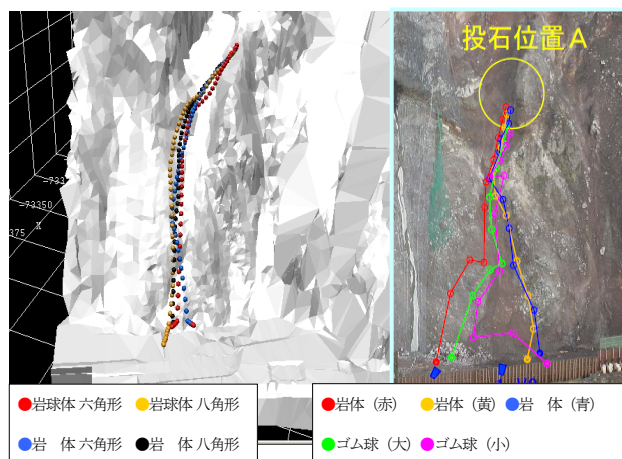


図-7 落下位置 A からの落下軌跡

表-2 再現解析に用いた解析ケース

	落石岩体	斜面	落体半径 (m)	バネ係数 法線方向 (N/m)	バネ係数 接線方向 (N/m)	反発係数	転がり摩擦係数 (岩体の形状次第)
岩球体 六角形	安山岩 火砕岩 崖すい	0.15	1.2×10^7	3.0×10^5	0.60 (岩盤)	0.58 (六角形断面)	
					0.47 (モルタル)		
					0.01		
岩球体 八角形	安山岩 火砕岩 崖すい	0.15	1.2×10^7	3.0×10^5	0.60 (岩盤)	0.41 (八角形断面)	
					0.47 (モルタル)		
					0.01		
岩体 六角形	安山岩 火砕岩 崖すい	0.15	1.2×10^7	3.0×10^5	0.24 (岩盤)	0.58 (六角形断面)	
					0.15 (モルタル)		
					0.01		
岩体 八角形	安山岩 火砕岩 崖すい	0.15	1.2×10^7	3.0×10^5	0.24 (岩盤)	0.41 (八角形断面)	
					0.15 (モルタル)		
					0.01		

面の比高は A 斜面は 80 m, B 斜面は 35 m 程度である。

(1) 現地実験の結果

図-7 には落下位置 A からの落下軌跡と後述の現地実験の再現解析結果を並べて示す。なお、図の右側が実験結果、左側が解析結果である。

図の実験結果より、落石は斜面が沢状になっていることから沢の内側に誘導されるように落下していることが分かる。その落下時間は 10 秒程度であった。

図-8 には落石位置 B の場合を同様に示す。落石位置 B においては、斜面が平滑に近いことから局所的な起伏に影響され、落下当初から落下軌跡に違いがみられた。なお、その落下時間は 4 秒程度であった。

これらのことより、落下軌跡は斜面地形や斜面性状から受ける影響が大きいことが分かる。そこで、落石挙動解析の当該斜面モデルはより細かな斜面地形の再現や、屋内試験で得られた反発係数を考慮してモデル化することとした。

4. 現地実験の再現解析

室内実験により得られた反発係数について、その落石シミュレーションへの適用性および解析精度を検証することを目的として、前述の現地実験の再現解析を実施す

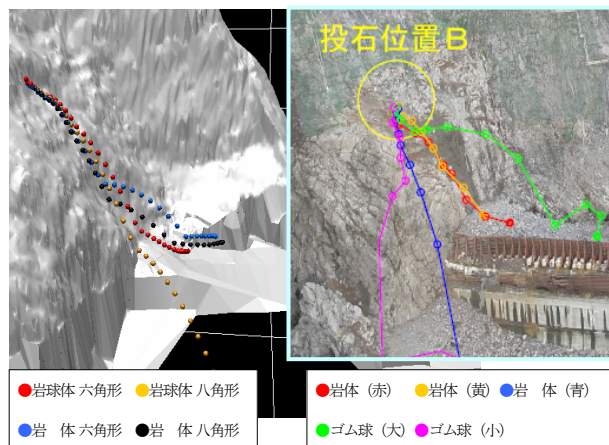


図-8 落下位置 B からの落下軌跡

表-3 地質調査結果および岩石試験結果

岩		相	火砕岩	安山溶岩
湿潤密度		w (g/cm ³)	1.990	—
自然密度		n (g/cm ³)	1.948	2.594
超音波伝播速度 V (km/sec ²)	自然	P 波伝播速度	1.76	3.42
		S 波伝播速度	0.97	1.69
一軸圧縮強さ (kN/m ²)	湿潤	一軸圧縮強さ	4887	—
	自然	一軸圧縮強さ	3938	68818
引張強度	引張強度 (kN/m ²)		218	5909
	密度 (g/cm ³)		1.89	2.608

ることとした。

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。この測量データをもとに斜面をモデル化し再現解析を行うこととした。

(1) 予備落石実験の再現解析に用いる定数設定

表-2 には、再現解析に設定したケース及び定数を示す。反発係数は屋内実験結果（表-1）の値を用い、岩球体から求めた反発係数と、岩体から求めた反発係数の 2 つを設定することとした。ここで、岩球体の反発係数は平均値を用いることとし、岩体の反発係数は岩球体との差異を明瞭にするために最低値を用いることとした。

また、落石岩体が斜面との衝突時に受ける抵抗を再現するため、阪口¹⁾らの提案する転がり摩擦抵抗を落石岩体を表す円形要素に設定した。ここで自然落石岩体についてはその形状を簡素化して考慮し、六角形断面と八角形断面の 2 ケースでモデル化することとした。すなわち、六角形断面の転がり摩擦係数を 0.58、八角形断面を 0.41 とした。

表-3 には、現地実験で用いた岩石試験結果を示す。要素間のバネ定数については岩片の超音波伝播速度から導き、法線方向 $k = 1.2 \times 10^7$ kN/m、接線方向 $k = 3.0 \times 10^5$ kN/m とした。なお、粘性減衰係数は反発係数から導いた²⁾。

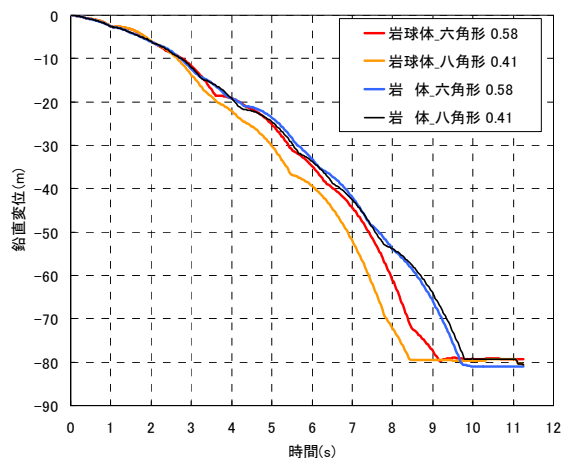


図-9 A斜面のシミュレーション結果（時系列）

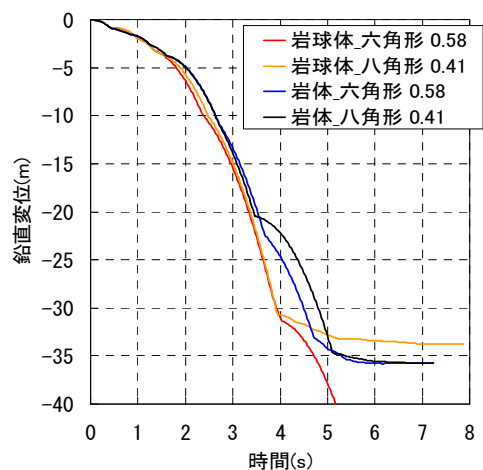


図-10 A斜面のシミュレーション結果（時系列）

(2) 現地実験の再現解析結果

a) A 斜面の再現解析結果

前述の図-7 の数値解析結果より、再現解析での落石軌跡は岩球体の反発係数、岩体の反発係数ともに類似の傾向を示していることが分かる。

図-9 には、再現解析の鉛直変位と落下時間の関係を示す。図より、解析結果の落下時間は岩体の反発係数を用いた場合がより長く、10 秒程度である。これは現地実験と同程度である。これより A 斜面では岩体の反発係数を用いた場合により高い再現性が得られたものと推察される。

b) B 斜面の再現解析結果

前述の図-8 の数値解析結果より、現地実験の試験体 1 の落石軌跡と、再現解析の岩球体_六角形の場合の落石軌跡が類似の傾向となっている。

図-10 には、再現解析の鉛直変位と落下時間の関係を示す。その落下時間の傾向は A 斜面の場合と同様に反発係数が小さい岩体の場合により長くなる傾向にある。しかしながら、実験における落下時間が 4 秒程度であったことより、B 斜面においては岩球体の反発係数を用いた場合により高い再現性を有しているものと判断される。これは A 斜面の場合と逆の結果となっている。

(3) 再現解析結果

A 斜面、B 斜面の再現解析結果から、斜面地形や性状によって、再現性の良い反発係数が異なることが明らかとなった。これより、反発係数の設定に関しては更なる検討が必要である。

5. 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

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、再現解析と同様の手法

表-4 解析パラメータ

岩体	斜面	落体半径 (m)	落体質量 (kN)	バネ係数 法線 (N/m)	バネ係数 接線 (N/m)	反発係数	転がり摩 擦係数
岩球体	安山岩	1.0	104	8.0×10^{10}	2.0×10^9	0.60	1.0
	火砕岩					0.47	
	崖すい					0.01	
岩体	安山岩	1.0	104	8.0×10^{10}	2.0×10^9	0.24	1.0
	火砕岩					0.15	
	崖すい					0.01	

で作製した。斜面は斜面高 200 m を越える急崖斜面であり、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場合の、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の評価を行った。

(2) 3次元 DEM の解析ケース

表-4 に本解析にて実施した解析ケースの一覧を示す。本解析においては、反発係数をパラメトリックに用いることとし、本検討の予備実験により得た 2 つの反発係数について解析を実施した。

本解析に用いた落石岩体は角のとれた直方体であることから、球体の落石要素を直方体形状と仮定するため転がり摩擦係数を 1.0 を設定した。また、要素の半径を 1.0 m、質量を 104 kN とし、バネ定数は再現解析の場合と同様の手法により設定した。すなわち、法線方向 8.0×10^{10} N/m、接線方向 2.0×10^9 N/m とした。

(3) 3次元 DEM による落石到達範囲

図-11 に、3 次元 DEM 落石シミュレーションにより得られた落石岩体の落下軌跡の過程を示す。図中の赤いラインは落石を発生させた位置を示し、白い球体は落石岩体を示す。

図-12 には、岩体の反発係数を用いた場合の解析における落石停止位置を示す。落石岩体は斜面を落下し落石防護溝で停止した。

図-13 には、岩球体の反発係数を用いた場合の落石停止位置を示す。落石岩体の一部で落石防護工を超えるものが生じた。

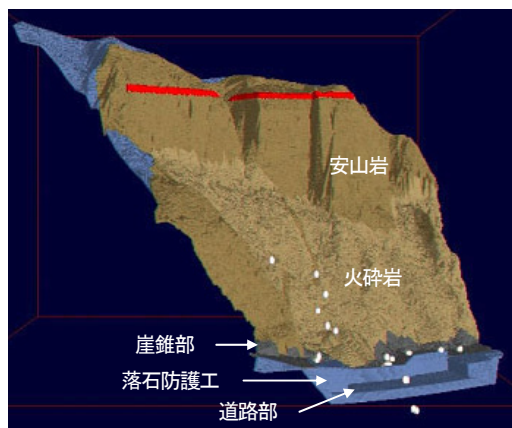


図-11 対象斜面の落石軌跡（岩球体）



図-12 岩体の反発係数を用いた場合の落石停止位置



図-13 岩球体の反発係数を用いた場合の落石停止位置

(4) 3次元DEMの落石エネルギーの算定

表-5 に落石防護工を超えた落石岩体が落石防護工に到達した時点での落下速度および水平速度，落石エネルギーを示す。

落石防護工を超えた落石岩体は2岩体である。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。これより，より安全側に検討した場合に，想定した防護工では完全には防護できない可能性を示すことが出来た。

表-5 落石防護工への落石エネルギー（岩球体）

落石岩体	斜面	反発係数	落体半径	落体質量	落下高さ	鉛直速度	落石エネルギー
岩球体	安山岩	0.6	1.0m	104kN	176m	15.8m/s	1300kJ
	火砕岩	0.47					
	崖すい	0.01					
岩体	安山岩	0.24	1.0m	104kN	175m	12.2m/s	774kJ
	火砕岩	0.15					
	崖すい	0.01					

なる傾向が得られ，岩体では一定の範囲内で収束する傾向がみられた。

- 3) 現地実験の再現解析から，斜面地形や性状によって再現性の良い反発係数が異なることから，反発係数の設定に関しては更なる検討が必要である。
- 4) 3次元DEMでは落石の挙動や落石エネルギーや到達範囲が推定できることから，道路防災計画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.

6. 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検討したものである。結果をまとめると以下のようなになる。

- 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反発係数が大きく異なる。
- 2) 落下試験体の材質が同じであっても反発係数は，岩球体では質量や落下速度が増すほど反発係数は低く

A STUDY OF CONSTANT SETTINGS IN ROCKFALL SIMULATION USING THE DISTINCT ELEMENT METHOD

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

Rockfall countermeasures are among the most important issues in road-related disaster prevention plans. In this study, a technique to analyze constant settings in rockfall simulation using the 3D-distinct element method (DEM) was examined with the aim of obtaining basic data contributing to rational planning and design, safety improvement and cost reduction in rockfall protection work.

To study the technique of setting analysis constants, indoor tests and on-site experiments were performed. Based on the results, an attempt was made using rockfall simulation to estimate the paths and travelling distances of falling rocks and the energy and impact force applied on reaching a structure.