平成20年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第65号

3次元DEM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

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　(shin-ya Okada)
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

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及び現地実験を行い定数の設定に関して検討を行った.

2. 屋内実験による個別要素法の定数設定

岩体を球体に整形し破砕や回転等を除いた純粋な反発係数を得るため屋内試験を実施した.

(1)屋内実験（自由落下試験）

写真－1 には，屋内実験状況を示す．屋内実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(63N/mm^2)およびモルタル盤 (35N/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る傾向がみられる.

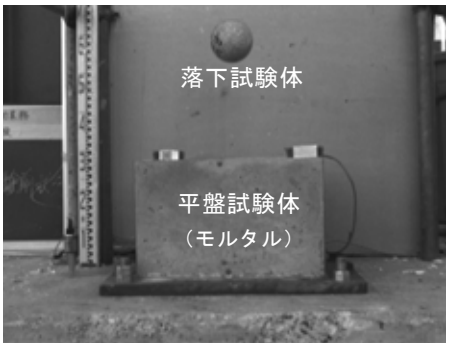

写真-1　屋内実験状況（自由落下試験）

写真-2　落下試験体

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．結果にばらつきがあるものの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，一定の範囲内に収ま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，質量と同様に一定の範囲内に収まる傾向を示す.

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砕や欠損，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．

e）屋内実験のまとめ

これらの屋内実験の結果から，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まる傾向がみられた．

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．落石岩体は直径 30cm 程度，ゴムボールは直径 30cm と 20cm である．現地実験は 2 箇所で実施し，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面の比高は A 斜面は 80m，B 斜面は 35m 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

屋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得ている．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) 現地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．

表-1　屋内実験結果

	平板材質	落体 形状	落体 重量(kg)	落体 寸法(cm)	落下高さ(m)	バウンド	反発係数 e	平均	採用値
岩球体の反発係数	岩盤	球体	1.3	φ10	0.5	3	0.68	0.66	0.60
	岩盤	球体	1.3	φ10	1.0	3	0.64		
	岩盤	球体	1.3	φ10	2.0	2	0.60		
	岩盤	球体	1.3	φ10	3.0	2	0.70		
	岩盤	球体	10.8	φ20	0.5	3	0.70	0.61	
	岩盤	球体	10.8	φ20	0.5	3	0.73		
	岩盤	球体	10.8	φ20	1.0	2	0.48		
	岩盤	球体	10.8	φ20	2.0	3	0.53		
	岩盤	球体	10.8	φ20	3.0	1	0.61		
	岩盤	球体	35.5	φ30	0.5	3	0.60	0.47	
	岩盤	球体	35.5	φ30	1.0	2	0.34		
	モルタル盤	球体	1.3	φ10	0.5	3	0.51	0.53	0.46
	モルタル盤	球体	1.3	φ10	1.0	3	0.61		
	モルタル盤	球体	1.3	φ10	2.0	2	0.49		
	モルタル盤	球体	1.3	φ10	3.0	3	0.49		
	モルタル盤	球体	10.8	φ20	0.5	2	0.48	0.52	
	モルタル盤	球体	10.8	φ20	1.0	2	0.44		
	モルタル盤	球体	10.8	φ20	2.0	3	0.63		
	モルタル盤	球体	35.5	φ30	0.5	1	0.25	0.26	
	モルタル盤	球体	35.5	φ30	1.0	1	0.27		
岩体の反発係数	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		
	モルタル盤	岩体	1.6	□9×8×19	1.0	1	0.30	0.29	0.15
	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		

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．要素間のバネ係数については岩片の超音波伝播速度から導き，法線方向 $k = 1.2\times10^7$ kN/m，接線方向 $k = 3.0\times10^5$ kN/m とした．なお，粘性減衰係数は反発係数から導いた[2]．

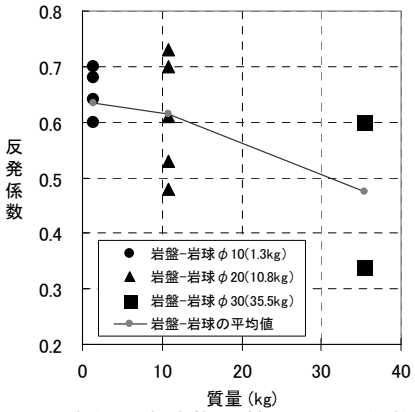

図-1　岩盤と岩球体の質量と反発係数

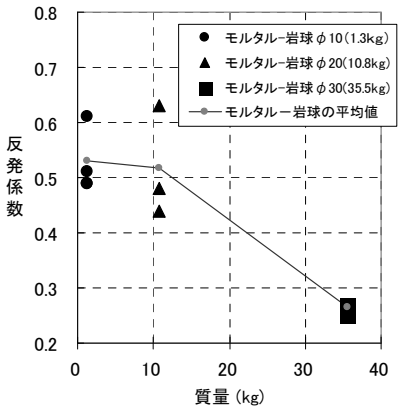

図-2　モルタル盤と岩球体の質量と反発係数

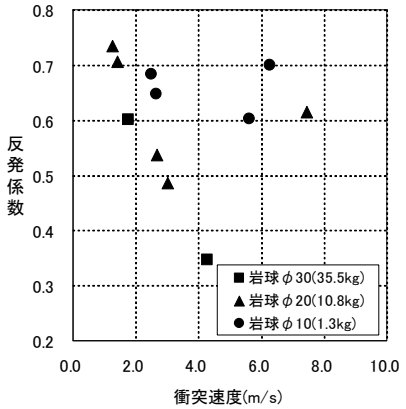

図-3　衝突速度と反発係数（岩盤）

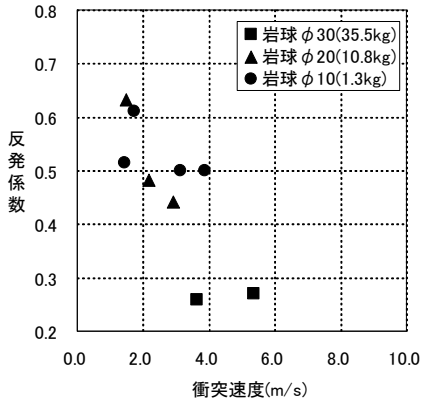

図-4　衝突速度と反発係数（モルタル盤）

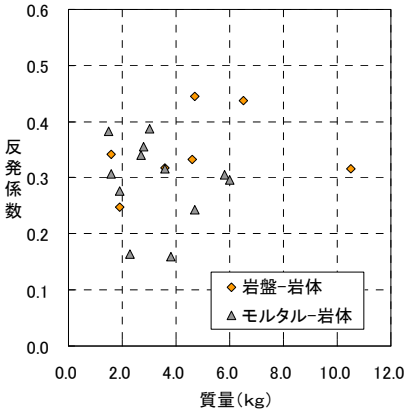

図-5　岩体質量と反発係数

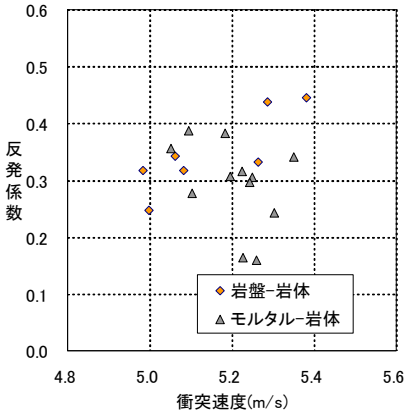

図-6　衝突速度と反発係数

(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，現地実験の岩体

写真-3　現地落石実験の落石岩体試験体

（赤）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

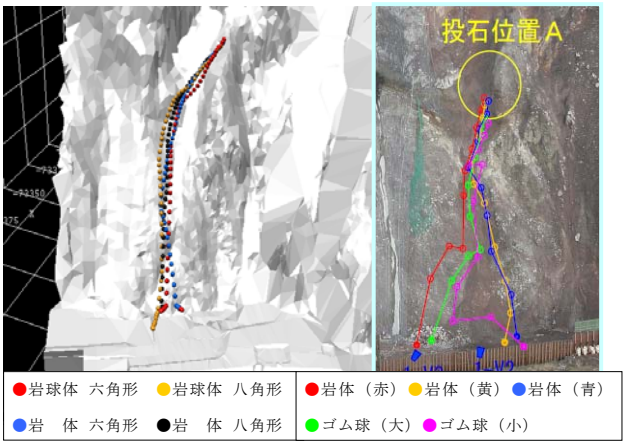

図-7　落下位置 A からの落下軌跡

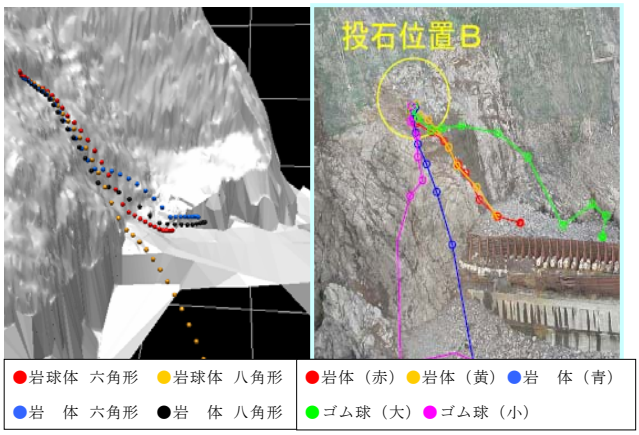

図-8　落下位置 B からの落下軌跡

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 (落体形状)
岩球体 六角形	安山岩	安山岩	0.15	1.2×10^7	3.0×10^5	0.60（岩盤）	0.58 (六角形断面)
		火砕岩				0.46（モルタル）	
		崖すい				0.01	
岩球体 八角形	安山岩	安山岩	0.15	1.2×10^7	3.0×10^5	0.60（岩盤）	0.41 (八角形断面)
		火砕岩				0.46（モルタル）	
		崖すい				0.01	
岩　体 六角形	安山岩	安山岩	0.15	1.2×10^7	3.0×10^5	0.24（岩盤）	0.58 (六角形断面)
		火砕岩				0.15（モルタル）	
		崖すい				0.01	
岩　体 八角形	安山岩	安山岩	0.15	1.2×10^7	3.0×10^5	0.24（岩盤）	0.41 (八角形断面)
		火砕岩				0.15（モルタル）	
		崖すい				0.01	

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

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. まとめ

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まる傾向がみられた．
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．

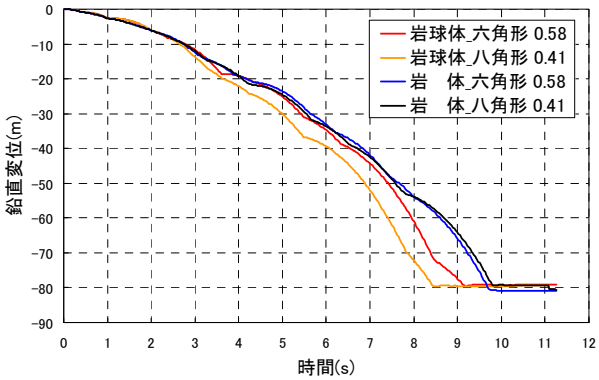

図-9　A 斜面のシミュレーション結果（時系列）

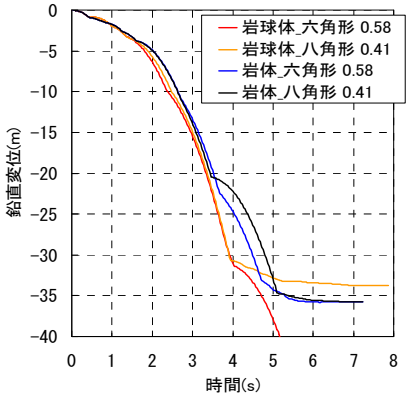

図-10　B 斜面のシミュレーション結果（時系列）

参考文献

1) 阪口秀，岩下和義，中瀬仁，本田中，西野隆之：土の構造とメカニックス-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の決め方について，構造工学論文集Vol.32A, 1986