

衝突角度の違いが落石解析結果に与える影響

The effect of rockfall simulation due to impact angle

島内哲哉*, 酒井直樹**, 大西有三***

Tetsuya SHIMAUCHI, Naoki SAKAI, Yuzo OHNISHI

Recently some numerical methods have been utilized to trace rock movements along the rock slope. However, deciding their appropriate input parameters, which are based on the situation, are yet unknown. In this study, we attempt to identify the parameter with the observational on site using video camera. The observational result are shown that the tangential and normal coefficients of restitution and the ratio of velocity energy depend on the angle of incidence. Then, we find that the rockfall simulation using DDA based on the analysis of the observations is well consistent with the real rockfall behavior. This now provides a useful method to decide the design work with slope cuts.

Key Words : Rock Fall, Simulation, DDA, Coefficient of Restitution, Ratio of Velocity energy

1. はじめに

落石の挙動は、斜面の傾斜や構成材質、落石の形状や規模など、さまざまな条件によって複雑に変化する。その対策は、一般に経験的方法に基づいて行われている¹⁾が、近年では落石対策工計画に数値解析が用いられるケースも増えている。しかし、現状では解析に必要な入力定数の設定や評価のための基礎情報が十分に得られているとはいえないため、その適用は落石の起終点や落下経路上での挙動がある程度既知の場合にほぼ限定されている。本研究では、危険岩塊除去などの施工現場で行った落石の挙動観察結果から得られる計測値と、数値解析を用いた再現実験結果から得られるパラメータとを対比することで、予測解析に必要な入力値の設定法に関する基礎資料を得ることを目的としている。本論文では、これまでに得られた結果から、落石衝突時の入射角が、反発係数や減衰係数、速度エネルギー比などに与える影響について述べ、それを数値解析に適用する際の留意点について報告する。

2. 落石観察実験を行った現場の緒言と観察の方法

これまでに実施している観察実験現場(3カ所)の緒言を、表-1に一覧した²⁾。観察は、ビデオカメラによる記録を中心としており、落石の位置や高さは、あらかじめ落下経路周辺の複数箇所に設けた座標点やスケールと撮影画面上で対比することで読み取った。また、速度は(a)(b)現場では 1/5sec, (c)現場では 1/6sec 毎にキャプチャした画像から求めた。なお、読み取りが特に難しい衝突時の計測では、キャプチャ間隔を縮めたり、前後の軌跡から解析的に推定するなどの方法についても併用している。

観察を行った現場は、いずれも施工中の現場であることから、落下経路の地盤が人工材料(発砲スチロール(EPS))や礫を主体とするルーズな岩砕で構成されている。このため、落石災害が懸念される通常の斜面

* 正会員 明治コンサルタント(株) 技術統括部分室

** 正会員 博士(工学) 明治コンサルタント(株) 技術統括部分室

*** 正会員 工学博士 京都大学教授 大学院工学研究科都市環境工学専攻

に比べると、地盤の緩衝効果の大きさや樹木等の障害物が無いなどの条件が、やや異なる。本観察実験では、このような条件下で、垂直な崖面からほぼ自由落下によって衝突した時の跳躍と、斜面上を低い跳躍を繰り返しながら落下する2タイプの跳躍を観察している。ここでは、(b)(c)現場での観察・計測結果を基に、斜面の傾斜や地盤が類似する条件下で、衝突時の速度や角度が反発係数や減衰係数、速度エネルギー比に与える影響について述べる。

表-1 ビデオ観察現場の緒言

観察現場 *観察回数	落下 高さ (m)	落下水 平距離 (m)	平均落 石径φ (m)	落石重量 (kN)	落石の形状 と 岩 質	落下方向 経路の特徴 ()内は観察内容
(a)現場 (施工中) *5	25	10	0.4 ~ 1.1	0.4 ~ 4	長短比 1:2~5 単体=25kN/m ³ (凝灰角礫岩)	静破材による人工岩塊除去。EPS 上への落下。扁平な岩塊が多い。 (自由落下と跳躍を観察)
(b)現場 (施工中) *17	42	20 ~ 25	1.0 ~ 2.0	3 ~ 23	長短比 1:1.5 単体=23kN/m ³ (凝灰角礫岩)	発破後の岩塊をバックホウで除去。 経路、落下位置は、ルーズな礫。 (自由落下と跳躍を観察)
(c)現場 (採石場) *10	63	115	1.5 ~ 3.0	17 ~ 74	長短比 1:2 単体=26kN/m ³ (安山岩)	ブルドーザーによる押し出し。 経路は、ルーズな礫。一部露岩。 (落下・跳躍から停止までを観察)

*観察した回数

3. 落石の運動特性が各種係数に与える影響(特に(b)(c)現場について)

3.1 落石観察実験から得られる反発係数、減衰係数、速度エネルギー比

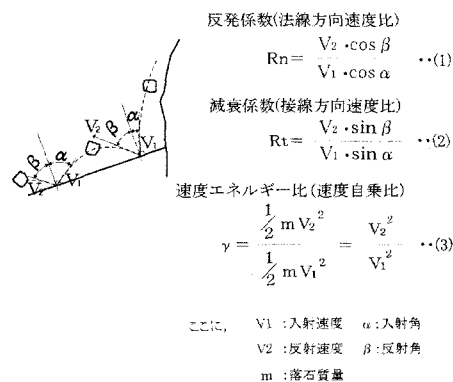


図-1 反発係数、減衰係数、速度エネルギー比の定義

落石観察実験から得られる代表的な物理定数に、反発係数、減衰係数および速度エネルギー比がある(図-1)。ただし、現場観察から得られるこれらの係数には、斜面の凹凸や衝突時の凹みや落石形状などの影響が含まれる。したがって、本論文で用いるこれらの係数も、各計測地点での落石や衝突地盤などの条件を含む、いわば見掛けの係数であることに注意が必要である。

観察現場の代表断面と代表的な計測位置、得られた各係数を表-2の図中にまとめた。図中の c1, c2 といった現場記号の添え字番号は、若い数字ほど、その斜面中で最も顕著に跳躍した地点であることを示す。当然、番号が後になるほど跳躍は小さくなり、計測も困難になることから計測回数も減少する。

計測した反発係数、減衰係数、速度エネルギー比などの値は、一般には衝突斜面の地盤状態によって変化すると考えられている。このため、例えば岩盤と土砂、あるいは同じ岩盤であっても、硬岩や軟岩などのように、性質に応じて細分した値として報告されることもある。表-3に、その一般的な値の範囲を示す。本現場での計測結果は、これらに比べると全体に低い。これは観察現場の地盤特性によるものと考えられる。ただし、低さの程度は現場毎に異なっており、例えば発砲スチロールを用いた(a)現場の値は、(b)(c)現場と比較してもさらに低い値を示している。一方、(b)(c)現場では、斜面の傾斜や構成材質がほぼ同じであるにもかかわらず、自由落下後の b1 と、その後の低い跳躍運動時の b2, b3, c1, 2 での各係数とは異なる値を示す。次に、この違いについて説明する。

表-2 現場観察実験から得られた各種定数

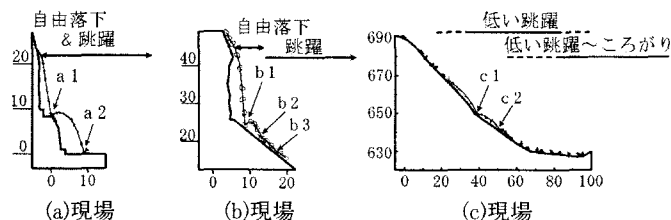


表-3 反発係数, 減衰係数, 速度エネルギー比の一般値の例

現場	跳躍位置	速度エネルギー比		反発係数		減衰係数		斜面構成材質
		平均	標準偏差	法線方向(Rn)		接線方向(Rt)		
				平均	標準偏差	平均	標準偏差	
(a)現場	a1	0.10	0.06	0.23	0.02	—	—	緩衝材 (EPS)
	a2	0.17	0.13	0.38	0.05	0.39	0.23	
(b)現場	b1	0.11	0.02	0.28	0.10	0.36	0.13	砕けた岩礫の盛土
	b2	0.47	0.17	0.48	0.24	0.69	0.04	
	b3	0.67	—	0.51	—	(0.83)	—	
(c)現場	c1	0.43	0.20	0.40	0.10	0.67	0.13	採石場の斜面
	c2	0.57	0.09	0.19	0.13	0.77	0.09	

右城 ³⁾	反発係数(Rn)	0.54~0.61
	減衰係数(Rt)	0.65~0.76
	速度エネルギー比(γ)	0.66~0.71
Stevens ⁴⁾	反発係数(Rn)	0.3~0.5
	減衰係数(Rt)	0.8~0.95

3.2 入射速度(V)と反発係数(Rn)および減衰係数(Rt)との関係

図-3および図-4に、(b)(c)現場における入射速度と反発係数(Rn)および減衰係数(Rt)との関係を示した。なお、ここでの入射速度とは、反発係数では法線方向速度(Vn)、減衰係数では接線方向速度(Vt)である。

落下形態がもたらす入射速度(V)自体の違いは図-3に明瞭に表れており、自由落下(24m)によって Vn が 16m/s(平均)を示す b1 グループと、低い跳躍を繰り返し Vn が 4~5m/s を示す b2,b3,c1,c2 グループの 2 つに分かれている。この違いは、緩衝効果を反映した結果と考えられる。ただし、反発係数(Rn)からみると、前者のグループで Rn=0.18~0.40 と低い範囲に集中するのに対し、後者のグループでは Rn=0.12~1.05 と広範囲に分散するため、入射速度の違いから反発係数(Rn)を推定することは難しい。一方、接線方向入射速度(Vt)と減衰係数(Rt)との関係では、(b)現場において接線方向入射速度が Vt=15m/s → 11m/s へと減少すると減衰係数が Rt=0.36 → 0.69 と上昇し、(c)現場での減衰係数もほぼ b2,b3 グループと同じ範囲に分布する結果となった。入射速度(Vt)による影響は、反発係数と入射速度(Vn)との関係より明瞭といえる。

3.3 入射角度(α)と反発係数(Rn), 減衰係数(Rt)との関係

図-5、図-6は、反発係数(Rn)と減衰係数(Rt)を入射角度(α)との関係で比較したものである。入射角度の違いは、落下経路における地形の違いを反映しているため明瞭である。すなわち、入射角度は $\alpha=43^\circ$ (平均)の b1 グループと、 $\alpha=68^\circ$ (平均)の b2,b3,c1,c2 の 2 グループに分けられ、図上でもおよそ 50° 付近を境に分かれている。このとき、入射角度の増加は、減衰係数の分布範囲自体の上方シフトという形で表れており、しかもシフトした範囲が(c)現場の分布とほぼ重なる。このため、入射角度の影響は、減衰係数(Rt)に対して明瞭に表れている。これに対し、反発係数(Rn)では入射角度の違いにかかわらず、b2,b3 が b1 の範囲と重なって広範囲に分布するため、(b)(c)現場全体としてみると Rn への影響を読みとりにくくなっている。衝突角度の違いは、減衰係数(Rt)により明瞭に表れている。

3.4 入射角度(α)と速度エネルギー比(γ)との関係

一方、図-7は、入射角度(α)と速度エネルギー比(γ)との関係を示したものである。その分布傾向は、図-6の入射角度と減衰係数の関係同様、b1 での速度エネルギー比が $\gamma=0.11$ (平均)と低く狭い範囲に集中する一方で、b2,b3 では $\gamma=0.47 \sim 0.67$ (平均)と高く、しかもその範囲は(c)現場のそれとほぼ同じ範囲に分布する。このため、(b)(c)現場全体として、衝突角度の違いは速度エネルギー比に明瞭に表れている。

3.5 計測結果からみた入射角度による影響

本結果から、反発係数(Rn)に対する入射速度(Vn)、入射角度(α)の影響は不明瞭で、減衰係数(Rt)およ

び速度エネルギー比(γ)に対しては、入射角度(V_t)や衝突角度の違いが影響するという結果が得られた。この結果が、衝突地点の地盤の緩衝効果を反映したものであることは明らかである。なお、各係数の変化幅については、入射速度や落石重量による影響も大きいため、今後さらにデータを収集していく必要がある。

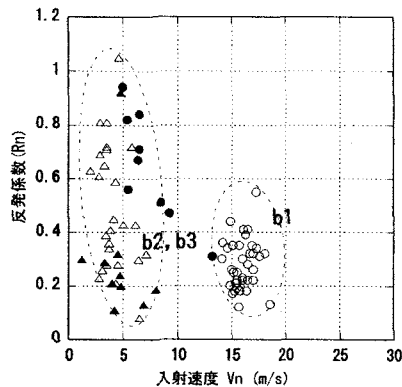


図-3 入射速度(V_n)と反発係数(R_n)

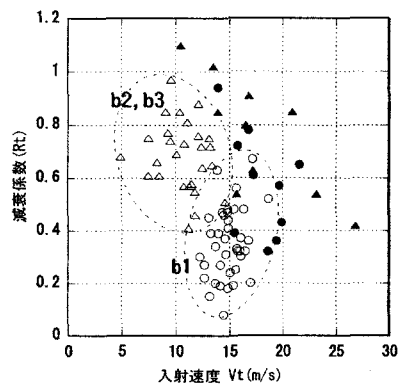


図-4 入射速度(V_t)と減衰係数(R_t)

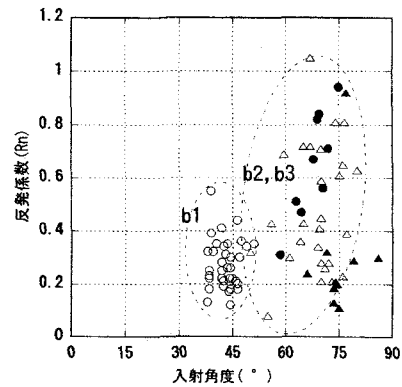


図-5 入射角度(α)と反発係数(R_n)

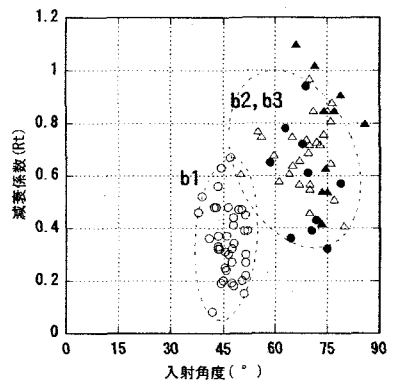


図-6 入射角度(α)と減衰係数(R_t)

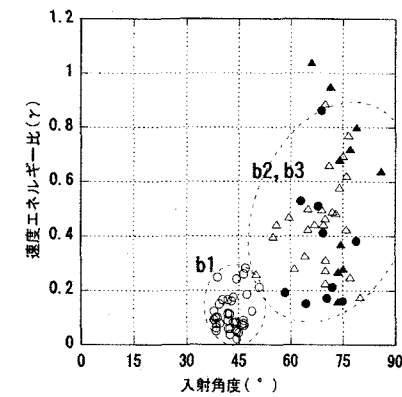


図-7 入射角度(α)と速度エネルギー比(γ)

凡 例	
○	b1
△	b2
●	c1
▲	c2

4. 数値解析による観察データの再現実験

4.1 再現実験の例題と用いた解析法

観察、計測結果をもとに、数値解析法による挙動の再現を試みた。解析に用いた例題は、(b)現場における最大規模の落石(重量約 40kN)である。第一衝突点である b1 までの落下高さは約 24m、落下水平距離は約 4m と、ほぼ垂直自由落下に近い条件である。ただし、落下後の観察距離が 15m 程度と短く、到達点まではさらに 10m 以上を要するため、その位置と速度は途中までしか把握できていない。なお、落石はバックホウで落としているため、解析では落下開始地点に初速($V_x=2.0 \sim 3.0\text{m/s}$, $V_y=2.5 \sim 3.5\text{m/s}$)を与えた。

適用した解析法は、質点解析法と不連続変形法(DDA)の 2 種類である。質点解析法は、文献⁴⁾を参考に作成した、衝突時の反発係数と減衰係数と摩擦のみを考慮した基礎的なものである。不連続変形法(DDA)は、落石解析専用のバージョン⁷⁾を用いた⁹⁾。このバージョンから、落石解析では速度エネルギー比と粘性係数を併用することが可能となったが、ここでは速度エネルギー比のみを用いた。物性値は、質点解析との比較であることから、落石の弾性係数(20GPa)の値をそのまま地盤にも適用し、剛体解析相当としている。落石形状についても、軌跡や速度への影響を除くために、重量と等価な疑似円形(36 角形)としている。

4.2 解析手順と解析結果

本例題の落石は、ほぼ垂直に落下して跳躍した後、低い跳躍運動を 2～3 回繰り返す、その後回転を中心としたころがり運動へと移行する。第一跳躍地点(b1)での減衰係数(R_t)と速度エネルギー比(γ)は、計測したなかでは低い方に属する。計測された速度は衝突のたびに大きく変動しているが、これには回転時の形状による影響も含まれている。このため、解析結果の確からしさは、速度と軌跡の両方で判定した。

解析手順は、図-8に示すとおりであり、最初はまず計測結果を入力値として、解析を開始した。しかし、質点解析では高く飛びすぎ、また DDA では逆に 2 回目の跳躍直後にほとんど停止するという結果となった。そこで、質点解析では、第一跳躍地点の減衰係数は計測値のまま、まず b1 での跳躍高さと速度が実測結果を再現できる反発係数(R_n)を探索した。次に、第二、第三跳躍地点で得られた計測値をもとに、計測値と平均値の間で R_n と R_t 探索するという作業を行った。DDA の速度エネルギー比についても同様の手順で探索した。

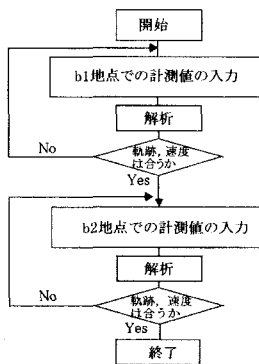


図-8 再現解析のフロー

以上のようにして、実際の軌跡と速度を再現した後、斜面全体に b1 のみ、あるいは b2 のみの入力値を適用した場合の解析を行い、それぞれの軌跡と速度を比較したのが図-9および図-10である。すなわち、斜面全体を b1 の入力値だけで解析した場合は速度も急速に減じて実測結果よりかなり手前で停止し、逆に b2 での入力値だけで解析した場合には大きな跳躍とともに実際とはかけ離れた遠方へ飛ぶ結果となった。表-3に、本例題における計測値と入力値をまとめた。なお同図には、質点解析結果から求めた速度エネルギー比も示したが、その値は DDA に用いた入力値とほぼ同じ結果となっている。

本解析結果から、(b)現場のような地形形状の斜面に数値解析を適用する場合には、自由落下後の跳躍に減衰の考慮が必要であることがわかる。なお、いずれの解析においても、b2 での入力値は計測値よりも高

表-3 観察から得られた計測値と数値解析に用いた値

解析方法	質点解析法				不連続変形法	
	b 1		b 2		b 1	b 2
計測地点 記号	Rn	Rt	Rn	Rt	γ	γ
計測値 平均	0.28	0.36	0.48	0.69	0.11	0.45
解析例で の計測値	0.25	0.08	0.32 ～0.59	0.61 ～0.52	0.04	0.26 ～0.27
再現解析に 用いた値	0.3	0.08	0.5	0.7	0.04	0.45
	(γ =0.05)		(γ =0.45)			

()内は計算値

い値,すなわち平均値近くの値を採用する必要があったが,これは他の例題ケースにおいても同様であった。

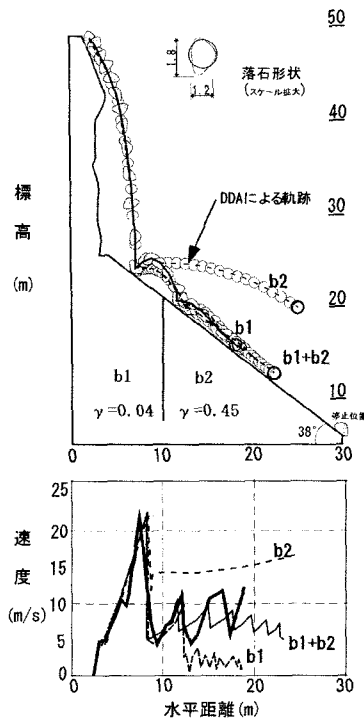
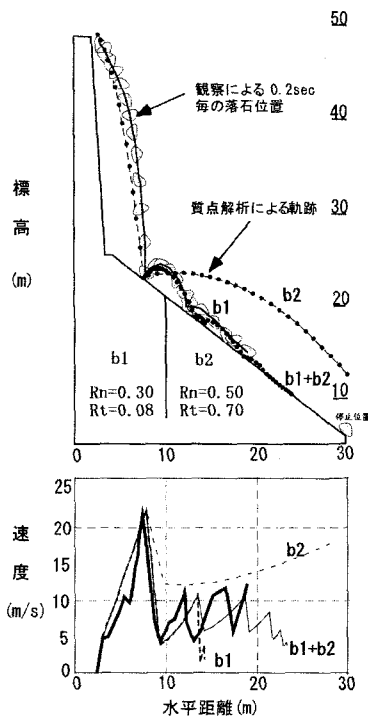


図-9 質点解析法による再現解析例 図-10 不連続変形法による再現解析例

6. まとめ

本論文では,危険岩塊除去現場や採石場での落石観察結果を基に,減衰係数や速度エネルギー比に入射角度が大きく影響することを報告した.また,その実測結果に対し,質点解析法と不連続変形法による再現解析を行って,(b)現場と同様の地形条件下での落石解析,すなわち入射角度が小さい場合の解析には,その減衰効果を考慮することが重要であることを示した.再現解析例での反発係数,減衰係数,速度エネルギー比の値は,下方斜面での計測値に対して,反発係数で50%値,減衰係数と速度エネルギー比では10%値と,きわめて大きな減衰を見込む必要があった.ただし,具体的な数値の範囲については,今後,落石重量や速度などの影響も含めて検討していく必要がある.

本結果は,落下地点での緩衝効果が通常の斜面に比べて大きい岩盤除去現場での結果を基にしているため,自然現象としての落石解析に対してはそのまま適用できない.しかし,類似の地形条件下での落石対策計画や,危険岩塊除去工を計画する際の施工計画に対しては,有益な情報を与えるものと考えられる.

参考文献

- 1)日本道路協会:落石対策便覧,2000
- 2)Tetsuya SHIMAUCHI,Naoki SAKAI,Yuzo ONISHI: Fundamental study of Mechanical Behaviors for Rockfall based on Imaging Analysis. ICADD4 in UK,2001,6
- 3)右城猛,吉田博,矢野光明,高石協,八木則男:斜面を落下する落石の運動定数と跳躍量に関する考察,土木学会論文誌 No.581/VI-37,49-58,1997
- 4)Stevens,Warren D., RocFall: a Tool for Probabilistic Analysis,Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls, University of Toronto,1998
- 5)DDA/API/Win2000/WinXP Ver.7,(社)システム総合研究所,第18回不連続性岩盤実用化研究会,2003.09