

実測値を用いた2次元個別要素法の落石解析 パラメータに関する検討

表真也^{1*}・西弘明¹・今野久志¹・伊東佳彦²・日下部祐基² 前田健一³

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)

³名古屋工業大学 都市社会工学科 環境都市プログラム (〒466-8555愛知県名古屋市中区昭和区御器所町)

*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、一軸圧縮強さ、超音波伝播速度等の室内力学試験やはね返り試験など屋内実験を行い解析パラメータの設定に関して検討を行った。この結果を基に、実斜面での実験結果と解析結果の比較を行うとともに、落石シミュレーションによって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。これにより、個別要素法の定数の設定に関して有用な知見が得られた。

Key Words : rockfall, 2D-discrete element method, analysis parameter, restitution test, falling test

1. はじめに

個別要素法¹⁾²⁾(以下DEMと略す)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、実斜面をモデル化し岩盤斜面上から岩塊が落下した場合の落石シミュレーションを行った³⁾。また、落石岩体が落石防護溝内に到達した時点での落石挙動を落石防護溝内に砂を設置した場合と未設置の場合について比較し、砂の緩衝効果などを検証した。これを基に到達範囲の推定、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ので以下を報告する。

の直径は 30cm と 20cm である。ゴムボールを用いたのは DEM の要素が球体であり、かつ破碎しないため、球体の落下軌跡を把握しやすいと考えたからである。現地実験は 2 箇所を実施し、落下試験体を斜面頂部から自由落下させた。



写真-1 現地実験の試験落体

2. 現地落石実験 (実斜面を用いた落石実験)

本論文では、DEM手法の検証を行うことを目的に実斜面において落石実験を行い、その落下軌跡と落石シミュレーションによる落下軌跡を比較した。落石実験は後述の落石挙動の予測解析を行う研究対象斜面と同様な斜面で実施した。当該斜面は斜面高さ200mを越える急崖斜面である。

写真-1には現地試験で用いた試験落体を示す。岩体(安山岩)の落体は直径は 30cm 程度、ゴムボール落体

(1) 現地実験の結果

写真-2には、現地実験を実施した投石位置 A (写真中の覆道までの高さ 80m) と投石位置 B (高さ 35m) を示す。

投石位置 A からの落下軌跡は、斜面が沢地形になっていたことから全ての試験落体は沢の内側に誘導されるように落下した。その落下時間は 10 秒程度であった。

一方、投石位置 B からの落下軌跡は、斜面の傾斜が

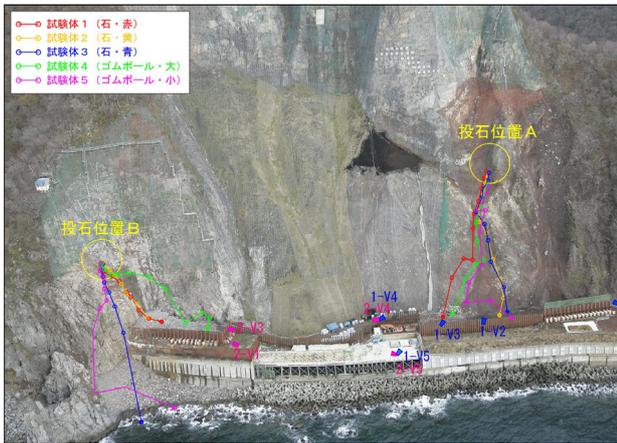


写真-2 現地落石実験結果

比較的なだらかであるため、局所的な起伏に影響され、落下当初から落下軌跡にバラツキがみられた。なお、落下時間は4秒程度であった。

3. 現地投石実験の再現解析

実斜面における落石シミュレーションへの適用性の検討および解析精度を検証することを目的として、前述の現地落石実験の再現解析を実施することとした。

(1) 現地投石実験の再現解析に用いた斜面のモデル化

落石実験を行った研究対象斜面では、事前の航空レーザ測量により詳細な地形データを得ており、これをもとに斜面をモデル化し再現解析を行うこととした。図-1に投石位置Aの解析斜面モデル、図-2に投石位置Bの解析斜面モデルを示す。

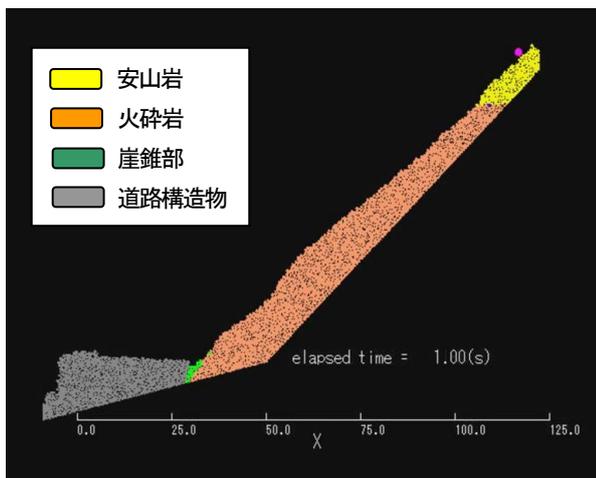


図-1 投石位置Aの解析斜面モデル (h=80m)

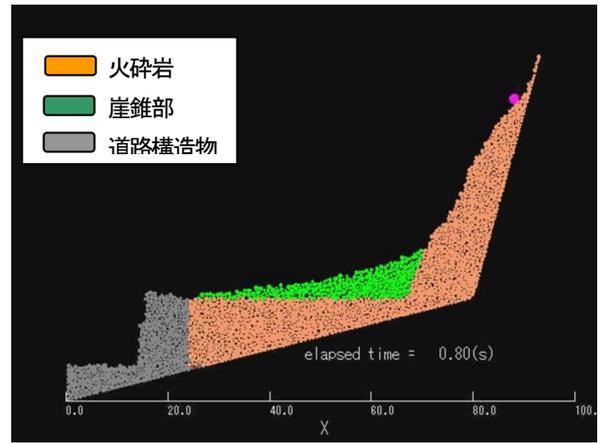


図-2 投石位置Bの解析斜面モデル (h=35m)

(2) 現地落石実験の再現解析に用いる定数設定

個別要素法 (DEM) では、粒子間に弾性力、減衰力を発生させるためにそれぞれバネとダッシュポットが用いられ、バネ定数と減衰定数が入力パラメータとなる。

また、摩擦力の再現のために、粒子間摩擦係数を入力値とするスライダーが用いられる。また、通常の粒状体では粒子間に引張り力は発生することはできないが、引張強度を有するボンド要素を用いることで試料の引張り破壊を表現することが可能となる。以降では、バネ定数、ボンド強度、減衰定数の設定に関して検討する。

まず、バネ定数について解析に用いる落石岩体と斜面の要素間バネ係数は、地質調査により得られた表-1の岩片の弾性波速度を用い、以下の式(1)、式(2)の算出式より算出した^{4) 5)}。これは、質量-バネ連結系において、一次元波動伝播速度を圧縮波速度 V_p とせん断波速度 V_s を、それぞれ、接触面の法線方向と接線方向のバネ定数 k_n と k_s を用いて表現したものである。

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

ここで、 k_n は法線方向バネ定数、 ρ は自然密度である。

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

また、 k_s は接線方向バネ定数である。これを参考に、火砕岩の法線方向バネ定数は $k_n = 2.41 \times 10^{10}$ (N/m)、接線方向バネ定数 $k_s = 6.36 \times 10^9$ (N/m) とした。

つぎに、本解析では岩体は複数の粒子要素をボンド要素で結合し作成している。これによって、非円形な不規則な形状の落体を作成することができ、落体の破砕も表現可能である。解析に用いるボンド要素である引張強度は、当該斜面の表-1の安山岩の一軸圧縮強さおよび引張り強度から逆解析的方法により求めた。粒子間のボンド強度を変化させた試料について一軸圧縮試験や引張試験のシミュレーションを実施し、得られた強度と実際の試験結果との比較によってパラメータが決定できる。これにより得られた粒子要素間のボンド要素の引張強度は、

$f_i = 320 \text{ MPa}$ であった。よって落体と斜面が衝突時に $f_i = 320 \text{ MPa}$ 以上のエネルギーが発生した箇所には斜面及び落体の粒子要素が分離する設定とした。

接触する粒子間でのエネルギー減衰を支配する減衰定数 h は、跳ね返り係数に大きく影響する。特に、粒子と粒子または粒子と板との間の垂直方向の跳ね返り係数は h によって決定される。そこで、減衰定数を求めるために、写真-3 に示すような簡単な方法で跳ね返り室内試験を行った。岩体を硬い岩質の床の上に落とすと跳ね返り係数 $R = 0.25$ を得た。この値には、落体の非球形性や衝突部の塑性変形なども反映された結果であることはいうまでもない。この跳ね返り係数となるように粒子と板との減衰定数 h を調整した結果、 $h = 0.70$ を得た。また、実斜面での解析では比較のために跳ね返り係数 $R = 0.50$ ($h \approx 0.28$) に相当するケースも実施することとした。

表-2 に再現解析に用いた解析ケースを示す。

表-1 地質調査結果および岩石試験結果

岩相	火砕岩	安山岩		
自然密度	$N(\text{g}/\text{cm}^3)$ 2481	2594		
超音波伝播速度	自然			
	P波伝播速度(km/sec)	3.47	3.42	
	S波伝播速度(km/sec)	1.74	1.69	
	動弾塑性係数(N/mm ²)	2.01×10^6	2.0×10^7	
一軸圧縮強度(kN/m ²)	湿潤	一軸圧縮強度	50045	—
	自然	一軸圧縮強度	47265	68818
引張強度	引張強度(kN/m ²)	2971	5909	
	密度(g/cm ³)	2.419	2.608	

表-2 再現解析に用いた解析ケース

落石岩体	落体直径(m)	バネ係数 法線方向(kN/m)	バネ係数 接線方向(kN/m)	ポンド要素の引張り強度(MPa)	参考値とした鉛直跳ね返り係数	粒子間の減衰定数
安山岩	0.3	2.41×10^{10}	6.36×10^9	320	0.25	0.7
安山岩					0.5	0.3

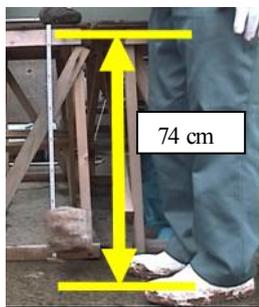


写真-3 室内試験状況

(3) 現地投石実験の再現解析結果

(a) 図-3 には現地投石実験 A (落下高さ 80m 落下時間 10 秒) の再現解析結果を示す。再現解析での岩体の落下時間は跳ね返り係数が $R = 0.25$ では 11 秒、 $R = 0.50$ では 9 秒であったことから跳ね返り係数による差はみられ

なかった。両者とも岩体が地山に衝突した後に、鉛直上向きに跳ね上がる場合は少なく、かつ、地山を転がり落ちるような挙動も目立つことが分かる。したがって、本ケースでは落体の挙動に与える減衰定数の影響は小さいと考えられる。

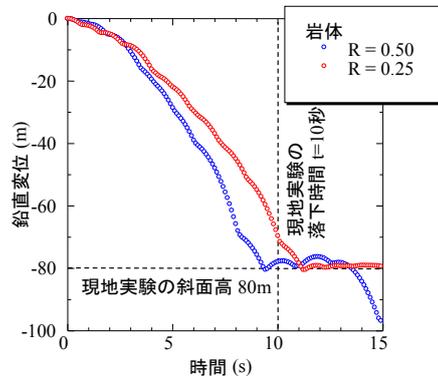


図-3 投石位置Aの落石シミュレーション結果(時系列)

(b) 図-4 には現地投石実験 B (落下高さ 35m 落下時間 4 秒) の再現解析結果を示す。再現解析での岩体の跳ね返り係数が $R=0.25$ では 5 秒、 $R=0.5$ では 4.5 秒であったことから (a) と同様に跳ね返り係数による差はみられなかった。

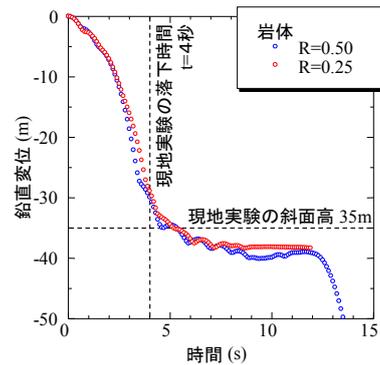


図-4 投石位置Bの落石シミュレーション結果(時系列)

上記 (a) (b) の結果より、岩体の落下時間は A 斜面、B 斜面共に現地投石実験と再現解析との時間差は同程度であった事から現地投石実験を再現することができたといえる。実斜面での落石シミュレーションでは室内試験によって得られた実跳ね返り係数 $R = 0.25$ ($h = 0.70$) を用いて実施することとした。

しかしながら、跳ね返り係数の差が 0.25 程度では落下時間に差はみられなかったため、跳ね返り係数の設定などの種々の条件の検討が今後必要である。

4. 2次元DEM落石解析による対策効果の検討

(1) 斜面および落石岩体のモデル化

写真-4に、現道への落石時の影響の検討を行う標高70mの実斜面を示す。解析を行った斜面は、図のラインで示す箇所です。現道および既設擁壁部に到達すると想定される落石経路を解析断面とした。



写真-4 落石シミュレーション対象斜面

図-5に、DEMに用いた解析モデルを示す。落石の運動は、地山の表面性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を要素の集合体として表現することで、落石の衝突による地山の破碎の再現や、要素間の結合を切ることによる砂堆積部（崖錘やポケット等）の再現を行い、落石が地山の表面性状から受ける影響を詳細に再現可能なモデルとした。また、落下衝撃による落下岩体の破碎・分離も考慮したモデルとなっている。

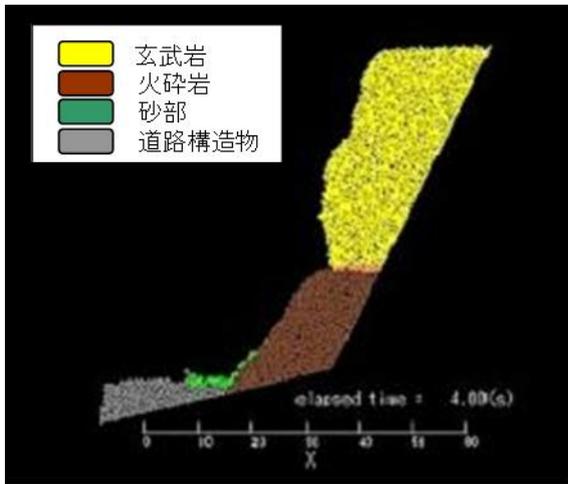


図-5 DEMに用いた解析モデル

斜面の物性モデルに関しては、落石挙動解析を行う箇所の地質調査結果および岩石試験結果をもとに、地質区分を行っている。また、落石岩体は玄武岩としてモデル化し、その要素径に関しては節理間隔（1m程度）および過去の落石事例（最大1m程度）から、内部亀裂、破碎の再現性などから、最大径 $D_{max}=1.0$ m ~ 最小径

$D_{min}=0.5$ m までとした。用いた粒子径は $D_{max} \sim D_{min}$ までの径を一様な確率で発生させて決めた。

(2) 解析パラメータの設定

解析に用いる落石岩体及び斜面の要素間バネ係数は、地質調査により得られた表-3の岩片の弾性波速度を用いて、式(1)、(2)により算出した⁴⁾⁵⁾。

玄武岩の法線方向バネ定数 $k_n=4.93 \times 10^{10}$ 、接線方向バネ定数 $k_t=1.73 \times 10^{10}$ 、火砕岩の法線方向バネ定数 $k_n=4.86 \times 10^9$ 、接線方向バネ定数 $k_t=1.47 \times 10^9$ とした。要素間の引張強度は、玄武岩 $f_t=1000$ MPa、火砕岩 $f_t=22$ MPa とした。減衰定数は跳ね返り係数 $R=0.25$ を想定し、 $h=0.7$ とした。

砂の堆積部に関しては、過年度の実験より求めた跳ね返り係数 $R=0.01$ といかなる落体であっても跳ね返らない。そこで減衰定数を臨界減衰の $h=1$ とし、かつ、粒子間にボンドを用いないことで、接点での減衰に加え堆積部の局所的な変形・破壊によるエネルギー逸散による効果を導入している。

表-3 地質調査結果および岩石試験結果

岩 相		玄武岩	火砕岩	
自然密度		n (g/cm ³)	2.596	1.948
超音波伝播速度 V (km/sec)	自然	P波伝播速度	4922	1.76
		S波伝播速度	2919	0.97
一軸圧縮強度 (kN/m ²)	湿潤	一軸圧縮強度		4887
	自然	一軸圧縮強度	205365	3938
引張強度	引張強度 (kN/m ²)		11005	218
	密度 (g/cm ³)		2.827	1.89

(3) 解析ケース

解析は現地照査の結果、転石などが確認された箇所から岩体を落下させた。

表-4に、実施した解析ケースの一覧を示す。表中の解析ケース名の第1項目は解析手法を、第2項目は跳ね返り係数を示している。第3項目のAは落石防護溝内に砂を整備した場合、Nは整備していない場合とする。

表-4中の①②解析ケースは落下高さ60mから玄武岩を落下させたケースで、③解析ケースは落下高さを25mで落石岩体の岩種を火砕岩として落下させた場合の3ケースを実施した。落体の形状は非円形で、複数の円形粒子を結合させてほぼ四角形である。

図-6には落石防護溝内の整備の有無を示す。整備後、落石防護溝内の幅員を現況の4.1mから4.9mへと拡張し、地盤高は現況より深さ0.3mまで掘削後に砂を0.3m敷施した。現地での砂の整備による緩衝効果の評価や対策工法として妥当かどうかについて検討するために、整備の有無の違いによる落下体の衝突エネルギーを算出した。

表-4 DEMの解析ケース一覧

解析ケース	岩種	落下高さ m	落石重量 kN	バネ定数 k (kN/m)		引張強度 f (MPa)
				法線方向 k_n	接線方向 k_s	
①(DEM-025-N)	玄武岩	60	215	4.93×10^{10}	1.73×10^{10}	1000
②(DEM-025-A)						
③(DEM-025-N)	火砕岩	25	13	4.86×10^9	1.47×10^9	22

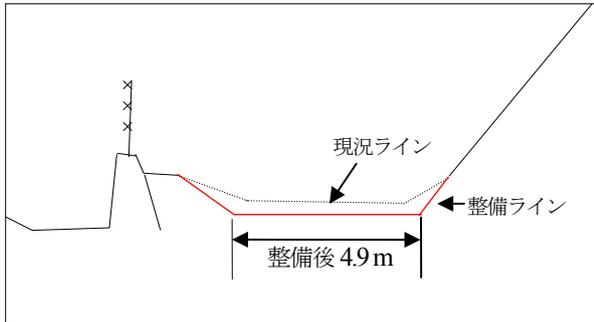


図-6 DEMに用いた解析モデル

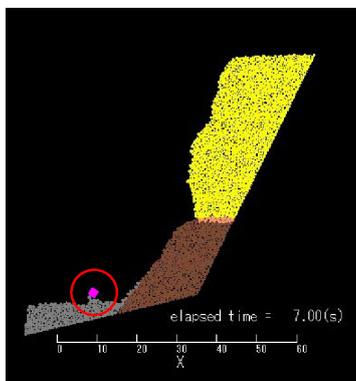
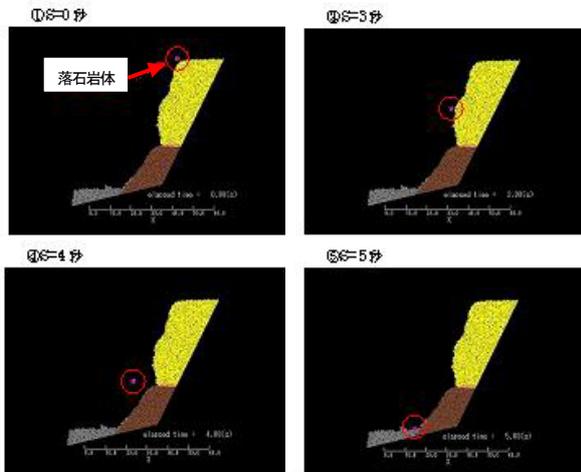


図-7 解析結果 (①DEM-025-N s=7秒後)

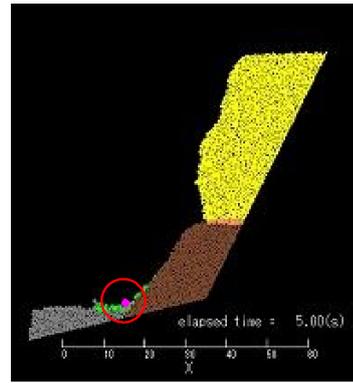


図-8 解析結果 (②DEM-025-A s=5秒後)

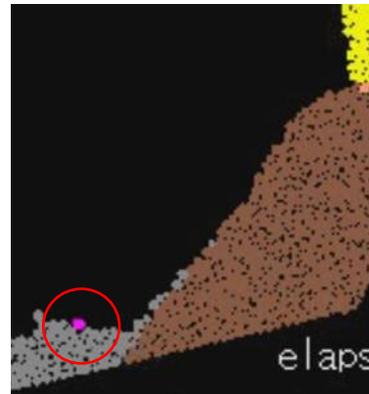
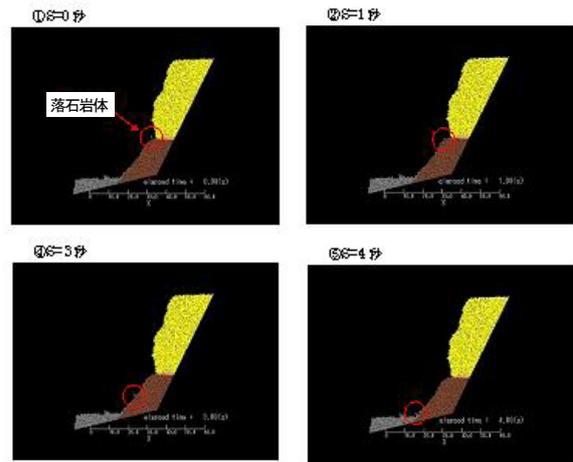


図-9 解析結果 (③DEM-025-N s=6秒後)

(4) 落下挙動

(a) 図-7には落石防護溝内を整備しない場合の解析ケース①を示す。落下岩体は、斜面を転がりながら落下し、落石防護擁壁に衝突する結果となった。落石岩体の破碎は無かった。

(b) 図-8には、落石防護溝内を整備した場合の解析ケース②を示す。ケース①の場合と同様に落下高さ 60mから落石岩体を落下させた結果のみを示す。砂による緩衝効果の影響によって、岩体は落石防護擁壁まで到達せずに落石防護溝内で停止しており、落石岩体の破碎は無

く、砂の緩衝効果が解析結果に大きな影響を与える結果となった。

(c) 図-9には、解析ケース①と同様に落石防護工内を整備しない場合で、落下岩体の岩種と落下高さを25mと変更した場合の落下軌跡を示す。岩体は落石防護擁壁まで到達し、落石防護溝内で停止する結果となった。落石岩体の破碎は無かった。

(5) 落石衝突エネルギーの推定

表-5には、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から、各解析ケースにおける衝突速度、衝突時の落石岩体重量、衝突エネルギーを示す。なお、衝突エネルギーは落石防護工に衝突した時点での落石岩体重量と衝突速度より算定している。これらの結果から以下のことがいえる。

①DEM-0.25-Nの落石防護溝を整備しない場合は落石岩体が破碎せず大きなまま衝突していることから衝突エネルギーが1,283 kJに達する。よって無対策では現道部に到達するなどの影響が生じるため既設擁壁の補強や擁壁背面の整備等の対策工の整備が有効である。

②DEM-0.25-Aでは砂を整備したことから落石防護溝内で停止したため、衝突エネルギーは0 kJであった。

③DEM-0.25-Nでは落下高さ25 mで落石防護溝内を整備しない場合は落石防護工に163 kJのエネルギーで衝突した。

表-5 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)	落石岩体重量 (kN)	衝突エネルギー (kJ)	落石到達範囲
①DEM-0.25-N	27.8	215	1283	落石防護擁壁に衝突
②DEM-0.25-A	0	215	0	落石防護溝内で停止
③DEM-0.25-N	15.2	13	57	落石防護擁壁に衝突

7. まとめ

本検討では落石岩体や斜面を粒子の集合体でモデル化し破碎や整備後の緩衝効果などの評価を試みた。

本研究では、通常よく行われる岩体の室内試験結果や簡単な屋内での岩体落下試験からDEMのパラメータを決定し、実斜面における落下実験のシミュレーションによる再現性を確認した。

さらに、実斜面で、想定される落体に対する落石シミュレーションを行ったところ、既設擁壁部まで達する場合と防護溝内で停止する結果が得られ、特に落石防護溝（ポケット）を整備することで明確な緩衝効果が発揮可能であることがわかった。今後は、落石防護溝による有効な緩衝効果発現の方法や解析精度向上について検討する必要がある。

参考文献

- 1) Cundall, P. A.: A Computer Model for Simulation Progressive, Large Scale Movement in Blocky rock system. Symp. ISRM, Vol.2: 129-136, 1971
- 2) Cundall, P. A., and O. D. L. Strack.: A Discrete Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 3) 表真也, 岡田慎哉, 石川博之, 伊東佳彦, 日下部祐基: 個別要素法を用いた落石シミュレーションに関する検討, 12回岩の力学国内シンポジウム (JSRM), 2008.
- 4) V.S. Vutukuri, S.S. Saluja, R.D. Lama 著 (増田秀夫, 田中荘一訳): 岩の力学的性質 I, 古今書院, pp.39, 1989
- 5) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, pp.39-45, 2004

A STUDY ON PARAMETERS FOR ROCKFALL ANALYSIS USING THE TWO-DIMENSIONAL DISTINCT ELEMENT METHOD WITH MEASURED VALUES

Shin-ya OMOTE, Hiroaki NISHI, Hisashi KONNO, Yoshihiko ITO
Yuki KUSAKABE and Kenichi, MAEDA

In this study, we examined a technique to analyze constant settings in rockfall simulation using the distinct element method (DEM), with the aim of obtaining basic data to contribute to rational planning and design, safety improvement, and cost reduction in rockfall protection work. To study the technique of setting analysis constants, indoor tests were performed. Based on the results of those tests, the energy and impact force exerted by falling rocks on impact with a structure were estimated through rockfall simulation. These estimates provided useful information regarding the setting of constants for the DEM approach.