

## (42) 実測値を用いた 2 次元個別要素法による落石解析の

## 再現性向上に関する検討

A Study on Parameters for Rockfall Analysis Using the 2D-Dimensional  
Discrete Element Method with Measured Values

表真也\*, 西弘明\*\*, 今野久志\*\*\*, 日下部祐基\*\*\*\*, 前田健一\*\*\*\*\*

Shinya omote, nishi hiroaki, konno hisashi, kusakabe yuki, maeda kenichi

\*(独)土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム (〒062-0862 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*博(工)(独)土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム (〒062-0862 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*\*博(工)(独)土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム (〒062-0862 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*\*\* (独)土木研究所寒地土木研究所防災地質チーム (〒062-0862 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*\*\*\*博(工),准教授,名古屋工業大学都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

*Key Words:* (rockfall, discrete element method, analysis parameter, restitution test, falling test)

キーワード: 落石, 個別要素法, 解析パラメータ, 跳ね返り試験, 落下試験

## 1. はじめに

我が国の国土は、狭く細長い上に脊梁に山脈が縦断する急峻な地形を呈している。そのため、道路は海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って建設されている箇所が多い。通常、斜面沿いに建設される道路の場合には、そのルート選定の際に斜面の安全に関しても十分な検討がなされている。しかしながら、長期にわたる凍結融解や岩盤の風化などの斜面の経時変化により、その状態が計画・設計時と変化する場合があります。状況によっては落石等の斜面災害の可能性が考えられる。このため、道路防災の観点から、それらに対する安全性の検討が必要になるものと考えられる。

落石は突発的に発生する自然現象のため、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。しかしながら、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。

このような、落石の落下挙動を推定する手法の一つとして、個別要素法<sup>1) 2)</sup> (「discrete element method」以後、「DEM」と記す。)がある。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、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<sup>3)</sup>。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。

## 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)の直径は 30cm 程度、ゴムボール落体の直径は 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

### (1) 現地落石実験の結果

写真-2には、現地落石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。

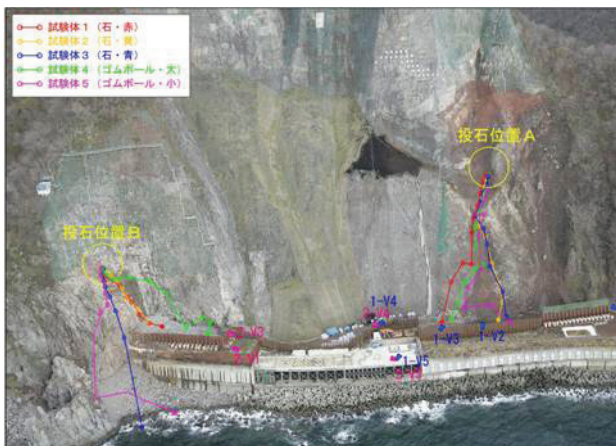


写真-2 現地落石実験結果

一方、投石位置 B からの落下軌跡は、斜面の傾斜が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. 現地落石実験の再現解析

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) 現地落石実験の再現解析に用いた斜面のモデル化

現地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。

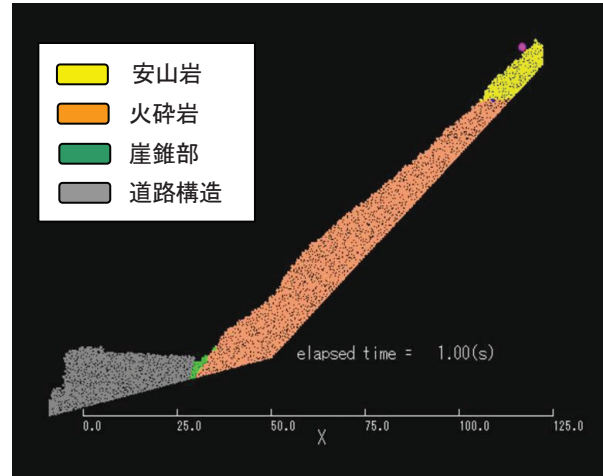


図-1 投石位置 A の解析斜面モデル(h=80m)

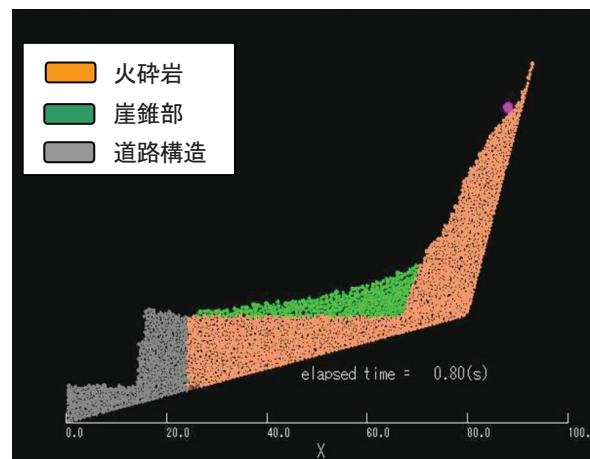


図-2 投石位置 B の解析斜面モデル(h=35m)

### (2) 現地落石実験の再現解析に用いる定数設定

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。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製している。通常の粒状体では粒子間に引張り力が発生することはないが、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。これによって、非円形な不規則な形状の落体を作製することができ、落体の破砕も表現可能である。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、落石岩体と斜面の要素間バネ係数は、質量一バネ連結系において、一次元波動伝播速度の圧縮波速度  $V_p$  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  $k_s$  を用いて以下の (1) (2) 式で表現できる<sup>4)5)</sup>。

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

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

ここで、 $\rho$  は自然密度である。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、これにより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。

解析に用いるボンド要素である引張強度は、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、得られた強度と当該斜面の表-1の安山岩の一軸圧縮強さおよび、引張強度との比較によって決定した。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、 $f_t = 320 \text{MPa}$  であった。よって、落体と斜面の衝突時に  $f_t = 320 \text{MPa}$  以上のエネルギーが発生した箇所には斜面およ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、跳ね返り係数の  $R$  を基に繰り返しシミュレーションを行い設定した。

これより、写真-3に示すような簡単な方法で跳ね返り試験を行った。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ている。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  $R = 0.50$  ( $h = 0.28$ ) 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
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
		動弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	$2.01 \times 10^6$	$2.0 \times 10^7$
一軸圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	湿潤	一軸圧縮強さ	50045	—
	自然	一軸圧縮強さ	47265	68818
引張強度		引張強度 (kN/m <sup>2</sup> )	2971	5909
		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	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)	ボンド要素の引張り強度 (MP)	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	$2.41 \times 10^{10}$	$6.36 \times 10^9$	320	0.25	0.7
安山岩					0.5	0.3

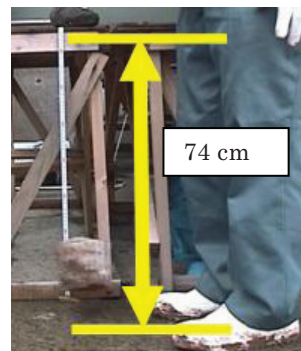


写真-3 室内試験状況

(1) 現地落石実験の再現解析結果

(a) 図-3には投石位置 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。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、本ケースでは投石位置 A の落下時間と挙動はある程度、再現できたと考えられる。

(b) 図-4には投石位置 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。したがって、本ケースでは投石位置 B の落下時間と挙動はある程度、再現できたと考えられる。

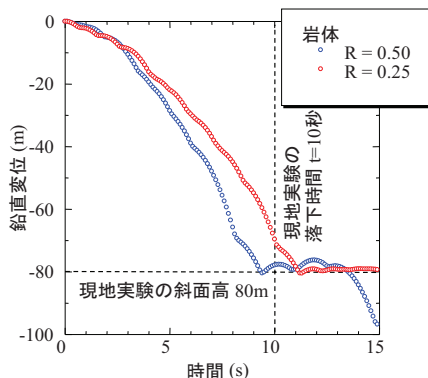


図-3 投石位置 A の落石シミュレーション結果 (時系列)

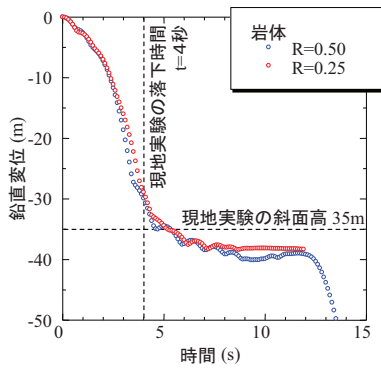


図-4 投石位置 B の落石シミュレーション結果 (時系列)

上記 (a) (b) の結果から、現地落石実験をある程度は再現することができたが、より適正な解析を行うため、跳ね返り係数の設定については検討していきたい。

#### 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見道および既設擁壁部に落石岩体が到達することが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（崖錐やポケット等）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。

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、破碎の再現性を考慮し、最大径  $D_{max}=1.0m$  ~ 最小径  $D_{min}=0.5m$  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。

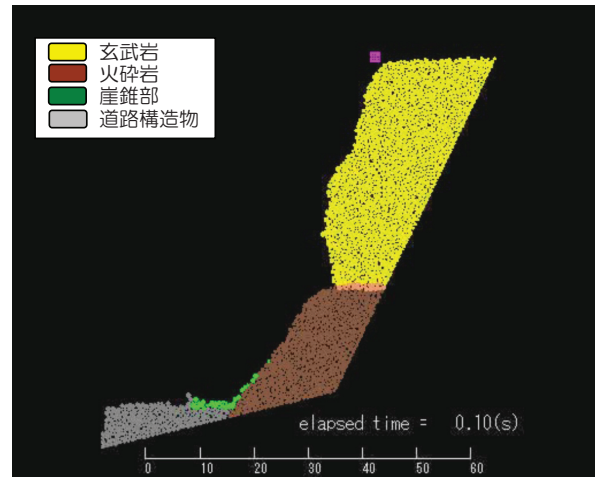


図-5 DEM に用いた解析モデル

##### (2) 解析パラメータの設定

当該斜面に用いる跳ね返り係数について今回は、室内試験によって得られた、実際の跳ね返り係数  $R=0.25$  ( $h=0.70$ ) を用いることとした。

落石岩体および斜面の要素間バネ係数は、現地での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)<sup>4)5)</sup> により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  $k_s=1.73 \times 10^{10}$ 、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  $k_s=1.47 \times 10^9$  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。

砂堆積部に関しては、過年度の実験でいかなる落体であっても跳ね返らない跳ね返り係数  $R=0.01$  を得ている。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 地質調査結果及び岩石試験結果

岩 相		玄武岩	火砕岩
超音波伝播速度 V (km/sec)	自然	P 波伝播速度 4.922	1.76
		S 波伝播速度 2.919	0.97
一軸圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	湿	一軸圧縮強さ —	4887
	自	一軸圧縮強さ 205365	3938
引張強度		引張強度 (kN/m <sup>2</sup> ) 11005	218
		密度 (g/cm <sup>3</sup> ) 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を発生源とし、落体の形状は現地踏査で直方体形状の安山岩の転石が確認されたことから直方体形状とした。

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堆積した場合、N は砂を堆積しない場合を示す。

図-6 には道路構造物の落石防護擁壁や落石防護溝内及び砂の堆積状況を示す。砂の堆積範囲は、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 まで掘削し砂を 0.3m 敷設した。表-4 中の①②は落下高さ 60m から玄武岩を落下させたケースである。

本解析により、実斜面で落石が発生した場合、砂の敷設による緩衝効果の有効性の評価や、対策工法として有効性を検討するために、砂堆積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。

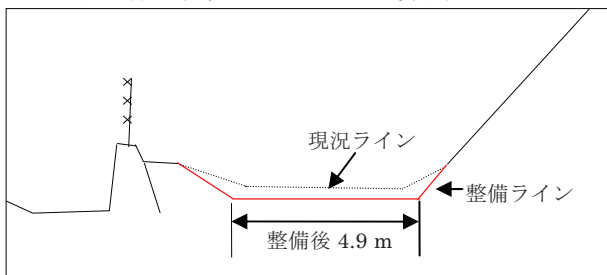


図-6 DEM に用いた解析モデル

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 <sub>n</sub>	接線方向 k <sub>s</sub>	
①(DEM-0.25-N)	玄武岩	60	215	4.93×10 <sup>10</sup>	1.73×10 <sup>10</sup>	1000
②(DEM-0.25-A)						
③(DEM-0.25-N)	火砕岩	25	13	4.86×10 <sup>9</sup>	1.47×10 <sup>9</sup>	22

(4) 落下挙動

図-7には、実斜面を用いた落石シミュレーションを行った3ケースの落石挙動とその解析結果の拡大図を示す。

(a) ケース①は、落石防護溝内を砂で堆積しない場合で、落石岩体を落下高さ 60m から落下させた軌跡を示す。落石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) ケース②は、落石防護溝内を砂で堆積した場合で、落石岩体を落下高さ 60m から落下させた軌跡を示す。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、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。落石岩体の破碎は無かった。

(c) ケース③は、解析ケース①と同様に落石防護溝内を砂で堆積しない場合で、火砕岩を落下高さ 25m から落下させた軌跡を示す。落石岩体は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。

(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擁壁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。結果から以下のことが考えられる。

(a) ケース①では、緩衝材が無いため落石防護擁壁に 1283kJ の衝突エネルギーで衝突した。また、ケース②では緩衝材を有するため落石防護擁壁に衝突せず落石防護溝内で停止した。これより、①②のケースから緩衝材の設置が落石対策に有効であることが考えられる。

(b) ケース③では、落石防護擁壁に 57kJ で衝突した。これより緩衝材等の設置が有効であることが考えられる。

表-5 落石到達範囲および落石エネルギー一覧

ケース	落下高さ (m)	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	60	27.8	215	1283	落石防護擁壁へ衝突
②DEM-0.25-A	60	0	215	0	落石防護溝内で停止
③DEM-0.25-N	25	15.2	13	57	落石防護擁壁へ衝突

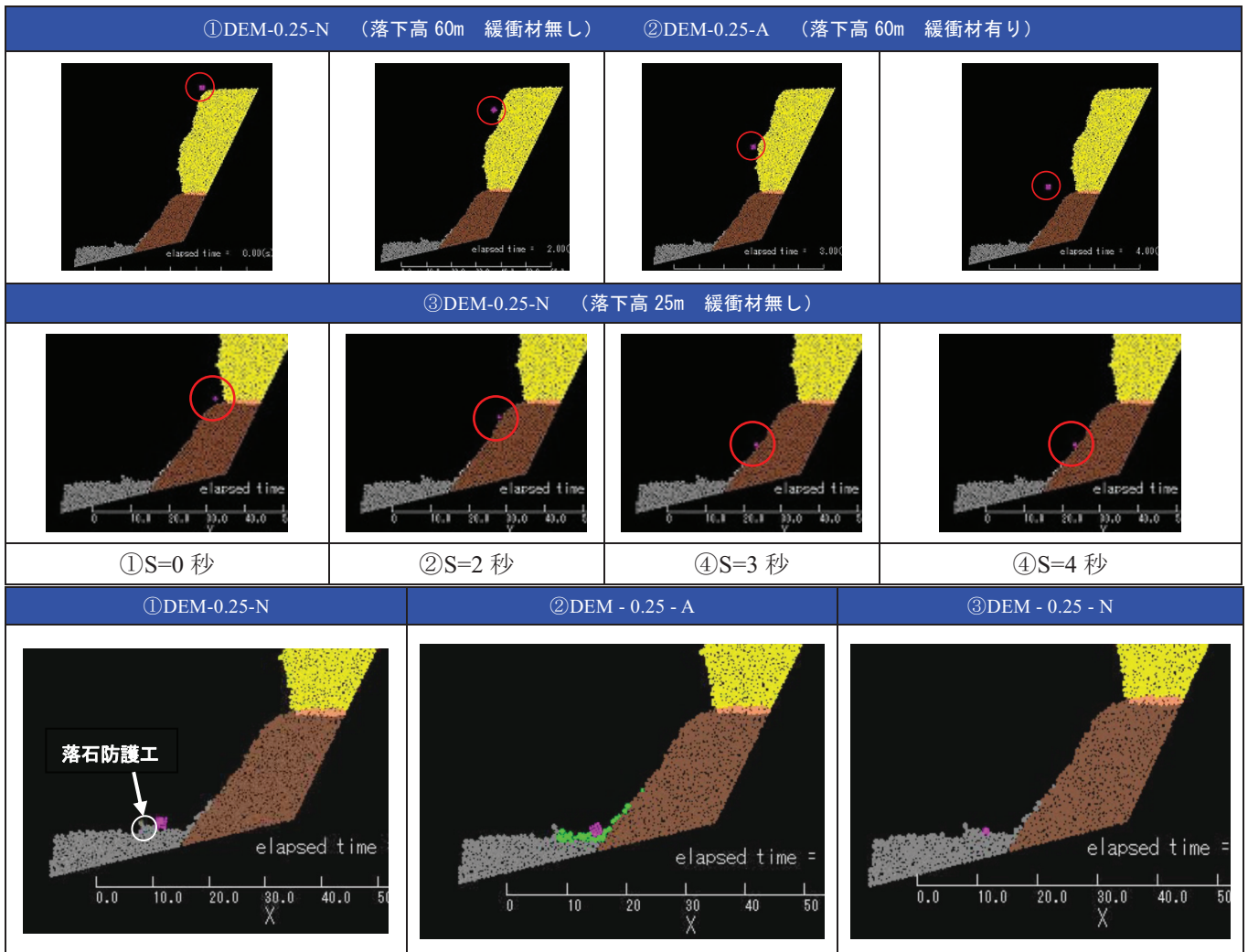


図-7 落石軌跡と解析結果

## 5.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、実斜面における現地落石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）に緩衝材として砂を敷設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的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