

# 崩壊土砂および防護工の個別要素法による モデル化

## MODELING OF DYNAMIC INTERACTION OF SLOPE FAILURE AND BARRIER STRUCTURES WITH THE DISTINCT ELEMENT METHOD

倉岡 千郎<sup>1</sup>・中島 祐一<sup>2</sup>

Senro KURAOKA and Yuichi NAKASHIMA

<sup>1</sup> 日本工営株式会社中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

E-mail: a4982@n-koei.jp

<sup>2</sup> 日本工営株式会社中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

**Key Words:** slope failure, distinct element method, impact force, run-out distance

### 1. はじめに

「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」が公布され、土砂災害の統計データに基づいて、急傾斜の高さ(H)の2倍を目安として警戒区域が検討される。ただし、斜面形状、斜面を構成する土砂の粒度、粒子の形状、水分の量、植生および対策構造物の有無によって、到達距離が異なるものと考えられる。本稿では特にエネルギー吸収型対策工が崩壊土砂の到達距離に与える影響に着目した。

そこで、礫質の土砂を対象とし、土砂を粒子の集合体としてモデル化する個別要素法(DEM)を用いて対策工の効果をモデル化する方法について検討した。

まず、個別要素法(DEM)により土砂とエネルギー吸収型対策工のモデル化を試みた。ポケット式落石防護網(図-1)の設置された斜面において発生した崩壊を再現することでモデルの検証を行った。さらに崩壊高さや土砂の量を変化させた感度解析を行ってエネルギー吸収型対策工が崩壊土砂の到達距離に与える影響を検討した。

崩壊土砂の危険性は到達範囲だけでなく、構造物に衝突した際の荷重(衝撃力)により評価される。

衝撃力の評価手法として、崩壊土砂の衝撃力の実験結果を参考にDEMモデルが検証されている<sup>1)2)</sup>。

DEMでは取り扱える粒子数には限りがあるので、砂のように細かい粒子一つ一つの運動を解析することは難しい。しかし、全ての粒子をモデル化しなくても、一つの粒子が複数の粒子を表すものと考え、一定の数の以上の粒子を用いれば、前述した到達域や衝撃力挙動を表すことは可能と考えられる<sup>2)</sup>。そこで、擁壁に作用する衝撃力をDEMによって求める方法を検討した結果についても説明する。

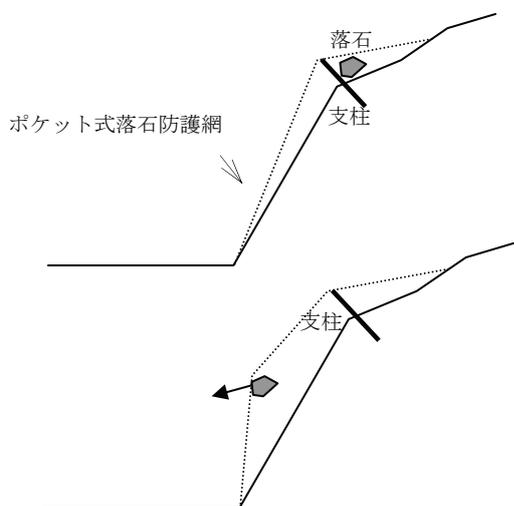


図-1 エネルギー吸収型対策工の例.

## 2. 崩壊土砂とエネルギー吸収型対策工のモデル化

### (1) 解析モデル

解析は単位幅を有する2次元とした。DEMを用いて土砂を円形粒子でモデル化すると、円形粒子は回転に抵抗しないため傾斜した面の上では停止しない。その結果、土砂の崩壊を円形要素の集合で表すと到達域が過大になる恐れがある。そこで、土砂を複数の円形粒子が剛結したモデルとして表すことで回転に対する抵抗を持たせた。ここで剛結した粒子をユニットと呼び図-2のように二つ結合したユニットと三つ結合したユニットを作成し、単体の粒子を混ぜて土砂を表した。図-2に示すようにこれらのユニットは傾斜のある面上でも摩擦があれば安定している。

これらのユニットの内部摩擦角などのパラメータや各ユニットの配合については、安息角を検証する基礎テストを別途行い決定した。

エネルギー吸収型対策工としては、ポケット式落石防護網を対象とした。モデル化する効果は、支柱の支持効果、ネットのエネルギー吸収効果、ネットの上端と下端を横方向につなぐ横ロープのエネルギー吸収効果が挙げられる。ネットを表す方法としては粒子間に引張りに抵抗するばねを導入し、モデル化したネットの伸長にともなうエネルギーが可能吸収エネルギー量を超えた時に、粒子間のばねを切断する。

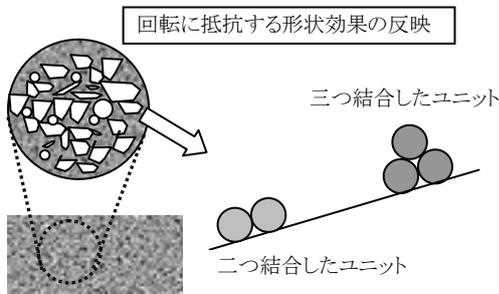


図-2 DEM で用いた土砂を表す粒子

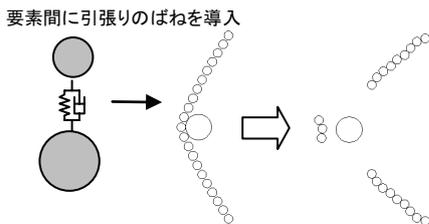


図-3 防護網(ネット)のモデル化

支柱の効果はネットを表す上端の粒子がバネで支柱に連結しているものとし、このバネの変位から支柱に作用する荷重を求め、支柱の耐力を超えた場合に支柱を表すバネを切断する。また、横ロープの効果は、ネットを表す上端と下端の粒子の変位に比例するバネを設定して表した。

### (2) 再現解析

実際に発生した崩壊土砂と防護網(ネット)の変形を再現することで解析モデルの検証を行なった。崩壊した土砂は崩壊長が15m程度であり、ネットを支える支柱は抜けたがネットは破れず、横ロープの効果によって土砂とネットがらみ出すような形に変形して停止した。設定したパラメータを表-1 および表-2 に示す。バネ剛性は法線方向( $kn$ )と接線方向( $ks$ )を同じとした。

表-1 土砂を表す粒子のパラメータ

パラメータ	本解析での設定
・ユニット数 ・各ユニットの配合	・424 個 ・1粒子、2粒子、3粒子のユニットを1:1:1の割合で配合
粒子の密度	1800 kg/m <sup>3</sup>
粒子の粒径	0.22 m
内部摩擦角	30 度
バネ剛性( $kn=ks$ )	50 kN/m
反発係数 $e = (v_2' - v_1') / (v_1 - v_2)$ (2粒子の場合、'は衝突後の速度を示す。)	0.1

表-2 エネルギー吸収型対策工を表すパラメータ

パラメータ	本解析での設定
ネットを表す粒子の径	0.4 m
ネットを表す粒子の密度	単位幅の重さが実際の重さに合うように設定
可能吸収エネルギー量	800 kJ
横ロープのバネ剛性	ネットの 1/100

支柱の耐力および横ロープの剛性を調整した結果、図-4に示すように現場で観察された土石とネットの変形を概ね表すことができた。しかしながら、ネットを支える横ロープの実際の耐力とエネルギー吸収力は明瞭ではなく、支柱や横ロープの各々の妥当性を詳細に評価するにはいたっていない。また、横ロープの効果は3次元的事であることから3次元モデルの必要性も考えられる。

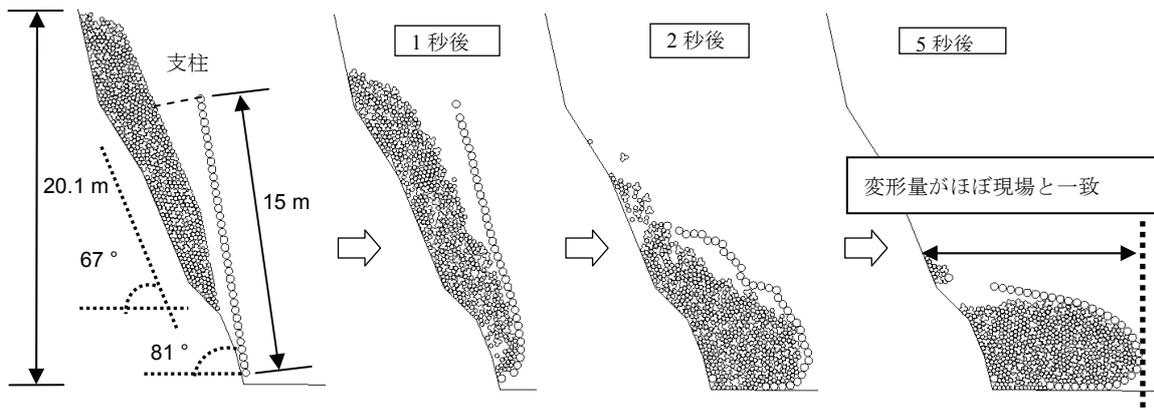


図-4 崩壊土砂と防護網の再現解析

### (3) 感度解析

傾斜や落下高さ、崩壊長を変化させた感度解析(表-3)を実施して、防護網(吸収エネルギー100kJ)のある場合と無い場合の土砂の到達距離(先端の粒子の位置)を求めた。感度解析では条件を簡略化するために横ロープと支柱の効果はモデル化していない。一例を図-5に示す。図-5右図は、防護網の伸長に伴うエネルギーが、可能吸収エネルギー量を超え破断した直後の様子を示す。

また、土砂の速度と衝突荷重(移動力)を求める簡易式より衝突力を求め、DEM から求めた粒子の平均速度から算定した衝突力と比較した。土砂の量はポケット式落石防護網を対策工として施工している斜面についての災害事例を参考に設定し、DEM のパラメータは再現解析と同じとした。

防護網がある場合と無い場合の到達距離の差を求めて最大運動エネルギー(E)との相関を調べた。ここで最大運動 E とは、時間変化する運動 E の最大値である。

表-3 感度解析ケース

傾斜	40,60,70,80 度
落下高さ (法尻から崩壊頭部までの高さ)	10,20 m
崩壊長さ	5,10 m

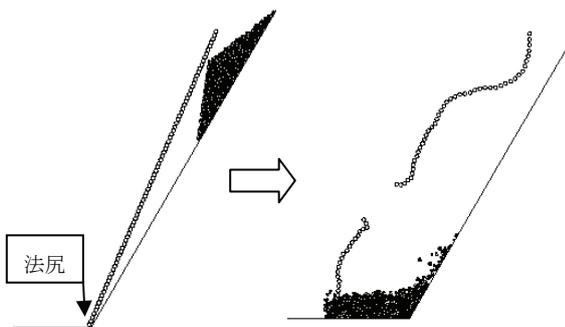


図-5 平面型崩壊モデルの一例

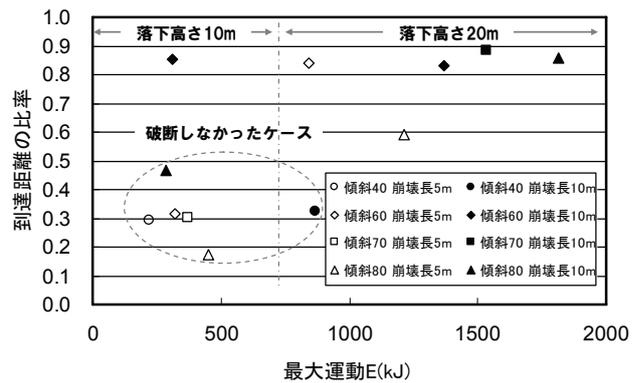


図-6 最大運動エネルギーと到達距離の比

防護網がある場合と無い場合の到達距離の比を最大運動 E にとの関係で見ると、図-6のように最大運動 E に関わらず、ネットが破断したケースで 10%~15%程度到達距離が短くなる。

次に法尻位置での単位面積あたりの衝突力(Fsm)を求めた。一つの方法として芦田他<sup>3)4)</sup>が提案する基本式(1)に基づいて土砂の速度を計算し、算定した速度から落石対策便覧<sup>5)</sup>に掲載されている式(4)を用いて Fsm を求めた。ただし、対象とした斜面は斜面勾配が下部で水平に変化するので、速度の計算にあたっては水平方向の速度成分が保存されると仮定した式<sup>4)</sup>を用いた。次に DEM から得られた速度から式(4)より Fsm を求めた。なお、DEM から求めた速度は粒子の平均座標の水平成分が法尻に達した時の全粒子の平均速度である。

$$U'_f(x') = \left\{ U'_{f0} e^{2ax'} - \frac{b}{a} (1 - e^{2ax'}) \right\}^{1/2} \quad (1)$$

(1)式の a 及び b は次の諸量である。

$$a = -\frac{2}{\{(\sigma-1)c+1\}} f_b \quad (2)$$

$$b = \cos \theta \left\{ \tan \theta - \mu_k \frac{(\sigma-1)c}{\{(\sigma-1)c+1\}} \right\} \quad (3)$$

ここに、 $U'_f$  : 土塊の無次元化移動速度、 $U'_{f0}$  : 土塊の無次元化初期移動速度、 $x'$  : 土塊の無次元化斜面方向移動距離、 $\sigma$  : 土粒子の比重、 $c$  : 体積濃度、 $f_b$  : 流体抵抗係数、 $\theta$  : 斜面の傾斜角、 $\mu_k$  : 動摩擦係数。

これらのパラメータのうち  $f_b$  は 0.025 とした。この値は、斜面の傾斜が 60 度のケースで DEM の平均速度と整合するように設定した値であり、文献<sup>4)</sup>に記載されている値の範囲に入る。その他のパラメータが速度に与える影響は小さく文献<sup>4)</sup>を参考にして  $c=0.5$ 、 $\mu_k=0.57$ 、 $\sigma=2.0$  とした。

衝突力(Fsm)は、速度が算定されれば以下の式(4)により算定される。

$$P = \rho_s \cdot V^2 \cdot A \cdot \sin^2 \alpha \quad (4)$$

ここに、 $P$  : 構造物に作用する衝突力(N)、 $\rho_s$  : 崩土の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $V$  : 崩土の到達速度 (m/sec)、 $A$  : 構造物の面に対する崩土の作用投影面積 ( $\text{m}^2$ )、 $\alpha$  : 崩土の構造物への衝突角度である。本解析では斜面に直交する単位面積の衝突壁を想定し、 $\alpha=90$ 度、 $A=1\text{m}^2$ である。

簡易式と DEM から求まる法尻位置の Fsm を比較したところ、図-7 に示すように斜面の傾斜角が 60 度よりも大きくなるにしたがって簡易式の Fsm は顕著に小さくなる。これは簡易式で法尻の水平面における速度を算定する際に上部斜面における速度のうち水平方向の成分のみが保存されると仮定するためである。すなわち、上部斜面と水平部の成す角度が 90 度に近いと、水平方向の速度成分が顕著に小さくなる。一方、DEM では粒子が水平部に衝突しても分散して連続的に移動するので速度が簡易式ほど急激に低下しない。また、DEM では、斜面の傾斜角が 70°から 80°に変化すると、Fsm が急増するが、これは、今回の平面型崩壊モデルでは、傾斜角が 80°の場合、土砂の移動現象が、すべり運動よりも自由落下に近い状態となっていることが一因として考えられる。

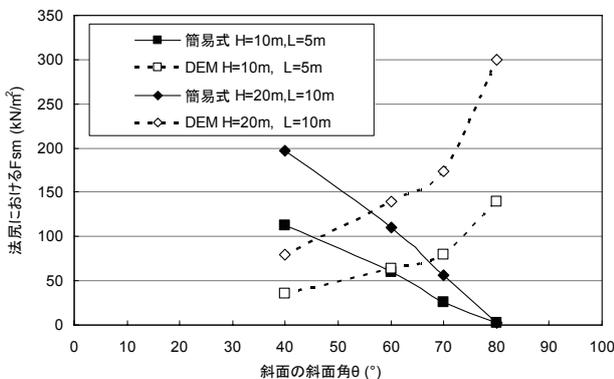


図-7 斜面の傾斜角と単位面積あたりの衝突力

### 3. 擁壁に作用する衝撃力の解析例

#### (1) 目的

前節の落石防護網の解析では、衝突力(Fsm)は DEM から求めた全粒子の平均速度から式(4)を用いて算定した。ここでは崩壊土砂が擁壁に衝突した際の Fsm を DEM 粒子と壁との接触力から直接求める方法と適用例について述べる。ただし、ここで紹介するモデル化方法は文献<sup>12)</sup>に記載されており、ここでは概要のみを述べる。

#### (2) 解析モデル

崩壊土砂の衝撃力の実験結果を参考に DEM モデルが検証されている<sup>12)</sup>。

実験<sup>6)</sup>の再現解析に用いたモデル形状を図-8 に示し、用いたパラメータを表-4 に示す。

本解析は 3 次元であり、球形の粒子を結合しないで用いた。既往の再現解析<sup>2)</sup>によれば、バネ剛性と粒子数が衝撃力に与える影響が大きく、粒子数は 10,000 以上とし、バネ剛性を 2~10 kN/m の範囲に設定した際の再現性が良好である。

ただし、これらの設定は土砂量が 0.1 m<sup>3</sup> 程度の実験に基づくものであり、数 10m<sup>3</sup> 以上の土砂量における適用性については実際の崩壊現象に基づく検証が必要と考えられる。

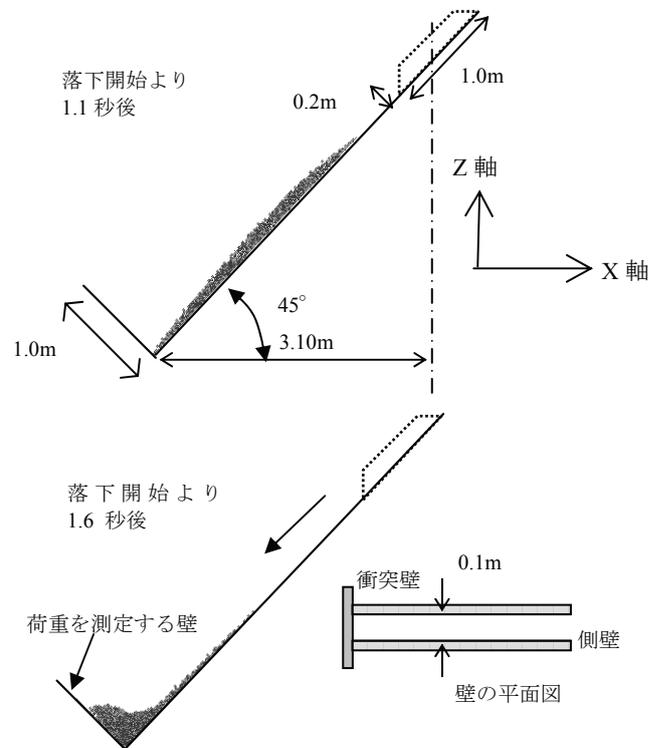


図-8 衝撃力の実験のモデル形状

表-4 土砂を表す粒子のパラメータ

パラメータ	本解析での設定
粒子の密度	2476 kg/m <sup>3</sup>
粒径 mm, (個数)	39.5 (10,000)
摩擦係数	0.6
粒子間バネ剛性(kn=ks)	2 kN/m
反発係数	0.1

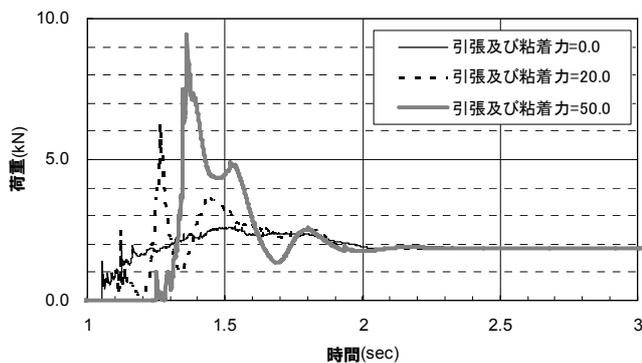


図-9 粘着力を変えた場合の衝撃力の時間変化

適用例の一つとして、粒子間の引張り力粘着力を変えた解析結果を図-9に示す。比較する実験結果はないものの、粒子が固まりになって落下すると荷重が大きくなる可能性が示唆され、土砂の粒度分布や粒子の大きさなどによって衝撃力が異なることを表している。

### (3) 擁壁に作用する衝撃力を求めた例

ここでは、高さ2mの擁壁を設定して15mの落差から土砂を落下させ、仮想ではあるが実規模レベルの解析を実施した(図-10)。解析ケースとしては、背面に水平な面を有する堆積土砂がある場合とない場合を設定し結果を比較した。試行的な計算を行う上で計算時間の短縮するために粒子数は5000個とし、幅0.5mで仕切られた流路を流下させた。粒径は0.06m、バネ剛性は10kN/mとし、その他のパラメータは表-4と同じである。土砂の量は間隙を考慮して単位幅に換算すると1.5 m<sup>3</sup>程度である。

擁壁の垂直部分に作用する衝撃力の時間変化を見ると、図-11に示すように背面に水平な面があるケースの荷重は、水平な面がないケースに比べて極めて小さい。これは、土砂が45°傾斜した面から擁壁背面の水平部分に衝突する際にエネルギーを失うためである。定量的な検証は必要としても、衝撃力は地表面形状の影響を大きく受ける可能性を示している。

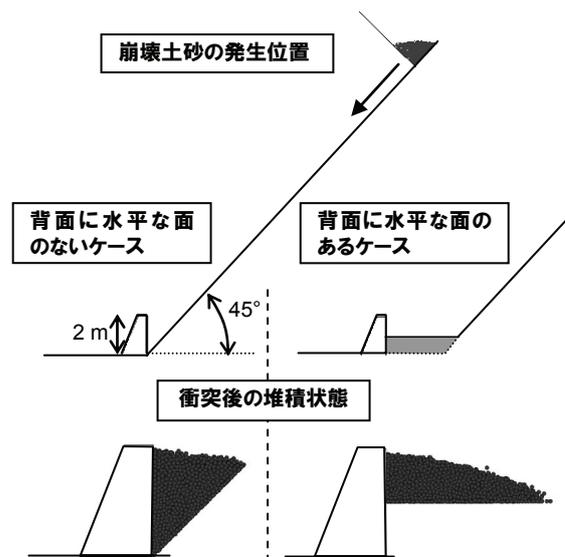


図-10 擁壁と崩壊土砂のモデル形状

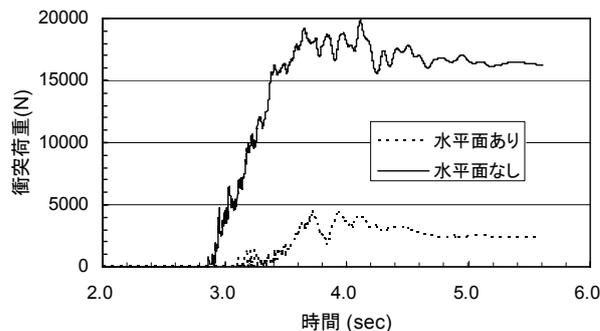


図-11 擁壁に作用する衝撃力の時間変化

## 4. まとめ

DEMは崩壊土砂とエネルギー吸収型対策工をシミュレーションする方法として可能性があり、防護網の吸収エネルギーを考慮した土砂の到達距離を推定する上で参考になるものと考えられる。ただし、再現解析のケースが少ないため土砂の粒度や量の異なる様々な崩壊事例の再現を実施することで解析の信頼性を向上させる必要がある。

簡易式及び個別要素法から求められる衝突力(Fsm)については、斜面勾配により相違点が見られた。今後は、実現象に照らしあわせて相違点の原因を検討する必要がある。また、多角形の礫などを表すために複数の円形粒子を剛結して用いた。このような粒子の形状効

果、配合、バネ剛性などが到達距離に与える影響を系統的に研究する必要がある。

擁壁に作用する衝撃力は、土砂の粒度や量だけでなく壁の背面の表面形状の影響を大きく受ける可能性がある。エネルギー吸収型対策工と同様、条件の異なる崩壊事例の再現解析や実験により、本結果を検証することが必要と考えられる。

**謝辞：**エネルギー吸収型対策工の解析では、筑波大学システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻の松島亘志准教授の作成した DEM コードを活用させていただきました。深く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1)倉岡千郎・中島祐一:粒状体個別要素法による崩土の衝撃荷重のシミュレーション,平成17年度砂防学会研究発表会概要集.
- 2)小山内信智・内田太郎・倉岡千郎・中島祐一・杉山実:個別要素法を用いた流下土砂の構造物に作用する荷重に関する数値計算,平成18年度砂防学会研究発表会概要集.
- 3)芦田和男・江頭進治・神矢弘・佐々木浩:斜面における土塊の抵抗則と移動速度,京都大学防災研究所年報,NO.28B-2,1985.
- 4)芦田和男・江頭進治・神矢弘:斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究,京都大学防災研究所年報,NO.27B-2,1984.
- 5)日本道路協会:落石対策便覧.
- 6)内田太郎・曾我部匡敏・寺田秀樹・松田義則・吉川修一・亀田信康:崩土の衝撃荷重の時間変化に関する実験的研究,平成16年度砂防学会研究発表会,2004.

(2008.5.16 受付)