

# 個別要素法により挙動を考慮した落石対策に関する信頼性設計に向けた提案

## A proposal of reliability based design of rockfall countermeasures using discrete element method

森口周二<sup>1</sup>, 大竹雄<sup>2</sup>, 本城勇介<sup>2</sup>, 原隆史<sup>2</sup>, 沢田和秀<sup>3</sup>

1 岐阜大学・工学部社会基盤工学科・s\_mori@gifu-u.ac.jp

2 岐阜大学・工学部社会基盤工学科

3 岐阜大学・流域圏科学研究センター

### 概 要

近年、構造物の設計には、信頼性設計法に基づいた設計法が重要視されている。また、数値解析が実務レベルで利用される機会が増えており、数値解析を用いた信頼性設計の枠組みが必要と考えられる。個別要素法は、利用が拡大している手法の一つであり、落石などの問題に対する有効なツールとして認知され始めている。落石や斜面の形状を直接表現することが可能なため、質点系の手法に比べて実現象に近い挙動が再現できる。しかし、その一方で、高い計算コストやパラメータの決定の難しさは大きな課題であり、落石や斜面の形状を詳細に表現するほど、計算結果はパラメータの値に敏感に反応して解に大きなバラツキが生じる。本研究では、個別要素法の問題点を解消すると同時に、落石対策工の信頼性設計を可能とする枠組みを提案する。例として、仮想斜面の落石の運動を想定して、落石エネルギー評価について一連の流れを示し、提案手法の有効性や利点について説明する。

キーワード：落石, 信頼性解析, 個別要素法

## 1. はじめに

現在、世界中の様々な設計コードが、従来の許容応力度設計法から信頼性設計法の考え方に移行している段階であり、土木構造物の設計についても、信頼性設計法に基づいた設計法が主流になってくると考えられる。また、近年の数値解析技術と計算機能力の向上により、数値解析が実務的なレベルで構造物の設計に用いられるようになってきた。そのため、今後の土木構造物の設計については、数値解析を用いた信頼性設計の枠組みが必要となる。

個別要素法 (DEM)<sup>1)</sup>も、近年その利用が拡大している数値解析手法の1つであり、落石などの個体の衝突が支配的な問題に対する有効なツールとして認知され始めている。しかしながら、解析パラメータの設定の難しさは未だ大きな課題であり、DEMを落石などのような問題に適用した場合には、斜面形状や落石の複雑な形状を表現できる一方で、解析結果は初期条件や入力パラメータに大きく依存する。そのため、落石挙動の傾向を正確に把握するためには数多くの解析ケースを実施する必要があるが、要素数の多い場合には膨大な計算時間が必要となり、十分な数の解析ケースを実施することが難しい。特に、3次元解析などでは、この傾向が強くなる。このような解析パラメータの不確実性や解析結果の取り扱いの難しさは、実務レベルの設計では大きなネックとなり、DEMの使用に対する障

害になっていると考えられる。

本研究では、先述のDEMに関する問題点を解消するとともに、DEMを落石対策工の信頼性設計に用いるための枠組みを提案する。本稿では、まず、その枠組みの概略を示し、その後、仮想斜面を対象とした落石について、落石エネルギーを評価対象として設計の手順を示す。また、本研究で得られる結果と従来の評価方法による結果を比較し、その結果について議論する。

## 2. 提案する信頼性設計の枠組み

### 2.1 基本となる設計の枠組み

地盤構造物の実務的なレベルⅢの信頼性設計の枠組みとして、図1に示す枠組みを提案されている<sup>2)3)</sup>。本研究では、この考え方に基いて、DEMを用いた落石対策工の信頼性設計の枠組みを提案する。図1に示す方法では、設計の作業工程を①数値解析、②不確実性解析、③信頼性解析の3つのプロセスに分離する。①の数値解析は、数値解析ツールを用いて、対象事象の応答を調べるプロセスである。このプロセスでは、対象事象に対して支配的な基本変数 $x$ の値の組み合わせを変化させ、それぞれの組み合わせに対する対象事象の応答を出力しておく。②不確実性解析は、基本変数 $x$ の不確実性を統計的手法により定量

化するプロセスである。このプロセスでは、基本変数  $x$  に対する経験的な知見や、これまでに蓄積されているデータベースの情報から、基本変数  $x$  の統計量（平均や分散）を評価する。③の信頼性解析では、①で得られた数値解析の結果を用いて基本変数  $x$  に対する対象事象  $y$  の応答局面を仮定する。その後、得られた応答局面と②で定量化された不確実性の情報を用いて、モンテカルロシミュレーションを実施する。その結果からある定められた状態に対する超過確率を算出し、信頼性の評価を行う。

上記の枠組みでは、数値解析のプロセスとその他のプロセスが独立しているため、数値解析手法の高度化や変化に即座に対応することができ、数値解析手法の発展に伴って新しい解析手法を随時採りこむことが可能である。

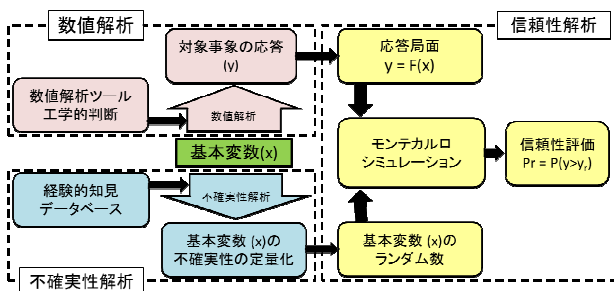


図 1 数値解析を用いた信頼性設計の枠組み<sup>2)3)</sup>

## 2.2 DEM を用いた設計の流れと考慮すべき不確実性

以下では、DEM を用いた信頼性設計の流れを示すとともに、その中で考慮すべき不確実性について説明する。図 2 は、先述の信頼性設計の枠組みに基づいて、DEM を利用した場合の設計の流れを示したものである。特に設計対象が落石対策工であると仮定して説明を進めるものとする。

まず、従来の設計と同じく、現地調査により不安定岩塊の位置、サイズ、岩種、および斜面の形状や表面の状態などを把握する。この結果をもとに、DEM の解析モデルや解析パラメータの値や範囲を決定するが、この際に、「計測誤差」、「空間的ばらつき」、「統計的推定誤差」という 3 種類の不確実性が含まれる。「計測誤差」は、調査対象（地盤や斜面など）の調査や試験に含まれる誤差であり、使用機器や計測者の個人差なども含まれる可能性がある。「空間的ばらつき」とは、調査対象の空間的な不均一性であり、例えば、斜面や岩体の強度が空間的に均一ではないことを意味する。また、「統計的推定誤差」は、特に限られた調査結果から解析対象の局所的な特性を推定する際に発生する誤差である。また、調査結果から DEM の解析パラメータを決定する際には、「変換誤差」が発生する。調査や試験の結果をそのまま解析パラメータとして用いることが可能な場合は少なく、多くの場合、調査や試験の結果を解析パラメータに変換する作業が必要となる。個別要素法では、岩種や試験結果から粒子間モデルのパラメータを決定することになるが、この際に変換誤差が生じる。最後に、設計モデル誤差があり、これは、設計計算に採用されたモ

デルが現実の現象を再現する精度にかかわる誤差である。この誤差には、DEM のモデル誤差と、DEM の計算結果から構築される応答局面のモデル誤差が含まれる。応答局面のモデル誤差は、DEM の計算結果のバラツキからある程度仮定できるのに対して、DEM のモデル誤差は、DEM という手法で現象を再現した場合に、実現象との乖離がどの程度あるかということの意味するものであり、容易に定量化できるものではない。しかし、この DEM のモデル誤差を適切に評価して基本変数として導入することにより、数値解析の結果と現実との整合性という実務者を悩ませる大きな問題を解消することが出来るため、極めて重要な不確実性であると考えられる。

上記の不確実性は、不確実性解析の中で、工学的知見、過去の研究成果、各種情報のデータベースを用いて定量化され、モンテカルロシミュレーションの入力値の情報として用いられる。図 2 をみてわかるように、DEM による解析を実施する目的は、応答局面を仮定するための材料を提供するという目的に限定されることになるため、全ての想定ケースを計算する必要はない。各種パラメータや解析条件を変化させた場合に、対象としている応答がどのように変化するか傾向が把握できればよい。そのため、数多くの想定ケースを解析する必要はない。DEM の計算結果に基づいて、応答局面が仮定され、基本変数の不確実性に基づいてモンテカルロシミュレーションが実施されることになるため、結果的に何千ケースといった膨大な量の計算の実施が可能となる。

このような枠組みで設計を進める利点として、DEM の問題点の解消が挙げられる。冒頭に述べたように、DEM の利用の障害となっている問題として、計算コスト、解析パラメータの決定の難しさ、計算結果のバラツキなどがある。提案する枠組みの中では、DEM の計算は応答関数の獲得という目的に限定して実施されるために、多くの計算ケースは必要なく、計算コストを削減できる。また、解析パラメータについても、不確実性を考慮した確率場として表現されることになるため設定しやすい。さらに、解のバラツキを利用して信頼性評価が行われるため、DEM の計算結果がばらついたとしても、その結果そのものに基づいて信頼性評価を行うことができる。このように、提案する枠組みは、DEM の計算結果を信頼性設計の中で利用できる環境を提供するだけでなく、実務レベルで DEM を利用する際の問題点を解消できる可能性がある。

次節以降では、仮想斜面の落石防護工を設計対象として、具体的な設計の流れを説明する。2 次元 DEM 解析を実施し、応答として、異なるパラメータの組に対する落石エネルギーの変化を調べる。その後、応答関数を仮定するとともに、不確実性の定量化を行い、モンテカルロシミュレーションによって信頼性評価を行う。なお、提案する枠組みの中では、先述の不確実性を定量化する考え方や手段が重要となるが、これらについては未だ完全に確立されていない部分もあるために、詳細な議論は避け、本稿では DEM を用いた信頼性設計の枠組み説明するものとする。

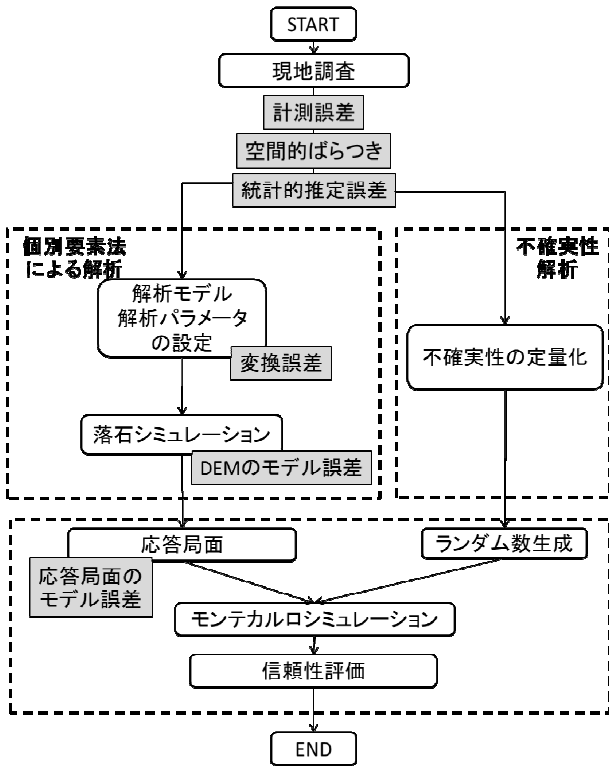


図 2 DEM を用いた設計の流れ

### 3. 個別要素法による落石シミュレーション

以下では、仮想斜面の落石防護工を対象として、先述の DEM を用いた信頼性設計の枠組みを適用する。本研究では、落石シミュレーションに対して、2次元 DEM を適用し、対象とする応答を防護工の設計に重要となる落石エネルギーとした。図 3 が用いた解析モデルの概略図である。DEM では、図 4 に示すように、球要素の間に粒子間力モデルを設定し、粒子同士の衝突により発生する力を計算し、粒子 1 つ 1 つの運動方程式を解く。近年では、粒子要素を剛結して、複雑形状を表現する方法が広く用いられており、本研究においても、粒子を剛結することで落石と斜面の形状を表現している。

本来であれば、解析モデルは現地調査に基づいて作成されるが、本研究においては、落石（岩塊）の規模や斜面形状は仮想のものとした。落石の質量は 400kg であり、斜面形状と落石の初期位置は図 3 に示すとおりである。計算開始と同時に、斜面上部の岩体が重力により斜面上を落下する。このとき、各解析ケースの落石エネルギーを算出する。図 3 には待ち受け防護壁の位置が示されているが、解析の中では存在しない。図 3 に示した待ち受け防護壁に衝突すると想定して、防護壁表面の位置を通り過ぎるときのエネルギーを評価する。このとき、落石エネルギーは並進速度と回転速度から算出する。

DEM の粒子間力モデルは、法線方向にバネとダッシュポット、接戦方向にバネとダッシュポットとスライダーを有する。それぞれに対して係数を決定する必要があるが、

これらのパラメータの決定に支配的な物理量は、反発係数と摩擦係数である。そのため、これらを基本変数として設定する。解析で用いる反発係数と摩擦係数については、一般的な値を考慮して決定した。また、DEM では、落石の形状を表現することが可能であるが、ここでは落石の形状が不明確であるという条件を設定し、落石の形状も 1 つの不確実性として導入し、落石のアスペクト比を基本変数として考慮した。ただし、初期の落石の位置エネルギーを一定とするために、図 5 に示すように体積が一定になるように落石の形状を変化させている。以上より、反発係数、摩擦係数、落石のアスペクト比を基本変数として解析を行った。それぞれの基本変数の値は、表 1 に示すように、反発係数が 0.4~0.6 の間で 3 種類、摩擦角が 20~40 度の間で 5 種類、アスペクト比が 1.083~1.940 の間で 3 種類とした。これらの組み合わせにより、合計 45 ケースについて DEM 解析を実施した。図 6~8 は、計算結果に基づいて、各アスペクト比について摩擦角と反発係数と落石エネルギーの関係をプロットしたものである。これらの結果より、摩擦角が大きくなるほどエネルギーは減少傾向にあるが、反発係数については解のばらつきが大きく、落石エネルギーに与える影響については明瞭な関係が確認されない。また、アスペクト比が大きくなるにつれて、摩擦角が高い領域では落石エネルギーが著しく低下することが確認できる。これは、アスペクト比が高い場合は、斜面上を滑動するような運動形態が多くなり、その場合に摩擦係数が大きいと落下速度が小さくなるためである。

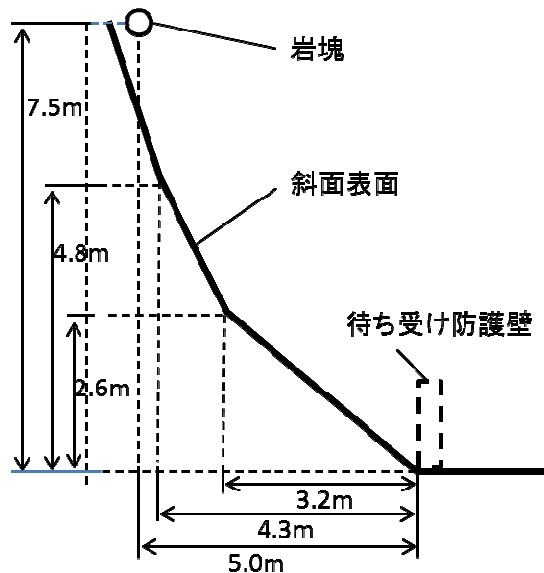


図 3 解析モデルの概略図

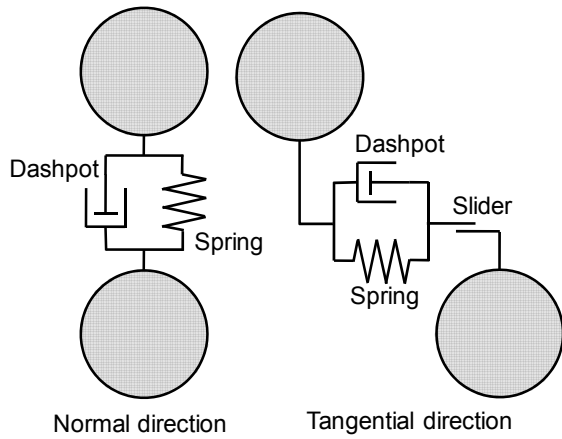


図 4 DEM の粒子間モデル

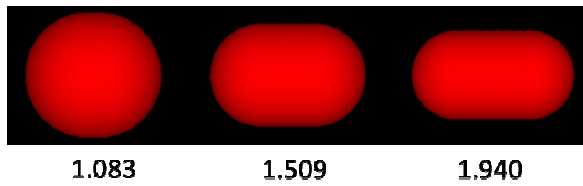


図 5 仮想岩塊のアスペクト比

表 1 解析で用いた各基本変数の値

基本変数	基本変数の値				
摩擦角(度)	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
アスペクト比	1.18	1.51	1.94		
反発係数	0.4	0.5	0.6		

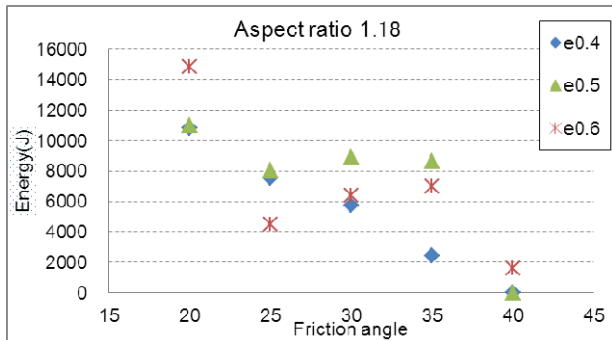


図 6 アスペクト比 1.17 の結果

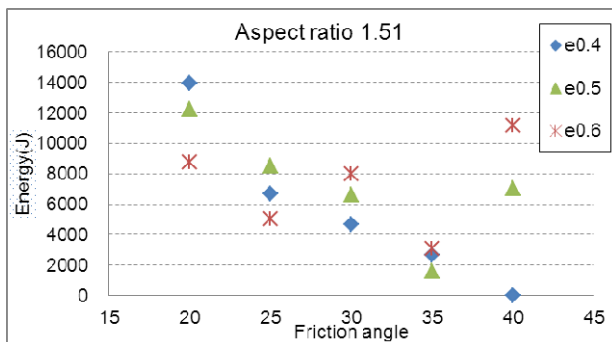


図 7 アスペクト比 1.51 の結果

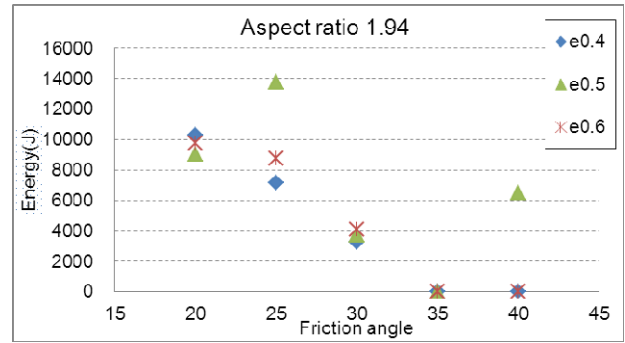


図 8 アスペクト比 1.94 の結果

#### 4. 応答局面の仮定

先述の DEM の計算結果より、反発係数については解のバラツキ大きく、エネルギーと反発係数の明確な関係は得られなかった。そのため、応答関数は、摩擦角とアスペクト比を変数とする関数で仮定した。表 2 に想定した関数と、それぞれの関数を用いた場合の標準偏差と残差、および AIC<sup>4)</sup>の値を示す。これらの結果より、表 2 の No.6 の関数を応答関数として採用し、以下の応答関数が得られた。

$$E = 18920 Asp - 6419 \log(F) Asp + 10839 \quad (1)$$

ここで、E は落石エネルギー、Asp はアスペクト比、F は摩擦角(degree)である。図 9 は応答関数をアスペクト比、摩擦角、落石エネルギーの 3 つの軸で構成される空間内で表現したものである。このように、応答関数としてどのような関数を用いるかは任意であり、工学的判断を加味して、DEM の計算結果を精度よく表現できる応答関数を仮定する必要がある。

ここで、式(1)の応答関数にモデル誤差の影響を導入する。先述のように、反発係数については落石エネルギーと明瞭な関係が確認されなかったために、応答関数の基本変数から排除しているが、反発係数が変化することで解にばらつきが生じており、このばらつきは応答関数のモデル誤差として評価されるべきである。また、DEM を利用して設計を行っているために、DEM のモデル誤差についても考慮すべきである。本研究では、応答関数のモデル誤差  $\delta_{DEM}$  と応答関数のモデル誤差  $\delta_{RS}$  を導入して、最終的に応答関数を以下のように仮定した。

$$E = (18920 Asp - 6419 \log(F) Asp + 10839) \delta_{DEM} \delta_{RS} \quad (2)$$

表 2 応答関数の候補と評価結果

No. 関数	標準偏差	分散	AIC
1 $E = a \cdot Asp + b \cdot F + c$	3854	0.316	873.7
2 $E = a \cdot Asp^2 + b \cdot F^2 + c$	3854	0.316	873.7
3 $E = a \cdot Asp + b \cdot F + c \cdot Asp \cdot F + d$	3891	0.319	873.5
4 $E = a \cdot Asp + b \cdot \log(F) + c$	3798	0.336	872.4
5 $E = a \cdot Asp + b \cdot \log(F) + c \cdot \log(F) \cdot Asp + d$	3832	0.440	872.1
6 $E = a \cdot Asp + b \cdot Asp \cdot \log(F) + c$	3792	0.338	872.2

※ a b c d は定数



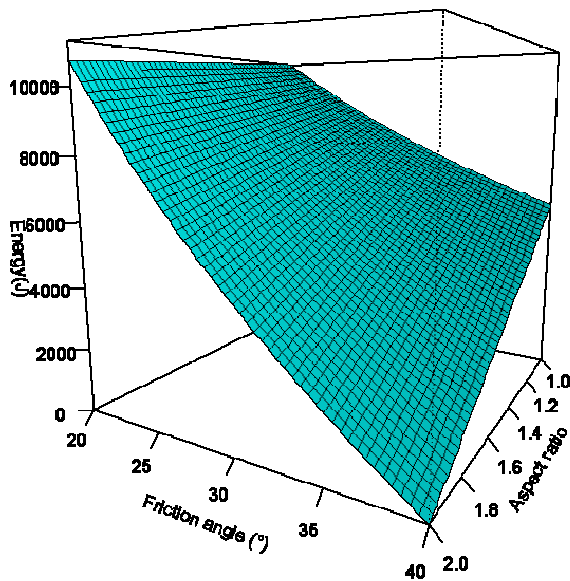


図 9 応答関数

## 5. 基本変数の不確実性解析

先述のように、応答関数に含まれる基本変数を摩擦係数、落石のアスペクト比、DEM のモデルのモデル誤差、応答関数のモデル誤差の 4 種類とした。不確実性解析のプロセスでは、これらの変数の確率モデルを推定する。摩擦角やアスペクト比については、現地調査結果や試験結果、または過去の研究成果やデータベースに基づいて決定されるものであるが、本研究では仮定の落石斜面を対象としているため、考えられる範囲に対して仮定の確率モデルを与えた。これらの平均値や分散、および分布関数を仮定することにより、不確実性を定量化する。また、応答関数のモデル誤差については、先述の DEM の計算結果のばらつきに基づいて正規分布に従うものとして定量化した。DEM のモデル誤差については、今後の研究で定量化を行うものとして、本研究においては仮想のものを設定した。

表 2 基本変数の確率モデル

基本変数		平均	標準偏差	分布関数
摩擦角(度)	$F$	30	7	正規分布
アスペクト比	$A$	1.5	0.5	正規分布
応答関数のモデル誤差	$\delta_{RS}$	1.0	0.55	正規分布
DEMのモデル誤差	$\delta_{DEM}$	1.0	0.2	正規分布

## 6. 信頼性解析

数値解析結果に基づく応答局面と、不確実性解析により定量化された基本変数の不確実性を用いて、モンテカルロシミュレーションを行った。本来であれば、この結果から得られる落石エネルギーの分布と、対策工の許容エネルギー

の値から、超過確率を評価することになるが、本研究では、防護工の許容エネルギーを確定的に設定するのではなく、各落石エネルギーの値に対する超過確率を算出した。図 10 にその結果を示す。このような結果の整理を行うことにより、実際の落石のエネルギーが、ある規定されたエネルギーを超える確率を得ることができ、対策工の選定などに有益な情報を与える。また、図 10 には 2 種類の結果（「45 ケース」と「200 ケース」）が示されている。先述のように、DEM の計算は 45 ケース行っており、その結果に基づいて応答関数を仮定しているが、45 ケースの DEM 計算結果に基づく結果が妥当であるかどうかを確認するために、200 ケースの DEM の計算結果に基づく評価結果も示した。この 200 ケースの計算は、表 1 のアスペクト比を 8 種類に、反発係数を 5 種類に増やして実施したものである。図より確認できるように、「45 ケース」と「200 ケース」の結果はほぼ一致しており、45 ケースの結果でも十分な精度であることがわかる。このように、少ない解析ケースでも応答の傾向を精度よく把握できればよく、DEM の解析パラメータを細かく設定して多くの解析ケースを実施する必要はない。ただし、解析ケースの絞り込みには、当然ながら工学的判断が必要であり、また、DEM という手法の特性を正しく理解しておく必要がある。

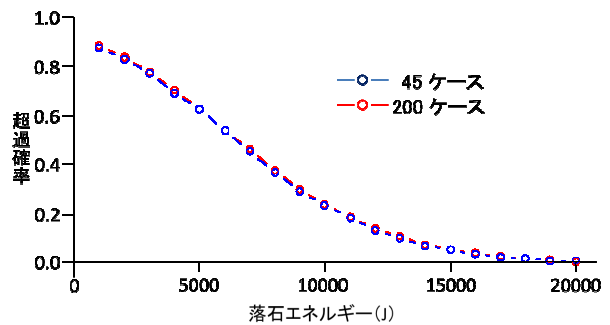


図 10 落石エネルギーに対する超過確率の関係

ここで、本研究で得られた結果について、現行の設計法との比較を行う。比較のために、用いたのは、落石対策便覧<sup>5)</sup>の落石エネルギー評価式であり、以下の式で表現される。

$$E = (1 + \beta) \left( 1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) mgH \quad (3)$$

ここで、 $\beta$  は回転運動の効果を加味した係数（ここでは  $\beta = 0.1$  とした）、 $\mu$  は等価摩擦係数、 $\theta$  は斜面勾配、 $m$  は落石の質量、 $g$  は重力加速度、 $H$  は落下高さである。この式を応答関数として仮定し、モンテカルロシミュレーションを実施した。 $\mu$  以外のパラメータについては解析条件などから確定値とし、 $\mu$  については落石対策便覧に記載されている値を参考にして確率モデルを推定している。本研究の DEM による落石エネルギーと、落石対策便覧の評価式による結果の比較を図 11 に示す。図 11 は、それぞれの計算によって得られた落石エネルギーの頻度分

布図である。これを見てわかるように、DEMによる結果は、落石対策便覧の評価式による結果に比べて全体的に低い値を示している。落石対策便覧では、多くの実験結果を基にして、設計に対してかなり安全側のエネルギーの値が出力されるようにパラメータを設定することになっているため、当然ながらDEMによる結果に比べて大きいエネルギーが算出される。このように、1つの評価式で様々な条件の落石エネルギーを評価しようとする場合、どうしても安全側の評価が必要となる。しかし、本研究で示した枠組みでは、落石危険個所の地質や地形、および落石の形状などを考慮してDEMによる落石シミュレーションを実施し、その個所特有の落石エネルギーの応答関数を構築することが可能であるため、過度に安全側の設計になることを防ぐことができる。本稿で示した計算では、DEMのモデル誤差などを精度よく評価して導入するには至っておらず、出力された結果も大きな分散を含んだものであるが、それでも従来の設計法と比べて合理的な設計ができる可能性を確認することができる。

ていく予定である。

## 参考文献

- 1) Cundall P. A. and Strack O. D. L (1979): A discrete numerical model for granular material, *Geotechnique*, 29, 47-65.
- 2) Honjo Y., Hara T. & Kieu Le T.C.(2010): Level III Reliability Based Design of Examples set by ETC10, *Proceedings of 2nd International Workshop on Evaluation of Eurocode 7*.
- 3) Yusuke Honjo, *Challenges in Geotechnical Reliability Based Design*, *proceedings of 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk*, pp.11-27, 2011
- 4) Akaike, H. (1973) : Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, *2nd International Symposium on Information Theory*, Petrov, B. N., and Csaki, F. (eds.), Akademiai Kiado, Budapest, 267-281.
- 5) 社団法人日本道路協会, 落石対策便覧, 丸善, 2000年(改訂版)

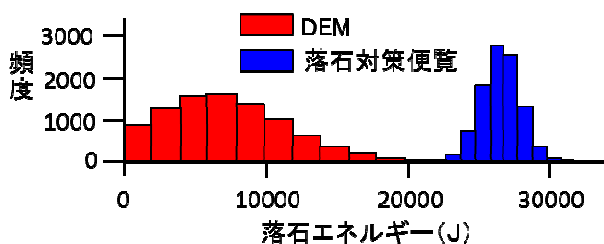


図 10 落石エネルギーの頻度分布図

## 7. まとめ

本稿では、DEMを用いた落石対策工の信頼性設計の枠組みを提案した。また、シンプルな条件で仮想斜面における落石を想定して、具体的な設計の流れを示した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・提案した枠組みは、DEMを用いた信頼性設計の環境を提供するだけでなく、実務上でDEMの利用の障害となる問題点についても解消できる可能性がある。
- ・DEMの計算結果に基づいて、ある状態に対する危険度を超過確率で表現することが可能であるため、設計に対して定量的な情報を提供することができる。
- ・従来の統一的な評価方法と比較して、個所特有の評価が可能となり、対象とする個所によっては、設計における過大評価を大幅に解消できる可能性がある。

本研究では、実斜面ではなく、仮想斜面を対象としてDEM解析を実施しており、また、DEMのモデル誤差について詳細な議論を行っていないため、現段階では提案した枠組みの可能性について論じる程度にとどまっている。今後、各種の不確実性の定量化の考え方や算出方法を明確化するとともに、実斜面での落石を対象とした検証を実施し