

平成27年度原子力施設等防災対策等委託費  
(斜面崩壊に伴う原子炉施設への影響評価手法の整備)  
事業  
報告書

平成28年3月

日本大学工学部工学研究所

本報告書は、日本大学工学部工学研究所が原子力規制庁からの委託により実施した平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（斜面崩壊に伴う原子炉施設への影響評価手法の整備）事業の成果をとりまとめたものです。

本報告書の複製、転載、引用等には、原子力規制庁の承認が必要です。

## 目次

	頁
1 はじめに	1-1
2 滑落型崩壊形態における影響評価	2-1
2.1 はじめに	2-1
2.2 斜面崩壊に係わる解析手法の整備	2-2
2.3 崩壊土塊の到達位置の特性評価	2-19
2.4 崩壊土塊の衝突速度の評価	2-72
2.5 崩壊土塊の堆積土量の評価	2-77
3 進行型崩壊形態における影響評価	3-1
3.1 斜面崩壊時の変形量に関する評価	3-1
3.1.1 有限要素法を用いた斜面崩壊時の変位量に関する評価	3-1
3.1.2 粒子法(MPM)を用いた斜面崩壊時の変位量に関する評価	3-34
3.2 斜面对策工の耐震補強効果の検証	3-49
3.2.1 アンカー工により補強された斜面模型の振動実験による補強効果の検証	3-49
3.2.2 抑止杭により補強された斜面模型の振動実験による補強効果の検証	3-63
4 あとがき	4-1

## 1. はじめに

原子力発電所の安全審査に係わる地盤安定性評価では、平成 3 年に発行された JEAG4601-1991「原子力発電所耐震設計技術指針（追補版）」に基づく検討が実施されてきた。同指針では、地盤安定性検討について、すべり面法等の慣用法による検討、静的解析による検討、動的解析による検討の 3 段階の検討を、原則として全て実施する手順を示している。また、土木学会原子力土木委員会では、平成 21 年 2 月に前述の指針に示された地盤安定性検討の手順における 3 段階の検討のうち、最も信頼性が高く、また動的上下動を直接取り扱うことのできる「動的解析による検討」を主体とした、新しい地盤安定性検討の手順を「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術」として提案した。原子力施設内における斜面や基礎地盤の安定性評価に関する審査ガイド（平成 25 年 6 月制定）では、それらを踏まえた安定性評価の考え方が示されている。しかし、平成 25 年 11 月に制定された「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では設計を上まわる事象に対する安全性の評価も行うことが示されている。

原子力発電所の安全性に発電所敷地内における斜面の崩壊に及ぼす影響を評価するためには、斜面崩壊後の影響に関するシナリオを適切に評価することが必要となる。例えば、図 1-1 に示す様に、原子炉建屋周辺斜面が地震に伴い不安定化し、斜面崩壊により岩塊が滑落し、建屋などの施設に衝突し、建屋・機器に損傷を与えるというものである。原子力発電所の安全性を確保するためには、斜面の崩壊によって施設の安全機能に重大な影響を及ぼさないことを確認する必要がある。そのためには、斜面崩壊の発生可能性と崩壊領域を合理的に評価することが重要となる。(独)原子力安全基盤機構(JNES)が平成 26 年 2 月に発行した RE レポート「JNES-RE-2013-2037:基礎地盤及び斜面の安定性に係る設計・リスク評価の手引き」は、地盤の安定から崩壊後の施設や構造物への影響をシームレスに評価するため、

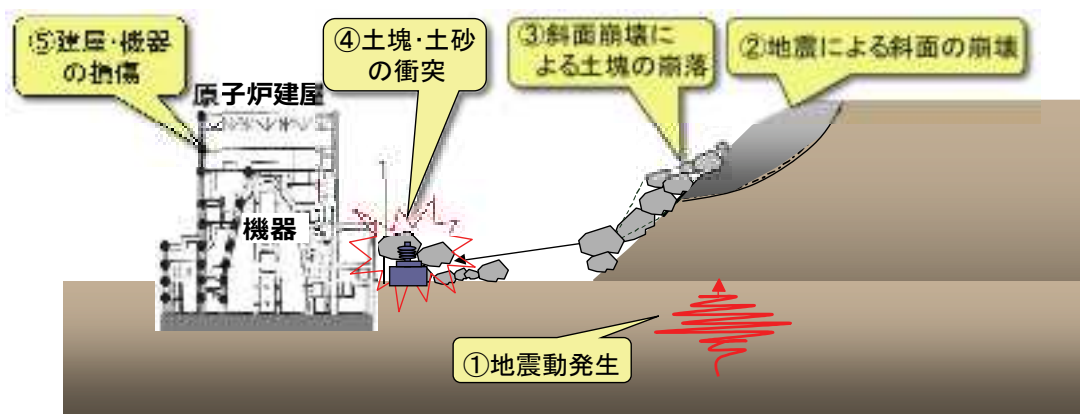


図 1.1 原子炉建屋周辺斜面の想定シナリオ



安定に関わる限界状態、崩壊に関わる限界状態を設定し、安定とリスクの評価体系を示した。その課題を踏まえ、平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費（斜面の安定性に係る設計・リスク評価手法の整備）事業により、破壊モードの判定に関わるスクリーニングに課題のあること、滑落型崩壊による斜面崩壊が施設へ及ぼす影響として質点系解析や DEM を用いた解析による崩壊土塊の到達位置、構造物への衝突速度、さらに堆積土量の評価精度の向上が必要であることなどが、課題として示された。

ここでは、破壊モードの判定に基づいた滑落型崩壊による斜面崩壊が施設へ及ぼす影響として以下の 4 項目の評価、さらに進行型崩壊に対して、以下に示す変位量の評価に基づいて破壊モードの判定に必要な斜面の不安定限界の評価の検討を実施する。合わせて、斜面の不安定化に対する斜面对策工の耐震補強効果を検証する手法として、進行型崩壊の評価手法の適用性を把握するため、(独)原子力安全基盤機構が実施した斜面模型の一連の振動実験のうち対策工の効果を検証するための実験結果の分析も実施する。

#### < 滑落型崩壊 >

- ・ 斜面崩壊に係わる解析手法の整備
- ・ 崩壊土塊の到達位置の特性評価
- ・ 崩壊土塊の衝突速度の評価
- ・ 崩壊土塊の堆積土量の評価

#### < 進行型崩壊 >

- ・ 斜面崩壊の変形量に関する評価

## 2. 滑落型崩壊形態における影響評価

### 2. 1. はじめに

斜面崩壊により発生する土塊が斜面下部まで滑落すると、重要施設・設備に重大な影響を及ぼすことがあり、その影響評価が必要となる。そのためには滑落挙動を推定できる解析手法、評価の方法が重要となる。さらに、こうした崩壊、滑落挙動には大きなばらつきが存在するため確率論的に評価することが求められるが、そのためには簡易に（高速に）計算することが可能な方法を開発する必要がある。上記のようなニーズを踏まえ、滑落型崩壊形態の斜面崩壊に係る解析手法の整備および崩壊土塊の到達位置の特性評価における考え方をまとめる。本報告書では質点モデルによる解析方法に基づいて検討した結果について報告する。また、実機に適用する場合の手順についても述べる。

本報告書では落石現象の不確定性を考慮するために乱数を用いた質点解析を用いる。その目的と概要について簡単に述べる。対象となる岩石の形状や斜面の地形について詳細にモデル化を行い、精緻な力学モデルでその再現を試みても落石の予測には大きな不確定性が伴う。斜面の表面には基本的に細かな凹凸があり物性値も均質ではなく、岩塊の形状は真球ではない。それら斜面や岩塊の形状や物性の情報を全て詳細に調査してモデルに反映させることは現実的ではない。また、同じ斜面、同じ石を用いた同じ条件の落石実験を複数回実施した場合でも、落石の経路や到達距離は大きくばらつくこととなり、一般には全く同じ結果を再現することは困難である。詳細に形状等の情報を考慮しても、強非線形の問題には予測が困難な不確定性が伴うことも報告されている。このように落石のような現象には大きな不確定性が伴うため、その到達位置などは確率分布で評価を行い、注目する構造物への衝突確率などを用いて落石の危険性を評価することが妥当であろう。落石などに対するシミュレーション手法として個別要素法などや質点解析などが用いられている。個々の落石の詳細な力学挙動を分析することを目的とする場合は個別要素法などの詳細な方法が適切と考えられるが、実際の斜面を対象として形状等の不確定性を考慮して落石の到達位置の分布を評価することを目的とする場合は簡易な方法でも十分である可能性がある。そこで、質点系の単純な力学モデルに、跳ね返りの方向に関して乱数を用いた不確定性を与えて、落石の到達位置分布を予測する方法を検討する。提案する方法では質点（落石）のすべりや回転は考慮せずに、斜面との衝突、跳ね返りだけで落石の挙動を表現する簡易的な方法であり、計算時間は個別要素法などに比較すると圧倒的に短い。そのため、モンテカルロシミュレーションのような繰り返しを多く必要とする計算にも適用できる可能性がある。

## 2. 2 斜面崩壊に係わる解析手法の整備

### 2. 2. 1 衝突確率評価の検討条件

斜面の崩壊による岩塊が構造物に衝突する確率について、GMM(Gaussian Mixture Model)により評価した場合の精度について検討する。JR 総研によって実施された実験を対象に数値解析による比較検討を行う。高さ 1.0m から個別落下を行った実験ケース（試番 4、詳細については 2.3 節を参照）を想定して、乱数を用いた質点解析（詳しくは 2.3 節）を行い、その結果から到達位置の分布について GMM を用いてモデル化し、衝突確率を評価する。別途、質点解析から直接衝突確率を算定して比較する。さらに、質点解析から衝突時の速度、及び衝突の時刻や高さなどの評価を直接行った例についても示す。

質点解析パラメタは 2.3 節で述べる検討結果を踏まえて次のように設定した。図 2.1-1 には実験結果に加え、解析結果の一例も合わせて示している。

想定した実験（詳細については 2.3 節を参照）

試番 3（41 度斜面，径 40-80mm，落下高さ 1.0m）

解析条件：反発係数法線 0.43,接線[0.85,1.05]，凹凸度 0.3

検討対象とする構造物として図 2.1-1 に示すような A, A', B の 3 種類を考えた。構造物 A として(240, 0) (240, 120), A'として長さを 1/100 とした(240, 0) (240, 1.2), 構造物 B として(360, -120), (360, 0)の線分を想定した。

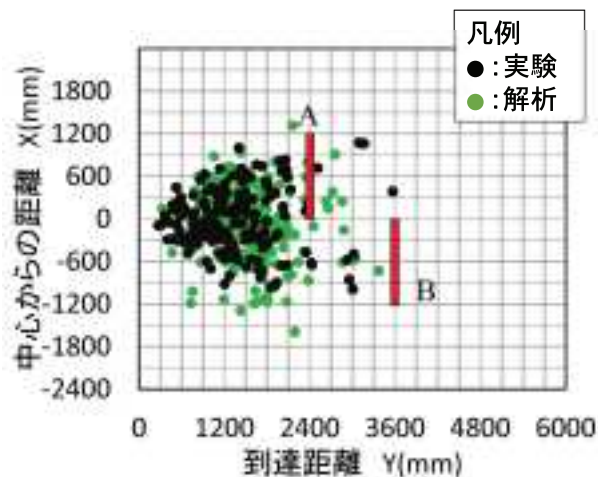


図 2.1-1 岩塊の到達位置と想定する構造物の位置

## 2.2.2 GMM(Gaussian Mixture Model)を用いた衝突確率の評価

複雑な特性を持った確率密度分布を表す手法として、複数のガウス型確率密度分布の和として表現する混合ガウスモデルGMM(Gaussian Mixture Model)が知られており、その推定法としてEM(Expectation and Maximization)アルゴリズムを用いる方法がある。

落石(岩塊)の質点解析を行い、GMMを用いて落石の到達位置の確率分布を推定して衝突確率の算定を行う。粒子数は200と500の2ケースについて計算を実施した。最初にガウス分布の足し合わせの数を情報量基準BIC(MDLとも呼ばれる)から決める。粒子数200に対して重ね合わせ個数を1から6までとした場合についてBIC(MDL)を求めた結果を図2.2-1に示す。この場合は情報量基準が最小となる1個が選択される。図2.2-2に推定された確率密度分布を示す。同様にして粒子数500に対してBIC(MDL)の分布を図2.2-3に示す。この場合は2個が選択された。図2.2-4に推定された確率密度分布を示す。

これら確率密度分布のモデル化の結果に基づき衝突確率の評価を行う。ただし、ここでの衝突確率は斜面崩壊が生じた、あるいは落石が生じた場合の条件付き確率であることに注意されたい。注目する施設への落石一つ当たりの衝突確率については次式で算定する。

$$P_1 = \int_{\Omega} p(x, y) dx dy \quad (1)$$

ここで、 $p(x, y)$ は落石の到達位置座標に関する確率密度分布である。積分領域 $\Omega$ については図2.2-5に示すように落石の崩壊領域の中心から直線で対象構造物への衝突経路を仮定して、その背後の領域とした。背後の領域は全て積分の対象領域となり厳密には無限遠まで積分する必要があるが、ある程度大きな領域を積分しておけば実質上は十分である。図のように左右それぞれ $d_a$ の線分を設けて4角形の積分領域とし、 $d_a$ は十分に大きな長さとする。

落石の中心座標を実際の実験における落石実験で落とした位置(-0.92, 0.0)として2.1節で述べた対象物への衝突確率の計算を行った。その結果を表2.2-1及び図2.2-6に示す。表には粒子数10万に対して質点解析を行い、直接衝突確率を算定した結果も示している。例えば、構造物Aについては10万粒子(落石)中、3166個が衝突しており衝突確率は $3.2 \times 10^{-2}$ となる。このようにして求めた確率を真としてGMMで算定した結果の精度評価を行う。粒子数200に基づく結果は構造物Aに対しては非常に良い一致、A'についてもオーダーは一致している。構造物Bではおよそ一桁過小評価する結果となっている。それに対して粒子数500に基づく結果は構造物A、A'ともに非常に良い一致、構造物Bについてもオーダーは一致している。

非常に良い結果となっているが対象とした分布が単純であることが原因である可能性がある。そこで、凹凸度0.2として再度質点解析を行った。それに対して粒子数100, 200, 500の場合についてGMMによるモデル化を行った。それぞれの場合について図2.2-7に情報量基準の分布を示す。2個あるは3個が最小値となっている。そこで以下3個の重ね合

わせによるGMMにより衝突確率を計算する。図2.2-8に算定された確率密度分布を示す。これらの情報をもとに衝突確率を求めた結果を表2.2-2、図2.2-9に示す。また、凹凸度0.3の結果も含めて、質点解析10万粒子による結果を真としてそれに対する比の形でまとめて図2.2-10に示す。特徴は以下のようにまとめられる。

- 凹凸度0.3では構造物Bは多少精度が落ちるが全体的に高い精度
- 凹凸度0.2ではやや低い精度
  - 構造物Aであっても粒子数が少ないと悪い精度
  - 粒子数を増やせば改善される傾向

総じて良い結果が得られたが、実際にPRAへ適用するにはまだ解決すべき問題も多い。

- 1) 落石の中心座標の決め方
- 2) 衝撃力（衝突時の速度）の評価

やや分布が複雑になった凹凸度0.2の精度は0.3のケースに比較して悪くなっている。今回のモデルは非常に単純でGMMの数も1から3個と少ないが、複雑な地形の場合は落石の進行方向も複雑になり、その場合の適用性には注意を要する。また、実際の地形では落石の中心座標を決めるのも容易ではない。崩壊領域がある程度の大きさとなる場合は1点でモデル化することが困難になることが予想される。複数点を設定する必要があるかもしれない。また、単に衝突確率だけでなく、衝突の衝撃に関する評価も必要となる。例えば衝突時の速度を推定しようとするならかのモデル化が必要となる。一つの方法としては残存距離と衝突速度の関係をモデル化することも考えられるが、斜面の勾配なども関係するかもしれない。残存距離とはもしも構造物に衝突しなければさらにどの程度移動していたかの距離を表しており、衝突した時点でのエネルギーの大きさに関係した量となっている。

そこで、次の節では質点解析から直接的に衝突時の情報を抽出してそのハザードを評価する例を示す。

表 2.2-1 凹凸度 0.3 の場合の衝突確率のまとめ

	質点解析（10万粒子）		GMM	
	衝突個数	衝突確率	200	500
構造物 A	3166	$3.2 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-2}$
構造物 A'	80	$8.0 \times 10^{-4}$	$4.7 \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-4}$
構造物 B	97	$9.7 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$4.9 \times 10^{-4}$

表 2.2-2 凹凸度 0.2 の場合の衝突確率のまとめ

	質点解析 (10 万粒子)	GMM		
		100	200	500
構造物 A	$2.5 \times 10^{-2}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$
構造物 A'	$6.7 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-4}$
構造物 B	$5.9 \times 10^{-4}$	$9.5 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-4}$

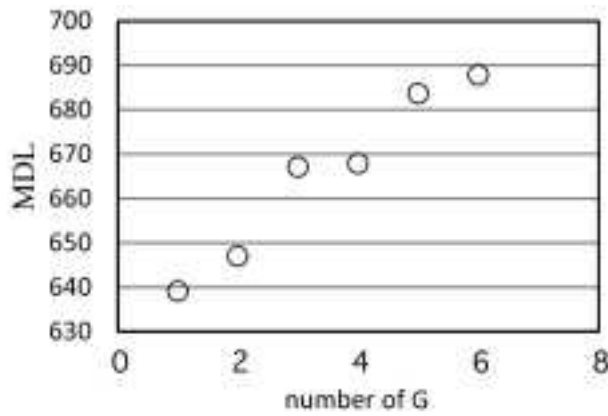


図 2.2-1 200 粒子に対する GMM の重ね合わせの個数と情報量基準 (MDL, BIC)

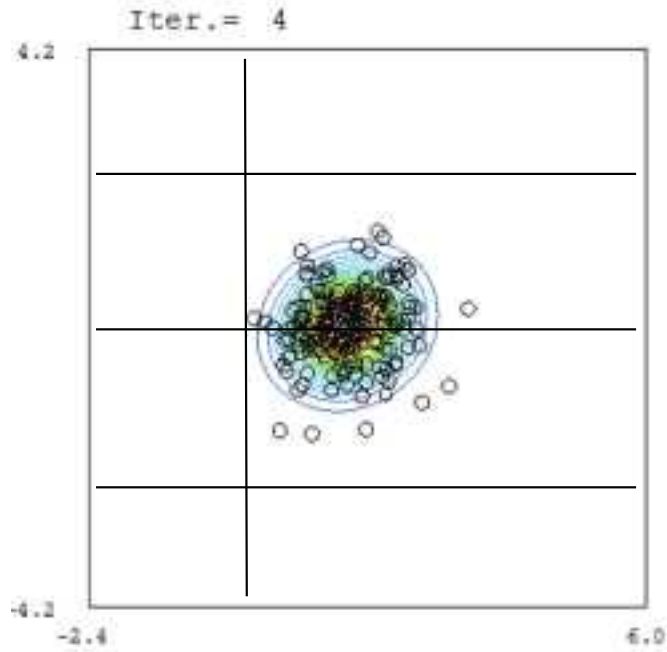


図 2.2-2 200 粒子の質点解析に基づく落石の確率密度分布

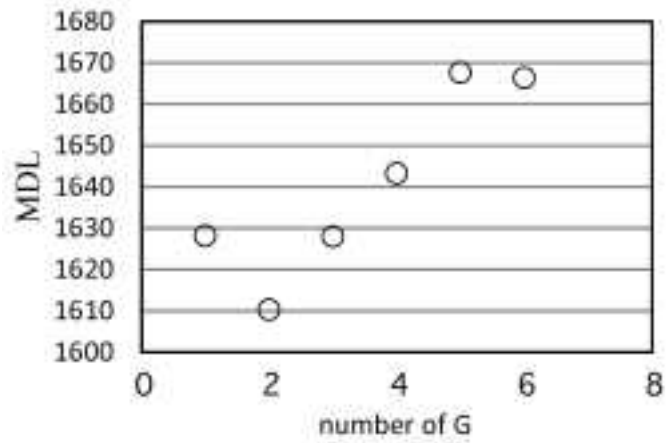


図 2.2-3 500 粒子に対する GMM の重ね合わせの個数と情報量基準 (MDL, BIC)

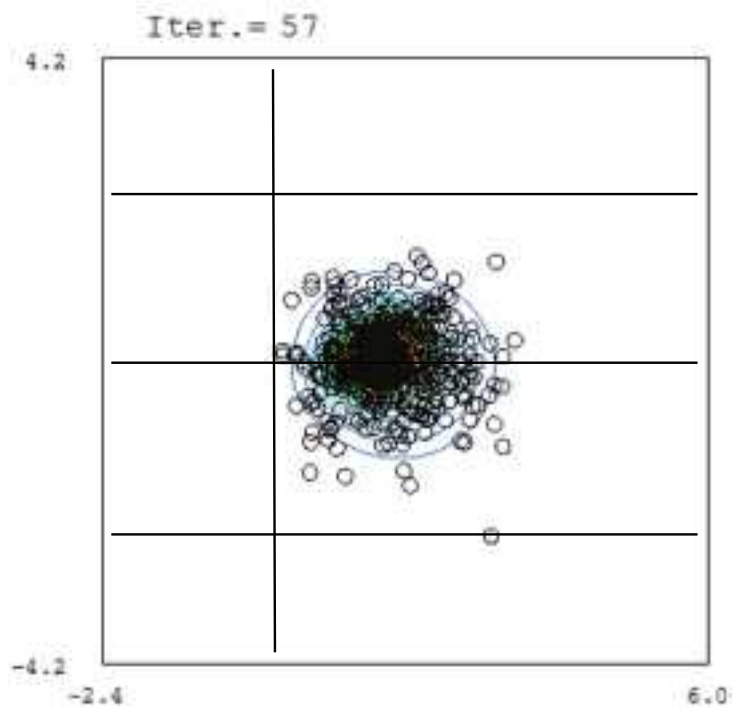


図 2.2-4 500 粒子の質点解析に基づく落石の確率密度分布



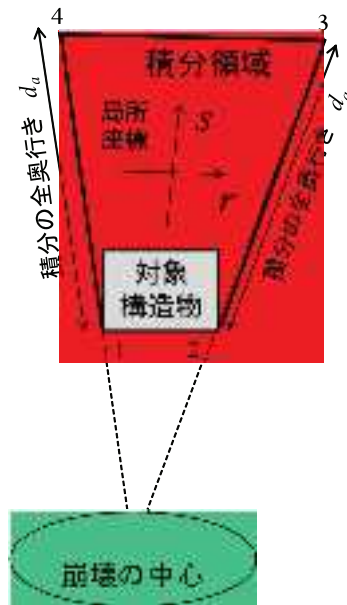


図 2.2-5 衝突確率算定のための到達位置座標に関する積分領域

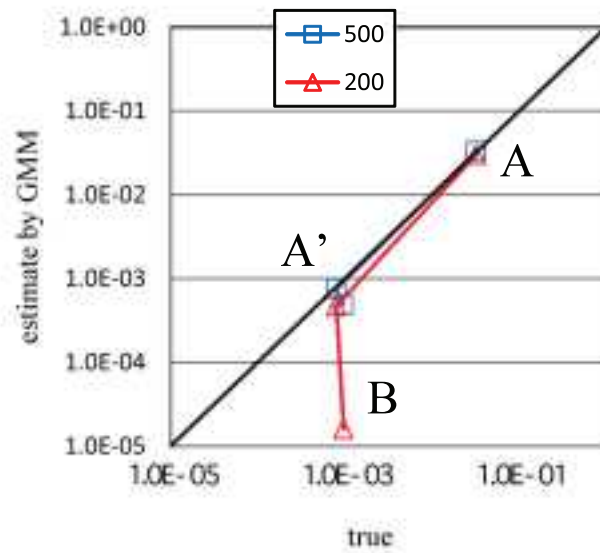
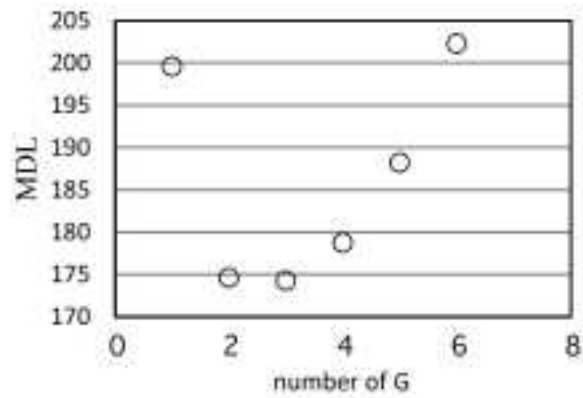
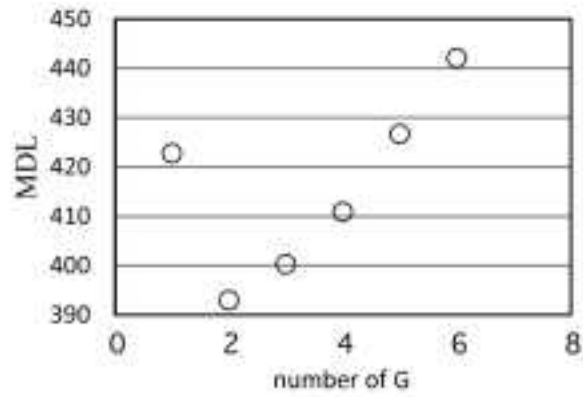


図 2.2-6 200, 500 粒子の質点解析に基づく衝突確率の推定値と 10 粒子の質点解析により直接評価した衝突確率

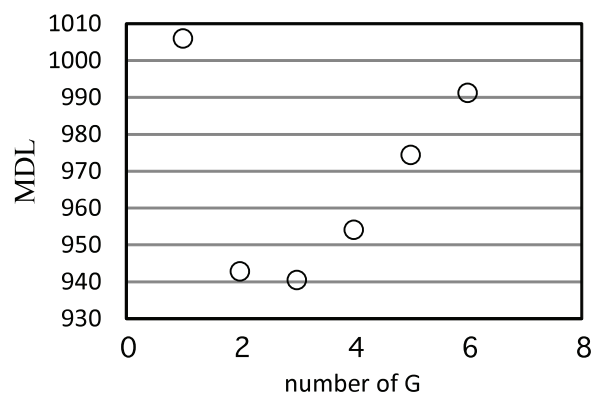




(1) 100 粒子

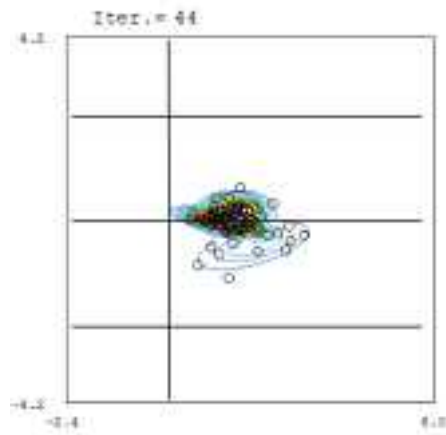


(2) 200 粒子

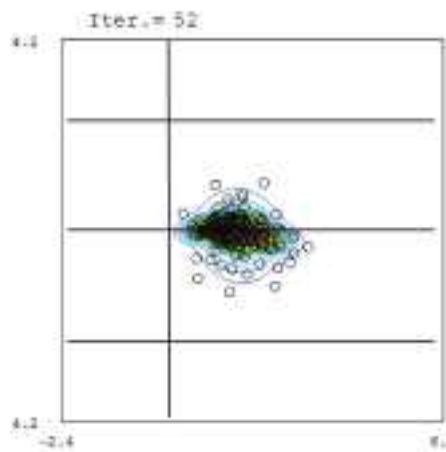


(3) 500 粒子

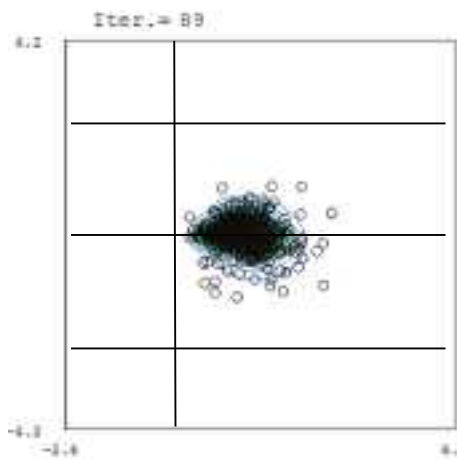
図 2.2-7 情報量基準の分布，凹凸度を 0.2 とした場合



(1) 100 粒子



(2) 200 粒子



(3) 500 粒子

図 2.2-8 GMM による確率密度分布，凹凸度を 0.2 とした場合

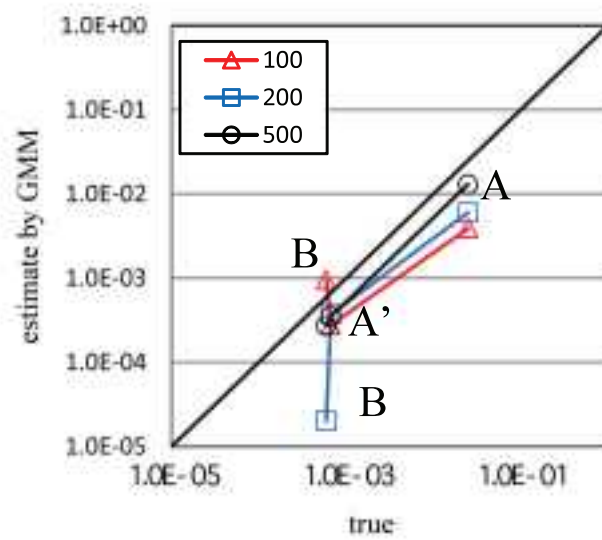
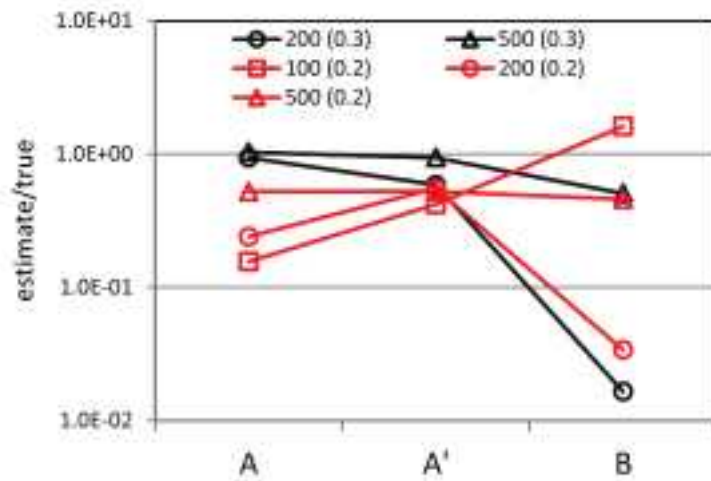
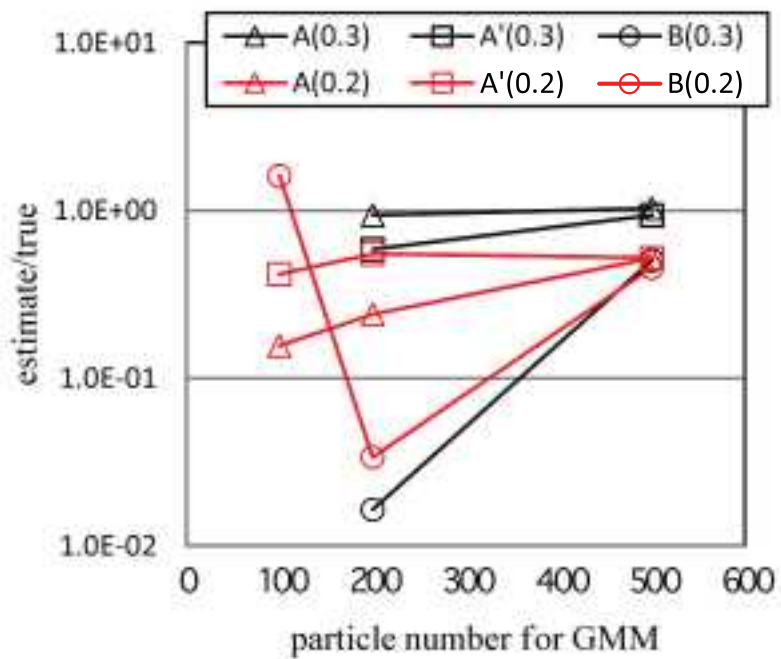


図 2.2-9 100, 200, 500 粒子の質点解析に基づく衝突確率の推定値と 10 粒子の質点解析により直接評価した衝突確率, 凹凸度を 0.2 とした場合



(1) 構造物と精度, 凡例 粒子数 (凹凸度)



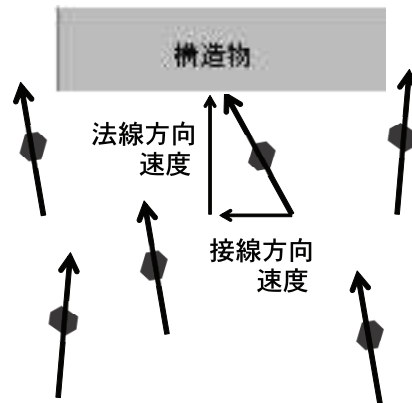
(2) GMM に用いる粒子数と精度, 判例 構造物 (凹凸度)

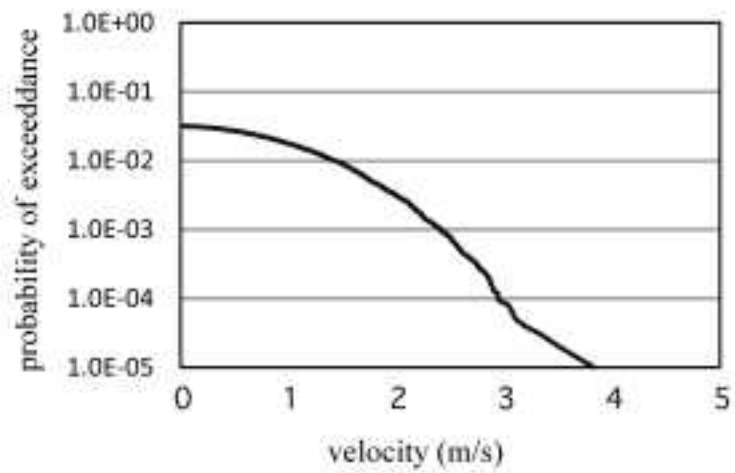
図 2.2-10 GMM による評価結果の精度

### 2.2.3 質点解析を用いた直接的な衝突ハザード評価

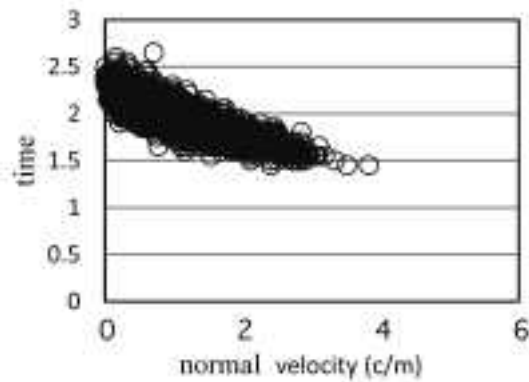
前節に示したように GMM を用いた衝突確率は粒子数を増やせば精度が改善される傾向が得られたが、同時に課題も示された。実問題のように複雑な 3 次元形状を扱う場合、あるいは、単純な落石ではなく斜面崩壊に伴う岩塊衝突を評価するには落石中心の考え方について再考する必要がある。また、衝突速度と超過確率の関係を評価するには残存距離と衝突速度の関係のモデル化が必要になり、検討すべき多くの問題がある。そこで、質点解析あるいは DEM 解析から直接衝突のハザードを評価する方法について示す。下図のように構造物に衝突する際の法線方向速度について注目し、法線方向衝突速度とその超過確率の関係を衝突速度ハザードと定義して、算定した例を示す。

構造物 A について 10 万粒子による質点解析から直接的に算定した衝突の特性を図 2.2-11 に示す。図の(1)には上記の衝突速度ハザードを、(2)には法線方向衝突速度と衝突時刻を、(3)には法線方向、接線方向の衝突速度の関係を示す。同様にして構造物 A' や B について図 2.2-12, 2.1-13 に示す。このように直接的に衝突速度との関係等を示すことができる。10 万粒子に対する計算時間は通常のパソコンで 4-5 分程度である（ただし、その後処理計算等でも結構時間を要する。また、10 万粒子の計算結果は 0.7GB 以上になる）。

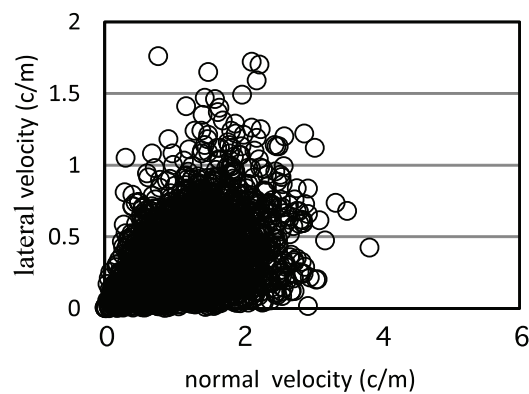




(1) 衝突速度ハザード，法線方向の衝突速度の超過確率

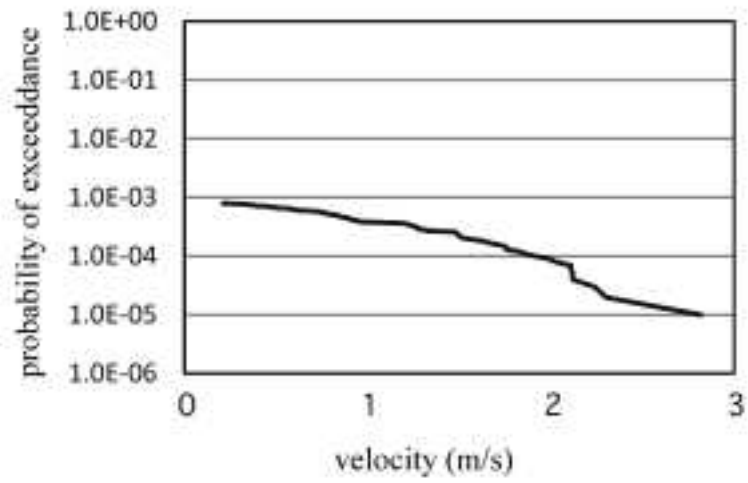


(2) 法線方向衝突速度と衝突時刻

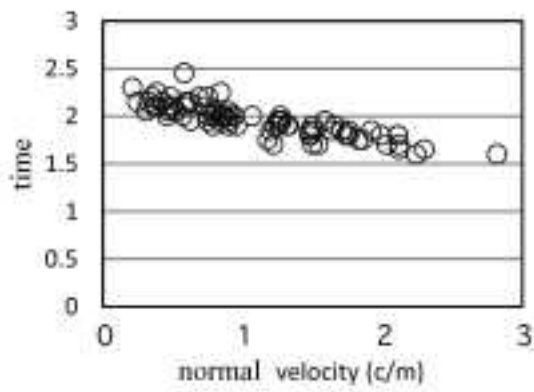


(3) 法線方向，接線方向の衝突速度

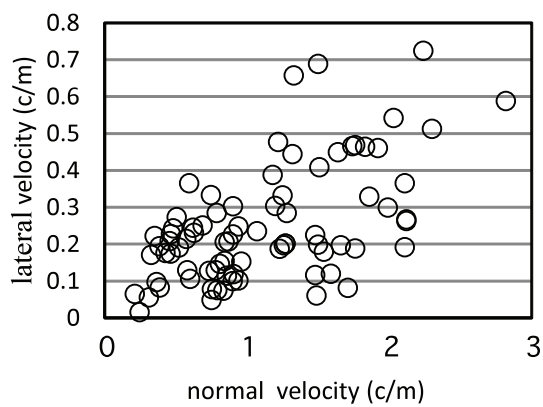
図 2.2-11 10 万粒子の質点解析に基づく構造物 A への衝突の特性



(1) 衝突速度ハザード，法線方向の衝突速度の超過確率

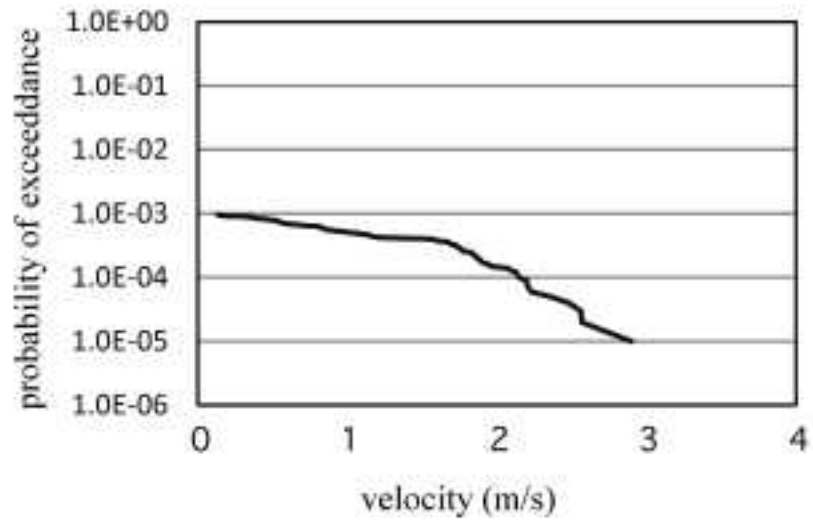


(2) 法線方向衝突速度と衝突時刻

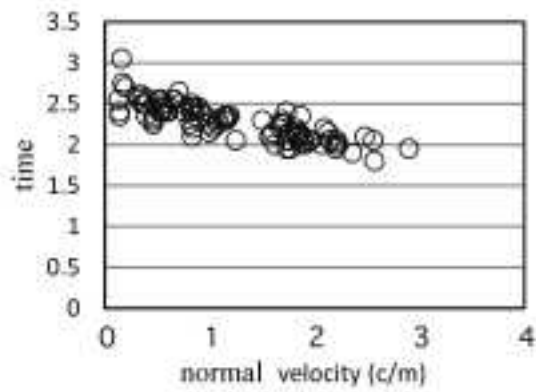


(3) 法線方向，接線方向の衝突速度

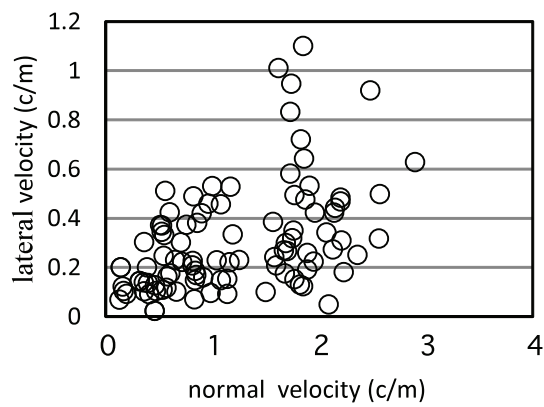
図 2.2-12 10 万粒子の質点解析に基づく構造物 A'(A の 1/100 の長さ)への衝突の特性



(1) 衝突速度ハザード，法線方向の衝突速度の超過確率



(2) 法線方向衝突速度と衝突時刻



(3) 法線方向，接線方向の衝突速度

図 2.2-13 10 万粒子の質点解析に基づく構造物 B への衝突の特性



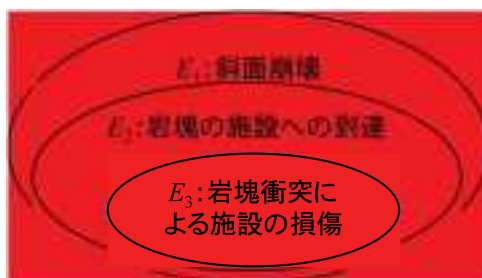
## 2.2.4 実機へ適用する際の手順案

### 2.2.4.1 手順案の全体構成

斜面崩壊により発生する土塊が斜面下部まで滑落すると、重要施設・設備に重大な影響を及ぼす可能性があり、そのリスク評価が重要である。リスク評価を行うためには、1)滑落挙動を推定できる解析・評価の方法、2)損傷確率を評価するための方法、が必要となる。滑落挙動について個別要素法や粒子法（MPM、MPS法、SPH法、など）を用いて、地震時の動的な応答から崩壊、滑落挙動までを一貫して評価することも考えられるが、非常に多くの労力が必要なこと、ならびに未解決の課題も多いことから、全く新しい体系を構築するのではなく現状の評価体系を拡張した方法について検討する。ここでは、以下の3段階の限界状態を対象として評価する考え方を示す。

- 1) 斜面崩壊の可能性
- 2) 岩塊の施設への到達
- 3) 岩塊の衝突による施設の損傷

1)の斜面の崩壊の可能性は従来の力の釣り合いに基づく限界状態あるいは変形量に基づく限界状態で評価する。2)については斜面の崩壊が開始したとの仮定のもとで岩塊の到達位置について簡易的な個別要素法あるいは乱数を用いた質点解析を用いて評価する。さらに、3)として衝突による衝撃力との関係から施設の損傷について評価する。斜面周辺の検討対象とする施設については、大きな衝撃力によって損傷を受け機能が失われる施設と崩壊した土塊が堆積することにより機能が失われる施設を想定し、上記の3段階の限界状態超過確率の手順について述べる。衝撃力により損傷を受ける可能性のある施設としてRC構造物を想定する。



#### (1) 斜面崩壊の可能性 岩塊の施設への到達 岩塊の衝突による施設の損傷

斜面崩壊の可能性については従来の力の釣り合いに基づく評価と変形量に基づく評価が考えられる。前者については2次元の等価線形有限要素法解析に基づく方法を用いる。地震時の滑動力（作用）と抵抗力の比較から限界状態を定義する方法であり、安全審査等で既に多くの実績がある。比較的計算時間も短いことからモンテカルロシミュレーションに基づく損傷度曲線の評価を行うことが可能であろう。損傷度曲線が求められ

れば地震危険度曲線とのコンボルージョンから斜面崩壊の開始の確率を求めることができる。後者の変形量に基づく方法については、2次元逐次非線形有限要素解析を用いるが、まだ研究途上の課題も多いため、限界変形量の設定等については仮定をした上で評価する必要がある。

## (2) 岩塊の施設への到達

斜面の崩壊が発生した場合にどこまで岩塊が到達するか、どの程度堆積するかについて、個別要素法や質点解析を用いて評価する。斜面の崩壊領域については安全側の仮定として大きめの領域を想定し、その全領域が岩塊となって崩壊すると仮定する。岩塊の転動解析に関するパラメタを全て確定的に決めることは困難であるためパラメタスタディーを行い、その感度解析結果から安全側の評価となるようにパラメタ設定を行う。

上記の2種類の施設（衝撃力が問題となるRC構造物、堆積量が問題になるアクセス道路）を対象に施設に岩塊が到達する確率あるいは施設上（道路上）に堆積する量に関する確率評価の考え方を述べる。まず、崩壊が発生するとの条件のもとで衝突するあるいは堆積する条件付き確率を算定し、(1)で算定した斜面崩壊の開始の確率と合わせることで全確率を算定する。モンテカルロ法で衝突あるいは堆積の条件付き確率の評価を行うためには非常に多くの繰り返し計算が必要になるため、質点解析や簡易DEMの導入など計算時間を短縮し現実的な計算負荷で実行可能な方法の導入を行う。

衝突については質点解析、堆積に関しては簡易DEMが適していると予想される。堆積についての限界状態に関する条件付き確率はほぼ0か1になると思われ、確率の計算というよりパラメタスタディー的な検討となることが予想される。

## (3) 岩塊の衝突による施設の損傷

崩壊した岩塊が対象構造物に衝突する際の衝撃力は、個別要素法や質点解析から直接評価することは困難である。個別要素法では設定するばね値や岩塊形状などに大きく影響を受けるため、質点解析では衝撃力を直接算定することはできないためである。そこで、これまでの落石に関する実験結果の整理を行い、衝突時の速度と衝撃力の関係等のモデル化を行い、数値解析から算定した岩塊の到達位置や衝突時の速度から衝撃力を間接的に推定することが現実的であろう。衝撃力に対するRC構造物の耐力については既往の研究成果からフラジリティー曲線を算定することができる。(1)(2)の検討結果を合わせて地震により斜面崩壊が発生し、崩壊した岩塊が施設に衝突し、施設に損傷を与える確率を算定することができる。

### 2.2.5 まとめ

本報告書では滑落型崩壊形態における影響評価として、斜面崩壊に係わる解析手法の整備について検討した結果についてまとめた。

ここでは、GMMによる衝突確率評価と、質点解析による直接的な衝突確率評価について示した。10万粒子の質点解析を真として、数百個の到達位置分布に基づくGMMによる衝突確率算定の精度について検討したところ、ある程度の精度は確認することができたが、実際に確率的危険度評価へ適用するにはまだ解決すべき問題も多い。今回の検討モデルは非常に単純でGMMの数も1から3個と少ないが、複雑な地形の場合は落石の進行方向も複雑になり、その場合の適用性には注意を要する。また、実際の地形では落石の中心座標を決めるのも容易ではない。崩壊領域がある程度の大きさとなる場合は1点でモデル化することが困難になることが予想され、複数点を設定する必要があるかもしれない。また、確率的危険度評価を実施するには単に衝突確率だけでなく、衝突の衝撃に関する評価も必要となる。そこで、質点解析から直接的に衝突速度に関する超過確率を算定する方法を示した。このように数十万、百万の解析結果から直接的に評価する方が好ましい。

## 2.3. 崩壊土塊の到達位置の特性評価

2.3.1 から 2.3.2 に示す実験の再現解析を通して提案する質点解析 (2.3.3.1 で概要を説明) の有効性を 2.3.3 から 2.3.5 で検証する。また、平成 26 年度実験を対象に簡易 DEM モデルを用いたシミュレーション検討を 2.3.6 で実施する。

### 2.3.1 再現解析の対象とする実験 1 (栃木)

栃木ら (電力中央研究所) で行われた実験結果についてその概要に示す。出典は以下のとおりである。

#### 参考文献

- 1) 栃木均：地震時崩落岩塊の到達距離に関する影響要因の検討-斜面崩壊を想定した振動台実験と二次元個別要素法解析による影響予測手法の開発，電力中央研究所報告, N08084, 2009.
- 2) 栃木均：地震時崩落岩塊の到達距離に及ぼす岩塊の大きさと形状の影響，電力中央研究所報告, N09021, 2010.

斜面崩壊後の岩塊の飛散分布特性を把握するため岩塊の崩落実験が実施された。20-30mmと40-80mmの2種類のサイズの塊状岩塊について、単一岩塊の落下と岩塊群の崩落を行った結果の概要を示す。実験に用いた20-30mmおよび40-80mmの岩塊はZinggの方法による形状分類を実施し、岩塊の長辺長 $a$ 、中間長 $b$ および短辺長 $c$  ( $a>b>c$ の関係)の寸法比として定められる扁平率 $c/b$ と細長率 $b/a$ の大小により塊状を選定した。図 2.3.1-1に示す実験装置を用いて、単一岩塊の落下実験と岩塊群 (崩落量10kg, 50kg) の崩落実験が実施された。

単一岩塊の落下実験では、20-30mmと40-80mmの岩塊の中からそれぞれ代表300個を抽出し、ひとつずつ落下させたときの到達位置を記録している。岩塊は、ひとつ落下させた後にその岩塊を平板上から取り除いてから次の岩塊を落下させている。落下方法は、図 2.3.1-1(1)の斜面中央の法肩手前に岩塊の長辺が斜面傾斜方向に向くようセットし、指で少しずつ押し出して落下させる。岩塊は、数 cm 滑動したところで回転し始め、法尻まで滑動するケースはほとんどなかった。岩塊群の崩落実験では、図 2.3.1-1(2)(3)のように所定の量を箱に入れ、図中に示す蓋を瞬時に開放することにより崩落させて岩塊群の到達位置を記録している。

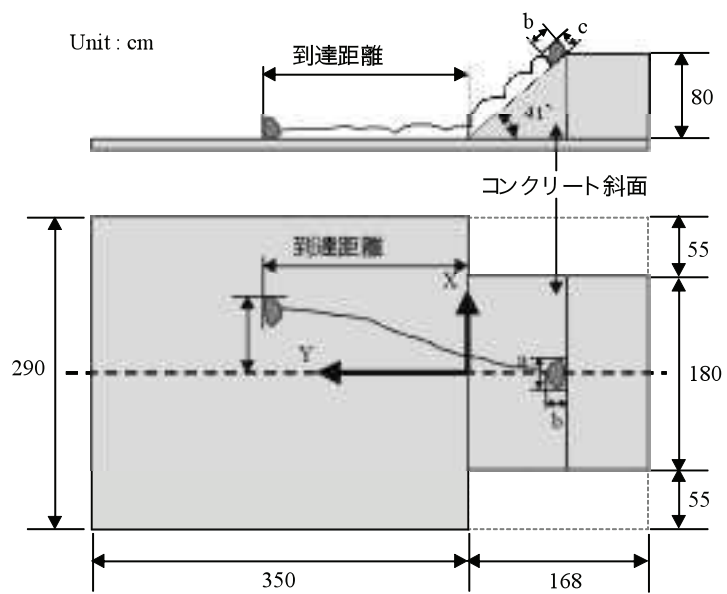
本報告書では表 3.1-1 に示すケース 1a と 2a の 2 ケースを対象とする。ケース 1a と 1b は 40-80mm の塊状岩塊の個別と同時落下(50kg)、ケース 2a と 2b は 20-30mm の塊状岩塊の個別と同時落下(10kg)の実験である。使用する岩塊量 (重量) の記録はあるものの、崩落させた岩塊の個数のデータは残っていない。そこで、実験終了後の写真から岩塊個数を数えた結果を表 2.3.1-1 に示している。

これら 4 ケースについての岩塊の到達位置の分布を図 3.1-2 に示す。また、X,Y 方向

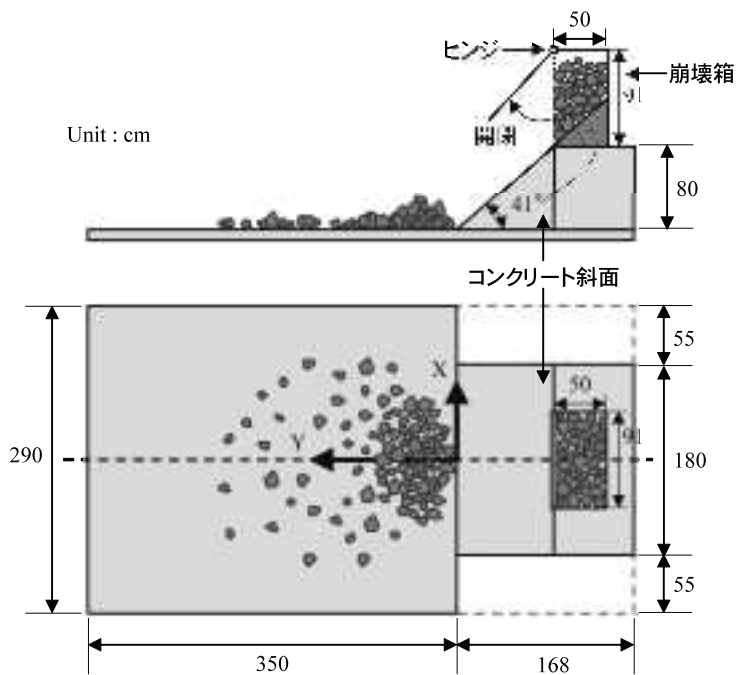
への累積分布を図 2.3.1-3 に示す。ケース 1a と 2a あるいは 1b と 2b では到達位置の分布に大きな差は見られない。つまり、個別落下、同時落下ともに岩塊の大きさの影響は小さい。一方、個別落下と同時落下の違いの影響について注目すると、40-80mm、20-30mm とともに個別に落下させた方が遠くまで到達している。同時に落下させた場合は斜面の直下に集中して分布しており、一部重なっている。これらの傾向は岩塊同士の相互作用によって解釈できると考えている。同時に落下させる場合は、落下中の岩塊同士の衝突や既に停止している岩塊への衝突によりエネルギーが消散される。そのため、単独に落下させる場合に比べて遠くまで移動せずに斜面直下に多く堆積していると解釈できる。実験や到達位置分布の詳細については栃木の論文<sup>1),2)</sup>を参照されたい。

表 2.3.1-1 実験結果のケース

ケース	1a	1b	2a	2b
大きさ	40-80mm		20-30mm	
落とし方	個別	同時 50kg	個別	同時 10kg
個数	300	177	300	442

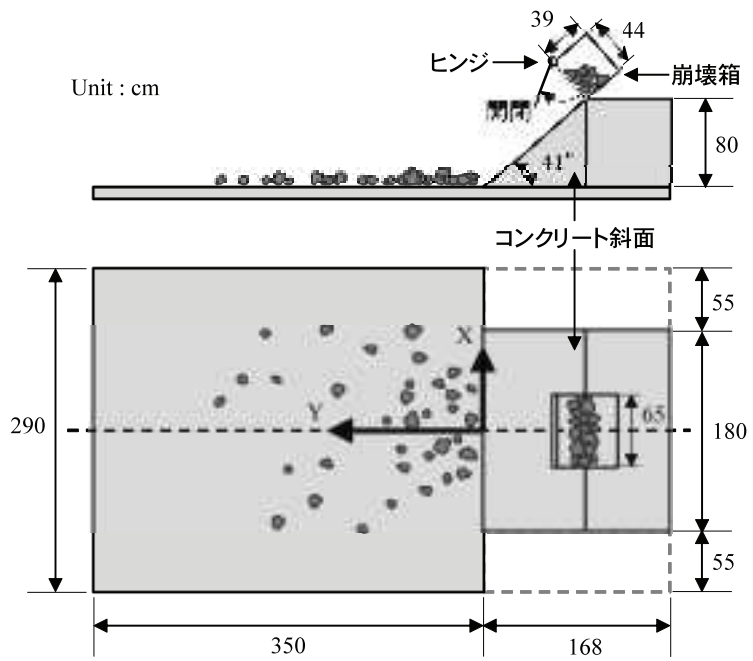


(1)個別に落とす場合



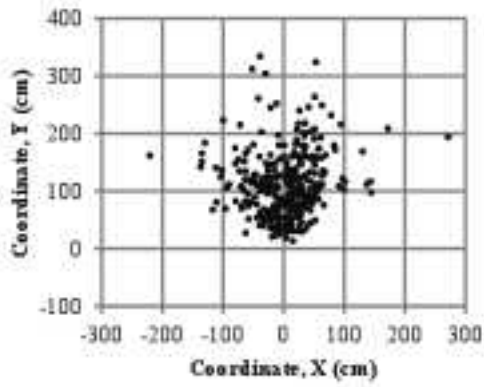
(2)ケース 1b 岩塊(40-80mm)50kg をまとめて落とす場合

図 2.3.1-1(1/2) 桁木らにより実施された落石実験の概要と各種寸法

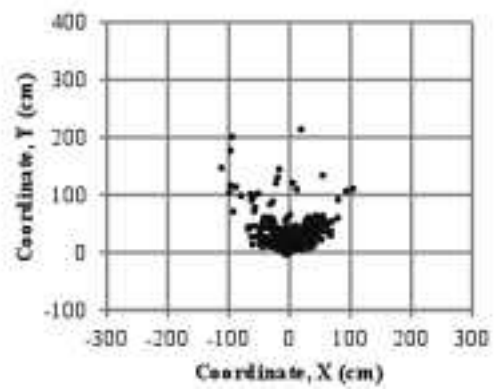


(3) ケース 2b 岩塊(20-30mm)10kg をまとめて落とす場合

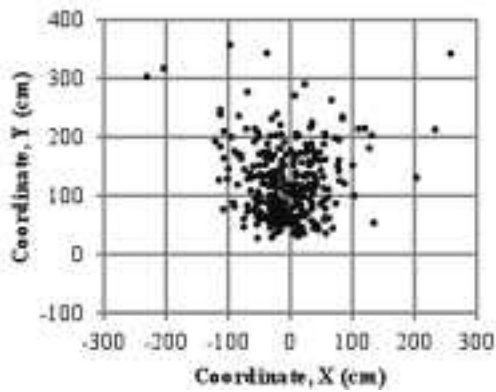
図 2.3.1-1(2/2) 栃木らにより実施された落石実験の概要と各種寸法



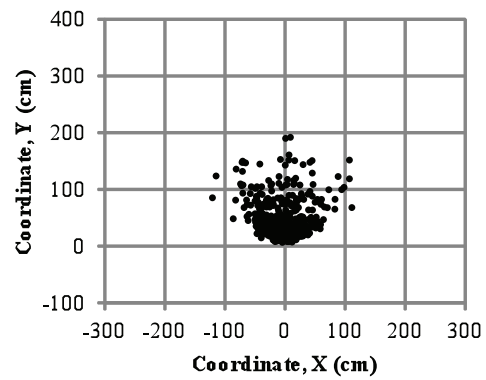
(1) ケース 1a (40-80mm, 個別落下)



(2) ケース 1b (40-80mm, 同時落下)



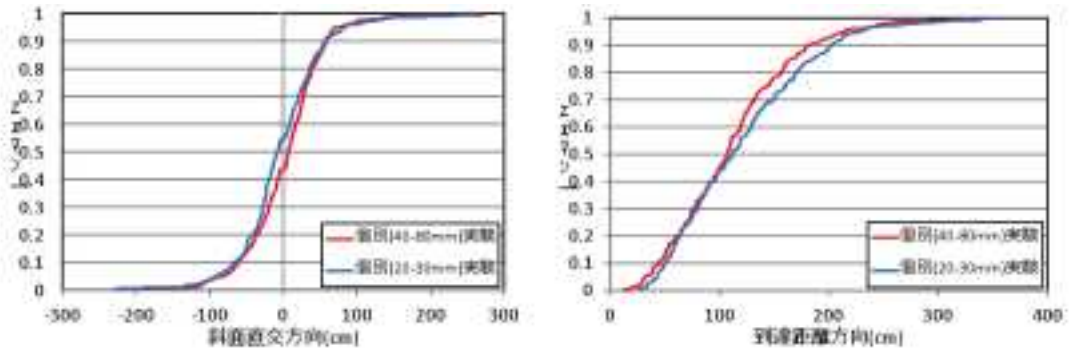
(3) ケース 2a (20-30mm, 個別落下)



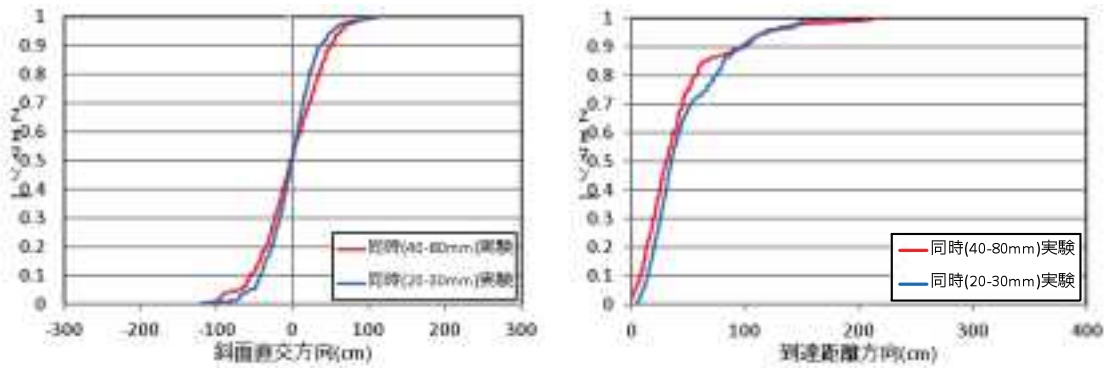
(4) ケース 2b (20-30mm, 同時落下)

図 2.3.1-2 落石実験結果の岩塊の到達位置の分布





(1) 個別落下(1a と 2a)



(2) 同時落下(1b と 2b)

図 2.3.1-3 落石実験結果の岩塊の到達位置の累積分布による粒径別比較

### 2.3.2 再現解析の対象とする実験2 (JR 総研)

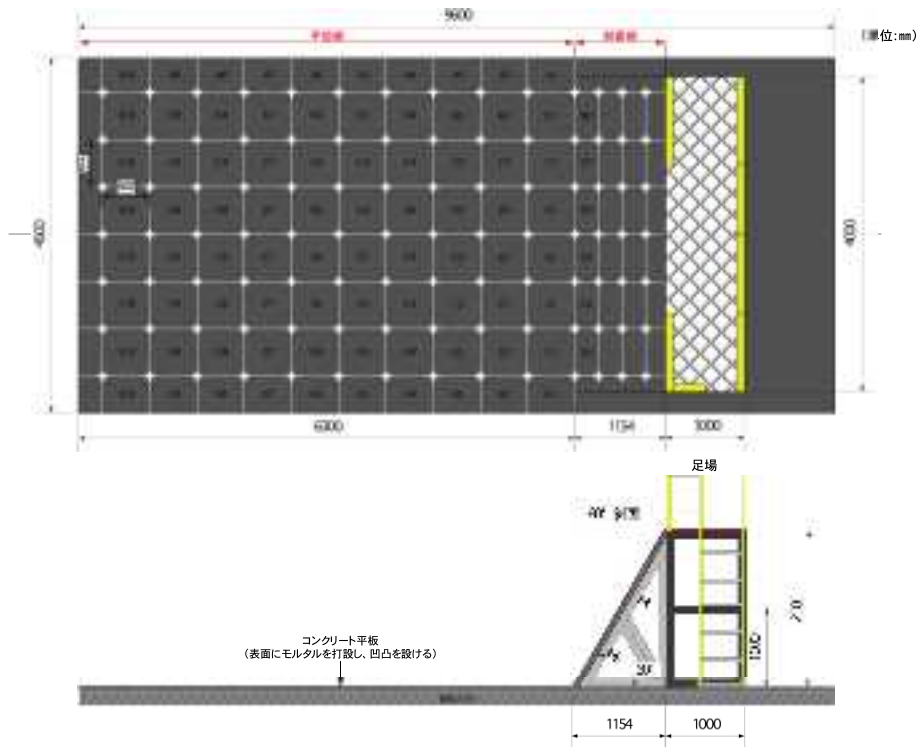
砕石単体の転動試験は、岩塊単体の転動挙動を把握することを目的として、事前に形状計測を行った砕石粒子（粒子 A：径 20-30mm，粒子 B：径 40-80mm）を使用して実施された。砕石単体の転動試験条件は、表 2.3.2-1 に示すように、斜面勾配、砕石粒子サイズおよび落下高さをパラメータとした合計 981 回の落石実験が実施された。本試験では、斜面上部の短辺方向の中心位置を基準に、砕石粒子を所定の高さから自由落下させて、斜面上での砕石粒子の転動挙動を模擬した。砕石を落下させる際は、砕石の角を下に向け落下させた（角落とし）と砕石の平面を落下させた（平落とし）の 2 通りの方法で行った。

製作した斜面模型の概要ならびに製作状況は、図 2.3.2-1 に示すとおりである。斜面模型は、鋼製で組立てた架台に 300 mm×600 mm×厚さ 60 mm のコンクリート板を斜面部ならびに平坦部に合計 296 枚設置した。コンクリート板表面には、斜面または平坦部の摩擦力を高めるために、黒色に着色したモルタルを打設し、ほうきを使用してモルタル表面に凹凸を設けた。斜面模型作製後には、斜面部と平坦部に 600 mm×600 mm の間隔で格子枠を描画した。

実験結果の概要を図 2.3.2-2 から 6 に示す。また、平落としと角落としの比較を図 3.2-7 から図 2.3.2-10 に示す。このように落とし方の違いの影響は明確には現れていない。そのため、以下の検討では両者の区別なく扱う。

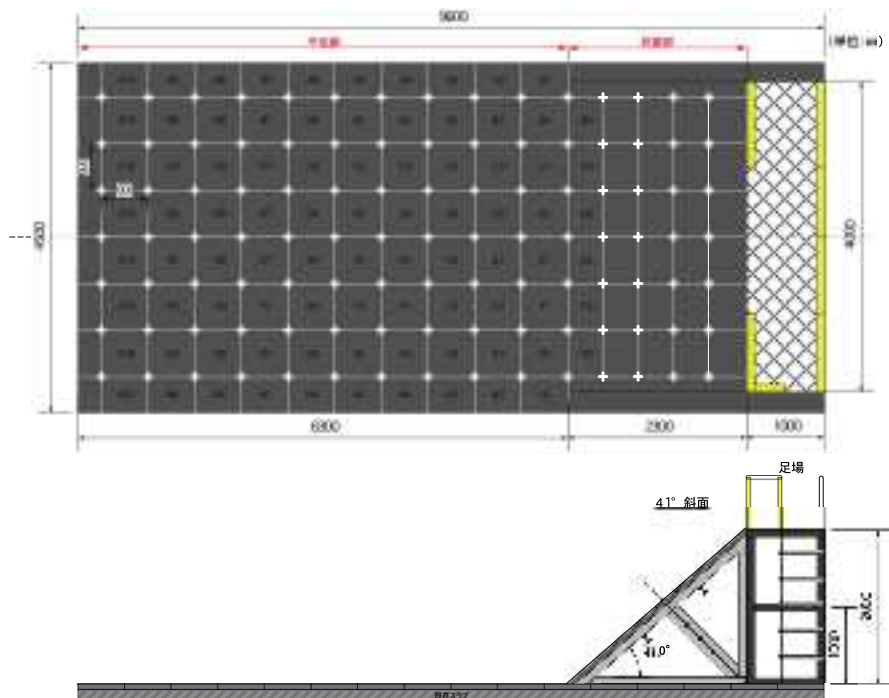
表 2.3.2-1 砕石単体の転動試験条件一覧

試番	斜面勾配	粒子サイズ	落下高さ (m)	落下個数
1	41°	粒子 A 20 mm～30 mm	2.0	226
2		粒子 B 40 mm～80 mm 最小・最大粒径	0.5	188
3			1.0	188
4			2.0	191
5	60°		2.0	188



(1) 斜面勾配 60°

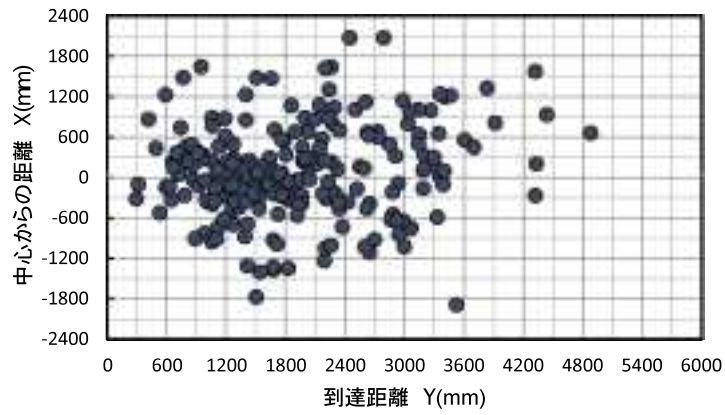
(図中の番号は、「碎石の転動試験」の計測時に使用した.)



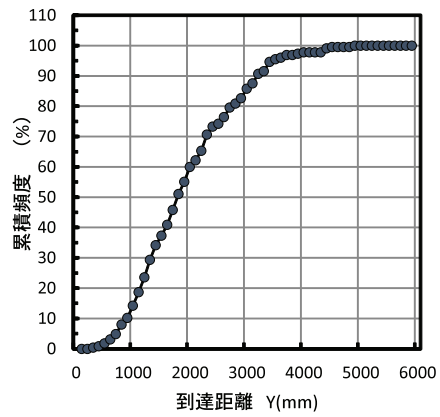
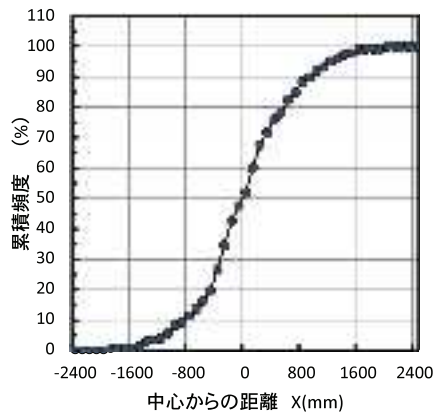
(2) 斜面勾配 41°

(図中の番号は、「碎石の転動試験」の計測時に使用した.)

図 2.3.2-1 斜面模型概要



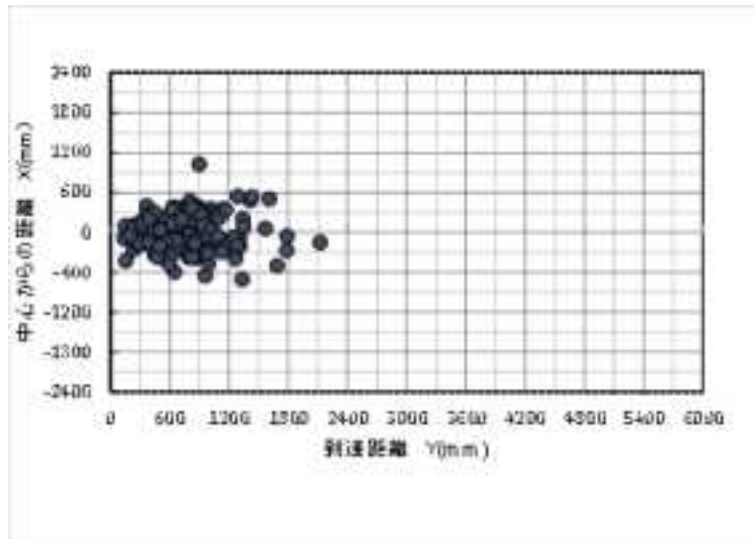
(1) 到達位置の分布



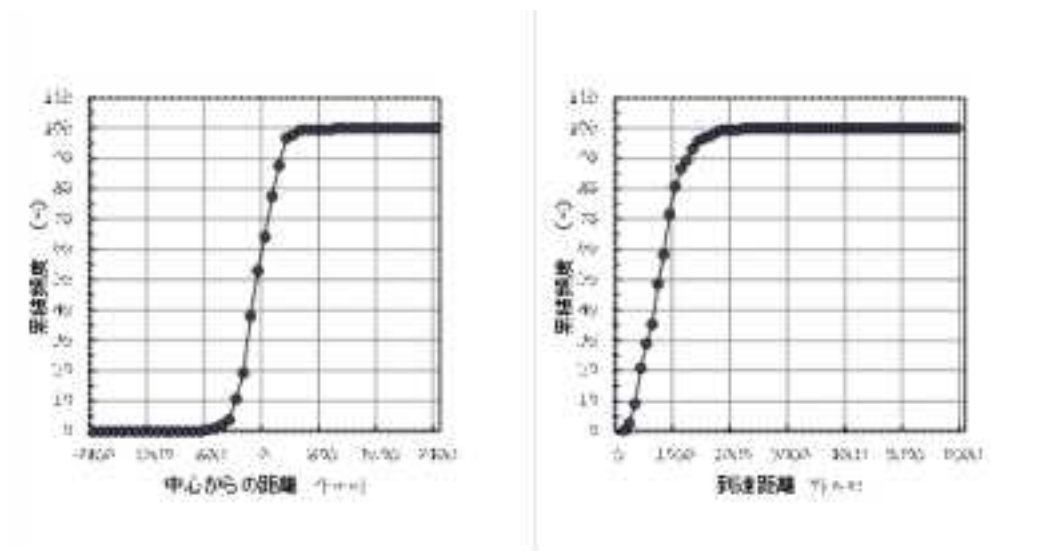
(2) X 方向(斜面直交)の累積分布

(3) Y 方向(到達方向)の累積分布

図 2.3.2-2 試番 1(落下高さ 2.0m, 径 20-30mm, 勾配 41 度)による全実験結果



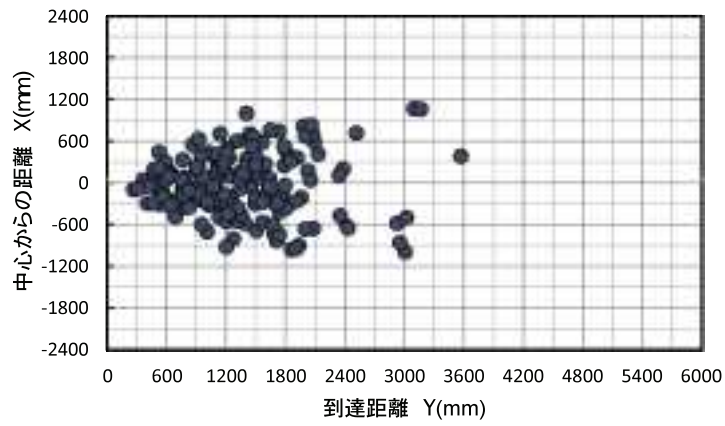
(1) 到達位置の分布



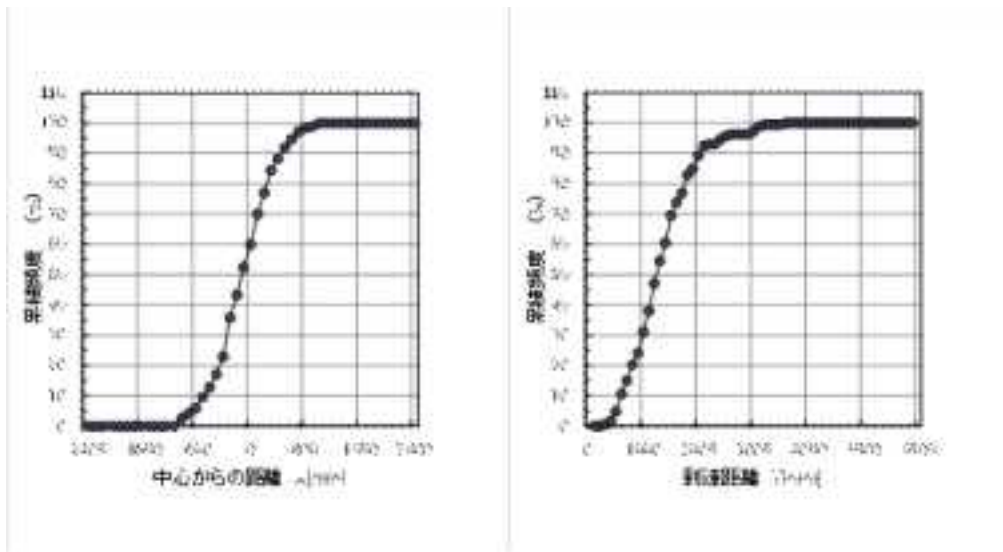
(2) X 方向(斜面直交)の累積分布

(3) Y 方向(到達方向)の累積分布

図 2.3.2-3 試番 2(落下高さ 0.5m, 径 40-80mm, 勾配 41 度)の条件による全実験結果



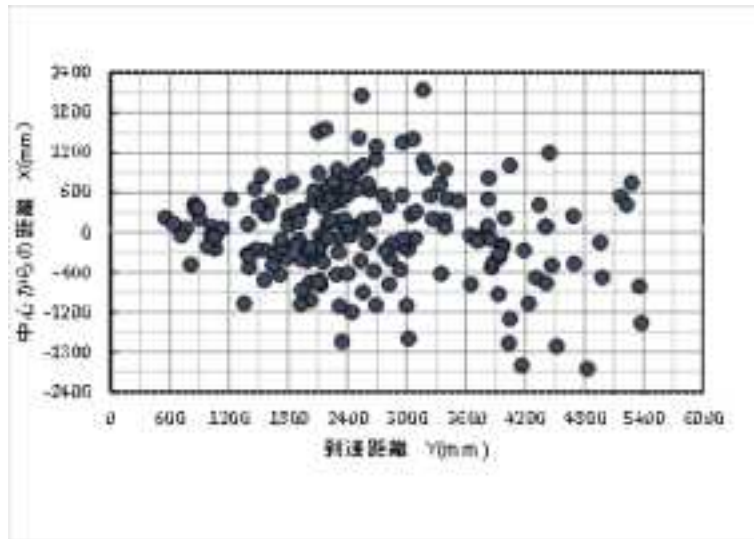
(1) 到達位置の分布



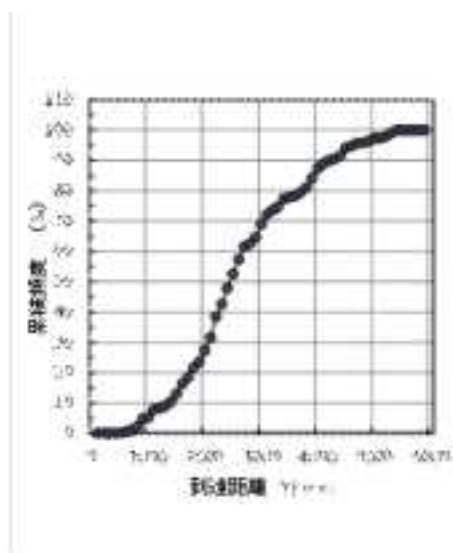
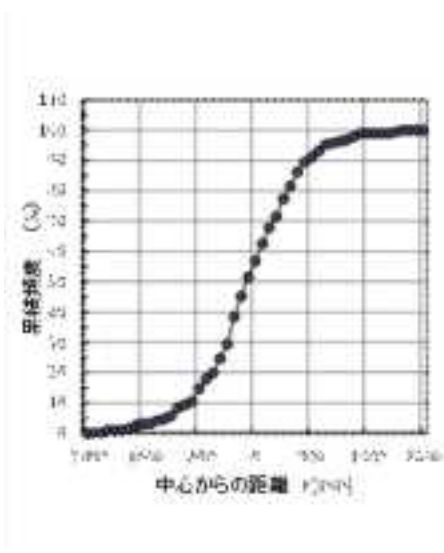
(2) X方向(斜面直交)の累積分布

(3) Y方向(到達方向)の累積分布

図 2.3.2-4 試番 3(落下高さ 1.0m, 径 40-80mm, 勾配 41 度)の条件による全実験結果



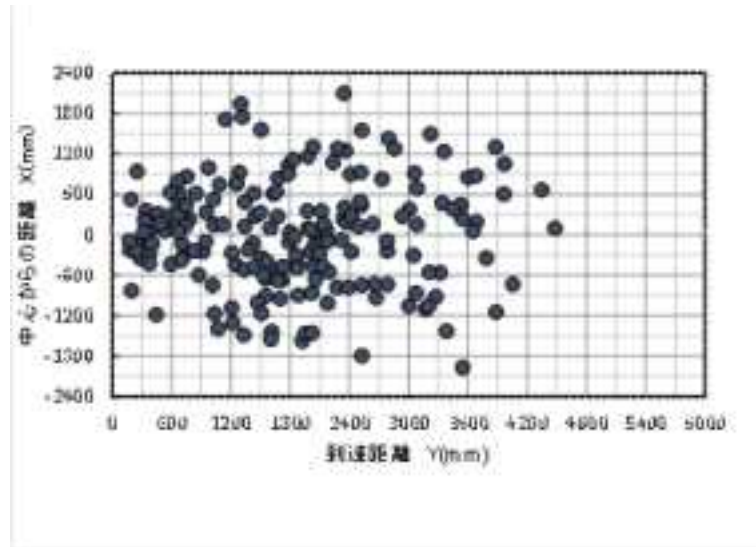
(1) 到達位置の分布



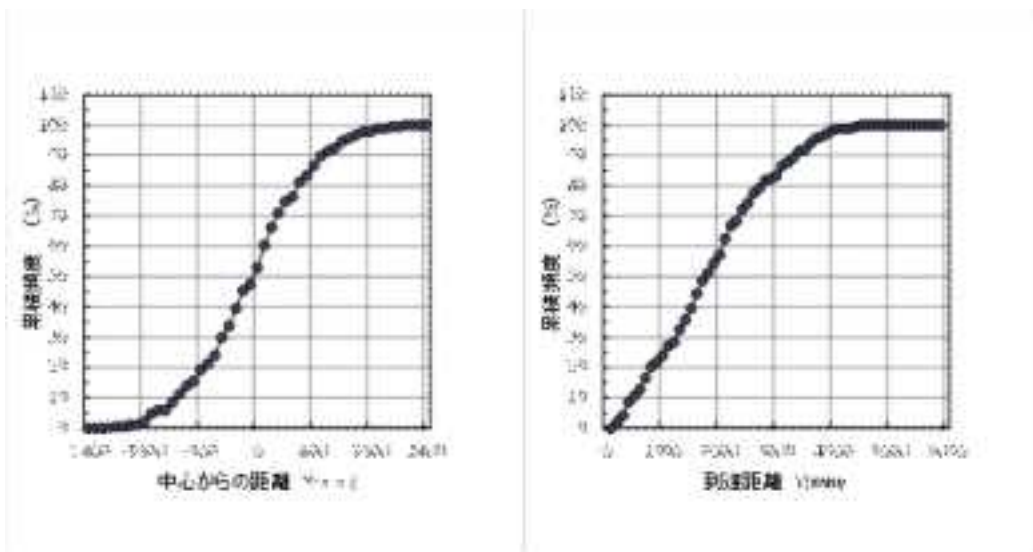
(2) X 方向(斜面直交)の累積分布

(3) Y 方向(到達方向)の累積分布

図 2.3.2-5 試番 4(落下高さ 2.0m, 径 40-80mm, 勾配 41 度)の条件による全実験結果



(1) 到達位置の分布

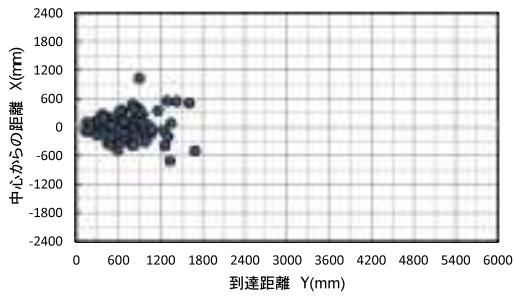


(2) X 方向(斜面直交)の累積分布

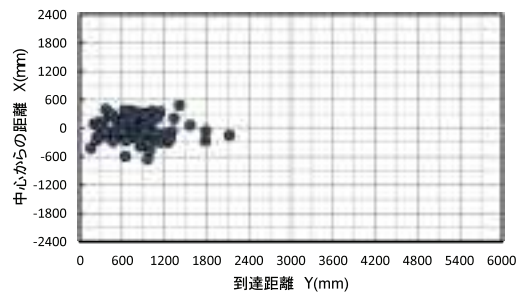
(3) Y 方向(到達方向)の累積分布

図 2.3.2-6 試番 5(落下高さ 2.0m, 径 40-80mm, 勾配 60 度)の条件による全実験結果



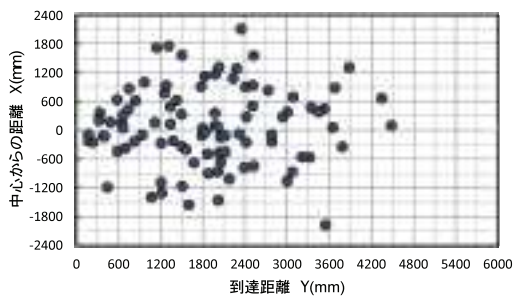


(1) 平落とし

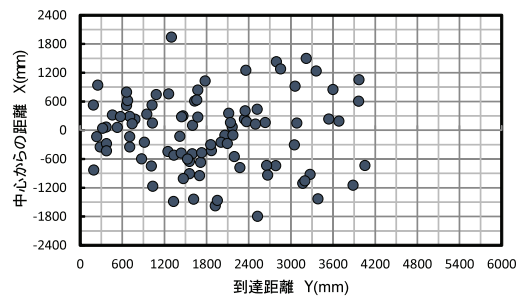


(2) 角落とし

図 2.3.2-7 試番 2(落下高さ 0.5m, 径 40-80mm, 勾配 41 度)の条件による到達位置の分布

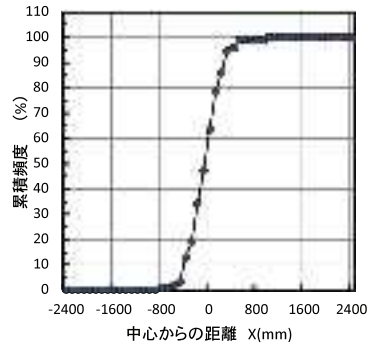


(1) 平落とし

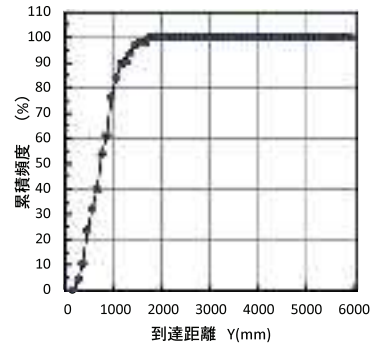


(2) 角落とし

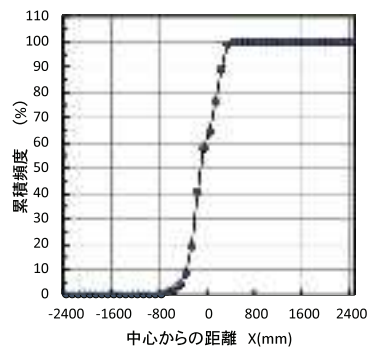
図 2.3.2-8 試番 5(落下高さ 2.0m, 径 40-80mm, 勾配 60 度)の条件による到達位置の分布



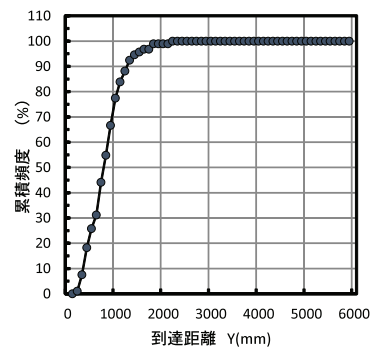
(1) 試番 2X 方向(粒子 B, 平落とし)



(2) 試番 2Y 方向(粒子 B, 平落とし)

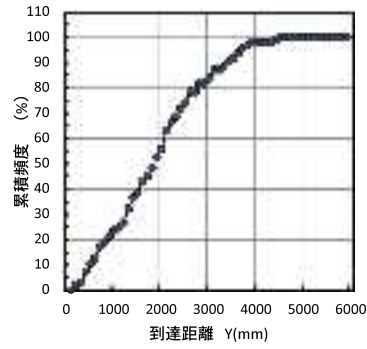
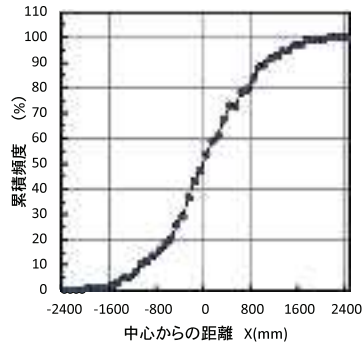


(3) 試番 2X 方向(粒子 B, 角落とし)

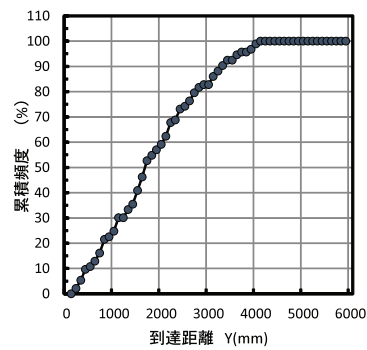
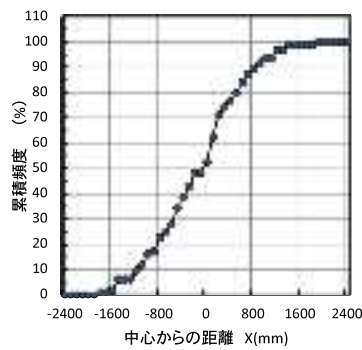


(4) 試番 2Y 方向(粒子 B, 角落とし)

図 2.3.2-9 試番 2(落下高さ 0.5m, 径 40-80mm, 勾配 41 度)の条件による累積分布



(1) 試番 5X 方向(粒子 B, 平落とし) (2) 試番 5Y 方向(粒子 B, 平落とし)



(3) 試番 5X 方向(粒子 B, 角落とし) (4) 試番 5Y 方向(粒子 B, 角落とし)

図 2.3.2-10 試番 5(落下高さ 2.0m, 径 40-80mm, 勾配 60 度)の条件による累積分布

### 2.3.3 質点解析による再現性

#### 2.3.3.1 乱数を用いた質点解析の概要

落石を質点で表すため微小な凹凸形状による跳ね返り方向の挙動を厳密に表現することはできないが、そのばらつきについて乱数を用いて近似的に表すことを試みる。まず、斜面の任意位置法線ベクトルを  $\mathbf{r}_{n0}$  とする。斜面表面や岩塊の微小な凹凸を考慮するため地盤（斜面）の法線ベクトル  $\mathbf{r}_{n0}$  にランダムなベクトル  $\mathbf{r}_r$  を加え、落石の跳ね返りの方向ベクトル  $\mathbf{r}_n$  を以下のように定める。

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{r}_{n0} + \mathbf{r}_r \quad (1)$$

ベクトル  $\mathbf{r}_r$  は、各成分について独立な一様乱数から算定して方向を定め、そのベクトルの大きさは平均 0、標準偏差  $\sigma_r$  のガウス分布に従う乱数で与えることとした。つまり、凹凸の大きさは標準偏差  $\sigma_r$  によって制御されることになる。この標準偏差を凹凸度と呼ぶことにする。本論文における凹凸度とは地盤と岩塊の両方から決まるパラメタであり、地盤に全く凹凸がなく、なおかつ岩塊が真球の場合のみ 0 となることに注意されたい。その場合は、落石の挙動にばらつきは生じず、同じ位置からの落石は全く同じ軌跡となる。

岩塊の地盤面接触直前の速度ベクトルを  $\mathbf{v}$  とする。これを地盤面法線方向とそれに直交するベクトル  $\mathbf{v}_n, \mathbf{v}_l$  に分ける。

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_n + \mathbf{v}_l \quad (2)$$

ここで、

$$\mathbf{v}_n = (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}_n) \mathbf{r}_n, \quad \mathbf{v}_l = \mathbf{v} - \mathbf{v}_n \quad (3)$$

法線方向とそれに直行する方向の反発係数  $c_n, c_l$  から接触して跳ね返った直後の速度ベクトルを次のように求める。

$$\mathbf{v} = -c_n \mathbf{v}_n + c_l \mathbf{v}_l \quad (4)$$

前回地盤と接触した時刻を  $t$  として、次に接触する時刻  $t_c$  を 2 分法で求める。時刻  $t$  から  $t + \Delta t$  の間で接触がない場合、時刻  $t + \Delta t$  における岩塊の位置  $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$  は次式でもとめることができる。

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \Delta t \mathbf{v}_t + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \mathbf{g} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{g}$  は重力加速度を表しており、以下の式で与えられる。

$$\mathbf{g}^T = (0, 0, -9.8) \quad (6)$$

式(5)で算定した位置が地盤面より上にあれば、時刻  $t$  以降、落石は地盤面とまだ接触していないので地盤面の下になるまで  $t + n\Delta t$  として  $n$  を増加させる。初めて地盤面の下側になる  $n$  に対して、時刻  $t + (n-1)\Delta t$  と  $t + n\Delta t$  の間で地盤と接触していることになる。これらを接触時刻の下限  $t_1$ 、上限  $t_2$  として二分法を用いて以下のように新たな接触時刻  $t_c$  を算定する。

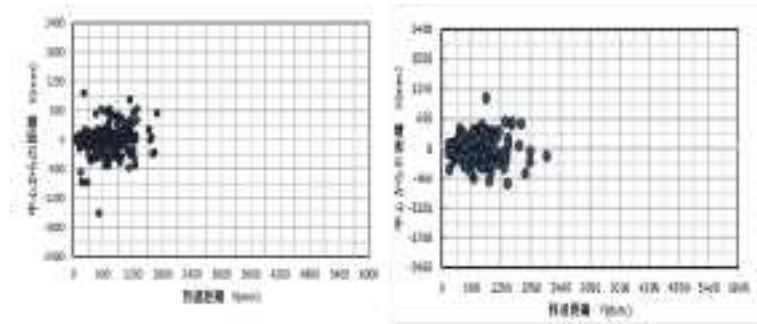
- 1) 上記の方法に従い接触時刻の上限  $t_2$ 、下限  $t_1$  の初期値を決める.
  - 2) 上下限の時刻の平均  $t_m$  に対して式(5)によって位置を計算する.
  - 3) 計算された位置が地盤面より上であればそれを新たな下限  $t_1 = t_m$ 、地盤面より下であれば上限  $t_2 = t_m$  とする
- 上下限の差  $t_2 - t_1$  がある一定値  $\varepsilon$  以下になれば終了、そうでなければ 2)へ

### 2.3.3.2 落石実験の再現解析

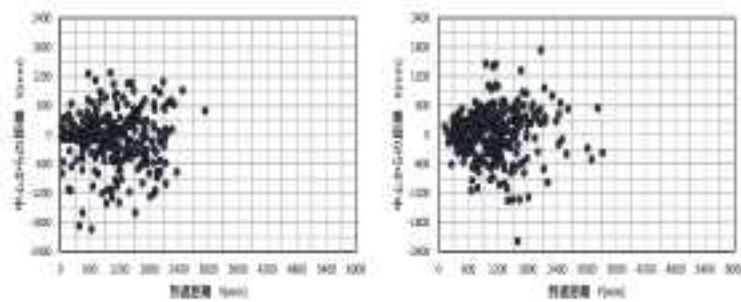
質点解析による解析結果として到達位置の分布を図 2.3.3-1 に、斜面直交方向及び到達方向の累積分布を図 2.3.3-2 に示す. 解析のためのパラメタとして反発係数 0.84, 凹凸度 0.25 としている. これらのパラメタは栃木の実験 (高さ 0.8m, 斜面勾配 41 度) のケースに合致するようにパラメタスタディーで求めた値である. 落下高さが 0.5, 0.8, 1.0 の場合はよく一致しているが, 2.0m の場合は実験結果に比較して解析結果が到達方向, 斜面直交方向ともにばらつきが大きくなっている. また, 図 3.3-1 に到達位置の分布について, 実験では放射状に到達位置が広がる傾向がみられるのに対して, 解析ではその傾向があまり明確ではない.

斜面勾配 41 度の全ケースの比較を行うため図 2.3.3-3 に示す様に到達方向の中央値, 斜面直交方向のフラクタイル値 0.1, 0.9 を求めて図 2.3.3-4 にまとめた. 到達方向の中央値は粒径が 40-80mm のケースについては比較的再現性はよい. しかし, 図 2.3.3-1, 2 に示すように分布の特性はやや異なり, ばらつきはやや解析結果の方が大きい. また, 高さ 2.0m の実験結果では粒径の違いがはっきり表れており, 粒径 40-80mm の結果は 20-30mm に比較して遠くまで到達している. 現状の質点解析では粒径の違いは反映できておらずその再現はできない. 一方, 実験の斜面の直交方向については粒径の違いは明確にはない. 落下高さ 0.5, 0.8m での再現性は良好であるが, 落下高さが高くなると解析によるばらつきの方が大きくなっている.

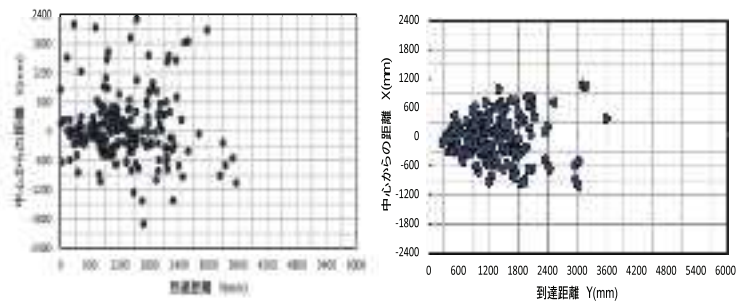
同様にして斜面勾配 60 度の実験結果の再現解析結果を図 3.3-5 に示す. 解析結果は実験結果に比較して, 斜面直交方向, 到達方向ともに大幅にばらつきが大きくなっていることがわかる.



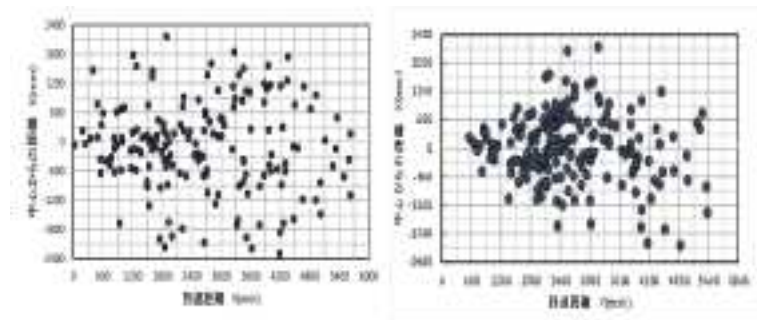
(1) 落下高さ 0.5m



(2) 落下高さ 0.8m

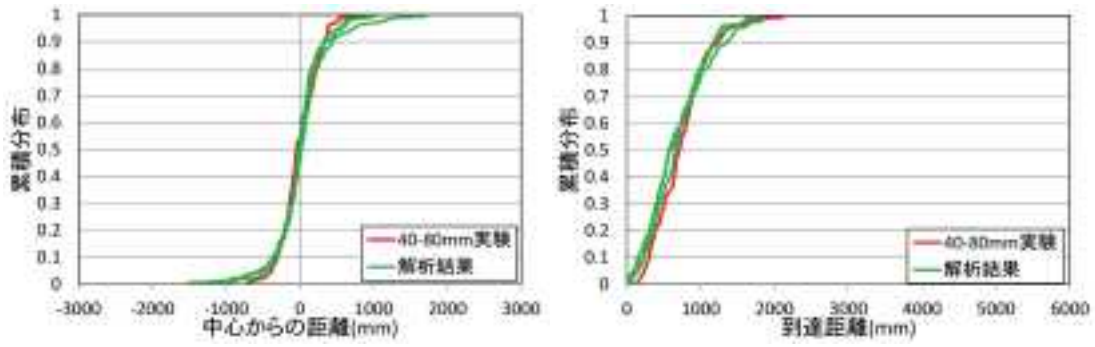


(3) 落下高さ 1.0m

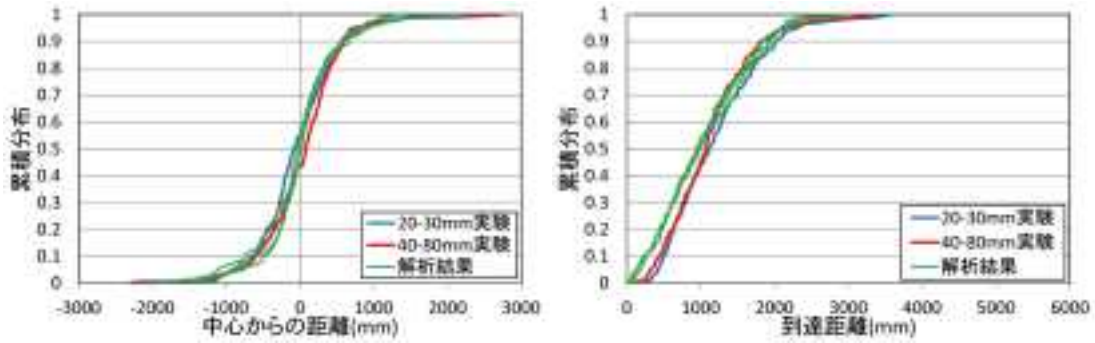


(4) 落下高さ 2.0m

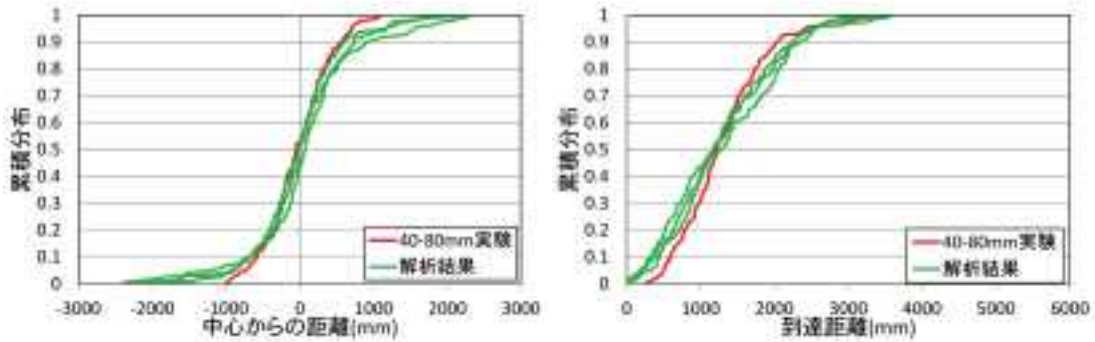
図 2.3.3-1 栃木による実験に合わせたパラメタによる解析と実験の到達位置の分布  
反発係数 0.84, 凹凸度 0.25, 左：解析, 右：実験



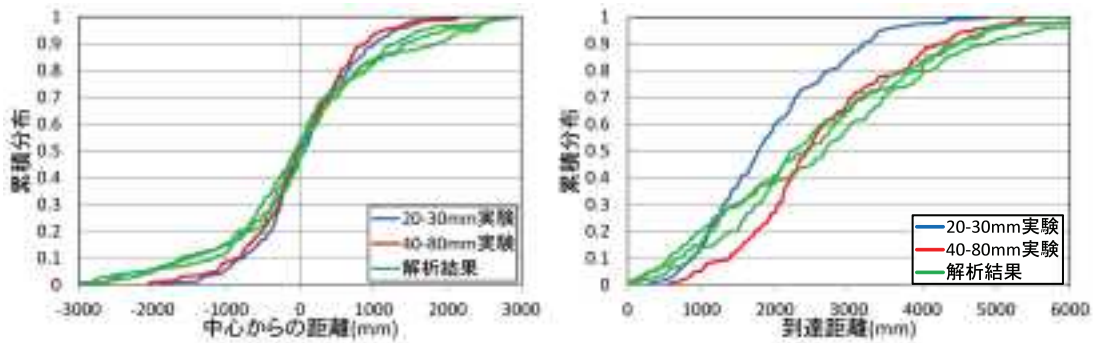
(1) 落下高さ 0.5m



(2) 落下高さ 0.8m



(3) 落下高さ 1.0m



(4) 落下高さ 2.0m

図 2.3.3-2 桁木の実験に合わせたパラメタによる解析と実験の累積分布による比較  
反発係数 0.84, 凹凸度 0.25



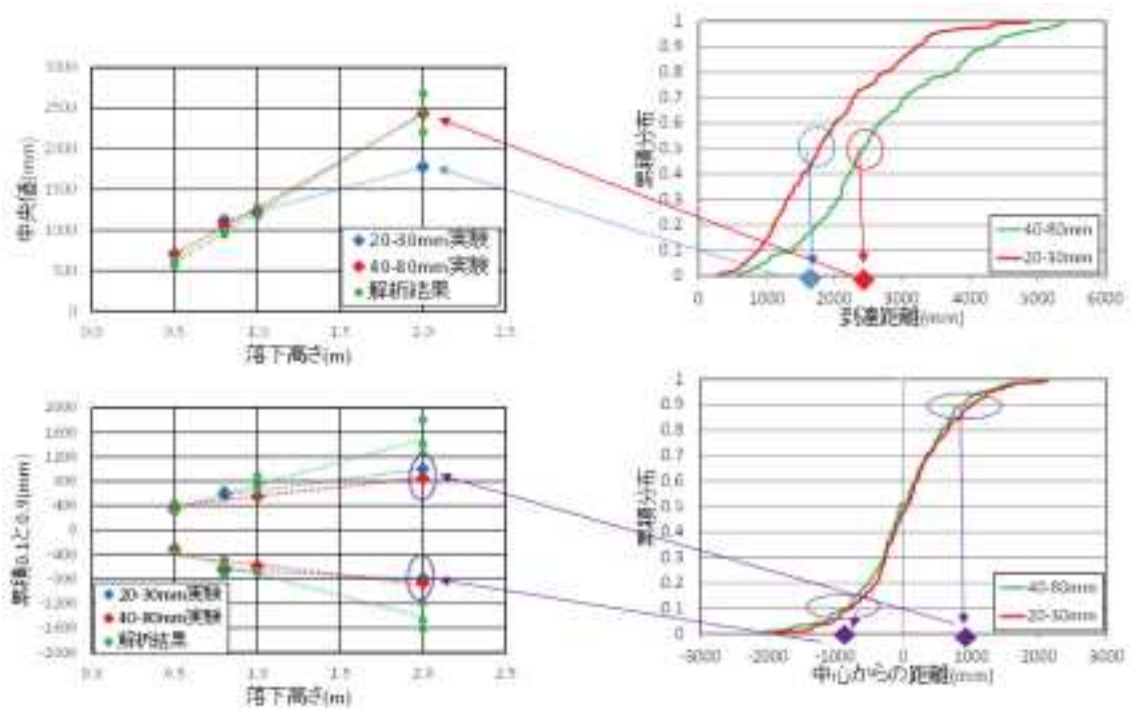
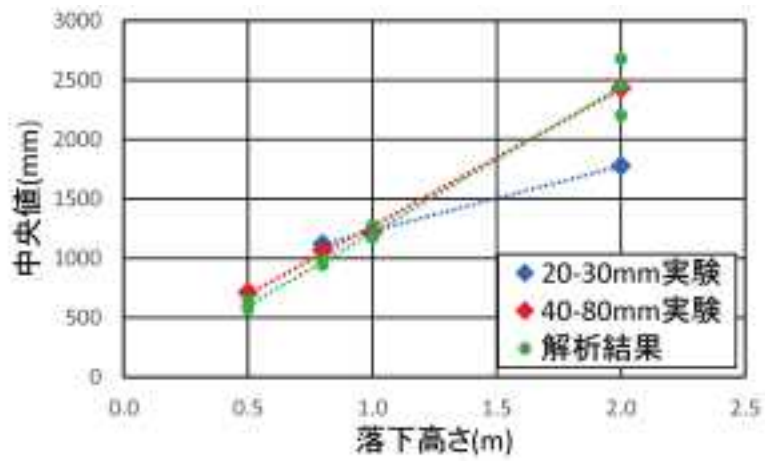
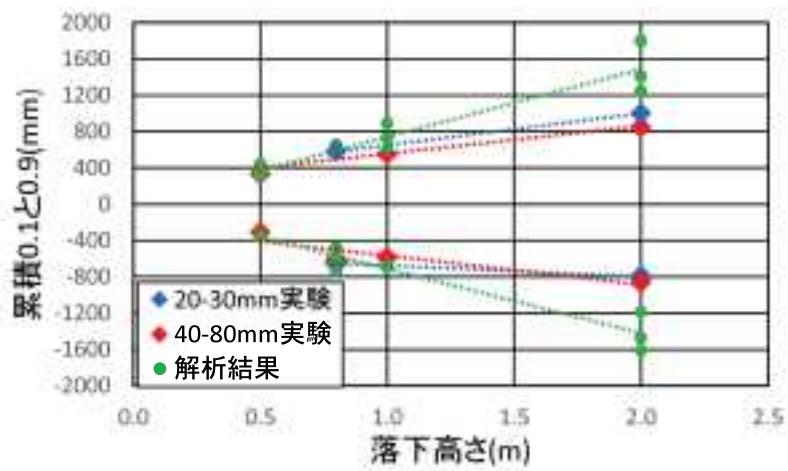


図 2.3.3-3 中央値，フラクタル値の算定方法



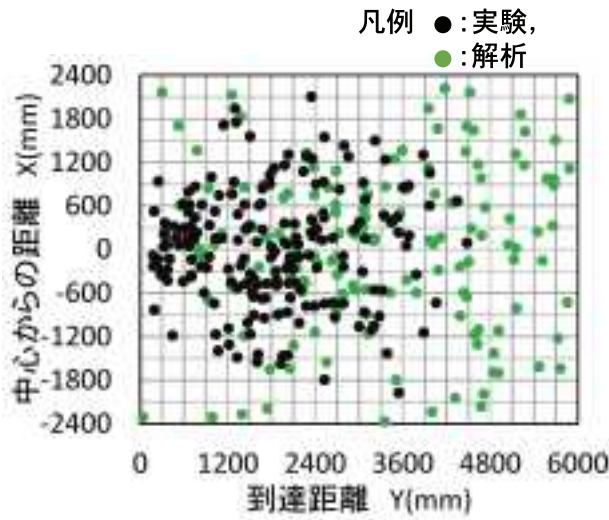


(1)到達距離方向

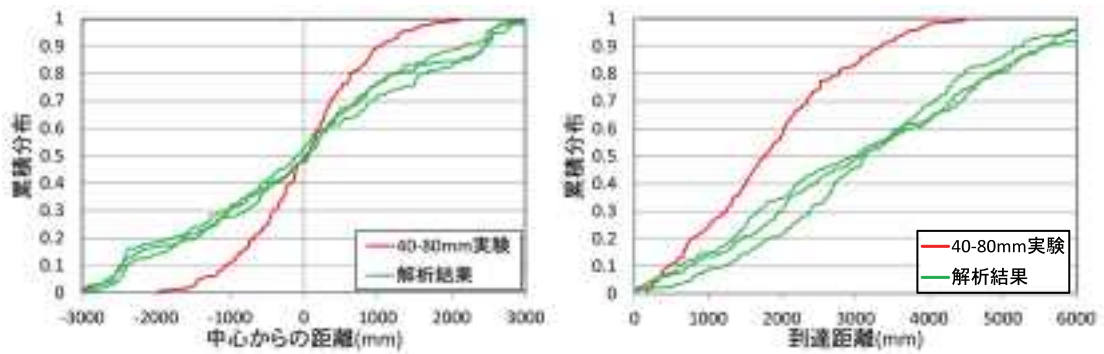


(2)斜面直交方向

図 2.3.3-4 中央値, フラクタイル値と落下高さの関係



(1) 落石到達位置の分布



(2) X 方向(斜面直交)の累積分布

(3) Y 方向(到達方向)の累積分布

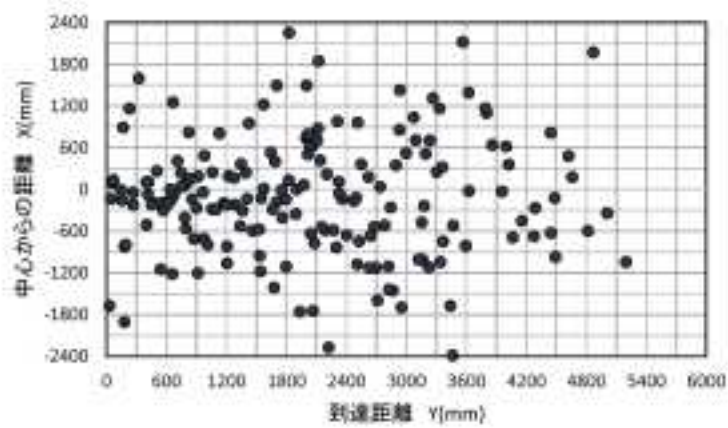
図 2.3.3-5 60度斜面(試番5の条件, 高さ2.0m),  
反発係数0.84, 凹凸度0.25での解析結果

### 2.3.3.3 解析手法の問題点

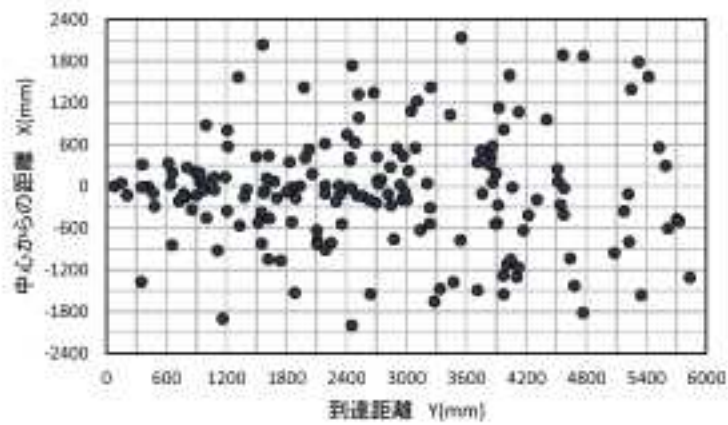
高さ 2.0m の実験結果の再現性を向上させるためパラメタスタディーを行った。まず、斜面勾配 41 度のケースについて図 2.3.3-6 及び 7 に示す。パラメタを調整することにより(3)(4)(5)などでは再現性が高くなっている。しかし、再現性を高めるためには斜面部と平坦部で反発係数を変えるなどの工夫が必要になる。また、0.5m など落下高さの低いケースを同時に満足するようなパラメタを決めることは困難である。

次に斜面勾配 60 度のケースについて到達位置の分布及びそれぞれの方向別の累積分布を図 2.3.3-8 及び 9 に示す。反発係数 0.78，凹凸度 0.20 とすると再現性は大変良くなるが、他のケースの再現性は悪くなる。0.8m の実験結果でフィッティングしたパラメタ反発係数 0.84，凹凸度 0.25 の解析によるある時刻における様子を図 3.3-10 に示す。斜面直下で大きく跳ね上がっていることがわかる。

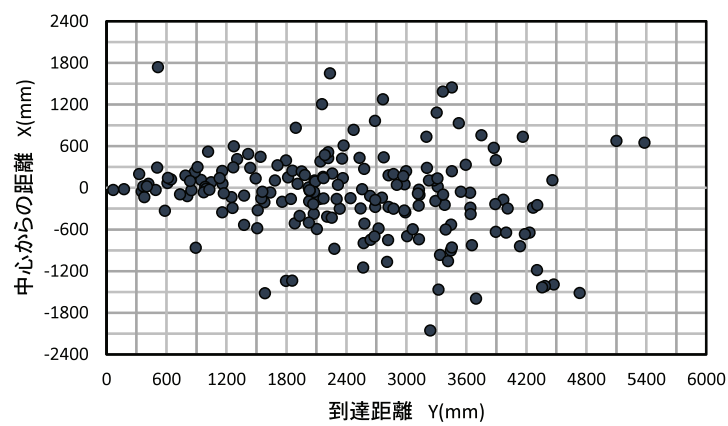
鉛直方向に単純に落下させた場合の反発係数は実際には 0.4 付近であることが報告されているが（JR 総研の要素試験結果，栃木らの実験），質点解析における反発係数は回転の効果なども含めた等価な値との解釈から，このような大きい数値（0.8 程度）を設定している。そのため，このようにスーパーボールのように大きく跳ね上がるという不自然な現象が生じている。別途行われている実験では，衝突前後の速度の比を法線方向，接線方向のそれぞれについて求めた結果が報告されている。それによると法線方向は 0.4 程度，接線方向は 1.0 程度である。そこで，法線方向と接線方向の反発係数の値を別々に設定する方法について次節で検討する。



(1) 反発係数 0.82,凹凸度 0.25

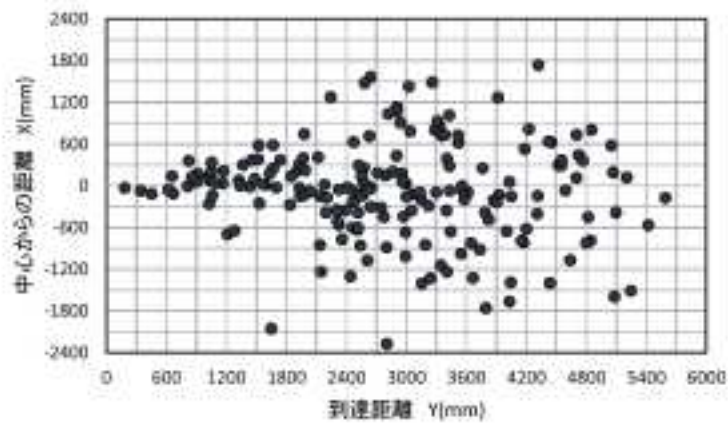


(2) 反発係数 0.84,凹凸度 0.20

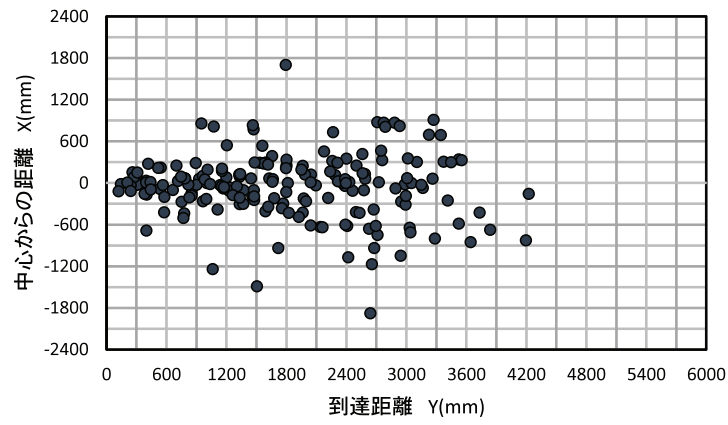


(3) 反発係数 0.88(斜面部)0.78(平面部),凹凸度 0.15

図 2.3.3-6 41度斜面で落下高さ 2.0m でのパラメタスタディ結果(到達位置)(その 1/2)

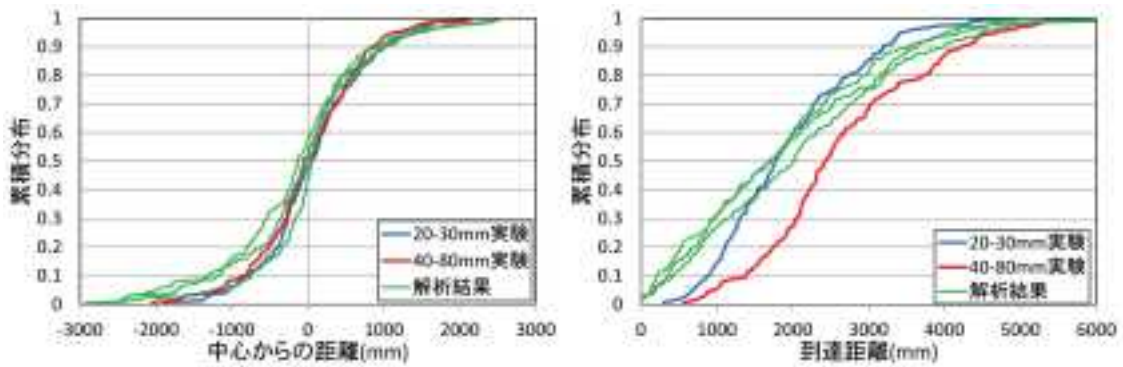


(4) 反発係数 0.89(斜面部)0.79(平面部),凹凸度 0.15

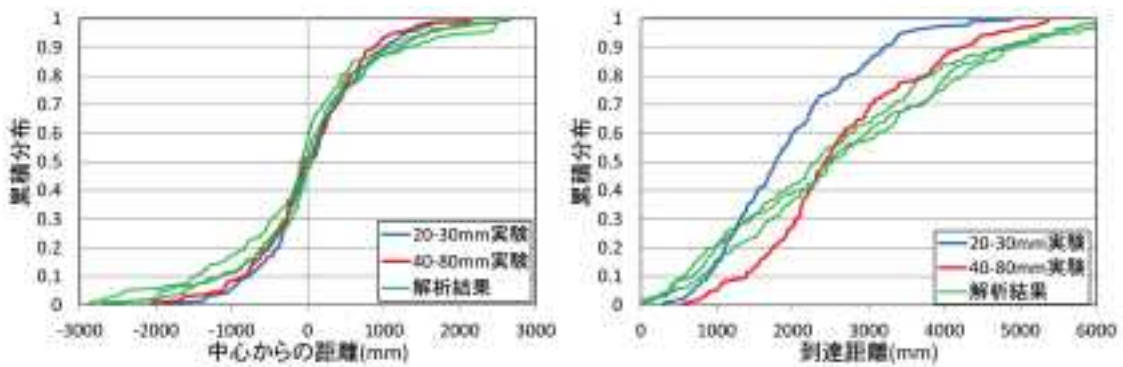


(5) 反発係数 0.86(斜面部)0.76(平面部),凹凸度 0.15

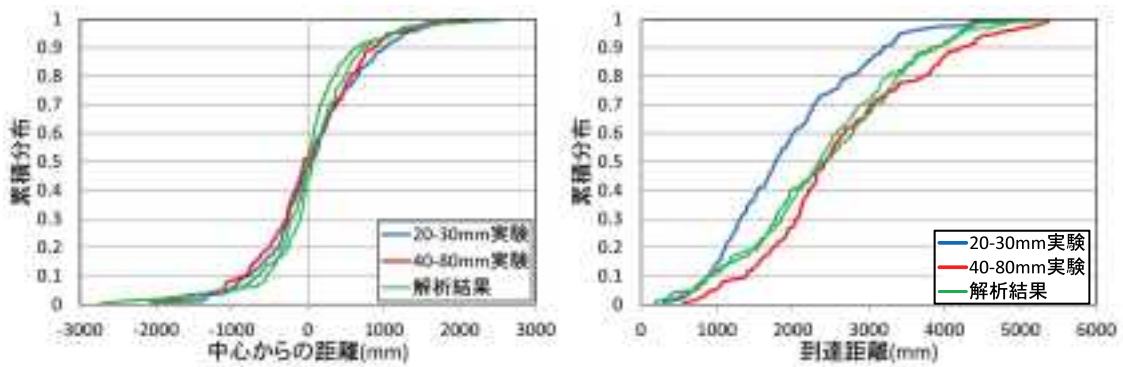
図 2.3.3-6 41 度斜面で落下高さ 2.0m でのパラメタスタディ結果(到達位置)(その 2/2)



(1) 反発係数 0.82,凹凸度 0.25

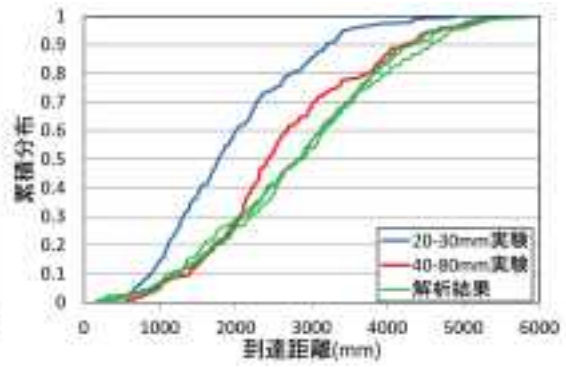
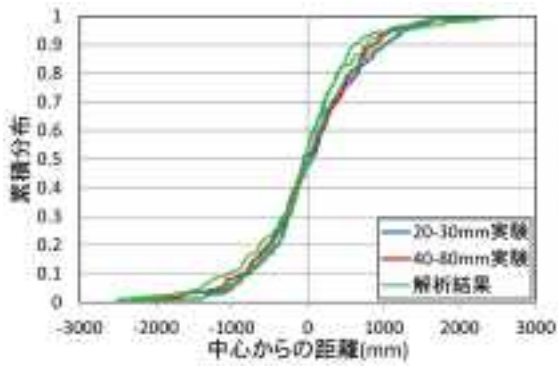


(2) 反発係数 0.84,凹凸度 0.20

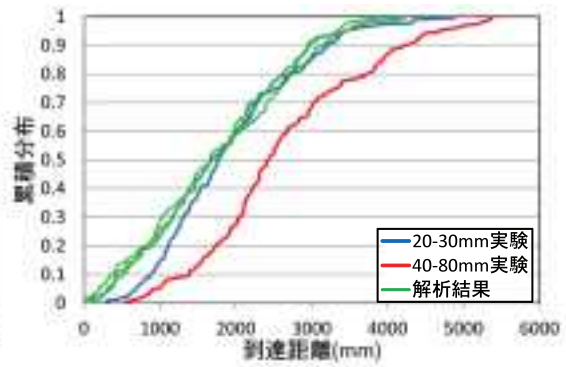
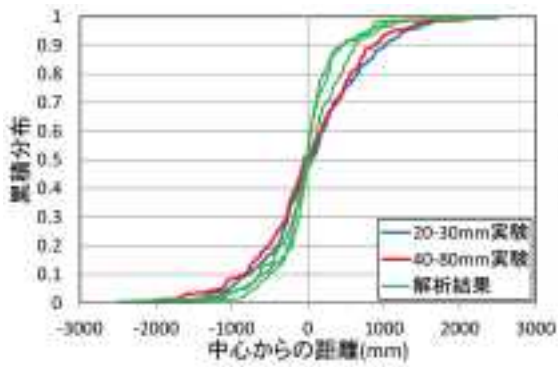


(3) 反発係数 0.88(斜面部)0.78(平面部),凹凸度 0.15

図 2.3.3-7 41 度斜面で落下高さ 2.0m でのパラメタスタディ結果(累積分布)(その 1/2)



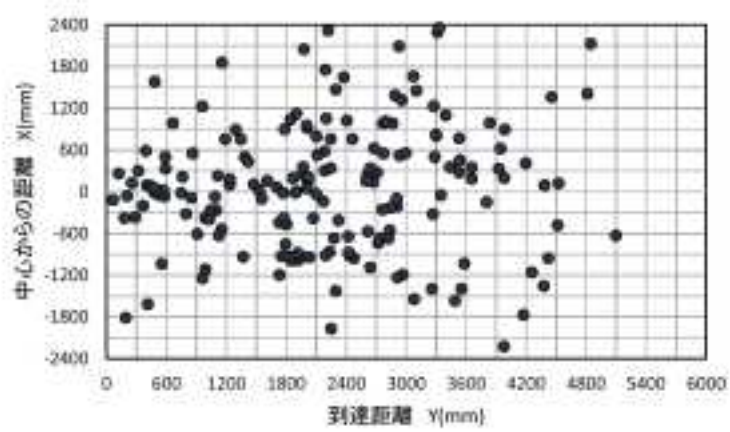
(4) 反発係数 0.89(斜面部)0.79(平面部),凹凸度 0.15



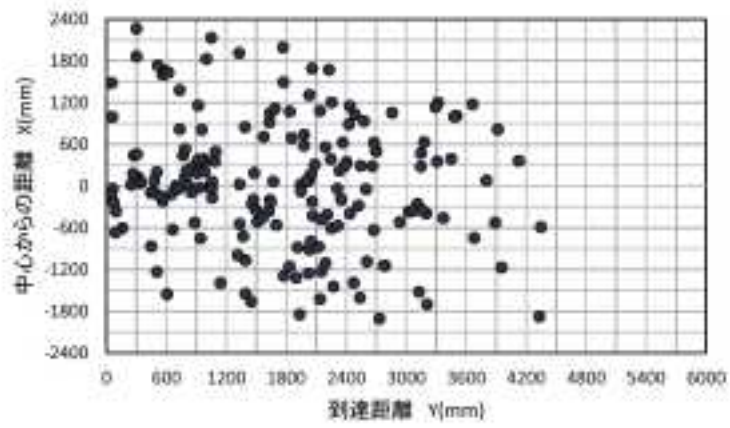
(5) 反発係数 0.86(斜面部)0.76(平面部),凹凸度 0.15

図 2.3.3-7 41 度斜面で落下高さ 2.0m でのパラメタスタディ結果(累積分布)(その 2/2)

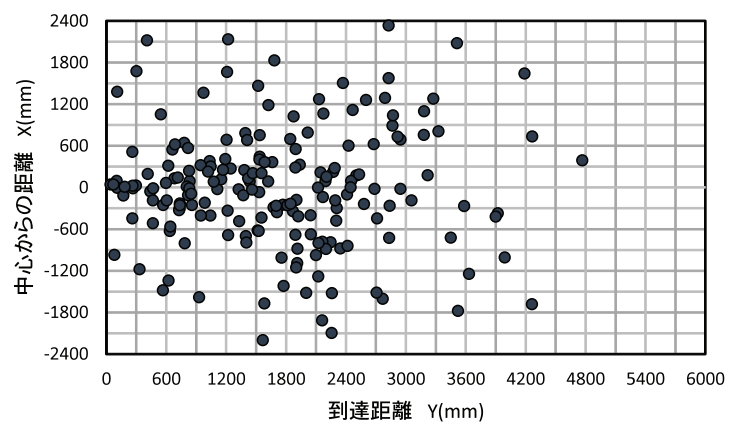




(1) 反発係数 0.80, 凹凸度 0.25



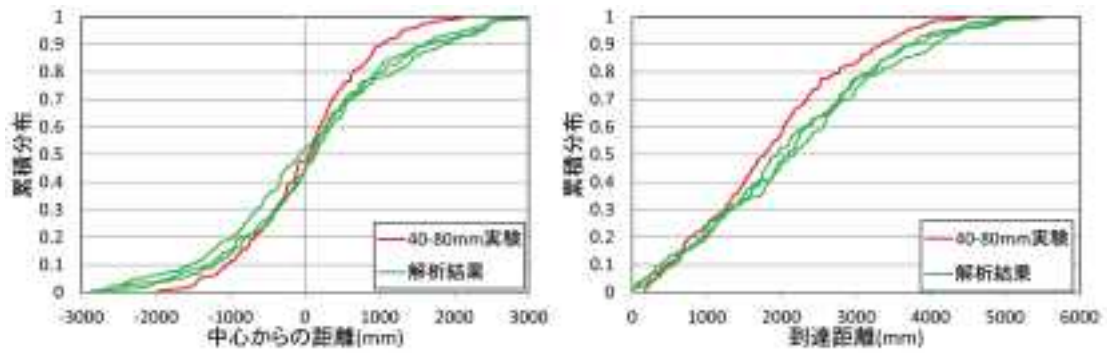
(2) 反発係数 0.78, 凹凸度 0.25



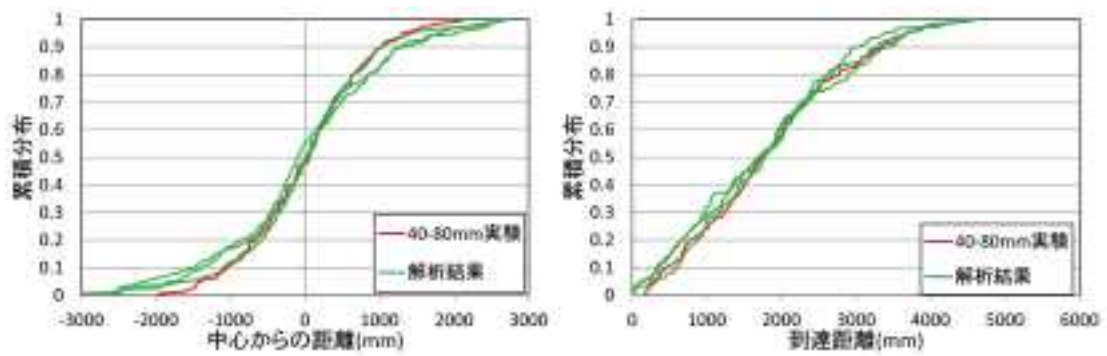
(3) 反発係数 0.78, 凹凸度 0.20

図 2.3.3-8 60度斜面, 落下高さ 2.0m のケースに対するパメタスタディ, 到達位置の分布

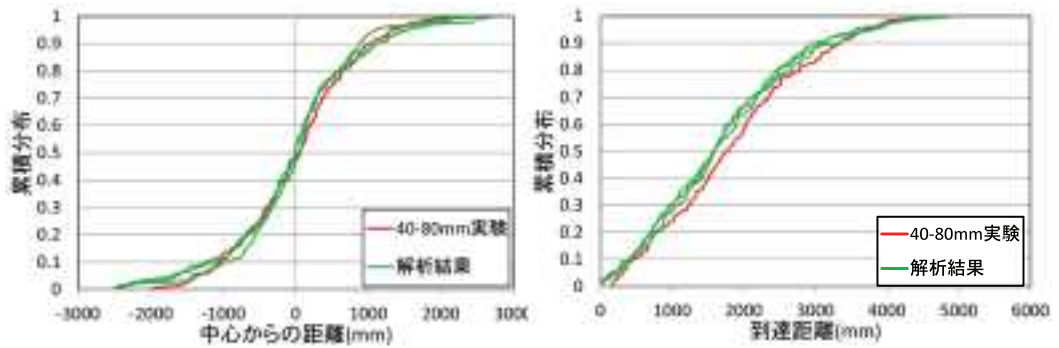




(1) 反発係数 0.80, 凹凸度 0.25



(2) 反発係数 0.78, 凹凸度 0.25



(3) 反発係数 0.78, 凹凸度 0.20

図 2.3.3-9 60度斜面, 落下高さ 2.0m のケースに対するパメタスタディ, 累積分布

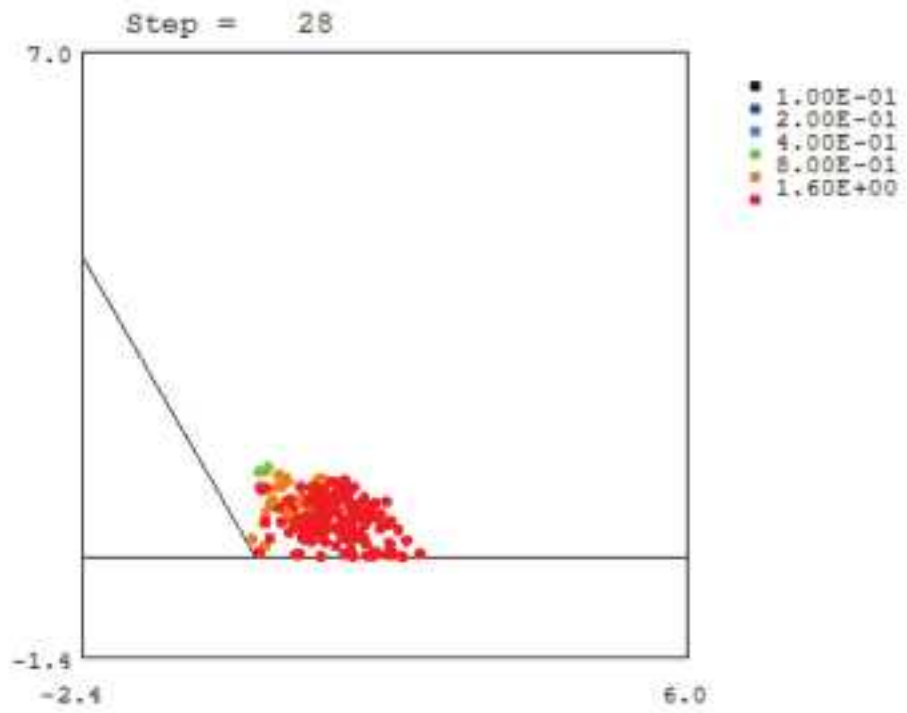


図 2.3.3-10 勾配 60 度，高さ 2.0m，反発係数 0.84，凹凸度 0.25 の解析結果．斜面直下で大きく跳ね上がっている様子．

#### 2.3.4 法線，接線方向別の反発係数を用いた質点解析の再現性

前節に示したように現状のモデルではパラメタを調整しても全てのケースを同時に再現できるパラメタは存在しない。そこで，実験ケース全ての再現性に注目して法線方向と接線方向の反発係数の値を別々に設定する。凹凸度と水平方向反発度は本来関連性があり，真球の岩塊，平板の斜面であれば凹凸度 0，水平方向反発係数 1.0 となり止まらない。斜面は岩塊や斜面の凹凸度が大きくなれば，水平方向反発係数も小さくなり早く停止する。全実験結果の再現性を評価するために，到達方向は 0.1, 0.5, 0.9 フラクタイル値，直交方向は 0.1, 0.9 フラクタイル値に注目する。

まず従来の法線方向，接線方向の区別なく反発係数 0.84，凹凸度 0.25（高さ 0.8m，勾配 41 度の実験結果にフィッティングした値）とした場合の全実験結果との再現性を図 2.3.4-1 に示す。斜面勾配 41 度の場合は落下高さ 0.5, 0.8, 1.0, 2.0m の 4 種類あり，0.8, 2.0m については径 40-80mm に加えて径 20-30mm のケースもあるため，径 40-80mm は落下高さ 70, 190cm に径 20-30mm は 90, 210cm に図化した。現状の質点解析では粒径の違いは考慮できないのでそのまま図化している。解析結果については乱数の種を変更して 3 回実施し，それぞれを図化している。パラメタを調整している高さ 80cm のケースでは非常に良好な再現性となっているが，高さが 200cm のケースは斜面勾配 41 度 60 度のケースともに解析結果の方が大きく散らばっていることがわかる。

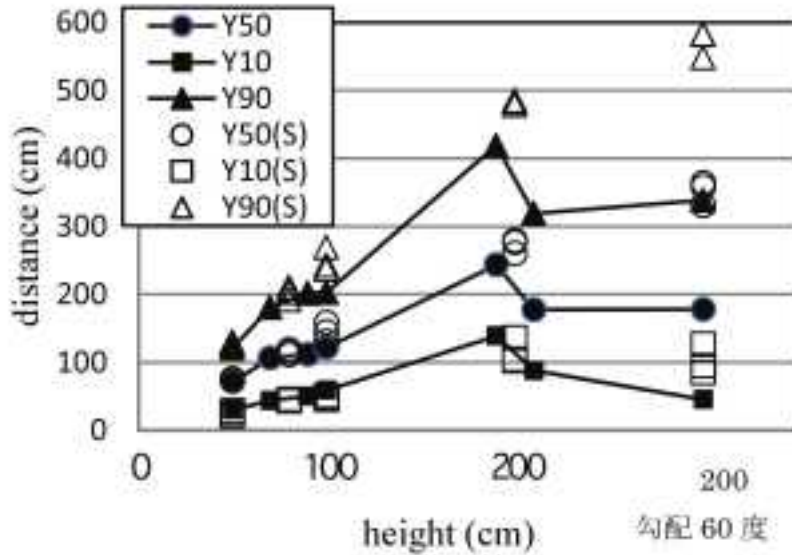
そこで，法線，接線方向別に反発係数のパラメタスタディを行ったところ，反発係数（法線 0.4，接線 0.95），凹凸度 0.30 とすると全体的な再現性が比較的良好な結果が得られた。図 2.3.4-2 に各フラクタイル値の比較を示す。大幅に再現性は改善されていることがわかる。しかし，実験結果と比較すると直交方向のばらつきはほぼ一致しているものの，到達方向のばらつきはやや実験結果に比べて小さい。ばらつきの程度を決めるパラメタは凹凸度しかないため，現状のモデルではこれ以上の再現性の向上は困難である。

実験結果は斜面直下で停止する岩塊や遠くまで到達する岩塊が現れる。衝突の角度（岩塊の角など）によって接線方向の反発係数が大きくなる場合と小さくなる場合があると解釈して，接線方向の反発係数を確定値ではなく確率変数として扱う。ここでは仮に一様分布に従うとして多少のパラメタスタディーを行った結果，0.85-1.05 の間でばらつかせると再現性が向上した。その結果を図 2.3.4-3 に示す。

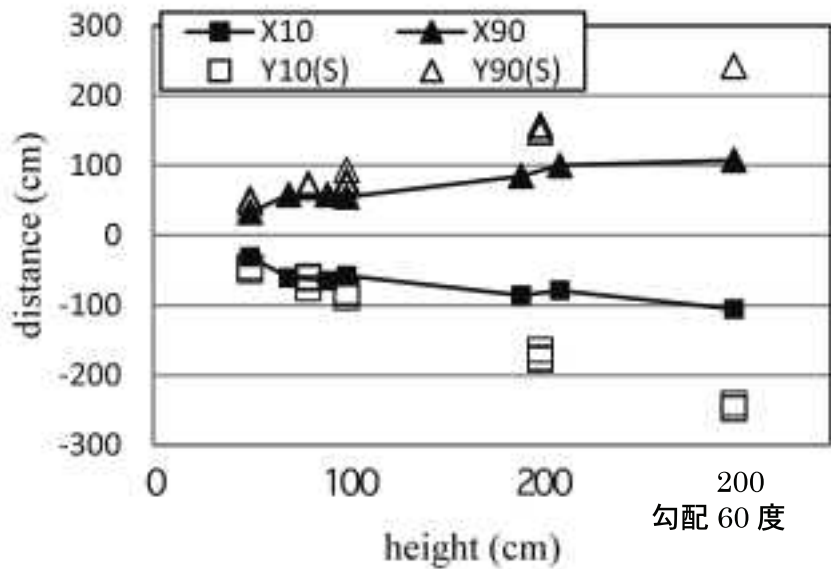
栃木らの実験と JR 総研の実験では多少条件が異なることを考慮して，法線方向反発係数は落下高さ 80cm の場合 0.48，それ以外 0.43 とし（簡易 DEM による検討と同じ条件），接線方向反発係数[0.85, 1.05]の一様分布，凹凸度 0.3 として計算した結果を図 2.3.4-4 に示す。これらの解析結果の落石の到達位置の分布，ならびに累積分布を図 2.3.4-5 から図 2.3.4-9 に示す。高さ 50cm のケースは非常によい再現性となっているが，鉛直方向の反発係数を 0.4 からやや大きくした分，高さ 80cm 以上のケースについては全体的に遠くまで到達する結果となっている。凹凸度は 0.25 程度に小さくした方が再現性はよいかもしれない。また，接線方向反発係数についても，さらなるパラメタスタディー，

あるいは正規分布などの導入を試すなどすればさらに再現性が向上する可能性がある。

図 2.3.4-10 に高さ 200cm, 斜面勾配 60 度のケースのある時刻における跳ね返りの様子を示す。もっとも跳ねている時刻を選んでいるが、図に示されているようにあまり高く跳ね返っておらず、実際の実験と同じような状況となっている。

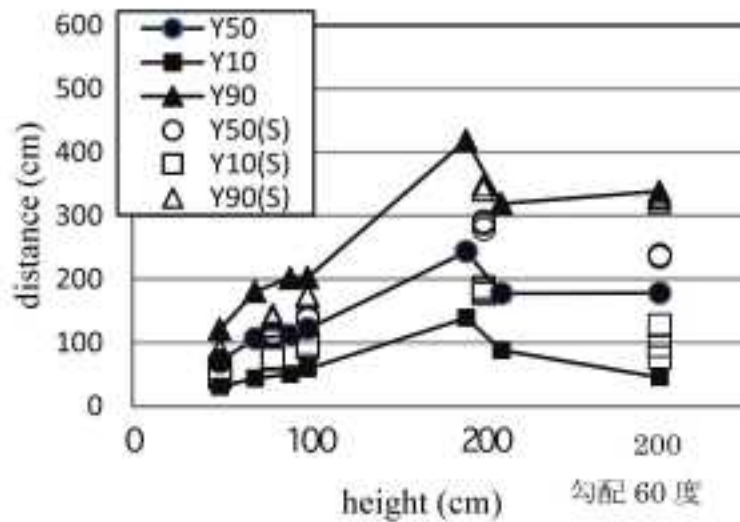


(1) 到達方向の再現性

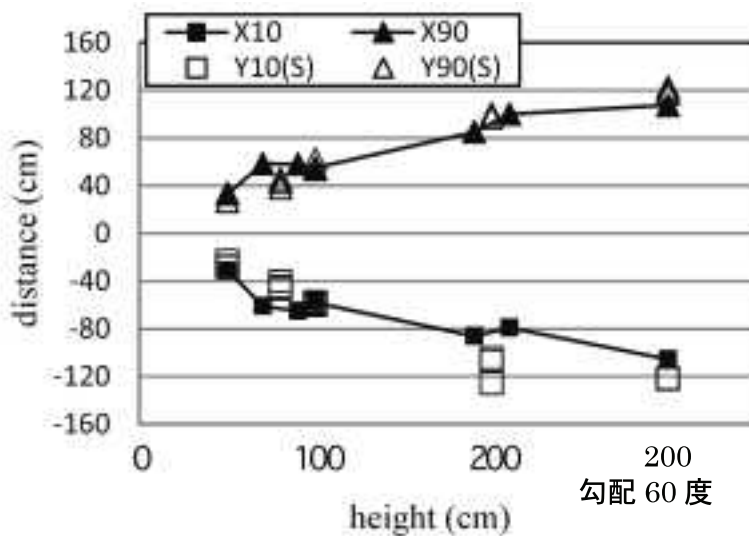


(2) 斜面直交方向の再現性

図 2.3.4-1 反発係数 0.84, 凹凸度 0.25, 到達位置のフラクタル値の比較  
 凡例 ●■▲ : 実験, ○□△ : 解析 (乱数の種をかえてそれぞれ 3 ケース)  
 落下高さ 80, 200cm について径 40-80mm は落下高さ 70, 190cm に, 径 20-30mm は 90, 210cm に図化



(1) 到達方向の再現性



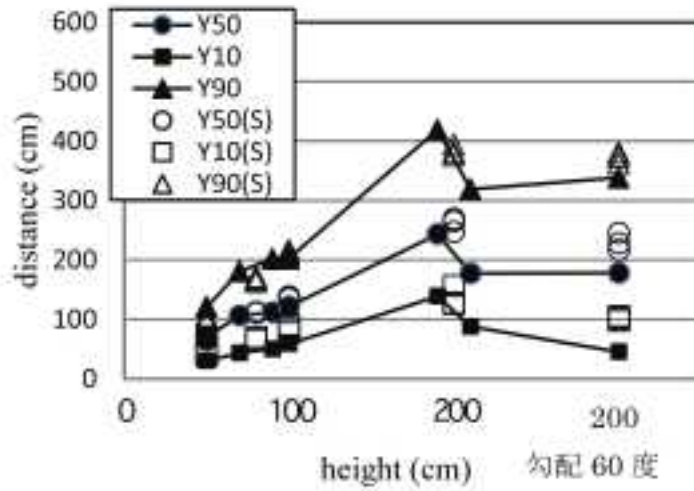
(2) 斜面直交方向の再現性

図 2.3.4-2 反発係数(法線 0.4, 接線 0.95), 凹凸度 0.30

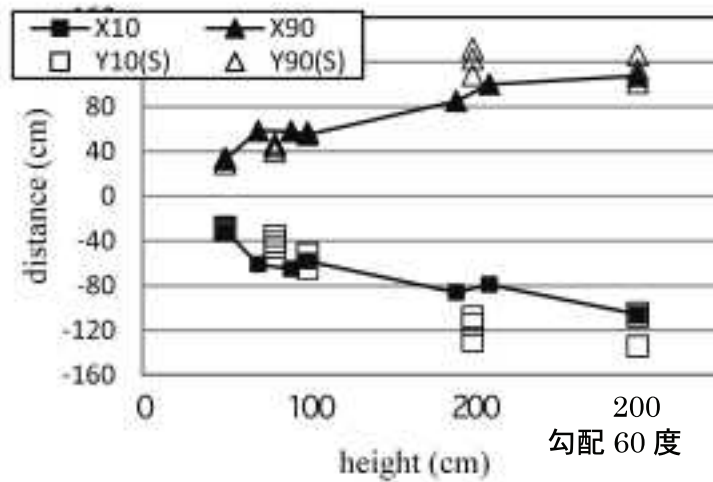
到達位置のフラクタル値の比較

凡例 ●■▲ : 実験, ○□△ : 解析 (乱数の種をかえてそれぞれ 3 ケース)

落下高さ 80, 200cm について径 40-80mm は落下高さ 70, 190cm に, 径 20-30mm は 90, 210cm に図化



(1) 到達方向の再現性



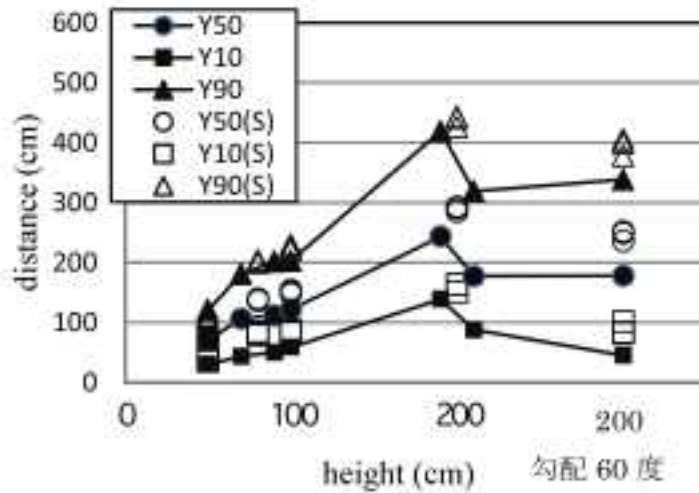
(2) 斜面直交方向の再現性

図 2.3.4-3 反発係数(法線 0.4, 接線[0.85, 1.05]の一様分布), 凹凸度 0.3

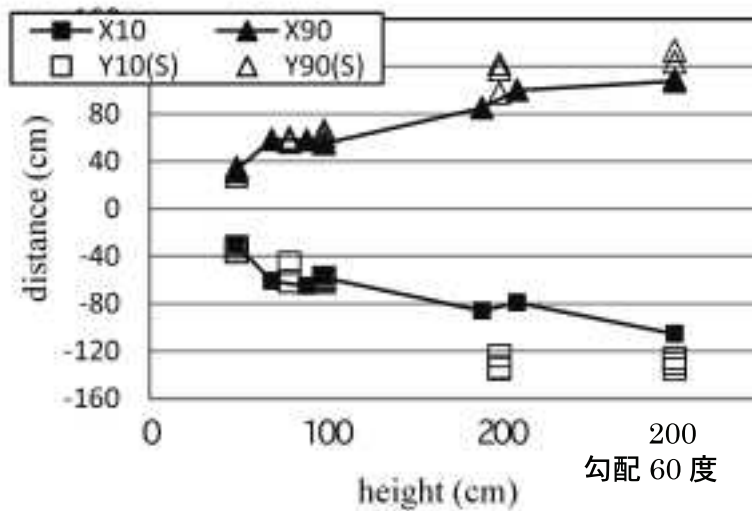
到達位置のフラクタル値の比較

凡例 ●■▲ : 実験, ○□△ : 解析 (乱数の種をかえてそれぞれ 3 ケース)

落下高さ 80, 200cm について径 40-80mm は落下高さ 70, 190cm に, 径 20-30mm は 90, 210cm に図化



(1) 到達方向の再現性



(2) 斜面直交方向の再現性

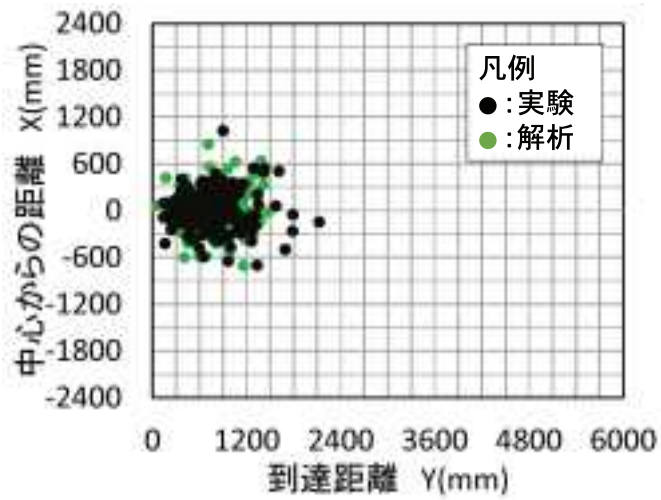
図 2.3.4-4 法線方向反発係数 落下高さ 80cm の場合 0.48, それ以外 0.43  
接線方向反発係数[0.85, 1.05]の一様分布, 凹凸度 0.3

到達位置のフラクタル値の比較

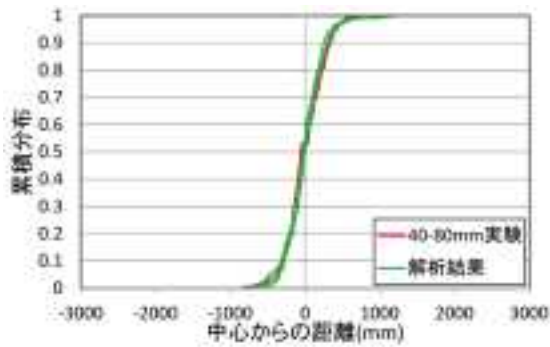
凡例 ●■▲ : 実験, ○□△ : 解析 (乱数の種をかえてそれぞれ 3 ケース)

落下高さ 80, 200cm について径 40-80mm は落下高さ 70, 190cm に, 径 20-30mm は 90, 210cm に図化

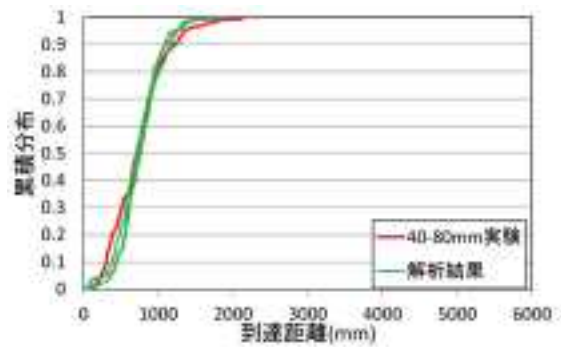




(1) 落石到達位置の分布

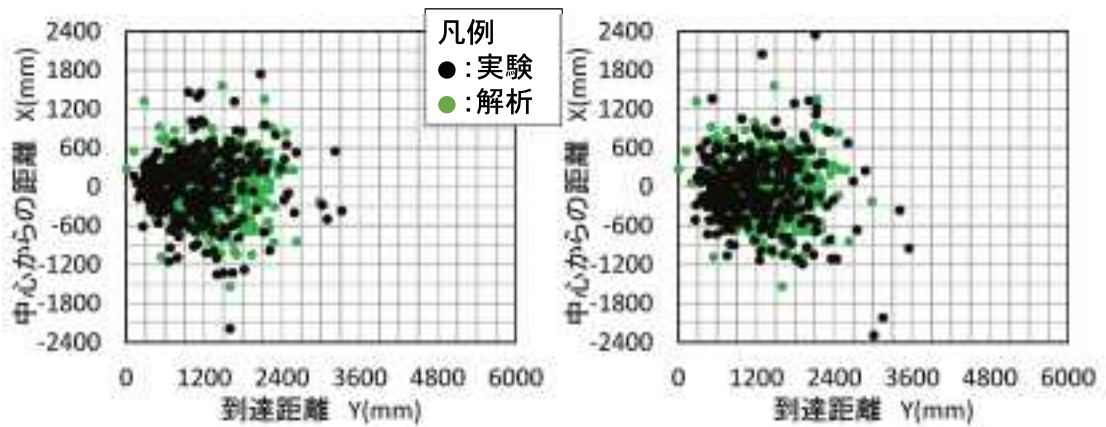


(2) X 方向(斜面直交)の累積分布



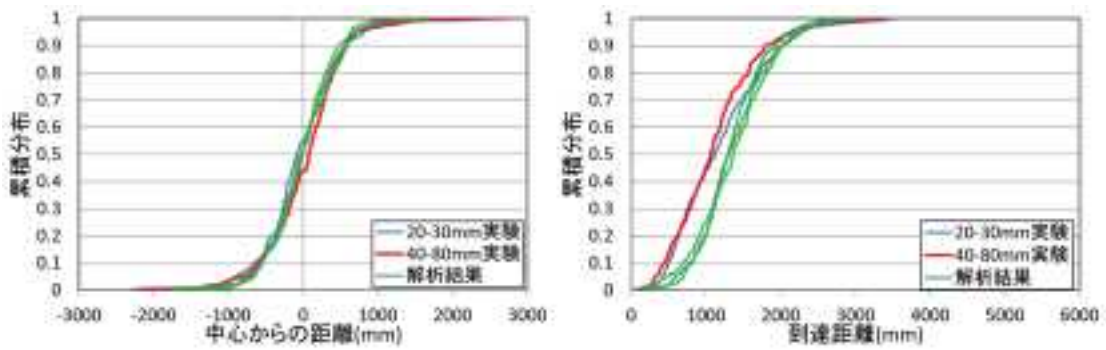
(3) Y 方向(到達方向)の累積分布

図 2.3.4-5 41 度斜面, 高さ 50cm,  
法線方向反発係数 0.43, 接線方向反発係数[0.85, 1.05]の一様分布, 凹凸度 0.3



(1) 落石到達位置の分布(40-80mm)

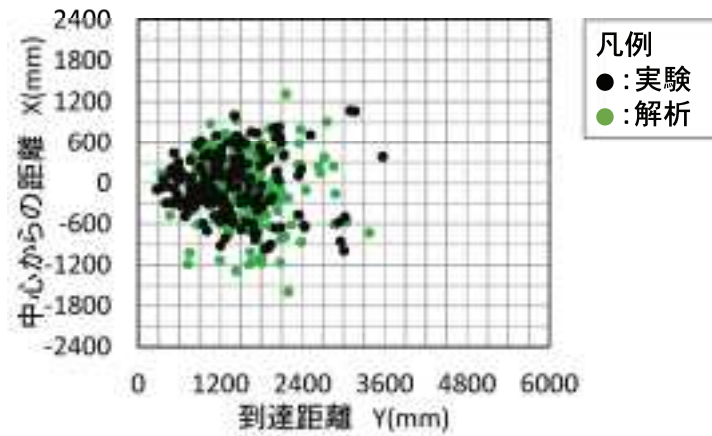
(2) 落石到達位置の分布(20-30mm)



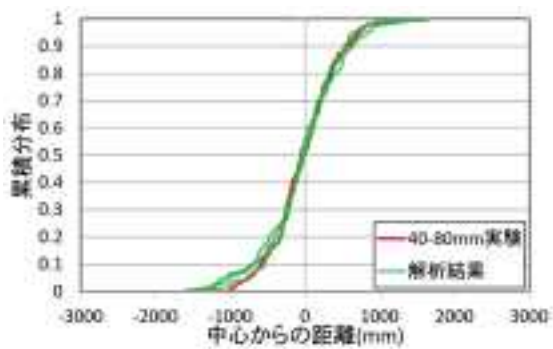
(3) X 方向(斜面直交)の累積分布

(4) Y 方向(到達方向)の累積分布

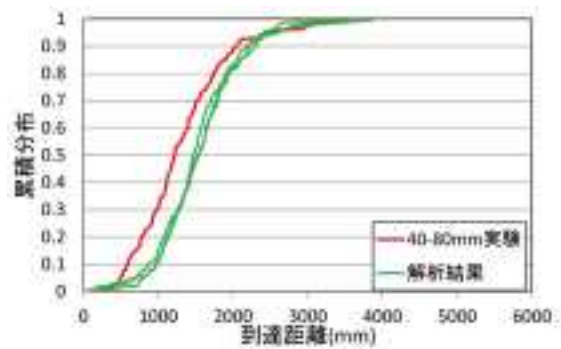
図 2.3.4-6 41度斜面, 高さ 80cm,  
法線方向反発係数 0.48, 接線方向反発係数[0.85, 1.05]の一様分布, 凹凸度 0.3



(1) 落石到達位置の分布



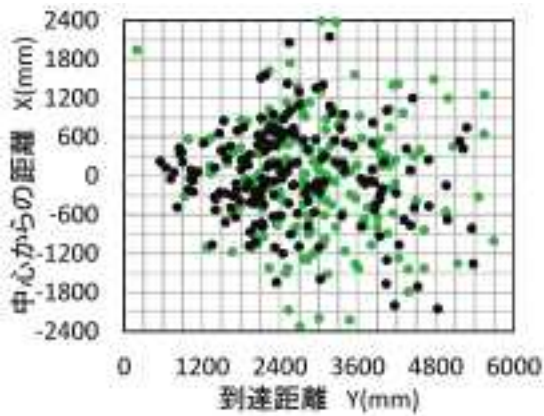
(2) X 方向(斜面直交)の累積分布



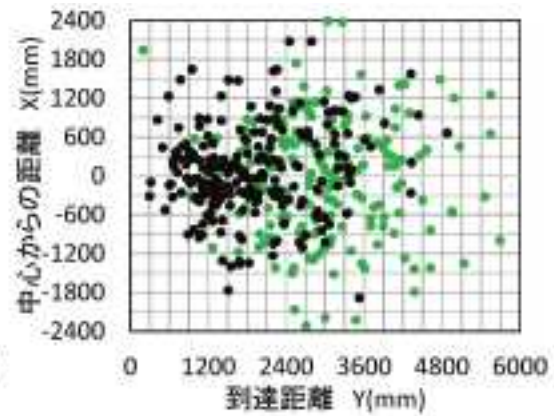
(3) Y 方向(到達方向)の累積分布

図 2.3.4-7 41 度斜面, 高さ 100cm,  
法線方向反発係数 0.43, 接線方向反発係数[0.85, 1.05]の一様分布, 凹凸度 0.3

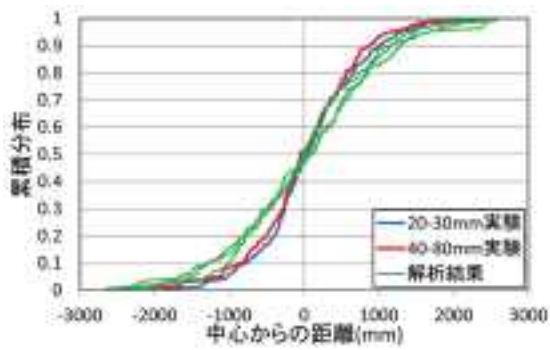
凡例  
 ●:実験  
 ●:解析



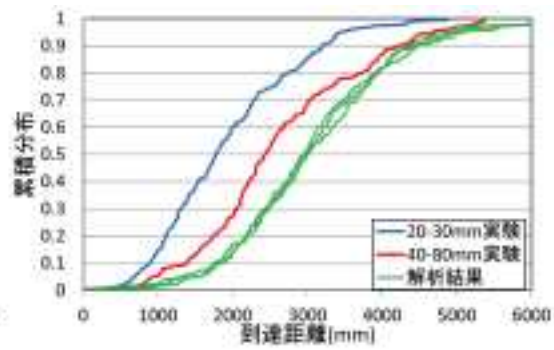
(1) 落石到達位置の分布(40-80mm)



(2) 落石到達位置の分布(20-30mm)

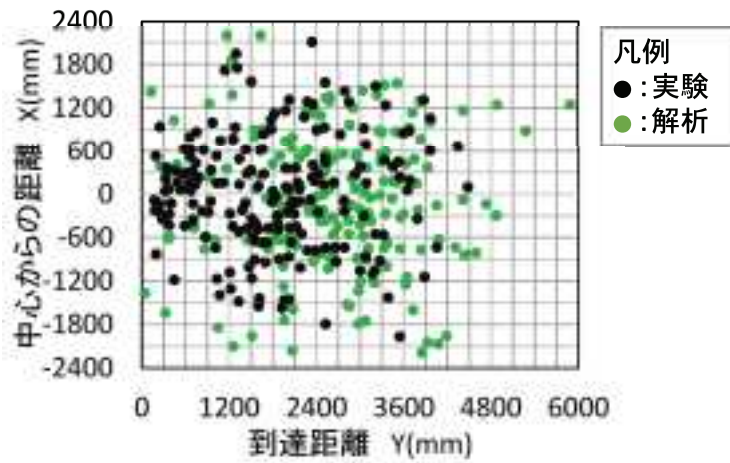


(3) X 方向(斜面直交)の累積分布

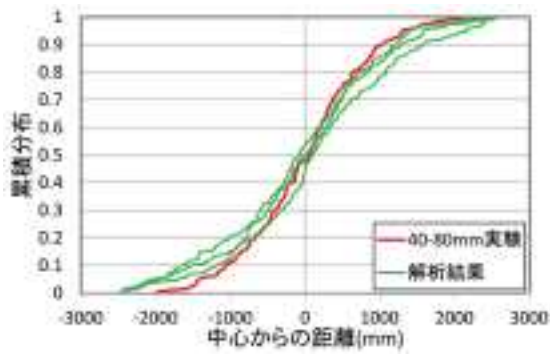


(4) Y 方向(到達方向)の累積分布

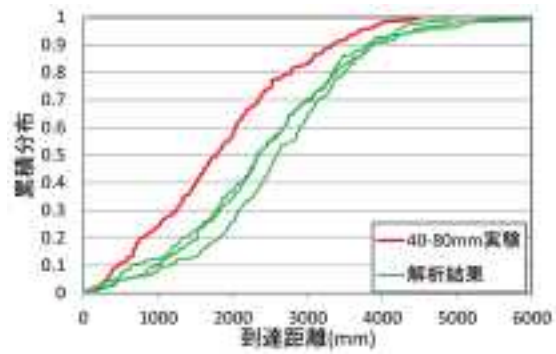
図 2.3.4-8 41 度斜面, 高さ 200cm,  
 法線方向反発係数 0.43, 接線方向反発係数[0.85, 1.05]の一様分布, 凹凸度 0.3



(1) 落石到達位置の分布



(2) X 方向(斜面直交)の累積分布



(3) Y 方向(到達方向)の累積分布

図 2.3.4-9 60度斜面, 高さ 200cm,  
法線方向反発係数 0.43, 接線方向反発係数[0.85, 1.05]の一様分布, 凹凸度 0.3

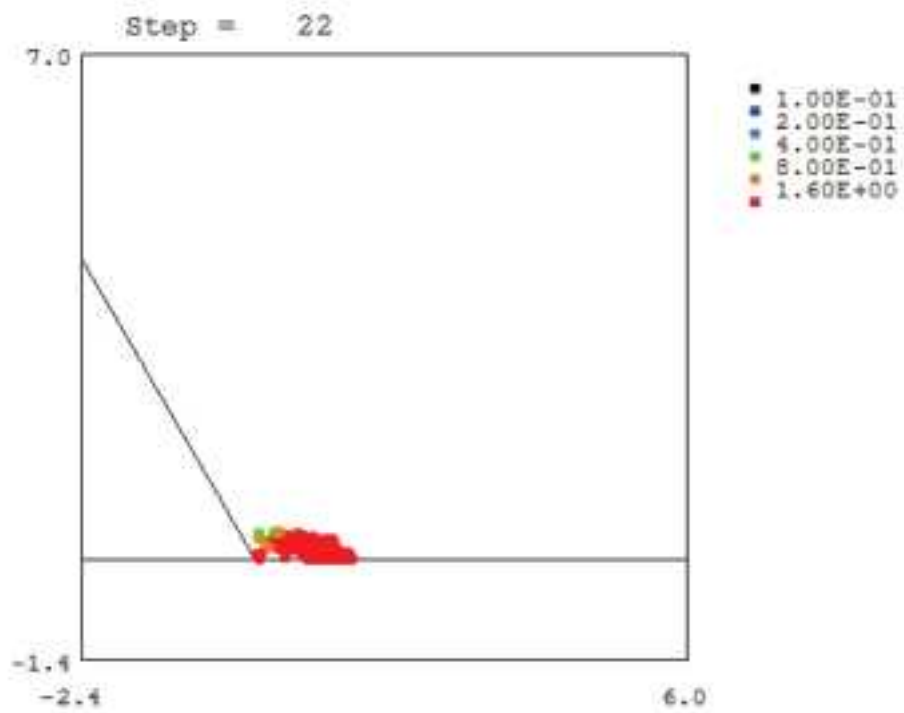


図 2.3.4-10 斜面直下での跳ね返りの様子  
 勾配 60 度，法線方向反発係数 0.43，凹凸度 0.3  
 法線方向反発係数 0.43，接線方向反発係数[0.85, 1.05]の一様分布，凹凸度 0.3

### 2.3.5 まとめ

滑落型崩壊形態における影響評価として、崩壊土塊の到達位置の特性評価について検討した結果についてまとめた。

その検討では乱数を用いた質点解析の実験結果の再現性について検討を行った。法線方向と接線方向の反発係数の値を別々に設定したところ、反発係数(法線 0.4, 接線 0.95), 凹凸度 0.30 とすると全体的な再現性が比較的良好な結果が得られた。しかし、実験結果に比べ直交方向のばらつきはほぼ一致しているものの、到達方向のばらつきはやや実験結果に比べて小さい。実験結果は斜面直下で停止する岩塊から遠くまで到達する岩塊が現れる。衝突の角度(岩塊の角など)によって接線方向の反発係数が大きくなる場合と小さくなる場合があると解釈して、接線方向の反発係数を確定値として扱い、仮に一様分布に従うとして多少のパラメタスタディーを行った結果、0.85-1.05 の間でばらつかせると再現性が向上した。さらなるパラメタスタディーや、接線方向の反発係数について正規分布などの導入を試すなどすればさらに再現性が向上すると思われる。さらなる詳細なモデル化は単なるフィッティングだけではなく、実験データの反発係数の分析など詳細な検討に基づいて決めることが好ましい。簡易 DEM や質点解析の十分な精度確認が重要である。



## 2.3.6 簡易 DEM モデルを用いた崩壊土塊の到達位置の特性評価

### 2.3.6.1 岩塊単体試験に対するシミュレーション検討

#### (1) シミュレーションケース

表 2.3.6-1 にシミュレーションケースを示す。ケースの番号は、実験における「試番」の番号に対応する。それぞれに対するシミュレーションモデルを図 2.3.6-1 に示す。落下させる粒子と同じ大きさの粒子を直径の間隔で格子状に配置する。試行回数は、括弧内に示した実験のそれによらず、一律 300 回とした。

#### (2) 解析のパラメータ

解析のパラメータに用いる試験体の反発係数は、表 2.3.6-2 の反発試験結果に基づき、3 回の試行結果のうち最も大きな値である 0.43 とした。別途実施したシュミットハンマー試験による硬度は、斜面で 36.6(材齢 73 日)、底板で 36.2(材齢 81 日)であった。名古屋工業大学における実績では、硬度 35.4 に対して同じ石灰岩の試料の反発係数が 0.47 であったことから、実験時の反発係数は「0.43」より大きい可能性がある。

法線方向減衰係数  $\eta_n$  と反発係数  $e$  と法線方向ばね係数  $kn$ 、質量  $m$  の関係は、次式であらわされる。本検討以降用いる個別要素法のマイクロパラメータを表 2.3.6-3 に示す。

$$\eta_n = \frac{|\log_e e| \cdot 2\sqrt{mk_n}}{\sqrt{\pi^2 + (\log_e e)^2}}$$

表 2.3.6-1 シミュレーションケース

ケース (試番)	斜面勾配 (°)	粒子サイズ	落下高さ (m)	試行回数
ケース 1	41	25mm	2.0	300(226)
			0.8*	300*(300)
ケース 2		60mm	0.5	300(188)
			0.8*	300*(300)
ケース 3			1.0	300(188)
ケース 4			2.0	300(191)
ケース 5			60	2.0





(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3



(d) ケース 4

図 2.3.6-1 シミュレーションモデル

表 3.2.6-2 反発試験結果

試番	試験名	落下対象 (砕石番号)	衝突対象	試験日	ケース	標点の種類	落下高さ cm	衝突時砕石挙動	標点No.	反発係数計測試験結果			備考										
										衝突速度の算出 V=Y/t mm/s	跳ね返り高さの算出 跳ね返り高さ H(修正) mm	反発係数 e=(2gh) <sup>1/2</sup> /V											
1		粒子A (83番)	流路底面	2014/10/29	10	標点なし	40	衝突後、若干斜めに跳ねた	1	3002.103000	45.355342	0.31											
									11	2929.606000	29.637165	0.26											
									14	2712.880000	52.323361	0.37											
2		粒子B (1番)	流路底面	2014/10/29	4	黒標点	40	衝突後、回転しながら跳ねた	1	2952.908500	42.676907	0.31	0.30	標点1・2の平均値									
									2	3035.936300	40.689422	0.29											
									斜 面 と 岩 塊 間 の 反 発 係 数 を 求 め る 試 験							10	特に問題なし	1	3004.148000	38.658014	0.29	0.28	標点1・2の平均値
																		2	3043.651500	33.732045	0.27		
																		1	2903.372000	21.922340	0.23	0.23	標点1・2の平均値
																		2	2902.596000	24.242315	0.24		
3		球形 (3番)	流路底面	2014/10/28	7	黒標点	10	特に問題なし	1	1413.968500	21.515009	0.46	0.43	標点1～9の平均値									
									2	1449.134500	18.563677	0.42											
									3	1552.619300	16.432880	0.36											
									4	1681.523000	13.830747	0.31											
									5	2691.147500	38.618562	0.30											
									6	2935.509500	44.316356	0.32											
										13		特に問題なし	7	1681.523000	13.830747	0.31	0.31	標点1～9の平均値					
													8	2691.147500	38.618562	0.30							
													9	2935.509500	44.316356	0.32							
													10	1413.968500	21.515009	0.46							
													11	1449.134500	18.563677	0.42							
													12	1552.619300	16.432880	0.36							

150728鉄道総研落石実験Y02取得データ実施要素試験Y跳ね返り特性Y(報告書)反発係数一覧.xlsx

表 2.3.6-3 個別要素法のマイクロパラメータ

要素半径(m)	0.03
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2,600
バネ係数(N/m)	2.0×10 <sup>6</sup>
粘性減衰係数(N・s/m) 40-80mmの実験用	3.98×10 <sup>2</sup>
摩擦係数(摩擦角)	0.577(30°)

(3) シミュレーション結果

シミュレーション結果の一例を図 2.3.6-2 に示す。斜面高さ 1m 勾配 41° 粒子径大のケースである。両者おおむね対応しているが、斜面直交方向は、DEM のばらつきが大きく、斜面流下方向は、実験の距離が若干大きめになっている。

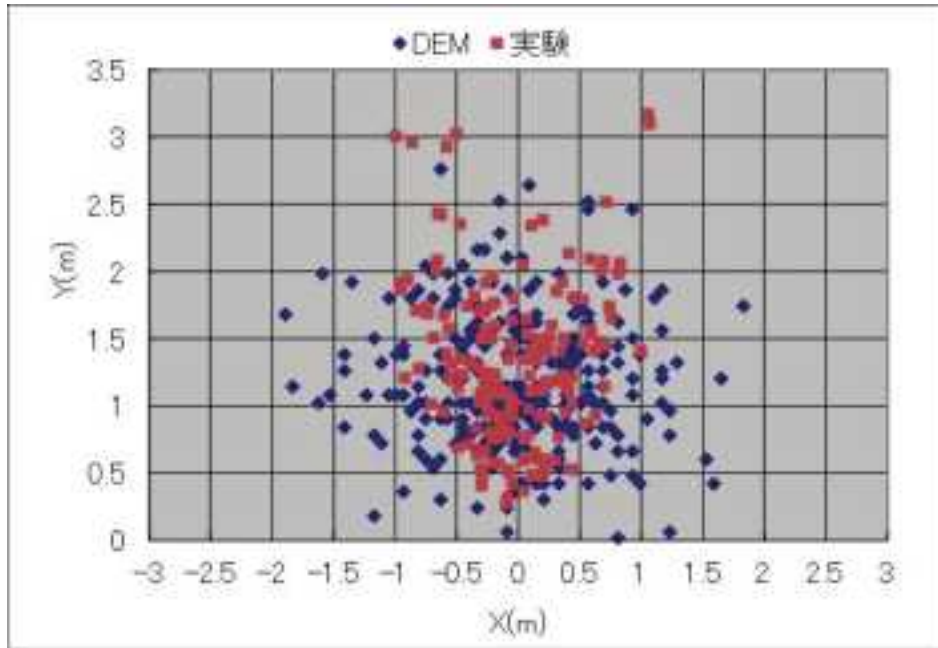
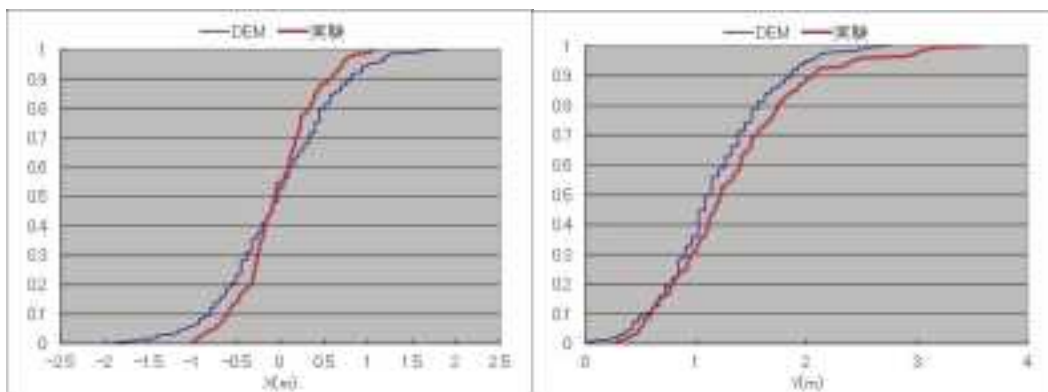


図 2.3.6-2 到達位置の比較



(a)斜面直交方向

(b)斜面流下方向

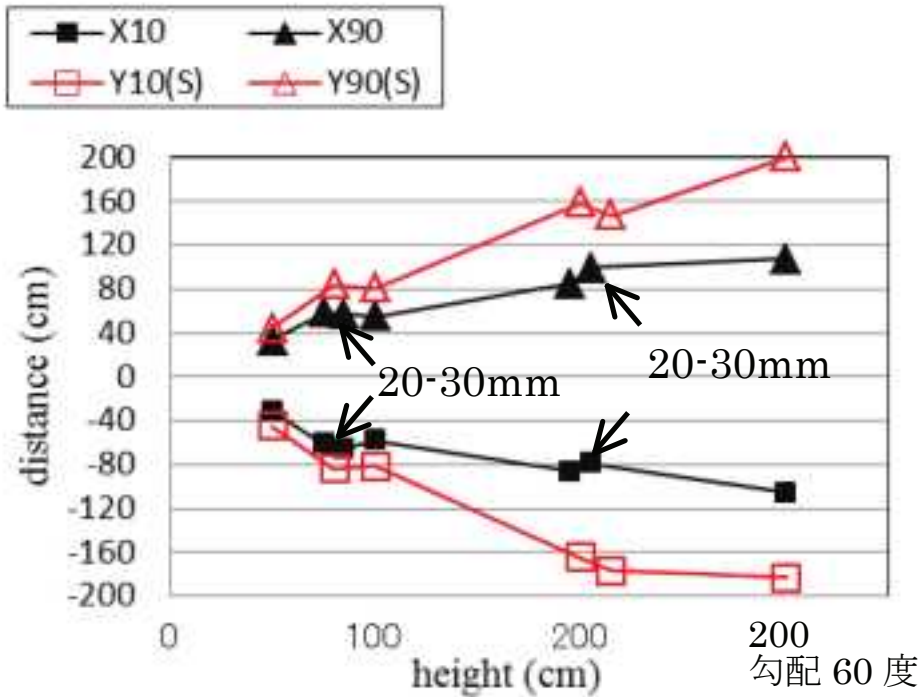
図 2.3.6-3 確率分布関数の比較

複数の条件での再現性を見るため、フラクタル値を図 2.3.6-4 に比較した。基本ケースは、斜面勾配 41 度、径 40-80mm である。実験では落下高さ 80, 200cm については径 20-30mm のケースもあるため、径 40-80 は落下高さ 75,195cm に径 20-30mm は 85,205cm の位置に図化した。同様に解析の径 25mm は落下高さ 210cm 位置に図化した。斜面直交方向の DEM のばらつきは大きいですが、斜面流下方向についてはおおむね対応している。また、斜面高さ 2m における粒径の大小、勾配の緩急によりあらわれる結果の差異を、ある程度表現できている。

斜面高さの小さいケースについて図を見やすくするため、斜面高さで基準化した斜面流下方向のグラフを図 2.3.6-5 に示す。斜面高さ 50cm の解析結果の対応が悪くなっている。斜面高さに対するモデルの分解能が荒いためではないかと考えられる。本検討から、

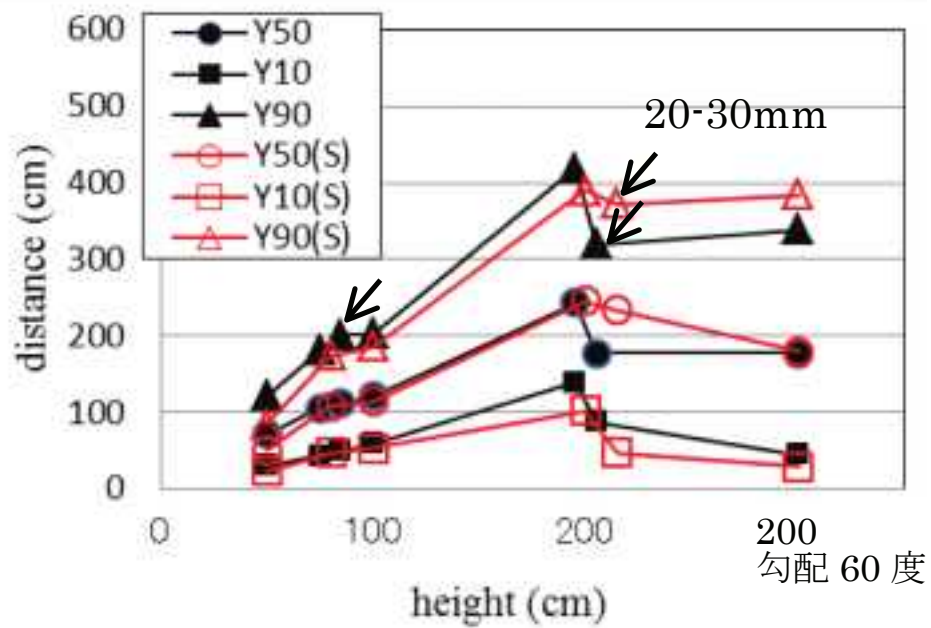
粒径は、斜面高さに対して 6/80 以下である必要があると言える。

凡例 ●■▲：実験，○□△：解析



(a) 斜面直交方向

図 2.3.6-4 フラクタイル値の比較



(b) 斜面流下方向

図 2.3.6-4 フラクタイル値の比較 —続き—

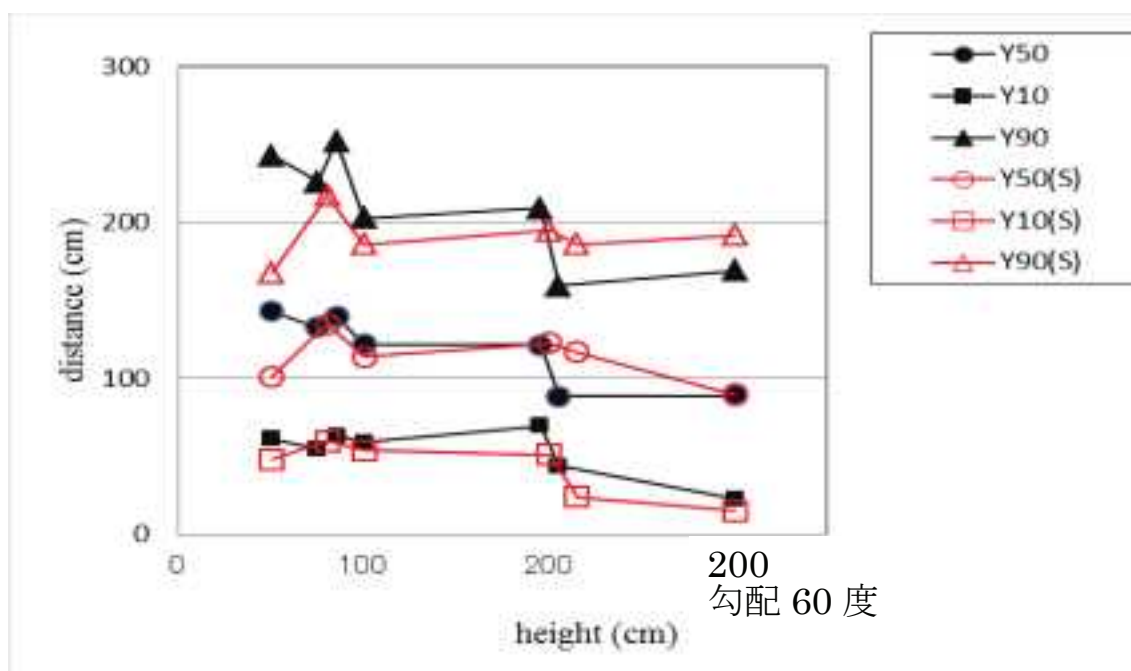


図 2.3.6-5 フラクタイル値の比較、斜面流下方向、斜面高さで基準化

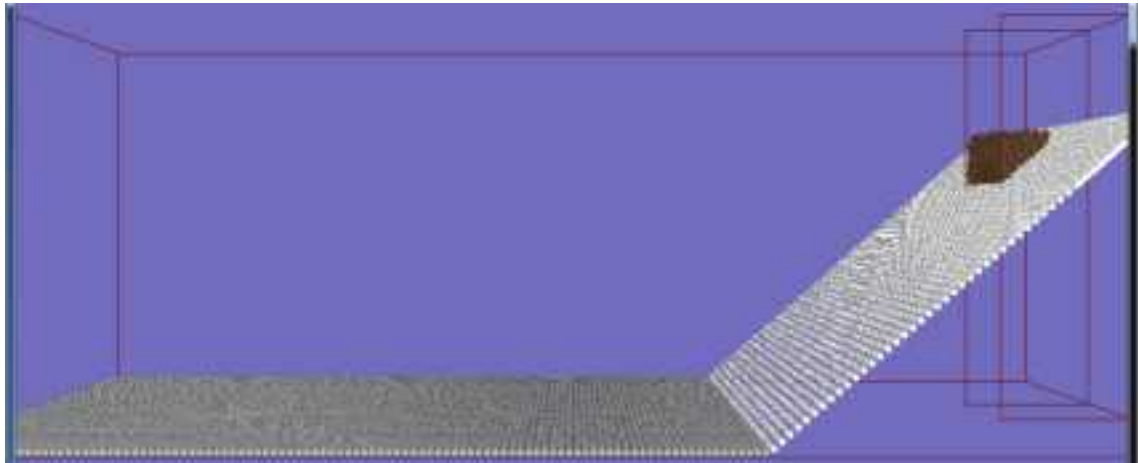
### 2.3.6.2 岩塊群試験に対するシミュレーション検討

#### (1) シミュレーションケース

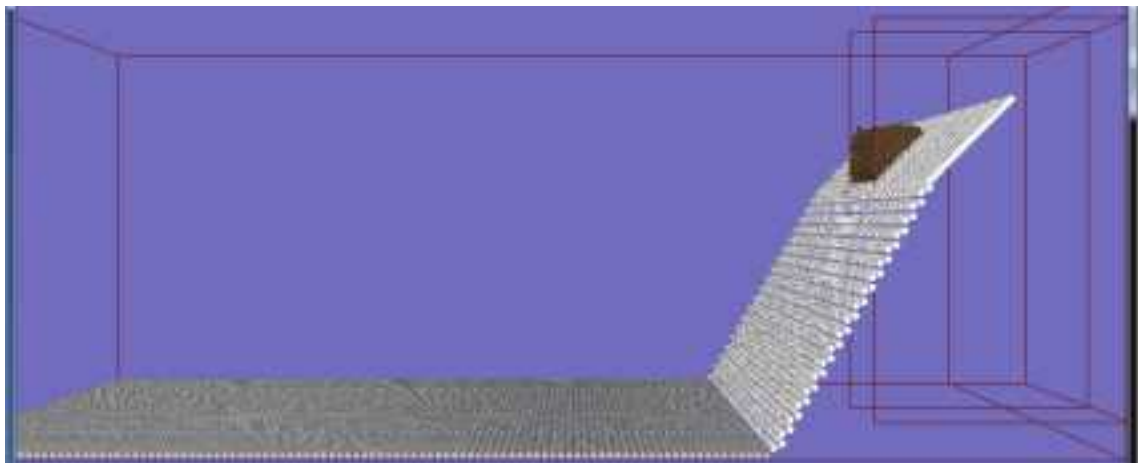
シミュレーションケースを表 2.3.6-4 に示す。ケースの番号は、実験における「試番」の番号に対応する。それぞれに対するシミュレーションモデルを図 2.3.6-6 に示す。落下させる粒子と同じ大きさの粒子を直径の間隔で格子状に配置する。落下個数は、括弧内に示した実験のそれによらず、一律 615 個とした。

表 2.3.6-4 シミュレーションケース

ケース (試番)	斜面勾配 (°)	粒子サイズ	落下高さ (m)	落下個数
ケース 1	41	60mm	2.0	615(615)
ケース 14	60	60mm	2.0	615(629)



(a) ケース 1



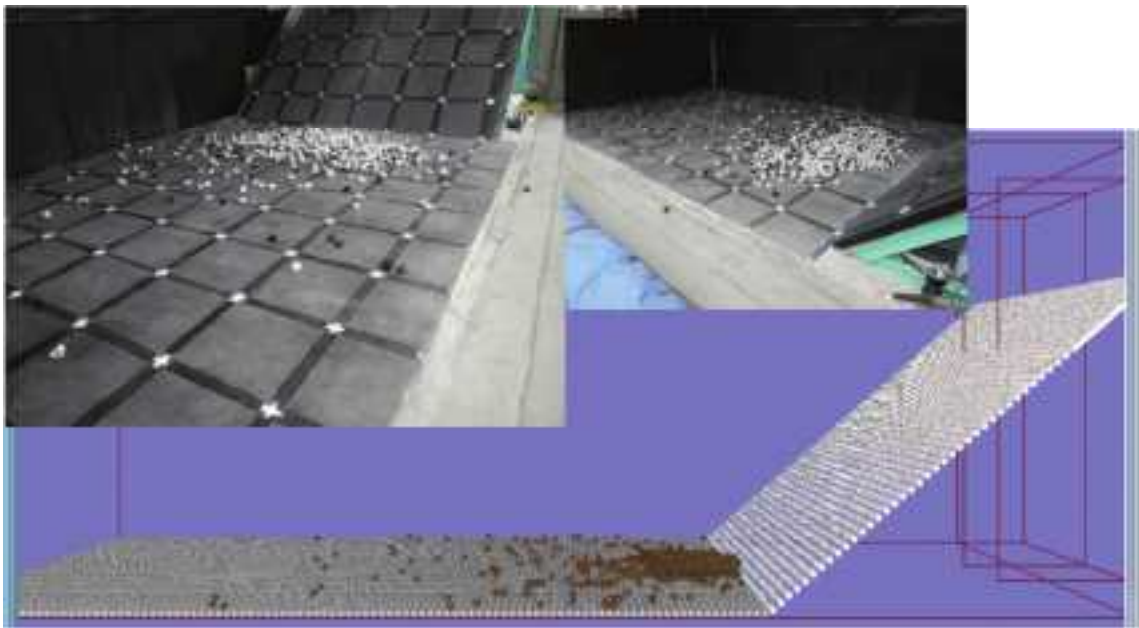
(b) ケース 14

図 2.3.6-6 シミュレーションモデル

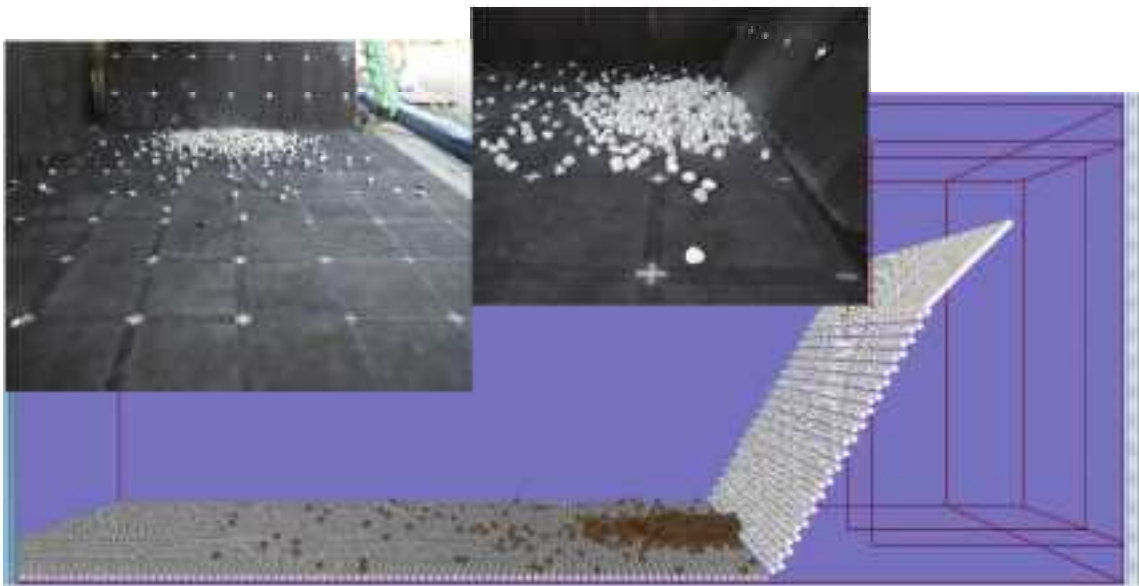
## (2)シミュレーション結果

シミュレーション終了時の様子を図 2.3.6-7 に示す。実験の試番 1 は、法尻からやや離れたところに岩塊が蓄積している。これに対してシミュレーションケース 1 は、図 2.3.6-8 に示すように法尻付近に岩塊が蓄積している。実験の試番 14 に対するシミュレーションは、図 2.3.6-9 に示すように対応が良い。しかし、勾配の緩急による結果の差異を、シミュレーションでは顕著には再現できなかったため、粒子間の反発係数を、現在より高く設定する等、今後もう一段の調整の必要がある。基本ケースに対して、反発係数に関するパラスタを実施した図 2.3.6-10 に結果を示す。





(a) ケース 1

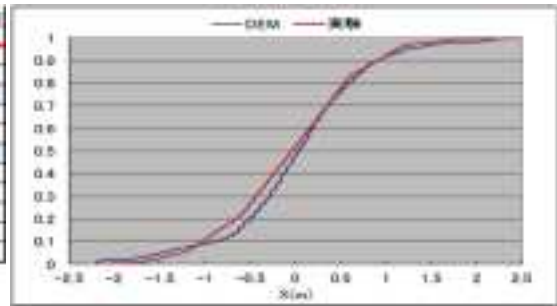


(b) ケース 14

図 2.3.6-7 シミュレーション終了時の様子

	2300	2025	1500	900	300	-300	-900	-1500	-2025	-2300
-300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.3	1.7	19.1	37.4	7.9	1.7	0.0	0.0
1500	0.0	0.0	0.9	3.5	4.3	4.7	4.2	1.9	0.0	0.1
2100	0.1	0.4	0.4	1.4	7.1	7.3	1.4	0.8	0.0	0.0
2700	0.0	0.0	0.2	0.5	1.0	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0
3300	0.0	0.0	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2
3900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
4500	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6300	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

実験(質量比の分布), 615個



割合	2025	1500	900	300	-300	-900	-1500	-2025	
15%~20%	-300	0	0	0.3	7.1	0.7	0	0	0
5%~15%	300	0.5	0.5	3.3	17.0	1.1	0.1	0.2	0
1%~5%	900	0.8	1.1	4.3	4	5.2	2.4	0.7	0.8
0%~1%	1500	1.4	1.3	0.3	0.2	1	1.6	0.5	0
	2100	0.5	0.7	0.2	0.5	0.3	0.8	0.3	0.3
	2700	0.2	0.3	0.2	0	0.2	0.7	0.3	0.5
	3300	0	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0.2
	3900	0	0	0.2	0	0.3	0	0.2	0
	4500	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0
	5100	0	0	0	0	0	0	0	0
	5700	0	0	0	0	0	0	0	0
	6300	0	0	0	0	0	0	0	0

DEM(質量比の分布), 615個

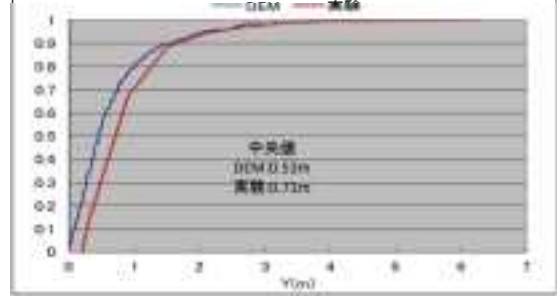
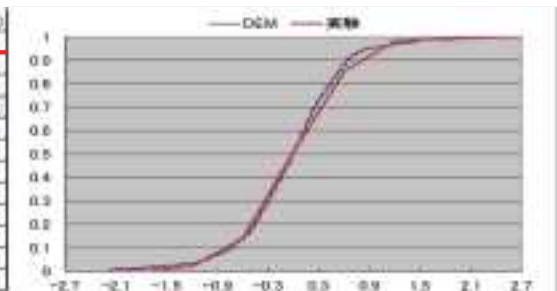


図 2.3.6-8 到達位置の比較 (ケース 1)

	2300	2025	1500	900	300	-300	-900	-1500	-2025	-2300
-300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.2	6.7	19.1	19.5	6.9	0.5	0.0	0.0
900	0.0	0.0	0.3	3.9	13.7	14.4	4.5	0.0	0.0	0.0
1500	0.2	0.0	0.5	7.3	2.2	2.1	1.4	0.5	0.0	0.2
2100	0.2	0.4	0.1	0.5	0.7	1.0	0.0	0.2	0.2	0.0
2700	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0
3300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
3900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

実験(数量比の分布), 629個



割合	2025	1500	900	300	-300	-900	-1500	-2025	
15%~20%	-300	0	0	0.2	9.1	1.4	0	0	0
5%~15%	300	0.3	0.4	6.3	24.7	19.5	9.8	0.5	0.3
1%~5%	900	0.3	0.5	4.0	10.7	7.5	0.7	0.3	0.3
0%~1%	1500	0.7	0.8	0.7	2.3	1.1	0.3	0.3	0
	2100	0.2	0.2	0.5	1	0.2	0.2	0	0.2
	2700	0.2	0	0	0.2	0.3	0.2	0.2	0
	3300	0.3	0	0.2	0	0.2	0.2	0	0.2
	3900	0	0.2	0.5	0	0.2	0.2	0.2	0
	4500	0	0.2	0	0	0.2	0.2	0	0
	5100	0	0	0	0	0	0	0	0
	5700	0	0	0	0	0	0	0	0
	6300	0	0.2	0	0	0	0	0	0

DEM(到達位置の分布), 615個

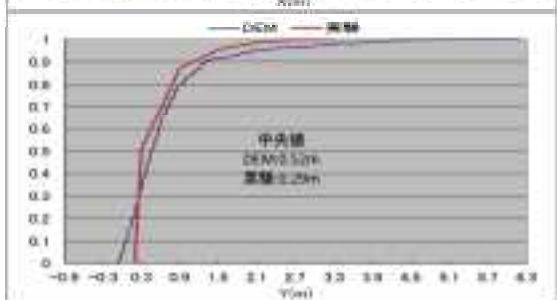


図 2.3.6-9 到達位置の比較 (ケース 14)



質量比  
 0%~5%  
 5%~15%  
 15%~25%  
 25%~35%

	2225	1500	800	300	-300	-800	-1500	-2225
-300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

反発係数0.5B

	2225	1500	800	300	-300	-800	-1500	-2225
-300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

反発係数0.43

	2225	1500	800	300	-300	-800	-1500	-2225
-300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5700	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

反発係数0.1

図 2.3.6-10 反発係数のパラスタ

## 2.4 崩壊土塊の衝突速度の評価

DEM 等で、岩塊の到達位置の分布が予測された後、対象構造物以遠の領域を積分することによって衝突確率を求める他、残存距離をパラメータとした衝突速度ハザードを求めることが考えられる。このためには、速度と残存距離との関係をモデル化する必要がある。ここでは、その資料とするため、実験、DEM および一質点モデルについて、岩塊を単独で落下させた時の速度と残存距離との関係を整理する。

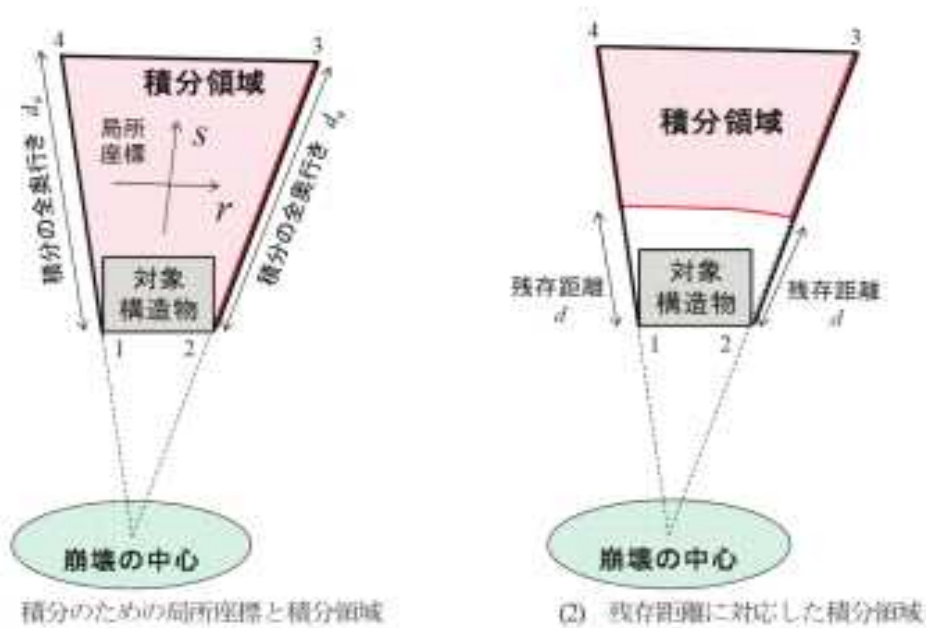


図 2.4-1 衝突確率算定のための到達位置座標に関する積分領域

(1) データの整理法

図 2.4-2 に、DEM の解析例を示す。図は、右方から転動してきた岩塊の XZ 平面上の軌跡 2 例である。赤い点線が法尻を示しており、これより左側が平坦部である。平坦部に入射し直後から、各ステップでの水平移動距離とその時点における絶対速度の関係を、図 2.4-3 に示す。このグラフに対して、水平移動距離の平方根を骨格とするフィッティング曲線を用いて、この曲線との残差自乗和が最小となる見かけの摩擦係数を求め評価値とした。見かけの摩擦とは、質点が平面上を転動したり跳躍することなく滑動する運動に置き換えた場合の摩擦を表している。摩擦係数が大きいほど、最終到達地点に至るまでの速度が相対的に大きいことを示している。フィッティングの例を図 2.4-4 に示す。

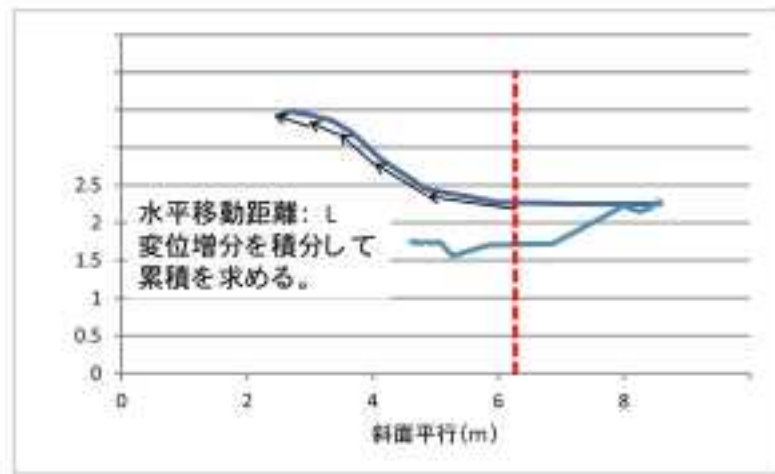
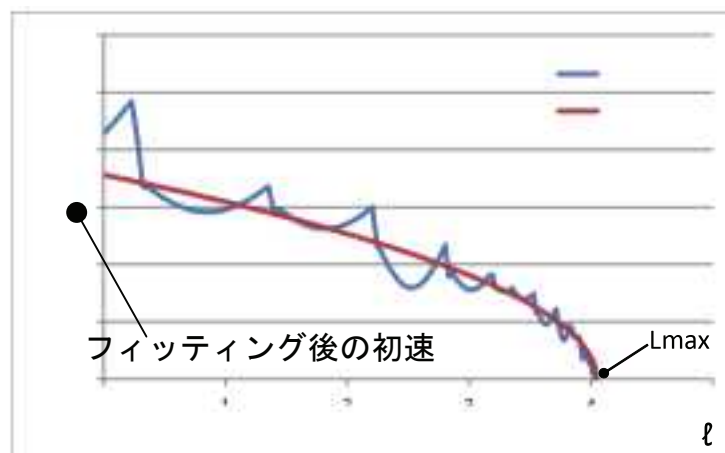


図 2.4-2 DEM の解析例、XZ 平面上の軌跡



絶対速度:  $V = (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{0.5}$   
 水平移動距離:  $l$

フィッティング曲線:  $v = (2\mu g D)^{0.5}$

$\mu$ : 見かけの摩擦係数  
 $D$ : 残存距離、 $L_{max} - l$  図2-1での定義とは異なる

図 2.4-3 絶対速度－水平移動距離関係

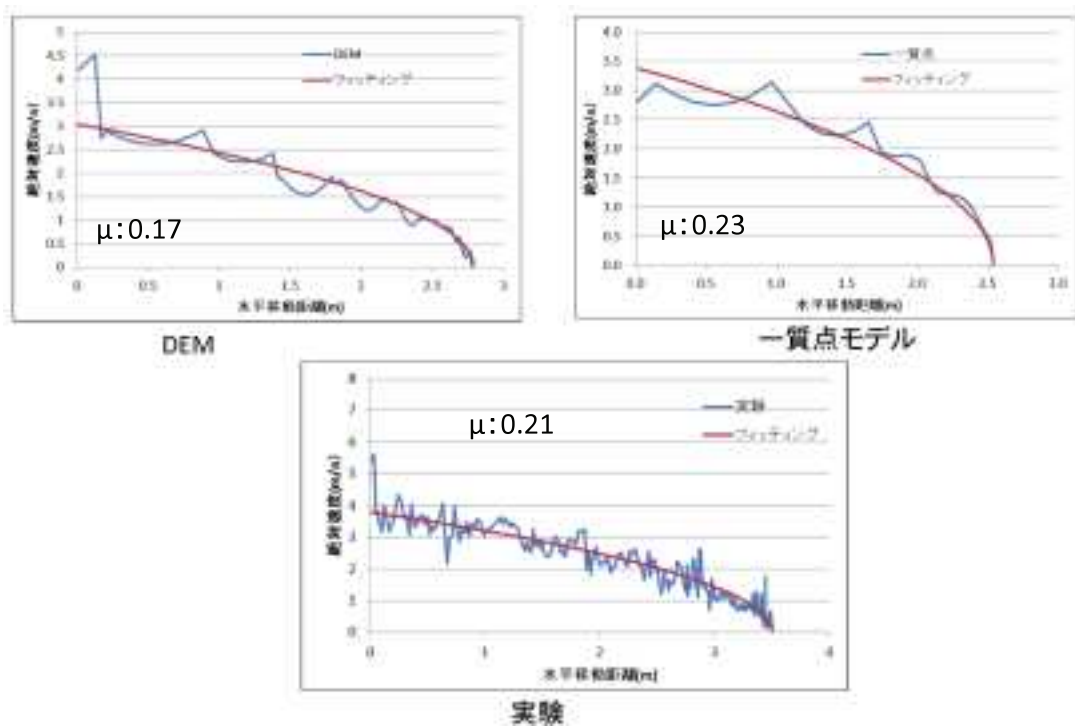


図 2.4-4 フィッティングの例（斜面高さ 2.0m、勾配 41°）

## (2) 分析結果

図 2.4-5、図 2.4-6 および図 2.4-7 に、実験、DEM および一質点モデルの分析結果を示す。実験において、見かけの摩擦係数~最終水平移動距離(Lmax)、見かけの摩擦係数~フィッティング後の初速関係に、一定の相関が認められる点が興味深い。DEM、質点モデルではこの傾向が認められない。見かけの摩擦係数の平均値は、質点モデルで 0.27、DEM で 0.18、実験では 0.16 であった。質点モデルの値が大きいのは、回転を考慮していないためである。

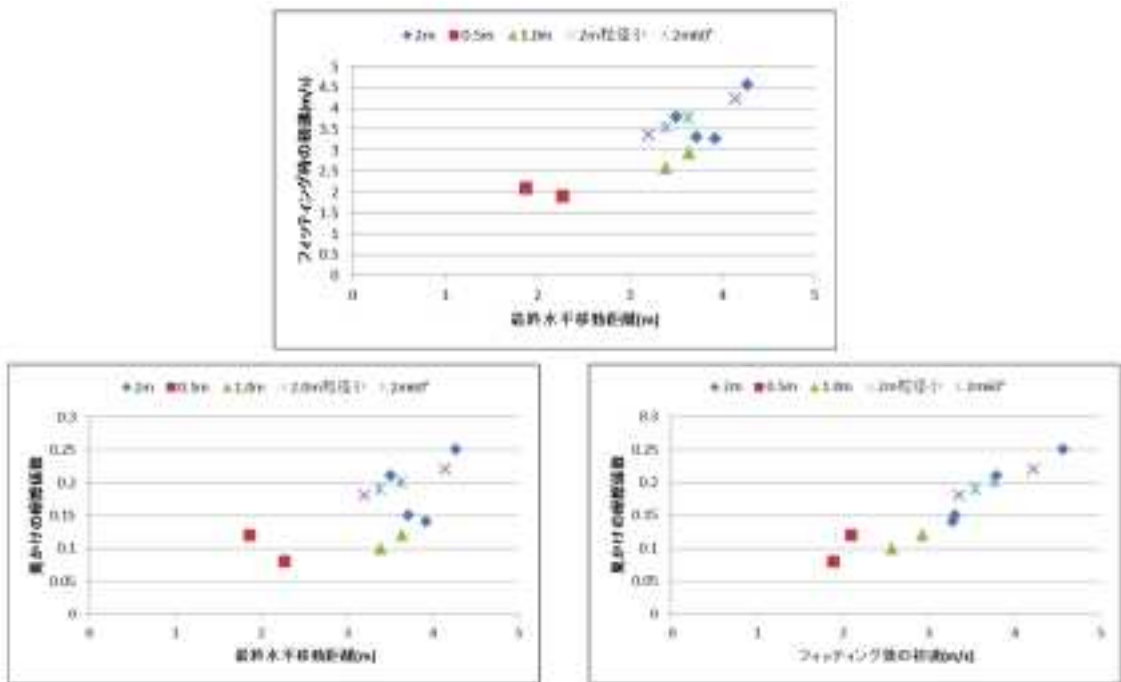


図 2.4-5 実験、フィッティング後初速～最終水平移動距離～見かけの摩擦係数関係

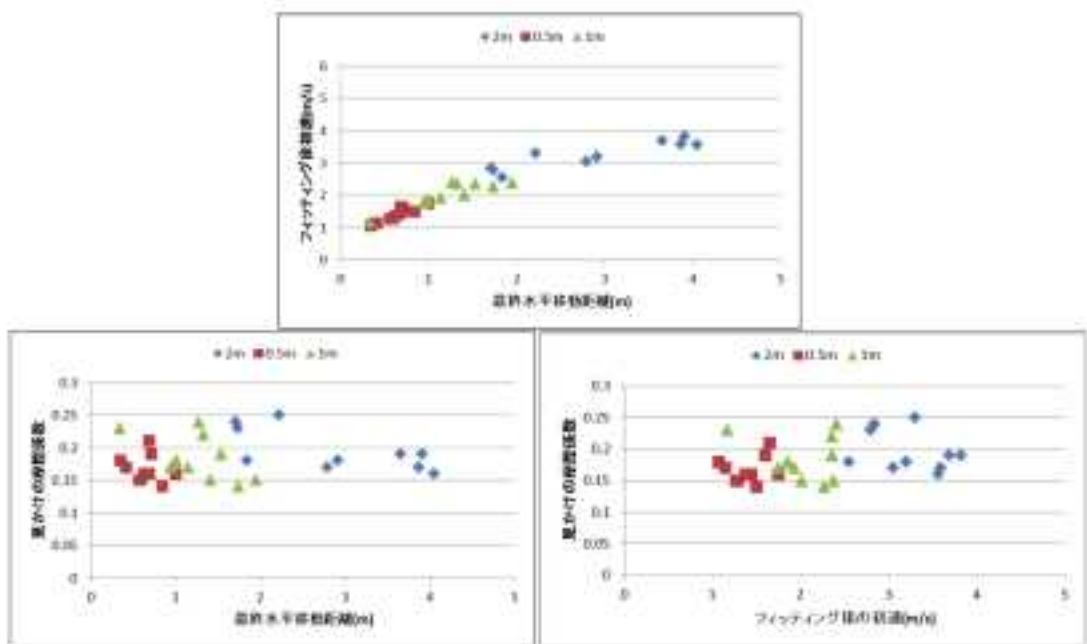


図 2.4-6 DEM、フィッティング後初速～最終水平移動距離～見かけの摩擦係数関係

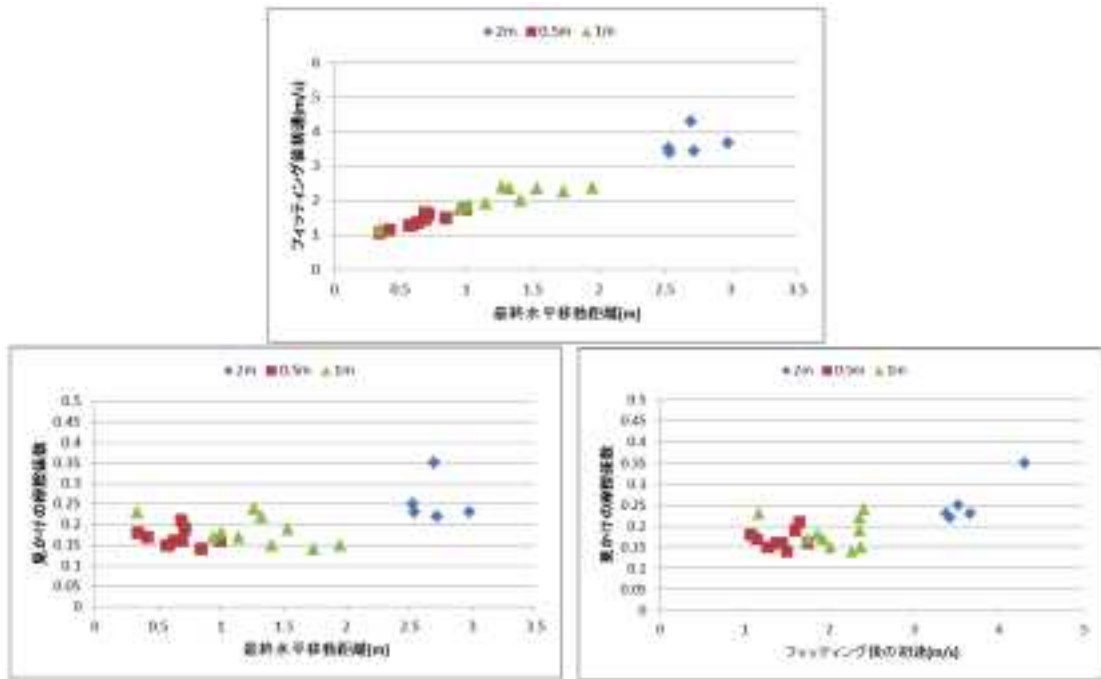


図 2.4-7 一質点、フィッティング後初速～最終水平移動距離～見かけの摩擦係数関係

## 2.5. 崩壊土塊の堆積土量の評価

### (1)実験の再現解析

実斜面が崩壊する場合、そこには細粒分が含有しており、これによって堆積状態が変化することが考えられる。一般的には、図 2.5-1 に示すように、細粒分の含有率が高くなるほど、岩塊の転動量が小さく法先近傍の堆積量が大きくなる傾向がある。

ここでは、第一章 2 節の 41° 斜面を対象に実施したシミュレーションを基本ケースとし（反発係数 0.43）反発係数をパラメータとして、岩塊の堆積状態をどの程度コントロールできるかシミュレーション検討を行う。反発係数 0.43 および 0.1 のシミュレーション結果を図 2.5-2 に示す。反発係数によって到達距離や法先の堆積状況に差が生じる様子がわかる。



図 2.5-1 実験、細粒分含有率による堆積状態の差

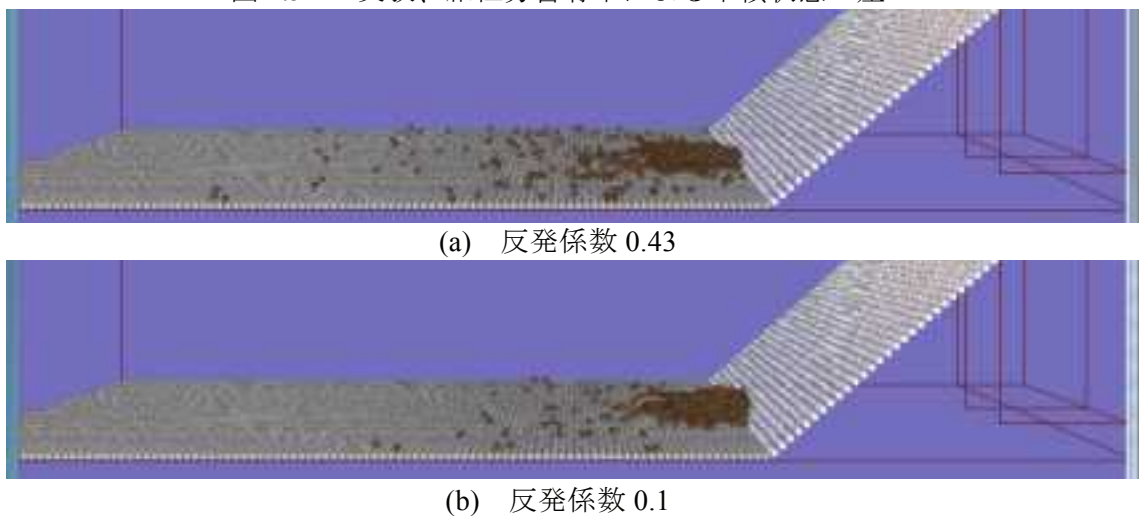


図 2.5-2 シミュレーション結果



図 2.5-3 は、反発係数を 0.58、0.43、0.28 および 0.1 とした場合の結果である。反発係数によって堆積状態をある程度コントロールすることができる。しかし、実験における細粒分含有率 60%の結果のような、法先ではあるが斜面上に大量の土砂が堆積するような状態を再現するためには、別のコントロールパラメータ、具体的には「転がり摩擦」の導入が必要である。



図 2.5-3 シミュレーション、反発係数による堆積状態の差

(2)三次元個別要素法に係る解析手法の整備

解析結果を図 2.5-4 に示す。最初の 10 秒間に、自重で崩壊した土砂の第一波がほぼ最大の距離に到達した後、覆いかぶさるように徐々に崩壊が継続している。本解析は、一回あたり、プリポスト処理を合わせおおむね一日の作業時間がかかるため、MCS を実施することは困難である。

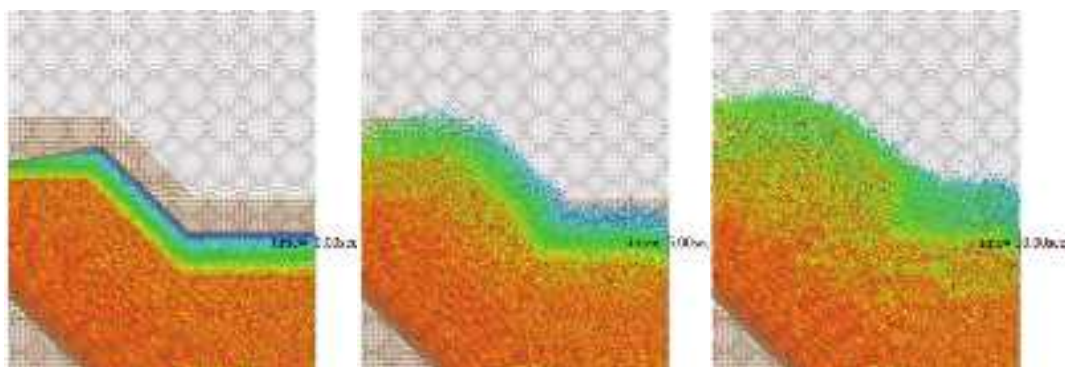


図 2.5-4(1) 解析結果

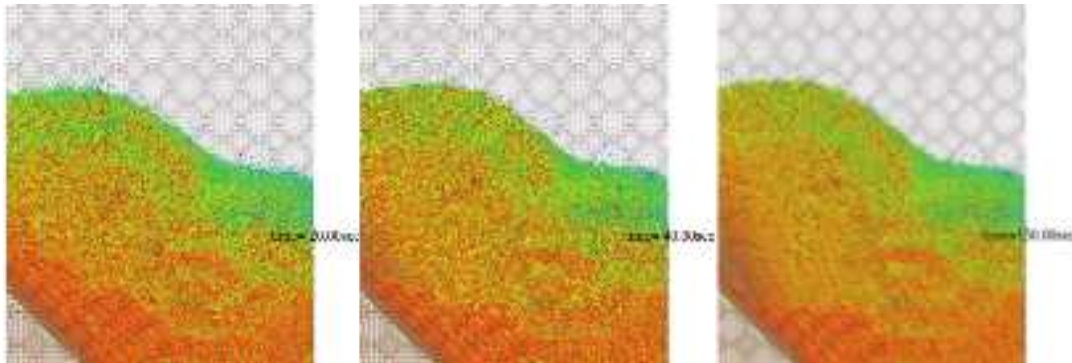


図 2.5-4(2) 解析結果

### 参考文献

- 1) 原子力規制委員会，基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド，2013.
- 2) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987，社団法人日本電気協会，電気技術基準調査委員会，1987.
- 3) 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準，日本原子力学会，2007.
- 4) 原子力安全基盤機構：基礎地盤及び斜面の安定性に係る設計・リスク評価手引き，JNES-RE-2013-2037，2014.
- 5) 土木学会原子力安全土木技術特定テーマ委員会：原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言（土木工学からの視点），2013.
- 6) 吉田郁政，内藤直人，中瀬仁：斜面崩壊による岩塊や落石の衝突ハザードの評価法，土木学会第34回地震工学研究発表会講演論文集，2014.
- 7) Cundall, P. A., and O. D. L. Strack: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Géotechnique*, 29, 1979.
- 8) 中瀬仁，曹国強，田部井和人，栃木均，松島亘志：個別要素法による原子力発電所周辺の地震起因性斜面崩落挙動のモデル化と適用性，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71, No.4(地震工学論文集第34巻)，I\_476-I\_492, 2015.
- 9) 吉田郁政，内藤直人，中瀬仁：斜面崩壊による岩塊や落石の衝突ハザードの評価法，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71, No.4(地震工学論文集第34巻)，I\_136-I\_144, 2015.
- 10) 栃木均：地震時崩落岩塊の到達距離に関する影響要因の検討-斜面崩壊を想定した振動台実験と二次元個別要素法解析による影響予測手法の開発，電力中央研究所報告，N08084，2009.
- 11) 栃木均：地震時崩落岩塊の到達距離に及ぼす岩塊の大きさと形状の影響，電力中央研究所報告，N09021，2010.
- 12) 右城 猛，楠本雅博，加賀山肇：岩盤上の表土が落石の跳ね返り速度に及ぼす影響に関する研究，第6回地盤と環境に関するシンポジウム講演概要・技術論文集，地盤工学会四国支部徳島県地盤工学研究会，2009.
- 13) Sakaguchi, H., Ozaki, E. & Igarashi, T. : Plugging of the Flow of Granular Materials during the Discharge from a Silo, *Int. J. Mod. Phys. B*, 7, 1949-1963, 1993.