

## 第5章 落石シミュレーションの実例と考察

### 5.1 はじめに

本研究の課題とする落石シミュレーションの開発は、従来の方法では取り扱うことのできなかったこと、あるいは限界のあることを明らかにし、落石対策検討上必要な情報を得ることである。すなわち、地形の変化や斜面性状の不均質さについても考慮でき、落石の軌跡やエネルギーを予測することである。本章では、実際の落石地をモデルとした解析事例を示す。ここでは、3次元落石シミュレーションが特に有効と考えられる谷地形と尾根地形を選定し、落石の到達域や運動エネルギー、跳躍高さについて照査する。そして、それらの結果の解釈と対策工計画時の適用についての考え方を述べる。

### 5.2 谷地形での解析事例と考察<sup>1)</sup>

本節では 2.7.1 の「鳥取県西部地震時の落石状況と地形および崩壊斜面の調査解析」で述べた大規模落石地域の内、谷地形を有する C 地区において実施した落石シミュレーションについて述べる。図 5.2.1 に対象地の平面図を示す。図中左側の谷部を解析対象とした。



図 5.2.1 大規模落石箇所平面図 (C 地区)

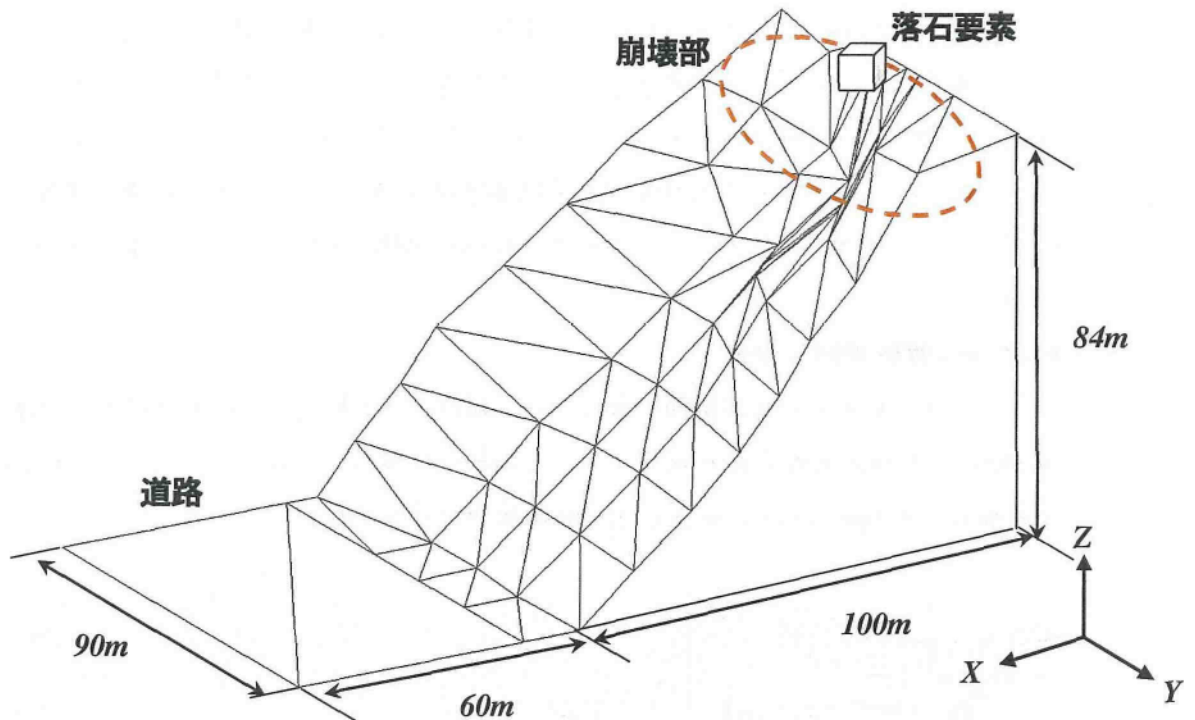


図 5.2.2 谷地形の解析モデル図

解析に用いたモデルは、斜面の水平距離が概ね X 方向に 100m、Y 方向に 90m、落差 84m の谷地形である。崩壊部付近は急崖地であり、10m～20mの落差を持つ。斜面中腹から平坦面にかけては極端な地形変化は存在せず平面的である。X=100m 以降は平坦面であり、60m の長さがある。

落石要素は一辺 1m の正六面体であると仮定した。落石要素の初期位置については、崩壊上部に 5 箇所を仮定し、a～e 点とした。1 箇所につき 1000 回のシミュレーションを試行し、その軌跡を追った。また落下途中の運動エネルギー及び跳躍高さを算出する一方法として、後出の図 5.1.4 に示すように A-A'、B-B'、C-C'、D-D' のように、4 つの断面を仮定し、この断面を通過する時の値を出力した。

落石の運動に影響を与える要因をこの例では次のように扱った。

- ランダム (random) とした事項

$$\text{減衰定数 } \eta/\eta_0 = \bar{\eta}/\eta_0 \pm 20\%$$

(変動係数 20% の正規分布)

- 未知 (unknown) とした事項

岩塊の形状, 初期位置, 初速度, 地表面を表す三角形頂点の座標値, 地表面の微視的变化, 減衰定数  $\eta/\eta_0$  と  $\phi$  の中央値.

以上の考えをもとに, 解析定数を表 5.2.1 に設定した. ランダム (random) とした減衰定数は, 落石要素が斜面と接触する毎に変化させ, モンテカルロ手法を用いて, 1000 回の変化を通して, その分布が正規分布に従うようにした. 落石の初期位置については, 表 5.2.2 に示す範囲で試行毎に, 多少のばらつきを与えている. 減衰定数 0.16 と 0.28 は, 反発係数  $Re$  に換算すると 0.6 と 0.4 であり, 岩盤斜面における硬岩と軟岩に相当する<sup>2)</sup>と仮定した.

表 5.2.1 解析に用いた入力定数

	解析 I	解析 II
形状	立方体	立方体
大きさ	1m × 1m × 1m	1m × 1m × 1m
密度	2.650Mg/m <sup>3</sup>	2.650Mg/m <sup>3</sup>
減衰定数	0.16 ± 0.16 × 0.20	0.28 ± 0.28 × 0.20
表面摩擦角	30°	30°
初期	0(静止)	0(静止)

表 5.2.2 落石要素の初期位置

	X(m)	Y(m)	Z(m)
a	15.80	18.55 ± 0.05	71.00 ± 0.50
b	5.70	36.80 ± 0.05	82.00 ± 0.50
c	5.90	48.40 ± 0.05	83.00 ± 0.50
d	18.00	65.90 ± 0.05	77.00 ± 0.50
e	22.30	79.20 ± 0.05	80.00 ± 0.50

解析は表 5.2.1 に示した条件を用いて解析 I と解析 II の 2 つの例について実施した結果について述べる。図 5.2.3, 図 5.2.4 は 5000 回の試行のうちから任意に 500 例の要素重心軌跡の水平面への投影図を示している。

解析 I について述べる。a の位置から落下し始めたものは水平方向の広がりが小さく、軌跡が集中している。初期位置が e の例についても同様のことがいえる。初期位置が b, c, d の例については、a や e の例と比較すると落石要素の通過する位置に広がりが見られる。しかし、これらの例は解析初期の段階で落下する方向が決まるとも言える。X=30m あたりを越えると、どの例も落石要素は等高線に直交するように運動している。

解析 II についても解析 I と同様のことがいえるが、どの例も解析 I と比べて落石要素の広がり範囲が狭くなっている。また、落下距離が短くなっているということも図からわかる。これは減衰定数の平均値が解析 I の方が小さく（反発係数が大きい）、落石要素が地表面と接するときのエネルギー損失が小さいためである。

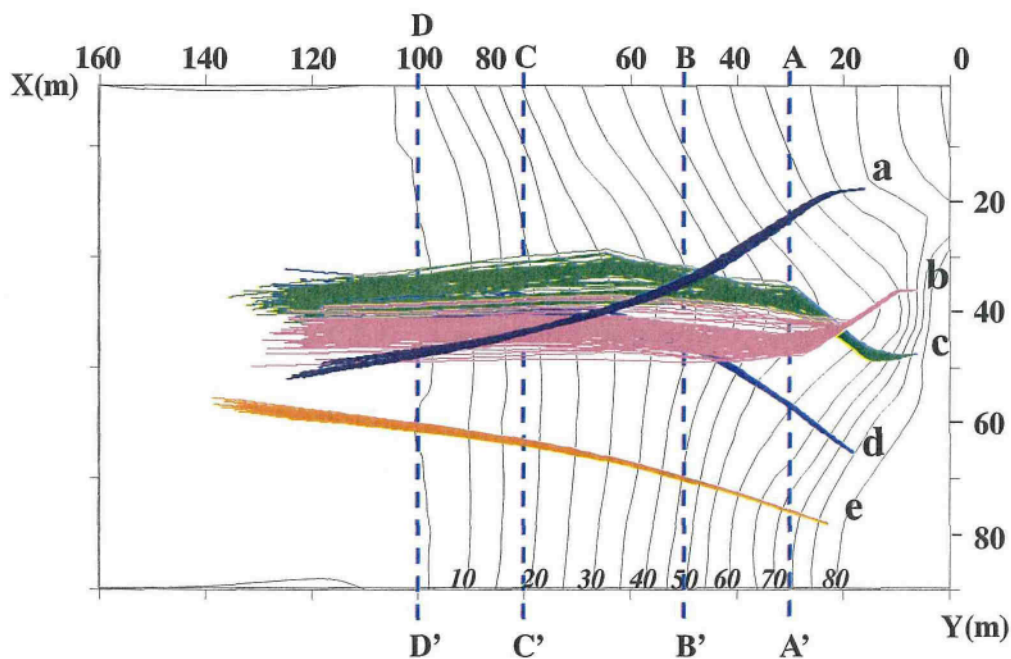


図 5.2.3 要素軌跡の水平面への投影図 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0 = 0.16 (Re = 0.6)$ )



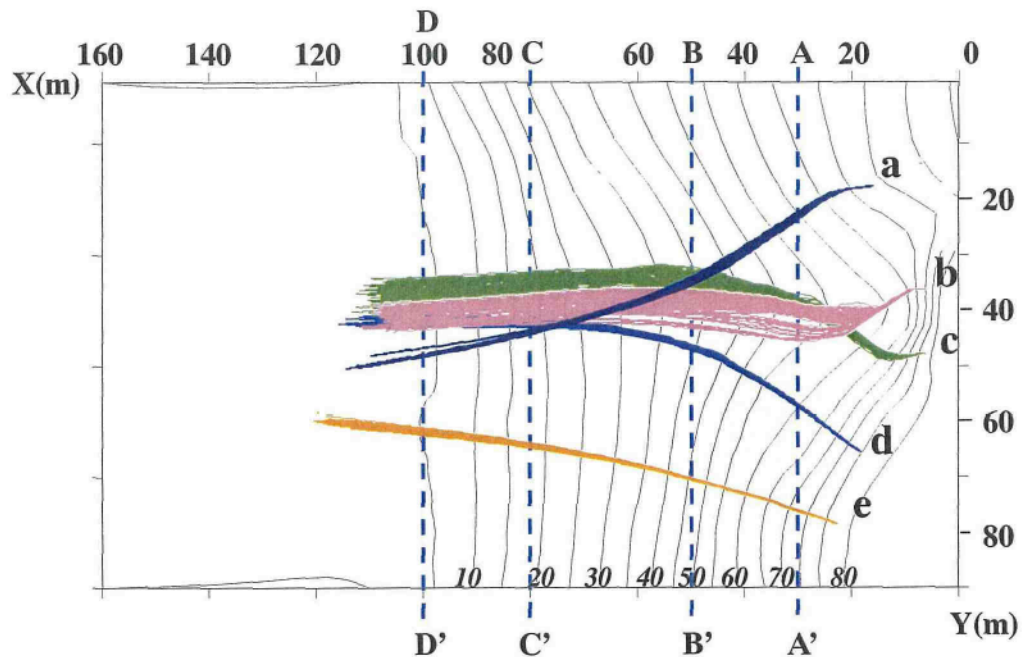


図 5.2.4 要素軌跡の水平面への投影図 (解析Ⅱ,  $\bar{\eta}/\eta_0 = 0.28 (Re = 0.4)$ )

図 5.2.5 及び 5.2.6 は、最終的に要素が停止した位置を示している。5000 回試行した全ての例の停止位置である。

解析Ⅰでは、停止位置は斜面から平坦面へ遷移する地点から水平距離にして 10m 以上離れたところまで到達し停止している。停止域は、およそ X 方向に 45m, Y 方向に 30m であり, X=140m を越えて停止する例もいくつかある。斜面途中で停止する例はなかった。

解析Ⅱでは、停止域はおよそ X 方向に 20m, Y 方向に 30m であり, 解析Ⅰよりも斜面に近い位置で停止している。こちらの場合も斜面途中で停止する例はなかった。

谷地形においては、要素の初期位置が多少異なっても類似する軌跡を辿るが、落石到達位置は粘性係数比により異なってくる。

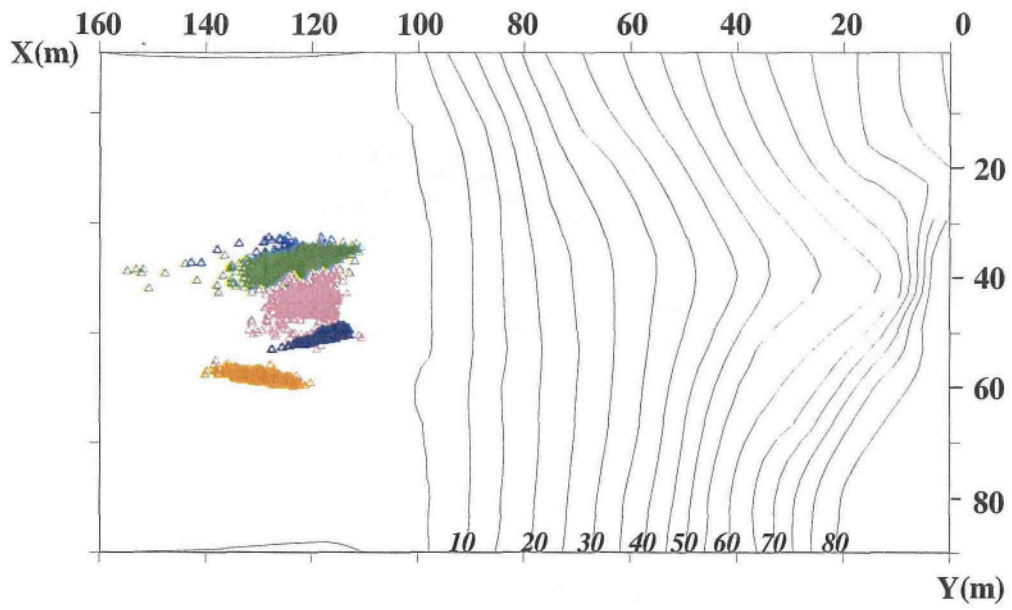


図 5.2.5 要素停止位置の分布 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.16 (Re = 0.6)$ )

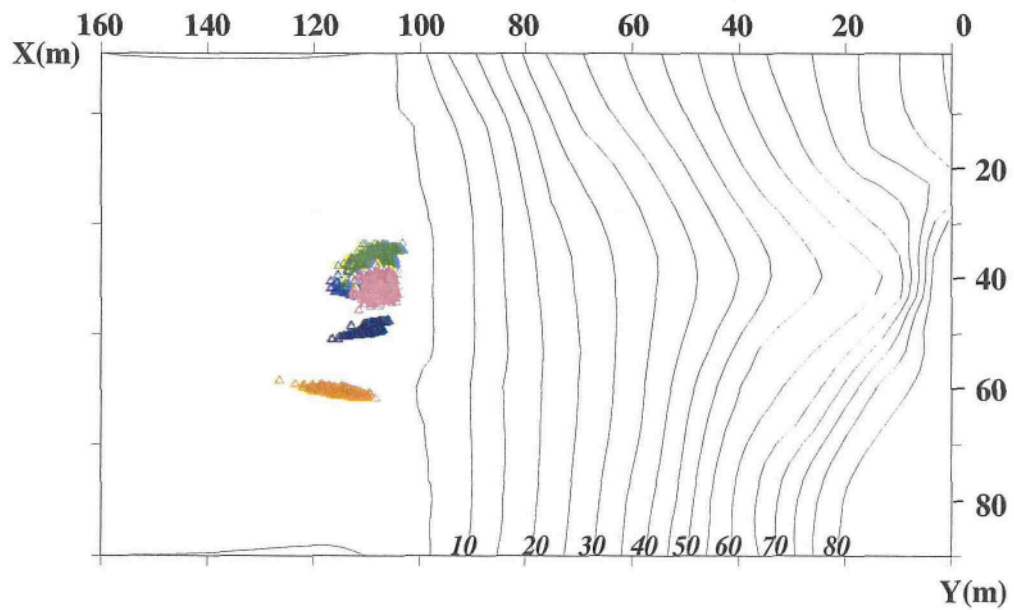


図 5.2.6 要素停止位置の分布 (解析 II,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.28 (Re = 0.4)$ )

図 5.2.7 は落石体積と相対到達距離の関係を示したものである。C地点で実際に発生した落石のデータと解析結果をプロットした。相対到達距離とは、落石到達位置を崩壊頭部である遷急点から斜面末端の平坦面までの水平距離で相対化したものである。現地データに関しては初期位置不明であるので崩壊部を初期位置として仮定して求めた。

現地データに関しては、平坦面まで到達した例よりも斜面途中で停止した例が非常に多く、図の左上に集中している。しかし、体積の大きなものは平坦面に達する傾向も見受けられる。これに対し、解析の場合は全て平坦面に到達しているため、相対到達距離は 1.0 以上となる。但し、最終到達位置に関しては、反発係数が低い  $Re=0.4$  の場合は現地での最終到達位置に近い値を示している。

現地斜面の途中で停止した落石は、位置エネルギーや落石の大きさ・形状、植生、微地形などの影響によって運動を制限されたものと考えられるが、本研究では、これらの影響を受けない自由度が高く、エネルギーの高い落石を対象としているため、一概に比較することはできない。今回の解析においては、落石要素の体積を  $1\text{m}^3$  とし、正六面体として取り扱った。しかし実際には、体積も様々であり、形状も板状や塊状と一定ではない。このため、将来的には、これらも考慮する必要があると考える。

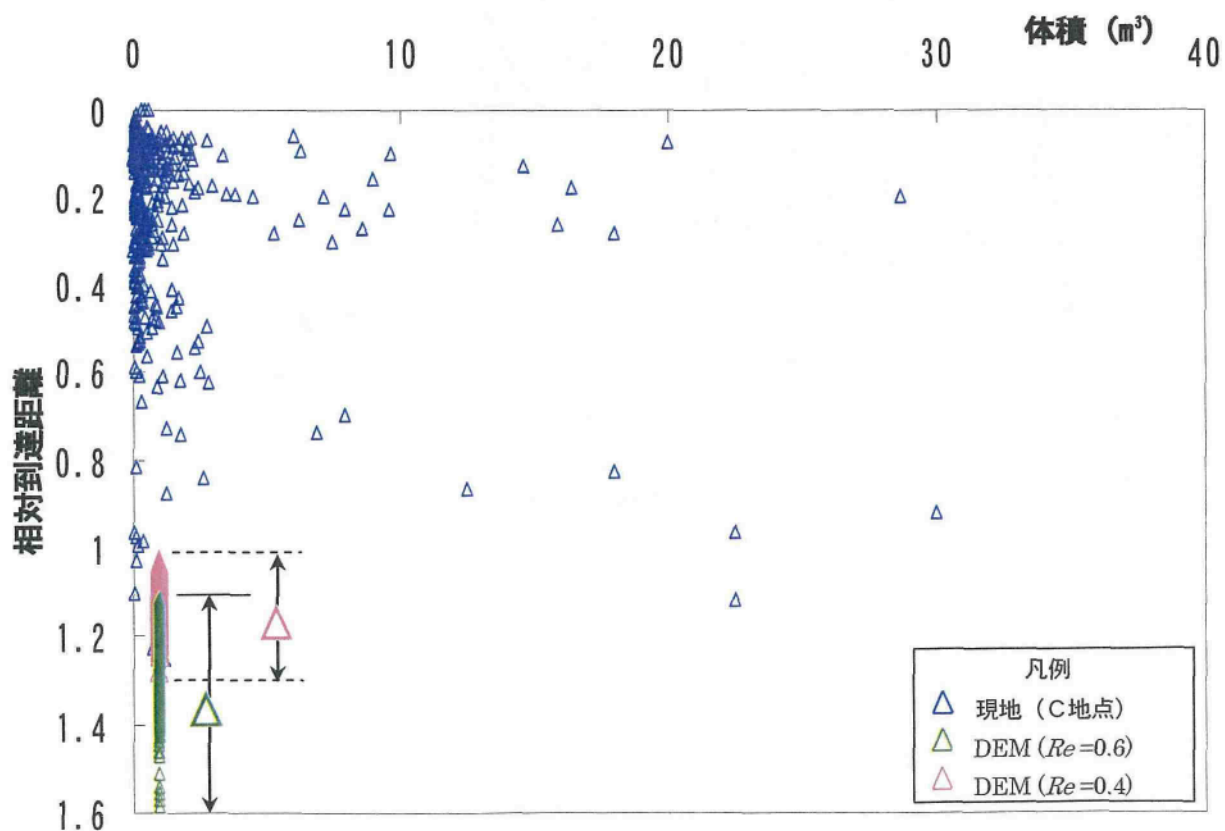


図 5.2.7 体積と相対到達距離の関係

次に落石要素の運動エネルギーと跳躍高さについて述べる。

図 5.2.8 は落石要素が斜面を落下する時の運動エネルギーの推移を示したものである。初期位置をCとして、解析定数を解析Ⅰと解析Ⅱとした解析より、任意に2例ずつ示した。これらの例を見ると、各ケース毎に斜面落下時の運動エネルギーの大きさが異なっているが、全体にはエネルギーが推移していく傾向は類似している。全体にエネルギーが大きくなる部分は斜面末端付近であるが、注目される点は跳躍運動を繰り返すことにより、斜面途中でエネルギーがかなり変動していること、斜面途中でエネルギーが小さくなる部分が存在することである。エネルギーが小さくなる部分は落石軌跡の方向が変化する部分であり、このような箇所ではエネルギーが低減されることは非常に興味深い。このような位置が確定できれば、ここに防護工を設置することにより、経済的な対策が可能となると考える。

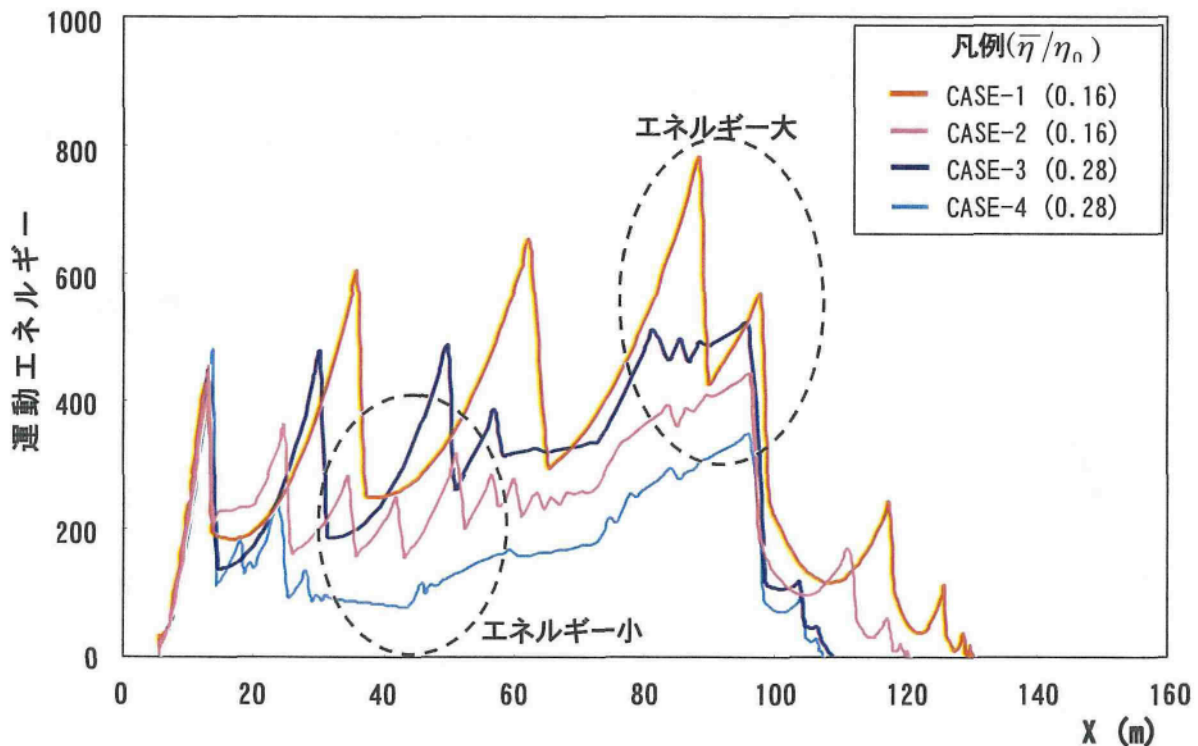


図 5.2.8 運動エネルギー推移図



ここで、3.4 で述べた落石便覧<sup>3)</sup>による方法によるエネルギー計算を行い、解析結果と比較する。落石便覧より計算した結果を表 5.2.3 に示す。

表 5.2.3 落石便覧<sup>3)</sup>による落石エネルギー

斜面区分	斜面の特性	摩擦係数 $\mu$	落石エネルギーE (KJ)	
			H=82.5m	H=40m
A	硬岩	0.05	2226	1079
B	軟岩	0.15	1964	952
C	土砂・崖錐	0.25	1702	825
D	崖錐	0.35	1440	698

落石便覧には、落下高さが 40m を超えると、落下速度は一定（終端速度）に達する傾向があり、同時にエネルギーも一定値に収束すると述べている。このため、H=40m とした計算結果も上表に示した。

一方、DEM 解析による運動エネルギーは図 5.2.8 の運動エネルギー推移図によると、斜面末端で最大となり、その値は全体に 300~800KJ、減衰定数の高い CASE-3 と CASE-4 で見ると 300~400KJ である。DEM 解析による結果は、上図の落下高さ 82.5m の場合と比べると、かなり小さな値を示し、便覧の基準値（落下高さ 40m）を用いた場合のエネルギーと比べても低めの値を示している。DEM 解析では落石の接触時に速度減衰が行われるため全体に低めの値を示すと考えられる。これら便覧値との比較は 4.4 で基本モデル斜面を用いて検討している。

図 5.2.9~図 5.2.12 は落石要素が D-D'断面を通過する時の運動エネルギーと跳躍高さの分布を示している。D-D'断面は X=100m 地点にあり、地形が斜面から平坦面へと変化する位置である。

解析 I においては、D-D'断面において運動エネルギーが図 5.2.9 のように分布した。割合的には非常に少ないが、800kJ 以上の運動エネルギーを持っている例もある。しかし多くの例は 150kJ を中心に 80~280kJ の間に分布している。

跳躍高さは図 5.2.11 のように分布した。そのほとんどが 0.5~3.2m に分布するが、4m を超える跳躍高さを持つ例もある。

解析 II においては、運動エネルギーは図 5.2.10 のように分布した。この分布には特に大きな運動エネルギーを持つものはなく、全てが 40~200kJ に分布する。跳躍高さは図 5.2.12 のように分布した。跳躍高さは 1.4m を中心に 0.5~2.5m まで分布し、大きな跳躍高さを持つ例はない。

このように、粘性減衰係数比  $C$  によってその分布の形状や、平均値は異なり、当然ながら解析 I (減衰定数の低い) の方がエネルギー、跳躍高さ共に大きな値を示している。

ここで、落石便覧<sup>3)</sup>の方法による落石高さとの解析値を比較する。

落石便覧の方法によると、落石高さは斜面の法線方向に 2.0m の一定値としている。これを、鉛直高さに換算すると、 $H=2.0m/\cos \alpha$  ( $\alpha$ : 斜面勾配  $36^\circ$ ) = 2.47m である。この値は、解析 I の中央値、解析 II の最大値程度の値である。

以上の解析結果を、落石対策に反映させる方法として次のようなことを提案する。

どの解析ケースを実務に用いるかは難しい問題であり、確かな方法はないが、一つの方法として、落石の最終到達位置の比較により判断する方法があると考えられる。今回の解析では落石の最終到達位置は、解析 II のケースが図 5.2.7 に示したように現実に近い位置を示したといえる。このため、落石エネルギーや跳躍高さについては解析 II の結果を適用するのが妥当といえる。したがって、落石工運動エネルギーと跳躍高さは図 5.2.10、5.2.12 に示した頻度分布図より設定する。この値を決める方法は確立されたものはないが、数値のばらつきを知った上で頻度分布の中央値を用いるのが一般的であろう。これを信頼性設計の概念でみると、中央値は信頼度 50% (累積度数 0.5) となる。将来的には、このような考え方は、統計量を扱うシミュレーション解析を実用化する上で必要であり、具体的にどのように取り扱うかは今後の重要な課題と考える。

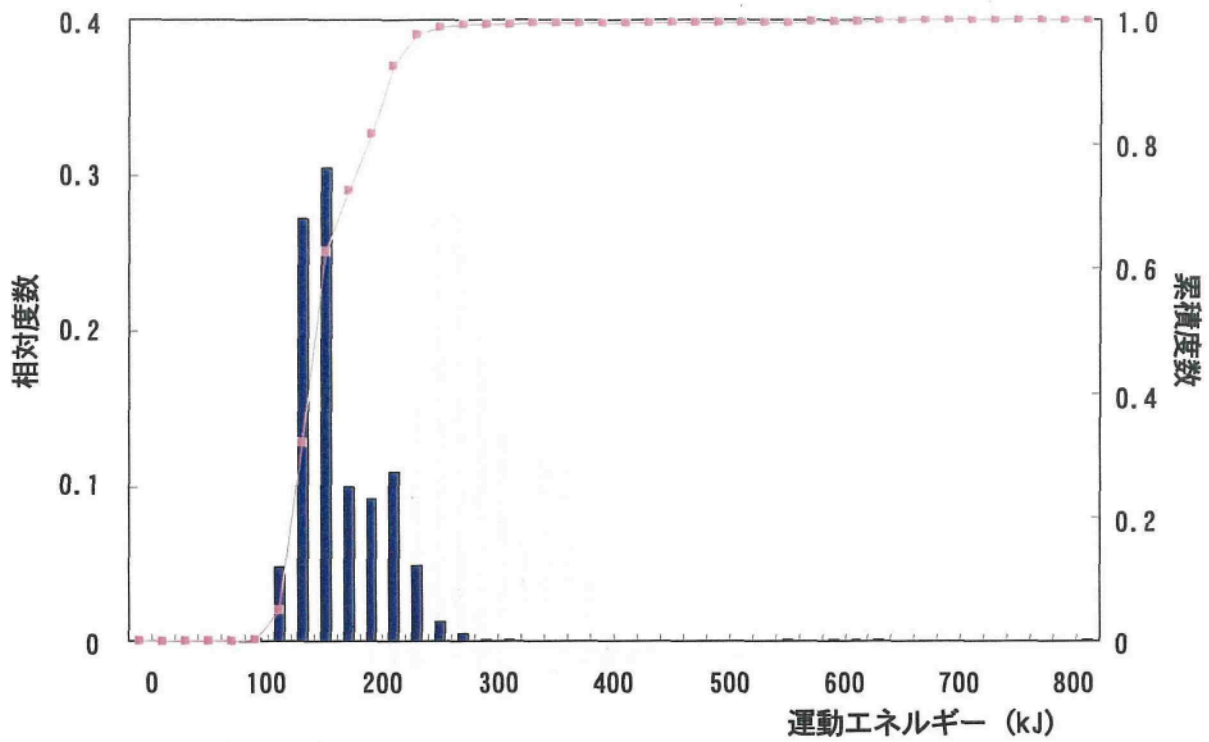


図 5.2.9 D-D'断面における運動エネルギー分布 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.16 (Re=0.6)$ )

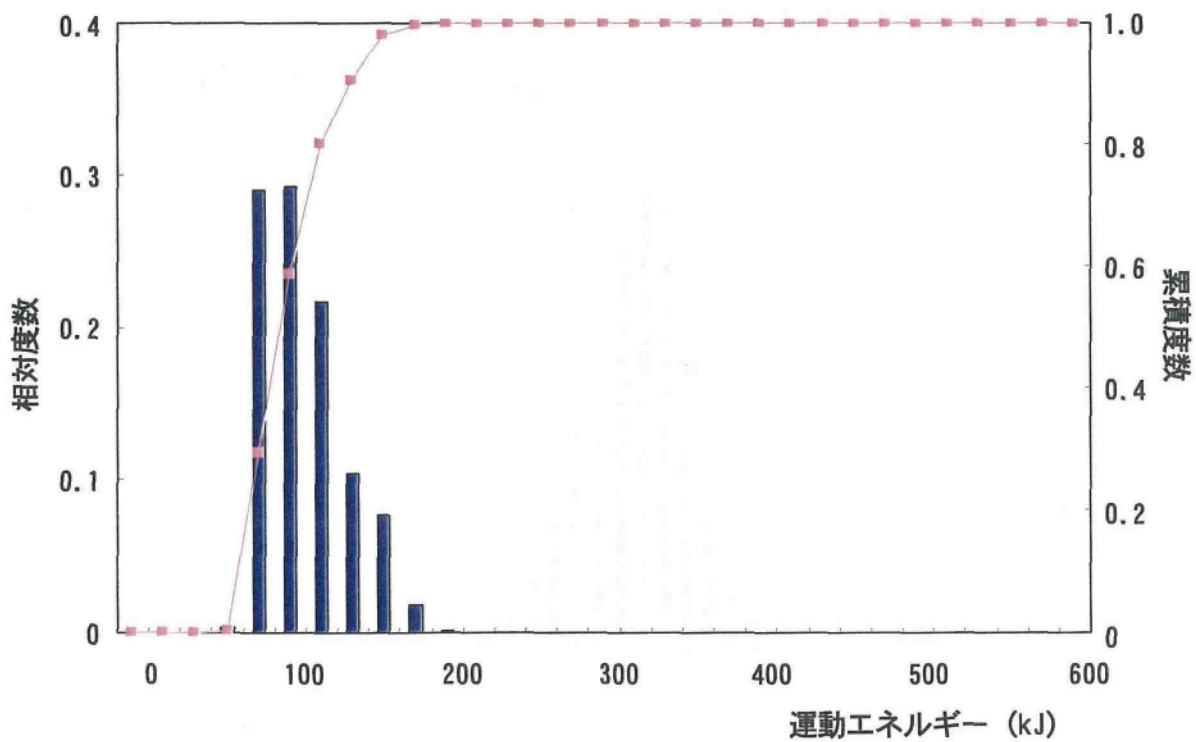


図 5.2.10 D-D'断面における運動エネルギー分布 (解析 II,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.28 (Re=0.4)$ )

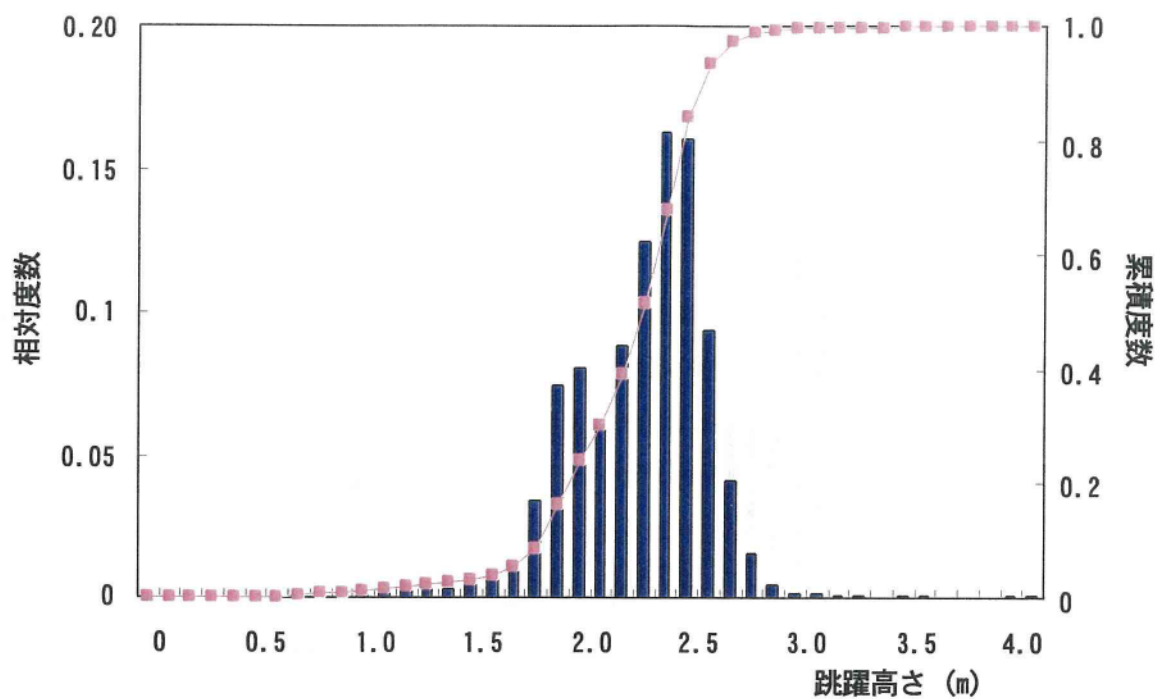


図 5.2.11 D-D' 断面における跳躍高さ分布 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.16 (Re=0.6)$ )

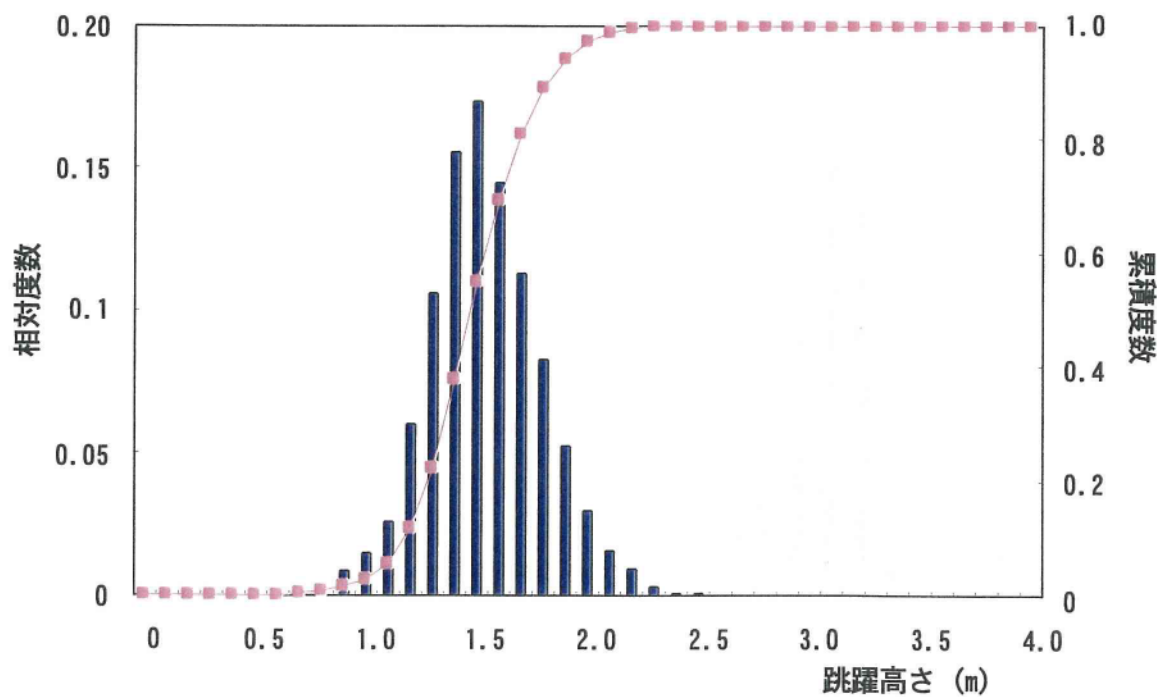


図 5.2.12 D-D' 断面における跳躍高さ分布 (解析 II,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.28 (Re=0.4)$ )



### 5.3 尾根地形での解析事例と考察<sup>4)</sup>

本節では、2.7.3の「千枚岩分布地域で発生した落石斜面の調査解析」で述べた落石現場を対象とする。この現場の崩壊箇所（落石源）は、図5.3.1に示すように山地の尾根部にあたるため、落石が発生した場合の落石軌跡・到達位置を推定することは経験的な判断だけでは難しい。このような場合は、特に、以下に述べる落石シミュレーションの適用が望ましいと考える。

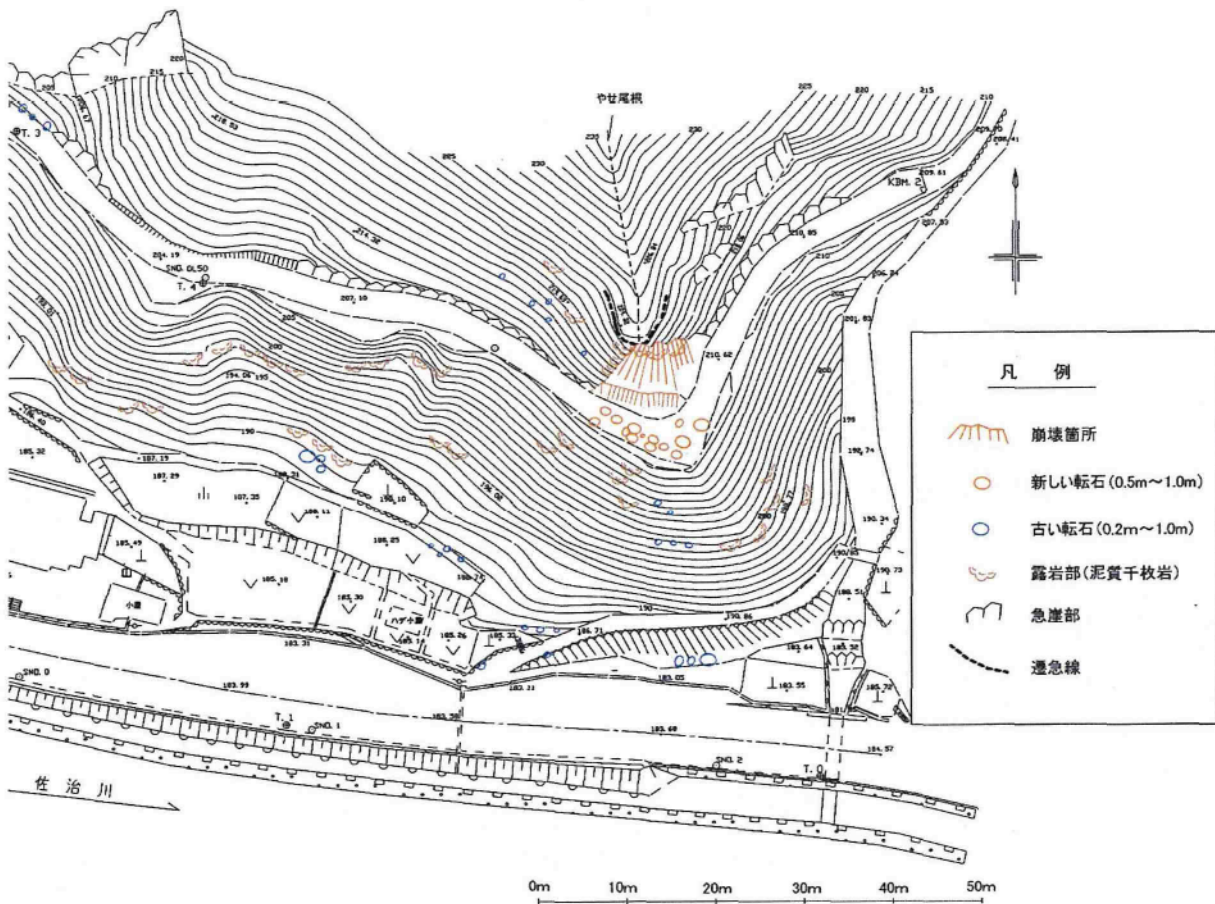


図 5.3.1 落石地平面図

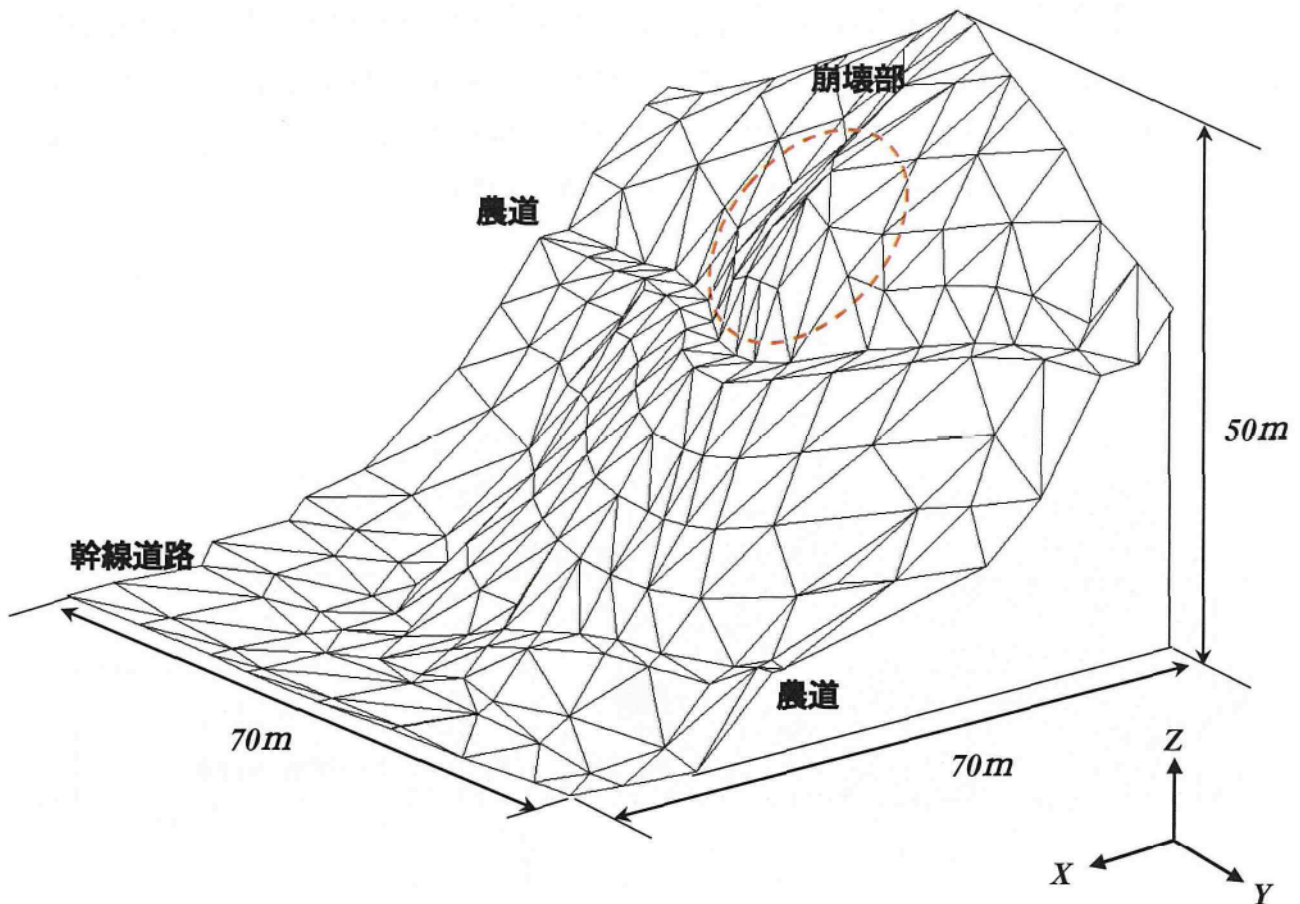


図 5.3.2 尾根地形の解析モデル図

解析に用いたモデルは水平距離が X 方向 70m, Y 方向 70m, 落差 50m の尾根地形である。尾根線上に崩壊部があり、崩壊部直下と幹線道路より 5m 上部に農道が存在する。上部農道から幹線道路までの落差は、およそ 37m となっている。

落石要素は一辺 1m の正六面体であると仮定した。落石要素の初期位置については、崩壊上部に 5 箇所を仮定し、a~e 点とした。1 箇所につき 1000 回のシミュレーションを試行した。尾根地形では前項で行ったような検査断面を設けることは無意味である。このため、ある標高を落石要素が通過する時の値を照査した。落石の初期位置については確定値として変化させない場合と試行毎に Y 方向と Z 方向に多少のばらつきを考える場合（ランダム変化）の 2 パターンとして行った。落石要素の初期位置は表 5.3.1, 表 5.3.2 に示す通りである。

入力定数については、ランダム（random）として取り扱う減衰定数は、落石要素が斜面と接触する毎に変化させ、1000 回の試行を通してその分布は正規分布に従うものとした。このときの変

動係数は $\nu=0.2$ に設定した。減衰定数の平均値は $\bar{\eta}/\eta_0=0.16$ と $\bar{\eta}/\eta_0=0.28$ の2つを用いた。反発係数に換算すると、前者は $Re=0.6$ 、後者は $Re=0.4$ である。

以上、各シミュレーションの入力定数の設定値を表5.3.3にまとめておく。

表 5.3.1 落石要素の初期位置 (解析 I, II)

	X(m)	Y(m)	Z(m)
A	18.50	41.55±0.05	226.00±0.50
B	22.00	42.55±0.05	224.50±0.50
C	22.50	45.05±0.05	224.50±0.50
D	19.50	45.05±0.05	226.00±0.50
E	22.00	47.55±0.05	222.50±0.50

表 5.3.2 落石要素の初期位置 (解析 III, IV)

	X(m)	Y(m)	Z(m)
A	18.50	41.50	225.50
B	22.00	42.50	224.00
C	22.50	45.00	224.00
D	19.50	45.00	225.50
E	22.00	47.50	222.00

表 5.3.3 解析に用いた入力定数

	解析 I, III	解析 II, IV
形状	立方体	立方体
大きさ	1m × 1m × 1m	1m × 1m × 1m
密度	2.650Mg/m <sup>3</sup>	2.650Mg/m <sup>3</sup>
減衰定数	0.16±0.16×0.20	0.28±0.28×0.20
表面摩擦角	30°	30°
初期速度	0(静止)	0(静止)

解析 I~IVの要素重心軌跡について述べる。

解析は初期位置を A~E の 5 箇所を仮定した。A と B は尾根線より左側に、C は崩壊部、D は崩壊部より上方、E は尾根線より右側にある。図 5.3.3~図 5.3.6 は、これらの 5 箇所を初期位置として、それぞれ 5000 回試行したうち 500 回分の軌跡を描いたものである。

解析においては、初期位置 A~E を中心として、解析ごとに Y 方向と Z 方向に多少位置が変化（一様分布に従う乱数変化）するようにした場合（解析 I, II）。と初期位置は確定値として扱う場合（解析 III, IV）とを実施した。入力定数については表 5.3.3 の 2 つのケースを考え、接触毎に減衰定数を正規分布に従った乱数として発生させてシミュレーションを行った。

解析 I の軌跡を図 5.3.3、解析 II の軌跡を図 5.3.4 に示した。どちらの解析においても初期位置が A, B のケースでは、概ね同じような位置に到達している。これは、地形が影響したと考えられる。A, B から落下し始めた要素は、最大傾斜の方へ落下していくが、落下すると考えられるところには地形の急変点や凹凸が見られない。要素は最大傾斜方向へ落下していくため、同じ様な位置に到達したと言える。C から落下する例に注目すると、初期の段階で複数の経路を辿っている。その後は地形の影響も考えられるが、要素は最大傾斜の方向へ落下し、一軌跡群の水平方向への広がり方に幅が見られない。C 点は崩壊部上にあり、尾根線上でもある。解析毎に初期位置を多少変化させているが初期位置は尾根線付近に分布している。このような尾根箇所においては、落石軌跡は初期段階で不安定にバラつき、その後は最大斜面方向に向かっていくと考えられる。

落石の初期位置を変化させた場合（図 5.3.3, 5.3.4）と初期位置を確定した場合（図 5.3.5, 5.3.6）を比較すると、図 5.3.3, 5.3.4 の方が軌跡の水平方向へ広がりが見られる。特に尾根部分を通過する C と D の例においてその違いが顕著である。初期位置が小さく変化するだけでも軌跡に大きな違いがあり、解析に際し初期位置の設定が軌跡を考える上で重要であると考えられる。



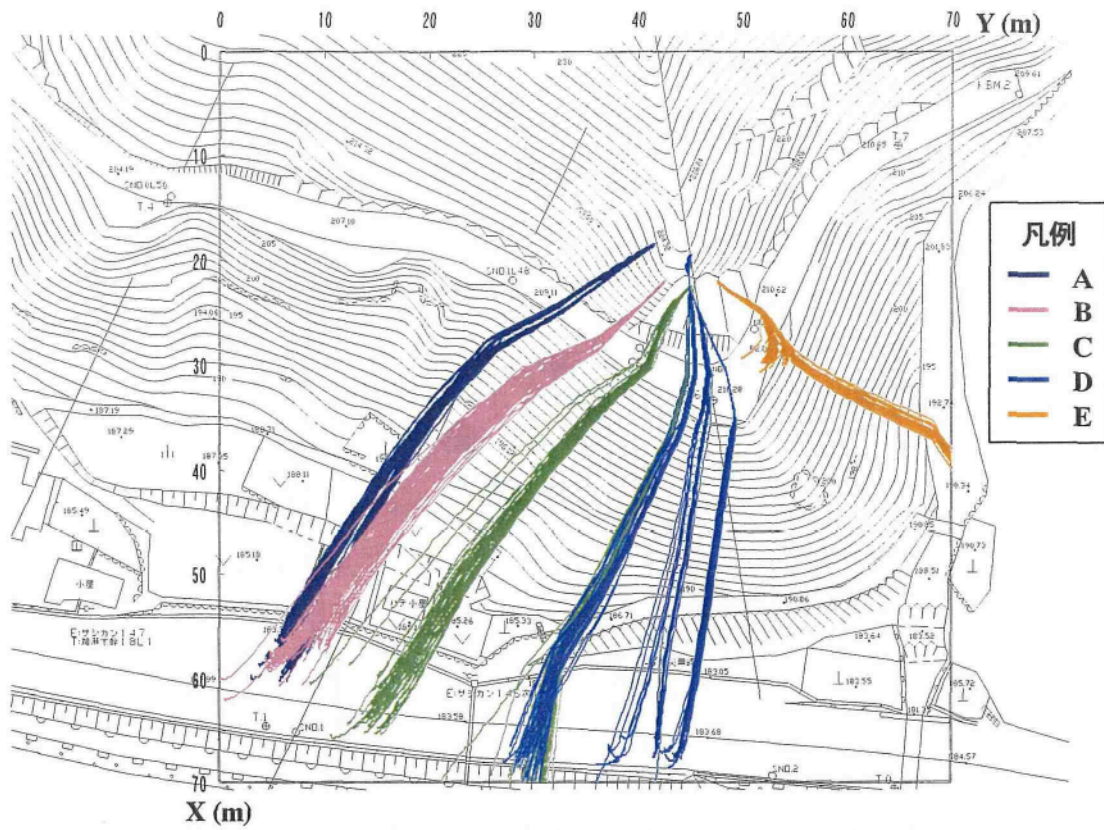


図 5.3.3 要素軌跡の水平面への投影図 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.16(Re=0.6)$ , 落下位置ランダム変化)

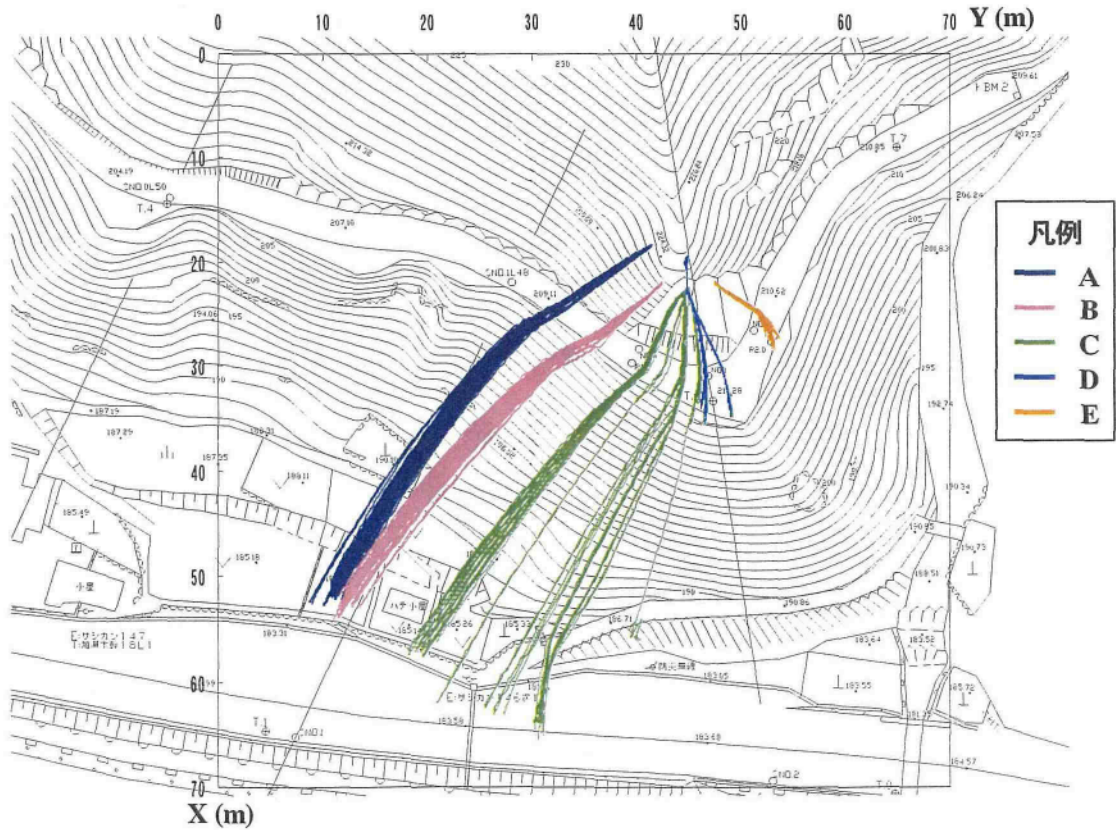


図 5.3.4 要素軌跡の水平面への投影図 (解析 II,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.28(Re=0.4)$ , 落下位置ランダム変化)



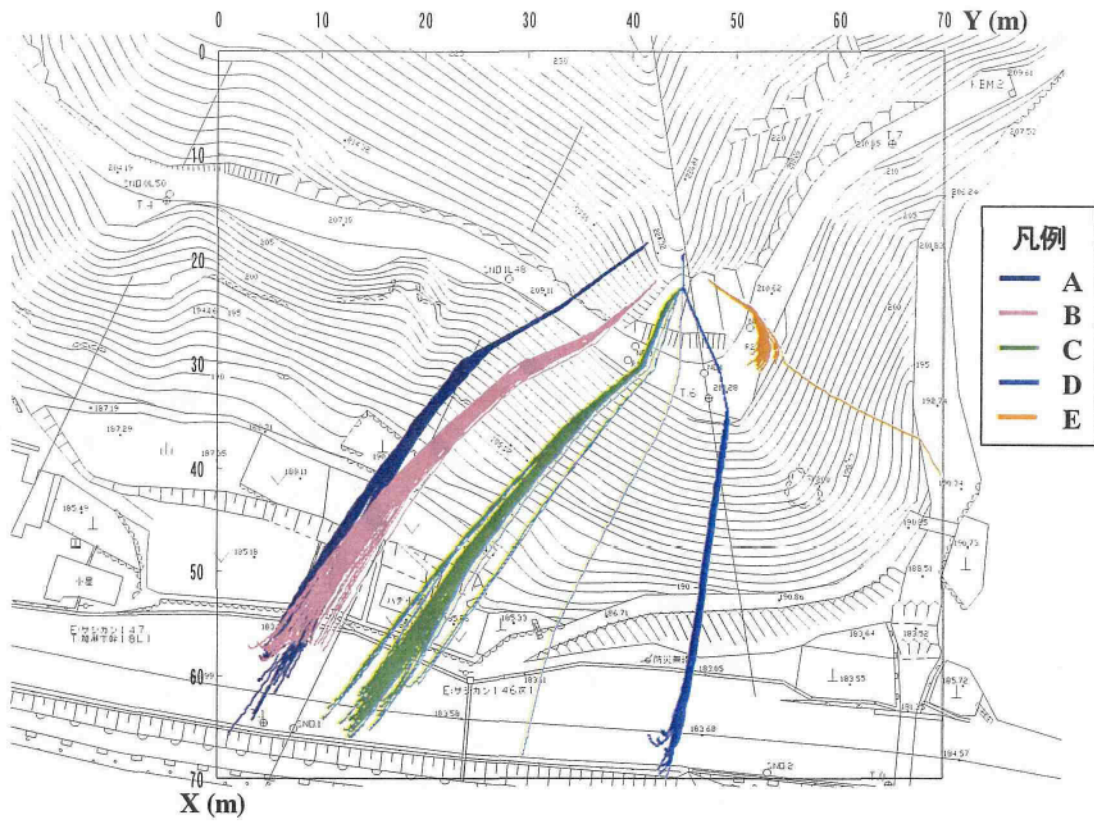


図 5.3.5 要素軌跡の水平面への投影図 (解析Ⅲ,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.16 (Re=0.6)$ )

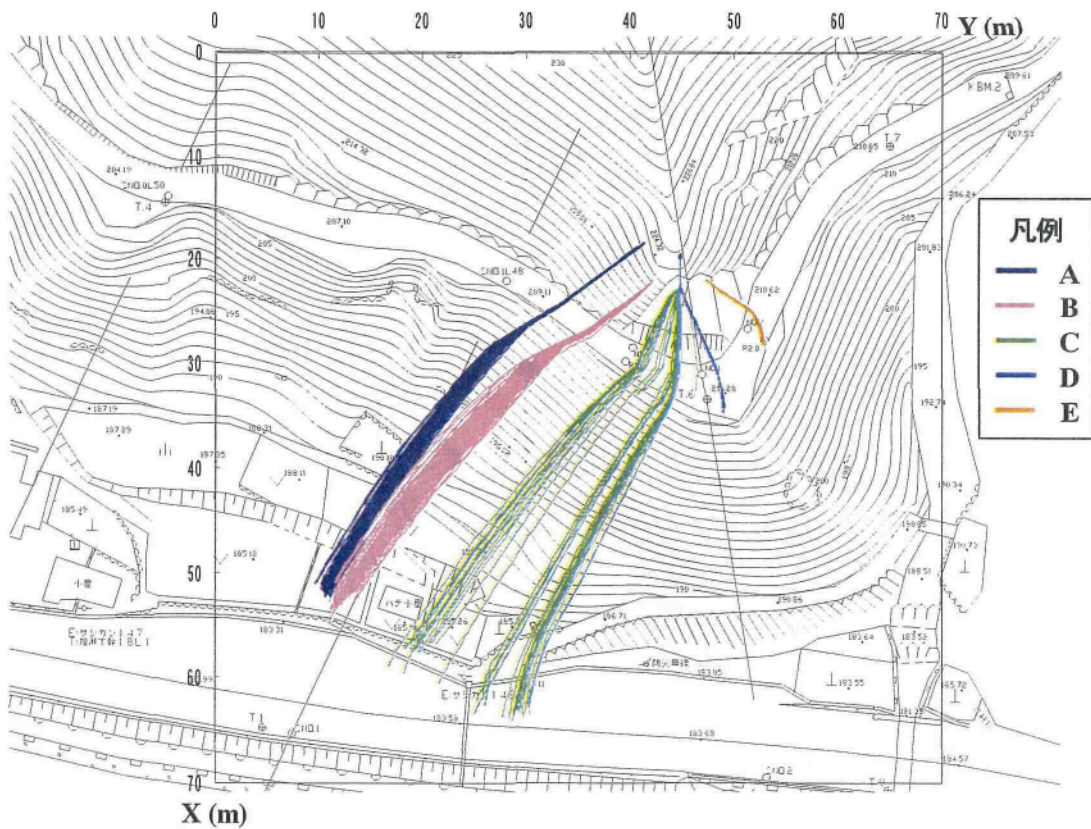


図 5.3.6 要素重心軌跡の水平面への投影図 (解析Ⅳ,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.28 (Re=0.4)$ )

図 5.3.7 と図 5.3.8 は、初期位置を変化させて解析を行った 5000 例の停止位置を示したものである。解析結果は三角形で示してあるが、その他にこの斜面で実際に発生した落石の停止位置も丸形で併記してある。これについては、赤は新しい転石、青は過去の転石である。また、図 5.3.9 と図 5.3.10 に落石要素がある領域に到達する確率を示した。

解析Ⅰの場合は、E 以外の位置から落下した場合はほとんどが最下部の幹線道路まで到達しており、解析領域外 ( $x \geq 70\text{m}$ ) へ飛び出した例も多く、7.5%程度となっている。落下経路にもよるが、C、D から落下した例は領域外に飛び出す例が多いことから、道路に到達する直前に大きな運動エネルギーを有すると考えられる。確率的に見ると、幹線道路まで到達するのは 78.2%、崩壊部直下の農道で停止するのは 17.7%であった。

解析Ⅱの場合は、崩壊部直下の道路部分に停止する例が多いが、初期位置によっては下方まで落下してくる例も多い。最下部の道路まで到達したのは C 地点から落下した例が多いが、道路直前の平地や緩斜面で停止する例もある。解析Ⅱでは解析領域外へ出たものはなかった。確率的に見ると、幹線道路まで到達したのは 49.0%、崩壊部直下の農道で停止したのは 51.0%であった。

この斜面で発生した新しい転石と古い転石の停止位置と比較すると、解析Ⅱの入力定数を用いた方が、より現実に近い解析結果が得られるといえる。このように、現状の転石位置などのデータがある場合は、試行錯誤的に入力定数を決定していくことが必要と考える。また、落石対策工の平面位置を検討する場合は、図 5.3.10 より落石の到達位置と確率を考慮して、到達確率のより高い位置を重点的に整備する方法を採ることができると考えている。



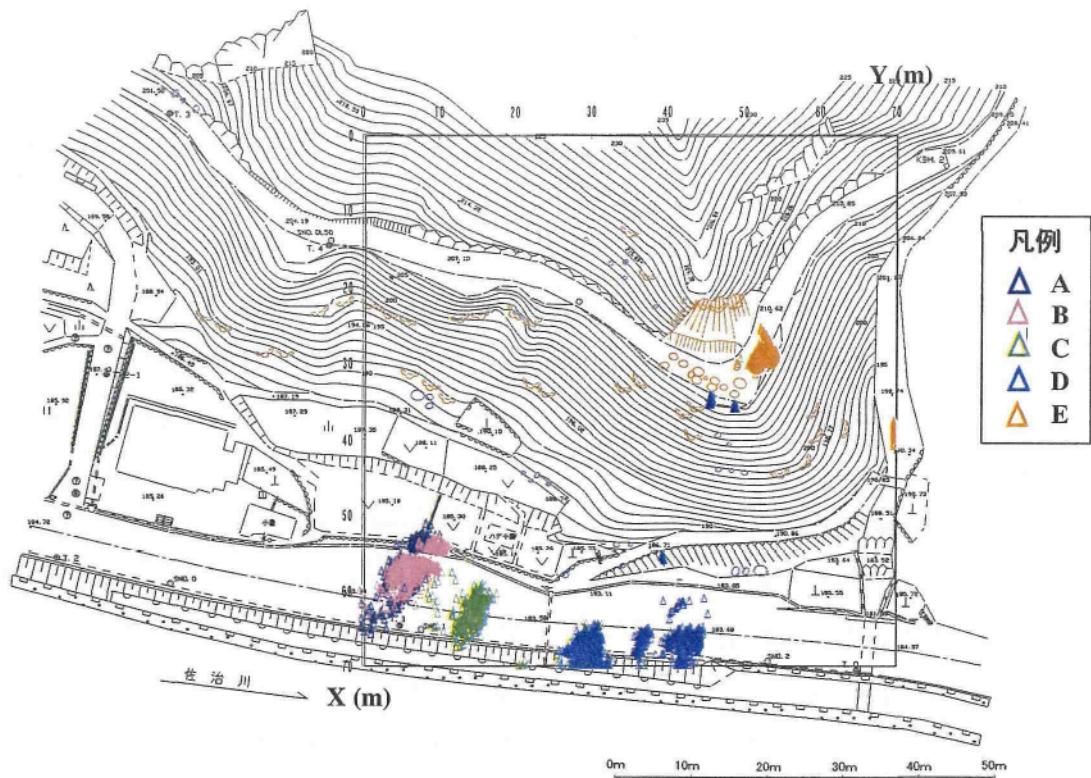


図 5.3.7 要素の最終到達位置の分布 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0 = 0.16$  ( $Re = 0.6$ ), 初期位置ランダム)

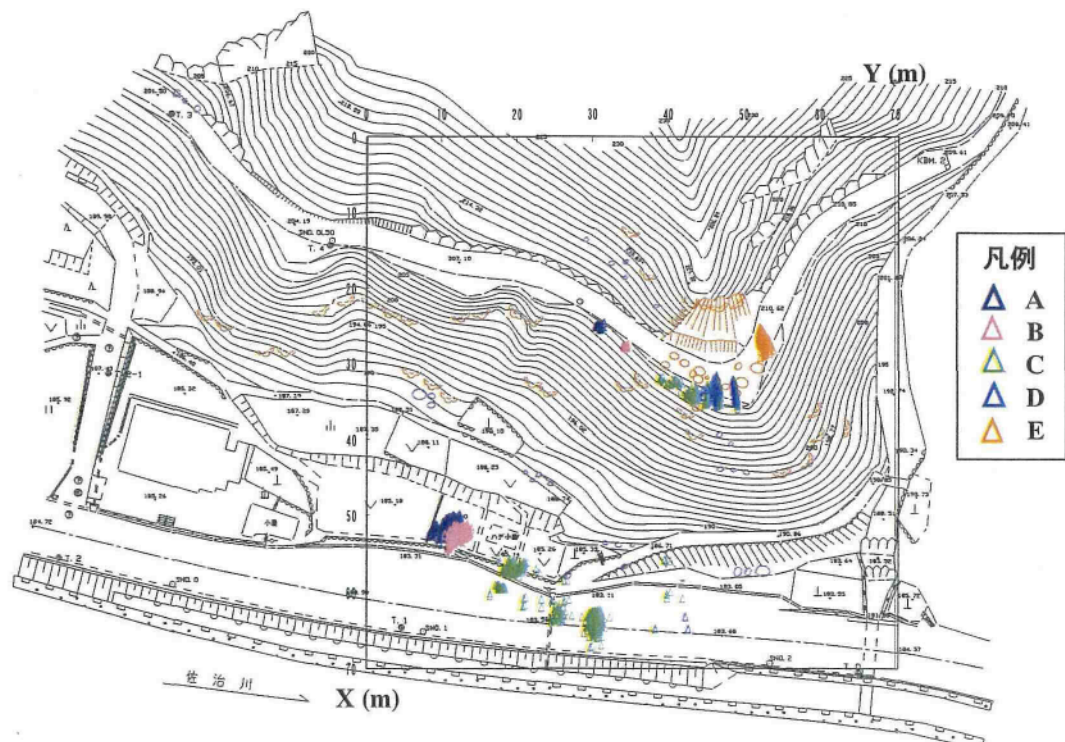


図 5.3.8 要素の最終到達位置の分布 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0 = 0.28$  ( $Re = 0.4$ ), 初期位置ランダム)



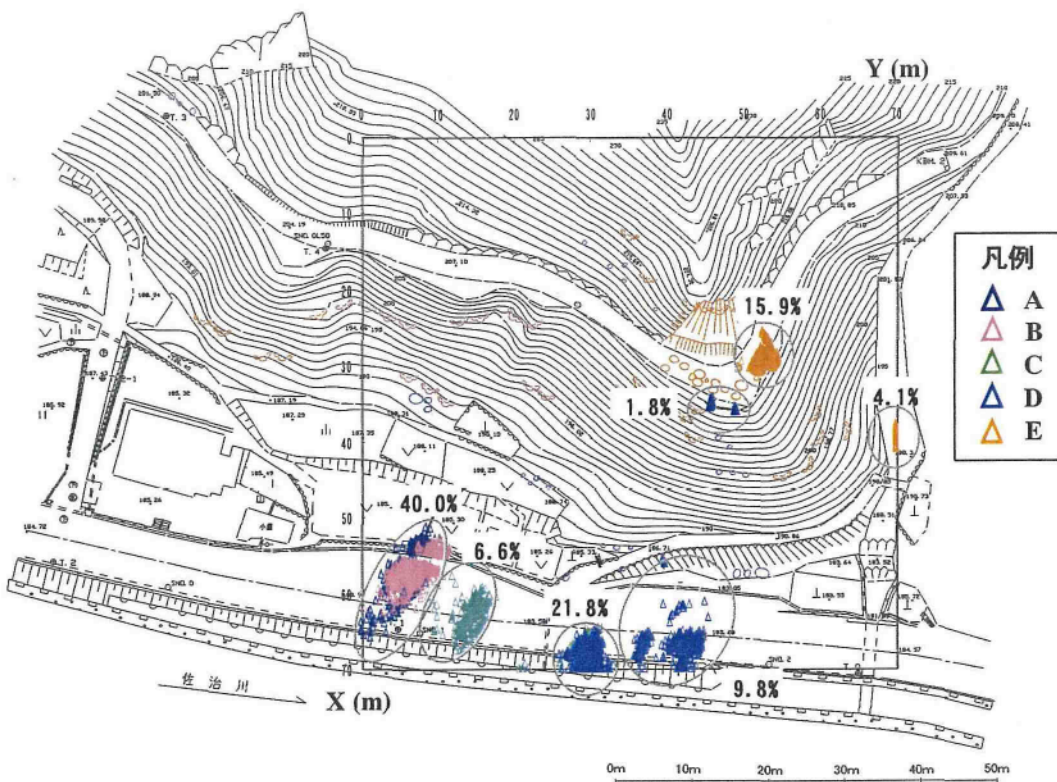


図 5.3.9 要素の到達確率 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0 = 0.16 (Re = 0.6)$ 、初期位置ランダム)

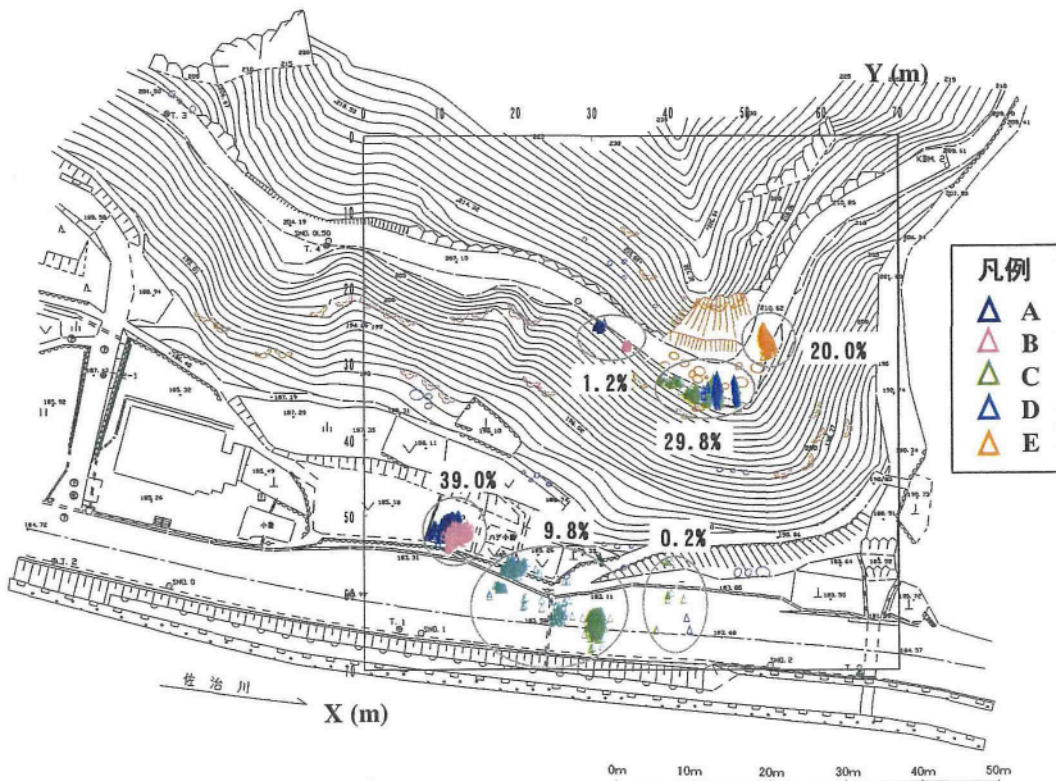


図 5.3.10 要素の到達確率 (解析 II,  $\bar{\eta}/\eta_0 = 0.28 (Re = 0.4)$ 、初期位置ランダム)

図 5.3.11, 図 5.3.12 は各初期位置から落下した要素が, ある Z 座標でもつ運動エネルギーの平均値を円の大きさを示したものである. 平均については, 到達せずに停止してしまった例は含まず, 通過した例のみの平均値である. 運動エネルギーは要素重心が Z=210m, 205m, 190m, 185m の位置を通過した時のものを平均した. Z=210m は崩壊部直下にある農道の標高であり, Z=185m は幹線道路直前の標高である.

解析 I も解析 II も A と B から落下した例は, Z=210m での運動エネルギーは大きい, 落下するにつれて運動エネルギーは小さくなっている. 逆に D の例では落下するにつれてエネルギーを増し, 道路直前で運動エネルギーが非常に大きくなっている. このように, 落石要素がどのような経路を辿るかによって運動エネルギーが変わってくる. 経路別に運動エネルギーがどの位置で大きくなるか, また小さくなるかといったことを予測することは対策工の計画時に重要な情報となる. すなわち, 落石経路上のエネルギーの小さい場所に対策工を設置できれば, 経済的な対策となり得るからである.



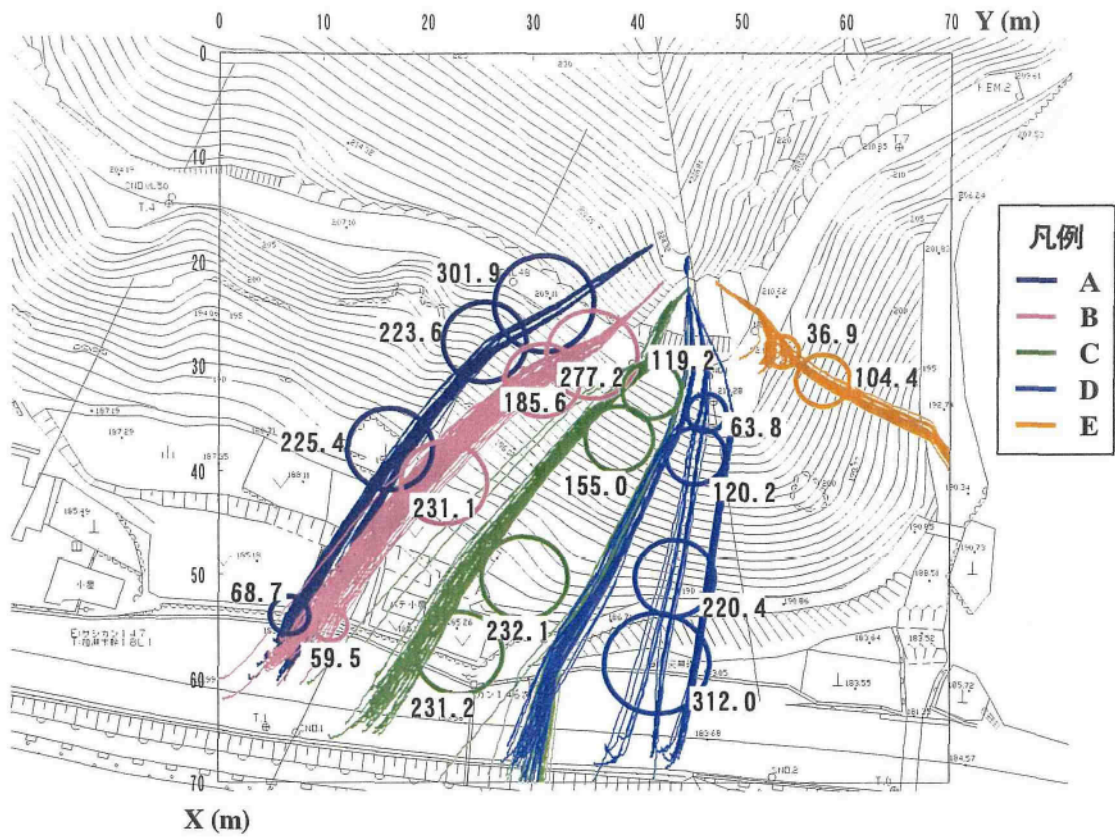


図 5.3.11 運動エネルギーの平均値 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.16 (Re = 0.6)$ , 落下位置ランダム変化)

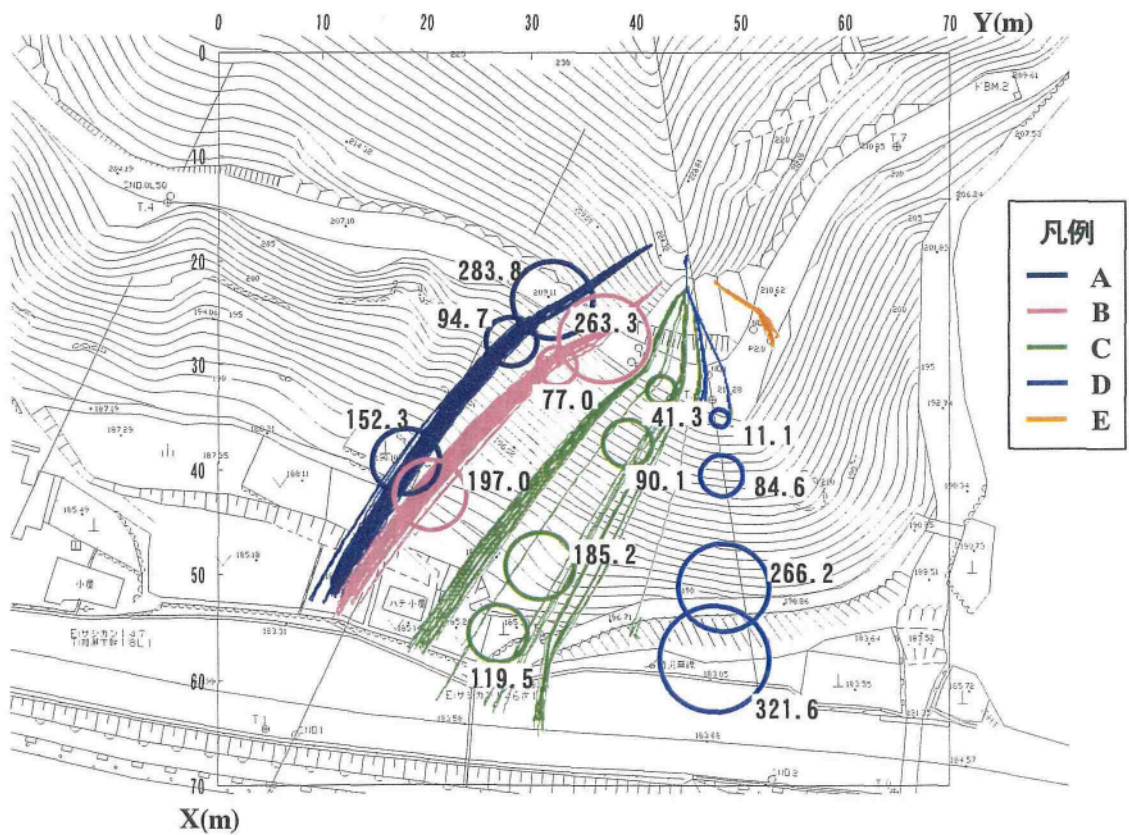


図 5.3.12 運動エネルギーの平均値 (解析 II,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.28 (Re = 0.4)$ , 落下位置ランダム変化)

図 5.3.13 と図 5.3.14 は跳躍高さの分布の一例である。解析 I の場合で、初期位置を C としたときの分布である。要素重心が  $X=33.5\text{m}$ 、 $X=58\text{m}$  を通過するときの跳躍高さの分布を示している。 $X=33.5\text{m}$  付近は、C から落下した要素が崩壊部直下の道路から斜面に転がり始める位置である。跳躍量が比較的大きいのは崩壊部の直下であるため、崩壊部からバウンドしてくるものによると考えられる。また解析 I は減衰定数が小さいため、農道で大きく跳ね上がることも考えられる。およそ  $4.4\text{m}$  程度を中心に分布しているが、小さい跳躍量を示すものもある。 $X=58\text{m}$  付近は、斜面から道路へ遷移する地点である。この位置での跳躍高さは  $1.4\text{m}$  程度を中心に  $4.0\text{m}$  程度まで分布している。中には  $6\text{m}$  を超えるものも存在している。

尾根地形の場合、経験的な判断だけで落石軌跡を推定することは難しい。このため、3次元解析シミュレーションが有効と考えた。解析の結果、落石軌跡分布は、落石発生位置の違いにより大きな広がりを持つことが確認された。この結果に基づき、代表的なそれぞれの落石軌跡において、エネルギーや跳躍高さについて考察していく必要がある。このような作業を行い、どの範囲あるいはどの位置に対策を施すべきか、そして、どの程度の規模の対策工が必要か等を検討していくべきと考える。

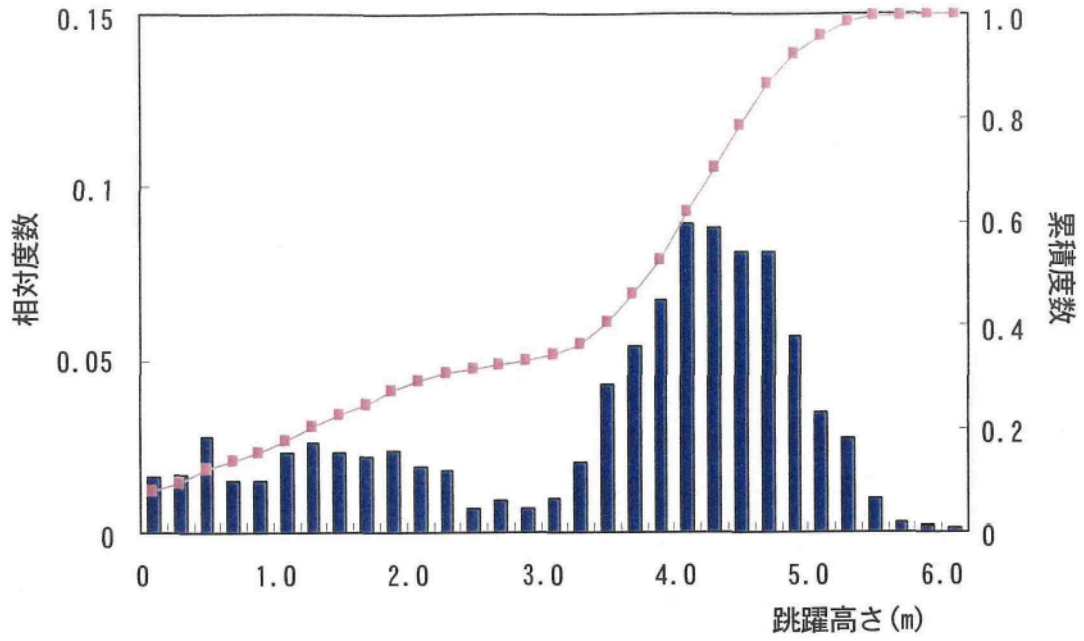


図 5.3.13 跳躍高さの分布 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.16(Re=0.6)$ , 落下位置ランダム変化,  $X=33.5m$ )

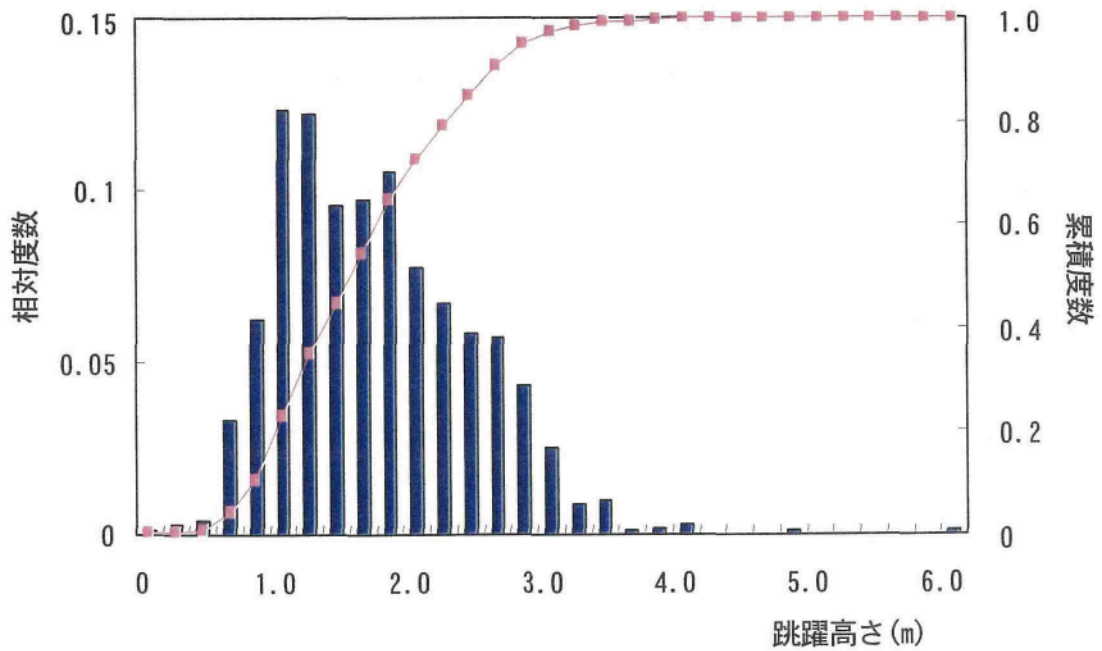


図 5.3.14 跳躍高さの分布 (解析 I,  $\bar{\eta}/\eta_0=0.16(Re=0.6)$ , 落下位置ランダム変化,  $X=58m$ )



## 5.4 まとめ

本研究の課題とする落石シミュレーションの開発は、現状の設計手法では解決できない、あるいは限界のあることを明らかにすることである。すなわち、地形の変化や斜面性状の不均質さについても考慮でき、落石の軌跡やエネルギーを予測することである。本章では、実際の落石地をモデルとした3次元解析の事例を示した。ここでは、3次元落石シミュレーションが特に有効と考えられる谷地形と尾根地形を選定し、落石の到達域や運動エネルギー、跳躍高さについて照査した。以下に、解析の結果とその適用方法についてまとめる。

谷地形と尾根地形の落石軌跡を比較すると、谷地形では軌跡は谷の中央に向かって推移していくが、尾根地形の場合は、軌跡の初期段階での変化が大きく、それに伴って落石の最終到達位置の範囲も広がっている。したがって、尾根地形の場合は、シミュレーション解析を用いなければ、これらの位置を予測することは難しいといえる。

落石軌跡の変化する位置や地形形状の変化によって、落石エネルギーが低下する箇所が確認された。このような箇所において落石対策工設置すれば、経済的な対策が可能となると考える。

落石の到達位置とその確率の予測を行ったが、このような解析により、対策工の必要性や重点的に整備する位置を検討できると考える。

落石エネルギーや跳躍高さについては試行計算によって得られる頻度分布図により設定する。この値を決める方法は確立されたものはないが、数値のばらつきを知った上で頻度分布の中央値を用いるのが一般的であろう。これを信頼性設計の概念でみると、中央値は信頼度50%（累積度数0.5）となる。将来的には、このような考え方は、統計量を扱うシミュレーション解析を実用化する上で必要であり、具体的にどのように取り扱うかは今後の課題と考える。

以上に落石シミュレーションの実例について述べたが、本研究例の他にも過去に幾つかの解析研究<sup>2),5),6),7)</sup>がなされている。本研究ではそれらの貴重な研究を参考にさせてもらったことを最後に記しておく。

## 参 考 文 献

- 1) 谷口洋二, 西村 強, 精山誉志, 木山英郎: 鳥取県西部地震で発生した落石と3次元個別要素解析例, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp401-406, 2003.1
- 2) 日本道路協会編: 落石対策便覧に関する参考資料(落石シミュレーション手法の調査研究資料), pp.189, 1992.
- 3) 日本道路協会編: 落石対策便覧, pp.10-20, 2000
- 4) 谷口洋二, 西村 強, 精山誉志, 木山英郎: 落石運動に影響を与える不確定要因のモデル化と3次元軌跡解析, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2004.1
- 5) 鷺田修三, 古賀泰之, 伊藤良弘: 落石運動の予測手法について, 第24回土質工学会研究発表会講演集, pp.1611-1614, 1989.
- 6) 吉田 博・右城 猛・榎谷 浩・藤井智弘: 斜面性状を考慮した落石復工の衝撃荷重の評価, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1603-1616, 1991.
- 7) 呉建宏, 大西有三, 門間敬一, 西山哲: 3次元不連続変形法(3D DDA)による岩盤斜面崩壊のシミュレーション, 材料学会, Vol.52, No.5, pp.488-493, 2003.5.



## 第6章 結論

本研究は、もっとも身近で難しい防災技術の一つである落石対策技術を取り上げ、より効率的、効果的な対策工が計画できるよう対策工の位置やその規模を予測する方法を確立することを目標とした。その内容は、通常用いられる設計手法では限界のある地形や斜面性状の複雑な変化や落石形状などの要因を考慮できる数値解析手法を開発し、落石対策工の設計に必要な情報を客観的に得ようとするものである。

落石対策を講じる上で、もっとも基本的なことは、対策計画箇所にとどのぐらいの落石エネルギーが生じるかを見積もることである。また、平面的にとどの位置に対策を講ずるかを決めなければならない。しかしながら、落石源は比較的容易に特定できるが、そこからの落石軌跡とエネルギーを推定するのは非常に難しい。従来は、これを現場実験からの経験則を用いて推定してきたが、本研究では数値解析手法（個別要素法DEM）を用いて個々の現場において最も合理的な対策工が計画できるような方策を提示することを目的とした。

第1章では、本研究の背景と意義について述べた。

第2章では、落石の定義と落石発生の素因についてまとめ、落石の危険度評価のための調査手法を述べている。加えて、鳥取県内の地形地質と落石の関連について考察し、落石発生源の調査解析例を紹介している。鳥取県の地質的特性からみると、県下には落石危険地域と考えられる地質が広く分布しており、実際にそれぞれの地質分布地域において特徴的な落石が発生している。地形的特性からみると、落石の多くは地形の遷急点（浸食前線）において発生している。また、落石発生危険箇所の新しい調査手法としてボアホールカメラや熱赤外線映像法の適用例を示している。

第3章では、落石の運動形態と現行の防護工設計に関連する因子の導出について述べ、さらに、既往の落石実験結果を示し、現状の防護工の設計手法との問題点について記述している。現行の落石対策設は実斜面を単純化した上で、既往の落石実験結果をもとに導かれた経験則を用いて行われている。しかしながら、既往の落石実験においても落石エネルギーや落石高さ等の評価において、必ずしも同一な結果が得られていないこと、斜面性状や地形の変化に対しては適用できないなどの問題点があることを示している。

第4章では、第3章で述べた問題点に対する一方策として、本研究で開発した個別要素法による3次元落石シミュレーションの開発とその適用について述べている。

個別要素法（DEM）は、落石を形状のある物体として、飛行、衝突、すべり、ころがりなどのすべての運動形態を表現できることから、より現実に近いシミュレーションが可

能である。したがって、DEMのシミュレーションによれば、従来の方法では取り扱うことのできなかつた、落石の挙動や運動エネルギーの変化などを明らかにすることができ、落石対策検討上必要な情報が得られると考える。個別要素法ではダッシュポットの減衰係数が重要なパラメータとなるが、これを反発係数というわかり易い概念を用いて決定できることを室内実験によって検証している。この落石シミュレーションを用いて単純斜面モデルでの2次元解析を行い、落石運動の特性や現行の設計手法との相違などについて考察している。さらに、種々の解析定数（減衰係数、摩擦係数など）にモンテカルロ法を用いてばらつきを与えることにより自然斜面の不均質さを表現できることを示し、その解析例を示している。

第5章では、第4章に述べた解析手法を実際の落石現場に適用した事例とその検討結果を述べている。ここでは、谷地形および尾根地形を選び、落石の軌跡や到達域、運動エネルギー、跳躍高さ等を照査している。谷地形と尾根地形の落石軌跡を比較すると、谷地形では軌跡は谷の中央に向かって推移していくが、尾根地形の場合は、軌跡の初期段階での変化が大きく、それに伴って落石の最終到達位置の範囲も広がっている。したがって、尾根地形の場合は、シミュレーション解析を用いなければ、これらの位置を予測することは難しいといえる。また、落石軌跡の変化する位置や地形形状の変化によって、落石エネルギーが低下する箇所が確認された。このような箇所において落石対策工設置すれば、経済的な対策が可能となると考える。

第6章では、第2章から第5章に述べる内容を総括して本論文の結論とする。すなわち、本研究で開発した3次元落石シミュレーションの実用性としては、落石による危険範囲を特定することが困難な場合、落石対策に要する費用が膨大になると予想され、できるだけ効果的・経済的な対策を検討する必要がある場合、などに対し効果的だと考えられる。将来的には通常の落石対策の設計にも用いられるべきで、そのためには、必要な定数の設定方法、特に過去の落石履歴を考慮した試行計算による定数の設定方法や現地での反発係数を測定する簡易な調査方法の開発、そして、なによりも実際の落石現場での解析事例を積み重ねていき、普遍的な解析手順や落石運動の法則性を見出していく必要があると考えている。



**END**