

第3章 落石の運動と対策工

3.1 はじめに

本章では、まず、落石の運動形態を分類し、従来の設計手法のもととなる基礎運動方程式を適用した落石速度やエネルギーの算出について述べ、さらに既往の落石実験例を示す。大規模な落石実験は、跳躍高さや運動エネルギーなど、落石の運動に関する貴重な情報を現行の防護工設計手法に与えていると考えられる。そこで、代表的な3例の落石実験例を引用して落石運動の特徴を知るとともに、防護工設計法の基本的な考え方について述べる。尚、落石の飛躍する高さについての表現は統一されておらず、跳躍量とする場合と跳躍高さとする場合の両者が用いられている。このため、本論文では、引用する文献の表現を尊重して記述するが、通常は跳躍高さとして記述することとする。

本研究は、個別要素法を用いた数値シミュレーションを中心とする研究である。ここでは、現行の設計手法の問題点について記述し、それに代わる方法として、斜面性状や地形の変化に適応できる数値解析手法の必要性を述べている。

3.2 落石の運動機構

3.2.1 落石の運動形態

落石の運動形態は図 3.2.1 に示すように、すべり運動、回転運動、跳躍運動に分類される。

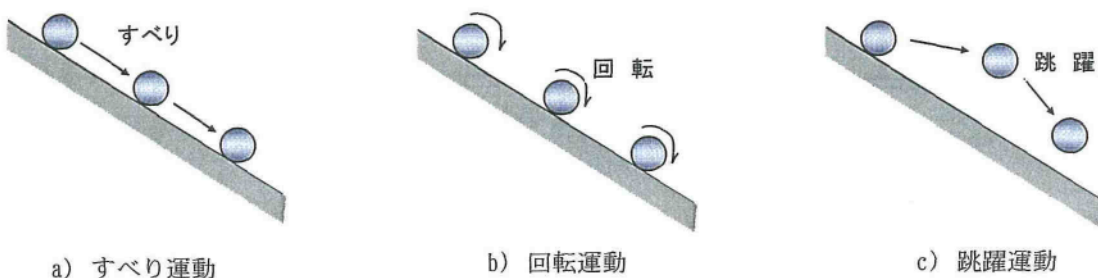


図 3.2.1 落石の運動形態

a) すべり運動

岩塊、礫、玉石等が斜面に沿ってずり落ちる運動。

b) 回転運動

岩塊、礫、玉石等が斜面上を回転しながら下方へ移動する運動。

c) 跳躍運動

空中を跳躍しながら移動する運動。これは、落石発生箇所からすぐに移動するものと、すべり運動や回転運動しながら途中で突起などにより跳躍運動に移行する場合がある。

以上のように落石は、すべり運動・回転運動・跳躍運動の3つの形態、あるいはこれらを組み合わせた運動形態をとりながら斜面を落下していく。そして、これらの運動形態を支配する要因としては、落石の形状や寸法、落下斜面の形状・地質・植生などが挙げられる。

3.2.2 落石の基礎運動方程式

落石の回転・すべり・跳躍のそれぞれの運動形態について、基礎運動方程式を適用した考え方を示す。

(1) 回転およびすべり運動

落石を図 3.2.2 に示すように球形の物体と単純化して、基礎運動方程式を解き、回転及びすべり運動に関して落石速度とエネルギーの算定式を導く。

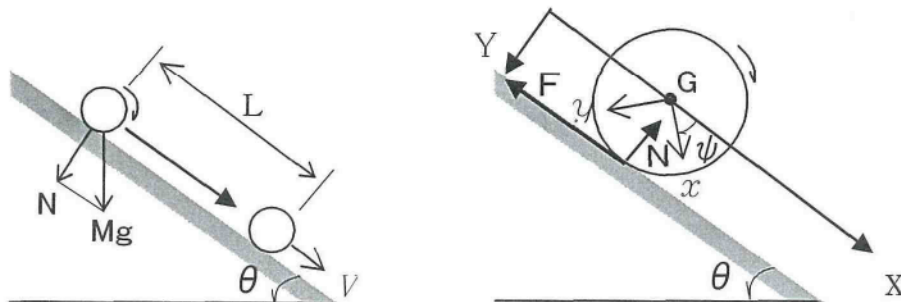


図 3.2.2 回転・すべり運動

(a) 回転運動

斜面と水平面のなす角 θ ，球の半径 a ，質量 M ，斜面と球の間の摩擦係数 μ ，摩擦力を F とする。図 3.2.2 に示すように座標系を定めると、運動方程式は次のようになる。

$$M\ddot{X} = Mg \cdot \sin \theta - F \quad (3.2.1)$$

$$M\ddot{Y} = 0 = Mg \cdot \cos \theta - N \quad (3.2.2)$$

$$I\ddot{\phi} = Fa \quad (3.2.3)$$

摩擦力 F が作用して、球-斜面にすべりがなければ、回転角速度に半径を乗じたものが並進速度に等しいことになる。つまり、

$$\dot{X} = a\dot{\phi}$$

が成立する。もし、接点ですべりが生じておれば、 $\dot{X} < a\dot{\phi}$ となる。 $\dot{X} = a\dot{\phi}$ を(3.2.3)式へ代入すると、 $F = \frac{I}{a^2} \ddot{X}$

$$(3.2.1) \text{式に代入すると, } (M + \frac{I}{a^2}) \ddot{X} = Mg \cdot \sin \theta$$

$$\text{球の慣性モーメント ; } I = \frac{2}{5} Ma^2 \text{ を入れると, } (M + \frac{2}{5} \frac{Ma^2}{a^2}) \ddot{X} = Mg \sin \theta$$

$$\ddot{X} = \frac{5}{7} g \sin \theta \quad (\text{等加速度運動}) \quad \text{となる.}$$

ここで、斜面をLの距離だけ移動するのに要する時間を計算すると、

$$L = \frac{1}{2} (\frac{5}{7} g \sin \theta) t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{2L}{g \sin \theta} \cdot \frac{7}{5}} \quad \text{となる.}$$

その時刻tにおける斜面方向の速度は、

$$V = \ddot{X} t = \frac{5}{7} \cdot \sqrt{\frac{2L}{g \sin \theta} \cdot \frac{7}{5}} \cdot g \sin \theta$$

斜面高さ $h = L \sin \theta$ より、高さとの関係は

$$V = \sqrt{2gh} \cdot \sqrt{\frac{5}{7}} = \alpha \cdot \sqrt{2gh} \quad \text{この } \alpha \text{ を自由落下速度 } V = \sqrt{2gh} \text{ に対する比であり, 残存係数}$$

と呼ばれる。

$$= 0.845 \sqrt{2gh}$$

$$\text{摩擦力 } F \text{ は, } F = \frac{I}{a^2} \ddot{X}, \quad \ddot{X} = \frac{5}{7} g \sin \theta, \quad I = \frac{2}{5} Ma^2 \text{ より } F = \frac{2}{7} Mg \cdot \sin \theta \text{ となる.}$$

$$\text{このときの摩擦係数 (摩擦角) } \mu \text{ は } \mu = \frac{F}{N} = \frac{2}{7} \tan \theta \text{ である.}$$

この式は、接点でのすべりの発生が摩擦係数と傾斜角によって決まることを表している。

例えば、 μ が一定のとき、 $\mu = F/N = (2/7) \tan \theta$ が、すべりが発生しない傾斜角の上限を表し、 $\mu > (2/7) \tan \theta$ なる傾斜角では、すべりが発生しないことになる。

ここで、仮に、 $\mu = 0$ とすると、

$$\begin{aligned} M\ddot{X} &= Mg \sin \theta & \ddot{X} &= g \sin \theta \\ M\ddot{Y} &= 0 = -N + Mg \cdot \cos \theta & \ddot{Y} &= 0 \quad \ddot{\phi} = 0 \end{aligned}$$

$$L = \frac{1}{2} g \cdot \sin \theta t^2 \quad t = \sqrt{\frac{2L}{g \sin \theta}}$$

$$V = at = g \cdot \sin \theta \sqrt{\frac{2L}{g \sin \theta}} = \sqrt{2gL \sin \theta} = \sqrt{2gh}$$

すなわち、高さ h の自由落下の速度に等しく、残存係数は 1 となる。

しかし、摩擦が存在するとき、上記したように線速度は約 0.85 倍に減じられる。

この時（摩擦が生じた場合）の運動エネルギー E は

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \text{ より } = \frac{1}{2} m (0.845 \sqrt{2gh})^2 = 0.714 mgh \quad \text{となる。}$$

この式は非常に簡潔であるが、斜面勾配や摩擦係数の要素が入らないという問題がある。

(b) すべり運動

斜面と物体間の摩擦は存在するが、回転が生じない場合の運動方程式は次のようになる。

$$M\ddot{X} = Mg \sin \theta - F \quad (3.2.4)$$

$$M\ddot{Y} = 0 = Mg \cos \theta - N \quad (3.2.5)$$

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (3.2.6)$$

$$(3.2.5), (3.2.6) \text{ 式より, } F = \mu Mg \cdot \cos \theta$$

これを (3.2.4) 式に挿入すると、 $M\ddot{X} = Mg \cdot \sin \theta - \mu Mg \cdot \cos \theta$

$$\ddot{X} = g(\sin \theta - \mu \cos \theta) = g \sin \theta \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right)$$

前の誘導を参考にすれば、斜面高さ h を落下したときの線速度は、

$$V = \sqrt{2gh} \cdot \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}} \quad \text{残存係数は } \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}} \text{ と与えられる。}$$

そして、この時の運動エネルギーは

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = mgh \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) \quad \text{となる。}$$

これに、回転エネルギー分を足しあわせて全エネルギーとすれば、

$$Et = (1 + \beta) mgh \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) \quad \text{ここに } \beta \text{ は回転エネルギー補正分}$$

上式は、落石便覧¹⁾に記載されている落石エネルギー式である。

この式は、回転運動から導いたエネルギー式とは異なり、斜面の摩擦や勾配の要素を取り入れることができる利点がある。しかし、回転運動を β という係数（落石便覧では通常

0.1 を用いる) で単純化していることに問題が残されている。

(2) 跳躍運動

落石の跳躍、衝突運動を質点の力学（落石を体積のない質点と仮定する）で考えると次のようになる。

平面に質点が入射角 α_1 で衝突し、反射角 α_2 で反発する場合を考える。なお、座標系として面方向は n 、垂直方向は s を採用する。

衝突前の速度は、次のような成分を持つ

$$v_s = v \sin \alpha_1 \quad v_n = -v \cos \alpha_1 \quad (3.2.7)$$

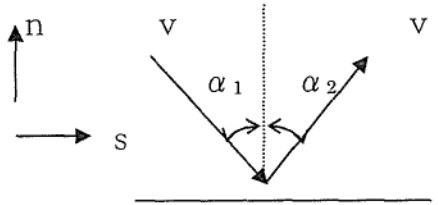


図 3.2.3 衝突時の速度成分

反発係数を e とおいて、衝突後の n 方向の速度成分は、

$$v'_n = -e v_n = e v \cos \alpha_1 \quad (3.2.8)$$

運動量と力積の関係については、質量を m 、反力を f_s 、 f_n とすれば、

$$s \text{ 方向 ; } f_s \Delta t = m v_s - m v'_s = m (v_s - v'_s) \quad (3.2.9)$$

$$\begin{aligned} n \text{ 方向 ; } f_n \Delta t &= m v_n - m v'_n = m v_n - m v'_n \\ &= m (1 + e) v_n \\ &= m (1 + e) v \cos \alpha_1 \end{aligned} \quad (3.2.10)$$

今、衝突時に摩擦則が成立すると仮定すれば、摩擦係数を μ ($=\tan \theta$) とおいて、

$$\mu = \frac{f_s}{f_n} = \frac{f_s \Delta t}{f_n \Delta t} = \frac{m(v_s - v'_s)}{m(1+e)v \cos \alpha_1}$$

従って、

$$\begin{aligned} v'_s &= v_s - \mu (1 + e) v \cos \alpha_1 \\ &= v \sin \alpha_1 - \mu (1 + e) v \cos \alpha_1 \\ &= v (\sin \alpha_1 - \mu (1 + e) \cos \alpha_1) \end{aligned} \quad (3.2.11)$$

このとき、平行方向のみかけ上の反発係数は、

$$e_t = \frac{v(\sin \alpha_1 - \mu(1+e)\cos \alpha_1)}{v \sin \alpha_1} = 1 - \mu (1 + e) \cot \alpha_1 \quad (3.2.12)$$

e_t は、摩擦係数、入射角に依存する量となる。

ここで、 $e_t < 0$ すなわち、 $v'_s < 0$ なる例を考えよう。このとき、質点は入射方向にはねかえることになる。これは回転運動を考慮していない場合、納得のいかない挙動である。

$v'_s > 0$ となるためには、(3.2.12) より

$$\tan \alpha_1 > \mu (1 + e) \quad (3.2.13)$$

よって、入射角が (3.2.13) 式を満たすことが必要となる。

(3.2.13) 式が満足されないような条件下での平行方向速度 v'_s の決め方には、次の 2 とおりが考えられる。

- ① 反発係数は接触面垂直方向のみならず、接線方向速度にも適用できる。
- ② (3.2.13) 式の条件が満足されないとき、接線方向の運動量の損失はない。

$$\text{すなわち、 } m v_s = m v'_s$$

- ① の場合、衝突後の速度、反射角 α_2 は次のようになる。

$$v'_s = e v \sin \alpha_1$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{v'_s}{v'_n} = \frac{e v \sin \alpha_1}{e v \cos \alpha_1} = \tan \alpha_1 \quad \text{すなわち、入射角と反射角は等しい。}$$

- ② の場合 $v'_s = v_s = v \sin \alpha_1$

$$\tan \alpha_2 = \frac{v'_s}{v'_n} = \frac{v \sin \alpha_1}{e v \cos \alpha_1} = \frac{1}{e} \tan \alpha_1 \quad 0 < e < 1 \text{ より } \alpha_1 < \alpha_2 < \frac{\pi}{2} \text{ となる。}$$

(3) まとめ

本節では、落石の運動形態について述べた。斜面上の落石の運動解析は、落石および斜面を理想化したもので進められてきた。例えば、落石を円形とした本項の記述もその例の一つとなる。さらに、最も単純な場合を考えれば、質点の力学に基づいて運動形態を取り扱うことが可能である。しかし、落石は形状を持つものであり、かつ斜面もここで述べたような一様なものではないことを考えれば、できる限り実現象を表現できるモデル化を行うことが望ましい。そこで、要素を剛体とし、接触時のエネルギー損失を接触点ごとにダッシュポットを仮定して表現する個別要素法を用いることにした。この解析法に導入されているダッシュポットは、減衰振動を表すためのものである。本論で取り扱う落石の平面との接触時の挙動に対し、どのような値を用いるべきか、あるいはどのように値を決定すべきか考察しておく必要がある。従来より、斜面との接触によるエネルギー損失を反発係数の大小によって表すことが考えられてきたことをから、第 4 章においては、両者つまり反発係数と粘性減衰係数の関係も論じて、粘性係数の実用的な算定法を検討する。

3.3 落石の既往現場実験例

第2章に述べたような落石事例においては、落下前に岩塊がどのような状態にあり、どのような軌跡で最終位置に達したか、さらに軌跡に沿う運動エネルギーや跳躍高さがどうであったか等のデータを得ることはできない。このデータがあれば極めて貴重なものといえるが、落石時にそれらを計測することは不可能に近い。このため、現場実験、室内実験を通じて落石運動機構を明らかにしようとする試みがなされている。

ここでは、国内で行われた落石実験を3例挙げて説明し、それらの相異点等について記述する。

3.3.1 日本道路公団の実験（1973年）²⁾

(1) 実験概要

目的：落石運動機構・落石運動エネルギーの解明，落石防護工の防護機構の解明

場所：群馬県利根村大字菌原の自然斜面

実施日：昭和48年（1973年）9月6日～8日

方法：高低差60mの傾斜角が異なる2種類の自然斜面を伐採除根して、実験斜面A、B（以下斜面A、Bあるいは菌原A、Bとする）とした。

斜面Aは傾斜角53°程度の岩露出斜面、斜面Bは傾斜角38°程度の崖錐斜面。

供試落石は30～800kgの自然石を塊状と板状に区分して使用。

落石の立体写真と高速度カメラにより軌跡、回転状況を測定。

(2) 実験結果

図3.3.1は斜面AおよびBそれぞれの斜面における落石の落下高と跳躍量の関係を示したものである。これによると、いずれの斜面も跳躍量は落下高30mまでは2次曲線で増大し、最大跳躍量は約2mに収束している。しかし、斜面途中に突起がある場合はこれを超えていることがわかる。

図3.3.2は落下高と落下速度の関係をまとめたものである。これによると、落下高が40mを超えると落石速度の上限値がある一定値に収束していく傾向があることがわかる。但し、斜面勾配が40°のB斜面は一定値を超えないが、勾配が55°のA斜面は一定値を若干越えるデータも見られる。

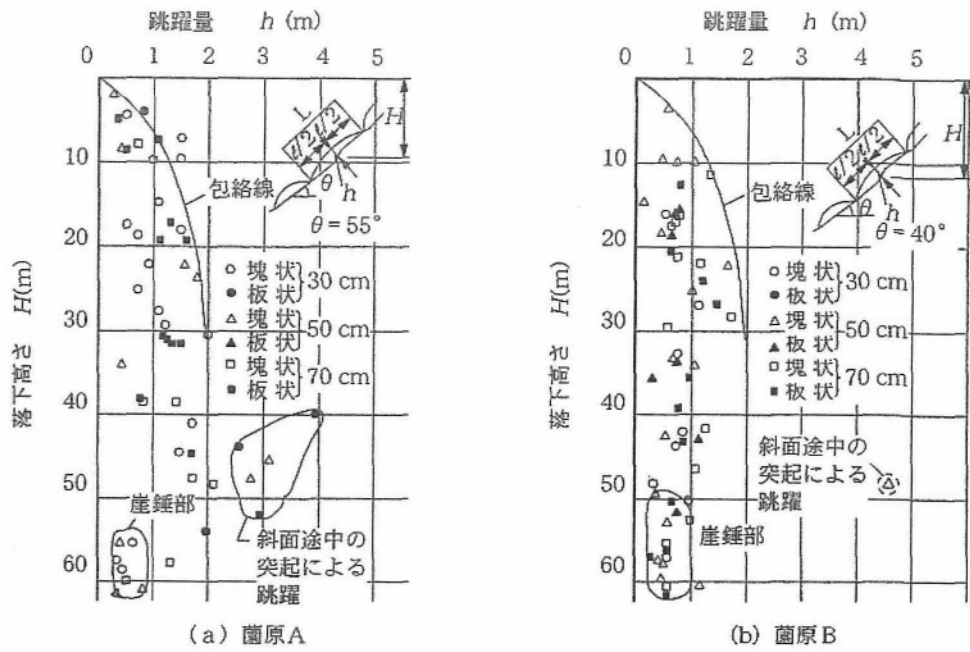


図 3.3.1 落石高さ と最大跳躍量²⁾

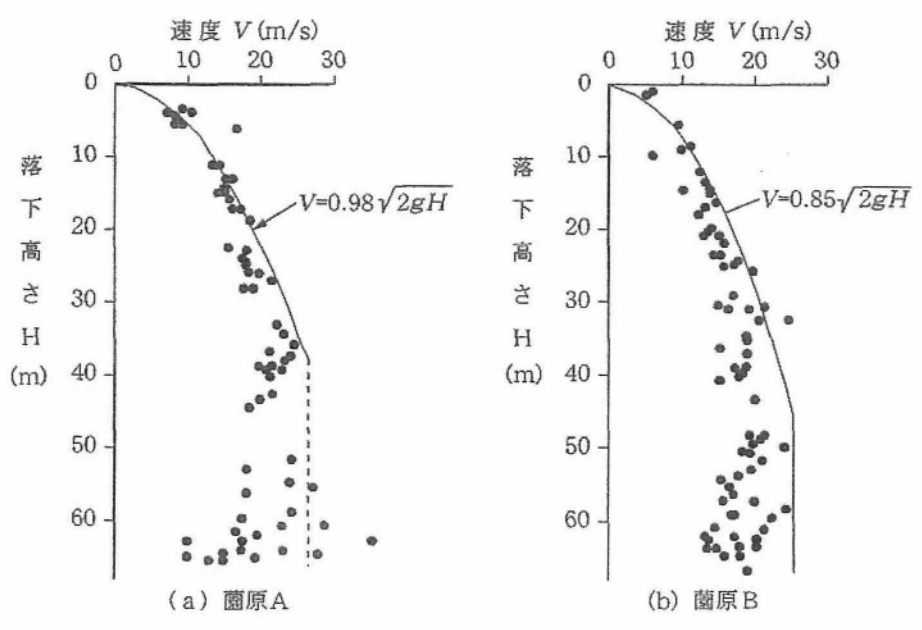


図 3.3.2 落石の落下高さ と速度²⁾

3.3.2 建設省土木研究所の実験（1981年）³⁾

(1) 実験概要

目的：実物大の実験斜面における観測データから運動形態を予測する基礎データを得ること。

場所：香川県高松市近郊の土取場跡地の人口斜面

実施年：昭和56年（1981年）

方法：実験斜面は斜面勾配約 60° ，斜面長約35mの風化花崗岩よりなる。

供試落石は板状，塊状に分類された花崗岩。落石の大きさは最大径で30cm，50cm，70cmの3種類。実験の種類と方法は，図3.3.3に示すように，実験1（運動エネルギーに関する実験），実験2（回転エネルギーに関する実験），実験3（落石の入射角に関する実験），実験4（総合実験）に区分して行っている。

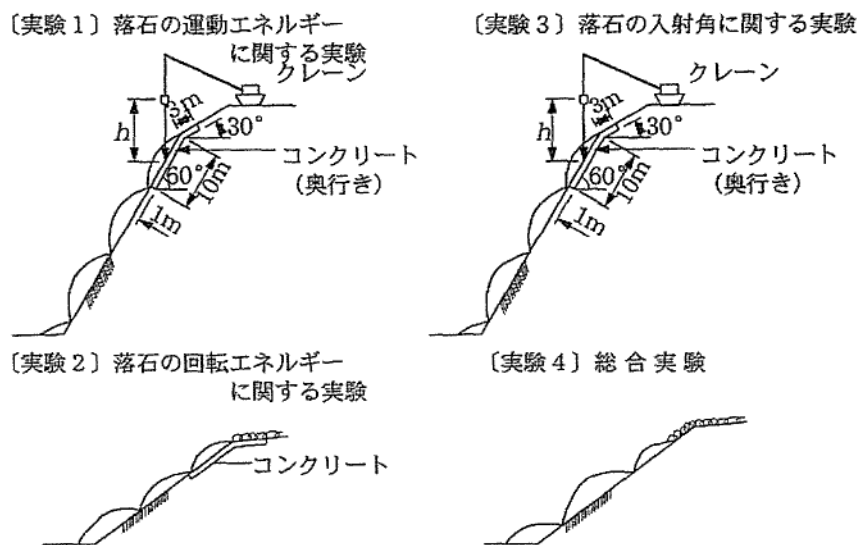


図 3.3.3 実験の種類と方法³⁾

(2) 実験結果

ここでは，上記の実験結果の内の跳躍量について述べる。

図3.3.4は落石の落下高さや落石の跳躍量をまとめたものである。これによると，落石の跳躍量は落下高さが高くなると増大するが，ある一定値を超えると収束する傾向にある。

図3.3.5は落石の大きさや形状による跳躍量の変化を見たものであるが，これによると落石の形状および大きさによる跳躍量の相違は認められない。

図 3.3.6 は斜面勾配と最大跳躍量についてまとめたものであるが、これによると斜面勾配 30° 以上の急斜面においては、勾配の急な斜面ほど跳躍量は小さくなる傾向があることがわかる。

図 3.3.7 はシュミットハンマーで求めた斜面硬度（反発度）と落石の跳躍量の関係を示したものである。この結果をみると、硬度と跳躍量の関係には、特に相関は見られておらず、同一地質の斜面での実験では反発度と跳躍量の関係を見るのは困難であったのではないかとと思われる。

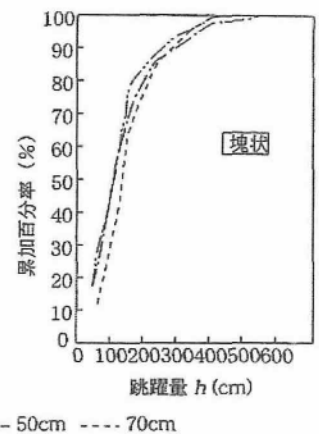
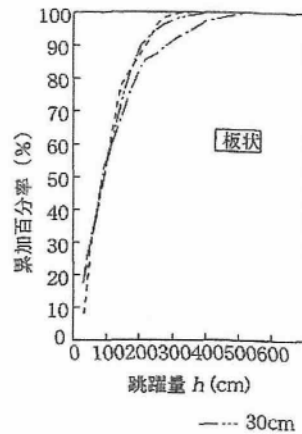
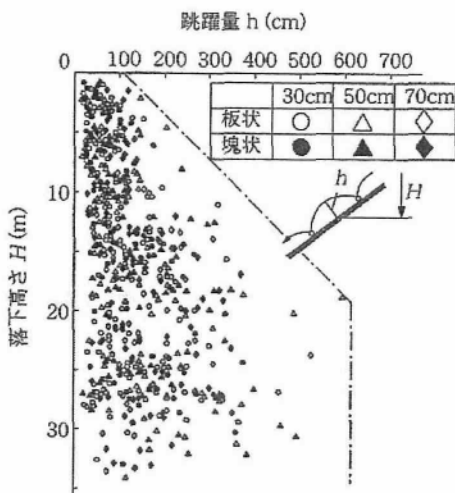


図 3.3.4 落石の落下高さ³⁾と最大跳躍量³⁾ 図 3.3.5 最大跳躍量の累加百分率³⁾

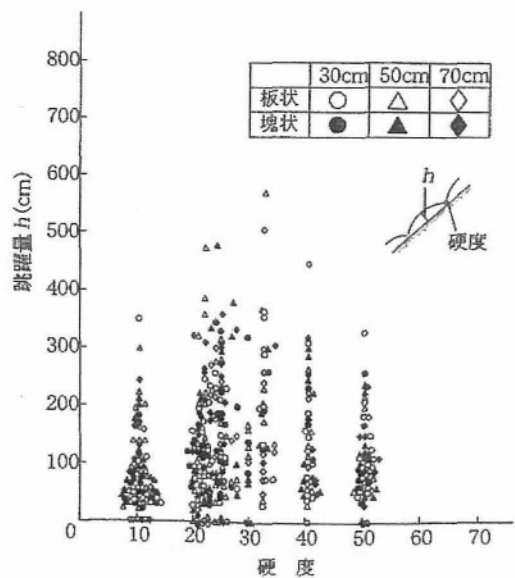
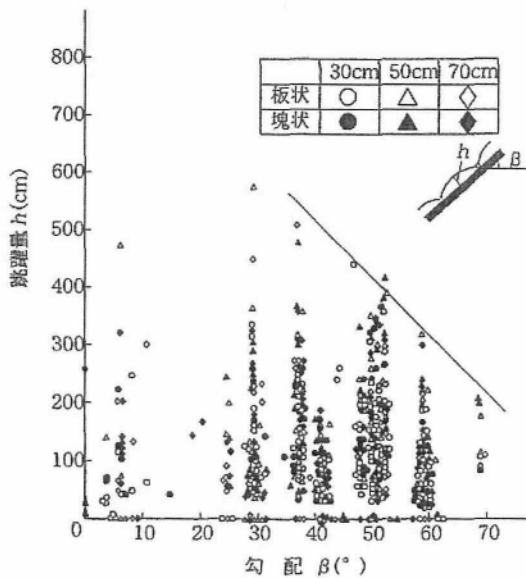


図 3.3.6 斜面勾配と最大跳躍量³⁾

図 3.3.7 斜面硬度と最大跳躍量³⁾

3.3.3 四国建設コンサルタントの実験（1983年）⁴⁾

(1) 実験概要

目的：落石跳躍高さの合理的な推定手法の確立

場所：徳島県鳴門市中山の碎石場

実施年：昭和58年（1983年）

方法：実験斜面は高低差22.5m，斜面勾配約48°．地質は砂岩・頁岩互層，凹凸小．

供試落石は質量6.0～47.5kgfの角ばった形状で同一地点から落下させる．

落石挙動はシネカメラとビデオカメラでの撮影と斜面上に設けた5m間隔の標識を目印にした目視観察によって追跡する．

(2) 実験結果

図3.3.8および図3.3.10は落下高さと斜面に衝突する前後の落石速度を落石質量との関係でまとめたものである．これによると，衝突前後どちらの場合も落石の質量による速度の違いは認められない．両図から反発係数 e （衝突後の速度/衝突前の速度）を求めると， $e=0.4/0.66 \approx 0.6$ 程度であることがわかる．

図3.3.11は落下高さと最大跳躍高の関係を示したものであるが，これによると落下高さ（斜面高さ+投石高さ）が30mまでであるが，最大跳躍高さは落下高さが大きくなるにつれて増加する傾向にある．これは，他の実験で見られたような落下高さがある一定値（30mと20m）を超えると最大跳躍高が収束していくという傾向とは異なる結果である．

斜面に衝突する直前の速度 V_2 (m/s)

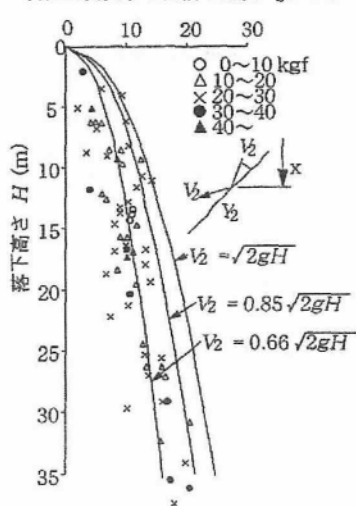


図 3.3.8 衝突直前の速度⁴⁾

跳躍開始直前速度 V_1 (m/s)

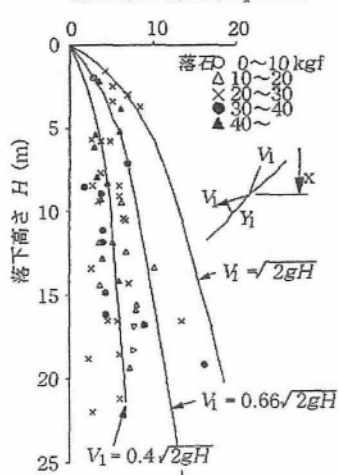


図 3.3.10 衝突後の速度⁴⁾

最大跳躍高 h (m)

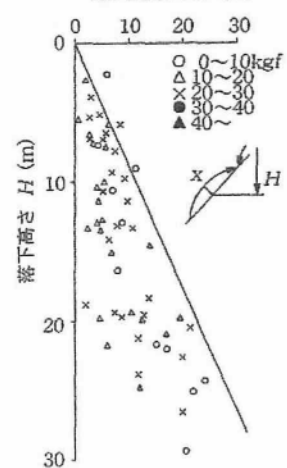


図 3.3.11 最大跳躍高⁴⁾

3.3.4 まとめ

国内で行われた主要な落石実験 3 例について説明したが、これらの実験は必ずしも同等の結果は示されていない。実験結果の相異点をまとめると、表 3.3.1 のようになる。

表 3.3.1 落石実験結果の相違

落石実験実施機関	落石跳躍量について	落石速度 v について
1) 日本道路公団 (1973)	落下高さ 30mまでは増加し、最大跳躍量 2mに収束する。	落下高さ $H=40\text{m}$ までは増加し、それ以降は収束する傾向にある。 増大領域では落石速度 $v = 0.85 \sim 0.98\sqrt{2gH}$ 。
2) 建設省 (1981)	落下高さ 20m以上で収束していく傾向がある。 最大跳躍量は 3m~5m。	
3) 四国建設コンサルタント (1983)	落下高さの増加に伴い跳躍高さも増加する。 跳躍量の収束は認められない。 最大跳躍高さは 10~20mにも及ぶ。	落下高さの増加に伴い落石速度も増加する。 落石速度の収束は認められない。 落石速度は $v = 0.66 \sim 0.85\sqrt{2gH}$ 。 石の重量との相関は認められない。

以上のように、落石実験の結果には、落石跳躍量、落石速度についてかなりの相違が見られる。現行の落石対策設計においては通常は上記 1) の日本道路公団の実験結果をもとにしてまとめられた「落石対策便覧」(日本道路協会)¹⁾を基準にした経験則による手法で設計を行っている。しかしながら、経験則のもとなる実験結果においても上述したような相違点がある。本論文で用いる DEM のシミュレーションでは従来の方法では取り扱うことのできない落石の挙動や運動エネルギーの変化などの特性をあきらかにできるため、今後は落石実験とシミュレーションでの検証をより厳密に行っていけるものとする。

3.4 落石対策工

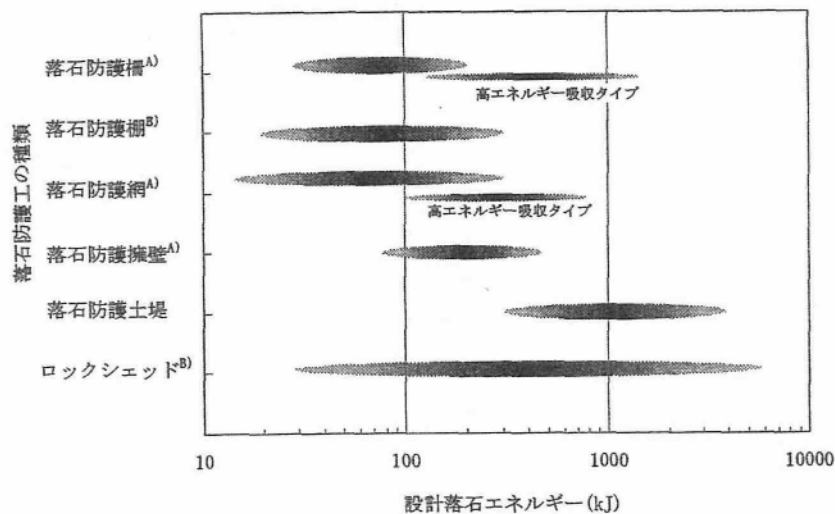
本研究は、個別要素法を用いた数値シミュレーションを中心とする研究である。そこでは、到達域や落石エネルギーの予測に重点をおいた比較検討をとなる。そこで、本節では、数値解析によって得られた結果を実務に導入する上で必要となる落石対策工の特徴について記述する。

落石対策工は、大きく分けると落石予防工と落石防護工がある。

落石予防工は落石源を処理するものである。根固め工、ロックネット、ロープネット、ロックボルト（アンカー）、接着工法、除石（小割り、撤去）などがある。

これに対して、落石防護工は、落石という移動する物体の運動エネルギーに対抗するという独特の構造物である。落石運動を止めたり、落石の運動経路を変えること、で被害を食い止めるものである。落石防護柵、落石防護壁、落石覆工（ロックシェッド）、リングネットなどがある。落石防護工のおおよその対応可能なエネルギー範囲を図3.4.1に示す。

図3.4.1をみればわかるように落石防護工は落石のエネルギーによって、それに対応できる防護工の種類が決まってくる。したがって、この運動エネルギーをどう見積もるかが大きな課題である。現状の設計法では、これを既往の実験から得られた経験則によって導き出している。具体的には、予想される落石の重量、速度、最大跳躍高さや地形、地質などを勘案して前節で述べたような簡便な方法で検討を行っている。本研究においては、この部分をいかに充実したものにするかを目的とする。



注1) 本図は既往の施工実績、実験事例等から、各工法の適用範囲の目安を示したものである。

注2) 上記工法のうち A)はエネルギー計算により設計される工法、B)は静的な強度計算により設計される工法であり、工種により設計法が異なるため本来単純には比較はできない。一般には静的な強度計算により設計されたものは、設計

図 3.4.1 落石防護工の適用範囲の目安

以下に、落石対策のフローと対策工法の考え方の参考資料を示すと共に、鳥取県内あるいは近辺で実施された落石対策工を写真で示す。図 3.4.2、表 3.4.1 は落石対策工の検討方針を立てる際に利用される。落石エネルギーが比較的小さい場合は持ち受け型の落石防護工を選定し、落石エネルギーが大きな場合は落石発生源対策としての落石予防工の選定あるいは防護工との併用を計画するのが一般的である。また、発生源での崩壊が予想されるような時はおのずと予防工中心の対策となる。

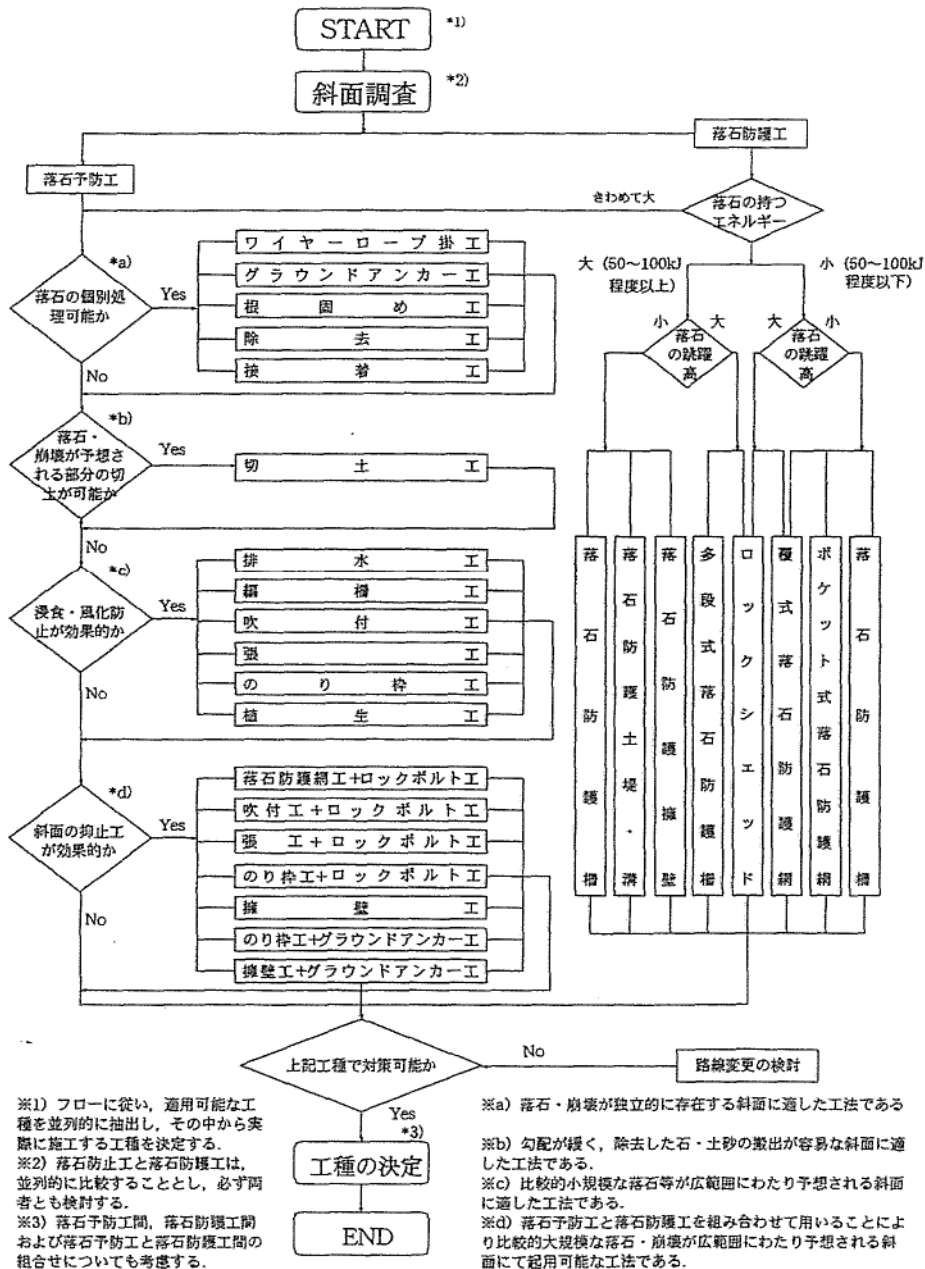


図 3.4.2 落石対策工の選定フローチャート 1)

表 3.4.1 現場の状況と対策の考え方¹⁾

対策の考え方		現場の状況	対策工	工法略図	備考
発生源対策	切土・除去工	不安定な転石、浮石を限定することができ、それを切土または除去することが可能な箇所。	切土工 除去工		
	切土または除去工ができない箇所。切土以外の発生源対策工の方が有利な箇所	不安定な転石、浮石を限定し、それを斜面上に固定することが可能な箇所。 (転石、浮石の下部がえぐられている場合)	根固め工 接着工		
		不安定な転石、浮石を限定し、それを斜面上に固定することが可能な箇所。 (転石、浮石の上部を固定することにより安定すると判断される場合)	ワイヤー・ロープ 掛工 グラウト・アンカー工 ロックボルト工		アンカーの長さは状況に応じて増減する。状況に応じて短いロックボルトを採用する。
		浮石型落石の発生源として場所が限定される箇所。	吹付工 張工 のり砕工		ロックボルト工やアンカー工との併用が考えられる。
防護対策	発生源対策ができない箇所。防護対策の方が有利な箇所。	のり面、斜面上に沿った小規模落石が心配される箇所。 (路側あるいは、路側構造物の上部に防護柵を設ける余裕がある場合)	防護柵工		
		のり面、斜面上に沿った小規模落石が心配される箇所。 (路側あるいは、のり面が路側にせまっておき、防護柵を設ける余裕がない場合)	落石防止網工		ポケット式と覆工式がある。
		中・大規模落石が心配される箇所。沢部などのように路側に余裕があり、待受け擁壁が設置できる場合。	落石防護擁壁工		
		中・大規模落石が心配される箇所。落石発生源、落石の規模、飛びはね高さ等から他の対策が取れない場合。	ロックシェッド		
発生源・防護対策の組合せ	斜面上に無数の浮石・転石があり、落石群としての対策が必要な場合など。	上記対策工の組合せが必要			

(落石対策便覧 p. 64 より加筆引用)



写真 3.4.1 のり枠アンカーとリングネット
(鳥取県溝口町)



写真 3.4.2 ロープネット
(鳥取県佐治村)



写真 3.4.3 接着ボンド工法
(兵庫県佐用町)



写真 3.4.4 覆式ロックネット
(鳥取県溝口町)



写真 3.4.5 ポケット式ロックネットと防護柵
(鳥取県溝口町)



写真 3.4.6 高エネルギー吸収型落石防護柵
(鳥取県溝口町)



写真 3.4.7 古タイヤを使った防護柵
(鳥取市)

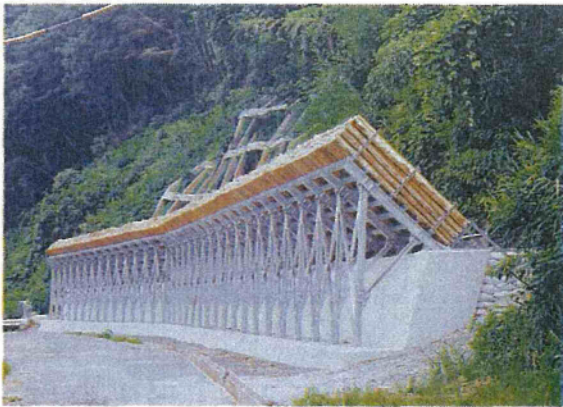


写真 3.4.8 木材を使った防護柵
(鳥取県溝口町)



写真 3.4.9 曲柱型の落石防護柵
(鳥取県西伯町)



写真 3.4.10 リングネット
(鳥取県溝口町)



写真 3.4.11 ロックシェッド

3.5 現状の設計手法と問題点

現状の設計解析手法は経験則による方法が主体である。これは、既往の実験データなどに基づきある程度経験的に落石速度、衝撃力、落石エネルギーなどを算出する方法である。この方法は、「落石対策便覧」(社団法人日本道路協会)¹⁾にまとめられており、現在わが国のほとんどの落石対策はこの方法に従って実施されている。以下に、この方法の考え方を述べる。

3.5.1 落石の跳躍高さ

図 3.5.1 に現場落石実験の例を示す。この実験結果によれば落石の跳躍高さは形状に左右されず、ほとんど 2m 以下であるが、途中斜面に突起がある場合は、これを越えることが示されている。落下高さとの関係は、落下高さが 30m までは高さが大きくなるほど跳躍量(高さ)が大きくなるが、落下高さが 30m を超えると跳躍量は増加しない傾向にあることが分かる。以上のことから、現行の落石対策設計では、そのほとんどが跳躍高さを 2m に設定している。

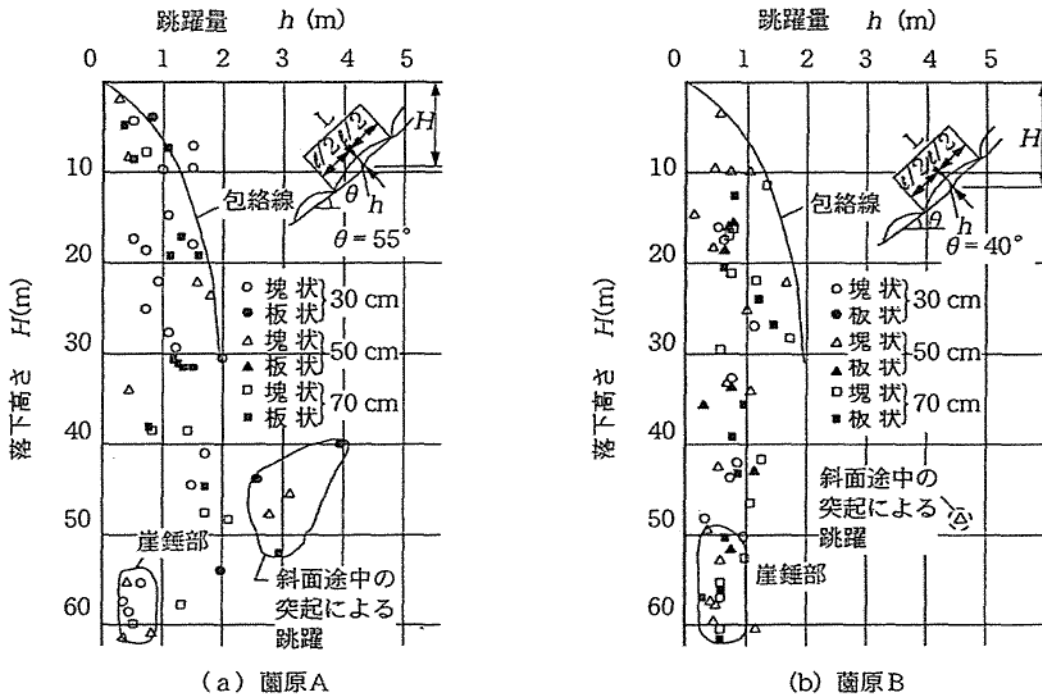


図 3.5.1 落石の跳躍量と落下高さ¹⁾

3.5.2 落石の速度

図 3.5.2 は、落石実験結果より、落石高さ H と落石速度 V の関係をまとめたものである。図中の α は残像係数と呼ばれる自由落下速度に対する比である。図によると、落石高さが40mを超えると、落石速度が一定値に収束する傾向があることがわかる。しかし、この傾向の意味するところは良くわかっていない。現行の落石対策設計では、落石高が40mを超える場合は、40m地点での速度あるいはエネルギー値をもとに設計を行っている。落石速度、落石エネルギーが一定値に収束する現象については、前項の既往落石実験で述べたように収束しない現象もみられている。このため、現状の方法では危険側の設計となる恐れがあり、さらなる研究が必要と考える。本論文では4章において、これをシミュレーション解析によって検討している。

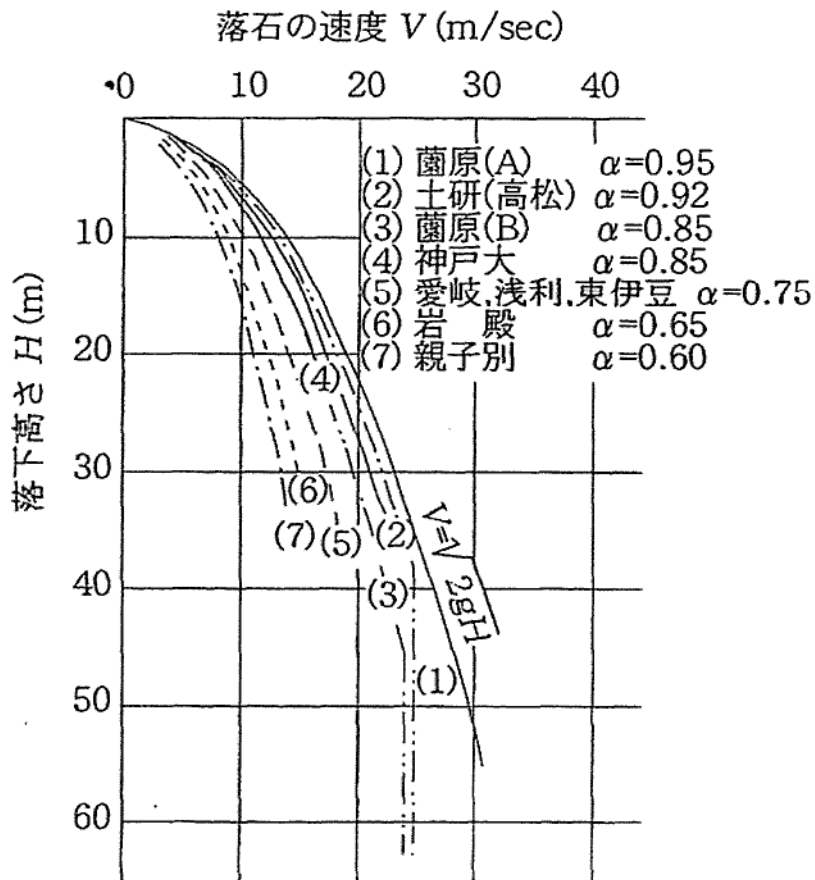


図 3.5.2 落石高さ H と速度 V の関係¹⁾

3.5.3 落石の運動エネルギー

落石の運動エネルギー E は落石の線速度エネルギー E_v と回転エネルギー E_r の和で表される。

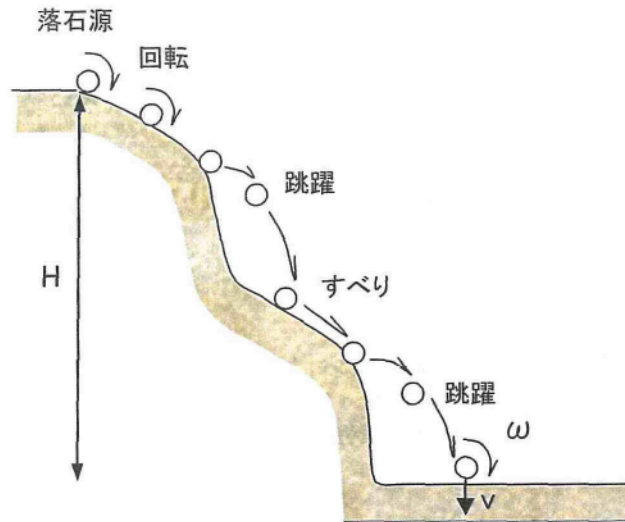


図 3.5.3 落石運動模式

すなわち、

$$E = E_v + E_r$$

これに、それぞれのエネルギー式と等価摩擦係数などを考慮すると、落石の運動エネルギーは次式のようになる。(3.5.1) 式は 3.2 において誘導している。

但し、現行の基準¹⁾では、落石の落下高さが 40m を超える場合は、エネルギーの増加はないものとし、落下高さ 40m と同一のエネルギー値をもちいている。

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) m \cdot g \cdot H \quad (3.5.1)$$

ここに、 β : 回転エネルギー係数

(大半が既往の実験結果より 0.1 を採用, E_v の 10%)

μ : 等価摩擦係数

θ : 斜面勾配

m : 落石の質量

H : 落石の落下高さ

g : 重力加速度

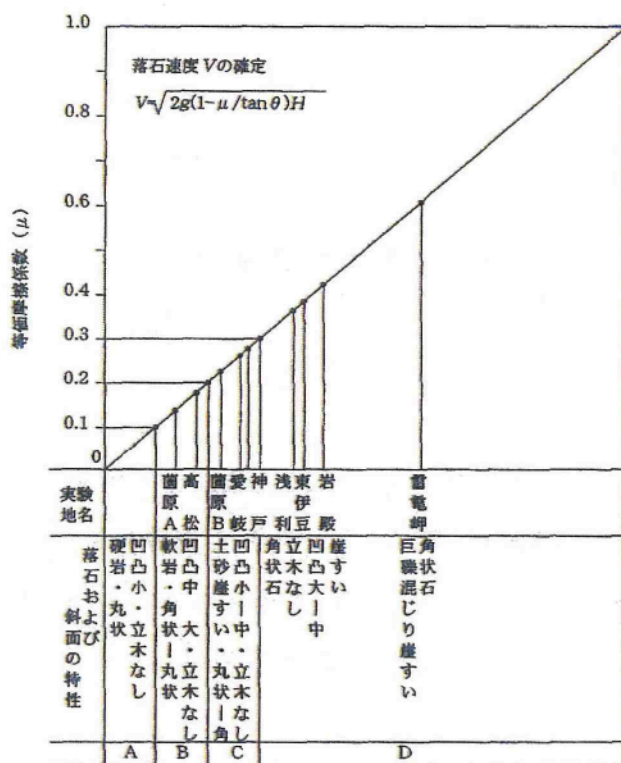
落石速度と各エネルギーは次式にもとづく。

$$\text{落石速度: } V = \alpha \cdot \sqrt{2gH} \quad (3.5.2)$$

$$\text{残存係数: } \alpha = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}} \quad (3.5.3)$$

$$\text{線エネルギー: } E_v = \frac{1}{2} mV^2 \quad (3.5.4)$$

$$\text{回転エネルギー: } E_r = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (3.5.5)$$



区分	落石および斜面の特性	設計に用いる μ	実験から得られる μ の範囲
A	硬岩，丸状：凹凸小，立木なし	0.05	0~0.1
B	軟岩，丸状～角状：凹凸中～大，立木なし	0.15	0.11~0.2
C	土砂・崖錐，丸状～角状：凹凸小～中，立木なし	0.25	0.21~0.3
D	崖錐・巨礫混り崖錐，角状：凹凸中～大，立木なし～あり	0.35	0.31~

図 3.5.4 斜面の種類と等価摩擦係数¹⁾

3.5.4 落石の質量

落石対策便覧⁴⁾によれば、「落石質量は現地で測定した落石の単位体積質量を用いて算出するのが望ましいが、測定困難な場合には単位体積重量を 26KN/m³として算出してよい」とされている。

表 3.5.1 に各種岩石毎の比重および吸水率の一般値を示す。これによると、通常の場合には単位体積重量 26KN/m³（比重 2.60）として問題ないと考えられるが、一部の岩石（玄武岩などの塩基性岩）ではさらに高い値を用いたほうが良いと思われる。

表 3.5.1 各種岩石の比重および吸水率⁵⁾

種 類	比 重	吸 水 率 (%)	
花 崗 岩 類	最 大	2.76	2.4
	最 小	2.53	0.2
	平 均	2.64	0.5
石 英 閃 緑 岩	最 大	2.85	0.8
	最 小	2.61	0.2
	平 均	2.72	0.5
斑 岩 お よ び 玢 岩 類	最 大	2.82	6.3
	最 小	2.53	0.1
	平 均	2.64	0.9
石 英 安 山 岩	最 大	2.63	5.1
	最 小	2.19	0.8
	平 均	2.47	2.8
輝 石 安 山 岩	最 大	2.78	4.9
	最 小	2.30	0.5
	平 均	2.53	2.3
橄 欖 輝 石 安 山 岩	最 大	2.83	3.6
	最 小	2.64	0.9
	平 均	2.68	1.5
古 銅 輝 石 山 岩	最 大	2.93	1.1
	最 小	2.61	0.2
	平 均	2.82	0.5
玄 武 岩	最 大	2.72	2.1
	最 小	2.71	1.4
	平 均	2.72	1.7
石 灰 岩	最 大	2.81	3.4
	最 小	2.40	0.1
	平 均	2.69	0.4
砂 岩	最 大	2.79	9.9
	最 小	2.34	0.1
	平 均	2.57	1.9
鉄 鉱 滓	最 大	3.50	1.9
	最 小	2.51	0.3
	平 均	2.89	1.2

3.5.5 落石運動エネルギーと衝撃力の計算例

この表はある斜面において、落石径と落下高さの違いによるエネルギー変化を見るために作成したものである。現行の設計手法では、このような計算表を何種類か作成しておくことで設計検討ができるように単純化されている。

表 3.5.2 落石エネルギーの計算例

< 落石径を変化させた場合 >

浮石・転石 番号	浮石の大きさ(m) 直径d	落石サイズ V(m ³)	重量 W(t)	斜面勾配 θ(度)	落差 H(m)	摩擦係数 μ	落石エネルギー E(tfm)	落差補正 H'(m)	落石の衝撃力 P(t)
	0.5	0.196	0.53	40	40	0.35	13.6	23.3	67
	0.6	0.283	0.76	40	40	0.35	19.6	23.3	86
	0.7	0.385	1.04	40	40	0.35	26.6	23.3	105
	0.8	0.503	1.36	40	40	0.35	34.8	23.3	126
	0.9	0.636	1.72	40	40	0.35	44.1	23.3	147
	1.0	0.785	2.12	40	40	0.35	54.4	23.3	169
	1.1	0.950	2.57	40	40	0.35	65.8	23.3	192
	1.2	1.131	3.05	40	40	0.35	78.3	23.3	216
	1.3	1.327	3.58	40	40	0.35	91.9	23.3	240
	1.4	1.539	4.16	40	40	0.35	106.6	23.3	265
	1.5	1.767	4.77	40	40	0.35	122.4	23.3	290
	1.6	2.011	5.43	40	40	0.35	139.2	23.3	317
	1.7	2.270	6.13	40	40	0.35	157.2	23.3	343
	1.8	2.545	6.87	40	40	0.35	176.2	23.3	370
	1.9	2.835	7.66	40	40	0.35	196.3	23.3	398
	2.0	3.142	8.48	40	40	0.35	217.5	23.3	426
	2.1	3.464	9.35	40	40	0.35	239.8	23.3	455
	2.2	3.801	10.26	40	40	0.35	263.2	23.3	484
	2.3	4.155	11.22	40	40	0.35	287.7	23.3	514
	2.4	4.524	12.21	40	40	0.35	313.3	23.3	544
	2.5	4.909	13.25	40	40	0.35	339.9	23.3	574

< 落下高さを変化させた場合 >

浮石・転石 番号	浮石の大きさ(m) 直径d	落石サイズ V(m ³)	重量 W(t)	斜面勾配 θ(度)	落差 H(m)	摩擦係数 μ	落石エネルギー E(tfm)	落差補正 H'(m)	落石の衝撃力 P(t)
	0.5	0.196	0.53	40	40	0.35	13.6	23.3	67
	0.5	0.196	0.53	40	35	0.35	11.9	20.4	62
	0.5	0.196	0.53	40	30	0.35	10.2	17.5	56
	0.5	0.196	0.53	40	25	0.35	8.5	14.6	51
	0.5	0.196	0.53	40	20	0.35	6.8	11.7	44
	0.5	0.196	0.53	40	18	0.35	6.1	10.5	42
	0.5	0.196	0.53	40	16	0.35	5.4	9.3	39
	0.5	0.196	0.53	40	14	0.35	4.8	8.2	36
	0.5	0.196	0.53	40	12	0.35	4.1	7.0	33
	0.5	0.196	0.53	40	10	0.35	3.4	5.8	29
	0.5	0.196	0.53	40	5	0.35	1.7	2.9	19

(諸条件)

- ・落石サイズ(V) $(d/2)^2 \times \pi$
- ・落石重量(W) $V \times \gamma$ ($\gamma = 2.7 \text{tf/m}^3$)
- ・斜面勾配(θ) 落石ルートの最急勾配
- ・落石エネルギー(E) $E = (1 + \beta)(1 - \mu / \tan \theta) W \cdot H$
- ・落差(H) 落下高さ40mを越える場合には、落石高さを40mとする。
- ・衝撃力(P) $P = 15.49 W^{2/3} \cdot H'^{3/5}$ (Hertz の衝突理論)
- ・落差補正(H') $H' = (1 - \mu / \tan \theta) H$

3.5.6 落石防護柵の設計の考え方

ここでは、落石防護工で最も使用頻度の高い落石防護柵の設計の考え方と問題点を示す。

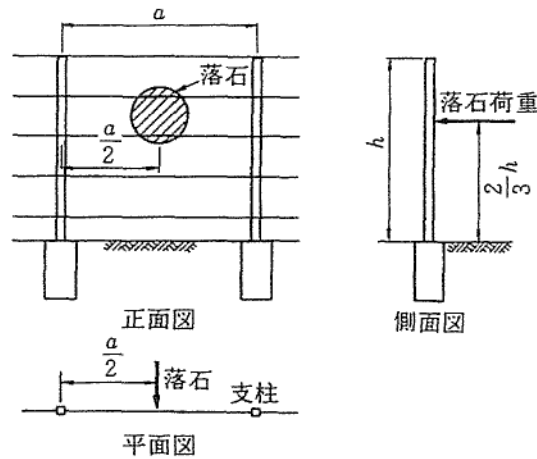


図 3.5.5 落石荷重の作用位置¹⁾

落石の衝突位置は、図 3.5.5 に示すように支柱間の中央で、落石の衝突方向は柵に直角としている。

これは、支柱間の中央に落石が当たった場合が防護柵のエネルギー吸収能力がもっとも小さいとされているからである。落石の方向は柵に作用する落石エネルギーが最大となる柵の直角方向に設定している。

このような条件で、柵の許容できるエネルギー（可能吸収エネルギー） E_T を算出し、これと前述した落石のエネルギー E とを比較検討することで落石防護柵の設計を行っている。

$$\text{柵の可能吸収エネルギー} \quad E_T = E_R + E_P + E_N \quad (3.5.6)$$

E_R : ワイヤロープの吸収エネルギー

E_P : 支柱の吸収エネルギー

E_N : 金網の吸収エネルギー

$$\text{落石エネルギー} \quad E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) m \cdot g \cdot H \quad (3.5.7)$$

落石エネルギーの式は、落石速度 $V = \alpha \cdot \sqrt{2gH}$ （自由落下速度を基本とした式）

$$(3.5.8)$$

から導かれた式であり、落石の方向による速度成分の違いなどは考慮されていない。すなわちもっとも大きな落石速度を、柵に生じるモーメントがもっとも大きくなる方向に作用させているのである。この考え方は、落石の軌跡を推定することが困難であることから、安全側に立った設計手法を採らざるを得なかった結果であると思われる。しかしながら、落石軌跡を推定する方法が確立されればより合理的な考え方に拠る設計手法が採られると考えられる。このような観点においても、落石シミュレーションの実用化が急がれると考える。

3.5.7 ロックシェッド設計の考え方

ロックシェッドは落石防護柵では対応できない規模の大きな落石や跳躍量のある落石に対して用いられる。

ロックシェッドの設計方法は、落石防護柵のような落石エネルギーに基づいた簡易な設計法ではなく、落石による衝撃力に対して構造物の耐力を照査する方法が採られている。これは、ロックシェッドは規模が大きく、高価であるため、永久構造物としての使用が期待されているからである。

以下に、ロックシェッドの設計の考え方、落石衝撃力の設定の仕方について説明する。

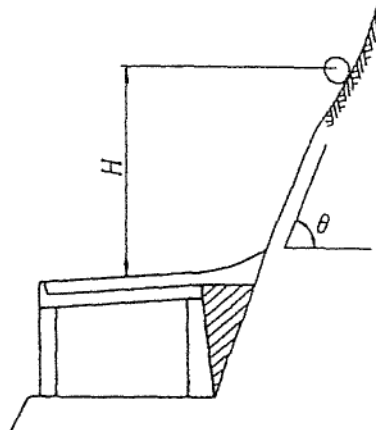


図 3.5.6 落石の落下高さ¹⁾

ロックシェッド設計は、落石による衝撃力を次のように静的荷重に置き換えることを基本とし、(3.4.9)式によって与えられる。この式は、落石を球形、被衝突面を平面と仮定して、Hertzの衝突理論を適用して求められた推定式⁶⁾である。

$$P = 2.108 (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (3.5.9)$$

P：落石の衝撃力 (KN)

m：落石の質量 (t)

g：重力加速度 (m/s^2)

λ ：ラーメン定数 (1000～10,000KN)

H：落石の落下高 (m)

落石の落下高 H は、自由落下の場合は落差 H をそのまま使用するが、勾配 θ の斜面に沿って落下する場合は次式による換算高さ H' を用いる。

$$\text{換算高さ } H' = \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) \cdot H \quad (3.5.10)$$

μ : 斜面の等価摩擦係数

(3.4.9)式の衝突理論式は、基本的には落石が垂直に落下する場合の推定式であるため、実際には落石の最終速度に対応する自由落下高さを用いるのが望ましい。しかしながら、自由落下のみの落石は少なく、多くの落石は落下途上に衝突、すべりを繰り返すため最終速度を推定することは困難である。このため、通常は斜面の勾配 θ と等価摩擦係数 μ を用いた換算高さで算出している。

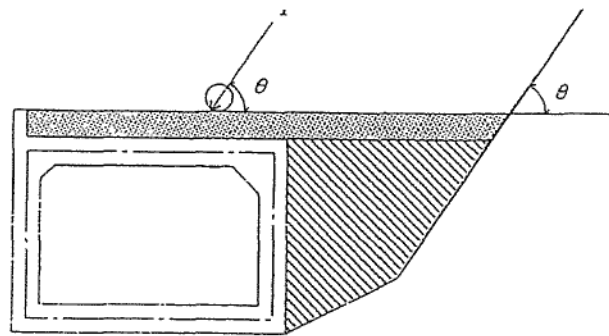


図 3.5.7 衝撃力の作用方法¹⁾

落石の作用方向は自由落下の場合は鉛直方向とするが、斜面を転落してくる落石の場合は入射角を斜面の勾配 θ とし、ロックシェッド頂版面直角方向成分 P_v は次式により算出されている。

$$P_v = P \cdot \sin \theta \quad (3.5.11)$$

通常は、このような考え方とっているが、落石軌跡を推定する方法が確立されれば、斜面勾配を用いるのではなく、推定した落石の入射角を直接入力することができる。

以上に述べたように、ロックシェッドの設計においても、落石挙動、落石速度などの重要な要素を経験則によって求めているのが、現在行われている設計方法である。このような課題を、落石シミュレーションの実用化により克服していき、適正な設計を行えるようにすることが望まれている。これに、DEM 解析を役立てたいと考えている。

3.6 まとめ

本章では、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。以上のことから、従来経験則による方法に代わり、種々の要因を考慮できる数値解析手法の開発が必要となると考える。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会編：落石対策便覧，pp.1-250，2000
- 2) 日本道路公団東京支社・(株)建設企画コンサルタント：落石実験調査報告書，1973.
- 3) 佐々木康，谷口栄一：落石の跳躍量に関する実験，第 14 回日本道路協会論文集，pp.113-115，1981.
- 4) 右城 猛，村上哲彦：落石の飛躍高の推定，第 1 回落石の衝撃力およびロックシェットの設計に関するシンポジウム論文集，pp48-54，1983.
- 5) 林業土木コンサルタンツ技術研究所：森林土木ハンドブック，p.67，1997.
- 6) 土木学会編：土木技術者のための振動便覧，1985

4章 落石の3次元数値シミュレーション法

4.1 はじめに

山地の多いわが国では、主要幹線道路や観光道路が山間部を縫うように走っている。しかしながら、国土の大半が脆弱な地盤であるため、降雨や地震等によって土石流や落石が発生し、道路が寸断されるあるいは重大な事故に通じるといった事例が後を絶たない^{1),2)}。2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震においても落石が発生し、被害が発生している³⁾。山間地域での道路交通の安全確保は重要な問題といえる。

このような災害は、災害発生箇所やその規模が特定できなかつたことに起因するともいえる。本章においては、落石の3次元数値シミュレーションの開発について述べるが、その意図するところは、落石発生の危険性を評価し、対策を計画するための基礎情報を得ようとすることである。

落石の危険度を検討する場合、どの位置が落石の発生源であるかは現地調査により比較的容易に判断できるが、落石の落下軌跡や到達位置、跳躍量などについての予測は非常に難しい。本章では、これらの予測を可能とするための3次元数値シミュレーションの開発について述べる。この中では解析の重要なパラメータである減衰係数 κ を反発係数 R_e 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。そして、この手法を用いて単純斜面モデルでの落石解析を行い、落石運動の基本的な性質について考察している。さらに、自然斜面の不均質さを種々の解析定数（減衰係数、摩擦係数など）をモンテカルロ法により、ばらつきを与えることにより表現できることを示し、その適用例について述べている。

4.2 3次元個別要素法の概要

4.2.1 落石に関する数値シミュレーション法

落石の数値シミュレーション法は、質点系シミュレーション法と非質点系シミュレーション法に大別できる。質点系シミュレーション法では、落石の回転運動が無視されるのに対し、非質点系シミュレーション法では、落石は形状を持ったブロックとして扱うことになる。質点系シミュレーション法では、地表面との衝突時の転がりを含む運動を表現するため、多くのモデル化がなされてきた⁴⁾。例えば、鷲田らは、衝突時のみ剛体とする2次元モデルを考案している⁵⁾。

一方、非質点系シミュレーション法では、個別要素法⁶⁾ (Distinct Element Method (DEM)) や DDA (Discontinuous Deformation Analysis; 不連続変形法)⁷⁾ が良く使われる。DDA は、有限要素法と同じくポテンシャルエネルギーの最小化原理を用いて剛性マトリックスを計算し、時間ステップ計算を行う。この際、各ステップでのブロックの位置や形状は前のステップで求めたものから始められ、ブロックの形状の更新から求められた平衡方程式を解いて変形解析を行うものと説明されている。つまり、ブロックの変形を取り扱える点で剛体を仮定する DEM とは相異点を持つ。また、DDA では、準静的な問題への適用では、接触点にペナルティー係数を与えて接触する2つのブロックが過度に食い込まないような手法を採用している。1ブロックの空間の運動に対しては、DDA も並進・回転の運動方程式を解いており、その解き方が陽解法か、陰解法によるかの差があるのみである。有限要素法と同じ解法原理（ただし、要素の剛性を決定する部分）に基づくことの厳密さを報告する例もあるが⁸⁾、不連続性岩盤では、岩自体の変形より不連続面の性状が支配的であること、本研究では落石自体の変形を取り扱うのではなく、空間移動を取り扱うことを考えれば、剛体の力学に基づく手法で十分であると考えられる。

DEM は、地盤を分離した剛体ブロックの集合体としてモデル化し、並進および回転に関する運動方程式を差分法により解き、個々の要素の運動を追跡する数値解析法である。計算過程を示すと図 4.2.1 のようになる。この手法は不連続系の安定解析や破壊後の運動の追跡に適している。図 4.4.2 に個別要素法による解析の一例として、角柱の転倒解析を示す。これは、岩盤斜面の崩壊形態の一つである Toppling 破壊を模擬している。越前海岸の崩壊 (1989) や鳥取県西部地震 (2000) での崩壊でもこのような破壊形態が発生したと言われている⁹⁾。本章に述べる計算モデルは、剛体の力学に基づいた完全に動力的な 3次元モデルである。

このシミュレーション法の開発の大きなポイントは、剛体の3次元空間内における回転運動の表現にある。剛体の回転運動には、オイラーの式を用いるとともに、オイラー角¹⁰⁾を導入している。Cundall^{11),12)}も三次元解析プログラムを開発しているが、準静的な問題への適用に限定して、4.2.2の(4.2.2)式の左辺第2項を無視するとともに、回転に関する運動方程式も地表面を表す全体固定座標系内で解くという簡略化を施している。本計算モデルでは、この第2項についても、忠実に扱うとともに、全体座標系と剛体の慣性主軸座標系の関係も式(4.2.7)(4.2.9)のように取り扱っている。

また、確率論的手法を導入した数値シミュレーション法も提案されている⁵⁾が、衝突時の非線形挙動のモデル化や解析パラメーターの設定などに議論の余地が残っているとされ、合理的な三次元シミュレーション法の開発が望まれている⁴⁾。

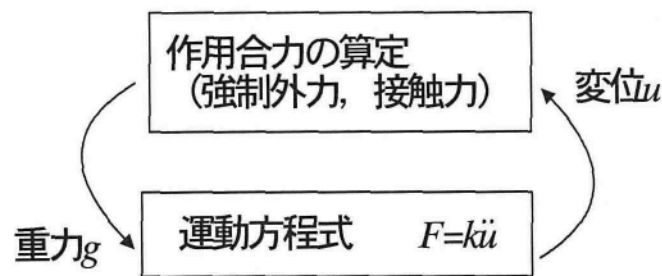


図 4.2.1 運動方程式の逐次解法

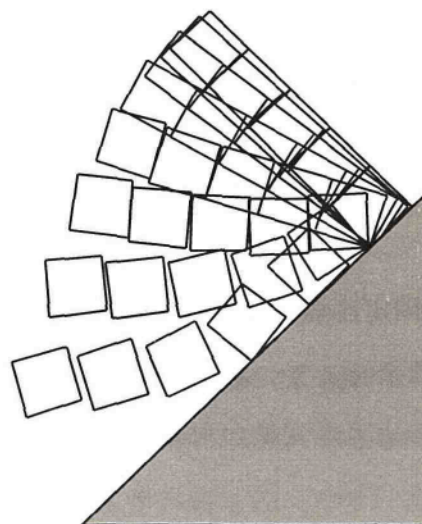


図 4.2.2 Toppling 破壊のシミュレーション

4.2.2 ブロックの運動

1つのブロックの並進運動方程式は次のように表せる.

$$\ddot{x}_i = F_i / m + g_i \quad (4.2.1)$$

ここに, \ddot{x}_i はブロックの重心の加速度, F_i は地表面との接触力, m_i はブロックの質量, g_i は重力加速度ベクトルである. 指標*i*は1~3の範囲で変化し, 地形を表す全体座標系のベクトルの成分を表す. 本文の記述では, x_3 軸が重力方向と一致する.

剛体の回転運動について示すと以下のとおりとなる. 回転運動はオイラー式で表され, ブロックの慣性主軸に対して表される.

$$\begin{aligned} I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 &= M_1 \\ I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 &= M_2 \\ I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 &= M_3 \end{aligned} \quad (4.2.2)$$

ここに, I_1, I_2, I_3 は慣性主軸モーメント, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ は主軸に対する回転速度, M_1, M_2, M_3 はブロックの主軸周りのモーメントである. 次式は, それぞれ時刻*t*の移動速度 $\dot{x}_i^{(t)}$ と回転速度 $\omega_i^{(t)}$ を表す.

$$\dot{x}_i^{(t)} = \dot{x}_i^{(t-\Delta t)} + \ddot{x}_i^{(t)} \Delta t \quad (4.2.3)$$

$$\omega_i^{(t)} = \omega_i^{(t-\Delta t)} + \dot{\omega}_i^{(t)} \Delta t \quad (a=1, 2, 3). \quad (4.2.4)$$

変位増分とブロックの重心位置は以下のように表される.

$$\Delta x_i^{(t)} = \dot{x}_i^{(t)} \Delta t \quad (4.2.5)$$

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \Delta x_i^{(t)}. \quad (4.2.6)$$

次式より, 回転増分 $\Delta\theta_i$ が求まる.

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ -\cos\theta_3 / \sin\theta_1 & \sin\theta_3 / \sin\theta_1 & 0 \\ \cot\theta_1 \cos\theta_3 & -\cot\theta_1 \sin\theta_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} \quad (4.2.7)$$

$$\Delta\theta_i = \dot{\theta}_i \Delta t \quad (4.2.8)$$

ここで, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は全体座標系(固定座標)と回転後の慣性座標系のなす角度, すなわちオイラー角を表す. ここに, 全体座標系(x_1, x_2, x_3)と慣性主軸系(ξ, η, ζ)を図4.2.3のように定義すると, 両座標系間には, 次のような変換が可能である.

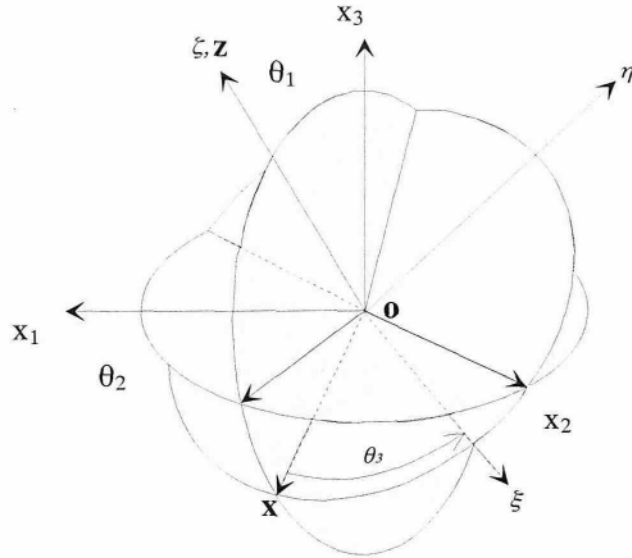


図 4.2.3 全体座標系と慣性主軸系

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (4.2.9)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3 & -\sin \theta_1 \cos \theta_3 \\ -\cos \theta_2 \cos \theta_1 \sin \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_3 & -\sin \theta_2 \cos \theta_1 \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \cos \theta_2 & \sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_1 & \sin \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}$$

ブロックの頂点座標は次式で与えられる。

$$x_i^{v(t+\Delta t)} = x_i^{v(t)} + \Delta x_i^{(t)} + e_{ijk} \Delta \theta_j (x_k^{v(t)} - x_k^{(t)}) \quad (4.2.10)$$

e_{ijk} は交代テンソルである。

4.2.3 接触力の算出

次に、岩塊と地表面の接触判定について述べる。地表面は三角形要素の分割し、できるだけ原地形に近づける。剛体要素 1 頂点の三角形要素への接触は、三角形要素および当該頂点の座標を水平面に投影した後、図 4.2.4 を参照して、まず、次式を満足する必要がある。

$$A = A_1 + A_2 + A_3 \quad (4.2.11)$$

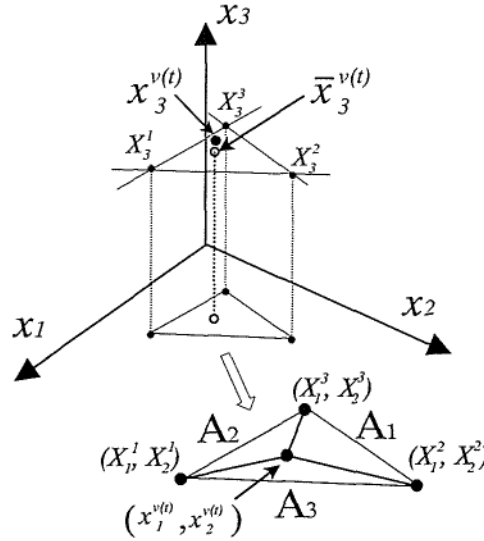


図 4.2.4 地表面の三角形要素への分割

ここに、 A （添え字なし）は、三角形要素の水平面への投影面積、 A_1 、 A_2 、 A_3 は、剛体の頂点と三角形要素の頂点により作られる三角形の面積を表す。さらに、

$$dz = x_3^{v(t)} - \bar{x}_3^{v(t)} < 0 \quad (4.2.12)$$

なるとき、岩塊は地表面に接触していると判定でき、接触相手の三角形要素（地表面）も特定できる。なお、 X_3^a 三角形要素の頂点座標を示すとき、

$$\bar{x}_3^{v(t)} = \sum_{l=1}^3 X_3^l \frac{A_l}{A} \quad (4.2.13)$$

と求めることができる。この値は、三角形要素を含む平面と $x_3 = x_3^{v(t)}$ なる直線との交点の x_3 座標を表す。接触速度と変位ベクトルは(4.12)(4.13)式で算定される。これらの量は、全体座標系内の表示となっている。

$$V_i = \dot{x}_i^{(t)} + e_{ijk} \dot{\theta}_j (x_k^{v(t)} - x_k^{(t)}) \quad (4.2.14)$$

$$\Delta U_i = V_i \Delta t. \quad (4.2.15)$$

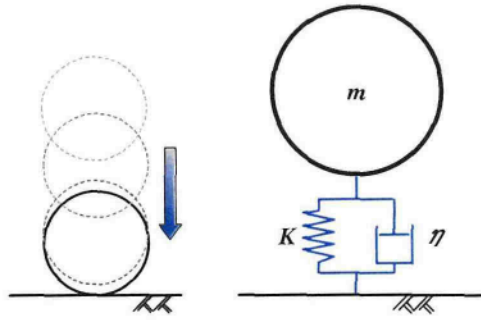


図 4.2.5 接触点に挿入したバネ-ダッシュポット系

岩塊-地表面間の接触力は、三角形に対して設けられた局所座標系 (n, s, t) 内で算定する。 n 軸は平面の法線方向、 s, t 軸は平面内にある。まず、接触相対変位は、次のようには、法線成分と接線成分とに分解して求められる。

$$\begin{pmatrix} \Delta u_s \\ \Delta u_t \\ \Delta u_n \end{pmatrix} = [T] \{ \Delta U_i \} \quad (4.2.16)$$

$[T]$ は全体座標 (x_1, x_2, x_3) 系から局所座標系への座標変換マトリックスである。接触変位増分は接触力増分の算定に用いられる。

接触力は、接点間に挿入したバネ-ダッシュポット系を用いて算定する。岩塊が地面に衝突したとき、岩塊は運動エネルギーを失い、例えば、落下開始位置に復することはない。ダッシュポットはこのような現象を表すために導入されたものである。接触力は次のように計算する。

弾性接触力の増分は、

$$\begin{aligned} \Delta e_n &= k_n \Delta u_n, \\ \Delta e_s &= k_s \Delta u_s, \\ \Delta e_t &= k_t \Delta u_t, \end{aligned} \quad (4.2.17)$$

ここに、 k_n, k_s は、バネの剛性係数である。

弾性接触力は(4.2.18)式で与えられる。

$$\begin{aligned} e_n &:= e_n + \Delta e_n, \\ e_s &:= e_s + \Delta e_s, \\ e_t &:= e_t + \Delta e_t. \end{aligned} \quad (4.2.18)$$

ダッシュポットに生ずる接触力は、

$$\begin{aligned}
d_n &= \eta_n \Delta u_n / \Delta t, \\
d_s &= \eta_s \Delta u_s / \Delta t, \\
d_t &= \eta_s \Delta u_t / \Delta t,
\end{aligned}
\tag{4.2.19}$$

ここに、 η_n, η_s は、粘性減衰係数である。

接線方向の接触合力 $f_{st} = \sqrt{e_s^2 + e_t^2}$ が、最大摩擦抵抗 $f_{\max} = e_n \tan \phi$ を超えるときは、バネおよびダッシュポットに生じている力に以下のような条件を適用する。ここに、 ϕ は静止表面摩擦角である。動的な現象を取り扱うので動摩擦係数を用いることも考えうるが、摩擦角より小さい傾斜の斜面上に置かれたブロックが、接点に挿入した弾性バネに変位を生じさせて静止することを表現するため静止摩擦角を採用している。当然、斜面傾度が静止摩擦角より大きいときは、ブロックは斜面下向きに滑動するので、静止摩擦力は接線方向力の上限を与えることになる。この滑動中の斜面方向の接触力は、(4.18)式により求められるので、静止摩擦力を与えつづけることはない。

$$\begin{aligned}
e_s &:= e_s \times f_{st} / f_{\max} \\
e_t &:= e_t \times f_{st} / f_{\max} \\
d_s &= d_t = 0.
\end{aligned}
\tag{4.2.20}$$

接触力はバネおよびダッシュポットに生じた力の和として、(4.2.21)式で求める。

$$\begin{aligned}
f_n &= e_n + d_n, \\
f_s &= e_s + d_s, \\
f_t &= e_t + d_t.
\end{aligned}
\tag{4.2.21}$$

上記の接触力は、局所座標系内の量であるので、次式により全体座標系に変換する。

$$F_i^B = [T]^{-1} \begin{pmatrix} f_s \\ f_t \\ f_n \end{pmatrix},
\tag{4.2.22}$$

ブロックの主軸周りの回転モーメントは次のように算定する。

$$M_a := M_a - e_{abc} \underline{F}_c^B \underline{x}_b^v,
\tag{4.2.23}$$

ここに、下指標 a, b, c は 1~3 の範囲で変化し、岩塊の慣性主軸座標系のベクトル成分を表す。また、 F および x に付けられた下線は、これらが、慣性主軸座標系内で取り扱われていることを表している。

図 4.2.1 の示すように、(4.2.21)から(4.2.23)を時間増分ごとに繰り返すことにより、岩塊の運動を追跡することが可能となる。

4.3 減衰係数の決定法

4.3.1 減衰振動理論による反発係数の算出¹³⁾

前節のような衝突が発生したとき、岩塊は運動エネルギーを失う。これは、法線方向速度係数比（反発係数）あるいは接線速度係数比と言う用語で表現されている⁴⁾。このような衝突に伴う運動エネルギーの損失を、DEMは図4.2.5に示すようなダッシュポットにより表現している⁶⁾。このダッシュポットは現象を理解するためのモデルであるので、減衰係数の実用的な決定法を検討しておく必要がある。図4.3.1は地表面($x_3=0$)の軸を与え、岩石ブロックが地表面に衝突する時刻を t_1 、そのときの速度を v_1 、そして岩石ブロックが地面から離れたときの時刻を t_2 、そのときの速度を v_2 として表したものである。定義上、反発係数 R_e は(4.3.1)式で求められる。

$$R_e = -\frac{v_2}{v_1}, \quad (4.3.1)$$

斜面と接触・非接触を繰り返しながら運動する質点の接触時の運動方程式を以下のように書く。

$$m\ddot{y} + \eta\dot{y} + Ky = mg \quad (4.3.2)$$

ここに、 m ：質量、 K ：接触剛性係数、 g ：重力加速度である。

式(4.3.2)は、減衰振動を示し、図4.3.1は解の一例を描いたものである。これは、 $t=0$ において $y_0=v_0=0$ の例であるが、 $t=t_1$ において、 $y=0$ 、 $\dot{y}=v_1$ の条件を与えたとしても、 $t>t_1$ の解は図中のように得られる。そこで、 $y=0$ に接触平面を仮定して、質点が破線のような空中落下ののち、 $t=t_1$ で平面と接触を開始したとすれば、太線をたどり、 $t=t_2$ で非接触となる。そ

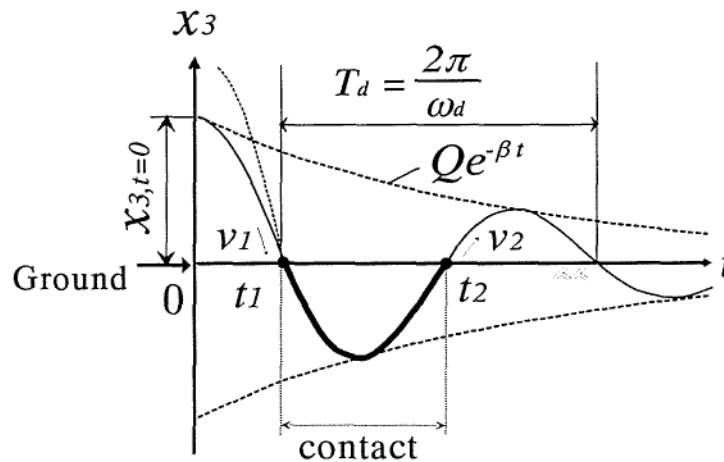


図4.3.1 減衰振動曲線を用いた反発係数の算出

して、質点の斜面との接触時間は、 $dt=t_2-t_1=T_d/2=\pi/\omega_d$ すなわち減衰固有周期の1/2となる
 ことがわかる。速度に対する解は、 $\bar{t}=t-t_1=0$ で、 $y=0$ 、 $\dot{y}=v_1$ とすれば、

$$\dot{y}=(\cos\omega_d\bar{t}-\frac{\beta v_1}{\omega_d}\sin\omega_d\bar{t})v_1\exp(-\beta\frac{\pi}{\omega_d}) \quad (4.3.3)$$

となる、 $t=t_2$ ($\bar{t}=t_2-t_1=\pi/\omega_d$) のときの速度は、

$$v_2=-v_1\exp(-\beta\frac{\pi}{\omega_d}) \quad (4.3.4)$$

となる。(4.24) 式より、

$$Re=-\frac{v_2}{v_1}=\exp(-\beta\frac{\pi}{\omega_d}) \quad (4.3.5)$$

$\beta=\eta/m$ 、 $\omega_n=k/m$ 、 $\omega_d=\sqrt{\omega_n^2-\beta^2}$ 、 $\eta_0=2\sqrt{mK}$ さらに、 $\eta/\eta_0=C$ (減衰定数) として式

(4.3.5) を簡単にする

$$Re=\exp(-\frac{C\pi}{\sqrt{1-C^2}}) \quad (4.3.6)$$

図 4.3.2 は平面と接触・非接触を繰り返しながら運動する球要素の解析と反発係数 Re と減衰係数 η の関係式の対応を示している。反発係数がわかれば、この図を利用して減衰係数の決定が可能となる。

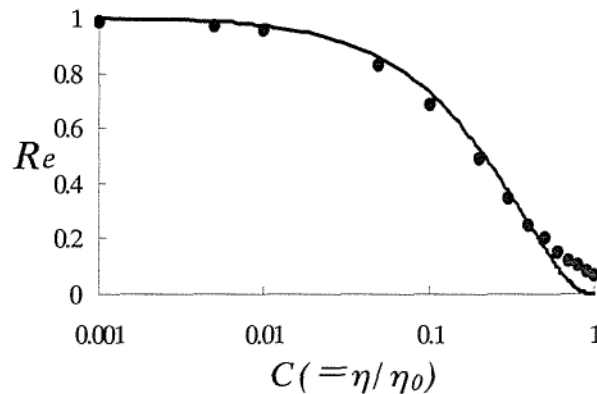


図 4.3.2 反発係数と減衰定数の関係

4.3.2 室内模型実験¹⁴⁾

簡易な室内実験装置を用いて、落下反発試験を実施するとともに、その結果を個別要素解析と比較した。解析に際して、接触剛性係数 K はヤング率，ポアソン比を用いて木山ら¹⁵⁾が提案した弾性接触論により算出し，減衰係数は， $\eta_0=2\sqrt{mK}$ および図 4.3.2 を参照して決定している。

図 4.3.3 は，室内模型実験の概略を示している。実験では，斜面にモルタル板を用い，その表面に，ゴム板（厚さ 5mm），サンドペーパー（＃80 および＃40）を貼り付けて，計 4 種の条件を準備した。落石要素として，ガラス球（ $\phi 2.46\text{cm}$ ）及び鉄球（ $\phi 2.54\text{cm}$ ）を準備し，前述の斜面へ初期速度 0 で自由落下させた。初期落下高さ h_0 は，30，45，60cm の 3 例，斜面傾度 θ は， 30° 45° 60° の 3 例を行っている。落石要素を，デジタルビデオカメラで撮影したのち，その映像の画像処理を行って，落石要素の運動を把握した。

図 4.4.4 および図 4.3.5 は，実験結果の一例と解析結果を示している。図は，斜面と落下要素の接触点を原点に，落下方向を Y 軸，水平方向を X 軸にして， $h_0=30\text{cm}$ ， $\theta=30^\circ$ の例である。表面の変化により斜面への衝突後の軌跡に差が見られるが，0.45~0.55 程度の反発係数が計測されている。この結果と図 4.3.2 から決定した η を用いた個別要素解析結果を図中に描いている。解析結果として，図には，減衰定数 C の値に対して表面摩擦角 ϕ を 30° ， 50° の 2 例を示している。これらの結果より，図 4.3.2 を定数の決定に用いた個別要素解析結果は，実験結果をほぼ表現していることがわかる。

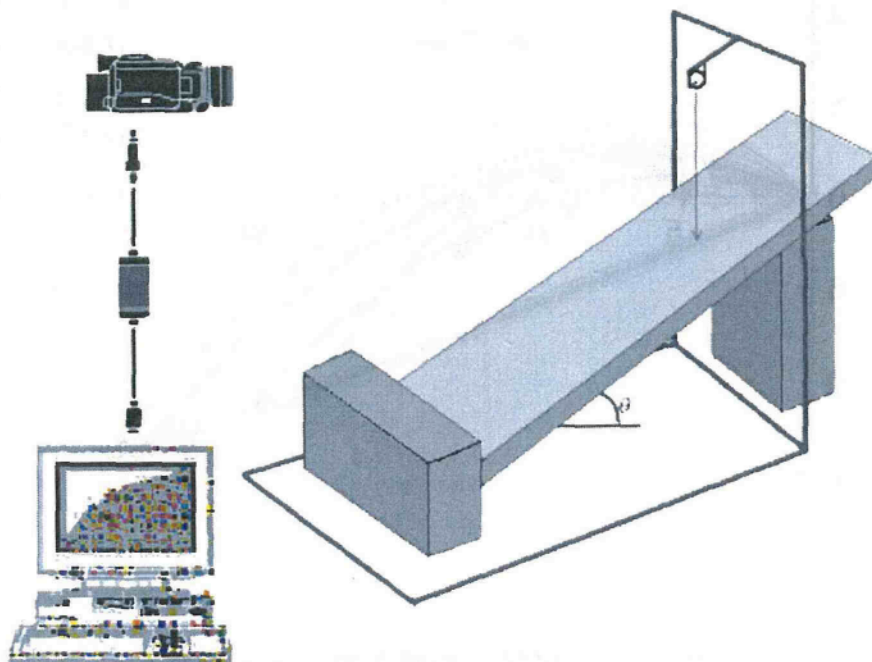


図 4.3.3 実験装置

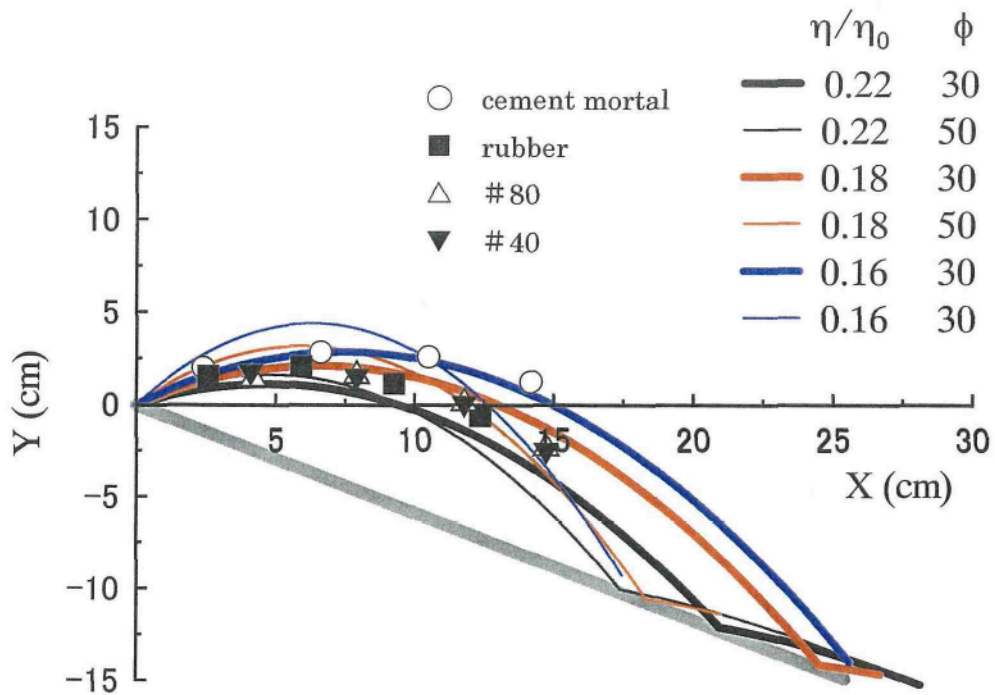


図 4.3.4 斜面への衝突後の軌跡 (ガラス)

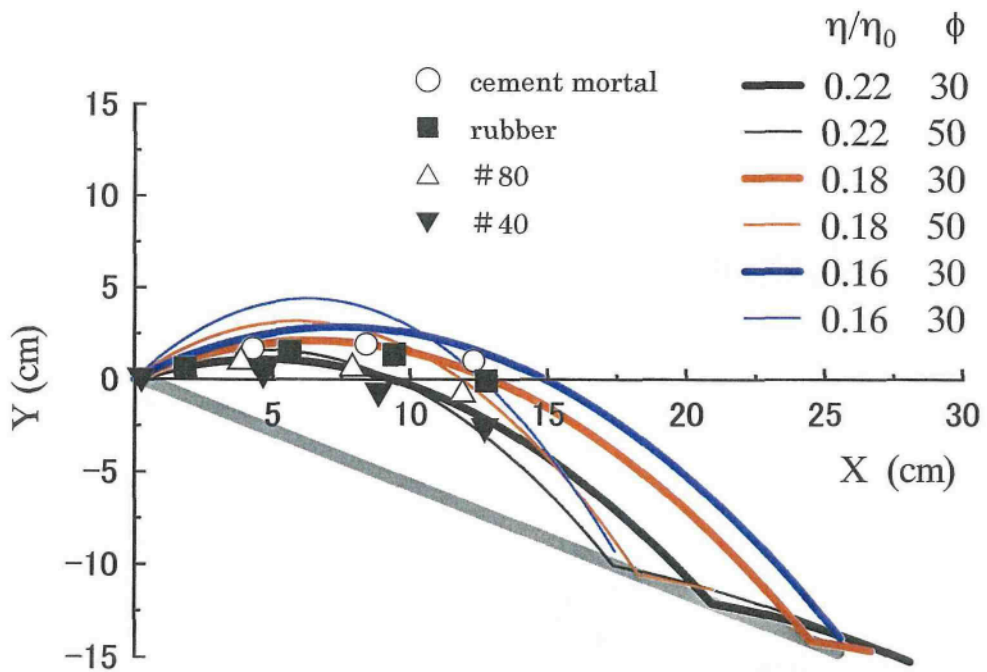


図 4.3.5 斜面への衝突後の軌跡 (鉄)

以上に述べたように、DEM 解析において落石の衝突を表現するには減衰定数 C を用いる。そして、この減衰定数 C は反発係数 Re によって求められる。落石の衝突運動は斜面の性状（地質やその硬軟、植生など）によって大きく左右される。本解析方法は、この斜面性状を反発係数 Re という分かりやすい概念を用いてモデル化できるという利点がある。

実際にこの反発係数を設定するには、落石跡地では落石履歴による逆解析により求め、新規の場所においては既往の実験データや近傍の落石地による逆解析などによって設定することとなる。図 4.3.6 に室内現場実験と室内実験から得られた落石の速度比を示す¹⁶⁾。この図の法線方向速度比 Rn が反発係数 Re となる。これによると、岩盤地盤では反発係数 $Re=0.3\sim 1.0$ 、土砂地盤では $Re=0.2$ 程度となっている。このように、反発係数は実験により比較的容易に求めることができる。

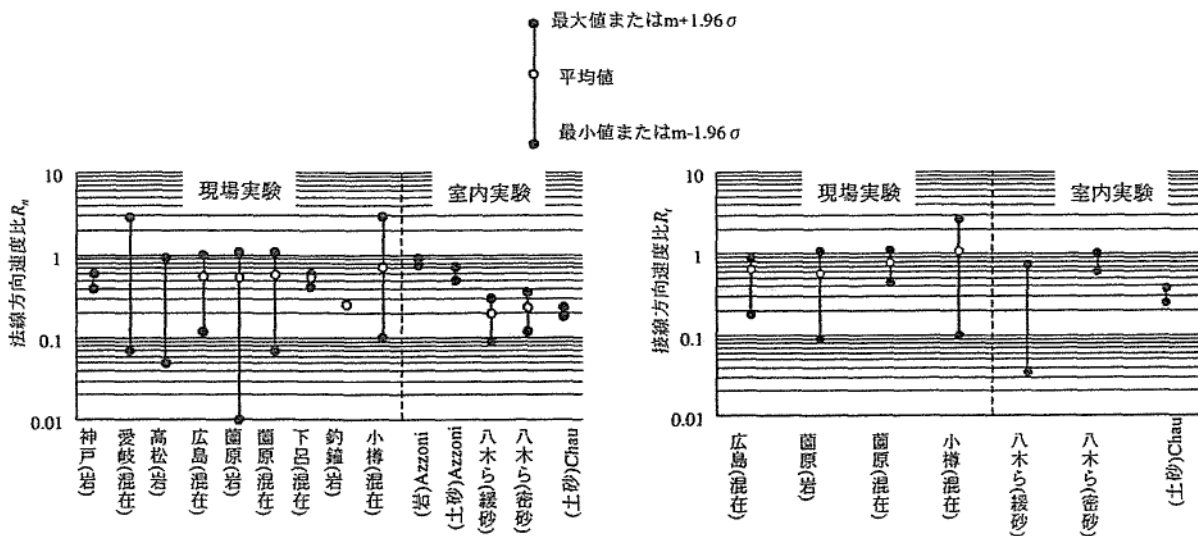


図 4.3.6 法線方向速度比と接線方向速度比¹⁶⁾

4.4 基本モデル斜面での2次元解析と考察

本節では、地形コンタが平行で断面が直線である切土斜面のような単純斜面での落石シミュレーション解析を行い、諸条件の違いによる落石運動変化をシミュレーションし、落石運動の基本的な性質について考察する。解析手法は2次元解析とし、3種類の解析モデルを設定した。

4.4.1 解析条件1 (斜面勾配と反発係数による影響)

解析条件1は、斜面勾配 α と反発係数 Re を変化させた場合の落石運動現象と落石エネルギーの変化を見るために行った。解析条件は次のとおりである。

落石要素 $1 \times 1 \text{m}$ の立方体 落下高さ $h = 5 \text{m}$ 斜面高さ $H = 20 \text{m}$
斜面勾配 $\alpha = 25^\circ \ 45^\circ \ 65^\circ$ 反発係数 $Re = 0.1 \sim 0.9$ (減衰定数 $C = 0.59 \sim 0.03$)

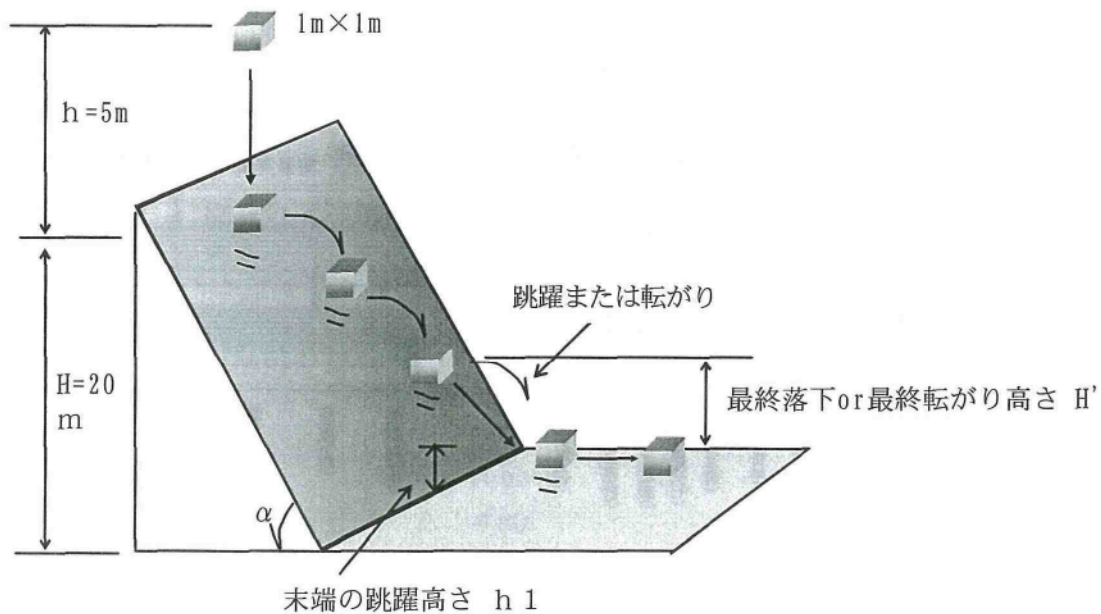


図 4.4.1 解析条件1

解析の結果を表 4.4.1 に、落石軌道の代表断面を図 4.4.2、図 4.4.3 に示し、以下に結果の考察を述べる。

i) 斜面勾配 $\alpha = 25^\circ$ の場合

反発係数 Re が低いと斜面途中で落石が停止する。

跳躍運動時のエネルギーは高いが、転がり運動(すべり・回転)時はエネルギーが非常に低くなる。当然ながら、落石停止時のエネルギーは0である。

落石速度比(水平成分/鉛直成分)は2.14~6.61であり、水平成分が卓越している。

落石エネルギーは落石便覧のエネルギーと比べると小さな値を示している。

斜面末端での落石高さは反発係数 0.9 の場合、2.16mである。反発係数 0.8 以下の場合には跳躍運動とならない。

ii) 斜面勾配 $\alpha = 45^\circ$ の場合

反発係数 Re が下がると跳躍運動から転がり運動に推移する。

落石エネルギーは跳躍時の方が若干大きい。

落石速度比（水平成分／鉛直成分）は反発係数 Re が 0.7 以上のときは 0.85～1.49 と値にばらつきがあるが、全体に水平成分が卓越しているが、反発係数 0.6 以下のときはいずれの速度比も 1.0 を示す。

解析結果のエネルギーと落石便覧によるエネルギーの関係は、軟岩相当と崖錐相当の各値で比べると、解析値の方が 2分の1 程度の小さな値を示している。（ここでは $Re=0.1\sim 0.2$ を崖錐、 $Re=0.3\sim 0.6$ を軟岩と仮定した。）

斜面末端での落石高さは反発係数の増加につれて大きくなり、反発係数 0.7～0.9 で落石高さ 1.22～3.72mに変化している。

iii) 斜面勾配 $\alpha = 65^\circ$ の場合

反発係数 Re が下がると跳躍運動から転がり運動に推移する。

落石エネルギーは跳躍運動とすべり・回転運動との違いはみられない。

落石速度比（水平成分／鉛直成分）は 0.3～0.7 と鉛直成分が卓越している。

解析結果のエネルギーと落石便覧によるエネルギーの関係は、軟岩相当と崖錐相当の各値で比べると、解析値の方が便覧値の 65%～70%の値を示している。

斜面末端での落石高さは 1.63m～4.36mであり、反発係数の増加につれて大きくなる傾向がある。しかし、一部には最終自由落下高さの変化によって、逆転している部分も見られる。

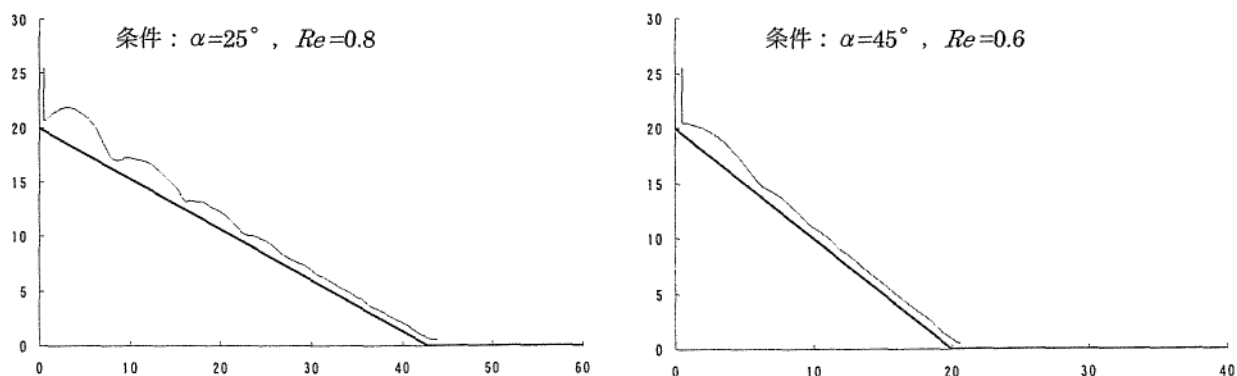


図 4.4.2 落石軌跡断面 1

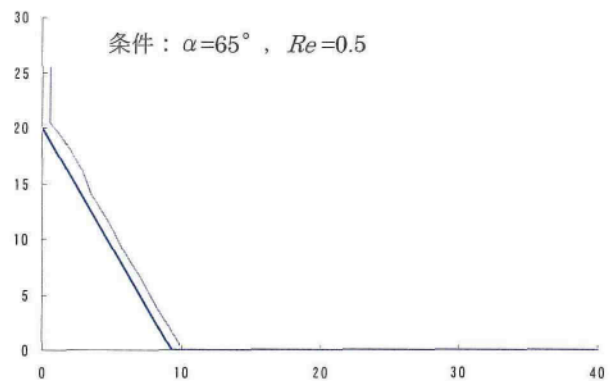
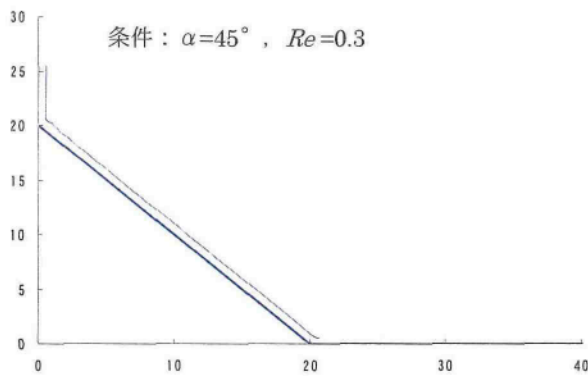


図 4.4.3 落石軌跡断面 2

表 4.4.1 解析条件 1 のシミュレーション結果

基本条件		落石運動現象			落石エネルギーと速度				落石便覧によるE(KJ)			
反発係数 Re	勾配 $\alpha (^{\circ})$	最終自由落下 高さ H' (m)	最終転がり 高さ H'' (m)	末端での 落石高さ(m)	エネルギー E(KJ)	落石速度(m/sec)		速度比	等価摩擦係数			
						X成分	Z成分	合成	X/Z	$\mu = 0.15$	$\mu = 0.35$	
0.9	25	2.66		2.16	160.8	10.89	1.65	11.02	6.61	475.3	174.8	
0.8			4.71		34.5	4.62	2.16	5.10	2.14			
0.7		斜面途中で停止										
0.6		斜面途中で停止										
0.5		斜面途中で停止										
0.4		斜面途中で停止										
0.3		斜面途中で停止										
0.2		斜面途中で停止										
0.1		斜面途中で停止										
0.9	45	6.35		3.72	292.6	12.34	8.27	14.86	1.49	595.6	455.5	
0.8		9.83		2.45	352.2	10.14	12.76	16.30	0.79			
0.7		5.25		1.22	294.9	9.68	11.35	14.92	0.85			
0.6			8.23		256.0	9.83	9.83	13.90	1.00			
0.5			13.5		243.0	9.58	9.58	13.54	1.00			
0.4			16.33		236.3	9.44	9.44	13.36	1.00			
0.3			20.03		233.3	9.38	9.38	13.27	1.00			
0.2			19.98		230.2	9.32	9.32	13.18	1.00			
0.1			20.08		224.1	9.20	9.20	13.00	1.00			
0.9	65	20.1		4.36	482.8	5.98	18.13	19.09	0.33	651.7	586.3	
0.8		2.06		1.72	378.4	9.28	14.12	16.90	0.66			
0.7		7.17		2.38	405.1	7.93	15.58	17.49	0.51			
0.6		3.12		1.63	412.1	7.82	15.81	17.64	0.49			
0.5			10.55		416.8	7.50	16.07	17.74	0.47			
0.4			13.14		411.0	7.44	15.96	17.61	0.47			
0.3			17.96		405.9	7.40	15.86	17.50	0.47			
0.2			20.1		401.0	7.35	15.77	17.40	0.47			
0.1			20.1		396.5	7.31	15.68	17.30	0.47			

■ : 跳躍運動

□ : すべり、回転運動

$Re=0.3\sim 0.6, \mu=0.15$: 軟岩相当

$Re=0.1\sim 0.2, \mu=0.35$: 崖錐相当

4.4.2 解析条件 2 (斜面高と斜面勾配, 反発係数による影響)

解析条件 2 は, 斜面高さや斜面勾配, 反発係数 Re を変化させた場合の落石運動現象と落石エネルギーの変化を見るために行った. 解析条件は次のとおりである.

落石要素 $1 \times 1 \text{m}$ の立方体 落下高さ $h = 5 \text{m}$ 斜面高さ $H = 20 \text{m} \sim 100 \text{m}$
斜面勾配 $\alpha = 45^\circ \sim 65^\circ$ 反発係数 $Re = 0.6, 0.8$ (減衰定数 $C = 0.16 \sim 0.07$)

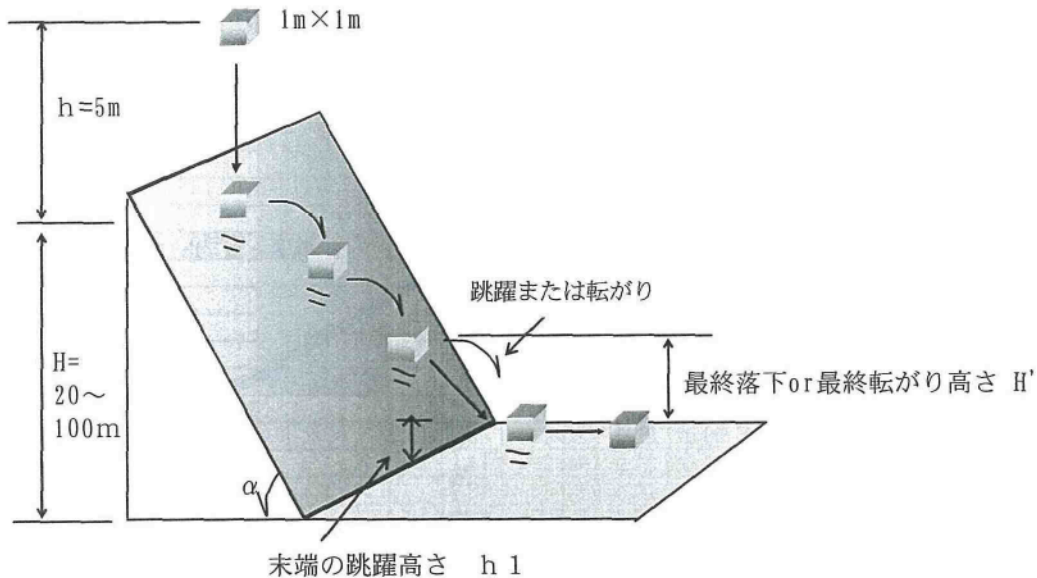


図 4.4.4 解析モデル 2

解析の結果を表 4.4.2 に, 落石軌道の代表断面を図 4.4.5 に示し, 以下に結果の考察を述べる.

i) 斜面勾配 $\alpha = 45^\circ$ の場合

反発係数 $Re = 0.8$ では斜面高さ 40m 以下が跳躍運動, 斜面高さがそれ以上になると転がり・回転運動になる. 反発係数 0.6 ではすべて転がり運動になる.

落石運動エネルギーは斜面高が高くなるにつれて増加し, 落石速度も同様に増加する.

反発係数 $Re = 0.8$ と 0.6 とでは, 落石運動現象が異なっているが, 運動エネルギーについては大きな違いはみられない.

落石便覧によるエネルギーは高さ 40m 以上では一定値と定義しているが, シミュレーション結果では跳躍運動・転がり運動のいずれにおいても高さと共に増加する傾向にある. エネルギー値は高さ $70 \sim 80 \text{m}$ までは便覧値を下回るが, それを超えると便覧値より高い値を示す.

斜面末端での落石高さは $1.64 \text{m} \sim 2.45 \text{m}$ の値にばらついており, 斜面高さとの相関は見られない.

ii) 斜面勾配 $\alpha = 65^\circ$ の場合

反発係数 $Re = 0.8$ では跳躍運動, 反発係数 0.6 ではすべり・回転運動が卓越する.

運動エネルギーは斜面高が高くなるにつれて全体に増加し、落石速度も同様に増加する。反発係数 $Re=0.8$ と 0.6 とでは、落石運動現象が異なっているが、落石エネルギーについては大きな違いはみられない。

落石便覧によるエネルギーは高さ 40m以上では一定値と定義しているが、シミュレーション結果では跳躍運動・転がり運動のいずれにおいても高さと共に増加する傾向にある。エネルギー一地は高さ 50mまでは便覧値を下回るが、それを超えると便覧値より高い値を示している。斜面末端での落石高さは、勾配 45° のときと同様に斜面高さとの相関は見られない。斜面末端での落石高は 1.72~3.38mの値にばらついている。

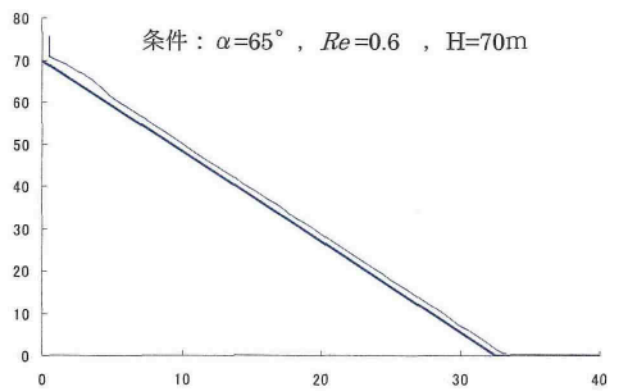
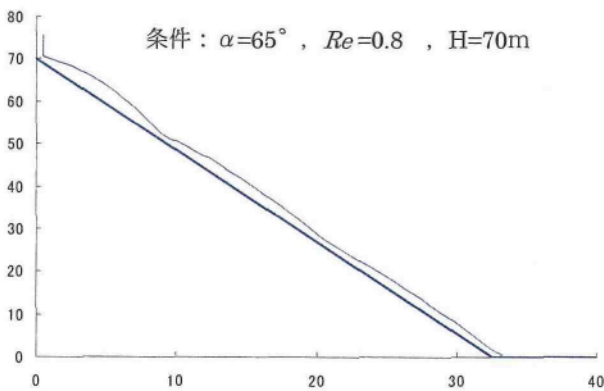
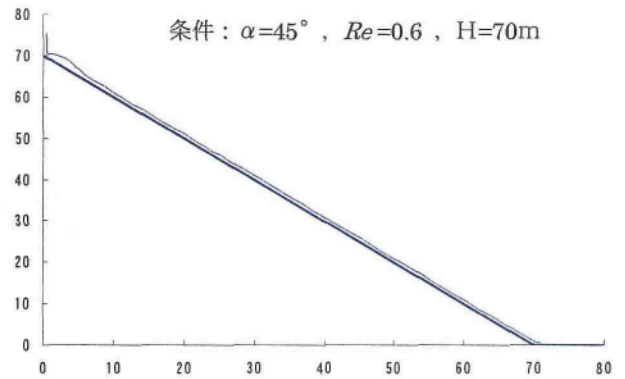
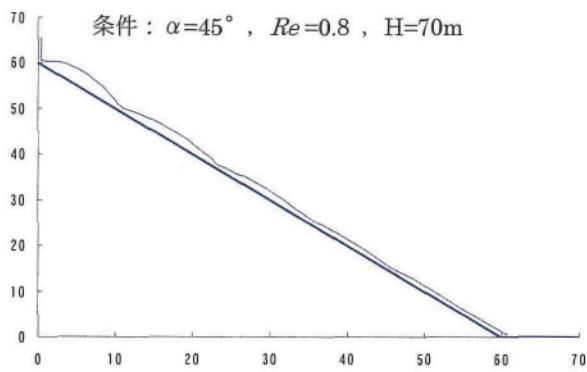


図 4.4.5 落石軌跡断面図 3

表 4.4.2 解析条件 2 のシミュレーション結果

基本条件			落石運動現象			落石エネルギーと速度				解析モデル2 落下高さ5m 等価摩擦係数によるE(KJ)		
斜面高 H(m)	反発係数 Re	勾配 α (°)	最終自由落下 高さ H' (m)	最終転がり 高さ H'' (m)	末端での 落石高さ(m)	エネルギー E(KJ)	落石速度(m/sec)			速度比 X/Z	等価摩擦係数	
							X成分	Z成分	合成		$\mu=0.15$	$\mu=0.35$
20	0.8	45	9.83		2.45	352.2	10.14	12.76	16.30	0.79	595.6	455.5
30			7.64		2.07	415.8	12.25	12.80	17.72	0.96	833.8	637.6
40			5.42		1.64	511.7	14.01	13.78	19.65	1.02		
50				4.19		628.9	15.37	15.44	21.79	1.00		
60				14.19		770.7	16.43	17.66	24.12	0.93		
70				24.19		849.4	17.88	17.93	25.32	1.00		
80				34.19		953.9	19.05	18.90	26.83	1.01		
90				44.19		1068.8	20.08	20.09	28.40	1.00		
100				54.19		1184.6	21.14	21.14	29.90	1.00	953.0	728.7
20			0.6	45	8.23		256.0	9.83	9.83	13.90	1.00	595.6
30	18.23				366.4	11.76	11.76	16.63	1.00	833.8	637.6	
40	28.23				475.8	13.40	13.40	18.95	1.00			
50	38.23				585.6	14.87	14.87	21.02	1.00			
60	48.23				695.4	16.20	16.20	22.91	1.00			
70	58.23				805.2	17.43	17.43	24.65	1.00			
80	68.23				915.0	18.58	18.58	26.28	1.00			
90	78.23				1024.7	19.66	19.66	27.81	1.00			
100	88.23				1134.5	20.69	20.69	29.26	1.00	953.0	728.7	
20	0.8	65			2.06		1.72	378.4	9.28	14.12	16.90	0.66
30			12.06		3.38	594.8	9.28	19.05	21.19	0.49	912.4	820.9
40			22.06		2.57	875.6	9.28	23.97	25.71	0.39		
50			8.34		2.37	954.8	12.31	23.85	26.84	0.52		
60			18.34		2.63	1207.7	12.31	27.57	30.19	0.45		
70				1.98		1315.3	14.68	27.88	31.51	0.53		
80				11.98		1558.0	14.68	30.99	34.29	0.47		
90				21.98		1826.4	14.68	34.10	37.13	0.43		
100				31.98		1925.1	16.54	34.34	38.12	0.48	1042.7	938.1
20			0.6	65	3.12		1.63	412.1	7.82	18.13	19.74	0.43
30		9.88				614.3	9.08	14.12	16.79	0.64	912.4	820.9
40		19.88				810.2	10.45	15.58	18.76	0.67		
50		29.88				993.4	11.57	15.81	19.59	0.73		
60		39.88				1183.3	12.63	16.07	20.44	0.79		
70		49.88				1373.2	13.61	15.96	20.97	0.85		
80		59.88				1563.0	14.52	15.86	21.50	0.92		
90		69.88				1752.8	15.37	15.77	22.02	0.97		
100		79.88				1942.6	16.18	15.68	22.53	1.03	1042.7	938.1

: 跳躍運動

: すべり、回転運動

Re=0.3~0.6, $\mu=0.15$: 軟岩相当

Re=0.1~0.2, $\mu=0.35$: 崖錐相当

4.4.3 解析条件3 (落石形状と斜面勾配, 反発係数による影響)

解析条件3は, 落石の形状と斜面勾配 α , 反発係数 Re を変化させた場合の落石運動現象と落石エネルギーの変化を見るために行った. 解析条件は次のとおりである.

落石要素 $1 \times 1\text{m}$, $1 \times 2\text{m}$, $2 \times 1\text{m}$ (幅 \times 高さ) 落下高さ $h = 5\text{m}$ 斜面高さ $H = 20\text{m}$

斜面勾配 $\alpha = 25^\circ$ 45° 65° 反発係数 $e = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ (減衰定数 $C = 0.45 \sim 0.07$)

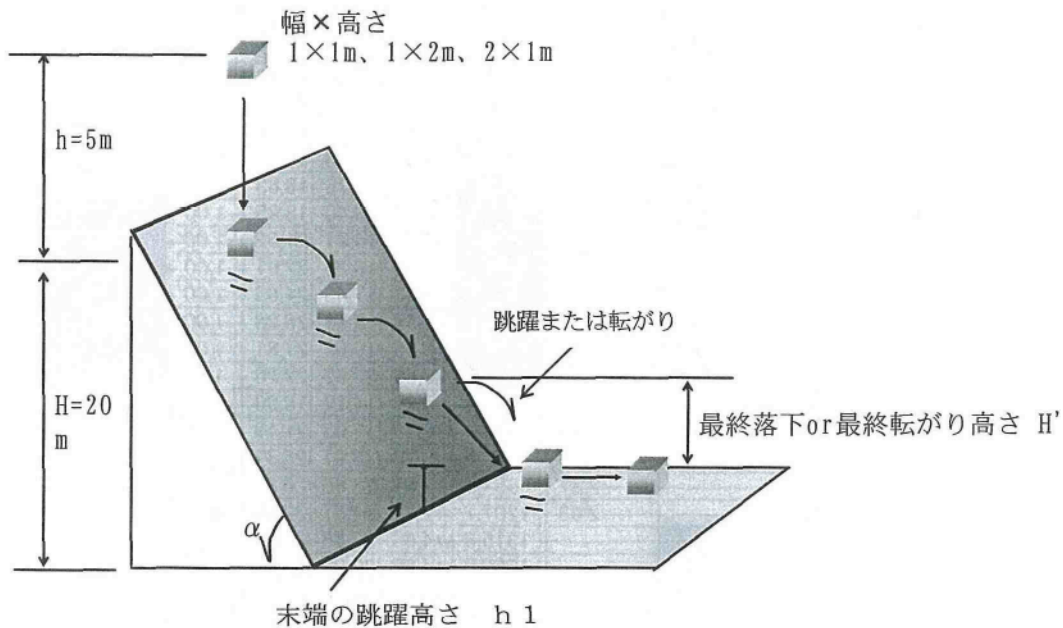


図 4.4.6 解析条件3

解析の結果を表 4.4.3 に, 落石軌道の代表断面を図 4.4.7 に示し, 以下に結果の考察を述べる.

i) 斜面勾配 $\alpha = 25^\circ$ の場合

いずれの落石要素においても反発係数 Re が下がると途中で落石が停止する.

いずれの落石要素においてもすべり・回転運動を呈している.

落石エネルギーは, 便覧によるエネルギーと比べて非常に小さな値を示す.

落石要素の高さを高くした場合は, 幅を広げた場合より高いエネルギーを示す.

ii) 斜面勾配 $\alpha = 45^\circ$ の場合

いずれの落石要素においても反発係数 Re が下がると途中で跳躍運動から転がり運動に変化する.

落石エネルギーは, 便覧によるエネルギーの半分程度の小さな値を示す.

落石要素の高さを高くした場合と幅を広げた場合のエネルギーはほぼ同等である.

斜面末端での落石高さは 2.38~2.50mを示す.

ii) 斜面勾配 $\alpha = 65^\circ$ の場合

いずれの落石要素においても反発係数 Re が下がると途中で跳躍運動から転がり運動に変化する.

落石エネルギーは、便覧によるエネルギーの 60~70%の値を示す.

斜面末端での落石高さは 1.63~2.63mを示し、反発係数が大きいほど落石高さが大きい.

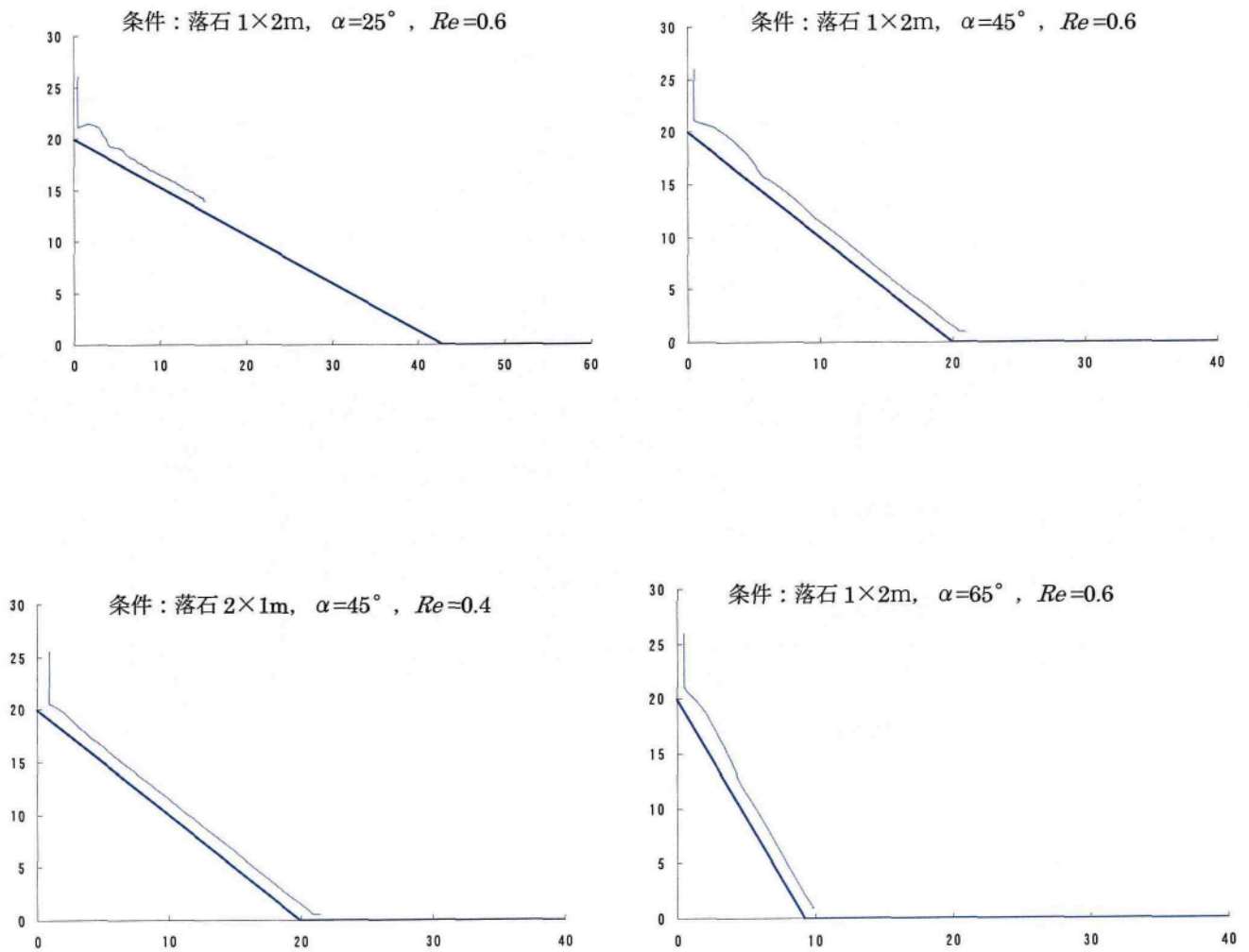


図 4.4.7 落石軌跡断面図 4

表 4.4.3 解析条件3のシミュレーション結果

解析モデル3 落下高さ5m

サイズ		基本条件		落石運動現象			落石エネルギーと速度					落石便覧によるE(KJ)	
高さ m	幅 m	反発係数 Re	勾配 α (°)	最終自由落下 高さ H' (m)	最終転がり 高さ H'' (m)	末端での 落石高さ(m)	エネルギー E(KJ)	落石速度(m/sec)			速度比	等価摩擦係数	
											X/Z	$\mu=0.15$	$\mu=0.35$
							X成分	Z成分	合成				
1	1	0.8	25	斜面途中で停止	4.71		34.5	4.62	2.16	5.10	2.14	475.3	174.8
		0.6											
		0.4											
		0.2											
1	2	0.8	25	斜面途中で停止	6.59		67.7	4.58	2.14	5.05	2.14	475.3	174.8
		0.6											
		0.4											
		0.2											
2	1	0.8	25	斜面途中で停止	9.45		22.8	2.66	1.24	2.94	2.14	950.6	349.5
		0.6											
		0.4											
		0.2											
1	1	0.8	45	跳躍運動	9.83	2.45	352.2	10.14	12.76	16.30	0.79	595.6	455.5
		0.6											
		0.4											
		0.2											
1	2	0.8	45	すべり、回転運動	10.57	2.50	733.1	9.87	13.39	16.63	0.74	1191.2	910.9
		0.6											
		0.4											
		0.2											
2	1	0.8	45	すべり、回転運動	10.58	2.38	718.7	9.77	13.26	16.47	0.74	1191.2	910.9
		0.6											
		0.4											
		0.2											
1	1	0.8	65	跳躍運動	2.06	1.72	378.4	9.28	14.12	16.90	0.66	651.7	586.3
		0.6											
		0.4											
		0.2											
1	2	0.8	65	すべり、回転運動	2.79	2.48	765.6	8.93	14.46	17.00	0.62	1303.4	1172.7
		0.6											
		0.4											
		0.2											
2	1	0.8	65	すべり、回転運動	2.16	2.63	731.2	9.12	13.88	16.61	0.66	1303.4	1172.7
		0.6											
		0.4											
		0.2											

跳躍運動

すべり、回転運動

Re=0.3~0.6, $\mu=0.15$:軟岩相当

Re=0.1~0.2, $\mu=0.35$:崖錐相当

4.4.4 解析結果のまとめ

単純斜面モデルでの解析結果をまとめると次のようになる。

- ・反発係数 Re が低いと落石は転がり運動（すべり・回転）となる。特に斜面勾配が緩いとこの傾向顕著である
- ・斜面勾配が 45° より緩い場合は、落石速度は水平成分が卓越し、 45° より急な場合は鉛直成分が卓越する。
- ・落石運動エネルギー、落石速度は斜面高が高くなるにつれて全体に増加していくが、一部、最終落下高さの増減の影響と思われるエネルギー低下が見られる。
- ・落石要素の高さを高くした場合と幅を広げた場合での、エネルギー、跳躍高さの相違はみられない。
- ・落石エネルギーを落石便覧の方法でのエネルギーを比べると、斜面勾配 45° のときは高さ 70～80m まで、斜面勾配 65° のときは高さ 50m まで便覧値を下回る。それ以上高くなると便覧値以上のエネルギーとなる。
- ・斜面末端での落石高さは反発係数 Re の増加と斜面勾配の増加つれて大きくなる。しかし、斜面高さとの相関はみられない。
- ・斜面末端での落石高さの解析結果をまとめると表 4.4.4 のようになる。これによると、斜面勾配が 25° の緩い場合は反発係数が高い値のときのみ跳躍し、その高さは便覧による高さと同程度である。斜面勾配が 45° の場合は反発係数 Re が 0.7 以上のときに跳躍し、その高さは便覧の基準をやや下回る。斜面勾配が 65° の場合は反発係数 Re が 0.6 以上のときに跳躍し、その高さは便覧の基準をかなり下回っている。実際の斜面の反発係数は、普通は 0.7 以下と考えられることを考慮すると、いずれの斜面勾配の結果も落石高さは便覧の基準値を下回っていると考えられる。特に斜面勾配が急な場合は顕著といえる。

表 4.4.4 斜面末端での落石高さ

斜面勾配 α	反 発 係 数 Re									平均	便覧の基準	
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9			
25°										2.16	2.16	2.21
45°							1.22	2.45	3.72	2.46	2.46	2.83
65°						1.63	2.38	1.72	4.36	2.52	2.52	4.73

便覧の基準： $2m/\cos \alpha$

以上の結果を考慮して、次に、落石対策工計画時の問題点と課題について述べる。

勾配の緩い斜面では水平方向の速度が卓越するため、落石防護柵は有効である。しかし、落石便覧の方法ではエネルギーを高く見積もりすぎるため過大設計となる傾向にある。また、ロックシェドのようなラーメン構造の場合は水平速度成分が大きく影響するため熟慮する必要がある。

斜面勾配が急な斜面では、鉛直方向の速度が卓越するため防護柵の背後に緩衝地帯（落石ポケット）を設置すると効果的である。斜面高さが 40m以内では経験的な手法を用いると過大設計になり、斜面高さがそれ以上になると経験的な手法ではエネルギーを低く見積もりすぎるため危険側の設計となる恐れがある。

斜面末端位置での落石高さについては、斜面勾配が 45° 以下の場合は落石便覧の基準値（斜面法線方向に 2m）を適用できるが、勾配が 45° を超えるような急傾斜地では便覧の方法では落石高を高く見積もりすぎるといえる。

以上の考えは、あくまで切土斜面のような起伏のない斜面に適用され、凹凸のある斜面や勾配の変化する斜面では適用されない。これらの斜面については、今後、解析検討していく必要がある。しかしながら、今回の単純斜面の結果においても非常に有意な結果が得られたといえ、基本的な考え方は適用できると考えている。

4.5 確率論的手法の導入

4.5.1 落石運動に影響を与える不確定要因とモデル化

落石の運動に影響を与える要因を列記すると以下のようなになる。

- ・ 岩石ブロックに関する事項

体積、密度、形状、初期位置、初速度、など

- ・ 地表面に関する事項

表面形状、接触定数（剛性係数、減衰係数）、摩擦係数、など

本法でも、解析に際して以上のような情報を必要とするが、落石の運動を解析するにあたり、これらの状況を事前に把握することは難しい。そこで、何らかの値を仮定して解析を進める、さらには、確率的な分布を持つ量として取り扱うことが考えられる。しかし、上記の量を即座に確率量とすることには問題がある。例えば、岩塊が二つ以上に分離することを仮定しなければ、体積は軌跡解析の一試行において、一定値として取り扱うべき量である。さらに、事前の調査等により落石体積をある程度知ることが可能である。一方、接触に関する定数は解析領域にわたって、把握する困難であり、平均値と分散を持った量として取り扱わざるを得ないものとなる。Dudt, J.P. & Heidenreich, B.もこのような見地から入力変数の与え方について議論している¹⁷⁾。本研究においても、彼らの議論を参照するとともに、前述した計算法に冒頭の事項を2つの区分に分けて入力、落石軌跡解析を実施することにした。

まず、一つ目の区分は、平均値と分散を有するとして取り扱う量であり、もう一方は、未知であり、何らかの値を仮定して取り扱わざるを得ない量とする区分である。前者をランダム（random）と呼び、後者を未知（unknown）と呼ぶことにする。ランダム（random）に属す変数は予め定義した分布に従い取り扱えるとする。つまり、ランダム（random）に区分した変数は、用いられるとき（例えば、岩塊が地表面に接する毎に）、モンテカルロ法により、既知の分布形に基づき決定する。この分布には、一様分布（最大値と最小値が既知）、三角形分布（前掲に加え、平均値かモード）あるいは統計的分布を用いる。一方、未知（unknown）に区分する変数は、解析に際して未知であり、何らかの値を仮定する。未知（unknown）に区分にした変数は岩塊の運動開始前に与えられ、その試行中は一定値として取り扱うことにする。このように、入力値を適宜変化させて試行を繰り返し、運動軌跡への影響を知ることは可能である。

具体的な適用方法としては、自然斜面の不均質さを種々の解析定数（減衰係数や摩擦角など）をモンテカルロ法により、ばらつきを与えることにより表現（モデル化）できることを示し、その適用例を示している。

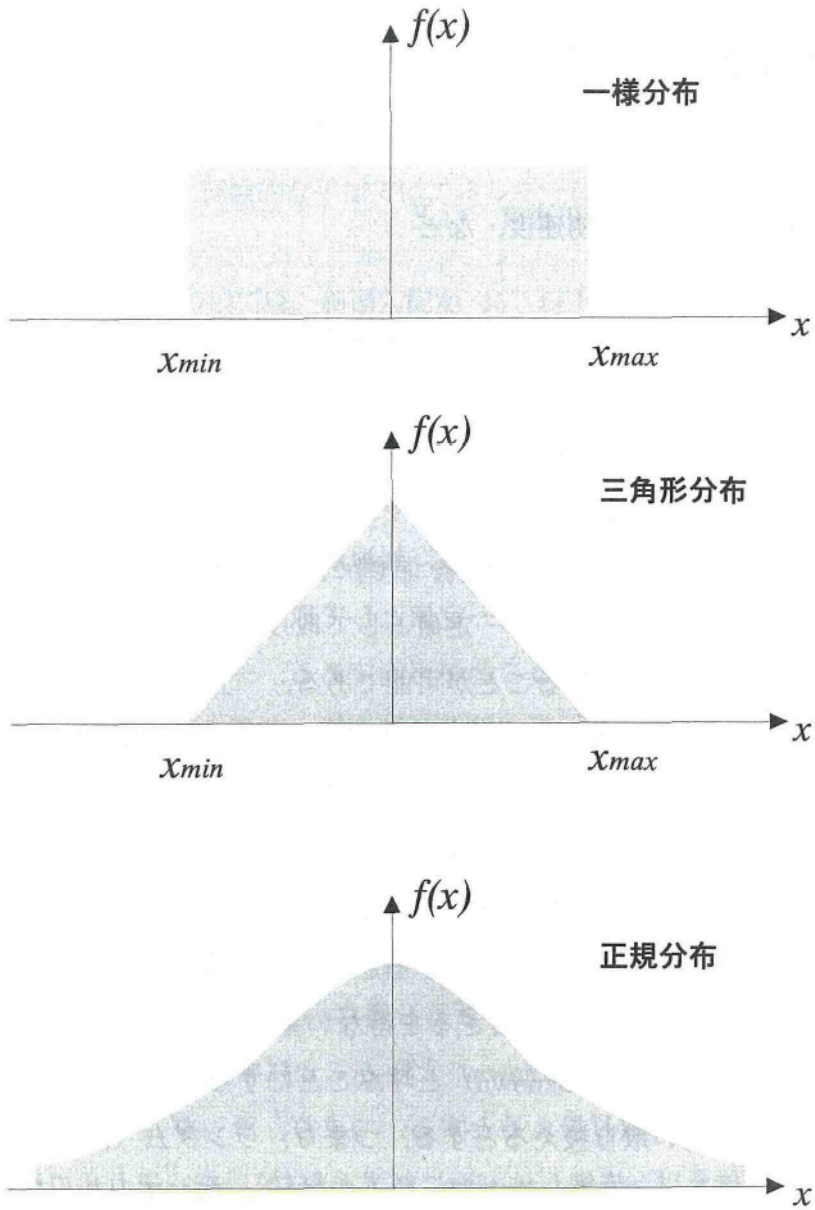


図 4.5.1 定数のばらつき (random)

4.5.2 モンテカルロ法

モンテカルロ法とは乱数発生などのコンピュータ機能を活用して不確実な事象を繰返し発生させる手法である。本研究においては、減衰係数、表面摩擦角などを前項の記述のように不確定と定義した要因は、モンテカルロ法により取り扱った。乱数発生は、線型合同法¹⁸⁾により一様乱数を発生させるとともに、正規乱数については、下記のように取り扱っている。

n 個の一様乱数 $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_{k+j}$ に対して

$$Z_i = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{k+j} - \frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{1}{12n}}} \quad (4.5.1)$$

を計算すれば、n が大きいとき Z_i は中心極限定理より正規分布に従う確率変数とみなすことができる。n が大きい程 Z_i の正規分布への近似度はよくなるが、必要な一様乱数の発生の個数が多くなりその発生時間が長くなる。このため、n=6 程度が実際に多く使われている。なお n=12 とすれば近似度は極めて高くなる。式(4.5.1)で標準正規分布 $N(0,1)$ に従う乱数列 $\{Z_i\}_N$ が発生されれば、正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従う正規乱数列 $\{y_i\}_N$ は、

$$y_i = \mu + Z_i \sigma \quad (4.5.2)$$

ここに、 μ : 平均値、 σ : 標準偏差である。

4.6 立方要素の落下解析¹⁹⁾

本節では、前述した入力変数の取り扱いを具体的に示すため簡単な解析例を示す。図 4.6.1 は、地表面形状をあらわしている。斜面の最大傾斜角は 75° であり、平均傾斜角は 42° 、高さは 82m である。地表面形状は、地形図から水平位置や標高を読み取って三角形要素の連結として表現している。このように三角形平面に連結で地形を表現することは、頂点間にも微視的な地形変化はあると考えられるが、その程度は未知 (unknown) であるため近接頂点間を直線で連結した三角形内は平面であると確定していることになる。以下のように入力条件を取り扱った。

- random 変数とした事項

減衰定数 η/η_0 , 表面摩擦角 ϕ

- unknown 変数とした事項

岩塊の形状, 初期位置, 初速度, η/η_0 と ϕ の平均値, 地表面の微視的変化 (local asperities)

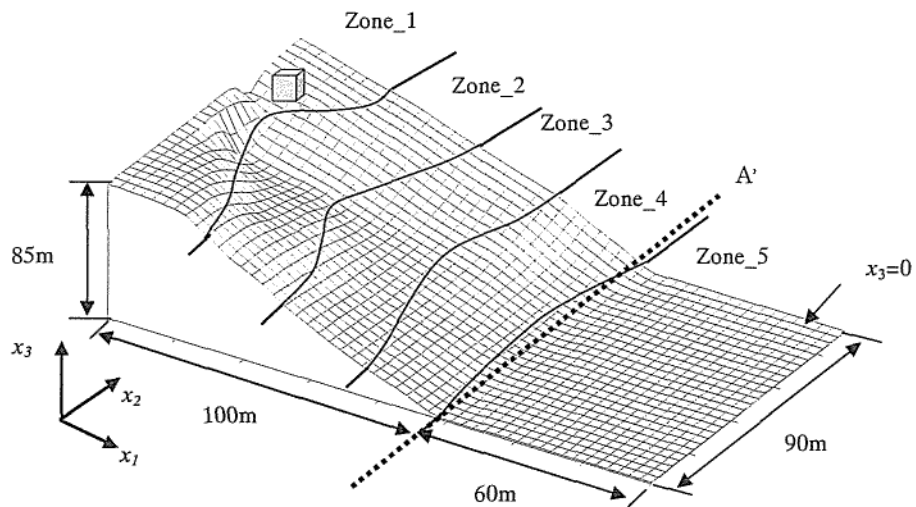


図 4.6.1 解析に用いた斜面

表面摩擦角, 減衰定数については, 表 4.6.1 のように平均値と変動係数を与え, 減衰定数については正規分布, 表面摩擦角については対数正規分布とした. また, 以下の値を確定値として与えた.

- ・形状: 立方体
- ・大きさ: $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$,
- ・密度: 2650kg/m^3 ,
- ・初期位置: $(x_1=11.1\text{m}, x_2=66.0\text{m}, x_3=82.5\text{m})$,
- ・初期速度: 0 (静止),
- ・ (η/η_0) と ϕ の平均値: 表 4.6.1 参照

表 4.6.1 接触に関する定数の設定

	Contact Stiffness k (kN/m)	Friction Angle ϕ ($\mu=\tan\phi$)	Damping Constant Ratio η/η_0	
			Case A	Case B
1	200.0	35±20%	0.5±20%	0.8±20%
2	150.0		0.6±20%	0.8±20%
3	100.0		0.7±20%	0.8±20%
4	25.0		0.8±20%	0.8±20%
5	12.5		1.0	1.0

図 4.6.2 は、要素重心軌跡の水平面への投影図を示したものである。500 回の試行に基づいて、落石要素が下段水平面に到達したときの運動エネルギーおよび跳躍高さの度数分布図を図 4.6.3、図 4.6.4 に示した。

以上の結果から、解析に際して確定値とできない入力変数を単に乱数を用いて取り扱うのではなく、前述したような考え方を基準に取り扱うことが可能であり、かつ、任意断面での運動エネルギーや跳躍高さなどの出力が可能な解析法であることが示された。

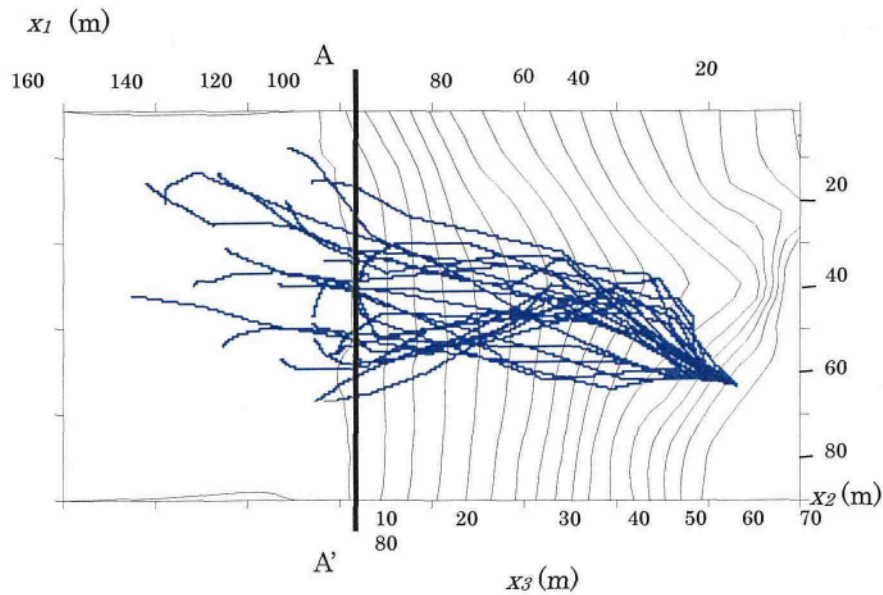


図 4.6.2 軌跡の水平面への投影

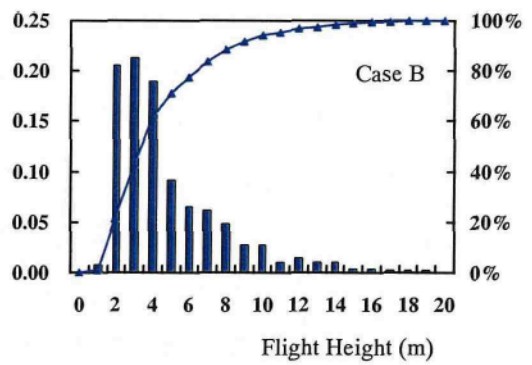
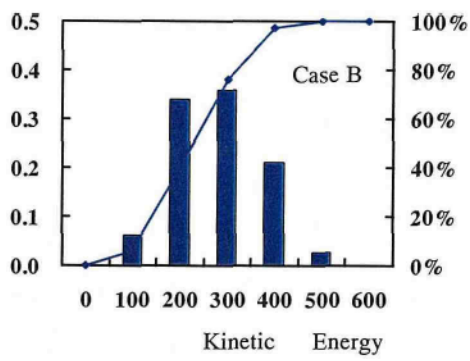
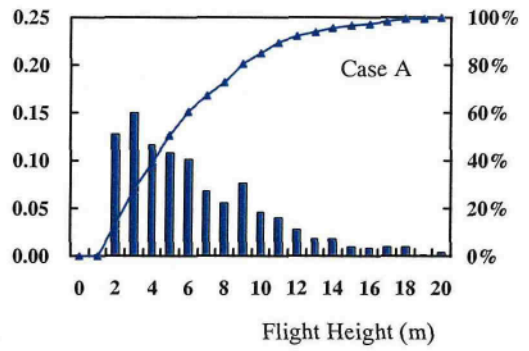
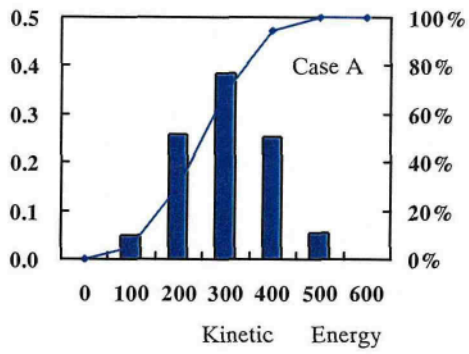


図 4.6.3 A-A' における運動エネルギーの分布

図4.6.4 A-A' における跳躍高さの分布

4.7 まとめ

本章では、落石の3次元数値シミュレーション法の開発と適用について記述した。主たる結果を列記すると以下のようなものである。

1. 岩塊を剛体と仮定して、3次元個別要素解析法を構築した。岩塊の空間運動にはオイラーの式を導入して厳密に行った。地表面は、三角形要素に分割して、地形の変化をなるべく忠実に表現するとともに、落石要素の地表面への接触判定に効率的な手法を開発した。
2. 岩塊が地表面に衝突したときの運動エネルギー損失を、個別要素法では、ダッシュポットを用いて表現している。本章では、このダッシュポットの減衰係数の決定法として、反発係数との関係式を誘導した。この関係式を用いた数値解析結果と室内模型実験を比較したところ、ダッシュポットの減衰係数の決定法として本式は利用できることが明らかとなった。
3. 単純斜面モデルでの2次元解析を行い、落石運動の基本的性質について考察し、通常的设计で用いられる落石便覧との結果比較を行った。そして、落石対策工設計の問題点と課題とについて述べた。
4. 落石の運動に影響を与える要因を二種に分類した。それらは、反発係数のように解析対象領域において、平均値と分散を既知として取り扱えるとする区分と落石の体積などのように解析に際しては、未知であるとして取り扱わざるを得ない区分である。このような入力条件に関する処理を1.に述べた3次元解析法を導入した解析例を示した。

参 考 文 献

- 1) 山岸宏光：北海道における最近の二つの岩盤崩落について，岩の力学ニュース，No.49，pp.3-5，1998.
- 2) 山本哲朗，原田 宏，寺山 崇，吉原和彦，勝部安昭，宮崎晃一：2001年芸予地震により発生した山口県内の斜面災害特性，土と基礎，Vol.51,No.11，pp.29-31，2003.
- 3) 福田毅，藤村 尚：2000年鳥取県西部地震による落石災害復旧事例，土と基礎，Vol.51，No.9，pp.13-15，2003.
- 4) 榎谷 浩，佐々木哲也，倉岡千郎，古賀泰之，三木 茂：落石対策 ー落石運動のメカニズムと予測（その2）ー，土と基礎，Vol.50，No.4，pp.48-53，2002.
- 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) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. Symposium on rock mechanics. Nancy. Vol. 2, pp.129-136. 1971.
- 7) Gen-Hua SHI, Richard E. Goodman:Two-Dimensional Discontinuous Deformation Analysisi, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.9, pp.514-556, 1985.
- 8) 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，Vol.52, No.5, pp.488-493, 2003.5.
- 9) 西村 強，池添保雄，藤村 尚，木山英郎：DEMによる岩盤斜面崩壊の一考察，鳥取大学工学部研究報告，Vol.21, No.1, pp.187-193, 1990.
- 10) 坂田 勝：工学力学，pp.79-82，1978.
- 11) Formulation of a three-dimensional distinct element method – part I, A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks, International journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics Abstract, Pregamon Press, Vol.25, No.3, pp.107-116,1988.
- 12) Formulation of a three-dimensional distinct element method – part II, mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks,, International journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics Abstract, Pregamon Press, Vol.25, No.3, pp.117-125,1988.
- 13) 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

- 14) 精山誉志, 谷口洋二, 木山英郎, 西村 強: 落石運動に関する個別要素解析と室内簡易模型実験, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.683-684, 2003.
- 15) 木山英郎, 藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, No.333, pp.137-146, 1983.
- 16) 日本道路協会: 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.
- 17) 大駒 誠一: 改訂 FORTRAN77, サイエンス社, pp.205-207, 1992.
- 18) Dudit, J.P. & Heidenreich, B.: Treatment of the uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model for rock falls. International conference on landslides. Davos: 507-514, 2001.
- 19) 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