

斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価

AN EVALUATION OF IMPULSIVE DESIGN LOAD OF ROCK SHEDS
TAKING INTO ACCOUNT SLOPE PROPERTIES

吉田 博*・右城 猛**・榎谷 浩***・藤井 智弘****

By Hiroshi YOSHIDA, Takeshi USHIRO, Hiroshi MASUYA, Tomohiro FUJII

Because of few numerical experimental data of falling stones on slopes, the falling behavior of stones on real slopes was observed in addition. From the data obtained repulsion coefficients and energy ratios of stones before and after a collision, and slope friction coefficients for a sliding and a rolling which might control the motion of a stone on slopes were arranged as probability variables.

Based on these parameters a simulation method to estimate the falling path and the velocity of stones were developed. The method was confirmed by applying to test slopes using previously existing experimental data.

An estimation method of the design load of rock sheds for falling stones taking into account of slope properties, particularly slope shapes was presented.

1. まえがき

ストーンガード、ロックシェッドなど落石防護構造物の設計では、その敷設現場の斜面の状況から、落石の落下速度、跳躍高さ、落下位置などを、経験的に想定し、設計用の落石衝撃力¹⁾を決定しているのが現状であり、落石の落下挙動のより合理的な推定法の確立が望まれている。こうしたことから、運動方程式に基づいた落石の運動機構の解析^{2,3)}や実験研究⁴⁻¹⁰⁾およびこれらに基づく推定のための試み⁹⁻¹⁴⁾が行われてきた。また、落石地帯を有するヨーロッパ諸国においても、同様な試みが行われており^{15,16)}、特に、文献15)では斜面の詳細な凹凸や岩質、岩塊の形状などをデータとして与え、落下径路および速度の推定を、2次元のみならず3次元的な解析が試みられている。

しかし、これらの推定法は、文献12,13)を除き個々の実験で得られた落石の運動に関する特性値を、確定量とみなして用いてシミュレーションを行っており、一般性に欠けるため、実際の落石防護構造物の設計に使用されるまでには至っていない。また、既往の落石実験において、正確な数値データが得られているものは少ない^{5,6)}。

そこで、本研究では、まず、新たに実斜面を用いた落石実験を行い、これより得られたデータを確率変量としてとらえ、それに基づいた落石の跳躍経路および速度のシミュレーション手法を示す。

そして、既往の実験データを用いて、当該斜面に対するシミュレーションを行い、実験結果との比較を行う。最後に、従来の落石実験および今回の実験結果を整理し、斜面上の落石の挙動の推定の可能性とその設計への適用方法について検討する。

* 工博 元・金沢大学教授 (〒932-01 富山県小矢部市水島561)
 ** (株)第一コンサルタンツ常務取締役 (〒780 高知市高須新町3-1-5)
 *** 工博 金沢大学助手 (〒920 金沢市小立野2-40-20)
 **** 日本サミコン (株) 金沢支店課長 (〒921 金沢市額乙丸2-200)

2. 斜面上の落石の運動に関する特性値

斜面に沿って落下する落石の速度は、同一高さからの自由落下の速度に比較して小さい。測定された落石の落下速度 V と自由落下速度 V_0 の関係は一般に次式で示される。

$$V = \alpha V_0 = \alpha \sqrt{2gH} \quad (1)$$

ここに、 g は重力の加速度であり、 H は落下高さ、 α は一般に速度残存係数と呼ばれており、この値は斜面の岩質または土質、その硬度、植性、凹凸の状態、傾斜角などの特性に依存するものと考えられている。斜面上の落下速度が自由落下速度より減少する原因には各種のものが考えられるが、それらの影響をすべて含めて斜面の表面摩擦と仮定し、これを等価摩擦係数と呼んでいる。速度残存係数は等価摩擦係数 μ を用いて次式で表される。

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}} \quad (2)$$

ここに、 θ は斜面勾配である。

したがって、式(1)は等価摩擦係数を用いると、次のように表される。

$$V = \sqrt{2g(1 - \frac{\mu}{\tan \theta})H} \quad (3)$$

ここに、 g は重力の加速度である。

実際の斜面には凹凸およびいくつかの斜面勾配の変化が存在するが、斜面勾配 θ の直線斜面とみなし、落石が地点Aから地点Bに到達するまでに要した時間を t 、AB間の距離を S とすると、等価摩擦係数 μ は次式で与えられる。

$$\mu = \tan \theta - \frac{2S \sec \theta}{gt^2} \quad (4)$$

また、斜面衝突(図-1)による反発係数 e および速度エネルギー比 r は、次式により求められる。

$$e = \frac{V_2 \sin \beta_2}{V_1 \sin \beta_1}, \quad r = \frac{mV_2^2/2}{mV_1^2/2} = \frac{V_2^2}{V_1^2} \quad (5)$$

ここに、 m は落石の質量、 V_1 および V_2 は衝突前および衝突後の落石の速度、 β_1 および β_2 は、落石の衝突前(V_1)および衝突後の速度(V_2)の方向と斜面の成す角度である。

過去に行われた実験の内、1、2を除いて、実験斜面の斜面特質、落石特性および等価摩擦係数、残存係数、反発係数、速度エネルギー比などの運動特性値が文献(17)にまとめて示されている。

3. 落石の運動機構

(1) 落石の運動形態

落石の運動の基本形態は、斜面に沿って落下する滑り運動と回転運動(これらを総称して線運動と呼ぶ)、および空中を跳躍しながら落下する跳躍運動とに分類される。

落石の運動は単純でなく、落石の形状や寸法、岩質とともに落石斜面の地形、地質、植性状況によって前述の基本形態を変化させながら落下するのが一般的である。

(2) 落石の基礎運動方程式

a) 滑り運動 斜面の傾斜角度を θ 、等価摩擦係数を μ とすれば、初速を V_0 として、斜面に沿う t 秒後の滑り速度 V 、および t 秒間に斜面に沿って滑る距離 S (図-2(a))は、次のように与えられる。

$$V = V_0 + gt(\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad (6)$$

$$S = V_0 t + \frac{1}{2}gt^2(\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad (7)$$

式(3)より計算される落石の落下速度は、落下高さとともに増加するが、実斜面での実験結果では、速度はある一定値に収束する傾向にある⁷⁾。斜面上を落石が滑り落ちる場合、落石は摩擦以外にも、草や樹木、斜面

上の微小な凹凸などからの抵抗を受ける。それら全ての抵抗は、落石速度に比例すると仮定した方が合理的である。この抵抗係数を c_k とすれば、式(6)および(7)は、

$$V = \frac{a}{c_k} + (V_0 - \frac{a}{c_k})e^{-c_k t} \quad (8)$$

$$S = \frac{a}{c_k}t + \frac{1}{c_k}(V_0 - \frac{a}{c_k})(1 - e^{-c_k t}) \quad (9)$$

となる。ここに、

$$a = g(\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad (10)$$

は斜面方向の加速度である。また、滑り初める条件は、

$$\tan \theta > \mu \quad (11)$$

で表される。

b) 回転運動 質量 m 、半径 r の様な球が滑ることなく、回転しながら斜面を落下する場合の斜面に沿う t 秒後のすべり速度 V 、および t 秒間に斜面に沿って進む距離 S (図-2(b))は、つぎのように与えられる。

$$V = V_0 + \frac{r^2}{k^2 + r^2}gt\sin \theta \quad (12)$$

$$S = V_0 t + \frac{r^2}{2(k^2 + r^2)}gt^2\sin \theta \quad (13)$$

ここに、 V_0 は初速であり、 k は球の回転半径である。

滑り運動の場合と同様に抵抗係数を考慮すると、速度および距離は式(8)および(9)と同一の式で与えられる。ただし、式中の加速度 a は、

$$a = \frac{r^2}{k^2 + r^2}g\sin \theta \quad (14)$$

で与えられる。

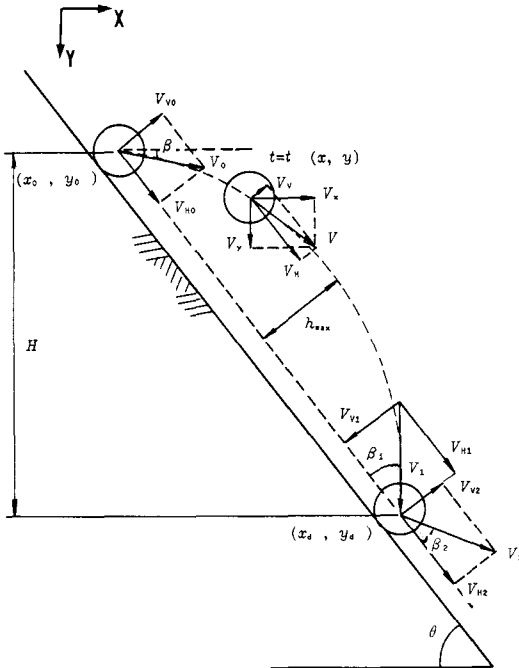


図-1 落石の跳躍運動と衝突

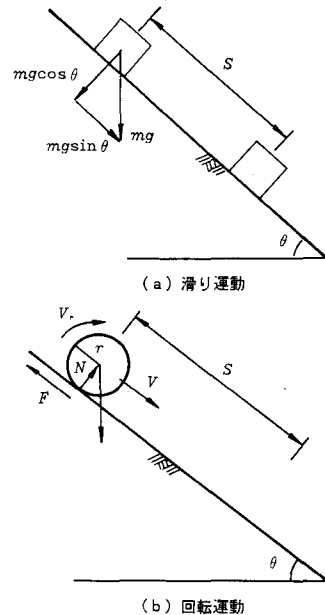


図-2 落石の線運動

滑らずに転がり落ちる条件は,

$$\frac{r^2}{(k^2 + r^2)} \tan \theta \leq \mu \quad (15)$$

で与えられる.

c) 跳躍運動 斜面上の1点 (x_0, y_0) から初速度 V_0 , 水平となす角 β で飛出す物体の落下点の座標 (x_d, y_d) は, 次のように与えられる (図-1 参照).

$$x_d = x_0 + \frac{2V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (\tan \theta - \tan \beta) , \quad y_d = y_0 + (x_d - x_0) \tan \theta \quad (16)$$

また, 空気抵抗係数 a_k を考慮した場合の t 秒後の速度成分 (V_x, V_y) および座標 (x, y) は, 次式によって与えられる.

$$V_x = V_0 \cos \beta e^{-a_k t} , \quad V_y = \frac{g}{a_k} + (V_0 \sin \beta - \frac{g}{a_k}) e^{-a_k t} \quad (17)$$

$$x = x_0 + V_0 \cos \beta \frac{1 - e^{-a_k t}}{a_k} , \quad y = y_0 + \frac{gt}{a_k} + (V_0 \sin \beta - \frac{g}{a_k}) \frac{1 - e^{-a_k t}}{a_k} \quad (18)$$

跳躍開始から t 秒後の斜面垂直方向の速度 V_v は,

$$V_v = V_{v0} - g t \cos \theta \quad (19)$$

で与えられる. 最大跳躍量は $V_v = 0$ とおくことにより求めることができる.

d) 衝突運動 斜面への衝突前の入射角度を β_1 , 入射速度を V_1 とし, 衝突後の反射角を β_2 , 反射速度を V_2 とすると (図-1 参照), 衝突後の速度の斜面に対して鉛直方向および斜面方向の速度成分 V_{v2} および V_{h2} は, つぎのように与えられる.

$$V_{v2} = e V_1 \sin \beta_1 , \quad V_{h2} = \rho V_1 \cos \beta_1 \quad (20)$$

ここに, e は反発係数, ρ は速度の斜面方向成分の減衰係数である. 式(5)で与えられる速度エネルギー比は反発係数および減衰係数を用いて次式のように与えられる.

$$r = \rho^2 \cos^2 \beta_1 + e^2 \sin^2 \beta_1 \quad (21)$$

e) 回転運動から跳躍運動への移行 落石が回転運動をしている場合, 限界速度 V_{cr} より速くなると跳躍運動に移行する. 限界速度の値は, 実験データから決定される.

$$V > V_{cr} \quad (22)$$

4. 落石の軌跡に関する実験

斜面を落下する落石の運動は, 斜面の状態, 落石の形状および寸法等各種の影響を受けるため, 運動力学的理論解析のみでもって予測することは困難である. こうしたことから, これまでにも実験を主体とした研究がなされてきたが, 正確な数値データとして残っているものが少ない^{5,6)}. そこで, 著者らは, 広島県高田郡甲田町増田碎石場内の斜面を利用して落石実験を行い, 落石の運動機構に関するデータの蓄積を行なうと同時に, 落石の速度および跳躍量の推定方法の確立を試みた.

(1) 実験概要

a) 実験斜面 実験斜面は, 碎石場内の切取り斜面で, 高低差60m, 斜面勾配35°~43°であり, 斜面全体にわたって岩盤の上にところどころに巨礫が混ざった崖錐が堆積している.

b) 供試落石 供試落石は, 碎石場内より採集した石英斑岩の角状石で重量は約20kg~4,000kgであり, これらを見やすいように白色ペンキで着色した. 供試落石は軽量のは人力で, 大きいものは油圧式バックホウにより, 斜面頂上の同一場所より約80個落下させた.

c) 落下軌跡の観測方法 斜面の正面2方向, および斜面側面1方向から計3台のビデオカメラにより軌跡撮影を行った. また, 斜面には, 上下2方向に10m 間隔で標識ボールを設置し解析の場合の目印とした.

d) 落石の速度および跳躍量の算出 まず、斜面頂上と下端とを直線で結ぶ代表的な測線を定め、その線上に標識ポールを10本設置した。

つぎに、各落下ケースごとに、ビデオから落石の運動を線運動区間と跳躍運動区間とに分類した。線運動における落石の速度を直接算出するのは、落石が斜面から受ける抵抗力は常に変化しているため困難である。そこで跳躍運動から線運動に移行する際の衝突直後の反射速度と、線運動から跳躍運動へ移行する際の跳躍運動開始時の速度を、速度変化図において直線で結び、これを線運動の速度変化とすることにした。また、それぞれの跳躍運動に対して、落石の速度および最大跳躍量の算出を行った。

落石が測線から大きく反れて運動した場合、あるいは破碎した場合には、実験データから除外した。

(2) 実験結果

a) 落石の運動形態

ケース1：最初、投石地点より線運動を続け、ある地点で、回転による遠心力や斜面上の突起物への衝突により空中に飛び出し、それ以降は跳躍運動を繰り返して斜面下端に到達するケース。

ケース2：最初、投石地点より線運動を続け、ある地点で、跳躍運動に移行するが、その後、再び線運動および跳躍運動を繰り返して斜面下端に到達するケース。

本実験での落石の運動形態を上記のように分類した結果、全落石の43%はケース1であり、残りがケース2であった。既往の落石実験結果についても、その運動機構を上記のように分類してみたところ図-4のようになった。蘭原A（岩斜面）での運動形態は、全落下ケースのほとんどがケース1に属し、斜面の傾斜角度が異なるということもあるが、崖錐斜面の運動形態とは、顕著な違いがあることがわかる。

b) 落石の速度 落石が斜面に衝突する直前の速度 V_1 をもって落下高さ H における落石の速度とし、その分布を落石の重量別（3種類）に分けて示したものが、図-5である。

落石の重量による残存係数の違いに顕著な差は見られない。これは、既往の実験でも岩斜面、崖錐斜面を問わず見られた傾向である。また、図-7は、本実験における全落下ケースの速度分布を示したものであるが、図中に蘭原A（岩斜面）、蘭原B（崖錐斜面）の速度の上限値を描き本実験との比較を行った。その結果、崖錐斜面である本実験と蘭原Bの α の上限値はほぼ等しい。しかし、岩斜面である蘭原Aの α の上限値は、ある地点まではほとんど自由落下に等しく、崖錐斜面と比べて顕著な差がみられる。

さらに、図-5よりわかるように、蘭原A、Bの落下速度は、それぞれ落下高さ約40mで、ある一定値に収束しているが、本実験では、落下高さ約25m付近で、一度ある一定値に収束しているものの、落下高さ40m付近で、再び落下速度が増加している。これは、30m付近で斜面の急激な変化があるために、落石が空中に飛び出し斜面から受ける抵抗が急に少なくなったためと考えられる。

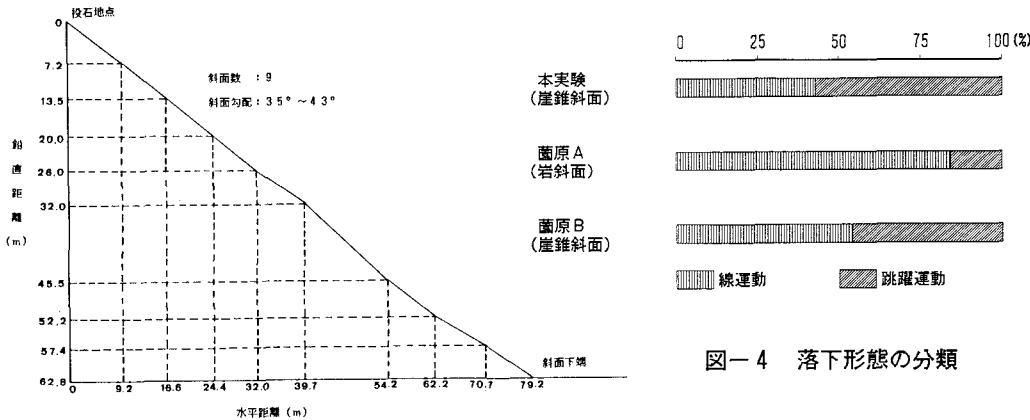


図-3 実験斜面の代表断面

図-4 落下形態の分類

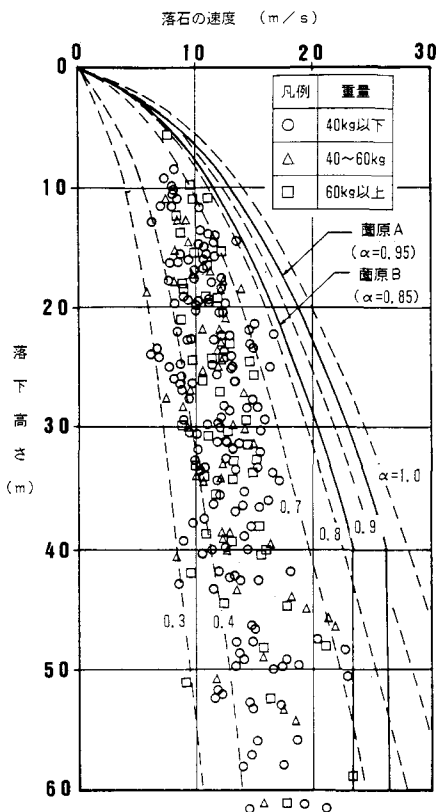


図-5 落石の速度分布

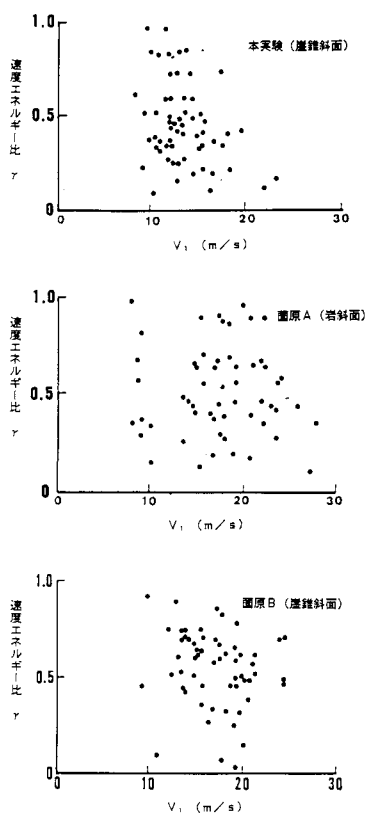


図-6 速度と速度エネルギー比

また、特に崖錐斜面の場合は、落石が斜面に衝突したとき、斜面がクッション材の働きをするため、運動エネルギーの減少が著しいものと考えられる。そこで、本実験および菌原の実験における落石の速度エネルギー比 γ について調べてみた (図-6)。

崖錐斜面である本実験および菌原 B では、入射速度 V_1 が約 16~18m/sec 以上において γ の減少傾向が認められるが、岩斜面である菌原 A では、入射速度 V_1 が約 20~22m/sec 以上で γ が減少傾向を示している。この γ の減少が始まる速度の違いが最終的に、崖錐斜面と岩斜面の落石の速度の差につながっているものと考えられる。

さらに、入射速度および反射速度を斜面に対して垂直方向と斜面方向に分解し、衝突による速度損失について詳しく調べてみた。反発係数 e および減衰係数 ρ は、図-1 に示す入射速度の垂直成分 V_{V1} および斜面方向成分 V_{H1} と反射速度の垂直成分 V_{V2} および斜面方向成分 V_{H2} を用いて、反発係数 e および減衰係数 ρ は、

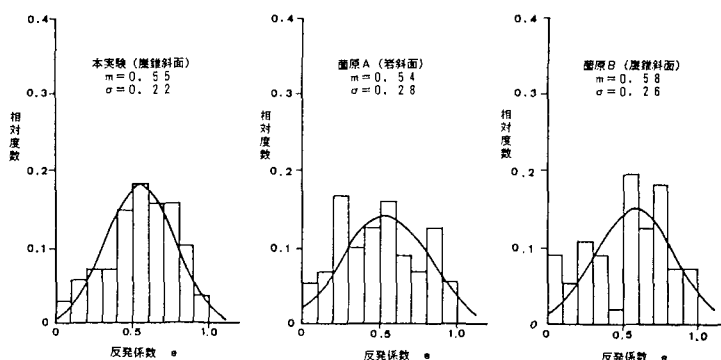
$$e = V_{V2}/V_{V1}, \quad \rho = V_{H2}/V_{H1} \quad (23)$$

と表される。この反発係数と減衰係数のヒストグラムおよびその平均値、標準偏差を、それぞれ、実験別に図-7、8 に示す。

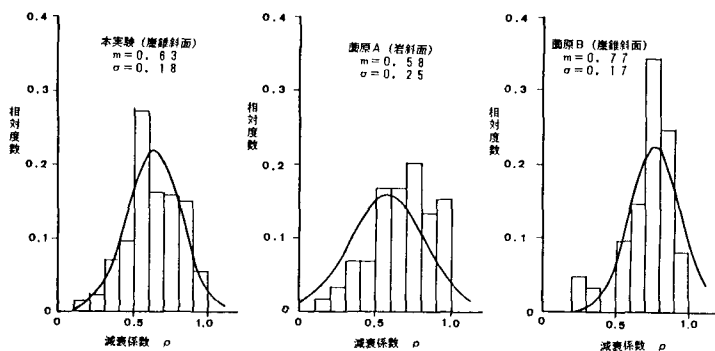
反発係数に関しては、崖錐斜面と岩斜面では平均値、標準偏差とも極端な差はないといえる。しかし、減衰係数に関しては、崖錐斜面は岩斜面に比べて、平均値は大きいが標準偏差は小さくバラツキが少ないといえる。

図-9 は、線運動から跳躍運動に移行するときの限界速度について調べたものである。

崖錐斜面である本実験および菌原 B の限界速度は約 3~12m/sec であるが、岩斜面である菌原 A は、約 0~7m/sec となっており、崖錐斜面に比べて低速で線運動から跳躍運動に移行するといえる。



図一 7 反発係数



図一 8 減衰係数

c) 落石の跳躍量 本実験での最大跳躍量と落下高さの関係を図一 10 に示す。

落石対策便覧によれば⁸⁾，落石の寸法（重量）による最大跳躍量の差は見られなかったとされているが，本実験では，重量が大きくなるにつれて最大跳躍量の上限值が小さくなる傾向がみられる。特に1t 以上の巨石では，最大跳躍量が1mを越えるものは見られない。実験中の目視観察で，重量が小さいものほど斜面の凹凸の影響を受け，落下軌跡に変化をきたすことを確認しており，図一 10 の傾向はうなずけるものである。

さて，全体としてこの最大跳躍量をみた場合，その上限値は約2mで収束しているといえる。これは，同じ崖錐斜面で斜面勾配も非常に類似した崖原Bと同じ傾向を示している。また，図一 10 の中には示していないが，落石が二つに割れて運動エネルギーのほとんどが一方に移り最大跳躍量が 5m以上になったケースがあった。

また，落下高さ50～60m付近で最大跳躍量が急に小さくなっているのは，崖錐斜面下端でよく見られることであるが，崖錐が極度に厚くなった上に，斜面勾配がゆるやかになっているためである。

d) 斜面の摩擦係数 本実験および崖原の実験について，摩擦係数の分布を調べたものが図一 11 である。また，図中には，その平均値，標準偏差も示してある。

これより，岩斜面は崖錐斜面に比べて摩擦係数の平均値，標準偏差ともに大きいといえる。

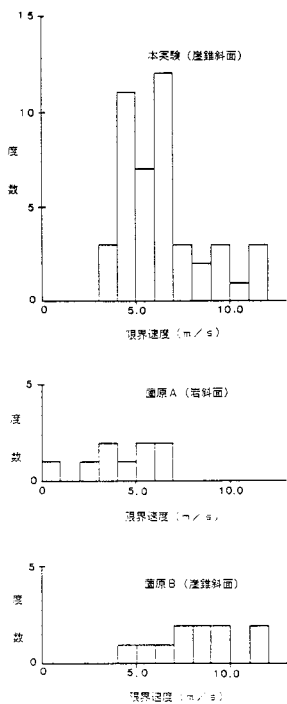


図-9 線運動の限界速度

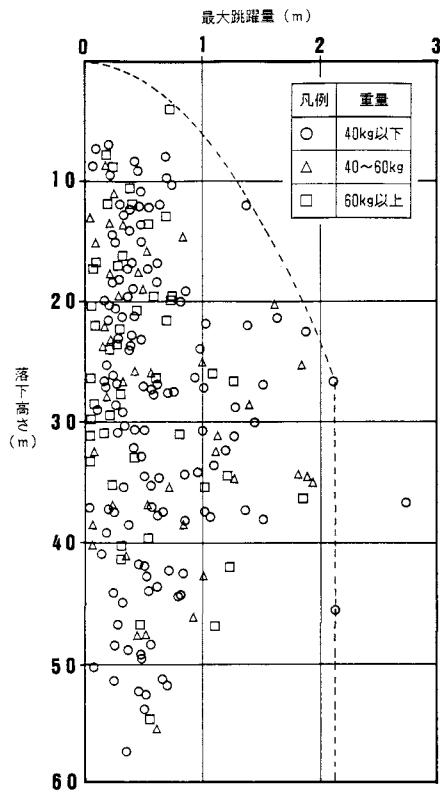


図-10 最大跳躍量分布

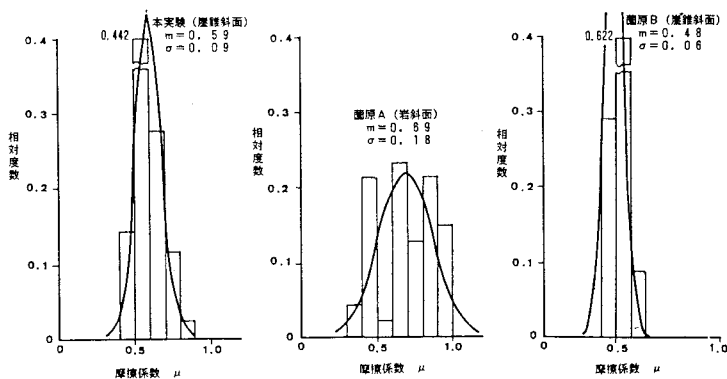


図-11 摩擦係数

e) 既往の実験データを用いた本実験のシミュレーション ここまで述べてきたように、斜面性状の非常に類似した本実験と菌原 B の実験は、その落石の跳躍量および速度においても非常によく似た傾向を示した。ここで、後述のシミュレーション手法を用いて、本実験のシミュレーションを試みた。摩擦係数、反発係数、および減衰係数は菌原 B の実験データを用い、抵抗係数には菌原 B のシミュレーションの繰り返しによって求めた 0.4 の値を用いることにした。シミュレーション結果を図-12 に示す。図より明らかなように、落石の速度、最大跳躍量は実験値を非常によく再現しているといえる。

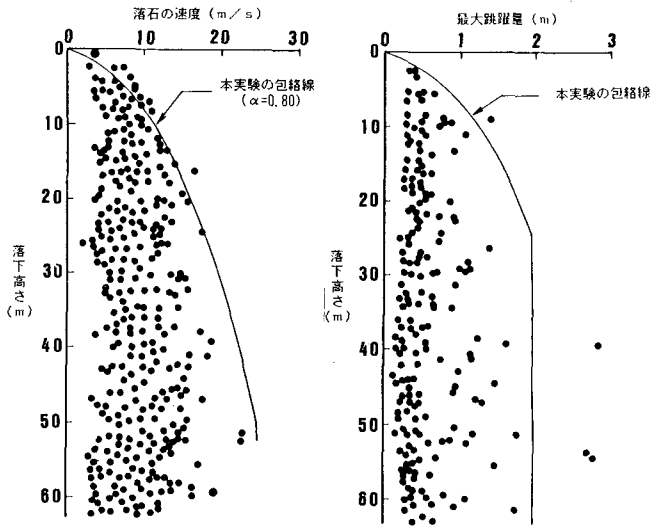


図-1 2 シミュレーション結果

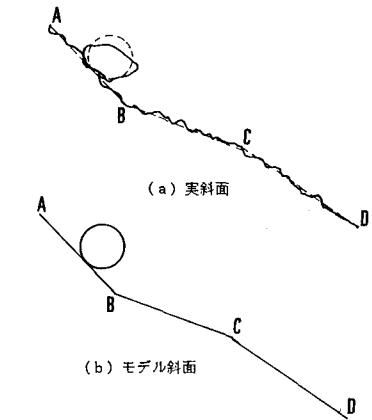


図-1 3 斜面および落石のモデル化

f) 落石の平面的な広がり ここまで述べてきた落石の運動は、二次元問題に限定したものであったが、実際の落石の運動は、三次元的な動きも多く、落石の発生地点からの平面的な分散角度を予測することは、ロックシェッドおよび落石防護柵の道路延長方向の長さを決定する上で、非常に重要なことである。

本実験では、落石の重量が小さいものほど斜面の凹凸の影響を受け、平面的な分散角度が大きくなっている。特に、重量が1t以上の巨石では、斜面の影響をほとんど受けず、その分散角度は極めて小さかった。

5. シミュレーションの方法

斜面および落石をモデル化し、線運動に対し、それぞれ、式(6),(7) および式(12),(13)を用いると、既往の実験結果(藺原, 高松)と比べ、速度および跳躍量がかなり大きくなるという結果を得た。これは、摩擦以外の抵抗も作用するためと考えられる。そこで、本研究では、線運動中の抵抗として、速度に比例した抵抗を考慮することにした。そして、実験結果とシミュレーションのフィードバックにより確定された抵抗係数を用いれば、より正確なシミュレーションが可能と考えられる。

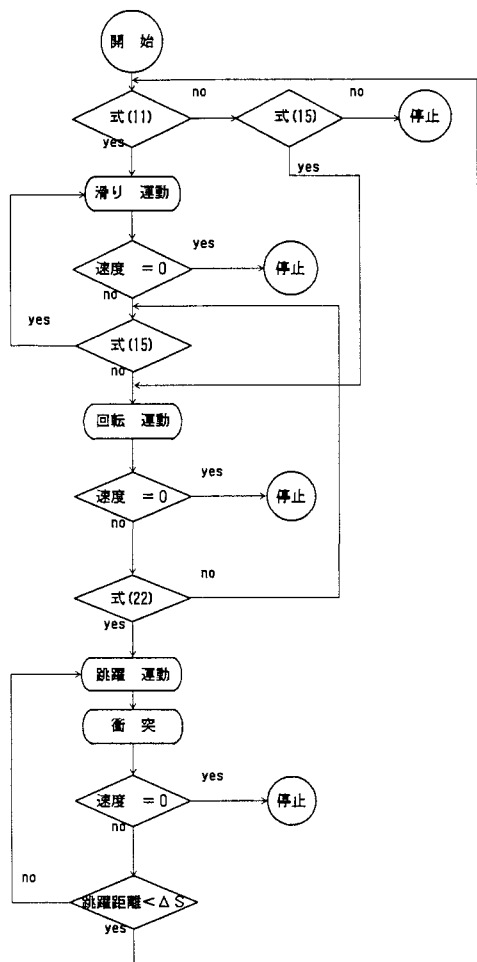
(1) 斜面および落石のモデル化

実際の斜面は、図-1 3 (a) に示すように、細かな凹凸がたくさん存在するが、これらを見出し、極端な斜面の変化点(A, B, C, D点)のみに着目し、図-1 3 (b) のように斜面を有限個の直線で近似する。また、落石は球と仮定する。

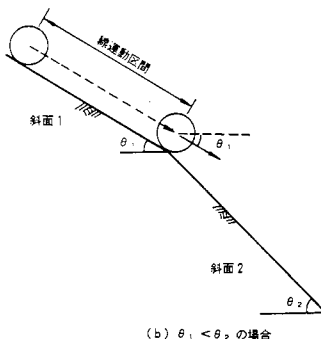
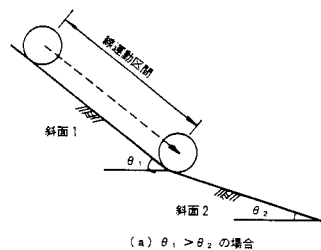
(2) 落石の運動形態の変化

a) 同一斜面上での運動形態の変化 シミュレーションのフローチャートを図-1 4 に示す。まず、落石がある斜面上を回転運動している場合、そのまま回転運動を続けるか、滑り運動に移行するかを式(15)で判定する。また、跳躍運動への移行は式(17)で判定する。さらに、すべての運動形態に対し、速度が0になった場合、落石は停止し計算を終了する。

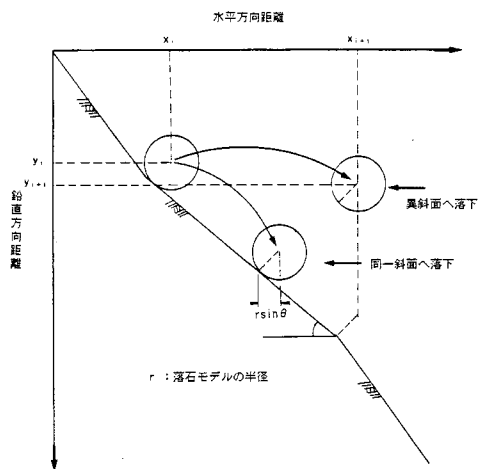
つぎに、落石がある斜面上を滑り運動している場合は、そのまま滑り運動を続けるか、あるいは回転運動に移行するかを式(15)で判定する。本シミュレーションでは、反発係数 e を $0 < e < 1$ の範囲で取り扱っているため、落石が跳躍運動を一度始めると、他の運動形態に移行しなくなる。そこで、斜面衝突後の斜面方向の跳躍距離が落石の直径の10分の1以下となった場合には、回転運動か滑り運動に移行するものとした。



図一 1 4 シミュレーションのフローチャート



図一 1 5 異斜面での運動形態の変化



図一 1 6 落下位置の判定

同一斜面上では、以上のように運動形態が変化するものとし、3. で述べたそれぞれの運動形態に応じた式を用いるものとする。

b) 落石が異斜面に移る場合の運動形態の変化 まず、図一 1 5 (a)に示すように斜面1と斜面2の傾斜角が $\theta_1 > \theta_2$ であり、落石が斜面上を回転および滑り運動を行なって斜面2に達したとき、落石は、斜面2に $\theta_1 - \theta_2$ の角度で衝突するものと仮定する。衝突後は、落石が斜面2に移ったとして計算を進めて行く。運動形態の変化は、図一 1 4 に示す衝突運動以降の流れとなる。

また、図一 1 7 (b)に示すように斜面1と斜面2の傾斜角が $\theta_1 < \theta_2$ であり、落石が斜面1上を回転および滑り運動を行なって斜面2に達したとき、落石は角度 θ_1 で空中に飛び出すものとする。運動形態の変化は、図一 1 4 に示す跳躍運動以降の流れとなる。

また、斜面で落石が跳躍運動をしたとき、その落石が跳躍運動を開始した斜面と同一の斜面に落下するか、

あるいは異った斜面に落下するかの判断は、以下のように行った。

図-16より明らかなように、次式を満足したとき落石は跳躍を開始した斜面と同一の斜面には落下しないと判断し、つぎの斜面の計算として取り扱う。

$$x_0 + S_x > x_1 + r \sin \theta \quad (24)$$

ここに、 x_0 = 跳躍開始時の落石の重心の x 座標、 x_1 = 跳躍を開始した斜面の終点の x 座標および S_x = 跳躍開始時から x 方向に進んだ距離である。

(3) 反発係数, 減衰係数, 摩擦係数

反発係数, 減衰係数, 摩擦係数は, 斜面の凹凸や落石の形状等, 様々な要因の影響を受け, 非常にランダムであり, 一定値と考えるのは好ましくない。著者らは, 菌原の実験データより, これらの諸係数の確率分布を求め, この確率分布が図-7および8に示すように, 正規分布をなすと仮定して, その確率密度関数より正規乱数(信頼区間95%)を発生させ, これらの諸係数を決定し, シミュレーションに用いるものとした。

6. 抵抗係数 c_k の推定

これまでの実験とシミュレーションのフィードバックで得られた抵抗係数 c_k は, 菌原Aで $c_k = 0.1$, 菌原Bおよび本実験で $c_k = 0.4$ となった。

実験データは, 岩斜面が1種類, 崖錐斜面が2種類と少なく, 速度残存係数 α と抵抗係数 c_k との関係を定式化するにはまだ少し無理があるが, 立木の存在する斜面での抵抗係数の定式化を以下の方法で試みた。

岩殿での実験斜面性状は, 立木が存在する他は, 本実験と非常に類似している(文献17参照)。そこで, 本実験の諸係数(反発係数, 減衰係数, 摩擦係数)およびモデル斜面を用いて岩殿斜面のシミュレーションを行ない, 実験から得られている残存係数 $\alpha = 0.65$ に対応する抵抗係数の値を試行錯誤的に求めたところ0.9となった。したがって, これまでに求めた抵抗係数 c_k と残存係数 α との関係は図-17に示すような直線で表せる。しかしながら, 立木や草木の存在する斜面の落石の運動に関する詳細なデータがなく, この直線関係は, 今のところ, 十分信頼に耐えるとはいえない。今後, 各種の条件の斜面で落石実験を行い, 本シミュレーションを用いてフィードバックを繰り返すならば, この抵抗係数 c_k と残存係数 α の関係が明らかになり, 落石の速度および最大跳躍量を合理的に推定する手法を確立することが可能になろう。

7. 実斜面への適用

図-18に示す実斜面AおよびBに対し, シミュレーションを試みた。図には, 下方から円内に斜面番号が, また, 斜面勾配の変化点に接点番号が付されている。斜面Bは, 斜面Aに隣接する測点での斜面であり, 接点8および12が凹んでいる他は, ほぼ, 斜面Aと同じ形状をしている。

斜面AおよびBとも, 斜面番号1はロックシェッド上のサンドクッションの表面を示している他は, いずれも岩斜面である。シミュレーションには, 反発係数, 減衰係数および摩擦係数の平均値および標準偏差として菌原Aのものを使用し, 斜面抵抗係数 $c_k = 0.1$, 空気抵抗係数 $\alpha_k = 0.001$ を, また, 計算時間間隔として0.02秒を用いた。

図-19は, 1tの岩塊の落下シミュレーションを200回行ったうち, 30回分の落下経路を図示したものである。斜面Bの凹部が跳躍量に大きく影響していることがうかがえる。また, 落石がロックシェッド上のサンドクッション上に到達したときの速度を用いて, 落石対策便覧式¹⁾により計算した衝撃力の発生頻度およびロックシェッドの主桁が9.5mのスパンで単純支持されているとした場合に, この衝撃力により発生する主桁の最大曲げモーメントの発生頻度のヒストグラムを図-20に示す。

これらの図より, 斜面上のわずかな凹部が落石を跳躍させ, 落下位置を変化させるとともに, 大きい衝撃力を発生させることがわかる。

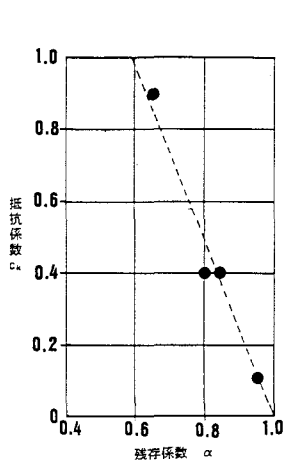


図-1 7 抵抗係数と残存係数

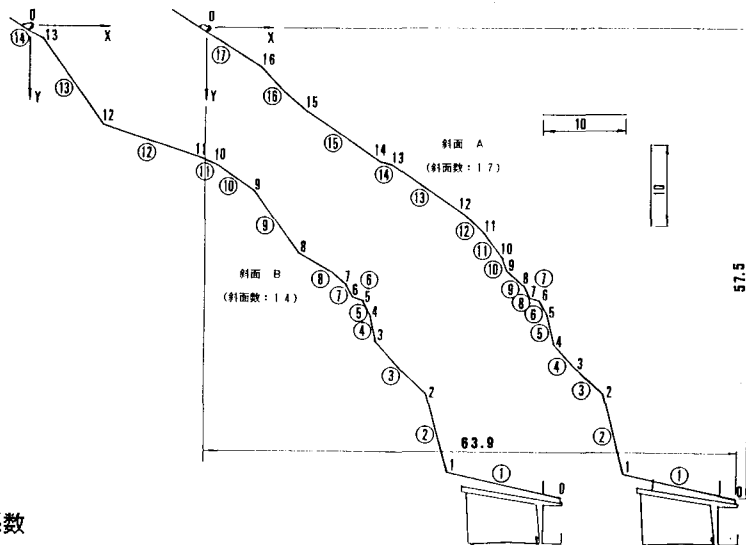


図-1 8 モデル化したシミュレーション用斜面

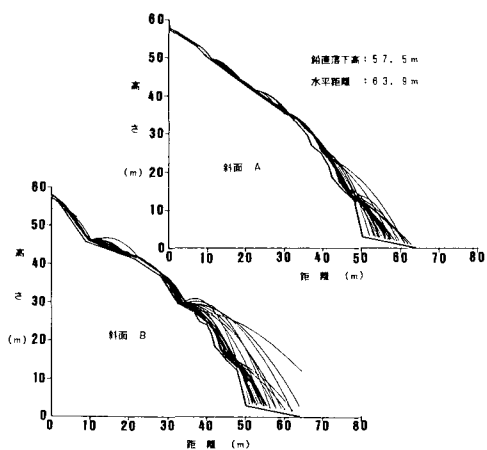


図-1 9 落下経路のシミュレーション

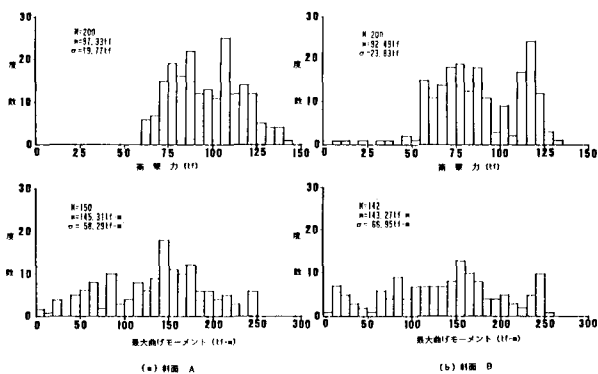


図-2 0 衝撃力および最大曲げモーメントの発生頻度図

8. 結 論

本研究では、斜面上の落石の落下経路および速度の推定方法を確立する目的で、落下高さ約60mの実物大崖錐斜面を用いて落石実験を行ない、既往の実験との比較を行なった。その結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 本実験の落石の速度の残存係数 α の値は0.8程度であり、過去に蕨原で行なわれた落石実験の斜面B(崖錐斜面)の速度残存係数 α の値(0.85)とほぼ等しい値となり、ある速度に達すると速度が一定値に収束する傾向も確認された。また、本実験でも既往の実験で見られたように、落石の重量による速度の違いは認められなかった。
- (2) 既往の実験では、落石の跳躍量の重量による違いは認められていないが、本実験では重量が大きくな

るほど、跳躍量は小さくなり、1t以上の巨岩では1m以上の跳躍は認められなかった。また全体としては、最大跳躍量の約 95%が2m以内であった。

(3) 本実験での落石の平面的軌跡は、重量が小さいものほど投石地点からの分散角度が大きくなった。これは、実験の目視観測で重量の小さいものほど斜面の凹凸の影響を受けていたことが確認されていることからもうなずける結果である。

既往の実験結果および本実験結果より、落石の落下経路および速度を合理的に推定するために、著者らは、速度に比例した抵抗係数 c_k を導入し、剛体の運動方程式を用いた落石の運動のシミュレーション手法を開発し、その適用性の検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 斜面抵抗係数は崖錐斜面が $c_k = 0.4$ 、岩斜面が $c_k = 0.1$ 程度であり、この値を用いると、速度および最大跳躍量の実験値を非常によく再現できた。

(2) 立木および草木の存在する崖錐斜面の抵抗係数の値を、本シミュレーションで推定した結果 0.9となった。立木および草木の存在する斜面の落石の運動の詳細なデータがないために、この値は推定の段階に留まるが、今後、実験を重ねることにより、より信頼性のある値が得られるであろう。

(3) 既往の実験および本実験結果より、最大跳躍量の約95%は2m以内であったと結論付けられているが、これらの斜面は、いずれも凹凸の少ない斜面である。わずかな凹部が跳躍量および構造物に及ぼす影響について、実例を用いて説明した。

この結果、斜面の物理的な性質のみならず形状も、落石の運動形態に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

本研究では、数少ない実験データに基づいてシミュレーションを行ったが、精度を上げるためには、今後、各種の条件下で多くの実験を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983年 7月。
- 2) 福岡正己：落石の運動機構，施工技術，Vol.6, No.8, pp.14-16, 1973年7月。
- 3) 福岡正己：落石の運動機構について，第11回日本道路会議特定課題論文集，pp.96-98, 1973年10月。
- 4) 神戸製鋼所：落石防止柵現地実験報告（概要），1966年10月。
- 5) 日本道路公団東京支社・建設企画コンサルタント：落石実験調査報告書，1973年11月。
- 6) 日本道路公団名古屋管理局：建設企画コンサルタント：愛岐落石防止柵耐衝撃力測定実験報告書，1973年9-11月。
- 7) 高速道路調査会：落石防護施設の設置に関する研究報告書，1974年10月。
- 8) 佐々木康他：落石の跳躍量に関する実験，第14回日本道路会議特定課題論文集，pp.113-115, 1981年。
- 9) 右城 猛・村上哲彦：落石飛躍高の推定，第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp.48-54, 1983年7月。
- 10) 建設省土木研究所：落石防災対策に関する調査報告書（その2），土木研究所資料，No.2771, 1989年2月。
- 11) 大房・福田：落石による擁壁の衝突速度と落下軌跡の算定，土木技術，Vol.33, No.5, pp.36-41, 19 年 月。
- 12) 右城 猛・大原建史・明坂宣行・吉崎和人：実験データを用いた落石の運動軌跡のシミュレーション，第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp.88-91, 1986年7月。
- 13) 斉藤武文・吉田 博・梶谷 浩：実落石の落下位置および速度に関する一推定法，第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp.98-104, 1986年7月。
- 14) 古賀・伊藤・鷺田・森下：落石の運動軌跡の予測法に関する検討，土木技術資料，Vol.31, No.8, 1989年9月。
- 15) Rochet, L. : Application des modèles numériques de propagation à l'étude des

éboulements rocheux, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et
chaussées, No.150-151, Sept.-Oct., 1987.

16) Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement Bundesamt
für strassenbau: Schutz gegen Steinschlag(2. Auflage), pp.21-29, Nov. 1985.

17) 吉田・榎谷・右城・柴田：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ，土木学会論文集，
No.421, pp.1-10, 1990年9月.

(1990年10月12日受付)