

シミュレーションによる落石運動軌跡の予測

四国建設コンサルタント(株) 設計部 正会員 石城 猛
 “ 開発部 正会員 吉崎 和人
 “ 設計部 正会員 ○坂東 優

1. まえがき

斜面に落下する落石の運動を予測することは、道路防災上極めて重要な課題である。しかしながら、落石の運動は斜面の形状、土質、植生状況、落石の形状等により極めて複雑になることから、これを解析的に予測することは不可能に近いといえる。

そこで筆者らは、実際の切取斜面で落石実験を行い、斜面に落下する落石の運動機構を観察するとともに、その実験結果を用いて、シミュレーションにより落石の運動軌跡の予測を試みた。

2. 落石実験の概要¹⁾

実験場所は、徳島県鳴内市中山の碎石場内の切取斜面である。斜面高さは25.5 m、斜面勾配は約48度であり、ほぼ一様である。斜面は、泉砂岩と頁岩が互層を成しており、その層理面の方向に切取られているため比較的凹凸は少く滑らかである。

落下させた石は、碎石場内で発破により切出した、重量1.0~4.5 kgの角張った形状をしたものである。落下させた個数は30個で、すべて、白色のペンキで着色し、同一地点から落下させた。

落石の挙動は、斜面の正面から8 mmカメラで、側面から16 mmカメラおよびビデオカメラで撮映した。

3. 実験結果

実験より得られた落石の軌跡の1例を図-1に示す。投石地点(a)から(b)地点までは、回転運動をしながら斜面に沿って落下し、それ以降は跳躍運動を繰返している。

投下した各々の落石について、観測結果から図-1に示した様な軌跡を描き、その軌跡をもとにして、落石が斜面に沿った線運動から跳躍運動に移行するときの速度 V_0 、そのときの速度残存係数 $\alpha (=V_0/\sqrt{2gH_0})$ 、 H_0 :投石地点からの落差)と運動の方向が斜面となす角度 θ_0 、斜面に衝突した落石が再び跳躍するときの衝突前と衝突後の速度比 $r (=V_2/V_1)$ 、そのときの飛出しの方向 θ_2 をそれぞれ計算し、ヒストグラムに表わすと図-2~図-6のようになる。

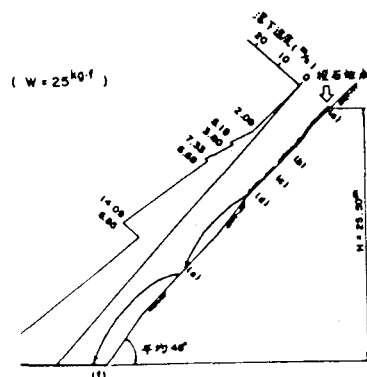
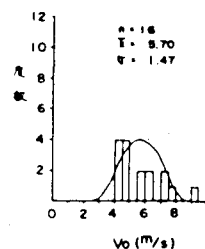
図-1 落石の落下軌跡¹⁾

図-2 跳躍運動に移行する速度

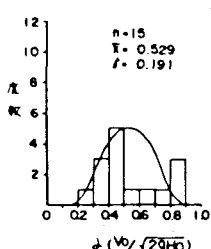


図-3 跳躍開始時の速度残存係数

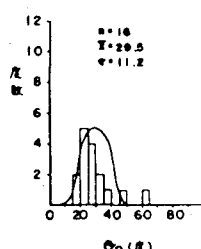


図-4 跳躍開始時の飛出し角度

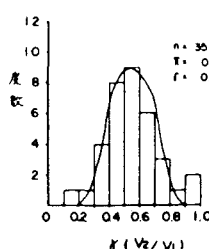


図-5 衝突前と衝突後の速度比

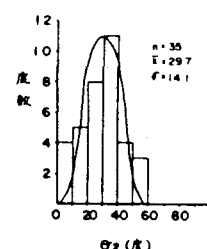


図-6 衝突後の飛出し角度

4. 落石の軌跡のシミュレーション

落石の運動は斜面の形状、土質、植生状況、落石の形状等によって極めて複雑となる。このため、落石の軌跡を解析的に予測することは不可能に近く、実験データを用いたシミュレーションによって予測するのが实际的といえる。シミュレーションの方法として、斜面勾配と速度残存係数の関係、斜面に沿った線速度から跳躍運動に移行する限界速度、あるいは飛出し角度と斜面勾配の関係、斜面への衝突時の速度エネルギー比、あるいは反発係数と衝突速度の関係等を定量的に評価し、落石の軌跡を一義的に決定する方法があるが、今回の落石実験による限りでは、これらの間にはほとんど相関性を見いだせなかった⁴⁾。これは、落石の運動が斜面のわずかな凹凸や落石の形状によって大きく支配されるためと考えられる。したがって、落石の軌跡の決定要素である、跳躍運動に移行する限界速度や飛出し角度等は、確率論的に評価する方がより实际的であるし、また、シミュレーションの信頼性を高めることができると思われる。

このようなことから、図-2～図-6に示した各々の実験データを独立した確率変数と考え、それぞれの確率密度関数を正規分布と見なし、95%の信頼区間で乱数を発生させ、 α 、 V_0 、 θ_0 、 r 、 θ_2 の値を確率論的に決定した。図-7は、これらの値を用いて100種類の軌跡を描いたものである。また、これらの軌跡の90%を包絡する直線を実測値と比較すると図-8のようになり、両者は極めて良く一致している。

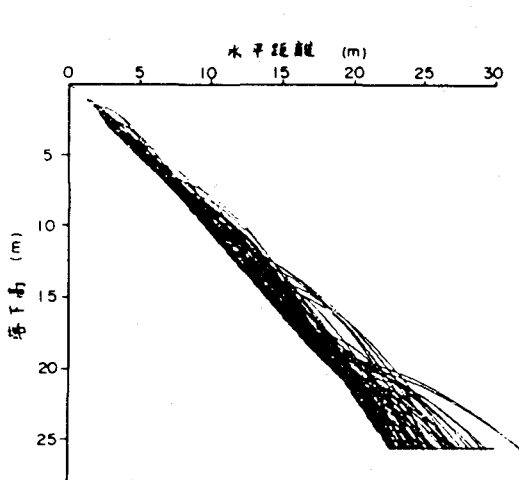


図-7 シミュレーションによる落石の軌跡

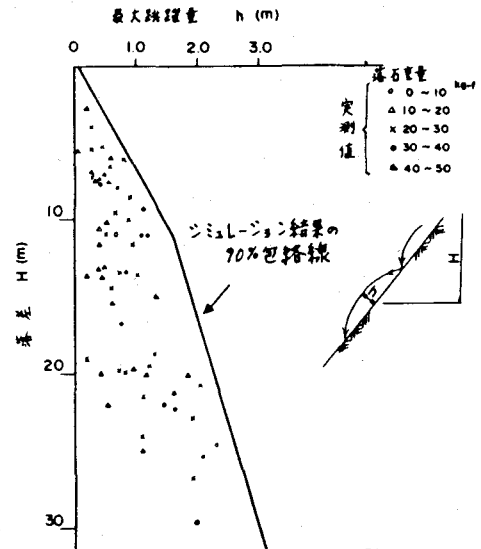


図-9 シミュレーション結果と実測値の比較

5. あとがき

実験データを確率論的に評価し、実験斜面に対してシミュレーションを行った結果、実測に近い落石の軌跡をシミュレートすることができた。落石の運動を予測する上で、シミュレーション手法を用いることは極めて实际的かつ有効な方法と考えられる。しかしながら、落石の恐れのある多くの斜面は、道路交通に対する安全性等の問題もあり落石実験を行うことができない。落石は、斜面の形状、土質、植生状況等によってその運動が著しく異なることから、限られた実験データより得られた確率密度関数を斜面に依じてどのように修正して用いるかが今後の大きな課題である。

<参考文献>

- 1) 4), 5) 石城猛, 村上哲彦: 落石の飛跳高の推定, 第一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, 金沢大学工学部土木工学科構造力学研究室編, 1983年7月, PP48~54
- 2) 大房高明, 福田富男: 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, NO5, PP36~41
- 3) 三上善哉: 落石防止防護工法, 理工図書