

## 3 次元落石運動解析における入力値の選択に関する検討

鳥取大学 学生会員 ○金 美錦 野口 珠美  
鳥取大学 正会員 西村 強 木山 英郎

## 1. はじめに

落石の運動を数値計算によって表現しようとする研究は今までも実施されてきたが、その多くは2次元解析であり、地形が急変する斜面における運動を対象とするとき、水平方向への広がり表現できない。そこで、本研究では、3次元個別要素法により落石の運動の予測を行った。解析に際しては、落石運動に影響を与える入力変数に対して Latin Hypercube Sampling 法<sup>1)</sup>を適用してその入力値を選出した。そして選出した入力値を用いて3次元落石軌跡数値シミュレーションを行った。

## 2. 入力値の設定

入力値が  $X_1, X_2, \dots, X_N$  の  $N$  個必要であるとする（これは  $N$  個の入力変数があるのではなく、 $N$  個の数値が必要であるという意味である）。入力変数  $X$  の全体分布から  $N$  個の数値をサンプリングし、出力値  $Y$  の分布を推定する。このような方法は、Random Sampling と称せられる。この方法では、かなりの試行回数を行わないと入力値に偏りが発生することがある。そこで、試行回数を抑えながら、このような偏りを避ける工夫として、入力変数  $X$  の分布  $S$  を小区間（あるいは小空間） $S_i (i=1, 2, \dots, I)$  に分割し、空間  $S_i$  からサンプリング  $X_{kj} (j=1, 2, \dots, n_i; (\sum n_i = N))$  としてやれば、全区間に対して入力値を得ることができる。もし、 $I=1$  とするならば、前述の Random Sampling となる。このような手法の利点は、 $X$  の分布  $S$  を表すのに用いる  $N$  を減少させることができるということであり、Stratified Sampling と称せられる。さて、入力すべき変数が  $k$  個存在する場合を考える。この場合、ある入力変数  $X_k$  を  $N$  個の区間に分ける。ここにおいて、すべての一区間の再現確率は  $1/N$  で同一であるとする。まず、一区間より、一入力値のサンプリングを行う。そうすれば、 $X_k$  に対して  $X_{kj} (j=1, 2, \dots, N)$  となる  $N$  個の数値が準備されることになる。次にこの作業を全ての入力変数に対して実施する。すなわち  $X_k (k=1, 2, \dots, k)$  にそれぞれに  $X_i (i=1, 2, \dots, N)$  が与えられる。この後  $X_k$  をランダムに組合せ1回あたりの入力値（群）とする Sampling 法である。Random Sampling より少ない回数で、分布からまんべんなくサンプリングを行い、入力変数の不確定性を網羅できる手法として、Latin Hypercube Sampling が紹介されている。本研究では、落石の運動解析に個別要素法<sup>2)</sup>の3次元プログラム<sup>3)</sup>を使用した。上記の入力条件のうち、初期落下高さ  $H$ 、落石要素の幅  $b$ 、幅と高さの比  $b/h$ 、反発係数  $e$  および静止摩擦係数  $\phi$  を仮定した分布より乱数を用いて決定した後、ランダムに組み合わせて一回あたりの入力値群を設定することを行った。このプログラムでは、剛体要素が重力の作用下で、地表面との衝突・跳躍を繰り返しながら運動する様子を表現できる。剛体の回転運動についてオイラー式で表され、剛体要素の慣性主軸に対して記述している。また、接点におけるエネルギー損失をバネ-ダッシュポット系で表現するにあたり、粘性係数  $\eta$  を反発係数  $e$  の関係式として次式を用いている。

$$\eta = \frac{|\ln e| \cdot \eta_0}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}}$$

ここに、 $\eta_0$  は臨界減衰係数。 (1)

## 3. 解析モデル及び入力パラメーター

図1に解析に用いた地形のモデルを示す。各パラメーターについては、定義した存在範囲に一樣に分布しているとして3つの値を2.に述べた手順により選定した。次に、選定した値にランダム順列を用いて組み合わせた結果を表1に示す。落石運動解析においては各組合せ (CASE1~3) について各50回の試行を実施した。一試行において（つまり、要素が運動を開始し

表1 入力値の組み合わせ

|        | $b(m) : h(m)$ | $H(m)$ | $\phi$ | $e$  |
|--------|---------------|--------|--------|------|
| CASE-1 | 1.56 : 1.29   | 0.16   | 29°    | 0.06 |
| CASE-2 | 1.03 : 0.58   | 0.70   | 22°    | 0.09 |
| CASE-3 | 0.90 : 0.66   | 0.44   | 26°    | 0.09 |

て静止するあるいは解析対象領域外へ至る), 反発係数については表中の値の  $\pm 20\%$  の範囲に一樣に分布するとして, 要素が地表面に接する度に乱数を用いて決定した。また, 以下のように入力条件を設定した。

密度:  $2.220\text{Mg/m}^3$ , 初期速度: 0 (静止),

接触剛性係数:  $k_n=1000(\text{kN/m})$ ,

$k_s=1000(\text{kN/m})$

#### 4. シミュレーション結果

図 2 に要素中心軌跡の水平面への投影図を示す。軌跡の水平方向への広がりを見ることができる。特に, 初期位置直下の小段に達した後は地形の影響と接触状態によって要素は最大傾斜の方向へ落下している。これは尾根地形における落石運動の特徴をよく表現していると考えられる。同じ初期位置においてもブロックの大きさあるいは初期落下高さなどのパラメータにどのような値を入力するかによって落石の軌跡は多様に現れるようになる。さらに, 到達位置を見ると, 約 8% が小段に静止しており, 残り 92% が最下部の平坦面まで到達したことが分かる。図 3 は軌跡の一例を鉛直面への投影したものである。

#### 5. まとめ

本研究では落石運動における入力変数の設定を Latin Hypercube Sampling 法を適用して選定した。そして選定した入力値を用いて 3 次元数値シミュレーションを行った。その結果, 入力値を入力変数値の存在範囲から偏りなく抽出することができた。当然のことながら, 計算された軌跡は, 計算手法の仮定と多くの入力変数の値に依存している。現地における過去の履歴等と照らし合わせながら解析結果の検討を行うことも重要である。

#### 参考文献

- 1) McKay, M. D. & Conover, W. J. 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, Vol.21, No. 2: 239-245.
- 2) Cundall, P. A. 1971. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. *Symposium on rock mechanics*. Nancy. Vol. 2:129-136.
- 3) Nishimura, T., Seiyama, T., Kiyama, H. & Taniguchi, Y. 2003. A three-dimensional simulation model for rockfall using distinct element method. *Proceedings of the 3rd international symposium on rock stress*. RS Kumamoto 03: 449-454.

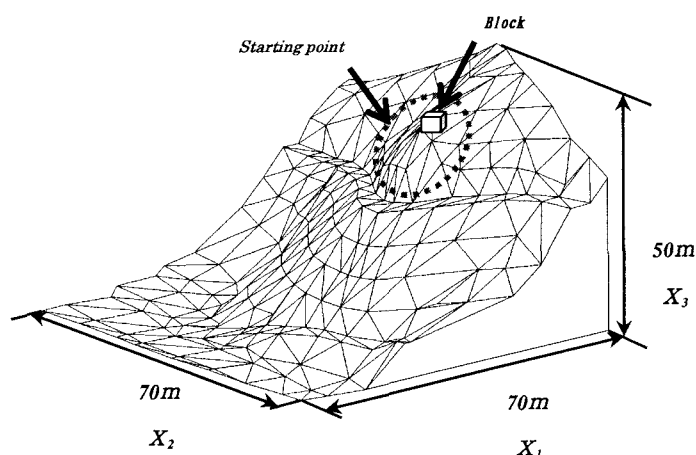


図 1 解析モデル図

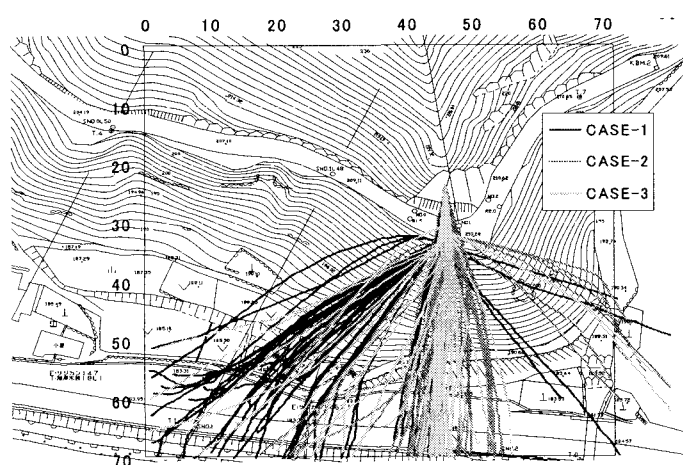


図 2 要素中心軌跡の水平面への投影図

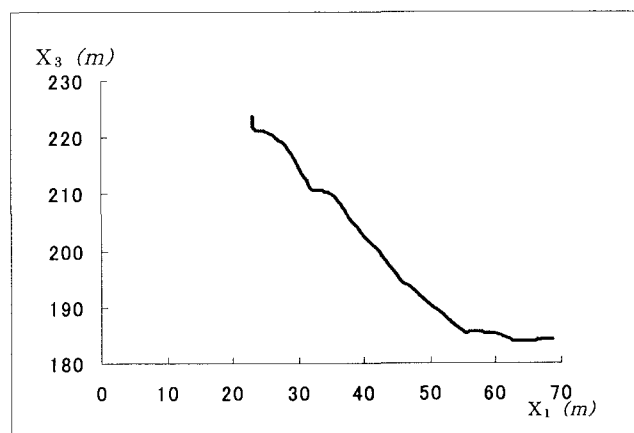


図 3 鉛直面への投影図