

(株) 基礎建設コンサルタント 正会員 ○能野一美

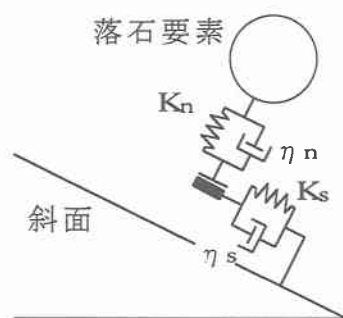
徳島大学工学部 フェロー 山上拓男

徳島大学工学部 正会員 蔣 景彩

1. はじめに 落石から事故を防ぐためには、落石の運動形態を的確に予測して、落石防護工の設計を行わなければならない。しかし、落石運動が複雑な自然現象であるために、落石運動の推定は非常に困難なものとされている。こうしたことから落石運動の合理的な推定法の確立が強く望まれている。

本報告では、落石機構のモデル化に数値解析手法として個別要素法を採用し、解析結果を大きく左右する材料特性の決定に逆解析を用いた落石の落下経路の推定法を提案する。ここでは、提案する手法を著者らが行った模型斜面による室内落石実験に適用した事例を紹介し、提案する手法により斜面の変形をも考慮した解析が可能であるか否かを検討する。

2. 個別要素法 個別要素法を用いて落石解析を行う場合、斜面を剛体壁でモデル化すると、落石の運動を支配する材料特性は、落石要素と斜面間の垂直方向バネ定数 K_n 、せん断方向バネ定数 K_s 、垂直方向減衰定数 η_n 、及びせん断方向減衰定数 η_s となる。これらのパラメータを適切に与えることができれば、実現象を忠実に再現する落石運動をシミュレートすることが可能となる。そのため、これらパラメータの値を、落石実験により求まる落石の軌跡をもとに同定する方法を提案したい。



図－１ 個別要素法接触モデル

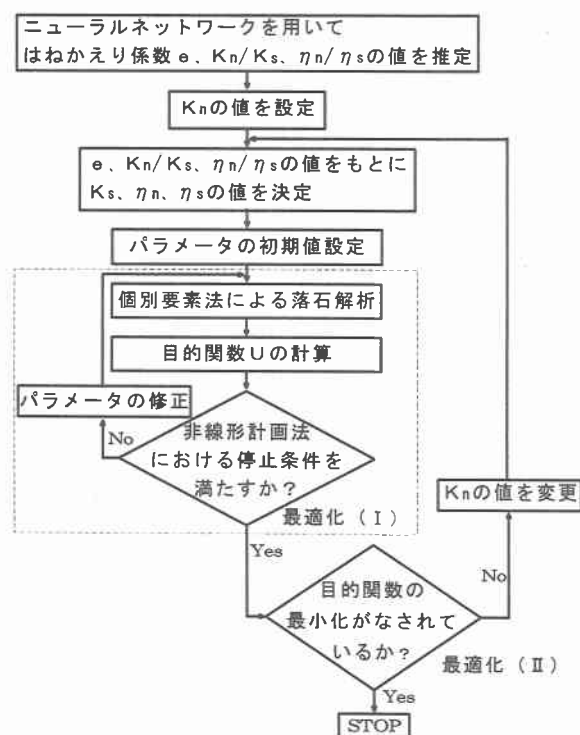
3. 落石運動の推定法 本研究で提案する落石運動推定法の手順を簡潔に説明する。まず、落石の危険性のある斜面において落石実験を実施する。次に、そこで得られた落石の軌跡を用いて個別要素法材料特性の逆解析を行う。そして推定された逆解析値のもとで落石の挙動をシミュレートし、設計上の落石運動を予測する。本研究では、1つの事例として、逆解析を行うために必要な落石の軌跡を室内落石実験により求めた。落石の軌跡はある時間間隔 ΔT ごとに得られる落石の重心座標で定義する。

4. 2重最適化法 本研究ではより正確な逆解析値を得るために、山上ら²⁾が提案している逆解析を行う際に設定する初期値をも目的関数の関数であると考え、2重最適化法を採用している。2重最適化法のフローチャートを図－2に示し、これを用いて提案する同定法を説明する。

まず、跳ね返り係数 e 、 K_n/K_s 、及び η_n/η_s の値を推定する。これらの値は落石の軌跡を基にニューラルネットワークを用いて推定している。なお、跳ね返り係数とは、大町ら³⁾により理論的に導かれているものであり、次式のように K_n 、 η_n 、落石の質量 m で表される。

$$e = \exp\left(-\frac{\eta_n \pi}{\sqrt{4K_n m - \eta_n^2}}\right) \quad (1)$$

次に、 K_n の値を任意に仮定する。そして、この仮定された K_n と、上で推定された跳ね返り係数 e 、 K_n/K_s 、



図－２ 2重最適化法フローチャート

及び η_n / η_s の値から、 K_n 以外のパラメータの値を決定し、それらを初期値として逆解析を行う。上述のように初期値を設定する理由は、解析における落石挙動が跳ね返り係数 e と K_n / K_s の値に支配されるためである。

逆解析は式（２）に示す目的関数 U の最適化を非線形計画法に基づいて行う（最適化Ⅰ）。

$$U = \sum_{i=1}^n \left((X_{ob,i} - X_{cal,i})^2 + (Y_{ob,i} - Y_{cal,i})^2 \right) \tag{2}$$

ここに、 $X_{ob,i} \cdot Y_{ob,i}$ は落石実験により求まる時刻 i における落石重心座標であり、 $X_{cal,i} \cdot Y_{cal,i}$ は個別要素法を用いて落石シミュレーションを行った際に得られる、落石実験と同じ時刻 i における落石重心座標である。非線形計画法における停止条件を満たす目的関数が得られれば、求められた目的関数の最小化がなされているか否かの判定がなされる。判定が下されない場合は K_n の値を変更（最適化Ⅱ）して初期値を設定し直してから最適化Ⅰを再度行う。以上の作業を目的関数の最小化がなされるまで繰り返す。

５．室内模型斜面への適用例 室内模型斜面としては、斜面の変形が落石挙動に及ぼす影響を観察するために、コンクリート斜面とまさ土斜面の２種類をそれぞれ凹凸の無いように作成した。作成した斜面を 40° の傾斜で設置し、落石供試体を落下させ、それぞれの斜面における落石挙動を比較する。落石供試体は $4 \times 4 \times 6 \text{ cm}$ の直方体の石を用いている。ここでは紙面の都合上まさ土斜面の場合を取り上げる。また、解析を行う際には、斜面を 40° に傾斜させた剛体壁でモデル化し、供試体は複数の円形要素を連結させて多角形を形成する要素でモデル化した。

ここでは室内模型斜面に適用した結果のみを示す。表－１に逆解析結果を示す。また、図－３は落石実験により得られた落石挙動と逆解析値のもとでのそれとの比較図である。図中の○が模型斜面における落石現象を示している。落石の軌跡は $1 / 30$ 秒間隔で求めたものであり、正確な２次元の軌跡で落下したものである。また、●が逆解析値のもとでの落石挙動である。この図から逆解析値のもとでの落石挙動は、模型斜面で実際に起きた現象とおおむね一致していることが分かる。したがって、逆解析により得られた値は妥当なものであると判断することができる。

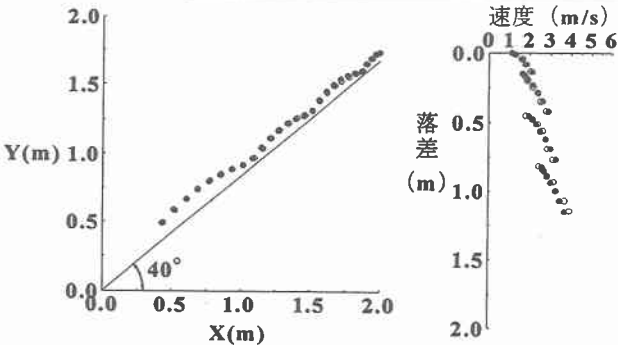
まさ土斜面における落石現象は、落石供試体が斜面に衝突する際、斜面に変形が生じる。そのため、コンクリート斜面における場合と比較して、衝突時の落石運動エネルギーの減少割合が大きくなる。本研究では解析上斜面を剛体壁でモデル化して落石シミュレーションを行っているため、解析での落石現象においては斜面のモデル自体に変形は生じない。しかし、模型斜面における変形が落石挙動に与える影響を取り込んだ上でのパラメータが同定されているため、模型斜面での現象をシミュレートすることができていると言える。

６．結論 本研究では、斜面の変形を考慮した落石問題における材料特性の逆解析を行った。その結果、逆解析値のもとでの落石挙動は模型斜面におけるそれを再現するものであることが確認された。今後は現場での適用事例を検討しなければならない。

《参考文献》 １）山上拓男他（１９９２）：非円形すべり面に沿う間隙水圧分布の逆解析、土質工学会四国支部技術・研究発表論文集。 ２）大町達夫,荒井靖博（１９８６）：個別要素法で用いる要素定数の決め方について、構造工学論文集,Vol32A.

表－１ 逆解析結果

	逆解析値
垂直方向バネ定数 K_n (N/m)	3.13E+05
せん断方向バネ定数 K_s (N/m)	3.63E+03
垂直方向減衰定数 η_n (N・sec /m)	1.31E+02
せん断方向減衰定数 η_s (N・sec /m)	6.11E+01
摩擦係数 μ	0.1
Δt	1.0E－05
目的関数	2.03E－03
反復回数（最適化Ⅱ）	46



図－３ 落石軌跡および落差－速度関係の比較図