

15. 落石挙動の数値シミュレーションに関する研究

A study on numerical simulation of rockfall

(株)基礎建設コンサルタント ○能野一美
徳島大学工学部 山上拓男

1. はじめに 落石防護工の設計を合理的に行わんとすれば、まず落石の運動を的確に予測する手法を確立しなければならない。このとき、多種多様な形状と性質を有する斜面や様々な落石の形状と寸法を考慮に入れた落石運動の予測が不可欠である。著者らはこの目的のため、DEM(個別要素法)を前提に、与えられた斜面に対して落石シミュレーションのパラメータを逆解析手法に基づき同定する方法¹⁾を確立している。この方法は、地山の変形や立木と落石の衝突の影響を反映したパラメータの値を与える。したがって実現象を忠実に再現する落石運動をシミュレートする事が可能となる。本稿では、提案法を実斜面に適用した事例を紹介する。

2. 個別要素法の応用 DEMを用いて落石をシミュレートする際には斜面と落石をモデル化する必要がある。本手法では、斜面を剛体壁で、また落石を複合要素でモデル化している。複合要素とは、複数の円形要素を剛体的に結合させた要素のことを言う。落石を複合要素で表現した場合、接触判定と接触力の計算は落石を構成する要素間では行わず、落石の各要素と斜面間でのみ従来の円形要素と同じ方式で行う。したがって、落石の運動を支配する材料特性は、単体の円形要素を扱う場合と同様、図-1に示す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 、せん断方向減衰定数 η_s 、及び摩擦係数 μ となる。これら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が表現できる。こうして筆者らは、上述したように落石の軌跡をもとにこれらパラメータを逆解析的に同定する方法論を打ち立てている。逆解析は、与えられた落石の飛跡を最も良く再現するパラメータを最適化問題の解として探索するものである。その際、落石の飛跡は経過時間が既知の場合と未知の場合何れでも構わない。ただし、摩擦係数 μ は逆解析すべきパラメータの中には含まれていない。その理由の説明は当日に譲る。

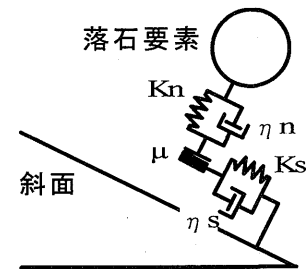


図-1 個別要素法接触モデル

3. パラメータの同定法 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、逆解析に供すべき落石の軌跡の獲得法について述べねばならない。これには2つの状況を想定している。すなわち、1つは、落石の危険性のある斜面において落石実験を実施し、落石の軌跡を求める場合。いま1つは、あえて落石実験を行わなくとも、落石災害が発生した際の事後調査により、落石の飛跡が判明している場合。いずれにせよ、こうして得られた軌跡に基づき逆解析が実施される。

著者らが提案している逆解析法のフローを図-2に示した。詳細については、当日説明するが、逆解析法は、ニューラルネットワークの活用による初期値の設定方法と、山上ら²⁾が提案している2重最適化法を採用しているところに特徴を有している。2重最適化法とは、初期値の値が解析結果に大きく影響するという事実から、逆解析を行う際に設定する初期値をも目的

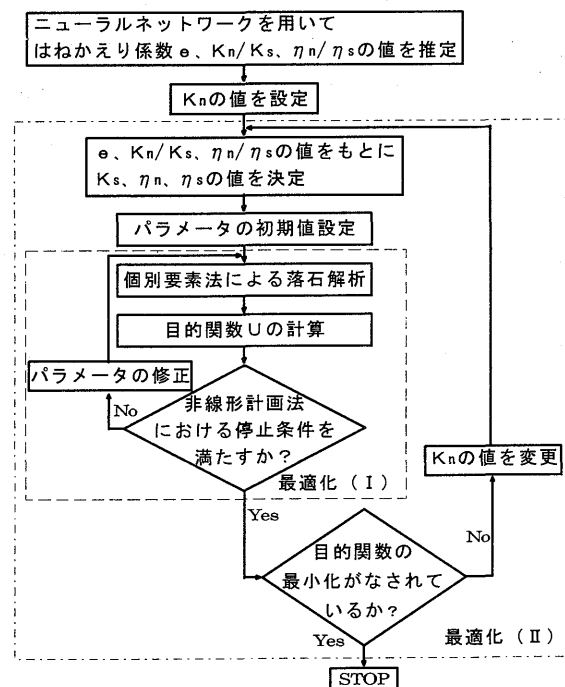


図-2 逆解析フロー

関数の関数であるとみなし、より小さな目的関数が得られるような初期値の値を自動的に探索するループを新たに設けて、二重の最適化問題を構築するという手法である。

4. 実斜面への適用例 本研究で提案する手法を検証するために、実斜面における落石現象に適用した事例を示す。

図-3において○印で示す落石の軌跡は、落石の運動機構の解明と落石防止柵の安全性確認を目的として、日本道路公団東京支社と㈱建設企画コンサルタントによって実施された落石実験結果の一部³⁾である。

図に示す落石(約900kg, 直径約70cm)の軌跡(○印)は、4次元写真測量の概念に基づき0.22秒間隔で求められたものである。当然のことではあるが落石は3次元的な挙動を示しており、実験では(X, Y, Z)の座標が求められている。ただし、落石平面図によれば、落下方向に対する直交方向には、運動偏倚は5m以内に収まっている。測定精度は(X, Y, Z)が0.1m, 時間は0.02秒の誤差以内とされている。図中の○印で表された落石の軌跡は、こうした落石挙動を、鉛直断面上に写影して得られたものである。

この落石の軌跡を観測値として採用し逆解析を行った。なお、解析に際しては、直径24cmの円形要素を6個連結させた要素で落石をモデル化している。

表-1に逆解析結果をまとめた。また図-3に逆解析を行った結果を実験結果と比較した。図中の●印が逆解析値のもとでの落石挙動を示している。

結果は実現象を精度良く再現していることが分かる。このように、提案法は実在する斜面に適用することも十分可能であることが確かめられている。

5. むすび 提案法を検証すべく実斜面上での現地実験に本手法を適用したところ、得られた結果は十分満足できるものであった。したがってこの方法によれば、斜面の変形は無論のこと、斜面上に繁茂する植生や立木の影響をも的確に取り込んだパラメータを推定し得ると考えられる。このことは提案法が適切なエネルギー評価に基づく落石防護工の設計に資することを意味し、その意義は少なくないであろう。

今後、この手法の機能を更に発展させる上で、非均質場のパラメータ逆解析法を手掛けなければならない。実のところ、この点についても筆者らはほぼその骨格を仕上げている⁴⁾。また、あえて実験を行わなくとも、なんらかの背景で落石の軌跡が判明している場合、提案法は等しく適用可能である。この間の事情についても講演当日実例を挙げて紹介したい。

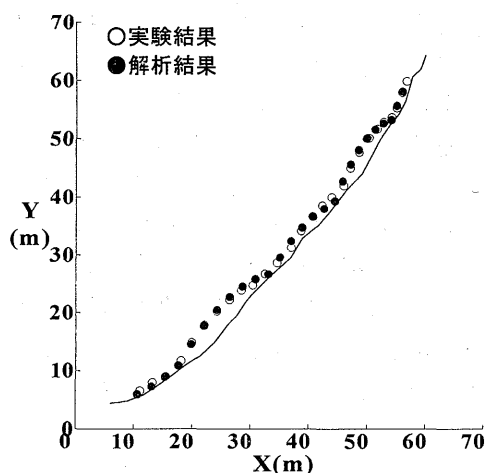


図-3 落石軌跡の比較図

表-1 逆解析結果

	逆解析値
垂直方向バネ定数 K_n (N/m)	1.54E+07
せん断方向バネ定数 K_s (N/m)	2.22E+05
垂直方向減衰定数 η_n (N·sec/m)	1.24E+05
せん断方向減衰定数 η_s (N·sec/m)	9.19E+04
摩擦係数 μ	0.1
タイムステップ Δt (sec)	1.0E-05
目的関数	9.82
反復回数(最適化II)	35

—参考文献— 1) 能野, 山上, 蔭: 斜面の変形を考慮した落石挙動の数値シミュレーションに関する研究, 地すべりと斜面崩壊に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会四国支部, pp.145-150, 2000 2) 山上, 植田, 西田: すべり面に沿う間隙水圧分布の逆解析, 第34回土質工学シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.151-158, 1989 3) 金沢, 田中米, 田中総太郎: 4次元写真測量の概念と35mm映画, 写真測量, Vol.12, No.4, pp.35-41, 1973 4) 能野, 山上, 蔭: 落石挙動の数値シミュレーションに関する研究, 第36回地盤工学研究発表講演集, 地盤工学会, pp.2509-2510, 2001