

（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

1. はじめに 落石防護工を設計せんとする場合、落石の落下速度・跳躍量・落下位置等の設計条件を推定する必要がある。これらを推定する方法としては経験的手法によるものと数値シミュレーションによるものがあるが、数値シミュレーションにより実現現象を忠実に再現し得るならば、後者の方が合理的であることは言うまでもない。

著者らは、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落石の飛跡データから逆解析手法に基づき同定する方法を確立している¹⁾。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。

落石の飛跡データから DEM に現れるパラメータを同定するため、落石軌跡をどのように表現するか、そしてまたそれをいかに入手するか、は大変重要な課題と言わねばならない。本項では、自然現象としての落石災害が発生した場合の事後調査により、落石が残した痕跡をもとに推定された飛跡を用いて、DEM パラメータの値を同定する方法を紹介する。

2. DEM の応用 DEM を用いて落石をシミュレートする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めていない。その理由の説明は当日に譲る。

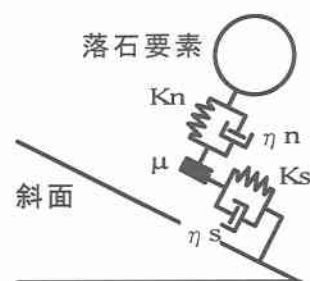


図-1 DEM 接触モデル

3. 落石運動の推定法 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⁾ が提案している二重最適化法を採用しているところに特徴を有している。二重最適化法とは、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関数の変数であるとみなし、より小さな目的関数が得られるような

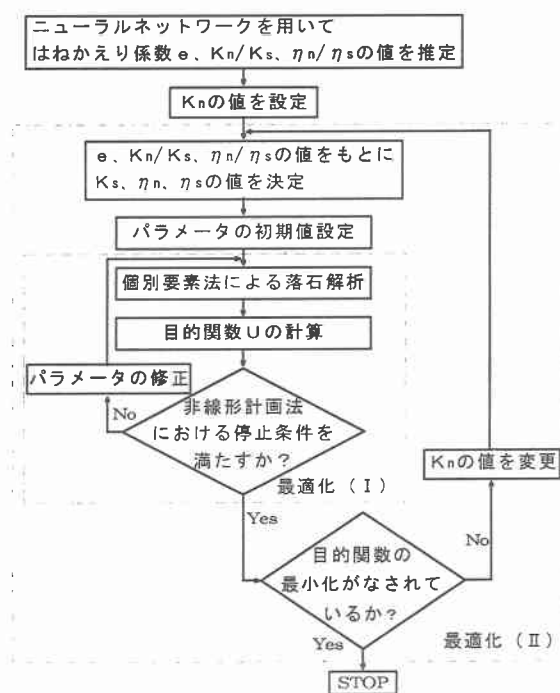


図-2 逆解析フロー

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。逆解析に供すべき落石の軌跡の獲得法については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。本項では後者の場合に提案法を適用した事例を示す。この場合の落石軌跡を模式的に図-3に示した。

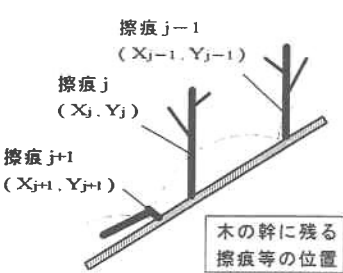


図-3 落石軌跡の定義

4. 落石災害への適用例 適用した事例は、平成2年10月8日午前10時頃、一般国道11号の徳島県鳴門市北灘町鳥ヶ丸において発生した落石災害³⁾である。落石防止柵のコンクリート天端より比高差63m(斜面長約100m)上方の民地斜面に位置する崖の一部岩塊が崩落し、落石となって傾斜約40°の溝状地形をなす自然斜面上を周辺の雑木、松等に当たりながら落下し、落石防護柵(H=3m)を破り、高松方面に向かって進行中の観光バスを直撃したものである。バスに衝突した落石は重量1.43tonの方塊状岩塊であり、そのほか斜面内で停止し、位置が知られたもの5個、合計6個の岩石の落下が確認されている。参考文献3)には、それらの落石痕跡断面図が示されている。

表-1 逆解析結果

	逆解析値
垂直方向バネ定数 K_n (N/m)	3.65E+06
せん断方向バネ定数 K_s (N/m)	1.82E+05
垂直方向減衰定数 η_n (N・sec/m)	8.11E+04
せん断方向減衰定数 η_s (N・sec/m)	6.41E+04
摩擦係数 μ	0.2
タイムステップ Δt (sec)	1.0E-05

落石痕跡断面図には、16箇所の擦痕あるいは衝突位置等が記されている。前述したように、確認された落石は6個あるため、どれがどこに当たったのかということは定かではない。従って、単純に、バスに衝突した落石が断面図に示された16箇所を通過したと仮定し、逆解析時の観測値とした。さらに、コンクリートの天端、落石とバスが衝突した位置、およびその2点間における放物運動の頂点(推定)の位置も観測値として採用する。以上合計19箇所が図-4において×印で示されている。

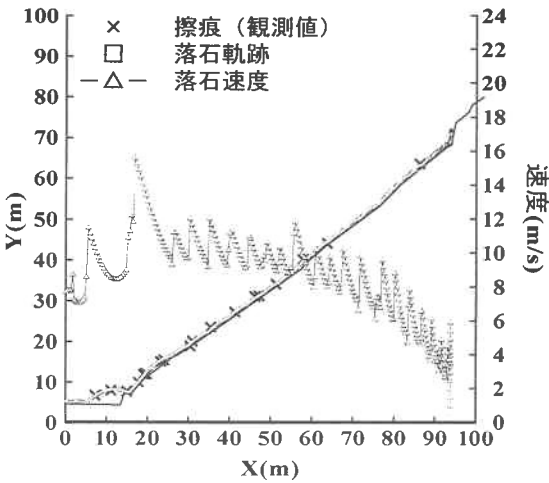


図-4 落石災害時の擦痕(観測値)とシミュレーション結果

上記の痕跡を観測値として逆解析を実施した。なお、解析に際しては、直径42.5cmの円形要素を4個縦横均等に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る。また、図-4に同定されたパラメータのもとでの落石挙動を示す。解析における落石が全ての観測値を通過していることが分かる。正解は“神のみぞ知る”であるが、きわめて妥当な解と認識している。

5. むすび 本研究で得られた結果のように、落石災害が発生したときどのように落石が落下したのかが推定できれば、災害の原因究明や、その後の災害防止対策に威力を発揮するのは明らかである。

【参考文献】1) 能野, 山上: 落石運動解析に要する個別要素法パラメータの同定法, 土木学会論文集, No.701/Ⅲ-58, pp.409-420, 2002. 2) 山上他: 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, pp.63-64, 1992. 3) 山上拓男: 四国における自然災害—土砂災害—, 土と基礎, Vol.39, No.9, pp.50-55, 1991.