

落石運動解析に要する個別要素法 パラメータの同定法

能野一美¹・山上拓男²

¹正会員 工修(株)基礎建設コンサルタント 技術部(〒779-3120 徳島市国府町南岩延883番地9)

²正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地)

個別要素法を前提に、斜面ごとの落石運動を支配するパラメータを的確に評価する手法が提案されている。その骨子は当該斜面で落石実験を行い、得られた軌跡を基に、逆問題の解析から運動パラメータを同定しようとするものである。ただし敢えて実験を行わなくとも、落石の軌跡が判明している場合、やはり本手法が適用できる。逆問題の定式化に当り、初期値の設定にニューラルネットワークが活用されている。また初期値をも目的関数の変数とみなして二重最適値問題が構築されている。提案法を検証すべく、模型実験並びに現場実験に適用したところ、十分満足できる結果が得られた。この方法によれば、落石衝突時の地山の變形、立木と落石の衝突、あるいは植生の影響などが反映されたパラメータを同定し得る。

Key Words : *rockfall, distinct element method, back analysis, slope deformation, parameter identification, laboratory and in-situ tests*

1. はじめに

落石は、数ある道路災害の中でも特に発生する頻度が高く、時には人命をも脅かす危険物である。急峻な斜面沿いに建設されている山岳道路を多く抱えている我が国においては、落石対策は道路防災上の重要な課題の一つとなっている。

現状では、落石防護工の設計において重要な設計条件である落石の落下速度・跳躍量・落下位置等の推定は、落石対策便覧¹⁾などの経験式に頼るのが一般的である。しかし、経験式は文字通り過去の経験やいくつかの実験結果に基づくものであるため、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を予測しようとする場合、経験式では十分には対応できない。

本研究の目的は、斜面上における落石の運動シミュレーションに要するパラメータ(物性値)を定める合理的かつ汎用的方法を開発することである。落石運動のシミュレーション自体はすでにモンテカルロ法、DEM(個別要素法)、あるいはDDA(不連続變形

法)などの活用による高度に洗練された手法が各所で提案されている。しかしながら、これら既往の方法はいずれも、斜面毎に異なるであろう落石運動を支配するパラメータの決定法が確立されていないという共通した難点を有している。落石の運動には、落石の形状、斜面の形状、地山構成材料の特性、植生の有り様、等々が関係し、際立って複雑であるため、実際、ある特定の斜面に対して落石運動を支配するパラメータを適切に決定することは難しい問題である。とりわけ、落石が斜面地山に衝突する際の地山の變形や植生の存在を考慮したパラメータの決定は困難と言わねばならない。

本研究においては、DEM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すなわち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 を逆解析手法に基づき同定する方法を確立する。この方法は、地山の變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。

DEMを適用するに当っては、実際にはいま一つのパラメータすなわち摩擦係数 μ が必要である。しかし本文で展開する逆解析手法においては、この摩擦係数 μ は直接的に逆解析すべきパラメータ群(上記4個)の中には含めていない。理由の第一は、摩擦係数の相違が余り大きくは結果に影響しないこと；第二の理由は、逆解析すべきパラメータはその数が少なければ少ない程安定した、精度の良い解が求めやすいこと；第三の理由は、本文で提案する手法をベースに、必要に応じて、十分な精度の摩擦係数を推定する方法論を別途に構築し得ること、などである。こうした背景から、本文では μ の値は前もって与えられる既知量として扱っている。なお、詳しくは本文11章を参照されたい。

研究の骨子は、当該斜面において落石実験を行い、得られた落石の軌跡(この軌跡には地山の変形や立木の存在の影響が取り込まれている事実に注意)を基に、非線型最適値問題としての逆解析問題を構築し、上の四つのパラメータを同定しようとするものである。ただし、敢えて落石実験を行わなくとも、落石災害発生時の調査結果として軌跡が判明している場合、やはり本手法が適用可能であることは言うまでもない。

2. 個別要素法の応用

DEMは粒状体を対象とした解析法としてP.A.Cundall²⁾により提案された。DEMは、互いに不連続な要素の集合体に対して個々の要素が運動方程式を満足し、要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件として、集合体の動力学的挙動を数値解析する手法であり、各分野において有用性が確認されている。

DEMで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。ここではそれらをモデル化する方法について説明する。

まず、斜面をモデル化する方法には、斜面を粒状集合体で形成する方法と、剛体壁でモデル化する方法の2通りが考えられる。前者の方法で落石のシミュレーションを行えば、斜面の変形を解析上で直接的に再現できる。しかしこの場合、斜面を構成する要素の数が多くなればなるほど、解析に要する計算時間が飛躍的に増大するという不都合が生じる。したがって、規模が大きいモデルを扱う場合現時点ではこの方法は実用的でない。後者の方法は、接触判定を落石要素と斜面間のみで行えばよく、解析を行

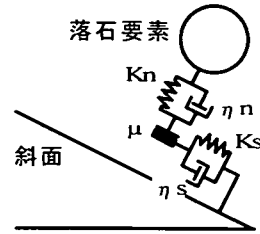


図-1 個別要素法接触モデル

う上では扱いやすい方法である。しかし、モデル化した斜面には解析上変形が生じないため、実際の斜面で生じる斜面変形が落石挙動に与える影響を直接的に取りこむことは出来ない。本研究では、実用性を重んじ、扱いやすい後者の方法を用いることにした。そしてこの手法で、なおかつ落石衝突時の斜面の変形や立木の存在の影響を、間接的とは言え、考慮し得る解法としての逆解析法を提案する。

次に、落石をモデル化する方法について述べる。DEMで解析を行う場合、接触判定が容易であるという理由から、円形要素が用いられることが多い。しかし、円形要素では実際の落石等の複雑な形状の物体を充分に表現することはできない。したがって本研究では、岩下・福岡³⁾が提案しているペア要素という概念に注目して落石のモデル化を行った。ペア要素の原理は、もとになる要素には従来の円形要素をそのまま使い、複数の円形要素を剛体的に結合させ、その並進運動と回転運動を追跡するというものである。要素の重なりや粒径に変化を持たせることにより、いろいろな形状をした要素の表現が可能となる。岩下らは扁平な粒子が堆積する土層を解析で表現するため、敢えて要素の連結を二つの要素のみで行っている。こうした理由から連結した要素をペア要素と呼んでいる。

本研究では、上記の原理を用い、複数の円形要素を連結させて多角形としたモデル(以後、複合要素と呼ぶ)で落石を表現し、その落下シミュレーションを行った。複合要素を解析に用いることで、多角形特有の複雑な落下現象を解析上で再現できる。

落石を複合要素で表現した場合でも、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に示すように、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。これらパラメータの値を適切に与えることができれば、実

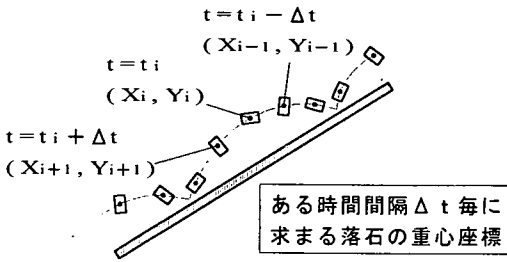


図-2 落石軌跡の定義 (時間既知の場合)

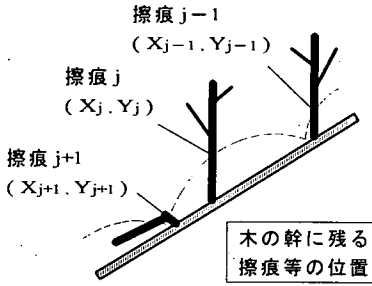


図-3 落石軌跡の定義 (時間不明の場合)

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。そこで落石実験から求められる落石の軌跡を基にこれらパラメータの値を同定する方法を提案したい。

3. 落石軌跡の表現法

落石の飛跡データから DEM に現れるパラメータを精度良く逆解析する手法を構築するのが本研究のねらいである。したがって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。

まず落石軌跡の獲得の仕方については2通りの方法を想定している。一つは当該斜面において落石実験を実施し、その様子をデジタルビデオカメラで撮影する方法；他の一つ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基に飛跡を明らかにする方法。これら二つの方法の決定的な相違点は、第一の方法には落石開始後の経過時間が入り得るが、第二の方法では時間を一切取り込めないことである。図-2は落石落下位置の時間推移が明らかな場合の模式図であって、個々の落石位置は重心の座標で表すものとする。また図-3には事後調査により単に擦痕等の痕跡のみが明らかとなる状況を模式的に示した。

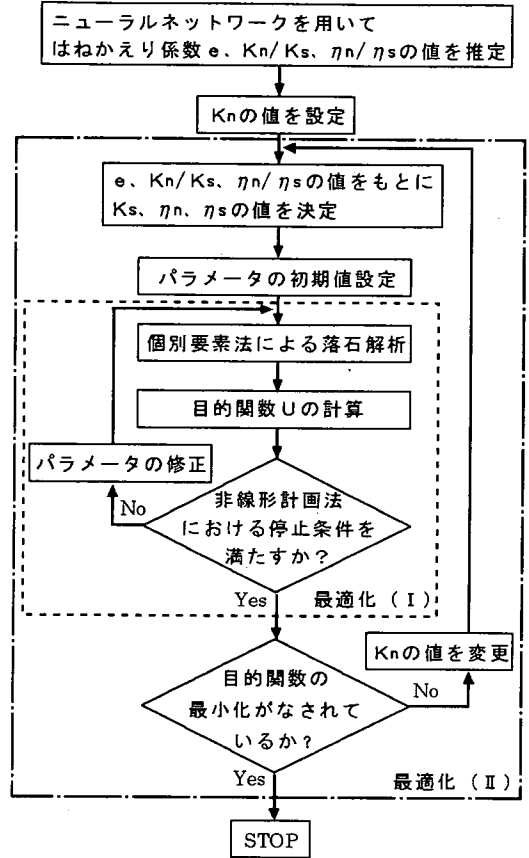


図-4 逆解析フロー

4. パラメータの同定法

提案法の基本概念は、式(1)もしくは式(2)に示す目的関数を最小化(実は零と)するようなパラメータの組 $(K_n, K_s, \eta_n, \eta_s)$ を見つけ出すことである。ただし、式(1)は落石落下の経路のみならず経過時間が既知の場合、式(2)は時間が不明の場合にそれぞれ用いるべき目的関数である：

時間既知の場合

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

ここに、 $X_{ob,i}, Y_{ob,i}$ は落石実験により求まる時刻 i における落石重心座標； $X_{cal,i}, Y_{cal,i}$ 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。また、 n は測点数である。

時間不明の場合

$$U = \sum_{j=1}^m (Y_{ob,j} - Y_{cal,j})^2 \quad (2)$$

ここに、 $Y_{ob,j}$ は測点 j における観測による落石重心の Y 座標値； $Y_{cal,j}$ は測点 j の X 座標に対応する計算による落石重心の Y 座標値。 m は測点数である。

目的関数 U を最小とするパラメータを求める問題は最適値問題とか非線型計画問題と呼ばれ、色々な方法が用意されている。そこで筆者らは当初、修正 Marquardt 法⁴⁾のもとに上の四つのパラメータを一挙に逆解析する事を試みた。ところが目下の問題においては、同定すべきパラメータの数が4個というのは多すぎると見えて、単純な解析法では十分な収束解は求められない事が判明した。そこで種々試行錯誤の後、図-4にそのフローチャートを示す解法を採れば、安定的に収束解の得られる事が明らかとなった。以下、図-4のフローチャートを概説する。

まず始めに、跳ね返り係数 e の値、及び K_n と K_s の比 (K_n/K_s) の値が解析における落石の挙動を大きく支配している事実を指摘しなければならない。ここに、跳ね返り係数とは、大町・荒井⁵⁾により理論的に導かれているもので、次式のように K_n 、 η_n 、及び落石の質量 m で表される。

$$e = \exp\left(-\frac{\eta_n \pi}{\sqrt{4K_n m - \eta_n^2}}\right) \quad (3)$$

すなわち、個々のパラメータの値が異なっても、跳ね返り係数 e と K_n/K_s の値が同じであれば、落石の運動経路はほぼ同じとなる事が経験的に知られた。

そこで先ず第一段階として、落石実験で与えられる落石の挙動（飛跡）を再現し得る“ e と K_n/K_s の値”を推定することから始める。この推定にはニューラルネットワーク^{6), 7)}を用いる。この目的のため構築したネットワークを図-5に示した。ネットワークは落石の軌跡を入力すると、跳ね返り係数 $e, K_n/K_s$ 、ならびに η_n と η_s の比 (η_n/η_s) の値を出力するように構築した。

そして任意に設定した DEM のパラメータのもとで

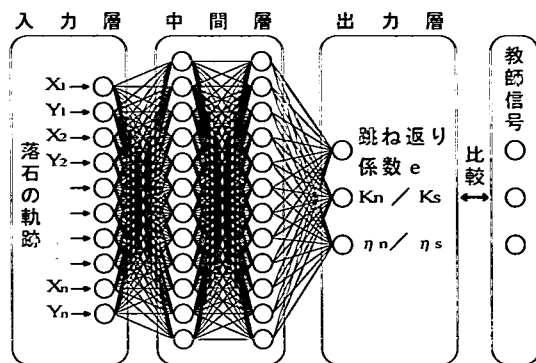


図-5 ネットワークの構築

順解析、つまり落石の落下解析を行った結果得られる落石の軌跡を「学習データ」とする。ここに、順解析は多数のパラメータの組（本文の事例ではいずれも15個の組）の各々に対して、実験（実測）時の初期条件と同じ初期条件の下に行った。また、そのとき設定したパラメータの組み合わせで定まる跳ね返り係数 e 、 K_n/K_s 、及び η_n/η_s の値を「教師データ」とする。こうして学習し終えたネットワークに落石実験から求まる落石の軌跡を入力すれば、跳ね返り係数 e 、 K_n/K_s 、及び η_n/η_s の値が推定できる。なお、ニューラルネットワークのプログラムは徳島大学の澤田⁸⁾が開発したものを使用している。

いま、 e 、 K_n/K_s 、及び η_n/η_s の値が推定されたものとしよう。この状態で、 K_n の値を任意に仮定すると、仮定された K_n と、推定されている e （式(3)）、 K_n/K_s 、及び η_n/η_s の値から、 K_n 以外のパラメータの値が決定できる。図-4の最初の三つのブロックがここまでの説明部分に相当する。ここに、 K_n としては 1×10^5 (N/m) と 1×10^7 (N/m) の間の任意の値を採用すれば十分である。

以上により定められた一組のパラメータを最適値問題の初期値として、まず落石のシミュレーションを行い、解析上の落石の軌跡を求める。そしてこの落石の軌跡と、別途落石実験により求められている落石の軌跡から式(1)ないし式(2)の目的関数を計算する。次いで目的関数が非線形計画法における停止条件を満たしているか否かの判定を行う。この手順を、パラメータの値を逐次修正しつつ、停止条件が満たされるまで繰り返す。停止条件が満たされたときのパラメータの値は目下の初期値の下での最適解となる。このプロセスが図-4中に点線で囲まれたループ(最適化I)で行われる。なお、この間の最適化問題の解法にはやはり修正 Marquardt 法を

用いている。

落石問題に関わらず、一般にこの種の最適値問題を解く場合、初期値の値が解析結果に大きく影響することが知られている。つまり、得られた最適解はしばしば局所的なそれであって、大域解である保証はない。そのため、幾通りかの初期値のもとで解析を行い、その結果最も小さい目的関数を与える解を大域的最適解として採用するのが普通である。

山上ら⁹⁾はこの問題点を改善するために、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ことを提案している。

山上らはこの手法を、構築された最適化問題の構造から、「二重最適化法」と名付けている。この方法は、設計者が初期値を設定する都度逆解析を繰り返し行なわねばならないという手間を解消する。また、人間が試行錯誤しながら初期値を設定し、最適解を推定するには自ずと限界があるのに対して、初期値の設定をも最適化のループに組み込むことから高い確度で最適解を求め得ることが期待できる。そこで、本研究においても、この二重最適化問題を構築し、個別要素法のパラメータを同定した。このプロセスが図-4中の一点破線で囲まれたループ(最適化(II))で実行される。なお、初期値の値を探索するために構築された最適化問題(最適化(II))を解くのに Nelder・Mead のシンプレックス法¹⁰⁾を採用している。

5. 室内模型実験

本研究で提案する手法を検証するために、室内模型実験を行って落石の軌跡を求め、提案する手法に適用した。

模型斜面として、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° に傾斜させたのち落石供試体を落下させる。落石供試体としては $4 \times 4 \times 6$ cm (258.4 g)の直方体の石を用いている。

模型実験の様子は1台のデジタルビデオカメラで撮影している。落石の軌跡は撮影された画像からデジタルタイザを用いて求めている。

落石供試体の落下方法としては、任意の位置から斜面上に自由落下させる方法と、落下高さを確保せず地面に接地した状態から転がらせて落とす方法の

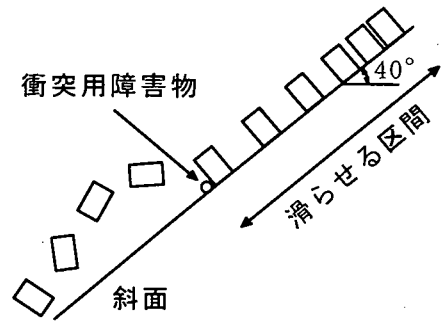


図-6 落石供試体落下方法

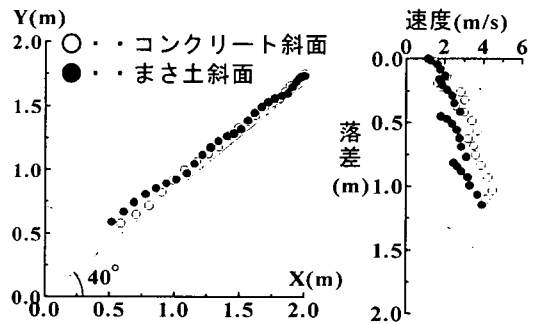


図-7 落石軌跡および落差-速度関係の比較図

二つが考えられる。しかし、これらの方法で模型実験を試みたところ、落石供試体が正確な2次元の軌跡で落下する可能性は極めて低かった。無論、ここの解析理論は2次元のそれである。

そこで、図-6に示すように、落石供試体をある区間滑らせ、障害物に衝突させて跳躍落下させる方法を採用した。滑らせる区間には、斜面上にシートを貼りその上にガイドを設けて、供試体が着実に滑り落ちるよう細工している。実験においては滑らせる距離を変化させていくつかの軌跡を求めた。そして、正確な2次元の軌跡であると判断されたもののみを逆解析時の観測値に用いた。ここで正確な2次元の軌跡とは、図-6に示すように供試体の一つの面が終始カメラ側に向いており、かつ斜面上を真っ直ぐに落下する現象を意味する。

ここで、実験の結果の一部を示し、コンクリート斜面とまさ土斜面とでの落石現象の違いを考察する。

図-7に落石供試体をそれぞれの斜面に落下させたときの軌跡および落差-速度関係の比較図を示した。二つの斜面において供試体が障害物に衝突する前に滑らせる距離は同じ(50 cm)としているが、障害物に衝突した直後の跳躍速度(初速)が実験ご

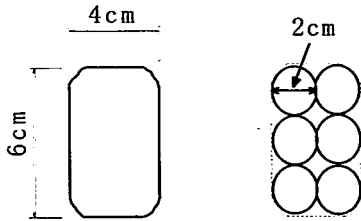


図-8 落石供試体のモデル化

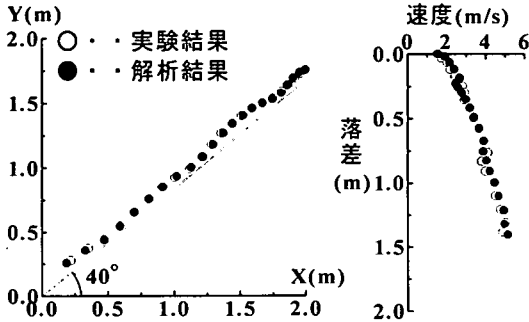


図-9 コンクリート斜面へ適用した場合の比較図

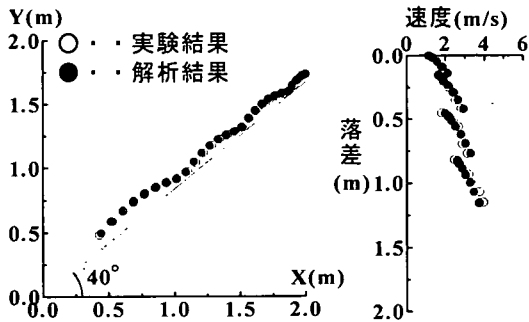


図-10 まさ土斜面へ適用した場合の比較図

とに微妙に異なり得るため、比較に当っては初速の同じものを取り上げた。図中の○はコンクリート斜面における落石の軌跡を示しており、●がまさ土斜面におけるそれを示している。

落石供試体の運動形態は、多角形特有の複雑な挙動を示しながら落下しており、供試体と斜面の衝突の仕方によっては急に跳ね上がるという現象も見られた。また、コンクリート斜面とまさ土斜面における落差-速度関係に明確な差が現れていることが分かる。この落差-速度関係の差異には、落石供試体と斜面とが衝突する時に生じる斜面変形が影響し

表-1 逆解析結果

斜面材質	逆解析値	
	コンクリート	まさ土
垂直方向バネ定数 K_n (N/m)	1.66E+06	3.13E+05
せん断方向バネ定数 K_s (N/m)	6.69E+04	3.63E+03
垂直方向減衰定数 η_n (N·sec/m)	2.23E+02	1.31E+02
せん断方向減衰定数 η_s (N·sec/m)	7.47E+01	6.11E+01
摩擦係数 μ	0.1	0.1
タイムステップ Δt (sec)	1.0E-05	1.0E-05
目的関数	4.20E-03	2.03E-03
反復回数(最適化II)	39	46

ていると思われる。実験後のまさ土斜面は、明らかに落石供試体が斜面に食い込んだような変形が確認された。この変形が落石供試体の運動エネルギーを減少させ、コンクリート斜面の場合と比較して、落差-速度関係に明確な差となって現れたものと推察される。

6. 室内模型斜面への適用例—経過時間既知の場合—

ここでは、コンクリート斜面とまさ土斜面における落石の軌跡を観測値とした場合の提案法の適用結果を示す。このケースは落石の落下経路と、落下開始から各観測点に至るまでの経過時間が明らかな事例である。よって逆解析は式(1)に基づいて行われる。解析に際しては、斜面を40°に傾斜させた剛体壁でモデル化し、供試体は直径2cmの円形要素を6個連結させた要素で4×4×6cmの直方体石をモデル化した(図-8)。

表-1に逆解析結果を示す。

図-9に、コンクリート斜面における落石の軌跡を用いて逆解析を行った結果を実験結果と比較した。図-10はまさ土斜面における場合である。どちらの図とも、図中の○が模型斜面における落石実験結果を、●が逆解析されたパラメータのもとの解析結果を示している。ここに、図-9、図-10における各点は落下開始後1/30秒間隔で測定ないし計算された点をプロットしたものである。これら二つの図から明らかなように、逆解析値のもとの落石挙動は、模型斜面で実際に生じた現象とおおむね一致している。

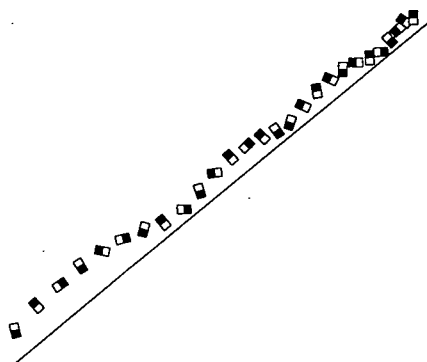


図-1 1 模型実験における落石供試体の様子

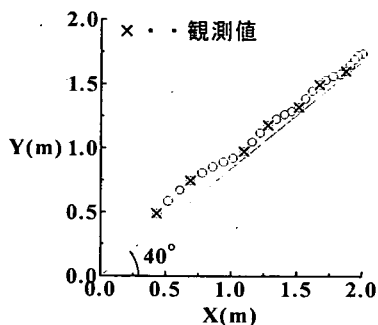


図-1 3 観測値（経過時間不明）

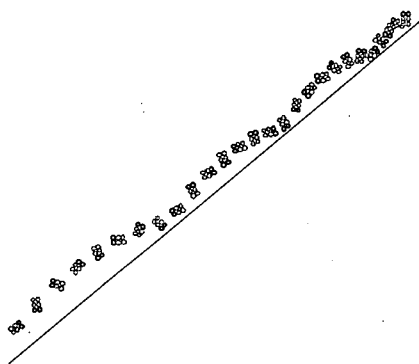


図-1 2 逆解析値のもとでの落石挙動

表-2 逆解析結果

	逆解析値
斜面材質	まさ土
垂直方向バネ定数 K_n (N/m)	1.83E+05
せん断方向バネ定数 K_s (N/m)	1.55E+03
垂直方向減衰定数 η_n (N·sec/m)	9.39E+01
せん断方向減衰定数 η_s (N·sec/m)	3.45E+01
摩擦係数 μ	0.1
タイムステップ Δt (sec)	1.0E-05
目的関数	2.49E-04
反復回数 (最適化II)	46

また、図-1 1 は室内模型実験（まさ土斜面）において落石供試体が落下する様子をスケッチしたものである。図から回転の様子は明らかであろう。図-1 2 は落石をシミュレートした際、複合要素が示した挙動である。図-1 1、1 2 二つの図を比較すると、落石が落下する際に回転している様子も落石シミュレーションで良く再現できていることが分かる。

7. 斜面変形の間接的考慮

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。そのため、解析上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。このとき、コンクリート斜面の場合は、落石と斜面が衝突する際、斜面自体に変形は生じないため、何ら支障なく本手法を適用することができる。

まさ土斜面の場合のように、落石と斜面の衝突時

に斜面に変形が生じる場合はどうであろうか。実はこの場合でも、変形の影響が反映された落石軌跡に基づいて逆解析を実施する限り、得られたパラメータは斜面地山の変形特性を取り込んでいると判断して構わないのである。即ち、提案法は間接的に斜面の変形を考慮し得ていると言ってよい。実際、まさ土斜面の結果も十分満足できるものであることは、すでに確認した通りである。

8. 室内模型斜面への適用例—経過時間不明の場合—

ここでは、落石が残した痕跡でしか落石の軌跡が推定できない場合を想定して、提案法を適用した結果を示す。すなわち、経過時間が不明な場合の事例であって、逆解析は式(2)を用いてなされる。

図-1 3 の○印は、図-1 0 と同じ実験結果であって、前述したように 1/30 秒間隔で測定されたまさ土斜面上の落石重心座標位置を表している。これ

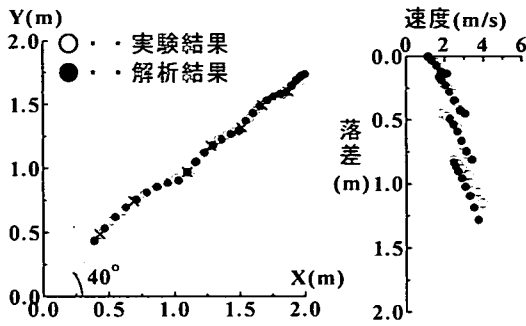


図-14 まさ土斜面へ適用した場合の比較図

らのうち、×印を付した点(7箇所)を落石が残した痕跡であると仮定した。この七つの落石重心座標を逆解析時の観測値として利用する。

解析では、×で表した実験による落石重心点のX座標値($X_{ob,j}$)と、計算による落石重心点のX座標値($X_{cal,j}$)が等しいときの計算によるY座標値($Y_{cal,j}$)を求める。そして、 $X_{ob,j}$ に対応するY座標値($Y_{ob,j}$)と $Y_{cal,j}$ との誤差の二乗和で表される目的関数(式(2))を最小化するようなパラメータの組を同定する。

表-2に逆解析結果を示す。

図-14に、逆解析を行った結果を実験結果と比較した。図中の●が逆解析値のもとでの落石挙動を示している。解析結果と実験結果では、落差-速度関係に少々の誤差が生じているものの、落石の経路はほぼ等しくなっている。

先の経過時間が既知の場合の適用例に比べて、落差-速度関係により大きいずれが生じているのは、言うまでもなく逆解析を行う際の観測値に由来している。先の適用例では、観測値となる落石重心座標を経過時間ごとに求めているため、落石の重心座標が実験値と解析値間で一致すれば、落石が落下し始めてからその地点に到達するまでの経過時間も一致することになる。したがって、落石の軌跡が一致すれば、落差-速度関係も自ずと一致するのである。

ところが、図-14の場合は、落石が残した痕跡(位置)のみを観測値としていて、その位置を通過する落石の速度は分からない。そのため、たとえ落石の経路が実験値と解析値とで一致していても、落石の速度までは一致する保証がないのである。したがって、経過時間既知の場合がそうでない場合に比べてより良い結果を与えるのは当然と言えよう。

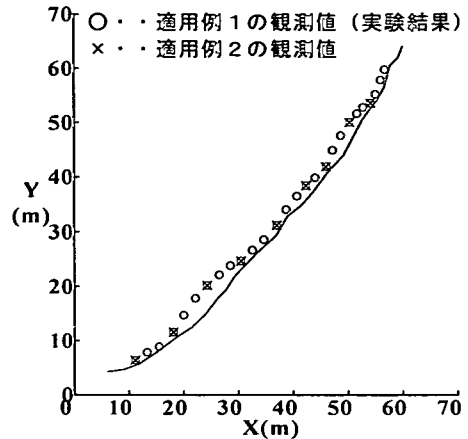


図-15 実斜面における落石の軌跡

9. 実規模斜面への適用例

ここでは、実斜面における落石現象に適用した事例を示す。

図-15に見られる落石の軌跡は、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(株)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である¹¹⁾。

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○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、提案手法の適用を試みた。図中の○で表される0.22秒間隔で求まっている落石の重心座標を観測値とした場合(適用例1)と、図中の×で表す点(9箇所)を落石が残した痕跡(時間不明)であると仮定し、観測値に採用した場合(適用例2)の2通りで逆解析を行った。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(要素の配列は図-8に同じ)で落石をモデル化している。この場合、落石モデルの重量は実験で用いられた落石と同程度の900kgとしているが、形状は実験時のそれと意

表-3 逆解析結果

	逆解析値	
	適用例 1	適用例 2
垂直方向バネ定数 K_n (N/m)	1.54E+07	1.79E+07
せん断方向バネ定数 K_s (N/m)	2.22E+05	2.53E+05
垂直方向減衰定数 η_n (N·sec/m)	1.24E+05	1.38E+05
せん断方向減衰定数 η_s (N·sec/m)	9.19E+04	7.34E+04
摩擦係数 μ	0.1	0.1
タイムステップ Δt (sec)	1.0E-05	1.0E-05
目的関数	9.82	1.96
反復回数 (最適化II)	35	40

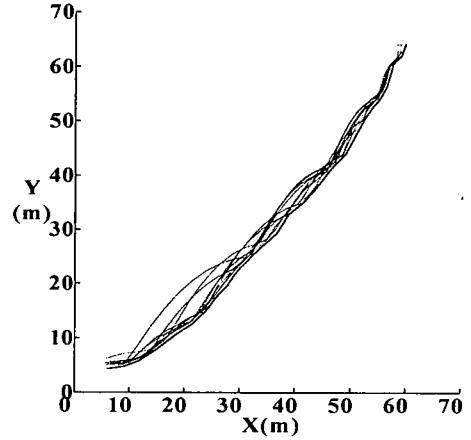


図-17 落石挙動のシミュレーション

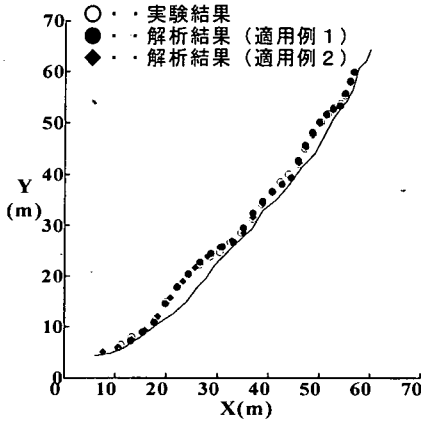


図-16 実斜面に適用した場合の比較図

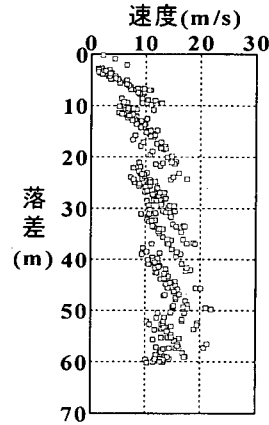


図-18 落差-速度関係

図的に少し異なったものとした。理由は、形状が少々異なっている、重量が余り変わらなければ、ほとんど問題の無い逆解析値の得られることを示すためである。上記したように実験では直径約70cmの石が用いられたとの記述以外、原文¹⁾には石の形状に関する記述は見当たらない。恐らく球形に近い落石が用いられたのであろう。そこで、仮に直径約70cmの球状落石を用いて逆解析したとすれば、以下に示す解析結果に比べて精度が良くなることも、決して悪くはないことを筆者達は経験的に確認している。要するに、重さは重要であるが、落石の形状はそれ程支配的要素ではないという事実を付記しておきたい。

表-3に逆解析結果をまとめた。また図-16に逆解析を行った結果を実験結果と比較した。図中の●が適用例1で同定された逆解析値のもとでの落石

挙動を、◆が適用例2の場合の挙動をそれぞれ示している。また、○は実験結果である。

適用例1、適用例2のいずれの結果においても実現現象を精度良く再現している。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た。

10. 防護工設計への活用法

落石の軌跡が判明しているとき、提案手法に従えば、その軌跡を十分な精度で再現する落石運動パラメータが明らかとなることは、これまでの議論で見てきた通りである。そこで、こうして求められたパラメータを落石防護工の設計にどのように活用すべきかについて、一つの提案を行っておきたい。

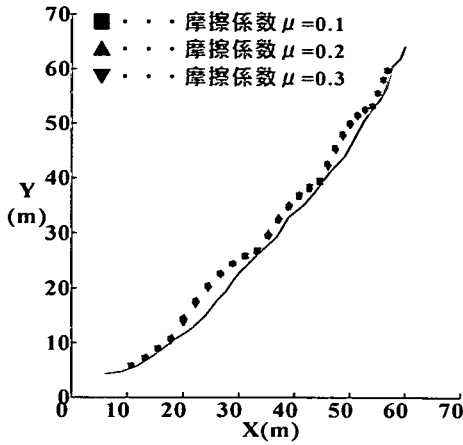


図-1 9 摩擦係数の影響(Case1)

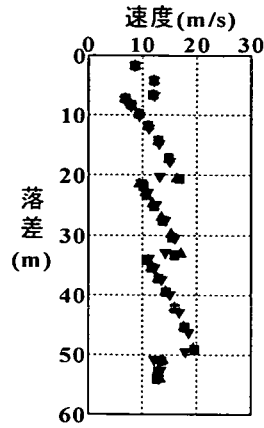


図-2 0 落差-速度関係(Case1)

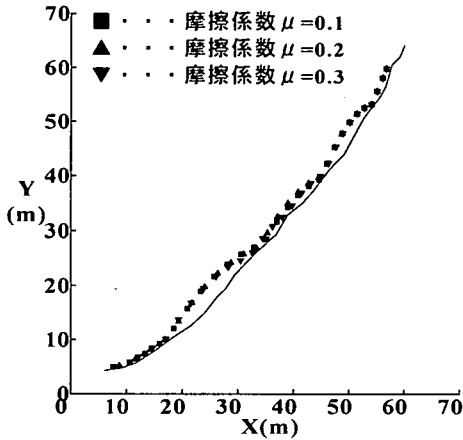


図-2 1 摩擦係数の影響(Case2)

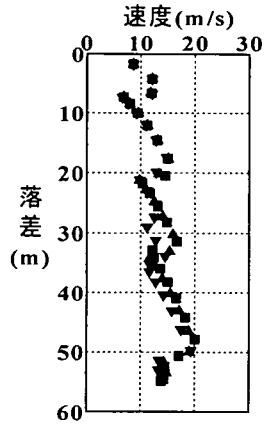


図-2 2 落差-速度関係(Case2)

図-1 7は、図-1 6の実斜面に関して特定された適用例1のパラメータのもとに、落石の開始位置(初期位置)、初速度、あるいは初期回転速度をわずかに変化させた状態で順解析を10通り実施し、得られた結果の軌跡を一括して示したものである。また図-1 8はこのときの落差-速度関係を表している。

防護工の設計に先立ち、先ず逆解析されたパラメータを用いて図-1 7、図-1 8に相当する数多くの順解析を行う。そうして、その中で設計担当技術者が最も適切と判断した結果をターゲットに実構造

物の規模と強度を定めればよい、とするのが筆者らが提案したい本手法の活用法であり設計手順である。この場合、例えば最も大きい跳躍高さの軌跡から防護工の規模(高さ)を、そしてまた防護工設置位置での最高落下速度から防護工の必要強度を定める、等々いろいろな検討の仕方が想定できよう。いずれにせよ、精度良いパラメータが推定できたならば、こうした設計手順を踏むのに大した労力を要するものではない。

表-4 逆解析結果 (摩擦係数 0.1)

	K_n	K_s	η_n	η_s	摩擦係数
Case1	1.54E+07	2.22E+05	1.24E+05	9.19E+04	0.1
Case2	1.79E+07	2.53E+05	1.38E+05	7.34E+04	0.1

表-5 逆解析結果 (摩擦係数 0.2)

	K_n	K_s	η_n	η_s	摩擦係数
Case1	1.81E+07	8.93E+05	1.35E+05	8.45E+04	0.2
Case2	5.25E+07	1.76E+06	2.60E+05	1.46E+05	0.2

表-6 逆解析結果 (摩擦係数 0.3)

	K_n	K_s	η_n	η_s	摩擦係数
Case1	1.05E+07	3.89E+05	1.05E+05	3.91E+04	0.3
Case2	1.40E+07	5.60E+05	1.34E+05	5.19E+04	0.3

1.1. 摩擦係数について

第1章で摩擦係数 μ については前もってその値を指定することとして、逆解析すべきパラメータからは除外すること、及びその理由を述べておいた。実際ここまでに提示してきた解析は全て摩擦係数 $\mu = 0.1$ としている。本章ではそうした理由の裏付けを示しておきたい。

図-19, 図-20は先の図-15で対象とした実斜面の事例について、経過時間既知とした場合に関し、摩擦係数を $\mu = 0.1, 0.2, 0.3$ の3通りに変化させて逆解析した結果を比較したものである。このとき得られた各パラメータの値は表-4~表-6にCase1としてまとめられている。

同様に、図-21, 図-22は同じく図-15×印のみのデータに基づき、経過時間未知として、やはり $\mu = 0.1, 0.2, 0.3$ について逆解析した結果を比較している。この場合の逆解析されたパラメータはCase2として表-4~表-6中にまとめられている。

以上の図, 表から知られるように、個々のパラメータの値は必ずしも等しくはなっていないけれど、それらのトータルな役割の集積としての飛跡や落差-速度関係は摩擦係数の値にさほど影響されていない。この事実が μ を逆解析すべきパラメータから除外した最大の根拠となっている。ただし筆者らは、必要とあらば摩擦係数についても最適な値を特定する手法を既に構築していて、この点に関しては稿を改めて公表したいと考えている。

1.2. むすび

個別要素法の活用のもとに、斜面の変形を考慮した落石運動に要する材料特性の逆解析法を提案し、検討と考察を加えた。提案手法の骨子は、当該斜面において落石実験を行い、得られた飛跡データからその斜面特有のパラメータを特定しようとするものである。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。

提案法を検証すべく室内規模の模型実験や、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、落石衝突時の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。前章で述べた摩擦係数の同定法と共に別の機会に公表の予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧, 2000年6月。
- 2) Cundall, P.A. : A Computer Model for Simulating

- Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, *Symp, ISRM, Nancy, France, Proc*, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 3) 岩下和義, 福岡和男: DEM による偏平粒子の堆積に関する研究, 土木学会第 45 回年次学術講演概要集第 3 部, pp. 898-899, 1990.
 - 4) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, pp. 99-110, 1995.
 - 5) 大町達夫, 荒井靖博: 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, Vol. 32A, pp. 715-723, 1986.
 - 6) 中野馨, 飯沼一元, ニューロンネットグループ+桐谷滋: 入門と実習ニューロコンピュータ, 技術評論社, 1991.
 - 7) 菊池豊彦: 入門ニューロコンピュータ, オーム社, 1990.
 - 8) 永野優子, 古川幸信, 澤田勉, 平尾潔: ニューロプログラムの開発と道路橋地震被害予測への応用, 土木学会四国支部第 4 回技術研究発表会講演概要集, pp. 46-47, 1998.
 - 9) 古谷元, 山上拓男, 鈴木壽: 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・研究発表会発表論文集, pp. 63-64, 1992.
 - 10) J.Kowalik, M.R.Osborne 共著 (山本善之, 小山健夫共訳): 非線形最適化問題, 倍風館, pp. 27-31, 1970.
 - 11) 金沢正治, 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.

(2001. 7. 30. 受付)

AN IDENTIFICATION OF DEM PARAMETERS FOR ROCKFALL ANALYSIS

Kazuyoshi YOKINO and Takuo YAMAGAMI

A methodology is presented in which four DEM parameters are identified from back analysis of rockfall trajectories observed in field rockfall tests or traced by site investigation of natural rockfall occurrences on a slope. The proposed method, though in an indirect manner, can evaluate the parameters taking into account the effects of slope deformation and/or collision between falling rock and vegetation on the slope. A number of laboratory rockfall tests results and an in-situ test result were used to verify the proposed approach. As a result, it is concluded that four parameters can be reasonably determined from back analysis of the trajectories of falling rocks.