

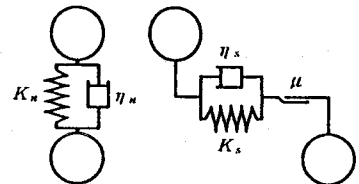
落石問題における材料特性 (K_n , K_s , η_n , η_s) の逆解析 (第2報)

(株) 阪神コンサルタンツ 正会員 ○奥田博之
徳島大学 正会員 山上拓男
(株) 阪神コンサルタンツ 正会員 植田康宏

1. はじめに 落石防護工の計画・設計において落石の運動を的確に予測することが重要となる。ところが、落石の運動は斜面の形状や地質などにより複雑に変化するため、落石運動の予測は非常に困難であり経験工学的に決定しているのが現状である。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。そこで、著者らは逆解析を利用した落石運動の推定法を提案している。

第1報¹⁾では、仮想の剛体斜面における落石問題に対して修正Marquardt法を適用した結果を述べた。ここでは、推定された材料特性が負の値となり物理的に説明できない結果となった。本論文は、第1報で課題として挙げた“制約条件の導入”を行った場合について論述したものである。なお、落石シミュレーションに用いた数値解析法は個別要素法²⁾である。

2. 個別要素法 個別要素法は粒状体を対象とした数値解析法としてCundallにより提案された。個別要素法の基本概念は、互いに不連続な剛体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、要素間の力が作用・反作用の法則に従うことを条件として、要素の挙動を数値積分により逐次追跡していくことにある。図-1に要素間の接触モデルを示す。左図は法線方向、右図は接線方向の接触の機構をそれぞれ表している。この図に示すように、要素間の接触はバネ、ダッシュポット、スライダの組み合わせで表現される。これらの接触特性(法線方向バネ定数 K_n 、接線方向バネ定数 K_s 、法線方向減衰定数 η_n 、接線方向減衰定数 η_s 、摩擦係数 μ)は要素の挙動を支配する材料特性である。個別要素法についてのさらに詳細な説明は紙面の都合上参考文献を参照されたい。



(a) 法線方向 (b) 接線方向
図-1 要素間の接触モデル

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。つぎに、そこで得られた落石の軌跡を用いて材料特性の逆解析を行う。そして、推定された材料特性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。その予測された落石運動をもとに落石防護工の計画・設計を行う。ここでは、落石実験を行い、落石の軌跡が得られたものとして材料特性の逆解析を行う方法を検討する。

落石の軌跡から得られる観測値として、図-2に示すように、落石が斜面と衝突するときの落石重心座標(X_{Ci} , Y_{Ci})、落石の最大跳躍量(H_i)、最大跳躍量が生ずるときの落石重心座標(X_{Hi} , Y_{Hi})、および衝突時刻(t_i)を採用した。つまり衝突1回当たり6個の観測値が得られることになる。目的関数はこれら観測値と対応する計算値の誤差の二乗和で次式のように表される。

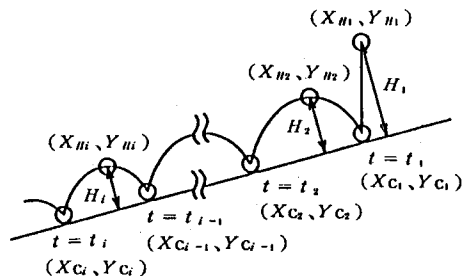


図-2 落石問題における観測値

$$\text{目的関数: } S = \sum_{i=1}^N \{ \omega_{1i} (\bar{X}_{Ci} - X_{Ci})^2 + \omega_{2i} (\bar{Y}_{Ci} - Y_{Ci})^2 + \omega_{3i} (\bar{H}_i - H_i)^2 + \omega_{4i} (\bar{X}_{Hi} - X_{Hi})^2 + \omega_{5i} (\bar{Y}_{Hi} - Y_{Hi})^2 + \omega_{6i} (\bar{t}_i - t_i)^2 \} \quad (1)$$

ただし、バー無しの変数は観測値を、バー付きの変数は計算値をそれぞれ表している。また、 N は落石と斜面との衝突回数である。 $\omega_{1i} \sim \omega_{6i}$ は各観測値に対する重みであり、今回は全て1に設定している。

この目的関数を最小にする材料特性を最適化手法により求める。なお、最適化手法には制約条件付き非線

形最小二乗問題を対象としたNLSSQP法³⁾を採用した。

4. 仮想斜面への適用例

ここでは、本手法の妥当性を検討するために仮想の剛体斜面に適用した結果を述べる。まず、図-3に示すような幅100m、高さ45mの剛体斜面を想定し、表-1に示す1組の材料特性のもとで順解析を行った。図中の曲線は落石が落下し始めてから

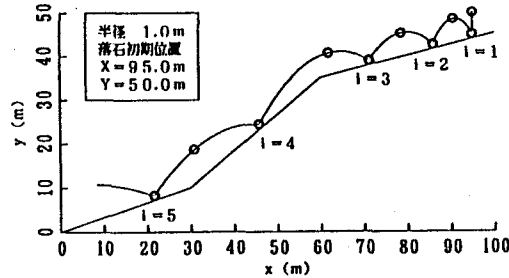


図-3 解析モデルおよび順解析結果

表-1 解析条件

K_n (N/m)	5.0×10^8
K_s (N/m)	8.0×10^8
η_n (N·sec/m)	5.0×10^4
η_s (N·sec/m)	4.0×10^4
μ	0.5
Δt (sec)	$10^{-4} \sim 10^{-5}$

10.0秒後までの軌跡であり、○

表-2 逆解析結果

パラメータ	正解値	制 約 条 件 付 き								制約条件無し	
		Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 4	
		初期値	逆算値	初期値	逆算値	初期値	逆算値	初期値	逆算値	初期値	逆算値
K_n	5.0×10^8	3.0×10^8	1.80×10^8	6.0×10^8	6.05×10^8	4.0×10^8	5.52×10^8	3.0×10^8	4.38×10^8	3.0×10^8	3.35×10^8
K_s	8.0×10^8	3.0×10^8	2.68×10^8	9.0×10^8	9.82×10^8	6.0×10^8	5.31×10^8	3.0×10^8	4.30×10^8	3.0×10^8	4.37×10^8
η_n	5.0×10^4	3.0×10^4	3.01×10^4	6.0×10^4	5.52×10^4	4.0×10^4	5.71×10^4	3.0×10^4	1.73×10^5	3.0×10^4	1.08×10^5
η_s	4.0×10^4	3.0×10^4	3.11×10^4	5.0×10^4	4.89×10^4	3.0×10^4	6.03×10^4	3.0×10^4	2.51×10^5	3.0×10^4	1.97×10^5
目的関数		0.04253		0.01091		1.57140		4.10617		2.04048	
反復回数		5		3		22		7		8	
CPU time		117min18sec		68min40sec		721min25sec		154min15sec		84min11sec	

この軌跡より前述した観測値を決定し、材料特性の逆解析を行う。未知

パラメータは、 K_n 、 K_s 、 η_n 、 η_s の計4個である。

本適用例では、初期値を4通りに変化させて逆解析を行った。与えた初期値は第1報で用いたものと同じ値である。制約条件は K_n 、 K_s 、 η_n 、 $\eta_s > 0$ とした。逆解析結果を表-2に示す。第1報

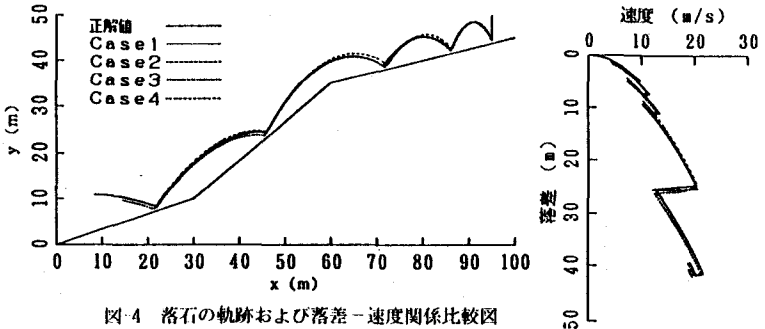


図-4 落石の軌跡および落差-速度関係比較図

で η_s が負値となったケース4についても同様に表-2に示す。また、図-4は各逆算値のもとでの落石の軌跡および落差-速度関係と正解値のもとでのそれらとの比較図である。表-2にみられるように制約条件を導入することにより逆算値が負の値になることは解消できた。また、各ケースにおける逆算値は正解値とは離れたところで収束しているが、各逆算値のもとでの落石運動は正解値のもとでのそれに概ね一致している。したがって、落石防護工の計画・設計には本手法は十分使用可能である。

5. おわりに 本文では、落石防護工の計画・設計に必要な落石運動の合理的な推定法の確立を目的に、第2報として制約条件を導入した逆解析法について述べた。今後、よりリアルな落石運動の予測を行うために、斜面の地盤変形を考慮した場合の逆解析について検討していく予定である。

【参考文献】1)奥田：落石問題における材料特性(K_n 、 K_s 、 η_n 、 η_s)の逆解析、土質工学会四国支部技術研究発表会、1993、2)Cundall, P. A. & Strack: The Distinct Element Method as Tool for Research in Granular Media, Report to The National Science Foundation Concerning NSF GRANT ENG76-20711, pp. 1~96, 1978 3)ASNOP研究会編：非線形最適化プログラミング、1991