

確率論を援用した落石シミュレーション（DDA）に用いるパラメータの検討

日本道路公団（JH） 試験研究所 正会員 天野 淨行  
 同上 正会員 松山 裕幸

1. はじめに

落石対策工の設計においては、落石がどのような経路、跳躍高さ、速度で道路に達するかを評価する必要がある。そこで、落石の軌跡、速度を定量的・合理的に予測評価できる落石シミュレーション（DDA）による設計法の開発を行ってきた<sup>1)2)</sup>。本論文では、開発した設計法に用いる各パラメータの感度分析を行い、各パラメータの落石エネルギー損失への影響程度を明らかにしたので報告する。

2. 概要

確率論による落石シミュレーションでは、解析に用いるパラメータを確定値または確率変数として設定する必要がある。そこで、シミュレーション解析に用いるパラメータが落石挙動にどの程度影響するかを調べ、影響度の大きいパラメータは確率変数として扱い、小さいものは、確定値を用いることとした。表1に感度分析に使用したパラメーター一覧を示す。この表の中で確率変数として取扱っている「衝突減衰係数」と「樹木抵抗係数」の感度分析結果について以下に述べる。

表1 感度分析に使用したパラメーター一覧表

パラメータの種類		値	
確定値	弾性係数 E [MPa]	軟岩・土砂・崖錘	5.7
		張りコンクリート	3,590
	ポアソン比	硬岩（落石）	10,300
		軟岩・土砂・崖錘	0.3
		張りコンクリート・コンクリート吹付工	0.17
	単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	硬岩（落石）	0.2
軟岩・土砂・崖錘		19	
張りコンクリート・コンクリート吹付工		23	
接触バネ剛性 [kN/m]	法線方向バネ剛性 Kn	20,000,000	
	接触方向バネ剛性 Ks	2,000,000	
斜面の摩擦角 [°]	軟岩・土砂（裸地）	25.9	
	植生工	25.9	
	張りコンクリート・コンクリート吹付工・硬岩	30.3	
確率変数	衝突減衰係数	0~1.0	
	樹木抵抗係数 $\mu d$ [N・s/m <sup>4</sup> ]	0~5.0	

3. 感度分析

衝突減衰係数

図1のように、落石が斜面に衝突したときに、落石と地盤の塑性変形等でエネルギーの損失が生じることより、落石に作用する地盤反発力が低減される。地盤反発力を低減させることは、加速度を低減させることと等価となる。このエネルギー損失を表すパラメータを衝突減衰係数と定義する。衝突減衰係数の感度分析では、衝突減衰係数に0~1.0までの一様乱数を発生させ、その他のパラメータを固定して、2箇所の調査地について落石シミュレーションを実施した。検討した調査地は、斜面の凹凸が少なく、樹木の影響がほとんど無視できる斜面であり、調査対象の落石速度が明らかな事例である。なお、落石形状については実際の落石を採用した。調査地

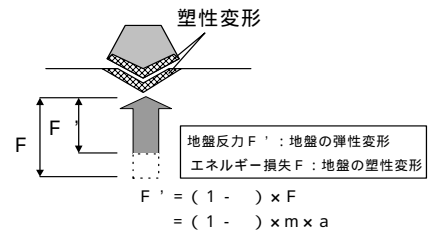


図1 衝突時のエネルギーロスモデル

の結果を図2、調査地の結果を図3に示す。これより、衝突減衰係数が小さいほど速度が大きくなることからわかる。落石発生時の調査から照査位置での速度は、13.8~17.6m/sと推定され、これを満足する衝突減衰係数は、0.45~0.75である。調査地

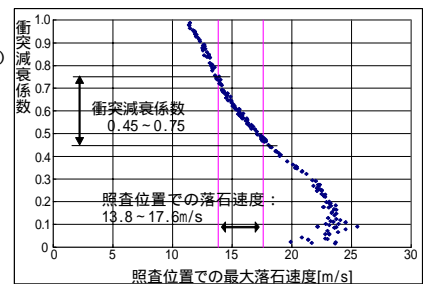
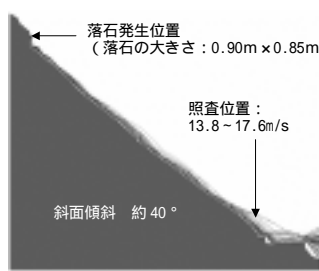


図2 調査地の結果

では、同様の検討を行い、照査位置での衝突減衰係数は0.5~1.0であった。以上の結果から、衝突減衰係数は落石速度に大きな影響を与えることがわかった。よって、このパラメータは0.45~1.0の

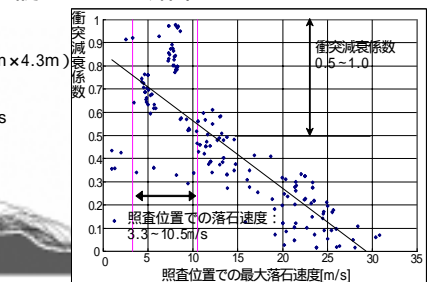
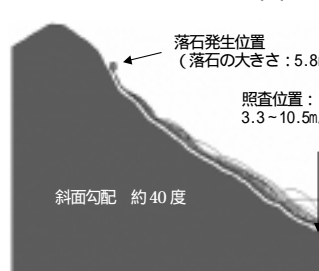


図3 調査地の結果

キーワード: DDA, 落石シミュレーション, パラメータ, 感度分析, 落石対策工

連絡先: 日本道路公団試験研究所 東京都町田市忠生 1-4-1 TEL:042-791-1621 FAX:042-791-2380

幅を持った一様乱数を発生させた確率変数として扱うことが妥当であるとする。

樹木抵抗係数

斜面における落石挙動は樹木の抵抗力に大きく依存する。落石シミュレーションでは、この樹木の抵抗力を樹木抵抗係数  $\mu_d$  を用いて表現している。筆者らは、樹木抵抗係数  $\mu_d$  と基底樹木径  $t_d$  とは  $\mu_d = k t_d$ （比例係数  $k=0 \sim 100$ ）のように正比例の関係があると考えた。そこで、落石軌跡が明らかにされている現場（7箇所）において、落石発生箇所から道路までの落石軌道沿い（5 m幅）を対象として、この調査区域内に生育する樹木の樹種を特定し、胸高直径、樹木の位置、落石と樹木の衝突位置（擦痕高さ）および地盤との衝突位置（窪み）を調査した。次に、落石シミュレーションによる解析を実施する。解析では、比例係数  $k$  に  $0 \sim 500$  までの十分大きな値の乱数を発生させ、200回のシミュレーション解析を行った。そして、解析結果と擦痕高さや窪みの調査結果位置が一致するような樹木抵抗係数を求め、図4のような樹木抵抗係数と基底樹木径との関係を明らかにし、図5に示す基底樹木径による樹木抵抗係数の対数正規分布を得た<sup>3)</sup>。基底樹木径とは単位面積あたりの樹幹の径の合算であり、式(1)で表される。

$$t_d = \sum d_i / s \quad (1) \quad (t_d: \text{基底樹木径} [m], d_i: \text{各々の樹木の胸高直径} [m], s: \text{樹木調査区間の面積} [m^2])$$

樹木抵抗係数の感度分析では、 $0.0 \sim 5.0 [N \cdot s / m^4]$ の一様乱数を、その他は表1に示す確定値として落石シミュレーションを実施した。検討に用いた斜面は、図6に示す落石実験を実施した斜面であり、結果を図7に示す。図7は投石小段～普通小段の最大速度をとったものである。これをみると、落石速度は樹木抵抗係数に大きな影響を受けていることがわかる。よって、樹木抵抗係数は確率変数として扱うことが妥当である。従って樹木抵抗係数の確率変数は、表2に示す対数正規分布に従った確率変数を発生させるものとする。

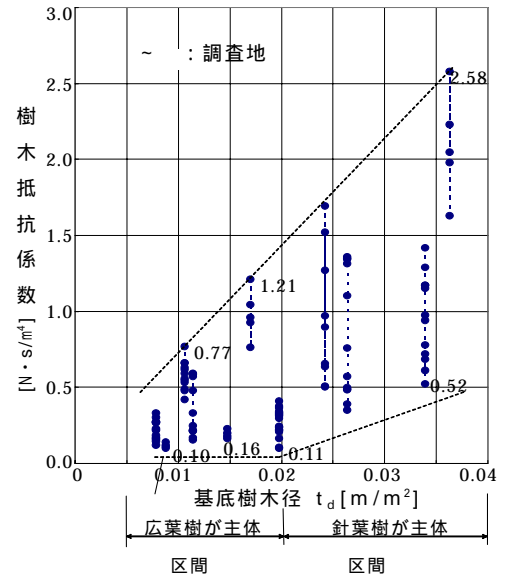


図4 樹木抵抗係数と基底樹木径との関係図

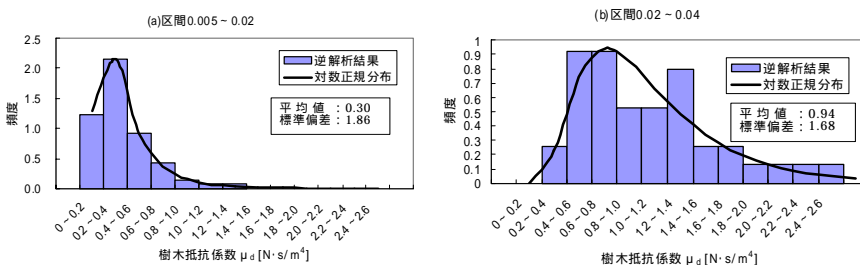


図5 基底樹木径の区間毎における樹木抵抗係数の分布範囲

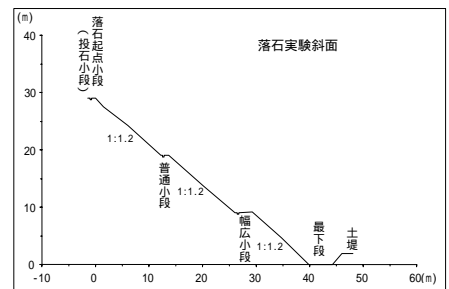


図6 落石実験断面図

4. まとめ

確率変数として扱う樹木抵抗係数および衝突減衰係数について以下に示す精度向上を考える。樹木抵抗係数について、過去の落石箇所（7箇所）から、樹木抵抗係数と基底樹木径との関係を把握した。今後は竹林を含めた事例を追加することにより精度を高め定量化していく。衝突減衰係数については、簡易貫入試験などによる地盤種類との関係について、データを蓄積し、精度を高め定量化していく。

参考資料：1) 松山、緒方、天野 切土のり面における落石挙動に関する検討、第41回日本地すべり学会研究発表会 2002.8 2) 松山、緒方、天野 切土のり面における合理的な落石対策工に関する検討、第41回日本地すべり学会研究発表会 2002.8 3) 日本道路公団試験研究所報告「落石シミュレーションによる合理的な落石対策工の設計手法の開発」

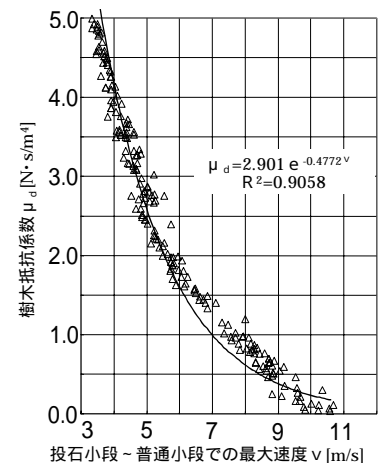


図7 樹木抵抗係数の感度分析の解析結果(データ数:200)