

## 落石の衝突エネルギーによる危険度評価に基づく落石対策工の最適設計手法の検討

東京都市大学 学生会員 ○津田 悠人  
東京都市大学 正会員 吉田 郁政

### 1. はじめに

落石対策工の設置の必要性及び対策の優先順位は既往の落石履歴や道路防災点検に基づいて判断されることが多い。対策が必要と判断された場合の設計条件の決定方法に関しても設計者の裁量に依存するとの報告もある<sup>1)</sup>。さらなる高度化のためには、危険度に関する定量的評価を加えることが好ましい。

本研究では、質点解析に基づく落石の危険度評価より落石が被害を与える確率を算定し、トータルコスト（初期建設費＋リスク）が最小となる落石対策工の最適設計を行う例を示す。

### 2. 対象道路の周辺斜面のモデル化

基盤地図情報ダウンロードサービス<sup>2)</sup>によりある道路周辺の5mメッシュの標高データを入手して3次元斜面モデルを作成した。本検討では1500m平方の領域を対象とし、90,000データの標高データを用いた。地震や豪雨などを起因とする落石の危険箇所は、防災カルテ等から推定することも考えられるが、本検討では落石発生地点は単純に勾配に応じて確率的に割り当てた。図-1に示すように斜面直下に存在する道路を147個の長さ10mのセグメントに分割し、各セグメントについての落石の危険度評価を行い、落石対策工の最適配置を検討する。

### 3. 検討する落石対策工のモデル化

本研究では、落石対策便覧に例示されている限界状態を参考に限界状態1,2を定義する。限界状態1を超過すると落石が対策工に衝突することで何らかの補修費用が生じ、また路線の機能に一部支障を及ぼし一時的な経済的損失が生じると仮定する。限界状態2を超過すると対策工が大きく損傷して、路線や人命等に影響を与え、交通の遮断により経済的な損失が生じると仮定する。本検討では対策工の限界

状態を落石の衝突エネルギーで定義し、限界状態1,2に対応して限界エネルギー1,2と呼ぶ。ある区間に対策工を設置した場合のトータルコストを次のように定義する。

$$c_t = c_0 + (p_{t1} - p_{t2})c_1 + p_{t2}c_2 \quad (1)$$

ここで、

$$p_{t1} = p_e p_{f1}, \quad p_{t2} = p_e p_{f2} \quad (2)$$

$c_0$ は対策工の設置コスト、 $p_{t1}$ ,  $p_{t2}$ は限界状態1,2を超過する確率、 $c_1$ は限界状態1を超過したときの影響度（対策工の補修コスト）、 $c_2$ は限界状態2を超過したときの影響度（落石による路線への影響度）、 $p_e$ は落石発生確率、 $p_{f1}$ ,  $p_{f2}$ は落石が生じた場合に限界エネルギー1,2を超過する確率である。これらの確率は別途質点解析を実施して算定している<sup>3)</sup>。限界状態1,2を超過する確率に影響度を乗じることでリスクを算定しており、式(1)に示すように対策工の設置コストと限界状態1,2のリスクの和をトータルコストとする。条件付超過確率 $p_f$ は危険度評価よりそれぞれの限界エネルギーに対応する確率を求める。

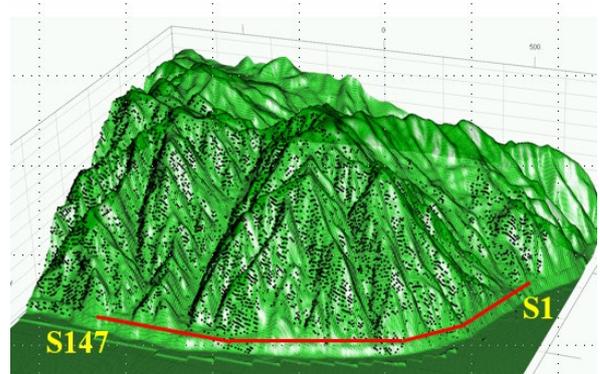


図-1 対象とした斜面地形と最適配置の対象とした道路

キーワード 落石対策工, 最適設計, トータルコスト, 制約条件付最適化問題, 線形計画法  
連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 都市工学科 TEL 03-5707-0104

#### 4. 落石対策工の最適配置手法および試算例

各セグメントについて選択肢として表-1に示すように対策工なし、対策工A, B, Cの4つを設けた。落石の発生確率 $p_e$ は0.7と仮定した。各セグメントについてトータルコストが最小となる選択肢を図-2に示す。

コストには通常はなんらかの制約があり、トータルコストのみで最適配置を求めることは現実的ではない。そこで、制約条件として、全セグメントの設置コストの総和についての上限を設ける。こうした制約条件付最適化問題は対策工の種類やセグメント数が増えると複雑になり経験的に決めることは困難になる。そこで、線形計画法に基づいて最適化問題の定式化を次のように行う<sup>4)</sup>。

$$\begin{aligned} \min \quad & C_t = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n a_{jk} c_{t,jk} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n a_{jk} c_j \leq B \\ & a_{jk} \in \{0, 1\}, j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $C_t$ は全セグメントに対策工を設置した場合のトータルコストの総和、 $a_{jk}$ はセグメント $k$ における対策工 $j$ の設置の有無を示す変数、 $c_j$ は対策工 $j$ の設置コスト、 $B$ は路線セグメント全体における予算である。

図-3に予算制約を6000万円に設定した場合の最適配置を示す。予算制約がない場合と比較して全体的に弱い対策工Aが設置されており、ハザードレベルの低いセグメントでは弱い対策工Aから対策工なしへ変化している。ある程度エネルギーをもって到達する確率の高いセグメントでは対策工B、ハザードレベルが高いセグメントでは変わらず強い対策工Cが設置されており、ハザードレベルに応じて対策工が設置されていることが確認できる。

#### 5. おわりに

本研究では質点系解析に基づく危険度評価より落石が被害を与える確率を算定し、トータルコスト（初期建設費+リスク）に注目した落石対策工の最適設計手法の提案および試算例を示した。

本研究では最適配置を評価するための枠組みを示すことを目標として落石発生確率、落石対策工の耐力や落石による路線への影響度（被害額）、初期建設費を仮定した。本研究では被災した場合の経済的損

失額や人身損失額を表-1に示すように仮定した。これらについては別途国土交通省の費用便益分析マニュアルなどを用いて評価することを試みている。

#### 参考文献

- 1) 岐阜大学地盤工学科地圏マネジメント工学講座（八嶋・沢田研究室）：落石防護対策の落石調査・設計方法および工法選定に関する実態調査について、2006。
- 2) 基盤地図情報ダウンロードサービス-国土地理院 : <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> , 2018.3.26. 閲覧。
- 3) 中村ら：3次元質点解析を用いた落石の衝突エネルギーに基づく確率論的危険度評価，令和2年度全国大会第75回年次学術講演会，2020。
- 4) 菅野ら：路線における落石対策工の最適配置評価のための統計モデリング，土木学会論文集A2, Vol.74, No.2, pp.13-21, 2018。

表-1 各対策工のコスト及び限界状態

対策工の種類	設置費 (万円)	限界状態1 影響度 (万円)	限界エネルギー1 (kJ)	限界状態2 影響度 (万円)	限界エネルギー2 (kJ)
なし	0	0	0	5000	10
A(弱い)	35	17.5	60	5000	100
B(普通)	75	37.5	150	5000	200
C(強い)	300	150	600	5000	800

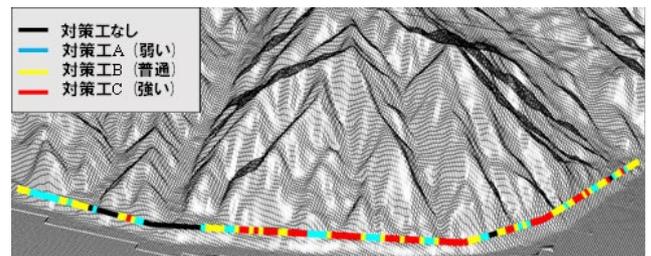


図-2 予算制約がない場合の最適配置

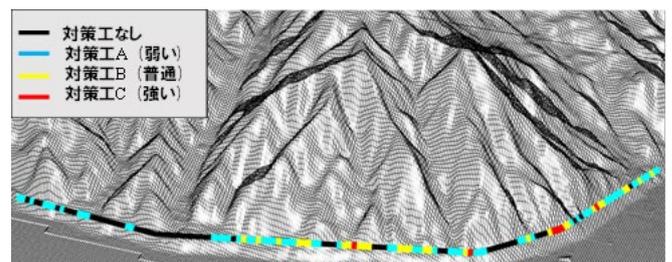


図-3 予算制約がある場合の最適配置