

# 落石対策の意思決定支援手法

布川 修\* 高馬 太一\*\* 杉山 友康\*\*\*

## A Method of Determining Priorities for Investment in Disaster Prevention for Rockfalls from Slopes

Osamu NUNOKAWA Taichi KOHMA Tomoyasu SUGIYAMA

Rockfalls from slopes sometimes occur over railway lines. It is therefore essential to minimize the rockfall disasters over the railway lines and to maintain safe and punctual train operation. It is also necessary to evaluate a disaster risk of rockfall from a slope considering the probability and expenditures required for the rockfall. We developed a method to evaluate a disaster risk of rockfall using risk assessment method. In this paper, we describe a method to determine priorities for investment to prevent the rockfall applying the developed method.

キーワード：落石，防災対策，リスク，発生確率，損失

### 1. はじめに

土砂崩壊や落石などによる災害から列車の安全・安定輸送を確保するために、のり面防護工や落石止柵などの対策が行われている。このような防災対策は、崩壊や落石の危険度とこれらが発生したときの損失を考慮した災害の危険性を単一の指標で定量的に評価することで、より効果的・効率的に実施することができる。しかし、こうした評価手法は確立されていないため、別々の指標で評価された崩壊の危険度や線区の重要度などから、経験的に防災対策の優先順位や方法を決定しているのが現状である。

こうした背景のもと、筆者らは、リスク評価手法を適用することで、降雨時に発生する盛土や切土の崩壊による災害の危険性をリスクとして単一の指標で評価し、この結果を利用して防災対策の意思決定を支援する方法を提案した<sup>1)</sup>。本稿では、もう一つの主な斜面災害である落石災害を対象としたリスク評価方法と、この結果の利用方法について述べる。

### 2. 落石災害リスクの定義

落石による鉄道への被害は、①斜面上方から岩塊が落下し、②この岩塊が線路まで到達し、③線路を支障する、または、落石が列車を直撃するか、落石に列車が衝突することによって発生する。落石による鉄道への被害発生

の概念を図1に示す。この概念をもとに、イベントツリー形式で落石発生時に想定される事象を設定すると図2に示すとおりとなる。

式(1)に示す一般的なリスク算出の考え方に沿って、落石災害リスク  $R$  (円/年) は、落石により生じる事象ごとの被害発生頻度期待値  $P_i$  (回/年) と事象ごとの被害発生時の損失  $C_i$  (円/回) を乗じて、これらをすべて足し合わせることで算出する。

$$R = \sum (P_i \times C_i) \quad (i=1 \sim 10) \quad (1)$$

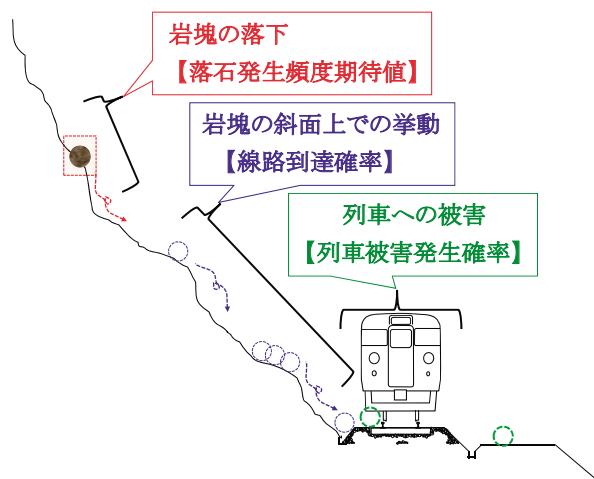


図1 落石による鉄道への被害発生概念

### 3. リスク算出方法

#### 3.1 被害発生頻度期待値の算出

事象ごとの被害発生頻度期待値  $P_i$  (回/年) ( $i = 1 \sim 10$ ) は図2をもとに、以下の式で算出する。

$$P_i = P_a \times P_b \times P_c \times P_d \times P_e \quad (2)$$

\* 防災技術研究部 地盤防災研究室  
 \*\* 前 防災技術研究部 地盤防災研究室 (現 西日本旅客鉄道(株))  
 \*\*\* 防災技術研究部

特集：防災技術

ここで、

$P_a$ ：落石発生頻度期待値（回/年）

$P_b$ ：落石の線路到達確率

$P_c$ ：落石が列車を直撃する確率

$P_d$ ：線路上の落石に列車が衝突する確率

$P_e$ ：脱線確率

以下、式(2)に示した各確率の算出方法について述べる。

落石発生頻度期待値  $P_a$  の算出方法として、①過去の災害データの統計値から求める、②鉄道事業者が実施する定期的な検査結果を用いて健全度判定ごとの対策の考え方をもとに求める、③岩塊の劣化を考慮して求める、などが挙げられる。ここでは例として、上記②の方法について示す。

健全度判定ごとの対策の考え方とこれにもとづく落石発生頻度期待値  $P_a$  の設定例を表1に示す。例えば、「健全度判定がA1の場合、1年から2年以内に対策を要す」という考え方の場合、対策を実施するまでの期間に岩塊が落下するものと仮定すれば、落石発生頻度期待値  $P_a$  は0.5～1.0（回/年）と設定することができる。この考え方で求める落石発生頻度期待値は、統計的あるいは力学的に精度が保証されるものではないが、防災対策の優先順位などを計画することを目的としてリスクを概略的に求める場合には、健全度判定以外のデータを取得する必要がないため、実務上有用であると考えられる。

なお、ここで述べている健全度判定は、落石が発生して線路に到達する可能性までを含めた判定ではなく、落石が発生するかどうかのみであることに注意を要す。この場合、すなわち落石発生源における健全度判定方法は、文献2)が参考になる。

線路到達確率  $P_b$  を求めるためには、落下すると想定した岩塊が落下経路上でどのような軌跡となるかを把握する必要がある。この方法として、図3に示すように、岩塊と地盤の反発係数等を変動値として、質点系力学にもとづいて落石の挙動を計算する落石シミュレーションを用いる。落石シミュレーションの結果を利用することにより、図3に示した、岩塊が①線路まで到達しない確率  $P_{b1}$ 、②線路を通過する確率  $P_{b2}$ 、③線路で停止する確率  $P_{b3}$ 、のそれぞれを求めることができる。

列車への被害形態には、①落石が走行中の列車を直撃する場合と②線路上に到達した落石に列車が衝突する場合があります。それぞれに、a) 列車が脱線する場合とb) 脱線しない場合があります。落石が列車を直撃する確率  $P_c$  は、列車が落石危険区間を通過する年間あたりの累積時間割合から求める。また、線路上の落石に列車が衝突する確率  $P_d$  や脱線確率  $P_e$  は、過去の災害データの統計値から求める方法や対象箇所における見通し距離と列車速度から求める方法がある。

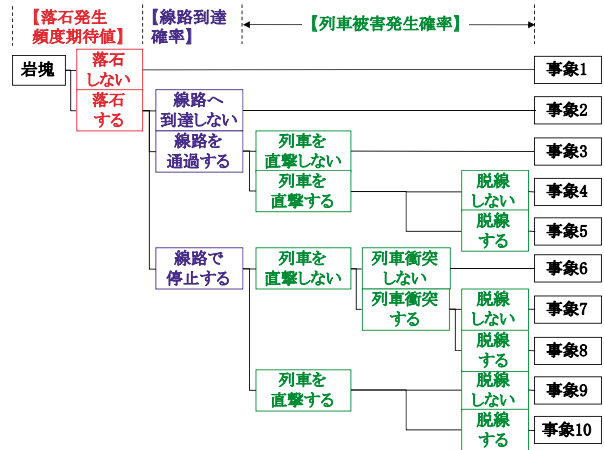


図2 落石発生時に想定される事象

表1 健全度判定ごとの対策の考え方とこれにもとづく落石発生頻度期待値の設定例

(a) 対策の考え方

健全度判定	対策実施時期の考え方
A1	落石の危険性が高く 1年から2年以内に対策を要す
A2	落石の危険性があり 2年から5年以内に計画的に対策を要す
B	風化などの進行によって Aランクとなる可能性がある

(b) 落石発生頻度期待値の設定例

健全度判定	落石発生頻度期待値 $P_a$ (回/年)
A1	0.5～1
A2	0.2～0.5
B	0.02～0.1

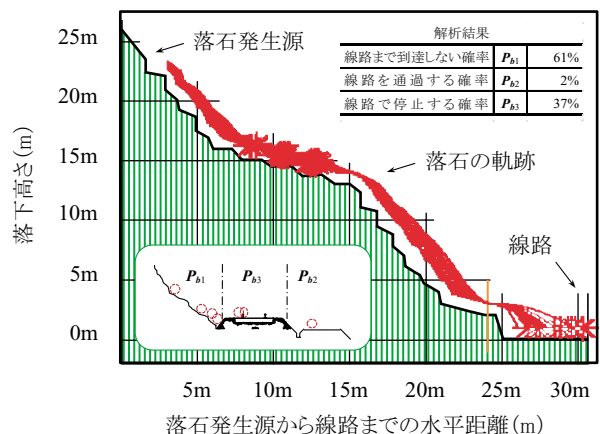


図3 落石シミュレーションの例

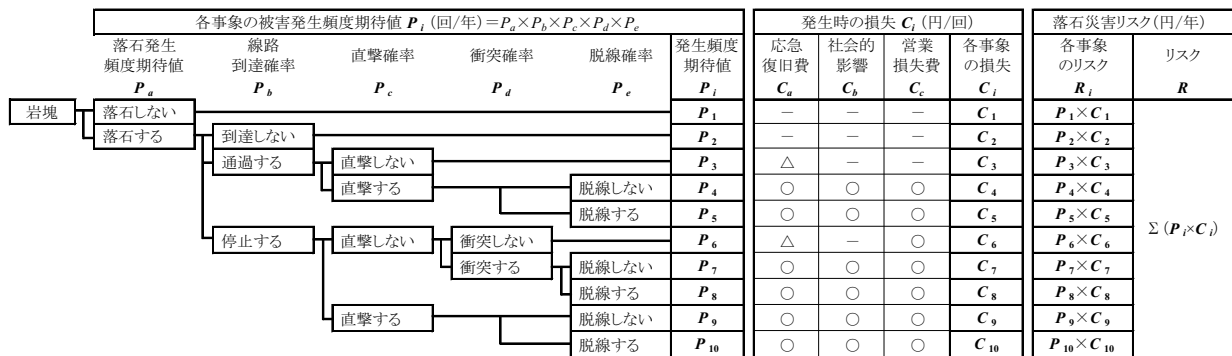


図4 落石災害リスク算出のイベントツリー

3.2 被害発生時の損失項目とリスク算出フロー

想定される事象ごとの被害発生時の損失  $C_i$  ( $i = 1 \sim 10$ ) を算出するためには、損失として考えるべき項目を設定する必要があります。これらは、評価対象の斜面が存在する線区の特徴などにより異なると考えられるため、実際の評価の都度、設定する必要があります。ここでは例として、①応急復旧費  $C_a$ 、②社会的影響  $C_b$ 、③営業損失費  $C_c$  の3項目とした。また、それぞれの具体的な損失は、対象斜面が位置する線区の営業利益や旅客人数、列車速度などを考慮して、鉄道事業者が本手法を利用する際に設定することになるが、過去の災害時の統計値などから設定する方法があげられる。

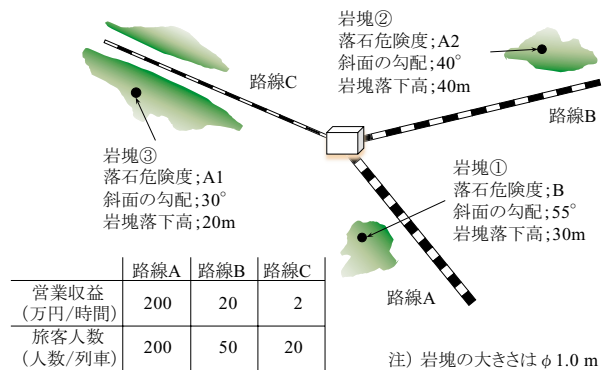


図5 ケーススタディ対象の岩塊

落石により想定される事象ごとに該当する損失項目を示すとともに、式(1)から落石災害リスクを算出するフローを図4に示す。図4において、異なる事象で同じ損失項目が該当する場合でも、脱線の有無などにより損失の大きさは異なる。例えば、線路上の落石に列車が衝突するが脱線しない事象(事象7)と脱線する事象(事象8)の応急復旧費  $C_a$  は、脱線に関する費用分のみ事象8のほうが大きい。

落石災害リスク  $R$  は、図4に示すとおり、落石発生頻度期待値、線路到達確率、列車への直撃確率、列車との衝突確率、脱線確率から計算される事象ごとの被害発生確率と、応急復旧費、社会的影響、営業損失費から被害発生時の損失とを算出し、式(1)により求められる。

表2 各事象の被害発生頻度期待値の算出条件

パラメータ	岩塊①	岩塊②	岩塊③
落石発生頻度期待値 $P_a$	0.03	0.5	1
線路到達確率	$P_{b1}$	0.54	0.84
	$P_{b2}$	0.08	0.10
	$P_{b3}$	0.38	0.06
直撃する確率 $P_c$	0.016	0.008	0.001
衝突する確率 $P_d$	0.3		
脱線する確率 $P_e$	0.1		

※)  $P_i = P_a \times P_b \times P_c \times P_d \times P_e$  (事象  $i = 1 \sim 10$ )  
 注)  $P_{b1}$ : 線路まで到達しない確率  
 $P_{b2}$ : 線路を通過する確率  
 $P_{b3}$ : 線路で停止する確率

4. リスクを利用した防災対策の意思決定支援方法

この章では、仮想した条件のもとケーススタディを行い、3章で示したリスク算出方法を利用して防災対策の意思決定を支援する方法について概略的に説明する。なお、ケーススタディにおいて、対策工を施工した場合のリスクを算出するが、ここでは、対策を施す前のリスクを現状リスク  $R$  と呼び、対策を施した後のリスクを対策後リスク  $R'$  と呼ぶ。

4.1 試算条件

図5に示すとおり、3線区に位置する斜面に岩塊が存在するものとした。なお、発生源における落石危険度、斜面の勾配や岩塊の落下高さ、営業収益、旅客人数が異なるが、岩塊の規模は同様であると仮定した。

事象ごとの被害発生頻度期待値  $P_i$  を求めるための条件を表2に示す。落石発生頻度期待値  $P_a$  は、前述の定期的な検査による健全度判定による方法で求めた。具体的には、健全度判定 A1 の場合は1年以内に、A2 の場合は2年以内に、B の場合は30年以内に対策を要するという基本的な考え方を仮定し、A1 を1.0回/年、A2 を0.5回/

特集：防災技術

年、Bを0.03回/年とした。

線路到達確率 $P_b$ は、図5に示した勾配や岩塊の落下高さをもとに断面を仮定し、落石シミュレーションにより求めた。この結果、表2に示すとおり、岩塊が線路上で停止する確率は岩塊①が他の2つと比較して明らかに大きい結果となった。

落石が列車を直撃する確率 $P_c$ は、列車が落石危険区間を通過する年間あたりの累積時間割合を仮定して求めた。具体的には、累積時間割合は営業収益や旅客人数が多いほど大きいとし、落石が列車を直撃する確率 $P_c$ は営業収益が大きい路線A、路線B、路線Cの順に0.016、0.008、0.001とした。線路上の落石に列車が衝突する確率 $P_d$ 、および脱線する確率 $P_e$ は、それぞれ0.3、0.1と仮定した。

設定した事象ごとの被害発生時の損失を表3に示す。なお、この表は図4に示した事象ごとの応急復旧費、社会的影響、営業損失費を設定し、これらを足し合わせることで求めたものである。

応急復旧費 $C_a$ は、落石が線路まで到達したときにおける岩塊の撤去費用や、土木、軌道、電気設備などが破損したときの費用を考慮した。なお、落石が列車を直撃、または落石に列車が衝突する場合は車両の復旧費用も考慮した。社会的影響 $C_b$ は、1列車あたりの旅客人数を考慮して設定し、脱線する場合は脱線しない場合の2倍になると仮定した。営業損失費 $C_c$ は、落石災害による運転支障時間を想定して各路線の1時間あたりの営業収益を乗じることで設定し、脱線する場合は脱線しない場合の3倍と仮定した。

4.2 現状リスクの算出

表2および表3から算出した各岩塊の事象ごとの被害発生頻度期待値 $P_i$ と現状リスク $R$ の試算結果を表4に示す。

被害発生頻度期待値は被害が発生しない事象1、事象2を除くと、すべての岩塊において事象3(落石有一線路通過一直撃無の場合)、事象6(落石有一線路上に停止一直撃・衝突無の場合)、事象7(落石有一線路上に停止一衝突有一脱線無の場合)の頻度期待値が他と比較して大きい結果となった。また、被害が重大となる(列車が脱線する場合)事象8と事象10の被害発生頻度期待値は $10^{-6}$ から $10^{-4}$ のオーダーとなった。

現状リスク $R$ は岩塊②が大きく、次いで岩塊①、岩塊③の順となった。ここで、岩塊①と岩塊③の比較では、落石発生頻度期待値 $P_a$ が小さい岩塊①の方がリスクは大きくなった。これは、岩塊①では線路上で停止する確率 $P_{b3}$ が大きく、その結果として事象6から事象10の被害発生頻度期待値が岩塊③と同程度となり、岩塊①の被害発生時の損失が岩塊③よりも大きいことによる。

表3 設定した各事象の損失

事象	損失 $C_i$ (万円/回)		
	岩塊①	岩塊②	岩塊③
事象 1	0	0	0
事象 2	0	0	0
事象 3	750	750	750
事象 4	14,500	4,300	2,530
事象 5	54,500	14,300	6,530
事象 6	1,750	850	760
事象 7	12,500	4,100	2,510
事象 8	54,500	14,300	6,530
事象 9	14,500	4,300	2,530
事象 10	54,500	14,300	6,530

表4 各事象の被害発生頻度期待値と現状リスクの試算結果

(a) 被害発生頻度期待値

事象	被害発生頻度期待値 $P_i$ (回/年)		
	岩塊①	岩塊②	岩塊③
事象 1	$9.7 \times 10^{-1}$	$5.0 \times 10^{-1}$	$0.0 \times 10^1$
事象 2	$1.6 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-1}$	$9.2 \times 10^{-1}$
事象 3	$2.4 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$6.0 \times 10^{-2}$
事象 4	$3.5 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-4}$	$7.8 \times 10^{-5}$
事象 5	$3.9 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$8.7 \times 10^{-6}$
事象 6	$7.8 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$
事象 7	$3.0 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-3}$	$5.4 \times 10^{-3}$
事象 8	$3.4 \times 10^{-4}$	$8.9 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-4}$
事象 9	$1.7 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-5}$
事象 10	$1.9 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-6}$

(b) 現状リスク

事象	リスク $R_i$ (万円/年)		
	岩塊①	岩塊②	岩塊③
事象 1	0.0	0.0	0.0
事象 2	0.0	0.0	0.0
事象 3	1.8	37.2	44.9
事象 4	0.5	1.5	0.2
事象 5	0.2	0.6	0.1
事象 6	13.7	17.7	10.6
事象 7	37.8	32.9	13.5
事象 8	18.3	12.8	3.9
事象 9	2.4	0.9	0.1
事象 10	1.0	0.3	0.0
$R=\sum R_i$	75.9	104.0	73.3

4.3 対策後リスク

ここでは、現状リスク $R$ が他の2つより大きい結果となった岩塊②を対象として、対策後 $R'$ リスクを算出する。対策案は、図6に示すとおり、対策工の特徴と施工費用が異なる3種類とした。各種対策による効果を考慮した対策後の被害発生頻度期待値は以下のとおり算出

した。

対策案aは岩塊が発生源位置から落下することを防止する対策である。そこで、対策後の落石発生頻度期待値  $P_a'$  は0になると仮定した。

対策案bは落石を線路の途中で捕捉する対策である。そこで、図7に示すように、この対策案を考慮した落石シミュレーションを実施し、線路到達確率を算出した。なお、対策前よりも対策後は岩塊の線路近傍に到達する確率が小さくなる。

対策案cは落石を線路際で捕捉するとともに、万が一線路に到達した場合にも検知装置によってこの位置への列車の進入を防止する対策である。そこで、対策案bと同様に、対策案を考慮した落石シミュレーションにより線路到達確率を算出した。さらに、線路上の落石に列車が衝突する確率  $P_d'$  を0とした。

上記の条件のもとに対策後リスク  $R'$  を求めて現状リスク  $R$  と比較し、リスク低減効果  $\Delta B (= R - R')$  を算出した。さらに、リスク低減効果  $\Delta B$  を対策費用  $C_T$  で除した値を費用対効果  $X (= \Delta B / C_T)$  と定義して求めた。なお、費用対効果  $X$  が大きいほど、費用ベースでは効率的な対策であると判断できる。

これらの結果を図8に示す。この図より、すべての対策案において、リスクが大幅に低減する結果となり、リスク低減効果  $\Delta B$  が大きい案は対策案aとなった。また、対策案のうち費用対効果  $X$  が最も大きく効率的な案は、対策案bとなった。

#### 4.4 防災対策の意思決定支援方法

落石災害リスクの試算結果一覧を表5に示す。この結果をもとに、リスク評価結果を利用した防災対策意思決定支援方法の考え方について考察する。

防災対策の優先順位決定の考え方として、1) 現状リスク  $R$  の高い順に対策を実施する、2) 費用対効果  $X$  の高い順に対策を実施する、ことが挙げられる。上記1) の場合、表5より、対策の優先順位は岩塊②、岩塊①、岩塊③の順となり、上記2) の場合、岩塊① (対策案b)、岩塊② (対策案b)、岩塊③ (対策案b) の順となる。優先順位決定の考え方により優先順位は異なるが、リスク評価結果を利用すれば、対策の優先順位は定量的に決定できる。

一方、対策方法決定の考え方として、a) リスク低減効果  $\Delta B$  が高い対策とする、b) 費用対効果  $X$  が高い対策とする、ことが挙げられる。本稿の試算結果では、どの岩塊においても上記a) の場合は対策案aとなり、上記b) の場合は対策案bと決定できる。

優先順位や対策方法決定の考え方は評価対象の斜面が存在する線区の特徴などにより異なることが想定される。ここでは、優先順位決定の考え方を上記1)、対策方

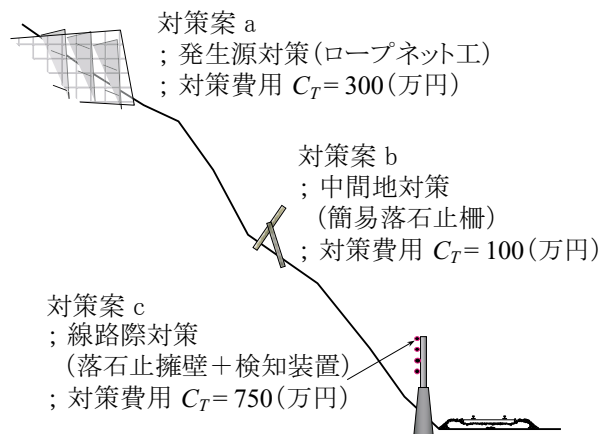


図6 ケーススタディにおける対策案

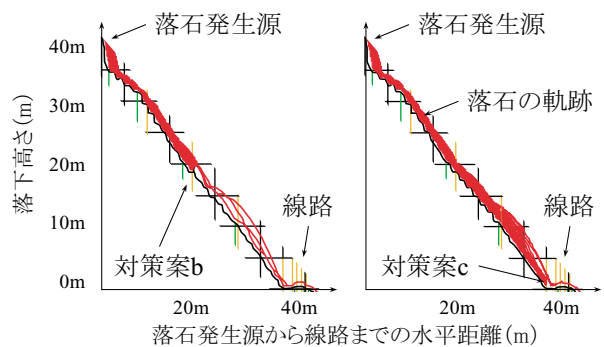


図7 対策案ごとの落石シミュレーション結果例 (左：対策案b, 右：対策案c)

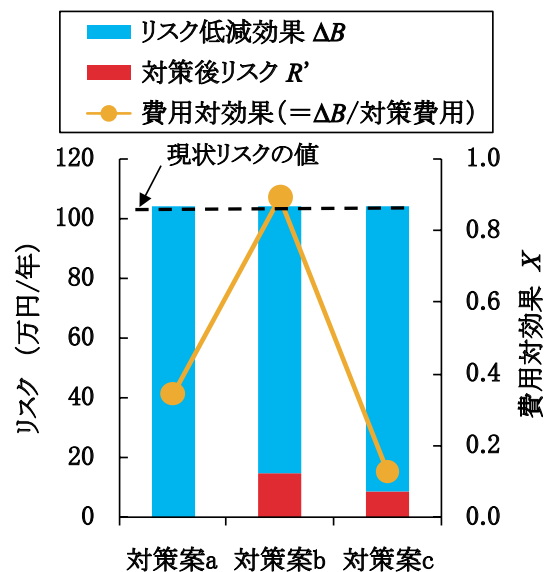


図8 対策後リスクおよびリスク低減効果と費用対効果の算出結果

表5 ケーススタディ結果一覧

斜面名称	岩塊①			岩塊②			岩塊③		
現状リスク $R$ (万円/年)	75.9			104.0			73.3		
対策案	対策案 a	対策案 b	対策案 c	対策案 a	対策案 b	対策案 c	対策案 a	対策案 b	対策案 c
現状リスク $R'$ (万円/年)	0.0	2.2	1.2	0.0	14.7	8.9	0.0	21.6	7.6
リスク低減効果 $\Delta B$	75.9	73.6	74.6	104.0	89.3	95.2	73.3	51.7	65.7
対策費用 $C_r$ (万円)	150	50	375	300	100	750	225	75	565
費用対効果 $X$	0.51	1.47	0.20	0.35	0.89	0.13	0.33	0.69	0.12

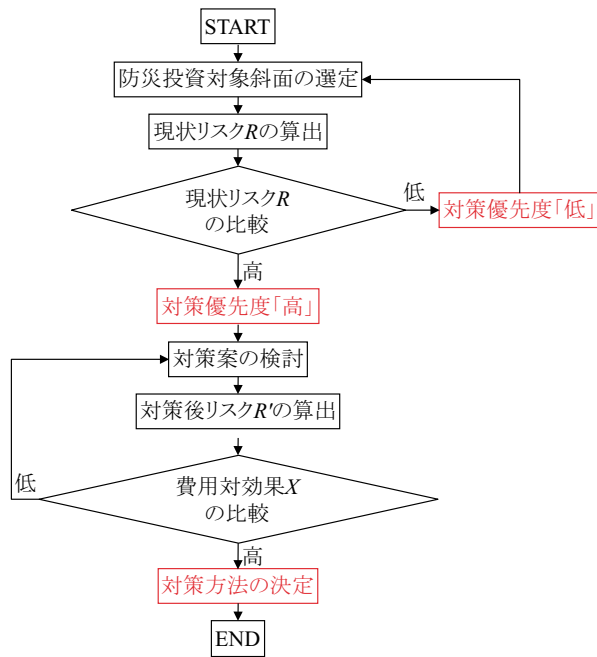


図9 防災対策意思決定フローの例

法決定を上記 b) とした場合を例として、防災対策意思決定のフローを図9に示した。こうしたフローにもとづき、現状リスクと対策後リスクを算出することで、防災対策の優先順位や対策方法を定量的に決定できることから、本手法を利用すれば防災対策の意思決定を支援することが可能であると考えらる。

## 5. まとめ

本項の内容をまとめ、以下に記す。

- 1) 落石発生時に想定される事象を10事象に分類し、事象ごとの被害発生頻度期待値と損失とから落石災害のリスクを評価する方法を示した。
- 2) 落石発生頻度期待値の算出方法として、鉄道事業者が実施する定期的な検査結果を用いて健全度判定ごとの対策の考え方をもとに求める方法を、線路到達確率の算出方法として、落石シミュレーションの結果を利用する方法を示した。これらから、落石発生時の被害発生頻度期待値が算出できる。
- 3) 仮想した条件のもとケーススタディを行い、現状リスクと対策リスクを算出することで、防災対策の意思決定を支援することが可能であることを示唆した。今後は、実際の斜面を対象としてリスクを算出し、実務に適用する際の課題を明らかにしていきたい。

## 文献

- 1) 布川修, 杉山友康, 太田直之: 降雨による斜面災害に対する防災投資の意思決定支援手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, pp.17-22, 2009
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (構造物編) 土構造物 (盛土・切土) 付属資料 10, 丸善, p.116-128, 2007