

落石災害の対策優先順位と方法を決める

布川 修
 防災技術研究部
 (地盤防災研究室 主任研究員)

杉山 友康
 防災技術研究部
 (部長)



はじめに

鉄道沿線に存在する斜面から岩塊が落下(落石)することで、列車の運行を阻害する災害が発生することがあります。こうした落石災害から列車の安全・安定輸送を確保するために、岩塊をワイヤロープなどで固定する(図1)、あるいは線路際に柵などを設置する(図2)ことで落石が線路まで到達しないようにする対策が実施されています。

こうした落石災害の対策は、岩塊が崩落する危険度や線区の重要度などを勘案し、経験的に実施優先順位や方法が決定されています。そこで、ここでは、災害の危険性をリ

スクとして算出し、定量的な指標をもとに落石災害対策の意思決定を支援する方法について紹介します。

リスクの定義

落石による鉄道への被害発生を概念を図3に示します。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します。これらを考慮して落石発生時に想定される事象をイベントツリー形式で設定すると、図4に示すように10事象に区分することができます。

一方、一般的にリスクは災害によって生じると想定される年間あたりの損失額と定義され、災害時に起こりうる様々な被害の年間あたりの発生回数(以下、発生頻度期待値)と被害が発生したときの損失とを掛け合わせることで求められます。したがって、図4に示した10事象ごとの発生頻度期待値と損失とを求めることで、落石災害のリスクを算出することができます。

様々な斜面に存在する様々な岩塊同士の落石災害危険性を比較する場合において、①落石発生時に想定される事象のうち、被害が生じる事象の発生頻度期待値を用いる場合



図1 岩塊をワイヤロープで固定する対策の例



図2 線路際に柵等を設置する対策の例

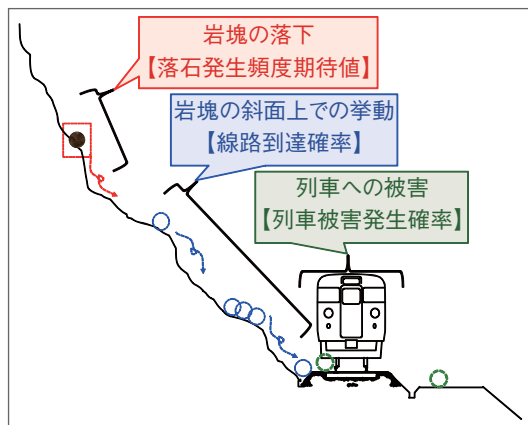


図3 落石による鉄道への被害発生の概念図

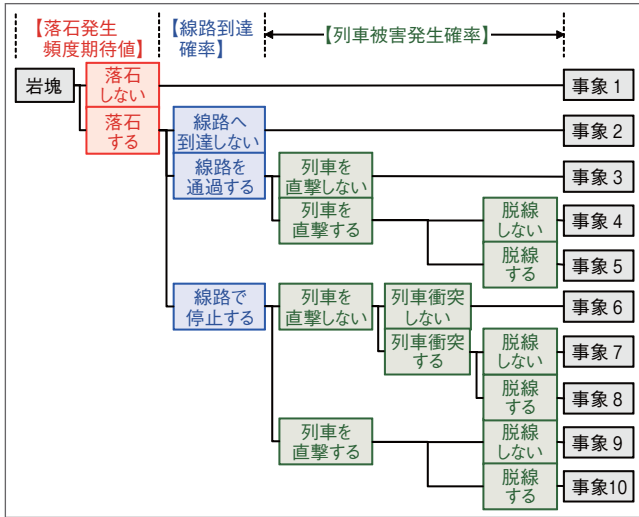


図4 落石発生時に想定される事象

と、②落石災害リスクを用いる場合とが考えられます。そこで、以下、事象ごとの発生頻度期待値および落石災害リスクの算出方法について説明します。

発生頻度期待値の算出方法

落石発生時に想定される事象ごとの発生頻度期待値は、図3、図4に示す落石発生頻度期待値、線路到達確率、列車被害発生確率（直撃確率、衝突確率、脱線確率）から算出します。

落石発生頻度期待値の算出方法として、①過去の災害事例データの統計値から求める、②鉄道事業者が実施してい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、などが挙げられます。上記③の方法は、現在確立された研究結果や技術がないため、ここでは、例として上記②の方法について述べます。

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に示します。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

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 P_a の設定例

健全度判定	対策実施時期の考え方	落石発生頻度期待値 P_a (回/年)
A1	落石の危険性が高く 1年から2年以内に対策を要す	0.5
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	0.2
B	風化などの進行によっては Aランクとなる可能性がある	0.02~0.1

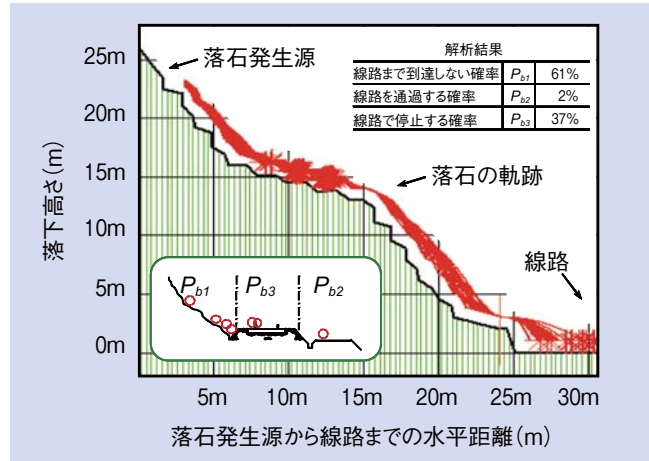


図5 落石シミュレーションの計算例

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恐れが高いと仮定すれば、落石発生頻度期待値 P_a は0.5(回/年)と設定することができます。

上記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ありません。しかし、防災対策の優先順位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、実務上有用です。なお、この健全度判定は線路に到達する可能性までを含めたものではなく、落石の発生域のみの判定であることに注意が必要です。この場合の健全度判定方法は、文献1)が参考になります。

線路到達確率 P_b は、図5に示すように、岩塊と地盤の反発係数などを変動値として質点系力学にもとづいて落石

各事象の発生頻度期待値 P_i (回/年) = $P_a \times P_b \times P_c \times P_d \times P_e$	発生時の損失 C_i (円/回)				発生頻度期待値 P_i	落石災害リスク (円/年)	
	応急復旧費 C_a	社会的影響 C_b	営業損失費 C_c	各事象の損失 C_i		各事象のリスク R_i	リスク R
岩塊							
落石しない							
落石する							
到達しない							
通過する							
直撃しない							
直撃する							
衝突しない							
衝突する							
脱線しない							
脱線する							
停止する							
直撃しない							
直撃する							
衝突しない							
衝突する							
脱線しない							
脱線する							

※○は該当する項目

図6 各事象の発生頻度期待値と損失および落石災害リスクとの関係

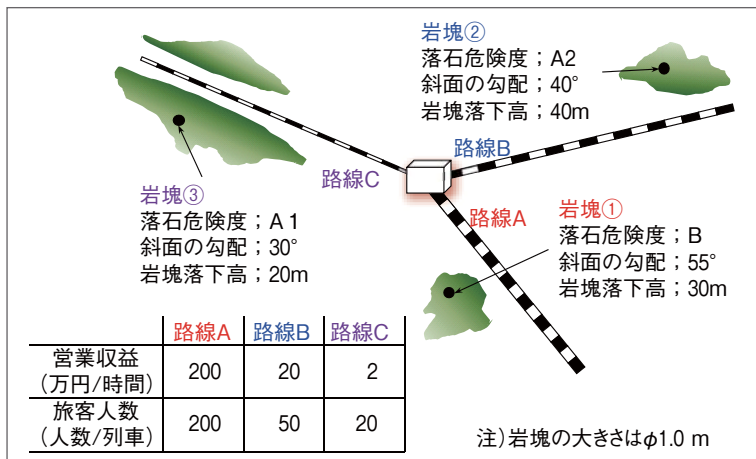


図7 試算の条件

の挙動を計算する落石シミュレーションにより求めることができます。シミュレーション結果から、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} のそれぞれを求めます。

落石が走行中の列車を直撃する確率は、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ことができます。線路上の落石に列車が衝突する確率や脱線確率は、過去の災害データの統計値から求める方法などが挙げられます。

落石災害リスクの算出方法

リスクを算出するためには事象ごとに生じる損失 C_i を設定する必要があります。損失には多くのものが考えられ、すべてを網羅することは困難なため、評価対象の斜面が存在する線区の特性を考慮して、実際の評価の都度検討する必要があります。ここでは、例として損失に占める割合が比較的大きな項目である応急復旧費、社会的影響(車両の被害額など)、営業損失費の3項目を設定しました。

具体的な損失は、対象斜面で想定される落石の規模、線区の営業収益や旅客人数、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りますが、過去の災害時の統計値などから設定する方法が挙げられます。

これまで述べた落石災害リスク算出の考え方を整理して、各事象の発生頻度期待値と損失および落石災害リスクとの関係を図6に示します。この図に示す関係に沿って計算することで、落石災害リスクを算出することができます。

算出結果の利用方法

ここでは、仮想した条件で試算を実施し、この結果をもとに被害の発生頻度期待値やリスクの算出結果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説明します。

表2 被害の発生頻度期待値算出結果の例

No.	被害発生頻度期待値 (回/年)		
	岩塊①	岩塊②	岩塊③
全被害	1.4×10^{-2}	8.0×10^{-2}	8.0×10^{-2}
脱線被害	3.6×10^{-4}	9.6×10^{-4}	6.1×10^{-4}

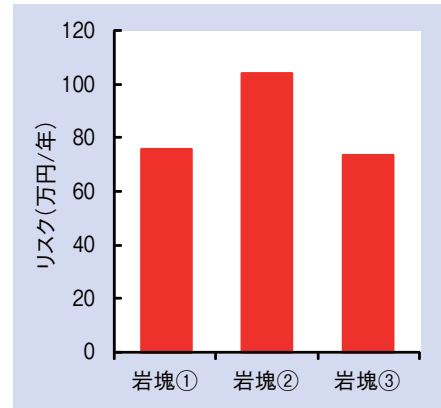


図8 現状リスクの算出結果の例

(1) 被害の発生頻度期待値算出結果

試算の概略的な条件を図7に示します。この条件から落石発生時に想定される事象ごとの発生頻度期待値を算出し、図6をもとに、鉄道に少しでも被害が生じる事象3～事象10の頻度期待値の合計値(以下、全被害の発生頻度期待値)と、脱線する被害が生じる事象5、事象8、事象10の合計値(以下、脱線被害の発生頻度期待値)を求めました。この結果を表2に示します。

全被害の発生頻度期待値は岩塊②と岩塊③がほぼ同じ値ですが、これは落石危険度が大きい岩塊③の線路まで到達する確率が小さいためです。脱線被害の発生頻度期待値はすべて 10^{-4} オーダーと小さい結果になりましたが、この中では岩塊②が最も大きいことが定量的にわかります。

このように、被害の発生頻度期待値を算出することにより、落石による被害の危険性が定量的に把握できることから、防災対策の優先順位判断の指標となります。なお、被害発生時の損失も考慮した指標であるリスクを用いたほうが、様々な線区に様々な岩塊が存在する場合における防災対策の優先順位は決定しやすいですが、対象岩塊や線区によっては損失の設定が難しいことが想定され、この場合には発生頻度期待値を算出することが有用となります。

(2) リスクの算出結果

ここでは、対策を施す前のリスク(以下、現状リスク R)と対策を施した後のリスク(以下、対策後リスク R')を算出した結果を示します。

現状リスクの算出結果を図8に示します。この図をもとにリスクの高い順に対策を実施するという考え方に沿えば、

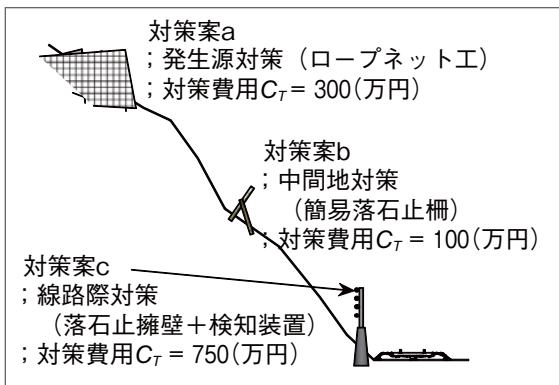


図9 本試計算における対策案

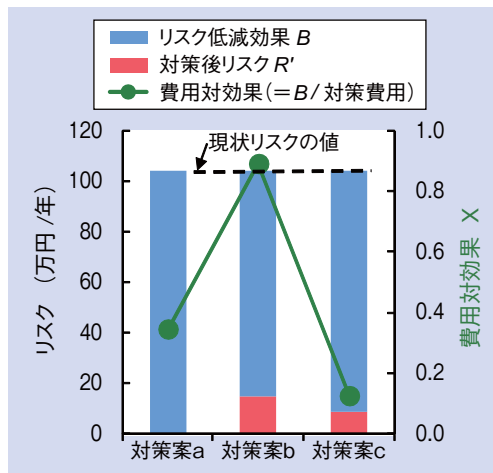


図10 対策後リスクの算出結果の例

図7の条件のみでは困難だと思われる防災対策の実施優先順位を定量的に決定することが可能です。

本試計算における対策案を図9に示します。対策の効果として、発生源対策である対策案aの場合には岩塊を落下させないようにする対策であるため落石発生頻度期待値が0になる、中間地対策である対策案bの場合には岩塊が線路近傍に到達する確率が小さくなる、検知装置を含む線路際対策である対策案cの場合には岩塊が線路近傍に到達する確率が小さくなるとともに、線路上の落石に列車が衝突する確率が0になる、としました。

以上を踏まえた対策後リスク算出結果を図10に示します。なお、図には現状リスク R と対策後リスク R' から算出できるリスク低減効果 $B (= R - R')$ と、リスク低減効果 B を対策費用 C_T で除した値を費用対効果 X と定義して求めた結果も示します。この費用対効果 X が大きいと対策費用に対して得られる効果が金額的に高いこととなります。

対策方法決定の考え方として、①リスク低減効果 B が高い対策を優先する、②費用対効果 X が高い対策を優先する、ことが挙げられます。図10より、上記①の場合は対策案a、上記②の場合は対策案bと定量的に決定できます。

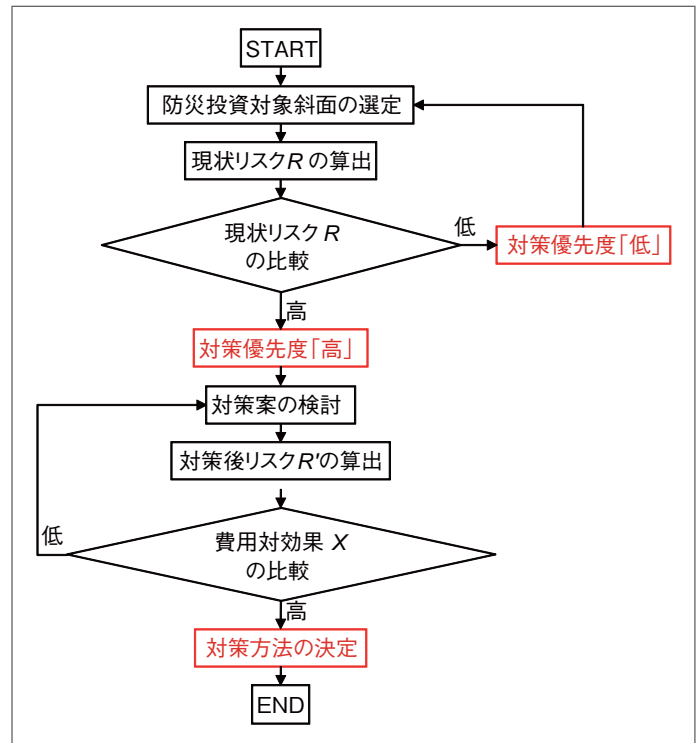


図11 防災対策の意思決定フローの例

対策の優先順位や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長などにより異なることが想定されますが、優先順位は上記で述べた考え方で、対策方法決定は上記②とした場合を例とすると、防災対策意思決定のフローは図11のようになります。

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になります。

おわりに

ここでは、落石災害のリスクを算出する方法とこの結果を利用した防災対策の意思決定支援方法について紹介しました。本手法は、比較的簡易な現地調査結果やデータ整理結果からリスクが算出可能であることから、実務でも容易に適用できます。RRR

文献

- 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、pp.116-128、2007
- 布川修、高馬太一、杉山友康：落石対策の意思決定支援手法、鉄道総研報告、vol.25、No.7、2011