リスク評価に基づく 鉄道沿線落石対策の意思決定手法

高馬 太一¹・杉山 友康²・布川 修³・西垣 誠⁴・西山 哲⁵・大島 義信⁶

¹正会員 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室 (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島五丁目4-20)
E-mail: taichi-kouma@westjr.co.jp

²フェロー 京都大学大学院特定教授 工学研究科 (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: sugiyama.tomoyasu.4n@kyoto-u.ac.jp

³正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38)
E-mail: nunokawa.osamu.30@rtri.or.jp

⁴フェロー 岡山大学大学院教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中三丁目1-1)
E-mail: n_makoto@cc.okayama-u.ac.jp

⁵正会員 岡山大学大学院教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中三丁目1-1)
E-mail: nishiyama.satoshi@cc.okayama-u.ac.jp

⁶正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科 (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: oshima.yoshinobu.3a@kyoto-u.ac.jp

鉄道沿線斜面の落石対策を効率的に実施するためには、落石が鉄道の列車運行に与える影響をリスクとして定量的に評価し、この結果を利用して対策の優先順位や対策方法を決定することが望ましい。本研究では、過去の落石災害データの分析結果に基づいて鉄道への被害の実態を考慮した落石発生個数期待値を算出し、この結果を用いたリスク評価優先路線の抽出手法を提案した。次に、抽出されたリスク評価優先路線において鉄道で実施している岩塊の危険度判定等をもとに鉄道に具体的に生じる被害発生確率を算出し、この結果と被害が生じた場合の損失とから岩塊同士を相対的に比較するためのリスク算出手法を提案した。さらに、リスク算出結果を用いた落石対策の意思決定手法を計算事例により示した。

Key Words : rockfall, disaster risk, risk assessment technique, disaster prevention

1. まえがき

落石の発生は通常前兆現象がなく、誘因と考えられる事象との相関も明瞭ではない。このため、落石の発生の予測は困難で、鉄道で行われている降雨時運転規制などにより災害を未然に防止するという方法をとることは難しいとされている¹⁾。そこで、鉄道では落石災害から列車運行の安全性を確保するために、落石防護網などのハード対策や検知装置、速度規制といったソフト対策を講じている。このような対策は、災害の危険性を岩塊の危険度と落石が発生した際の損失を考慮して単一の指標で定量的に評価することでより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、岩塊の危険度や路線の重要度などの個別に評価された別々の指標をもとに、落石対策の優先順位や対策方法を経験的に決定しているのが現状である。

そこで、本研究では、鉄道沿線の斜面において発生が懸念される落石やそれが鉄道の列車運行に与える影響をリスクとして評価し、この結果を用いた落石対策の意思決定手法を検討した。本論文では、定期的な検査結果や比較的容易な計算で得られるデータをもとに路線や岩塊単位で落石リスクを定量的に算出する手法を論じ、落石対策の意思決定手法を計算事例により示した。

2. 斜面と落石のリスク評価に関する過去の研究

近年、自然災害に対する危険度を単に構造物の耐力で評価するのみならず、災害発生の危険性を確率的に評価することや被害が発生した場合の損失を考慮して危険度を評価することの重要性が指摘されている²⁾。そのため、降雨による斜面崩壊では崩壊を発生させる誘因となる

降雨と素因である斜面の耐雨性を考慮して、斜面がある期間内に崩壊する可能性を確率的に算出し、この結果と被害が発生した際の損失とから、斜面崩壊の危険度をリスクとして評価する研究がなされている。

例えば、大津ら³⁾は、高速道路沿線斜面を対象としてイベントツリーにより斜面崩壊時の被害を場合分けし、発生確率^{4), 5)}と損失からリスクを求める方法を提案している。また沖村ら^{6), 7), 8)}は、崩壊メカニズムを踏まえて破壊確率と損失を算出し、リスクを算出する方法を提案している。田中ら⁹⁾は、道路防災点検の結果と崩壊の履歴を利用した統計解析結果と降雨の年超過確率からリスクを算出する方法を提案している。また関口ら¹⁰⁾は、斜面管理の各段階において取得可能な情報を用いた事業優先度の評価方法を提案している。鉄道では過去に発生した崩壊事例のデータを用いた統計解析結果をもとに、斜面の耐雨性を求める岡田ら^{11), 12)}、杉山ら^{13), 14)}の手法を利用して鉄道の降雨時運転規制を考慮して崩壊発生頻度期待値を求める方法を布川ら¹⁵⁾が提案し、それらの方法をもとにリスクを算出する方法とその結果を利用した防災対策意思決定方法を計算事例により示している¹⁶⁾。これらの研究成果は、道路や鉄道の沿線斜面を対象として、降雨時の斜面災害に対する危険度をリスクとして評価することで、合理的に防災対策の優先度を判断することが可能であることを示唆しているが、いずれも降雨による斜面災害リスク評価に関するものである。

一方、本研究の対象である落石に対するリスク評価に関しては以下のような研究事例が報告されている。

例えば、大津ら¹⁷⁾は、一般道路に隣接している複数の不安定岩盤ブロックからなる斜面を対象として、多様な崩落パターンが想定される場合の落石リスクを社会経済的損失を考慮して評価する方法を構築し、その手法により算定される累積リスクを用いることで費用対効果を考慮して合理的な対策工の立案が可能であることを提案している。高木ら¹⁸⁾は、道路斜面の落石を対象としたリスクマネジメントプロトタイプとして道路斜面の防災点検結果と落石履歴データから落石発生確率を推定し、これと落石に起因する経済損失とからリスクを算出する方法を計算事例により示している。鉄道では深田ら¹⁹⁾が、過去の落石災害の事例をもとに落石の落下高さや斜面の傾斜角などを把握し、落石シミュレーションにより算出した線路への影響度をノモグラム化したリスクマップを作成し、これを斜面点検や線路防災計画の策定に活用することを提案している。鉄道沿線斜面の落石については、その他にも多くの研究がなされているが、いずれの内容も地形的・地質的な特徴に関するものや落石形態を主に考察されたものが多く、落石による鉄道への被害形態や被害程度を考慮した定量的な評価手法を提案するまでには至っていないのが現状である。

表-1 落石に対する危険度判定基準

		岩塊発生源での不安定性に対する評価					
		aa	a		b	c	s
			a1	a2			
線路への影響度	1	AA	A1	A2	B	C	S
	2	A	B		B	C	S
	3	B	B		C	C	S

[岩塊発生源での不安定性に対する評価区分]

aa: きわめて不安定, a(a1, a2): 不安定, b: やや不安定, c(s): 安定

[防護設備等の効果を考慮した線路への影響度に対する評価区分]

1: 影響大, 2: 影響中, 3: 影響小

3. 鉄道における斜面管理の現状と本研究の内容

落石による鉄道への被害は、斜面上方から岩塊が落下し、この岩塊が線路まで到達して線路を支障する、または岩塊が列車を直撃するか岩塊に列車が衝突することにより発生する。こうした落石災害から列車運行の安全性を確保するために、数多く存在する鉄道沿線の斜面から落石危険箇所を抽出し、落石防護網などのハード対策や検知装置、速度規制などのソフト対策を講じている。

西日本旅客鉄道株式会社（以下、JR西日本という）では、2年に1回の頻度で実施する通常全般検査²⁰⁾（目視による調査）において岩塊の発生源での不安定性評価（aaランクからsランクまでの5段階）と防護設備等の効果を考慮した線路への影響度評価（1から3までの3段階）の組み合わせにより、表-1をもとにAAランクからSランクまでの5段階で岩塊の落石に対する危険度を判定している。この際、判定をより精度よく実施するために斜面全体の踏査結果をとりまとめた斜面防災カルテ^{21), 22)}を活用して総合的な危険度評価を実施している。なお、対策についてはAAランクの場合は直ちに措置、判定A（A1及びA2）は一定期間内に措置、判定Bは継続的に監視することとしている。しかし、岩塊発生源における不安定性評価が正しくなされたとしても岩塊が落下した際の線路への影響度や被害程度を定量的に評価する手法は確立されていないため、岩塊の危険度や路線の重要度などの別々の指標をもとに、主観的な評価によって経験的に落石対策の優先順位を決定しているのが現状である。また、潤沢な防災投資の予算を確保できる場合には、危険度が高いと評価されたすべての岩塊を対象に、岩塊を除去したり岩塊が落下しないようにコンクリートや網で覆うなど、発生源における対策を講じることが理想である。しかし、現実には防災投資の予算は限られているため、発生源における対策、岩塊が落下しても線路への

図-1 本研究の流れ

図-2 本研究の内容

到達を防止するための構造物を斜面途中や線路際に施工する対策、岩塊が線路に到達したことを検知する対策など、様々な対策を経験に基づいて組み合わせて実施しているのが現状である。このような対策をより効率的に実施するためには鉄道沿線の斜面で発生が懸念される落石やそれが鉄道の列車運行に与える影響をリスクとして定量的に評価することが必要であると考える。

本研究の流れを図-1に示す。同図に示すとおり、まず、過去の落石災害データをもとに落石による鉄道への被害の実態を分析した。次いで、落石災害データの分析結果に基づいて、優先的にリスク評価を実行する路線の抽出手法を検討した。さらに、抽出された路線を対象に岩塊同士を相対的に比較するためのリスク算出手法を検討し、リスク算出結果を利用した落石対策の意思決定手法を検討した。

具体的には、図-2に示すとおり落石対策の意思決定の検討段階を2つに区分した。第一段階では、過去の落石災害データに基づいて、各路線の落石発生個数期待値を算出・比較することで、数多く存在する路線から優先的にリスク評価を実行する路線の抽出が可能となることを5章で論じた。第二段階では、抽出された路線を対象に、落石検査データ等をもとにリスク評価を実行し、岩塊の対策前リスク、対策後リスク、費用対効果を算出・比較することで、複数の岩塊に対する落石対策の優先順位や個々の岩塊に対する対策方法の決定が可能となることを6章で論じた。

4. 鉄道における落石災害の実態

落石による鉄道への被害の実態を明らかにするために、過去の落石災害データに基づいて、落石の大きさ、列車

運行への影響、落石の到達位置、列車への被害発生の有無について分析した。

使用したデータは、JR西日本管内で1996年から2008年に発生した157個（20路線）の落石災害である。ここで、発生源から落下した岩塊が線路付近で複数個に割れる場合もあるが、このような場合は1個として計上した。なお、一般的に鉄道では、列車運行に支障を与えた、あるいは支障を与える可能性があったものが落石災害として取り扱われるため、本研究に用いるデータには落下した岩塊が斜面途中で停止した事象は含まれていない。さらに、全落石個数157個のうち、落石の大きさが記録されているものが125個、列車運行への影響時分が記録されているものが94個であった。

落石の大きさの頻度分布を図-3に示す。同図より落石の大きさは50cm未満の頻度が最も高く約70%を占める。また、落石の大きさと落石が発生した際の列車運行への影響時分との関係を図-4に示す。同図より落石が発生した際の列車運行への影響（点検や応急対策に要した時分）は、落石の大きさが200cm未満であれば概ね300分程度以下であり、影響時分の平均値は105分であった。さらに、落石の到達位置の頻度分布を図-5に示す。同図より落石の到達位置は線路内に到達した頻度が最も高く約60%を占めることがわかった。

次に、鉄道への被害の事象を場合分けすると、図-6のように整理できる。同図より、列車が脱線した頻度は全落石個数157個のうちの1.9%であり、これは、線路内に到達した落石に列車が衝突した30個のうちの10.0%であった。つまり、落石が発生して線路内に到達しても列車の衝突やそれによる脱線等の大きな被害を受ける事象は比較的少ないといえる。

全落石個数157個のうち、乗務員が列車前方の落石を発見したか否かと列車衝突の有無とが明確である96個の

図-3 落石の大きさの頻度分布

図-4 落石の大きさと列車運行への影響時分との関係

図-5 落石の到達位置の頻度分布

図-6 落石による各事象の頻度分布

図-7 落石の発見の有無による衝突事象の頻度分布

図-8 落石と列車の衝突の有無に関する走行速度と視認距離との関係

落石を対象にそれぞれの頻度分布を示すと図-7のようになる。なお、同図より線路内の落石を発見できた頻度は62.5%、発見できなかった頻度は37.5%であった。また、落石に列車が衝突した頻度は、前方の落石を発見した際には10.1%、発見できなかった際には66.7%であった。

以上より、列車前方の落石を発見できた場合、つまり、視認距離が確保されている場合は落石に列車が衝突する事象の頻度より衝突しない事象の方が大きくなる。逆に、霧や降雨等の天候、あるいは夜間走行中のように乗務員の列車前方の視認性が悪く落石を発見できなかった場合には衝突する事象の頻度が大きくなることがわかった。したがって、線路内に到達した落石に走行中の列車が衝突するか否か、すなわち、落石による列車への被害発生の有無は、列車前方の視認距離 l_1 と列車の制動距離 l_2 が関係するといえる。

図-8は、図-7に示した96個の落石のうち、発生当時の列車の走行速度が明らかな46個を対象として落石と列車との衝突の有無を列車の走行速度と前方の視認距離との関係で表したものである。ここで、同図の破線は、視認距離 l_1 と列車の走行速度に応じた制動距離 l_2 とが等しい場合 ($l_1=l_2$) である。つまり、この破線より左上の領域

では視認距離に対して制動距離が短いために衝突しない可能性が高いことを、右下の領域では左上とは逆の理由で衝突する可能性が高いことを意味する。プロットした過去の落石災害データはこの傾向とほぼ一致することがわかる。なお、上記で示した値はいずれも条件付き確率であり、一つの岩塊から想定される衝突事象や脱線事象の被害発生確率は、6章で後述するように 10^6 から 10^4 のオーダーとなる。

5. 落石リスク評価優先路線の抽出

数多く存在する路線の全ての岩塊を対象として、落石リスクを計算するためには、詳細なデータをすべて入手する必要があるために現実的ではない。

そこで、本章では、過去の落石災害や定期的な検査で得られるデータをもとに、岩塊の落石発生確率や各路線の落石発生個数期待値を求める手法を提案し、計算事例により、数多く存在する路線から優先的にリスク評価を実行する路線を抽出する手法について検討する。

図-9 過去の落石発生箇所における危険度判定の頻度分布

(1) 落石発生個数期待値の算出手法

3章で述べたとおり，定期的な検査では表-1をもとに岩塊の発生源での不安定性評価（aaランクからsランクまでの5段階）と防護設備等の効果を考慮した線路への影響度評価（1から3までの3段階）の組み合わせにより，AAランクからSランクまでの5段階で危険度を判定している．本節では，この定期的な検査結果を利用して落石発生箇所の危険度判定から岩塊の落石発生確率を求めた．

使用したデータは前述の落石災害データと同様であり，落下した岩塊が線路に支障を与えた，あるいは，支障を与える可能性があったものである．危険度判定は，落石が発生する直前に実施した定期的な検査結果や斜面防災カルテ^{21), 22)}の点検情報を参考にした．

過去の落石発生箇所における発生源での危険度判定の頻度分布を図-9に示す．ここで，危険度aランクは岩塊の落下危険性が最も高い判定結果であるが，同図より落石発生確率はaランクが最も高く，次いで，bランク，cランクの順となることがわかる．すなわち，危険度の高い判定ほど落石発生頻度が高くなることがわかった．

そこで，路線に関係なく発生源での危険度判定により岩塊の落石発生確率が決定されるものと仮定して，過去の落石発生箇所の路線（20路線）の全線におけるすべての岩塊個数と，危険度判定ごとの過去の落石発生回数とから各危険度判定の落石発生確率を算出した．各危険度判定の落石発生確率を算出する条件を表-2に示す．同表より，各危険度判定の過去の落石発生回数を路線全体の岩塊個数と落石災害データの統計年数で除すことで，各危険度判定の年間あたりの落石発生確率を求めることができる．

上記の手法で求めた結果を表-3に示す．本研究で算出した統計値によると，年間あたりの岩塊の落石発生確率はaランクが $\alpha=2.12 \times 10^{-3}$ ，bランクが $\beta=4.14 \times 10^{-4}$ ，cランクが $\gamma=1.69 \times 10^{-4}$ となることがわかる．これらの危険度判定ごとの落石発生確率をもとに，路線ごとの年間あたりの落石発生個数期待値 P_{line} は式(1)により求められる．

表-2 各危険度判定の岩塊の落石発生確率の算出条件

発生源での危険度判定	a	b	c
過去の落石発生回数	113	22	9
各危険度判定の岩塊個数	2277	1657	157
路線全体の岩塊個数	4091		
落石災害の統計年数	13		

表-3 過去の統計値に基づく岩塊の落石発生確率の試算結果

発生源での危険度判定	a	b	c
各危険度判定の落石発生確率 (本研究で求めた統計値)	α	β	γ
	2.12×10^{-3}	4.14×10^{-4}	1.69×10^{-4}

$$P_{line} = \alpha \cdot N_{a,line} + \beta \cdot N_{b,line} + \gamma \cdot N_{c,line} \quad (1)$$

ここで， P_{line} ：路線の落石発生個数期待値

α ：aランクの落石発生確率

$N_{a,line}$ ：路線全体のaランクの岩塊個数

β ：bランクの落石発生確率

$N_{b,line}$ ：路線全体のbランクの岩塊個数

γ ：cランクの落石発生確率

$N_{c,line}$ ：路線全体のcランクの岩塊個数

すなわち，危険度判定ごとの落石発生確率と路線内の危険度判定ごとの岩塊個数を乗じて，すべてを合計することで路線の落石発生個数期待値 P_{line} が算出できる．

(2) 落石発生個数期待値の計算事例

本節では上記で示した手法をもとにケーススタディを行い，落石発生個数期待値算出手法を用いたリスク評価優先路線の抽出方法を概略的に説明する．

a) 計算条件

各路線の落石発生個数期待値 P_{line} を算出するための条件を図-2，表-4に示す．これらに示すとおり路線全体の岩塊個数や危険度判定ごとの岩塊個数が異なる3路線を対象とした．表-4より，岩塊個数は路線Ⅲ，路線Ⅰ，路線Ⅱの順に多く，岩塊の危険度判定ごとの個数もそれぞれ異なることがわかる．このように岩塊個数や岩塊の危険度判定ごとの個数が個別に定量化されていても，これらの条件のみで路線同士を相対的に比較することは難しい．

b) 落石発生個数期待値の算出

表-4をもとに算出した路線ごとの落石発生個数期待値 P_{line} の試算結果を図-10に示す．同図より，各路線の落石発生個数期待値 P_{line} は，路線Ⅱ，路線Ⅲ，路線Ⅰの順で大きくなることがわかる．ここで，路線Ⅱと路線Ⅲとを比較すると，路線Ⅱでは路線全体の岩塊個数は少ないが危険度判定はaランクが多く，路線Ⅲでは個数が多いが危険度判定はaランクよりbランクの方が多い．つまり，

表-4 各路線の落石発生個数期待値の算出条件 (過去)

パラメータ	路線I	路線II	路線III
路線全体の岩塊個数 N_{line}	180	120	200
危険度判定ごとの 岩塊個数	$N_{a,line}$	40	60
	$N_{b,line}$	60	20
	$N_{c,line}$	80	40
危険度判定ごとの 岩塊の落石発生確率	α	2.12×10^{-3}	
	β	4.14×10^{-4}	
	γ	1.69×10^{-4}	

※) $P_{line} = \alpha \cdot N_{a,line} + \beta \cdot N_{b,line} + \gamma \cdot N_{c,line}$

図-10 各路線の落石発生個数期待値の算出結果 (過去)

本ケーススタディでは路線全体の岩塊個数よりも岩塊の危険度に依存した結果となっている。

以上より、表-4に示したような路線全体の岩塊個数や危険度判定ごとの岩塊個数のみで路線同士を相対的に比較することは難しいが、図-10で示したような路線の落石発生個数期待値 P_{line} の算出結果は、路線としての落石リスクを概略的に評価する際の参考になる。

ここで、岩塊の危険度は、落石対策の実施により低くなり、未対策の場合には経年による風化・劣化の進行によって現在の危険度よりも高くなることが想定される。そのような場合にも、表-5、図-11に示した試算結果の一例のように、上記で示した手法をもとに最新の定期的な検査結果を反映させることで、過去と現在、あるいは将来の路線の落石発生個数期待値変化を評価することが可能となる。こうした評価は将来的な防災投資を検討する際の参考になると考える。

c) 落石リスク評価優先路線の抽出手法

図-12に落石リスク評価優先路線抽出フローを示す。このフローでは、まず過去の落石災害データや定期的な検査で得られるデータをもとに危険度判定ごとの岩塊の落石発生確率を算出し、この結果を利用して路線の落石発生個数期待値を算出する。そして、この値を路線同士相対的に比較し、この値が小さい路線は落石リスク評価を実行する優先順位が低く大きい路線は高いと判断する。すなわち、数多く存在する路線において、落石発生個数期待値の大きい路線から優先的に落石リスク評価を実行するものとし、抽出された路線の沿線に存在する岩塊を

表-5 各路線の落石発生個数期待値の算出条件 (現在)

パラメータ	路線I	路線II	路線III
路線全体の岩塊個数 N_{line}	180	90	200
危険度判定ごとの 岩塊個数	$N_{a,line}$	60	30
	$N_{b,line}$	80	30
	$N_{c,line}$	40	30
危険度判定ごとの 岩塊の落石発生確率	α	2.12×10^{-3}	
	β	4.14×10^{-4}	
	γ	1.69×10^{-4}	

※) $P_{line} = \alpha \cdot N_{a,line} + \beta \cdot N_{b,line} + \gamma \cdot N_{c,line}$

注) 対策実施後の落石発生確率は0と仮定

図-11 各路線の落石発生個数期待値の算出結果 (現在)

<優先路線の抽出結果>

図-12 落石リスク評価優先路線抽出フロー

対象として、後述するリスク評価を実行して落石対策の優先順位や対策方法を検討することになる。

上記で示したとおり、こうしたフローに沿って路線の落石発生個数期待値の算出結果を利用することで定量的な一つの指標をもとに、リスク評価優先路線を抽出することが可能であると考えられる。

図-13 落石による鉄道への被害発生の概念

図-14 落石発生時に想定される事象

6. 落石リスク評価

5章では、一定区間を有する路線ごとの落石発生個数期待値の算出手法とその結果の利用方法について論じた。

本章では、抽出された路線に存在する岩塊への防災投資の予算をより効率的に配分するために、個別の岩塊を対象に落石リスクを評価する手法を検討する。なお、前述では、落石発生個数期待値が最も大きい路線の岩塊を対象にリスク評価を実行することとしているが、落石対策の意思決定がより困難になると想定される場合への適用を考慮して、ここでは、第一段階で複数の路線が抽出されたものと仮定し、岩塊が位置する路線が異なる場合を検討する。

(1) 被害発生確率の算出

落石は斜面上方から岩塊が落下する現象であり、鉄道では落下した岩塊が線路を支障することで災害となる。岩塊が落下した際の被害には、線路内に到達した岩塊によって列車運行を支障する、岩塊に列車が衝突する、これにより脱線する、などの直接的な被害と岩塊の除去等の間接的な被害が挙げられる。

図-13の落石による鉄道への被害発生の概念をもとに設定したイベントツリー形式を図-14に示す。この図をもとに落石リスク R は式(2)により求められる。

$$R = \sum (P_i \times C_i) \quad (i=1 \sim 13) \quad (2)$$

ここで、 R : 落石リスク (円)

P_i : 事象 i の発生確率

C_i : 事象 i が生じた時の損失 (円)

すなわち、落石リスク R を落石により想定される損失期待値と定義する。そして信頼性解析²³⁾に準拠し、落石により想定される各事象の発生確率 P_i と事象ごとの被害発生時の損失 C_i を乗じること各事象のリスクを算出し、これらの値をすべて合計することで岩塊の落石リスク R が求められる。各事象の発生確率 P_i ($i=1 \sim 13$) は図-14をもとに以下の式で算出する。

$$P_i = P_a \times P_b \times P_c \times P_d \times P_e \times P_f \quad (3)$$

ここで、 P_a : 岩塊が落下する確率

P_b : 岩塊が線路に到達する確率

P_c : 岩塊が列車を直撃する確率

P_d : 列車前方の岩塊を発見する確率

P_e : 線路内の岩塊に列車が衝突する確率

P_f : 列車が脱線する確率

ただし、 $P_a \sim P_f$ には図-14に示したように2～3の場合分けがある。具体的には P_{a1} : 落下なし、 P_{a2} : 落下あり、 P_{b1} : 岩塊の線路到達なし (以下、到達無という)、 P_{b2} : 岩塊の線路通過あり (以下、通過有という)、 P_{b3} : 岩塊の線路停止あり (以下、停止有という)、 P_{c1} : 直撃なし、 P_{c2} : 直撃あり、 P_{d1} : 発見なし、 P_{d2} : 発見あり、 P_{e1} : 衝突なし、 P_{e2} : 衝突あり、 P_{f1} : 脱線なし、 P_{f2} : 脱線ありの場合の確率である。これらより、例えば、事象1の発生確率は $P_1 = P_{a1}$ 、事象2の発生確率は $P_2 = P_{a2} \times P_{b1}$ 、事象3の発生確率は $P_3 = P_{a2} \times P_{b2} \times P_{c1}$ と算出することができる。

なお、1章で述べたとおり、落石の発生の予測は困難で、鉄道で行われている降雨時運転規制により落石災害を未然に防止することは難しいとされていることから、本研究では運転規制による場合分けは除外した。

以下、式(3)の各確率を算出する方法について述べる。

岩塊落下確率 P_{a2} の算出方法としては、1) 表-3に示す

表-6 危険度判定ごとの対策の考え方とこれに基づく岩塊落下確率の設定例

(a) 対策の考え方の例		(b) 岩塊落下確率の設定例	
危険度判定	対策実施時期の考え方	危険度判定	岩塊落下確率 P_{a2}
a1	落石の危険性が高く 1年から2年以内に対策を要す	a1	0.5 ~ 1
a2	落石の危険性があり 2年から4年以内に計画的に対策を要す	a2	0.25 ~ 0.5
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	b	0.02 ~ 0.25

図-15 落石シミュレーションの例

図-16 走行中の列車に落石が直撃する確率の考え方

図-17 走行中の列車が落石に衝突する確率の考え方

ような過去の落石災害データの統計値から求める方法、
2) 鉄道事業者が実施する定期的な検査結果を利用して、危険度判定ごとの対策計画の考え方をもとに求める方法、
3) 経年による岩塊の風化・劣化の進行をモデル化して求める方法などが挙げられる。ここで、上記1)は、様々な仮定に基づいて確率等を算定する方法よりも現実に即した結果になると推察される。しかし、統計値を用いると図-14に示した線路到達確率までを含めた落石発生確率となる。個別の岩塊を対象として落石リスクを評価する場合は、発生源での危険度判定が同じ場合でも斜面の状況や線路までの離隔距離などが違う場合には、異なる発生確率として評価するのが望ましいと判断した。また上記3)は現在の技術的知見において岩塊の風化・劣化モデルを作成するにはいたっていない。このため、本研究では、上記2)の方法を採用した。

表-6は危険度判定ごとの対策の考え方とこれに基づく岩塊落下確率 P_{a2} の設定例である。

例えば、ある鉄道事業者では危険度判定がa1の岩塊に対して1年から2年以内に対策を要するという考え方で落石対策の計画を実施しているとする。この場合の岩塊落下確率は対策を実施するまでの期間（ここでは2年とする）に岩塊が落下すると仮定すれば0.5と設定できる。

この考え方で求める岩塊落下確率 P_{a2} 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落石対策の優先順位を計画することを目的に落石リスクを概略的に求める場合には、危険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、ここで述べている危険度判定は、岩塊が落下して線路に到達する可能性までを含めた判定ではなく、岩塊が落下するか否かのみに着目していることに注意を要す。その際、鉄道沿線での岩塊の発生源における危険度判定方法は、鉄道構造物維持管理標準（土構造物）²⁰⁾が参考になる。

岩塊の線路到達確率 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。この方法としては、図-15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基づいて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、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} の各々を算出することができる。

列車への被害形態には、1) 走行中列車に岩塊が直撃する場合と、2) 岩塊に列車が衝突する場合とがあり、それぞれに、列車が1) 脱線する場合と、2) 脱線しない場合とがある。

岩塊が列車を直撃する確率 P_{a2} は、過去の落石落下実験で得られた落石の拡がり²⁰⁾を参考に最大45°と仮定し、図-16に示すように対象岩塊から落下が想定される区間（以下、落石危険区間という）を通過する1日における始発列車から最終列車までの時間を算出し、年間あたりの累積時間割合を求める。すなわち式(4)、式(5)により算出できる。

図-18 落石リスク算出フロー

$$P_{c2} = \frac{n \times t}{8760} \quad (4)$$

$$t = \frac{L + 2ab}{v} \quad (5)$$

ここで、 n ：落石危険区間の1年間通過本数（本年）

t ：落石危険区間の1列車通過時間（時間）

L ：落石危険区間（m）

a ：車両の長さ（m）

b ：車両連結数（両）

v ：走行速度（km/h）

つまり、岩塊が列車を直撃する確率 P_{c2} は落石危険区間を通過する列車本数が多く、走行速度が小さいほど大きくなる。

岩塊を発見する確率 P_d は、現地で前方の視認距離 l_1 を確認する方法があり、視認性が良いと判断できる場合は発見する確率を1、視認性が悪い場合は0と設定することができる。また、4章での過去の落石災害データの統計値を用いて設定する方法がある。

岩塊に列車が衝突する確率 P_e は岩塊を発見する確率 P_d と関係があり、視認距離 l_1 を現地で確認するか、図-17に示すように線路の曲線半径から式(6)により求め、列車の走行速度から式(7)により算出した列車の制動距離 l_2 と比較することで設定できる。

$$l_1 = 2r \cos^{-1} \left(\frac{1 - W_L}{r} \right) \quad (6)$$

$$l_2 = \frac{v^2}{7.2\beta} \quad (7)$$

ここで、 l_1 ：前方の視認距離（m）

l_2 ：列車の制動距離（m）

r ：線路の曲線半径（m）

W_L ：線路中心から斜面までの距離（m）

β ：減速度（km/h/s）

つまり、岩塊に列車が衝突する確率 P_{e2} は、前方の視認距離が長く走行速度が小さいほど減少するため、 $l_1 > l_2$ のときに0となり、 $l_1 < l_2$ のときに1となる。

脱線する確率 P_f は、4章での過去の落石災害データの統計値を用いることで設定できる。

(2) 被害発生時の損失項目と落石リスクの算出手法

斜面上の岩塊の落下により想定される事象ごとの被害発生時の損失 C_i （円）（ $i=1 \sim 13$ ）を求め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るが、これらは評価対象とする箇所によって異なることが想定される。

このため、実際に本研究を適用する場合には評価対象の岩塊が位置する路線の旅客人数、営業収益、列車本数、線路の曲線半径および列車の走行速度などを考慮して、鉄道事業者がリスク評価を実行する際に設定することとなる。ここでは例として、応急復旧費 C_a 、社会的影響 C_b 、営業損失費 C_c の3項目とし、各事象に該当する損失項目を図-18に示すとおり設定した。被害発生時の損失 C_i （ $i=1 \sim 13$ ）は式(8)により算出できる。

$$C_i = C_a + C_b + C_c \quad (8)$$

ここで、 C_a ：応急復旧費（円）

C_b ：社会的影響（円）

C_c ：営業損失費（円）

落石により想定される事象ごとに該当する損失項目と式(2)により落石リスクを算出するフローを図-18に示す。

ここで、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が異なる。具体的には後述するが、例えば線路上に到達した岩塊に列車が衝突するが脱線はしない事象7と衝突して脱線する事象8の応急復旧費 C_a では脱線に関する費用分のみ事象8の方が大きくなる。

図-19 ケーススタディにおける対象岩塊

以上により、落石リスク R は、図-18に示すとおり岩塊落下確率 P_a 、線路到達確率 P_b 、直撃確率 P_c 、発見確率 P_d 、衝突確率 P_e 、脱線確率 P_f から各事象の発生確率 P_i を求め、さらに、応急復旧費 C_a 、社会的影響 C_b 、営業損失費 C_c 等を設定することで事象ごとの被害発生時の損失 C_i を算出し、式(2)により計算できる。

(3) 落石リスクの計算事例

本節では仮定した条件のもとケーススタディを実施し、落石リスク算出手法を利用した落石対策の意思決定方法を概略的に説明する。なお、以降では、対策を施す前のリスクを対策前リスク R 、対策を施工した後のリスクを対策後リスク R' と呼ぶ。

a) 計算条件

図-2、図-19に示すとおり、岩塊の大きさは直径1.0mとしていずれの岩塊も同じ大きさであると仮定し、岩塊の発生源における危険度判定、斜面勾配、岩塊の落下高さ、旅客人数、営業収益、列車本数、線路の曲線半径、列車の走行速度がそれぞれ異なる3路線に存在する3岩塊を対象とした。図-19より、岩塊の危険度判定や旅客人数などが個別に定量化されていてもそれぞれが別々の指標であるため、これらの条件をもとに落石対策の優先順位や対策方法を決定することは難しい。

各事象の発生確率 P_i を算出するための条件を表-7に示す。岩塊落下確率 P_a は、表-6に示した定期的な検査による危険度判定による方法で算出した。具体的には、危険度判定a1の場合は2年以内、a2の場合は4年以内、bの場合は50年以内に対策を要すと仮定し、岩塊落下確率 P_a をa1では0.50、a2では0.25、bでは0.02とした。

岩塊の線路到達確率 P_b は図-19に示した岩塊の大きさ、斜面勾配、岩塊の落下高さの条件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-7に示すとおり、岩塊が線路で停止する確率 P_{b3} は岩塊が他の2つと比較して明らかに大きい結果となった。

岩塊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式(4)、式(5)により求めた。具体的には累積時間割合は列車本数が多いほど大きくなり、旅客人数や営業収益が多い、路線I、路線II、路線IIIの順に0.016、0.008、0.001となった。

岩塊を発見する確率 P_d は図-7に示した過去の統計値をもとに0.625とした。

線路内の岩塊に列車が衝突する確率 P_e は岩塊を発見できない場合とできる場合とで設定方法を区別し、前者の場合は図-7に示した過去の統計値をもとに0.667とした。後者の場合は図-19に示した曲線半径、走行速度の条件をもとに、式(6)、式(7)により前方の視認距離 l_1 と列車の制動距離 l_2 を算出し、 $l_1 > l_2$ (図-8の左上領域) の場合は0、 $l_1 < l_2$ (図-8の右下領域) の場合は1とした。

線路内に到達した岩塊に列車が衝突して脱線する確率 P_f は、図-6に示した過去の統計値を参考に0.10とした。なお、直撃して脱線する確率 P_{f1} は過去の落石災害事例がなかったため過去の統計値からその値を設定することはできないが、本ケーススタディでは岩塊に列車が衝突して脱線する確率と同等として0.10と仮定した。ただし、ここで設定する値はリスクに大きな影響を与えるため実際に実務で実行する際は慎重に設定する必要がある。

設定した事象ごとの被害発生時の損失を表-8に示す。なお、同表は図-18に示した事象ごとの応急復旧費 C_a 、社会的影響 C_b 、営業損失費 C_c を設定し、これらの費用を合計することで求めたものである。

ここで、応急復旧費 C_a は岩塊が線路まで到達した際の撤去費用や土木・軌道・電気設備などが破損した場合の費用を過去の統計値を参考にした。なお、岩塊が列車を直撃、または線路上の岩塊に列車が衝突する場合の車両の復旧費用も過去の統計値を参考にした。社会的影響 C_b は図-19をもとに1列車あたりの旅客人数を考慮して脱線する場合は脱線しない場合の5倍になると仮定した。営業損失費 C_c は図-4に示した過去の統計値を参考に落石

表-7 各事象の発生確率の算出条件

パラメータ		岩塊i	岩塊ii	岩塊iii
岩塊落下確率	P_{a2}	0.02	0.25	0.50
線路到達確率	P_{b1}	0.62	0.84	0.92
	P_{b2}	0.08	0.10	0.06
	P_{b3}	0.30	0.06	0.02
直撃する確率	P_{c2}	0.016	0.008	0.001
発見する確率	P_{d2}	0.625		
衝突する確率 (上段:発見無の場合) (下段:発見有の場合)	P_{e2}	0.667		
		0.0 ($l_1 > l_2$)	1.0 ($l_1 < l_2$)	0.0 ($l_1 > l_2$)
脱線する確率	P_{f2}	0.10		

※) $P_i = P_a \times P_b \times P_c \times P_d \times P_e \times P_f$ (事象 $i=1 \sim 13$)

表-9 各事象の発生確率の算出結果

事象 No	各事象の発生確率 P_i		
	岩塊i	岩塊ii	岩塊iii
事象 1	9.80×10^{-1}	7.50×10^{-1}	5.00×10^{-1}
事象 2	1.24×10^{-2}	2.10×10^{-1}	4.60×10^{-1}
事象 3	1.57×10^{-3}	2.48×10^{-2}	3.00×10^{-2}
事象 4	2.35×10^{-5}	1.80×10^{-4}	3.90×10^{-5}
事象 5	2.61×10^{-6}	2.00×10^{-5}	4.33×10^{-6}
事象 6	7.37×10^{-4}	1.86×10^{-3}	1.25×10^{-3}
事象 7	1.33×10^{-3}	3.35×10^{-3}	2.25×10^{-3}
事象 8	1.48×10^{-4}	3.72×10^{-4}	2.50×10^{-4}
事象 9	3.69×10^{-3}	0.00	6.24×10^{-3}
事象10	0.00	8.37×10^{-3}	0.00
事象11	0.00	9.30×10^{-4}	0.00
事象12	8.82×10^{-5}	1.08×10^{-4}	1.30×10^{-5}
事象13	9.80×10^{-6}	1.20×10^{-5}	1.44×10^{-6}

による列車運行への影響時分（5時間）を想定して、**図-19**をもとに各路線の1時間あたり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倍の影響時分になると仮定した。

こうして仮定した条件のもと、例えば岩塊iの事象7の損失合計は、 $C_7 = 1,500 + 10,000 + 1,000 = 12,500$ （万円）、事象8の損失合計は、 $C_8 = 1,500 + 50,000 + 3,000 = 54,500$ （万円）と設定した。なお、ここで設定する値はリスクに大きな影響を与えるため、実際に実務で実行する際は慎重に設定する必要がある。

b) 対策前の落石リスク算出

各岩塊の各事象の発生確率 P_i と対策前リスク R の試算結果を表-9、表-10に示す。まず、各事象の発生確率は、岩塊の落下により被害が発生しない事象1と事象2を除くとすべての岩塊において事象3、事象6、事象7、事象9の発生確率が他の事象と比較すると大きい結果となり、先の**図-6**での被害形態とも一致することがわかる。さらに、被害が重大となる事象5、事象8、事象11、事象13の発生確率は 10^{-6} から 10^{-4} のオーダーとなった。

表-8 設定した各事象の損失

事象 No	被害発生時の損失合計 C_i （万円）		
	岩塊i	岩塊ii	岩塊iii
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	1,750	850	760
事象10	12,500	4,100	2,510
事象11	54,500	14,300	6,530
事象12	14,500	4,300	2,530
事象13	54,500	14,300	6,530

表-10 対策前リスクの算出結果

事象 No	各事象のリスク R_i とリスク合計（万円）		
	岩塊i	岩塊ii	岩塊iii
事象 1	0.0	0.0	0.0
事象 2	0.0	0.0	0.0
事象 3	1.2	18.6	22.5
事象 4	0.3	0.8	0.1
事象 5	0.1	0.3	0.0
事象 6	1.3	1.6	0.9
事象 7	16.6	13.7	5.6
事象 8	8.0	5.3	1.6
事象 9	6.5	0.0	4.7
事象10	0.0	34.3	0.0
事象11	0.0	13.3	0.0
事象12	1.3	0.5	0.0
事象13	0.5	0.2	0.0
リスク合計	35.9	88.5	35.6

次に、対策前リスク R は、表-10に示すように岩塊ii、岩塊i、岩塊iiiの順で大きくなるのがわかる。ここで、岩塊iと岩塊iiiとを比較すると、岩塊iの方が岩塊落下確率 P_{a2} は小さいが対策前リスク R は大きい。これは岩塊iは線路で停止する確率 P_{b3} が大きく、その結果として事象6から事象13の発生確率が岩塊iiiと同じ程度となり、さらに岩塊iの被害発生時の損失が岩塊iiiよりも大きいためである。

以上により、**図-19**に示したような個別に評価された別々の指標をもとに落石対策の優先順位を判断することは困難であるが、表-10のような対策前リスク R の結果は落石対策の意思決定をする際の参考になると考える。

c) 対策後の落石リスク算出

対策前リスク R がほかの2つより大きい結果となった岩塊iiを一例として対策後リスク R' を算出する。なお、ここでの対策案は、**図-20**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。また、各種の対策により期待できる効果を考慮して対策後の発生確率 P'_i を以下のとおり算出した。

図-20 ケーススタディにおける対策案

図-21 対策後の落石シミュレーションの例（岩塊 ii）

図-22 対策後の各事象の発生確率の算出結果（岩塊 ii）

表-11 対策後リスクの算出結果（岩塊 ii）

事象 No	対策後の各事象のリスク R_i' とリスク合計（万円）			
	対策案a	対策案b	対策案c	ソフト対策
事象 1	0.0	0.0	0.0	0.0
事象 2	0.0	0.0	0.0	0.0
事象 3	0.0	1.9	0.0	18.2
事象 4	0.0	0.1	0.0	2.8
事象 5	0.0	0.0	0.0	1.0
事象 6	0.0	0.3	0.0	0.0
事象 7	0.0	2.3	0.0	0.0
事象 8	0.0	0.9	0.0	0.0
事象 9	0.0	0.0	4.2	12.4
事象 10	0.0	5.7	0.0	0.0
事象 11	0.0	2.2	0.0	0.0
事象 12	0.0	0.1	0.2	1.7
事象 13	0.0	0.0	0.1	0.6
リスク合計	0.0	13.4	4.4	36.7

対策案aは、岩塊が発生源の位置から落下することを防止する効果があるため、対策後の岩塊落下確率 P_{a2}' は0になると仮定した。

対策案bは、岩塊を斜面の途中で捕捉する効果があるため、図-21に示すように、落石止柵の効果を考慮した落石シミュレーションを実施し、対策後の線路到達確率 P_b' を算出した。なお、対策後は、対策前よりも岩塊の線路近傍に到達する確率は減少する。

対策案cは、岩塊を線路際で捕捉するとともに、仮に岩塊が線路に到達した場合にも検知装置が作動することによってこの位置への列車の進入を防止する効果がある。そこで、対策案bと同様に、対策の効果を考慮した落石シミュレーションを実施し、対策後の線路到達確率 P_c' を算出した。また、対策後の線路上の岩塊に列車が衝突する確率 P_{c2}' は4章での考察をもとに0になると仮定した。

上記の条件のもとに算出した対策後リスク R' と対策前リスク R の差をリスク低減効果 $\Delta B (=R-R')$ として求めた。また、リスク低減効果 ΔB を施工費用 C_T (円) で除した値を費用対効果 $X (= \Delta B/C_T)$ と定義して求めた。

つまり、リスク低減効果 ΔB が大きいほど効果的で費用対効果 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することができる。

対策後の各事象の発生確率 P_i' と対策後リスク R' の試算結果を図-22、表-11、図-23に示す。図-22より、対策案aでは事象1、対策案bでは事象2、対策案cでは事象2と事象9の発生確率が増加したことにより、被害が重大となる事象（事象5、事象8、事象11、事象13）の発生確率が減少している。この結果、表-11に示すようにすべての対策案において対策前リスク R が低減される結果となることがわかる。また、図-23により、3種類の対策案のうちリスク低減効果 ΔB が最も大きい対策は対策案aとなり、費用対効果 X が最も大きくなる効率的な対策は対策案bとなることがわかる。

次に、鉄道沿線の落石危険区間に対するソフト対策として実施している速度規制^{25), 26)}のリスク低減効果を検証する。なお、鈴木²⁷⁾は列車運行の安全性に対して、速度規制による列車脱線事故防止の効果は大きいと報告している。先の図-22、表-11のソフト対策は図-19で仮定した

図-23 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(岩塊ii)

表-12 ケーススタディ結果一覧

岩塊名称	岩塊i			岩塊ii			岩塊iii		
対策前リスク R (万円)	35.9			88.5			35.6		
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
対策後リスク R' (万円)	0.0	1.3	0.8	0.0	13.4	4.4	0.0	10.3	3.8
リスク低減効果 ΔB	35.9	34.6	35.1	88.5	75.1	84.1	35.6	25.3	31.8
施工費用 C_T (万円)	150	50	375	300	100	750	225	75	565
費用対効果 X	0.24	0.69	0.09	0.30	0.75	0.11	0.16	0.34	0.06

走行速度90km/hを25km/hに規制した場合の試算結果である。図-22より、各事象の発生確率は速度を低下することで岩塊が走行中の列車を直撃する事象(事象4, 事象5, 事象12, 事象13)は若干増加するが、衝突する事象(事象7, 事象8, 事象10, 事象11)がそれよりも大幅に低減されることがわかる。また、表-11により、対策後リスク R' は対策前リスク R の41.5%となり6割程度のリスク低減効果が得られている。すなわちソフト対策は落石発生時の列車運行の安全性に対して一定の効果があるといえる。なお、速度規制にはこうした被害軽減の効果がある一方で列車運行の定時性を低下させる。そのため、一時的には効率的な対策となるが、ソフト対策の期間が長期になる場合は速度規制により生じる損失などの間接的な費用が発生する可能性があることに注意を要す。

d) 落石対策の意思決定手法

上記で算出した落石リスクの試算結果一覧を表-12に整理した。ここでは、この結果をもとにリスク算出結果を用いた落石対策の意思決定手法の考え方について考察する。

対策すべき岩塊の優先順位を決定する考え方としては、1-1) 対策前リスク R の高い順に対策を実施、1-2) 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。

表-12により、上記1-1) にもとづく対策の優先順位は、岩塊ii, 岩塊i, 岩塊iiiの順となり、本ケーススタディでは上記1-2) の場合も同様の順となる。このようにリスク算出結果を利用することで定量的なひとつの指標

で対策の優先順位が決定できる。

一方、対策すべき岩塊が決定した後、最適な対策方法を決定する考え方としては、2-1) リスク低減効果 ΔB が高い対策とする、2-2) 費用対効果 X の高い対策とすることが挙げられる。本試算結果ではどの岩塊においても上記2-1) の考え方では対策案a, 上記2-2) の考え方では対策案bと決定できる。

落石対策の優先順位決定や対策方法決定の考え方は、評価対象の岩塊が位置する路線の特性などにより異なることが想定される。本研究では、図-24に示すとおり、優先順位決定の考え方を1-1), 対策方法決定の考え方を2-2) とした場合を一例に落石対策意思決定のフローを検討した。このフローでは、まず定期的な検査などにより抽出された落石対策対象岩塊の各事象の発生確率 P_i を求め、被害が重大となる事象(事象5, 事象8, 事象11, 事象13)の値が大きい岩塊にはソフト対策の検討を実施する。また、必要により、ソフト対策後の各事象の発生確率 P'_i を再度算出し、この値が大きい岩塊への対策は特に重要であると判断し、対策案の検討を実施する。

次に、対策前リスク R を算出する。そして、岩塊同士を相対的に比較し、対策前リスク R の大きい順に優先度が高いものと判断する。

落石対策が必要と判断された岩塊については、各種の対策後リスク R' を算出する。そして、対策後リスク R' 、対策前リスク R 、施工費用 C_T とから費用対効果 X を求め、この値が大きくなる対策案を講じることがリスク低減策

として効率的であると判断する。なお、いずれの対策案も費用対効果 X が小さい場合には、対策後の残存リスクを評価したうえでソフト対策の実施の有無を検討する。

上記で示したとおり、こうしたフローに沿って、落石リスクの算出結果を利用することで、これまでは岩塊の危険度や路線の重要度などをもとに、経験的に決定していた落石対策の意思を、定量的なひとつの指標をもとに決定することが可能であると考える。

7. 結論

本研究では、鉄道沿線斜面において発生が懸念される落石やそれが列車運行に与える影響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落石対策の意思を決定する手法を提案することを目的として、路線や岩塊単位で落石リスクを定量的に算出する手法とリスク算出結果を用いた落石対策の意思決定手法を検討した。この結果、以下のような結論を得た。

- 1) 過去の落石災害データをもとに落石による鉄道への被害を事象ごとに場合分けし、列車への被害発生の可能性を統計値から求める手法を示した。
- 2) 過去の落石災害データをもとに岩塊発生源における危険度判定ごとの落石発生確率を求める手法を提案した。また、路線の落石発生個数期待値を算出し、この値を路線同士相対的に比較することで、リスク評価優先路線を抽出する際の参考となることを計算事例により示唆した。
- 3) 落石検査データをもとに岩塊発生源での危険度判定を考慮した岩塊落下確率、線路到達確率、直撃確率、発見確率、衝突確率、脱線確率から計算される事象ごとの発生確率を算出し、これと上記の事象が発生した際の応急復旧費、社会的影響、営業損失費とから落石リスクを算出する手法を提案した。
- 4) 落石対策の対象となる岩塊の対策前リスクを求め、この値を岩塊同士相対的に比較することで、対策の優先順位を決定する際の参考となることを計算事例により示唆した。
- 5) 対策後リスクと対策前リスクとを比較して落石対策のリスク低減効果や費用対効果を求めることで対策の方法を決定する際の参考となることを計算事例により示唆した。
- 6) これまで岩塊の危険度や路線の重要度などの別々の指標をもとに経験的に決定していた落石対策の意思を、リスク算出結果を用いて定量的に決定することを可能とするフローを提案した。

＜落石リスク評価結果＞

図-24 落石対策意思決定フロー

ここで、落石対策対象路線や岩塊を選定して落石対策を実施するまでの一連の流れと本研究の関連図を図-25に示す。同図に示すとおり、過去の落石災害データなどの入力条件を収集し、危険度判定ごとの落石発生確率の算出結果をもとに路線の落石発生個数期待値を算出する。また、岩塊、斜面、路線条件などの入力条件を収集し、岩塊落下確率、線路到達確率、列車被害発生確率などの算出結果を踏まえて落石リスクを算出し、対策前リスク、対策後リスク、費用対効果を比較する。こうした本研究の成果を利用することで定量的な指標をもとに落石対策強化路線を抽出することができ、限られた予算を用いて効率的な落石対策が実施可能になる。なお、図-25に示した入力条件は資料収集や定期的な検査により比較的容易に入手できる。したがって、鉄道沿線に数多くの岩塊が存在する場合に本研究成果の適用は有用である。

今後、本研究で提案する手法を落石対策の具体的な計画に利用するためには、落石災害データの蓄積や検査精度の向上および事象ごとに設定する損失の精度をより高める必要があると考える。また、鉄道沿線斜面では降雨による斜面崩壊等も多く発生しており、防災対策をより効率的に実施するためには、落石対策のみならず降雨による斜面崩壊対策も同時に評価することが重要であり、この際は布川ら¹⁶⁾が提案している研究成果などを参考に検討する必要がある。

図-25 落石対策対象路線や岩塊を選定して落石対策を実施するまでの一連の流れと本研究の関連図

参考文献

- 公益財団法人 鉄道総合技術研究所: 落石対策技術マニュアル, p.7, 1999.3
- 社団法人 地盤工学会: 地震と豪雨・洪水による地盤災害を防ぐために—地盤工学からの提言—, 2007 年度会長特別委員会, p.36, 2009.8
- 大津宏康, 大西有三, 水谷守: 高速道路に近接する斜面を対象とした自然災害に対するリスクマネジメント手法に関する提案, 土木学会論文集, No. 658/VI-48, pp. 245-254, 2000.9
- 榎明潔: 降雨時の斜面表層崩壊, 土と基礎, Vol. 47, No. 5, pp. 17-20, 1999.
- 大津宏康, 大西有三, 高橋健二, Srisin Janrungautai: 貯留型タンクモデル法による地下水挙動を考慮した斜面リスク評価に関する研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会, IV-346, pp. 691-692, 2003.
- 沖村孝, 鳥居宣之, 萩原貞宏, 吉田正樹: リスクマネジメント理論を用いた道路のり面の危険度評価手法に関する研究, 建設工学研究所論文報告集, 第 43-A 号, pp. 51-64, 2001.11
- 沖村孝: 山腹表層崩壊発生位置予知に関する一研究, 土木学会論文集, No. 331, pp. 113-120, 1983.
- 沖村孝, 市川龍平: 数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, 土木学会論文集, No. 358/III-3, pp. 69-75, 1985.
- 田中衛, 恒岡信幸, 三木博史: 道路斜面災害リスク評価法について, 土木技術資料, 44-12, pp. 50-55, 2002.
- 関口信康, 大津宏康, 伊豆隆太郎: 道路斜面防災マネジメントにおける事業優先度評価手法に関する研究, 土木学会論文集 F4, Vol. 67, No. 4, pp. I_121-I_130, 2011.
- 岡田勝也, 杉山友康, 村石尚, 野口達雄: 統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価手法, 土木学会論文集, No. 448/III-19, pp. 25-34, 1992.
- Okada, K., Sugiyama, T., Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M.: Statistical risk estimating method for rainfall on surface collapse of a cut slope, *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 3, pp. 49-58, 1994.
- Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M.: Statistical rainfall risk estimating method for a deep collapse of a cut slope, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 4, pp. 37-48, 1995.
- 杉山友康, 岡田勝也, 秋山保行, 村石尚, 奈良利孝: 鉄道盛土の限界雨量に及ぼす防護工の効果, 土木学会論文集, No. 644/IV-46, pp. 161-171, 2000.
- 布川修, 杉山友康, 太田直之, 畑明仁, 堀倫裕, 亀村勝美, 岡田勝也: 鉄道の降雨時運転規制を考慮した斜面崩壊の発生頻度期待値算出方法, 土木学会論文集 C, Vol. 66, No. 1, pp. 78-88, 2010.
- 布川修, 杉山友康, 森泰樹, 畑明仁: 鉄道沿線斜面降雨時リスク評価に基づく防災対策の意思決定方法, 土木学会論文集 C, Vol. 67, No. 1, pp. 160-173, 2011.
- 大津宏康, 大西有三, 西山哲, 竹山雄一郎: 岩盤崩落による社会経済的損失を考慮したリスク評価に関する研究, 土木学会論文集, No. 708/III-59, pp. 187-198, 2002.6
- 高木朗義, 本城勇介, 倉内文孝, 浅野憲雄, 原隆史, 沢田和秀, 森口周二, 北浦康嗣, 八嶋厚: 岐阜県飛騨圏域を対象とした道路斜面のリスクマネジメント～落石災害を対象として～, 土木学会論文集 F4, Vol. 68, No. 2, pp. 109-122, 2012.
- 深田隆弘, 森泰樹, 澁谷啓: 線路への影響評価に基づく落石リスクマップの作成手法, 土木学会論文集 C, Vol. 68, No. 1, pp. 199-212, 2012.
- 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)附属資料 10, pp. 116-128, 丸善, 2007.
- 細岡生也, 村田一郎, 杉山友康, 沖村孝: 鉄道における土構造物管理のためのカルテの考案, 第 61 回土

- 木学会年次学術講演会, IV-336, pp. 669-670, 2006.9
- 22) 高馬太一, 泉並良二, 深田隆弘, 森泰樹, 荒巻智: 土構造物維持管理のための斜面防災カルテの利活用, 第 47 回地盤工学研究発表会, C-09, pp. 5-6, 2012.7
- 23) Benjamin, J. R. and Cornei, A. A.: *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill, pp.578-580, 1970.
- 24) 社団法人 日本道路協会: 落石対策便覧, 資料編, 丸善, pp. 266-268, 2004.3
- 25) 細岡生也, 山根伸穂: JR 西日本におけるローカル線落石対策に関する取組み, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 43, No. 2, pp. 27-29, 2005.2
- 26) 高馬太一, 永田充則, 大間秀樹: 三江線の落石斜面の維持管理, 第 61 回土木学会年次学術講演会, IV-371, pp. 739-740, 2006.9
- 27) 鈴木博人: 降雨時の列車運行の安全性向上に向けた考察ー降雨に起因した列車脱線事故の分析ー, 第 18 回鉄道工学シンポジウム, pp. 141-147, 2014.7
- (2015. 3. 31 受付)

A METHOD OF DETERMINING PRIORITIES FOR INVESTMENT IN DISASTER PREVENTION FOR ROCKFALL FROM SLOPES

Taichi KOHMA, Tomoyasu SUGIYAMA, Osamu NUNOKAWA,
Makoto NISHIGAKI, Satoshi NISHIYAMA and Yoshinobu OSHIMA

To effectively mitigate the rockfalls from the slopes neighboring railway lines, the risk of individual rock should be quantified with consideration of its stability and damage cost, and then the risk-based counter action should be done. However, assessing all the rocks in all the slopes along with the lines is quite difficult due to the restriction of budget and human resources. Therefore, in this study, two-step risk assessment was proposed: first, the target lines to be assessed were preliminarily selected according to the expected number of rockfalls which can be calculated by previous data. Then the risk of individual rockfall in the target lines was calculated by multiplying the damage cost and the collision probability between the rock and train. Finally, optimum counter action was determined according to the risk reducing effect or its benefit by cost.