

# 斜面の降雨被害発生確率による防災投資の意思決定支援手法の研究

防災技術研究部 地盤防災  
研究室長 杉山 友康

## 1. はじめに

鉄道では、降雨により沿線で発生する斜面災害から列車の安全を確保するために、のり面防護工などにより斜面の耐力を向上させるハード対策や、雨量を指標として列車の運転を規制するソフト対策が行われている。鉄道事業者の多くは、斜面の崩壊危険度を一つの指標として、これに線区の特性など（重要度や運転規制値）から経験的に対策の優先度を判断しているのが実情である。

一方で、近年自然災害に対する危険性を単に構造物等の耐力で評価するのみならず、被害を受けた場合の損失を考慮して災害危険度を評価することの重要性が指摘されるようになってきた。そこで、降雨時の斜面崩壊に伴う被害をリスクとして捉え、被害発生確率を算定し、被害に応じた損失から斜面の危険度を評価する斜面災害リスク評価手法について研究を進めてきた。ここでは、斜面災害リスクを算定し、線区の特性が異なる斜面に対しても防災投資を効率的に判断することに資する支援手法について紹介する。

## 2. 研究内容

### 2.1 斜面災害リスクの定義

輸送人員や列車本数などの性特が異なる線区にそれぞれ斜面が存在する場合、個々の斜面の崩壊危険度と線区の特性を同時に考慮して定量的に評価することは難しい。そこで、これを定量的な指標に基づいて評価するために、斜面災害に対する危険度を旅客数、斜面の崩壊危険度、崩壊時の規模などを考慮して算出するリスク評価手法を用いて検討した。なお、本研究では、鉄道沿線で発生する斜面災害のうち降雨時に鉄道管理用地内である盛土、切土（以下、斜面という）が崩壊することによる土砂災害を対象とする。

個々の斜面におけるリスク $R_{isk}$ （円／年）は式（1）に示すように、降雨によって被害が発生する年間あたりの頻度 $P$ （以下、被害発生頻度という）と被害が発生することで生じるコスト（損失） $C$ を乗じたもの、すなわち、斜面崩壊を対象として被害が発生することにより想定される年間あたりの損失額と定義する。ただし、斜面が崩壊しなくても規制によって運転が停止されていることによる損失もこれに含めるものとする。

$$R_{isk} = P \times C \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$P = P' \times n \quad \dots \dots \dots (2)$$

$R_{isk}$ ：斜面災害に対するリスク（円／年）

$P$ ：被害発生頻度（回／年）

$C$ ：被害によるコスト（損失）（円／回）

$P'$ ：被害発生確率（例えば斜面崩壊確率）

$n$ ：降雨の年間発生頻度（回／年）

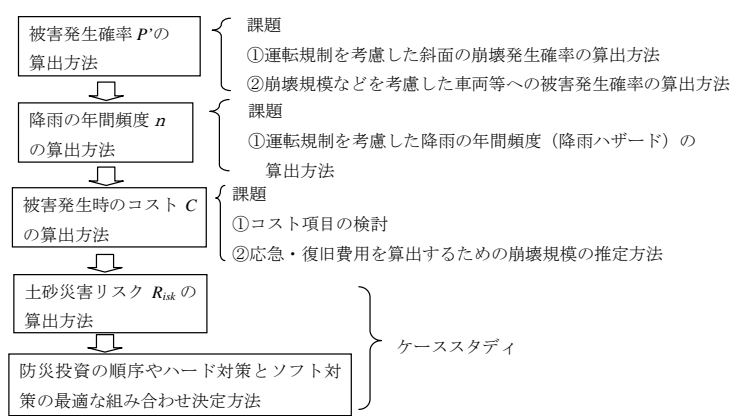


図1 研究フローと課題

### 2.2 研究フロー

本研究のフローと研究課題とした項目を図1に示す。この図に示すとおり、前節で定義した斜面災害に対するリスク $R_{isk}$ を算出するためには、被害発生確率 $P'$ の算出方法、被害によるコスト $C$ の算出方法をはじめとしてコストに直接的に影響する崩壊規模についてもその予測手法を明確にすることが必要となる。これ

らの算出手法や予測手法を踏まえて、リスクの算出方法を構築し、これをもとにケーススタディにより防災投資の順序等の決定方法について検討する。

### 3. 被害発生頻度 $P$ の算出

#### 3.1 被害発生確率 $P'$

被害発生確率  $P'$  は、斜面が崩壊した場合でも発生時の状況（運転規制発令の有無（詳細は後述）、発生時間帯など）によって被害状況（コスト）が異なることを考慮し、発生時の状況ごとに算出する。すなわち、被害発生確率  $P'$  は、式(3)に示すように三つの確率を乗ずることで求める。

$$P' = P_a \times P_b \times P_c \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $P_a$ ：崩壊発生確率

$P_b$ ：運転時間内であるか、運転時間外であるかの確率（以下、運転時間帯確率という）

$P_c$ ：車両被害確率（車両に被害が及ぶ場合にのみ車両被害確率  $P_c$  を乗じる）

#### 3.2 被害発生確率 $P'$ の算出方法

##### (1) 崩壊発生確率 $P_a$

式(1)、式(2)に従えば、斜面の崩壊発生確率を算出するためには斜面の耐降雨強度の評価（崩壊の危険性を降雨量を指標として算出）が必要となる。これには、鉄道総研が既に提案している限界雨量に基づく斜面の危険度評価手法<sup>1)</sup>を用いるものとした。限界雨量は、斜面の状態（地盤強度、立地条件など）に応じて、評価対象斜面の耐雨強度（限界雨量）として連続雨量と時間雨量の積値を予測するものである。なお、この手法は過去の災害事例を統計処理して得ているため、予測値と統計サンプルの実測値との間には誤差が生じる。この予測誤差は予測値（予測した限界雨量）に対して正規分布するとして確率分布を算定するものとした（図2）。

ここで、降雨災害の発生確率を求めるためには、降雨量に応じた発生確率分布（フラジリティカーブ）を設定することが必要となる。一般的な発生確率分布は図3のように示される。しかし、限界雨量は連続雨量と時間雨量の2指標の組み合わせで得られるため、連続雨量と時間雨量の2軸上でフラジリティカーブを設定することが必要となる。図4は限界雨量に基づく斜面崩壊確率分布（フラジリティカーブ）を示したものであり、これから連続雨量と時間雨量に応じた被害発生確率を求めることが可能である。

##### (2) 運転規制と崩壊の有無による被害事象の区分

降雨による斜面崩壊などから旅客の安全を確保するために運転規制が行われる場合が多い。降雨による運転規制は、ある一定量の降雨が観測された場合に崩壊

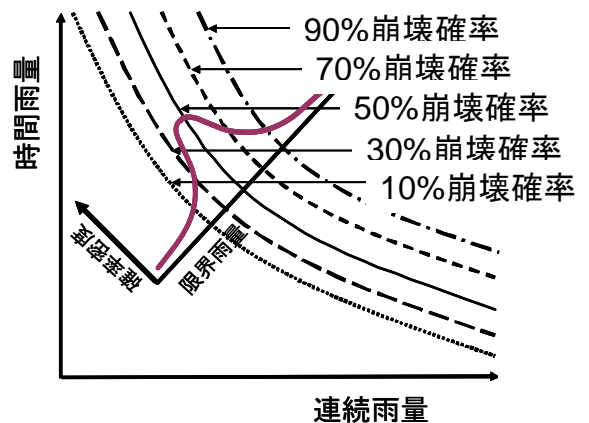


図2 限界雨量曲線とその確率分布

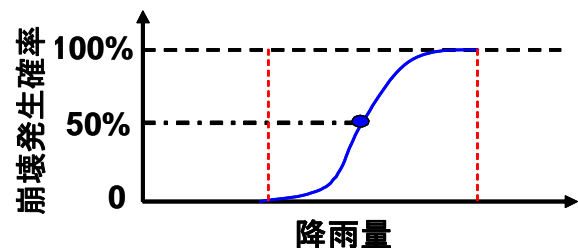


図3 フラジリティカーブの概念

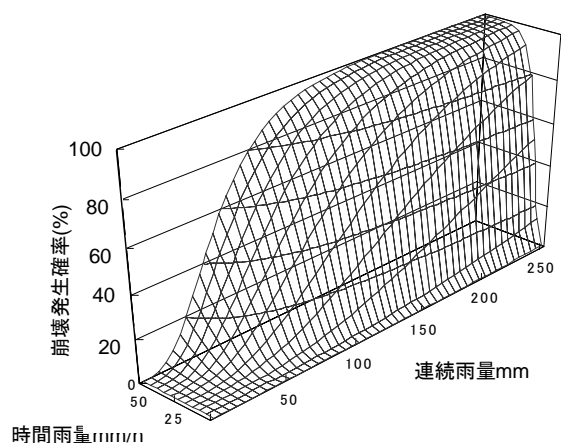


図4 斜面崩壊確率の分布 (フラジリティカーブ)

の有無にかかわらず、停止の措置がとられるものである。したがって、斜面崩壊の発生危険度（耐降雨強度）と運転規制は密接な関係にあるといえる。図5は、一般に鉄道で採用されている運転規制の概念に前述のある値の限界雨量をあわせて示したものである。図5から理解できるように、運転規制値と限界雨量曲線との関係から、降雨時の被害事象は、限界雨量から判断する崩壊の有無と運転規制発令（ここでは運転停止とする）の有無によって四つに分類することが必要となる。例えば、運転停止発令前に斜面崩壊が発生した場合（領域C）は、列車支障の可能性が高くなり、崩壊箇所の復旧費用、復旧期間中の営業損失の他に列車支障による損失が生じる。一方、斜面崩壊が発生しない場合でも、運転停止が発令された場合（領域B）には、停止発令期間中の営業損失や代行輸送費などの損失が生じることになる。このように、実際の運転規制値と評価対象斜面の限界雨量との関係から降雨時の被害発生状況を区分し、区分された領域毎の被害発生確率 $P'$ が求められる。

(3) 運転時間帯確率 $P_b$ および車両被害確率 $P_c$

被害発生時の時間帯や列車支障の有無によって被害が異なる。すなわち、運転時間帯や斜面崩壊規模や形状によっては、車両に被害が及ぶ場合とそうでない場合がある。そこで、過去の研究成果である切土の崩壊規模の予測値<sup>2)</sup>や盛土の崩壊形状と崩壊規模の予測値<sup>3)</sup>などを利用して、車両被害確率を算出することとする。なお、崩壊の規模については、発生後の復旧費用や復旧期間に直接的に影響するため、これら崩壊規模等の予測値は以下で示すコストの算出根拠の一部にも利用する。

3.3 降雨の年間発生頻度  $n$

年間当たりの被害発生頻度を求めるためには、連続雨量と時間雨量の組み合わせによる降雨ハザードを設定し、図5に示したA~Dの領域ごとの降雨頻度を求めることが必要となる。そこで、過去の降雨データに基づき降雨の年間発生頻度分布を対数正規分布関数によって近似することで、降雨ハザードを設定する。図6にこの例を示す。

3.4 被害発生頻度  $P$

前述した式(3)から被害発生確率を求め、それぞれの該当する降雨の発生頻度を乗ずることによって、式(2)から評価対象斜面の年間当たりの被害発生頻度が求められる。

4. 土砂災害リスクの算出方法

3章の結果を踏まえ、降雨時に発生すると考えられる事象（シナリオ）を運転規制値と限界雨量曲線から4つに区分し（3.2(2)参照）、さらにそれぞれの区分毎に発生事象を細分化して斜面災害リスクを算出するフロー（イベントツリーと称する）を作成したものが図7である。すなわち、ある一つの斜面を対象とした災害リスクは、細分化した各事象の発生頻度（被害発生頻度）とコスト（被害発生時のコスト）を乗じてそれぞれ求め、事象毎に求めたリスクをすべて合計することで算出する。なお、被害発生時の損失項目については、実際に本手法を適用する際に鉄道事業者が十分な検討のうえで、必要となる項目を設定することになる。

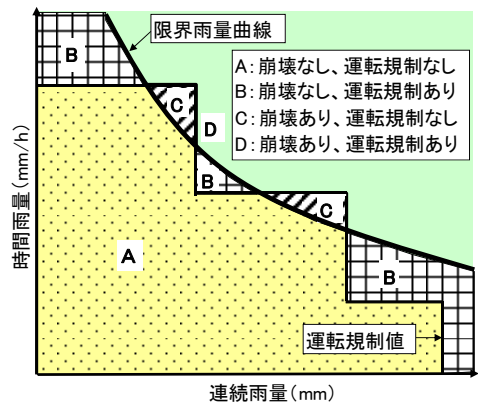


図5 限界雨量曲線と運転規制値による事象の分類

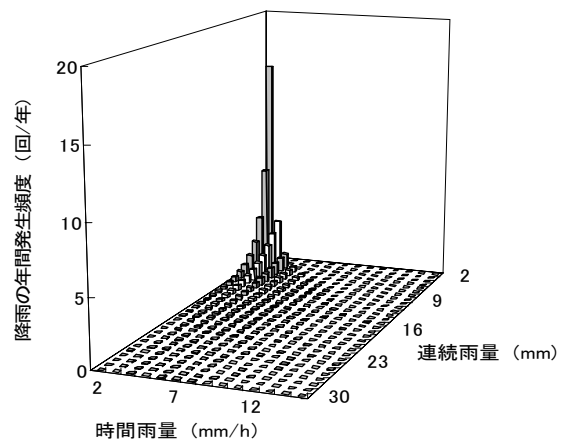


図6 対数正規分布関数により近似した降雨ハザード

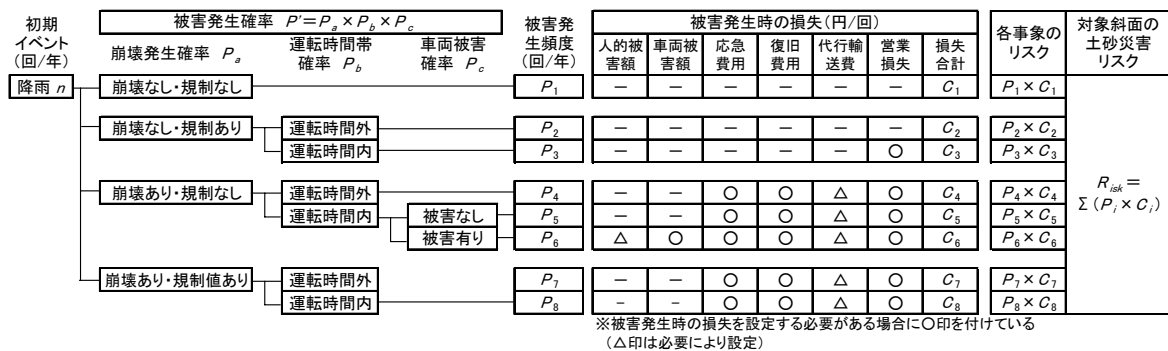


図7 斜面災害リスクの算出フロー (イベントツリー)

### 5. ケーススタディ

ケーススタディの結果の一例として、図8に、盛土4箇所を対象とした現状のリスク、ハード対策後のリスク、ハード対策によるリスクの低減量をそれぞれ算出した結果およびこれまで斜面崩壊の危険度指標とされてきた限界雨量を示す。この結果より、各盛土のリスクを比較することができる。現状のリスクを比較するとB線区b盛土のリスクが他の3地点に比べ高いことが分かる。一方、ハード対策後のリスクは各盛土ともに大幅に低くなり、その値もほぼ等しいため、現状のリスクが高い盛土ほどリスクの低減効果も大きい結果となることが理解できる。また、A線区a盛土の場合、限界雨量からみた危険度の順位(限界雨量が小さいほど危険度が高い)は3番目となっているが、現状のリスクから評価される危険度(リスクが高いほど危険度は大きいと判断する)は2番目に高い結果となる。このように、斜面の条件のみを考慮して求めた限界雨量に対し、現状のリスクは線区のさまざまな特性(営業損失や崩壊発生時の復旧費など)を考慮して求めており、これらから定量的に決定できる危険度の順序は、限界雨量とリスクを用いる場合とは異なる結果となる場合がある。

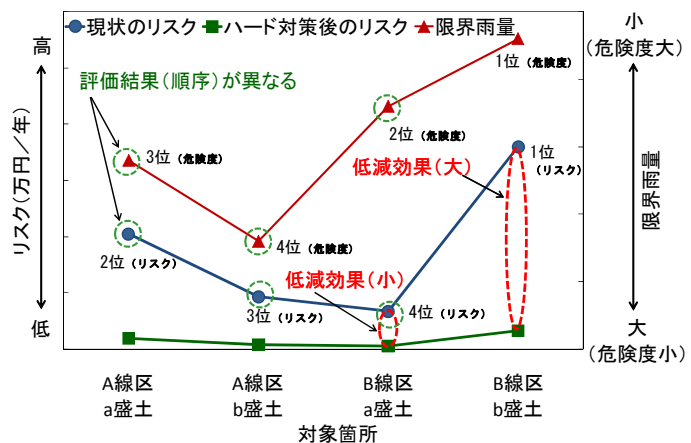


図8 現状とハード対策後のリスクと限界雨量

### 6. おわりに

本研究では、リスク評価手法を適用して降雨による斜面災害に対するリスクを斜面個々に算出する方法を構築し、防災投資の意思決定の支援となる手法としてケーススタディによる検討を行った。被害発生時のコストの項目や被害額の設定については今後さらに深度化する必要があるが、リスク評価手法を用いて降雨時の斜面崩壊に対する危険度を評価する手法については一定の成果を得たと考える。斜面崩壊は降雨に依存して発生するものばかりでなく、降雨に依存するとは限らない岩盤崩壊や落石なども鉄道の安全輸送を阻害する要因になっており、これらの被害に対するリスク評価手法についても今後検討する予定である。

(参考文献)

- 1) 杉山友康：降雨時の鉄道斜面災害防止のための危険度評価手法に関する研究、鉄道総研報告、特別第19号、1997.5.
- 2) 布川修、杉山友康、小林徹：斜面崩壊規模の予測手法と崩土の衝撃力特性、鉄道総研報告、Vol.19、No.10、2005
- 3) 杉山友康、森泰樹、布川修、太田直之：降雨による盛土崩壊の形態と規模に関する統計的予測手法、鉄道総研報告、Vol.22、No.1、2008