

斜面災害被災リスクに基づく 高速道路通行規制基準値の設定

橋詰遼太¹・二宮陽平²・堤浩志³・小濱健吾⁴・貝戸清之⁵

¹学生会員 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: r.hashizume@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²学生会員 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: y.ninomiya@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 西日本高速道路 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-8)

E-mail: h.tsutsumi.aa@jrl.eng.osaka-u.ac.jp

⁴正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-8)

E-mail: k-obama@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁵正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

高速道路上において、斜面災害による利用者の被災を未然に防ぐため、適切な通行規制が必要とされている。本研究では、統計解析モデルを用いて斜面災害被災リスクを定量化し、被災リスクに基づく規制基準値の設定手法を提案する。具体的には、ハザードモデルを援用し、解析雨量データ、斜面特性、斜面災害の発生履歴を用いて斜面災害発生確率を求める。規制開始、終了の判断には斜面災害発生確率を採用し、規制未実施時に斜面災害が発生したときの被災リスクを指標として規制基準値を検討する。最後に、高速道路路線の实在データを用いた適用事例を通じて本研究で提案する手法の有用性について考察する。

Key Words : slope disaster, highway regulation, hazard model, disaster risk

1. はじめに

近年の局所的豪雨や短時間強雨の増加に伴い、高速道路上における斜面災害の危険性が高まっている。高速道路会社は斜面災害の発生を抑制するために、のり面のコンクリート被覆、緑地化、アンカー工といった工事をハード対策として行っている。しかしながら高速道路上には無数の斜面が存在し、今後大規模修繕、大規模更新を予定している高速道路会社にとって、すべての斜面に対して対策工事を行うことは、費用的な観点から困難であると考えられる。路線上の斜面災害のみならず、高速道路会社の管理区域外での斜面災害による土砂流入も増加している。管理区域外の対策工事は地方自治体の管轄となり、高速道路会社が対策工事を実施することは難しい。このように斜面災害防止のためのハード対策は費用、管理権限の面で限界がある。

一方で、高速道路利用者の斜面災害による被害のリスクを低減するために、雨量計による常時観測といったソフト対策も実施されている。過去の降雨や災害履歴、道路構造を基にした規制基準値が IC 区間ごとに定められている。IC 区間ごとに設置された雨量計で規制基準値を超える雨量を観測した場合、事前通行規制を実施することにより利用者の被災を回避している。事前通

行規制においては近年の集中豪雨の増加に伴い、規制基準値に達する前に斜面災害が発生する「見逃し」や、規制を実施中に斜面災害が発生しない「空振り」が増加している。「見逃し」が増加した場合、高速道路利用者の被災リスクが高まり、「空振り」が増加した場合、規制時間が増大し、高速道路のサービス性低下の要因となる。現行基準値では近年の局所的豪雨や短時間強雨といった異常気象への対応が困難であり、定量的な手法を用いることにより改善の余地があると考えられる。

以上の問題意識のもと、本研究では統計解析による斜面災害予測モデルを作成し、規制基準値の設定について検討する。具体的には、過去の降雨の時系列データ、斜面災害の発生履歴、斜面情報に基づき、斜面災害発生確率を求め、斜面災害発生確率を基にした規制実施方法を検討し、被災リスクと規制時間を指標とした規制基準値の設定モデルを提案する。以下第 2 章では、本研究の基本的な考え方を述べる。第 3 章では、斜面災害発生確率の算出モデルを定式化し、第 4 章で斜面災害発生確率を基にした規制基準値の決定方法について詳述する。最後に第 5 章で实在の高速道路路線を対象とした実証分析を行い、本研究で提案する手法の有用性を検証する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 斜面災害予測

NEXCO 西日本では過去に観測された降雨データや災害記録、道路構造をもとに、時間雨量と連続雨量を用いた規制基準を定めている。連続雨量とは降雨開始から降雨終了までの累積雨量である。2mm/h を超える降雨で降雨開始とし、2mm/h 以下の降雨が6時間継続した時点で降雨終了としている。本研究では降雨開始から降雨終了までの時系列を降雨イベントとする。過去の降雨を、横軸に連続雨量、縦軸に時間雨量をプロットし降雨履歴図を図-1 に示す。1回の降雨を1本の折れ線グラフとして記録し、過去20年間の降雨履歴を同一のグラフ上に描くことで降雨特性を表す。降雨履歴図を基に連続雨量と組合せ雨量の2つの基準値を設定する。組合せ雨量とは連続雨量とその時点における時間雨量の組合せで定められる基準値のことである。基準値は「岩井法¹⁾」により決定する。「岩井法」は設計要領で降雨量や積雪の水分統計解析で用いられる確率手法である。供用年数、被害履歴、道路構造といった各区分における特性に応じて降雨確率年を設定する。連続雨量基準では、5~6年に一度出現する降雨量を1つの目安とするが、路線の重要性や各区分の特性によっては、それ以上の出現確率雨量とすることもある。組合せ雨量基準では、排水工の設計で用いられている3年確率雨量を時間雨量値とし、連続雨量値は2年を目安としている。降雨履歴図上に災害記録をプロットし、災害プロットが基準値以上の領域となるように、基準値を設定する。すべての災害プロットを基準値以上とするのではなく、災害の規模や災害発生後の対策状況、降雨経験を十分に考慮し、基準値を設定している。しかしながら、近年の局所的豪雨や短時間強雨の影響で、規制基準値未満の雨量で斜面災害が発生する「見逃し」や、規制を実施しても斜面災害が発生しない「空振り」が増加している。安全性を保ちつつ、規制時間を短縮化できる規制基準が求められている。

地質情報や雨量を基に規制基準値を決定するため研究は数多くなされている。藤原等²⁾は土砂災害警戒避難基準と高速道路通行規制基準の両方の適用を受ける重複区域について、区域の指定状況や土砂災害の影響を確認するとともに、降雨パターンなどの違いが両基準の超過時刻に与える影響を比較分析している。櫻谷等³⁾は多項ロジットモデルを用いて斜面災害発生確率を統計的にモデル化し、通行規制実施前に斜面災害が発生するリスクと通行規制実施後に斜面災害が発生しないリスクの双方を考慮した通行規制基準値の設定方法を提案している。しかしながら、解析に用いられる降雨データは降雨イベント中の最大連続雨量であり、

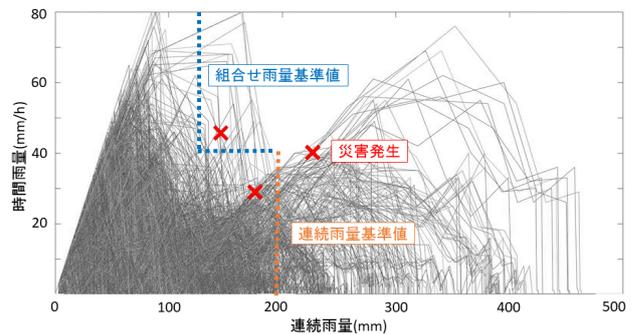


図-1 降雨履歴図

斜面災害発生時の降雨との関係性が明らかになっていないという問題点がある。また、通行規制解除基準については検証されていない。

以上の問題意識から、斜面災害発生時点の降雨量の不可観測性を考慮したモデルが必要とされる。本研究では、過去の斜面災害発生データ、時間雨量データ、斜面情報を用いて、斜面災害の発生確率を推定する斜面災害発生モデルを開発する。ハザードモデルを援用することで、斜面災害の発生時刻が不明であっても、ある期間に斜面災害が発生する確率を算出することが可能である。また、斜面災害発生確率によって規制開始・規制解除の判断を行い、被災リスクを基準値設定の指標として用いることにより定量的に基準値を設定する。

(2) 斜面災害の被災リスク

規制基準値設定に関する研究として、大津等⁴⁾は斜面の破壊確率を用いて通行規制基準超過・非超過と斜面崩壊の有無の4つの場合分けを考え、各組における社会経済的損失を算出し、損失を最小化させるような規制基準値を設定している。人身損失の算出において、時間交通量、走行速度、崩壊土砂の到達幅、制動定期距離を設定して通行車両の土砂埋没と土砂衝突による被災人数を算出している。本研究では大津等が用いた人身損失の算出式を用いて、被災リスクを算出する。被災リスクは規制未実施時の被災車両の期待値と定義し、各時刻における災害発生確率と災害が1件発生したときの被災台数の積によって表す。現行基準による規制時より被災リスクを低減可能な基準値を設定する。

3. 斜面災害予測モデル

(1) 生存時間解析

斜面災害が発生するまでの時間を生存時間解析を用いてモデル化する。具体的に、災害が発生したメッシュ i_a では、「災害は雨量 $r_{a,1}$ (時点 $t_{a,1}$) までは発生していなかったが、雨量 $r_{a,2}$ (時点 $t_{a,2}$) になるまでには発生していた」という情報が得られる。一方、災害が発生しなかったメッシュ i_b では、「雨量 $r_{b,1}$ (時点 $t_{b,1}$)、雨量 $r_{b,2}$ (時点 $t_{b,2}$)、...、 $r_{b,N}$ (時点 $t_{b,N}$) において災害は発生しなかった」という情報が得られる。このような時系列データを用いることにより、各時刻における生存確率が求められる。

斜面災害が発生するまでの時間（観測開始時点をもととする時間軸上における時間）を連続確率変数 T で表現する。本研究では、確率変数 T をハザードを用いて特徴付ける。ハザードは $T \geq t$ (t : 任意時点) という条件のもと、微小期間 $[t, t + \Delta t]$ に T が存在する条件付き確率 $\text{Prob}[t \leq T < t + \Delta t | T \geq t]$ を用いて、

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}[t \leq T < t + \Delta t | T \geq t]}{\Delta t} \quad (1)$$

と定義される。また時刻 t に達しても事象が発生しない確率 $S(t)$ は

$$S(t) = \text{Prob}(T > t) \quad (2)$$

と定義される。 $S(t)$ は確率密度関数 $f(t)$ を積分した量となるため、

$$S(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (3)$$

と表される。したがって、

$$f(t) = -\frac{dS(t)}{dt} \quad (4)$$

と表されるため、 $h(t)$ は $f(t), S(t)$ を用いて、

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = -\frac{d}{dt} \ln S(t) \quad (5)$$

と表される。ここで、式 (5) の両辺を 0 から t まで積分することで、累積ハザード $H(t)$ が定義される。

$$H(t) = \int_0^t h(u) du = -\ln S(t) \quad (6)$$

となる。したがって、

$$S(t) = \exp[-H(t)] = \exp\left\{-\int_0^t h(u) du\right\} \quad (7)$$

が成立する。

本研究では、離散値である時間雨量を確率変数として用いている。 T が離散確率変数であるとき、そのハザードは確率質量関数 $g(t_j)$ を用いて、

$$\begin{aligned} h(t_j) &= \text{Prob}(T = t_j | T \geq t_j) \\ &= \frac{g(t_j)}{S(t_j)} \quad (j = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (8)$$

と表される。なお、 $g(t_j)$ は、

$$g(t_j) = \text{Prob}(T = t_j) = S(t_{j-1}) - S(t_j) \quad (9)$$

と表されるため、

$$h(t_j) = \frac{S(t_{j-1}) - S(t_j)}{S(t_{j-1})} = 1 - \frac{S(t_j)}{S(t_{j-1})} \quad (10)$$

と表現できる。生存関数 $S(t_i)$ は

$$S(t_i) = \prod_{j(t_j \leq t_i)} \frac{S(t_j)}{S(t_{j-1})} = \prod_{j(t_j \leq t_i)} 1 - h(t_j) \quad (11)$$

と表され、 $h(t_j)$ が十分小さいとき、

$$1 - h(t_j) = \exp -h(t_j) \quad (12)$$

が成立するので、生存関数は

$$S(t) \simeq \exp\left\{-\sum_{u=1}^t h(u)\right\} \quad (13)$$

と表される。時刻 t における災害発生確率 $p(t)$ は、

$$p(t) = 1 - \frac{S(t)}{S(t-1)} \quad (14)$$

と表され、時刻 $t-1$ までに斜面災害が発生しないという条件のもと、時刻 t までに斜面災害が発生する条件付き確率を示す。

本研究で定式化するハザードでは、土壌水分量の影響を考慮するために実効雨量を説明変数に採用する。実効雨量は雨量を重み付けして算出される。矢野⁶⁾は以下の式を提案している。

$$R(t) = \sum_{s=0}^{t-1} 0.5^{s/N} r_i(t-s) \quad (15)$$

$r(t)$ は時間雨量、 N は半減期を示す。実効雨量を用いたメッシュ i におけるハザードは、

$$h_i(t) = \exp\left\{\alpha + \beta R_i^N(t) + \sum_{m=1}^M \gamma_m x_{i,m}\right\} \quad (16)$$

と表される。 $r_i(t)$ は時刻 t における時間雨量、 $x_{i,m}(x_{1,m}, \dots, x_{I,m})$ はメッシュ i における斜面特性、 α, β, γ は未知パラメータである。半減期の異なるモデルを実データに適用し、各モデルを比較して半減期 N を決定する。

(2) 尤度関数

高速道路上では定期的にパトロールが実施され、斜面災害の発見時刻は記録されているが、斜面災害が発生した正確な時刻は不明である。ある期間内に災害が発生したことのみに判明しているとき、災害発生時刻は打ち切りデータとして得られる。斜面災害発生時点は斜面災害発見時点とその 6 時間前の時点の間に存在すると仮定する。斜面災害発生メッシュでは区間打ち切りされたデータとなる。一方、斜面災害が発生しなかったメッシュでは、右側打ち切りされたデータとなる。右側打ち切りされたデータからは、少なくとも降雨イベント終了時刻よりも後に災害が発生するという情報が

得られる。いま、メッシュ*i*において降雨状態の実現値 $\bar{\epsilon}_i^t$ ($t = 1, \dots, T$) と、さらにメッシュ*i*における素因の特性ベクトル $\bar{\mathbf{x}}_i$ に関するデータが得られたと考える。記号「 $\bar{}$ 」は観測値、 T は降雨の観測期間を表す。メッシュ*i*において得られる観測値ベクトルは $\bar{\boldsymbol{\xi}}_i^t = (\bar{\epsilon}_i^t, \bar{\mathbf{x}}_i)$ と表せる。また、パラメータ α, β, γ を $\phi = (\alpha, \beta, \gamma)$ と表す。メッシュ*i*における斜面災害の発生有無をダミー変数を用いて、

$$\bar{\delta}_i^t = \begin{cases} 1 & (\text{災害発生}) \\ 0 & (\text{災害未発生}) \end{cases} \quad (17)$$

と表す。このとき、個々の降雨イベント、斜面災害は独立に生起すると仮定して、観測値ベクトル $\bar{\boldsymbol{\xi}}_i^t$ が生起する尤度 $\ell(\phi|\bar{\boldsymbol{\xi}}_i^t)$ は、

$$\ell(\phi|\bar{\boldsymbol{\xi}}_i^t) = [S(t'_i - 6) - S(t'_i)]^{\bar{\delta}_i^t} [S(T)]^{1 - \bar{\delta}_i^t} \quad (18)$$

と表される。 t'_i は、災害発見時刻を示す。さらに、全てのメッシュにおいて得られる観測値集合を $\bar{\Xi} = \{\bar{\boldsymbol{\xi}}_1, \dots, \bar{\boldsymbol{\xi}}_I\}$ とする。観測値集合 $\bar{\Xi}$ が生起する尤度 $\mathcal{L}(\phi, \theta|\bar{\Xi})$ は、

$$\mathcal{L}(\phi|\bar{\Xi}) = \prod_{i=1}^I \ell(\phi|\bar{\boldsymbol{\xi}}_i^t) \quad (19)$$

と表される。対数尤度関数は、

$$\ln\{\mathcal{L}(\phi|\bar{\Xi})\} = \sum_i \ln\{\ell(\phi|\bar{\boldsymbol{\xi}}_i^t)\} \quad (20)$$

と表される。

4. 通行規制実施方法

現行の規制基準値は時間雨量と連続雨量を用いて IC 区間単位で設定されている。しかしながら、気象庁の報告によると降雨の局地化、集中化、激甚化が指摘されており、IC 区間ごとに設置された雨量計では、降雨量の過小評価が懸念される。近年の異常気象による降雨に対応するためには、1km 四方のメッシュにおける、降雨の時系列変化、斜面特性を定量的に考慮する必要があると考えられる。そこで本研究では、規制基準値として時刻 $t+1$ における斜面災害発生確率 $p_i^{t+1}(\epsilon_i^{t+1}, \bar{\mathbf{x}}_i, \hat{\phi})$ を用いる。時刻 $t+1$ における斜面災害発生確率は斜面災害予測モデルに 1 時間後の予測雨量と斜面情報を適用して算出される。IC 区間内のあるメッシュにおいて、災害発生確率が規制基準値を超えた場合、そのメッシュの属する IC 区間で規制が実施される。規制基準値は全区間で統一の施策変数 u とする。

$$p_i^t(\epsilon_i^t, \bar{\mathbf{x}}_i, \hat{\phi}) > u \quad (21)$$

また、区間内のすべてのメッシュにおいて災害発生確率が v 時間継続して基準値 u 以下となったとき通行規制解除とする。

$$p_i^t(\epsilon_i^t, \bar{\mathbf{x}}_i, \hat{\phi}) \leq u \quad (22)$$

通行規制を実施していないにも関わらず、斜面災害が発生したときの被災リスクを求める。個々のメッシュで斜面災害が独立に発生すると仮定すると、通行規制を実施していないにもかかわらず、メッシュ*i*において斜面災害が発生する確率は、

$$P_i(\mathbf{p}_i^t(\epsilon_i^t, \bar{\mathbf{x}}_i, \hat{\phi}), \mathbf{u}, \mathbf{v}) = \begin{cases} p_i^t(\epsilon_i^t, \bar{\mathbf{x}}_i, \hat{\phi}) & (\text{式 (22) を満たさないとき}) \\ 0 & (\text{式 (22) を満たすとき}) \end{cases} \quad (23)$$

時間交通量を w としたとき、規制を実施していないにもかかわらず IC 区間 k においてあるメッシュで斜面災害が発生したときに生じるメッシュあたりの被災台数を $C_k(w)$ すると、メッシュ*i*における被災リスクを、

$$R_i(\mathbf{p}_i^t(\epsilon_i^t, \bar{\mathbf{x}}_i, \hat{\phi}), \mathbf{u}, \mathbf{v}, w) = C_k(w) P_i(\mathbf{p}_i^t(\epsilon_i^t, \bar{\mathbf{x}}_i, \hat{\phi}), \mathbf{u}, \mathbf{v}) \quad (24)$$

全区間における被災リスクは、

$$R(\mathbf{u}, \mathbf{v}, w) = \sum_{i=1}^I R_i(\mathbf{p}_i^t(\epsilon_i^t, \bar{\mathbf{x}}_i, \hat{\phi}), \mathbf{u}, \mathbf{v}, w) \quad (25)$$

と表すことができる。

施策変数 u を変化させたときの被災リスクと規制時間の増減について考える。 u を増加させると被災リスクは増加し、規制時間は減少する。また、 u を減少させると斜面災害の捕捉率が増加し、被災リスクは減少するが、規制時間は増加する。すなわち、被災リスクと規制時間はトレードオフの関係にあり、双方を同時に減少させることは不可能である。そこで現行基準による規制を行った際の被災リスク・規制時間と比較し、双方を低減させる規制基準値を検討する。

5. 実証分析

(1) データ概要

本研究で提案したモデルの有効性を検討するために、高速道路会社が管理するある高速道路路線を対象として実証分析を行う。分析対象とする路線の諸元を表-1 に示す。対象とする路線は合計で 10 区間の IC 区間が存在しする。最も供用年数の短い路線は 6 年であるが、最も供用年数の長い路線は 30 年と IC 区間ごとに供用年数が大きく異なる。路線内の道路構造や斜面情報、斜面災害履歴が 1km 四方のメッシュごとに記録されている。降雨量データとして気象庁により記録されている解析雨量を用いる。解析雨量とは全国に設置されている気象レーダー、アメダス等の地上の雨量計と組み合わせ、1 時間の降水量分布を 1km 四方のメッシュに分割し、解析したものである。路線内には 143 メッシュで構成されている。災害発生回数は路線全体で 7 回であり、斜面災害が発生していない IC 区間も存在する。

表-1 対象路線の諸元

IC 区間	供用 年数	メッシュ 数	斜面災害 発生回数
1	29	4	1
2	29	22	0
3	30	17	0
4	30	20	0
5	26	18	2
6	26	10	0
7	19	13	1
8	14	15	3
9	14	12	0
10	6	12	0

また、各メッシュで実効雨量の最大値が大きく異なるため、各メッシュの最大値が1となるように正規化した。

6. おわりに

本研究では、高速道路の通行規制基準に着目し、各時刻における斜面災害発生確率を時間雨量データ、斜面情報、斜面災害の発生履歴を用いたモデルにより推計し、利用者の安全性向上と規制時間の低減を図る規制方法を提案した。具体的には、ハザードモデルを援用し、実効雨量と切土面積を用いたモデルにより、1km四方のメッシュにおける斜面災害発生確率を表現した。

規制開始・規制解除の判断には斜面災害発生確率を用いた。被災リスクを規制未実施時に災害が発生したときの被災台数の期待値と定義し、斜面災害発生確率と各IC区間の災害が1件あたりの被災台数を用いた被災リスクの算出方法を示した。なお、本研究で提案した方法論を用い、実際の路線データを用いた実証分析を行っており、その結果および考察に関しては研究発表会にて提示する。

謝辞：本研究の一部を実施するあたり、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成事業「特別研究員奨励費（研究課題/領域番号：JP18J20014）」の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 岩井重久, 石黒政儀: 応用水文統計学, 森北出版, 1970.
- 2) 藤原優, 横田聖哉: 土砂災害警戒避難基準と高速道路の通行規制基準の比較に関する一考察, 土木学会論文集 F6, Vol.75, No.1, pp.40-53, 2019.
- 3) 櫻谷慶治, 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之, 音地拓: 高速道路斜面災害に対する降雨時通行規制基準値の設定方法, 土木学会論文集 F6, Vol.75, No.1, pp.12-30, 2019.
- 4) 大津宏康, 梅川祐一郎: 社会経済的損失を考慮した豪雨時の事前通行規制に関する検討, 建設マネジメント研究論文集, Vol.15, pp.1-11, 2008.
- 5) J.P. クライン, M.L. メシュベルガー: 生存時間解析, 丸善出版
- 6) 矢野勝太郎: 前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究, 砂防学会誌, Vol.43, No.4, pp.3-13, 1990.
- 7) 涌井良幸, 道具としてのベイズ統計, 日本実業出版社, 2009.
- 8) 小西貞則, 北川源四郎: 予測と発見の科学 情報量基準, 朝倉書店, 2006.