

第IV部門

斜面災害発生確率の時系列変化に基づく通行規制基準値の設定

大阪大学工学部 学生員 ○橋詰遼太
 大阪大学大学院工学研究科 学生員 二宮陽平
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 貝戸清之

1. はじめに

我が国の高速道路は、全供用延長の約 7 割が土工区間であり、降雨による斜面災害に対して十分な対策が求められる。斜面災害による利用者への被害を防ぐため、事前通行規制が行われている。しかしながら、近年の集中豪雨の増加に伴い、通行規制基準値に達する前に斜面災害が発生する「見逃し」や、通行規制実施中に斜面災害が発生しない「空振り」が報告されている。現行基準値では、過去の降雨履歴を基に定性的な判断が加えられて設定されている。定量的な手法を用いることで改善の余地があると考えられる。そこで、本研究ではハザードモデルを援用し、過去の降雨の時系列データ、斜面災害の発生履歴、斜面特性に基づき、各時刻の災害発生確率を求める。また、災害発生確率の時系列変化を基にした規制実施方法を検討し、見逃しと空振りによる損失を考慮した規制基準値の設定モデルを提案する。以下 2. では斜面災害予測モデル、3. では規制値設定モデル、4. では実証分析を通して本研究の有用性を確認する。

2. 斜面災害予測モデル

本研究では、災害発生時点が降雨開始時刻から災害発見時刻までの間に存在すると仮定し、ハザードモデルを用いて災害発生確率の時系列変化を求める。災害発生時刻が不明となっているデータに対してある期間内で災害が発生する確率を求めることが可能となる。既往のハザードモデルでは説明変数を一定の値としているが、本研究では説明変数に雨量の時系列データを採用する。現行の規制基準では雨量指標として時間雨量と連続雨量を用いているが、モデルの定式化にあたって、説明変数として連続雨量を用いた場合、降り始めの雨量の重みが大きくなるため、時間雨量と累積雨量を説明変数として用いる。累積雨量の期間は、モデルを実際のデータに適用して比較することにより最も適切なものを決定する。IC 区間 k のメッシュ i_k 、降雨イベント j ($j = 1, \dots, J_k$)、時刻 t ($t = 1, \dots, T_j$) におけるハザード関数は、

$$h_{k,i_k}^j(t) = \exp\{\alpha + \beta_1 r(t) + \beta_2 \sum_{s=t-N}^t r_{k,i_k}(s) + \gamma x_{k,i_k}\} \quad (1)$$

と表される。 J_k は IC 区間 k において降雨状態が観測された回数、 T_j は降雨イベント j における降雨の期間を表す。 $r(t)$ は時刻 t における時間雨量、 $x_1, \dots, x_K$ はメッシュ k における斜面特性、 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma$ は未知パラメータである。説明変数が離散値となるため、生存関数は、

$$S(t) = \exp\left\{-\sum_{u=1}^t h(u)\right\} \quad (2)$$

と表される。IC 区間 k のメッシュ i_k において、降雨イベント j 、時刻 t の降雨状態の実現値 $\bar{\varepsilon}_{k,i_k}^{j,t}$ と、メッシュ i_k における素因の特性ベクトル $\bar{x}_{k,i_k}$ に関するデータが得られたと考える。記号「 $\bar{\cdot}$ 」は観測値を示す。

IC 区間 k のメッシュ i_k において、降雨イベント j によって得られる観測値ベクトルは、 $\bar{\xi}_{k,i_k}^{j,t} = (\bar{\varepsilon}_{k,i_k}^{j,t}, \bar{x}_{k,i_k})$ と表される。また、パラメータ $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma$ を $\phi = (\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma)$ と表す。さらに、全ての IC 区間の全てのメッシュにおいて得られる観測値集合を $\Xi = \{\xi_{1,1}^1, \dots, \xi_{K,I_K}^J\}$ とする。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、これを用いて尤度関数は、

$$L(\phi, \Xi) = \prod_{k=1}^K \prod_{i_k=1}^{I_k} \prod_{j=1}^{J_k} \prod_{t=1}^{T_j} 1 - S(t') \prod_{j=j'+1}^{J_k} S(T_k) \quad (3)$$

と表現できる。本研究においてはマルコフ連鎖モンテカルロ法によりモデル推計を行い、推計されたパラメータを用いて災害発生確率を導出する。

3. 規制基準値設定モデル

災害発生確率の時系列変化を基に、見逃し、空振りによる損失を考慮した規制基準値を設定する。規制開始基準値は全区間で統一の施策変数 u とし、規制終了は現行基準と同じく無降雨 6 時間後とする。IC 区間 k 、メッシュ i_k で時刻 t における災害発生確率は $p_{k,i_k,t}(\varepsilon_{k,i_k}^{j,t}, x_{k,i_k}, \hat{\phi})$ と表される。通行規制を実施していないにも関わらず、メッシュ i_k で災害が発生する確率を

$P_{k,i_k}(p_{k,i,t}(\varepsilon_{k,i_k}^{j,t}, x_{k,i_k}, \hat{\phi}), u)$ とする. IC 区間 k において, あるメッシュ i_k で斜面災害が発生したときに生じるメッシュあたりの金銭的なコストを C_k すると, 全区間における見逃しによる損失は,

$$R(u) = \sum_{k=1}^K \sum_{i_k=1}^{I_k} C_k P_{k,i_k}(p_{k,i,t}(\varepsilon_{k,i_k}^{j,t}, x_{k,i_k}, \hat{\phi}), u) \quad (4)$$

と表現できる. 一方, 通行規制を実施したにも関わらず, メッシュ i_k において災害が発生しない確率は $P_{k,i_k}^c(p_{k,i,t}(\varepsilon_{k,i_k}^{j,t}, x_{k,i_k}, \hat{\phi}), u)$ と表される. IC 区間 k において, ある区間 k で斜面災害が発生したときに生じる区間あたりの金銭的なコストを C_k^c すると, 全区間における空振りによる損失は,

$$R^c(u) = \sum_{k=1}^K C_k^c \prod_{i_k=1}^{I_k} P_{k,i_k}(p_{k,i,t}(\varepsilon_{k,i_k}^{j,t}, x_{k,i_k}, \hat{\phi}), u) \quad (5)$$

と表される. u を Δu 増加させると見逃しによる損失は増加し, u を Δu 減少させると空振りによる損失は増加する. すなわち, 見逃しによる損失と空振りによる損失はトレードオフの関係にあり, 双方の損失を同時に減少させることは不可能である. そこで, 双方の損失の和を最小化させる施策変数を最適基準値とする. 最適基準値設定モデルは,

$$\min_u \{R(u) + R^c(u)\} \quad (6)$$

と表すことができる.

4. 高速道路路線における実証分析

対象となる高速道路路線上の過去数年分の解析雨量と各メッシュの斜面特性を用いて, 定式化されたハザードモデルの未知パラメータを推定する. メッシュ内の切土合計面積が災害発生確率に影響していると仮定し, 説明変数に採用した. 時間雨量のパラメータは符号条件により棄却された. モデルに採用する累積雨量の期間を1時間ずつ増加させ, 各モデルをAICによって比較したところ, 9時間累積雨量を用いたモデルで, AICが最小となった. 9時間累積雨量を用いたモデルを

$$h_{k,i_k}^j(t) = \exp\{\alpha + \beta \sum_{s=t-8}^t r_{k,i_k}(s) + \gamma x_{k,i_k}\} \quad (7)$$

と表す. 規制基準値設定モデルを用いて, 期待損失の和を最小にする最適規制基準値を試算した. 見逃しによる損失を災害が1件発生したときの人身損失額, 空振りによる損失を1時間の規制によって得られなくなった料金収入と仮定し, IC区間ごと設定する. 規制基準値が0.260%から0.305%のとき, 期待損失の和が最小になった. 基準値の設定にあたって安全側に配慮し, 規制基準値は0.260%とした. 現行基準値による期待損失との比較を表-1に示す. 見逃しとなった2件は他の災害

表-1 現行基準による規制との比較

	現行基準	提案手法
災害発生件数	7	
見逃し件数	2	2
空振り件数	30	6
規制時間(h)	406	146
期待損失の和(千円)	174,624	120,982
見逃し	97,126	105,429
空振り	77,498	15,553

発生箇所と比較して降雨量が少ないため, 災害発生確率が低く推計されていると考えられる. また, 見逃しによる期待損失は現行基準より増加となった. 実際の高速道路管理において, 人身損失だけでは見逃しによる損失を十分に考慮できているとはいえず, 規制基準値が高めに算出されていると考えられる. 一方, 空振り件数は大幅に低減され, 空振りによる期待損失は大幅に減少した.

5. おわりに

本研究においては, 高速道路における通行規制基準に着目し, 雨量や斜面特性, 斜面災害の発生履歴に基づいた斜面災害予測モデルの開発, 規制による損失の定量化によって最適通行規制基準値を設定するための方法論を提案した. 最適規制基準値を適用した結果, 現行基準による規制よりも空振りによる損失を大幅に低減することが可能となった. 今後の課題として, 規制解除基準の設定が必要となる. 規制解除基準を検討することにより, 空振りによる損失をさらに低減できると考えられる. また, 見逃しによる損失の算出方法を再検討することにより, 規制基準値設定モデルの高度化を図る.

【参考文献】

- 1) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築, 自然災害科学, Vol. 27, No. 1, pp. 69-83, 2008.
- 2) 山田敦浩, 竹本大昭, 小林央宜, 倉本和正, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平: 豪雨時の道路事前通行規制基準雨量の設定に関する研究, 砂防学会誌, Vol. 57, No. 6, pp. 28-39, 2005.
- 3) 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.