

1 kmメッシュごとの降雨斜面災害発生確率を考慮した通行規制基準値設定手法の提案

西日本高速道路株式会社 正会員 ○櫻谷慶治
東北大学災害科学国際研究所 正会員 水谷大二郎

西日本高速道路株式会社 正会員 音地 拓
大阪大学大学院工学研究科 正会員 小濱健吾
大阪大学大学院工学研究科 正会員 貝戸清之

1. はじめに

降雨時斜面災害防止のため高速道路等で導入されている事前通行規制においては、通行規制実施前に斜面災害が発生する「見逃し」事例や通行規制実施後に斜面災害が発生しない「空振り」事例の回数を低減させることが重要である。しかしながら、現行の規制基準値設定手法では、2つの事例の利用者に与える影響が定量的に評価されていない。そのため、素因情報と誘因情報を用いて斜面災害発生確率を統計的に分析し、設定される通行規制基準値に対するリスクを定量的に評価可能にする枠組みが必要である。

本研究では、降雨時の適切な規制基準値を設定するための方法論を構築する。具体的には、1)素因情報、誘因情報を用いて斜面災害が発生する確率を表現する斜面災害発生モデルの構築、2)斜面災害発生確率を用いて、見逃し、空振りが利用者に与える影響を定量的に評価できるようなりリスク管理指標の提案と規制基準値設定モデルの構築を行い、2つのモデルにより構成される方法論を提案する。

2. 斜面災害発生モデル

$k(k = 1, \dots, K)$ 個のIC区間に対して規制基準値を設定することを考える。本研究では、IC区間ごとに独立に規制基準値を決定できると仮定する。ここで、IC区間ごとに道路構造条件やのり面条件に代表される素因、降雨条件に代表される誘因は多様に異なる。さらに、IC区間内においても、素因、誘因は大きく異なる。いま、あるIC区間 k において、メッシュ $i_k(i_k = 1, \dots, I_k)$ で斜面災害が発生する事象をモデル化する。ここでのメッシュは、一辺が約1kmの標準地域メッシュの第3次メッシュとする。素因情報はメッシュごとに考慮するが、誘因情報に関しては、現行の規制実施方法との整合性を保つために、IC区間を代表する1つのメッシュで得られる降雨をモデル化する。

斜面災害は発生する、あるいは発生しないといった2値

の状態により記述することができる。その状態を決める変数として、道路構造条件、のり面条件、降雨条件を考える。ここで、IC区間 k において誘因である降雨条件は時々刻々と変化する。そこで、ある時点における降雨状態を確率変数により表現することを考える。IC区間 k において、降雨状態(時間雨量や連続雨量といった降雨量の統計量)の確率変数ベクトルを $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 、降雨状態の同時確率密度をパラメータ $\boldsymbol{\theta}_k$ を持つ $f_k(\boldsymbol{\varepsilon}|\boldsymbol{\theta}_k)$ とする。このとき、素因、誘因、パラメータを所与とした場合のIC区間 k のメッシュ i_k において降雨状態 $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ と斜面災害が発生する事象($\delta_{k,i_k} = 1$)の同時生起確率密度、および降雨状態 $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ と斜面災害が発生しない事象($\delta_{k,i_k} = 0$)の同時生起確率密度はロジスティック関数¹⁾を用いて、

$$p(\delta_{k,i_k} = 1, \boldsymbol{\varepsilon}_k | \boldsymbol{x}_{k,i_k}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\theta}_k) = \frac{1}{1 + \exp\{-\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{x}_{k,i_k} \boldsymbol{\beta}' + \boldsymbol{\varepsilon}_k \boldsymbol{\gamma}'\}} f_k(\boldsymbol{\varepsilon}_k | \boldsymbol{\theta}_k) \quad (1)$$

$$p(\delta_{k,i_k} = 0, \boldsymbol{\varepsilon}_k | \boldsymbol{x}_{k,i_k}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\theta}_k) = \frac{\exp\{-\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{x}_{k,i_k} \boldsymbol{\beta}' + \boldsymbol{\varepsilon}_k \boldsymbol{\gamma}'\}}{1 + \exp\{-\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{x}_{k,i_k} \boldsymbol{\beta}' + \boldsymbol{\varepsilon}_k \boldsymbol{\gamma}'\}} f_k(\boldsymbol{\varepsilon}_k | \boldsymbol{\theta}_k) \quad (2)$$

となる。ただし、 $\boldsymbol{x}_{k,i_k} = (\boldsymbol{x}_{k,i_k,1}, \dots, \boldsymbol{x}_{k,i_k,M})$ は素因の特性変数ベクトル、 $\boldsymbol{\varepsilon}_k = (\boldsymbol{\varepsilon}_{k,1}, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_{k,N})$ は誘因の確率変数ベクトル、 $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta} = (\boldsymbol{\beta}_1, \dots, \boldsymbol{\beta}_M)$ および $\boldsymbol{\gamma} = (\boldsymbol{\gamma}_1, \dots, \boldsymbol{\gamma}_N)$ はパラメータであり、 $\boldsymbol{\phi} = (\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma})$ と表す。なお、パラメータ $\boldsymbol{\theta}_k$ はIC区間ごとに設定され、IC区間ごとで異なる降雨状態の同時確率密度を用いていることに留意されたい。メッシュ単位での素因を所与とした場合に、降雨状態と誘因が確率的に変化する様子をモデル化した式(1)、(2)を斜面災害発生モデルと呼ぶ。モデル推定は最尤法により行い、用いるデータはメッシュごとに整理した斜面災害履歴、道路構造情報、のり面情報および2006年1月から2014年12月までの一連の国土交通省解析雨量とした。これにより、図-1に示すように任意の連続雨量での斜面災害発生確率を求めることが可能となる。なお図-1には、考慮した特性変数の中で最も対数尤度が大きく推計された最大連続雨量と合計切土面積を採用した斜面災害発生モデルを示している。

Keywords ; 斜面災害 通行規制基準 高速道路 統計的手法

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-8 TEL : 06-6879-4866 Email : k.sakuradani.aa@jrl.eng.osaka-u.ac.jp

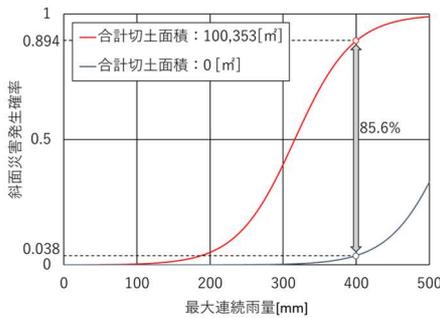


図-1 斜面災害発生確率

3. 規制基準値設定モデル

通行規制を実施していないにもかかわらず斜面災害が発生するリスク(安全面のリスク)を定義する。高速道路における現行の規制基準値を例に、連続雨量 u_k 、時間雨量 v_k に対し規制基準値を連続雨量基準 $u_{k,1}$ 、組合せ雨量基準 $u_{k,2}, v_k$ と設定した場合、IC 区間 k に通行規制を実施していないにもかかわらずメッシュ i_k において斜面災害が発生する無条件確率を

$$\begin{aligned} \bar{P}_{k,i_k}(u_{k,1}, u_{k,2}, v_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) &= \int_0^{u_{k,2}} \int_0^{u_{k,2}} p(\delta_{k,i_k} = 1, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) d\varepsilon_{k,2} d\varepsilon_{k,1} \\ &+ \int_{u_{k,2}}^{u_{k,1}} \int_0^{v_k} p(\delta_{k,i_k} = 1, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) d\varepsilon_{k,2} d\varepsilon_{k,1} \end{aligned} \quad (3)$$

と導出できる。さらに、その際に生じるメッシュあたりのコストを C とすると IC 区間 k における安全面のリスクを、

$$R_k(u_{k,1}, u_{k,2}, v_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) = \sum_{i_k=1}^{I_k} C \bar{P}_{k,i_k}(u_{k,1}, u_{k,2}, v_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) \quad (4)$$

とそれぞれ定義できる。

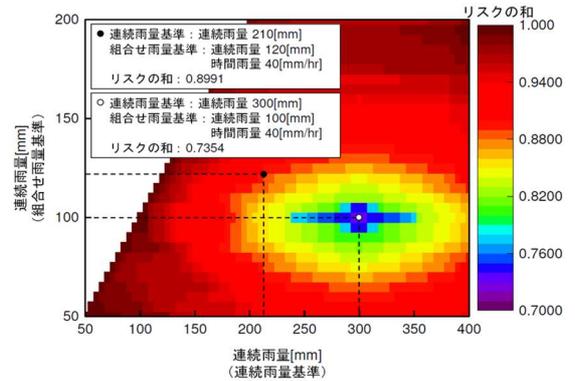
通行規制を実施したにもかかわらず斜面災害が発生しないリスク(社会損失面のリスク)を定義する。個々のメッシュの斜面災害が独立に発生すると仮定し、IC 区間 k に通行規制を実施したにもかかわらず IC 区間内の全てのメッシュで斜面災害が発生しない確率を式(1)、(2)と規制基準値を用いて定義することができる。この確率を用いて、IC 区間 k に通行規制を実施したにもかかわらず IC 区間内の全てのメッシュ $1, \dots, I_k$ で斜面災害が発生しない無条件確率は、

$$\begin{aligned} \bar{P}_k^c(u_{k,1}, u_{k,2}, v_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) &= \int_{u_{k,1}}^{\infty} \int_0^{u_{k,1}} \prod_{i_k=1}^{I_k} p(\delta_{k,i_k} = 0, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) d\varepsilon_{k,2} d\varepsilon_{k,1} \\ &+ \int_{u_{k,2}}^{u_{k,1}} \int_{v_k}^{u_{k,2}} \prod_{i_k=1}^{I_k} p(\delta_{k,i_k} = 0, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) d\varepsilon_{k,2} d\varepsilon_{k,1} \end{aligned} \quad (5)$$

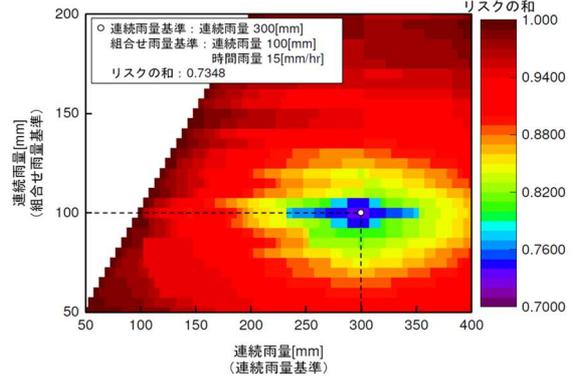
と表せる。さらに、その際に IC 区間あたりに生じるコストを C^c とすると IC 区間 k における社会損失面のリスクを、

$$R_k^c(u_{k,1}, u_{k,2}, v_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) = C^c \bar{P}_k^c(u_{k,1}, u_{k,2}, v_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) \quad (6)$$

と定義できる。これらのリスクはトレードオフの関係にあるため、両リスクを同時に低減することは不可能



(a) 時間雨量 40mm/hr で固定



(b) 時間雨量 15mm/hr で固定

図-2 両リスクの和

である。そこで、両リスクの和により目的関数を定式化するとともに規制基準値設定モデルを

$$\min_{u_{k,1}, u_{k,2}, v_k} \{R_k(u_{k,1}, u_{k,2}, v_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) + R_k^c(u_{k,1}, u_{k,2}, v_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k)\} \quad (7a)$$

$$\text{subject to } u_{k,1} \geq u_{k,2}, \quad u_{k,2} \geq v_k \quad (7b)$$

と定式化する。図-2 (a), (b) には、2. のモデル推定結果と実在の高速道路区間を想定して設定したコスト C, C^c 、および時間雨量 v_k をそれぞれ 15mm/hr, 40mm/hr で固定させた場合の両リスクの和を示している。図-2 (a) より連続雨量基準を変動させるのみでも、現行規制基準値 ($u_{k,1}=210, u_{k,2}, v_k=120, 40$) よりリスクが低い基準値を設定できることがわかる。また、図-2 (b) は、本モデルで試算された最適な規制基準値によるリスクの最小値を示している。

4. おわりに

本研究で示した方法論により、見逃しおよび空振り事例に要するコストを設定することにより、安全面および社会損失面のリスクのトレードオフを考慮した規制基準値を設定することが可能となる。

【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.