

高速道路における降雨時通行規制基準値の 最適設定手法の提案

音地拓¹・櫻谷慶治²・小濱健吾³・水谷大二郎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: t.onji@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 西日本高速道路株式会社関西支社 総務企画部 企画調整課 (〒 530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20)

E-mail: k.sakuradani.aa@jrl.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 大阪大学特任准教授 大阪大学大学院工学研究科 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-8)

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

⁴学生会員 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻・日本学術振興会特別研究員 DC (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: d-mizutani@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

高速道路上での斜面災害の発生は、利用者の快適な運転を妨げ、重大事故発生の要因の1つとなるため、斜面災害発生の事前予測と予測結果に基づく適切な通行規制が重要となる。しかしながら、現行の降雨時通行規制基準値設定過程には過去の災害発生時の降雨量を準用するなど定量的に評価できない部分が存在する。さらに、近年の気象特性の変化などにより現行の基準値では捉えきれない災害事例や過大な通行規制実施事例も報告されており、現行の降雨時通行規制基準値の設定手法には課題が残されている。本研究では、降雨時における最適な通行規制基準値を決定するための方法論を構築する。具体的には、過去の斜面災害情報と降雨データを用いて、斜面災害と降雨の発生を統計的にモデル化する。さらに、それらのモデルを用いて、斜面災害のリスク指標を定義することにより最適化モデルを定式化する。最後に、実測データを用いた適用事例を通して、本研究で構築した方法論の有用性を実証的に検証する。

Key Words : *slope disaster, traffic regulation standard, expressway, rainfall, statistical method*

1. はじめに

日本の高速道路では、土工区間が供用延長の約7割を占めており、斜面災害の発生は利用者の安全・安心な運転を妨げる大きな要因となる。そのために、高速道路では、降雨時における適切な通行規制基準値の設定が重要となる。現行では、「通行車両への被害を未然に防ぐために最も適切な通行規制基準値とは、利用者への被害を防止する上で通行規制基準値に到達した後の斜面災害の発生率が高く、かつ、不必要な通行規制の件数が小さくなるような基準値である」という観点に基づき降雨時通行規制基準値が設定されている。現行の通行規制基準の評価指標は、降雨開始から降雨終了までの累積雨量で表現される連続雨量と1時間の降雨量の合計で表現される時間雨量を採用し、それらが**2.(2)**において詳述するような確率降雨量をもとに設定される閾値を上回ると通行規制が実施される。現行の基準値は、過去の斜面災害事例を考慮することにより基準値のもとになる確率降雨量の確率年(再現期間)を経験に基づき設定し、さらに、算出された確率降雨量による閾値をIC区間ごとの供用年数などを考慮し、

主観的に変動させることにより最終的に設定されている。このように、部分的に恣意性の存在する現行の通行規制基準値の設定手法では、通行規制実施前に災害が発生する事象や通行規制実施後に災害が発生しない事象をリスク指標として定量化することは困難である。さらに、近年、気象特性の変化などにより、現行の基準値では捉えきれない災害事例や、通行規制実施後に災害が発生しない事例も報告されており、このような事象にも現行の降雨時通行規制基準値の設定手法で対応することが困難である場合も少なくない。そのため、斜面災害の発生や気象特性の変化などを定量的に評価し、最新の斜面災害の発生や気象特性の変化などを通行規制基準値の設定に逐次考慮し、斜面災害に関するリスクを低減させるようなルールの確立が喫緊の課題となっている。

通常、降雨時通行規制基準値は、低く設定するほど斜面災害が利用者へ及ぼす被害を未然に防ぐことが可能となり、利用者の走行安全性が確保される。一方で、通行規制基準値を低く設定することで、通行規制時間の増加を招き、通行規制後に斜面災害が発生しないというような過大な通行規制により、高速道路のサービ

ス性が低下する。このように、通行規制実施以前に斜面災害が発生するリスク（安全面のリスクと呼ぶ）と通行規制実施以後に斜面災害が発生しないリスク（サービス面のリスクと呼ぶ）の間にはトレードオフの関係があり、高速道路管理者は両者の関係を考慮に入れて適切な通行規制基準値を設定することが必要である。

以上の問題意識のもと、本研究では、高速道路における斜面災害に対して、定量的な降雨時通行規制基準値の設定手法を構築する。具体的には、1) 過去の斜面災害情報と降雨データを用いた統計的手法により、斜面災害発生確率を表すロジットモデル（斜面災害発生モデル）を降雨量を説明変数として考慮して推定し、2) 降雨量の分布を表す極値分布（降雨量分布）についても過去の降雨データより統計的に推定し、3) 推定された斜面災害発生モデルと降雨量分布を用いて安全面、サービス面のリスクを定量化し、4) 2種類のリスクを目的関数に含むような最適化モデルを用いて最適通行規制基準値を決定する、という過程を通じて降雨時の最適通行規制基準値を決定する。以下、**2.**で本研究の基本的な考え方を説明する。**3.**では、現象のモデル化を行う。**4.**では、適切な通行規制基準値を求める最適化モデルを定式化する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

近年、局地的な豪雨や短時間での豪雨は増加傾向にあり、さらに斜面災害の発生件数についても増加傾向にある。それに伴い、道路において降雨時通行規制基準値では捉えきれない斜面災害事例が報告され、現行の通行規制基準に関する研究が実施されてきた。それらの研究において、新たな降雨時通行規制基準の策定にあたり、斜面災害の発生確率を力学的なアプローチにより表現しているものがある。具体的には、土壌内部の水分量に着目して、土壌を何層かに分割し、各層をタンクと仮定することで、降雨が上段のタンクから下段のタンクまでの浸透や各タンクからの流出をモデル化したタンクモデルを用いているものである^{1),2)}。また、RBF ネットワーク（Radial Basis Function Network）と呼ばれるがけ崩れの発生限界雨量線の設定において用いられている手法により、斜面災害発生時点の土壌内部の水分量を推定することで新たな降雨時通行規制基準を策定しているものも存在する³⁾。これらは土壌内部の水分量に着目しているという点において、降雨時通行規制基準の策定に対する力学的なアプローチと言える。また、斜面災害の発生要因を統計的手法である数量化理論を用いて分析しているもの⁴⁾や斜面災害の発生要因から斜面災害発生時の限界雨量を統計的に

予測し、鉄道沿線の盛土を対象とした斜面災害の発生危険度の評価手法を提案し⁵⁾、それにより斜面災害の発生頻度期待値を確率的に算出する手法について検討したものもある⁶⁾。

本研究では、高速道路に着目し、斜面災害発生の誘因情報である降雨量を用いて統計的に斜面災害の発生確率を表現するとともに、降雨の発生確率に関しても表現することにより、新たな降雨時通行規制基準の策定を目指す。すなわち、大量のデータが蓄積されている降雨データと斜面災害発生時点の降雨データから斜面災害の発生確率を表現する点において、本研究は降雨時通行規制基準の策定に対する統計学的なアプローチと言える。さらに、新たな降雨時通行規制基準の策定過程において、斜面災害に対するリスク指標を定量化することにより、リスクの最適化についても議論する。

(2) 現行の降雨時通行規制基準値設定手法とその課題

現在、西日本高速道路株式会社が管理する高速道路では、降雨時通行規制基準の評価指標として、正時の時間雨量（以下、時間雨量）と呼ばれる整数 $k(0 \leq k \leq 23)$ に対して、 k 時00分から $k+1$ 時00分までの1時間に降った雨の合計値で表される指標と、連続雨量と呼ばれる雨の降り始めから降り終わりまで時間雨量 2mm/hr を超える雨が6時間以上の中断を伴わず継続した場合の累積雨量で表される指標を用いて、①連続雨量単独の基準値と②連続雨量と時間雨量を組合わせて用いる基準値を採用している。これらの基準値の設定フローには、図-1に示すように6つのステップがある。ステップ**1-1**では、高速道路沿線に設置された観測計により降雨データを観測・保存を行う。それと同時にステップ**1-2**では、過去に降雨時に発生した斜面災害情報の収集・保存を行う。ステップ**2**では、図-2に示すような降雨履歴図をステップ**1-1**で保存された降雨データを用いて作成する。図-2では、例として、同図の左に示している降雨が観測された場合の降雨履歴図を表している。ステップ**3**では、図-3に示す岩井法⁷⁾による確率降雨量の算出フローに従い、確率降雨量を算出し、ステップ**2**で作成した降雨履歴図に通行規制の閾値としてプロットする。ステップ**4**では、ステップ**1-2**で保存した斜面災害情報を降雨履歴図にプロットする。最後にステップ**5**において、ステップ**4**でプロットされた斜面災害情報やIC区間の供用年数などを考慮し、通行規制基準の閾値を変動させることにより図-4に示すように通行規制基準値が設定される。

以上の通行規制基準値設定フローにおいて、ステップ**3**における連続雨量と時間雨量の確率率は、過去の斜面災害事例の経験に基づき表-1のように設定されており、さらに、ステップ**5**における通行規制の閾値の

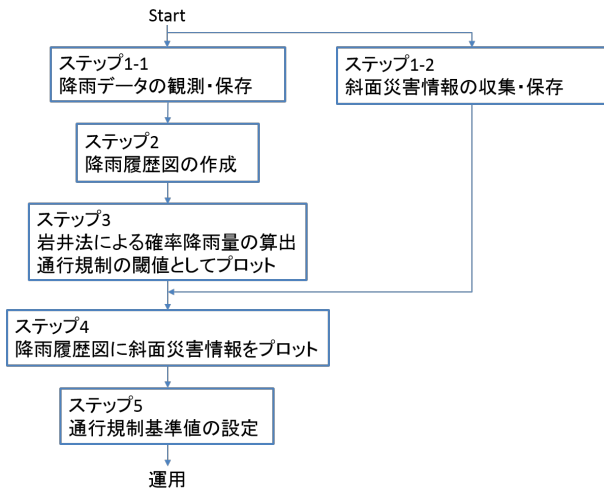


図-1 通行規制基準値設定フロー

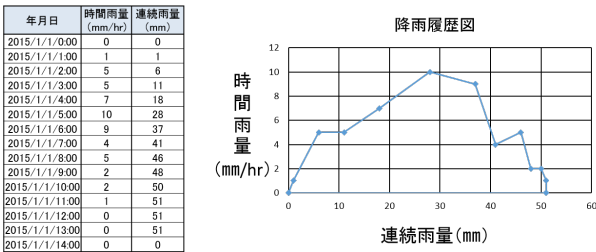


図-2 降雨履歴図

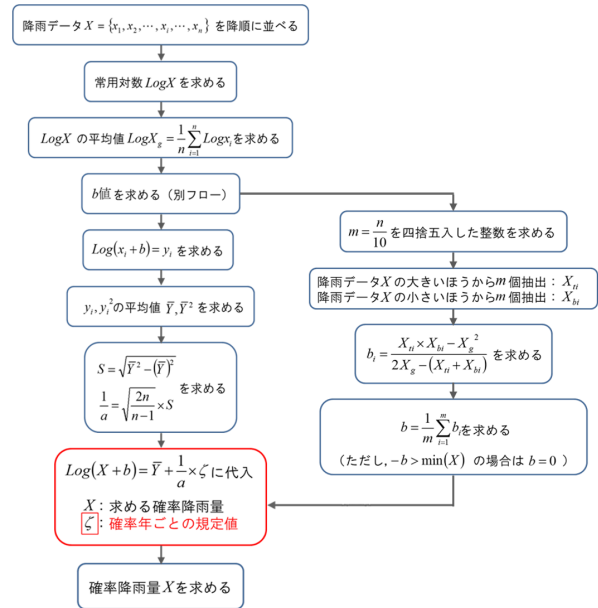


図-3 確率降雨量算出フロー

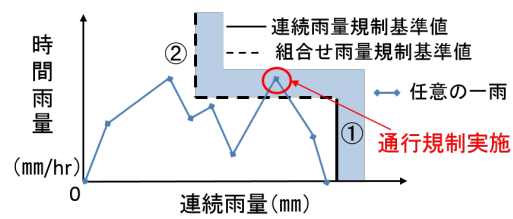


図-4 通行規制基準値の設定

変動は高速道路管理者の主観的なものである。したがって、現行の手法においては、降雨時通行規制基準値は、過去の災害事例を考慮しているものの、最終的な設定過程には恣意性が残る。しかしながら、ゲリラ豪雨など近年の気象特性の変化を考慮すると、定量的な根拠に基づき、確率年と最終的な通行規制基準値を決定していくことが望ましい。本研究では、ロジットモデルにより斜面災害発生確率を表現する。その際、高速道路管理者は、降雨時における通行規制の意思決定を降雨量により行っていることから、斜面災害発生確率の説明変数として降雨量を採用することにより斜面災害の発生確率を表現する。また、降雨の発生確率を確率分布で表現することにより斜面災害が発生する確率、斜面災害が発生しない確率とのそれぞれの積により安全面のリスクとサービス面のリスクを定義する。これにより、安全面のリスクとサービス面のリスクの間に存在するトレードオフの関係の議論が可能となる。

(3) ロジットモデル

斜面災害情報が、発生、あるいは、発生しないという 2 値変数として与えられることを考慮するために、本研

表-1 確率年の設定

① 連続雨量	② 組合わせ雨量	
	連続雨量	時間雨量
概ね 5~6 年確率	概ね 2 年確率	概ね 3 年確率

究ではロジットモデルにより、斜面災害発生確率を表現する。ロジットモデルは、一般化線形モデルの一種であり、被説明変数 y が 2 値変数で表される。ロジットモデルでは、発生確率 p を表現する際に制約条件 $0 \leq p \leq 1$ を満足するために、説明変数と未知パラメータの線形結合 $z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots$ で表される線形予測子 z をロジットリンク関数 $\ell(\cdot)$ を用いて、

$$\begin{aligned}
 p &= \ell(z) \\
 &= \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)} \\
 &= \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots)}
 \end{aligned}$$

と変換する。このとき、発生確率 p が線形予測子 z のロジスティック関数であると仮定すれば、 z がどのような値をとっても $0 \leq p \leq 1$ の範囲で表すことができる⁸⁾。

ロジットモデルは、2 値変数に限らず、多値変数の場合にも適用でき、自然現象や社会現象などをモデル化しようとするときに用いられる汎用性の高いモデリング手法である^{8),9)}。本研究においては、斜面災害の発生が 2 値変数で表されることから、2 値変数においてロジットモデルを適用する 2 項ロジットモデルを採用する。そこで斜面災害発生確率 p を表現するにあたり、2 項ロジットモデルにおける未知パラメータ $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots)$ を推定する必要がある。その推定手法として、本研究では最尤推定法を用いる。

(4) 極値分布

斜面災害に寄与する降雨量の要因として最大降雨量が考えられる。現行の降雨時通行規制基準の評価基準には連続雨量と時間雨量が用いられている。これらの 2 つの評価指標のうち本研究では、連続雨量に着目し、月最大連続雨量の発生確率を確率分布で表現する。その際、確率分布として極値分布を採用する。極値分布とは、確率変数として採用する値をある区分により分けたとき、各区分ごとの最大値が漸近的に従う確率分布として知られており、河川の年間最大流量や年間最大風速、年間最大降雨量などの確率分布に適用される¹⁰⁾。極値分布は形状パラメータ、位置パラメータ、尺度パラメータと呼ばれる 3 種類のパラメータにより決定される確率分布であり、形状パラメータのとり値によりガンベル分布、フレシェ分布、ワイブル分布に分類することができる。これらの 3 種類の極値分布をまとめたものは一般極値分布と呼ばれる。一般極値分布の累積分布関数は、

$$G(x|k, \mu, \sigma) = \exp\left(-\left(1+k\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-\frac{1}{k}}\right)$$

と表すことができる。ただし、

$$1+k\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) > 0$$

であり、パラメータ k , μ はともに実数で、それぞれ形状パラメータ、位置パラメータを示し、パラメータ σ は正の実数で尺度パラメータを示す。さらに、一般極値分布の確率密度関数は、

$$g(x|k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\left(1+k\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \cdot \left(1+k\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-1-\frac{1}{k}}$$

で表される。また、形状パラメータ k により分類される極値分布は、以下の 3 種類である。

- (a) $k=0$ のとき タイプ I: ガンベル分布
- (b) $k > 0$ のとき タイプ II: フレシェ分布
- (c) $k < 0$ のとき タイプ III: ワイブル分布

本研究では、最大連続雨量の確率分布を一般極値分布により表現し、推定された形状パラメータ k により 3 種類の極値分布の判別を行う。最大連続雨量の確率分布を一般極値分布により表現するにあたり、形状パラメータ k , 位置パラメータ μ , 尺度パラメータ σ を推定する必要がある。その推定手法は、2 項ロジットモデルの未知パラメータ推定と同様に最尤推定法を用いる。

降雨時の斜面災害の通行規制基準を議論するにあたり、日常的に観測される降雨ではなく、降雨量が他の降雨と比べ相対的に大きくなるような降雨に着目する必要がある。そのため、本研究では、個々の期間単位での最大降雨量に着目し、極値分布を用いた分析を行う。このとき、個々の期間の期間長を恣意的に決定する必要がある。本研究の適用事例では、1ヶ月内に、通行規制基準値を上回る降雨が複数回観測されないという仮定のもと、期間長を 1ヶ月として分析を進めている。当然のことながら、1ヶ月内に通行規制基準値を上回る降雨が複数回観測されている場合には、期間長をより細かく設定することもできるが、そのときには、期間内の最大値を正確に表現するという極値分布の利点が低減されることとなる。このような期間長の設定は、獲得されたデータに応じて決定する必要があり、本研究の適用事例に限っては、期間長 1ヶ月の妥当性は確認しているが、他のデータを用いた分析を行う際には、詳細な考察のもと決定してゆく必要がある。

3. 現象のモデル化

(1) 斜面災害発生モデル

斜面災害発生確率 p を 2 項ロジットモデルにより表現し、斜面災害発生モデルと定義する。本研究では、斜面災害発生の有無を表す情報と 2.(2) で定義した連続雨量を用いて、2 項ロジットモデルを推定する。その際、2 項ロジットモデルの発生確率は一連の連続雨量ごとに定義される。さらに、当該一連連続雨量を説明変数として採用する。当然のことながら、連続雨量の定義における時間雨量と継続時間を変化させることにより連続雨量の値も変化し、それらも降雨時通行規制基準の指標となり得る。本研究では、連続雨量の定義を所与とした場合のリスク評価手法と通行規制基準値設定のフレームワーク構築に主眼を置くため、連続雨量の定

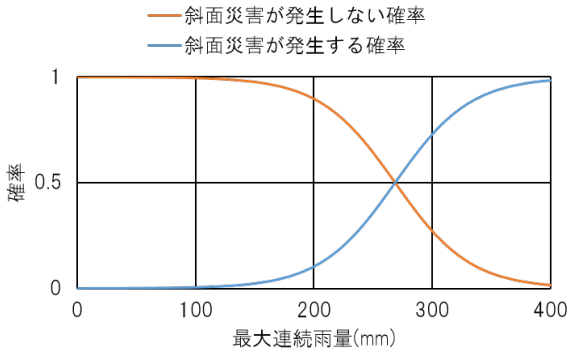


図-5 斜面災害発生モデル

義を変更することによる通行規制基準値変化に関する分析は今後の課題とする。いま、 I 回の一連の連続雨量 i ($i = 1, \dots, I$) が観測されたとする。2 項ロジットモデルにおいて、連続雨量 i において斜面災害が発生する確率 p_a^i は、未知パラメータ β_0, β_1 と当該連続雨量値 x_1^i を用いて、

$$p_a^i = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1^i)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1^i)} \quad (1)$$

と表現することができる。このとき、連続雨量 i において、斜面災害が発生しない確率 p_b^i は、

$$\begin{aligned} p_b^i &= 1 - p_a^i \\ &= \frac{1}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1^i)} \end{aligned} \quad (2)$$

と表現できる。ただし、 β_0 は定数項を表す。この斜面災害発生モデルにより、任意の連続雨量における斜面災害の発生確率が定式化されると同時に、斜面災害が発生しない確率も定式化される。また、本研究における斜面災害発生モデルでは、斜面災害が発生する確率 p_a^i 、発生しない確率 p_b^i は、 $0 \leq p_a^i \leq 1$ 、 $0 \leq p_b^i \leq 1$ 、 $p_a^i + p_b^i = 1$ の条件のもとで図-5 に示すようなシグモイド曲線で表現される。

(2) 降雨量分布

本研究では、最大連続雨量の確率分布を一般極値分布で表現し、降雨量分布と定義する。ここで、時点 $t_0 = 0$ を初期時点とする離散的な時間軸

$$t_j = t_{j-1} + u \quad (j = 1, 2, \dots)$$

を定義する。この離散的な時間軸上の点を時点と呼び、カレンダー時刻と区別する。一般極値分布を用いて、期

間 $[t_{j-1}, t_j)$ (期間 j ($j = 1, \dots, J$) と呼ぶ) 内で観測された一連の連続雨量の最大値 (最大連続雨量) y_j ($j = 1, \dots, J$) の累積分布関数 $G(y_j|k, \mu, \sigma)$ 、確率密度関数 $g(y_j|k, \mu, \sigma)$ はそれぞれ、

$$\begin{aligned} G(y_j|k, \mu, \sigma) &= \exp\left(-\left(1 + k\left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \\ g(y_j|k, \mu, \sigma) &= \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\left(1 + k\left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \\ &\quad \cdot \left(1 + k\left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \end{aligned}$$

と表すことができる。なお、期間 $j - 1$ に開始し、期間 j に終了した降雨の連続雨量は、期間 j 内に観測されたものとする。ここで、 k, μ, σ はそれぞれ形状パラメータ、位置パラメータ、尺度パラメータを示している。さらに、一般極値分布は、形状パラメータ k により以下の 3 種類に分類される。

(a) $k=0$ のとき タイプ I : ガンベル分布

$$\begin{aligned} G(y_j|\mu, \sigma) &= \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)\right)\right) \\ g(y_j|\mu, \sigma) &= \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)\right)\right) \end{aligned}$$

(b) $k > 0$ のとき タイプ II : フレシエ分布

$$\begin{aligned} G(y_j|k, \mu, \sigma) &= \begin{cases} \exp\left(-\left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) & (y_j \geq \mu, \frac{1}{k} > 0) \\ 0 & (y_j < \mu) \end{cases} \\ g(y_j|k, \mu, \sigma) &= \frac{1}{k\sigma} \left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}-1} \\ &\quad \cdot \exp\left(-\left(\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}\right) \quad (y_j \geq \mu) \end{aligned}$$

(c) $k < 0$ のとき タイプ III : ワイブル分布

$$\begin{aligned} G(y_j|k, \mu, \sigma) &= \begin{cases} \exp\left(-\left(-\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}\right) & (y_j \leq \mu, \frac{1}{k} > 0) \\ 1 & (y_j > \mu) \end{cases} \\ g(y_j|k, \mu, \sigma) &= \frac{1}{k\sigma} \left(-\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}-1} \\ &\quad \cdot \exp\left(-\left(-\frac{y_j - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}\right) \quad (y_j \leq \mu) \end{aligned}$$

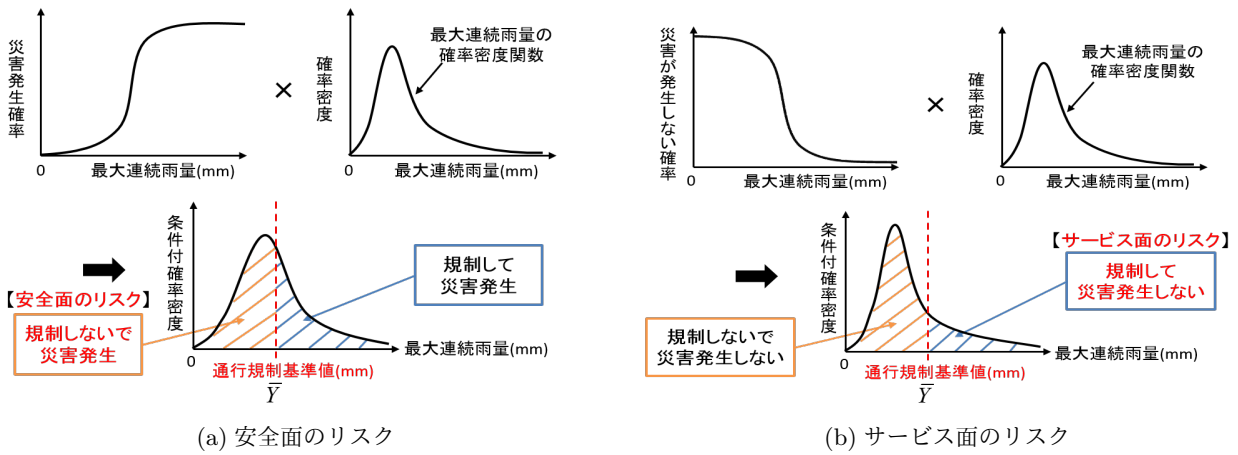


図-6 リスクの定義

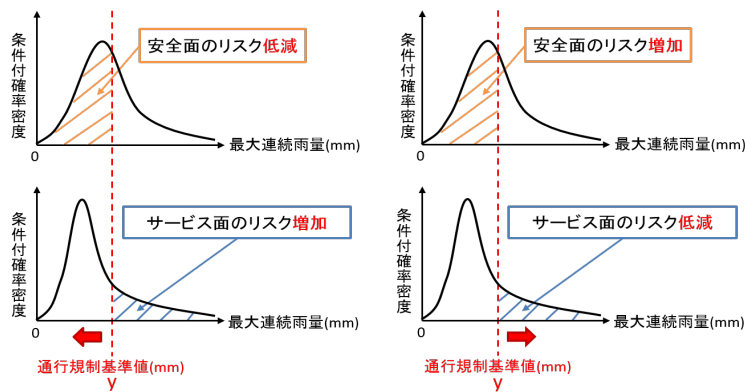


図-7 トレードオフの関係

4. 最適化モデル

(1) リスク指標の定式化

3.(1), 3.(2) で示した斜面災害発生モデルと降雨量分布により、安全面のリスクとサービス面のリスクを評価するために、2つのリスクを定義する必要がある。そこで、斜面災害発生モデルを $p(y|\hat{\beta})$ 、降雨量分布の確率密度関数を $g(y|\hat{k}, \hat{\mu}, \hat{\sigma})$ とおき、安全面のリスク $R_1(\bar{Y})$ を式 (3)、サービス面のリスク $R_2(\bar{Y})$ を式 (4) で定義する。ただし、 y は説明変数である一連の連続雨量、 $\hat{\beta}$ は斜面災害発生モデルにおける未知パラメータの推定値、 \hat{k} , $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ は降雨量分布の確率密度関数における形状パラメータ、位置パラメータ、尺度パラメータの推定値を表し、 \bar{Y} は通行規制基準値となる連続雨量である。

$$R_1(\bar{Y}) = \int_0^{\bar{Y}} p(y|\hat{\beta})g(y|\hat{k}, \hat{\mu}, \hat{\sigma})dy \quad (3)$$

$$R_2(\bar{Y}) = \int_{\bar{Y}}^{\infty} (1 - p(y|\hat{\beta}))g(y|\hat{k}, \hat{\mu}, \hat{\sigma})dy \quad (4)$$

具体的には、図-6 に示すように、安全面のリスク $R_1(\bar{Y})$ を斜面災害が発生する確率 $p(y|\hat{\beta})$ と降雨量分布の確率密度関数 $g(y|\hat{k}, \hat{\mu}, \hat{\sigma})$ との積で表される条件付き確率密度関数における通行規制基準値 \bar{Y} での積分値で定義する。一方で、サービス面のリスク $R_2(\bar{Y})$ を斜面災害が発生しない確率 $1 - p(y|\hat{\beta})$ と降雨量分布の確率密度関数 $g(y|\hat{k}, \hat{\mu}, \hat{\sigma})$ との積で表される条件付き確率密度関数における通行規制基準値 \bar{Y} での積分値で定義する。以上により、通行規制基準値 \bar{Y} における安全面のリスクとサービス面のリスクの定量化が可能となる。

(2) トレードオフの関係

降雨時通行規制基準のリスク指標として、通行規制実施前に斜面災害が発生するリスク（安全面のリスク）と通行規制実施後に斜面災害が発生しないリスク（サービス面のリスク）の両者を同時にとりあげる。図-7 に示すように、任意の通行規制基準値に対して、基準値を小さく設定すると安全面のリスクは低減されるが、サービス面のリスクは増加する。一方で、基準値を大きく

設定するとサービス面のリスクは低減されるが、安全面のリスクは増加する。以上のように安全面のリスクとサービス面のリスクの間には、トレードオフの関係が存在し、両者を同時に低減させるような通行規制基準値は存在しない。そこで、2つのリスクを目的関数に含むようなモデルを構築し、両者が可能な限り低減される値を最適通行規制基準値として設定する最適化モデルを定式化する。

(3) 最適化モデルの定式化

通常、高速道路における降雨時リスク管理において、安全面のリスクとサービス面のリスクを同等のリスクとして取り扱うことは考えにくい。そこで、両者の重要性を考慮しつつ、同時に可能な限り低減させるために、2つのリスクに対して重み付けた複合的な目的関数の定式化とともに、高速道路における最低限のサービス性を確保するために、サービス面のリスクに対して上限としての制約条件を設定することで最適化モデルを定式化する。その上で、サービス面のリスクの上限値をパラメータとして変化させると同時に、2つのリスクに対する重みをシステムティックに変化させ、トレードオフの関係を分析する。以上のような最適化モデルは、

$$\begin{aligned} & \min (AR_1(\bar{Y}) + BR_2(\bar{Y})) \\ & \text{subject to } R_2(\bar{Y}) \leq T \end{aligned}$$

と定式化できる。ここで、 A, B は、安全面のリスク $R_1(\bar{Y})$ 、サービス面のリスク $R_2(\bar{Y})$ それぞれの重み付けを表すパラメータ、 T は、サービス面のリスク $R_2(\bar{Y})$ に対する上限値を表すパラメータを示している。

5. おわりに

本研究では、高速道路斜面災害とその降雨時通行規制基準に着目し、斜面災害情報と降雨データから斜面災害発生モデルと降雨量分布を推定し、その双方により2種類のリスク指標を定量化することにより降雨時最適通行規制基準値を決定するための方法論を提案した。具体的には、1) 斜面災害発生モデルを2項ロジットモデルで、降雨量分布を一般極値分布で表現し、2) 推定されたモデルを用いて安全面とサービス面のリスク指標を定式化し、3) これらのリスク指標を用いて目的関数を定義し通行規制基準の降雨量を引数として最適化モデルを定式化した。この方法論により目的関数のパラメータと制約条件を所与とした場合に最適通行規制基準値を一意に決定することが可能となる。

一方、今後に残された課題がいくつか存在する。第1

に、本研究では、斜面災害の説明変数として連続雨量のみの採用に留まった。今後、斜面災害発生の誘因情報である時間雨量やIC区間の地形特性というような素因情報を説明変数として採用することでモデルの高度化を図ることが重要である。第2に、連続雨量の定義を変更することによる通行規制基準値の変化に関する分析を行うことは、降雨時通行規制基準における新しい評価指標を構築する点において重要である。第3に、本研究では、一般極値分布の期間長を恣意的に決定したが、分析対象とするデータに応じて期間長を系統的に決定するための方法論の開発が望まれる。第4に、第1の課題で言及した時間雨量に関して、現行の規制基準値の決定方法を考慮すると、時間雨量と連続雨量の双方を同時に通行規制基準値として採用することが望ましい。その際には、時間雨量と連続雨量の同時生起確率密度を定式化することにより、本研究で提案したリスク評価と最適化モデルのフレームワークを用いて、より詳細なリスク評価と通行規制基準の決定が可能となると考えられる。なお、講演会当日には、実測データを用いて本研究の有効性を実証的に検証した事例を紹介する。

参考文献

- 1) 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, 2008.
- 2) 高橋健二, 大津宏康, 大西有三: タンクモデル法による斜面の降雨時リスク評価法の研究, 建設マネジメント研究論文集, Vol.10, 2003.
- 3) 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.
- 4) 沖村孝, 杉本博: 統計的手法による自然斜面崩壊の研究, 土木学会論文報告集, 第290号, 1979.10.
- 5) 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, 1992.6.
- 6) 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, 2010.2.
- 7) 岩井重久, 石黒政儀: 応用水文統計学, 森北出版, 1970.
- 8) 久保拓弥: データ解析のための統計モデリング入門—一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC—, 岩波書店, 2012.
- 9) 飯田恭敬, 岡田憲夫: 土木計画システム分析-現象分析編-, 森北出版, 1992.
- 10) 蓑谷千鳳彦: 統計分布ハンドブック, 朝倉書店, 2010.

(2016. ?? ?? 受付)

A PROPOSAL FOR AN OPTIMUM METHOD TO ESTABLISH TRAFFIC REGULATION STANDARDS IN CASE OF POSSIBLE RAINFALL INDUCED SLOPE DISASTERS ON EXPRESSWAY

Taku ONJI, Keiji SAKURADANI, Kengo OBAMA, Daijiro MIZUTANI and Kiyoyuki KAITO

Occurrences of slope disasters on expressway disturb user's comfortable drive and cause serious accidents. Thus, it is important to adequately regulate traffic on the basis of the result of advance prediction. However, occurrences of slope disasters are not quantitatively valuated in a part of the establishment process of the present traffic regulation standards. Moreover, it is reported that occurrence of slope disaster before traffic regulation because of the climate change in the recent years and nonoccurrence of slope disaster after traffic regulation. Therefore, there are problems in the present method of establishing traffic regulation standards. In this study, the methodology for establishing optimal traffic regulation standards in the event of rain is built. Specifically, occurrence of slope disaster and rainfall is statistically formulated with the past data of slope disasters and rainfall. Furthermore, the risk of slope disaster is defined with these models and optimal model is formulated. Lastly, the authors adopt the proposed method to an existent expressway section as a model section and discuss the effectiveness of the methodology which is proposed in this study by empirical analysis.