

# 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

京都大学大学院 大津 宏康\*<sup>1</sup>

京都大学大学院 梅川 祐一郎\*<sup>2</sup>

By Hiroyasu OHTSU and Yuichiro UMEKAWA

事前通行規制とは、一般国道やJRにおいて降雨による斜面災害のリスク低減策として用いられる方法であり、災害が発生する前に当該区間を通行禁止にする措置である。この事前通行規制を実施する主目的としては、斜面崩壊によって人命の損失や負傷が発生する可能性を未然に防ぐことが挙げられるが、その一方で、規制する区間が通行できなくなるために利用者に不便をもたらすというデメリットも存在する。

本研究では一般国道に焦点を絞り、事前通行規制における上記のメリット・デメリットを踏まえて、規制区間の災害発生危険度のみならず道路管理者および道路利用者が斜面災害時や事前通行規制時に負担する社会経済的損失を考慮した、事前通行規制の基準の設定方法に関する試算を提案する。具体的には、降雨に対する斜面内の地下水位の挙動を再現するためにタンクモデルを用い、規制区間において斜面災害時および事前通行規制時に発生する社会経済的損失に焦点を当てた規制基準雨量の設定方法を検討するものである。また、連続雨量による一律の規制基準ではなく、降雨波形の違いや降雨の継続時間によって異なった規制基準雨量が算定されることを示す。

【キーワード】事前通行規制，社会経済的損失，限界雨量曲線

## 1. はじめに

降雨による斜面崩壊は毎年の梅雨期・台風期に特定の地域で多数発生し、土石流を誘発して深刻な被害を引き起こしている。それだけでなく、近年の国土開発により都市部から周辺部へ、そしてさらに丘陵部から山間部へと発展が進むにつれ、降雨による斜面災害がインフラおよび流通経済に及ぼす影響が非常に大きくなってきている。

JR や一般国道において、降雨による斜面災害のリスク低減策として用いられる方法は、災害が発生する前に当該区間を通行禁止にする事前通行規制である。国土交通省道路局ホームページ・事前通行規制情報 (<http://www.mlit.go.jp/road/bosai/jizenkisei/kisei.html>) によれば、事前通行規制とは、「大雨や台風による土砂崩れや落石等の恐れがある箇所について、

過去の記録などを元にそれぞれの規制の基準等を定め、災害が発生する前に『通行止』などの規制を実施し、道路を利用する皆様の安全を確保する」と述べられている。この事前通行規制を実施する主目的としては、斜面崩壊によって人命の損失や負傷が発生する可能性を未然に防ぐことが挙げられる。しかしながら、一方では規制する区間が封鎖となるために利用者に不便をもたらすというデメリットも存在する。

現在行われている事前通行規制については、地方整備局が管理する一般国道では連続雨量を、JR では時間雨量と連続雨量を基にした限界雨量曲線<sup>1)</sup>を基準として実施されている。いずれの場合においても、これらの規制基準は過去の災害履歴から決定されている。しかし近年、過去に経験の無い豪雨が発生す

\*1 経営管理研究部 教授 075-383-3260, ohtsu@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

\*2 経営管理教育部 学生 075-383-3263, umekawa@toshi.kuciv.kyoto-

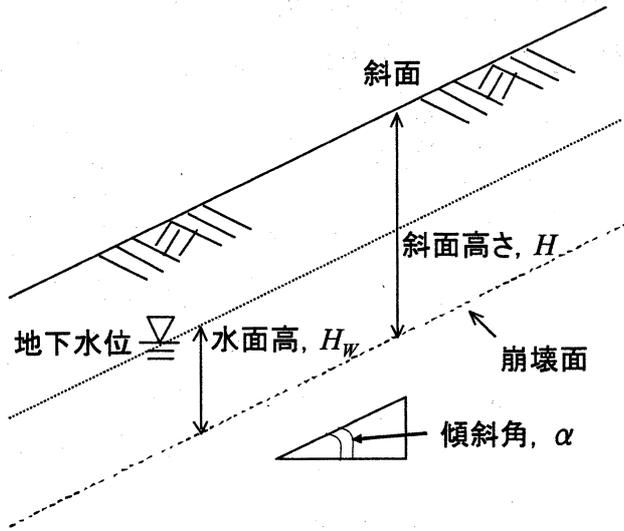


図-1 直線すべりモデル

るケースも増加してきており、過去の災害履歴のみによって決定される事前通行規制のあり方だけでは十分とは言えない。過去の災害履歴のみならず、利用者や企業および施設管理者にとってどのような規制基準が最適であるかという観点が必要となってくる。

筆者ら<sup>2)</sup>は、これまでに主に道路斜面を対象として、斜面崩壊に関する破壊確率  $p$ 、斜面崩壊に伴う損失  $C$  との積 ( $p \times C$ ) として算定される損失期待値をリスクと定義し、そのリスクを判断指標とした斜面補修・補強の優先順位付けに関する検討を示してきた。この研究においては、損失  $C$  は事業者損失（斜面の原形復旧費、対人・対物補修費）に加えて、利用者が被る社会的経済的損失（走行時間損失、迂回・走行損失）の和として定義した。

ここで、豪雨時の事前通行規制を実施することと、斜面が崩壊することは全く独立事象である。したがって、リスク評価の観点からは、事前通行規制は、事業者損失に含まれる対人・対物補修費のみを軽減するものであると位置付けられる。

このような観点から、本研究においては、一般国道における豪雨時の事前通行規制が対人・対物補修費（人身損失）を軽減する方策であるとして、その規制基準値の最適値の設定について、道路管理者および利用者が被る社会経済的損失を最小化するという観点から検討を加えるものである。

## 2. 斜面の破壊確率および発生損失

### (1) 期待損失

本研究では一般国道を対象として、降雨に起因する斜面崩壊による被害と、豪雨時の事前通行規制に伴って発生する損失をコスト次元で定量化する。そのために、式(1)に示すように期待損失という指標を定義する<sup>3)</sup>。対象とする損失は、複数の斜面を含む地域一帯での災害や事前通行規制によるものではなく、一般国道に付随する特定区間内の個別斜面が引き起こすものとする。

$$R = \sum_{i=1}^J P_i \times C_i \quad (1)$$

ここに、 $R$  は期待損失、 $P_i$  は事象  $i$  が発生する確率、および  $C_i$  は事象  $i$  が発生する場合の損失を表す。この定義式によると、期待損失はある事象に伴う損失の期待値と表現されることになり、損失の要因となる事象が生じる可能性と、その事象が生じた場合の被害額を合わせて考えることが可能になる。

### (2) 斜面の破壊確率

降雨による実際の斜面崩壊の形態としては、榎<sup>4)</sup>が指摘しているように、崩壊土塊の層圧  $H$  (図-1では斜面高さとして標記) と斜面の長さ  $L$  の比  $H/L$  が 0.1 程度の薄い表層すべりが多いことが確認されている。この知見に基づき、本研究では降雨に伴う斜面崩壊の形態を、図-1に示す直線すべりを用いてモデル化するものと仮定する。この仮定条件の下で、図-1に示す直線すべりモデルにおける斜面の安定性を示す性能関数  $Q$  は、次式のように定義される<sup>5)</sup>。

$$Q = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H}\right) \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} - 1 \quad (2)$$

ここに、 $\gamma_w$  [kN/m<sup>3</sup>] は水の単位体積重量、 $\gamma$  [kN/m<sup>3</sup>] は土の単位体積重量、 $H_w$  [m] は水面の崩壊面からの高さ（以下、水面高と称す）、 $H$  [m] は斜面高さ、 $\alpha$  [rad] は崩壊面の傾斜角、 $c$  [kN/m<sup>2</sup>] は土の粘着力、 $\phi$  [rad] は土の内部摩擦角を表す。

本研究では、性能関数  $Q$  における土の粘着力  $c$  と

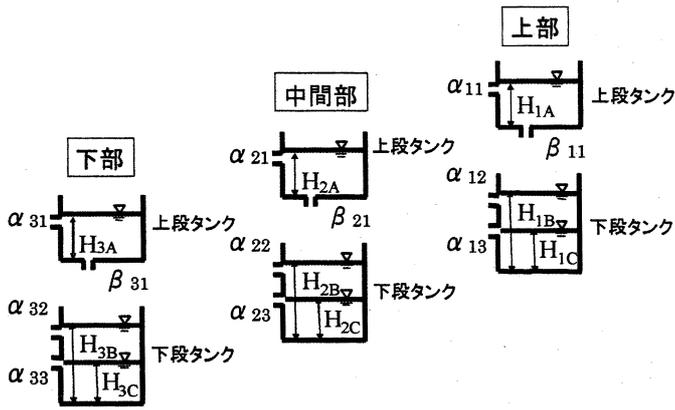


図-2 3連一次元タンクモデル

内部摩擦角  $\phi$  は確率変数と考え、 $X=c$  および  $Y=\tan\phi$  は、それぞれ  $X \sim N(\mu_c, \sigma_c)$ 、 $Y \sim N(\mu_{\tan\phi}, \sigma_{\tan\phi})$  という分布に従うと仮定する。

なお、両確率変数に関する平均値と標準偏差は、以下のように設定する。すなわち、一般に斜面の安定性に係わる強度定数に関しては、ばらつきを考慮した確定値のみが用いられ、明確に平均値と標準偏差が算定されることはない。このため、本研究では、安定解析に用いられる確定値を平均値と設定し、変動係数 COV は標準偏差/平均値と定義されることから、標準偏差は変動係数 COV と平均値の積として設定する。なお、以下の検討においては、ばらつきが比較的小さい場合を想定し、変動係数  $COV=0.1$  と設定する。

本研究では降雨による地下水位の変動を考慮した斜面の破壊確率を求めるために、ある水面高  $H_w$  に対して、 $Q$  が 0 を下回る確率  $\text{Prob}[Q(H_w) < 0]$  を算定するものとする。なお、水面高  $H_w$  については、降雨との関連性を考慮する必要があるため、次節に示すタンクモデルを用いてその変動をモデル化する。

タンクモデルを介して求められる水面高  $H_w$  は、雨の降り方に対する  $H_w$  の時間的変動が再現されている。そこで、降雨の始まりから水面高が徐々に上昇し、やがて降雨が終了すると斜面内の水分が引き始め、水面高さも下降していくという水面高の時間変動の開始から終了のうち水面高の最高値を採用する。そして、この値をもとにして性能関数  $Q$  が 0 を下回る確率、すなわち、 $\text{Prob}[Q(\max\{H_w\}) < 0]$  を算定することとする。この確率を以後、条件付破壊確率  $p_f$  と称する。

### (3) 降雨ハザード関数

本研究では、降雨に起因した斜面災害について検討を行うため、考察の対象とする特定地域における降雨の傾向についても考える必要がある。その考え方として、対象地域の過去の降雨状況からその地域の大雨の発生確率を決定するという方法を用いることにする。

対象地域における過去 20 年間の降雨データから多い順に上位 20 位の連続雨量を調べ、その情報を基にして連続雨量の年超過確率をガンベル法<sup>3)</sup>により求める。ガンベル法によれば、ある連続雨量  $r[\text{mm}]$  を超える降雨が一年間に発生する確率（以下、年超過確率と称す） $\psi(r)$  は、

$$\psi(r) = 1 - \exp[-e^{-a(r-b)}] \quad (3)$$

と表される。この  $\psi(r)$  は、ある連続雨量  $r$  に対する降雨ハザード関数とも呼ばれる。なお、式 (3) の  $a$ 、および  $b$  は対象地域の過去の降雨状況によって決まる定数である。

### (4) タンクモデル

式 (2) のような直線すべりモデルを考えた場合、降雨の状態がどの程度水面高の上昇に影響を及ぼすかを考える必要がある。本研究ではこの点を考慮すべく、比較的簡単に降雨による水面高の変動を推定する方法として、流出解析で用いられるタンクモデルを用いるものとする。タンクモデルとは、ある地域での降雨がその流域でどのような流出となって表れるかを推定するための手法であり、豪雨時の洪水予測や灌漑などの地下水利用を目的として用いられてきた<sup>6)</sup>。

本研究で用いるタンクモデルは、降雨への応答をモデル化した 2 段タンクからなる一次元タンクモデルを、斜面の上部、中間部、および下部に連結した図-2 に示す 3 連一次元タンクモデルである<sup>7)</sup>。なお、一次元タンクモデルは、ホートン地表流と降雨浸透に関係する上段タンクと側方浸透を発生させる下段タンクで構成されている。このようなタンクモデルを用いて、降雨に対する水面高変動の応答性を再現することとする。

## (5) 発生損失の分類および算定方法

本研究では、一般国道において斜面災害の発生時に想定される社会経済的損失、および事前通行規制時に想定される社会経済的損失を考察の対象とする。これらの社会経済的損失には道路事業者が被る損失（直接損失）と、道路の寸断が社会全体に及ぼす経済的損失（間接損失）とがあり、それらの損失額を計算する必要がある<sup>8)</sup>。

考察の対象とする損失は、被害額として定量的に計算できる以下の4つの項目とする。

### i) 人身損失 ( $C_1$ )

◇ 被災した道路利用者の人的損失と物的損失

### ii) 復旧費用 ( $C_2$ )

◇ 災害後の道路復旧に要する費用

### iii) 迂回損失 ( $C_3$ )

◇ 災害時の迂回による交通コストの増分

### iv) 空振損失 ( $C_4$ )

◇ 事前通行規制時の迂回による交通コストの増分

人身損失 ( $C_1$ ) は、崩壊してきた土砂（落石）に車両が埋没する、あるいは、道路に到達した土砂（落石）に車両が制動できず衝突することによって、死亡、負傷、軽傷、および物損を被る災害被災者の被害額である。

復旧費用  $C_2$  は、交通遮断の回復までに要した費用が対象となり、災害発生に伴う恒久対策工事の費用を含めず、復旧工事費と到達土砂の運搬処分費から算定する。

迂回損失  $C_3$  は、斜面災害で路線区間が通行止めになることにより発生する、道路利用者の被る社会的損失のことである。道路利用者は、通常は通行できる路線区間が斜面災害によって通行封鎖されてしまうと、目的地までの道のりを迂回せざるを得ない。そのためにより多くの時間を要したり、迂回路を走行すること自体に通常よりも多くの走行費用を要したりと、数々の損失を被ることになる。迂回損失は、そのような災害時の道路封鎖によって強いらられる道路利用者の時間費用損失と走行費用損失の和からなり、道路利用者が受ける負担を定量化したものである。

空振損失  $C_4$  は、事前通行規制の空振に伴い発生する損失である。ここで言う事前通行規制の空振りとは、

事前通行規制を行ったにも関わらず、斜面崩壊が生じなかった場合のことである。なお、平成2年度から平成16年度までの15年間の平均通行止め時間としては、事前通行規制区間内で災害発生に起因する通行止めが約20%であることに対し、事前通行規制の空振りが約30%、事前通行規制区間以外の災害による通行止めが約50%であったと報告されている<sup>9)</sup>。

このような事前通行規制の空振においては、人身損失 ( $C_1$ ) および復旧費用 ( $C_2$ ) は発生しないが、通行封鎖によって当該区間の通行ができなくなるために、斜面災害発生時と同じような迂回に伴う時間・走行費用損失が発生する。しかしながら、この場合の迂回に伴う時間・走行費用損失は、斜面崩壊が生じていないがゆえに、当該区間の安全が確認されればただちに通行可能となるので、迂回損失  $C_3$  と等しい値とはならない。

空振損失  $C_4$  の算定にあたっては、単位時間あたりの時間費用損失と走行費用損失が、災害による迂回損失  $C_3$  の算定に用いたものと同じであることを利用する。これは、封鎖の要因が斜面災害であれ事前通行規制であれ、封鎖していないときの当該区間の交通量や迂回路の長さなど、損失算定に用いる単位時間あたりの基本的なデータは当該区間特有のものであり、変わらないためである。

上記の考えの下、事前通行規制による規制時間を  $A$  時間、斜面災害時に想定される通行止め日数を  $B$  日間として、

$$\varepsilon = A / (24 \times B) \quad (4)$$

というパラメータ  $\varepsilon$  を設定する。このパラメータを用いて、

$$C_4 = \varepsilon \times C_3 \quad (5)$$

という関係式により空振損失  $C_4$  を算定する<sup>5)</sup>。

## (6) 規制基準雨量の超過・非超過による場合分け

本研究では、地方整備局が管理する一般国道で実施されている、連続雨量を判断基準とした事前通行規制を想定する。一般国道では、当該箇所の連続雨

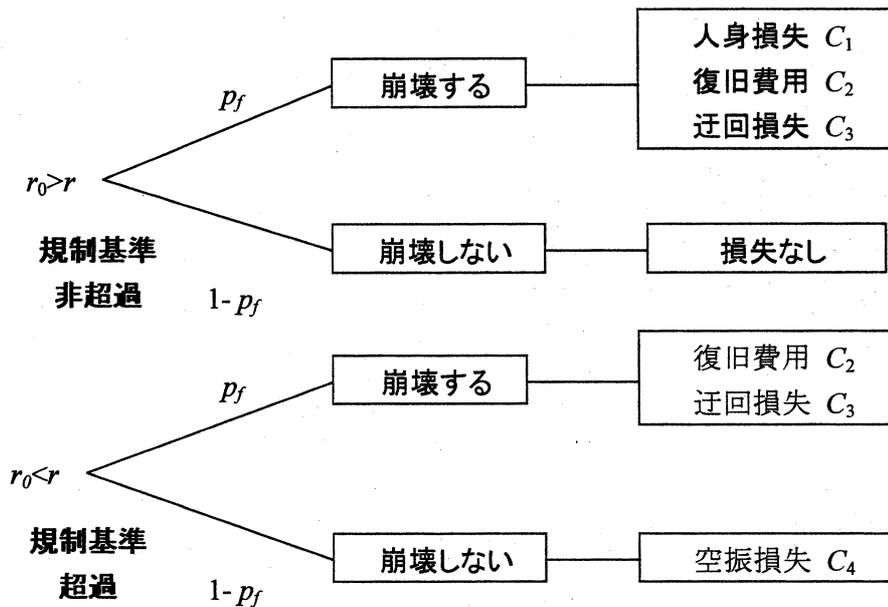


図-3 規制基準雨量の超過・非超過による場合分け

量が、基準値である規制基準雨量を超過した際に事前通行規制が実施される。この想定のもと、連続雨量  $r$ [mm]が規制基準雨量  $r_0$ [mm]を超えるか超えないかによって、また、斜面災害が発生したか発生しなかったかによって、計 4 つの場合分けを考えることができる。

**case1.**  $r$  が  $r_0$  を超過し、かつ斜面災害が発生する。

◇ このケースでは期待損失は  $p_f \times (C_2 + C_3)$  である。

**case2.**  $r$  が  $r_0$  を超過し、かつ斜面災害が発生しない。

◇ このケースでは期待損失は  $(1-p_f) \times C_4$  である。

**case3.**  $r$  が  $r_0$  を超過せずに、斜面災害が発生する。

◇ このケースでは期待損失は  $p_f \times (C_1 + C_2 + C_3)$  である。

**case4.**  $r$  が  $r_0$  を超過せず、斜面災害も発生しない。

◇ このケースでは期待損失は 0 である。

この場合分けを図にしたものを図-3 に示す。これら 4 つのケースをもとにして、規制基準雨量  $r_0$  をある値に設定したときの期待損失を算出することができる。なお、これら 4 つのケースの分類は、規制基準雨量  $r_0$  をどの値に設定するかによって変わってくる。例えば、規制基準雨量  $r_0$  を大きな値に設定すれば、豪雨時でも連続雨量は規制基準雨量を超過することは少なくなり、事前通行規制はあまり行われなくなるので、case1 や case2 よりも case3 や case4 のほうが生じやすくなる。逆に規制基準雨量  $r_0$  を小さい値に設定すれば、case3 や case4 よりも case1 や case2

のほうが生じやすくなる。

### (7) 年間期待損失

いま、前節によって case1～case4 の期待損失が分かっているので、それら全体の和を最小にできるような規制基準雨量  $r_0$  を設定することを試みる。

ある特定の斜面が破壊する確率は、条件付破壊確率  $p_f$  で表され、当該地域での豪雨の発生のしやすさは年超過確率  $\psi(r)$  で表されるとする。いずれも連続雨量  $r$  を基に決定される値であり、年超過確率  $\psi(r)$  は 1 年を単位としたある連続雨量値  $r$ [mm] に対する超過確率である。 $\psi(r)$  は降雨ハザード関数とも呼ばれ、4 つのケースについてこの降雨ハザード関数を合積することによって、それぞれの合計期待損失を 1 年単位で求めることができる。以下、これを年間期待損失と呼び、 $R(r_0)$  で表す。年間期待損失  $R(r_0)$  は規制基準雨量  $r_0$  の関数である。

年間期待損失  $R(r_0)$  は、連続雨量が規制基準雨量を超過しない場合、すなわち事前通行規制を実施していない際に生じる期待損失  $R(r < r_0)$  と、連続雨量が規制基準雨量を超過する際、すなわち事前通行規制を実施している際に生じる期待損失  $R(r > r_0)$  の和で表される。

$$R(r_0) = R(r < r_0) + R(r > r_0) \quad (6)$$

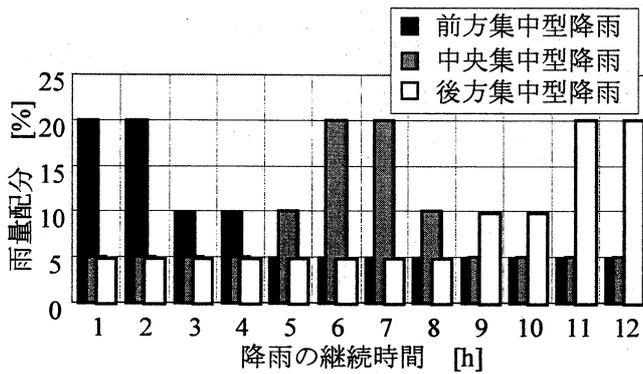


図-4 想定する降雨波形

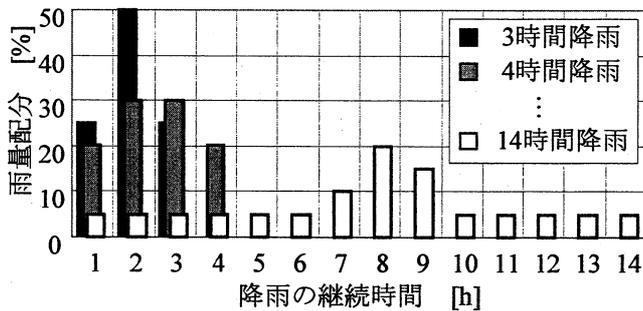


図-5 想定する降雨の継続時間

このうち、 $R(r < r_0)$ については前節の case3 と case4 における期待損失に降雨ハザード関数を合積したものが該当し、図-3 では非超過リスクとして示されている。 $R(r > r_0)$ については case1 と case2 における期待損失に降雨ハザード関数を合積したものが該当し、図-3 では超過リスクとして示されている。したがって、年間期待損失  $R(r_0)$  は式(5)のように表される。

$$\begin{aligned}
 R(r_0) = & \int_0^{r_0} [(C_1 + C_2 + C_3) \times p_f(r)] \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} dr \\
 & + \int_{r_0}^{\infty} [(C_2 + C_3) \times p_f(r)] \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} dr \quad (7) \\
 & + \int_{r_0}^{\infty} [C_4 \times (1 - p_f(r))] \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} dr
 \end{aligned}$$

$R(r < r_0)$ については  $r$  の積分区間が 0 から  $r_0$  に、 $R(r > r_0)$ については  $r_0$  から  $\infty$  となっていることに留意されたい。

このようにして求める年間期待損失  $R(r_0)$ は、先に

も述べたように規制基準雨量  $r_0$  の関数となっている。すなわち、 $R(r_0)$ の大小は  $r_0$  の設定によって左右されるので、 $r_0$  の設定によって、当該区間に発生する年間期待損失を最小にできるということを意味する。

### 3. 一般国道における適応例

#### (1) 雨の降り方に対する検討

現在、地方整備局が管理する一般国道では、豪雨時の連続雨量が区間ごとに定められる規制基準雨量を超過した際に事前通行規制が実施されている。しかし、一口に豪雨と言ってもその形態は様々であり、降り始めからの総雨量にのみ着目するだけでは、豪雨に対する斜面災害の危険性、およびそれがもたらす社会経済的な損失を検討するには十分ではない。同じ降雨強度が数時間程度続くという降雨も存在するが、時間とともに強度が増減する降雨も存在する。また、強い降雨が短時間で発生する場合もあれば、弱い降雨が長い時間発生する場合もある。そこで本研究では、降雨強度の時間的な変動、すなわち降雨波形と、降り始めから降り終わりまでの降雨の継続時間について考慮した事前通行規制の検討を行うものとする。降雨波形については図-4 に示すような、降り始めの降雨強度が最も強く、時間とともに減衰していくパターン（以下、前方集中型降雨と称す）と、降り始めは弱く、時間とともに降雨強度は強くなるが、ピークを境に強度が減衰していくパターン（以下、中央集中型降雨と称す）、および時間とともに強度が増し、降り終わりの降雨強度が最も強いパターン（以下、後方集中型降雨と称す）の3つのパターンを想定する。また、降雨の継続時間については図-5 の中央集中型降雨の事例に示すように、3時間継続する降雨から14時間継続する降雨まで降雨の継続時間を1時間ずつずらすことで、計12パターンを想定するものとする。なお、両図の縦軸に示す雨量配分とは、降雨開始時から終了時まで降った雨量の合計に対して、そのうち何%が各時間に降ったのかを表すものである。

#### (2) 考察対象区間の概要

本研究では、過去にも数回の事前通行規制実施の実績が存在し、実際に規制基準雨量が250mmと定められているある地区を考察の対象として、前章で示

表-1 想定交通量

車輛区分		交通量[台/日]
乗用車	乗用車	5,326
	バス	133
	計	5,459
貨物車	小型貨物車	2,677
	普通貨物車	878
	計	3,555
合計		9,014

表-2 その他の計算条件

平均乗車人数[人]	2
平均走行速度[km/h]	60
迂回走行速度[km/h]	30
規制区間長さ[km]	11.5
迂回路長さ[km]	57.5
崩壊土量[m <sup>3</sup> ]	1,300
崩壊到達幅[m]	30

した考え方の下、豪雨時の事前通行規制における規制基準雨量の試算を行う。試算に必要な条件として、降雨ハザード関数はこの区間に最も近い気象観測所がとらえた過去の降雨記録を基に決定し、各損失額の算定に用いた交通量は表-1のデータを用い、その他の条件は表-2にある値を仮定した。なお、本研究では、人身損失  $C_1$  の算定に必要な、死亡時の1人あたりの人身損失額を32,971千円と想定した<sup>3)</sup>。

迂回損失の算定にあたっては、災害が発生し表-2に示す崩壊土量(1,300m<sup>3</sup>)を、道路から除去し復旧するまでに要する日数を、積算基準に基づき13日間と設定した。

事前通行規制を実施しても無災害であった場合は、豪雨が止んだからといって即座に当該区間の規制を解除することは想定せず、道路管理者は規制を解除する前に当該区間に何も問題が発生していないことを点検し、安全が確認されてから通行規制を解除すると想定する。このとき、道路管理者が当該区間の通行は危険であると判断する材料が存在したり、あるいは安全を確認しようにも夜間であるために確認が困難な場合には、さらに規制時間が長引くことも予想される。ここで、事前通行規制時において通行規制の時間的な長さは一意に決まるものではなく、降雨の状況やいつ通行規制が実施されたかによっても異なるものである。しかし、次節および次々節で

表-3 損失額算定結果

損失区分	損失額[百万円]
人身損失 $C_1$	27.86
復旧費用 $C_2$	13.87
迂回損失 $C_3$	1,016.51
空振損失 $C_4$	97.74

は、道路事業者へのヒアリング結果に基づき、平均的な規制時間については、30時間と設定した。

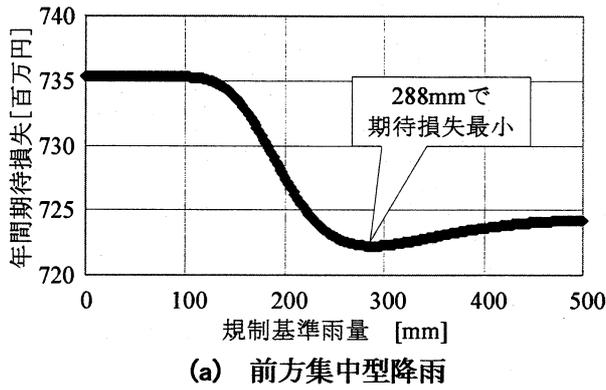
すなわち式(2)における  $\varepsilon$  は、

$$\varepsilon = 30 / (24 \times 13) = 0.096154 \quad (8)$$

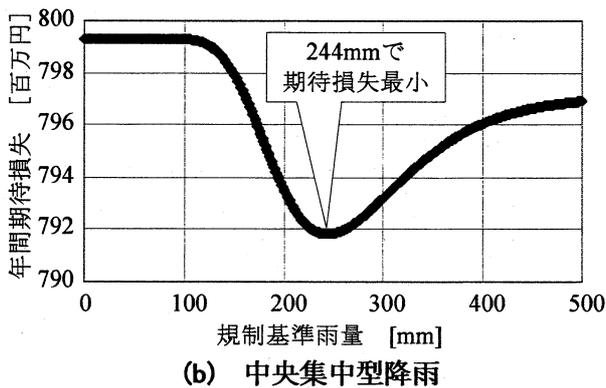
となる。前章でも示したが、空振損失は迂回損失のこの  $\varepsilon$  倍である。このようにして算定したそれぞれの損失額を表-3に示す。なお、に示す  $C_1 \sim C_3$  に示す各種損失の算定根拠については、付録に示す。

### (3) 降雨波形による期待損失の違い

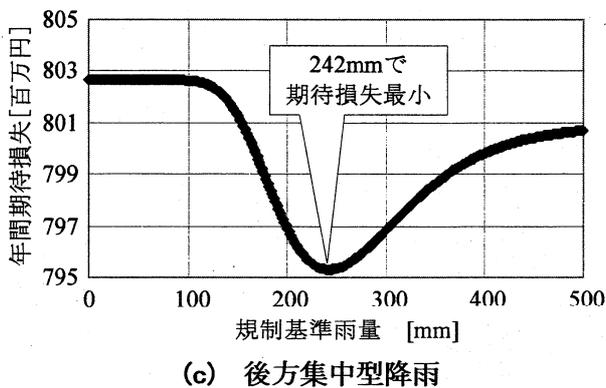
前節で示された条件の下、図-4に示したような降雨が12時間継続すると仮定して、前方集中型、中央集中型、後方集中型の3つの降雨パターンについて年間期待損失の算定を行った。また、その際、計算で得られた年間期待損失が最も小さくなる規制基準雨量を、道路利用者および道路管理者が被る損失を最小限にできるという意味で、規制開始のための最適な規制基準雨量であると判断することにした。この算定結果を図-6に示す。同図から、前方集中型降雨は中央集中型降雨や後方集中型降雨に比べて、より大きな規制基準雨量値が適していること、すなわち前方集中型降雨では中央集中型降雨や後方集中型降雨よりも降り始めからの雨量に対して緩めな規制基準を設定することが可能であることが分かる。これは同じ斜面でも、前方集中型の降雨のほうが他の波形の降雨よりも崩壊を生じさせにくいためと考えられる。また、前方集中型降雨は中央集中型降雨や後方集中型降雨に比べて、同じ連続雨量においても算定される年間期待損失が小さいことも分かる。このことから、道路管理者は前方集中型降雨よりも中央集中型降雨や後方集中型降雨のほうが豪雨時に大きな損失を発生する可能性があることを認識する必要があると言える。



(a) 前方集中型降雨



(b) 中央集中型降雨



(c) 後方集中型降雨

図-6 規制基準雨量と年間期待損失の関係

**(4)降雨の継続時間と連続雨量による限界雨量曲線**

前節では降雨の継続時間が 12 時間である場合の規制基準雨量と年間期待損失の関係を示したが、本節では、降り始めから降り終わりまでの時間、すなわち降雨の継続時間の長さも変化させた規制基準雨量の算定について考える。前節と同様に年間期待損失が最も小さくなる連続雨量が、道路利用者および道路管理者の被る損失を最小限にできるという意味で規制開始のための最適な規制基準雨量であると考え、その連続雨量を、降雨の継続時間ごとに求めた。

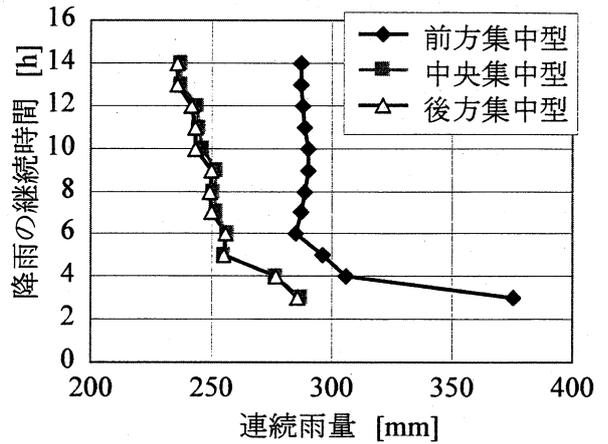
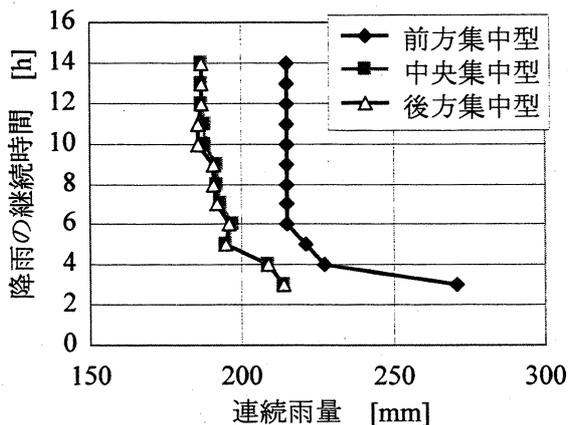


図-7 連続雨量と降雨の継続時間の関係 (規制時間 30 時間)

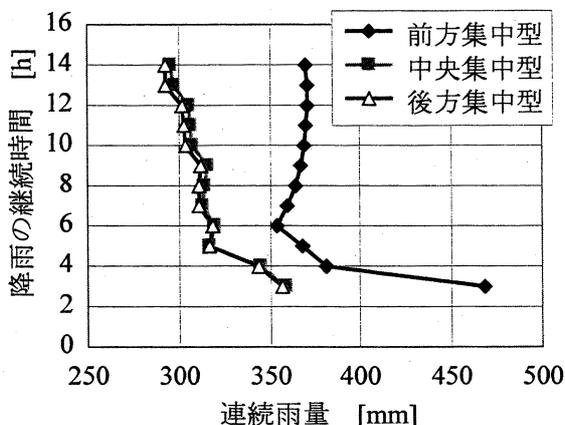
この算定結果を図-7 に示す。この図は横軸が連続雨量を表し、縦軸に降雨の継続時間を表している。降雨波形別に 3 つの曲線が見てとることができ、プロットされた各点は、降雨波形、および降雨の継続時間ごとの年間期待損失を最小にする規制基準雨量を表している。

この曲線の物理的意味は、ある降雨の挙動が曲線よりも左下の領域に収まる場合は、その降雨の状況下では事前通行規制を行う必要がないことを表し、曲線よりも右上の領域に達する場合は、事前通行規制を行うほうが期待損失をより小さくすることができることを表している。すなわち、この曲線が事前通行規制を行うか行わないかの分岐点を示しており、曲線より左下領域では事前通行規制を行わない方が期待損失は少なく、曲線より右上領域では事前通行規制を行う方が期待損失は少なくなることを示している。この曲線は、現在 JR が用いている限界雨量曲線が横軸を連続雨量、縦軸を時間雨量としていることに対し、縦軸を降雨の継続時間としている部分と、斜面災害と事前通行規制の空振による社会経済的損失に着目して、それを最小にする事前通行規制の判断材料となるところが、既存の限界雨量曲線と異なる部分である。

図-7 の特徴として、いずれの降雨波形においても降雨の継続時間が長くなると規制基準雨量は一定の値に収束することが見受けられる。これは、3~4 時間のように短い時間に極端に多量の雨がもたらされる場合は斜面に浸透する雨の量は少ないが、それよ



(a) 規制時間 15 時間



(b) 規制時間 60 時間

図-8 規制時間の連続雨量の関係

りも長い時間をかけて大雨が継続する場合は斜面に浸透する雨の量が多くなり、斜面崩壊の危険性が高くなるというタンクモデルの特徴を反映しているためと考えられる。

注意すべき点は、社会経済的損失に着目した規制基準であるために、ここで得られた規制基準雨量は、この損失に依存したものとなることである。本研究においては、表-1 および表-2 で示した規制区間の状況下で得られる社会経済的損失を想定したが、区間の長さや交通量等はそれぞれの区間で異なるものであるため、それぞれの規制区間で斜面災害時および事前通行規制の空振時に発生する社会経済的損失は個別なものとなる。したがって、本研究で示す事前通行規制の基準の設定方法を用いると、規制基準は規制区間ごとに異なったものとなる。

#### (5) 規制時間と規制基準の関係

前節および前々節では事前通行規制による規制時間を 30 時間と想定して、規制基準の設定方法に関する試算を行った。しかし、この規制時間は一意に決まるものではなく、降雨の状況や、いつ通行規制が行われているのかによっても異なるものである。そこで本節ではこの規制時間が状況によって変動するものとしてとらえ、規制基準雨量の試算を行うものとする。

規制時間を前節および前々節の半分である 15 時間と、倍である 60 時間について、これまでの検討と同じく社会経済的損失を最小にする規制基準雨量を試算する。降雨波形についても、これまでの検討と同じく前方集中型、中央集中型、および後方集中型の 3 つのパターンを想定し、降雨の継続時間についても 3 時間から 14 時間の各 1 時間について想定する。すなわち、他の条件を変えずに、規制時間が半分になった場合と倍になった場合を想定するものであり、式 (3) における  $\varepsilon$  だけが前節および前々節での値の半分あるいは倍になる。これに伴って空振損失  $C_4$  も変化することになる。

図-7 と同様に、年間期待損失を最小にする規制基準雨量と降雨の継続時間の関係を図-8 に示す。規制時間が 15 時間である場合は、30 時間の場合と比べて前方集中型降雨では規制基準が 70mm 程度小さくなるが、中央集中型および後方集中型降雨では、50mm 程度小さくなる。一方、規制時間が 60 時間である場合は、30 時間の場合と比べて前方集中型降雨では規制基準が 80mm 程度大きくなるが、中央集中型および後方集中型降雨では 60mm 程度大きくなる。これは、本研究で示す規制基準の設定方法が、当該区間が斜面災害時および事前通行規制時に発生する社会経済的損失に依存するものであり、その社会経済的損失の中でも、空振損失  $C_4$  の値は事前通行規制の時間的な長さによって決定されるものであるためである。そのため、本研究で示す規制基準の設定方法においては、この規制時間の長さによって規制基準雨量が左右されることを示している。

#### 4. まとめ

本研究は、一般国道における豪雨時の事前通行規

制について、斜面災害に伴い発生する社会経済的損失と事前通行規制そのものにもない発生する社会経済的損失を踏まえて、これらの損失を最小にする事前通行規制の規制基準の設定方法に関する試算を提案した。現状でなされている事前通行規制が過去の災害実績によって規制基準が設定されることに対し、本研究では道路利用者および道路管理者が被る社会経済的損失に目を向けた点が従来の事前通行規制の考え方と異なる部分である。

斜面災害の要因となる降雨については、その降り方に着目し、降雨の継続時間と降雨波形ごとに社会経済的損失を最小にする事前通行規制の規制基準を算定した。その結果、一律な規制基準ではなく、降雨の継続時間ごと、降雨波形ごとに異なる規制基準が得られた。

ただし、本研究で示した設定方法で得られる規制基準は、斜面災害時および事前通行規制時に発生する社会経済的損失の大きさに依存するものであるため、規制区間ごとに豪雨の発生のしやすさや、その区間の利用者の多さ、すなわち社会経済的な重要性は異なっていることを考慮すると、規制区間ごとの規制基準の設定が必要であると言える。また、規制時間の長さは予め一意に決まるものではないが、規制基準雨量はこの規制時間の長さにも依存するものであることにも注意が必要である。

## 付 録

斜面崩壊によって発生する損失は、崩壊した土砂の撤去・復旧費用 $C_1$ 、迂回に伴う時間・走行費用損失 $C_2$ 、人身損失 $C_3$ の大きく3つに分類され、それらの和が総損失額となる。

その計算方法は、以下に示す通りである。

a) 崩壊した土砂の撤去・復旧費用  $C_1$

$$C_1 = 9.6246 \times V_0 + 1361.1 \quad (9)$$

ここに、 $V_0$ は、到達土砂量[m<sup>3</sup>]を表す。

b) 迂回に伴う時間・走行費用損失

$$C_2 = \text{復旧日数} \times \text{利用者損失} \quad (10)$$

ここに、復旧日数は、到達土砂量を一日当たりの搬出土砂量で除した値であり、利用者損失は、時間損失と走行損失の和である。

c) 人身損失  $C_3$

$$C_3 = (M_1 + M_2) \times I \div 2 \quad (11)$$

ここに、 $M_1$ は土砂への埋没による被災人数、 $M_2$ は到達土砂への車両衝突による被災する人数、 $I$ は死亡時の一人当たりの人身損失額(32,971[千円])を表す。

また、土砂への埋没による被災人数  $M_1$ 、および到達土砂への車両衝突による被災する人数  $M_2$ は、それぞれ次式により算定する。

$$M_1 = \frac{\text{(時間交通量)}}{1000 \times \text{(走行速度)}} \times \text{(平均乗員数)} \times \text{(崩壊の到達幅)} \quad (12)$$

$$M_2 = \frac{\text{(時間交通量)}}{1000 \times \text{(走行速度)}} \times \text{(平均乗員数)} \times \text{(制動停止距離)} \quad (13)$$

式(9)～式(13)に基づく損失算定に用いた具体的な諸元を以下に要約して示す。

- ・ 平均乗車人数は 2 人
- ・ 死亡時の 1 人当りの人身損失額  $I$  は 32,971 千円
- ・ 迂回路の平均走行速度は 30km/h
- ・ 迂回路の長さは事前通行規制区間の長さの 5 倍
- ・ 災害復旧時の 1 日あたりの土砂運搬量は 100m<sup>3</sup>

## 【参考文献】

- 1) 例えば、岡田勝也、杉山友康：降雨時の斜面崩壊危険度と鉄道における運転規制、土と基礎、Vol.49, No.7, pp.22-24, 2001.
- 2) 大津宏康、高橋健二、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, pp.341-348, 2003.
- 3) 建設コンサルタント協会近畿支部：斜面安定評価における劣化概念の導入、第3編、2006.

- 4) 榎明潔：降雨時の斜面表層崩壊，土と基礎，Vol. 47, No.5, pp. 17-20, 1999.
- 5) 大津宏康，梅川祐一郎：土工・斜面，サマースクール 2007「建設マネジメントを考える」テキスト，pp115-121, 2007.
- 6) 伊藤正純：自然災害リスクを考慮した斜面設計手法に関する研究，京都大学修士論文，2000.
- 7) 高橋健二，大津宏康，大西有三：タンクモデル法を用いた地下水位挙動変動を考慮した斜面リスク評価の研究，土と基礎，Vol.51, No.10, pp.15-17, 2003.
- 8) 土木研究所材料地盤研究グループ：道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援マニュアル（暫定版），1999.
- 9) 沖村孝：豪雨災害，特に土砂災害防止への研究・仕組みの現状と課題，土と基礎，Vol.55, No.6, pp.1-4, 2007.

## A Proposal on Establishment of Early Traffic Warning Systems against Heavy Rainfall Based on Social Economic Losses

By Hiroyasu OHTSU and Yuichiro UMEKAWA

Early traffic warning systems against heavy rainfall carry out traffic regulations before disasters occur in order to reduce risks of slope disasters caused by heavy rainfall. The objective of the system is prevention of the losses of life and injury caused by the disaster. It has the disadvantage, however, that drivers cannot pass the route, appearing when the slope disaster does not occur under the traffic regulation.

In this proposal, we investigate the social economic losses when a slope collapses or early traffic warning systems are carried out, considering the probability of failure of slope. More specifically, social economic losses are classified into direct losses and indirect losses. The direct loss is related to cost of slope restoration and compensation for damages to vehicles, passengers and private properties. On the other hand, the indirect loss is related to losses to road users due to diversions during interruption of road service caused by slope failures or the traffic regulation by the early traffic warning system. Furthermore, we utilize Tank Model in order to consider the ground water level change to calculate a probability of slope failures by a difference of rainfall patterns and continuities.

While the conventional early traffic warning system is based on the historical records of slope disasters, the system which we propose is based on the social economic losses. Regarding accumulated rain as a criterion for traffic regulations against heavy rainfall, we propose the method for establishment of the early traffic warning system focuses on socio-economic view points.