

地形を考慮した土石流の発生危険性評価

布川 修* 太田 直之* 石川 智史**

Risk Evaluation of Debris Flow using Digital Terrain Model

Osamu NUNOKAWA Naoyuki OTA Satoshi ISHIKAWA

In order to ensure the safe train operation, it is necessary to identify beforehand the area along the railways where the risk of various kinds of slope collapse is high at the time of rainfall. The movement of the water in a slope at the rainfall time has a big influence on various kinds of slope collapse. We have calculated the movement of the water in a slope in consideration of three-dimensional geographical feature, and developed the calculation method of risk evaluation of debris flow based on this result. In this paper, we described the concept of the developed method, and a calculation example using this model.

キーワード：降雨，土石流，斜面崩壊，解析モデル，安定性，地形

1. はじめに

自然斜面や切土・盛土のり面の崩壊，あるいは土石流など降雨による様々な斜面崩壊から列車の安全を確保するためには，斜面崩壊の危険性を評価し，崩壊の危険性が高い箇所をあらかじめ把握しておくことが必要である。降雨による斜面崩壊の危険性を評価するためには，斜面周辺の比較的広範囲な水の移動現象を考慮することが重要となる。

そこで，筆者らは自然・切土斜面表層の崩壊を対象として，斜面表層の地下水位を求めた上で安定性を計算する解析モデルについて検討してきた^{1) 2)}。本稿は，この解析モデルを発展させることで土石流の発生危険性を評価することを試みたものである。

土石流の発生には溪流流域斜面の崩壊危険性と溪流水量の変化が大きな影響を及ぼす。溪流流域斜面の崩壊危険性については，これまでの検討で計算できることを明らかにした²⁾。そこで本稿では，まず，鉄道沿線斜面で計測した溪流水量と解析モデルで計算される溪流水量の比較を行い，解析モデルによる溪流水量計算の適用性について検討した。その上で，過去に土石流が発生した溪流を対象とした解析を実施し，溪流流域斜面の不安定化と溪流水量の増大という土石流発生時に想定される現象が計算可能かどうかを把握した。

2. 解析モデルの概要

降雨時に発生する自然斜面や切土斜面表層の崩壊に対

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

** 防災技術研究部 地盤防災研究室 (現 東海旅客鉄道株式会社 名古屋土木技術センター)

する安定性を評価する方法として，沖村³⁾らが提案したものがある。この方法では，まず地形図等をもとに対象斜面の地形を格子状に3次元座標でデジタル化し，4つの格子点に囲まれた要素ごとにある厚さの土塊を持つ斜面表層を設定する。そして，要素間の雨水流動を考慮して要素ごとの地下水位を計算し，この結果から自然斜面や切土斜面表層の崩壊に対する安定性を評価する。

本研究に先行して実施した研究では，上記のモデルに土質ごとに異なる斜面表層(要素)の平均化した飽和度(以下，平均飽和度という)と地下水位との関係式と，地形的に凹地となる箇所を「沢(溪流)」と定義して水が集中して流下する計算手法を導入することで，実務への適用性を高めた解析モデル^{1) 2)}(以下，既開発モデルという)を構築した。図1に既開発モデルにおける斜面表層の雨水流動に関する概念図を示す。図に示すとおり，降雨時に発生する斜面表層の雨水流動をモデル化することで，時々刻々と変化する地下水位を計算する。

図2に既開発モデルの計算フローを示す。まず，モデルの初期条件である数値地形データ，各要素の透水係数，表層厚，土質強度等を時間的に不変なデータとしたうえで，①地形条件から各要素の勾配を求め，水が流れる向きと沢(溪流)を設定する。つぎに，②設定した降雨を入力することで，要素ごとの水の流入量，流出量から要素の平均飽和度を求め，③これから地下水位を計算する。さらに，④求めた地下水位から要素ごとの崩壊に対する安定性を，簡便法として斜面表層の安定解析によく利用されている無限長斜面の安定解析手法を用いて算出した安全率(安定性の指標：値が小さいほど安定性が低い)により評価する。上記②～④を Δt 時間間隔で設定計算時間まで繰り返し行うことで，対象斜面全域における自然斜面と切土斜面表層の安定性を経時的に計算する。な

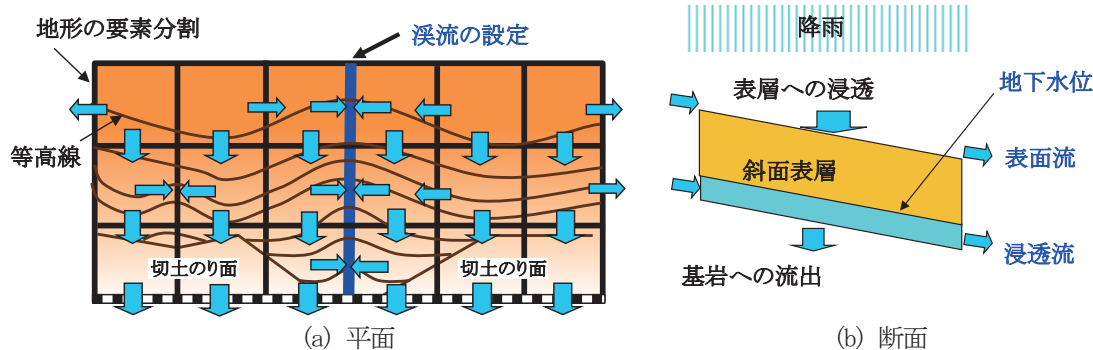


図1 既開発モデルにおける斜面表層の雨水流動に関する概念図

お、図2にも記載しているが、本研究で検討する土石流の発生危険性評価方法では、既開発モデルで算出される沢（溪流）の水量も利用する。

上記で示した計算の詳細は文献1)、2)に示しており、参考にされたい。

3. 溪流水量計算の適用性検証

3.1 土石流の発生形態

土石流の発生形態は、図3に示すとおり、a) 溪床堆積物によるタイプ、b) 斜面崩壊によるタイプ、に分けられる。上記a)のタイプは過去の斜面崩壊等により溪流に堆積物が溜まっており、溪流水量の増加に伴いこの堆積物が急激に移動を始めて土石流となるものである。上記b)のタイプは、一連の降雨中に斜面崩壊が発生して溪流に崩土が堆積し、溪流水量の増加に伴いこの崩土が急激に移動を始めて土石流となるものである。いずれのタイプにおいても、前述したとおり、土石流の発生には溪流水量の変化が大きな影響を及ぼすことから、ここでは、解析モデルによる溪流水量計算の適用性を検証した。

3.2 解析対象斜面の概要と解析条件

解析対象斜面は、鉄道沿線の斜面において溪流水量を計測した箇所である。この斜面は平均勾配25°程度で沢地形を呈しており、この沢（溪流）の流域面積は0.03km²（斜面奥行き方向の距離340m、斜面平行方向の距離100m）である。溪流部付近には、沢地形の中腹部から下部斜面にわたり表面排水工としての水路が敷設されている。この排水工の構造は三面張り（両側：間知石積、底面：コンクリート張）で、場所によって幅、深さとも若干寸法が異なるものの、幅950mm、高さ600mm程度である。

この水路に、図4に示すとおり、溪流水量計算のための堰（三角堰）を一定期間設置し、溪流水量の経時的な変化を計測した。三角堰を用いた際の溪流水量は、式(1)および式(2)から算出した。これらの式を用いて水量 Q

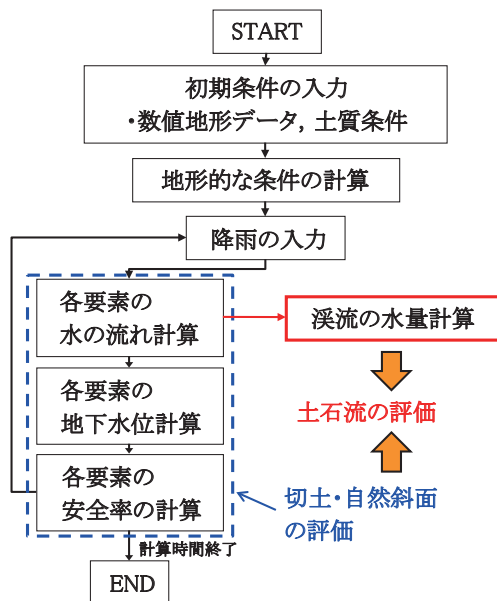


図2 既開発モデルの計算フロー

を算出する際に必要となる越流水深 H は、三角堰に設置したストレーナー管に地下水位計を設置することで計測した。

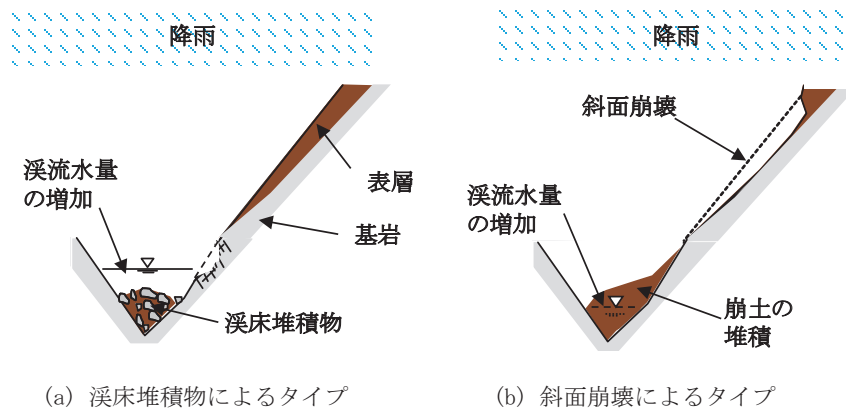
$$Q = 0.557 \cdot K \cdot H^{5/2} \quad (1)$$

$$K = 83 + (0.00624 / (B \cdot h^{3/4})) \quad (2)$$

ここで、 Q :水量 (l/min)、 B :堰幅 (0.5m)、 K :水量係数、 H :越流水深 (m)、 h :堰内水深 (0.15m) である。

解析対象斜面の数値地形モデル (10m 格子間隔) を図5に、解析パラメータを表1に示す。解析パラメータのうち、土粒子の密度、間隙比、透水係数、飽和度—地下水位モデルの係数については、現地採取した試料を用いた各種試験結果をもとに設定した。表層厚は、現地で実施した簡易動的コーン貫入試験の結果をもとに、斜面全域を一定の表層厚と仮定して設定した。

降雨条件は、当該斜面に最も近いアメダス観測所のデータを利用し、ある程度の溪流水量が観測された期間の観測降雨を与えた。降雨を与える前の初期状態として、



(a) 溪床堆積物によるタイプ (b) 斜面崩壊によるタイプ

図3 土石流の発生形態



図4 溪流水量の計測状況

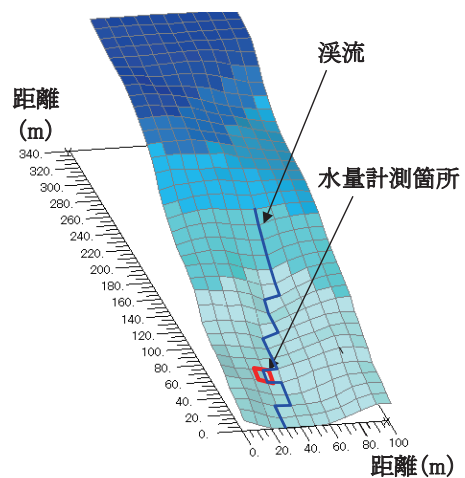


図5 溪流水量計測斜面の数値地形モデル

表1 溪流水量計測斜面の解析パラメータ

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.657
間隙比 e	0.912
表層厚 D (m)	2.5
透水係数 k (m/s)	5.0×10^{-5}
飽和度-地下水位モデルの係数 ¹⁾	$n = 0.0043 \cdot \theta + 1.265$ $S_{rh} = 0.1193 \cdot \theta + 75.7$ θ : 斜面角度 (°)

岡田らの手法⁴⁾を参考にして、斜面の飽和度分布が定常状態になるまで0.694mm/hの雨量を3日に1日の割合(年平均降雨量を2000mmとしたときの平均雨量)で与える予備解析を実施し、初期飽和度を設定した。

3.3 溪流水量の比較結果

上記で述べた解析条件をもとに、計測箇所と同一の箇所での溪流水量計算を行い、現地斜面で計測した溪流水量と比較した。計測および計算で得られた溪流水量の経時変化を図6に示す。ピーク時以外の溪流水量は計測結果よりも計算結果のほうが多く、絶対量としての誤差は

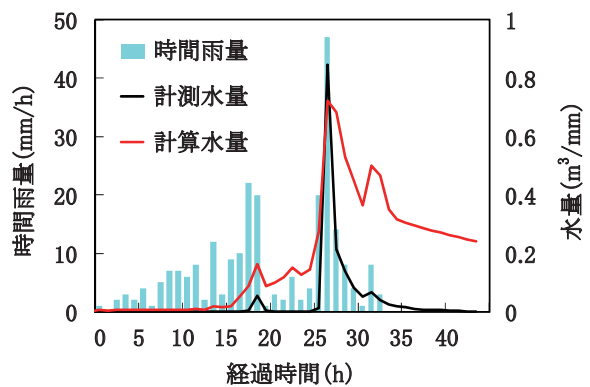


図6 計測および計算で得られた溪流水量の経時変化

あるもののピークとなる経過時間はほぼ一致し、経時的な傾向は概ね同様であることがわかる。したがって、土石流の発生に大きな影響を及ぼす溪流水量の変化を本解析モデルによる計算で再現できると判断した。

4. 事例解析

4.1 解析対象斜面の概要と解析条件

ここでは、溪流流域斜面の不安定化と溪流水量の増

特集：防災技術

大という土石流発生時に想定される現象が解析モデルによる計算で再現可能かどうかを把握することを目的として、過去に土石流が発生した箇所を対象とした事例解析を実施した。

解析対象斜面の数値地形モデル（10m 格子間隔）を図7に、解析パラメータを表2に示す。解析パラメータの設定方法および予備解析は、3.2節で述べた方法と同様である。3.2節の解析では設定していない土の強度定数は、内部摩擦角を 30° とし、粘着力は本解析の初期状態（予備解析後の状態）において最小となるメッシュの安全率が1.2となるように逆算して設定した。降雨条件は、当該斜面に最も近いアメダス観測所のデータを利用し、土石流が発生したときの観測降雨を与えた。

4.2 解析結果

解析結果として得られる渓流流域斜面の面的な安定性

評価結果の分布を図8に示す。この図より、降雨量の増加に伴い安定性が低下する渓流流域斜面の面積が増加していることがわかる。そこで、沖村ら⁵⁾が提案している土石流の発生・非発生を評価する考え方を参考にして、渓流流域斜面の崩壊危険性は崩壊面積率（＝崩壊の可能性が高まる渓流流域斜面の投影面積／渓流流域全体の斜面の投影面積×100(%)）で評価することとした。なお、この崩壊面積率は、図7に示した解析モデルによる計算結果から、所定の安全率を下回る渓流流域内の要素数の合計を算定し、渓流流域全体の要素数で除すことで求めることが可能である。

渓流流域斜面の崩壊危険性の指標とした崩壊面積率と渓流水量の計算結果を図9に示す。図に示すとおり、降雨量の増加に伴い、崩壊面積率、渓流水量とも増加する計算結果となっている。すなわち、渓流流域斜面の不安定化と渓流水量の増大という土石流発生時に想定される現象が解析モデルによる計算で再現できることが示唆される。

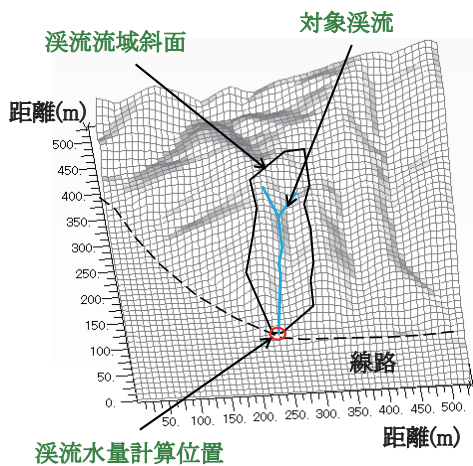


図7 土石流発生斜面の数値地形モデル

表2 土石流発生斜面の解析パラメータ

土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.624
間隙比 e	1.08
表層厚 D (m)	1
透水係数 k (m/s)	1.24×10^{-5}
飽和度 - 地下水位モデルの係数 ¹⁾	$n = 0.0043 \cdot \theta + 1.265$ $S_{rh} = 0.1193 \cdot \theta + 75.7$ θ : 斜面角度 ($^\circ$)
土の強度定数	内部摩擦角 30° , 粘着力は本解析の初期状態において最小となる安全率が1.2となる値に設定

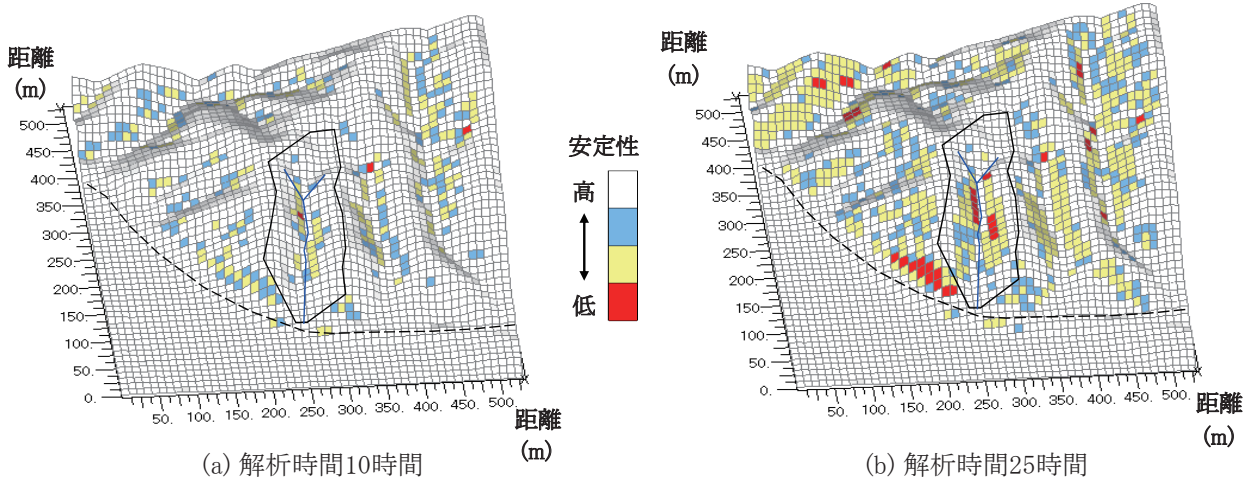


図8 渓流流域斜面の面的な安定性評価結果の分布

4.3 土石流の発生危険性評価フロー

3.1 節で述べた発生形態と 4.2 節で述べた解析モデルによる計算結果をもとに、図 10 に示すとおり、土石流の発生危険性評価フローを作成した。

溪床堆積物が土石流となる可能性は、溪床堆積物の有無と渓流水量に依存することから、現地調査により溪床堆積物の存在が確認される場合には、渓流水量が基準値を超えた場合に土石流が発生するものと評価する。一方、渓流水量が基準値を超えずに土石流が発生しないと評価された場合、および、溪床に堆積物が確認されなかった場合は、渓流流域斜面の崩壊により土石流となる可能性について評価する。具体的には、渓流流域の崩壊面積率と渓流水量がともに基準値を超えた場合に土石流が発生するものと評価する。

上記で述べた渓流水量の基準値の設定には、1) 過去の災害事例、2) 芦田らが提案している土石流発生限界水量の計算式⁶⁾、等が参考となる。渓流流域斜面の崩壊面積率の基準値は、1) 過去の災害事例、2) 前述した沖村らが提案している渓流の流域面積と崩壊面積率との関係をもとに土石流の発生・非発生を評価する考え方、等が参考となる。

これらの基準値に関しては、今後、土石流が発生した複数の箇所に対して本解析モデルを適用することで検討する予定である。

4.4 評価結果の利用方法

前述した解析モデルを用いた評価結果は、複数の土石流危険渓流を対象とした防災対策の優先順位等の判断や

降雨時運転規制の検討支援に利用できると考えている。

評価フローに示した渓流流域斜面の崩壊により土石流が発生する場合を想定した評価結果イメージを図 11 に示す。前述した検討を行うためには、まず、外力である降雨を統一した指標で設定する必要がある。ここでは、降雨パターンを鉄道構造物等設計標準（土構造物）⁷⁾ に示されている短期型降雨パターンとし、降雨量については近傍のアメダスデータを用いて時間雨量や連続雨量の確率雨量を求めることで設定することとした。図にはこの降雨（N年確率の降雨とする）を与えたときの計算結果である崩壊面積と渓流水量をそれぞれに設定される基準値で除した値の経時変化を示した。これらの値が 1.0 を上回っている時には、土石流の発生危険性が高まっているものと評価でき、図より土石流の発生危険性が高ま

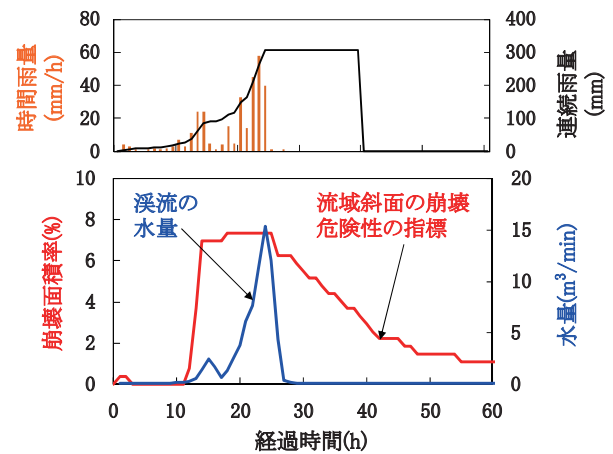


図 9 崩壊面積率と渓流水量の計算結果

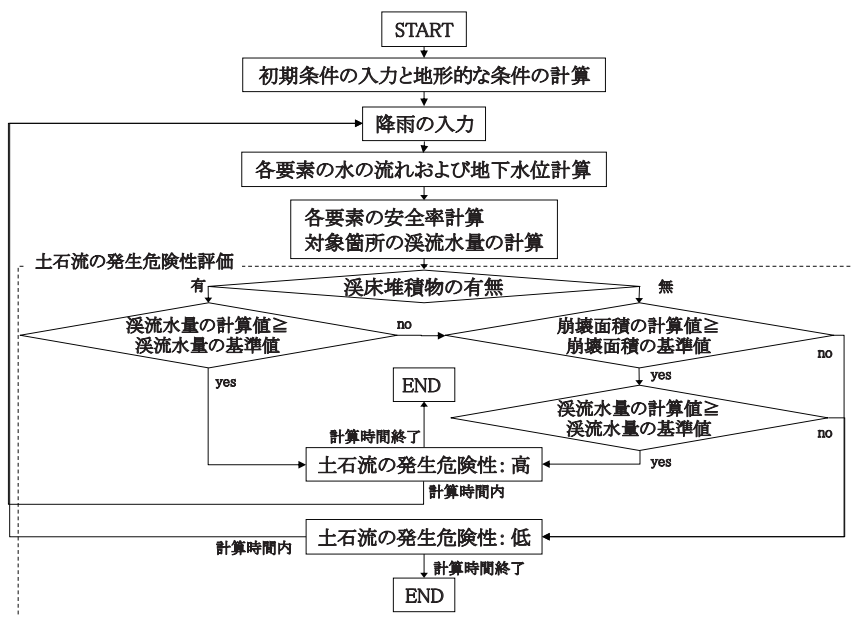


図 10 土石流発生の危険性評価フロー

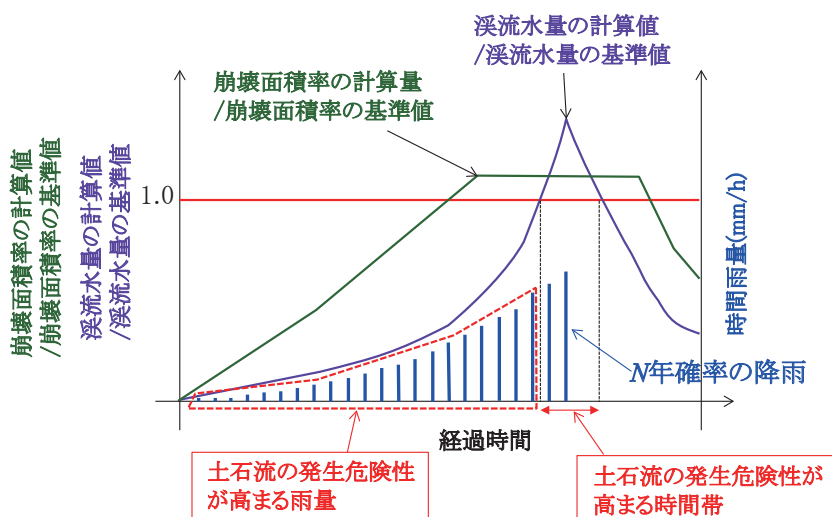


図 11 渓流流域斜面の崩壊により土石流が発生する場合を想定した評価結果イメージ

る雨量や時間帯を把握することができる。

このような評価を複数の土石流危険渓流に適用し、土石流の危険性が高まる雨量や時間帯を比較することで、防災対策の優先順位等の判断や降雨時運転規制の検討を支援することが可能であると考えられる。

5. まとめ

- 1) 渓流水量計測斜面を対象とした事例解析により、計測結果と計算結果とを比較することで、土石流の発生に大きな影響を及ぼす渓流水量の経時変化の再現性について検証した。その結果、特に、渓流水量がピークとなる経過時間については精度よく求められることがわかった。
- 2) 土石流発生斜面を対象とした事例解析により、渓流流域斜面の不安定化と渓流水量の増大という土石流発生時に想定される現象が解析モデルによる計算で再現できることを明らかにした。
- 3) 渓流流域斜面の崩壊危険性と渓流水量の変化を解析モデルにより計算し、この結果を利用した土石流発生の危険性評価フローと評価結果のイメージを示した。

6. おわりに

本稿では、降雨時における土石流の発生危険性を評価するための解析モデルの概要と事例解析の結果について述べた。今後は、前述したとおり、土石流が発生した複

数の箇所に対して解析モデルを適用し、土石流の発生危険性を評価するための基準値や解析モデルの適用性について検討する予定である。

文献

- 1) 布川修, 杉山友康, 太田直之: 地形を考慮した斜面表層部の地下水変動予測モデル, 鉄道総研報告, Vol.22, No.1, pp.23-28, 2008
- 2) 布川修, 杉山友康, 太田直之: 地形を考慮した斜面表層部の地下水変動と安定性評価, 鉄道総研報告, Vol.24, No.5, pp.17-22, 2010
- 3) 沖村孝, 市川龍平: 数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, 土木学会論文集, 第 358 号 / III -3, pp.69-75, 1985
- 4) 岡田勝也, 岩崎昭次, 杉山友康, 村石尚: 豪雨時の盛土の安定性解析のための定常地下水位の推定, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.2121-2122, 1999
- 5) 沖村孝, 鳥居宣之, 尾崎幸忠, 南部光広, 原口勝則: 豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築, 砂防学会誌, Vol.63, No.6, pp.4-12, 2011
- 6) 芦田和男, 高橋保, 澤井健二: 土石流危険性の評価法に関する研究, 京都大学防災研年報, 第 21 号, pp.423-439, 1978
- 7) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物編, 丸善, pp.53-54, 2007