

地形を考慮した斜面表層部の 地下水位変動予測と安定性評価

布川 修* 杉山 友康** 太田 直之*

A Method to Predict the Change of the Water Level and to Evaluate the Stability of the Slope Surface Layer Considering the Topography

Osamu NUNOKAWA Tomoyasu SUGIYAMA Naoyuki OTA

In order to secure the train operation, it is necessary to identify beforehand the area where the danger of failure of the slope surface layer along railways is high at the rainfall. The change of the water level of the surface layer at the rainfall has a big influence on the failure. It is important to predict the change of the water level of the slope surface layer for evaluating its stability. We have developed a method to predict the change of the water level and to evaluate the stability of the slope surface layer considering the topography. In this paper, we described the concept of the developed method, and examples using this model.

キーワード：斜面，表層崩壊，地下水位，安定性，地形，運転規制

1. はじめに

降雨時に鉄道沿線で発生する自然斜面や切土斜面（以下、斜面という）の表層の崩壊を未然に防ぎ、列車の安全を確保するためには、崩壊に対する安定性を評価し、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。降雨による斜面表層の崩壊危険度を評価するためには、崩壊に大きな影響を及ぼす地下水位変動を予測することが重要である。降雨時における斜面の地下水位および安定性を計算する手法として、3次元浸透流解析とこの結果をもとにした安定解析があげられるが、これらを利用するためには詳細な現地調査が必要であり、かつ解析におけるパラメータの設定が難しい場合が多い。

そこで、筆者らは上記解析方法よりも容易な現地調査で得られるデータを用いて斜面表層の地下水位を計算するモデルの検討を行い、提案した地下水位計算モデルにより実際の地下水位変動を再現できる可能性があることを解析事例により示した¹⁾。本稿では、この結果を踏まえて構築した地下水位計算結果から安定性を評価する解析モデルの概要を述べるとともに、実斜面を対象として実施した解析事例を示すことで、解析モデルの妥当性の検証と解析結果の利用方法について検討した。

2. 解析モデルの概要

降雨時に発生する斜面表層の崩壊に対する安定性を評価する手法として、沖村ら²⁾が提案したものがあある。この手法では、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、格子に囲まれた四角形の部分ごとにある厚さの土塊を持つ斜面表層を設定（以下、本研究ではメッシュという）する。そして、メッシュ間の雨水流動を考慮してメッシュごとの地下水位を計算し、この結果から斜面表層の安定性を評価する。本研究では、このモデルを基本として、新しい知見や手法を加えたモデルを構築した。図1に解析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水の流れをモデル化することで、変動する地下水位を計算する。

図2に解析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、各メッシュの透水係数、表層厚さ、土質強度等を時間的に不変なデータとしたうえで、①地形条件から各メッシュの勾配を求め、水が流れる向きと沢（本稿では、地形的に凹地となる箇所を「沢」として定義する）を設定する。つぎに、②設定した降雨を入力することで、メッシュごとの水の流入量、流出量からメッシュの飽和度を求め、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メッシュごとの安定性を、後述する方法により安全率として計算する。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表層の安

* 防災技術研究部（地盤防災）

** 防災技術研究部

特集：防災技術

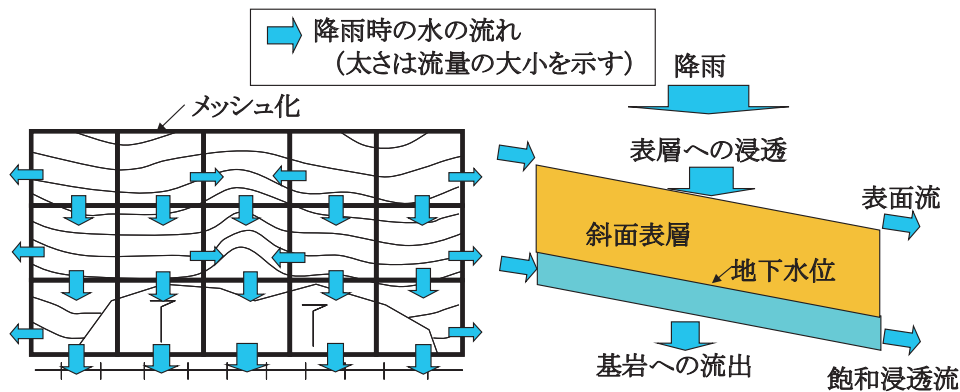


図1 解析モデルにおける斜面表層の水の流れに関する概念図¹⁾

定性を経時的に計算する。

図2に示した1) 地形的な条件の計算, 2) 各メッシュの水の流れ計算, 3) 各メッシュの地下水位の計算については文献1) に詳細を示しているため, ここでは, 4) 各メッシュの安全率の計算について示す。

各メッシュの安全率は, 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により求める。具体的には, 上記2), 3) により算出した地下水位と湿潤密度から以下の式で求める。

$$SF_{(i)} = \frac{C_s + C_r + A_{(i)} \cdot g \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi}{B_{(i)} \cdot g \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (1)$$

なお,

$$A_{(i)} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) h_{(i)} + \gamma_{(i)} (D - h_{(i)}) \quad (2)$$

$$B_{(i)} = \gamma_{sat} h_{(i)} + \gamma_{(i)} (D - h_{(i)}) \quad (3)$$

ここで, $SF_{(i)}$: i 時間ステップの安全率, C_s : 土の粘着力 (kPa), C_r : 根系による粘着力 (kPa), β : 斜面 (基岩) 勾配 ($^\circ$), ϕ : 土の内部摩擦角 ($^\circ$), γ_{sat} : 土の飽和密度 (t/m^3), γ_w : 水の密度 (t/m^3), $\gamma_{(i)}$: i 時間ステップの土の湿潤密度 (t/m^3), D : 表層厚さ (m), $h_{(i)}$: i 時間ステップの基岩面からの地下水位 (m)

3. 解析事例

3.1 解析対象斜面と解析条件

解析対象斜面は, 現地斜面において地下水位の計測を2007年6月から2008年12月までの期間で実施した箇所とした。対象斜面の地形および状況を図3に示す。この図は, 現地で実施した測量結果をもとに等高線図を作成し, その図上に崩壊跡などの現地の状況と計測点を示したものである。図に示すとおり, 当該箇所は起伏に富み崩壊跡が多数存在する斜面であり, 地下水位計測は沢状の地形条件となっている地点で実施した。

地下水位は, 表層地盤を筒状に掘削して埋設したスト

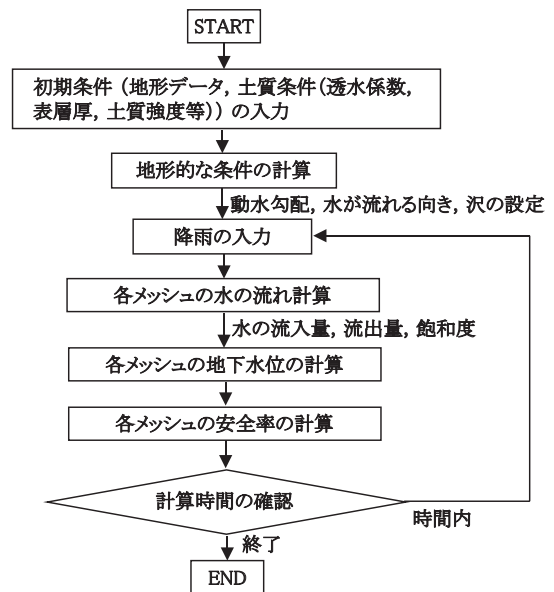


図2 解析モデルの計算フロー

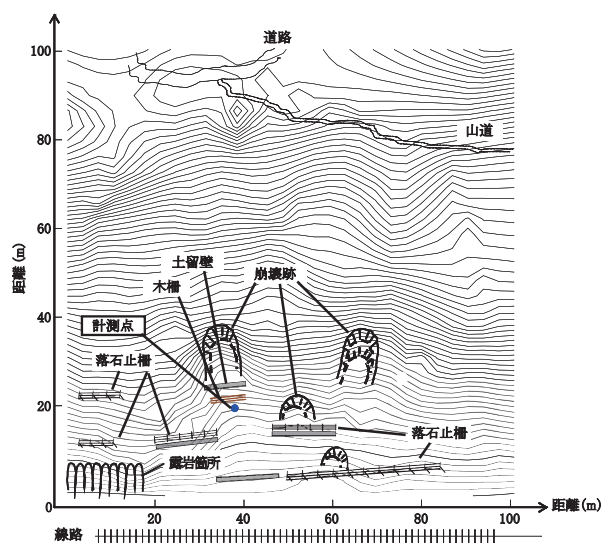


図3 対象斜面の地形および状況

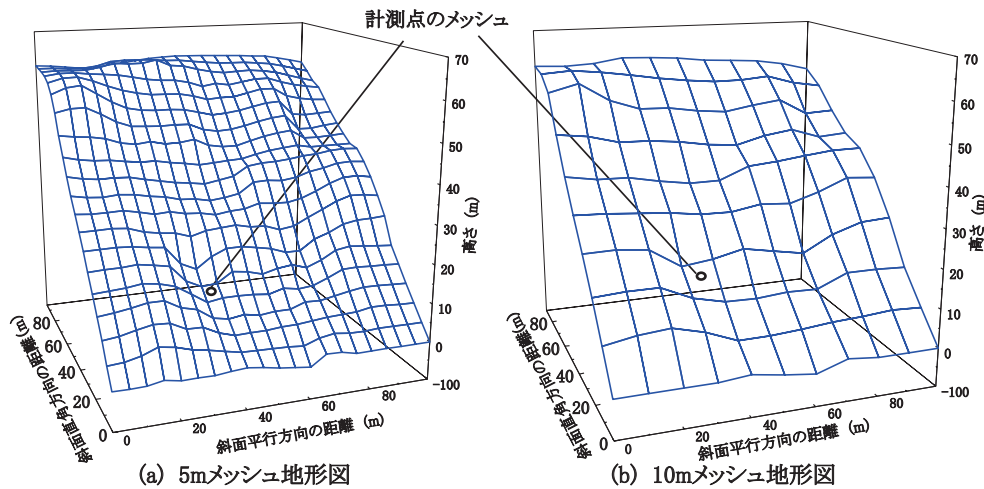


図4 解析で用いたメッシュ地形図

レーナー付き塩ビ管（管の地表面からの埋設長さ：1.95m）に地下水位計（差動トランス型）を設置する方法で計測した。なお、地下水位を変動させる要因である雨量のデータは、当該箇所にもっと近いアメダス観測所のデータを利用した。

図3に示した等高線図をもとに、5mおよび10m格子間隔で作成した地形図（以下、メッシュ地形図という）を図4に示す。文献1)の解析事例（本稿とは異なる実斜面）では、10mメッシュ地形図を用いた解析により実際の地下水位変動の再現性を確認したが、図3に示したとおり、本解析事例の対象斜面が起伏に富んだ地形を呈していることから、異なる格子間隔の地形図を用いた解析結果の差異を把握するため、5mメッシュ地形図と10mメッシュ地形図を用いた。

解析に用いたパラメータの設定値を表1に示す。表の初期飽和度以外の値は、当該箇所でも採取した試料を用いて実施した各種土質試験や現地でも実施した簡易動的コーン貫入試験の結果から、全てのメッシュで同じ値と仮定して設定した。初期飽和度は、岡田ら³⁾の手法を参考にして、対象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日の割合で（年平均降雨を

2000mmとしたときの平均雨量）与える解析（以下、予備解析という）を実施することでメッシュごとに設定した。

3.2 地下水位計算結果の検証

解析による地下水位計算結果を検証するため、実際に観測された降雨を与える解析を実施し、計測点における地下水位の経時変化について、計測結果と解析結果を比較した。

観測期間の中で降雨量が大きい期間を抽出して上記の解析を実施した結果を図5に示す。図より、10mメッシュ地形図の解析結果は計測結果の大まかな傾向を再現しているものの、5mメッシュ地形図の解析結果はより計測結果に近い傾向を示していることがわかる。これは、5mメッシュ地形図のほうが本来の地形をより再現できているためと考える。さらに、これらの結果の違いを把握するため、経過時間4時間および8時間における地下水位

表1 解析パラメータの設定値

土粒子の密度 ρ_s (t/m^3)	2.603	
間隙比 e	0.999	
表層厚 D (m)	1.4	
透水係数 k (cm/s)	8.5×10^{-3}	
初期飽和度 S_0 (%)	予備解析の結果	
飽和度-地下水位モデルの係数(文献1)式(7)参照)	n	$n=0.0043 \cdot \theta + 1.265$ θ : 斜面勾配 ($^\circ$)
	S_n (%)	$S_n=0.1193 \cdot \theta + 75.727$ θ : 斜面勾配 ($^\circ$)
時間ステップ Δt (h)	0.5 (予備解析は1)	

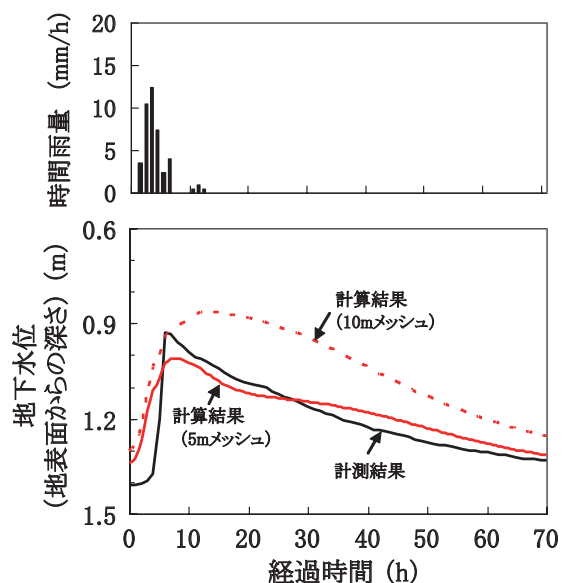


図5 計測点における地下水位の経時変化

特集：防災技術

の面的な分布をメッシュ地形図ごとに図6, 図7に示した。

これらの図より、降雨を与えることで雨水が集中する箇所地下水位が高くなることがわかる。5mメッシュ地形図では地下水位が高くなる箇所が2箇所に分散しているが、10mメッシュ地形図では計測点付近のみ地下水位が高くなっている。この結果として、図5に示したように、10mメッシュ地形図の結果は5mメッシュ地形図の結果と比較して、地下水位が若干高くなっていることが想定される。

以上のことから、解析により起伏に富んだ地形での地下水位をより正確に再現するためには、地形の特徴を表現できる適切なメッシュを用いることが必要であることがわかった。

3.3 安定性計算結果の検証

解析による安定性計算結果を検証するためには、実際に崩壊した斜面で崩壊に至るまでの地下水位を計測し、この斜面を対象とした解析結果が実現象を再現できることを確認することが望ましい。しかし、崩壊に至るまでの現象を計測した事例がないため、3.1節で示した実斜

面を対象として豪雨と考えられる降雨条件の解析を実施し、現地の状況から表層の崩壊が懸念されると判断できる箇所を解析で抽出可能かどうかを検討することにより検証を行った。

解析に必要なパラメータの値は表1と同じとした。ただし、降雨条件については、計測期間中に斜面の安定性を大きく低下させるような降雨が観測されなかったため、10mm/hの時間雨量を30時間与える降雨（総降雨量300mm）を豪雨と仮定して設定した。

土の強度定数は以下の通り設定した。①式(1)における土の内部摩擦角 ϕ を 30° 、根系による粘着力 C_r を0kPaとする。②土の粘着力 C_s に仮の値を設定し、解析の初期状態における対象斜面全域のメッシュの安全率を計算する。③対象斜面全域から安全率が最小となるメッシュを抽出する。④このメッシュの安全率が1.5となるように土の粘着力を式(1)から逆算する。⑤内部摩擦角 ϕ を 30° 、逆算した土の粘着力 C_s を土の強度定数として設定する。以上の方法により設定した土の粘着力は、5mメッシュ地形図の場合12.2kPa、10mメッシュ地形図の場合11.2kPaである。

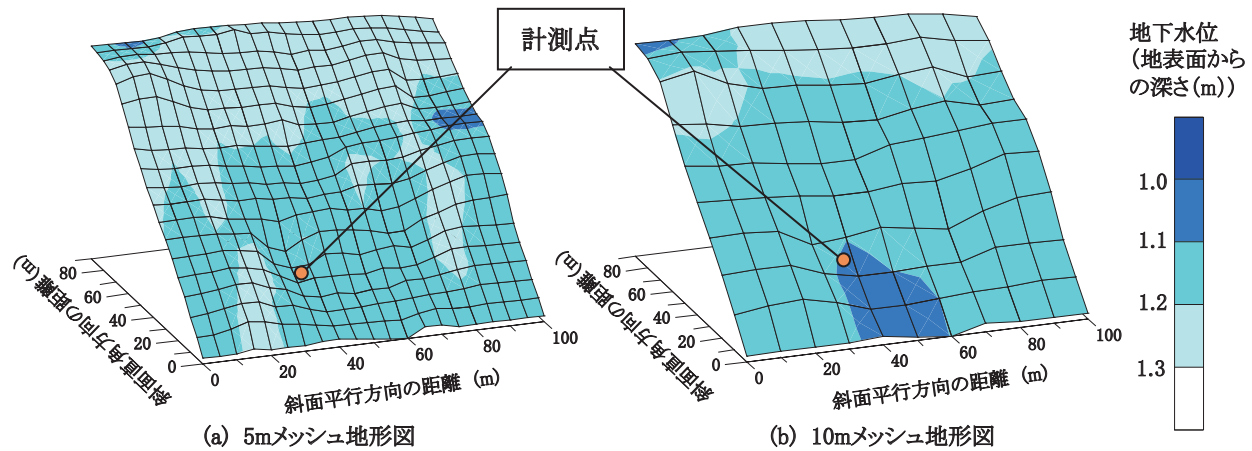


図6 地下水位の面的な分布（経過時間4時間）

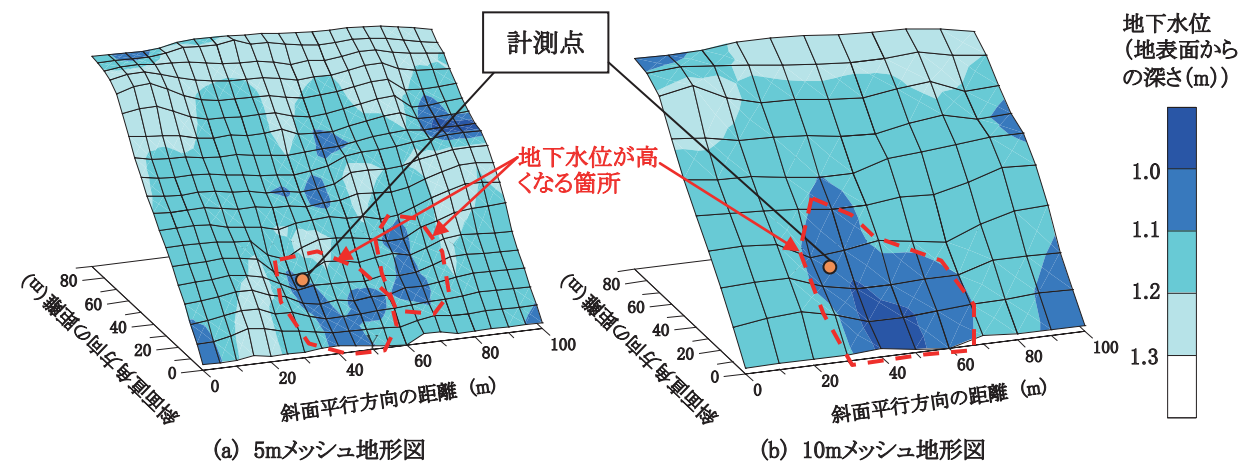
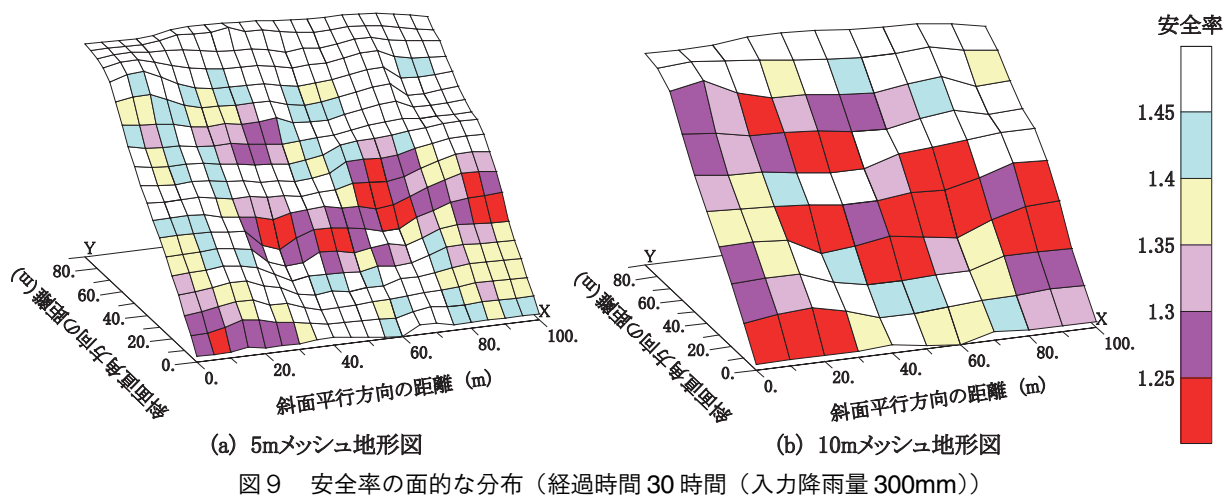
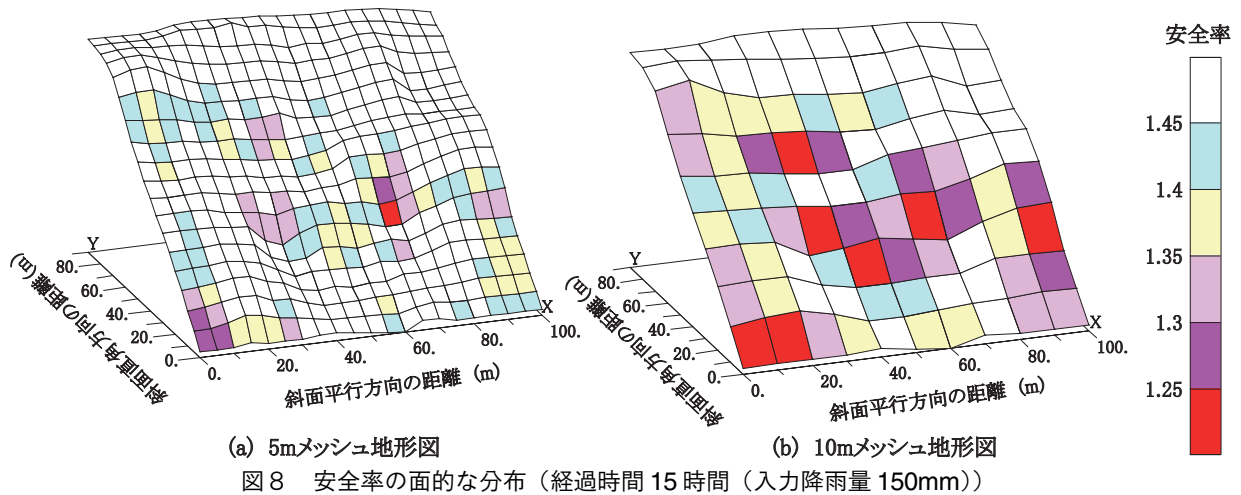


図7 地下水位の面的な分布（経過時間8時間）



この2つのメッシュ地形図で土の粘着力が異なる理由は以下の通りである。5mメッシュ地形図は10mメッシュ地形図と比較して、急な勾配箇所や緩やかな勾配箇所などが存在する現地の地形を詳細に再現している。つまり、5mメッシュ地形図の方が10mメッシュ地形図よりも急な勾配のメッシュが存在することになる。また、本解析の初期値の条件では地下水位がほぼ斜面表層の底部（基岩面の上部）に位置するため、式(1)より対象斜面全域において安全率が最小となるメッシュは勾配が急なメッシュとなる。したがって、前述したとおりこのメッシュの土の粘着力を式(1)から逆算して求めると、メッシュの勾配が急なほど土の粘着力が大きい結果となる。

本稿では、上記で示したようにメッシュ地形図ごとに異なる土の強度定数を設定した。したがって、メッシュ地形図ごとに相対的に安定性が低下する箇所、時間を計算していることになる。

5m、10mメッシュ地形図における経過時間15時間（入力総降雨量150mm）の安全率の面的な分布を図8に、経過時間30時間（入力総降雨量300mm）の結果を図9に示す。これらの図より、どちらのメッシュ地形図においても降雨量を与えるほど安定性が低下するメッシュの範

囲が広がる傾向を示している。5mメッシュ地形図と10mメッシュ地形図の結果を比較すると、10mメッシュ地形図において安定性が低下するメッシュの範囲は若干広いものの、5mメッシュ地形図とほぼ同じような箇所でのメッシュの安定性が低下していることがわかる。

対象斜面の崩壊跡を示した図3とこれらの図を比較すると、5mおよび10mメッシュ地形図とも露岩箇所と過去の崩壊跡、あるいはその周辺のメッシュの安全率が低下していることがわかる。これらの箇所には表層に土塊が存在しない箇所もあるが、一般的に崩壊が懸念される箇所と一致していることから、解析による安定性解析結果は妥当であると考えられる。

3.4 解析結果の利用方法

解析モデルを用いた斜面表層の崩壊に対する安定性の評価結果は、定量的に(1)崩壊危険箇所を抽出すること、(2)降雨時における運転規制方法の検討を支援すること、に利用できると思われる。ここでは、解析事例をもとに、上記それぞれの概念的な考え方を示す。

(1) 崩壊危険箇所の抽出

図9に示したように、豪雨と想定される比較的降雨量

特集：防災技術

の多い降雨条件を与える解析結果から、対象斜面において安定性が低下しやすい箇所を求めることができる。この図を利用することで、図10に示すように、対象斜面から崩壊危険箇所を抽出することが可能である。

(2) 運転規制方法の検討支援

安定性が低下しやすいと評価されたメッシュにおける安全率の経時変化を、例として5mメッシュ地形図を用いた解析結果から求めて図11に示す。この図から、メッシュの安全率は降雨を与えることにより低下し、降雨後、時間が経過することによって安全率が回復する傾向を示している。このような安全率の経時変化を、様々な降雨条件を設定した解析結果から求めることで、降雨時の運転規制方法を検討する際の参考値を求めることができる。

具体的には、安全率の経時変化から、基準となる安全率を下回るまでに与えた降雨量を求めることで、規制を

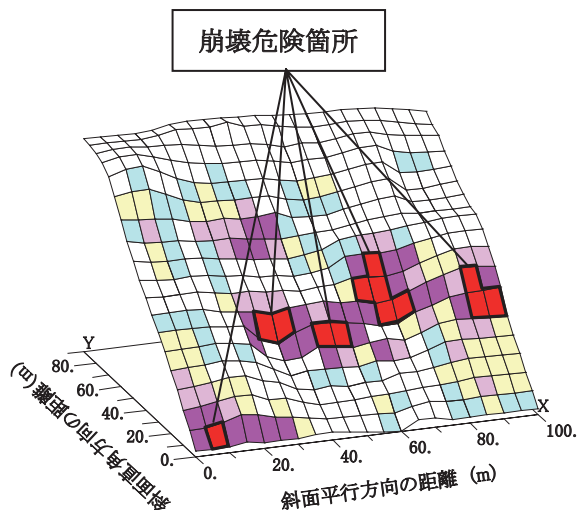


図10 対象斜面から崩壊危険箇所の抽出例

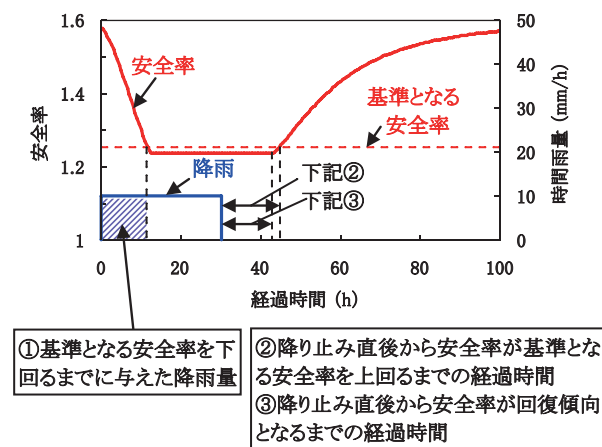


図11 着目メッシュにおける安全率の経時変化

発令する降雨量を検討する際の参考値となる(図11①参照)。また、降り止み直後から安全率が回復傾向を示すまでの経過時間を求めることで、規制の解除時間を検討する際の参考値となる。なお、安全率が回復傾向を示すまでの経過時間としては、降り止み直後からメッシュの安全率が1)基準となる安全率を上回るまでの経過時間(図11②参照)、2)明らかに回復傾向となるまでの経過時間(図11③参照)、が考えられる。

4. まとめ

本稿をまとめ、以下に記す。

- 1) 比較的容易な現地調査で得られるデータを用いて、降雨時における斜面表層の地下水位を求め、安定性を評価する解析モデルを構築した。
- 2) 上記解析モデルを用いた解析により、現地斜面の地下水位を再現できる可能性があること、崩壊危険箇所を抽出できる可能性があること、を解析事例により示した。
- 3) 対象斜面から崩壊危険箇所を抽出する場合や降雨時の運転規制方法を検討する際に、解析モデルを用いた斜面表層の崩壊に対する安定性の評価結果を利用する概念的な考え方を示した。

5. おわりに

本稿では、降雨時における斜面表層の安定性を評価するために構築した解析モデルの概要と、解析モデルの妥当性の検証結果、および解析結果の利用方法の概念的な考え方について述べた。今後は、解析パラメータが解析結果に及ぼす影響を明らかにすることで、これらの値の具体的な設定方法と、そのために必要な調査項目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) 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
- 3) 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