

地形を考慮した斜面表層部の地下水変動予測モデル

布川 修* 杉山 友康* 太田 直之*

A Method to Predict the Change of the Water Level on the Slope Surface Layer Considering the Topography

Osamu NUNOKAWA Tomoyasu SUGIYAMA Naoyuki OTA

Train operation control based on rainfall index is being applied during rainfall to secure the safety of the train. It is necessary to evaluate the stability of slope considering the change of the water level on the slope surface layer for executing train operation control more appropriately during rainfall. We developed the method to predict the change of the water level on the slope surface layer during rainfall for evaluating the stability of slope. In this paper, we described the concept of the developed method, and an example using this model.

キーワード：斜面，地下水，飽和度，表層崩壊，運転規制

1. はじめに

降雨による斜面の崩壊から鉄道の安全を確保するために降雨量を基準とした運転規制が行われているが、運転規制の方法（運転を規制する雨量値（規制雨量値）等）は防災対策や過去の災害事例，対象箇所を経験した雨量等から経験的に設定されているのが現状である。運転規制の方法を適切に設定するためには、降雨時における水の流れを考慮して斜面の安定性を評価する必要がある。

一方、降雨時における水の流れを考慮して斜面の安定性を評価する手法としては、3次元浸透流解析とその結果を踏まえた安定解析が挙げられる。しかし、これらの手法を用いて斜面の安定性を評価するためには詳細な現地調査が必要であり、なおかつ計算におけるパラメータの設定が難しい場合が多い。さらに、鉄道沿線における斜面数は膨大であり、全ての斜面の安定性をこれらの手法によって評価することは困難である。このため、斜面の安定性は崩壊の素因に着目した手法により評価する場合が多く、斜面の水の流れを考慮して評価することは少ない。

このような背景を踏まえ、降雨時において鉄道沿線が発生しやすい斜面（切土，自然斜面）表層部分の崩壊に対する安定性を評価するため、斜面表層部の地下水変動を簡易な計算方法を用いて予測するモデルを構築することを目的として検討を行った。本稿では、構築したモデルの概要と、このモデルを用いた解析事例について述べる。

2. 予測モデルの構築

2.1 モデルの概要

降雨時に発生する斜面表層の崩壊（以下、表層崩壊という）に対する安定性を簡易に評価する代表的な手法として、沖村ら¹⁾が提案したものがある。この手法は、対象斜面の投影図（地形図）を正方形のメッシュに分割した上で各メッシュに一定の土層厚を持つ土塊を仮定し、これをもとに各メッシュ内・メッシュ間の雨水流動を追跡した結果を踏まえて安定性を評価するモデルである。本稿では、このモデルを基本モデルとして、これに新しい知見や手法を加えてモデルを作成した。すなわち、図1に示すように対象斜面をメッシュに分割し、分割したメッシュ間およびメッシュ内の水の流れを計算し、降雨時における斜面表層部の地下水変動を予測するモデルを構築する。

図2にモデルの計算フローを示す。このフローに示すように、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、表層土の厚さ（以下、表層厚という）等を時間的に不変なデータとした上で、①地形的な条件の計算として各メッシュの勾配（動水勾配）や水が流れる向きを算出し、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）の設定を行う。つぎに、②設定した降雨を与えることで、各メッシュの水の流れ計算として各メッシュにおける水の流入量，流出量からメッシュの飽和度を算出し、③これを用いて各メッシュの地下水位の計算を行う。このように、上記の②～③を Δt 時間間隔で設定計算時間まで繰り返し行うことで、斜面表層部の地下水変動を予測するものとした。

本モデルと前述した沖村らの手法との違いは、斜面の

* 防災技術研究部（地盤防災）

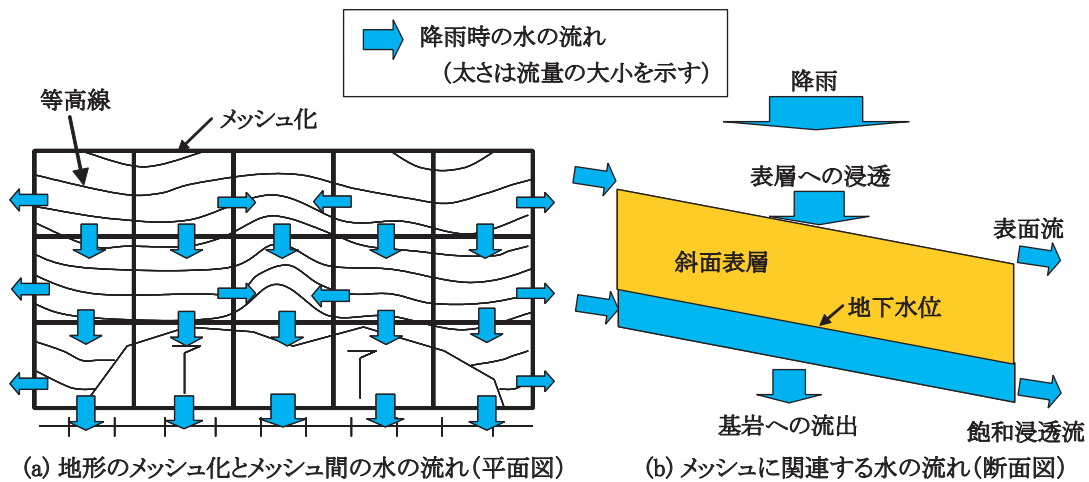


図1 基礎モデルにおける斜面の水の流れに関する概念図

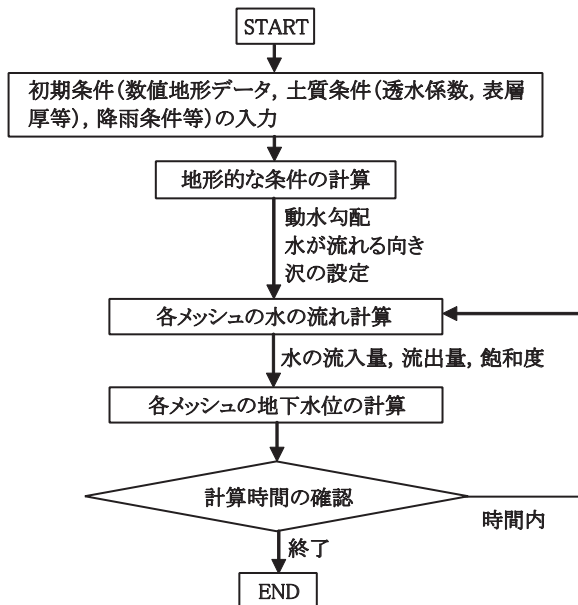


図2 モデルの計算フロー

地形的な凹地である沢には水が集中し、斜面の水の流れに大きな影響を及ぼすと考えられるため、本モデルでは地形的な条件として沢を設定した点である。また、地下水位の計算において、沖村らは有効降雨（降雨の内、斜面内に浸透する降雨）が直ちに基岩面に達して地下水位を形成するものとしているが、地下水位の形成は斜面表層の飽和度に依存すると考えられるため、飽和度と地下水位との関係を定式化し、その結果を用いて地下水位を計算することとした。これにより、土質等により異なると考えられる地下水位の形成プロセスに対応できる。

2.2 地形的な条件の計算

地形的な条件の計算では、まず、各メッシュにおけるX方向、Y方向（平面図上で設定）の動水勾配を求める。動水勾配は以下のように求められるものとした。

図3に示すようにメッシュ交点Pの座標を $P_p (X_p, Y_p,$

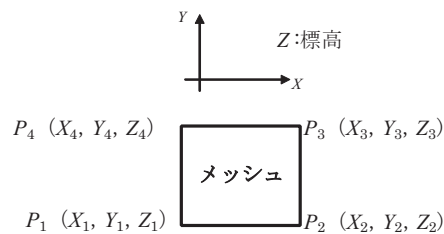


図3 メッシュ交点の座標の取り方

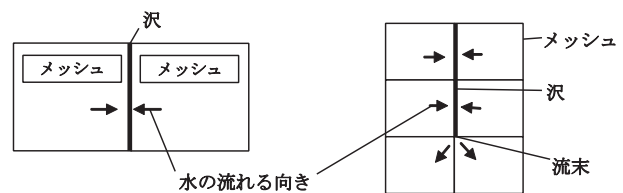


図4 沢の取り扱い

$Z_p)$ ($p = 1 \sim 4$) とする。

図3をもとにX方向、Y方向の動水勾配 I_x, I_y は以下の式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_x &= \frac{Z_1 + Z_4}{2} - \frac{Z_2 + Z_3}{2} \\ I_x &= \frac{\Delta h_x}{\sqrt{(X_1 - X_2)^2 + \Delta h_x^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_y &= \frac{Z_1 + Z_2}{2} - \frac{Z_3 + Z_4}{2} \\ I_y &= \frac{\Delta h_y}{\sqrt{(Y_1 - Y_4)^2 + \Delta h_y^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

なお、 $X_1 = X_4, X_2 = X_3, Y_1 = Y_2, Y_3 = Y_4$ とする。X方向、Y方向における水の流れの向きは、動水勾配が正となる側とする。さらに、水の流れの向きから沢を以下のように設定する。

水の流れの向きは動水勾配（斜面勾配）により定まるが、隣接するメッシュ間において、メッシュごとの動水勾配から水の流れの向きを求めると、メッシュ*i*からは

メッシュ*j*の向きに水が流れ、逆にメッシュ*j*からはメッシュ*i*の向きに水が流れる結果となることがある。こうした箇所は地形的な凹地として扱う必要があるため、メッシュ間に沢を設定した。なお、沢は次のように扱うこととする（図4参照）。

- ①各メッシュから沢の方向に流れる水（図1(b)の表面流、飽和浸透流）は、沢に集まるものとする。
- ②沢に集まった水は、 Δt 間に各メッシュにおける沢の下端（沢を結んだ2点のうち標高が低い点）に流れるものとする。
- ③沢の流末に集まった水は、流末の交点に隣接するメッシュの内、沢の辺を含まない2つのメッシュに1/2ずつ流れるものとする。

2.3 各メッシュの水の流れ計算

各メッシュの水の流れ（図1(b)参照）計算では、各メッシュにおける水の流入量（降雨や隣接メッシュからの流入）と流出量（隣接メッシュへの流出や基岩層への流出）を計算し、メッシュ内（斜面表層）の飽和度を次式により算出する。

$$\gamma_{(i)} = \gamma_{(i-1)} + \frac{q_{in(i)} - q_{out(i)}}{V} \cdot \gamma_w \quad (3)$$

$$S_{r(i)} = \frac{\gamma_{(i)} \cdot (1+e) - \gamma_s}{e \cdot \gamma_w} \cdot 100 \quad (4)$$

ここで、 $\gamma_{(i)}$ ：*i*時間ステップのメッシュの湿潤密度 (t/m^3)、 $\gamma_{(i-1)}$ ：*(i-1)*時間ステップのメッシュの湿潤密度 (t/m^3)、 $q_{in(i)}$ ：*i*時間ステップのメッシュへの水の流入量 (m^3)、 $q_{out(i)}$ ：*i*時間ステップのメッシュからの水の流出量 (m^3)、 V ：メッシュの体積（メッシュ面積×表層厚） (m^3)、 γ_w ：水の密度 (t/m^3)、 $S_{r(i)}$ ：*i*時間ステップのメッシュの飽和度 (%)、 e ：メッシュの間隙比、 γ_s ：土粒子の密度 (t/m^3)

なお、メッシュ内の飽和度が100%（完全に飽和した場合）となる場合は、水の流入量からその状態となるのに必要な水の量を除いた水が、図1(b)に示した表面流として流れるものとした。

流入量や流出量を計算するために設定したメッシュ間の水の流れは、表面流と飽和浸透流、沢における水の流れ、基岩層への流出である。なお、表面流はメッシュ表層へ浸透する最大の水の量を初期に設定した透水係数から算出し、それ以上の水がメッシュ表層に集まった（降雨や隣接メッシュからの流入）時にその水が表面流として流れるものとした。また、飽和浸透流はダルシー則²⁾に基づき、メッシュの動水勾配と前回の計算ステップ (Δt 前) で算出した地下水位から以下の式で求めることとした。

$$q_{outX(i)} = \frac{k}{100} \cdot I_X \cdot \Delta t \cdot 60 \cdot 60 \cdot h_{(i-1)} \cdot a \quad (5)$$

$$q_{outY(i)} = \frac{k}{100} \cdot I_Y \cdot \Delta t \cdot 60 \cdot 60 \cdot h_{(i-1)} \cdot b \quad (6)$$

ここで、 $q_{outX(i)}$ ：*i*時間ステップの飽和浸透流による*X*方向への水の流出量 (m^3)、 $q_{outY(i)}$ ：*i*時間ステップの飽和浸透流による*Y*方向への水の流出量 (m^3)、 k ：透水係数 (cm/s)、 I_X 、 I_Y ：動水勾配、 Δt ：時間ステップ (h)、 $h_{(i-1)}$ ：*(i-1)*時間ステップの基岩面からの地下水位 (m)、 a ：*X*方向に隣接するメッシュの幅 (m)、 b ：*Y*方向に隣接するメッシュの幅 (m)

2.4 各メッシュの地下水位計算

各メッシュの地下水位の計算では、2.3節で求めた飽和度から以下の式を用いて地下水位を求めることとした。

$$R_{h(i)} = \frac{1}{(100 - S_{rh})^n} \cdot (S_{r(i)} - S_{rh})^n \quad (7)$$

$$h_{(i)} = R_{h(i)} \cdot D \quad (8)$$

ここで、 $R_{h(i)}$ ：*i*時間ステップの地下水位比（＝地下水位/表層厚）、 $S_{r(i)}$ ：*i*時間ステップのメッシュの飽和度 (%) ($S_{r(i)} > S_{rh}$)、 S_{rh} ：地下水位が発生または消散する (0となる) ときの飽和度 (%)、 n ：係数、 $h_{(i)}$ ：*i*時間ステップの基岩面からの地下水位 (m)、 D ：表層厚 (m)

なお、式(7)は実斜面において地下水位と飽和度を計測した結果と理想化した斜面表層を対象とした2次元飽和・不飽和浸透流解析の結果をもとに、斜面表層の飽和度と地下水位比との関係性を求め、これらの関係を定式化した結果である。現地計測と浸透流解析で得た地下水位と飽和度との関係は以下の通りである。

実斜面において計測した地下水位と飽和度から得られた斜面表層の平均飽和度と地下水位との関係を図5に示す。この図に示したデータは様々な降雨条件下のものであることから、平均飽和度と地下水位との関係は、雨の降り方に依存せずほぼ同じような傾向を示すことが分かる。

この結果を踏まえて、理想化した斜面表層を対象とした浸透流解析を実施し、斜面表層における平均飽和度と地下水位との関係を明らかにした。なお、浸透流解析に必要な土質パラメータは、現地計測箇所土質条件をもとに決定した。図6に浸透流解析により得られた斜面表層の平均飽和度と地下水位比（＝地下水位/表層厚）との関係の例を示す。図6には浸透流解析から得た平均飽和度と地下水位比との関係を式(7)で近似した結果（図の近似式の曲線）を示しているが、式(7)により高い相関で解析値を近似できることが分かる。

*i*時間ステップの飽和度 $S_{r(i)}$ が式(7)の S_{rh} 以下の場合 ($S_{r(i)} \leq S_{rh}$) は、地下水位が発生しないものとした。また、地下水位消散後の飽和度は、水の流入がない場合、不飽和浸透流等の影響により減少していくことが知られている。しかしながら、 $S_{r(i)} \leq S_{rh}$ であり、かつ、メッシュに

特集：防災技術

水の流入がない場合、前節に示した式(3)、(4)では飽和度が変化しない。そこで、地下水位消散後の時間と飽和度との関係を浸透流解析の結果をもとに定式化し、 $S_{r(t)} \leq S_{rh}$ であり、かつ、メッシュに水の流入量がない場合は、この関係を用いて時間とともに飽和度が減少するものとした。

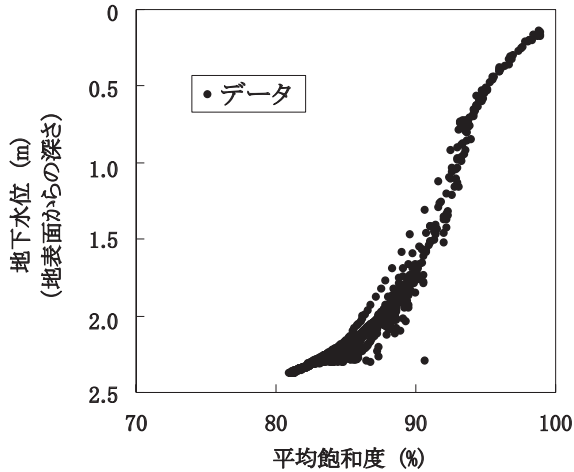


図5 斜面表層の平均飽和度と地下水水位との関係 (現地計測結果)

3. モデルを用いた解析事例

3.1 解析の条件

ここでは、現地計測を実施した箇所を対象とし、2章で示したモデルを用いて、実降雨を用いた解析を行い、計測した地下水水位と解析によって得られる地下水水位を比

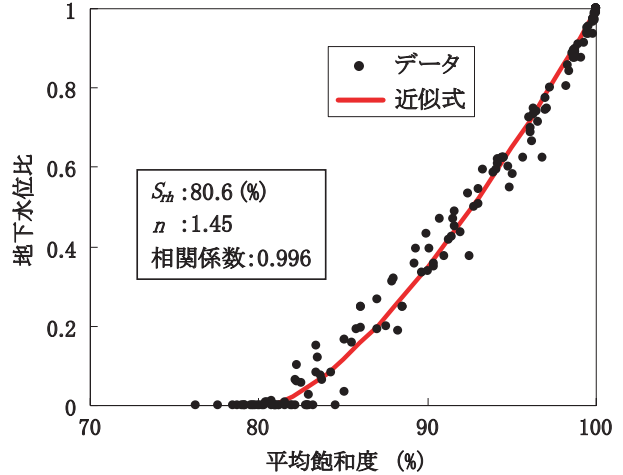


図6 斜面表層の平均飽和度と地下水水位比との関係 (浸透流解析の結果 斜面角度45度の場合)

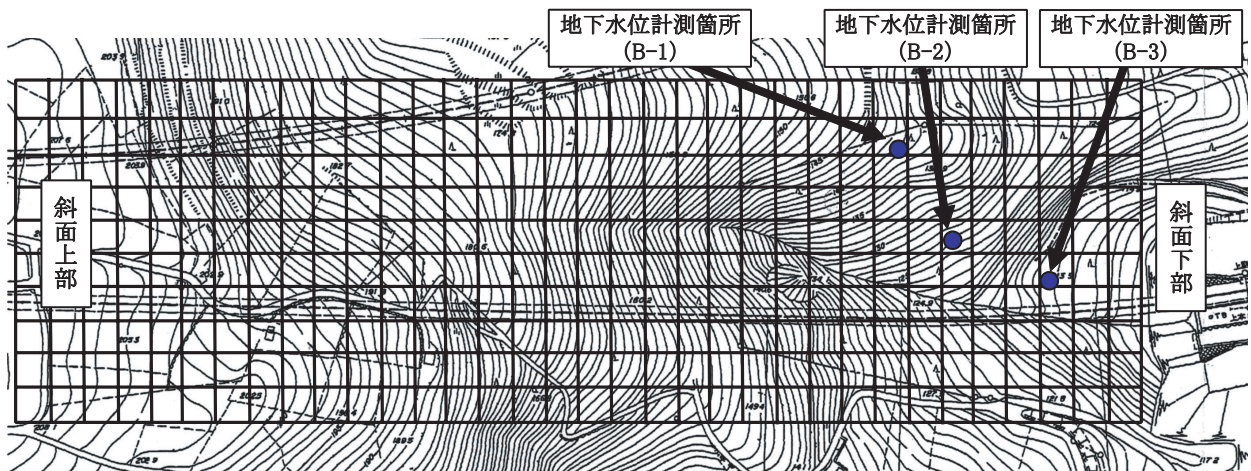


図7 解析対象箇所の地形図 (図上のメッシュ範囲が解析モデルの範囲 (10m 間隔))

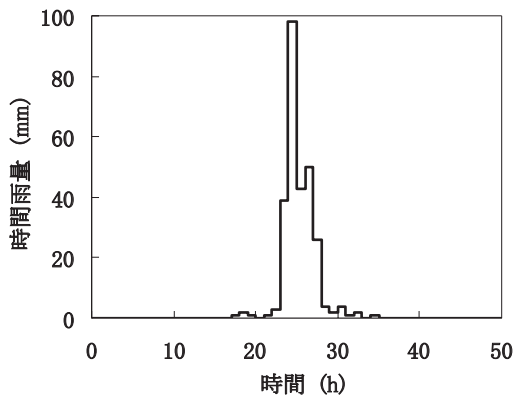


図8 設定降雨

表1 解析パラメータ

表層厚 D (m)	2.50	
土粒子の密度 γ_s (t/m ³)	2.66	
間隙比 e	0.91	
透水係数 k (cm/s)	5.00×10^{-3}	
初期飽和度 S_{r0} (%) ※	90.0	
式(7)の係数	S_{rh} (%)	80.6
	n	1.45
時間ステップ Δt (h)	1.00	

※は予備解析の時のみ必要

較することにより、モデルの妥当性と課題を検証する。

図7にメッシュ分割した解析対象斜面の地形図と地下水位の計測位置図を示す。解析で用いた降雨を図8に示す。なお、これらの図で示した降雨を与える解析の前に対象範囲の初期の飽和度や地下水位分布を設定するため、岡田ら³⁾の手法を参考にして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)飽和度や地下水位分布が定常になるまで与える解析(以下、予備解析という)を実施した。解析の初期条件として設定すべき解析パラメータを表1に示す。なお、表層厚、土粒子の密度、間隙比、透水係数は実斜面の調査結果から設定した。

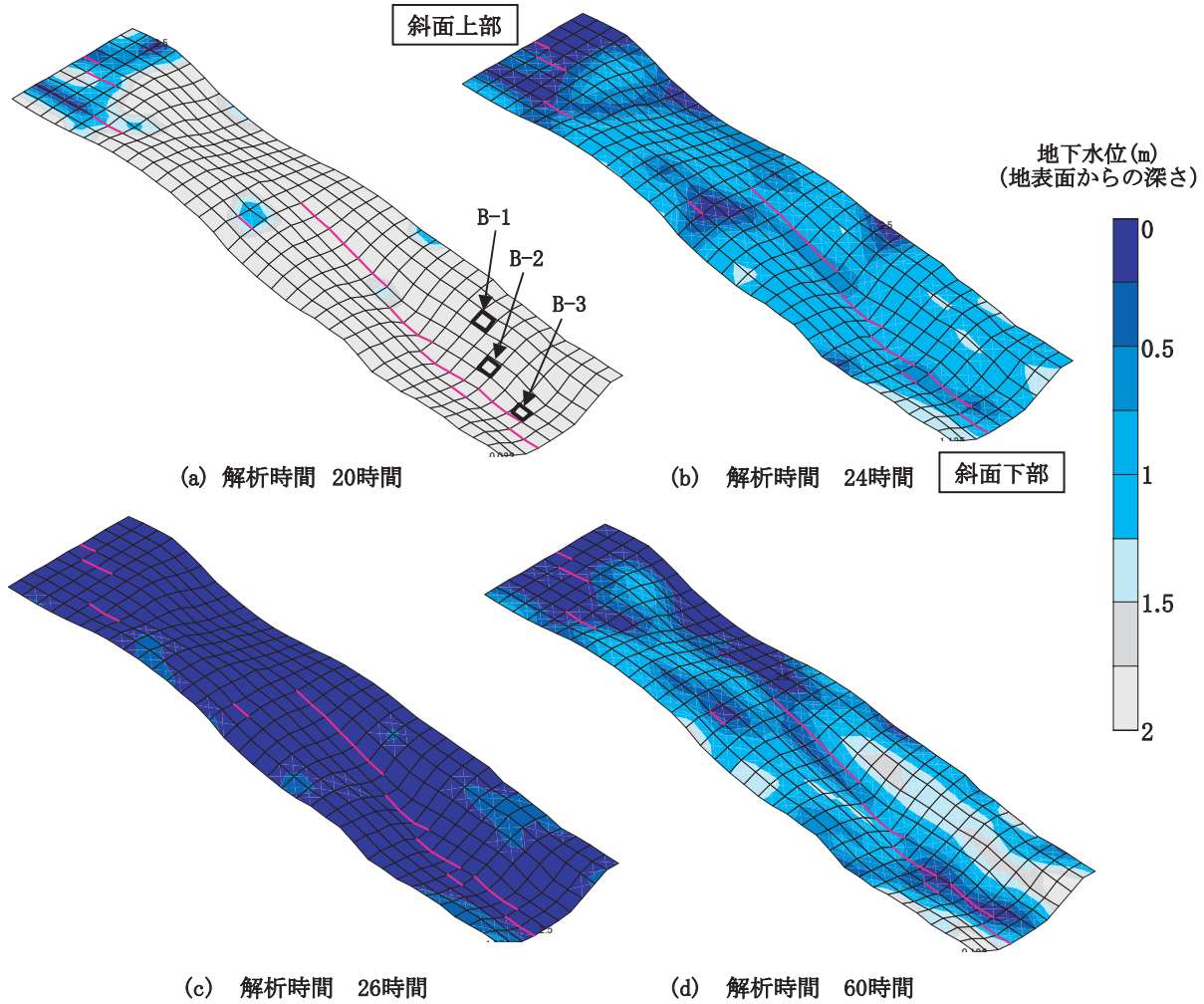


図9 対象箇所全域の地下水位コンター

(ピンク(メッシュ線のうちの薄い太線:白黒の部分)の線が沢と設定された箇所)

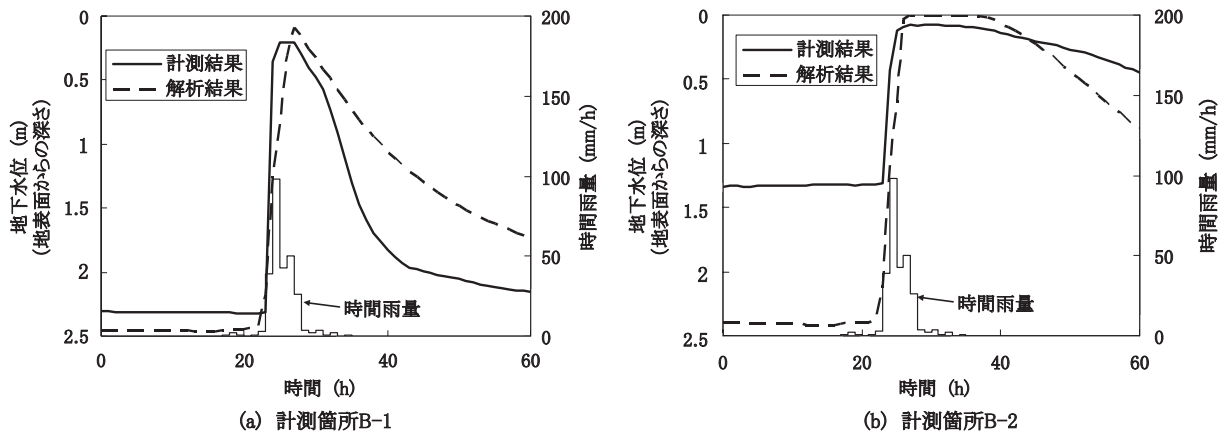


図10 計測と解析における地下水位の経時変化

特集：防災技術

3.2 解析結果

解析結果である対象斜面全域の地下水位コンターの経時変化を図9に示す。この解析で用いた実降雨は比較的短期間に集中的に降雨が観測された場合であるが、図から、実際の現象で見られるように、降雨を与えることにより斜面勾配が緩やかな箇所地下水位がまず上昇し、その後、斜面勾配が急な箇所地下水位が上昇することが分かる。また、降雨終了後、地下水位が下降する過程においては、上昇過程と反対に斜面勾配が急な箇所地下水位が下降し、その後、緩やかな箇所が下降することが分かる。なお、今回の解析では26時間後に対象斜面全域がほぼ地表面まで地下水位が上昇しているが、計測結果も同様の結果となっている。

図10に計測箇所B-1、計測箇所B-2における計測と解析の地下水位の経時変化を示す。計測箇所B-1において計測結果と解析結果を比較すると、地下水位が上昇する過程はほぼ同じであるが、地下水位が下降する過程は計測結果の方が早く低下している。計測箇所B-2については、初期の地下水位が異なるものの地下水位が上昇する過程ではほぼ同じであり、地下水位が下降する過程では解析結果のほうが早く低下している。

この結果から、本解析事例では、地下水位が上昇する過程、地下水位がピークとなる時間については、表層厚や透水係数等を一律とした本モデルを用いた解析でもほぼ妥当な結果となることが分かった。

4. まとめと課題

本稿のまとめと本モデルの課題を、以下に記す。

- (1) 降雨時における斜面表層の水の流れを考慮して、時間的・空間的に変化する表層崩壊に対する安定性を評価するモデルを構築した。
- (2) 本モデルの特徴は、斜面における水の流れに大きな影響を及ぼすと考えられる沢を設定できる点と、斜面表層の地下水位と飽和度との関係を定式化した結果を用いることで、土質等により異なると考えられ

る地下水位形成プロセスに対応できる点である。

- (3) 本モデルを用いた解析により、本モデルの課題を明らかにした。具体的な課題は以下の通りである。
 - (a) 本稿の解析事例では、地下水位が上昇する過程とピークとなる時間についてはほぼ妥当な結果となり、地下水位が下降する過程については異なる結果となった。これらの原因を、計算方法と過程を詳細に検討することで明らかにする必要がある。
 - (b) 解析パラメータである表層厚や透水係数等の変化が地下水位の変化に及ぼす影響を明らかにした上で、これらパラメータの設定方法を検討する必要がある。

5. おわりに

本稿では、降雨時において鉄道沿線で発生しやすい斜面表層部分の崩壊に対する安定性を評価するために、斜面表層部の地下水変動を簡易な計算方法を用いて予測するモデルと、このモデルを用いた解析事例について述べた。今後は、本稿で明らかになった課題を解決するとともに、様々な斜面にこのモデルを用いた解析を適用し、モデルの妥当性と適用性について検討する予定である。さらに、本モデルを用いて表層崩壊に対する安定性を評価し、その結果を踏まえて降雨時の運転規制の方法や規制雨量値を検証する手法を確立したいと考えている。

文献

- 1) 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, 1985.6
- 2) 山口柏樹: 土質力学, 技報堂出版, pp.54, 1984.
- 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.