

土の粘着力の飽和度依存性を考慮した 広域斜面の降雨時安定性解析

布川 修* 浅野 嘉文** 川尻 峻三***

**Stability Analysis of Slope Surface Layers Extending over a Wide Area under Rainfall Condition
in Consideration of the Dependence of the Soil Cohesion on the Degree of the Soil Saturation**

Osamu NUNOKAWA Yoshifumi ASANO Shunzo KAWAJIRI

In order to secure the train operation, it is necessary to identify beforehand the area where the danger of the failure of slope surface layers along railway lines is high during the rainfall. The change of the water level of the surface layer during the rainfall has a great influence on the failure. We have developed a method of predicting the change of the water level and evaluating the stability of the slope surface layer considering the topography. In order to improve the accuracy of this method, we introduced to the analysis the relation between the decrease of the soil cohesion and the increase of the degree of the soil saturation. In this paper, we describe this method, and an analysis example using this method.

キーワード：斜面，降雨，表層崩壊，地下水位，安定性

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ぐためには、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性を適切に評価するためには、斜面周辺の比較的広範囲な水の移動現象を考慮して、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。そこで、筆者らはデジタル化された斜面の地形情報と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) 3)}。

一方、本研究で対象としているすべり土層の厚さが1～3m程度の表層崩壊の原因の一つとして、不飽和状態にあるすべり土層に雨水が侵入し、土の強度定数である粘着力が低下することが考えられる。土中の水分量の増加や浸水による土粒子間のサクシジョンの減少によって粘着力が低下する事実は数多く報告されている^{4) ~7)}。

そこで、上記解析モデルにおける安定計算の精度向上を図ることを目的として、土の飽和度（土の間隙中に水が占める割合）の上昇に伴い粘着力が低下する関係を上記解析モデルに導入した⁸⁾。本稿では、この方法の概要

と事例解析結果について述べる。

2. 解析モデル

2.1 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する安定性を評価する方法として、沖村ら⁹⁾が提案した手法がある。この方法では、まず数値標高モデルをもとに対象斜面の地形を4つの格子点に囲まれた要素に分割し、これらの要素ごとにある厚さ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（以下、既開発モデルという）^{1) 2) 3)}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、時々刻々と変動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標高モデル、各要素の透水係数、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数値標高モデルから各要素の勾配を求め、水が

* 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）

*** 防災技術研究部 地盤防災研究室（現 北見工業大学）

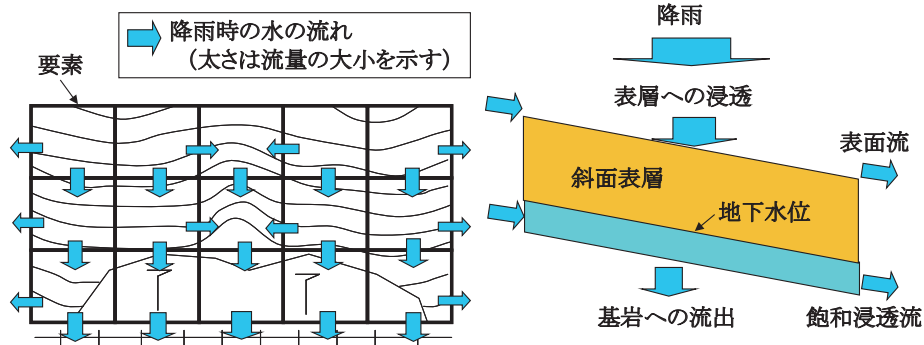


図1 既開発モデルにおける斜面表層の水の流れに関する概念図¹⁾

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の手順を設定した時間間隔 Δt 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。

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。本稿の内容に関連する上記④に示した無限長斜面の安定解析の式を以下に記載する。

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

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、 $SF_{(i)}$ ：時間ステップ i 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)、 $\gamma_{(i)}$ ：時間ステップ i の土の湿潤密度 (t/m^3)、 D ：表層厚さ (m)、 $h_{(i)}$ ：時間ステップ i の基岩面からの地下水位 (m)

2.2 土の粘着力の飽和度依存性の導入

前述したとおり、上記解析モデルにおける安定計算の精度向上を図ることを目的として、土の飽和度の上昇に伴い粘着力が低下する関係を上記解析モデルに導入する。具体的には、以下の式 (4) を用いて時間ステップ i の平均飽和度 S_{ri} から時間ステップ i における土の粘着力 c_i を算出し、式 (1) の土の粘着力 C_s に代入する。

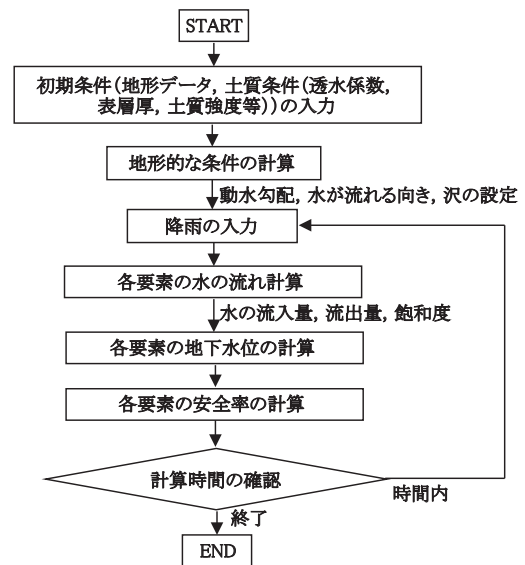


図2 既開発モデルの計算フロー²⁾

$$c_i = c_0 - \Delta c \cdot (S_{ri} - S_{r0}) \quad (4)$$

ここで、 c_i ：時間ステップ i の土の粘着力 (kPa)、 c_0 ：計算初期の土の粘着力 (kPa)、 Δc ：係数 (kPa)、 S_{ri} ：時間ステップ i の平均飽和度 (%)、 S_{r0} ：計算初期の平均飽和度 (%) である。

式 (4) を導入することで、2.1 節で示した解析モデルでは土の粘着力が解析時間すべてにおいて一定としていたのに対し、本稿のように時間ステップごとに変動する平均飽和度に応じて変動する粘着力を扱えるようになる。なお、上記式 (4) は、秦ら¹⁰⁾ が示した飽和度と粘着力との関係を一般化したものである。

3. 事例解析

本章では、2.2 節で述べた方法を既開発モデルに導入した場合における安定計算の精度向上を検証するために、土の粘着力を一定としているこれまでの解析と土の粘着力の飽和度依存性を導入した解析を実際に崩壊が発



図3 解析対象斜面の航空写真^{11) 12)}

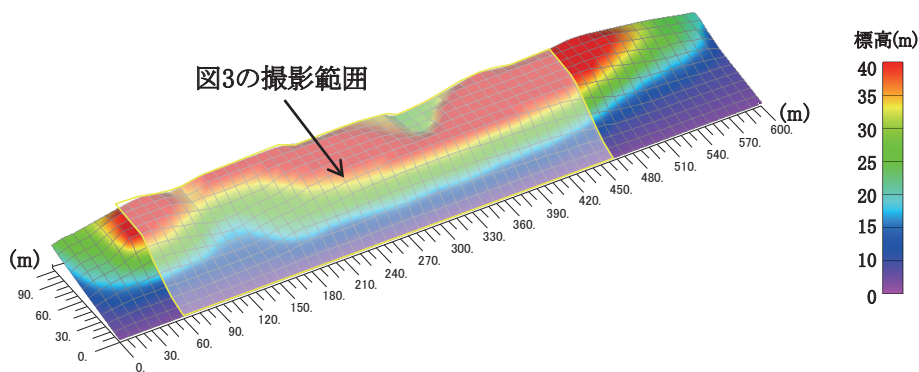


図4 解析に用いた数値標高モデル⁸⁾

生じた斜面を対象として実施した。

3.1 解析対象斜面の概要

事例解析の対象は、三浦ら^{11) 12)} および Kagamihara ら¹³⁾ が報告している平成 21 年台風 18 号によって崩壊した名古屋鉄道常滑線の沿線の斜面である。本崩壊事例では、沿線における斜面が複数箇所で崩壊し、崩土が線路内に流入した。三浦らと Kagamihara らは、崩壊箇所のうち崩壊規模が最も大きい崩壊斜面の近接斜面を対象として、原位置試験および原位置より採取した乱れの少ない土試料を用いた飽和・不飽和状態における定圧一面せん断試験から、崩壊土層厚さおよび崩壊斜面の強度特性を把握している。さらに、室内試験結果を反映した浸透流解析および斜面安定解析を実施している。

図3は崩壊箇所周辺の航空写真である。三浦らと Kagamihara らの報告によると、崩壊地周辺の地形は、斜面の比高が30m程度で、勾配は40～45°程度の北西向きの斜面である。また、当該斜面の地質は新第三紀常滑累層の砂岩、礫岩、シルト岩および粘性土で構成され、層理面が斜面に対して5～15°の流れ盤を呈しており、崩壊の大部分が強風化したシルト岩であると報告されている。

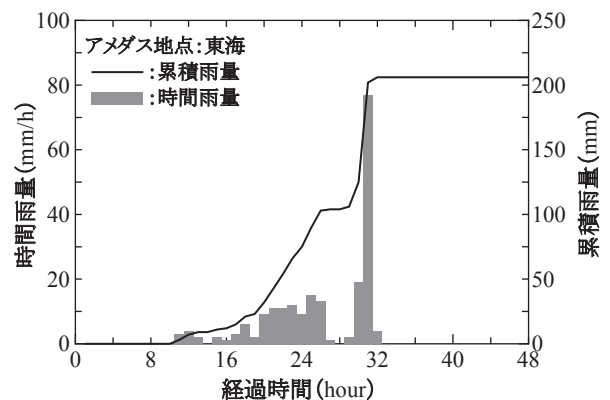


図5 斜面崩壊時の降雨データ⁸⁾

3.2 粘着力一定解析

解析に用いた格子間隔 10m の数値標高モデルを図4に示す。図3に示す崩壊斜面を含む範囲を解析対象とした。なお、数値標高モデルは、等高線図(2万5000分の1)から格子点の標高を読み取ることで作成した。

解析で用いる各パラメータは、前述した三浦らと Kagamihara らの報告を参考にして設定した。具体的には、土粒子の密度 ρ_s を 2.647g/cm^3 、間隙比 e を 0.97、表土層厚さ D を 1.2m、平均飽和度と地下水位との関係⁸⁾ を保水性「小」とした。土の強度定数のうち内部摩擦角 ϕ は 35° とした。粘着力 C_s については 0kPa とするパ

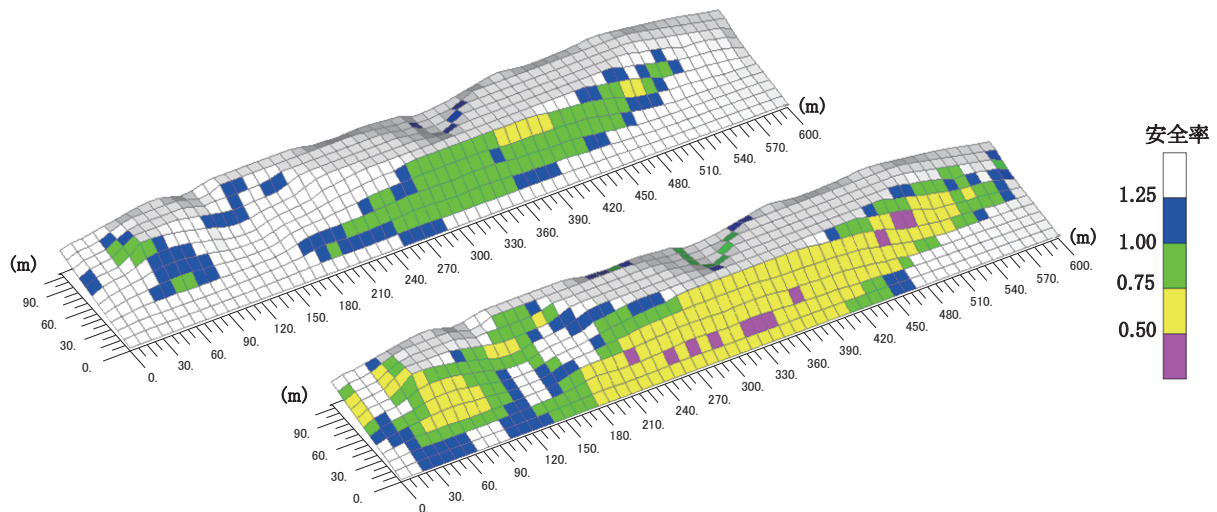


図6 安全率の空間分布 ($C_s = 0\text{kPa}$) (上図：0時間，下図：31時間)

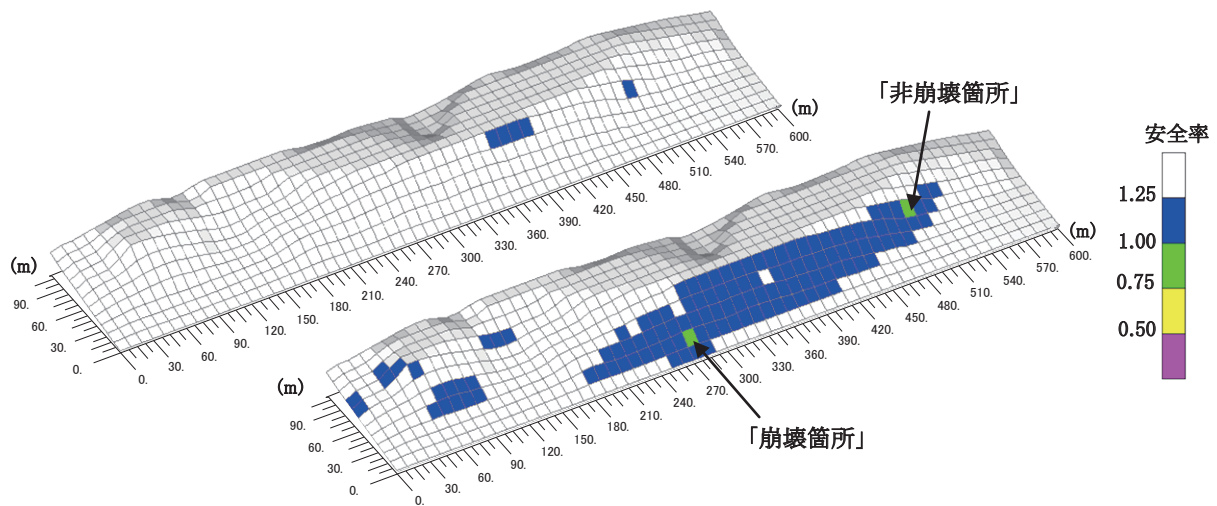


図7 安全率の空間分布 ($C_s = 5.75\text{kPa}$) (上図：0時間，下図：31時間)

ターンと、崩壊規模が最も大きい崩壊箇所にあたる要素の安全率が最も小さくなるときに1.0程度となるように逆算して求めた値 ($C_s = 5.75\text{kPa}$) とするパターンを2パターンを用いた。根系による粘着力 C_r は 0kPa とした。

解析では、まず岡田ら¹⁴⁾の手法を参考にして、各要素の平均飽和度がほぼ定常になるまで 0.694mm/h の雨量を3日に1日の割合 (年平均降雨を 2000mm としたときの平均雨量) で与える予備解析を実施した。そして、予備解析で得られた各要素の平均飽和度を初期値として、図5に示した斜面崩壊発生時の降雨データを与える本解析を実施した。なお、降雨データは対象斜面近傍 (対象斜面からの距離は約 8.0km) のアメダス観測所「東海」から得られたデータである。

解析結果として降雨を与える前 (解析時間0時間) と安全率が最も小さくなる時間 (解析時間31時間) における安全率の空間分布を図6 ($C_s = 0\text{kPa}$ の場合)、図7 ($C_s = 5.75\text{kPa}$ の場合) に示す。図6より、 $C_s = 0\text{kPa}$ とした場合には、解析初期の段階から安全率1.0を下回

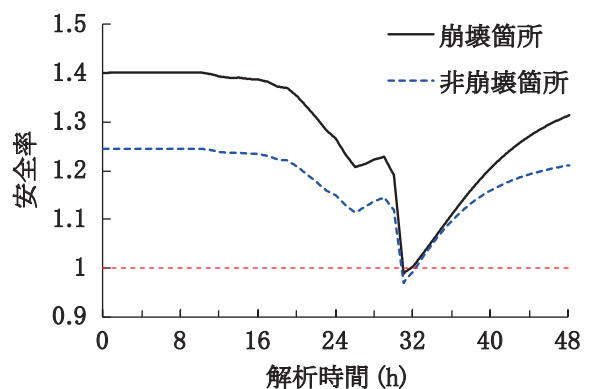


図8 安全率の経時変化

る領域が広範囲に分布し、解析時間31時間にはさらに範囲が広がっていることがわかる。一方図7より、 $C_s = 5.75\text{kPa}$ とした場合には、解析初期の段階から安全率が1.25以下となる要素は存在するものの、解析時間31時間では崩壊箇所を網羅するような範囲の安全率が1.25以下となっている。

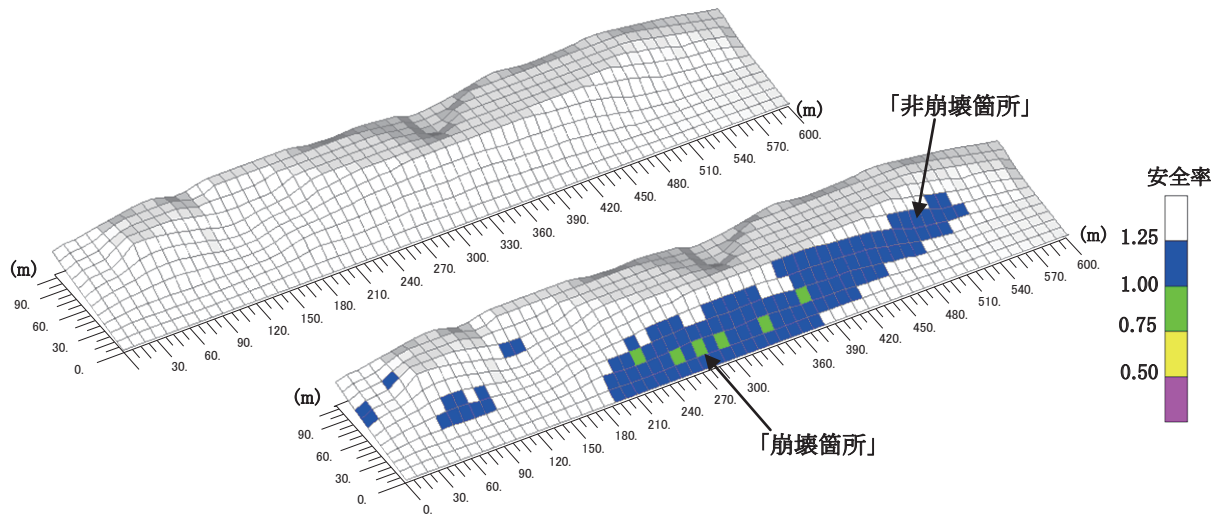


図9 安全率の空間分布 (C_s 変動) (上図：0時間，下図：31時間)

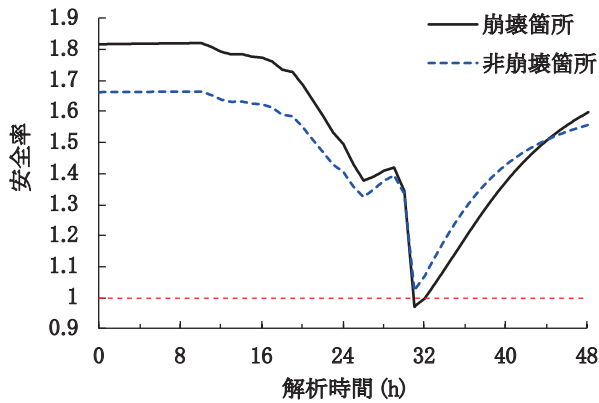


図10 安全率の経時変化

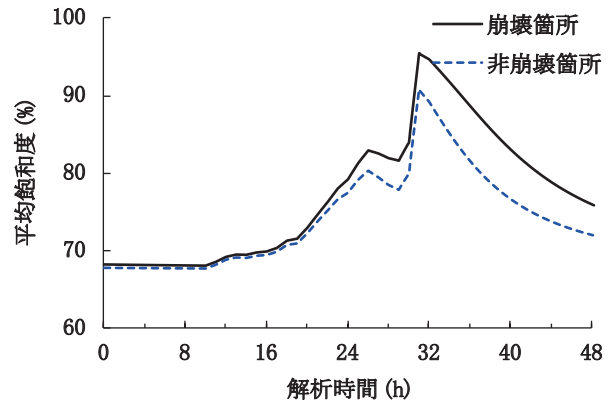


図11 平均飽和度の経時変化

図7に示した $C_s = 5.75\text{kPa}$ における解析時間31時間の結果において、安全率1.0を下回った要素は2つであった。一つの要素は前述したとおり崩壊規模が最も大きい崩壊箇所にあたる要素(図7に示した「崩壊箇所」)であるが、もう一方の要素(図7に示した「非崩壊箇所」)は実際には崩壊が発生していない箇所である。これらの要素の安全率の経時変化を比較した結果を図8に示した。この図に示すとおり、崩壊箇所よりも非崩壊箇所の安全率のほうが解析初期から終了まで安全率が低い結果となっている。

以上より、粘着力を一定とした解析は、相対的には不安定な箇所を抽出することができるが、崩壊箇所よりも非崩壊箇所の安全率を低く計算するなど、実際の現象と矛盾する結果となる場合があることが示唆される。

3.3 粘着力の飽和度依存性を考慮した解析

本節で実施した解析のパラメータのうち、式(4)に示したパラメータ以外、すなわち土の粘着力以外は3.2節と同様である。式(4)の計算初期の土の粘着力 c_0 は三浦

らと Kagamihara らが現地で採取した不攪乱試料(乱れが少ないように採取した試料)を用いて実施した不飽和状態の低圧一面せん断試験から得られた 10kPa とした。式(4)の係数 Δc は、3.2節で実施した粘着力一定解析と同様の考えに基づき、崩壊規模が最も大きい崩壊箇所にあたる要素の安全率が最も小さくなるときに1.0程度となるように逆算($\Delta c = 0.159\text{kPa}$)することで求めた。

図9に降雨を与える前(解析時間0時間)と安全率が最も小さくなる時間(解析時間31時間)における安全率の空間分布を示す。本解析では、解析初期の段階では安全率1.25を下回る要素はないが、解析時間31時間では崩壊箇所を網羅する範囲の安全率が1.25以下となっている。

3.2節と同様に、図9に示した「崩壊箇所」と「非崩壊箇所」(図7と同位置)の安全率の経時変化を図10に、平均飽和度の経時変化を図11に示す。図10より、粘着力の飽和度依存性を考慮した場合には、解析初期は非崩壊箇所の安全率が低くなるものの、解析時間31時間においては崩壊箇所の安全率の方が小さくなる結果となっ

特集：防災技術

ている。この結果は、図 11 に示すとおり解析時間 31 時間において崩壊箇所の方が非崩壊箇所よりも平均飽和度が高くなり、この影響を考慮して安全率を計算したためである。

以上より、土の粘着力の飽和度依存性を考慮することで実現象とより整合した結果が得られる、すなわち計算精度が向上するものと推察される。

4. まとめ

本稿をまとめ、以下に記す。

- 1) 筆者らが提案する解析モデルにおいて、粘着力を一定として安全率を計算する解析では、相対的には不安定な箇所の抽出が概ね可能であるが、要素の安全率計算において実際の現象と矛盾する結果となる場合が示唆される。
- 2) 粘着力の飽和度依存性を考慮して安全率を計算する解析では、実現象とより整合した結果が得られる、すなわち粘着力を一定とする安全率の計算よりも精度が向上するものと推察される。

5. おわりに

本稿では、筆者らが提案する解析モデルにおいて、粘着力の飽和度依存性を考慮することで計算精度が向上する可能性があることを事例解析により示した。今後は、その他の斜面にも同様の方法を適用することで提案する解析モデルの実斜面への適用性を把握するとともに、多様な地盤材料を対象とした粘着力と飽和度との関係についての検討を実施していく予定である。

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位変動と安定性評価, 鉄道総研報告, Vol.24, No.5, pp.17-22, 2010
- 3) 布川修, 太田直之, 石川智史: 地形を考慮した土石流の発生危険性評価, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, pp.35-40,

- 2013
- 4) 杉山友康, 村石尚, 岩崎公俊, 成瀬文宏: 鉄道盛土における水圧変動と降雨時の安定性, 土と基礎, Vol.41, No.4, pp.28-32, 1993
- 5) A.M.R.G. Athapaththu, T. Tsuchida, K. Suga, and S. Kano: A lightweight dynamic cone penetrometer for evaluation of natural masado slopes, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. C, 63(2), pp.403-416, 2007.
- 6) 川崎元, 西垣誠: 実用的な不飽和土用三軸圧縮試験装置の開発とそれを用いて測定した不飽和土のせん断強度について, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.1, pp.39-56, 2011
- 7) H. Ling and H. I. Ling: Centrifuge model simulations of rainfall-induced slope instability, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.138, No.9, pp.1151-1157, 2012.
- 8) 浅野嘉文, 川尻峻三, 布川修, 太田直之, 杉山友康, 渡邊論: 降雨時における斜面表層崩壊を再現する簡易解析モデルの提案, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.4, pp.579-595, 2013
- 9) 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
- 10) 秦吉弥, 一井康二, 土田孝, 加納誠二: 降雨による盛土の耐震性低下に関する一考察, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.2, pp.401-411, 2009
- 11) 三浦みなみ, 大代朋和, 沖村孝, 澁谷啓, 奥田達也, 鏡原聖史: 平成 21 年台風 18 号による斜面崩壊現場の崩壊メカニズムに関する一考察, 第 46 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1941-1942, 2011
- 12) 三浦みなみ, 大代朋和, 沖村孝, 澁谷啓, 奥田達也, 鏡原聖史: 平成 21 年台風 18 号による斜面崩壊現場の崩壊メカニズムに関する一考察, 建設工学研究所論文報告集第 53 号, pp.175-184, 2011
- 13) S. Kagamihara, S. Shibuya, B. S. Kim, S. Kawajiri, T. N. Lohani and T. Okimura: Case study on shallow failure of conglomerate and siltstone slopes due to a heavy rainfall, *Proc. of Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*, in print., 2013.
- 14) 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