

# 地すべり斜面を対象とした気液二相流解析・弾塑性解析を組み合わせた斜面安定性評価手法の構築

末永 弘<sup>1\*</sup>・小早川 博亮<sup>1</sup>・田中 姿郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1 6 4 6)

\*E-mail: suenaga@criepi.denken.or.jp

降雨浸透ならびに斜面安定性を数値解析により評価する手法は、これまで数多く実施されてきたものの、現場への適用性を示した事例は少ない。そこで、気液二相流解析と弾塑性有限要素法解析を組み合わせることで、斜面の安定性を評価する解析手法を構築し、この手法を実斜面の現場に適用した。その結果、降雨浸透流解析から得られた地盤内の体積含水率の変化傾向が測定値と概ね一致したことより、構築した手法の一部である、降雨浸透流解析の適用性が示された。また、降雨浸透流解析の結果を用いた斜面安定解析から、適用した斜面における全体安全率は常に1.0よりも大きくなり、対象斜面が崩壊していない事実と整合していることが明らかとなった。

**Key Words** : slope stability, rainfall infiltration, gas-liquid two phase flow, elastic plastic analysis

## 1. はじめに

近年、地球環境変化に伴う異常気象により、豪雨の発生する頻度や地域が増大している。これに対応して斜面の崩壊現象も頻発していることから、斜面崩壊の予測手法を確立することが重要な課題となっている。

斜面崩壊の要因として、降雨浸透に伴う地盤内の間隙水圧、飽和度の上昇による自重の増加ならびにすべり面上の見かけの強度低下が挙げられる<sup>1)</sup>。不飽和地盤における浸透現象は、重力、浮力、毛管圧が作用する複雑な物理現象となることから、この現象を数値解析により表現するためには、地盤内の間隙中における地下水と空気が同時に流動する現象を取り扱う、気液二相流解析を実施する必要があるものと考えられる。しかしながら、降雨浸透現象の数値解析による表現は、これまで地盤内の空気の存在を無視できると仮定し、不飽和浸透流解析により実施されてきた<sup>2), 3)</sup>。

一方、斜面を対象に降雨浸透と地盤の変形挙動を解析した研究事例は多く存在するが<sup>4)~6)</sup>、降雨浸透流解析および斜面安定解析を組み合わせた解析手法を現場へ適用した事例は少ない。このため、これらの解析技術を用いた斜面崩壊に関する評価手法の現場への適用性検証が必要である。

そこで本研究では、気液二相流解析を用いた降雨浸透

流解析と、斜面安定解析を組み合わせた斜面安定性評価のための解析手法を構築し、現場への適用性を評価した。

## 2. 斜面安定性評価手法の構築

本研究において、斜面安定性の評価手法として、1) 降雨の浸透挙動を的確に表現するための気液二相流解析手法、および2) 斜面地盤の力学的安定性を評価するための弾塑性解析手法を組み合わせた手法を構築した。

以下に、降雨浸透流解析、斜面安定解析の解析手法、およびこれらを組み合わせた評価手順について述べる。

### (1) 降雨浸透流解析手法

降雨浸透流解析には、汎用気液二相流解析コード TOUGH2<sup>7)</sup>を用いた。TOUGH2における基礎方程式は、質量保存則、エネルギー保存則である。しかしながら、本研究における対象は斜面を持つ深度数十m程度の地盤であり、温度変化がほとんど影響しないと考えられることから、等温状態を仮定し、エネルギー保存則は考慮しないこととした。

解析における入力パラメータは、絶対浸透率 $K$ 、間隙率 $\phi$ 、二相流特性(相対浸透率 $k_r$ 、毛管圧 $P_c$ )、および降雨量の時間変化である。また、主要変数は、圧力 $P$ 、

飽和度 $S$ である。本研究では、気相として空気、液相として水を想定し、水蒸気の流動ならびに水への空気の溶解は考慮していない。

## (2) 斜面安定解析手法

斜面安定解析には、汎用弾塑性有限要素法解析コードGA3D<sup>8)</sup>を用いた。GA3Dでは、地盤の変形、破壊における応力-ひずみの関係に弾完全塑性モデルを用い、弾塑性構成測において、降伏基準にMohr-Coulomb式、塑性ポテンシャルにDrucker-Prager式を採用したモデル(MC-DPモデル)を採用している。

解析における入力パラメータはヤング係数 $E$ 、ポアソン比 $\nu$ 、粘着力 $c$ 、内部摩擦角 $\theta$ 、ダイレタンシー角 $\phi$ であり、主要変数は応力 $\sigma$ 、ひずみ $\varepsilon$ である。

本解析手法では、要素ごとに計算される局所安全率による評価に加え、GA3Dを用いてせん断強度低減法<sup>9)</sup>による、すべり面における全体安全率の評価を行った。せん断強度低減法とは、まず地盤材料のせん断強度 $\tau_f$ が係数 $A$ で割った値で表わせると仮定する。すなわち、

$$\tau_{fA} = \frac{c'}{A} + \sigma' \frac{\tan \theta'}{A} \quad (1)$$

となる。ここに、 $c'$ 、 $\theta'$ 、 $\sigma'$ はそれぞれ有効応力に関する粘着力、内部摩擦角、すべり面上の有効垂直応力である。はじめにこの $A$ に小さい値(例えば0.1)を与えると、 $\tau_{fA}$ は大きな値となり、応力状態は弾性状態となる。次に $A$ を段階的に増加させ、ある点におけるモール円と交差する場合にモール円が仮想的なせん断強度線に接するよう応力補正を行っていき、ある $A$ を与えた段階で弾塑性解析の反復計算が発散することになる。この時点における $A$ を斜面の全体安全率と定義する<sup>8)</sup>。

## (3) 評価の手順

本研究では、はじめに降雨浸透流解析を行い、解析結果から得られる出力である地盤の各要素における飽和度 $S$ 、毛管圧 $P_c$ をもとにせん断強度を計算し、これを用いて斜面安定解析を実施した。

不飽和状態では、毛管効果により付加的な粘着力であるサクシオン応力が作用し、これによりせん断強度が増大するものと考えられる。このため、せん断強度の増分 $\Delta c'$ を以下のように置く。

$$\Delta c' = \xi S P_c \tan \theta' \quad (2)$$

ここに $\xi$ は定数であり、土槽における模擬降雨を与えた実験結果に基づき、 $\xi = 1.25$ とした<sup>9)</sup>。

評価の手順としては、まずはじめに斜面の地形、地質情報から、地表の傾斜角、地下における地層の深度分布

を考慮し、解析メッシュを構築した。この解析メッシュの各グリッドに対して、地質に応じた透水係数、間隙率、二相流特性を与える。物性値を与えたメッシュに対して初期条件、境界条件を設定し、降雨を与えたときの地下浸透挙動を計算した。

つぎに浸透流解析から得られる、各要素の飽和度 $S$ と毛管圧 $P_c$ から式(2)を用いることによりせん断強度を求め、これと地盤の力学的物性値を入力データとして斜面安定解析を実施した。この斜面安定解析の結果から、各要素ごとのすべり安全率(局所安全率)ならびに全体安全率を求め、斜面の安定性を評価するものとした。

## 3. 評価対象および入力データ

### (1) 評価対象

評価対象は、宮崎県耳川流域における一斜面とした。当該地域における地質は、中生代白亜紀の下部四万十層群に属しており、砂岩・頁岩よりなる。地盤の隆起と河川による浸食の繰り返しにより、急峻部に厚く崩積土が分布する不安定な地形が多数存在する<sup>9)</sup>。図-1(a)に解析対象とした斜面の地質断面図を示す。地表から数m~20m程度の厚さで崖錐堆積物が堆積し、下位には崩壊堆積物と呼ばれる、過去に地すべりや崩壊によって形成された堆積物が堆積する。さらにこの下位には頁岩を主体とする岩盤が存在している。これらの地質要素ごとに降雨浸透流解析、斜面安定解析に必要な物性値を設定し、解析を実施した。解析に用いたメッシュ図を図-1(b)に示す。

### (2) 降雨浸透流解析への入力データ

絶対浸透率 $K$ は現場透水試験結果より得られた透水係数を基に算出した<sup>9)</sup>。 $K$ を算出するためには地下水の粘性、密度が必要となるが、本研究では地下水温を20℃とし、粘性を $1.0 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 、密度を $1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ と仮定した。図-1(a)に示したように、崩壊堆積物中には粘性土が存在するが、現場試験で設定する試験区間長よりも層厚が薄いため、現場透水試験では評価できなかった。このため、透水係数は後述する室内試験結果をもとに与えた。

間隙率 $\phi$ は、現場で測定することは困難であったため、崖錐・崩壊堆積物に関しては、既往の降雨浸透実験、解析を実施している例<sup>10)</sup>を参考に、0.4(40%)とした。粘性土に関しては、別途コアを用いて測定した値として、0.25とした。表-1に地質要素ごとのパラメータをまとめる。

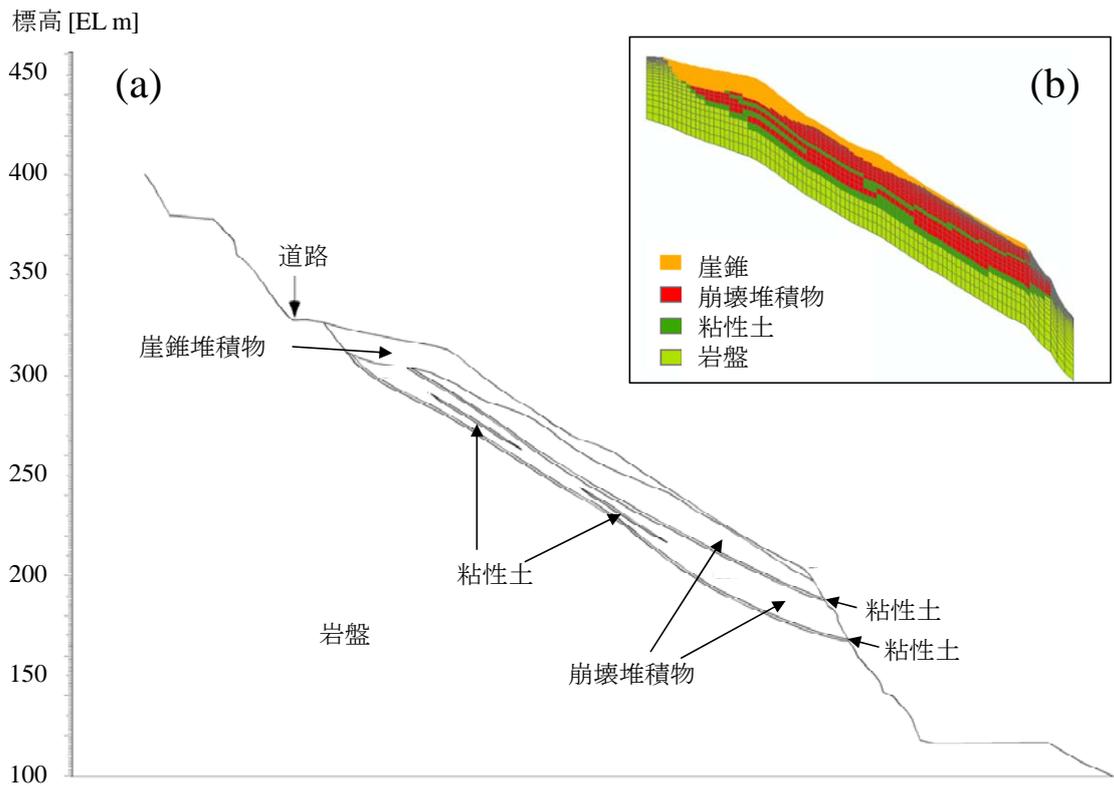


図-1 評価対象領域 (a)地質調査結果に基づく断面図, (b)断面図をもとに作成した解析メッシュ図)

表-1 地質要素ごとの絶対浸透率, 間隙率

地質	絶対浸透率 $K(m^2)$	間隙率 $\phi (-)$
崖錐堆積物	$7 \times 10^{-12}$	0.4
崩壊堆積物	$1 \times 10^{-13}$	0.4
粘性土	$1 \times 10^{-15}$	0.25
岩盤	$3 \times 10^{-14}$	0.2

二相流特性を求めするため, 現場のボーリング孔より試料を採取し, 毛管圧および相対浸透率の測定を行った. 試料として, 崩壊堆積物の中から1試料, 粘性土の中から1試料の計2試料を用いた.

二相流特性のうち, 毛管圧の測定には, 水銀圧入式ポロシメータを用いた. 得られた毛管圧測定値について, 以下のvan Genuchtenによるモデル式<sup>11)</sup>によるフィッティングを行い, フィッティングパラメータを求めた.

$$P_c = P_c^* \left( S_e^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{1-m} \quad (3)$$

ここに,  $S_e = (S - S_{br}) / (1 - S_{br})$ ,  $S_{br}$ は不動飽和度であり,  $P_c^*$ ,  $m$ はフィッティングパラメータである.

相対浸透率の測定装置の概念図を図-2に示す. この装置を用いることにより, 水で飽和した岩石に空気が注入した場合に, 空気の圧力・流量と水の圧力・流量を同時に測定することができる. この測定値をもとに, TOUGH2を用いた室内試験を対象とした数値解析を実施

し, 室内試験結果を再現する相対浸透率を求めた. 相対浸透率を求める手法に関しては, 文献<sup>12)</sup>を参照されたい. 図-3, 図-4に崩壊堆積物, 粘性土の試料から得られた相対浸透率曲線を示す.

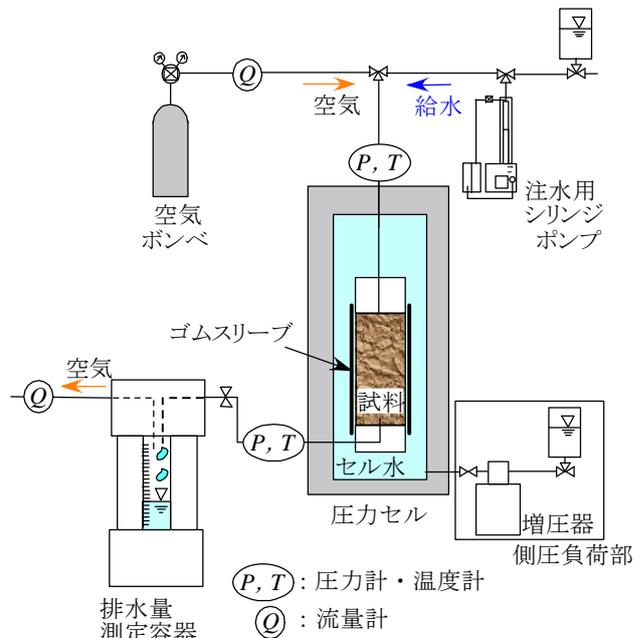


図-2 相対浸透率測定装置

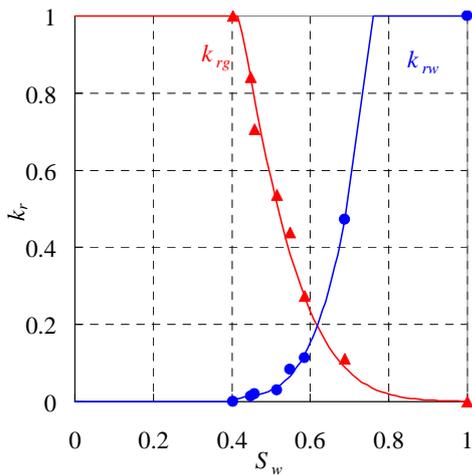


図-3 相対浸透率測定結果 (崩壊堆積物)

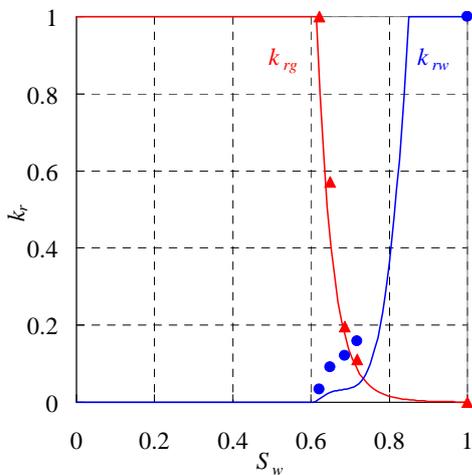


図-4 相対浸透率測定結果 (粘性土)

崖錐堆積物については、間隙率の時と同様、崩壊堆積物の毛管圧、相対浸透率を用いることとした。また、岩盤の毛管圧については、 $10^9 \sim 10^{12} \text{m/s}$ と小さい透水係数の岩石を用いて不飽和特性を決定している室内試験結果<sup>13)</sup>で得られた値を参照し、式(3)において $m=0.5$ 、 $P_c^*=1.0 \text{MPa}$ とした時のものを用いた。相対浸透率曲線については、液相に関してはvan GenuchtenとMualemによる以下のモデル式において、 $m=0.5$ としたものを用いた。

$$k_{rw} = \sqrt{S_e} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (4)$$

また、気相における相対浸透率はCoreyのモデルを用いた。

$$k_{rg} = (1 - S^*)^2 \left[ 1 - (S^*)^2 \right] \quad (5)$$

ここに、 $S^* = (S - S_{gr}) / (1 - S_{gr} - S_{gr})$ であり、 $S_{gr}=0.05$ とした。表-2に二相流特性において与えたパラメータをまとめる。

表-2 二相流特性において与えたパラメータ

地質	毛管圧		相対浸透率	
	$P_c^*$ (MPa)	$m$	$m$	$S_{gr}$
崖錐堆積物	0.06	0.26	データ (図-3)	
崩壊堆積物	0.06	0.26	データ (図-3)	
粘性土	0.17	0.55	データ (図-4)	
岩盤	1.0	0.5	0.5	0.05

※「データ」は図に示すデータを離散データとして与えた

### (3) 斜面安定解析への入力データ

斜面安定解析は、全応力解析にて実施した。

斜面安定解析において入力すべきパラメータのうち、崖錐堆積物、崩壊堆積物におけるヤング係数 $E$ 、粘着力 $c$ 、内部摩擦角 $\theta$ については、当該地質より得られたサンプルを用いた三軸試験結果に基づき設定した。また、粘性土、岩盤における $E$ 、 $c$ 、 $\theta$ については、既往の耳川流域における斜面安定解析<sup>14)</sup>において用いられた値を参照し、設定した。

$\nu$ については $\theta$ から算出される初期静止土圧係数 $\lambda_0$ を用いて、以下の式により算出した<sup>9)</sup>。

$$\nu = \frac{\lambda_0}{1 - \lambda_0} = \frac{1 - \sin \theta}{2 - \sin \theta} \quad (6)$$

三軸試験は圧密非排水 (CU) の条件で実施した。また $\phi$ については、 $\theta$ を用いて以下の式により算出した<sup>9)</sup>。

$$\psi = \theta - 30^\circ (\theta > 30^\circ), \text{ or } 0 (\theta \leq 30^\circ) \quad (7)$$

斜面安定解析に用いたパラメータについて、表-3に地質要素ごとにまとめる。

表-3 斜面安定解析に用いるパラメータ

地質	ヤング係数 $E$ (MPa)	粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\theta$ ( $^\circ$ )	ポアソン比 $\nu$ (-)	ダイレタンシー角 $\phi$ ( $^\circ$ )
崖錐堆積物	17.0	10.0	26.0	0.35	0.0
崩壊堆積物	12.8	58.0	20.8	0.39	0.0
粘性土	21.0	50.0	30.0	0.33	0.0
岩盤	4800	1500	45.0	0.22	15.0

## 4. 計算条件

### (1) 降雨浸透流解析

初期条件は、当該地域の年間降水量を平均的に与え、定常状態になるまで計算した場合に算出された地盤内の各要素における飽和度分布、地下水位分布を用いた。

次に境界条件として、図-1 (b)の下方ならびに上流の側面においては流体の移動のない不透過境界を、地表面には大気圧境界を、下流側面においては地下水の流出する透過境界をそれぞれ与えた。また、下流側面においては、標高EL 115mに河川水位を一定値として与えた。

降雨条件として、地表面の境界に2011年に起こった台風15号の降雨パターンの降水を与えた。図-5に経過時間ごとの10分間降水量、および累積降水量を示す。

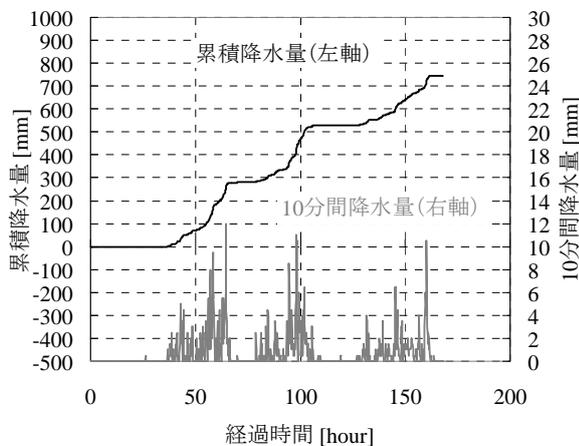


図-5 降雨条件 (2011年台風15号飽和度の時間変化)

### (2) 斜面安定解析

斜面安定解析では、初期の応力場を以下のように求めた。まず、初期の状態において、単位体積重量から自重を求めて、荷重のベクトルを算出した。次にこのベクトルに、間隙水圧による荷重を加算して自重を計算することにより、初期応力場を算出した。

せん断ひずみ分布は、2. (3)において述べたように、降雨浸透流解析結果から得られる $S$ 、 $P_c$ に基づいて求めた。

斜面安定解析の境界条件は、地表面に関しては自由に变形でき、側面、下面においては变形できない拘束条件を課した。

## 5. 計算結果

計算結果のうち、降雨浸透流解析結果として、地盤内の飽和度計算結果を図-6に示す。図には、降雨開始前、および159時間後の地盤内における飽和度分布を表す。この図から、崖錐堆積物、崩壊堆積物内においては、降

雨により地盤の飽和度が上昇していくことが分かる。崖錐堆積物では、0.4程度であった飽和度が0.5程度まで上昇している。一方、岩盤内においてはほとんど飽和度の変化が見られないものの、岩盤と崖錐堆積物の境界では、上部(標高320m付近)から降雨の浸透に伴い飽和度が上昇している。

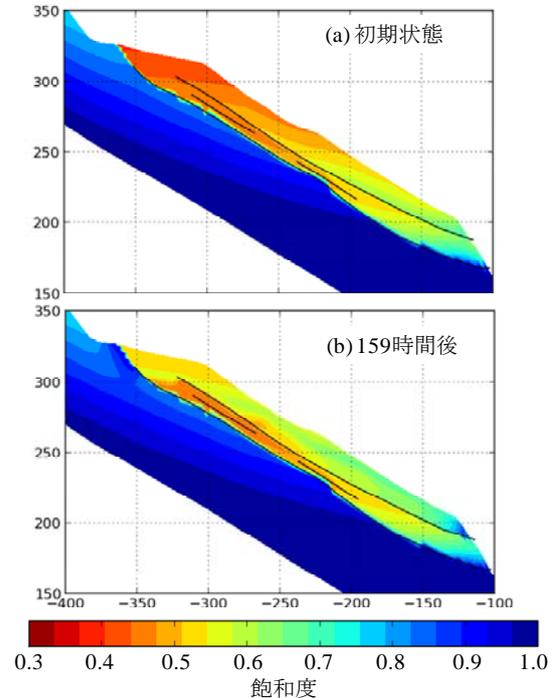


図-6 降雨浸透流解析結果 (飽和度の時間変化)

図-7に斜面中腹(図-6において横軸の座標が-225m付近)における体積含水率の測定結果と計算結果を比較する。体積含水率の測定は、現場のボーリング孔に設置された土壌水分計によるものである。この図から、解析結果は、表層から1~3mでは降雨に反応して体積含水率が変化し、15mより深部ではほとんど変化しないといった、体積含水率の変化傾向を概ね再現できており、降雨浸透流解析について適用性が示された。

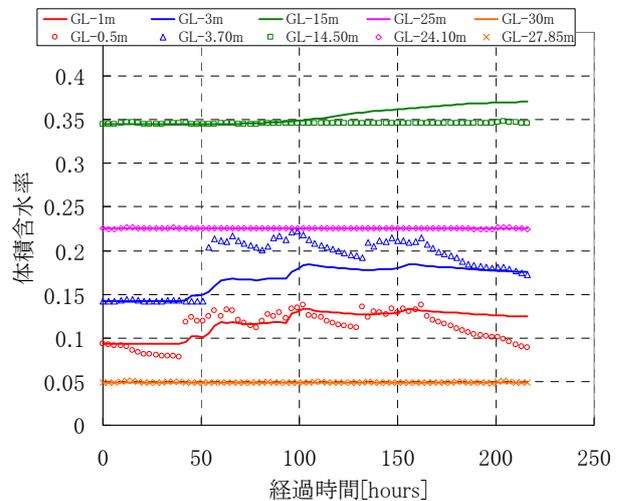


図-7 降雨浸透流解析結果 (体積含水率の時間変化)

図-6の飽和度分布を用いて、斜面安定解析を実施した結果例について、図-8に示す。このデータをもとに、全体安全率を算出すると、1.52となる。全体安全率は、計算対象の期間中1.38~1.52と、常に1よりも大きい値となった<sup>9)</sup>。このことは、系全体が1以上の安全率であることから崩壊しないことを表し、実際に2011年台風15号で当該斜面が崩壊しなかった事実と整合している。

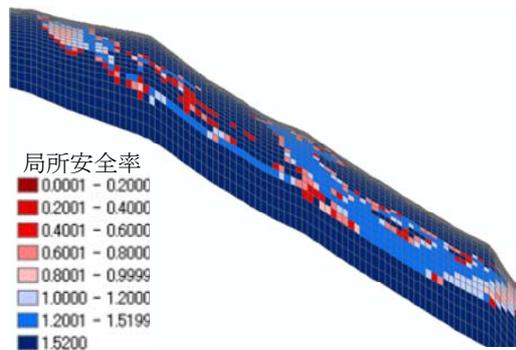


図-8 斜面安定解析結果例 (159時間後の局所安全率分布)

## 6. まとめ

気液二相流解析と弾完全塑性モデルを用いた斜面安定解析を組み合わせた、降雨の浸透に起因する斜面の安定性を評価する手法を構築した。

四万十帯の崩壊堆積物が分布する斜面にこの手法を適用し、2011年台風15号の降雨を与えて計算した結果、地盤内の体積含水率の変化傾向は、測定値と概ね整合したことから、降雨浸透流解析の適用性が示された。また、斜面の全体安全率は常に1.0よりも大きく、崩壊せず安定と評価でき、実際の斜面の状態と整合していることが明らかとなった。

## 参考文献

1) 鳥居居之, 大西剛史: 斜面崩壊危険度評価のための表土層内の降雨浸透過程を簡略化した地下水位算定モデル, 土木学会論文集 C, 67(4), pp.441-452, 2011.

2) 平松晋也, 水山高久, 石川芳治: 山腹斜面における雨水の挙動と数値モデルによる再現性に関する研究, 新砂防, 44(1), pp.21-30, 1991.

3) Bronstert, A., and Plate, E.J.: Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslope and micro-catchments, *J. of Hydrology*, 198, pp.177-195, 1997.

4) 内田太郎, 水山高久: パイプ流が斜面の安全率に及ぼす影響に関する数値解析を用いた考察, 砂防学会誌, 55(2), pp.14-23, 2002.

5) 信岡卓, 鶴飼恵三, 若井明彦, 蔡飛: 降雨の非定常性と地盤の不飽和特性を考慮した斜面安定性予測手法の検討, 土木学会論文集 C, 65(1), pp.29-40, 2009.

6) 笹原克夫, 田村圭司: 急勾配まさ土斜面における降雨時の地表面変位の再現モデル, 地すべり, 47(3), pp.155-160, 2010.

7) Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G.: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134*, 1999.

8) 地盤技術者のための FEM シリーズ編集委員会: 地盤技術者のための FEM シリーズ③ 弾塑性有限要素法をつかう, 地盤工学会, 2003.

9) 末永弘, 小早川博亮, 田中姿郎: 気液二相流解析・弾塑性解析を組み合わせた斜面安定性評価手法の構築, 電力中央研究所研究報告, N12014, 2013.

10) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 地球規模水循環変動に対応する水管理技術に関する研究, 国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告, 9, pp.46-55, 2006.

11) van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc.*, 44, pp. 892-898.

12) Suenaga, H., and Nakagawa, K.: Analysis of two-phase flow properties of sandstones to evaluate their suitability for geologic storage of CO<sub>2</sub>, *Proc. of GHGT-10*, Energy Procedia, 2010.

13) 堤和大, 渡辺邦夫, 菅伊三男, 山脇真二: 岩石の不飽和特性の逆推定法, 応用地質, 35(2), pp. 69-76, 1995.

14) 田代幸英, 吉武宏晃, 林信雄: 大規模崩壊斜面における斜面構造と崩壊メカニズムの解明, 降雨と地震に関する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム予稿集, pp.265-270, 2009.

## DEVELOPMENT OF SLOPE STABILITY EVALUATION METHOD FOR SLOPE FAILURE USING A SEQUENTIAL ANALYSIS COUPLED GAS-LIQUID TWO PHASE FLOW AND ELASTIC PLASTIC PHENOMENON

Hiroshi SUENAGA, Hiroaki KOBAYAKAWA, and Shiro TANAKA

There are many studies to develop analytical methods of rainfall infiltration and slope stability, while there are not so many studies to apply it to the field of slope movement and to validate their applicability. We developed an evaluation method to combine gas-liquid two phase flow analysis and elastic-plastic finite element analysis and applied it to a slope field. It was showed that whole safety factor of larger than 1.0 at all times in the slope was consistent with the fact of no slope failure by the slope stability analysis using the results of the rainfall infiltration analysis.