

気液二相流・弾塑性解析による豪雨に伴う斜面崩壊危険度評価手法の現場への適用

末永 弘^{1*}・田中 姿郎¹・小早川 博亮¹

¹一般財団法人 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

斜面地盤への降雨浸透および力学挙動を数値解析により精緻に表現するため、降雨浸透現象に気液二相流解析を適用し、斜面地盤の力学挙動にせん断強度低減法による弾塑性解析を適用することにより、両者を組み合わせた斜面崩壊危険度評価手法を構築した。この手法を四万十層群の硬質堆積岩斜面に適用した結果、気液二相流解析から得られた斜面地盤内の体積含水率が測定値と概ね一致していることが示された。また弾塑性解析より、同一の豪雨を与えた場合、崩壊する・崩壊しないと予測された斜面が実際にそれぞれこの予測に整合的な挙動を示した。これらにより、構築した解析手法の妥当性が示された。

Key Words : slope failure, heavy rain, gas-liquid two phase analysis, elastic plastic analysis

1. はじめに

斜面崩壊を発生させる要因の一つとして、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せん断強度の低下が考えられる¹⁾。近年、豪雨の発生する頻度、地域が増大しており、これに伴って斜面の崩壊現象も頻発していること^{2)~4)}から、斜面災害予測・防止方策の確立が急務となっている。

本研究では、豪雨に伴う斜面崩壊を予測・評価するための手法として、数値解析を用いることとした。数値解析による降雨浸透に伴う斜面崩壊危険度評価は、これまでに数多く行われてきている^{5)~10)}。これらの既往研究で用いられてきた解析手法は、降雨浸透に関しては空気の流れを考慮せず地下水の流れのみを取り扱った不飽和浸透流解析、斜面安定に関しては極限平衡法によるものが多い。しかしながら、地盤内に封入された空気の流れは不飽和浸透流解析では表現が困難であり、極限平衡法では斜面におけるすべり土塊全体のつり合いだけしか成立しないという指摘¹¹⁾や、斜面の変形から破壊への遷移過程を必ずしも適切に考慮できないという指摘¹²⁾がある。

そこで、著者らは降雨浸透に関しては気体と液体の双方の流れを取り扱うことのできる気液二相流解析、斜面安定に関してはせん断強度低減法¹³⁾を組み込んだ弾塑性解析を行い、両者を組み合わせた斜面崩壊危険度評価手法を構築した¹⁴⁾。ここでは、手法の概要ならびに実斜面への適用結果について述べる。

2. 斜面崩壊危険度評価手法

構築した崩壊危険度評価手法は、降雨浸透について気液二相流解析を行い、その結果を用いて地盤の力学挙動について弾塑性解析を行い、斜面の崩壊危険度を評価する方法である。解析手法の詳細は文献¹⁴⁾を参照されたい。

(1) 気液二相流解析方法

気液二相流解析には、解析コード TOUGH2¹⁵⁾を用いた。TOUGH2における基礎方程式は、質量およびエネルギー保存則であるが、浅層地盤内では温度変化は小さいと考えられることから、地盤内は等温状態と仮定し、エネルギー保存則は取り扱わないこととした。

解析における入力パラメータは絶対浸透率 K 、間隙率 ϕ 、二相流特性(相対浸透率 k_r ・毛管圧 P_c)、および降水量の時間変化である。解析における主要変数は、気相圧力 P_a 、液相の飽和度 S_w である。

(2) 弾塑性解析方法

弾塑性解析では、解析コード GA3D¹⁶⁾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、弾塑性構成則において、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 ν 、粘着力 c 、内部摩擦角 θ 、ダイレイタンシー角 ψ であり、主要変数は応力 σ 、ひずみ ε である。

(3) 斜面崩壊危険度評価の手順

斜面崩壊危険度評価の手順について、以下に示す。まず斜面地盤の地形・地質情報に基づき、解析メッシュを作成する。この解析メッシュの各要素に対して、地質に応じた水理特性(K , ϕ , k_r , P_c)を与える。気液二相流解析により、斜面地盤に降雨が浸透した時の地下水・空気の流動をシミュレートし、地盤内の飽和度 S_w 、間隙水圧、毛管圧 P_c の分布を求める。次に気液二相流解析から得られる、要素ごとの S_w と P_c をもとに、以下の式により各要素のせん断強度 τ を求める。

$$\tau = c + \xi S_w P_c \tan \theta + \sigma \tan \theta \quad (1)$$

ここに、 ξ は強度増加係数であり、1.25とした¹⁷⁾。これと、 E , c , θ , ν , ψ といった地盤の力学的物性値を入力データとして、弾塑性解析により地盤の力学的挙動をシミュレートし、せん断強度と応力から要素ごとの局所安全率（せん断強度を応力で除した値）を求めた。

斜面崩壊危険度は、せん断強度低減法¹⁸⁾により評価した。まず地盤のせん断強度に係数 R を掛けた値を仮想的な地盤のせん断強度 τ_R と仮定する。すなわち、

$$\tau_R = R(c' + \sigma' \tan \theta') \quad (2)$$

となる。ここに、 θ' , c' , σ' はそれぞれ有効応力に関する内部摩擦角、粘着力、すべり面上の有効垂直応力であり、要素ごとの θ , c , σ とは異なる。はじめにこの R に大きい値（例えば10）を与えると、 τ_R は大きな値となり、地盤は弾性状態となる。次に R を段階的に低減させると、ある要素ではMohr-Coulombの破壊基準を超え塑性化するため、Mohr円が仮想的なせん断強度線に接するよう応力補正を行う。さらに R を低減させて計算を行っていくと、弾塑性解析の反復計算が発散することとなる。この時点における R を、本研究では斜面崩壊危険度と定義する。この斜面崩壊危険度 R が1.0以上となり弾塑性解析の反復計算が発散する結果となる場合、地盤全体で見た場合の応力が再配分されず、地盤の強度よりも応力が上回ることとなり、斜面が崩壊すると判断される。

3. 対象とした斜面および解析条件

(1) 対象とした斜面概要

本研究では、宮崎県の耳川流域における2箇所の斜面を対象に、斜面崩壊危険度評価手法を適用した。耳川流域では、2005年の台風14号により、山間部において局地的に総降水量1000mmを超える豪雨があり、多くの斜面崩壊をもたらした¹⁹⁾。本研究では、この2005年台風14号により崩壊した斜面と、崩壊しなかったものの今後崩壊する可能性のある斜面²⁰⁾を1箇所ずつ選択した。地質は四万十層群の砂岩・泥岩により構成される。当該地域の四万十層群は、一般的に北東-南西走向、北西傾斜を示

し、延岡構造線を境に北西側には白亜系四万十層群、南東側には古第三系の四万十層群が分布している。今回対象とした斜面のうち、2005年台風14号により崩壊した斜面を斜面A、崩壊しなかった斜面を斜面Bと称する。斜面Aの基盤岩は古第三系四万十層群の砂岩・泥岩互層を主体とし、斜面に対して斜交した流れ盤の構造を示す。斜面Bについては白亜系四万十層群の砂岩・泥岩互層を主体とし、斜面に対して受け盤の構造を示す。

2005年台風14号により崩壊した斜面Aについては、地質調査結果に基づき復元された崩壊前の断面を対象に解析を行うこととした。斜面Aについては斜面の崩壊した方向の断面を対象とし、斜面Bについては斜面の滑動している方向に概ね沿った方向の断面を対象とした。なお、斜面Aと斜面Bの地質年代は異なるが、両者とも泥岩優勢の砂岩・泥岩互層からなる硬質岩であること、耳川流域の地形の形成プロセスが同様であることから、地盤材料の力学特性や浸透特性は同様のものであると仮定した。また、斜面Aと斜面Bは、流れ盤・受け盤と斜面に対する地層の傾斜方向が異なるが、岩盤よりも上位の地層は過去の崩壊や重力変形に伴い角礫化するなど移動を生じていること、斜面Bでは粘性土の存在により、岩盤とこれより上位の崩壊堆積物の変形が連続しないと考えられることから、地層の傾斜方向を解析モデルに反映させないことは問題ないと判断した。

(2) 解析における入力データ

解析は二次元断面で行うこととし、地質調査結果による地質断面図に基づき、解析メッシュを構築した。斜面A、斜面Bの解析メッシュをそれぞれ図-1、図-2に示す。

解析メッシュは、水平方向(図-1、図-2におけるx方向)に斜面Aは3.6m、斜面Bは3.0mの格子幅とし、鉛直方向(同y方向)は最小となる地盤最上位の格子幅を0.2mとして、深部になるに従い格子幅を増大させた。鉛直方向の最大の格子幅は斜面Aで4.7m、斜面Bで12.7mである。総メッ

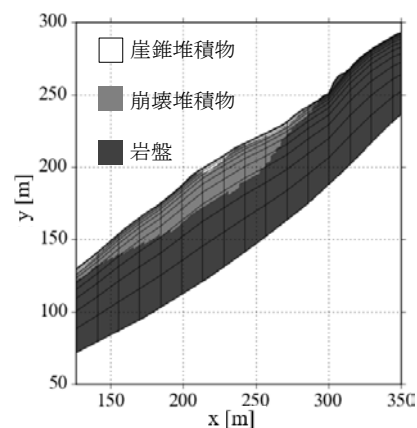


図-1 解析メッシュ図（斜面A）

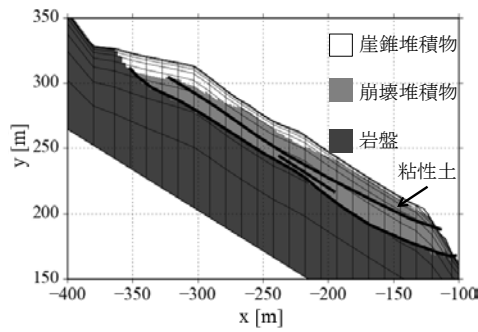


図-2 解析メッシュ図 (斜面B)

シュ数は斜面Aで4800, 斜面Bで3584である。図-1, 図-2では, 全てのメッシュを図中に示すと地質分布の判読が困難となるため, x方向, y方向とも5本ごとにメッシュを表示している。

a) 気液二相流解析における入力データ

気液二相流解析において必要となる入力データのうち, 地盤の絶対浸透率 K は斜面Bのボーリング孔において実施された現場透水試験ならびにボーリングコアによる室内透水試験の結果から得られた透水係数をもとに, 現場の地下水の温度を20℃に仮定した場合に得られる値を用いた。また間隙率 ϕ については, 現場で測定することは困難であるため, 既往の研究例¹⁾ならびにコア試験結果に基づき設定した¹⁴⁾(表-1)。二相流特性は, 斜面Bの現場から採取したボーリングコアにより, 相対浸透率 k_{ra} , k_{rw} については空気透過試験装置を用いて, 毛管圧 P_c については水銀圧入式ポロシメータを用いてそれぞれ求めた¹⁴⁾。図-3, 図-4に地質要素ごとの k_{ra} ならびに k_{rw} , P_c をそれぞれ示す。

b) 弾塑性解析における入力データ

表-1 地質ごとの絶対浸透率 (K) と間隙率 (ϕ)

地質	$K(\text{m}^2)$	ϕ
崖錐堆積物	7×10^{-12}	0.40
崩壊堆積物	1×10^{-13}	0.40
粘性土	1×10^{-15}	0.25
岩盤	3×10^{-14}	0.20

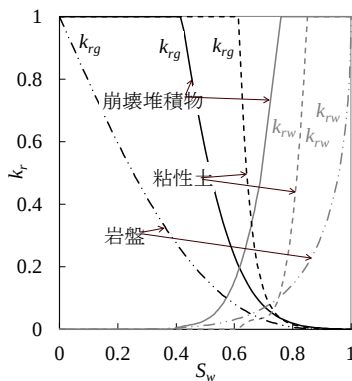


図-3 相対浸透率曲線

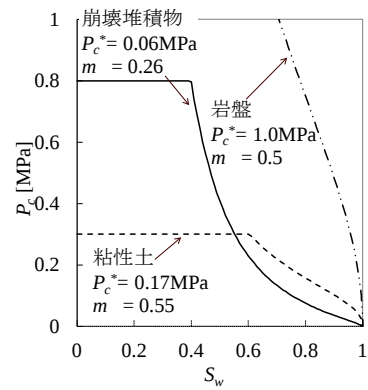


図-4 毛管圧曲線

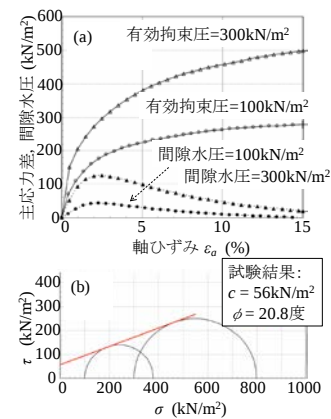


図-5 三軸試験結果

弾塑性解析において入力すべきパラメータのうち, 崩壊堆積物のヤング係数 E , 粘着力 c , 内部摩擦角 θ については, 斜面Bより得られた岩石試料を用いた三軸試験結果に基づき設定した。三軸試験は圧密非排水 (CU) の条件で実施した。試験結果を図-5に示す。

崖錐堆積物, 粘性土, 岩盤については, 既往研究事例である当該地域における斜面安定解析¹⁾において使用された値を用いた。ポアソン比 ν , ダイレイタンシー角 ψ については, θ を用いて, 以下の式により算出した¹⁾。

$$\nu = \frac{1 - \sin \theta}{\sin \theta} \quad (3)$$

$$\psi = \theta - 30^\circ (\theta > 30^\circ) \text{ or } \psi = 0^\circ (\theta \leq 30^\circ) \quad (4)$$

表-2に弾塑性解析で用いたパラメータをまとめる。

表-2 地質ごとの弾塑性解析パラメータ

地質	$E[\text{MPa}]$	$c[\text{kPa}]$	$\theta[^\circ]$	$\nu[-]$	$\psi[^\circ]$
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

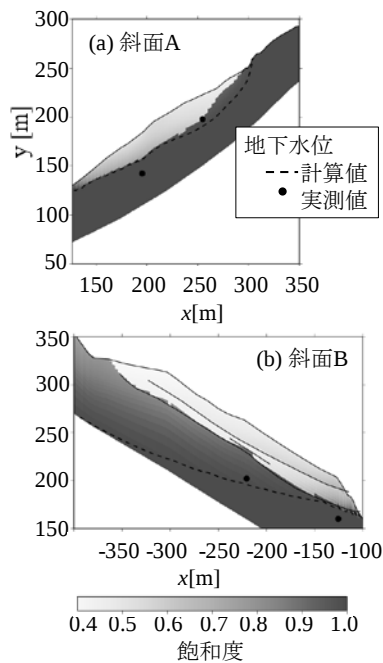


図-6 地下水位に関する観測値と計算結果の比較

(3) 解析条件

気液二相流解析では、まず初期状態を決定するための解析として、年間降水量の地下浸透割合相当の浸透量を地表に与えた場合に定常状態となるまでの計算を実施した。年間降水量および地下浸透割合は、当該地域の平均的な年間降水量である2600mm、および降水量から蒸発散量と流出量を差し引いた浸透割合として0.2と仮定し、設定した¹⁹⁾。それぞれの斜面において2箇所地下水位を測定しており、計算結果による地下水位が実測に基づく平均的な地下水位測定結果と概ね整合していることから、設定は妥当であると判断した(図-6)。

気液二相流解析の境界条件は、計算領域の上面である地表面を大気圧境界、下方境界と斜面の上流にあたる側方境界(以降、上流境界と称す)は不透過境界、斜面の下流にあたる側方境界(以降、下流境界と称す)は流出境界とし、下流境界における水位は一定とした。

解析において入力する降雨は、斜面Aが崩壊した2005年台風14号の降雨波形とした(図-7)。図-8に気液二相流解析で得られた体積含水率と現場で測定した体積含水率を比較する。現場における体積含水率は、斜面Bにおけるボーリング孔を利用して設置した土壌水分計を用いて測定したものである²⁰⁾。この図を見ると、解析結果と実測値が概ね整合的であることが分かる。D1孔のGL-27～30mについては、D2孔のGL-29～30mと比較して解析値は同程度であるのに対して実測値は小さいことから、実測値の初期値が周辺地盤のものと異なる可能性があると考えられる。以上のことから、地盤内の含水状態についても概ね実測値を再現出来ているものと考えられる。

弾塑性解析では、まず初期の応力場を求めるための解

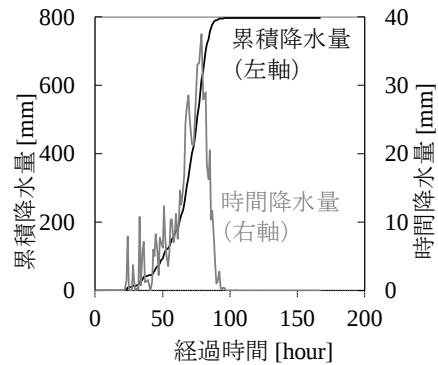


図-7 入力降雨波形 (2005年台風14号)

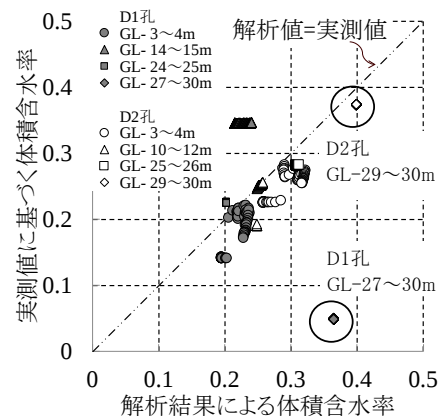


図-8 体積含水率の計算値と実測値の比較

析を実施した。すなわち、要素ごとに単位体積重量から自重による荷重を計算し、これに間隙水圧による荷重を加算した後、全応力解析を行うことにより初期応力場を算出した。せん断強度分布は2. (3)にて述べたように、二相流解析から得られる S_w 、 P_c より求めた。

弾塑性解析の境界条件は、地表面は自由に变形できる境界、それ以外の境界である下方、上流、下流境界は変形できない拘束条件を課して固定境界とした。

4. 解析結果

斜面A、斜面Bを対象に2005年台風14号の降雨波形を与えた場合の解析結果として、地盤内における飽和度および局所安全率の分布の時間変化を図-9、図-10にそれぞれ示す。両図ともに、上から順に開始24、72、120時間後の状態を示しており、左列が飽和度分布、右列が局所安全率分布の変化をそれぞれ表している。

飽和度分布の変化を見ると、斜面Aでは降雨開始72時間において主に地表付近の飽和度がほぼ1.0となっている一方、斜面Bでは斜面下方で飽和度が1.0に近い値となっている場所が見られるものの、斜面Aよりも飽和度が上昇していないことが分かる。また、72時間、120時間と時間経過に伴い、斜面A、斜面Bとも飽和度の上昇傾

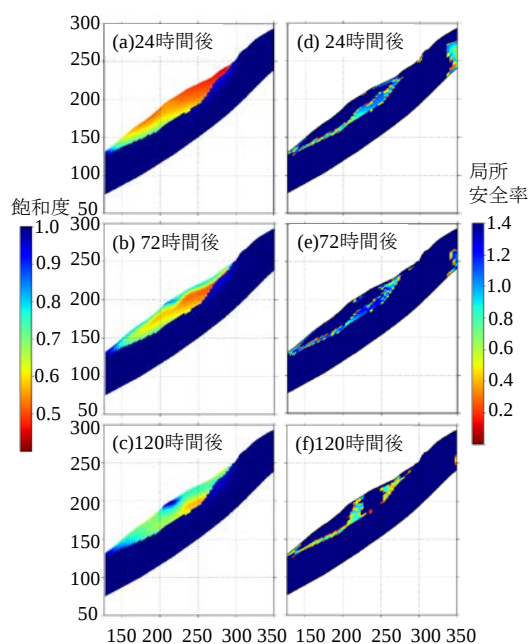


図-9 解析結果(斜面 A, (a)～(c)は飽和度, (d)～(f)は局所安全率)

向が認められるものの、両者を比較すると、飽和度の絶対値には違いがあることが分かる。以上のことから、同様の降雨を与えた場合でも、浸透の状況は異なることが考えられる。また斜面Aでは、120時間後に斜面中腹の崩壊堆積物と岩盤との境界付近に周囲より飽和度の低い領域（0.6程度）があるが、ここでは空気が閉じ込められ局所安全率が低下している可能性がある。

局所安全率分布の変化を見ると、斜面Aにおける24、72時間後の時、および斜面Bにおける24、72、120時間後の時には、青や水色といった寒色系の分布が多くみられるのに対し、斜面Aにおける120時間後には赤や黄色といった暖色系の分布が多くみられる状態となっていることが分かる。寒色系の色は局所安全率が1.0以上と要素の強度が応力を上回っていることを表しており、力学的には安定しているものと考えられる。一方で暖色系の色は局所安全率が0～0.5程度であり、1つの要素で考えた場合、Mohr-Coulombの破壊基準を超えて塑性化することになる。塑性化した要素としていない要素の間におけるつり合いの計算では、残差力すなわち力の不均衡が生じるが、弾塑性解析では地盤の系全体において塑性化の判定を再度行い残差力を再配分し、再配分できない場合には斜面が崩壊するものと評価する。斜面Aの120時間後における局所安全率分布(図-9(f))では、岩盤と崩壊堆積物境界付近で暖色系の低下領域が見られることから、実際の崩壊挙動を模擬できていることが示唆される。

解析結果から得られた斜面崩壊危険度について、表-3に示す。斜面Aでは96時間後までは崩壊危険度が1.0未満であったが、120時間後には1.05となり崩壊すると判定さ

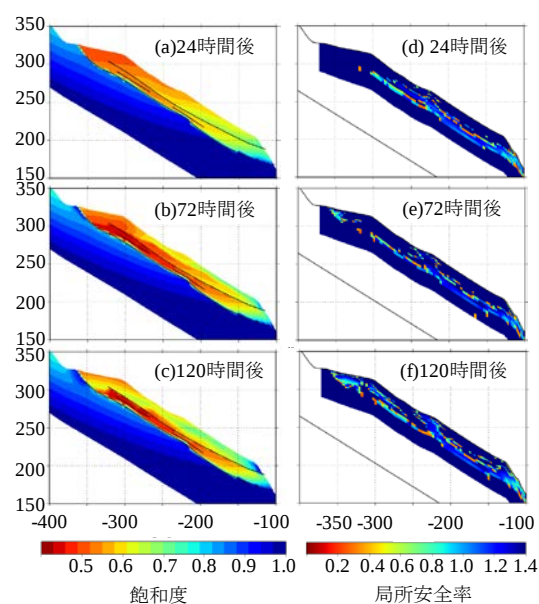


図-10 解析結果(斜面 B, (a)～(c)は飽和度, (d)～(f)は局所安全率)

れている。図-9を見ると、斜面Aの24時間後や72時間後においても暖色系のセルは存在するが、弾塑性解析により残差力が再配分された結果、崩壊危険度は1.0未満の値として求まり崩壊しないと判定されるが、斜面Aの120時間後においては塑性化した要素が多く残差力が再配分できないため、崩壊すると判定されたものと考えられる。一方斜面Bでは、図-10に見られるように局所的には暖色系のセルが存在するものの、斜面全体ではすべての時間において0.6～0.7程度であり、崩壊しないものと判定される。これらのことは、2005年台風14号において斜面Aは崩壊し、斜面Bは年間数mmと緩慢な変位を示しつつも崩壊しなかった事実と整合的であると考えられることから、構築した斜面崩壊危険度評価手法の適用性が示されたものと考えられる。ただし、斜面Aにおいて実際に斜面が崩壊した時刻は把握されておらず、崩壊の時刻は確認できないものの、降雨のピーク後に斜面崩壊する事例は多いことから、斜面Aでも降雨のピーク後に、地盤への降雨浸透により崩壊したものと推定される。

表-3 崩壊危険度評価結果

経過時間	斜面A	斜面B
24時間後	0.88	0.72
48時間後	0.82	0.70
72時間後	0.74	0.66
96時間後	0.81	0.67
120時間後	1.05	0.68
144時間後	1.19	0.69
168時間後	1.28	0.70

5. まとめ

降雨浸透に関して気体と液体の双方の流動を取り扱うことのできる気液二相流解析を、力学挙動に関してせん断強度低減法を組み込んだ弾塑性解析を行い、両者を組み合わせるにより斜面崩壊危険度を評価する手法を構築した。この斜面崩壊危険度評価手法を四万十層群の硬質堆積岩により基盤が構成される実際の斜面に適用した結果、2005年台風14号の豪雨により実際に崩壊した斜面については崩壊危険度が1.0を上回り崩壊すると判定され、崩壊しなかった斜面については崩壊危険度が1.0を下回り崩壊しないと判定された。これにより、構築した手法の適用性が示された。

謝辞：研究の実施にあたり、九州電力株式会社の篠原芳朗氏、市丸義次氏、吉村健氏、吉武宏晃氏、宮崎遼氏、西日本技術開発株式会社の大石博之氏には、実験現場を提供頂き、解析結果とりまとめに際し有益な助言を頂いた。また、株式会社電力計算センターの石原修二氏、高橋健吾氏には数値計算を実施する際に、株式会社セレスの渡辺雅一氏、須藤昌幸氏にはボーリングコアを用いた室内試験を実施する際に多大な協力を頂いた。以上の方々に謝意を表明する次第である。

参考文献

- 1) 地盤工学会編: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, 184p, 2006.
- 2) 国土交通省近畿地方整備局: 2011 年紀伊半島大水害 災害対応の記録, 2013.
- 3) 土木学会, 地盤工学会: 平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団・調査報告書, 2014.
- 4) 日本応用地質学会: 2017 年九州北部豪雨災害調査団報告書, 2018.
- 5) 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, No.358/III-3, pp.69-75, 1985.
- 6) 平松晋也, 水山高久, 石川芳治: 雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究, 新砂防, Vol.43, No.1, pp.5-15, 1990.
- 7) Reid, M.E.: Slope instability caused by small variations in hydraulic conductivity, *Journal of Geotechnical and*

Geoenvironmental Engineering, Vol.123, No.8, pp.717-725, 1997.

- 8) 内田太郎, 盛伸行, 田村圭司, 寺田秀樹, 瀧口茂隆, 亀江幸二: 場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所への予測に及ぼす影響, 砂防学会誌, Vol.62, No.1, pp.23-31, 2009.
- 9) Zhan, T.L.T., Jia, G.W., Chen, Y.-M., Fredlund, D.G. and Li, H.: An analytical solution for rainfall infiltration into an unsaturated infinite slope and its application to slope stability analysis, *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.37, Issue12, pp.1737-1760, 2013.
- 10) Li, W.C., Dai, F.C., Wei, Y.Q., Wang, M.L., Min, H. and Lee, L.M.: Implication of subsurface flow on rainfall-induced landslide: a case study, *Landslides*, Vol.13, Issue5, pp.1109-1123, 2016.
- 11) 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② 弾塑性有限要素法がわかる, 地盤工学会, 296p, 2003.
- 12) 若井明彦, 吉松弘行: 地すべりを再現するための数値解析手法の現状, 日本地すべり学会誌, Vol.50, No.1, pp.7-17, 2013.
- 13) 鶴飼恵三: 弾塑性 FEM による斜面の全体安全率の計算方法, 土質工学会論文報告集, Vol.29, No.2, pp.190-195, 1989.
- 14) 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.
- 15) Pruess, K., C. Oldenburg and G. Moridis: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report*, LBNL-43134, 1999.
- 16) 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, 314p, 2003.
- 17) 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, Vol.65, No.1, pp.29-40, 2009.
- 18) 鶴飼恵三: 安定解析におけるせん断強度低減法の有用性, 土と基礎, Vol.38, No.1, pp.67-72, 1990.
- 19) 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, 降雨と地震に対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.
- 20) 吉武宏晃, 田中姿郎, 豊田康嗣, 末永弘, 小早川博亮, 澤田昌孝, 大石博之: 降雨に伴う斜面崩壊予測に向けた検討ー耳川流域の斜面災害と降雨浸透特性の把握への取り組みー, 日本応用地質学会平成 23 年度研究発表会講演論文集, pp.151-152, 2011.

ON APPLICATION OF A NUMERICAL RISK ANALYSIS METHOD OF A SLOPE FAILURE WITH HEAVY RAIN USING COUPLED GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW AND ELASTIC PLASTIC ANALYSIS TO SLOPE FIELDS

Hiroshi SUENAGA, Shiro TANAKA and Hiroaki KOBAYAKAWA

We developed an evaluation method combining gas-liquid two-phase flow analysis and elastic-plastic finite element analysis to represent rainfall infiltration and slope stability precisely through a numerical simulation. The method was applied to a slope field of hard sedimentary rocks of the Shimanto group, and the results showed that the method successfully identified slope failure, evaluating collapsed slope as collapsed and safe slope as not collapsed during the same heavy rainfall.