

短報

斜面崩壊予知戦略 —南九州シラス地帯を例として—

松尾 和昌*・酒匂 一成**・北村 良介***

The strategy for prediction of slope failures
— A case study in the southern part of Kyushu Island, Japan —

Kazumasa MATSUO*, Kazunari SAKO**, Ryosuke KITAMURA***

Abstract

In Kagoshima Prefecture, which is located in the southern part of Kyushu Island, Japan, there are several active volcanoes such as Mt. Sakurajima, Mt. Kirishima, Mt. Kaimon etc. Most of the earth surface in this prefecture is covered with various volcanic deposits. The non-welded part of pyroclastic flow deposits, so-called Shirasu in Japanese, forms steep slopes. In the rainy season (June~September) the slope failure often occur due to heavy rainfall on such steep slopes.

In this paper a synthetic system at the stage of research and practical-use is proposed to predict such slope failures and to prevent natural disasters due to rainfall. The proposal is given as two flow charts. These flow charts show the outline of the system in which key items are briefly explained. In the research stage, the models for voids, apparent cohesion, and the unsaturated seepage and slope stability analysis are introduced with the field measurements of rainfall, suction and temperature in soil. Then the procedure to determine the input parameters is explained for numerical experiments. Finally the system at the stage of practical-use is introduced.

キーワード：シラス，豪雨，斜面崩壊予知

Key words：Shirasu, Heavy rainfall, Prediction of slope failure

* 鹿児島大学大学院理工学研究科システム情報工学専攻
System and Information Engineering Course, Graduate
School of Science and Engineering, Kagoshima University

** 鹿児島大学大学院理工学研究科システム情報工学専攻
System and Information Engineering Course, Graduate
School of Science and Engineering, Kagoshima University

*** 鹿児島大学工学部海洋土木工学科
Department of Ocean Civil Engineering, Kagoshima
University

本短報に対する討論は平成 14 年 11 月末日まで受け付ける。

1. まえがき

南九州シラス地帯では梅雨期、台風来襲期の集中豪雨による斜面崩壊が頻発している^{1), 2), 3)}。降雨に伴う斜面崩壊は、含水比の増加に伴う土塊自重の増加、せん断強度パラメータの一つである見かけの粘着成分の低下、正の間隙水圧の増加による有効拘束圧の低下等に起因していることが定性的に知られている。ここで、見かけの粘着成分とは地盤工学で従来から用いられている粘着力のことを意味しているが、力の次元ではないことを強調するために本短報では見かけの粘着成分という用語を用いる。シラス斜面で降雨によって生じる斜面崩壊の多くは表層すべり型崩壊といわれるものであり、崩壊幅、崩壊長さが数メートル、崩壊深が数十センチメートルである。

北村ら⁴⁾は南九州シラス地帯での降雨に伴う表層すべり型斜面崩壊を予知することを目指した防災戦略を提案した。本短報では参考文献⁴⁾で提案したシステムを踏まえ、予知を目指した研究のアウトラインとこれまでに得られた成果をまとめ、今後の課題を抽出している。また、システム完成後の実用段階での運営方法についても言及している。

2. 予知システム（研究段階）

Fig. 1 は予知システムを確立するための研究段階での手順を示すフローチャートである。予知は通常「いつ（時間）」、「どこで（場所）」、「どのような（規模）」を事前に知ることを意味しているが、本システムで目指している予知は時間と規模のみであり、崩壊が予想される危険斜面を予め特定しておくことから始まる。

Fig. 1 において、太字で囲んだ間隙モデル⁵⁾、粘着モデル⁶⁾、浸透モデル^{7), 8), 9)}、斜面安定解析モデル^{6), 10)}はシステムの骨格をなしている。間隙モデル・粘着モデルは土要素の浸透特性・力学特性を明らかにするための数値力学モデルである。浸透モデルは初期・境界条件を有する土塊の浸透特性を明らかにするための数値力学モデルである。斜面安定解析モデルは土塊の含水状態を考慮し、せん断強度パラメータを用いて斜面の安定

度を明らかにするための数値力学モデルである。現在、Fig. 1 に示した一連のフローの計算が実行可能なコンピュータプログラムを開発中である。以下、主な項目の現段階までに得られた成果について説明する。

間隙モデル (Fig. 1 の (1)) においては、土粒子レベルでの力学的・確率論的考察により間隙比、体積含水率（含水比）、飽和度、不飽和・飽和透水係数、サクションを導いてきており、水分特性曲線、透水係数と含水比の関係 (Fig. 1 の (7)) を求めることができる。入力パラメータの具体値は、理科年表などから得られる間隙水の表面張力、粘性係数、物理試験 (Fig. 1 の (6)) の一つである土粒子密度試験から求まる土粒子密度、物理試験 (Fig. 1 の (6)) の一つである粒度試験から求まる D_{10} (10%通過粒径)、及び、粒径加積曲線を対数正規分布と仮定して得られる変動係数である。ここで、変動係数とは対数正規分布の標準偏差を平均で割った量と定義される。間隙モデルでは変動係数を介して粒径分布から間隙径分布を推定し、間隙比、含水比、不飽和・飽和透水係数、サクションを導いている。間隙モデルを用いて得られた水分特性曲線や不飽和・飽和透水係数は、不攪乱試料を用いた土の保水性試験 (Fig. 1 の (5)) と不飽和・飽和透水試験 (Fig. 1 の (5)) から得られた土質試験結果と比較し、モデルの妥当性が検討される。Fig. 2 は不飽和土の保水性試験と透水試験が同時に実施できる試作試験装置によって得られた土質試験結果^{11), 12)}と間隙モデルを用いた計算結果を示しており、間隙モデルの妥当性が明らかにされている。数値シミュレーションに用いた入力パラメータの値を Table 1 に示す。不飽和・飽和透水試験に関しては、降雨によって斜面崩壊が発生する地盤では飽和度 100% という状態は皆無であること、土質試験の方法と解説¹³⁾で規定されている飽和透水試験では試料の試験後の飽和度は 100% にはなっていないことに着目し、今後間隙モデルの修正が必要である。

粘着モデル (Fig. 1 の (1)) においては、土粒子レベルでの力学的・確率論的考察によりサクションに起因する見かけの粘着成分とサクションの関

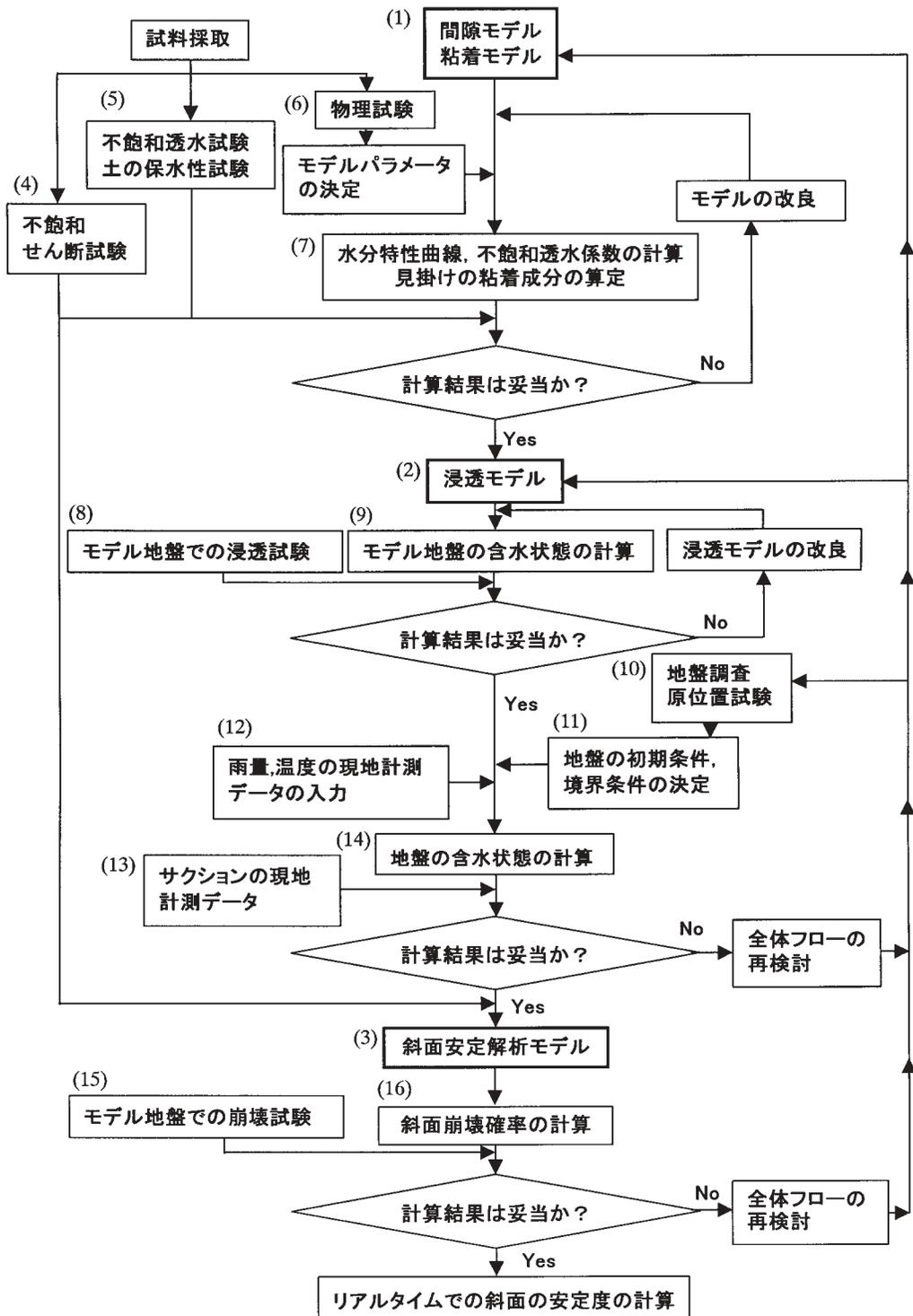
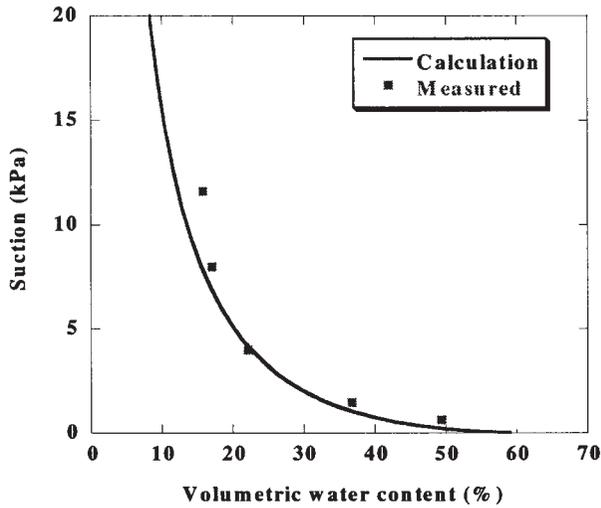
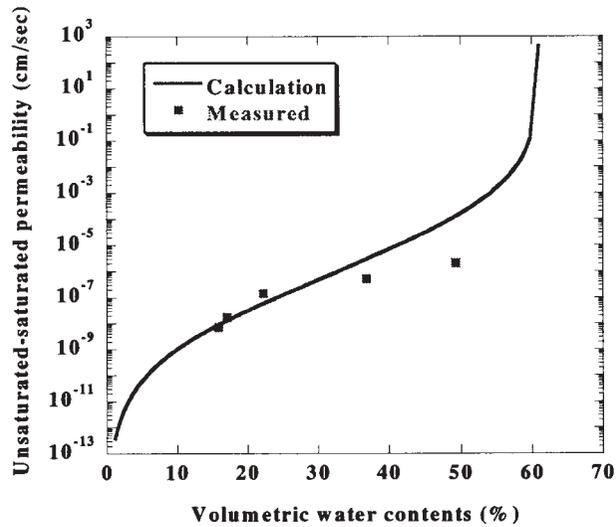


Fig. 1 Flow chart of proposed strategy (Stage of research)



(a) Moisture characteristic curves.



(b) Relation between permeability coefficient and water content.

Fig. 2 Variations in moisture characteristics and permeability coefficient

係 (Fig. 1 の (7)) を求める。Fig. 3 は粘着モデルを適用し、サクションと見かけの粘着成分増分の関係を計算した一例である。Fig. 3 に示した関係の妥当性を検証するために、超低拘束圧下での不飽和土のせん断強度パラメータ (見かけの粘着成分 c 、内部摩擦角 ϕ 。以下 c 、 ϕ と記す。) の含水比依存性を調べる試験を行っている¹⁴⁾。後述する

Table 1 Input parameter for the numerical model

Sample	Shirasu
Density of soil particle (g/cm^3)	2.37
Surface tension (N/m)	73.48×10^{-3}
Coefficient of viscosity ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.138×10^{-3}
Void ratio	1.567
Diameter finer than 10% D_{10} (cm)	7.45×10^{-4}
Coefficient of variance	-0.531

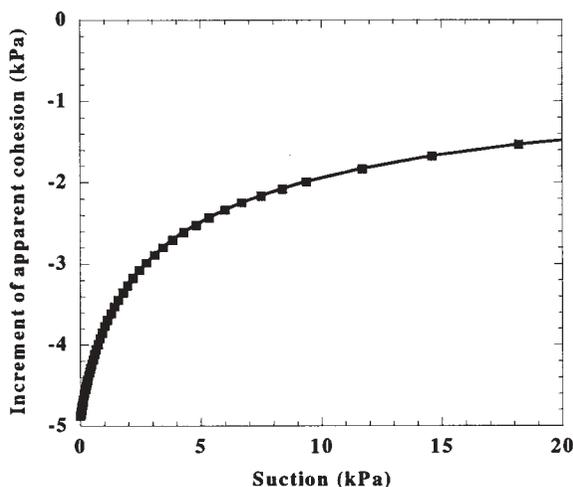


Fig. 3 Relation between apparent cohesion and suction obtained by numerical experiment

斜面安定解析を行うためには、事前に同定された潜在すべり面上のある含水状態でのせん断強度パラメータ c , ϕ を室内土質試験で求めておき (Fig. 1 の (4)), Fig. 3 に示した関係を用いることによって、降雨による含水比の変化に対する見かけの粘着成分の変化を定量的に評価する。なお、本システムでは含水比の変化によって c のみが変化し、 ϕ は一定であると仮定し、斜面の安定度の計算 (Fig. 1 の (16)) を行っている。間隙モデル、粘着モデルの妥当性が明らかになると Fig. 1 のフローは浸透モデルに移動する。

浸透モデル (Fig. 1 の (2)) においては、差分法や有限要素法を用いて降雨浸透、地下水変動などによる地盤内含水比分布の変化を時系列で求める (Fig. 1 の (9))。得られた結果は、初期条件と境界条件が明確な土槽を用いたモデル斜面での浸透試験結果 (Fig. 1 の (8)) と比較・検討される。Fig. 4 は土槽試験で用いられた土槽の寸法、モデル斜面の形状、テンシオメータ、間隙水圧計の設置場所を示している。土槽内に作られたモデル斜面の上端あるいは下端から水を供給し、モデル斜面内のサクシジョンの変化を計測している。計測されたサクシジョンや間隙水圧を浸透モデルによるシミュレート結果と比較することによって、浸透モデルの妥当性が明らかにされる。土槽試験で浸透

モデルの妥当性が明らかになると、Fig. 1 のフローは実斜面での浸透モデルの妥当性の検討に移動する。すなわち、斜面での地盤調査 (Fig. 1 の (10)) より斜面の層構成を明らかにし、解析領域、解析領域の初期条件・境界条件を決定する (Fig. 1 の (11))。そして、雨量と温度の現地計測データ (Fig. 1 の (12)) を入力し、得られたサクシジョンの計算結果 (Fig. 1 の (14)) を現地計測データ (Fig. 1 の (13)) と比較することによって浸透モデルの妥当性を明らかにする。雨量、サクシジョン、地中温度の現地計測データは電話回線 (有線、無線)、光ファイバーケーブル等の通信手段を介して研究室のパソコンに回収される¹⁵⁾。実斜面での浸透モデルの妥当性が明らかにされると Fig. 1 のフローは斜面安定解析モデルに移動する。

斜面安定解析モデル (Fig. 1 の (3)) においては、浸透モデルによって得られた潜在すべり面上の含水比の情報をもとに、見かけの粘着成分の増減を考慮した安全率の変化を計算する (Fig. 1 の (16))。現時点では表層すべり型の斜面崩壊を対象としているので、斜面安定解析には Janbu 法を用いて安全率の計算を行っている。その際、内部摩擦角は一定とし、見かけの粘着成分のみを含水比に依存して変化させている。Fig. 5 (a) は想定斜面、Fig. 5 (b) は想定斜面に Janbu 法を適用し

たときに得られた安全率の計算結果を示している。降雨に伴いサクションが低下すると斜面の安全率が低下していることがわかる。初期条件と境界条件が明確な土槽を用いたモデル斜面での崩壊試験結果 (Fig. 1 の (15)) は、同じ初期・境界条件の下で斜面安定解析モデルによって計算された崩壊時間と比較され、モデルの妥当性が検討される。安全率は 1 を境に崩壊と非崩壊を判定する指標である。従来の斜面安定解析は不静定問題であるため、幾つかの仮定を設けて安全率を誘導している。仮定が妥当でない場合は安全率が 1 以下でも崩壊せず、又は 1 以上でも崩壊する。そこで、せん断強度パラメータ c 、 ϕ のバラツキ等を考慮した斜面崩壊確率 (Fig. 1 の (16)) の導入を試みている¹⁶⁾。モデル斜面で斜面安定解析モデルの妥当性が明らかになると、実斜面への適用段階となる。実斜面への適用に際しては、事前の地盤調査・原

置試験 (Fig. 1 の (10)) 等によって潜在すべり面を同定し、それらの情報がコンピュータに入力される。潜在すべり面の同定には、コーン貫入試験装置や簡易貫入試験装置が有用な原位置試験装置と考えられる¹⁷⁾。Fig. 6 は潜在すべり面の同定法を示した模式図である。Fig. 6 において貫入抵抗値が急変する深度を連ねたラインが潜在すべり面となる。

以上のように、地盤調査、原位置試験、室内土質試験より得られた解析領域内のデータをもとにして、数値シミュレーションに用いるパラメータの具体値を入力しておくこと、リアルタイムでの斜面の安定度の計算が可能となる。晴天時のサクション分布の計算には温度データを用い、雨天時には温度と雨量のデータを用いる⁸⁾。研究段階では、晴天時でも降雨時でも常に計算されたサクションが現地計測と一致するように解析領域の境界条件

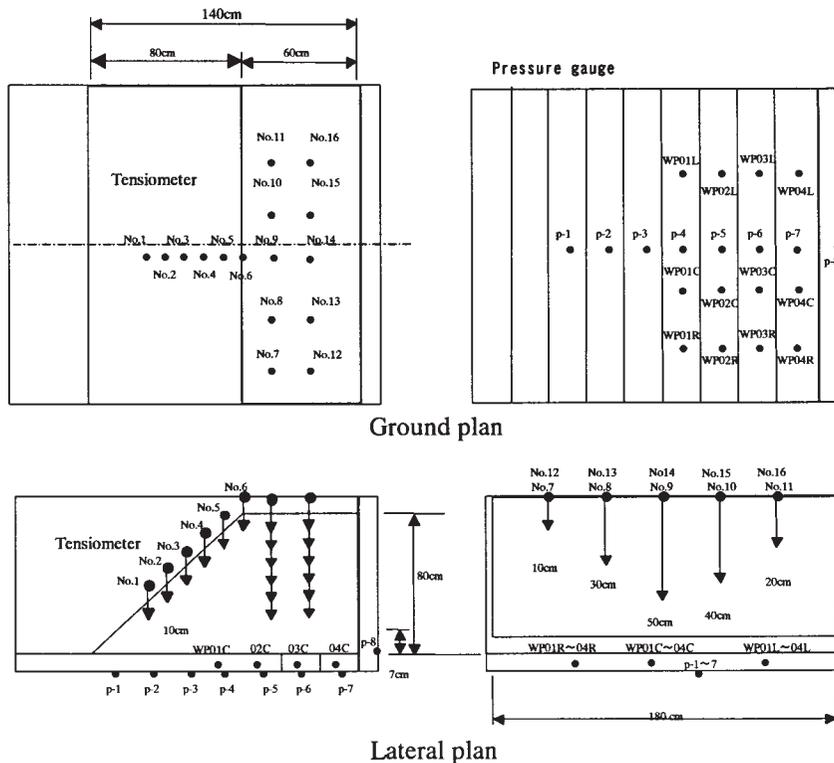
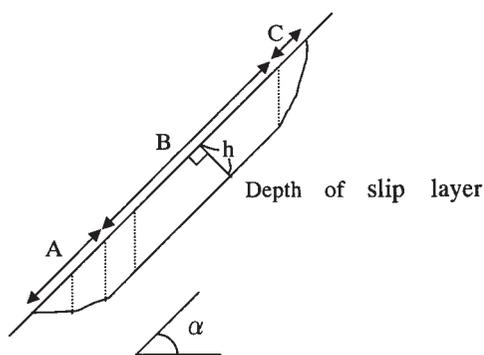
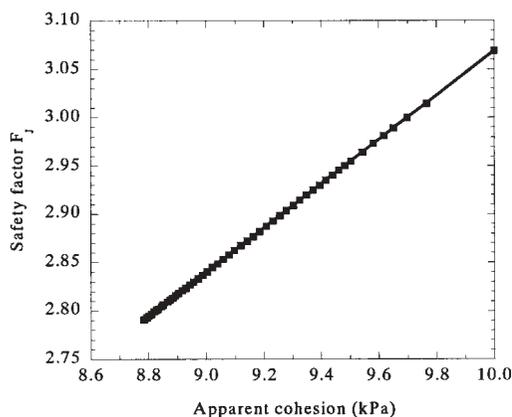


Fig. 4 Soil box for infiltration test and position of sensors



(a) Slope profile used by the slope stability analysis



(b) Relation between safety factor and apparent cohesion obtained by numerical experiment

Fig. 5 Potential slip plane and the change in safety factor

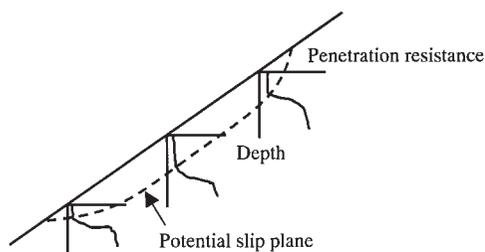


Fig. 6 Identification of potential slip plane

(間隙水の移動量, 蒸発量) を修正するアルゴリズム (一種の逆解析手法) を確立することが課題の一つとなる。

3. 予知システムの運用 (実用段階)

Fig. 7 は実用段階での予知システムのフローを示している。実用段階でのフローの見直しは、サクションの計算結果と計測結果を比較することによって (Fig. 7 の (1), (2), (3)), 地盤の初期条件, 境界条件を修正する (Fig. 7 の (4))。コンピュータは晴天時も降雨時も常にデータを取り込み, 斜面の含水状態をシミュレートすることになる。斜面崩壊の危険性が予見される時は, 10 分間隔で回収される雨量データのみならず, 今後予想される雨量をコンピュータに入力し, 将来の斜面の安定度を事前に計算することが可能である。これらの結果を用いて道路・鉄道等の規制及び規制解除, 住民の避難・帰宅等を判断することが可能となる。

提案しているシステムでは斜面内の含水状態を測定するためにテンシオメータを採用している。テンシオメータを用いる場合は, 1 ヶ月に一度程度の頻度で脱気水の補給が必要であろう。実用段階でのテンシオメータの維持・管理は, 斜面や道路を管理する国・地方自治体の出先機関が行うことになるであろう。出先機関における毎日の測定データ回収からなんらかの異常が見つかった場合, コンピュータを介したりリモートでの修復, 又は現地へ行き適切な処置を施すことが必要である。冬期には南九州シラス地帯の山岳部でも脱気水凍結等のトラブル発生が考えられる。含水状態の測定のためにテンシオメータ以外の土壌水分計も開発されている。対象となる斜面の特性を勘案し, 維持・管理の手間が少なく, 信頼性の高いデータが得られる土壌水分測定装置を選択するためのマニュアルも実用段階では必要である。

シラス地帯での降雨による斜面崩壊のほとんどは 5 - 10 月に発生している。11 月から翌年の 4 月までは崩壊予知のための準備期間とみなされる。この期間に測定装置, データ転送システムのチェック, 数値計算に関する種々の試行を実施し, 全体システムが正常に稼働し, 正確なデータが得られ

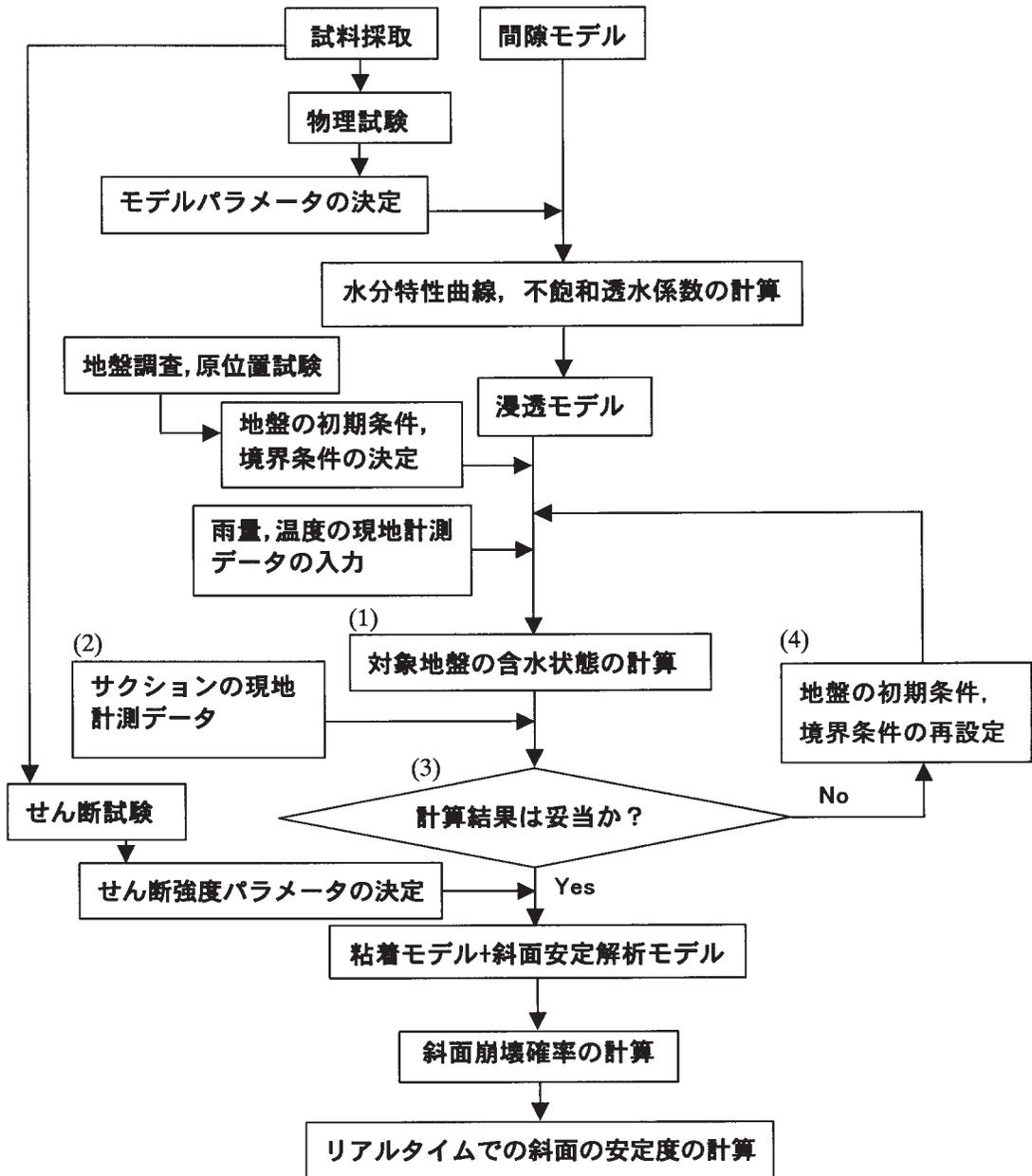


Fig. 7 Flow chart of proposed strategy (Stage of practical-use)

ることを確認しておく必要がある。

4. あとがき

本短報では、南九州シラス地帯での降雨による

表層すべり型斜面崩壊を予知するためのシステムを提案し、システムを確立するために北村研究室で行ってきている各種の土質試験、数値シミュレーションの進行状況を紹介した。また、本システム

が確立し、実用に供される場合の運用についても言及した。現時点では、提案している予知システムは未完成であるが、地盤調査、原位置試験、室内土質試験、コンピュータプログラムの開発の中で本システムを確立するために行わなければならない具体的な検討事項は明らかにされた。今後はこれらの検討事項を拙速に陥らず、一つずつ着実に解決していくことを目指したい。

謝辞

本研究は科研費地域連携推進研究費 (No.12792009)、基盤研究 (B) (No.13450196) の援助を受けた。国土交通省鹿児島国道工事事務所には土槽試験で援助をいただいた。日本道路公団鹿児島管理事務所には斜面調査でお世話になった。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 露木利貞ら：1986年梅雨末期集中豪雨による鹿児島市内のシラス災害に関する調査研究，科研費報告書 (No.61020038)，1987.
- 2) 1993年鹿児島豪雨災害調査委員会編：1993年鹿児島豪雨災害一繰り返される災害一，土質工学会 (現；地盤工学会)，1995.
- 3) 出水市土石流災害調査団：1997年鹿児島市出水市土石流災害調査報告，地盤工学会，1998.
- 4) 北村良介，松尾和昌：斜面崩壊に対する防災戦略，第18回日本自然災害学会学術講演会，pp.5-6，1999.
- 5) Kitamura, R., Fukuhara, S., Uemura, K., Kisanuki, G. and Seyama, M.: A numerical model for seepage through unsaturated soil, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.4, pp.261-265, 1998.
- 6) 酒匂一成，山田満秀，北村良介：新しいシラス斜面の安定解析手法，土木学会応用力学論文集，Vol. 3，pp.497-503，2000.
- 7) 福原清作，植村桂樹，北村良介：水の浸透による不飽和粒状体の崩壊挙動のモデル化，土木学会応用力学論文集，Vol. 1，pp.757-766，1998.
- 8) 宮本裕二，城本一義，北村良介：不飽和しらす地盤への間隙モデルの適用，土木学会応用力学論文集，Vol. 2，pp.593-598，2000.
- 9) 酒匂一成，北村良介，吉村博秋：しらす斜面 (鹿児島県喜入町) の2次元不飽和浸透解析に関する一考察，第36回地盤工学会研究発表会，pp.1287-1288，2001.
- 10) 酒匂一成，北村良介：浸透を考慮した斜面安定解析手法の開発，第56回土木学会年次学術講演会，pp.698-699，2001.
- 11) 瀬山正隆，志方宏敏，北村良介，城本一義，阿部廣史：試作不飽和透水試験装置を用いた不飽和土の透水特性，第34回地盤工学会研究発表会，pp.725-726，1999.
- 12) 瀬山正隆，北村良介，城本一義，阿部廣史，酒匂一成：不飽和砂質土の透水特性について，第35回地盤工学会研究発表会，pp.1493-1494，2000.
- 13) 地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会：土質試験の方法と解説 (第一回改訂版)，pp.334-338，2000.
- 14) 川畑 誠，北村良介，酒匂一成，久永泰輔，福田孝二：一面せん断試験装置による不飽和土のせん断強度パラメータに関する一考察，第36回地盤工学会研究発表会，pp.531-532，2001.
- 15) 北村良介，川井田 実，阿部廣史，城本一義，寺地卓也：砂質土地盤でのサクシヨンの現地計測システムの開発，土木学会論文集，No.652/III-51，pp.287-292，2000.
- 16) 荒木功平，酒匂一成，松尾和昌，北村良介，阿部廣史：降雨による斜面崩壊確率に関する一考察，第34回地盤工学会研究発表会，2002 (印刷中)
- 17) 小屋敷洋平，横山真之，北村良介，松尾和昌：ミニ・コーン貫入試験装置による潜在すべり面の同定に関する基礎的実験，第56回土木学会年次学術講演会，pp.696-697，2001.

(投稿受理：平成13年11月12日
訂正稿受理：平成14年4月2日)