

降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの確立に関する研究

Study on disaster prevention system of slope failure due to rainfall

酒匂一成¹・里見知昭²・菅野智之³・安川郁夫⁴・深川良一⁵

Kazunari Sako, Tomoaki Satomi, Tomoyuki Sugano, Ikuo Yasukawa, Ryoichi Fukagawa

¹立命館大学 COE 推進機構 ポストドクトラルフェロー (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
Postdoctoral fellow, Ritsumeikan University, COE promotion organization

²立命館大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
Graduate student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

³立命館大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
Graduate student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

⁴立命館大学 COE 推進機構 特別研究員 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
Fellow, Ritsumeikan University, COE promotion organization

⁵立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

The purpose of this research is to construct a prevention system using field measured data in real time, in-situ tests, laboratory tests, and numerical models in order to protect human lives, infrastructures and heritages ...etc., from slope disasters caused by heavy rainfall. In this paper, the outline of the slope disaster prevention system is explained. The filed monitoring system, which was set up on a slope behind an important cultural asset in July 2004, is then presented. Finally, unsaturated seepage analysis and slope stability analysis that are applied to simulate the change of slope stability with time are described.

Key Words: Rainfall, Disaster prevention, Slope failure, Monitoring

1. はじめに

京都盆地周辺の山腹・山麓には、世界文化遺産をはじめ数多くの重要な文化財が集積しており、これまでに火災、地震、降雨、風などによって幾度も被害を受けてきている。これらの重要文化財は代替性がなく、また、現在の社会・経済状況を考慮すると被災後の重要文化財の修復を行うことは、容易でないことが予想される。したがって、これらの文化遺産を将来に亘って保全するためには、自然災害に対する防災システムの確立が必要である。近年、日本各地で異常気象が頻発しており、とりわけ 2004 年は、日本本土に観測史上最多の 10 個もの台風が上陸した。これらの台風などに起因する局地的な集中豪雨により各地で斜面崩壊が生じ、多くの人命や社会資本が失われた。

そこで、本研究では降雨による斜面崩壊から代替性のない重要文化財および人命（観光客、周辺住民など）を守るための防災システムを確立することを目的としている。本論文では、降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの概要について述べる。また、現地計測データおよび数値シミュレーション（浸透解析・斜面安定解析）による降雨時の斜面の安定性評価手法について述べる。

2. 斜面防災システムの概要

本研究では、降雨時の表層すべり型崩壊を対象とした防災システムの構築を目的としている。降雨時の表層すべり型崩壊の主な原因は、1)雨水の浸透による土塊自重の増加、2)土中の飽和度の増加に伴うせん断強度パラメータの低下、3)地下水の上昇に伴う浸透力の増加であると定性的に言われている。

また、予知は、「場所」、「時間」、「規模」を事前を知ることの意味しているが、本システムで目指している予知はその中の時間と規模のみであり、崩壊が予想される危険斜面（場所）を予め特定し、降雨により時々刻々と変化する斜面の安定性を定量的に評価することを目指している。

これまでに北村ら¹⁾、松尾ら²⁾は、降雨時の斜面崩壊を予知して災害を未然に防ぐことに重点を置き、現地斜面モニタリングシステムと数値シミュレーションを有機的に結びつけることにより構築される防災システムを提案している。本研究では、北村らの提案するシステムをベースに降雨時の通行規制・避難および降雨後の規制解除を行うことのできる斜面崩壊予知システム（以降、防災システム）の構築を行っている。

図1に防災システムのフローを示す。本システムでは、まず、雨量、間隙水圧および地表面変位の計測を行う。次に、これらの計測結果を用いたデータ分析による斜面の安定性評価および数値シミュレーションによる安定性評価という2段階評価が実施される。斜面の危険度が高い場合、避難勧告が発令される。また、避難勧告後も現地計測が継続され、避難解除の判断を行うための安定性評価が実施される。

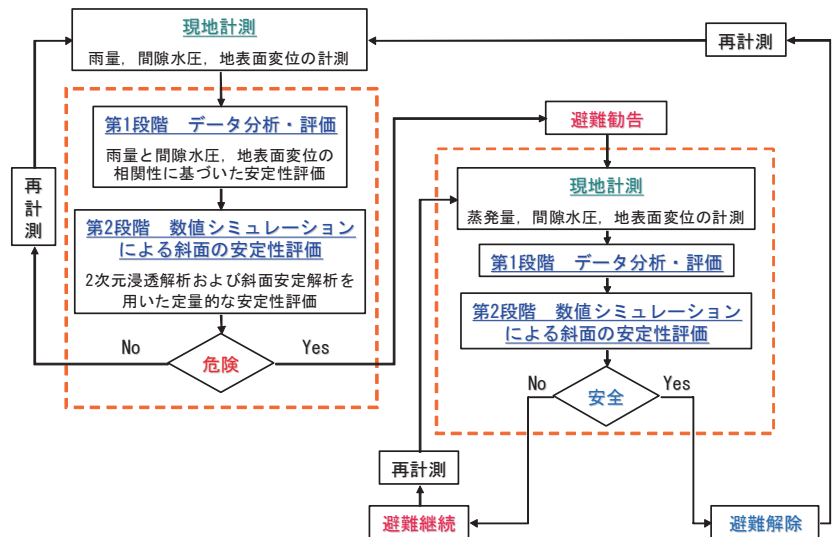


図1 斜面防災システムフロー

3. 現地斜面モニタリングシステム

本研究では、2004年度から重要文化財後背斜面において現地斜面モニタリングを行ってきている³⁾。また、2006年度から計測地点の多点化を行い、より広範囲で詳細な斜面の観測を行うためにデータ通信・収集機能を強化したシステムを作成した。

図2に多点計測システムの設置位置を示す。図2には、過去の崩壊箇所も示している。

地点Mは、2004年度に計測を開始した地点である。写真1に地点Mの計測システム設置状況を示す。テンシオメータ（20、40、60、80、100cmの深さに計5本）、温度計（10、20、30cm）、転倒ます式雨量計が設置されており、間隙水圧、地中温度、10分間雨量の計測を行っている。ここで、図3にテンシオメータの概略図を示す。テンシオメータは、セラミック製のポーラスカップを土中に埋設し、パイ



図2 多点現地計測システムの設置位置

ブやチューブを介して圧力計をつなぎ、内部を脱気水で満たしたものである^{4), 5)}。セラミック製ポーラスカップ部分で、土中の間隙水圧とテンシオメータ内の脱気水の圧力が平衡することにより、圧力センサによって土中の間隙水圧を計測することができる。また、テンシオメータ上部の水タンク部は、テンシオメータの圧力センサが防水加工されていないことと水タンク部に直射日光が当たることによる日周期の変動を抑えることから断熱キャップで覆っている（写真 1）。

図 2 のように地点 M を中心として、その周辺斜面に地点 A から地点 D の 4 地点を増設した。各増設ポイントでは、テンシオメータ（40、80、100cm の深さに計 3 本）、温度計（0、20、40cm の深さに計 3 本）が設置されている。全ての機器の電源は、計測地点近傍の機械室から得ている。

地点 M には、測定器を格納した測定 BOX があり、地点 B、C のセンサも M 地点の測定 BOX に接続されている。また、地点 A と D には、それぞれ別個に測定 BOX が設置されている。全ての地点は、有線で結ばれており、計測データは、地点 A の測定 BOX に備えられている無線 LAN のアクセスポイントから寺務所に設置してあるパソコンへ送信されている。集められたデータは、



写真 1 計測機器設置状況 (M 地点)

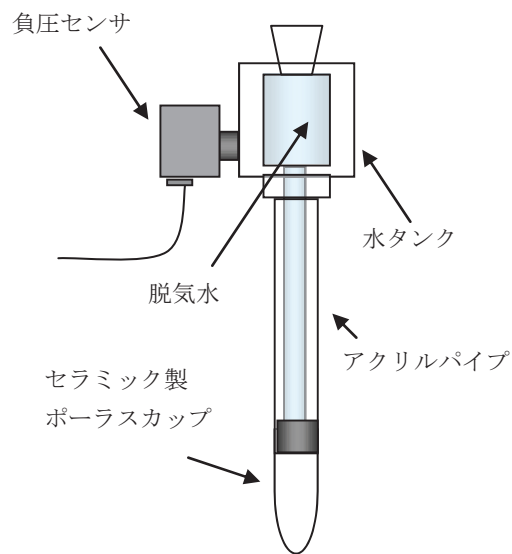


図 3 テンシオメータの概略図

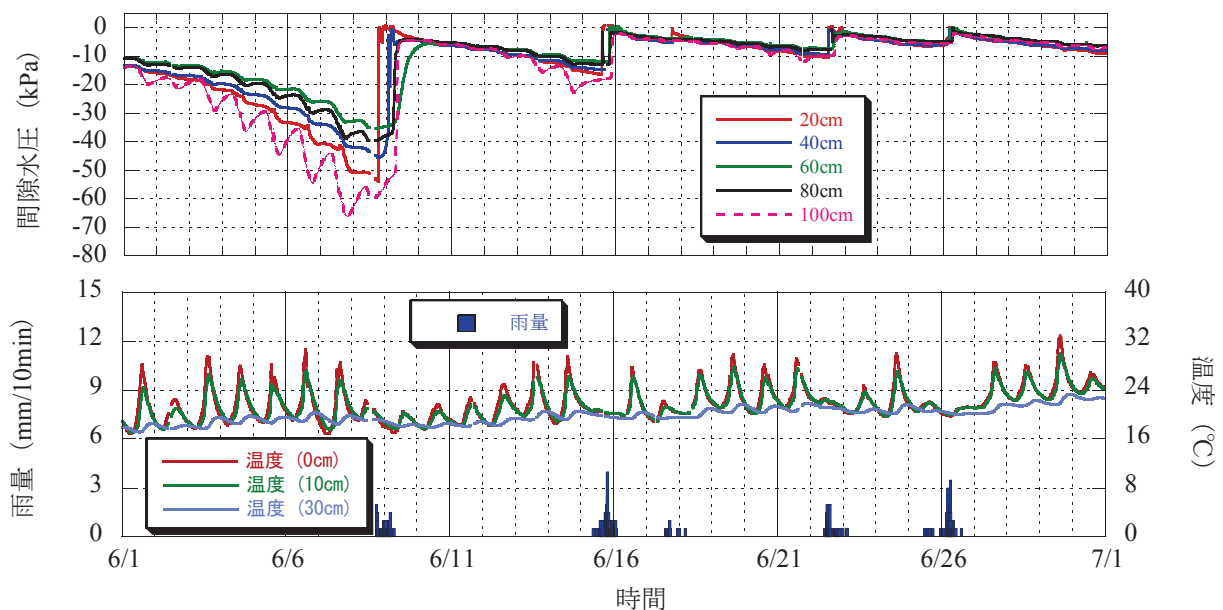


図 4 間隙水圧、10 分間雨量及び地中温度の時系列変化 (2006 年 6 月)

パソコン内で自動的に処理され、web 上に表示され、遠隔地よりデータ収集を行うことができる。

図 4 に現地斜面モニタリングシステムにより得られたデータ（間隙水圧、10 分間雨量および地中温度の時系列変化）を示す。図より、降雨に伴い間隙水圧の上昇が見られる。また、晴天時には地盤内の間隙水の蒸発などに伴い間隙水圧が低下していく様子が見られる。6 月上旬における深さ 100cm の間隙水圧の値が大きく変動しているのは、テンシオメータ内の脱気水が抜け、内部に溜まった空気が気温の日変動に伴い膨張・収縮したためであると考えられる。今後、テンシオメータのメンテナンス問題について取り組む必要がある。得られた間隙水圧および雨量データは、次節で述べられる斜面の安定度評価に用いられる。また、地中温度データは、風速、気圧や湿度などの気象データと組合せて、蒸発量を算定するために使用される。

本研究の対象斜面においては、地表面変位を計測するために、光ファイバセンサ（B-OTDR 光センサ）の設置を行い、2006 年 5 月 26 日から計測を実施した。図 2 中の B、M、C 地点に沿う測線に、1 スパン 5m の光ファイバセンサが計 5 スパン（地点 M より上部に 2 スパン、下部に 3 スパン）設置した。センサの精度は 0.1mm/m である。図 5 に光ファイバセンサの設置位置、写真 2 に M 地点上部のセンサ②地点付近の状況を示す。また、図 5 には設置日から 2006 年 12 月 31 日までの約 7 ヶ月間における累積変位が記されており、約 1～2.5mm の引張・収縮が生じている。2006 年度は降雨量が少なく、雨量、間隙水圧と変位の明確な関連性については得られなかった。今後、雨量、間隙水圧、変位の関連性について明らかにすることができれば、現地計測データに基づいた斜面崩壊予知が可能となると考えられる。

4. 斜面安定性評価手法

図 1 に示すように、本研究での防災システムでは、現地計測データを用いて、データ分析による斜面の安定性評価および数値シミュレーションによる安定性評価の 2 段階評価が実施される。そこで、それぞれの手法について以下に述べる。

(1) データ分析による斜面の安定性評価

本研究において斜面安定性評価の第一段階として現地モニタリングデータを用いた評価手法を用いる。これまでに気象庁、地方自治体、道路、鉄道などの各機関において雨量指標を用いた斜面の崩壊危険度評価手法が提案されてきており、土壌雨量指数、実効雨量、時間雨量や連続雨量などの指標を単独もしくは組合すこと（例えば、縦軸：短時間雨量指標、横軸：長時間雨量指標）により提案されている⁶⁾。

本研究では、2004 年 7 月～2006 年 11 月（降雨量が計測できなかった 2005 年 5 月、2006 年 4、5、7 月を除く）までの現地計測データおよび 2004 年 7 月以前の気象庁データ⁷⁾、過去の崩壊時のデータを用い、本対象地点で最も有効であると考えられる雨量指標の組合せについて検討した。その結果、対象斜面において図 6

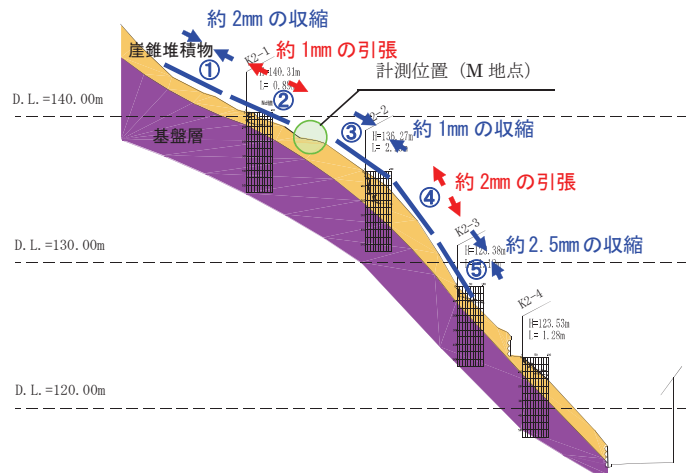


図 5 光ファイバセンサの設置位置および設置日から 2006 年 12 月 31 日までの累積変位



写真 2 光ファイバセンサ設置状況 (②地点)

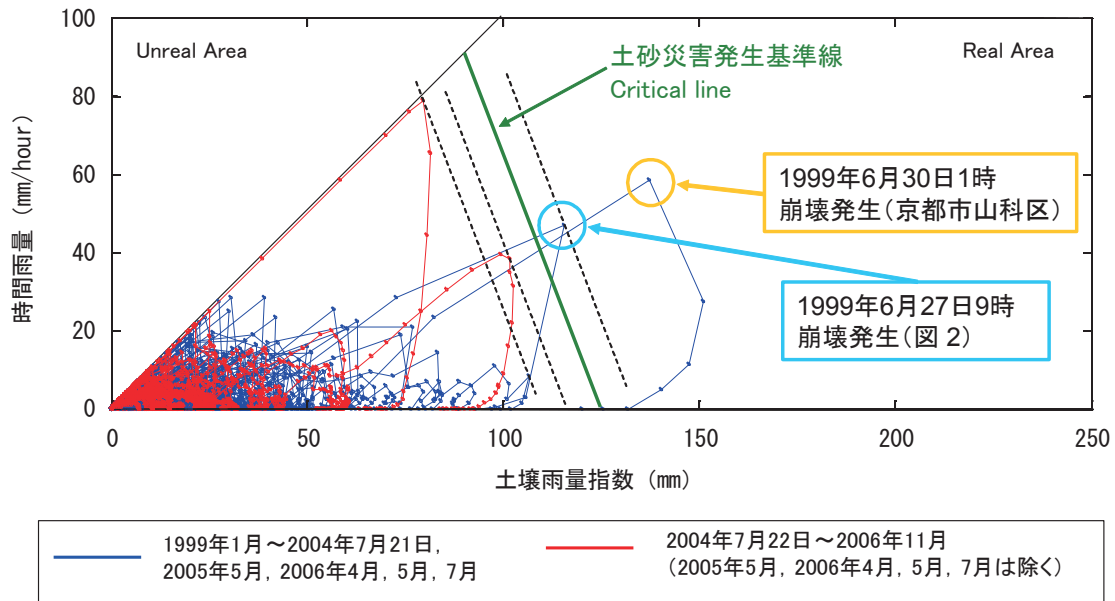


図 6 時間雨量-土壌雨量指数の関係

に示すような横軸「土壌雨量指数」、縦軸「時間雨量」とした評価が最も有効であることがわかった。倉本ら
 が実施した雨量指標の選定に関する研究においても、時間雨量と土壌雨量指数による評価手法が、「災害捕捉
 率が高く、空振り頻度が多くない」、「土壌雨量指数を用いることにより発表時間が極端に長くなることが避
 けられる」などの理由から、最も妥当であったことが報告されている⁸⁾。

本研究の対象斜面においては、過去の斜面崩壊時の雨量データが得られているため、図 6 に示すように土
 砂災害発生基準線の設定を行うことができる。また、今後得られる計測データにより、基準線の再設定を行
 うことができる。今後、図 6 に示すような雨量指標による図に、間隙水圧や地盤変位のデータを組み合わせ
 ることによって、より精度の高い安定性評価手法を提案したいと考えている。

(2) 数値シミュレーションによる安定性評価

本研究における数値シミュレーションでは、有限要素法による 2 次元
 不飽和・飽和浸透解析および非円弧すべり面に対する安定解析 (Janbu
 法)が行われ、降雨時の斜面の安定性の定量的評価を行うことができる。
 本研究室では、これまでにまさ土を用いた盛土を作成し、7 本の埋設型
 テンシオメータを設置して、盛土に一定の降雨量を与え、降雨時の浸透・
 崩壊挙動について実験的考察を行ってきている。本論文では、室内土槽
 試験での盛土形状や試験条件データを用いて数値シミュレーションによ
 る浸透挙動や盛土の安定性の評価を行う。また、計測データや崩壊挙動
 との比較により、モデルの妥当性を検討する。

表 1 室内土槽試験での条件

降雨条件	50mm/h	
	境界条件	上面
	法面	注水
	底面	非排水
	背面	非排水
盛土条件	初期含水比 (%)	5
	湿潤密度 (g/cm ³)	1.6
	斜面勾配 (°)	45

a) 解析条件

室内浸透・崩壊土槽試験のデータを基に解
 析条件を設定した。表 1 に室内土槽試験時の
 初期条件、境界条件および盛土条件を示す。
 図 7 に 2 次元不飽和・飽和浸透解析および安
 定解析を行う解析領域を示す。解析領域の節
 点数は 1476 個、要素数は 1395 個である。図
 中の丸印は、土中の負の間隙水圧を測定する
 ための埋設型テンシオメータの設置位置を示
 している。また、図には、安定解析を行う領
 域が示されており、解析では、Janbu 法を用

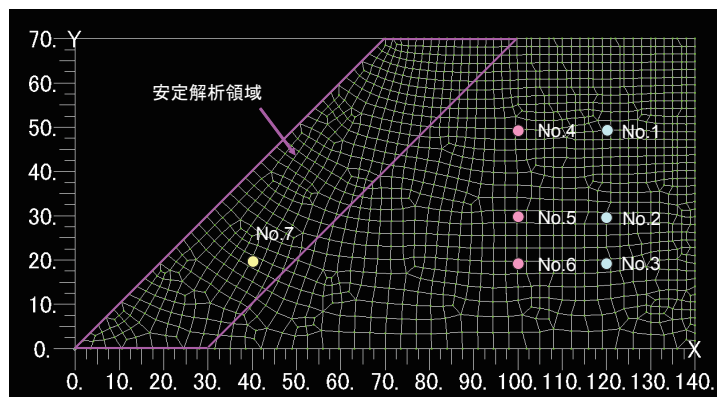


図 7 解析領域

いて領域内の最小安全率を求めている。

b) 不飽和土の浸透・せん断特性に関する数値力学モデル

2次元不飽和・飽和浸透解析を行うに当たり、不飽和土の浸透特性（水分特性曲線、飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係）を把握することが重要になる。水分特性曲線を求めるモデルとして、van Genuchten式⁹⁾や Brooks&Corey式¹⁰⁾などがよく使われる。また、不飽和透水係数を推定するためのモデルとして、Burdine¹¹⁾や Mualem¹²⁾モデルが用いられている。また、簡単な土質パラメータのみから水分特性曲線と不飽和透水係数を求めることのできるモデル（以降、間隙モデルと称す）が提案されている¹³⁾。本論文では、間隙モデルを用いた解析を行った。表2に間隙モデルで用いる入力パラメータを示している。図8に水分特性曲線および飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を示す。また、図中では、土質試験結果（保水性試験、定水位透水試験）との比較を行っている。水分特性曲線では、実験値と同程度の値を示しているが、完全には一致していない。また、透水係数については、計算値が実測値よりも数オーダー大きくなったため、実測値とのフィッティングを行った¹³⁾。

豪雨時における斜面崩壊の原因の一つとして、雨水が浸透し、サクシオンが低下して、見掛けの粘着成分が減少することが挙げられる。そこで、飽和度と見掛けの粘着成分の関係を求めるためのモデル（以降、粘着モデル）が提案されている¹⁴⁾。表2に粘着モデルで用いる入力パラメータを示す。粘着モデルでは、飽和度の変化に伴う見掛けの粘着成分の変化量が計算されるため、ある飽和度におけるせん断強度パラメータ（見掛けの粘着成分 c 、内部摩擦角 ϕ ）が土質試験から得られれば、飽和度0~100%の見掛けの粘着成分を推定することができる。図9に飽和度-見掛けの粘着成分の関係を示す。図より、飽和度が増加すると見掛けの粘着成分が減少していく様子が見られる。よって、降雨に伴い土中のサクシオンが低下（飽和度が増加）し、見掛けの粘着成分が減少する。一方で、すべり土塊の自重が浸透水により増加することにより、安全率が減少することが予想できる。粘着モデルについては、不飽和せん断試験結果との比較により、妥当性の検討が必要である。

(c) 2次元不飽和・飽和浸透解析および斜面安定解析結果

図8、図9に示された数値計算結果を用いて、2次元不飽和・飽和浸透解析および斜面安定解析を行った。ここで、境界条件は、表1に示したとおりである。また、初期値は、圧力水頭-14.7kPaで一定とした。図10に室内土槽試験で計測された負の間隙水圧（サクシオン）の結果および数値解析から得られた間隙水圧および安全率の時系列変化を示している。図より、間隙水圧の時系列変化の実験結果と計算結果を比べてみると、深さ20cm部分に当たるNo.1においては、実験結果と計算結果が一致していることがわかる。深さ40cm部分に当たるNo.2、No.5のデータにおいて、大きな相違が見られる。これは、実験中No.2上部の盛土表面に雨水が溜まっていたため、No.5より早く浸透が生じたと考えられる。また、実験結果および計算結果では、

表2 間隙モデル、粘着モデルの入力パラメータ

試料	まさ土
土粒子の密度 (g/cm^3)	2.63
水の表面張力 (N/m) (水温15°C時)	73.48×10^{-3}
水の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) (水温15°C時)	1.138×10^{-3}
間隙比	0.75
粒径加積曲線データ	15個
見掛けの粘着成分(kPa) (飽和度10.8%時)	5.63
内部摩擦角(deg.)	18.9

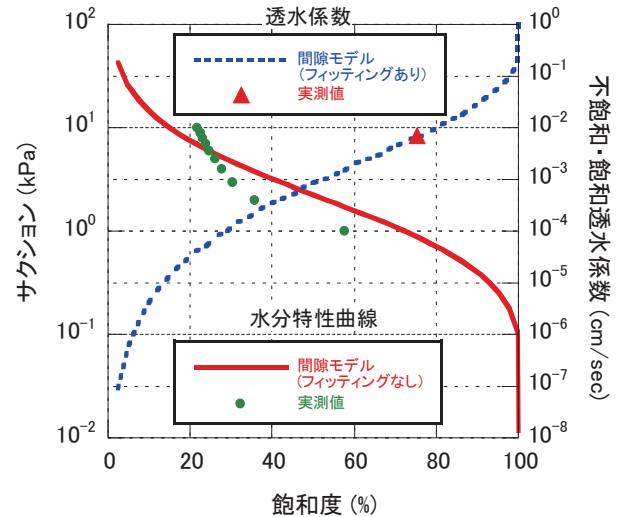


図8 水分特性曲線および透水係数（まさ土）

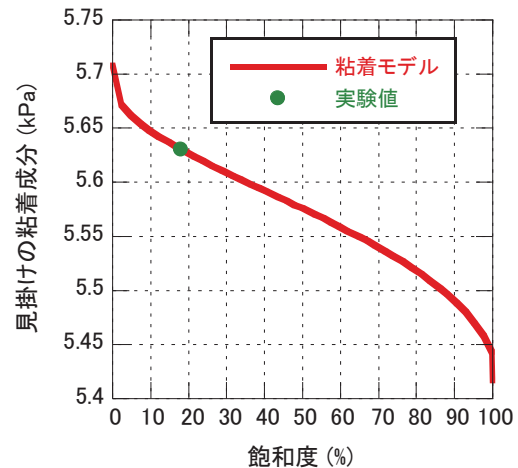


図9 飽和度-見掛けの粘着成分関係

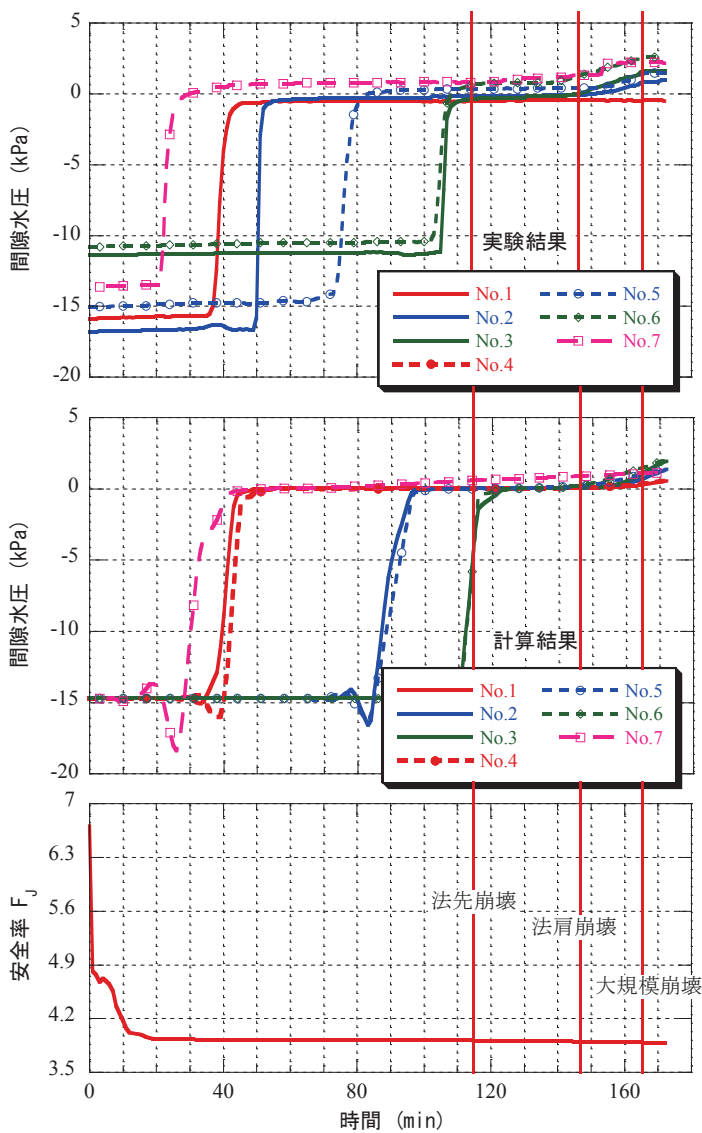


図 10 間隙水圧および安全率の時系列変化

間隙水圧上昇後、約 0kPa 付近で一定となり、しばらく経ったあと、再び上昇していく様子が見られる。

安全率の時系列変化においては、間隙水圧の上昇に伴い、安全率の低下が見られる。しかしながら、安全率の値が、1 よりも非常に大きくなっており、安定であることを示している。

室内土槽試験では、写真 3 に示すように注水後約 115 分に法先崩壊が生じた後、局所的な進行性破壊が続き、注水後約 147 分、165 分に法肩からの崩壊が発生した。盛土の崩壊が、法先からの進行性崩壊によって生じたため、安定解析における崩壊形状（法肩から一気に崩壊が生じるとした崩壊）と異なっていることが安全率の値が大きくなった原因の一つと考えられる。今後、進行性破壊を考慮できる安定解析手法の提案が必要である。さらに、盛土内の土に働く垂直応力レベルは非常に小さく、今回用いた垂直応力を 30、60、90kPa 程度で行った一面せん断試験の見掛けの粘着成分および内部摩擦角であっても、せん断強度パラメータが過大に評価されているためではないかと考えられる。今後、より低圧力下での試験を行っていく必要があると考えられる。また、粘着モデルの妥当性の検討も必要である。

また、図 10 において間隙水圧の変化と崩壊時間に着目すると、間隙水圧が雨水の浸透によって増加し、約 0kPa 付近で一定となり、しばらく時間が経過したあとに崩壊が発生している。このことから斜面の間隙水圧を計測し、間隙水圧が一定となる時間を把握することにより、早い段階での警報発令ができるのではないかと考えられる。



(a) 注水後 115 分



(b) 注水後 147 分



(c) 注水後 165 分

写真 3 盛土の崩壊状況

5. まとめ

本論文では、降雨による斜面崩壊から代替性のない重要文化財および人命を守るための防災システムの概要について述べた。また、現地計測データおよび数値シミュレーション（浸透解析・斜面安定解析）による降雨時の斜面の安定性評価手法について述べた。

現地計測データを用いた安定評価手法では、現地計測データと気象庁データから横軸「土壌雨量指数」、縦軸「時間雨量」とした評価が最も有効であること、過去の斜面崩壊時の雨量データにより土砂災害発生基準線の設定が可能であることを示した。

数値シミュレーションによる安定性評価手法では、まさ土を用いた室内土槽試験のデータを用いた間隙水圧および安全率の時系列変化の計算結果を示した。また、土槽試験結果と計算結果の比較による数値力学モデルの妥当性の検討を行い、不飽和浸透解析では比較的一致度が高かったが、安定解析では安全率が過大評価されるといった結果を得た。今後、崩壊形態および入力パラメータの問題について検討する必要がある。

また、室内土槽試験において間隙水圧が雨水の浸透によって増加し、約0 kPa 付近で一定となり、しばらく時間が経過したあとに崩壊が発生した結果が得られており、今後、この挙動に着目した土砂災害発生基準の設定が可能になるのではないかと考えられる。

以上、現地斜面モニタリングと数値シミュレーションを有機的に結びつけることにより、効率的・効果的な防災システムの確立が可能となり、減災・防災に役立つことができると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、鹿児島大学の北村良介教授に貴重なアドバイスを頂きました。深川研究室卒業・修了の学生諸君には土質試験、現地調査のサポートを頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) R. Kitamura, K. Sako and K. Matsuo: A research strategy for prediction of slope failures due to heavy rain, Proc. of 12th Asian Regional Conference, pp.1535-1538, 2003.
- 2) 松尾和昌・酒匂一成・北村良介：斜面崩壊予知戦略-南九州シラス地帯を例として-, 自然災害科学（日本自然災害学会誌），第21巻1号，pp.25-33, 2002.
- 3) 酒匂一成・深川良一・岩崎賢一・里見知昭・安川郁夫：降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング，地盤工学ジャーナル，Vol.1, No.3, pp.57-69, 2006.
- 4) 地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会編：不飽和地盤の挙動と評価，p.14-17, 2004.
- 5) 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.
- 6) 社団法人地盤工学会「降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究委員会」編：降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関するシンポジウム発表論文集，pp.13-19, 2006.
- 7) 気象庁：<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>.
- 8) 倉本・野呂・小山内・小林・岡田：土砂災害警報情報の作成・発表基準に用いる雨量指標の検討，平成17年度砂防学会研究発表会概要集，pp.186-187, 2005.
- 9) van Genuchten, M. Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. Soil Science of America Journal. Vol. 44. No.5. pp.892-898, 1980.
- 10) Brooks, R. H. and Corey, A. T. : Hydraulic Properties of Porous Media, Hydrol. Pap. No.3, Colorado State Univ., Fort Collins, 1964.
- 11) Burdine, N. T. ; Relative Permeability Calculations from Pore-size Distribution Data, Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., Vol.198, pp.71-77, 1953.
- 12) Mualem, Y. : A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resour. Res., Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 13) K. Sako and R. Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soil and Foundations, Vol.46, No.5, p.595-604, 2006.
- 14) K. Sako, R. Kitamura, M. Yamada: A consideration on effective cohesion of unsaturated sandy soil, Proc. of The Fourth International conference on Micromechanics of Granular Media, Powders and Grains 2001, pp.39-42, 2001.