

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760331

研究課題名（和文） 降雨時および降雨後の斜面安定度評価システムに関する研究

研究課題名（英文） A Research on Slope Stability Evaluation System due to rainfall

研究代表者

酒匂 一成（SAKO KAZUNARI）

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・准教授

研究者番号：20388143

研究成果の概要：豪雨時の斜面崩壊による災害を軽減するためには、降雨時の斜面の安定性を経時的かつ定量的に評価することが必要である。また、道路管理者へのヒアリングから、“規制解除を行う際の判断が非常に難しい”という意見を得た。本研究では、降雨時および降雨後の斜面の安定性の定量的な評価手法について検討を行った。特に、蒸発量の計測方法、現地計測データの分析手法および数値シミュレーションの精度向上のための土槽試験に関して検討を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	0	2,200,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,200,000	300,000	3,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：自然災害，自然現象観測・予測，地盤工学，土砂災害，防災

1. 研究開始当初の背景

日本各地において、梅雨期、台風襲来期に局地的な集中豪雨が発生しており、斜面崩壊が多発し、崩壊土砂が土石流となって流下して災害が起きており、多数の人命や社会基盤が失われている。

豪雨時の斜面崩壊による災害を軽減するためには、降雨時の斜面の安定性を経時的かつ定量的に評価する必要がある。また、道路管理者に対してヒアリング調査を行ったところ、“規制解除を行う際の判断が非常に難しい”という意見を得た。そこで、本研究で

は、降雨時および降雨後の斜面の安定性の定量的な評価手法について検討を行う。本研究により、避難や通行・運行の規制や解除を効果的に行うことができ、住民の精神的、経済的負担を軽減できると考えられる。

2. 研究の目的

降雨時および降雨後の斜面安定度評価を行うために図-1に示すような評価フローを考えている。そこで、本研究では、評価システムの確立を目指し、以下の点に関して、主に研究を実施した。

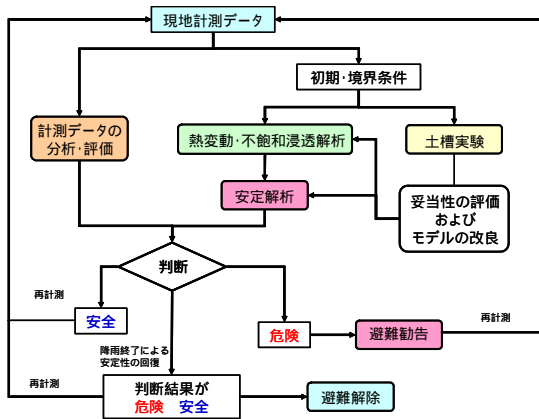


図-1 斜面安定評価システムのフロー

- (1) 気象計測装置（気温、相対湿度、露点温度、降雨量、気圧、日射量、風向、風速計で構成）を導入し、雨量および蒸発量の計測を可能にする。
- (2) 得られた計測データを分析することにより、間隙水圧などの各種データと雨量の関係について、分析・評価を行う。
- (3) 室内土槽試験を実施し、斜面崩壊メカニズムの解明および数値シミュレーションの妥当性を検討する。

これらの研究を有機的に組み合わせることにより、降雨時および降雨後の斜面安定度を定量的に評価することが可能となると考えられる。

3. 研究の方法

以下に、上述した目的に対する研究方法を示す。

- (1) バルク法による蒸発量推定方法を用いる。気象計測装置を用いた計測データから蒸発量を求めることができるか、土槽試験および数値モデルとの比較を行うことにより検討した。
- (2) 現地モニタリング結果の降雨量と負の間隙水圧データについての関連性について、主成分分析を実施した。また、降雨量、間隙水圧と斜面の安全度について検討を行った。
- (3) 現地計測モニタリングデータおよび室内土槽試験結果を用いて、不飽和浸透および安定性に関する数値シミュレーションを実施した。

4. 研究成果

(1) 蒸発量測定方法に関する検討
蒸発量の推定には、渦相関法やバルク法、熱収支法などがある。本研究では、気象観測

表-1 計測項目

気象データ	
大気圧	p [hPa]
気温	T []
地表面温度	T_s []
相対湿度	H_u []

結果（気温、風速、湿度、など）から求める

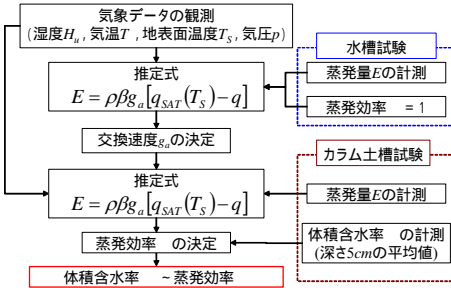


図-2 蒸発効率 -体積含水率 の関係

バルク法¹⁾による式(1)を使用する。また、表-1は式(1)に必要な観測項目である。

$$E = \rho \beta g_a (q_s - q) \quad (1)$$

ここに、 E : 蒸発量 [kg/m²s], ρ : 空気密度 [kg/m³], g_a : 交換速度 [m/s], $q_s = q_{SAT}(T_s)$: 地表面温度 T_s に対する飽和比湿 [kg/kg], q : ある高度での温度 T に対する大気の比湿 [kg/kg], β : 蒸発効率 [-]。ただし、蒸発効率 β は、気象観測データのみで求めることは容易ではない。そこで、交換速度 g_a を円筒土槽試験と並行して実施した水槽試験の結果から求め、土槽試験の結果から蒸発効率を算出することで、表層の体積含水率と蒸発効率の関係を求める (図-2)。

土槽試験の概要

カラム土槽試験の概要（計測機器の埋設位置）を図-3に示す。今回は、地表面からのみの熱伝導とするために、正方形カラムの側面に断熱材を巻き、底面には発泡スチロールを敷いた。屋内土槽試験について図-4に示す通りである。また、屋内試験では気温、熱の変化が僅かであるため、熱源の代用としてハロゲンヒーターを用いて試験を実施した。電子はかりは、風の影響で計測誤差を極力なくするため、電子天秤の周りにダンボールで囲んでいる。また、本研究で行った試験条件は表-2の通りである。

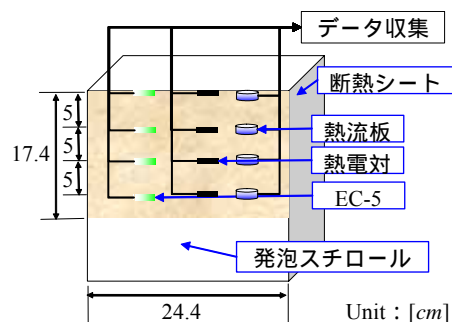


図-3 土槽概要図

表-2 試験条件

試験	条件	含水比	目的
試験1	屋内	5%	風の影響をなくするため、屋内で試験を行った。また、蒸発量と含水比の関係を調べる。
試験2	屋内	10%	風の影響をなくするため、屋内で試験を行った。また、蒸発量と含水比の関係を調べる。
試験3	屋外	10%	屋外において、風や日射量の影響で蒸発量が変化するかを調べる。

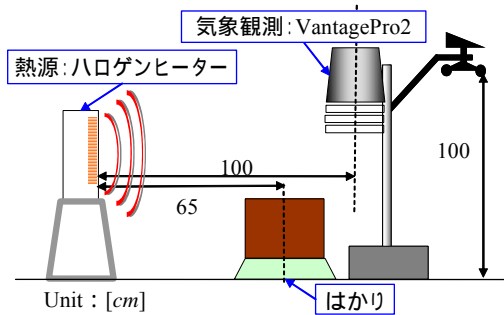


図-4 試験概要図

また、試験に用いた試料は、信楽産まさ土であり、供試体の条件を表-3に示す。

表-3 供試体条件

含水比	9.5 [%]
乾燥密度	1.520 [kg/m^3]
間隙比	0.72
湿潤密度	1.672 [kg/m^3]
飽和度	36.2 [%]

試験結果

図-5に、気温、湿度、気圧の気象観測の結果を、図-6に、土壌水分センサー、熱電対、蒸発量の計測結果を、図-7に体積含水率～蒸発効率を、図-8に推定値と計測値の結果を示す。

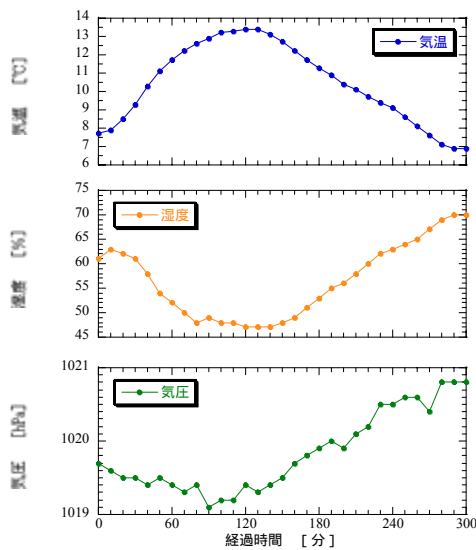


図-5 気温、湿度、気圧

考察

試験結果から、蒸発量の推定値と計測値との比較では、ばらつきがあるものの気象観測結果とある程度関連していることが確認できた。しかし、より正確な蒸発量の推定を行うためには、気象観測だけでなく、地盤内の水分変動や地中温度の変化を考慮して検証する必要があると考えられる。体積含水率と蒸発効率の関係では、近藤氏の既往の研究²⁾(砂の場合)で実施した傾向に比較的似ている。これは、含水率の変化が蒸発効率にも関係していると考えられる。試験データを蓄積

しさらに検討を進める必要がある。また、土

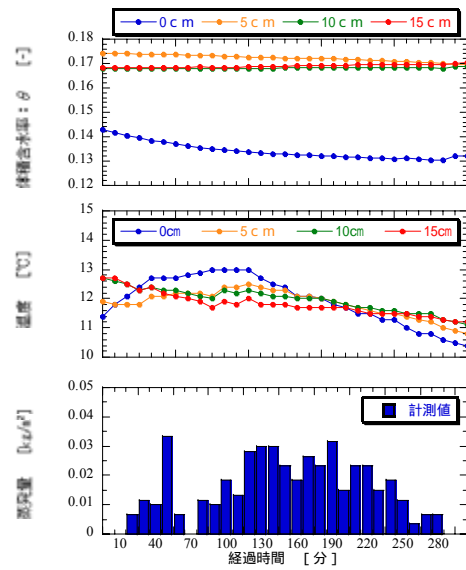


図-6 体積含水率、地中温度、蒸発量

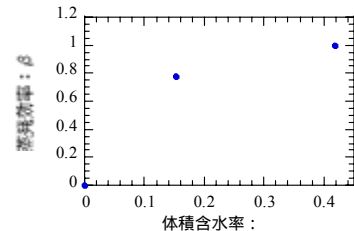


図-7 体積含水率～蒸発効率

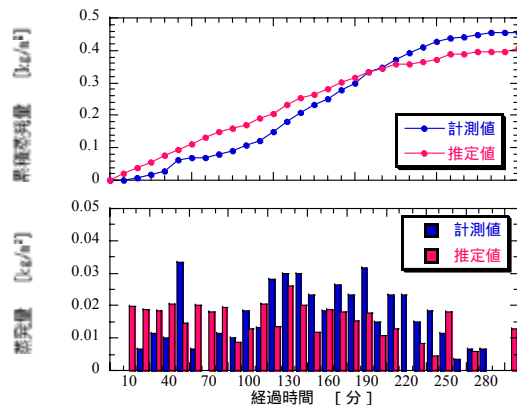


図-8 累積蒸発量、蒸発量の比較

の種類によって傾向が異なるため、様々な土や試験条件で蒸発試験を行い、土質試験結果(粒度、間隙比、土の水分保持特性、など)と関連して検討することが望まれる。その結果、蒸発量の推定精度が向上し、地盤内の水分変動をより具体的に把握することができるため、降雨による斜面崩壊に対する避難解除の基準設定において有効な指標になると思われる。

(2) 主成分分析を用いた斜面の安定度評価手法

2004年7月から京都市の重要文化財後背斜面（以下、対象斜面）にテンシオメータと転倒ます型雨量計を設置し、間隙水圧と10分間雨量の計測を実施してきた。本研究では、それらの結果に基づき統計的評価手法を採用して降雨時の斜面崩壊危険度をリアルタイムに評価することを目的とし、多変量解析手法の一つである主成分分析（Principal Component Analysis：PCA）³⁾を適用した評価方法（以下、提案手法）を提案した。そこで、2007年台風4号時（2007年7月13日～15日）の計測結果を危険度評価の対象として、提案手法に基づいて算出した主成分得点を評価指標に採用することの有効性、避難勧告や解除のタイミングの設定基準について検討した。

主成分分析による斜面崩壊危険度評価

図-9の降雨に対する斜面崩壊の危険度評価フローについて説明する。はじめに、過去のデータを使って主成分分析を行い、固有値や固有ベクトル（以下、主成分の係数）などを算出して採用する主成分の数を決める。ここで、有効な雨量指標の組み合わせを検討する。次に、主成分の係数と現在の計測データを用いて主成分得点をリアルタイムに求め、得られた主成分得点が基準値を上回った場合は避難勧告（準備・指示）を発令する（図-9の危険度評価(1)）。避難勧告の発令後も主成分得点を求め、基準値を下回った場合は解除（準備・指示）を実施し、下回らない場合は避難を継続する（図-9の危険度評価(2)）。最後に、主成分分析用として崩壊・非崩壊の計測データを蓄積する。

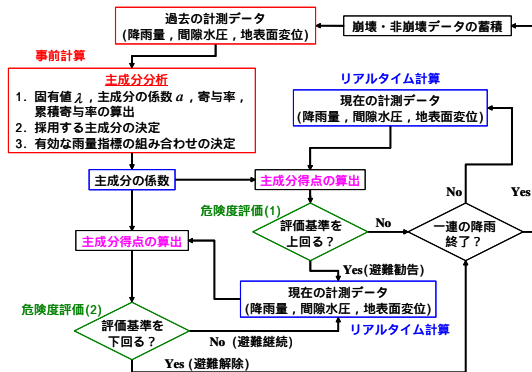


図-9 主成分分析による降雨に対する斜面崩壊の危険度評価

2007年台風4号時の危険度評価

まず、計測結果を示す。図-10に2007年台風4号時（7月13日～15日）の計測結果（間隙水圧、累積ひずみ、ひずみ速度、降雨量（時間雨量・連続雨量））を示す。降雨開始時の間隙水圧が比較的大きいのは、7月9日から12日にかけて記録した累積雨量69mmが影響したためである。また、時間雨

量の強度によって間隙水圧の変化が明確に表れた結果より、降雨量のみではなく地盤内の水分変動を直接把握することは有効であると解釈できる。一方、図-10の地表面変位（累積ひずみ・ひずみ速度）については、2007年5月26日15時を基準（0mm）としており、累積ひずみは地表面変位をセンサー長（5m）で除して百分率で表した値で、ひずみ速度は1時間ごとの累積ひずみ量に換算した値であり、双方のパラメータも正値は引張、負値は圧縮を意味する。図-10より、累積ひずみやひずみ速度はほとんど変化せず、特にひずみ速度は±0.01%/hrの範囲内である。なお、光ファイバセンサの精度は0.1mm/m（0.01%）である。以上より、今回のような雨量強度（最大時間雨量：10.2mm/hr）では、斜面はほとんど変位しないことが分かった。

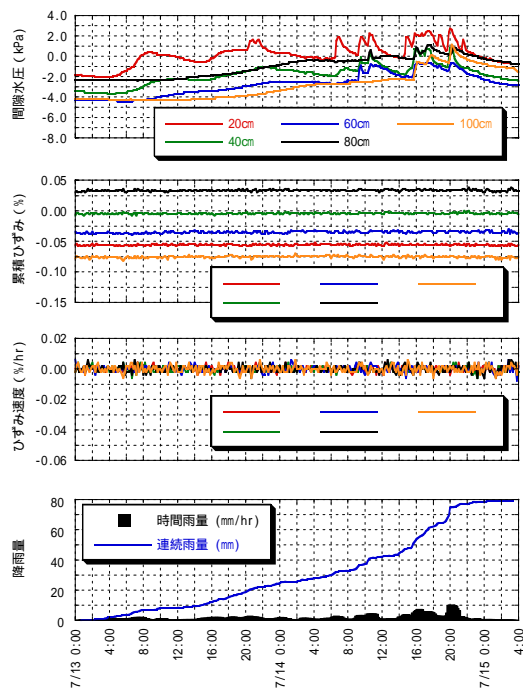


図-10 2007年台風4号時の計測結果

次に、分析結果を示す。ここでは、2007年台風4号時の斜面の危険度をリアルタイムに評価することが目的であるため、今回の分析には、計測を始めてから（間隙水圧と10分間雨量は2004年7月から、地表面変位は2006年5月から）2007年台風4号直前までに連続雨量5mm以上を記録したデータを使う。なお、連続雨量は、雨が降り始めてから無降雨状態が3時間続いた時間までの累積雨量とする。当時の計測結果と主成分の係数を使って算出した主成分得点をもとに対象斜面の危険度をリアルタイムに評価する。なお、雨量指標の組み合わせとして、本研究での分析結果より、雨量指標は「Case2：1.5h半減期実効雨量・72h半減期実効雨量」を採用した。

図-11 に主成分得点（間隙水圧のみの第 1

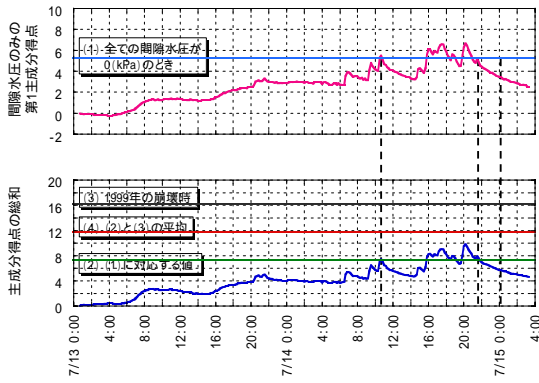


図-11 2007 年台風 4 号時の主成分得点の時系列変化

主成分、間隙水圧と雨量指標による総和)を示す。今回採用する主成分の数については、対象斜面のような自然斜面における地盤内の水分変動は、地質や地形などに影響するため、固有値が 1 以上の主成分のみでは雨量強度と地盤内の水分変動の関係を有効に把握し評価することは容易ではないと推測される。そこで、採用する主成分にはある一定の情報量を持つことが望ましいと判断し、累積寄与率が 80% 付近となった第 3 主成分までを用いた(表-4)。また、間隙水圧のみの第 1 主成分得点に注目したのは、表-5 に示すように第 1 主成分の固有値は最大であり、第 1 主成分で元の変量をより多く説明することができるからであり、避難勧告や解除等を発令するタイミング設定のときに使用する。

今回の計算結果をもとに、避難勧告や解除等を 4 段階(避難準備(警戒基準)、避難指示、解除準備(警戒解除)、解除指示:図-11 の ~ に対応)に分けて、発令するタイミングの設定基準について検討する。このとき、4 つの基準値(1): 全ての間隙水圧を 0kPa と仮定したときの間隙水圧のみの第 1 主成分得点, (2): (1) に対応する主成分得点の総和, (3): 計測地点付近で過去に崩壊したときの主成分得点の総和(雨量データ(気象庁 京都地方気象台(京都), 1999 年 6 月 27 日 9 時, 時間雨量: 47mm/hr, 連続雨量: 123.5mm), 間隙水圧を 0kPa と仮定), (4): (2) と (3) の平均値)を使う。なお、崩壊時の間隙水圧を 0kPa と仮定したのは、降雨による間隙水圧の増加、特に正圧(0kPa)が続くと、一般に斜面は不安定になりやすいからである。

避難勧告のタイミングとして、「避難準備」は、全ての間隙水圧を 0kPa と仮定したときの間隙水圧の第 1 主成分得点よりも上回った時点とし、斜面の安定化が著しく低下した時間帯と解釈する。「避難指示」は、避難準備と崩壊発生の間として位置付けるため、「避難準備」発令時と崩壊時の主成

分得点の総和の平均値よりも大きくなった時点とする。一方、避難解除のタイミングとして、「解除準備」は、全ての間隙水圧を 0kPa と仮定したときの間隙水圧の第 1 主成分得点(避難準備と同値)よりも下回り、間隙水圧の計測値が 0kPa よりも小さくなった時間帯とする。「解除指示」は、「避難準備」発令時の主成分得点の総和より小さくなった時点で発令する。一般に避難解除のタイミングは、避難指示よりも難しいといわれており、今回の設定によって解除の目安になると考えられる。

今後は、主成分得点と過去の崩壊時のデータとを結びつけることにより、よりわかりやすい危険度指標の提案を行う必要がある。

(3) 不飽和浸透および安定性に関する数値シミュレーション

ここでは、土槽試験結果との比較により、数値シミュレーションの改良点などについて検討した。数値シミュレーションでは、有限要素法による 2 次元不飽和浸透解析および非円弧すべり面に対する安定解析(Janbu 法)を行い、降雨に伴う斜面の不安定化の定量的評価を行っている。結果として、透水係数や見かけの粘着成分などを設定するモデル^{4)・5)}の改良の必要性、境界条件の設定方法の検討、入力パラメータの決定手法、間隙水圧計測時の空気圧測定の必要性がわかった。

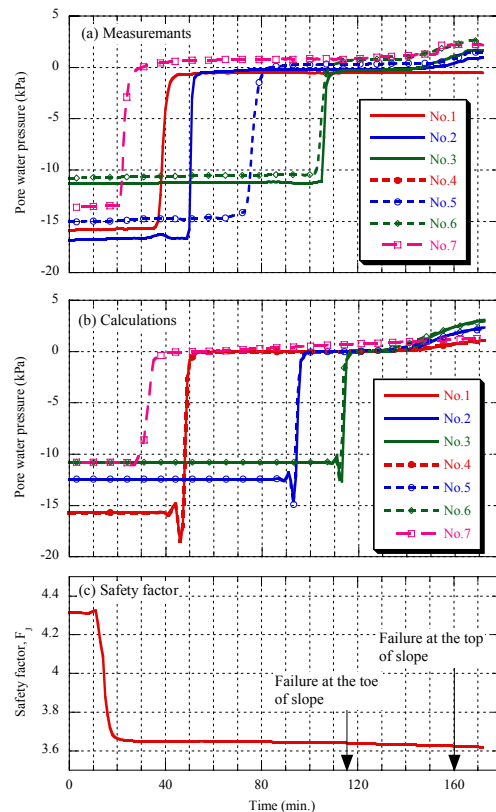


図-12 間隙水圧および安全率の時系列変化

参考文献

- 1) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，p.108，1994.
- 2) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，p.198，1994.
- 3) 田中豊，脇本和昌：多変量統計解析法，現代数学社，pp.53-84，1983．
- 4) 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.
- 5) 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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

K.Sako, R.Kitamura, T.Satomi and R.Fukagawa: A research on the quantitative evaluation of slope stability during rainfall, Proc. of Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, pp.533-538, 2009. (査読有)

里見知昭，酒匂一成，安川郁夫，深川良一：地中温度の計測結果を用いた不飽和地盤の水分変動評価手法の提案，土木学会論文集 C，Vol.65，No.2，pp.334-348，2009. (査読有)

里見知昭，酒匂一成，安川郁夫，深川良一：降雨時の表層すべり型崩壊に対する斜面モニタリングに関する研究，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2008，pp.27-32, 2008. (査読有)

酒匂一成，里見知昭，深川良一，仲矢順子，石田優子：光ファイバセンサによる重要文化財後背斜面の地表面変位計測，歴史都市防災論文集，Vol.2，pp.105-110，2008. (査読有)

Ha H Bui, K. Sako, T. Satomi and R. Fukagawa: Numerical simulation of slope failure for mitigation of rainfall induced slope disaster of an important cultural heritage，歴史都市防災論文集，Vol.2，pp.111-118，2008. (査読有)

里見知昭，酒匂一成，安川郁夫，深川良一：主成分分析を用いた降雨時斜面のリアルタイム危険度評価-京都市東山区重要文化財後背斜面を対象として-，歴史都市防災論文集，Vol.2，pp.119-126，2008. (査読有)

酒匂一成，里見知昭，深川良一，北村良

介：降雨によるまさ土斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験，第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.21-26，2008. (査読有)

里見知昭，酒匂一成，安川郁夫，深川良一：地盤内の水分変動を考慮した主成分分析による降雨時斜面の危険度評価，第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.91-96，2008. (査読有)

里見知昭，酒匂一成，中川太郎，安川郁夫，深川良一：表層すべり型崩壊に対する長期モニタリング結果に関する一考察，斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム，pp.149-154，2007. (査読有)

K. Sako, R. Kitamura, R. Fukagawa and I. Yasukawa: Monitoring and warning system for slope failure due to heavy rainfall, Proc. of The 3rd International conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII-3, Paper No.189, pp.146, 2007(CD). (査読有)

〔学会発表〕(計5件)

酒匂一成，菅野智之，深川良一，安川郁夫，北村良介：まさ土斜面を用いた室内降雨浸透試験結果に対する2次元不飽和浸透解析，第63回年次学術講演会講演概要集，pp.707-708，2008.

里見知昭，須田剛文，酒匂一成，安川郁夫，深川良一：室内土槽試験を対象とした主成分分析による降雨時斜面の危険度評価，第63回年次学術講演会講演概要集，pp.189-190，2008.

酒匂一成，菅野智之，里見知昭，深川良一，安川郁夫：京都市東山山麓における2次元不飽和浸透解析，第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集，pp.1089-1090，2008.

須田剛文，酒匂一成，里見知昭，深川良一：降雨による表層すべり型崩壊を対象としたモデル斜面崩壊実験，第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集，pp.1959-1960，2008.

里見知昭，酒匂一成，安川郁夫，深川良一：主成分分析を用いた降雨時斜面の危険度評価手法の提案，第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集，pp.1997-1998，2008.

6. 研究組織

(1)研究代表者

酒匂 一成 (SAKO KAZUNARI)
立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・准教授

研究者番号：20388143