

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686056

研究課題名(和文) 地盤調査・斜面計測・数値解析からなる降雨時・降雨後の斜面安定度評価システムの確立

研究課題名(英文) Estimation system about slope stability for rainfall-induced slope failure which consists of ground survey, slope monitoring techniques and numerical simulations

研究代表者

酒匂 一成 (Sako, Kazunari)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：20388143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、降雨時の斜面安定性評価に加え、定量的な避難解除基準の設定を目指した降雨後の斜面安定度評価システムについて研究を行った。本システムは、地盤調査、斜面計測、数値解析で主に構成されている。そのシステムの精度向上を目的に、室内土槽試験や現地計測結果を用いた降雨量と斜面崩壊の関係に関する考察、斜面観測技術の検証、斜面安定解析手法の改良、数値解析に必要な地盤情報のデータ蓄積および活用方法の検討について取り組み、斜面崩壊に至る降雨の傾向の把握、地表面の蒸発量観測に関するパラメータの取得方法、地盤内の間隙水圧や間隙空気圧の計測手法、より合理的な斜面安定性評価方法の提案などの成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：A lot of slope failures were occurred during rainy season in Japan. In order to determine reasonable evacuation criteria for rainfall-induced slope failure, an quantitative estimation system about slope stability for rainfall-induced slope failures was proposed in this project. The system consists of ground survey, slope monitoring techniques and numerical simulations. Firstly, the relationships among precipitation, pore-water pressure in unsaturated ground and slope failure were discussed using results obtained from laboratory experiments and field measurements. the measurement techniques on evaporation from ground surface and pore-water and pore-air pressure in unsaturated ground were then proposed. A slope stability analysis method by considering unsaturated seepage force in unsaturated slope was also proposed.

研究分野：地盤工学

キーワード：自然現象観測・予測 土砂災害 地盤工学 地盤調査 斜面災害 不飽和土質力学 降雨 斜面安定

1. 研究開始当初の背景

降雨時の表層すべり型崩壊の主な要因として、雨水浸透に伴う土塊自重の増加、土のせん断強度の低下および地下水上昇に伴う浸透力の増加により、斜面の変形や崩壊が生じるものと考えられる(図1)。そこで、降雨時の表層すべり型崩壊の発生メカニズムを考えるには、不飽和土質力学を援用する必要があり、雨量、不飽和浸透挙動、変位や崩壊挙動を関連づけて考える必要がある。従来の降雨に伴う斜面崩壊予測に関連する研究では、その多くは、降雨時の斜面の不安定化に関する研究が行われてきている。申請者らの防災担当者などへのヒアリングでは、斜面の不安定化も重要であるが、避難の解除をどのタイミングで行うかに関する情報も必要であるとの意見が得られた。よって、避難解除のためには、降雨後の斜面安定度評価も重要となる。そこで、申請者は、降雨時・降雨後の表層すべり型斜面崩壊を対象とした崩壊メカニズムの解明、防災システムの構築、現地斜面計測技術や斜面安定性評価手法について研究を行った。

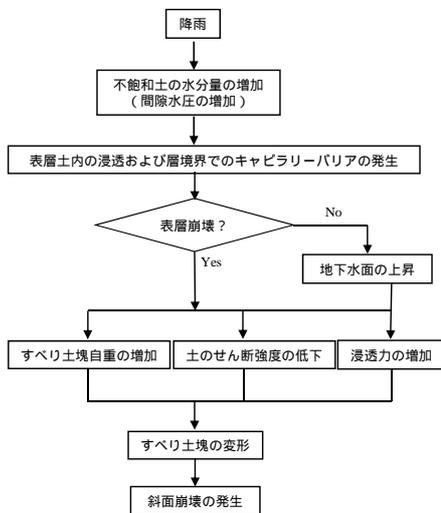


図1 降雨時の斜面崩壊の発生メカニズム

2. 研究の目的

本研究課題における降雨時・降雨後の表層すべり型崩壊を対象とした防災システム(斜面崩壊危険度評価システム)の流れおよび研究戦略を図2に示す。

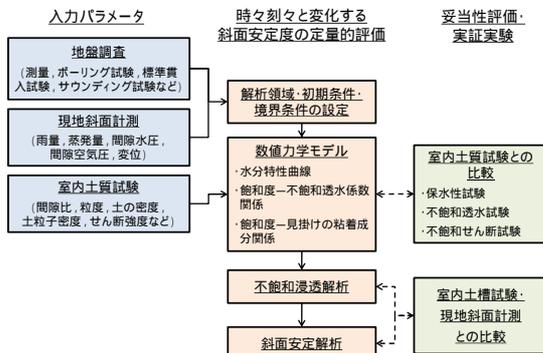


図2 斜面崩壊危険度評価システムの流れと

研究戦略

本システムは、不飽和浸透を考慮した斜面安定度評価を行うものであり、本研究課題では、その実用化を目指したシステムの精度向上を目的としている。主に取り組んだ内容は以下の通りである。

- (1) システムの実用化に向けた取り組み
- (2) 斜面の地盤情報データに関する検討
- (3) 斜面安定性評価手法に関する検討

3. 研究の方法

研究目的に示す各項目において、実施した研究方法を以下に示す。

- (1) システムの実用化に向けた取り組み
 - 室内土槽試験や現地計測結果の考察
 - 室内土槽試験結果による降雨量、不飽和浸透挙動、斜面の変位・破壊の関係や現地計測結果に基づく、降雨量、不飽和浸透挙動と過去の崩壊との関係についての考察を行い、崩壊メカニズムや避難警報のタイミングについて検討。

斜面観測技術に関する研究

地盤の不飽和浸透挙動を観測手法に関する取り組みを行った。まず、降雨後の斜面の浸透挙動を検討するために、地表面からの蒸発量を把握することが重要と考えられることから、簡単な気象観測結果から蒸発量を把握するための手法について検討を行った。また、テンシオメータによる計測における、土中の間隙空気圧の間隙空気圧の影響を考慮した手法について検討した。また、土壌水分計の現地設置の容易化およびキャリブレーションに関する検討を行った。

- (2) 斜面の地盤情報データに関する検討

ボーリングデータなどの地盤調査結果や室内土質試験結果は、数値解析などの解析領域、材料パラメータの決定において、非常に重要である。そこで、本研究課題では、特に以下の部分について取り組んだ。

地盤情報の収集に関する検討

山間部のボーリングデータの保存状況について調べ、解析領域等を決定するに十分なデータがあるかなどについて調査した。また、鹿児島県や鹿児島市にあるボーリング調査結果の電子データおよび紙データを収集するとともに、地盤データの表示・利用方法について、地質技術者と検討した。

室内土質試験データの収集に関する検討

不飽和浸透解析および降雨による斜面安定解析を行うためには、不飽和土の水分特性曲線、不飽和透水係数、見かけの粘着成分の水分依存性に関する土質試験データが必要となる。一方、申請者らは、間隙比や粒度から水分特性曲線、不飽和透水係数、見かけの粘着成分を求める数値力学モデルを提案してきている。これらの妥当性評価のため、土の保水性試験および不飽和一面せん断試験について、その計測データの確認を行った。

- (3) 斜面安定性評価手法に関する検討

斜面安定解析手法として、非円弧すべり法

(Janbu 法)を用いているが、従来の手法では不飽和浸透による浸透力の影響が考慮されていなかった。そこで、本研究では、不飽和土中の浸透力を斜面安定解析手法に組み込むことに取り組んだ。また、粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いた擁壁がある場合などの斜面の変形挙動に関する数値解析に取り組んだ。

4. 研究成果

本研究課題で得られた主な研究成果および今後の展望について以下に示す。

(1) システムの実用化に向けた取り組み

室内土槽試験や現地計測結果の考察

申請者らは、まさ土を用いた室内模型斜面を用いて、降雨により斜面が不安定化する過程を負の間隙水圧、変形量、地下水位などの計測結果から検討した。また、清水寺境内斜面の現地斜面モニタリング結果を用いて、室内土槽試験で観察された過程の現地適用性について検討した。まず、申請者らが実施した室内土槽試験において、モデル斜面として高さ 5.0m×幅 4.0m、傾斜角 40 度であり、斜面底面は非排水、法先底面は排水条件とし、時間雨量 50mm の条件で実験を行ったケースや幅 1.5m×高さ 70cm、傾斜角 45 度で複数の雨量条件で行ったケースの間隙水圧、地表面変位、地下水位の時系列データおよび崩壊の観察記録を用いて、降雨時の斜面崩壊の発生過程について考察した。その考察結果として、以下のような知見が得られた。

テンシオメータの計測値(間隙水圧)と斜面変状の関係について、図 3 に示すような 4 つの状態になる傾向が見られた。降雨開始時からの状態 I は、計測地点までの降雨が浸透しておらず、不飽和状態であることから、負の間隙水圧を示す。降雨浸透が進むにつれ、計測地点まで雨水が到達すると、周辺の飽和度が上昇し、間隙水圧が増加する(状態 II)。その後、地盤内は間隙空気が間隙内にわずかに取り込まれた状態となり、テンシオメータの値は、ほぼ一定値を示す(状態 III)。この値は、土の種類に寄るが、まさ土では約-1kPa 程度、しらすでは約-3kPa 程度の値を示していた。つまり、状態 III では、浸透水により地盤内が飽和状態に近づくが、間隙に存在する気体が地盤外に抜けず封入された状態で、ほとんど飽和状態であるが負の間隙水圧が働いている状態であることから、状態 III を疑似飽和状態と称す。さらに、降雨浸透が続き、地下水位が上昇し、テンシオメータの設置位置に到達すると、周辺地盤が飽和状態に近づくため、テンシオメータの計測値は再上昇する(状態 IV)。疑似飽和状態(状態 III)では、初期状態に比べ飽和度が高く、土塊自重が大きくなり、土のせん断強度が低下するため、沈下や亀裂などの斜面変状が発生しやすい状態であることが考えられる。特に、すべり面付近のテンシオメータが状態 IV に達すると、斜面全体として大変形が生じる可能性が

高まる。今回の考察に用いたデータでは、すべり面付近にあるテンシオメータが地下水位上昇状態(状態 IV)に達した後に、崩壊が生じている。これは、地下水による浸透力も加わったためと考えられる。

以上のことから、状態 III が降雨により維持されると、崩壊に至る可能性が高まる。また、今回の試験ではすべり面付近の地下水位が形成されることで斜面崩壊が発生している。そのため、地下水位上昇により間隙水圧が増加し有効応力が低下することで崩壊に至ったものと考えられる。しかし、防災システムを考える上で、避難時間を考慮すると、地下水位が感知してから崩壊までの時間は短いことが分かる。そこで、すべり面付近のテンシオメータの値がいつ状態 IV を示したか、その後、どれくらいの雨が降ったかについての観測が、避難の判断資料の一つになるのではないかと考えられる。

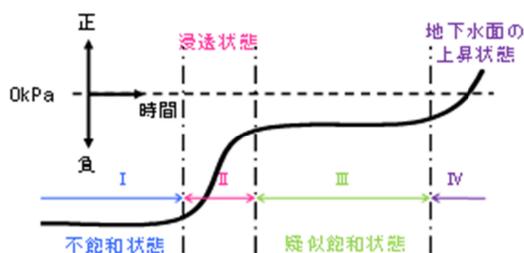


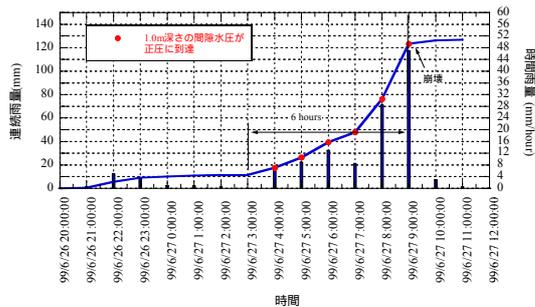
図 3 テンシオメータ計測値と斜面の状態

次に、申請者らが行った現地計測結果(京都市東山区)から、降雨量-間隙水圧-斜面崩壊の関係について考察した。これまでの長期計測の結果から、時間雨量 4.0mm 以上、連続雨量 7.0mm 以上の時に、すべり面付近と想定した 100cm 深さに設置しているテンシオメータが正圧(飽和状態と考えられる)を示す傾向が得られている。そこで、崩壊時の降雨状況および比較的降雨量が大きかった際の観測結果を用い、図 3 に示した傾向に基づき考察を行った。

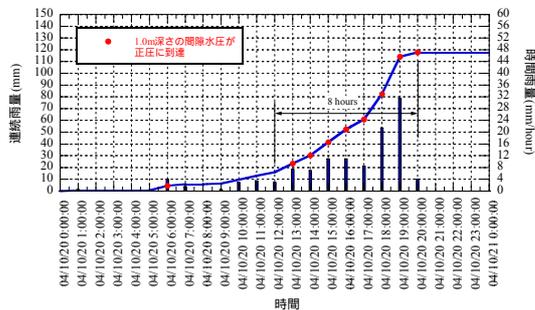
図 4 に(a)1999 年 6 月 26~27 日、(b)2004 年 10 月 19~21 日、(c)2010 年 7 月 11~14 日の降雨履歴とテンシオメータが正圧に達したデータを示す。図 4(a)は、観測箇所付近の斜面で連続雨量が 123.5mm に達し、崩壊発生時の時間雨量が 47.0mm/hour であった時の雨量データである。また、崩壊は発生していないが降雨量が多かった 2004 年 10 月 19~21 日や 2010 年 7 月 11~14 日のデータを用いて考察した。

図 4(a)では、間隙水圧が正圧に達してから 6 時間で崩壊が発生している。また、図 4(b)では、間隙水圧が正圧に達してから 8 時間経過しているにも関わらず、崩壊まで至っていない。この理由として、連続雨量と時間雨量の最大値が、1999 年の崩壊時と比べ低いことが考えられる。図 4(c)では、連続雨量が 177.0mm と最も多い降雨が発生したが崩壊は発生しなかった。間隙水圧が正圧に達したのは 3 時間であり、時間雨量も 1999 年の降雨

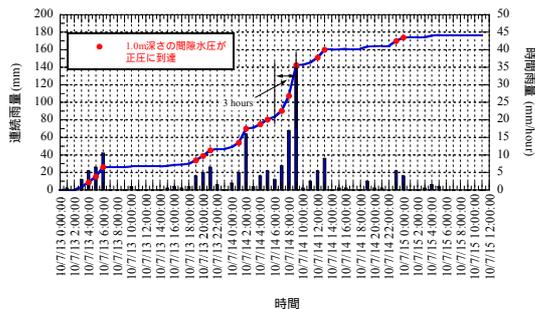
と比べ小さかったためと考えられる。以上のことから、間隙水圧が正圧に達した時間とその時間の降雨量から、平均時間雨量を求めると、18.6mm/hour, 12.8mm/hour, 19.7mm/hourとなる。基盤層に近いテンシオメータの間隙水圧が正圧に達してから100mm以上の降雨が発生することで、斜面崩壊が発生する可能性が高まり、時間雨量がある一定の降雨量が継続的に続くことで、崩壊に至ると考えられる。



(a)1999年6月26～27日



(b)2004年10月19～21日



(c)2010年7月11～14日

図4 降雨量-間隙水圧の関係

斜面観測技術に関する研究

降雨後の斜面の安定性を評価するためには、降雨後の水分変動をシミュレーションする必要があり、そのためには、降雨後の斜面表層からの蒸発量の現地観測が重要となる。そこで、一般的な気象観測データから蒸発量の推定を行うことのできるバルク法¹⁾を用いることにした。バルク法では、気象データに加えて、蒸発効率 β や交換速度 g_a が必要であり、特に蒸発効率 β は表層土の体積含水率や間隙径などに影響される。そこで、本研究では、Kondoらの手法²⁾を基礎に、試験方法に変更を加え、砂質土の体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係について実験データの整理法およびその特徴について考察した。図5に試験装

置の概要を示す。図5に示すように試験装置は、気象観測装置、水槽試験装置、土槽試験装置で構成され、試験は無風状態で実施するため室内で行った。実験試料として豊浦砂を用い、内径15.5cm、外径16.5cm、高さ2cmの塩化ビニル製円筒容器に、間隙比 $e = 0.785$ になるように、底面から1cm, 2cmごとに均一に締固めた。塩化ビニル製円筒容器は表面からのみの熱伝導とするために、側面と底面に断熱シートを貼り付けた。

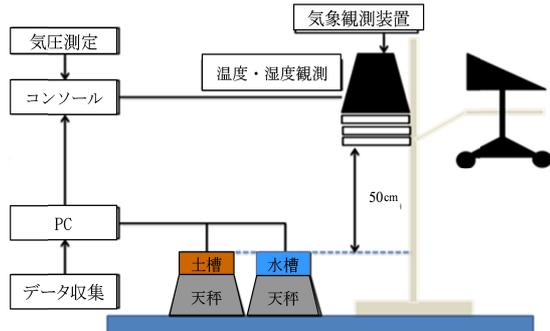


図5 蒸発効率観測装置の概要

図6に体積含水率と蒸発効率の関係の実験結果およびKondoら²⁾が提案した砂質土に関する実験式を示す。

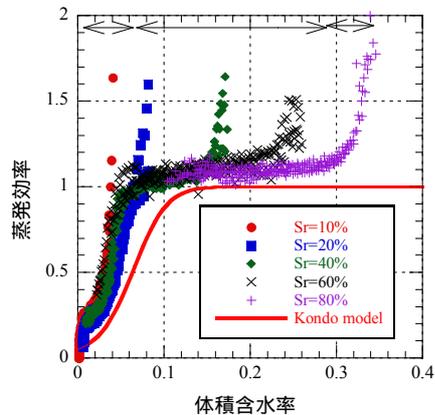


図6 体積含水率と蒸発効率の関係

図6より、算定値の実験結果とKondoらのモデルがより近い傾向を示していることがわかる。しかし、蒸発効率が $\beta=1.0$ を超える部分も見られる。そこで、算定値において、蒸発効率が1.0を超える部分、蒸発効率が $\beta < 1.0$ である部分に分けて考察を行った。この部分は、実験開始直後の土槽からの蒸発量が多い時点での蒸発効率を示している。土と水では、体積熱容量が異なるため、実験開始後1時間程度は土表面のほうが温まりやすくなっている。しかし、前述したように、近藤らのモデルでは、土と水の体積熱容量の差を考慮していないため、 θ と β との関係がこの部分のような算定値を示していると考えられる。この部分は、土槽からの蒸発量と水槽からの蒸発量がほぼ一致している時点での蒸発効率を示している。時間経過とともに、土槽からの蒸発量は徐々に減少するが、水槽からの蒸発量は増加する。すると、土槽と水槽の蒸発量が

ほぼ同様の測定値を示すようになる。その土槽と水槽の蒸発量がほぼ同様の測定値を示す時 $\beta=1.0$ となっていると考えられる。この部分は、の状態からさらに時間が経過すると、土槽からの蒸発により、土槽内の水分が蒸発することで蒸発するポテンシャルが低下し、土の含水量に応じて、土の間隙構造などの影響で蒸発量が減少している時点での蒸発効率を示していると考えられる。以上のことから、体積含水率と蒸発効率の関係について、その傾向をより詳細に考察することができた。今後は、蒸発効率 $\beta < 1.0$ 部分の体積含水率との関係は、土の間隙比や粒度に依存していることから、様々な種類の土を用いて実験を行い、体積含水率と蒸発効率のモデル化を行っていききたい。

その他、間隙空気圧測定に関する成果などについては、発表論文を参照されたい。

(2) 斜面の地盤情報データに関する検討 地盤情報の収集に関する検討

数値解析に必要な解析領域や材料特性を設定するための手法として、3次元レーザースキャナーによる斜面形状の測量とサウンディング試験を観測斜面において実施した。また、解析範囲が広域にわたる場合は、過去のボーリングデータなどの地盤情報データの活用を検討した。申請者らが地質技術者との共同で開発を進めている鹿児島版地盤情報データベース³⁾を基礎に、その表示方法の検討やデータ収集および質の検証を行った。課題としては、道路やトンネル周辺には多くのデータが存在するが、斜面についてはデータが不足するケースが多いことが挙げられる。また、土質試験結果の有無が場所により、異なることが課題である。

室内土質試験データの収集に関する検討

本研究課題では、不飽和土の保水特性および強度特性に関する試験を実施した。森本ら⁴⁾の提案した保水性試験の短縮化手法をもとに、より作業性を高めるための変更を加え、効率良く不飽和土の保水特性を得るための試験装置を作製し、従来の装置と同等の結果をより短時間で得られることが確認された。不飽和一面せん断試験については、供試体のサクシオン制御手順の違いに伴う試験結果への影響について検証し、せん断試験の垂直応力の制御方法の改善を行い、より精度の良い不飽和土のせん断強度特性を得ることができるようになった。

(3) 斜面安定性評価手法に関する検討

降雨時の表層の斜面崩壊を考えるには、不飽和土の浸透特性や強度特性を考慮する必要がある。しかしながら、従来の斜面安定解析では十分に不飽和域の浸透特性が考慮されていない。そこで、不飽和土中の浸透力や浮力を考慮した斜面安定解析手法を提案した。まず、斜面安定解析手法として、非円弧すべり面に対応できる極限平衡法の一つであるJanbu法(体積力法による式)を用いた。この手法では、従来は浸透流による浸透力につい

ては、地下水位以下の土塊についてのみ取り扱われていた。しかしながら、一般に不飽和土中においても浸透流は生じており、それに伴う浸透力も発生していると考えられる。そこで、本研究では、不飽和土中の浸透力を提案した。飽和土中の浸透力は、次式で示される。

$$J_{sat} = j \cdot V = \gamma_w i V \quad (1)$$

ここに、 j : 単位体積当たりの浸透力、 i : 動水勾配、 V : 土塊の体積。

一方、不飽和土の体積は間隙中の水と空気、それぞれそれぞれに接する土粒子に分けることができ、不飽和土中の浸透力は水と接する土粒子のみ作用していると考えられる。そこで、不飽和土中の浸透力が作用する体積について考えた不飽和土中の浸透力は、次式のように示される。

$$J_{unsat} = j \cdot V_j = \gamma_w i S_r V \quad (2)$$

ここに、 V_j : 浸透力の影響体積、 S_r : 飽和度。

よって、不飽和土の浸透力は、飽和度で変化するとした。式(2)を体積力法表示のJanbu法に組み込み、不飽和領域での浸透力を考慮した斜面の安全率を計算できるようにした。図7にある仮想斜面のすべり土塊の飽和度が一樣に変化する場合の計算結果を示す。

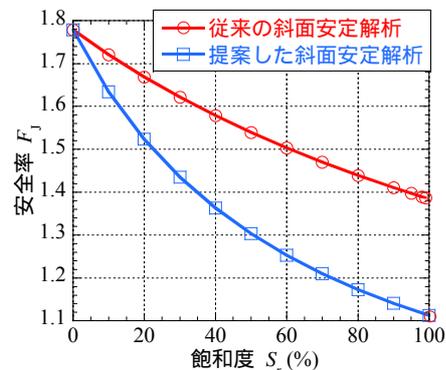


図7 すべり土塊の飽和度が一樣に変化する場合の飽和度と安全率の関係

図7では、不飽和浸透による浸透力を考慮した結果と考慮していない従来の結果を比較している。図より、いずれも飽和度が増加すると共に安全率は低下している。従来の計算結果では、不飽和状態においても、その飽和度に応じた土塊自重の増加により安全率が低下している。しかし、飽和状態になった際に飽和浸透による浸透力が考慮されることにより、急激に安全率が低下していることがわかる。一方、不飽和浸透による浸透力を考慮した計算結果については、乾燥状態から飽和状態まで滑らかな曲線で安全率が変化しており、提案する解析手法は、より合理的な結果を示しているものと考えられる。今後の課題としては、不飽和土の浸透力を考える際の影響体積の妥当性について検証する必要がある。

また、本研究では、SPH法による斜面の応力・変形解析手法の開発を行い、擁壁がある

場合の安定状態および限界状態における地盤内の応力状態や地下水位がある場合の斜面の安定性についてその計算結果の妥当性について理論値やモデル実験との比較を行った。その結果、地盤内応力に関する解析結果は、概ね合理的な結果を得ていることがわかった。しかし、モデル実験で観察された挙動と異なる結果が見られるケースもあり、境界条件の設定や土質パラメータの設定などについて、検討が必要であると思われる。

<引用文献>

- 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，pp.108-109，1994。
J. Kondo, N. Saigusa and T. Sato: A parameterization of evaporation from bares soil surfaces, J. Appl. Meteor, Vol.29, pp.385-389, 1990。
酒匂一成，北村良介，中田文雄，田中義人，城本一義：地圏シミュレータ構想(その4)-鹿児島版地盤情報データベースの構築-，自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集，37号，pp.25-27，2013。
森本紘文ほか：新しい保水性試験による乾湿繰り返しについて，第41回地盤工学会研究発表会講演概要集，pp.865~886，2006。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

- 檀上徹，酒匂一成，藤本将光，深川良一，酒井直樹：不飽和土における間隙空気圧の計測およびテンシオメータへの影響の検証 地盤工学会ジャーナル 査読有，Vol.10，No.1，pp.81-92，2015(査読有)。
森岩寛稀，酒匂一成：土中の水分状態とバルク法における蒸発効率 β の水分依存性に関する室内試験，第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.223-228，2014(査読有)。
Kazunari Sako, Masayuki Tabata, Ryosuke Kitamura, Masayuki Niisaka: Slope stability analysis by considering unsaturated seepage force in unsaturated slope, Proc. of the sixth International Conference on Unsaturated Soils, pp.1279-1285, 2014(査読有)。
檀上徹，酒匂一成，深川良一，酒井直樹，岩佐直人，N.M.Quang：降雨量，不飽和浸透挙動，変位量の観測結果に基づく降雨時表層滑り型崩壊過程の検証，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.68，No.3，2012(査読有)。
宮本祐二，山田満秀，酒匂一成，荒木公平，北村良介：締固め曲線を考慮した水分特性曲線の数値力学モデル，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.67，No.2，pp.I_405-I_414，2012(査読有)。
酒匂一成，梅田和明，的場洋平，深川良一，北村良介，無線センサーネットワー

クを利用した長期斜面モニタリングに関する課題と改善，第6回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.107-112，2012(査読有)。

[学会発表](計15件)

- 北岡大典，酒匂一成：不飽和浸透を考慮した斜面安定解析に関する一考察，平成26年度土木学会西武支部研究発表会，2015年3月7日，琉球大学(沖縄県中頭郡西原町)。
酒匂一成，檀上徹，藤本将光，深川良一：京都市東山地区における斜面安定性に関わる降雨量と間隙水圧の関係について，第49回地盤工学会研究発表会，2014年7月16日，北九州国際会議場(福岡県北九州市)。
酒匂一成，北村良介，中田文雄，田中義人，城本一義：地圏シミュレータ(その5)，平成25年度自然災害研究協議会西部地区部会研究発表会，2014年2月7日，九州大学西新プラザ(福岡県福岡市)。
酒匂一成，北村良介，中田文雄，田中義人，城本一義：地圏シミュレータ構想(その4)-鹿児島版地盤情報データベースの構築-，自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集，2013年2月1日，九州大学西新プラザ(福岡県福岡市)。
鳥居文也，H.H.BUI，酒匂一成，里深好文，深川良一：箱型擁壁の安定状態時および限界状態時に作用する地盤内応力の検討，第56回日本学術材料工学連合講演論文集，2012年10月29日，京都テルサ(京都府京都市)。

[その他]

鹿児島大学研究者総覧：
<http://kuris.cc.kagoshima-u.ac.jp/614614.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

酒匂 一成 (SAKO Kazunari)
鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：20388143

(2)研究分担者

(3)連携研究者

(4)研究協力者

北村 良介 (KITAMURA Ryosuke)
深川 良一 (FUKAGAWA Ryoichi)
Ha Hong BUI (Ha Hong BUI)
檀上 徹 (DANJO Toru)
平岡 伸隆 (HIRAOKA Nobutaka)