

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760357

研究課題名（和文）

ゲリラ豪雨時の斜面崩壊メカニズムの解明のための計測技術・数値解析手法の高度化

研究課題名（英文）

Development of advanced measurement techniques and numerical analysis for surface failure of slopes during torrential rainfall (guerrilla-like rainfall)

研究代表者

小山 倫史 (KOYAMA TOMOFUMI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20467450

研究成果の概要（和文）：本研究では、ゲリラ豪雨時の雨水浸透現象の把握および表層崩壊メカニズムの解明を目的として、ゲリラ豪雨の降雨波形および斜面内の水収支を正確に捉えるための計測技術の高度化を図るとともに、連続体・不連続体モデルを用いたより高度な応力-浸透連成解析手法を開発した。また、集中豪雨により崩壊を起こした実斜面について、現地の地質調査・土質試験の結果および高精度な雨量観測データをもとに表層崩壊の再現解析を実施し、数値解析による斜面安定性評価および崩壊危険予測が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, more advanced measurement technique for accurate estimation of rainfall profiles and water mass balance in slopes during torrential rainfall (so-called guerrilla-like rainfall) was developed to investigate the mechanism of rainfall infiltration and rainfall-induced surface failure. The advanced numerical simulation tools were also developed to evaluate the slope stability and simulate the slope failure/collapse processes during torrential rainfall. The newly developed numerical simulation tools were applied to the real surface failure in the slope and their validity was investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
平成 23 年度	900,000	270,000	1,170,000
平成 24 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：地盤の挙動

1. 研究開始当初の背景

近年、梅雨前線や台風、異常気象などによる「ゲリラ豪雨」（局所的かつ短時間に多量に降る雨）に起因する斜面崩壊が数多く発生し、道路斜面や住宅地域などにおいて多大な被害をもたらしており、ゲリラ豪雨を含めて、多発する集中豪雨に伴う斜面防災システムの整備が急務である。

降雨による斜面崩壊は、斜面表層の飽和度に伴う密度増加による表層崩壊、斜面内の地下水位上昇に伴う有効応力の低下による地すべりに大きく分類されるが、いずれの場合も斜面内の地下水挙動を把握することが必要不可欠である。特に、ゲリラ豪雨と斜面災害に着目すると、ゲリラ豪雨は、極めて短時間に降雨量が変化するため、斜面表層部の湿

潤履歴によっては、数秒単位で多量の雨水浸透が発生し、斜面安定性を著しく低下させるだけでなく、表層崩壊などの斜面災害を誘発する。したがって、ゲリラ豪雨のような数秒単位の鋭敏な降雨およびその雨水浸透現象を評価する必要性があり、従来の斜面災害の雨量指標（例えば土壌雨量指数やスネーク曲線など）のみでは十分な評価はできないものと推察される。すなわち、ゲリラ豪雨を正確に計測することから、その降雨成分（降雨波形など）が斜面安定に与える影響を的確に把握する必要がある。そのためには、降雨成分を指標として斜面への雨水浸透メカニズムの解明が重要であり、従来の降雨指標のみによる警戒基準雨量に代わり、斜面の計測・モニタリングによる情報、力学・浸透特性も反映したシステムが必要である。

ゲリラ豪雨の予測に関しては、高精度・高分解能な X バンド MP レーダーの開発（国土交通省）や高分解能局地予測モデルの構築（気象庁）、豪雨を起因とする土砂災害に関しては、カオス時系列予測法の一つである RBF ネットワークを用いた警戒基準雨量の設定（国土交通省・気象庁）などが挙げられる。

一方、これまで応力-浸透解析手法の開発およびその適用例（例えば、豪雨に伴う越流による河川堤防の安定性評価など）がみられるが、ゲリラ豪雨時の降雨境界条件、特に、斜面表層付近の数秒単位で急激に変化する湿潤履歴に着目したものはほとんど見られない。この斜面表層付近の湿潤履歴を精度よく再現することがゲリラ豪雨時の斜面崩壊の精度良い予測につながると考えられ、リアルタイムで計測された降雨、斜面における局所的な表面流出量などの情報・水収支を反映させた数値解析モデルの構築が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、ゲリラ豪雨時の斜面安定性評価を対象とし、(1) 短時間に多量に降る雨（ゲリラ豪雨）の精度良い計測のためのリアルタイム雨量計、斜面の局所的な表面流出計測のための表面フラックスメータなどの計測機器を新たに開発し、土壌水分計・テンシオメータなどと組み合わせ、斜面のリアルタイム計測・モニタリングシステムの構築を目指す。(2) ゲリラ豪雨の特性を考慮した雨水浸透実験を実施し、雨水浸透挙動の把握を行う。また、(3) 従来の浸透流解析における降雨境界条件を見直し、タンク・モデルによる水収支を考慮した統合型地下水解析手法（リアルタイム計測システムより得られる降雨・表面流のデータを解析に反映させる）および連続体・不連続体モデルを用いた応力-浸透連成解析手法を開発し、ゲリラ豪雨時の斜面崩壊メカニズムの解明および予測精度の高い斜面安定解析を目指す。

3. 研究の方法

本研究は、ゲリラ豪雨の特徴（局所的・短時間・高降雨強度）を考慮した雨水浸透挙動およびそれが斜面安定に与える影響について実験・解析の両面からアプローチを試みた。なお、ゲリラ豪雨時の時々刻々と変化する雨量、降雨波形を正確に把握するための雨量計および浸透能を超えて浸透しない雨水の量を計測できる機器を新たに開発し、実験に用いた。

4. 研究成果

(1) リアルタイム雨量計・表面フラックスメータの開発

超音波レベル計を用いてリアルタイム雨量計の開発を行った（図1参照）。ゲリラ豪雨のような数秒単位の鋭敏な降雨を計測するためには、降雨をリアルタイムで計測する必要があり、本研究で開発した雨量計は超音波により円筒形の雨受けに溜まった水位（降雨量）を1秒ごとに計測し、従来の転倒桁型雨量計を用いた場合に生じるタイムラグが生じることなく、リアルタイムでの精度よい計測が可能となった。また、飽和・不飽和浸透流解析により、ゲリラ豪雨のような数秒単位の鋭敏な降雨は、時間降雨量や10分毎降雨量では正確に評価することができず、新たに降雨強度を降雨量の時間微分（単位時間当たりの降雨量）として定義し、降雨強度の時間微分として「降雨加速度」の概念を導入することで、数秒単位で変化する鋭敏な降雨を表現することが可能となる（図2参照）。

さらに、ゲリラ豪雨のような短時間・高降雨強度の降雨を対象とした雨水浸透現象を把握する場合、浸透能を超えて浸透しない雨水を正確に計測し、水収支を正確に把握することが重要であり、本研究で新たに開発した表面フラックスメータ（図3参照）は多点・

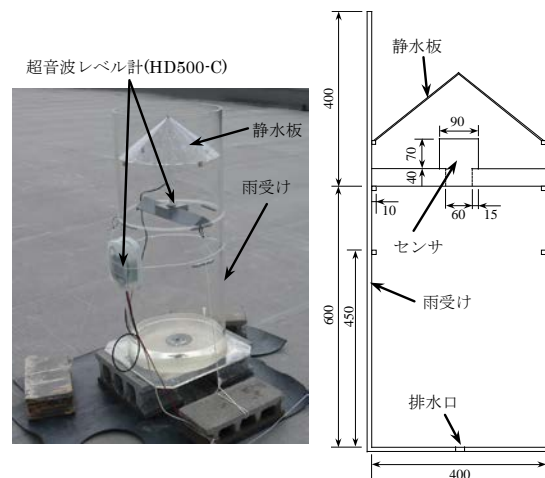


図1. 超音波レベル計を用いたリアルタイム雨量計。

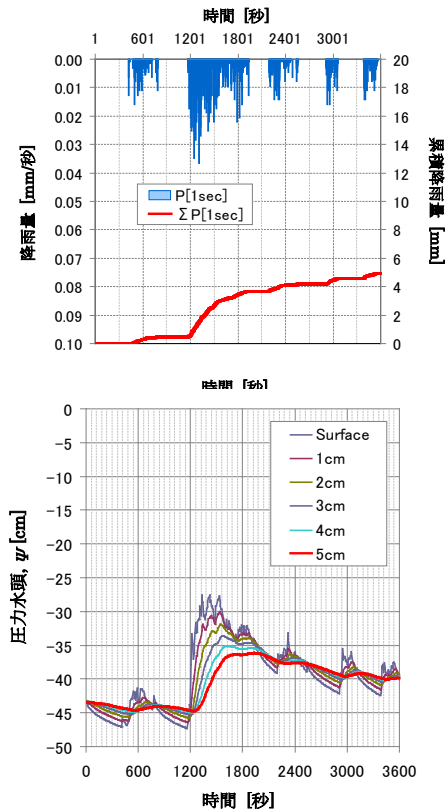


図 2. リアルタイム雨量計によるリアルタイム計測およびその結果を用いた 1 次元浸透流解析の結果.

リアルタイム計測という点で有効なツールであると考えられる.

(2) ゲリラ豪雨時の雨水浸透挙動把握のためのサンドカラム試験およびその数値解析

本研究では、地表面から降雨条件を与える雨水浸透カラム試験を実施し、ゲリラ豪雨を想定した強い降雨強度下での雨水浸透挙動の把握を目的としている。実験では、降雨強度だけでなく、地盤条件や雨滴粒径などの条件を考慮した豪雨時の雨水浸透挙動をより正確に捉えることで、斜面崩壊のトリガーとなる不飽和浸透メカニズムの解明を目的としている。同実験は、降雨強度、地盤の含水状態、排気・排水条件、雨滴粒径および初期含水比を変化させて実施し、降雨中の地盤内の間隙圧、間隙空気圧および水分量の変化を計測した (図 3 参照)。以下に本実験より得られた知見をまとめる。

- 豪雨時の雨水浸透挙動においては間隙空気の挙動が重要な役割を果たし、間隙空気圧の計測は現場計測においても必要かつ重要である。
- ゲリラ豪雨のように降雨強度が大きくなるほど、不飽和土における雨水と間隙空気とのスムーズな置換が起こらず、その

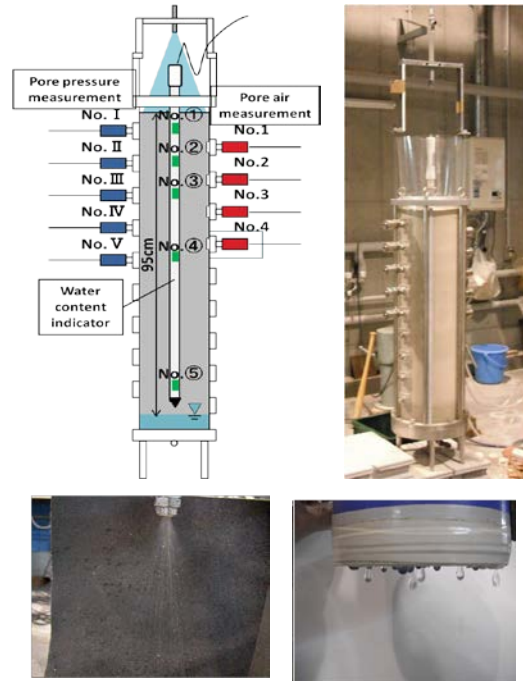


図 3. サンドカラムを用いた雨水浸透実験、装置の概要・全容および雨滴装置.

結果、間隙空気圧が上昇し、雨水浸透が妨げられる (図 4 参照)。

- ゲリラ豪雨では雨滴粒径が大きいことが知られており、同じ降雨強度でも雨滴粒径が異なると雨水浸透挙動も異なることが確認された。すなわち、雨滴粒径が大きいほど、雨水と間隙空気のスムーズな置換が起こらず、間隙空気圧の上昇とともに、雨水浸透が妨げられる。
- 地盤の不飽和特性、初期含水状態、排気・非排気条件が雨水浸透挙動に与える影響は顕著である。
- 現場斜面では、地中に浸透する雨水と浸透せずに表面を流れる雨水の水収支に着目した計測が必要であり、特に、斜面の表層崩壊表に着目すると、表面流による侵食などを考慮する必要がある。

また、1次元飽和・不飽和浸透流解析により降雨波形および降雨加速度 (降雨強度の時間変化) が雨水 (鉛直) 浸透挙動に与える影響についてパラメータ・スタディを実施した。以下にパラメータ・スタディより得られた知見をまとめる。

- 降雨加速度が大きいほど、地盤への浸透能を超え、結果として雨水が浸透せず、結果として、浸透深度も浅くなる傾向がある。
- 降雨波形が雨水浸透挙動に与える影響は大きく、特に、後方集中型の降雨は透水能が徐々に高くなる中でより降雨強度が大きくなるため、結果としてより多くの

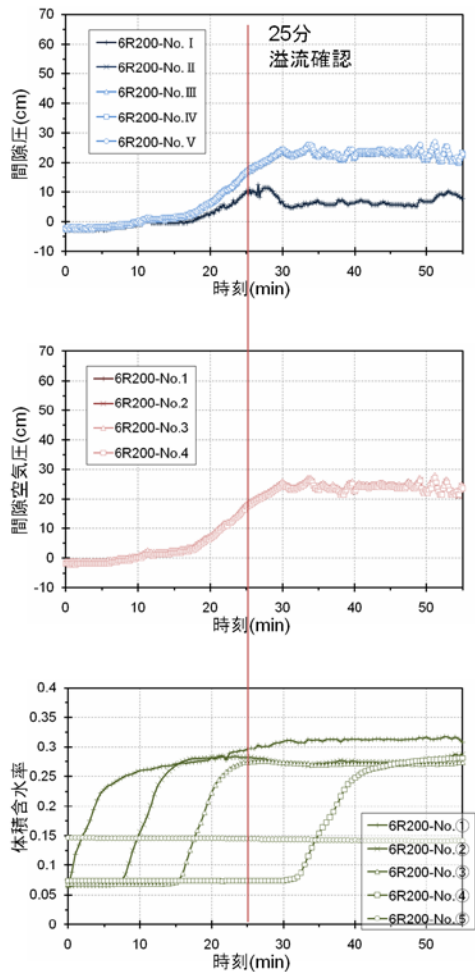


図 4. 実験中の異なる深度における間隙圧, 間隙空気圧および体積含水率の変化 (珪砂 6号, 降雨強度: 200mm/h の場合).

雨水を地盤内に浸透させることになり, 浸透による斜面崩壊の危険度が高まることがわかった.

(3) ゲリラ豪雨による表層崩壊を模擬した大型降雨実験および不連続変形法を用いた崩壊シミュレーション

降雨起因の斜面崩壊に対するより高度のシミュレーション・解析手法の開発を目的として, 本研究では, 不連続体解析手法の1つである不連続変形法 (DDA) に有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析の結果 (水圧, 飽和度の分布など) を逐次リンク (連成) させることにより, 降雨時における斜面の安定性評価のみならず, 崩壊過程および崩壊後の土塊・岩塊の移動も追跡できる解析コードの開発を行った. また, 開発した解析手法を防災科学技術研究所 (つくば) において実施された斜面を模擬した大型降雨実験 (図 5 参照) に適用し, その妥当性について検討した. 以下に, 本検討より得られた知見をまとめる.

- ・ 不連続体解析手法により, 大型降雨実験

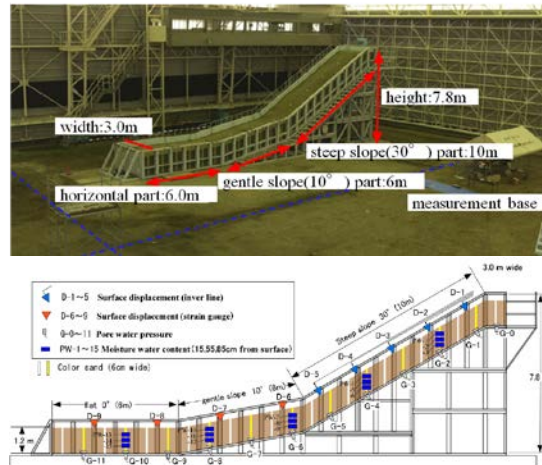


図 5. 斜面を模擬した大型降雨実験 (防災科学技術研究所にて実施)

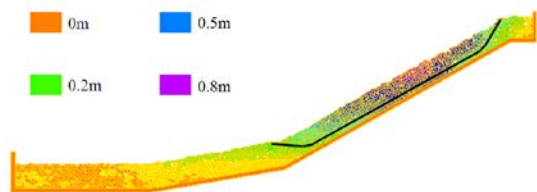


図 6. 解析により得られた土塊の移動距離の分布 (黒の実線は実験で観察されたすべり面の位置を示す).

で得られた崩壊パターンを定性的 (「どこ」が崩壊するのか) に再現することができた (図 6 参照).

- ・ 不連続体解析を用いることで崩壊前後の斜面の挙動を一貫して解くことができる. ただし, 「いつ」, 「どのくらい」崩壊起こるのかといった定量的な評価には, パラメータ設定を含めて, 課題が残った.
- (4) 豪雨による表層崩壊に対する再現解析

飽和・不飽和浸透流解析と円弧すべり解析を組み合わせることにより斜面崩壊予測手法を構築し, 2009年8月の豪雨で発生した国道沿いの斜面における表層崩壊についてメカニズム解明を目的とした再現解析を試み, 数値解析の妥当性の検証を行った. 以下に, 本検討より得られた知見をまとめる.

 - ・ 表層崩壊は, 降雨により不透水基盤上の土砂の飽和度が上昇し, 自重の増加および有効応力が低下することにより生じる (図 7 参照).
 - ・ 表層の飽和透水係数の値が斜面の雨水浸透および安定性に大きな影響を与える. 特に, 表層の透水係数が高い場合, のり尻付近に雨水が集まる傾向が顕著であり, のり尻付近から不安定化することが分かった (図 7 参照).

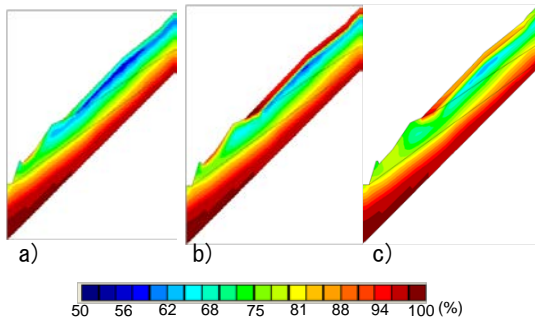


図 7. 解析より得られた斜面内の飽和度分布 (降雨強度: a) ピーク前, b) ピーク, c) ピーク後) .

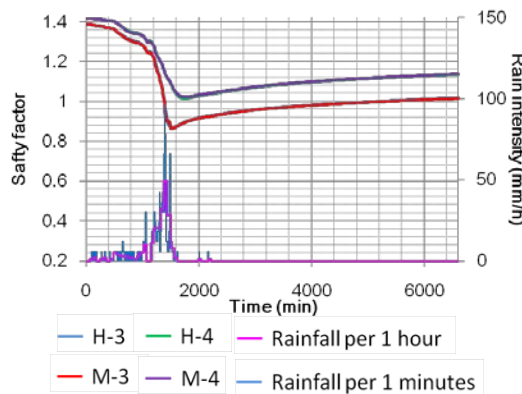


図 8. 降雨時および降雨終了後の斜面の安全率の変化 (図中の H, M はそれぞれ降雨強度を時間雨量あるいは 10 分雨量で評価した場合を意味し, 3, 4 は表層の透水係数のオーダー, すなわち, 1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-4} cm/sec を意味する).

- ・ 数値解析により, 降雨中のみならず, 降雨終了後の斜面の安全率を評価することができる (図 8 参照).
- ・ 本研究で提案した手法により, 実際の豪雨による表層崩壊現象を十分再現でき, 詳細な地質調査による解析モデルの精緻化および降雨外力の精度よい評価により, より精度の高い崩壊・危険度予測が可能となると考えられる.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Koyama, T., Nagano, K., Kim, S., Lee, K and Ohnishi, Y. Experimental and numerical studies on rainwater infiltration mechanism during torrential rainfall. Caspian Journal

of Applied Sciences Research, 2013; 2 (AICCE' 12/GIZ' 12): 440-448. (査読有)

- ② Nakamura, H., Koyama, T., Lee, K., Yamada, M. and Ohnishi, Y. Numerical simulations for rainfall induced slope failure -rainwater infiltration mechanism and evaluation of slope stability during torrential rainfall. Caspian Journal of Applied Sciences Research, 2013; 2 (AICCE' 12/GIZ' 12): 431-439. (査読有)
- ③ Irie, K., Koyama, T., Nishiyama, S., Yasuda, Y. and Ohnishi, Y. A numerical study on the effect of shear resistance on the landslide by Discontinuous Deformation Analysis (DDA). Geomechanics and Geoengineering, an International Journal, 2012; 7(1): 57-68. DOI:10.1080/17486025.2011.578672. (査読有)
- ④ 小山倫史, 高橋健二, 大西有三. 斜面における統合型地下水解析法の開発およびその実斜面への適用. 地盤工学ジャーナル 2010; 5(1): 103-118. (査読有)
- ⑤ 小山倫史, 高橋健二, 西川啓一, 大西有三. グリラ豪雨による斜面安定性評価のためのリアルタイム雨量計の開発. 地盤工学ジャーナル, 2010; 5(1): 61-67. (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 中村秀樹, 小山倫史, 李圭太, 山田雅義, 河島信義, 森井和弘, 大西有三. 豪雨時の雨水浸透および表層崩壊のメカニズム解明のための解析的研究. 第 47 回地盤工学研究発表会, 2012 年 7 月 14~16 日, 八戸.
- ② Koyama, T., Irie, K., Nagano, K., Nishiyama, S., Sakai, N. and Ohnishi, Y. DDA simulation for slope failure/collapse experiment caused by torrential rainfall. In: Advances in Discontinuous Numerical Methods and Applications in Geomechanics and Geoengineering, Proc. of the 10th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD 10), 6-8, December, 2011, Hawaii, USA.
- ③ 金秀娟, 小山倫史, 長野航兵, 李圭太, 大西有三. グリラ豪雨時における地盤の雨水浸透挙動に関する研究. 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2011, 2011 年 11 月 11 日, 大阪.
- ④ 金秀娟, 小山倫史, 長野航兵, 李圭太, 大西有三. グリラ豪雨時の雨滴サイズを考慮したサンドコラム雨水浸透試験. 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9

- 月 7～9 日，愛媛.
- ⑤ 入江敬，小山倫史，酒井直樹，西山哲，安田祐樹，大西有三. 不連続変形法による降雨に起因する斜面崩壊の予測解析. 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム，2011 年 1 月 13～14 日，東京.
 - ⑥ 長野航兵，小山倫史，李圭太，大西有三. 豪雨時における斜面の雨水浸透特性に関する解析的研究. 土木学会第 64 回年次学術講演会，2009 年 9 月 2～4 日，福岡.
 - ⑦ 小林猛嗣，小山倫史，長野航兵，李圭太，大西有三. 斜面勾配が豪雨時の雨水浸透特性に与える影響に関する一考察. 第 44 回地盤工学研究発表会，2009 年 8 月 18～21 日，横浜.
 - ⑧ 李圭太，小山倫史，長野航兵，秋場俊一，大西有三. 豪雨時における不飽和特性に着目した斜面の浸透特性に関する解析的研究. 第 44 回地盤工学研究発表会 2009 年 8 月 18～21 日，横浜.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山 倫史 (KOYAMA TOMOFUMI)

京都大学大学院工学研究科都市社会工学

専攻・助教

研究者番号：20467450