

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23404011

研究課題名(和文) インドシナ地域における豪雨に対する土砂災害早期警戒体制立案に関する研究

研究課題名(英文) A study on the establishment of landslide early warning system against torrential rainfall in Indochina region

研究代表者

大津 宏康(Ohtsu, Hiroyasu)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40293881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：インドシナ地域で斜面崩壊が最も多発している風化花崗岩(まさ土)からなる斜面での原位計測の分析結果より、降雨は表面流出、地中への浸透に加え、表面貯留の3成分に分類され、この内表面貯留は、斜面表層部でのインク瓶効果により、降雨浸透が抑制されることで生じることを確認した。また、解析で算定された浸透量を流入境界とした飽和・不飽和浸透流解析と実測値との比較から、同手法は、表面貯留量の概念を導入することで、浸透量を適切に表現可能となることを示した。さらに、降雨に起因する斜面崩壊機構として、降雨浸透に伴う飽和度の上昇による有効粘着力の減少により、安全率の低下が生じることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, field monitoring focusing on water mass balance due to torrential rainfall in the slope comprising weathered granite, which is dominate landslide-prone geological condition in Indochina Peninsula, has been conducted. The results showed that precipitation is divided into runoff, infiltration into subsoil and surface retention, which is generated by ink-bottle effect in unsaturated soil near slope surface. And, the results of FEM unsaturated-saturated seepage analysis, in which calculated infiltration into subsoil is treated as prescribed boundary condition considering the effect of surface retention, showed good agreement with that of measurement. In addition, as for mechanism of shallow landslide, it is pointed that the decrease of effective cohesion due to increase of degree of saturation may be the trigger of slope failure without generation of groundwater table.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：地盤工学

キーワード：地盤工学

1. 研究開始当初の背景

近年、インドシナ地域では降雨に起因する斜面崩壊の発生件数が急増し重大な被害が発生しつつあり、豪雨時の住民避難あるいは道路通行止めを目的とした土砂災害早期警戒体制の立案が喫急の検討課題となっている。現状での東南アジアにおける当該分野の研究では、図-1 に示すように、横軸に3日～7日累積降雨量、縦軸に日雨量が用いられることが多い。

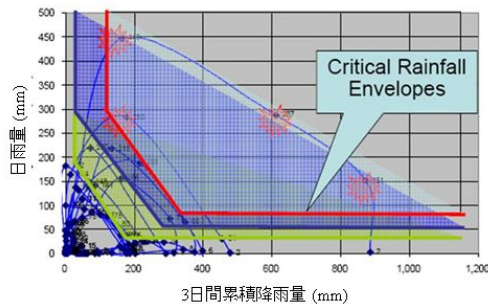


図-1 限界降雨包絡線

この理由は、対象とする降雨に先行する降雨履歴が斜面崩壊に影響を及ぼすことが経験的に認識されてことに起因する。このため、合理的に土砂災害早期警戒体制を立案するためには、豪雨時の斜面地盤での斜面崩壊の発生機構を明らかにするとともに、実際にどのような降雨指標を用いるかが重要な検討課題となる。このような課題に対して、起案者らは、「インドシナ地域における降雨に起因する地すべりの発生機構に関する調査研究」(科学研究費補助, 基盤研究(B) 海外調査, 平成20年度～平成22年度)において、タイの研究機関と共同して、タイ・ナコンノックの道路斜面において熱帯性豪雨時の水収支に関する原位置計測結果の分析を実施してきた。この研究より得られた知見は、以下のように要約される。

- (1) 当該斜面は、透水係数が $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$ の比較的難透水性の中塑性粘性土と分類される風化流紋岩からなっているが、想定される浅層のすべり面深度 1m 程度では、その先行降雨履歴効果が消散するのに2日程度要する。
- (2) 当該サイトのような地盤条件の斜面に対して土砂災害早期警戒体制を立案するためには、先行降雨履歴効果を考慮することが不可欠となる。

既往の研究結果によれば、タイにおいても日本においても降雨に起因する斜面崩壊が最も多く発生(全体に占める比率30%程度)している地盤条件は、中世代ジュラ紀～白亜記の花崗岩が風化したまさ土である。まさ土は、風化流紋岩からなる当該斜面に比較して透水性が高いことから、上記の知見(2)に示した豪雨時の体積含水率および間隙圧の増加の時間遅れが短くなると想定される。このため、降雨に起因する斜面崩壊が多発するま

さ土斜面を対象とした場合には、先行降雨履歴効果を考慮するか否かが重要な検討課題となる。

このような観点から、起案者らは、ナコンノックの道路斜面に引き続き、タイにおける研究協力者に加えタイ道路省の協力を得て、風化花崗岩(まさ土)からなるタイ・プーケットの道路斜面で、透水性の高い地盤条件での土砂災害早期警戒体制の立案を目的としたスコール時の水収支に関する原位置モニタリングを実施することを立案した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、近年インドシナ地域で急増している集中豪雨による斜面崩壊に対して、リスクマネジメントの観点から住民避難・道路通行止めを目的とした土砂災害早期警戒体制の立案を図るための調査研究を行うことである。現状での早期警戒体制は、既往の斜面崩壊時の降雨情報(時間雨量、累積雨量等)を組み合わせ設定されている。起案者らは、これまでのタイにおける風化流紋岩斜面での原位置計測データの分析結果から、スコールのような短時間に高強度の豪雨が集中して発生する場合には、豪雨に対する斜面安定評価では先行降雨履歴効果を考慮することが必要となる等の知見を得ている。一方、インドシナ地域で斜面災害の発生頻度が最も高いまさ土斜面では、その透水性が高いため、先行降雨履歴効果のみならず、豪雨開始後の比較的短期間での降雨浸透による斜面の不安定化が懸念される。

このような背景から、本研究ではタイ・プーケットにおけるまさ土斜面を対象とした原位置計測を実施し、土砂災害早期警戒体制の合理的立案に資する、豪雨時の斜面における水収支(表面流出・浸透)に関する基礎データの収集および分析に加え、計測結果に基づく数値解析モデルを用いた検討を実施した。

3. 研究の方法

本研究ではタイ・プーケットにおけるまさ土からなる切土斜面において、以下の方法により検討を実施した。

まず、原位置計測に先立ち、各種原位置調査(等高線調査、比抵抗電気探査、動的貫入試験、ハンドオーガーサンプリング、供試体サンプリング)、およびサンプリング試料を用いた各種室内試験を実施した。比抵抗電気探査および動的貫入試験の結果からは、斜面表層から深度 5.0m 程度の地盤は、風化の程度によって不均質であることが明らかとなった(図-2 参照)。そして、表層部から 1.0～2.0m の深度の領域は風化の程度が著しく、かつ比較的透水性の高い残積土と分類されることから、降雨の地中への浸透挙動を把握するための計測器は表層部から 1.0m 以浅に設置することとした。また、各種室内試験結果からは、当該斜面における不飽和土の浸透

解析に適用するパラメータを把握するとともに、降雨浸透に伴う地盤強度の低下特性を把握した。

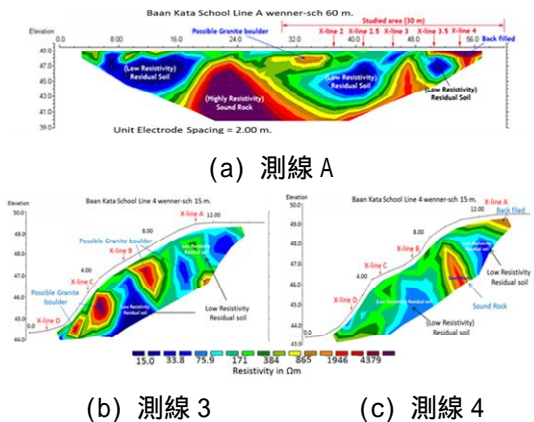


図-2 電気探査結果

次に、原位置計測では、降雨浸透特性を把握するため、間隙水圧・体積含水率を計測するテンシオメータおよび土壌水分計を斜面法尻部・中腹部に設置するとともに、表面流出量を計測するため法尻部に、新たに開発した計測装置を設置した。この計測結果について分析を実施し、斜面表層部での水収支に関して、降雨量は、降雨開始直後は、表面流出量および浸透量に加えて、地表付近に保持される水量、すなわち表層貯留量の3成分に分離されることを明らかにした。

さらに、原位置計測結果に対して、一次元タンクモデルを用いたシミュレーションにより、降雨に対する表面流出量・浸透量・表層貯留量の分離の割合は、降雨強度に依存して変動することを明らかにした。さらに、一次元タンクモデルを用いて算定された浸透量を流量境界とした FEM 飽和-不飽和解析を実施することで、本研究で提案した降雨に対する水収支関係の適用性について検証した。

4. 研究成果

本研究により得られた知見は、以下のよう

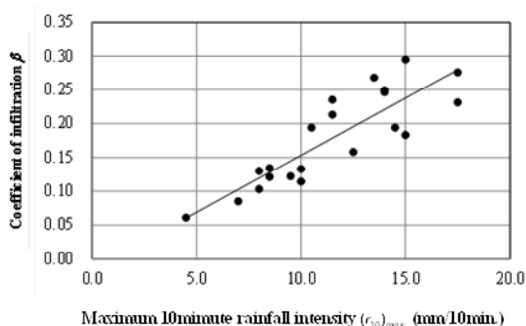


図-3 一次元タンクモデルパラメータ（浸透係数 β ）の同定結果

1) 斜面表層部での水収支に関して、降雨量は、降雨開始直後は、表面流出量および浸透量

に加えて、地表付近に保持される水量、すなわち表層貯留量の3成分に分離されることを明らかにするとともに、その分離の割合は、透水性および間隙率等の地質条件の違いのみならず、降雨強度に依存して変動することを、計測結果および一次元タンクモデルを用いた解析結果より明らかにした(図-3 参照)。

2) 一次元タンクモデルを用いた計測流出量の逆解析結果より同定された浸透係数 β は、10分間最大強度が大きいほど増加する傾向を示す。この傾向は、流出比(累積流出量/累積降雨量)が、10分間最大強度が増加するにつれて減少する傾向と調和的である。この結果より、降雨強度が高い場合には、降雨量に対して、表面流出成分に比べ、地中への浸透成分が卓越する傾向にあると推察される。

3) 同定結果を用いた一次元タンクモデルを用いた順解析により、表面流出は降雨に対して時間遅れを伴い発生するのに対して、地中への浸透は降雨開始とともに生じる。しかし、水収支に着目すると、降雨開始から短時間の間では、降雨強度は、次式に示すように表面流出強度と浸透強度との和を上回ることになる。この両者の差分は、表面付近で地中への浸透が抑制される量となることから、表面貯留量と解釈される。

4) 表面貯留量は、斜面表層部でのインク瓶効果により、降雨浸透が抑制されることに起因して発生する可能性がある。この仮説を検証するために、斜面表層部で計測された体積含水率と間隙水圧の変動特性(原位置 SWCC)に着目した。この結果、斜面表層部 GL-0.2m での計測結果に基づく原位置 SWCC は、降雨開始時には間隙水圧のみが反応する一方、体積含水率の増加が抑制されるインク瓶効果が明瞭に表れ、このインク瓶効果が発生する段階で、表面貯留量が発生していることが確認された(図-4 参照)。

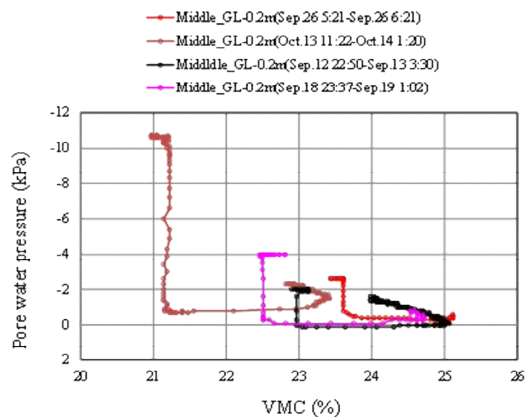


図-4 原位置 SWCC (中腹部)

5) 表面貯留比 Q_s/R は、最大 10 分間降雨強度が大きい程小さくなる傾向が認められる。この結果より、降雨強度が高い場合には、降雨開始時から地中への浸透が優勢にな

るのに対して、降雨強度が低い場合には、地中への浸透が抑制され表面貯留が優勢になると解釈される。

- 6)5)の事項を検証するため、表面貯留比 Q_s/R が異なる場合の、GL-0.1mおよび GL-0.2 mでの体積含水率の増加に着目した結果、以下の知見が得られた。すなわち、表面貯留比 Q_s/R が小さい場合には、GL-0.1mと GL-0.2mの体積含水率の増加の時間遅れはほとんどないのに対して、表面貯留比 Q_s/R が小さい場合には、GL-0.1mで体積含水率が増加を始めてから、かなり遅れて GL-0.2mでの増加が発生している。この表面貯留比 Q_s/R の大小による比較から、降雨強度が高い場合には、降雨開始時から地中への浸透が優勢になることが確認されたと推察される(図-5 参照)。

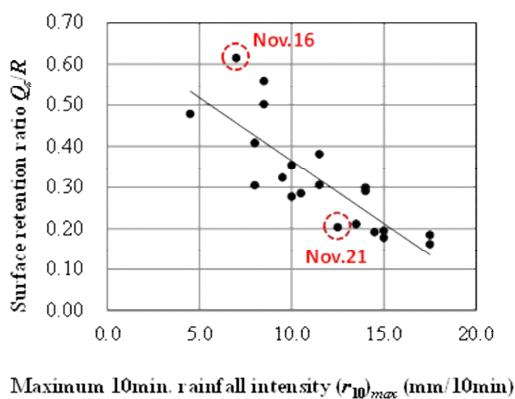


図-5 10分間最大雨量と表面貯留比の相関

- 7)浸透流解析において、一次元タンクモデルで算定される地中への浸透量を流入境界として入力した結果と、Neuman境界を用いた結果との比較検討より、以下の知見が得られた。Neuman境界を用いた解析では、インク瓶効果を考慮していないため、降雨開始時の流入量を過大評価することになる。一方、本提案手法では、インク瓶効果を含む非線形な関係となるSWCCに対して、表面貯留量という概念を導入することで、間接的に地中への浸透量を適切に表現していると解釈される。ただし、解析において降雨浸透に相当する吸水過程と排水過程でのヒステシスを考慮していないため、斜面表面付近での実際の体積含水率の変動過程を表現できていないことに留意されたい。しかし、本提案手法は、従来の手法に代わる降雨時の実際の地中への浸透量を簡便に評価できる手法と位置付けられると推察される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

大津宏康, 前田良刀, 矢部満, 高橋健二, 古賀博久, 豪雨時斜面安定問題における降雨波形の計測間隔に関する一考察, 地盤

の環境・計測技術に関するシンポジウム 2011 論文集, 2011, pp.65-70

大津宏康, 古賀博久, 浜崎智洋, 前田良刀, Nipawan CHALEIWCALARD: 短期間集中豪雨に対する転倒ます型雨量計の適用性に関する検討, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2012 論文集, 2012, pp.59-66

Y. Miyanaga, A. Kobayashi and A. Murakami, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol. 44, No.2, 2013, pp. 27-34

小林 晃, 山本 清仁, 岡田 謙吾, ため池堤体の効率的調査法 簡易弾性波速度分布測定の提案と複合評価, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), 2014, pp.1-10

大津宏康, 前田良刀, 益田浩, 高橋健二, 矢部満: 短期間集中豪雨に起因する斜面崩壊機構に関する研究, 材料, Vol. 63, No.3, 2014, pp.271-278

〔学会発表〕(計5件)

H. Ohtsu, International Collaborative Education on Geoenvironment for Disaster - Resilient Countries, HANOI GEOENGINEERING 2013, 2013, Hanoi, Vietnam

H. Ohtsu, Asian engineering technology for disaster management, National Engineering Conference & Thailand Engineering Expo 2013, Engineering Institute of Thailand, 2013, Bangkok, Thailand

H. Ohtsu, Geo-Risk Management on Underground Construction, RISK MANAGEMENT FOR URBAN UNDERGROUND CONSTRUCTION" RMUC 2013, Hanoi, Vietnam

H. Ohtsu, Hi. Masuda, Y. Maeda and K. Takahashi, A Study on the Characteristic of Rainfall Infiltration into Subsoil at a Slope, EIT-JSCE Joint International Symposium on International Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries 2013, 2013, Bangkok, Thailand

H. Ohtsu, J. Ikenaga and K. Takahashi: A Study on Applicability of Various Precipitation Indexes Considering the Characteristic of Runoff-Infiltration near Slope Surface, Proceedings of the 1st AUN/SEED-Net Regional Conference on Natural Disaster, 2014, pp.22-23,

Yogyakarta, Indonesia

〔図書〕(計1件)

大津宏康, 株式会社エヌ・ティー・エス出版, 斜面災害対策技術, 2014, pp.314-320

6. 研究組織

(1)研究代表者

大津 宏康 (OHTSU, Hiroyasu)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号: 40293881

(2)研究分担者

立川 康人 (TACHIKAWA, Yasuto)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号: 40227088

小林 晃 (KOBAYASHI, Akira)

関西大学・工学部・教授

研究者番号: 80261460

稲積 真哉 (INAZUMI, Shinya)

明石工業高等専門学校・その他部局等・講師

研究者番号: 90362459