

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 15 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：23380084

研究課題名(和文) 極端気象条件下における土砂災害の発生機構および災害軽減

研究課題名(英文) Triggering of landslides under extreme meteorological environment and landslide hazard mitigation

研究代表者

王 功輝 (Wang, Gonghui)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：50372553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：極端気象条件下における土砂災害の発生機構を解明し、新しい土砂災害の評価手法を開発するために、異常気象時に発生した土砂災害に対する現地調査、観測および室内実験研究を行った結果、大気圧の低下だけで初生地すべりが発生しなかったが、運動中の地すべり変動が大気圧によって変化すること、不飽和状態にある土試料におけるせん断に伴い、せん断ゾーン附近の土層において水分遷移現象が発生する、土層の撥水性が斜面崩壊の発生・運動機構を大きく影響することが分かった。

研究成果の概要(英文)：To understand the mechanism of landslides occurring during abnormal weather condition and then to develop a new evaluation approach of landslide hazard, we made field survey of some landslides recently occurred in Japan, set up a new monitoring system on a landslide, and also did laboratory tests. The main results could be summarized as follow. 1) Lowered air pressure during typhoon failed to reactivate a landslide, but affected the movement after the sliding was triggered by rainfall. 2) Localized shearing on unsaturated soil layers may result in the moisture transfer within the soil layer and then affect the shear behavior or stability. 3) Water repellency of the soil layer may greatly affect the initiation and movement mechanism of shallow landslides.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：崩壊 地すべり 土石流 異常気象 気圧 豪雨

1. 研究開始当初の背景

近年、台風や熱帯低気圧に伴う豪雨による土砂災害が相次いで生じている。平成 18 年は、台風 13 号により死者・行方不明者 10 名、重軽傷 400 名などの被害が出た。平成 21 年は、7 月の中国・九州北部豪雨による土砂災害により、死者・行方不明者 17 名などの被害が生じた。平成 22 年は、7 月の集中豪雨により、広島県庄原市に死者 1 名、全壊・半壊家屋 23 棟という大きな被害をもたらした。また、10 月の豪雨により、奄美大島に住宅や学校が浸水し、大量の土砂が流れ込むなど大きな被害が出た。

一方、斜面防災の現状としては、各地域でハザードマップを作成しており、土砂災害に関するモニタリング技術・数値シミュレーション技術、土砂災害防止における対策工法などが数多く開発されてきた。これらの成果や技術などは今までの防災計画に一定の役割を果たしたことは否定できない。しかし、多くの研究成果が得られたにもかかわらず、毎年のように豪雨に伴う土砂災害により、甚大な被害が絶えずに発生している。従って、斜面災害の防災力の更なる向上が早急に求められている。

日常に存在する大気圧の変化が誘因として地すべり変動を起こしうることが、研究代表者らの研究により初めて解明された。従って、台風などの異常気象時に大幅に変化する大気圧が急斜面の安定性を大きく影響することが予想される。例えば、大気圧の低下により、(1) 飽和土層における地下水圧が変化し、斜面の安定性が低くなること、(2) 不飽和土層において、サクシオン (= 間隙空気圧 - 間隙水圧) が小さくなることが考えられる。即ち、異常気象条件下における豪雨による斜面災害の予測には、大気圧の低下と雨の影響を同時に考えなければならない。しかし、今までの研究においては、この大気圧の変化が斜面安定へ及ぼす影響についての研究は全くされていない。

また、降雨に起因した斜面移動現象に最も支配的な因子は、土壌含水量の増加と地下水位の上昇であることが古くより指摘されている。従前より降雨—不飽和・飽和浸透流の過程を考慮した斜面災害予測手法が多く開発された。また、斜面災害に関する研究や実務時の検討では、地下水を一様で層状の水面形として取り扱っている例が非常に多い。ところが自然斜面内を流れる地下水は、斜面内の不均質性を反映して層状で一様に流れているのではなく、水脈状で流れており、しばしば斜面崩壊・地すべり発生斜面に湧出して

いる様が見受けられ、これらの水脈が、降雨時における地下水の流動や斜面土層における地下水圧の分布、そして斜面土層の安定性を大きく影響することが予想される。

従って、本研究では、土砂災害発生の危険度が高まっている地域における地すべり地を試験地として、現地調査と計測(大気圧変化、降雨、地下水位、不飽和土層の含水量、サクシオン、斜面変動、地下水脈分布)を実施し、室内実験(リングせん断試験による不飽和土せん断試験+大気圧の変化による飽和土層における地下水圧の変化及び不飽和土層におけるサクシオン変化に関する試験)を行い、台風や熱帯低気圧に伴う降雨による斜面災害の発生機構を解明し、より信頼性の高い斜面災害の評価手法を開発する。

2. 研究の目的

本研究では極端気象条件下における土砂災害の発生機構を解明するため、現地観測および室内試験研究を通じて、下記の点を明らかにする。

過去の豪雨時に発生した斜面災害の地質、地形、降雨状況、大気圧変化および斜面土層の物性特徴を解明する。

大気圧の変化および降雨による地下飽和土層における地下水圧の変化および不飽和土層におけるサクシオンの変化を解明し、これらの変化が斜面の安定性に及ぼす影響を的確に評価する。

物理探査により、豪雨時の斜面崩壊を大きく左右する流動地下水の水脈経路の分布を調査する手法を開発し、これらの分布と斜面崩壊の関係を解明する。

実験研究および現地計測を通じて、新しい不飽和土に関する実験手法を開発する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、下記のように研究を行った。

(1) 地すべりに対する現地計測

台風に伴う豪雨により斜面災害が頻発する宮崎県で、H17 年の台風 17 号により発生した斜面災害を調査した。また、現在斜面変動が進行中であり、次の台風の時に地すべりが発生する可能性が極めて高いと考えられる、宮崎県西米良村二畝ノ谷地すべり地において地すべり現地計測を行った。

二畝ノ谷地すべりは大規模(長さ:約 500m; 幅:約 200m;最大深さ:約 40m)で、砂岩頁岩互層の地層において発生したものである。H18 年の集中豪雨で、末端の所において小規模な地すべりが発生した。その後、林道災害復旧

事業により、崩壊した所が植生基材吹付け工で復旧されたが、H22年に斜面の中部に地割れが現れ、H24年の降雨により、地割れが斜面全体において広がって、大規模地すべりの輪郭が現れた。すべりの変動現象を観測するため、地すべりの末端において、深さ20mのボーリング2本を掘って、地下水位・水温計（設置深度:19.5m）、地中伸縮計(設置深度:7mと20m)、地表伸縮計、気圧計および雨量計を設置し、H23年11月～H25年8月の間で1秒間の間隔でリアルタイム地すべり現地観測を行った。また、地すべり変動により斜面土層における物性の変化を高精度表面波探査により調査した。さらに、高精度地上型レーザスキャナを用いて地すべり変動後の地形変化を測量した。

(2) 地すべりに対する現地調査

H23年の台風12号により紀伊半島において発生した土砂災害(例えば、和歌山県田辺市の伏菟野地すべりと栗栖川の地すべりおよび奈良県五條市清水地区の地すべり)に対して、現地調査を行い、土砂災害発生の地質、地形および斜面土層状況を調べた。また、地すべり発生後の地形を高精度地上型レーザスキャナで測量し、地形変化による新たな二次災害危険度評価手法の開発を試みた。

また、2013年10月16日の台風26号に伴う豪雨により、伊豆大島の三原山西側斜面において大規模な表層崩壊が発生した。崩壊した土砂が、大量の倒木とともに、約2.4kmを流下し、下流側の元町地区を襲って、死者・行方不明者約40名、家屋の被害300戸以上という甚大な被害をもたらした。この災害の発生運動機構を解明するために、発災後に現地調査・観測および室内実験を行った。

(3) 室内実験研究

異なる含水量を持つ土試料(珪砂およびレス)に対して、リングせん断試験を実施した。これによって、不飽和状態である試料を用いたせん断試験において、せん断によりせん断ゾーンが形成され、せん断ゾーン付近の土層における土壌水分の遷移現象を調べた。

伊豆大島の大規模斜面崩壊の発生・運動機構を解明するため、リングせん断試験機を用いて、崩壊の源頭部から採取した試料(火山灰とレス)に対して飽和非排水・自然排水せん断試験を行った。また、元町地区から収集された崩土を用いて、降雨による斜面崩壊模型実験を実施した。実験は異なる土層厚、初期含水量および土層密度下で実施され、実験

中に土層内部の土壌含水量変化、斜面変動および水圧を計測し、斜面崩壊の発生・運動機構を調べた。

土層の撥水性の変化による降雨時における斜面崩壊の発生・運動機構の変化を解明するために、異なる撥水性をもつ斜面土層模型を用いた降雨実験を実施した。実験において、降雨に伴う斜面土層内部の土壌含水量、水圧および変形を計測すると共に、表面流出および土砂侵食を計測した。

4. 研究成果

(1) 二畝ノ谷地すべり地に対する現地調査・観測を実施した結果、下記のことが分かった。

二畝ノ谷地すべりの活動が大雨の時に活発化するが、小雨による斜面の加速変動が認められなかった。

地すべり変動が大気圧の変化に伴って変化する(図1)。気圧が低くなると、地すべりが加速して変動する。しかし、台風4号が通過した日には、大気圧が大幅に低下したものの、観測している所において地すべりが形成されなかったため、明瞭な斜面変動が認められなかった。即ち、大気圧だけの低下による地すべりの発生ができなかった。

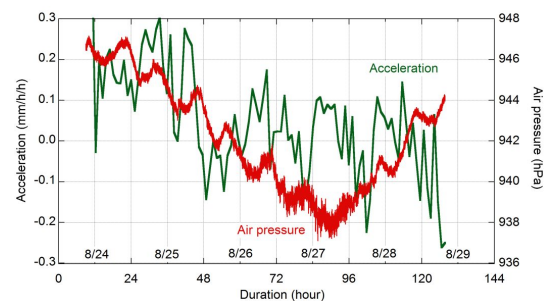


図1 大気圧の変化と地すべり変動の加速度

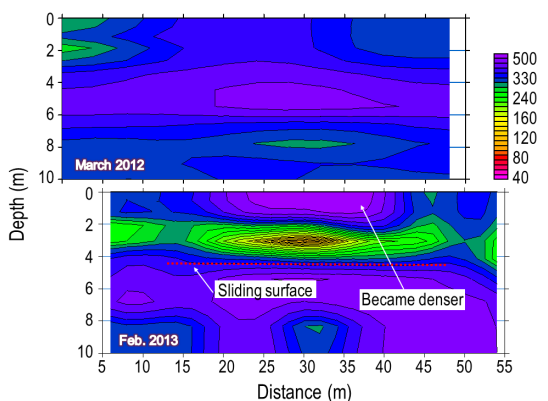


図2 斜面変動による地すべり末端土塊におけるS波速度構造変化

地すべり運動によって、すべり面附近の土層が粗な状態となったこと、地すべり移動土塊の脚部が圧縮され、土層の密度が高く

なっていることが、表面波探査の結果で分かった(図2)。

(2) 室内実験研究結果

伊豆大島災害に関する実験研究結果
伊豆大島斜面崩壊源頭部(すべり面の上下にある土層)から採取した試料(火山灰とレス)に対して飽和非排水リングせん断試験を実施した結果、両試料においても、崩壊に伴って高い過剰間隙水圧が発生し、せん断抵抗がほぼゼロまで低下しうることが分かった。

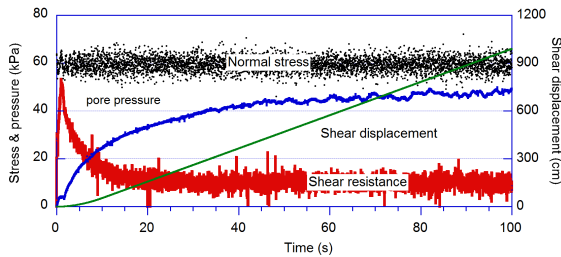


図3 伊豆大島斜面崩壊土層に対する飽和自然排水リングせん断試験結果

また、崩壊土層厚が平均で80cmであるため、崩土が非排水状態ではなく、自然排水状態にあると考えられる。こういった排水過程をも考慮し、リングせん断試験器のせん断箱の排水口を開けたままに、水の粘性係数より15倍高い液(SM15)で飽和した試料に対する高速せん断試験を行った。その結果、高い過剰間隙水圧が蓄積でき、せん断抵抗が著しく低下したことが分かった(図3)。すなわち、斜面土層が浅くても、崩壊土層において液状化現象が発生しうることが分かった。

元町地区から収集された崩土を用いて、降雨による斜面崩壊模型実験を実施した結果、いずれの実験においても、後退性崩壊が発生し、崩壊した土塊が高速で流下したことで、崩壊により崩壊土塊において高い過剰間隙水圧が発生しうることが分かった。

せん断による土壌水分の遷移現象
異なる初期含水量を持った試料に対して、リングせん断試験を実施した結果、せん断によりせん断ゾーンが形成され、せん断ゾーンおよびその上下にある土層において土壌含水量変化があることが分かった。これらの土壌含水量の変化は初期含水量によって異なる。すなわち、土壌水分が周囲土層からせん断ゾーン内へ遷移するかあるいは逆な現象になるかは土層の初期含水量によって異なる(図4)。これらの結果は、不飽和土斜面におけるすべり面の形成および強度の変化の解明に

対して極めて重要なことと考えられる。

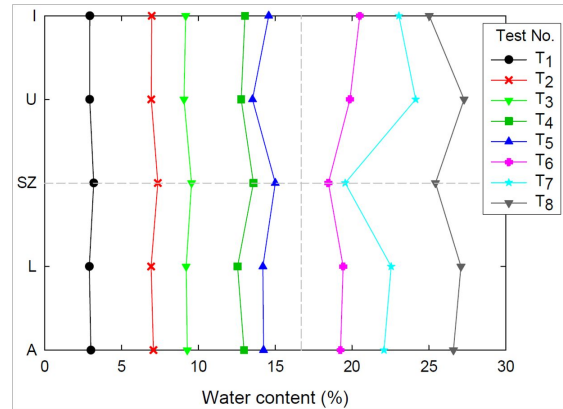


図4 異なる初期含水量を持ったレスに対するせん断試験における土壌水分遷移現象。I: 初期含水量; U, SZ, L: 試験後のせん断ゾーンの上, 中及び下の土層における土壌含水量。

土壌の撥水性と斜面崩壊

異なる撥水性が有する土層を用いた斜面降雨土層崩壊実験を実施した結果、土層の撥水性によって、斜面崩壊の発生機構が異なることがわかった。撥水性のない土層においては、降雨浸透により斜面土層の含水量が増加し、地すべり的な崩壊が発生したが、土層の撥水性が高くなると、降雨浸透が発生しにくくなり、表面流出による穏やかな表層浸食現象だけが発生した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

- Wang, G., Zhang, D., Furuya, G., Yang, J. (2014): Pore-pressure generation and fluidization in a loess landslide triggered by the 1920 Haiyuan earthquake, China: A case study. *Engineering Geology*, 174:36-45. 査読有, doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.006
- Zhang, F.Y., Wang, G., Kamai, T., Chen, W.W (2014): Effect of pore water chemistry on undrained shear behaviour of saturated loess. *Quarterly J. Engineering Geology and Hydrogeology*, 印刷中, 査読有, doi.10.1144/qjegh2013-085
- Miao, H., Wang, G., Yin K.L., Kamai, T., Li, Y.Y. (2014): Mechanism of the slow-moving landslides in Jurassic red-strata in the Three Gorges Reservoir, China. *Engineering Geology* 171: 59-69, 査読有, doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.017
- Wang, G., Suemine, A., Zhang, F., Hata, Y., Fukuoka, H., Kamai, T. (2014): Some fluidized landslides triggered by the 2011

Tohoku Earthquake (M9.0), Japan. Geomorphology, 208:11-21, 査読有, doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.009.

Wang, G., Huang, R.Q., Chigira, M., Wu, X.Y., Lourenço S.D.N. (2013). Landslide amplification by liquefaction of runout path material after the 2008 Wenchuan (M8.0) earthquake, China. Earth Surface Processes and Landforms, 38:265-274, 査読有, DOI: 10.1002/esp.3277

Zhang, D.X., Wang, G. (2013): Reservoir bank slope in Laxiwa Hydropower Station, China. Italian Journal of Engineering Geology and Environment - Book Series N.6: Proceedings of International Conference on Vajont -1963-2013: Thoughts and analyses after 50 years since the catastrophic landslide, pp: 513-520, 2013, 査読有, DOI: 10.4408/IJEGE.2013-06.B-49

Zhang, F.Y., Wang, G., Kamai, T., Chen, W.W., Zhang D.X., Yang J. (2013): Undrained shear behaviors of saturated loess at different concentrations of sodium chlorate solution. Engineering Geology 155: 69-79, 査読有, doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.018

Zhang, D.X., Wang, G., Yang, T.J., Zhang, M.C., Chen, S.H., Zhang, F.Y. (2013): Satellite remote sensing based detection of the deformation of a reservoir bank slope in Laxiwa Hydropower Station, China. Landslides 10(2), 231-238, 査読有, DOI 10.1007/s10346-012-0378-9

Liu, J., Shi, B., Lu, Y., Jiang H.T., Huang, H., Wang G., Kamai, T. (2012): Effectiveness of a new organic polymer sand-fixing agent on sand fixation. Environmental Earth Science 65:589-595, 査読有, DOI 10.1007/s12665-011-1106-9

〔学会発表〕(計9件)

Wang, G. (2013): Landsliding phenomenon under abnormal weather conditions: a case study on Nisenotani landslides (Keynote speech). In: Proc. workshop of rainfall-induced landslides warning technology, 8p. Taipei, October 21-23, 2013.

古谷元, 末峯章, 高野祐典, 王功輝, 新井場公德 (2013): 結晶片岩地すべりにおける連続地温計測による流動地下水脈の動態観測. 日本地すべり学会第52回研究発表会, 3-9. 2013年8月28-31日.

Aiguo XING, Gonghui WANG (2013): Dynamic analysis of the Niuniangou rock avalanche triggered by the May 12, 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. 日本地すべり学会第52回研究発表会, 3-18, 島根, 2013年8月28-31日.

王功輝, 末峯章, 松浦純生, 新井場公德 (2013): 異常気象時の斜面変動現象: 二畝ノ谷地すべり地における観測結果. 日本地すべり学会第52回研究発表会, P-14, 島根, 2013年8月28-31日.

Aiguo Xing, Gonghui Wang (2013): A catastrophic rockslide-debris avalanche at Zhaotong, Yunnan, China: description and dynamic analysis. Japan Geoscience Union Meeting 2013, HDS06-14, 2013年5月23日

末峯章, 日浦啓全, 浅井和由, 柳楽祐平, 王功輝 (2012): 結晶片岩地すべり地の地下水年代測定例. 第51回日本地すべり学会研究発表会講演集, No.2-16, pp.60-61, H24年8月28日~31日, 札幌

日浦啓全, 末峯章, 田中昭雄, 王功輝 (2012): 地すべり地内の地下水の水みちの形成に対する地質構造の寄与. 第51回日本地すべり学会研究発表会講演集, P-24, pp.242-243, H24年8月28日~31日, 札幌

松浦純生, 岡本隆, 阿部和時 (2012): 積算暖度法を用いた土砂災害の危険度評価手法. 第51回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp: 100. H24年8月28日~31日, 札幌

Wang, G., Suemine, A., Zhang, F.Y., Fukuoka, H., Kamai, T. (2012): Some catastrophic landslides triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. 11th Int'l & 2nd North American Symp. on Landslides, 1001-07. Banff, June 2-8, 2012.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
○取得状況(計0件)

〔その他〕
なし.

6. 研究組織

(1)研究代表者

王功輝 (WANG GONGHUI)
京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：50372553

(2)研究分担者

末峯 章 (SUEMINE AKIRA)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：00109092

釜井 俊孝 (KAMAI TOSHITAKA)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：10277379

松浦純生 (MATSUURA SUMIO)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：10353856

(3)連携研究者

なし