



京都大学 防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

拠点研究（一般推進）
2023KG-03

Slow-to-fast 斜面変動現象の総合的解明 及び崩落時刻予測の高度化

令和6年5月30日

May 30, 2024

研究代表者 王 功輝

Coordinator Gonghui WANG

拠点研究（一般推進）（ 課題番号： 2023KG-03 ）

京都大学防災研究所長 殿

[申請者（研究代表者）]

氏 名：王 功輝

職 名：教授

所属機関名：防災研究所・斜面未災学研究センター

下記のとおり、実施結果について報告します。

記

課題名：Slow-to-fast 斜面変動現象の総合的解明及び崩落時刻予測の高度化

研究代表者（氏名，所属，職名）：王 功輝，斜面未災学研究センター，教授

研究期間：令和 5 年 5 月 1 日 ～ 令和 6 年 3 月 31 日

共同研究参加者数：15 名（所外 11 名，所内 4 名）

1. 研究目的・趣旨

日本では、毎年のように、地すべり災害が多発している。特に、ゆっくりとした変動から最終的に高速で崩落する（slow-to-fast）斜面変動現象による被害は廃滅的であり、地域社会に大きな被害を及ぼしている。こういった斜面変動現象の発生・運動機構を解明し、その発生危険度をより的確に評価することは安全な社会の形成において急務である。本研究は、未だに明らかになっていないslow-to-fast斜面変動現象を総合的に解明すると共に、地すべり移動土塊やすべり面粘土の強度特性に基づいた斜面変動の予測を実施し、より精度の高い斜面崩落時刻予測手法の構築を目指す。具体的に、①高い時間分解能での現地観測によるslow-to-fast斜面変動実態の解明、②室内実験による排水／非排水状態での地すべり土塊／すべり面粘土のせん断強度特性（液状化、残留強度のせん断速度・状態依存性）とslow-to-fast変動機構の解明、③Slowとfastの斜面変動現象を支配するすべり面の形成・発達過程及び土塊液状化過程の解明、④上記の結果に基づく斜面変動の応答解析及び崩落時刻予測手法の高度化、を行う。

2. 研究経過

研究の遂行のプロセスは、以下の通りである。

- ① 異なる気候条件・地質背景を有する地域において発生した地すべりに対して、斜面変動や地下水位及び地質調査のボーリングデータ等を収集した。
- ② 結晶片岩型の地すべりである徳島県三好市西井川地すべりにおいて、変位計，地下水位計，土層傾斜計及び気圧計などによる斜面変動観測を行った。
- ③ 地すべり地から採取したすべり面粘土などの土試料に対して、リングせん断実験を行い、粘性土のせん断強度のせん断速度・状態依存性を調べた。また、リングせん断試験機を用いたクリーブ破壊実験を行い、slowからfast変動までの時間と変位、速度及び加速の関係を調べた。大規模岩盤地すべりにおけるslow-to-fast現象を研究するために、地すべり現地から採取した岩塊試料及び岩塩を用いたせん断実験を行い、slow-to-fast変動中におけるすべり面の形成・

発達過程を調べた。

3. 研究成果

2022年12月31日に発生した山形県鶴岡市西目地区の地すべりに対する現地調査及び室内実験を実施した。その結果、地すべりが風化した安山岩土層内にすべり面が形成され、そのすべり面には筒状のハロイサイトが形成されたことが明らかになった。また、すべり面粘土のせん断強度には強い速度効果があることを判明した。さらに、すべり面粘土の繰り返しせん断特性に基づいて、2019年6月18日に発生した山形県沖地震が斜面の不安定化過程に与える影響も検討した。

新潟県糸魚川市来海沢地区の泥岩地域において、2021年3月4日に発生した流動性の高い地すべりに対する現地調査及び室内実験研究を行った。その結果、飽和状態にある土層において、崩壊土砂の運動に伴って高い水圧が発生し、これが崩壊土砂を流動化させたと考えられる。また、排水状態における飽和土層の残留強度が、せん断速度の増加に伴い初めに低下し、その後に再び増加することが明らかになった。さらに、一つの再活動型地すべりにおいて、観測された地下水の変動から、すべり面粘土のせん断強度の速度効果を考慮した斜面変動の予測を行った。

大規模岩盤地すべり地から採取した試料を用いてリングせん断試験を行った結果、試料のせん断強度は、試料中の細粒分（ナノ材料）の含有率、せん断速度、及び垂直応力によって異なることが明らかになった。これらの実験結果を元に、規模岩盤地すべりの高速運動機構を検討した。

四国山地において、非常に強く変形が進んだ地質領域の崩壊地を徹底調査し、それによって降雨後に崩壊にいたるプロセスの解明を行った。砂岩メランジュ地域の極めて亀裂が多く、角礫化した地域では、特に崩壊の直後に相当の湧水があったことが特定できた。風化および侵食によって堆積した表土層を内部からの水圧が働き、それが崩壊したと思われる状況を確認できた。また、2011年紀伊山地の深層崩壊発生斜面で拡大崩壊の進行を伸縮計や移動杭により観測を行い、崩壊に至るまでの変形速度の変化や崩壊発生時の振動計測によりそのスペクトル特性が得られた。

4. 詳細

研究成果の一部はすでに国際学会誌に掲載されているため、以下では国際学会誌に掲載された論文の概要と結論について報告する。学会誌の言語に従い、英語または日本語で述べる。なお、山形県鶴岡市西目地区及び新潟県糸魚川市来海沢地区の地すべりを対象とした研究内容については、今後投稿予定のため、この報告書には記載しない。

4.1 prediction of landslide velocity and displacement prediction

It is noted that the content concerning this topic has been published, and in this report, we will mainly introduce the abstract and conclusions. More details could be found in:

- Haibo Miao, Gonghui Wang (2023): Prediction of landslide velocity and displacement from groundwater level changes considering the shear rate-dependent friction of sliding zone soil. *Engineering Geology* 327:107361.

4.1.1 Abstract of this study

In reactivated slow-moving landslides, the prediction of velocity and displacement is a crucial issue for understanding landslide kinematics and realizing warning systems. A variety of data-based numerical models have been used to predict landslide displacement; however, kinematics-based models, which consider the shear behaviors of soils within the sliding zone that fundamentally control landslide movement, have been relatively limited. In the present research, the Tangjiao landslide in the Three Gorges Reservoir (TGR) in China was taken as a case study. The monitored ground displacement from March 2007 to September 2016 and deformation signs observed in the field survey show that the Tangjiao landslide experienced slow movement with the ground displacement increasing stepwise in response to seasonal rainfall and periodic fluctuation of the reservoir water level. We performed a rate-stepped continuous ring shear test on two specimens remolded from the sliding zone soil at shear rates ranging from 0.01 to 10 mm/s. The test results show that the residual strengths of both specimens show a nonmonotonic shear rate dependency, i.e., a weak negative shear rate dependency (fitted by an exponential law) followed by a significant positive dependency (fitted by a linear law). The transition from a negative shear rate dependency to a positive shear rate dependency may be attributed to the change in shear mode when the shear rate exceeds a critical value. This complex shear rate-dependent residual behavior regulates the movement of the Tangjiao landslide in the reactivated state. On this basis, a kinematics-based model for predicting landslide velocity and displacement was proposed by taking into account the shear rate-dependent friction of the sliding zone soil. This model can reproduce the velocity and displacement of the Tangjiao landslide from the change in groundwater level (i.e., stress perturbations in this paper). The results suggest that by using this model, the well-investigated material parameters can enhance the prediction reliability and accuracy of landslide behavior. Our proposed approach, with the ability to reliably predict landslide velocity and displacement, such as the Tangjiao landslide in this work, has important implications for predicting movement trends and developing early warning systems for reactivated slow-moving landslides, especially translational landslides under similar geological conditions.

4.1.2. Conclusions of this study

In this study, the deformation characteristics of a large-scale reactivated landslide in the Jurassic strata in the TGR, China, were analyzed first. Ring shear tests on two specimens remolded from the sliding zone soils in two boreholes were carried out to examine the shear rate dependency of the residual strength by increasing the shear rate stepwise. The residual strength indices were also determined. On this basis, a kinematics-based model taking into account the shear rate-dependent frictional strength of the sliding zone soil was proposed to predict the landslide velocity and displacement. Finally, the implications for landslide reactivation from the shear rate dependency and the applicability of the prediction model were discussed. The following conclusions can be drawn:

- 1) The Tangjiao landslide is a slow-moving landslide that is now undergoing intermittent reactivation with the ground displacement increasing stepwise as a result of the seasonal rainfall and periodic fluctuation of the RWL.
- 2) The sliding zone soil of the Tangjiao landslide shows a nonmonotonic shear rate dependency of the residual strength, i.e., a weak negative shear rate dependency (fitted by an exponential law), followed by a significant positive shear rate dependency (fitted by a linear law). The transition of shear rate dependency may be due to the change in the shear mode when the shear rate exceeds a critical value (i.e., 0.5 mm/s).

This complex shear rate dependency of the residual strength regulates the reactivated movement of the Tangjiao landslide.

- 3) The intrinsic viscosity of the sliding zone soil of the Tangjiao landslide obtained by back analysis is approximately 130 times higher than that determined by the ring shear test. This discrepancy between the laboratory-scale and the field-scale intrinsic viscosities indicates a disparity between laboratory-scale and the field-scale sliding resistance, which will lead to unreliable prediction of the landslide velocities.
- 4) The SRF model considering the shear rate-dependent frictional strength of sliding zone soil can reproduce the velocity and displacement of the Tangjiao landslide from the changes in the recorded groundwater level. When using this model, well-investigated material parameters and accurate recorded groundwater levels would enhance the prediction reliability and accuracy of landslide behavior.

4.2 On the effects of nanomaterials on the residual shear strength of dry sandy mixtures

It is noted that the content concerning this topic has been published. Here we will also just introduce the abstract and conclusions. More details could be found in:

- Shengshan Wu, Gonghui Wang (2024): Mechanical effects of nanomaterials on the residual shear strength of dry sandy mixtures: Implication for the high mobility of rock avalanches. *Engineering Geology* : 107569 (Accepted: May 26, 2024; published online: May 28, 2024) <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107569>

4.2.1. Abstract

Nanoparticles found in rock avalanches and natural faults were inferred to be the reason for the ultra-low shear resistance of the materials along the shear surface. Nevertheless, this inference has not been physically verified yet. To investigate the role of nanoparticles in the shear behavior of granular materials, we conducted a series of ring shear tests on silicon dioxide nanoparticles (SN), silica sand (S8), and mixtures of the S8 with different contents of SN, under varying normal stresses (σ) and shear velocities (V). Our results showed that the shear strength (μ) of SN is high when σ is small (≤ 215 kPa at our test range), even though the maximum shear velocity is about 210 cm/s, but shows a great decrease under higher σ (≥ 619 kPa). The shear strength of mixtures varied with SN content. For S8 (M0) and the mixture of 10% SN (M10), when sheared under small σ , μ first decreased slightly with increasing V when V is smaller than 1 cm/s, after that it increased slightly with further increase of V . Nevertheless, this kind of shear-rate dependent behavior was not observed in the tests under higher σ . When the content of SN in the mixture was $<20\%$, μ increased with the increase of SN content. However, with further increase of SN content, μ decreased. Under high normal stress conditions, distinctive powder rolls were observed on the shear surface formed on the tests. When the mixtures with lower SN content ($\leq 50\%$), the powder rolls were not observed. We inferred that powder rolls can be produced under high SN content and high normal stress conditions, and this structure altered the particle movement mode from sliding friction to rolling resistance, resulting in a significant decrease in the shear strength. These findings provide valuable insights into the shear behavior of granular materials with nanoparticles and then provide evidence for a better understanding of the high mobility of rock avalanches.

4.2.2. Conclusions:

To clarify the role of nanoparticles in shear behavior and investigate their potential as lubricants to weaken

shear strength during high-velocity shearing, we conducted a series of ring shear tests on SN, S8, and mixtures of the two, under varying normal stresses and shear velocities. The following conclusions can be drawn from our study:

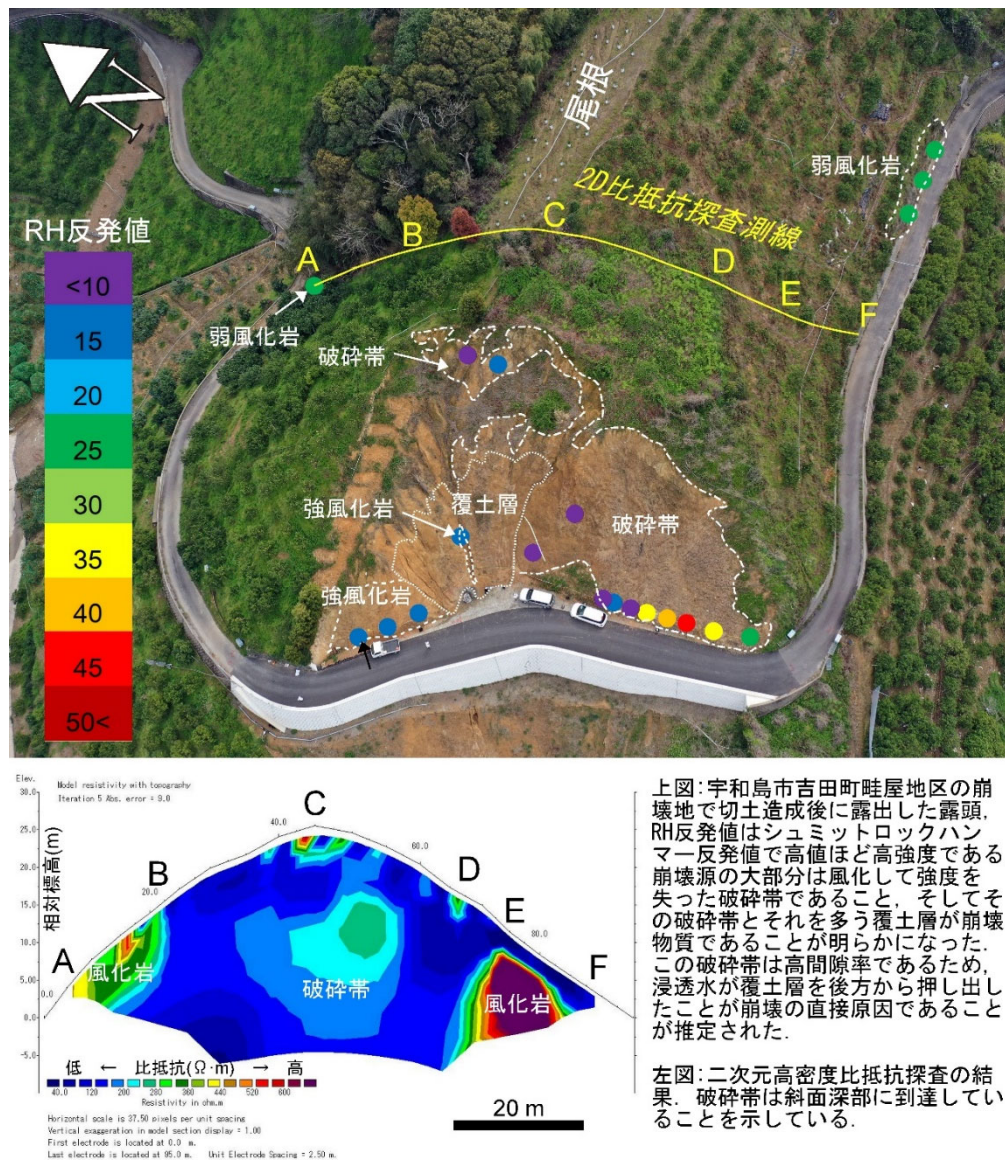
1. The shear resistance of pure nanomaterial SN is high and stable at lower normal stress levels, even though the maximum shear velocity is approximately 210 cm/s. However, with the increase of applied normal stress (619 and 1030 kPa in this study), the shear resistance decreases significantly.
2. The shear strength of the mixtures of S8 depends on the SN content. When the SN content is less than 20%, the shear strength of the mixture increases with SN content. However, a further increase of SN in the mixture will result in a significant reduction in the shear strength. These results indicate the different roles of SN in the shear behavior of the mixture, namely, the SN with less content will reduce the void space, resulting in the increase in the contacting areas of grains, while further increase of SN in the mixture will result in the fact that the main shear behavior will be mainly controlled by the nanoparticles.
3. The SEM observation on the shear surfaces formed in the tests on SN and mixtures of S8 with high content of SN under higher normal stress (619 and 1030 kPa) revealed the formation of powder rolls laying above the sliding surface and being perpendicular to the sliding direction. When the applied normal stress or the content of SN in the mixtures is higher, the presence of powder rolls becomes denser. Therefore, it is inferred that the significantly lowered shear strength of SN or mixtures with higher content of SN under higher normal stress results from the formation of these powder rolls, which enable the particle movement mode from sliding to rolling.

Finally, it is noted that although our test results showed that the shear resistance of the mixtures can suffer from significant reduction when the applied normal stress or the content of nanoparticles is high enough, the application of our test results to natural rock avalanches needs further scrutiny. In most cases the rock avalanches featured by large scale enable the displaced materials to be loaded by high normal stress during the transportation due to the great thickness, however, the content of nanoparticles in the sliding mass (or along the sliding zone) will be a key issue in affecting whether the weakening mechanism as shown in Fig. 5 can occur or not. Nevertheless, our results provide insight into understanding the possible roles of nanoparticles in the hypermobility of rock avalanches, because the threshold of nanoparticle content in the mixture could be different under differing normal stress, and the content of nanoparticles may increase due to the continuous pulverization of rocks with the progress of movement. The threshold of nanoparticle content may also be differing for different types of nanoparticles. Concerning this, further study by using different types of nanoparticles will be necessary and are undergoing.

4.3 変形砂岩地域の斜面崩壊危険度調査

2018年の西日本豪雨で比較的厚い岩盤崩壊が多発した地域を調査し、その場所の地質特性を調査した。その結果、崩壊の多くは、地殻の比較的浅部での断層変形によって破碎・変形した砂岩領域に特徴的に崩壊が多発していることが明らかにあった。これはメランジュと呼ばれる地質帯であるが、砂岩を多量に含む領域は限られる。砂岩の浅部断層変形では、空隙の形成が生じると考えられ、鉱物脈が充填されていることが多い。それが風化したことにとって比較的連続的な開口が形成されている。特に

断層角礫が存在する破碎帯は特徴的に流動的な深層崩壊を形成していたが、それは大量の浸透水が深部まで浸透し、破碎帯の表面を覆う低透水性の覆土層に水圧が作用していたものと考えられる。これは、崩壊の直後に相当の湧水があった写真証拠から判明した他、切土造成で内部構造が露出した露頭の分析、透水試験、比抵抗探査を組み合わせ、判明した事実である（図－1）。本研究は変形砂岩地域の危険性とその災害発生過程が具体的に明らかになったおそらく初めての事例であり、斜面災害危険地域の抽出において重要であることが判明した。



図－1 調査場所と電気探査結果図

4.4 深層崩壊発生斜面における斜面崩壊危険度調査

2011年紀伊山地の深層崩壊発生斜面で拡大崩壊の進行を伸縮計により観測を行い、崩壊に至るまでの変形速度の変化や崩壊発生時の地震動計測によりそのスペクトル特性が得られた。計測対象面は、紀伊山地中央部の十津川沿い（宇宮原）に位置する。この斜面では、2011年の台風12号による紀伊山地災害時に、中規模の深層崩壊が発生した。地質は、四万十付加体の美山コンプレックスに属する破断

層や混在岩が分布する。地質構造は、北から北西傾斜の流れ盤構造をなす。拡大崩壊に伴う斜面変形を計測するために、側方崖から派生する小崖を挟んで伸縮計を設置し、10分間隔で伸縮量を計測した。崩壊時の地震動を計測するために側方崖から約120m離れた斜面中腹に速度型地震計を設置し、サンプリング間隔0.01秒で速度の3成分（上下、南北、東西）を計測した。転倒式雨量計を、側方崖から約300m離れた道路沿いに設置し、5分間隔で雨量を計測した。図-2に、拡大崩壊発生までの伸縮計の伸び量と、累積雨量の時間変化を示す。拡大崩壊は、2020年7月9日23時30分～40分に発生した。崩壊体積は約45,000m³である。崩壊発生前の降雨条件は、時間雨量12mmから28mmの強雨が約14日間断続的に発生し、この間の累積雨量は753mmに達した。伸縮計のデータを用いて、斎藤（1968）の方法により、2020年7月1日から崩壊発生までの区間を3次クリープ段階とみなして、崩壊発生7時間前の伸縮量を使って崩壊時刻を予測したところ、実際の崩壊発生時刻より約70分遅れで崩壊時刻を予測できた。拡大崩壊による地震動の特徴は、波形の立ち上がりが不鮮明で全体として紡錘形を取る。継続時間は約30秒である。静穏時と崩壊発生時の速度波形のスペクトル解析を行った結果を図-3に示す。大崎順吉博士作成のラグウィンドウによるスペクトルの平滑化サブルーチン（LWIN）を使用した。崩壊時の卓越周波数は2～10Hzで、10Hz以上の高周波成分も含まれていた。

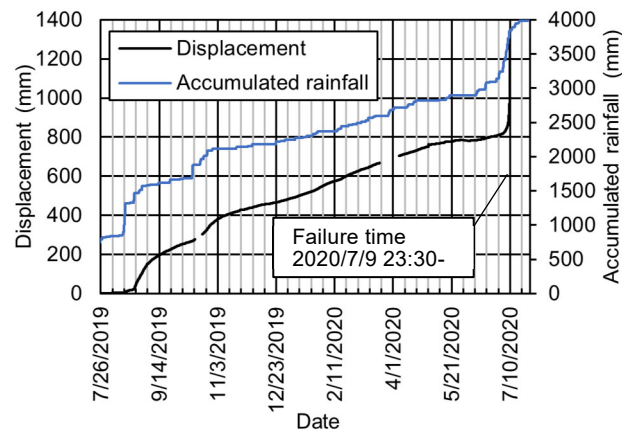


図-2 拡大崩壊発生前の伸縮計の伸び量と累積雨量

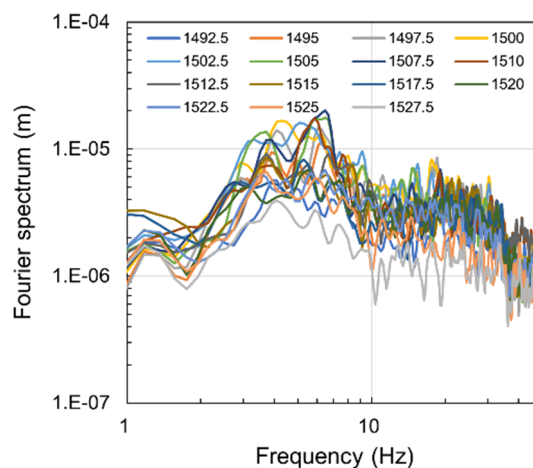


図-3 拡大崩壊発生時のフーリエスペクトル（N-S成分）

5. 研究成果の公表

山崎新太郎・渡邊達也 (2023): 砂岩の風化した断層破碎帯を素因とする破壊的流動性崩壊. 日本地すべり学会誌, 60(6): 7-15.

山崎新太郎 (2023): 付加体メランジュの砂岩地域における深層崩壊の多発. (公社) 日本地すべり学会第 62 回 (2023 年度) 研究発表会, 2-8.

山崎新太郎 (2023): 砂岩の変形と風化がもたらした深層崩壊の集中的発生場. 日本地質学会第 130 年学術大会, G3-O-1.

荒井紀之 (2024) : 1892 年四国山地東部で豪雨により発生した保瀬の崩壊の地質・地形学的素因について. 令和 5 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D104.

Shengshan WU, Gonghui WANG (2024): Revealing a Possible Shear Strength Weakening Mechanisms Based on Microscopic Insights from Ring Shear Tests. 令和 5 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P19.

王功輝 (2024) : ハロイサイトの生成と斜面の不安定性について、令和 5 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D211.

Haibo MIAO, Gonghui WANG (2023): Prediction of landslide velocity and displacement from groundwater level changes considering the shear rate-dependent friction of sliding zone soil. *Engineering Geology* 327:107361.

Shengshan WU, Gonghui WANG (2024): Mechanical effects of nanomaterials on the residual shear strength of dry sandy mixtures: Implication for the high mobility of rock avalanches. *Engineering Geology* 336: 107569