



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

拠点研究(一般推進)

2025KG-03

繰り返し地震による能登半島の土砂災害 の発生機構及び災害軽減

Landslide Disasters triggered by
Repeated Earthquakes in the Noto
Peninsula and Disaster Mitigation

令和 8 年 3 月

March, 2026

研究代表者 王 功輝

Coordinator Gonghui Wang

拠点研究（一般推進）（課題番号：2025KG-03）

課題名： 繰り返し地震による能登半島の土砂災害の発生機構及び災害軽減

研究代表者：王 功輝

研究期間： 令和7年5月1日～令和8年3月31日

共同研究参加者数： 23名（所外18名，所内5名）

研究及び教育への波及効果について

本研究は、能登半島地域における繰り返し地震による土砂災害を対象として、現地調査、地震観測、地盤構造調査および室内実験を総合的に実施し、地震時斜面災害の発生・運動機構に関する理解の深化に寄与した。特に、地質・地形・地下水条件と地震動特性を統合的に検討することで、地域特性を踏まえた地震時土砂災害の研究基盤を強化した。また、海外研究機関との共同研究を通じて、国際的な研究ネットワークの強化にも貢献した。

教育面では、大学院生や若手研究者が、現地調査、地球物理探査、地震動解析、室内せん断試験および数値解析など、多様な研究手法を実践的に学ぶ機会となった。特に、実災害を対象とした研究活動を通じて、課題発見能力や総合的な防災研究能力の育成に寄与した。さらに、本研究成果は、斜面防災や地震防災に関する教育・アウトリーチ活動にも活用され、防災意識の向上と社会実装型防災研究の推進に波及効果をもたらした。

研究報告：

(1) 趣旨・目的

近年、能登半島地域では、2007年能登半島地震、2023年奥能登地震、および2024年能登半島地震など、繰り返し発生した強い地震に伴い、多数の斜面崩壊や地すべりなどの土砂災害が発生している。特に、2024年能登半島地震では、急激な地盤隆起や長周期パルス地震動が確認され、それらが斜面災害の発生・運動に与える影響が強く懸念されている。さらに、崩壊土砂の堆積や地形変化に伴い、降雨時の二次連鎖性土砂災害の危険性も高まっている。

本研究では、能登半島地域において繰り返し発生した地震による土砂災害を対象として、現地調査、地震動観測、地下水・地盤構造調査、室内せん断実験、および数値解析を総合的に実施し、地域特性を有する地震時土砂災害の発生・運動機構を解明することを目的とした。また、地震後の降雨に伴う二次災害の発生機構を解明することをも目的とした。さらに、中国・成都理工大学、ニュージーランド GNS、USGS、Istanbul 工科大学などの海外研究機関との連携を通じて、四川地震、Kaikoura 地震、トルコ地震など海外事例との比較検討を進め、地震時地すべり研究の国際展開と防災研究ネットワークの強化を図った。

(2) 研究経過の概要

本研究では、繰り返し地震による能登半島地域の土砂災害を対象として、現地調査、地震動観測および室内実験を総合的に実施した。

まず、2007年能登半島地震、2023年奥能登地震および2024年能登半島地震によって発生した斜面崩壊・地すべりについて、文献調査と現地踏査を行い、崩壊地の分布特性、地形・地質条件、

崩壊形態、堆積土砂の特徴等を調べた。また、代表的な崩壊斜面において、ドローン空撮や LiDAR データを用いた地形解析を実施し、崩壊地形の特徴および地形変化の把握を進めた。さらに、崩壊源頭部や堆積域から土試料を採取し、室内試験および物性分析を行った。

次に、斜面内部構造を把握するため、微動観測を実施するとともに、既存ボーリング孔を利用した斜面地質調査を進めた。これにより、地震時斜面災害に関係する風化層構造の特徴について検討を行った。また、二つの大規模崩壊地において、満点地震計を設置し、地震動の長期観測を行った。

さらに、採取した土試料を対象として、リングせん断試験機および地震時地すべり再現試験機を用いたせん断試験を実施し、異なる地質条件における斜面土層の強度特性と変形・破壊挙動を調べた。加えて、3 次元 DDA 解析を用いて、地震動増幅特性や崩壊土砂の運動予測に関する検討を進めた。

また、本研究では、中国・ニュージーランド・アメリカ・トルコなどの海外研究機関と連携し、四川地震、Kaikoura 地震、トルコ地震等における地震時地すべり事例との比較検討を進めた。これにより、能登半島地域における地震時土砂災害の地域特性を国際的視点から整理し、地震後の二次連鎖性土砂災害の危険度評価に向けた基礎的知見を蓄積した。

(3) 研究成果の概要

本研究では、能登半島地域において繰り返し発生した地震に伴う土砂災害を対象として、現地調査、地盤・地下水調査、地震動観測、室内実験および数値解析を総合的に実施し、地震時土砂災害の発生・運動機構に関する新たな知見を得た。

現地調査の結果、2024 年能登半島地震では、急激な地盤隆起や強震動に加えて、地形・地質条件および地下水条件が複合的に作用し、多数の斜面崩壊や地すべりが発生したことが明らかとなった。特に、地震による地盤変動とその後の降雨作用により、不安定化した崩壊土砂が二次的な土砂移動を生じやすい状況にあることを確認した。また、ドローン測量や LiDAR データ解析により、大規模崩壊地における地形変化や堆積構造の特徴を把握するとともに、地震後の地形変化の継続性を確認した。さらに、満点地震計による観測を開始し、崩壊地周辺における地震動特性の把握に向けた観測体制を構築した。

室内試験では、異なる地質条件および含水状態を有する土試料に対してリングせん断試験等を実施し、地震時の繰返しせん断による強度低下や変形特性を明らかにした。特に、一部の試料では、地下水条件や細粒分含有率および透水性の違いがせん断強度および流動性に大きな影響を及ぼすことが確認され、地震時の高速長距離移動現象の理解に重要な知見を得た。

また、3 次元 DDA 解析を用いた複雑地形および不均質地盤条件下における地震動増幅特性や斜面崩壊危険度の評価を進めた。さらに、中国四川地震、ニュージーランド Kaikoura 地震、トルコ地震など海外の地震時土砂災害事例との比較検討を通じて、能登半島地域の地震時土砂災害の特徴を国際的観点から整理した。

能登半島地域において実施した主な研究内容を、以下に示す。

① 繰り返し地震による変位が生じた斜面の被害調査

斜面災害のハザードマップは主として地形・地質条件に基づいて作成されているが、崩壊範囲や斜面状態の時空間的变化を詳細に把握・評価する点については、なお課題が残されている。2024 年能登半島地震に先立ち、能登半島では 2023 年 5 月 5 日に Mj 6.5 の地震が発生しており、同地

域は短期間に繰り返し強震動を経験した。これら二つの地震による斜面崩壊範囲の違いや地震動特性との関係を明らかにすることは、将来的なハザードマップの高精度化に向けた重要な知見となる可能性がある。

岡田地区の珪藻質シルト岩斜面では、岩盤内の亀裂に沿って風化が進行していた。2023 年地震では幅約 20 m の範囲で岩盤崩落が発生した。林野庁 (2024) は、2023 年地震時の崩壊領域外側に段差亀裂が認められたことを報告しているが、2024 年地震では、崩壊範囲がその段差亀裂を巻き込む形で、幅約 80 m、長さ約 80 m へと拡大し、崩壊深も増大した。

また、烏川左岸側に位置する地すべり地では、2023 年地震時に開口幅 1~2 cm 程度の変状が確認されていたが、2024 年地震では長さ 10 m を超え、開口幅 10~20 cm 程度の開口亀裂が複数平行して確認された。さらに、斜面上部では閉口端をもつ開口亀裂間に凹地状の沈降が認められ、地すべり変位に伴う引張場の形成が示唆された。

これらの斜面において常時微動観測を実施し、H/V スペクトル比を算出した結果、顕著な卓越周波数は認められなかった。このことから、崩壊斜面における局所的な地震動増幅が主要な崩壊要因であった可能性は低いと考えられた。一方で、2023 年地震と 2024 年地震では規模が異なるため、震源スペクトル特性にも差異が存在すると考えられる。一般に、マグニチュードの大きな地震ほど低周波・長波長成分が卓越することから、斜面へ入力された地震波の卓越波長の違いが、両地震における崩壊範囲の差異を生じさせた要因の一つである可能性が示唆された。

② 素因となりうる崩壊斜面の内部構造

2024 年地震により崩壊した町野町の対象斜面では、尾根沿いに線状凹地が発達していた。本研究では、線状凹地を横断して崩壊斜面へ向かう測線および線状凹地に沿う測線において、能動震源を用いた表面波探査を実施し、崩壊の素因となりうる内部構造の抽出を試みた。

線状凹地を横断する断面では、線状凹地より崩壊斜面側の浅部に低速度領域が検出され、その底部は崩壊斜面内のすべり面へ連続していた。一方、線状凹地に沿う測線では、崩壊斜面上部において S 波速度が最も低く、崩壊斜面から離れるにつれて速度が増加する傾向が認められた。これらの結果から、崩壊斜面周辺には緩みが進行した領域が存在し、そのような脆弱化領域が強震動を受けて崩壊に至った可能性が示唆された。

さらに、崩壊斜面直上には緩み域が不安定な状態で残存していることが確認されたため、地震後の長期的挙動を把握することを目的として、傾斜計を設置し、継続的なモニタリングを開始した。

③ 地震時に発生した表層崩壊と風化帯構造の関係に関する調査

令和 6 年能登半島地震により、奥能登地域では多数の表層崩壊が発生し、風化帯構造を連続的かつ明瞭に観察できる斜面が各地に出現した。本研究では、表層崩壊の発生場や崩壊深の予測において重要となる地盤内の風化帯構造に着目し、詳細な現地調査を実施した。対象地域には多様な地質が分布しているが、本研究では、風化帯構造の形成過程と表層崩壊発生場との関係を比較検討するため、珪質シルト岩、流紋岩質火砕岩、デイサイト質火砕岩、安山岩質火山岩の 4 種類の岩種を対象とした。

その結果、表層崩壊のすべり面はいずれの岩種においても、クリープ変形の進行により基盤岩から分離し、原岩構造が乱された強風化岩内に形成されていた。一方で、風化帯構造や風化の進

行様式には岩種ごとに明瞭な違いが認められた。

珪質シルト岩は、比較的新鮮な状態でも亀裂が発達した亀裂性岩盤であった。弱風化岩と強風化岩の境界付近では黄鉄鉱の消失が確認され、硫酸生成を伴う化学風化が進行していた可能性が示唆された。このような化学風化による岩盤強度の低下に伴い、岩盤クリープが進行し、最終的に表層崩壊へ至ったと考えられる。

流紋岩質火砕岩は、溶結度が低く、風化が進行しやすい特徴を有していた。そのため、尾根部から溪床付近まで広範囲に強風化帯が形成されており、崩壊も広範囲に発生していた。崩壊面積率は約 30%に達し、対象岩種の中で最も高かった。また、すべり面が形成された強風化岩には、地震時に流動化を引き起こしやすいことで知られるハロイサイトが多量に含まれており、これが崩壊発生を助長した可能性がある。

デイサイト質火砕岩は、流紋岩質火砕岩に比べて溶結度が高く、岩片自体も硬質であるため、透水性が低く、風化が進行しにくい特徴を示した。その結果、強風化岩の分布は主として尾根部周辺に限定され、崩壊も尾根付近に集中していた。さらに、すべり面を構成する強風化岩にはハロイサイトおよびスメクタイトが含まれており、これらの粘土鉱物が崩壊発生に寄与した可能性が考えられる。

安山岩質火山岩では、ヘマタイトを主体とする極めて粘土質な強風化岩がシート状に地表を覆っていた。このため、降雨の岩盤内部への浸透が抑制され、風化の進行も比較的遅かったと推定される。その結果、強風化帯の形成は尾根部周辺の限られた範囲にとどまり、崩壊面積率も約 4%と低かった。

本研究では、限られた範囲での現地踏査および鉱物分析に基づいて、風化帯構造と表層崩壊との関係を検討した。したがって、同様の現象が奥能登地域全域に普遍的に認められるのかについては、今後さらなる検証が必要である。また、風化帯構造の形成メカニズムをより詳細に解明するためには、新鮮岩から強風化岩に至る連続試料を採取し、鉱物学的特性、物理特性、力学特性、および水理特性を総合的に評価する必要がある。特に、流紋岩質火砕岩とデイサイト質火砕岩における強風化岩の性状の違いが、原岩の鉱物組成に起因するのか、あるいは溶結度の差異によるものかについては、今後詳細な検討が必要である。さらに、珪質シルト岩についても、続成作用の程度によって性質が異なるため、続成度の異なる地域において同様の風化帯構造が形成されるかどうかは未解明である。

④ 市ノ瀬地すべりの運動機構と高速移動特性に関する調査

令和 6 年能登半島地震により発生した市ノ瀬地すべりでは、複雑な地すべり運動が確認された。現地調査および地形判読の結果、本地すべりは少なくとも 3 つのサブブロックから構成され、それぞれが異なるタイミングで移動したと考えられた。まず、中央部に位置する主ブロックが最初に滑動し、その末端部では土砂の流動化が生じた。続いて、第 2 サブブロックが崩壊し、その土砂は主ブロックの滑落崖上部に堆積した。さらに、最上部に位置する第 3 サブブロックが崩壊し、その末端部でも流動化現象が認められた。このように、本地すべりは段階的かつ連鎖的な崩壊・移動過程を示した。

また、本地すべりは比較的小さな見かけ摩擦角を示し、高い移動性を有していたことが特徴的であった。特に主ブロックについては、既存の古い地すべり地形が再活動したものである可能性が高く、過去の変動に伴い形成された弱層やすべり面が、今回の地震時の大規模変位に重要な

役割を果たしたと考えられる。

本研究では、地すべり地内の複数地点から採取した試料に対して室内せん断試験を実施した。その結果、すべての試料において非排水条件下でせん断強度の低下が確認されたが、その低下程度には地点ごとの差異が認められた。これは、地すべり内部における土質特性や風化状態の不均質性を反映している可能性がある。

さらに、すべての試料において速度依存性を有するせん断強度特性が確認された。このことは、地震時における高速移動現象だけでなく、平常時における旧地すべりの長期的な変位挙動の制御にも、速度依存的な力学特性が関与している可能性を示唆している。特に、移動速度の増加に伴う強度低下や流動化挙動が、本地すべりの高移動性に寄与した可能性が考えられる。

一方で、本研究は初期的な調査結果に基づくものであり、市ノ瀬地すべりの詳細な発生・運動機構を解明するためには、さらなる研究が必要である。特に、主ブロックのすべり面沿いに存在する土層のせん断特性を詳細に評価するとともに、本震時における地震動の入力特性や地すべり地内の地震応答特性を明らかにする必要がある。

⑤ 珪藻土地域に発生した地すべりの発生特性と流動性に関する研究

令和 6 年能登半島地震では、輪島市舟船地区や珠洲市岡田地区をはじめとする珪藻土分布地域において地すべり・斜面崩壊が発生した。しかし、全体としてみると、珪藻土地域における地すべりの発生数は比較的少なく、また、崩壊した土砂も高い流動性を示さない特徴が認められた。本研究では、これらの特徴的な地すべり挙動を明らかにするため、現地調査、試料採取、鉱物分析および室内せん断試験を実施した。

現地調査の結果、舟船地区および岡田地区では斜面崩壊や地すべりによる顕著な変状が確認された。採取試料に対する SEM 観察の結果、岡田地区の試料では珪藻殻を多く含む特徴が認められた。また、XRD 分析では、舟船地区試料に膨張性粘土鉱物が比較的多く含まれる一方、岡田地区試料では石英含有量が高い特徴が確認された。

さらに、舟船地区試料を対象に乾燥条件下でのせん断試験および非排水繰返しせん断試験を実施した結果、せん断変位の進行に伴って細粒化が進行し、局所的なせん断帯の形成とともに過剰間隙水圧の上昇が認められた。また、液状化特性には入力周波数依存性が存在し、0.2 Hz 条件では間隙水圧が全応力近くまで上昇し、せん断強度が著しく低下したのに対し、0.5 Hz 条件では顕著な液状化現象は確認されなかった。

岡田地区試料との比較試験では、岡田地区試料の方が繰返しせん断応力に対して敏感であり、より高い液状化傾向を示した。これは、岡田地区試料において石英含有量が高く、モンモリロナイト含有量が比較的少ないことにより、せん断時に急速な過剰間隙水圧の発生と土粒子構造の崩壊が生じやすかったためと考えられる。

一方で、珪藻土自体は飽和・完全非排水条件下では液状化しやすい性質を有するものの、実際の自然斜面では透水性が高いため地下水位が上昇しにくく、地震時に一時的に高い過剰間隙水圧が発生した場合でも速やかに消散する可能性が高い。その結果、高い過剰間隙水圧が継続的に蓄積されにくく、崩壊が発生した場合でも、高流動性を伴う大規模な流動化現象には発展しにくいことが示唆された。これは、珪藻土地域において地すべり発生数が比較的少なく、かつ流動性が限定的であった理由の一つであると考えられる。

本研究は限られた試料および実験条件に基づく初期的検討であり、珪藻土地域における地震時

地すべり発生機構をより詳細に解明するためには、さらなる研究が必要である。特に、鉱物組成、粒子破碎特性、透水性、地下水条件および繰り返しせん断条件が過剰間隙水圧の発生・消散挙動に与える影響について、系統的な検討を進める必要がある。

⑥ 2007 年能登半島地震と 2024 年能登半島地震における斜面崩壊発生箇所の比較調査

本研究では、2007 年能登半島地震および令和 6 年能登半島地震において発生した斜面崩壊を対象として、両地震時の崩壊発生位置や地形・地質条件の比較検討を行った。特に、高速道路沿線における斜面崩壊箇所に着目し、過去の災害記録、空中写真、地形データ、および現地調査結果をもとに、崩壊位置の特定と再崩壊箇所の抽出を試みた。

その結果、2007 年地震時と 2024 年地震時の双方において崩壊が確認された箇所が複数存在することが明らかとなった。これらの再崩壊箇所では、急傾斜地形や既存の地すべり地形、風化の進行した岩盤、緩み域の存在など、共通した地形・地質的特徴が認められた。また、高速道路沿線では、切土斜面や盛土構造物の影響を受けた崩壊も確認されており、自然斜面だけでなく人工改変地形と地震動との相互作用についても検討が必要であることが分かった。

さらに、繰り返し地震を受けた斜面では、地形・地質条件に加え、複数回の強震動履歴が斜面安定性に影響を及ぼす可能性が考えられる。そのため、どのような斜面条件を有する箇所で繰り返し崩壊が発生しやすいのかを明らかにすることは、将来的な地震時斜面災害危険度評価において重要であると考えられる。

本研究では、主として崩壊箇所の位置特定および再崩壊箇所の特徴把握を中心に調査を進めたが、詳細な地形解析、地質解析、地震動解析、および力学的検討については現在進行中である。特に、再崩壊箇所に共通する地形・地質条件や、繰り返し地震動が斜面崩壊発生に及ぼす影響については、今後さらに詳細な検討を行う予定である。

(4) 研究成果の公表

1. 松澤真・渡壁卓磨・佐藤昌人 (2026) : 地震時に発生した表層崩壊と風化帯構造の観察に関する一考察～令和 6 年能登半島地震の例～, *応用地質*, 66, 225-236.
2. 田近 淳・松澤真・佐藤昌人・渡壁卓磨・千田敬二・金山健太郎・大津洸介 (2025) : 微地形・表層地質から見た輪島市市ノ瀬地すべりの運動過程, *公益社団法人日本地すべり学会 第 64 回研究発表会*.
3. 松澤真・渡壁卓磨・佐藤昌人 (2025) : 令和 6 年能登半島地震で発生した表層崩壊と風化帯との関係, *令和 7 年度 日本応用地質学会 研究発表会*.
4. 渡壁卓磨・松澤真・佐藤昌人 (2025) : 能登半島地震で発生した大久保崩壊における岩石の風化と水質の関係, *日本地形学連合 2025 年学術大会*.
5. 安永裕紀, 松澤真 (2026) : 奥能登地方における火砕岩特性の相違が風化帯構造に及ぼす影響, 令和 7 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D206.
6. Matsuzawa, M., Watakabe, T, Sato, M. (2025): Investigation of Weathered Zone Related to Shallow Landslides Triggered by the 2024 Noto Peninsula Earthquake in Oku-Noto, Japan, *American Geophysical Union 2025 Annual Meeting*.
7. 土井一生・王功輝・山崎新太郎・大澤光・古谷元・大石怜生 (2025): Landslides damaged by repeated earthquakes - in the case of the slopes in Noto Peninsula -. *2025 年度地球惑星科学連合大*

- 会, HDS07-P10.
8. Junfan Liao, Jiangkun He, Gonghui Wang (2025): On the Shear Behaviors of Weathered Diatomaceous Mudstone and their Implication for Coseismic Landslides in the Noto Peninsula, Japan. 令和 7 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D209.
 9. Jiangkun He, Gonghui Wang, Fanyu Zhang, Gen Furuya, Issei Doi, Koichi Hayashi, Yasuhiko Okada (2026): Mechanisms and Evolution of the Ichinose Complex Landslide Triggered by the 2024 Noto Earthquake. 令和 7 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D210.
 10. Changze Li, Gonghui Wang (2026): Numerical Study of Landslides Using an Improved DDA–SPH Method. 令和 7 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D102.
 11. Jiajin Zhao, Gonghui Wang, Zhehao Zhu (2025): A new cyclic liquefaction path for sandy soils based on fabric evolution. 日本地すべり学会第 64 回 (2025 年度) 研究発表会および現地見学会. 3-6
 12. Junfan Liao, Jiangkun He, Gonghui Wang (2025): Impact of Particle Breakage of weathered diatomaceous mudstone on the Shear behavior: Implication for coseismic landslides in the Noto Peninsula, Japan. 日本地すべり学会第 64 回 (2025 年度) 研究発表会および現地見学会. 1-16
 13. Jiangkun He, Gonghui Wang, Fanyu Zhang, Gen Furuya, Issei Doi, Koichi Hayashi, Yasuhiko Okada (2025): On the complex landsliding phenomena on Ichinose area triggered by the 2024 Noto Peninsula Earthquake. 日本地すべり学会第 64 回 (2025 年度) 研究発表会および現地見学会. 1-21
 14. Junfan Liao, Gonghui Wang (2025): Impact of Diatom Fossil Particle Breakage on the undrained Shear behavior: Implication for coseismic diatomite landslides in the Noto Peninsula, Japan. *Japan Geoscience Union Meeting 2025*, HDS07-P02.
 15. Gonghui Wang, Gen Furuya, Koichi Hayashi, Issei Doi, Makoto Matsuzawa, Kongming Yan (2025): On the liquefaction and landsliding phenomenon enchiada Town triggered by the 2024 Noto Peninsula Earthquake. *Japan Geoscience Union Meeting 2025*, HDS07-P07
 16. Changze Li, Gonghui Wang (2025): Numerical Study on the Influence of Complex Rockfall Block Shapes Using 3D Scanning Technique. *Japan Geoscience Union Meeting 2025*, HDS07-04
 17. Jiangkun He, Gonghui Wang, Gen Furuya, Issei Doi, Koichi Hayashi, Yasuhiko OKADA (2025): On the complex landsliding phenomena on Ichinose area triggered by the 2024 Noto Peninsula Earthquake. *Japan Geoscience Union Meeting 2025*. HDS07-06
 18. 山田健太郎・古谷元・土井一生・林宏一・王功輝・山崎新太郎 (2025): 常時微動計測による輪島市町野町周辺の地盤構造, 日本応用地質学会北陸支部令和 6 年度研究発表会.
 19. 山田健太郎・古谷元・林宏一・土井一生・王功輝 (2025): 輪島市町野町における表面波探査・微動アレイ探査および単点三成分常時微動の測定, 物理探査学会第 153 回学術講演会.
 20. 荒井紀之・中山雅之・土井一生 (2026): 2024 年能登半島地震により地震地すべりが群発した山地斜面の地震観測—輪島市町野町鈴屋の事例—, 令和 7 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D205.