

地震および豪雨による連鎖斜面変動の発生機構に関する予察 —能登半島災害における現象の地質条件依存性を手掛かりに—

Preliminary Inspection on Mechanisms of Cascading Mass Movements Induced by Earthquake and Heavy Rainfall: Insights from Geological Dependence of the Phenomena in the Noto Peninsula

松四雄騎⁽¹⁾

Yuki MATSUSHI⁽¹⁾

(1) 京都大学防災研究所 地盤災害研究部門 山地災害環境研究分野

(1) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan

Synopsis

This report presents preliminary insights on mechanisms of cascading mass movements induced by earthquake and subsequent heavy rainfall with special focus on the variety of phenomena depending on the geological conditions in the Noto Peninsula disaster in 2024. In the preceding earthquake, the areal ratio of the coseismic landslides decreases exponentially with distance from the seismogenic fault, with a larger declining coefficient than the modeled peak ground acceleration (PGA). The spatial distribution of the coseismic landslides can be explained by incorporating a probability density function of threshold PGA for landslide initiation. This conceptual modeling enables us to evaluate landslide susceptibility regulated by geological factors and topographic amplification of the seismic shaking, as well as changes in hydro-geological conditions of the earthquake-affected hillslopes. The subsequent heavy rainfall triggered many new landslides in areas underlain by alternating beds of sandstone and mudstone, which was contrasting with additional sediment yield from landslide scars and reworking of debris in the areas of pyroclastic rocks, and with landslide enlargement in the siliceous siltstone dominant areas. The strong seismic shaking onto the stratified subsurface structure composed of plastic sandstone and brittle mudstone beds might alter the system of pore-pressure build up to change the weathered bedrock zone prone to slide.

キーワード: 最大地動加速度閾値, 風化帯構造, 地質減震, ハザード評価, 連鎖災害

Keywords: peak ground acceleration threshold, weathering zone structure, geological seismic damping, hazard assessment, cascading disaster

1. はじめに

地震に引き続く豪雨によって山地斜面の崩壊が連鎖的に生じることは経験的によく知られているが、その現象の機構と過程は、全く判然としていない。特に、強い地震動を受けた斜面の地盤で何が起こっ

ているのか、どのような素因条件の変化がどれほど生じ、次なる斜面崩壊の誘因となる降雨浸透に対し、どのような連鎖効果をもたらしているのか、未解明の点が多く残されている。特に、斜面を構成する基盤地質の条件に依存して多様な地震—豪雨の連鎖パターンが現れることに対して、「なぜそうなるのか」、

明確な説明を与えることは、現状、不可能といつてよい。

例えば2024年1月の能登半島地震と、同年9月に発生した奥能登豪雨では、地震動と降水供給という異なる誘因が、稀有にも類似した空間分布の傾向でもたらされた。このとき能登半島北部で確認されたパターンは主として次のような地質条件と現象の組み合わせであった。火砕岩と珪質泥岩を基盤とする山地では、比高の大きな山塊の高標高部に崩壊クラスターが生じており、いずれの場合も、地形効果により増幅した地震動が、斜面地盤のせん断破壊へとつながりやすい物性コントラストの大きな風化帯構造の存在が示唆される。ところが地震後の豪雨に対する斜面の振る舞いには明瞭な差異があり、火砕岩分布域では斜面上の崩壊跡地や溪床に堆積した崩土から多量の土砂が再移動した (Fig. 1A) のに対し、珪質泥岩の分布域では、崩壊地の拡大や溪床土砂の流出は見られたものの、連鎖的現象は概して限定的であった (Fig. 1B)。特筆すべきは砂泥互層分布域での事象であり、この地質条件では、地震時の斜面崩壊がごく僅かであったのに対し、その後の豪雨により、緩傾斜部を含む多数の斜面で大規模な崩壊が発生した (Fig. 1C)。

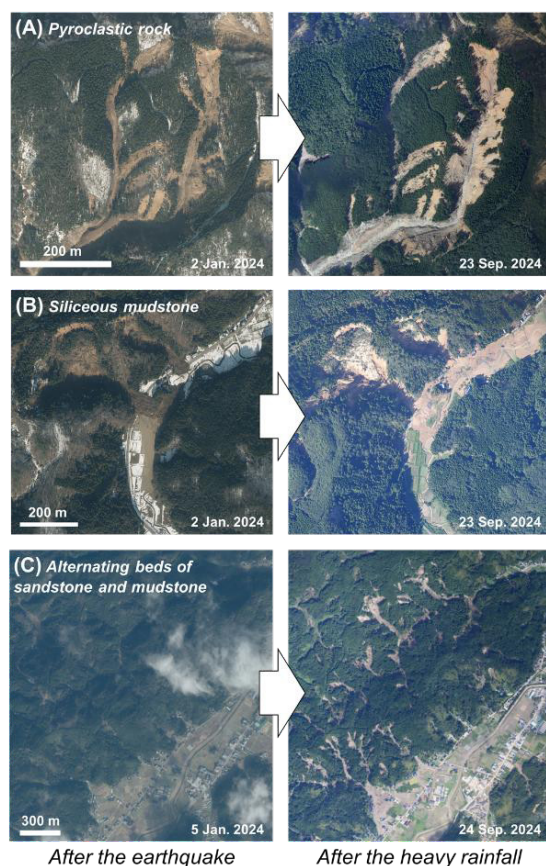


Fig. 1. Cascading landslide patterns in the Noto Peninsula by earthquake and heavy rainfall.

能登半島における一連の斜面変動にみられる地震—豪雨連鎖特性の地質依存性は、地震動に対する地盤の応答特性と破壊がもたらす水文地質構造の変化によって説明されるべきである。すなわち、風化生成物の動的な力学特性が地震時斜面崩壊の様式や発生数に影響するとともに、風化帯の部分喪失や部分破壊が斜面全体の水理学的特性を変化させ、貯水容量や排水能の変化を通じて、地震に引き続く豪雨での崩壊跡地あるいは崩土の受食性を規定すると同時に、新規斜面崩壊の発生/非発生を分けているものと推察される。

問題は、そうした連鎖的事象の実態が、全く明らかになっていないことである。それゆえどのような地形・地質の条件において、地震後の豪雨による斜面災害のハザードが高まっているのか判別できないため、警戒すべき現象とその発生場が絞り込めず、ハード・ソフト対策のあり方も具体的に検討できない状況となっている。本稿では、能登半島での事象に焦点を当て、地震—豪雨による連鎖的斜面変動の発生機構の解明に向けた予察と展望を述べる。

2. 2024年能登半島地震での斜面崩壊分布と地盤の破壊閾値の評価

2024年1月1日の能登半島地震で発生した斜面変動の空間分布 (Fig. 2) には、震源断層からの距離に応じた指数関数的減衰がみられ、地形や地質といった素因条件の影響は、その全体的傾向からの偏差として現れていた (松四, 2024)。斜面変動の面積率 (Fig. 3A空丸プロット) は、地震動の観測結果をよく再現する標準的なモデル (Fig. 3A緑線; Morikawa and Fujiwara, 2013) によって計算される最大地動加速度

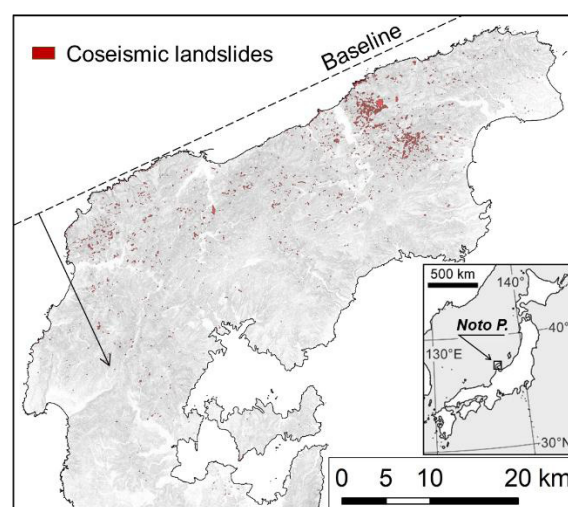


Fig. 2. Coseismic landslide distribution by the 2024 Noto Peninsula earthquake after Geospatial Information Authority of Japan (2024).

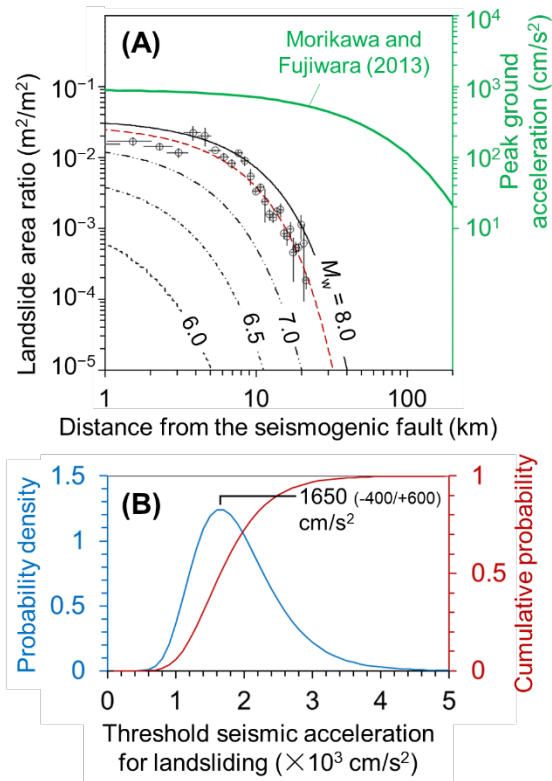


Fig. 3. (A) Declining trends of landslide areal ratio and peak ground acceleration. (B) Optimal probability functions of PGA threshold for landslide triggering.

(PGA: Peak Ground Acceleration) の距離減衰よりも大きな減衰率で減少していた (Fig. 3A) . このことは、斜面変動が地盤の破壊を伴うがゆえ、その発生誘因に閾値をもった現象であることを考えれば素直に理解できる. そこで、多様多数の斜面地盤のせん断破壊を引き起こすのに必要なPGAが、仮に対数正規分布しているものとし (Fig. 3B青線) , その累積関数 (Fig. 3B赤線) から、モデルにより計算されたPGAが作用したとき破壊に至る斜面の数密度を求め、観測された斜面変動面積率を説明できる関数を探索した. その結果、PGA = 1650 cm/s²をモードにもち、標準偏差-400/+600 cm/s²となるような閾値の確率密度分布が、斜面変動面積率の空間分布をよく説明できる (Fig. 3A赤破線) ことがわかった.

こうした分析により、現象の素因および誘因と、帰結の空間分布を簡便かつ数理的に結び付けることができる. すなわち、斜面変動面積率が增大しやすいという地質的素因はPGA閾値を小さい方にシフトさせるような確率密度関数を付与すれば説明できるし、地形効果による地震動増幅については、より大きなPGAが作用したために閾値を超えて破壊条件を満たす領域が増えたものと説明することができる. 一度経験的にその地域における斜面地盤の破壊閾値

を表す確率密度関数が得られれば、同じ断層系で発生する異なるモーメントマグニチュードをもつ地震に付随して起こる斜面変動面積率の空間分布を予測することもできる (Fig. 3A黒線) . そして、この概念モデリングは、後述するように、地震に引き続く豪雨によって生じる現象の説明にも資する糸口を付与するものとなる.

3. 地震後の豪雨による連鎖現象とその機構に関する予察

2024年9月21日の奥能登豪雨では、半島北縁に集中的な降雨がもたらされ (Fig. 4A) , 最大一時間降雨強度は>100 mm/h、総雨量は>500 mmに達した (Figs. 4B, C) . この豪雨により、地震時のそれとは明瞭に異なる空間分布で、新たな崩壊や既存崩壊地の侵食、崩土の再移動を含む連鎖的斜面変動が多数生じた (Fig. 5) . 地震時崩壊は、主として強震動発生源により近い半島北東の火砕岩を基盤とする山塊の高所や珪質泥岩の分布域でクラスターを形成していた (松四, 2024) のに対し、豪雨による新規の崩壊が多かったのは、雨域の中心に近い半島北西部で、特に地震ではむしろ崩壊の少なかった砂泥互層や溶岩の分布域であった (Fig. 5) .

斜面変動の連鎖特性は、場の地質条件に依存して異なっていた (Fig. 6) . 火砕岩や珪質泥岩を基盤とする山地では、地震時に発生した崩壊地での侵食や崩土の再移動による土砂生産あるいは崩壊地の拡大などが卓越していた (Figs. 1A, B, 6A) . これに対し、砂泥互層の分布域では、強震動を経験した斜面に、大強度かつ大量の降水がもたらされた場において、斜面勾配が20°程度の緩斜面でも節理面や層理面に

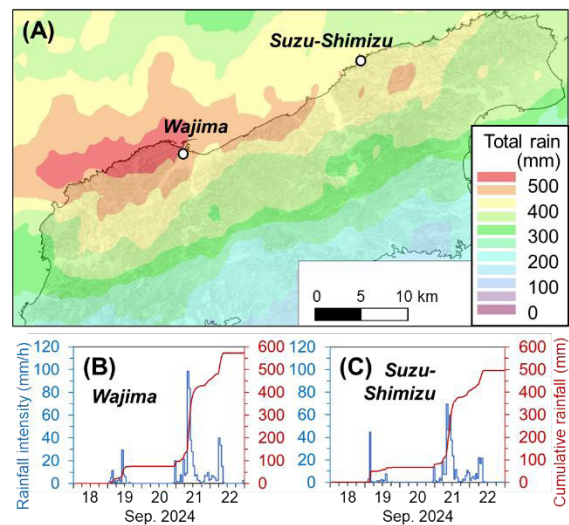


Fig. 4. Rainfall distribution (A) and hyetographs (B, C) in the Oku-Noto heavy rainfall event in Sep. 2024.

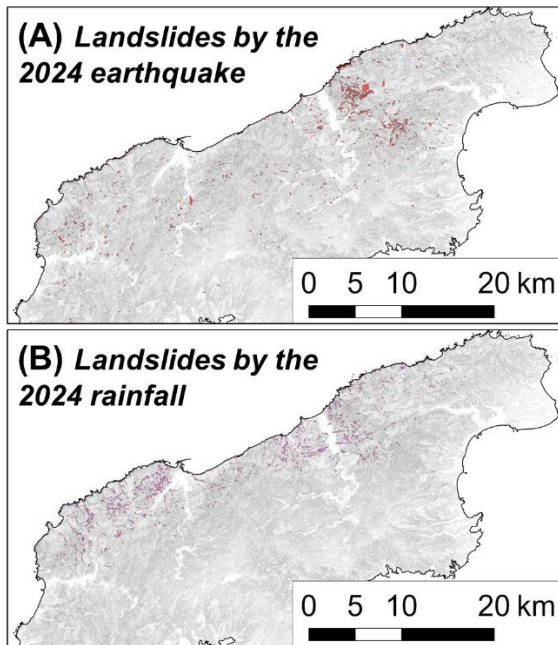


Fig. 5. Comparison between distributions of coseismic landslides (A) and rainfall-induced mass movements (B).

沿った崩壊が多発した (Figs. 1C, 6B) . すべり面には砂質部が露出する一方、泥質部は破碎して大量に溪床に堆積するという特徴的な様相が、しばしば観察された。

地質条件に依存した連鎖特性の多様性は、風化帯構造の特徴に関連付けて解釈できる。火砕岩は力学的強度と水理的性質の双方が、浅部で不連続性の高い風化帯構造を有しており、これが地震後の豪雨による崩壊地とその周辺での活発な土砂生産に繋がったものと推察される (松四, 2024) . 一方、珪質泥岩は乾湿風化を受けやすく、風化岩盤は深部まで強度

低下しており、強震動を被った斜面の風化帯には著しい破碎が認められた (松四, 2024) . この状態変化は、地下水の貯留と流動特性にも変化をもたらし、地震後に斜面が排水能を上昇させることによって、降水供給に伴う連鎖的な斜面変動が抑制される傾向となった可能性がある。そして砂泥互層分布域では、豪雨時に発生した斜面崩壊の滑落崖露頭において、風化により強度低下した泥岩部が多くの亀裂を生じている一方、粘着質な塑性体となった風化砂岩では破壊が生じていない様子が観察される (Figs. 7A–C) . この状況は、両者の破壊閾値の差異によって理解され (Fig. 7D) , 砂岩の方が破壊に要する地震動 (ここでは便宜的にPGAに代表させている) が大きいことが推察される。このとき、砂泥互層を基盤とする斜面では、風化帯全体が破壊されないために地震時崩壊は少なくなる。しかし、風化岩盤のうち泥岩部には多くの亀裂を生じているため、砂泥境界部に広く浸透水が到達しう状況が成立し、豪雨によって高い正水圧が生じることで、層理面や節理面をすべり面とする崩壊の多発に至ったものと推察される。

能登半島で実際に確認された地震–豪雨の連鎖による斜面変動現象を説明しうる機序として、これまでの踏査・観測に基づく仮説を、Fig. 8に描画した。火砕岩を基盤とする山地は地形的な高所をつくり、大起伏な斜面を形成するが、地下浅部での化学的溶脱により力学的な強弱コントラストが明瞭な風化帯をもつ (松四, 2024; Fig. 8A) . それゆえ、地震動の地形増幅効果も相まって風化岩盤のせん断破壊が起きやすく、多数の表層崩壊とその後の豪雨による土砂の再移動につながったものと推察される。一方、珪質泥岩の分布域では、風化岩に水酸化鉄の沈殿と

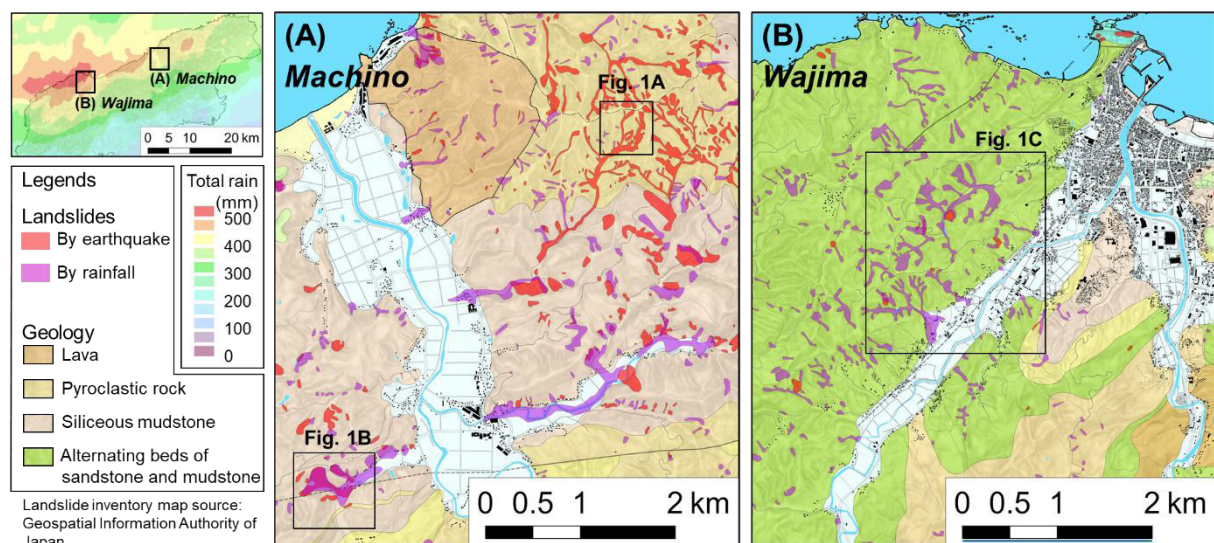


Fig. 6. Landslide inventories in Machino (A) and Wajima (B) areas caused by the earthquake and subsequent heavy rainfall. Geological map was adopted from Inoue et al. (2010).

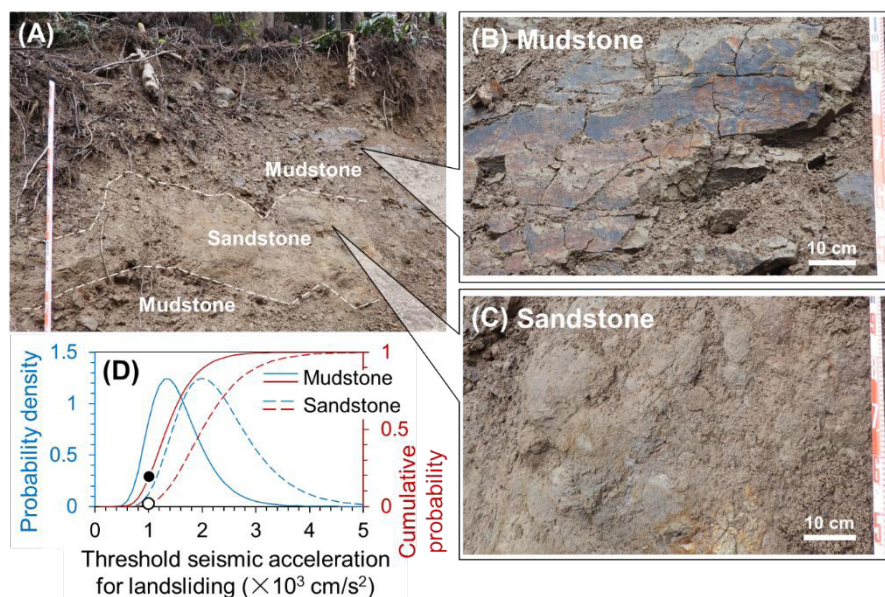


Fig. 7. A typical outcrop exposed at landslide scarp in the hillslopes underlain by alternating beds of sandstone and mudstone (A–C) and concept of differing PGA threshold explaining the different degrees of extensive cracking (D).

スレーキングによる著しい破碎が普遍的にみられ、特に層理面に対する流れ盤斜面で相対的に厚い風化帯が形成されている（松四，2024; Fig. 8B）。この地質構造が、地震時の酸化前線付近をすべり面とする地すべり性崩壊の発生につながったものと推察される。他方、地震動により亀裂のネットワークが強化され、結果として斜面の排水能が向上するために、滑落急崖の後退などを除いて、豪雨による連鎖崩壊は限定的なものにとどまった可能性がある。そして砂泥互層が基盤を構成している場合には、風化特性の差異により、風化した砂質部は難透水で高粘度の塑性を獲得するのに対し、泥質部はスレーキングにより破碎して岩片スケールでは弾性を保つものの、脆性度の高い弱層となる（Figs. 7, 8C）。強震動の発生時には泥質部のみが部分破壊することで地震動をダンピングし、斜面は全体として地震時には崩壊しないで済むものの、亀裂網の形成された泥質部と非破壊状態を保つ砂質部の境界で間隙水圧が上昇しやすい素因条件が成立し、豪雨時には緩傾斜部を含む多くの斜面が崩壊するという帰結をもたらしたものと考えられる。

4. まとめ

能登半島における2024年の地震とそれに続く豪雨による連鎖的な斜面変動について、地質条件に依存した現象の多様性に焦点を当てて、その発生機構に関する予察を提示した。地震に伴う斜面変動の面積率は、震源断層からの距離とともに指数関数的に減少するが、その通減係数は最大地動加速度（PGA）

のそれよりも大きい。このことは、斜面崩壊発生の閾値となるPGAの確率密度関数を考慮することで説明可能である。この概念的モデル化により、地質的要因と地震動の地形増幅に影響を受けた斜面崩壊の発生しやすさ、ならびに地震動による斜面の地下水文学条件の変化を評価できる可能性がある。地震後の豪雨では、火砕岩および珪質泥岩分布域において崩壊跡地の侵食や崩土の再移動、既存崩壊地の拡大が卓越した一方、地震時には崩壊の少なかった砂泥互層を基盤とする斜面で、新たな崩壊が多発した。

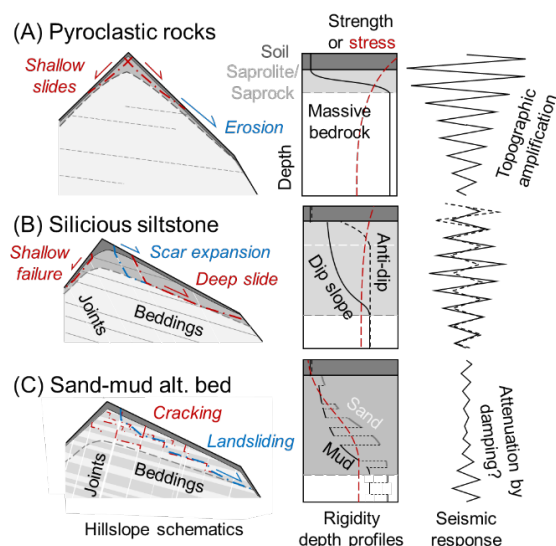


Fig. 8. Conceptual schematics illustrating hypothetical mechanisms of cascading mass movements by earthquake (drawn by red) and heavy rainfall (blue) under varying geological conditions.

砂泥互層斜面での新規崩壊の発生は、地震-豪雨による連鎖的斜面変動の発生機構に新たな仮説をもたらした。すなわち風化に伴い塑性を獲得した砂質部と脆性的な泥質部からなる積層状の風化帯構造が、泥質部の破砕により地震動をダンピングし、風化岩盤内での亀裂網の偏在的発達を通じて間隙正水圧の作用環境を変化させ、層理面や節理面をすべり面とする斜面崩壊の発生素因を成立させたというものである。この仮説は、今後、山地斜面の地形・地質条件と水文過程を定量的に評価・追跡する自然地理・応用地質学的なアプローチと、風化帯の発達論を扱う地球化学的アプローチ、そして地盤の構造と地震応答を定量解析する物理探査ならびに地盤工学的なアプローチをカップリングさせた多分野協働研究によって検証されるべきである。

近未来に南海トラフ地震の発生が見込まれ、豪雨の常襲地域ともなっている西南日本外帯の山地には、能登半島同様の海盆堆積物あるいは砂泥互層を主体とする付加体が広く分布している。過去には、因果的な連鎖関係が疑われる事象として、1854年の安政地震の後に1889年の明治十津川水害が、1944/46の昭和地震の後に2011年の紀伊半島大水害（平成十津川災害）が発生しており、地震よりもそれに続く豪雨でより多くの大規模斜面崩壊が発生している。こうした場での地震-豪雨連鎖による災害への備えを高度化するには、能登半島で生じた事象の実態を素因・誘因の両面から解明し、モデル化したうえで、その知見を有効活用すべきであることは論を俟たない。

謝 辞

本研究は、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携共同研究（2024-K-02）、JSPS科研費（21KK0015, 23K20543）および国土交通省の河川砂防技術研究開発 地域課題分野（砂防）による助成を受けた。

参考文献

- 井上卓彦・尾崎正紀・岡村行信（2010）：能登半島北部域20万分の1海陸シームレス地質図及び地質断面図，海陸シームレス地質情報集「能登半島北部沿岸域」，地質調査総合センター。
- 国土地理院（2024）：令和6年(2024年)能登半島地震に関する情報。 https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html
- 松四雄騎（2024）：2024年能登半島地震による斜面変動と連鎖複合災害—予察と展望—，京都大学防災研究所年報，第67巻A, pp. 131–140.
- Morikawa, N. and Fujiwara H. (2013): A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake, J. Disaster Res., Vol. 8, pp. 878–888.

（論文受理日：2024年10月5日）