

## 論文概要

所 属 理工情報生命学術院生命地球科学研究群  
環境学 学位プログラム

学 籍 番 号 202030285

氏 名 坂井 佑介

論 文 題 目 地震を誘因とした土砂移動による被害の防止・軽減に関する研究

論 文 概 要

地震を誘因とした土砂移動による被害の防止・軽減に向けて、日本国内を中心に過去の事例分析を行い、大規模な土砂移動や崩壊土砂が流動化した土砂移動において、人的・経済的被害が深刻化したことがわかった。このことから被害の防止・軽減には、大規模な土砂移動の予測のために「①発生規模の予測」が行えること、崩壊土砂が流動化する土砂移動の予測のために「②流動化した土砂の到達範囲の予測」が行えることが重要であると考えられる。

そこで、土砂移動の予測に必要となる①発生規模の予測、②流動化した土砂の到達範囲の予測、についてそれぞれの既往研究を整理した。このうち、①については、どのような要因が発生規模に影響を与えているかを評価した研究や発生規模に関する定性的な評価に関して分析がなされている研究はあるが、発生規模を定量的に予測する技術が不足している。また、②については、土砂の到達範囲の分析において、誘因が地震に限定されていない、土砂災害の種類を限定しているなどの課題がある。

①に関して、発生規模には地形条件、地盤条件、地震動特性が影響している。このうち地盤条件については3次元的な水理地質構造に関する情報、地震動特性についてはより空間分解能の高い情報が得られれば、発生規模の予測手法の確立に資することが期待される。このことから、空中電磁探査によって取得した3次元比抵抗データを用いることにより、深さ方向を考慮した地盤条件と土砂移動との関係を定量的に分析することを目的として「空中電磁探査を活用した土砂移動発生場・発生規模に関する水理地質構造の特徴分析」を実施する。また、SAR衛星によって取得する地表面の変位量を用いることにより、従来は見えづらかった地震動と土砂移動との関係をより詳細に分析することを目的として「SAR衛星を活用した土砂移動発生場・発生規模に関する地震動の特徴分析」を実施する。

②に関して、これまで地震を誘因とした土砂移動に関する研究は、特定の少数の土砂移動現象を対象としているなど、地震を誘因とする土砂移動の全体像の把握及び地震や場の条件、流動化の有無の違いによる影響分析が行われていない。このことから、山地部の土砂移動現象に関する事例を可能な限り網羅的に収集・分析した上で、流動化を考慮した土砂の到達範囲の予測手法を確立するため、「土砂の到達範囲の全体像把握と確率的な予測手法の提案」を実施する。

「空中電磁探査を活用した土砂移動発生場・発生規模に関する水理地質構造の特徴分析」では、深層崩壊の要因となるキャップロック構造や深層崩壊のすべり面となりうる深さ数10mの地点の不連続面のような水理地質構造を有している箇所の特徴的な比抵抗パターンを、調査ボーリン

グ等の各種現地調査によって明らかにした。具体的には、地表から深部に向かって比抵抗が相対的に高比抵抗、低比抵抗、高比抵抗に変化し、比抵抗極小部がライン上に連なることで特徴づけられる比抵抗パターンについて、浅部の高比抵抗は上位の不飽和な多亀裂岩盤に、低比抵抗は地下水流動帯と固結粘土層に、深部の高比抵抗は下位の飽和な多亀裂岩盤に、各々一致していることを確認した。さらに、比抵抗パターンを定量的に評価する手法として「比抵抗変化量」を提案し、この比抵抗変化量を用いることによって、土砂移動の発生場や発生規模に影響を及ぼすキャップロック構造等に類似した水理地質構造や急激に新鮮で堅硬な岩盤に推移する場所を抽出することができた。すなわち、空中電磁探査から得られる比抵抗変化量により、大規模な土砂移動が発生しやすい地域を評価できることを示している。

「SAR 衛星を活用した土砂移動発生場・発生規模の地震動の特徴分析」では、地震動特性に関する情報の精度向上のために、SAR (synthetic aperture radar; 合成開口レーダー) 衛星によって計測される変位量が地震動の影響の大きさを表す直接的な(内挿・外挿補間のない)地震動データとして活用可能か検証した。まず、土砂移動発生場について、既往研究で一般的に用いられている地盤の最大加速度 (Peak ground acceleration; PGA) の空間分布を地震計の観測データを用いて補間し、崩壊面積率と比較した結果、PGA の増加に伴う崩壊面積率の増加傾向は確認されたものの、ばらつきが大きく、不規則であったが、変位量を用いた場合には変位量の増加に伴う崩壊面積率の増加がより単調に増加する規則的な関係なるなど、細かい特徴に違いが現れた。また、変位量が大きくなると変位量の増加に伴う崩壊面積率の増加の程度が小さくなる、斜面勾配が大きくなると変位量の増加に伴う崩壊面積率の増加の程度が小さくなるといった、地震動の斜面崩壊に及ぼす影響が飽和するような現象を新たに確認した。このような新たな知見が得られた要因として、PGA が内挿・外挿されたデータであることに対し、変位量は直接観測された空間分解能の高いデータであることが考えられる。そして、この変位量と空間分解能の高い地形データを用いた崩壊面積率推定式を提案し、この式が崩壊面積率を精度良く再現できることを確認した。これらの結果から、SAR 衛星によって得られる地盤変位量は、従来は見えづらかった地震動と土砂移動の関係性をより詳細に分析できることが明らかとなった。

「土砂の到達範囲の全体像把握と確率的な予測手法の提案」では、3つの地震を対象に土砂移動現象の種類を限定せず、土砂の到達範囲のデータを収集・分析した。その結果、これまで豪雨による土砂災害でも指摘されてきたように、崩壊面積と到達距離及び到達比高に明瞭な相関が確認できた。しかし、一方で、同程度の崩壊面積であっても、到達距離の最大値と最小値には 10 倍近い違いが見られた。これに対し、本研究では、流動化して到達距離が特に長い現象も含めて地震毎に同じ崩壊面積のときの最小値と最大値の幅がほぼ一定であることを新たに示した。このことは、同じ崩壊面積のときに到達距離がある一定の範囲内に収まっていることを示している。本研究ではこの新たな知見に基づき、土砂災害の種類の違いに因らず、崩壊面積からある距離に土砂が到達する確率を予測する手法を提案した。提案した予測手法は、実績に基づき、ある崩壊面積  $A$  の崩壊土砂が崩壊面積から予測される到達距離に対して、ある任意の実績予測比  $r$  以下の地点まで到達する確率  $F(r)$  を予測する式である。そし

て、この確率予測式を 3 つの地震の実績データを用いて、地震ごとに予測式を作成し、検証した。その結果、中越地震と岩手・宮城内陸地震で作成した予測式は、予測式の作成に用いていない当該地震で発生した土砂移動の到達確率を良好に再現できた。さらに、予測式の係数は中越地震と岩手・宮城内陸地震ではほぼ同じであり、中越地震と岩手・宮城内陸地震の間では異なる地震であっても統一的に予測できることを示した。

以上の研究成果が地震を誘因とした土砂移動による被害の防止・軽減にどのように資するかを考察する。①発生規模の予測に関して、「空中電磁探査を活用した土砂移動の発生場・発生規模の水理地質構造の特徴分析」及び「SAR衛星を活用した土砂移動の発生場・発生規模の地震動の特徴分析」による成果から、比抵抗変化量や変位量を分析に用いることで、大規模な土砂移動が発生する可能性が高い地域であるかを評価すること、発生が想定される土砂移動の概ねの規模を推定することが可能となった。また、②流動化した土砂の到達範囲の予測に関して、「土砂の到達範囲の全体像把握と確率的な予測手法の提案」では、崩壊面積から流動化を包含した土砂の到達範囲を確率的に予測する手法を提案した。このことから、到達確率が 100%となる到達距離、すなわち予測される最も長い到達範囲を見込むことにより、たとえ土砂が流動化しても被害が及ばない範囲を予測することが可能となった。さらには、到達確率に応じた段階的なリスク評価ができるようになった。

そして、最後に、本研究成果を適用した南海トラフ地震等を想定した土砂災害対策への貢献として、具体的な対策手法を提案した。南海トラフ地震の対策計画では、防災上重要な箇所における土砂災害ハザードマップ整備が位置づけられている。そこで、防災上重要な箇所の周辺において空中電磁探査を実施して地盤の 3 次元比抵抗データを取得し、事前の地震動解析により地盤の変位量を推定する。その上で、本研究の成果を用いることにより、防災上重要な箇所の周辺において土砂移動の発生場の危険度評価、大規模な土砂移動現象が生じる可能性の有無が評価される。さらに、危険度が高いと評価された場所において現地調査等により概ねの発生規模を推定し、本研究で提案した発生規模から到達範囲を確率的に予測する手法を活用することによって、防災上重要な箇所において、従前の技術では評価困難であった大規模な土砂移動現象や崩壊土砂が流動化する現象に備えた土砂災害ハザードマップの整備が実現できるようになった。