

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

カズミ ザヒール アッバス

数千、数万の命が奪われる海外の地震の被害調査では、被災地域内の地震記録が皆無であることも少なくなく、人的犠牲・物的被害の大きな代価を払いながらも地震対策やその後の国土保全のための教訓が十分に得られないことがある。したがって地形や地盤に残るありとあらゆる痕跡を見直し、そこに刻まれた情報から将来の地震防災、復興にかかわる教訓を読み解いていくことが求められている。そして地形に刻まれた地震痕跡から重要な情報を抽出することは、昨今のリモートセンシング技術の発達で決して不可能ではなくなっている。

地盤災害や地震後も継続する可能性のある地形変動の可能性を議論するためにはLagrangian座標系での地形変動成分を抽出する必要がある。本論文はこのLagrangian地形変動成分の抽出法の精度を大きく向上させ、これを踏まえて地中内部の応力変動の成分を抽出し、これがトンネルや斜面災害の被害分布と整合的に重なることを示したものである。本論文は以下の6章から構成されている。第1章は本研究の背景と目的を述べている。

第2章では本研究で対象とした2つの被害地震について述べている。まず新潟県中越の中山間地域を直撃した2004年10月23日の中越地震では、確認されただけで1350を越える数の斜面崩壊が発生しこの地震被害を深刻にしたのみならず、平均して75mほどの土被りのある上越新幹線の堀之内、魚沼、妙見、滝谷のトンネル内部でも覆工コンクリートの崩落やレールのバックリングが発生した。地震に強いとされる地中内部の社会基盤施設までもが大きな被害を受けるほどの地形変動が生じた。この中越地震に伴う地形変動は土木学会を中核機関とした振興調整費事業で異なる時期のデジタル地形データが集約されたため、豊富な、かつ高精度なデータを用いてLagrangian座標系での地形変動成分を抽出する手法の改良を行うための最適な研究対象とされた。もう一つの地震はパキスタン・カシミール地震(M7.6)である。2005年10月8日午前8時50分(現地時間(UTC+5)、日本時間午後0時50分)にパキスタン北東部カシミール地方・インド国境近くで発生したこの地震では、8万6千人以上の死者が報告された。被災の最もひどかったジェーラム(Jhelum)川沿いでは、活動した断層に沿って多くの不安定な斜面が露出した。ムザファラバードからおよそ40km上流のハティアン・バラ(Hattian Bala)の山中では地震で山腹が崩壊し8000万 m^3 にも及ぶ土砂がジェーラム川の2つの支流をふさぎ大小2つの天然ダム湖が出現した。そしてこの決壊の可能性が復興事業や地域住民にとっての潜在的な脅威として懸念さ

れていたが、地震から4年4か月後にこのダムは決壊してしまう。この地震では、中越地震とは対照的に被災地近くで地震記録が皆無であり、遠地地震記録やInSAR画像など衛星から得られるデータのみが、科学的に被害の分布や原因を読み解く鍵になっていた。

第3章では地殻変動のLagrangian成分抽出方法の概要と、その精度向上のための工夫についてまとめている。小長井・藤田ら(2009)、そしてZhao Yu(2010)は剛体的な地形が上昇・沈下あるいは併進を伴った動きを行う場合を想定し、近接するEuler座標上の複数の点の標高変動からこれらの点に共通する地形変動のLagrangian座標成分を抽出する手法を提示し、新潟県中越地震の翌年に発生した魚野川中流域の冠水被害と地形変動の関連や斜面災害の分布と地形変動の関連を議論した。論文提出者は基本的にこの手法を踏襲し、その上で(1)本手法の前提となっている剛体的な地形の上下動や併進運動が成立し難い箇所を除去するロバスト性の高い判定基準、(2)地域全体の地形変動を抽出するための移動平均法のウィンドウサイズ決定の合理的な基準を提示し、浅部の地すべりなどの影響を除去したやや深い部分の地盤の変形抽出の精度を大きく高めている。

第4章では抽出されたやや深い部分の地盤の変形から地震断層面での滑りを逆解析する手法を示している。手法自体は古典的に確立されたものではあるが、地形変動のLagrangian成分抽出の精度が大幅に向上したことで、例えば中越地震のような複数の地震断層が滑動した状況でも分解能の高い解析結果が得られることを示している。併せて、近傍地震記録の皆無であるパキスタン・カシミール地震についてもInSAR画像の解析から、断層変位のインバージョン解析を行い、論文提出者らも加わった地震被害調査で確認されたジェーラム川沿いの地形変動や被害分布とも整合する結果を示している。

第5章では、推定された断層面での滑りを用いて、地中内に発生する応力場を解析している。地中の応力場を検討するためには、地震前の応力の初期状態を把握しなければならない。このため中越地域については、NATM工法で掘削された既設トンネルの工事段階での内空変位の計測結果からこれを推定している。加えて第4章、第5章を通して解析の精度は地中内部の構造設定に大きく影響されることになる。中越地域では、この地域でかつて石油掘削が行われ、また地震後の重力異常探査、また多くの地震動の解析結果から地下構造についての推定結果が得られていた。そして求められた平均主応力および偏差応力テンソルの2次不変量の空間分布は、中越地震での鉄道トンネルの被害分布や斜面崩壊分布を明確に説明するものとなった。また地震で生じた応力場の変化は地震前の地すべり地分布やため池分布などのパターンとも整合し、これはこの地域で類似の地形変化が連綿として続いてきたことを示唆するものとなった。一方パキスタン・カシミール地域では、表面波探査などによる地下堆積構造の推定結果や100mほどの浅いボーリングデータしか得られていなかった。それにもかかわらず、求められた偏差応力テンソルの2次不変量の空間分布は、カシミール地震

での斜面崩壊分布と整合する結果となった。これは応力場の逆解析が地表近い部分の地殻変動の精密な抽出結果に依っていることによるものと考えられ、本手法が地震記録の欠損している地域へも活用できることを示すものとなった。

第6章は本研究で得られた知見を整理し、これらが、地震による地盤災害や、その後の国土保全対策の中でどのように位置づけられていくかを示したうえで、今後の研究の発展の方向と課題をまとめている。

以上、本研究は、地震時に発生した地形変動情報から、地震被害の原因を合理的に解明する手掛かりを与え、さらにその後の国土保全に直接かかわる科学的な情報を与える方法論を示したものである。とりわけ地震による地形変動が過去にも繰り返されてきたことを示す中越地震の解析結果は、地震による地形変動の災害としての側面のみならず生活の場としての地盤環境を形成してきたこととも不可分であることを示唆している。当初の研究の目的からさらに踏み込んで、地震災害の対応を人の生活の依存する地盤環境の中で考えていく上で科学的な情報を示し得た意義は大きく、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。