

博士論文審査報告書

論文題目

RESEARCH ON SLOPE STABILITY AND
LANDSLIDE MOBILITY DURING EARTHQUAKES

地震時における斜面の安定性と
地すべりの運動特性に関する研究

申請者

Deping	GUO
郭	徳平

建設工学専攻 地震防災研究

2013年10月

2008年5月12日、中国四川省汶川を震央とした表面波マグニチュード8.0の地震が発生した。死者69,227名、行方不明者17,293名の内陸地震としては1976年の唐山地震につぐ被害を生じさせた。震源域が山岳地帯に位置し斜面の多くが風化していたため約20万箇所では斜面崩壊が発生し、多くの集落を埋没させた。死者・行方不明者の総数の約1/3にあたる約3万名が斜面崩壊の犠牲となった。

本研究は、四川地震による斜面崩壊の約2万事例について、崩壊形態、土質・岩質、震央距離、逆断層の上版・下版と崩壊箇所の位置関係、地表面最大加速度、斜面高さや形状、地形・地質条件崩壊面積、崩壊土量などの基礎データを収集し、斜面崩壊に影響を与える諸要因について考察して、地表面加速度と斜面高さを主要なパラメータとした斜面崩壊面積と崩壊土量および斜面崩壊箇所の密度の予測式を提案したものである。

さらに、地震入射波動の斜面による反射・散乱および増幅の特性を波動論と数値解析により分析し、斜面形状と入射波動の周波数が斜面の動的応答に与える影響を明らかにした。また、崩壊土砂の到達距離や運動特性（モデルティ：崩壊土砂到達平面距離と崩壊開始箇所の高さの比）に影響を与える諸要因を検討して、土砂到達距離とモデルティを予測するための経験式を提案した。

最後に、震源域の斜面の被害事例および無被害事例を併せた分析により、アンカーボルトや吹付コンクリート等各種斜面保護工の斜面安定への効果を検討した。この結果から四川地震においてはアンカーケーブル工法が斜面の安定に大きな効果があったことを示した。

第1章では、四川地震による斜面崩壊とそれによる被害の全体像を紹介するとともに、研究の方法と流れ、および汶川地震による斜面崩壊の既往研究を紹介している。既往研究は特定の崩壊事例の分析に焦点をあてているものが多く、本研究のように2万例の崩壊事例を収集し、これを総合的に分析して、将来の斜面崩壊の予測のための知見と情報を提供した既往研究例は少ない。

第2章では、斜面崩壊の発生密度（LAP：面積 1km^2 当りの斜面崩壊面積、およびLNC：面積 1km^2 当りの斜面崩壊件数）と、逆断層の上版・下版ごとに、断層線からの離間距離との関係性を分析した。この結果、逆断層の上版側の斜面崩壊の密度は下版側の約4倍であることを示した。さらに、420の地震動観測点における加速度記録の多変量解析により地表面の上下および水平方向の最大加速度の距離減衰式を逆断層の上版側と下版側のそれぞれについて提示した。これらの距離減衰式を用いて、個々の斜面崩壊地点での地表面最大加速度を算定し、地表面最大加速度、および断層線と崩壊地点との離間距離をパラメータとした斜面崩壊密度の予測式を導いた。この結果、四川地

震の事例においては地表面加速度が 200cm/s^2 以上になると斜面崩壊密度が急激に増大することが示された。

第3章では、地表面加速度、斜面角度、岩盤層理の傾斜角度および岩級等が斜面の安定・不安定に与える影響を定量的に検討し、地震動加速度と斜面高さが最も影響度の高い要因であることを示した。この結果を用いて崩壊土量と崩壊面積の予測式を地震動加速度、斜面高さをパラメータとして提示した。

さらに、S波が斜面表面に傾斜して入射した場合の波動の反射と散乱および地震動の増幅の特性の状況を波動論によって解析し、入射S波の周波数と斜面の表面付近の応答の増幅特性を明らかにした。この結果、地震波動の周波数が低いほど応答が増幅される領域が斜面表面近傍で広がることを示した。また、斜面形状が直線形状の場合S字状の場合およびオーバハング形状の場合など、斜面形状が地震動の増幅と表面近傍の応力に与える影響を2次元有限要素法を用いて数値解析し、応力分布をもとに斜面形状の安定性を動的な観点より検討した。この結果、S字状の斜面形状および斜面下部において傾斜が大きい凸状の斜面の場合、斜面下部に過大な応力が発生し、法尻をすべり面としたすべりの可能性が高いことを示した。

斜面崩壊後の総土量とその到達距離の精度の高い予測は斜面崩壊から人命と財産を守るために極めて重要である。また、山岳・丘陵地域のまちづくりに有用な情報を提供する。第4章では、斜面崩壊後の崩壊土砂の到達距離および斜面の運動特性（モビリティ：土砂到達距離と崩壊開始箇所の高さの比）に対する、斜面高さ、斜面角度、岩級、最大加速度など諸要因の影響を分析し、斜面高さ、斜面角度、岩級、崩壊土量等をパラメータとした到達距離とモビリティ予測のための回帰式を提案した。これらの回帰式が従来から予測式と比較して、より精度の高い予測値を与えることを示した。この結果は今後の山間地の防災計画に重要な情報と手段を与えるものと考えられる。

第5章では、四川地震による斜面の崩壊および非崩壊事例の分析をもとに、アンカーケーブル、フレームビーム、ソイルネーリングおよびボルト定着吹付コンクリート等の斜面对策工の効果について検討した。この結果、アンカーケーブルを対策工とした斜面の崩壊率は全数の1%程度で極めて効果が高いことが示された。

また、ボルト定着吹付クリートについては崩壊事例が10%を超えており比較的対策効果が低いことが示された。これは吹付クリートの場合、斜面より比較的浅い位置にすべりが形成されたことが原因であり、表層土の条件、支援層の深さによりボルトの定着長を決定することが重要であると結論している。

第 6 章結論では、斜面災害軽減に向けての本論文の成果による知見と情報をまとめるとともに、今後の本分野の研究の方向性について述べている。

以上要するには、本論文は 2008 年中国汶川地震による斜面崩壊例約 2 万件を調査対象として、地震動加速度、斜面高さと角度、斜面の形状、岩級、岩盤節理の角度などの諸要因が斜面の安定・不安定に与える影響を分析し、斜面崩壊の発生面積と崩壊土量を予測するための経験式を示したものである。また、崩壊後の土砂の到達距離等の運動特性（モビリティ）について地震動加速度と斜面高さをパラメータとする予測式を導いている。さらに、アンカーボルトなど各種斜面保護工の効果を崩壊事例と非崩壊事例を併せて分析し、各種保護工の有効性を定量的に示した。本研究の成果は地震による斜面の安定性検討のために有用な知見と情報、および安定性検討のための実務的な手法を提案しており、今後斜面保護工の設計と施工に活用され得るとともに、地盤工学の発展にも大きく寄与すると考えられる。

よって博士（工学）の学位を授与するにふさわしいものと判断する。

2013 年 10 月

審査員	主査	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	濱田政則
	副査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	赤木寛一
		東海大学教授	工学博士（名古屋大学）	藍檀オメル