

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25303015

研究課題名(和文)地震と降雨による複合斜面災害の危険度判定と早期警報技術の適用に関する海外調査研究

研究課題名(英文) Risk evaluation and early warning for slope disaster induced by earthquake and rainfall

研究代表者

内村 太郎 (UCHIMURA, Taro)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60292885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：中国、台湾、日本で、強い地震によって損傷を受けた自然斜面が、その後の豪雨をきっかけに崩壊する「地震と降雨の複合的な作用」による斜面災害を対象として調査研究を行った。(1)地震で強震を受けた山岳地域の斜面で、踏査、機器を使った調査と観測、現地実験を行い、斜面の不安定化の実態とメカニズムを把握し、危険な斜面の抽出の方法や災害を軽減する方法を提案した。(2)低コストで簡易な斜面表層の変状の観測装置を用いて、斜面災害の前兆をとらえ、早期警報によって被害を軽減する技術の実用化を推進した。さらに、多点計測や、弾性波を用いた斜面監視など、新しい技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：Slope disasters caused by heavy rainfall after strong earthquake are studied in cooperation among research groups from China, Taiwan, and Japan. Slopes in mountainous areas are often damaged with cracking and deformation by strong seismic events. Even in case they are not failed, they may be less durable against heavy rainfall than before the earthquake. To take care of such cases, following studies are conducted:

- 1) Mechanism of slope weakening due to strong earthquakes are discussed, and methods of risk evaluation are developed based on results from case studies, monitoring with sensors on site, and model/site experiments.
- 2) Low cost and simple monitoring and early warning equipments for slope failures are developed to reduce the risk of disasters. In addition, new methods as like multi-points monitoring and monitoring based on changes in elastic wave propagation through the surface layer are studied.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面災害 地震 降雨 現地調査 モニタリング 早期警報

## 1. 研究開始当初の背景

斜面災害（山崩れ）の原因の大半は豪雨と地震である。近年、アジアや中南米など世界各地で豪雨の規模と発生確率が増加し、極端な豪雨災害が目立っている。その中で、地震と豪雨の複合災害も課題になっている。

中国四川省では、2008年5月12日に生じた汶川地震で、山岳地域の断層帯に沿って多数の斜面が崩壊したが、地震時には崩壊に至らなかった斜面が、その後の降雨によって異常な変異を起こす事例が多く報告され、大規模な土石流災害も頻発している。台湾でも、1999年9月21日の集集地震以降、同様のことが起きている。これらは、地震力による斜面地盤の弱体化が原因である。日本においても、1~2年に一度の頻度でM6以上の地震が発生しており、地震後の斜面災害のリスク評価と対策が求められる。

## 2. 研究の目的

本調査研究は、中国、台湾、および日本の自然斜面で、強い地震によって損傷を受けた斜面が、その後の豪雨をきっかけに崩壊する、地震と降雨の複合的な作用によって生じる斜面災害（山崩れ）を対象として、次の2点を目的とした。

① 過去の地震で強震を受けた山岳地域の斜面で、踏査、機器を使った調査と観測、現地実験を行い、地震によって損傷し、降雨に対して不安定になった斜面の実態とメカニズムを把握し、危険な斜面の抽出の方法や災害を軽減する方法を提案すること。

② これまでに開発してきた、低コストで簡易な斜面の観測装置を用いて、斜面災害の前兆をとらえ、早期警報によって被害を軽減する技術の実用化を推進すること。さらに、多点計測や、弾性波を用いた斜面監視など、新しい技術の開発を試みること。

## 3. 研究の方法

### (1) 中国、台湾、日本の斜面調査

中国での活動は、成都山地災害与環境研究所が主導して、踏査を毎年行った。2013年には、都江堰白沙河、廬山地震災害地、彭州の斜面と断層の被害状況を確認した。2015年には、虹口塔子坪、銀洞子溝の土石流現場を踏査し、早期警報のための観測計画を議論した。2016年には、綿竹小崗剣の土石流被害調査のほか、虹口塔子坪、銀洞子溝の現場の観測状況を視察した。また、台湾では、主に台湾交通大学の主導で、2015年に台湾東部の国道沿いの斜面災害地を踏査した。日本においては、中国の研究者を招いて、2013年には紀伊半島の2011年台風による災害箇所、2015年には

伊豆大島の2013年土石流現場、2016年には2016年熊本地震による斜面災害状況の踏査を行った。

### (2) 斜面崩壊の早期警報手法の検討

これまで取り組んできた、斜面表層の傾斜変位の監視と、崩壊の早期警報技術の開発について、測定データに基づく警報基準の決め方について、過去のデータと、本研究期間中に新しく取られたデータ、模型実験などにより検討した。

また、2011年に中国の虹口塔子坪で実施した人工降雨による斜面崩壊実験について、観測データから、雨水の浸透と安全率低下の関係性を詳しく分析した。

### (3) 多点計測による早期警報技術の開発

上記の斜面監視手法を発展させて、斜面に多数の観測機を設置して、状況を面的に把握し、よりの確な警報の判断に使う技術を開発した。これを実現するために、より低コストの機器を開発した。

台湾の高雄第一科技大学の主導で、高雄市の燕巢廃棄物処分場の堀削斜面に、これらの機器を設置して、多点計測による監視を行った。また、日本では、伊豆大島の2013年土石流の源頭部、2015年~2016年は山梨県万沢の地すべり箇所、また2016年には熊本地震で亀裂の入った阿蘇外輪山の斜面で、多点監視を行った。これらのデータを整理して、多点計測による早期警報手法や基準値について検討した。

### (4) 弾性波による斜面調査と監視の技術の開発

斜面の表層の状態を調べて、危険箇所を把握するための能率的な方法として、弾性波探査（屈折法）を用いる方法を試みた。従来の屈折法では斜面表層のみを叩いて加振するのに加えて、表層底部の基盤層との境界も加振したときの走時を取ることで、測線に沿った表層の厚さ分布や硬さを測る方法を考案して、模型実験や実斜面での計測で検証した。

また、降雨時や地震後に、斜面への雨水浸透や変動の状況を監視するために、弾性波探査（屈折法）を応用する方法についても、模型実験と斜面を構成する不飽和土の要素試験により検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 中国、台湾、日本の斜面調査

中国、台湾、日本の研究者合同で、各地の斜面災害箇所を調査し、情報を共有した。特に、その中で中国の綿竹小崗剣、虹口塔子坪、銀洞子溝の現場では、観測機器を共同で設置

して運用を開始した（図1）。また、台湾高雄市の現場では、多点計測の初めての事例として、機器を設置して、試験計測を行った。



図1 銀洞子溝の観測機の配置例

### (2) 斜面崩壊の早期警報手法の検討

これまでに、斜面の表層に鉛直に挿入した鋼棒の微小な傾斜変位を監視して、崩壊の前兆を捉える手法（図2）を開発してきた。過去に実斜面で運用したときのデータに、本研究期間中に新しく取られたデータを加えて分析した結果、傾斜速度と崩壊までの残余時間の間に、一定の関係があることを見いだした（図3）。これに基づいて、0.1度/毎時を超える傾斜速度が継続的に観測されるときは、斜面が不安定な状態にあると考えられ、警報を出すことを提案した。また、崩壊前の傾斜の進み方について、現地計測や模型実験で詳しい検証を行った。

また、2011年に中国で実施した人工降雨による斜面崩壊実験のデータの分析では、観測データから、雨水の浸透過程と、進行的な崩壊の進み方との比較から、降雨の強度と継続時間に基づく警報基準について考察した。

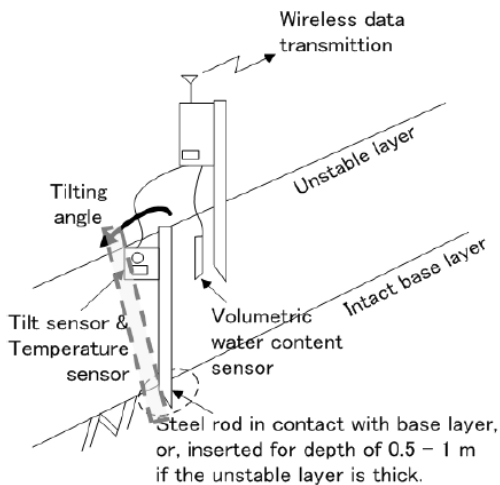


図2 斜面表層の傾斜の監視装置

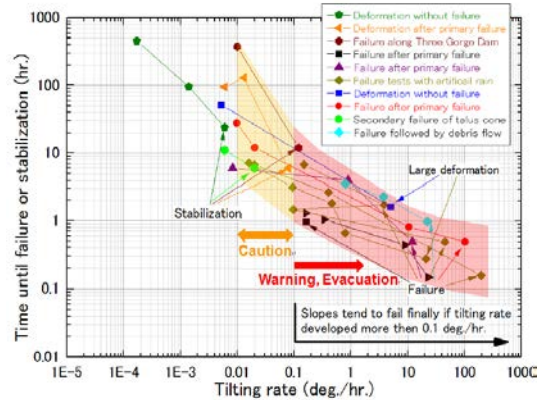


図3 表層の傾斜速度と崩壊残余時間の関係

### (3) 多点計測による早期警報技術の開発

斜面の多点計測を実現するために必要な機器の低コスト化を行った。通信距離は短いですが、より安価な無線モジュールを使って、機能と部品点数も削減した孫機センサーユニットを新しく開発し、これで斜面を面的に多数監視し、その情報を1箇所の長距離無線ユニットに集約して送信する構成とした。

機器の信頼性と有効性の検証を兼ねて、台湾高雄市の燕巢廃棄物処分場の堀削の裏面に設置して、多点計測を行った（図4）。その後、日本の伊豆大島の2013年土石流の源頭部、2015年～2016年には山梨県万沢の地すべり箇所でも運用した。また2016年には熊本地震で亀裂の入った阿蘇外輪山の斜面で、多点計測を開始した。1つの斜面の中でも、崩壊しやすい箇所とにくい箇所があるが、事前に的確に判別することは難しい。多点監視では両者を厳密に区別せずに広く計測データを収集する。そのため、全体の平均的なデータに基づいて警報を行うと、判断が危険な状態を見逃す側に偏ることになる。対策として、今回の観測事例から、斜面を複数の部分に階層的に分割して、それぞれの平均挙動を見ることで、警報の判断を行うことを提案した。

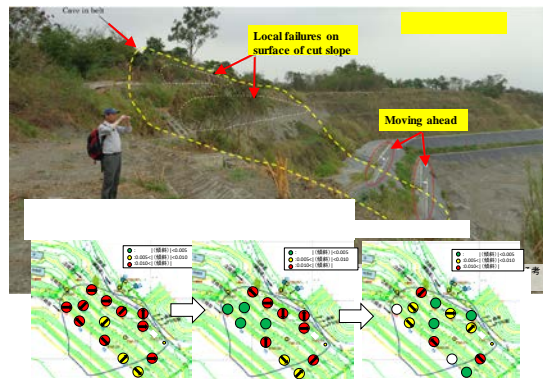


図4 台湾高雄市燕巢処分場の多点計測



(4) 弾性波による斜面調査と監視の技術開発

弾性波探査（屈折法）を応用した表層の厚さの分布や硬さの調査手法の開発では、模型実験で、層圧分布に変化のある表層の模型を製作し、その中を伝わる弾性波の走時を測定した。従来通りの表層だけ加振する測定方法では、表層の平均的な厚さしか得られないが、表層の底部の基盤層との境界を加布里したときの走時と組み合わせて、測線に沿った表層圧分布を推定できることが分かった（図5）。神戸市六甲山系の斜面でも試験計測を行って、検証した。

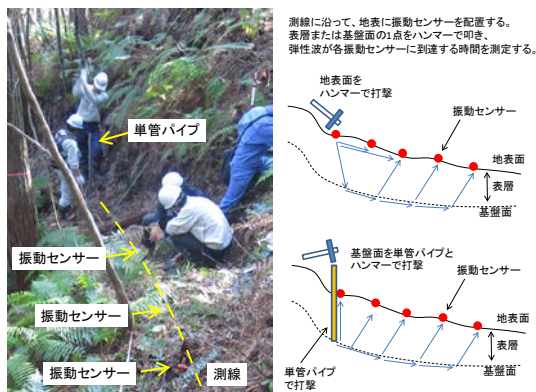


図5 弾性波探査（屈折法）の応用による表層厚さ分布の推定

また、降雨時や地震後に、斜面への雨水浸透や変動の状況を監視するために、弾性波探査（屈折法）を応用する方法を検討した。上記の表層厚さの推定は、表層内部の弾性波速度が均一で、一定値であることを前提としている。一方で、本研究では斜面を構成する不飽和土の要素試験を行い、地中に雨水が浸透する過程と、さらに崩壊につながる変形が始まる過程で、それぞれ弾性波速度が低下することが分かった（図6）。従って、同じように走時を測っていても、雨水浸透や、降雨、地震による変形によって、見かけ上異なる値の表層厚さが推定されることになる。これを利用して、斜面の状態を把握する手法について、模型実験、理論的な考察を行った。今後、熊本地震の被災現場などでも測定を行い、さらに詳しく検証する。

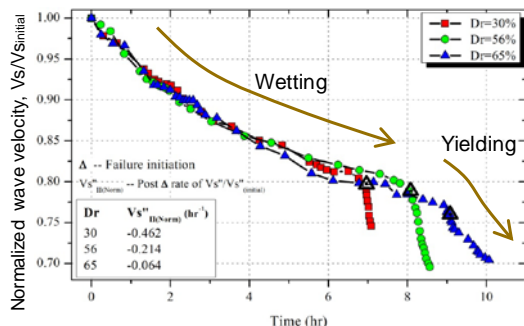


図6 不飽和土の三軸供試体における水浸とせん断降伏に伴う弾性波速度の低下

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

① Zongji Yang, Jianping Qiao, Taro Uchimura, Lin Wang, Xiaoqin Lei, Dong Huang (2017): Unsaturated hydro-mechanical behaviour of rainfall-induced mass remobilization in post-earthquake landslides, Engineering Geology, Vol. 222, pp. 102-110.

② Muhammad Irfan, Taro Uchimura (2016): Development and performance evaluation of disk type piezoelectric transducer for measurement of shear and compression wave velocities in soil, Journal of Earthquake Engineering, Published online:22/Sep/2016, <http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2016.1217800>

③ Irfan, M. and Uchimura, T. (2015): Helical Filter Paper Technique for Uniform Distribution of Injected Moisture in Unsaturated Triaxial Specimens, Soils and Foundations, Vol.55, No.4, pp. 749-760.

④ Taro Uchimura, Ikuo Towhata, Lin Wang, Shunsaku Nishie, Hiroshi Yamaguchi, Ichiro Seko, Jianping Qiao (2015): Precaution and early warning of surface failure of slopes by using tilt sensors, Soils and Foundations, Vol.55, No.5, pp. 1087-1100.

〔学会発表〕（計17件）

① Lin Wang, Shunsaku Nishie, Ling Su, Taro Uchimura, Shangning Tao, Ikuo Towhata (2017): Proposed early warning system of slope failure by monitoring inclination changes in multi-point tilt sensors, Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017, 2017/9/17-22, ソウル(韓国), (印刷中).

② Lin Wang, Shunsaku Nishie, Taro Uchimura, Ikuo Towhata, Ling Su, Shangning Tao (2017): An early warning system of unstable slopes by multi-point MEMS tilting sensors and water contents, Proc. of the 4th World Landslide Forum, 2017/5/29-6/2, Ljubljana (Slovenia), (印刷中).

③ Zongji YANG, Jianping Qiao, Taro Uchimura, Lin Wang, Dong Huang (2017): Explore on Hydro-Mechanical Threshold for Early Warning of Rainfall induced Landslides, Proc. of the 4th World Landslide Forum, 2017/5/29-6/2, Ljubljana (Slovenia), (印刷中).

④ 陶尚寧・Selvarajah Hemakanth・内村太郎

(2017): 弾性波探査屈折法を応用した斜面崩壊予兆の検知, 第 52 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2017/7/12-14, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), (印刷中).

⑤ 大原勇・Kapila Ranjith Withanage・内村太郎 (2017): 一面せん断模型実験を用いた斜面の表層変位による崩壊予測方法の検討, 第 52 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2017/7/12-14, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), (印刷中).

⑥ 王林・蘇綾・西江俊作・内村太郎・陶尚寧 (2017): 多点計測による 2016 年熊本地震の被災斜面における傾斜及び土壌水分変化の長期観測, 第 52 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2017/7/12-14, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), (印刷中).

⑦ Wang Lin, Nishie Shunsaku, Seko Ichiro, Uchimura Taro, Towhata Ikuo, Qiao Jianping (2015): Case histories of slope failure and landslide disaster prevention by using a low cost tilt sensor monitoring system, IAEG XII CONGRESS, Proceedings of "Engineering Geology for Society and Territory" - Volume 2, pp. 631-635, 2015/9/15-19, Torino (Italy).

⑧ T. Uchimura, I. Towhata, L. Wang, S. Nishie, H. Yamaguchi, I. Seko, J.-P. Qiao (2015): Monitoring and Early Warning for Surface Failure of Slopes by using Tilt Sensors, The Tokyo Conference on International Study for Disaster Risk Reduction and Resilience, Poster session No. 29 (ポスター発表), 2015/1/14-16, 東京大学(東京).

⑨ Wang, L., Nishie, S., Uchimura, T., Qiao, J.-P., Tian, H.-L., and Yang, Z.-J. (2015): The Stability Monitoring of Earthquake-induced Rock-fall, Proc. of the 6th Sino-Japan Geotechnical Symposium 2015, Article number: JPN-28, pp. 17-22, 2015/8/31-9/1, 北海道工業大学(北海道札幌).

⑩ Uchimura, T., Wang, L., Yamaguchi, H., Nishie, S., Eto, I., Tao, S., Lu, C.-W., Chang, J.-J. and Chen, C.-W. (2015): Multi-point monitoring of unstable slope with low cost sensor network, Proc. of the 6th Sino-Japan Geotechnical Symposium 2015, Article number: JPN-35, pp. 29-33, 2015/8/31-9/1, 北海道工業大学(北海道札幌).

⑪ 衛藤一平・内村太郎・Chen Yulong・王林 (2015): 斜面変位の多点監視:機器の開発とその有効性の検討, 第 50 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2109-2110, 2015/9/1-3, 北海道工業大学(北海道札幌).

⑫ L. Wang, J.P. Qiao, T. Uchimura, H.L. Tian, Z.J. Yang, S. Nishie, The Stability Monitoring of Earthquake-induced Slope Failure and Landslides, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2-4 November 2015/11/2-4, Christchurch (New Zealand).

⑬ Wang, L., Seko, I., Nishie, S. and Uchimura, T. (2015): Prefailure Deformation Monitoring of Landslide and Slope by using Tilt Sensors, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (15ARC), 2015/11/9-13, 福岡国際会議場(福岡県福岡市), JPN-048.

⑭ 内村太郎・王林・山口弘志・西江俊作・衛藤一平・陶尚寧 (2015): 斜面表層の傾斜変位の多点計測による崩壊予兆の監視, Kansai Geo-Symposium 2015 -地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム, 発表番号 6-7, 2015/11/20, 大阪市立大学学術情報センター(大阪府大阪市).

⑮ Wang Lin, Towhata Ikuo, Uchimura Taro, Qiao Jianping, Zeren Dawa (2014): Case Histories of Slope Failure and Landslide Disaster Prevention by Using a Low Cost Tilt Sensor Monitoring System, International Symposium Geohazards : Science, Engineering, and Management, 2014/11/20-21, Kathmandu (Nepal), pp. 359-368.

⑯ 清水彰久、内村太郎 (2014): 簡易動的コーン貫入試験の衝撃を使った斜面表層の弾性波探査, 第 49 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1761-1762, 2014/7/15-17 北九州国際会議場 (福岡県北九州市).

⑰ 内村太郎・東畑郁生・王林・西江俊作・山口弘志・瀬古一郎・Qiao Jianping (2014): 計測技術の災害軽減技術への適用 - 低コストで簡単に扱える斜面災害の早期警報システム, 第 15 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演, 講演番号 3C2-3, 2014/12/15-17, 東京ビッグサイト(東京).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況（計 0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内村 太郎 (UCHIMURA, Taro)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：60292885

### (2) 研究分担者

古関 潤一 (KOSEKI, Junichi)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：30272511

桑野 玲子 (KUWANO, Reiko)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号：80312974

東畑 郁生 (TOWHATA, Ikuo)  
関東学院大学・理工学部・客員教授  
研究者番号：20155500

### (3) 連携研究者 該当なし

### (4) 研究協力者

西江 俊作 (NISHIE, Shunsaku)  
中央開発株式会社 技術センター長  
WANG Lin  
中央開発株式会社 技術センター  
QIAO Jian-Ping、中国科学院・成都山地  
災害与環境研究所・教授  
YANG Zongji、中国科学院・成都山地災害  
与環境研究所・研究員  
HUANG Dong、中国科学院・成都山地災  
害与環境研究所・研究員  
HUANG An-Bing、台湾・国立交通大学土  
木工学科・教授  
LU Chin-Wei、台湾・高雄第一技術科学大  
学・准教授