

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246082

研究課題名(和文)地震と降雨の複合斜面災害のメカニズムと対策の研究

研究課題名(英文) Mechanism and mitigation of slope disasters caused by combined effects of earthquake and rainfall

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：災害被害程度を決める因子として、従来のような斜面の地盤材料のせん断強度に加え、破壊後の脆性(せん断強度後の軟化)を重視し、これらの材料挙動と風化との関係を調べることを、本年の目的とした。

軟岩の化学的風化による劣化を実験室で再現し、強度や剛性の低下を測定。自然軟岩の実験では個体差によるデータばらつきが大きい為、砂と水、石灰、石こうを混合して固めた人工軟岩の実験も重視した。準備した試験体を酸性水(ph=5および4)の水に浸潤させ、結合を溶解させて劣化を惹起。このサンプルで一軸圧縮試験を実施し、ピーク強度及びその後の軟化プロセスを計測。また自然の岩石強度をより迅速に測定するための点載荷実験も実施。

研究成果の概要(英文)：Human settlement is destroyed by debris flow and many casualties are claimed. Thus, it is important to study not only the shear strength reduced by weathering but also softening of stress-strain behavior after peak strength. In this regard, laboratory studies were performed, chemical weathering was reproduced and the decay of tested material were investigated on natural rocks as well as mixing sand, lime, gypsum and water at a specified ratio and cured for a certain time. Prepared specimens were submerged in acidic water with ph = 4 or 5 and the particle-to-particle bonding was destroyed chemically. Then, unconfined compression tests were run on samples with different extents of chemical weathering. Using the measured stress-strain relationship, study was made of the decay of the peak strength and the softening behavior that followed the peak. Moreover, point load tests were conducted to investigate more profoundly a number of weathered rock pieces.

研究分野：地震耐震工学

キーワード：岩石 せん断強度 断層 クリープ 地震荷重 軟化

### 1. 研究開始当初の背景

斜面災害が起こるたびに被害者が「長年崩れる気配の無かったこの斜面が、なぜこの程度の雨降りて崩れたのか？」と嘆くことは珍しいことではない。

なぜ予想外の斜面崩壊が起こるのか、地下水脈の変化、無思慮な掘削等理由はいくつかあるが、人間の制御の効かない原因として岩盤の風化、劣化がある。我が国のように多雨気候かつ地質的に若齢の岩盤斜面の多い国では、潜在的に風化と劣化の進んだ不安定斜面が無数にあり、危険と認識されている所だけで数十万カ所ある(写真1)。これらをすべて工学的に調査することすら財政的に困難であるが、風化課程の進行を追跡して調査を繰り返すことは、いっそう不可能と言わざるを得ない。その結果、危険度判定は地形や過去の崩壊履歴だけに依存するものとなり、安全側すなわち危険を過大評価したものにならざるを得ない。集落全域が危険地帯に指定され、万一の場合の避難所を設ける場所すらない、という事態も発生している。



写真1 風化花崗岩斜面の豪雨時崩壊による災害(2014年広島)

### 2. 研究の目的

岩石の風化にともなう力学的性質の劣化を実験室で再現し、自然斜面の危険度を簡易な方法で定期的に評価、風化の進行に伴って安全性が減少していく過程を追跡する手法を開発する。安全性が危険域に近づいた場合、既が開発した計器を設置して斜面観測体制に移行することを想定している。

### 3. 研究の方法

風化の再現方法としては凍結融解(力学的風化)のほか酸性水浸によって化学結合機構を溶解させて(化学的風化、写真2)材料の破壊に至らしめる。材料には、自然の岩石の他、均一な材質を確保できる人工軟岩(砂、石膏、石灰、水の混合物を固化させたもの)をも使用する。水浸時間すなわち化学的風化の度合いの異なる試験体を数多く準備し、一軸圧縮実験を行うことにより、微小ひずみ時の剛性(S波伝播速度)とピーク強度、および残留変形状態に至る応力ひずみ挙動の全体を計測する。また自然の岩石強度をより迅速に測定するための点載荷実験も実施する。



写真2 酸性水中の時間経過に伴う材料劣化(人工軟岩、pH4)

### 4. 研究成果

風化再現研究は剛性と強度の変化に着目すべきであるが、広島の花崗岩風化斜面の崩壊と長距離流動を考慮して、さらにピーク強度後の軟化・応力低下に着目した。破壊に至った斜面では外力はピーク挙動に達したと考えられ、その後は変形が進むにつれて抵抗応力レベル(残留強度と呼ぶ)が低下する。すると運動方程式の考え方により、

$$\text{すべり土塊の質量} \times \text{加速度} = \text{外力} - \text{抵抗} = \text{ピーク強度} - \text{残留強度}$$

なので、残留強度の劣化が著しければ、加速度すなわち流動性が高まると考えられる。しかし人工軟岩の一軸圧縮実験結果によれば、化学的風化によってピーク強度は著しく劣化して斜面は不安定の度合いを高めるものの、残留強度には大きな差が生じなかった(図1)。このことは残留強度が化学的風化しにくいと解するべきではない。残留強度の段階ではすでに試験体は大きな変形を経験しており、すべり面に沿って粒子の結合は破壊され終わっている、したがって化学的風化・劣化は残留強度に影響しない、と解するべきである。他方、ピーク強度が発生する時点での変形(ひずみ)は化学的風化によって小さくなっており、崩壊の前兆的な微変形は、化学的風化によって露呈されにくくなる、すなわち斜面崩壊の直前察知が難しくなる。自然の岩石について多数の点載荷実験も行ったが、岩石ごとの個体差が著しく、強度低下以外に有意な傾向を見出すことは難しかった。

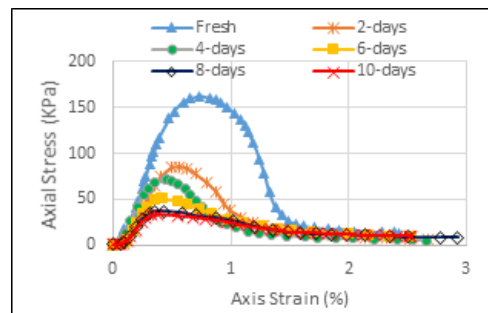


図1 化学的風化実験結果

風化の進行につれて強度が劣化することは疑いが無い。しかしこの過程を現場の斜面で計測し続けることは、実務上の財政制約のため、困難である。そこでより手軽に計測できる剛性低下(現場のS波伝播速度の低下)

で代用することを提唱する。このたびの化学的風化再現実験によると、物理風化（図2）と比べ、S波伝播速度低下と強度劣化との比率が異なっている（図3）。これは新しい発見である。風化と強度低下の計測を現場で繰り返すことは難しいので、実用的な対処法としては、同一斜面の風化程度の異なる個所で、一度に多くのS波伝播速度と強度の計測を行い、両者の相関が、その後の風化進行にも適用できる、すなわち時間変化と空間変化とが等価である、と考えるべきであろう。

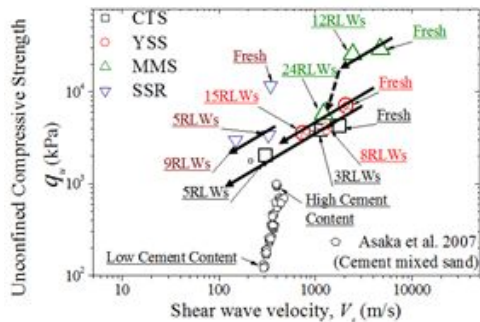


図2 凍結融解による物理的風化の進行に伴う物性の変化

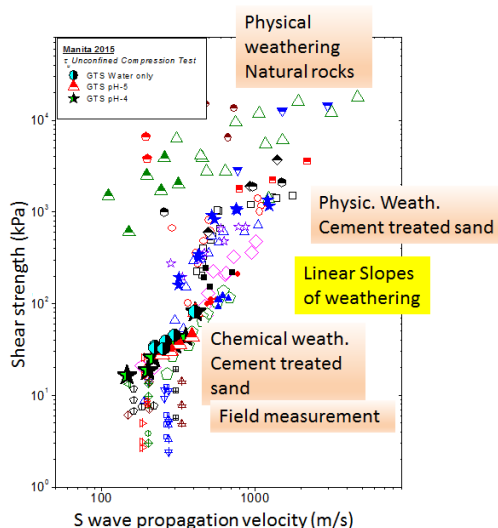


図3 化学的風化による劣化進行と物理的風化進行との比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Aziz, Mubashir, Towhata, Ikuo and Irfan, Muhammad (2015) Strength and Deformation Characteristics of Degradable Granular Soils, Geotechnical Testing Journal, Volume 39, Issue 3.

〔学会発表〕(計6件)

Towhata, I. (2016) Reconnaissance Study on Rainfall-induced Failure of Izu-Oshima Volcanic Mountain Slope, Geotechnical & Structural Engineering Congress, ASCE, Phoenix.

Towhata, I. (2016) Missing issues in mitigation of rainfall-induced landslides, 1st Int. Conf. on Natural Hazards & Infrastructure (ICONHIC2016), Chania, Greece.

Nakarmi, Manita and Towhata, Ikuo (2015) Soft Rock Slope Weathering Due To Rainwater, 6th Japan-China Geotechnical Symposium, Sapporo.

Towhata, I., Uchimura, T., Seko, I. and Wang, Lin (2015) Monitoring of unstable slopes by MEMS tilting sensors and its application to early warning systems, International Symposium on Geohazards and Geomechanics, Univ. Warwick, UK, also published from IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 26 (2015)

doi:10.1088/1755-1315/26/1/012049

Towhata, I., Gunji, K. and Nong, X. (2015) Deterioration of soft rock material by seismic excitation along big faults, 50th Indian Geotechnical Conference, Pune, India.

Wang, G. and Towhata, I. (2015) Global warming and landslide disaster: evidences from Japan, Joint Technical Committee JTC-1, TR3 Forum "Slope Safety Preparedness for Effects of Climate Change", Naples.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

内村 太郎 (Uchimura, Taro)  
東京大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 60292885

山田 卓 (Yamada, Suguru)  
大阪市立大学・工学研究科・講師  
研究者番号：70451789

(3)連携研究者

( )  
研究者番号：