

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26750135

研究課題名(和文) 弾性波を用いた室内実験による地すべり発生メカニズムの理解とモニタリング手法の確立

研究課題名(英文) Experimental study of landslide monitoring using elastic waves -understanding of landslide mechanism and establishing of its monitoring method-

研究代表者

土井 一生(Doi, Issei)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：00572976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：地すべりや斜面崩壊の防災、減災のためには、事前にそうした現象が発生することを予測することが重要である。本研究は、新たな斜面災害を予測する尺度として、弾性波の利用を提案するため、まず水槽実験をおこない地すべり発生前に、弾性波の伝播が土層中でどのように変化するか検証をおこなった。まずは、そのような水槽実験をおこなうための水槽を新たに製作し、弾性波の送受振システムを構築した。それを用いた降雨実験をおこなった結果、地下水位の変化に伴って、弾性波の伝播速度が複雑に変化すること、降雨に伴う斜面崩壊が発生するしばらく前から弾性波の伝播速度と振幅が低下することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We conducted a flume test and tried to grasp the changes in elastic wave propagation properties in the sediments before landslides. We firstly make a new apparatus to realize such experiments. Using the developed apparatus, the followings were found: 1) the speed of elastic waves changed very complicatedly in accordance with the ascend of ground water level, and 2) the speeds and the amplitudes of the elastic waves decrease a little before slope failures.

研究分野：斜面地震学

キーワード：弾性波 地すべり モニタリング

## 1. 研究開始当初の背景

日本の国土は狭いにもかかわらず、その7割以上が山間部にあたる。江戸時代初期からの急激な人口増加に対応するため、山間部を開発することによって居住区域を広げてきた。しかしながら、こうした急速な開発は、数十年から数百年に一度の自然現象によるハザードを十分に考慮されずにおこなわれていたために、多くの新興住宅地において、大雨や地震に伴う地すべりによる被害が発生している。そのため、斜面災害の発生に至るまでの過程をモニタリングする方法を構築することは、学術面のみならず防災面からも非常に重要な課題である。

豪雨に伴う地すべりの事前予測のために、主に土中の水分量によってその危険度が評価され、変位計・傾斜計によって斜面の変形がモニタリングされている(北村ほか、地盤工学会誌 2012)。このようなモニタリングは非常にゆっくりとすすめる地すべりには適用可能であるものの、いったん始まった地すべりがどこまで続くのか、高速すべりを伴う地すべりの場合に変形が確認されてから発生までにどの程度の時間があるか、などはわかりづらく被害軽減を押し進めるうえでの問題点が存在している。

このような問題を解決するためには、斜面内部の状態を把握する方法を開発し、斜面内部における地すべりのプロセスを理解することが必要となる。これによって、地表に変形が現れる前に、斜面内部で進行するプロセスを考慮して適切に危険度を評価できる可能性がある。

地震学や岩石力学の分野においては、近年、弾性波を用いた伝播媒質内部のモニタリングが積極的におこなわれつつある。研究代表者らは、フィールドにおいて、人工的に定常弾性波を発生させるシステムの近傍(約 1 km)で発振された弾性波を 1 年以上にわたり連続的に記録し、透過弾性波の波形の類似性が大規模降水に対応して低下すること、弾性波の到達時刻(すなわち、弾性波の伝播速度)が年周変化を示すことを明らかにした。また、岩石実験においては、Yoshimitsu et al. (Bull. Seismol. Soc. Am., 2011) がコーヒー缶程度の大きさの岩石試料に鉛直応力をかけて破壊させる実験をおこない、主破壊前に大きな弾性波の伝播速度低下と減衰率の増加を観測した。

前述のような弾性波による内部モニタリングを斜面に応用することで、斜面内部の状態の把握するために新たな観測量を導入できる可能性がある。これまでも斜面において弾性波計測がおこなわれてきたが、内部において発生する微小破壊(AE)を記録する受動的な観測に多くが留まっている。また、能動的に弾性波を送受信する研究事例においても、土層の静的な弾性波速度の推定に用いられるのがほとんどであった。近年、地震学分野の地震波干渉法とよばれる受動的なモ

ニタリング手法が斜面にも適用されつつあるが、抽出される変化が斜面内部のどのような状態を反映しているかよくわかっていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、弾性波が斜面災害の危険度モニタリングに活用できるかを検討するため、室内模擬実験をおこない、以下の点について明らかにする。

1) 斜面における能動的な弾性波モニタリングがどのような条件で可能となるか。

空隙や水分が多い斜面内部は高周波の弾性波を強く減衰させる。一方で、振幅の大きな弾性波を不安定な斜面内部に透過させることは崩壊の危険性を高める。そのため、モニタリングに適した送信弾性波の周波数や振幅、形状について、現場のスケールも考慮しながら明らかにする。

2) 弾性波の特徴に降雨に対応して変化が現れるか。

斜面内部を透過した弾性波が、斜面に与えた降雨の大きさやパターンによって変化するかを調べる。弾性波記録を解析することにより、降雨に対応した斜面内部における弾性波の減衰率、伝播速度における変化のパターンについて明らかにする。

3) どのような斜面内部プロセスがどのような弾性波の特徴の変化をもたらすか。

前項で述べた透過弾性波の変化の特徴があらゆる具体的な斜面内部でのプロセス・変化について、分類学的・理論的な観点から考察し明らかにする。これによって、地すべり発生メカニズムを斜面内部プロセスから理解する。また、弾性波モニタリングを通じた斜面内部状態の把握によって斜面災害の危険度モニタリングが可能か検討する。

## 3. 研究の方法

### 1) 斜面の再現方法

これまでの水槽実験において用いられる水槽は、底面が透水係数 0 の境界条件となっていたため、降雨や地下水位の上昇を模擬することが可能な水槽を新たに製作する。

さまざまなフィールドにおける斜面の状態を考慮するため、砂粒の粒径・種類、斜面の傾斜・形状を変え実験をおこなう。また、地質境界で地すべりが発生する可能性があることを考慮し、異なる種類の砂粒を 2 層に敷き詰めた実験もおこなう。

### 2) 降雨の再現

実験はいくつかの条件設定のもとにおこなう。降雨時の再現には、上方から霧吹きや

ジョウロで水を散布する。散布する水の量や継続時間を変えることで、さまざまなタイプの降水を再現する。

### 3) 送信する弾性波の探索

距離減衰や一般的な減衰率を用いて、現場スケールへの適用も考慮し、斜面内部を透過させる弾性波の強度、周波数帯、形状(単色波、スイープ波、インパルス)を以下の点に注意しながら決定する。

- ・ 十分な強度で受振子によって受信できるか
- ・ 弾性波による振動が斜面の安定性に影響をあたえないか

### 4) 室内における弾性波の透過実験(降雨による変化の検出)

長さ 1 m 弱程度の水槽の中に斜面を模して砂をセットし、斜面内部に圧電型の送振子と三成分加速度計受振子を数 10 cm 程度離して設置、その内部で弾性波を透過させる室内実験をおこなう。あわせて、土中水分計や間隙水圧計も斜面の中に設置し、連続的に計測をおこなう。

### 5) 弾性波の伝播速度・減衰率の推定

斜面内部の弾性的・非弾性的な性質の時間変化を、透過弾性波の到着時刻、強度、の特徴から推定する。研究代表者らが地震学的なスケールで弾性波モニタリングをおこなった際のアルゴリズムをベースに、伝播速度の変化を明らかにする。また、集録波形のスペクトル比を取ることで減衰率の変化を把握する。

## 4. 研究成果

### 1) 実験環境の整備

実験の再現性を担保するため、同室の地盤が作成できる降砂装置を作成した。その結果、土層密度のばらつきを数 % に抑えることが可能となった。

続いて、水槽の製作をおこなった。近年の豪雨により発生した表層崩壊の発生機構を文献検索や現地調査によって調べ、特に火山における表層崩壊においては、地面の傾斜とほぼ同じ傾斜を持つ成層構造で斜面鉛直方向に透水係数がばらつくことが分かった。地下水位の上昇に伴って、間隙水圧が上昇し斜面が不安定化する点も踏まえ、以下のような水槽を製作した。まず、ジャッキで持ち上げることで水槽を傾け、そこに砂を降下させたのち、水槽を水平に戻すことで、斜面と平行な地層が作成できるようにした。さらに、底面と側面をポーラスストーンとすることで、水槽下方からも水を供給することが可能となった。

弾性波を送る加振器の選定に当たっては、

送振弾性波が土層の構造・形状に影響を与えないこと、水槽の大きさの数分の1よりも短い波長をもつ弾性波を送振できることを条件に加振器を選定した。また、微弱な弾性波を受振できる高感度かつ低ノイズな加速度計を選定し、土層中を透過した弾性波を高周波数帯まで記録できる環境を整えた。

### 2) 静的な環境での弾性波計測

まず、飽和領域、不飽和領域、乾燥領域での弾性波がどのように土層中を透過するかを明らかにするため、水平地盤を用いた実験をおこなった。実験では、水槽の底面から水をゆっくりと注入し、地下水位を少しずつ上昇させたときの、弾性波の伝播特性の変化を調べた。その結果、弾性波の走時は水の注入に伴って徐々に遅くなったが、砂層全域が飽和した時刻前後において早くなる方向に転じた。一方、弾性波の振幅は、水の注入に伴って、特に高周波成分で低下することが分かった。

### 3) 降雨実験における弾性波の挙動

降水の浸透過程、不透水層の影響によって斜面が不安定となる過程における弾性波の透過特性の変化を調べる実験をおこなった。シリカを下層に混合することで、上層が良透水性、下層が難透水性を持つように調整した。

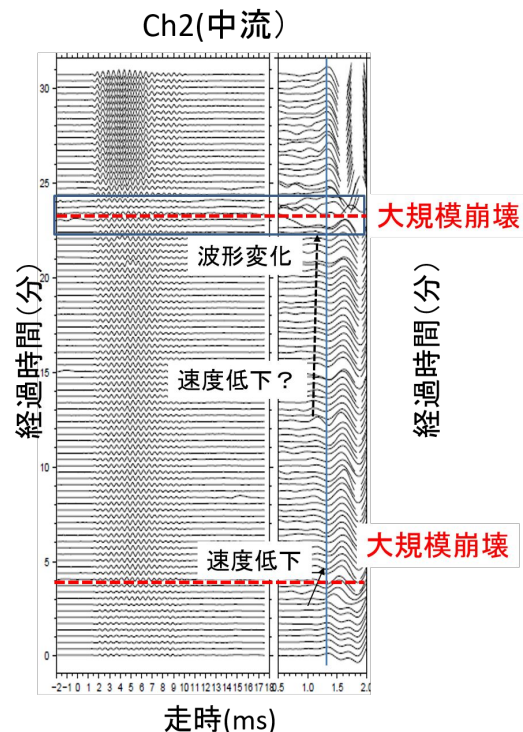


図1: 降雨に伴う弾性波の変化。

弾性波は 2 kHz の周波数を持つ正弦波の 10 回の繰り返しを 400 ms 間隔で与えた。初期状態の弾性波を集録するため、実験開始後 3 分間は降雨を与えず弾性波を収録した。続いて、時間雨量約 50 mm の降雨を与え、さら

に 20 分後に降雨量を 2 倍とした。

記録された波群の立ち上がりは、地表全点において降雨開始時に、また、地表の斜面中央において崩壊発生前の 10 分程度前から崩壊発生時にかけて遅くなった(図 1)。また、振幅も低下した。これらの観察事実から、弾性波によって斜面内部の水分状態や崩壊前の微小な変形についてモニタリングできる可能性が示唆された。

## 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 2 件)

M. Nakayama, H. Kawakata, I. Doi, N. Takahashi (2016): Spatio-temporal variation in propagation characteristics of elastic waves in a sand soil during a water injection test, Proceedings of 23rd International Acoustic Emission Symposium.

川方裕則・土井一生・高橋直樹・中山雅之 (2017): 軟弱地盤の構造変化検出を目的とした弾性波モニタリングの試み, 第 14 回岩の力学国内シンポジウム予稿集.

[学会発表](計 9 件)

土井一生・川方裕則・塩見尚也 (2016): 弾性波を用いた地下水状態の受動的モニタリングの試み、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、SSS28-03.

土井一生・川方裕則・高橋直樹・中山雅之・岸田貴兆 (2017): 能動震源による表層崩壊・地すべりのモニタリング - 水槽実験と能動観測 -, 研究集会「地球内部構造の観測・監視技術の未来」

土井一生・川方裕則・中山雅之・高橋直樹・岸田貴兆 (2017): 水槽実験を用いた表層崩壊模擬斜面における弾性波透過特性の変化の検出、日本地球惑星科学連合 2017 年大会、SSS11-P05.

M. Nakayama, H. Kawakata, I. Doi, and N. Takahashi (2015): Estimation of the propagation characteristics of elastic waves propagating through a partially saturated sand soil, 2015 AGU Fall Meeting, NH41C-1829.

高橋直樹・川方裕則・土井一生・中山雅之 (2015): 間隙水による弾性波伝播特性の変化, 2015 年地すべり学会研究発表会, 3-24.

中山雅之・川方裕則・土井一生・高橋直樹 (2015): 土層実験における弾性波の計測,

日本地震学会 2015 年秋季大会, S12-P04.

中山雅之・川方裕則・平野史朗・土井一生・高橋直樹 (2016): 砂層地盤における弾性波高周波成分の透過実験, 2016 年日本地震学会秋季大会, S12-P02.

M. Nakayama, H. Kawakata, S. Hirano, I. Doi, N. Takahashi (2016): Transmission experiment of elastic waves with short wavelengths through a highly porous sand soil during water injection, 2016 AGU Fall meeting, S43A-2812.

高橋直樹・川方裕則・中山雅之・土井一生・岸田貴兆 (2017): 表層崩壊の早期予警報の実現に向けた弾性波による斜面モニタリングの試み 模型実験による検証、第 52 回地盤工学研究発表会.

[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

土井 一生 (DOI, Issei)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号: 00572976

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし

(4)研究協力者

川方 裕則 (KAWAKATA, Hironori)  
立命館大学・理工学部・教授

釜井 俊孝 (KAMAI, Toshitaka)  
京都大学・防災研究所・教授