

令和元年6月19日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02996

研究課題名(和文) 斜面災害軽減のための地すべりシナリオの構築と弾性波を用いたモニタリングの高度化

研究課題名(英文) Construction of landslide scenario and advancement of elastic wave monitoring for slope disaster mitigation

研究代表者

川方 裕則 (Kawakata, Hironori)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：80346056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、地すべりの発生が危惧される斜面において、斜面下を透過する弾性波の波形記録を解析することにより、その斜面の状態をモニターできるようにすることを目指して実施された。現場では、斜面に影響を及ぼさない程度の低強度の弾性波を広い周波数範囲で送信し、高感度加速度計アレイ観測による受信に成功した。要素試験として実施した未固結な土層を媒質とした弾性波計測試験において、媒質の乾燥過程において水頭の減少にともなう伝播速度の増加がみられること、またこの変化は低周波側から先行してみられることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地すべりや大規模崩壊等による斜面災害の発生予測は、学術的にも社会的にも重要な課題である。特に、降水に伴う地すべりについては、実際の降水に対して斜面状態を適切に常時モニターすることにより斜面災害の発生予測に役立てることが肝要である。広周波数帯域の弾性波モニタリングは、周波数ごとに感度を持つ領域の広がり異なるという理論的な裏付けもあり、降水による媒質の湿潤状況の時空間分布の変化を詳細に把握する上で有用であることが、本研究によって示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study has been conducted to establish how to monitor the status of the slope using the elastic waves transmitting under the slope surface where landslide is concerned to occur.

For in situ monitoring, we radiated weak elastic waves over a wide frequency range so that status of slope was not affected. We successfully recorded transmitted waves by high sensitivity accelerometer array observation.

In laboratory, elastic wave measurement transmitting through unconsolidated soil was performed as an element test. An increase in phase velocity with decrease in water head was observed during the drying process of the medium, and this change preceded from lower frequencies.

研究分野：地震学、弾性波動論

キーワード：地すべり 弾性波透過 現場モニタリング 土層試験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 地すべりや大規模崩壊等による斜面災害の発生予測は、学術的にも社会的にも重要な課題である。特に斜面災害は直接的な被災のみならず、集落の孤立や河道閉塞などの二次的な災害を引き起こすため、豪雨によって被災し災害弱者と化した住民にとって非常に大きなダメージを与えかねない。そのため、予想される降水量を用いて斜面災害発生危険度を評価すること、実際の降水に対して斜面状態を常時モニターし斜面災害の発生予測に役立てることに對する社会的要請は非常に強い。

(2) 地すべりなどの発生が危惧される地域におけるモニタリングとして、サクシオンや土中水分量などの含水量に関する計測や、傾斜や変位などの変形に関する計測、アコースティック・エミッション（微小破壊）などの局所的な不安定に関する計測など、多岐にわたるモニタリング手法が提案・実施されている。しかし、このような取り組みにもかかわらず、多発する集中豪雨によって『予期せぬ崩壊』が発生し、人的・物的な被害が発生するケースが後を絶たない。それは、崩壊発生が、総降水量や地表に現れる変形だけではなく、地質・地下水の流れ・雨の降り方など多様かつ複合的な因子により面的に局在化する現象によって左右されるためである。

2. 研究の目的

一般に、岩盤地すべりは構成する岩石の層理面や地質断層によって支配されることが多い。このことは、地すべりが生じる際に土塊内部全体に加え、すべり面付近に卓越した変化が現れうることを示唆している。例えば、降水量は斜面全体におおよそ均等に与えられるのに対し、地下水はすべり面付近に集められるであろう。弾性波は斜面内部に存在する不連続面に現れる変化を敏感に捉えることができるものとして期待される。すべり面の形成が進むにつれ、波の伝播速度や強度が低下し、後続波が生成する。こうした現象をモニタリングし、従来の手法と組み合わせることによって、より迅速に地すべりの危険性の高まりを検知できる可能性がある。そこで本研究は、斜面に代表される表層地盤における弾性波による適切な状態モニタリング手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、現場弾性波モニタリング、要素試験に大別することができる。まず、現場モニタリングの対象とする斜面サイトを選定し、現場弾性波送信手法の確立と計測システムの開発をおこない、システム完成後、現場弾性波モニタリングを開始する。斜面に影響を与えない程度の弱い弾性波の送信を実施し、受信が可能な距離やその周波数帯について明らかにする。

(2) 透過弾性波の特徴を理解するために室内において要素試験を実施する。表層を模擬するために要素試験には未固結な土層を用い、水分量の変化に対する弾性波の特性の変化を精査する。特に、広い周波数帯の弾性波を活用することの利点について検討を進める。

4. 研究成果

(1) まず、現場弾性波モニタリングについて、対象サイトの選定、サイトの詳細把握、観測レイアウトの作成と、モニタリングシステムの構築を実施した。主たる対象としては、AC電源を利用可能であり、モニタリング期間中の計器埋設と計測システムの設置が可能である福岡県福岡市の斜面サイトとした。斜面現場の表層の弾性波伝播速度は200 m/s程度と低く、モニタリング実施可能な測線長が10~30 m程度であること、観測アレイの加速度計の設置間隔が1 m程度であることから、少なくとも10 Hz以上の弾性波送信が必要である。高周波数の波ほど散乱は強くなるが、高空間分解能であることが期待されるため、弾性波送信器としていくつかの装置を候補として検討した。受信器としての加速度計は、1辺が約1.5mのほぼ正三角形の頂点と重心、および重心と1頂点を含む直線上に分布させた9台でアレイを構成した。データ収録については、送信信号と加速度計の出力信号を同時収録するためのプログラムを作成し、実装した。また、リモートで動作状況を確認できるように設計することで、システム稼働状況の把握をおこなった。停電やネットワークトラブルによる欠測を含んだものの、都度メンテナンスを実施し、継続的に稼働させることに成功した。

(2) 高周波数側の候補としては、圧電型の弾性波送信器としては高出力が実現されるランジュバン振動子を採用した。防水加工を施したランジュバン振動子を送信器として埋設し、1 g/V程度の高感度の加速度計（加速度計についても防水加工を実施）にての受信を試みたが、波形解析を実施した結果、送信器からの信号を明瞭に検知することはできず、想定以上に散乱などの影響による波の減衰が強いことが判明した。そこで、周波数を低下させることとし、送信器を更新した。まず、長期間送信には向かないものの30 N程度の高出力が可能な動電式の加振器を採用した。より低ノイズの加速度計に更新したうえで、防水加工を施した加振器を設置して10~50 Hzの範囲で出力を変調させる送信（図1）を実施したところ、目標とする30 mの長スパンの計測でも対応する信号を受信することができた（図2）。長期間モニタリング用としては、固体表面に貼り付けて使用するタイプのスピーカーを採用した。スピーカーを使用した送信では、途中で欠測や送信器及び加速度計のレイアウト変更を含みつつも、サイトの都合により平

成 30 年 2 月に撤収するまでの 1 年以上の連続計測を実現することができ、8 m 測線での送信に対応する信号の受信に成功した。

(3) なお、連続波形記録の解析に関しては、変調送信を考慮し、スペクトログラムを利用した検出アルゴリズムの開発をおこなった。本システムでは斜面に影響を及ぼさない程度の低強度の送信をおこなうため、受信信号の信号強度は低い。そこで、送信タイミングをそろえて受信信号を重合させ、弾性波信号の伝達特性の時間変化をとらえるための解析プログラムの作成をおこない、その結果、上述の受信に成功した。ただし、スペクトログラムを作成すると、変調送信に対応する受信状況は確認することができたが、スペクトログラムの実質的な時間分解能は、アレイサイズに対して十分ではなく、アレイ内の伝播の状況までは把握することはできなかった。

(4) 並行して滋賀県内の斜面サイトで実施している連続微動観測で得られた波形記録を用いて、地震波干渉法解析を実施し、降雨と関連する可能性がある地震波速度変化を検出した。

(5) 現場計測で検知された弾性波の伝播速度は大気音速以下の低速であると推定されたため、要素試験として未固結な土層を媒質とした弾性波計測試験を実施した。波長と測線長のスケールが現場と大きく相違しないように媒質の大きさは 50 cm 程度、送信波の振動数を 10 kHz 程度に設定した。予備試験の結果、加振器周辺への水の浸透により加振器と媒質のカップリングに変化が現れてしまうことが明らかになったため、加振器周辺を遮水する手法を開発するなど、加振器と媒質のカップリングに関する課題を解決した。また、カップリングの課題に影響を受けない伝播速度について、収録済みの記録を解析した結果、媒質の乾燥過程において水頭の減少にともなう伝播速度の増加がみられること、またこの変化は低周波側から先行してみられることが明らかにされた。周波数ごとに感度を持つ媒質領域の広がり異なるという理論的な裏付けもあり、この結果は、本研究で実施したような広帯域の弾性波モニタリングが、降雨などによる媒質の湿潤状況の時空間分布の詳細把握に不可欠であることを示唆するものである。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

Doi, I., T. Kamai, R. Azuma, and G. Wang, A landslide induced by the 2016 Kumamoto Earthquake adjacent to tectonic displacement - Generation mechanism and long-term monitoring, *Engineering Geology*, 査読有, Vol. 248, 2019, 80-88
DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.11.012

Nakayama, M., H. Kawakata, S. Hirano, I. Doi, and N. Takahashi, Propagation characteristics of elastic waves transmitted through sand soils under dry and saturated conditions, *Progress in Acoustic Emission*, 査読有, Vol. XIX, 2018, 163-167

川方裕則, 土井一生, 高橋直樹, 中山雅之, 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講演集, 査読有, 2017, No. 124

Nakayama, M., H. Kawakata, I. Doi, and N. Takahashi, Spatio-temporal variation in propagation characteristics of elastic waves in a sand soil during a water injection test, *Progress in Acoustic Emission*, 査読有, Vol. XVIII, 2016, 211-216

Yamada, S., and A. Oshima, An attempting research on evaluating grain-size



図 1 . 高出力加振器の設置状況。写真上が送信方向である。

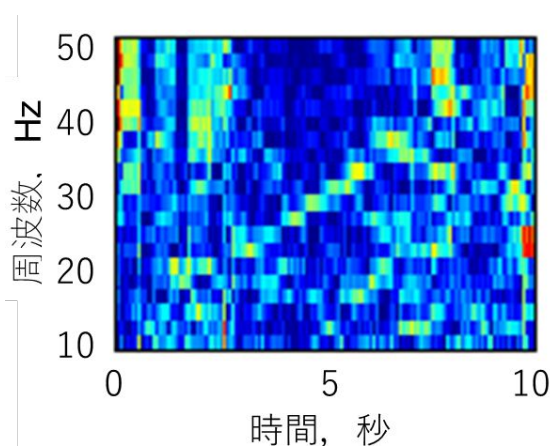


図 2 . 10 秒間かけて 10 ~ 50Hz まで変調させた送信に対応する受信信号の例 (約 30 m はなれた位置の加速度計の記録)。青は信号強度が低いことを、緑から黄色、赤に向けて強度が高くなるように描画されている。

characteristics based on acoustic properties of soil for liquefaction assessment by Swedish Ram Sounding, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有, Vol. 2, 2016, 321-326

DOI: 10.3208/jgssp.JPN-142

Goto, H., N. Tanaka, S. Sawada, and H. Inatani, S-wave impedance measurements of the uppermost material in surface ground layers: Vertical load excitation on a circular disk, Soils and Foundations, 査読有, Vol. 55, 2015, 1282-1292

DOI: 10.1016/j.sandf.2015.09.026

[学会発表](計20件)

Nakayama, M., H. Kawakata, S. Hirano, I. Doi, N. Takahashi, 24-hours broadband measurements of elastic waves transmitted through sand soils under dry and saturated conditions to investigate differences in propagation characteristics, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, 2018

土井一生, 川方裕則, 中山雅之, 高橋直樹, 岸田 貴兆, 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, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017

高橋直樹, 川方裕則, 中山雅之, 土井一生, 岸田 貴兆, 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, 第52回地盤工学研究発表会, 2017

Nakayama, M., H. Kawakata, S. Hirano, I. Doi, N. Takahashi, Improvement in transmission experiment of elastic waves through partially saturated porous sand soil, American Geophysical Union 2017 Fall Meeting, 2017

Eguchi, H., H. Goto, and I. Doi, Experiments and developments of S-wave impedance measurement method of the uppermost surface layers based on dynamic disk loading test, the 30th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, 2017

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：土井 一生

ローマ字氏名：(Doi Issei)

所属研究機関名：京都大学

部局名：防災研究所

職名：助教

研究者番号(8桁)：00572976

研究分担者氏名：山田 卓

ローマ字氏名：(Yamada Suguru)

所属研究機関名：大阪市立大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：70451789

研究分担者氏名：後藤 浩之

ローマ字氏名：(Goto Hiroyuki)

所属研究機関名：京都大学

部局名：防災研究所

職名：准教授

研究者番号(8桁)：70452323

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。