

氏名	陶 尚寧
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 1163 号
学位授与年月日	令和2年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	The changes of elastic wave propagation in the process of rainfall induced slope surface failure (斜面が豪雨によって表層崩壊する過程の弾性波伝播の変化)
論文審査委員	委員長 准教授 内村 太郎 委員 教授 桑野 二郎 委員 教授 長田 昌彦 委員 教授 松本 泰尚

論文の内容の要旨

Rainfall-induced landslides commonly occur in mountainous areas and cause severe human and infrastructural damage around the world, in places like Hong Kong, USA, and Italy. Most of the previous landslides have occurred at shallow depths, generally less than 3 m, and the average thickness of the failed surface layer was 1.2 m. To mitigate damage caused by rainfall-induced landslides, physical countermeasures such as retaining walls, ground anchors and dewater systems are common, however, they are not economically feasible for the amount of potentially unstable slope. Therefore, landslide early warning systems are an alternative soft countermeasure that can provide an efficient and economical way to reduce the damage of landslides. A typical landslide early warning system is based on monitoring of soil moisture and pore pressure, or on measuring mass movement events by linear displacement transducers, inclinometers or extensometers, or measuring both the soil moisture and the displacement by soil moisture sensors and tilt sensors. These methods have recently been used because they are simple and easy to install in the slope surface layer. However, they can only sense the local area surrounding the position of the sensor. To cover a wide area of unstable slope, many sensors are required.

Elastic wave propagation in soil as a non-destructive monitoring technique has received considerable attention in recent years. The application of elastic wave propagation in soil has been developed by many researchers, for example, shear waves were measured in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers, and recently, both shear wave (S-wave) and compression wave (P-wave) velocities were designed to measure the unsaturated soil. It was found that both P-wave and S-wave velocities decreased by nearly half when soil saturation was increased from 20% to 80% in laboratory triaxial experiments. A series of model experiments found that elastic wave velocities continuously decreased in response to moisture content and deformation.

In this study, a method of evaluating slope shear deformation and soil moisture by elastic wave is presented. Elastic

wave devices include an exciter and several receivers that are laid out within the slope surface layer to cover a relatively deep and wide area. To extend the former research, three main points have been improved in this study. Firstly, an exciter has been developed that can automatically generate clear and powerful elastic wave signals to propagate more than 1 m in soil. Secondly, an algorithm has been developed that can process the huge number of wave signals, and automatically detect the travel time and calculate the wave velocities. Thirdly, a full-scale multi-layer shear model was used to simulate the process of slope failure and observe the wave propagation. The detailed behavior of elastic wave propagation in soil over a wide range of soil moisture, shear stress, and shear deformation, can be explored. A series of tests were designed to reproduce the slope failure. The factors affect on elastic wave velocity have been confirmed.

In this study, not only the elastic wave velocities but also the wave attenuation has been investigated. A method using wave attenuation is presented to monitor slope deformations and soil moisture variations. It is an application of geometric spreading, which is as the wave moves away from the source, the area that the wave energy covers become larger and thus wave intensity decreases, and wave energy loss due to inelastic material behavior or internal friction during wave propagation. Laboratory experiments using a Multi-layer shear model were conducted, wave attenuation affected by shear forces corresponding with deformations on every layer, and the soil moistures in wet and dry processes have been analyzed.

To investigate the behavior of elastic wave propagation in the natural slope surface layer, elastic wave monitoring has been conducted at a slope located at Aso-shi, Kumamoto, Japan. This slope was suffered from the 2016 Kumamoto Earthquakes and some big cracks appeared on the slope surface. It is a typically unstable slope. The elastic wave monitoring devices include a fully automatic to generate elastic wave by the exciter, measure the wave signal by receivers. The layout of sensors and exciter underground and the monitoring parameters such as velocities, soil moisture, deformation from the sensors are shown in detail. Elastic wave velocities and attenuation behaviors with soil moisture on-site are similar to laboratory experiments.

These findings show that monitoring the wave propagation in a slope surface layer can indicate the status of soil moisture content and shear deformation. Slope instabilities may be predicted based on the historical record. Monitoring the changes in elastic waves in the slope surface layer is valuable and can be applied to an early warning system.

Keywords: Slope failure; Early warning; Wave propagation; Compression wave velocity; Wave attenuation; Shear deformation; Multi-layer shear model, Unsaturated soil

論文の審査結果の要旨

地球規模の気候変動に伴って異常豪雨が頻発し、山地や都市部の脆弱な斜面が崩れて、住民や社会に大きな被害を起こすことが憂慮されている。これに対して、擁壁や砂防堰堤などの機械的な補強工事に加えて、降雨情報や現地計測に基づく早期警報が行われている。近年、センサーと無線情報通信の技術が急速に発達し、さまざまな手法を用いて、より低コストかつ高精度での斜面の監視が試みられるようになった。本論文は、地盤中を伝わる弾性波の伝播特性の変化から、斜面の状態の変化を検知する可能性を探るため、斜面表層に雨水が浸透して変形し崩壊する過程を、模型実験と実斜面の計測で観察し、その間の弾性波速度を測定して、降雨に伴い不安定化する斜面内で弾性波速度が変化する要因を検討したものである。

本論文は、研究成果を8章に分けて記述している。

第1章では、降雨にともなう斜面災害に関する問題を概説し、研究の目標を述べている。

第2章では、斜面崩壊の機序、斜面地盤を構成する不飽和土の力学、および不飽和土中の弾性波伝播について、過去の知見をまとめている。先行研究では、斜面の表層崩壊の前には、表層の特に法尻部の飽和度が80%～90%に達して、斜面地盤に微少な変形が起こり、徐々に加速して崩壊に至ることが見いだされている。また細粒分を含む砂質土を使った三軸供試体において、異方応力下で注水すると、供試体内の飽和度の上昇にともなって弾性波速度が20%～30%低下し、さらに供試体が降伏して変形が進むと、弾性波速度がさらに急速に低下することが観察されている。本研究では、これら2つの知見を元に、降雨による斜面崩壊の前に斜面に起こる変化と、それともなう弾性波伝播の変化について検討した。

第3章では、模型実験装置の構成について述べている。斜面災害の大半は、降雨にともなう表層崩壊であり、そのすべり面の深さは平均1m～1.2m程度とされている。それを模擬するために、実験装置は、高さ1m(1段5cm×20段積層)のせん断土槽になっている。土層に、斜面の傾斜を模擬したせん断応力をかけながら、上端から人工降雨を与え、水が土層内を鉛直に流下する過程で、各深さの変位と弾性波速度を測定することができる。内部の10箇所の発振装置から順番に弾性波を発振し、30箇所の受信装置で受振して到達時間を計測する仕組みを開発した。また深さ方向10箇所に、体積含水率計を設置して水分量を測定した。

第4章では、模型実験で用いた材料の特性と、模型にかけたせん断応力と降雨の条件を記している。

第5章では、各受信装置が受信した波形データから、弾性波の到達時間を検出するデータ処理の手法を説明し、得られた弾性波速度の値を整理して示した上で、弾性波速度を変化させる要因を検討している。その結果、土槽内の各深さでの鉛直方向の弾性波速度は、その深さでの鉛直圧縮応力、体積含水率、およびせん断変形(各せん断層の変位)によって変化するという結論を得た。鉛直圧縮応力は、大きいほど弾性波速度を高める作用がみられた。鉛直圧縮応力は、深さに比例して大きくなるほか、雨水の浸透によって土層の重量が増えることによっても大きくなる。体積含水率は、雨水の浸透によって上昇し、弾性波速度を低くする作用がみられた。せん断変形は、増加するほど弾性波速度を低くする作用がみられた。せん断変形は、降雨の初期には、雨水によって土層の重量が増え、せん断応力が増加することで生じる。また崩壊が近づくと急速に増える。これらを整理して、斜面表層内部の鉛直圧縮応力、体積含水率、せん断変形のそれぞれの変化が弾性波速度の変化に与える影響を表す簡単な関係式を提案した。

第6章では、上記の模型実験でとれた波形データから、振動の振幅の情報を取り出して、土槽内の弾性波の減衰の傾向を分析している。水分量の増加とせん断変形の増加には、それぞれ減衰を大きくする作用があるという結論を得た。

第7章では、実斜面での計測例として、2016年の熊本地震で表層部が損傷した阿蘇外輪山内側の斜面表層で、弾性波速度を測定した結果について述べている。電磁石を用いて地中で10分ごとに弾性波を発振する加振装置と、その弾性波を離れた場所で測定する受信装置、および、受信した波形データから求めた弾性波の到達時間をインターネットでサーバーに送信する通信装置を開発して、全自動で継続的な弾性波速度の計測を行った。計測期間中に、当該斜面表層には大きな変形は見られなかったが、降雨にともなう地中の体積含水比の変化と、弾性波速度の変化の間には負の相関が見られ、模型実験で得られた傾向と一致した。

第8章では、本研究により得られた結論を述べている。

従来の地盤工学では、弾性波は、地盤内部の構造や土の性質を推定する地盤調査に主に用いられてきた。これに対し、本研究では、弾性波の伝播を継続的に測定することで、雨水の浸透にともなう地盤の変化を時々刻々捉えることを念頭に置いて、地盤内部の応力、変形、水分量が弾性波の速度と減衰に与える影響を観察し、整理した。先行研究では、不飽和三軸供試体内の弾性波速度と応力、変形、水分量の関係は調べられていたが、地表からの雨水の浸透を模擬した斜面地盤の複雑な模型での観察は初めてである。また、斜面の模型の中に仕込める大きさを数万回の加振に耐えられる加振装置や、野外で長期間、自動的に加振と計測ができるシステムを試行錯誤の末に開発しており、今後のこの分野の開発に役立つ要素技術を創り出している。

以上の点を総合的に判断して、博士の学位論文として合格と判定した。