

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04407

研究課題名（和文）音響伝播特性を用いた斜面地盤の水分量変化と崩壊予兆の検出

研究課題名（英文）Detection of changes in water contents and precaution of failure of slope surface based on elastic wave propagation

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） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：地盤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、弾性波速度が変化する要因を検討した。

斜面の表層地盤を模擬する多層せん断土槽の模型実験では、鉛直圧縮応力、体積含水率、せん断変形（あるいはせん断応力）の変化と弾性波速度の変化との間の単純な関係式を提案した。振動の振幅についても、水分量の増加とせん断変形の増加により減衰が大きくなった。実斜面での検証として、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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豪雨による斜面災害の降雨情報や現地計測に基づく早期警報に対して、近年のセンサー、無線、情報の技術の急速な発達にともなって、より低コストかつ高精度で斜面を監視する様々な方法が試されている。本研究は、地盤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、模型と実斜面で斜面表層に雨水が浸透し変形し崩壊する過程を観察して、弾性波速度が変化する要因を検討した。この成果は、斜面の監視と災害の早期警報の簡便な方法を実現するための基礎的な知見となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a method to evaluate shear deformation and soil moisture of slopes by using elastic wave is presented. A full-scale multi-layer shear model was used to simulate the pre-failure process of a slope, and the wave propagation was observed. The detailed behavior of elastic wave propagation in soil over a wide range of soil moisture, shear stress, and shear deformation, were explored.

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 City, Kumamoto, Japan. This slope was suffered from the 2016 Kumamoto Earthquakes and some big cracks appeared on the slope surface. Behaviors of elastic wave velocities and attenuation with soil moisture on-site are similar to laboratory experiments.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面災害 早期警報 弾性波 伝播速度 減衰 模型実験 野外測定 モニタリング

1. 研究開始当初の背景

我が国で豪雨により発生する斜面災害のほとんどは、小規模な深さ 1 m 程度の表層滑りである。研究代表者の先行研究では、表層滑りを再現する模型実験を繰返し、崩壊の前には、斜面の法尻部の飽和度が 80% ~ 90% に達すること、また斜面地盤の微小な変形が継続して起こることを見だしていた。これは、斜面監視に基づく災害早期警報に有効である。従来、地盤内の土壌水分量を測るには、間隙水の誘電率を利用する土壌水分計や、サクシオンを測るセラミックカップ（間隙水圧計）などを使う。地盤変形については、伸縮計や傾斜計がある。しかし、これらはそのセンサーを埋めた 1 点の値を測るため、図 1 のように延長の長い法面で、崩壊初期段階にごく一部が浸水したり、変形し始めたりする前兆を捉えるには、数多くのセンサーを密に配置しなければならない。

そこで、本研究では、図 1 に示すように、例えば斜面の法尻部に音波の発信機と受信機を数 m 離して埋設し、その間の測線上の音波の伝わり方の変化を捉えることで、測線上のどこかが高含水比になったり、微小に変形したりしたことを検知する技術を発案した。これにより、法面に設置するセンサーの数は激減し、鉄道、道路、堤防など、延長の長い盛土構造物の法面の恒常的な監視にも使えらることを考えた。

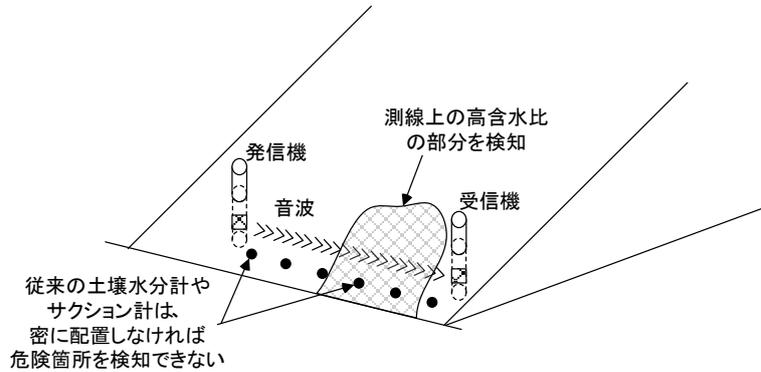


図 1 音波を利用した斜面監視の概念図

斜面内の弾性波速度が、水分量の変化や地盤の変形に応じてどのように変化するか、研究代表者による先行研究を示す。

山砂の不飽和三軸供試体に一定の偏差応力をかけた状態で、一定速度で注水すると、飽和度が上がり、ある時点で降伏して変形が始まる。この間、供試体内の弾性波速度を測り続けると、図 2 のように、飽和度増加に伴う弾性波速度低下と、降伏後の変形に伴う急速な速度低下が見られる。図は S 波速度の変化を示したが、P 波速度もほぼ同様に推移する。また、その変化率は 2 ~ 3 割を超えており、供試体の密度にもよらない。野外でも十分に検知できる変化である。

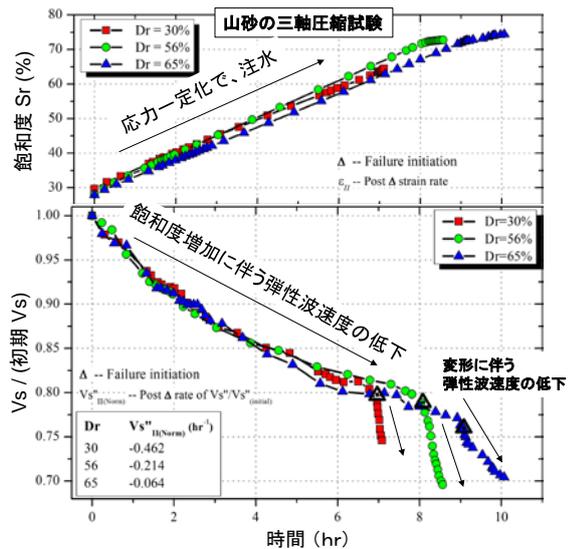


図 2 三軸供試体の注水に伴う弾性波速度の低下

飽和度の増加による速度低下は、吸水により振動の媒質である土の湿潤密度が増加することと、サクシオン解放や細粒分の吸水によって土の骨格の剛性が下がることによると考えている。P 波は、完全に飽和した状態 (B 値 = 1.0) であれば水中音波速度が発揮され、非常に高速に伝搬するが、飽和が不完全である限り、弾性波速度は下がり続ける。また、変形に伴う速度低下は、土の骨格の緩みによると考えられる。

図 3 は、斜面の小型模型に一定の雨を与えたときの、表層部の弾性波速度の推移である。斜面の内部に電磁石でワンショットの衝撃波を与え、表層の振動センサーに到達した時間を測定した。三軸供試体と同様に、飽和度増加に伴う弾性波速度の低下と、降伏後の変形に伴う急速な速度低下が見られた。このように、斜面の特に表層部で、弾性波速度の変化を監視することで、雨水の浸透や、斜面地盤の不安定化による変形の始まりを検知できる見込みがある。

本研究では、主に砂質土を用いた模型および実斜面で弾性波速度を測定し、弾性波の伝搬速度や減衰が変化する要因を分析し、斜面地盤が豪雨時に崩壊に至る過程がどのように検出されるか確かめた。また、実斜面内の弾性波速度を測るための、低コストかつ省電力の弾性波発信器、受信機、データ処理装置を製作した。

研究代表者は、図 4 のように、斜面表層の傾斜変位を監視することで、崩壊の予兆を検知する早期警報技術を開発してきた。これまでに防災の実務用途を含めて、国内外に約 80 箇所の実績がある。本研究の成果を、この傾斜センサーと組み合わせて活用し、斜面の状態をよりの確に把握することが考えられる。

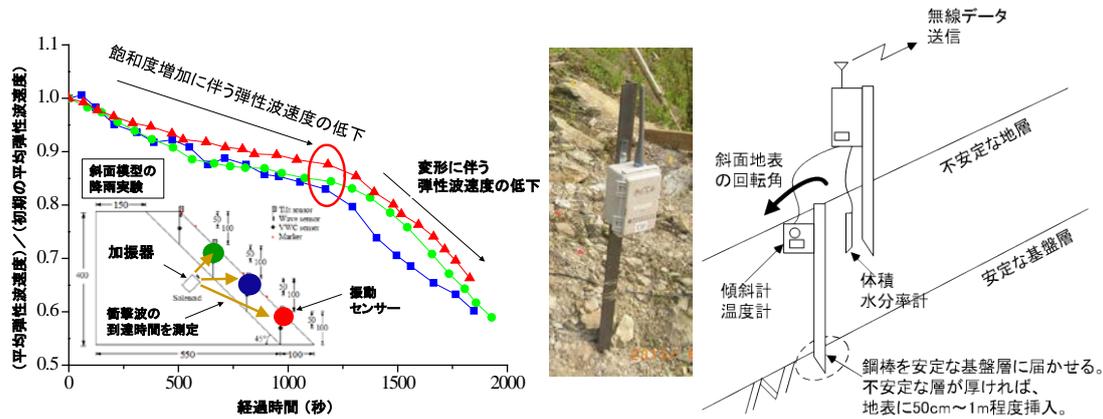


図3 斜面模型の注水に伴う弾性波速度の低下 図4 表層の傾斜変位による崩壊予兆の検知

地盤中の飽和度の測定や斜面災害の前兆の監視に、音波（弾性波）を用いる試みは、これまでにほとんどない。振動や音波を使った地盤内部の物理探査技術はいくつかあるが、加振方法として、ハンマー、起震機、爆薬などの高エネルギーを使い、長距離、広範囲の探査を行うものがほとんどである。本研究では、このような単発的な地盤調査ではなく、斜面防災のための経常的な斜面地盤の監視を目的としているので、省電力のために低エネルギーの音波を用いて、数m～数10mの短～中距離を探査する。これまでに、斜面防災のためのワイヤレスモニタリング装置の開発に取り組んでおり、計測や通信の電子回路や機器を設計してきた。今回は特に、遠くまで届く音波を少ないエネルギーで効果的に発信する機構と、離れた場所の発信器と受信機の間で、無線を使って同期をとり、弾性波速度を正確に測定する仕組みを、省電力の工夫により電池で長期間駆動し、低コストで使い勝手のよい小型の機器として実現するための、新しい工夫が必要だった。

学術的には、土質力学の分野では、ベンダーエレメントなどを用いた供試体の弾性波速度の測定が盛んに行われているが、ほとんどが地下水面下の地盤構造の探査を念頭に置いており、高拘束圧下で飽和した条件が対象である。斜面防災では、低拘束圧で、不飽和土層を対象とするため、これまでの知見にない発見が期待された。

2. 研究の目的

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することを目的とした。

また、要素技術として、斜面の模型の中に仕込める大きさと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作し実証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 模型実験

室内に斜面の表層地盤を模した多層せん断模型を使い、上載荷重とせん断応力をかけた状態で天端から雨水を浸透させて、雨水浸透から斜面崩壊に至るまでの弾性波速度の変化を調べた。図5に多重せん断土槽装置とセンサーの配置を示す。

この模型は、高さ5cm×20段=1mのせん断土層で、斜面表層の地盤を模擬している。表層崩壊のすべり面は平均深さ約1.2mという統計があり、室内実験でありながら、ほぼ実物大の模型といえる。各層に、深さと想定斜面勾配に応じた一定のせん断力をエアシリンダでかけた状態で、上面から雨水を浸透させる。雨水の浸透にともなって、各層がどのタイミングでどのように変形するか観察できる。

本研究では、このせん断土槽に、図5(a)に示すような加振装置と受信センサーを、図5(c)のように配置し、雨水の浸透と模型のせん断変形の全ての過程で、各発信器から弾性波を発振し、各受信センサーまでの弾性波の到達時間と、その振幅から、弾性波速度と減衰の分布を測定した。特に、加振装置は、今回の研究で開発したもので、ケース内の鋼球を電磁石で持ち上げて落とす方法で、模型に多数設置できるほど小さく、長期間に及ぶ実験中の数万回の加振を故障することなく安定して行うことが出来るようになった。

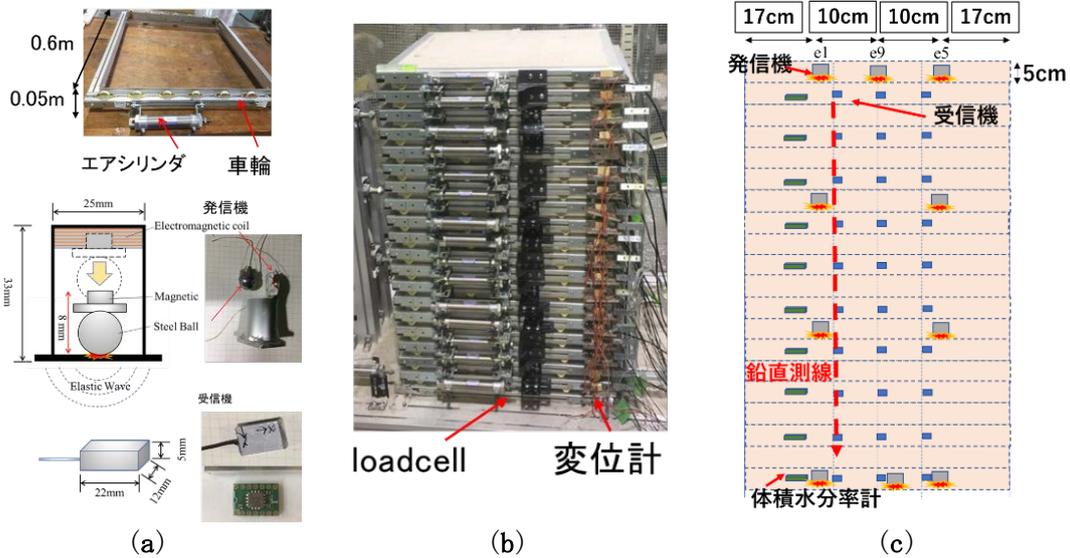


図5 多重せん断土槽装置とセンサーの配置。(a) フレーム, 弾性波の発信機と受信機; (b) 多重せん断土槽; (c) 発信機, 受信機と体積水分率計の設置。

主な結果を以下にまとめる。

a) 体積含水率の変化と弾性波速度 (図6 (a))

せん断応力をかけず, かつ変位も発生していない状態で, 天端から 60mm/h の降雨を与えた後に, 下部から重力で自然排水した。そのときの各深さでの弾性波速度と, それぞれの深さの測定区間の平均体積含水率を比較すると, 体積含水率の変化 (0.15~0.27) に対して, 弾性波速度は 10%~20%低下した。

b) せん断変形と弾性波速度 (図6 (b))

各層の体積含水率を一定に保った状態で, せん断応力を徐々に大きくして変位させる実験を行った。せん断応力(変位)が大きいくほど弾性波速度が下がった。せん断応力の増加(0~8kN/m², 変位は層の段数に応じて最大 2mm 程度) に対して, 弾性波速度は 10%~50%低下した。また載荷の最終局面では, ほぼ一定のせん断応力下でクリープ破壊したが, このときにも弾性波速度が低下し, 初期の載荷を合わせて, せん断変位と弾性波速度の間に図のような関係が見られた。

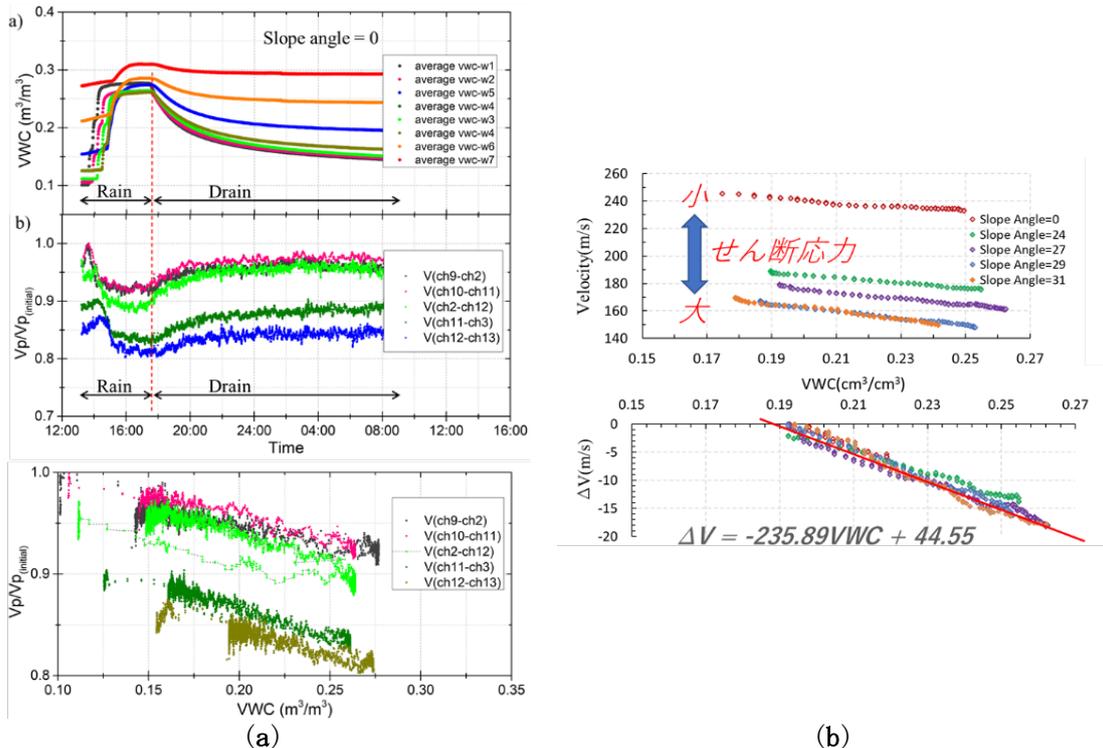


図6 水分量と弾性波速度 (a)せん断力をかけない場合の関係; (b) 一定のせん断力をかけた状態で体積水分率が変化したときの関係

以上の実験データの定量的な分析から、下記の関係式を提案した。

$$\Delta V = a \times \Delta [(\sigma_v)^{m/2}] + b \times (\Delta VWC) + c \times (\Delta \gamma)^d \quad (a, b, c, d, m \text{ は定数})$$

ΔV : 弾性波速度変化量 σ_v : 鉛直応力 (kPa) VWC : 体積水分率 γ : せん断ひずみ,

(2) 実斜面での検証

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(図7)。現地計測においても、電磁石を使って、数ヶ月にわたり10分ごとに加振し、受信した弾性波を解析して、到達時間、振幅、周波数分布をサーバーに送信するシステムを、新規に開発して、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。

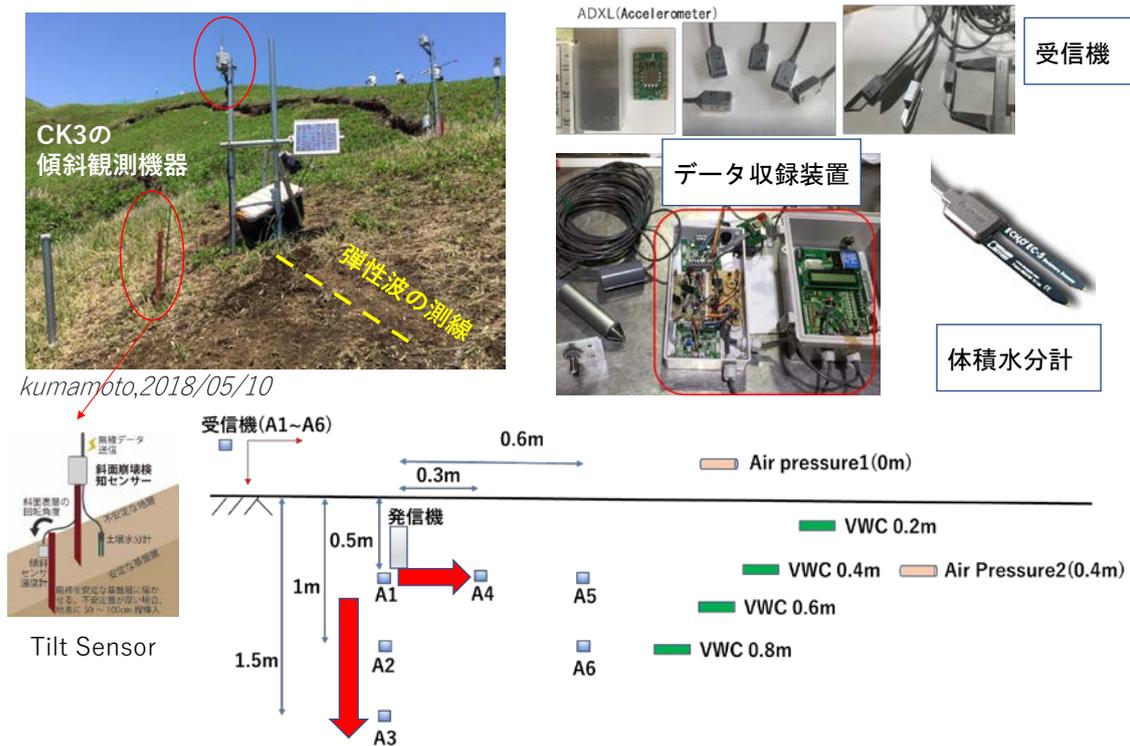


図7 弾性波の加振・測定装置の配置

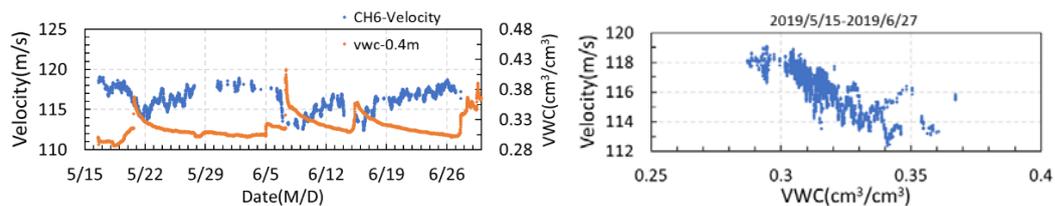


図8 受信機A3(発信機の鉛直方向の深さ1.5m)の弾性波速度と体積含水率

4. 研究成果

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で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た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Chen Yulong, Uchimura Taro, Irfan Muhammad, Huang Dong, Xie Jiren	4. 巻 14
2. 論文標題 Detection of water infiltration and deformation of unsaturated soils by elastic wave velocity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 1715 ~ 1730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10346-017-0825-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Irfan Muhammad, Uchimura Taro, Chen Yulong	4. 巻 230
2. 論文標題 Effects of soil deformation and saturation on elastic wave velocities in relation to prediction of rain-induced landslides	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 84 ~ 94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enggeo.2017.09.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yulong Chen, Muhammad Irfan, Taro Uchimura, Ke Zhang	4. 巻 18
2. 論文標題 Feasibility of Using Elastic Wave Velocity Monitoring for Early Warning of Rainfall-Induced Slope Failure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 E997
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s18040997	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Muhammad Irfan, Taro Uchimura	4. 巻 22-1
2. 論文標題 Development and performance evaluation of disk type piezoelectric transducer for measurement of shear and compression wave velocities in soil	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 147-171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13632469.2016.1217800	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tao Shangning, Uchimura Taro, Fukuhara Makoto, Tang Junfeng, Chen Yulong, Huang Dong	4. 巻 19
2. 論文標題 Evaluation of Soil Moisture and Shear Deformation Based on Compression Wave Velocities in a Shallow Slope Surface Layer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3406 ~ 3406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3390/s19153406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Yulong, Irfan Muhammad, Uchimura Taro, Cheng Guanwen, Nie Wen	4. 巻 15
2. 論文標題 Elastic wave velocity monitoring as an emerging technique for rainfall-induced landslide prediction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 1155 ~ 1172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1007/s10346-017-0943-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shangning Tao, Taro Uchimura, Makoto Fukuhara and Junfeng Tang	4. 巻 18
2. 論文標題 Estimation of the instability of slope surface layer by elastic wave attenuation changing with soil moisture and deformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geomate	6. 最初と最後の頁 81-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 内村太郎・陳宇龍・陶尚寧・謝濟仁・黄棟
2. 発表標題 斜面の表層崩壊の前兆としての地盤内の弾性波伝播の変化
3. 学会等名 第52回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 陶尚寧・Selvarajah Hemakanth・内村太郎
2. 発表標題 弾性波探査屈折法を応用した斜面崩壊予兆の検知
3. 学会等名 第52回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shangning Tao, Taro Uchimura, Junfeng Tang, Jiren Xie, Yulong Chen, Dong Huang
2. 発表標題 Features of elastic wave propagation in soil with different exciter energy
3. 学会等名 The 7th China-Japan Geotechnical Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 陶尚寧・内村太郎
2. 発表標題 Changes of elastic wave velocity and attenuation in slope deformation
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会発表講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chen, Y.L., Uchimura, T., Tao, S.N., and Xie J.R.
2. 発表標題 Changes in wave propagation through slope surface layer as a function of water content and shear deformation
3. 学会等名 第51回地盤工学研究発表会発表講演集
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Chen Yulong, Uchimura Taro, Tao Shangning, and Xie Jiren
2. 発表標題 Stability monitoring of soil slope in wetting and failure process using elastic wave velocity, Proc. of 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop
3. 学会等名 第6回日韓地盤工学ワークショップ(国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柴田智也・陶尚寧・高橋良輔・福原誠・内村太郎
2. 発表標題 降雨による斜面表層崩壊を模擬した多重せん断模型内の弾性波の伝播(速度)
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陶尚寧・内村太郎・柴田智也・福原誠・高橋良輔
2. 発表標題 降雨による斜面表層崩壊を模擬した多重せん断模型内の弾性波の伝播(減衰)
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shangning Tao, Taro Uchimura, Makoto Fukuhara, Junfeng Tang
2. 発表標題 Effects of soil moisture and shear deformation on elastic wave velocities in shallow slope
3. 学会等名 The 8th China-Japan Geotechnical Symposium(国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----