

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05019

研究課題名（和文）土砂崩壊の予兆を「見える化」する新技術の実証試験

研究課題名（英文）Experimental analyses on detection of potential risk of soil collapse

研究代表者

玉手 聡 (Tamate, Satoshi)

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・労働災害調査分析センター・センター長

研究者番号：10344243

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）：本研究では、工事中の土砂崩壊によって作業者が生き埋めとなる労働災害を防止することを目的に、現場で簡易に使用可能な計測技術の開発をおこなった。この技術は、斜面の表面付近で崩壊前に微増するひずみを新たに考案した表層ひずみ棒センサ(MPS)によってデータ計測するものであり、さらに、データは逐次解析してひずみ速度を求めるようプログラムした。システムの性能改善とその性能確認を実大規模の土砂崩壊実験や屋外計測で確認した。その結果、研究開発したMPSシステムは斜面のひずみ速度が閾値を超えると周囲に警報を発して危険を「見える化」することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、小型ポータブルで使用方法も簡単な土砂崩壊の計測システムを開発したことである。特に、計測用のセンサとして表層ひずみ棒センサ(MPS)を新たに考案するとともに、直接接続して逐次データ解析するシステムとして提供できるようにしたことである。さらに、計測と警報の性能を実大規模の模型実験と屋外現場実験から性能を確認した。従来のシステムは、専門工事技術者による設置や計測を必要とした。今回開発した技術は現場の施工者が容易に利用可能な簡易な手段とした。その結果、小規模な掘削工事に従事する多くの作業者の労働災害防止に貢献できることは社会的意義を有すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study develops a measurement system for prevention of cave-ins of digging workers at excavations of slopes and trenches. A newly developed sensor of MPS composes a 0.6m in short length of rod and 10 mm in small diameter so that rod bends in corresponding with shear strain of soil in shallow subsurface of slopes and grounds. In addition, this system has function to calculate the strain rate. When a value of the rate is greater than 0.01%/min, yellow lights flash as a sign of detecting D1 warning of the creep phenomenon. In addition, when actual values exceeds than two sets of values those are predicted from past record. D2 warns red lights flush frequently and sound buzzer loudly.

Slope failures were simulated with progress of excavations in a prototype model test and heavy precipitation in a field test, respectively. MPS system detected an increase of shear strain prior to failures and successfully showed an increase of the potential risk of slope failure in sites.

研究分野：土木工学 地盤工学 労働安全

キーワード：労働安全 建設工事 土砂崩壊 被災防止 モニタリング

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

斜面崩壊による作業者の被災を防止するためには、崩壊そのものの発生を防止することが第一である。すなわち、土止め支保工の設置や掘削勾配の変更によって斜面を安定させることが必要である。しかしながら、小規模の工事では必ずしも仮設構造物が設置されない場合があり、また、緊急的な災害復旧工事では詳細な調査に基づいた工事が難しい場合もある。したがって、労働安全をより確実なものとするためには「崩壊させないこと」だけではなく「崩壊を想定して備えること」も必要となる。

作業者の多くが危険に気づけず逃げ遅れて土砂に埋没し被災している現状を考えると、人の注意力だけに依存する安全には限界がある。さらなる安全には、技術的な支援が不可欠と考えられ、具的には、計測技術を利用して崩壊予兆を早期に捉え、避難によって人的な被害を防止することが有効と着想するに至った。警報から崩壊発生までの間に避難ができれば作業者の被災は防止できる。また、小規模な斜面であれば数メートルの離隔を確保することで埋没を免れられる。したがって、僅かな警報(避難)時間でも労働災害は防止できる可能性が高いと考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、工事中の土砂崩壊によって作業者が生き埋めとなる労働災害を防止することであり、そのために有効な計測技術を開発して現場に提供することとした。

この技術は、斜面の表面付近で崩壊前に微増するひずみの速度を見える化するものであって、早期に危険を把握することで迅速な避難を実現させようとするものである。具体的には、地表面付近のせん断ひずみを計測するための表層ひずみ棒センサー(以下、「MPS」と言う)と、そのデータを収録から解析及び警報までを一元的に処理する「土砂崩壊の簡易危険検出システム」(以下、「システム」と言う)を開発し、現場に提供することを目標とした。

図1は本研究にて開発したシステムであり、図2はその設置のイメージである。本研究の期間は4年間であり、この目的を達成するため各年度毎に次の課題を設定して研究に取り組んだ。

- 1) 初年度(令和2年度)：先行研究で考案したMPSの実用性能を高める改善を行う。具体的には、計測データの耐環境性能を高めるため従来の電圧出力(アナログ信号)を、デジタル出力に変更する。これによって、ノイズを低減した高精度なデータ収録を実現する。
- 2) 2年目(令和3年度)：前年度に試作したMPSとシステムの性能を確認する。システム側の回路を温度影響の少ないものに改善する。温度を低温から高温まで(-10度から+40度まで)変化させた環境下のデータを比較検証する。
- 3) 3年目(令和4年度)：開発したMPSシステムを実大規模の模型斜面に設置して崩壊実験し、崩壊前に予兆を判別して警報できるか確認する。
- 4) 最終年度の令和5年度は、前年度に引き続き計測性能を現場で検証しMPSシステムの改善を行う。さらに、研究成果のとりまとめと現場普及に向けた新技術登録などを行う。



図1 土砂崩壊の簡易危険検出システム

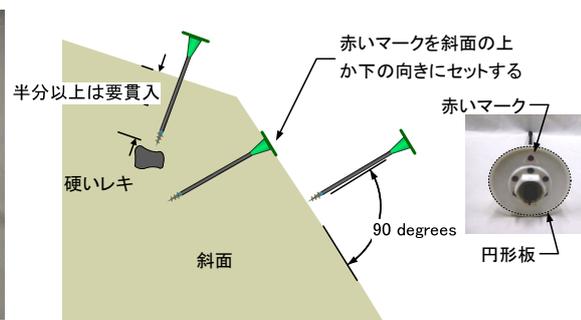


図2 MPSを斜面に設置するイメージ

3. 研究の方法

3.1 計測システムの耐環境性能の向上

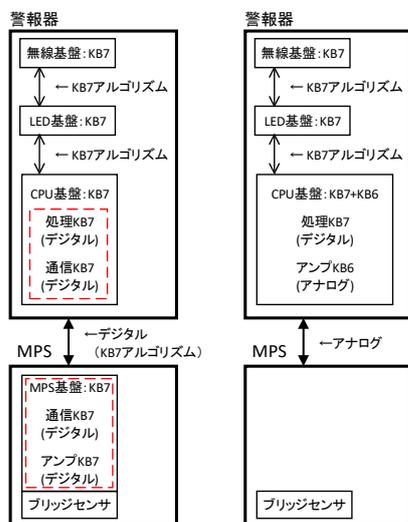
本研究ではMPSと警報器の実用化に向けた改善を行った。初期タイプはひずみゲージからの微小な電圧出力増分からせん断ひずみを換算して求め、斜面の動きを把握するものであった。いわゆるアナログ仕様である。その構造はシンプルかつ経済的であり、また、汎用のデータ収録装置に接続可能なことから冗長性を有する利点があった。一方、連続した長期計測では昼夜の温度差や日照が電圧出力を増減させ、また、現場に存在する電気的なノイズが混入して、計測精度を低下させる問題があった。そこで本研究では、この問題解決のためMPSの出力をデジタル化した。図3にその概要を示す。これまで警報器側に搭載していたアンプをMPS側に内蔵させ、また、電圧増分をデジタル信号に変換する通信機能を基盤KB7に内蔵させての出力をデジタル化した。さらに、警報器側ではデジタル信号を受信するための新たな通信基盤KB7とその信号を収録してデータ解析する処理させる改善を行った。

3.2 温度変化による計測影響の比較

異なる3つの仕様のMPSシステムに温度変化を与えて換算せん断ひずみの変化を確認した。

使用したシステムは、アナログ仕様の MPS と警報器を組み合わせたシステム MPS_a、デジタル仕様の MPS を組み合わせたシステム MPS_d、及びデジタル仕様でかつ温度影響を低減した処理システムの MPS_dt である。図 6 は温度変化を再現するためのインキュベータ(右)とその内部に設置した 3 セットの MPS である。3 本の MPS は全て吊り下げるように配置して、棒には曲げモーメントが作用しないようにした。

庫内の温度は-10 度から+40 度の間で変化させた。具体的には、2 時間毎に-10 度と 20 度と 40 度と段階的に設定温度を変化させた。1 サイクルは 6 時間であり、これを 4 回繰り返しており試験時間は 24 時間であった。



1) デジタル仕様(改善版) 2) アナログ仕様

図 3 計測システムのデジタル化の概要

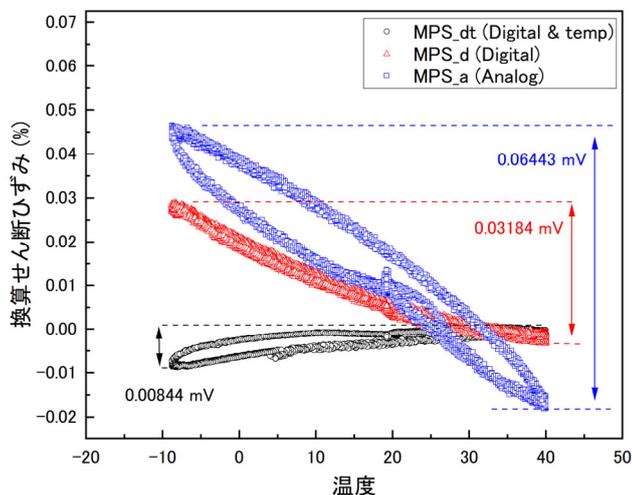
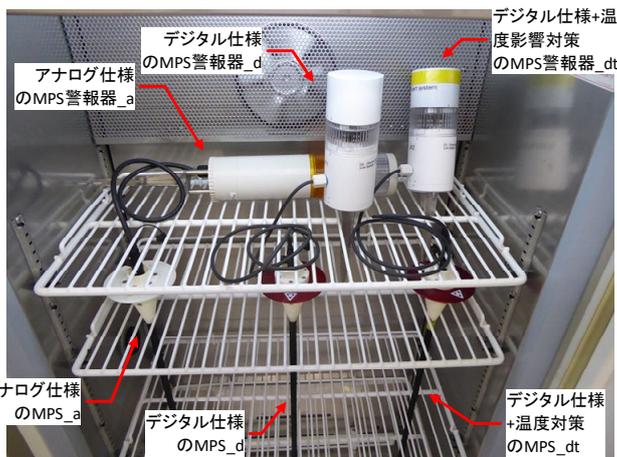


図 5 異なる 3 つの仕様の MPS システムの温度影響の比較



1) インキュベータ装置の外観



2) 庫内に設置した仕様の異なる MPS システム

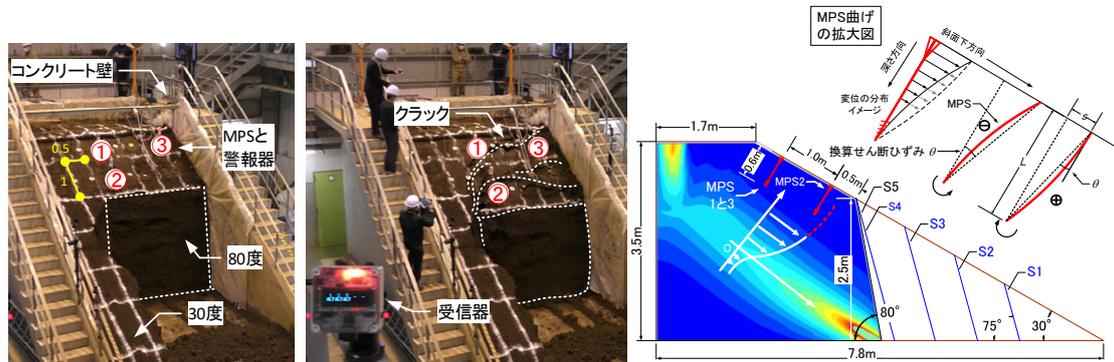
図 4 MPS システムに対する温度影響の確認する試験の様子

図 5 は 3 種類のシステムで計測した換算せん断ひずみ θ と温度の関係を表したものである。アナログ式の MPS_a は最も θ は-0.02%から0.05%付近に広く分布しておりその軌跡は楕円状となっている。これは温度の上昇時と減少時では同一温度であっても θ が異なるヒステリシスを示している。次に、デジタル仕様の MPS_d では θ の範囲が 0 から 0.03%付近となっており、先のアナログ仕様 MPS_a よりも狭くなっており、ヒステリシスもほぼ見られず同一温度に対する θ の再現性が高い。さらに、回路に温度影響への対策を施した MPS_dt では θ の範囲が-0.01 から 0% 付近に分布する。これは MPS_d と比較してさらに約 1/3 に範囲が縮小しており温度影響を低減した。以上より、初期のアナログシステムにデジタル化とさらに回路に温度対策を施した結果、 θ の変動は約 1/10 に減少させることができた。

3. 3 実大模型斜面による土砂崩壊実験による予兆検出と警報性能

本実験では土試料に関東ロームを用い大型模型実験をおこなった。模型斜面は図 6 に示すような 3 面がコンクリート壁(幅 4.0m、高さ 4.0m、奥行き長さ 7.0m)に囲まれた部分に盛土して作成した。模型斜面の高さは 3.5m、斜面の勾配は 30 度であり、築造後に約 36 時間自重で締め固めた。表面で計測した土の密度は約 10kN/m³であり、せん断強さ c と締め固め圧力 P の間には概ね $c=0.2P$ の関係があることを予め確認した。図 6 の 3) の S1 から S4 に示すように、本実験

では斜面を段階的に掘削して不安定化させた。掘削角度は 75 度とし、その高さは 1m、1.5m、2.0m、2.5m の 4 段階で行った。さらに第 5 掘削(S5)ではその勾配を 75 度から 80 度に増加させて、崩壊を待った。各掘削段階では 30 分のインターバルを設け、様子を観察しながら掘削を進めた。なお、本実験では 3 次元的な崩壊を再現するため、掘削は斜面の幅 4.0m のうち、向かって右側の幅 2.5m 部分を行い、右側壁が対称面となるようにした。MPS センサーは S5 の法肩から 0.5m 位置に No.2、さらにその 1m 奥に No.1 と No.3 を設置した。図 6 の 3) に MPS の曲げ方向と θ の出力極性を示す。



1) 第5掘削終了後(高さ2.5m) 2) 崩落開始(掘削終了から約5分後) 3) MPSセンサーの位置と極性
図6 模型斜面に設置したMPSセンサーの位置と崩壊の様子

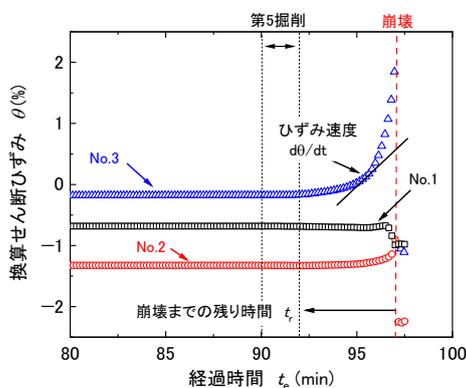


図7 MPSセンサーによる崩壊前の反応

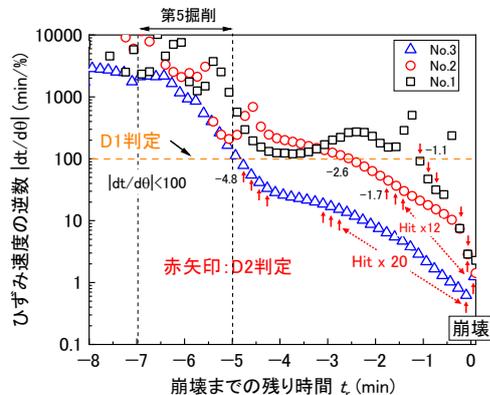


図8 崩壊前8分間のひずみ速度の逆数の変化

図7は経過時間 t_e に対するMPSセンサーの反応を示す。先の図6の1)に示した第5掘削(S5)は t_e が90分から開始し、その約2分後に終了した。その後、崩壊は t_e が97分の時に発生した。したがって、掘削終了から崩壊までには約5分の時間差があった。S5から崩壊までの間における3つのMPSの反応にはその大きさと検出時間に差が見られた。その原因は設置位置とすべり面の位置の関係によるものと考えられる。次に、 θ 曲線の接線勾配をひずみ速度($d\theta/dt$)と定義しその逆数の変化を解析した。

図8はひずみ速度の逆数の絶対値 $|dt/d\theta|$ と崩壊までの残り時間 t_r の関係を示す。3つのMPSに共通して第5掘削中の $-8 < t_r < -6$ で $|dt/d\theta|$ が5000から10000でほぼ一定で推移している。すなわち、ひずみ速度は $1/5000$ %/min以下と非常に小さく動きはほぼ生じていなかった。その後、 $t_r > -6$ では $|dt/d\theta|$ が減少していることから、ひずみ速度($d\theta/dt$)は増加している。その後、動きを加速させて崩壊に至っている。本システムではD1判定の目安として $|dt/d\theta| < 100$ を閾値としたが、これを満たしたタイミングは早い方からNo.3が $t_r = -4.8$ min、No.2が -2.6 min、No.1が -1.1 minの順であった。また、加速度的な増加を意味するD2検出を図内に赤矢印で示したがNo.3は $t_r = -4.8$ min、No.2は -1.7 min、No.1は -1.1 minの順であり本ケースではNo.1とNo.3がD1とD2を同時に満足していた。実験のビデオを確認するとNo.3の警報が初めに表示され続いてNo.2、No.1の順に点灯し、その1.1分後に崩壊した。目視では崩壊直前まで動きを把握することは難しかったが本システムは早期に捉えて周囲に情報を伝えられることを確認した。

3. 3 現場斜面における崩壊計測

MPS システムを用いた斜面崩壊の屋外計測を北海道雨竜郡雨竜町オシラリカ地区で実施した。図 9 は現場斜面の崩壊後の様子を示す。斜面は林道内の切土のり面に腹付け盛土したものであり、2023 年 7 月 27 日に築造した。計測の対象とした斜面の幅は約 5m、高さは約 3m 勾配はおおよそ 40 度であった。この画像は 2023 年 8 月 8 日に撮影したものであり、地山の切土面を境界として盛土全体が下方にスライドするように崩壊している。MPS 1 本を盛土斜面の右端から 2.3m の断面上、天端から 1m 下方の位置に設置し、MPS 計測データは斜面法肩に設置した警報機(受信器)にケーブル接続して記録した。崩壊後の様子から MPS は土砂と一体となって下方に移動していた。崩壊前後の断面を比較すると切土斜面に沿って盛土が下方に大きく移動しており、法肩では崩壊前後の高低差が 0.5m 程度であった。

図 10 は経過時間に対する降水量 r (mm/hr)、換算せん断ひずみ増分 $\Delta\theta$ (%)とひずみ速度の逆数 $|dt/d\theta|$ の経過を併せて示す。図 10 の 1)から長期的は推移をみると、期間①と②と③に発生した降雨に対して $\Delta\theta$ は増減しており、それに伴って $|dt/d\theta|$ も減少している。すなわち、MPSは降雨によって斜面に生じた微小変形から大変形までの一連の動きを明確に捉えている。そして経過時間 $t_e=143.5$ hr では $\Delta\theta$ は計測限界に達する大きな変形が生じており斜面はこの時崩壊に至ったものと考えられる。

図 10 の 2)から崩壊前 10 時間に着目すると、 $t_e=135$ hr で 8 mm/hr の強い降雨が記録され、その後、 $t_e=140$ hr までの約 5 時間、降雨は 2 mm/hr から 4.5 mm/hr で断続的に強弱を繰り返している。この間、 $\Delta\theta$ にはそれまでよりも大きな反応が現れている。 $\Delta\theta$ の増加は約 2 時間後の 137 hr から徐々に現れており、8 mm/hr の強い降雨に即座に反応する $\Delta\theta$ の増減ではなかった。これは先行降雨が表面から浸透して切土地山の境界に達するまでのタイムラグと考えられ、到達後に大きくせん断変形は増加した。その後の約 5 時間にわたって降雨は強弱を繰り返し、 $t_e=143.5$ hr 頃に崩壊に至っている。その推移は $|dt/dq| < 100$ からも明確に判別されており、逆解析した結果からは崩壊 5 時間前から D1 警報は連続して発せられていたことがわかった。

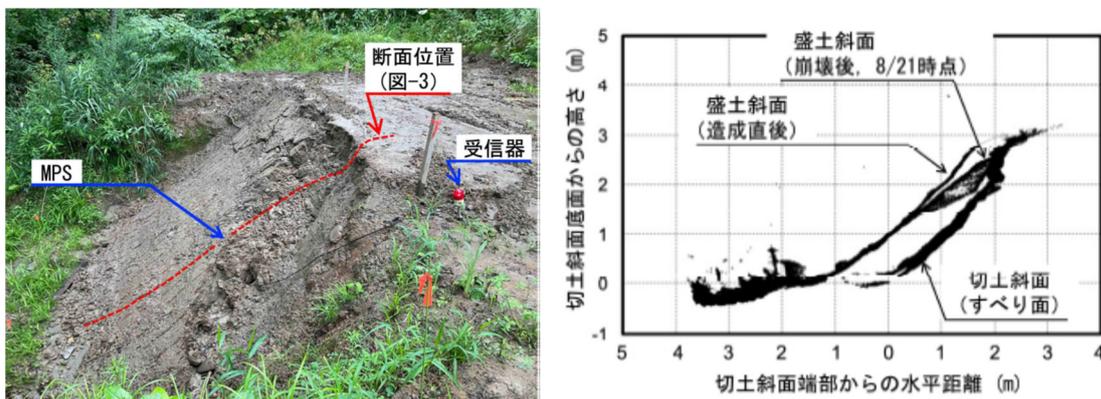
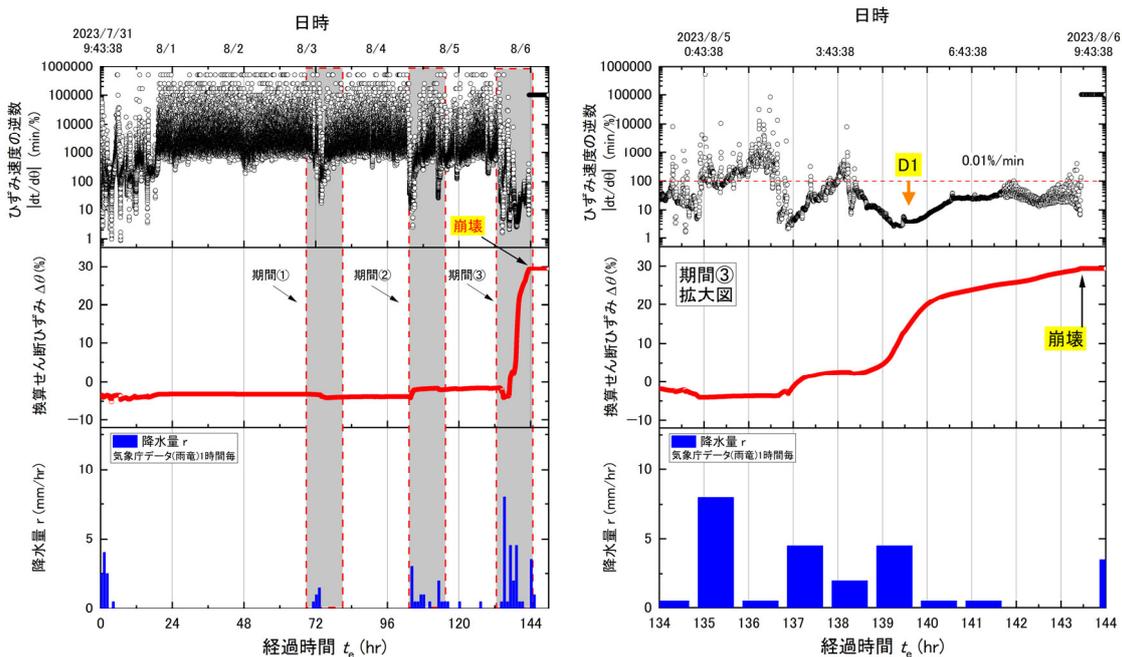


図 9 盛土斜面の崩壊状況 (2023 年 8 月 8 日撮影, 左) と崩壊前後の断面比較(右)



1)長期的な反応(7/31 から 8/6 まで) 2)崩壊直前の反応(崩壊前 10 時間)

図 10 計測開始から土砂崩壊までの換算せん断ひずみと降水量の推移

4. 研究成果

本研究では、工事中の土砂崩壊によって作業者が生き埋めとなる労働災害を防止することを目的に、現場で簡易に使用可能な計測技術の開発をおこなった。

この技術は、斜面の表面付近で崩壊前に微増するひずみを新たに考案した表層ひずみ棒センサー(MPS)によってデータ計測するものであり、さらに、データは逐次解析してひずみ速度を求めようプログラムした。検証実験から本技術は掘削による人工的な不安定化のみならず降雨による自然崩壊に対しても危険を「見える化」して人々の被災防止に貢献できる性能を有することが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 玉手聡	4. 巻 61-1
2. 論文標題 建設業における労働災害の基礎的分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 安全工学	6. 最初と最後の頁 35-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18943/safety.61.1_35	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 -

1. 著者名 玉手聡 , 堀 智仁, 菊田 亮一	4. 巻 17-1
2. 論文標題 小規模な溝崩壊による労働災害防止のための技術的保護方策に関する実証的研究	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 労働安全衛生研究	6. 最初と最後の頁 3~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2486/josh.JOSH-2023-0011-GE	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Satoshi Tamate, Tomohito Hori and Ryoichi Kikuta
2. 発表標題 Design of personal soil guard system for safer trench excavations in shallow depths
3. 学会等名 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉手聡、堀智仁、菊田亮一
2. 発表標題 掘削工事における労働災害防止のための簡易計測システム
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉手聡、堀智仁、菊田亮一、永尾浩一、市山大輝
2. 発表標題 表層ひずみ棒センサーの崩壊ブロック内外における反応
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉手聡、堀智仁、菊田亮一
2. 発表標題 実大斜面実験による崩壊予兆の計測比較
3. 学会等名 地盤工学会, 第56回地盤工学研究発表会, 同講演予稿集, 13-5-4-03.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉手聡、堀智仁
2. 発表標題 土砂崩壊の簡易危険検出システムの検討. 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, VI-70.
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, 同講演予稿集, VI-70.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉手聡、堀智仁、菊田亮一
2. 発表標題 掘削溝の崩壊危険を「見える化」する表層ひずみの計測技術
3. 学会等名 日本学術会議, 安全工学シンポジウム2020, 同講演予稿集, pp. 318 - 321.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉手聡、堀智仁、菊田亮一、永尾浩一、市山大輝
2. 発表標題 棒状センサーによる斜面表層のひずみ計測と動きの見える化
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会 同講演予稿集, 12-7-1-02
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永尾浩一、市山大輝、玉手聡、堀智仁、菊田亮一
2. 発表標題 土砂崩壊の無線モニタリングシステムの開発
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会 同講演予稿集, 12-7-1-03
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永尾浩一、市山大輝、玉手聡、堀智仁、菊田亮一
2. 発表標題 土砂崩壊の簡易危険検出システムを用いた実大斜面崩壊実験の無線計測
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演 VI-1192
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 玉手聡、堀智仁、菊田亮一
2. 発表標題 棒状センサーを用いた溝肩と溝壁における崩壊前のせん断ひずみ計測
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会 同講演予稿集, 24-8-3-01
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 横濱勝司、菊田亮一、玉手聡、堀智仁
2. 発表標題 斜面崩壊に対する表層ひずみ棒センサーの反応に関する屋外計測
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会 同講演予稿集, 24-8-3-02
4. 発表年 2024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
研究 分担者	堀 智仁 (Hori Tomohito) (20508634)	独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・ 建設安全研究グループ・上席研究員 (82629)	

	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
研究 協力者	横濱 勝司 (Yokohama katsuji) (50299731)	北海道大学・大学院工学研究院土木工学部門・助教 (10101)	
研究 協力者	畠山 寿市 (Hatakeyama Jyuichi)	暑寒の森道づくり研究所	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------