

土砂崩壊の無線モニタリングシステムの開発

Development of wireless monitoring system for soil collapses

キーワード

土砂崩壊, 切土工事, 労働災害, 実大実験,
簡易計測, 崩壊予測

永尾 浩一*, 市山 大輝**,
玉手 聡***, 堀 智仁***, 菊田 亮一****

研究概要

土砂崩壊による生き埋め事故の間接要因として逃げ遅れがあり, 目視で土砂崩壊の予兆に気づかないことが要因にあげられる。著者らは, 目視では確認が出来ない斜面浅層部の微小なせん断ひずみを無線通信することにより, 離れた場所においても同時刻で土砂崩壊の予兆を早期に把握する技術の開発を行っている。一方で無線での微小なせん断ひずみの計測はデータにばらつきがあり危険警報が遅れる問題があった。そこで計測システムの改善を行い実大規模の斜面崩壊実験で試験的に土砂崩壊のモニタリングを行った。その結果, 計測データが遅れることなく崩壊予兆の把握と危険警報発信ができることが確認された。

ABSTRACT

The indirect cause of burying people alive due to landslide accidents is the delay in escape, which is caused by not noticing the signs of soil collapses visually. The authors are developing a technique for early detection of signs of soil collapses at the same time in remote locations by wireless communication of shear strain in the shallow parts of slopes that cannot be visually confirmed. On the other hand, wireless measurement of shear strain has a problem of delay in warning of danger due to the variation of data. Therefore, we improved the measurement system and conducted trial monitoring of soil collapses in an actual full-scale slope failure experiment. As a result, it was confirmed that it was possible to detect predictive signs of collapse and issue danger warnings without any delay in the measurement data.

1 はじめに

切土工事等での土砂崩壊による労働災害の間接的な要因には逃げ遅れがあり, これは人が土砂崩壊の予兆に気づけないことを示唆している。この問題を解決するため厚生労働省所管の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(以下, 安衛研)では地盤の浅い部分の微小なせん断ひずみを計測して早期に土砂崩壊の予兆を捉え, 崩壊の危険性を光と音で周囲に知らせ逃げ遅れによる事故の発生を未然に防ぐ「土砂崩壊の簡易危険検出システム(Mini Pipe Strain meter system)(以下, 簡易システム)」を開発した。

簡易システムは, 軽量で既往の傾斜計や伸縮計のように設置に時間と労力を必要とせず, 簡易に設置と計測ができる。そのため, 現場で急きょ計測が必要となった場合でもすぐに対応が可能である。しかしこのシステムは斜面崩壊に伴う所定のひずみ速度の発生による警報は可能なもののその時刻歴データをリアルタイムに共有できない問題

があった。

著者らは, 上記簡易システムにより土砂崩壊の警報が発生する前に地盤変状の状況をリアルタイムに確認することができれば, 土砂崩壊の危険性を早期に把握出来ると考え, 「無線による土砂崩壊の簡易モニタリングシステム(以下, モニタリングシステム)」の開発を行ってきた²⁾。

2020年10月には, 安衛研の実大斜面崩壊実験において無線と有線でのモニタリングを実施し, 無線でも土砂崩壊の警報が動作することを確認した³⁾。しかし一方で, 無線によるモニタリング(以下, 無線MPS)では微小なせん断ひずみの変化を捉えられず, 計測値にはばらつきが生じ, 危険警報の発生においても有線によるモニタリング(以下, 有線MPS)の結果より大幅に遅れ課題も明らかとなった。

本稿は, 技術上の課題であった微小なひずみデータの無線通信における値の分解能と性能に関する改善と再度実大斜面崩壊実験にて検証を行った結果について報告する。

* 技術センター土木研究部, ** 大阪支店, ***労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所, ****日本スピードショア

2 土砂崩壊の無線による簡易モニタリングシステム

簡易システムを図-1に示す。簡易システムは表層ひずみ棒センサー（MPS）を計測に用いる。MPSは地盤の浅い部分で増加する 10^{-3} レベルの微小なせん断ひずみを計測するセンサーであり、重さ350gと軽量で長さも0.6mとコンパクトなものである。設置も市販の電動ドリルを用い数十秒でできるため、現場で迅速に利用できるメリットがある。

警報器はMPSからのデータを自動収録し、逐次解析する仕組みになっており、目視ではわからない微小なひずみの増加速度を判別して光と音で周囲に警報を発信する。

また同時に付属の受信器に情報を伝達し、離れた場所でも崩壊の危険を知らせることが可能である。

以上の通り簡易システムは目視による現場の安全監視を電氣的計測によって補助するものであるが、本研究ではさらにMPSからのデータを無線で送信して、タブレットやPC等の端末にリアルタイムで共有するモニタリングシステムを開発している。

モニタリングシステムを図-2、概要を図-3に示す。装置は、①表層ひずみ棒センサー（MPS）とデータ計測・解析を行う送信機からなる「計測部」、②計測部からのデータを集計し、端末部にデータを送信し、危険時にパトライトにより警報を発信する「アクセスポイント（AP）部」、③計測データのインターネット通信を行う「モバイルルーター」、④PC、iPad等の「端末部」で構成され、Google Chromeなどのブラウザにより「AP部」のホームページにアクセスすることでデータをリアルタイムに閲覧できる。

測定と判定の仕様は「簡易システム」と基本的に同じであり、データを10秒毎に計測し、それを逐次解析して求めたせん断ひずみ速度の変化から危険度を判定させる。その判定方法については3章に後述する。

データ通信は、Wi-Fi通信のほか、モバイルルーターを併用したインターネット回線での通信機能があり、遠隔地でのデータ通信が可能である。

なお、システムの通信プロトコルは、簡易通信に用いられているMQTTを使用し、最大5箇所まで同時計測ができる。

今回、表層ひずみ棒センサーによる 10^{-3} レベルの微小なせん断ひずみの変化に追従するため、出力電圧のさらなる増幅や分解能を向上させるなど以下のデータの計測精度の向上のための改善を行った。

以下にシステム改善の具体的な内容を示す。

- ① ゲインアンプ（電圧増幅回路）のアナログ電圧増幅率の増強（16倍→128倍）
- ② A/D変換器のデジタル分解能の変更（16bit→24bit）
- ③ 計測データの平滑化（1秒間に10回計測し、その平均値を計測値として使用）
- ④ Wi-Fi中継機を用いたWi-Fi通信の安定化
- ⑤ Wi-Fi通信およびInternet通信による通信拡大

また、本システムはMPS以外のセンサーも同時計測が可能であり、計器の外的な影響を調べる目的で、温度、湿度、照度、気圧、騒音、加速度、VOCが計測できる環境センサー（オムロン形2JCIE-BU01）の計測も行っている。

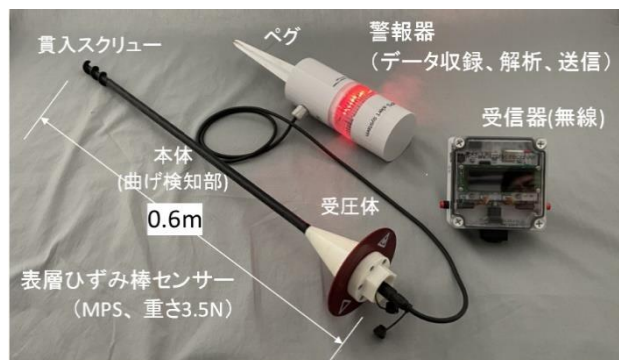


図-1 土砂崩壊簡易危険検出システム（簡易システム）



図-2 無線モニタリングシステム（モニタリングシステム）

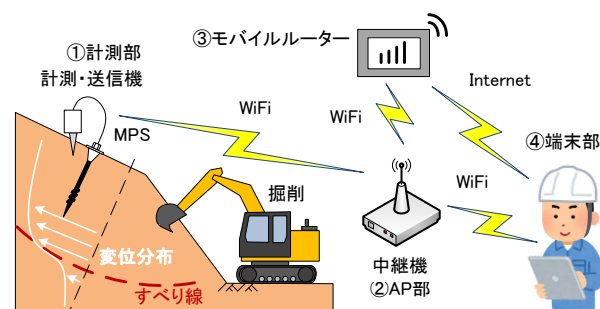


図-3 モニタリングシステムの概要

3 土砂崩壊判定閾値

「モニタリングシステム」では「簡易システム」と同じ方法で危険を判別している。両システムではMPSからの出力値を換算せん断ひずみ θ に変換し、 $\Delta\theta$ の増加速度の逆数 $\Delta t/\Delta\theta$ を用いて2段階で危険を判別している。具体的には下記のとおりである。

- ◆第1段階【D1警報】：換算せん断ひずみの1分当たりの増加速度が一定値を超えた状況。
 $|\Delta t/\Delta\theta|$ の値で判別。
- ◆第2段階【D2警報】：過去1分間の傾向から求めた換算せん断ひずみの予測値と実測値の乖離が閾値よりも大きく、加速度的な増加の可能性がある状況。

以下に、上記判別に用いる $\Delta t/\Delta\theta$ の算定式を示す。

$$\Delta\theta (\%) = (\Delta s / L) \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、L：「表層ひずみ棒センサー」の有効長さ、 Δs ：端末部のたわみ量。

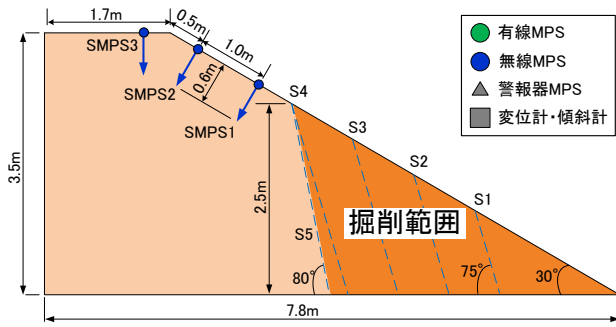


図-4 実大斜面立面図



写真-3 実大斜面崩壊実験崩壊状況

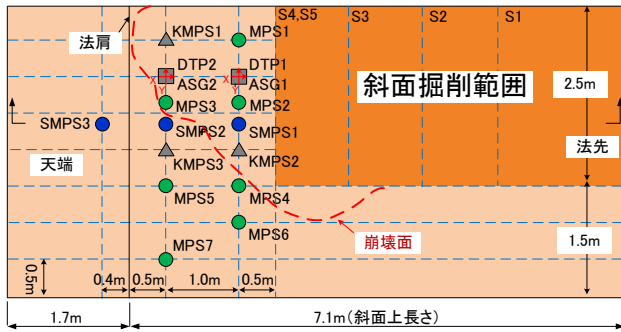


図-5 実大斜面平面図

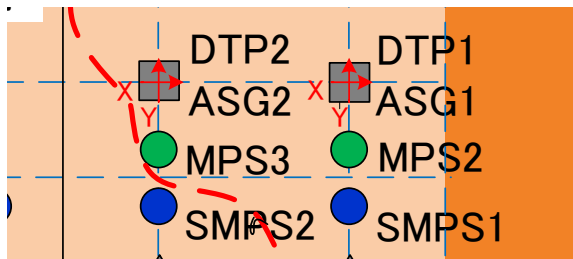


図-6 変位計および傾斜計位置図 (拡大)



写真-1 実大斜面全景および計測箇所状況

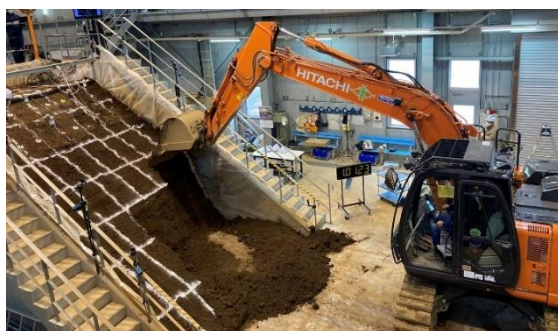


写真-2 実大斜面実験 BH 掘削状況 (S3 掘削)

$$\Delta t / \Delta \theta \text{ (min/\%)} = t / (\Delta \theta \times B) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 t :経過時間、 $\Delta t/\Delta \theta$:せん断ひずみ増加速度の逆数、 B :任意な係数である。

なお、換算せん断ひずみ増分 $\Delta \theta$ は、MPSの設置方向や θ の分布(凹分布か凸分布)によって値の正負が異なるため判別は逆数の絶対値 $|\Delta t/\Delta \theta|$ によって行っている。

D1警報の閾値は、既往の実験から逆解析的に求めており、具体的には、崩壊前に見られた $\Delta t/\Delta \theta$ の値と電気的な不確実性を総合的に考慮して $|\Delta t/\Delta \theta| \leq 100 \text{ (min/\%)}$ と仮定した。D2警報についても同様であり、せん断ひずみの10秒後と20秒後の予測値と実測値の乖離が2回続けて閾値よりも大きくなった場合に判別させた。その値は10秒後の $\Delta \theta$ が $2.1 \times 10^{-3} \text{ (\%)}$ 以上かつ20秒後で $\Delta \theta$ が $4.0 \times 10^{-3} \text{ (\%)}$ 以上と仮定した。

4 実大斜面崩壊実験概要

実大実験の概要を図-4から図-6に、実験状況を写真-1から写真-3に示す。土試料は含水比90%程度に調整した関東ロームを使用した。実験盛土は、高さ3.5m、幅4.0m、斜面勾配30°奥行き長さ7.1mの盛土斜面を法先からS1からS5の面を30分間隔で5段階に分けバックホウで切土掘削し、S5面の掘削で斜面を崩壊させた。

計測は、斜面法肩付近に表層ひずみ棒センサーMPS(○印)を設置し、各段階で地盤変状の様子を観測した。MPSは、無線(モニタリングシステム)での計測(以下、無線)を3箇所、別におこなった有線での計測(以下、有線)を7箇所、簡易システム(以下、警報器)(△印)を3箇所の合計13箇所設置した。さらに他の計測との比較のためワイヤー変位計および加速度傾斜計(□印)を2箇所設置した。

なお、無線計測の送信機は、掘削時にWi-Fi通信障害の影響を受けないよう斜面上を避け、天端部の離れた場所に設置して計測を行った。

5 実大斜面崩壊実験結果

MPSによって計測された掘削面直上部の換算せん断ひずみ増分 $\Delta \theta$ (式(1)参照)の無線、有線による時系列測定結果のS4掘削から崩壊までの結果を図-7、図-8に示す。

無線の値はばらつきがなく連続的であり、S4掘削において掘削変動による段階的なひずみの増加を良好に捉えている。また、掘削面から離れたSMPS3やMPS7においても

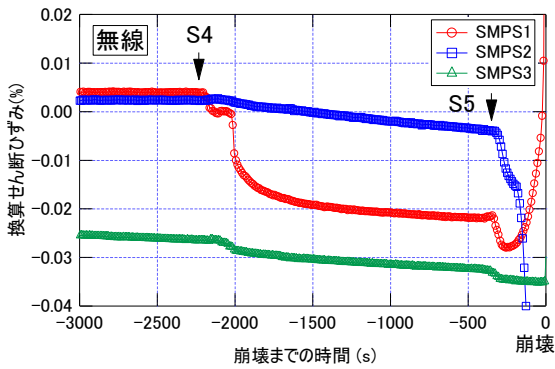


図-7 換算せん断ひずみ計測結果（無線）

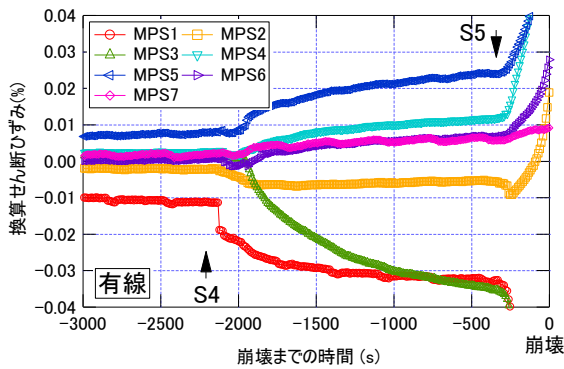


図-8 換算せん断ひずみ計測結果（有線）

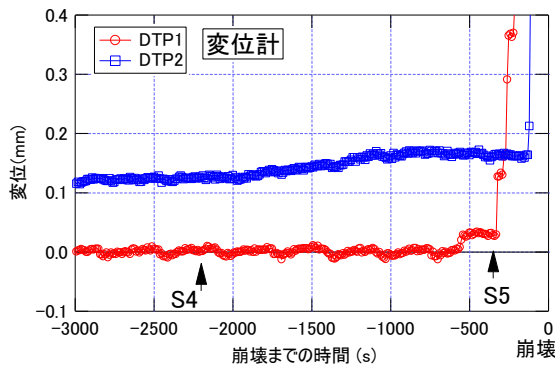


図-9 ワイヤ変位計計測結果

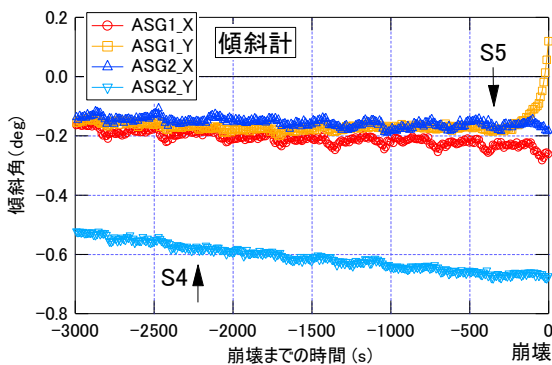


図-10 加速度傾斜計計測結果（有線）

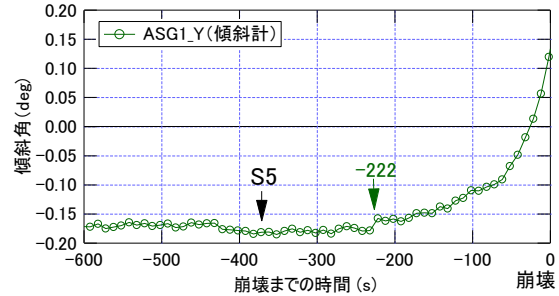
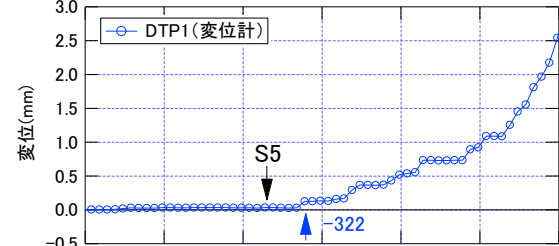
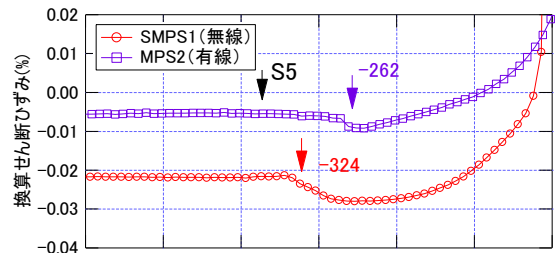


図-11 崩壊前の計測結果

掘削による変化が計測されていることがわかる。

さらに掘削面に近い SMPS1 と MPS2 では、S4掘削後の $\Delta\theta$ の増加収束傾向や S5掘削後の $\Delta\theta$ の急速な増加も同様に捉えており、無線においても有線と同精度で計測がされている。

一方、ワイヤ変位計の計測結果を図-9に、加速度傾斜計の結果を図-10に示す。ワイヤ変位計においても DTP2において S4から S5の段階掘削において緩やかな変動があるものの、掘削面に近い DTP1では S5掘削前まで変化があまり現れず、S5掘削後急激に値が増加している。また、DTP1の S5掘削後の急激な増加の値も1分間にわずか0.3mm程度であり、目視では斜面の変形には気づかないことがわかる。

加速度傾斜計の結果においては S4から S5の段階掘削では変動が見られず、S5掘削後 ASG1_Yにおいて急激に値が変化しているものの、その他は変化が見られなかった。

図-5及び図-6に示す掘削面に比較的近い MPS、変位計、傾斜計の崩壊直前の結果を図-11に示す。S5掘削後に計測値が変化する時間は、SMPS1で324秒前、MPS2で262秒前、DTP1で322秒前、ASG1_Yで222秒前となった。

MPSは S5掘削後、有線も無線も共通して連続して変化を敏感に捉えている。

一方、ワイヤ変位計 DTPは、実フィールドより計測条件の整った不動点からの計測であるにもかかわらず、値が段階状に増加しており計測精度的な限界が見られる。これは危険の把握を遅らせる可能性を示唆するものである。

また、傾斜計 ASGは S5掘削後の値の変化が小さく、崩

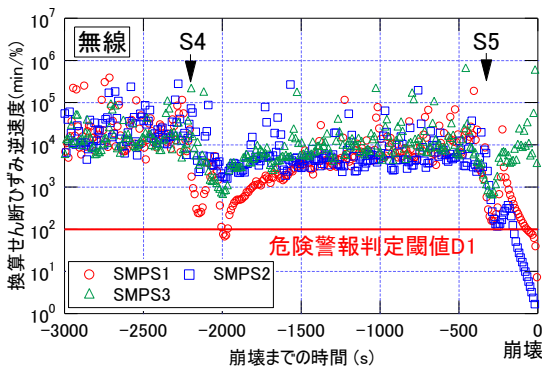


図-12 換算せん断ひずみ計測結果（無線）

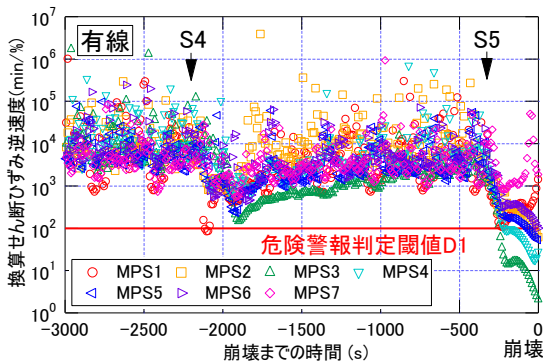


図-13 換算せん断ひずみ計測結果（有線）

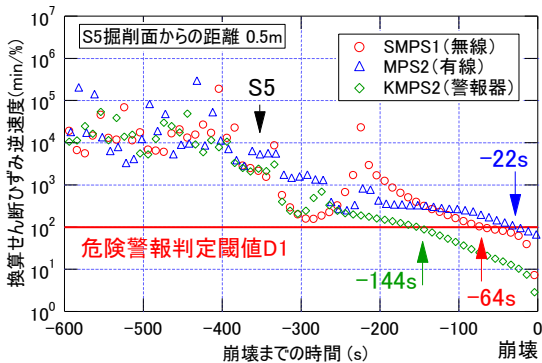


図-14 換算せん断ひずみ計測結果（SMPS1）

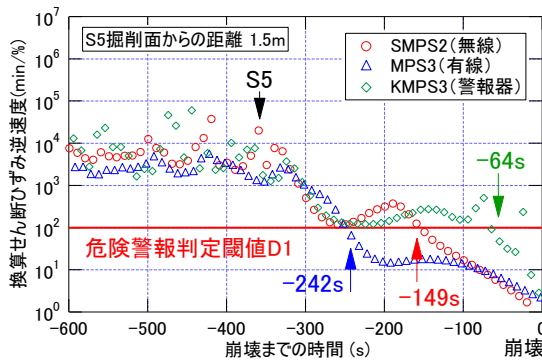
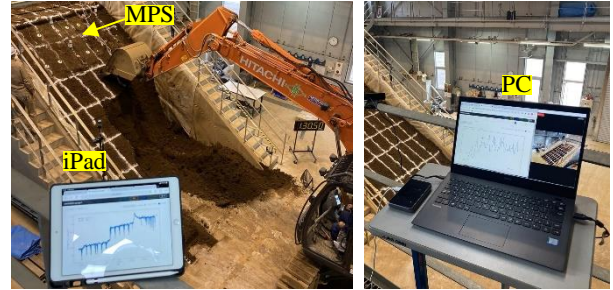


図-15 換算せん断ひずみ計測結果（SMPS2）

表-1 崩壊危険警報判定値 D1 発生時刻

S5掘削面からの距離	無線 MPS	有線 MPS	警報器 MPS
0.5m	-64s	-22s	-144s
1.5m	-149s	-242s	-64s



（左：Wi-Fi 通信，右：インターネット回線通信）

図-16 無線通信計測状況

壊に近づくにつれ変化が大きく現れることから、崩壊初期での判断が難しく、早期の危険把握は難しいとも考えられる。

MPS で計測された崩壊危険の指標となるせん断ひずみ増加速度の逆数 $|\Delta t/\Delta \theta|$ (式(2)参照)の測定結果を図-12および図-13に示す。 $|\Delta t/\Delta \theta|$ は、無線の値は有線と同様に段階掘削毎に変化（崩壊の予兆）を捉えており、S4掘削後に $|\Delta t/\Delta \theta|$ の値が危険警報閾値 D1の100より小さくなり崩壊警報発信を確認した。

さらに無線 MPS の SMPS1 と SMPS2 の計測箇所に近い有線 MPS 及び警報器 MPS の崩壊前の結果を図-14および図-15に示す。無線 MPS の計測値はばらつきがなく連続的であり、崩壊前の値の急激な変化も計測できており、有線 MPS や警報器 MPS と同精度で計測が可能と判断される。

また、上記 MPS の $|\Delta t/\Delta \theta|$ が100を下回る D1警報発生のタイミングについて S5掘削面からの距離で纏めたものを表-1に示す。S5掘削面からの距離が0.5mの場所では、無線 MPS が64秒前に対し、有線 MPS は22秒前、警報器 MPS は144秒前であった。S5掘削面からの距離が1.5mの場所では、無線 MPS が149秒前に対し、有線 MPS は242秒前、警報器は64秒前となった。崩壊面の位置により $|\Delta t/\Delta \theta|$ の値が変化すると考えられ、崩壊面に近い MPS の発生時刻が早くなる結果となった。

一方、図-15において警報の発生は、無線 MPS が149秒前、有線 MPS が242秒前であるが、242秒前に無線 MPS と有線 MPS は、同じタイミングで変化を計測しており崩壊の予兆は同精度で捉えていると考えられる。

無線通信の計測状況を図-16に示す。Wi-Fi 通信およびインターネット通信による計測では、掘削にともなう段階的な換算せん断ひずみの増加も連続的に確認することができた。また、インターネット回線を利用した計測は、Wi-Fi での通信と同様にリアルタイムで計測が良好にできて

おり、遠隔地でも同精度で斜面崩壊の危険を把握可能なことがわかった。

6 考察（システム改良前後の比較）

2020年10月に実施した実大斜面崩壊実験（システム改良前）と今回（2022年11月）実施した実大斜面崩壊実験（システム改良後）の結果を以下に示す。

システム改良前とシステム改良後の実験の概要と崩壊状況を図-17、写真-4に示す。システム改良前の実験は、今回と同条件であり、含水比90%程度の関東ロームで作成した高さ3.5m、幅4.0m、斜面勾配30°奥行き長さ7.1mの盛土斜面を法先から5段階に分けバックホウで切土掘削し崩壊させた。

比較を行ったシステム改良前とシステム改良後の MPS 位置を図-18に示す。双方とも斜面崩壊面に近い有線 MPS と無線 MPS の計測値を使用した。

換算せん断ひずみ増分 $\Delta\theta$ の結果を図-19に示す。システム改良前の値は有線が微小な $\Delta\theta$ の変化を連続的に捉えているのに対し、無線の値はパルス状であり、数値が粗く値が正確に計測できていないと思われる。

一方、システム改良後は、無線も有線と同様に微小なせん断ひずみの変化を計測できており、連続的な値の変化にも追従できていることがわかる。

せん断ひずみの増加速度の逆数 $|\Delta t/\Delta\theta|$ の結果を図-20に示す。左がシステム改良前、右がシステム改良後の結果である。改良前の無線の計測値は $\Delta\theta$ と同様に有線に比べ値が粗く、また変化が連続していないため、斜面崩壊の危険性を把握しているとは言いがたい。

一方、システム改良後の無線の結果は、有線と同じく連続的な変化を示しており、値の変化から崩壊の予兆を確認できる。

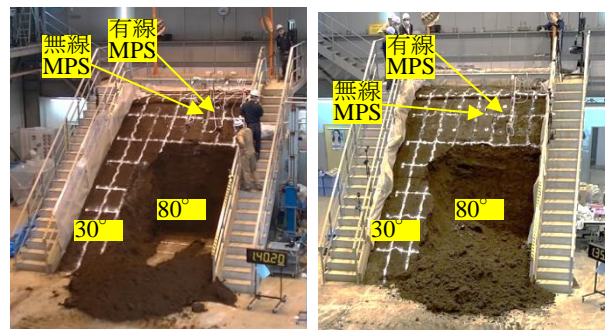
$|\Delta t/\Delta\theta|$ の値が100以下となる斜面崩壊警報 D1の発信時刻の結果を表-2に示す。システム改良前は、有線、無線ともに崩壊340秒前に閾値100以下となり、無線でも警報発信は確認された。一方、システム改良後は、有線では242秒前、無線では149秒前となった。

警報時間の比較からはシステム改良前の方が早く警報しているが、これは異なる実験での結果である。掘削から崩壊までの時間的な経過や細やかな条件は実験毎に異なるため、本報告では有線と無線の計測値の違いを議論する。

システム改良前の無線の値は、有線と同時に警報を発信しているものの、前述の通り有線に比べデータが粗く、微小なせん断ひずみの変化での崩壊予兆の判別は難しい。

一方、システム改良後の警報発信は、有線では崩壊242秒前、無線では崩壊149秒前となったものの、242秒前は無線も有線と同じ値の低下が計測されていることがわかる。

システム改良により無線でも値の急速な減少が捉えられ、無線においても有線と同様に危険警報の判定出来ると判断される。



（左：システム改良前，右：システム改良後）

図-17 実大斜面崩壊実験全景



（左：システム改良前，右：システム改良後）

写真-4 実大斜面崩壊実験崩壊状況

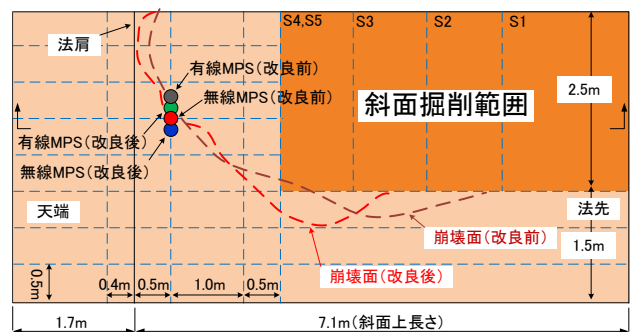


図-18 実大斜面崩壊実験概要

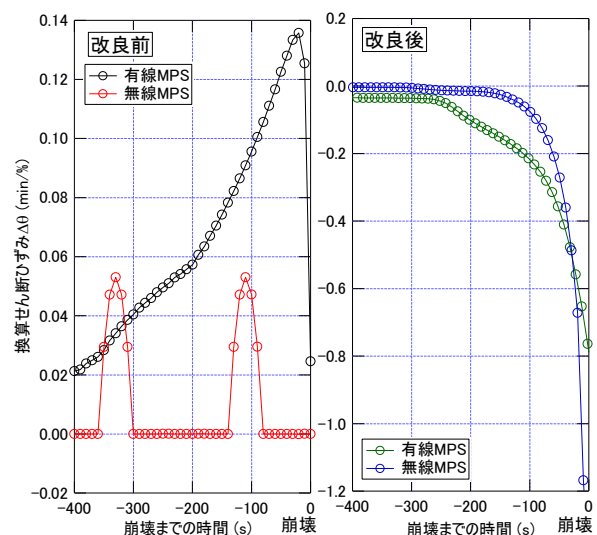


図-19 換算せん断ひずみ増分結果

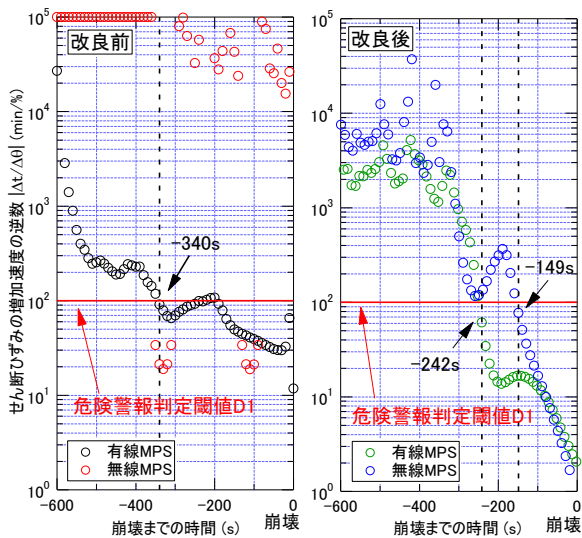


図-20 せん断ひずみの増加速度の逆数 $|\Delta t/\Delta \theta|$ 結果

表-2 崩壊危険警報判定値 D1 発生時刻

システム	無線 MPS	有線 MPS
改良前	-340s	-340s
改良後	-149s	-242s

7 おわりに

本研究では、開発中のモニタリングシステムのデータ収録と通信方法を技術的に改善し、その性能を実大規模の斜面崩壊実験において確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- MPS は、変位計、傾斜計と比較し、微少な変化を連続的に計測することが可能であり、崩壊初期の早い段階で段階の予兆を把握することができ、より速く警報を発信することが可能である。
- モニタリングシステムのシステム改良により、 10^{-3} レベルの微少なせん断ひずみを連続的に計測可能となり、そ

の精度も別におこなった有線計測とほぼ同レベルであることが認められた。

- 崩壊警報の発信に関しても、システムの改良により無線計測でも別に行った有線での計測と同精度で警報を発信することが実証された。
- モニタリングシステムを利用することにより、簡易システムで知ることができなかった崩壊警報に至る前の崩壊予兆（危険性）も把握することが可能となるため、さらなる安全な管理が期待される。

さらに、現在、現場での利用促進を考え、新たに送信機のバッテリーを乾電池式にし、防塵・防水などの機能を高めた製品を製造し、性能確認を行っている。

今後、現場での利用実績を増やすほか、同時に間隙水圧などの計測を同時に行い、長期的な斜面変状のモニタリング技術としても活用したい。

謝辞

無線による土砂崩壊モニタリングシステムの開発および実大規模溝崩壊実験に際し、ご協力、ご尽力いただいたスマートマシン株式会社福田氏、高野工事株式会社近藤氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 玉手聡, 堀智仁, 三國智温, 末政直晃: 施工時斜面における浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊監視の検討, 土木学会論文C (地圏工学), Vol.70, No.2, pp.213-225, 2014.
- 2) 市山大輝, 永尾浩一, 玉手聡, 堀智仁, 菊田亮一: 無線による土砂崩壊簡易モニタリングシステムを用いた模擬溝崩壊実験の計測, 佐藤工業技術研究所報, No. 47, 2022.
- 3) 市山大輝, 永尾浩一, 玉手聡, 堀智仁: 実大斜面崩壊実験における表層ひずみ棒センサーを用いた斜面変状モニタリング計測, 佐藤工業技術研究所報, No. 46, 2021.