

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05350

研究課題名(和文) 分布式光ファイバー一体型アンカーによる斜面崩壊予測手法の開発

研究課題名(英文) Development of anchor equipped with distributed fiber optic sensor for prediction of landslides

研究代表者

小暮 哲也 (Kogure, Tetsuya)

島根大学・総合理工学研究科・助教

研究者番号：70534006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,470,000円

研究成果の概要(和文)：当初計画していたアンカーへの分布式光ファイバーセンサーの埋設を変更し、地すべり地において調査・計測用に掘削されるボーリング孔へ光ファイバーセンサーを埋設した。2017年6月から10月までの4カ月の計測期間中に、深さ16mのボーリング孔内において10cm間隔でひずみ変化を測定した。その結果、降雨発生に伴う地中のひずみの増加を明確に検知できた。特徴的なひずみ変化を確認できた深さは、(1)1-5 m、(2)約8 m、(3)14-15.5 mである。深さ8 m付近のひずみ変化は、すべり面の変形によるものである。本研究により、今後の地すべり挙動モニタリングの主流になり得る有望な手法を開発できた。

研究成果の概要(英文)：Fiber optic cable was installed into a vertical borehole with its depth of 16 m in a landslide. Strain changes along the borehole were measured from June to October 2017 with spatial resolution of 10 cm. Results show that strain clearly increased with rainfall events. Distinctive strain changes are found at the depths of (1) 1-5 m, (2) approximately 8 m, and (3) 14-15.5 m. The strain changes around 8 m appear to show a deformation of the slip plane. This study has developed a promising geophysical method which can become a major current for landslide monitoring.

研究分野：自然災害科学

キーワード：光ファイバー 地すべり モニタリング ボーリング孔

1. 研究開始当初の背景

日本では地すべりや表層崩壊といった斜面崩壊が多発し、災害につながることが多い。こうした斜面崩壊は降雨により引き起こされるため、現在は降雨量の観測結果を基に住民の避難が判断されている。しかし、実際には斜面崩壊の発生と降雨量との関係は複雑であり、たとえば地質が異なる場所同士では、崩壊発生にいたる降雨条件も異なる。したがって、崩壊の危険性をより正確に判断するためには、降雨の情報に加え、対象となる斜面の変形状況をリアルタイムでモニタリングする必要がある。

既存の斜面変形計測には、伸縮計や変位計を用いたものがある。これらは、「点」でデータを取得するため、変形地点がすでに明らかの場合に有効な手法である。しかし、大部分の斜面崩壊は、発生位置を事前に特定できない。そのため、これらの手法による斜面崩壊の予兆の検知は難しい。

2. 研究の目的

近年、対象物の変形を「線」的に測定できる手法として、分布式光ファイバーセンシングが注目されている。光ファイバー内を進行する光の周波数は、光ファイバー周囲の温度変化や光ファイバーそのものの変形(ひずみ変化)に応じて変化する。光ファイバーセンシングは、その性質を利用し、計測された光の周波数の変化量から温度やひずみ変化量を算出する技術であり(斜面変形計測ではひずみ変化が測定対象)、「点センサー方式」と「分布式」に分けられる。以前は点センサー方式が主流だったが、近年の計測機器の進歩により、現在では光ファイバーの線全体に沿って最小数センチ間隔で数キロメートル以上にわたり連続的にデータを取得できる分布式が急速に普及してきた。センサーを一つ一つ測定点に設置する作業は必要なく、計測機器の操作により、一本の光ファイバー(通信用と同じ製品)上に点センサーを任意の間隔でほぼ無数に配置できる。点センサー方式に比べ設置作業がきわめて容易であり、大量に流通している通信用ファイバーを利用するため、センサー自体の値段も安い。したがって、温度やひずみの分布測定に有効で点センサー方式より低コストな技術である。

防災分野においては、1990年代後半から斜面変形のモニタリング用に光ファイバーの導入が検討され、実際の地すべりに設置された光ファイバーにより移動を監視可能なことが確認されている。しかし、従来の方法は分布式ではなく点センサー方式であったため、伸縮計や変位計と同様に変形地点が明らかの場合のみにしか使えない。その上、伸縮計や変位計の方が安価なため、現在では斜面変形計測手法としては光ファイバーがほとんど用いられていない。

「点センサー」方式ではなく、「分布式」光ファイバーセンシングの高精度、高解像度、

広範囲なデータ取得性は斜面災害の軽減に有効と考えられる。しかし、あらゆる斜面にやみくもに光ファイバーを設置するのは効率が悪い。そこで、既存の斜面災害対策技術・手法に光ファイバーのひずみ測定機能を追加する方法ならば、危険度が高い場所に光ファイバーを効率的に設置できると考えた。その第一歩として、斜面の補強に利用されるグラウンドアンカーに着目した。グラウンドアンカーは、斜面表面と内部の基盤とを鋼材やセメントで固定し、斜面を安定化させる技術である。しかし、アンカーで固定された斜面が完全に安定化するわけではなく、再び動き出し、アンカーの破断やコンクリート壁の破壊を引き起こすことがある。そこで本研究では当初、分布式光ファイバー一体型アンカーを開発し、地表から基盤までのひずみ変化量を線的にモニタリングし、崩壊発生予測手法として確立することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 概要

高速道路の建設現場では、道路を直線的に敷設するためにトンネルを掘削したり山を削ったりする。削られた山は不安定になり斜面が崩壊する可能性があるため、斜面補強のためにアンカーが使用される。本研究では、そのような高速道路工事現場におけるアンカー内に光ファイバーを埋設する予定であり、関係機関との調整を進めていた。しかし、現場試験を予定していた研究開始2年目に、工事区間内において大規模な地すべりが発生し、工事が大幅に遅れることになった。そのため、当初の計画を変更した。研究開始時の目的である「既存の斜面災害対策技術・手法に光ファイバーのひずみ測定機能を追加」するため、目的に適した試験地を選定し、研究開始2年目の冬から現場試験準備を開始した。新たに選定した現場は20年以上前に地すべりが発生した場所であり、自治体により既に地すべり対策工事が行われている。地すべり発生時に設けられた調査用のボーリング孔を利用可能であったため、その中に光ファイバーを埋設することとした。

(2) 光ファイバーセンシング

ひずみ測定に適した後方散乱光はブリルアン (Brillouin) 散乱光とレイリー (Rayleigh) 散乱光である。本研究では、後方散乱光の分析装置としてニュープレクス(株)社製のNBX-7020を用いた。NBX-7020は、ブリルアン散乱光用にPPP-BOTDA (Pulse Pre-Pump Brillouin optical Time Domain Analysis)、レイリー散乱光用にTW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry)と呼ばれる二つの解析システムを持つ。一般に、BOTDAは分布式光ファイバーセンシングを代表する解析システムであり、地すべりへの適用も含め既存研究で多く用いられている。一方、COTDRによる測定の空間解像度はBOTDAに比べ高いに

もかわらず，COTDR を用いた測定例はきわめて限られている（たとえば，小暮ほか（2015））。小暮ほか（2015）は，圧力容器内の直径 5 cm，高さ 10 cm の円柱供試体に異なる封圧を作用させ，供試体にらせん状に巻きつけた光ファイバーによって供試体のひずみ変化を測定した。その結果，COTDR は BOTDA に比べノイズが小さく高解像度なひずみ分布を測定できることがわかった。したがって，本研究では NBX-7020 を用いて COTDR による地すべりのひずみ分布を測定することとした。

（3）パイプひずみ計によるひずみ測定

地すべり下部のひずみを測定するために，ボーリング孔にパイプひずみ計（ひずみゲージ間隔 1 m）を設置した。その際，パイプひずみ計の山側の面に光ファイバーケーブルを沿わせ，ビニールテープにより一定間隔で固定した。光ファイバーが固定されたパイプひずみ計をボーリング孔に挿入し，ファイバーを折り返してからパイプひずみ計をグラウチングした。すなわち，ボーリング孔においてパイプひずみ計および光ファイバーの両方よりひずみを測定した。

（4）雨量および気温

地すべり地から約 20 km 離れた場所に気象庁のアメダス観測点がある。本研究ではこのデータを利用して地すべりの動きと雨量との対応を検討する。また，斜面付近の直射日光が当たらない林内において，地上 1.5 m の気温を 10 分間隔で測定した。

（5）測定条件

温度測定に対するグラウチング時の発熱の影響を避けるため，また，グラウトの温度を周囲に調和させるため，測定開始をグラウチングの 2 週間後の 2017 年 6 月 19 日とした。光ファイバーによる測定は PPP-BOTDA と TW-COTDR を 1 セットとした。それぞれの測定の所要時間は 5 分，45 分であるため，1 セットの所要時間は約 50 分である。各セット間の時間間隔を 6 時間とした。また，それぞれの測定の空間解像度を 10 cm とした。すなわち，本研究では 6 時間に一度，10 cm 間隔の測定点において PPP-BOTDA と TW-COTDR による周波数変化を測定した。

4．研究成果

（1）異なる深度におけるひずみ変化

図 1 はボーリング孔に沿ったひずみ変化を示すカラーマップである。ひずみ変化とは，測定開始日である 6 月 19 日のデータを基準とし，その値からの変化量を指す。図の左側には，ボーリング孔から得られたコアの写真を示す。左側縦軸は深さを表し，カラーマップおよびコアに共通である。表層付近の温度変化の影響を除去するため，深さ 1-16 m のデータを表示した。横軸上の棒グラフは測定期間中の降水量を示し，その目盛はカラーマップの右側縦軸である。カラーマップ中の水平方向に分布する寒色系のプロットはケー

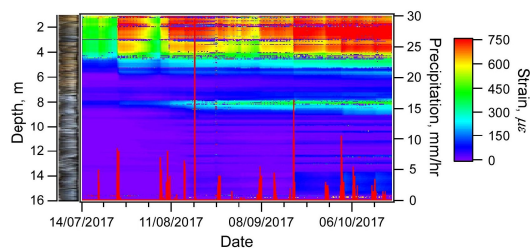


図 1 ボーリング孔に沿ったひずみの時間変化

ブルのグラウチングに関連するものであり，ひずみ変化が大きい深度において顕著である。しかし，空間解像度やひずみ測定精度が高いため，計測結果に含まれるノイズはボーリング孔全体のひずみ変化の把握に影響しない。既存技術であるパイプひずみ計や傾斜計によるひずみ変化の測定結果を図 1 のようにカラーマップで表示することは，空間解像度やひずみ測定精度の低さから，不可能である。分布式光ファイバーセンシングで主流な Brillouin 散乱光の周波数変化を解析する手法 (BOTDR または BOTDA) を用いても，ひずみ測定精度が TW-COTDR より低いため，ひずみ変化を視覚的に確認できるカラーマップを作成できない。本研究におけるひずみ変化の可視化の成功は地すべり挙動の詳細な把握につながるため，今後の地すべり挙動モニタリングの手法を大きく変える可能性がある。

図 1 はひずみが時間および深さに対して変化することを示しており，地すべりの変形を詳細に理解できる。特徴的なひずみ変化を確認できる深さは，(1) 1-5 m，(2) 約 8 m，(3) 14-15.5 m である。深さ 8 m 付近のひずみ変化は，地すべり発生時の自治体の調査によりすべり面と判断された深さと一致するため，すべり面の変形によるものと考えられる。

最も大きなひずみ変化は，主に泥岩からなる地表付近に見られる。この深さ 1-5 m の範囲内において深さ方向にひずみが増加することから，この範囲の地層はいくつかのブロックに区分されることが示唆される。TW-COTDR はこのように局所的な変化の検出にも有効である。この範囲のカラーマップにおいては水平方向の急激なひずみの増加も見られ，これは降雨の発生と一致する。ひずみは急激に増加した後，徐々に降雨前の値に向かって減少する。こうした傾向は深さ 14-15.5 m においても確認できる。

（2）降雨に対するひずみ変化の応答性

図 2 は，表層，すべり面，底層の代表としてそれぞれ 2.0 m，8.0 m，14.3 m を選び，それらの深さにおけるひずみ，および降雨の時間変化を示す。図 2 は，深さ 2.0 m におけるひずみ変化が，降雨イベントの発生とほぼ一致することを示す。この深さでは，ひずみ

変化は7月から8月上旬にかけて降雨により大きく増加し、次の降雨まで降雨前の値に向けて減少し続ける。降雨前後における同様のひずみの増減は、表層崩壊のひずみ変化をひずみゲージや傾斜計により測定した既存研究においても報告されている(中井ほか, 2016; Sonoda and Kurashige, 2017)。

降雨に対する深さ2.0 mにおけるひずみ変化の応答性は、台風5号や前線による8月7-10日の降雨(総雨量65.6 mm)後に、鈍くなった。すなわち、ひずみの振幅が小さくなった。しかし、深さ14.3 mでは、9月17日の降雨(日降水量78 mm)後に応答性が明らかに良くなった。それ以前には、ひずみ変化と降雨には対応関係が見られなかった。9月17日以降、深さ14.3 mにおけるひずみは降雨時に速やかに増加し、深さ2.0 mと同様に徐々に減少した。さらに、深さ2.0 mと14.3 mのひずみ変化は、9月17日以降お互いにシンクロし始めたように見える。これらの深さに比べ、深さ8.0 mのひずみ変化の特徴はやや異なる。この深さのひずみ変化は、8月中旬までは降雨に対して速やかに反応し、それ以降、深さ2.0 mと同様に応答性が鈍くなる。しかし、降雨終了後もひずみは測定期間終了まで上昇し続け、その間のひずみ変化は降雨と無関係である。

(3) 地すべりの深度方向に異なる変形プロセス

上述の通り、すべり面の変形プロセスは深さ2.0 mと14.3 mのものとは異なる。3つの深さにおける変形帯の厚さの違いもまた、異なる変形プロセスによるものと考えられる。深さ1-5 mの表層部においては、その厚さ全体におけるひずみ変化はほぼ一定であり、これは深さ14-15.5 mの底部における傾向と似ている。これらの深さの変形帯の厚さはすべり面の厚さより大きい。こうしたより厚い変形帯や降雨前後のひずみ変化の振幅傾向は、これらの深さにおける変形プロセスがすべりではなくクリープであることを示唆する。本研究結果および中井ほか(2016)の解釈に基づけば、表層部におけるひずみ変化の振幅は以下のように解釈される：1) 降雨により岩石中の水飽和度が上昇し岩石重量が増加すると、表層部は斜面下方に変形しひずみが増加する、2) 降雨終了後、次の降雨発生までに、乾燥や排水により岩石の水飽和度が減少するにつれひずみも減少する、3) こうしたひずみの増減を繰り返すことにより表層部はより締め固められ、降雨に対する応答性が鈍くなる。代わりに、底部における変形プロセスが変化した可能性がある。9月17日まで、表層部と同様のひずみの振幅は底部においては見られなかった。したがって、底部は9月17日の降雨により徐々に活発化したと思われる。底部におけるひずみ変化の開始の遅れは、雨水や地下水が地すべりの深部に浸透するにつれ、活動的な層が表層から底部に向

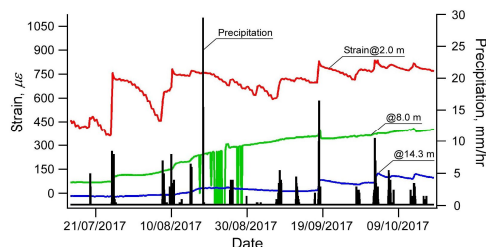


図2 深度別のひずみの時間変化

かって伝播したことを示す。したがって、本研究結果は、降水量の変化に伴い地すべり内の水浸透プロセスが変化したことを示す。分布式光ファイバーセンシングと水位観測等を組み合わせることにより、こうしたプロセスについてより深い知見を得られると考えられる。

(4) まとめ

本研究により、ひずみ変化量としては小さいものの、地すべり内においてすべり面より下方の泥岩の変形が検知されたことはきわめて重要である。これは、すべり面より下方の領域は長期にわたり安定であり浸透性が低いという従来の考えを改める必要性を示しており、特に地すべり挙動のシミュレーションや室内模型実験を行う際の境界条件の設定時などに考慮されるべきと思われる。本研究のデータは強い降雨後の底部の変形を明確に示しており、地下深くへの水の浸透を示唆する。災害予測および軽減に取り組む際には、より大きな地すべりにつながる可能性のある地下深部の変形にも注意を向ける必要がある。

地すべりの表層部および底部の変形は、本研究以前には検知されていない。本研究による成果は、既存技術を上回る空間解像度とひずみ測定精度を持つ TW-COTDR を導入したことによりもたらされた。この技術は、ひずみの空間および時間変化を高精度に可視化できる。これらの解像度は、地すべり挙動モニタリングをするうえで十分高い。さらに、地すべりに加え、ひずみ変化測定を通して理学および工学の様々な分野における岩石変形のモニタリングにも適用可能であると考えられる。たとえば、この技術を活断層を挟む領域のひずみ変化モニタリングに適用すれば、ひずみの蓄積による地震発生の理解に有効なデータを得られる可能性がある。

最後に、本研究は TW-COTDR を用いた分布式光ファイバーセンシングがきわめて有望な物理探査手法であることを実証した。測定結果は、既に対策済みの地すべりにおいてさえ、ボーリング孔に沿ったひずみ変化の鉛直分布をきわめて明瞭に示した。また、この手法は、ボーリング孔内に光ファイバーケーブルを挿入しグラウチングするというきわめて簡易な設置方法により実現可能である。得られる測定結果の精度の良さに加え、こうした簡便性からも、分布式光ファイバーセン

ングは将来、既存の固定点式センサーに置き換わる可能性がある。

<引用文献>

小暮哲也, 堀内侑樹, 木山 保, 西澤 修, 薛自求, 松岡俊文. 2015. 分布式光ファイバーセンサーによる静水圧環境下におけるひずみ測定. 物理探査 68, 23-38.

中井真司, 渡邊 聡, 笹原克夫, 岩田直樹. 2016. 降雨時のまさ土斜面表層部におけるせん断変形挙動と土壌水分の関係. 地盤工学ジャーナル 11, 115-125.

Sonoda, M., & Kurashige, Y. (2017). Characteristics of surface soil creep on a forest slope in Japan. *Geomorphology* 288, 1-11.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

Kogure, T., Okuda, Y. 2018. Monitoring the vertical distribution of rainfall-induced strain changes in a landslide measured by distributed fiber optic sensing with Rayleigh backscattering. *Geophysical Research Letters* 45, 4033-4040, 査読有, <https://doi.org/10.1029/2018GL077607>

[学会発表](計26件)

Kogure, T., Okuda, Y. 2018. Distributed fiber optic sensing with Rayleigh backscattering (TW-COTDR) for rainfall-induced strain changes in a landslide. The 7th Asia-Pacific Optical Sensors Conference, May 2018, Matsue, Japan.

Kogure, T., Okuda, Y. 2018. Measurements of strain changes along a borehole in a landslide using distributed fiber optic sensing. JpGU 2018, May 2018, Chiba, Japan.

小暮哲也, 奥田悠大. 2017. 地すべり移動体表層のクリープおよび深部すべり面の滑動: 分布式光ファイバーセンシングによる検出. 日本地形学連合 2017 年秋季大会, 2017 年 12 月, 九州大学.

小暮哲也. 2017. TW-COTDR による高精度地すべり挙動モニタリング. 光ファイバセンシング振興協会第 9 回シンポジウム, 2017 年 10 月, 東京工業大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小暮 哲也 (KOGURE, Tetsuya)
島根大学・総合理工学研究科・助教
研究者番号: 70534006