

◆ 報 文 ◆

光ファイバセンサによる道路斜面崩壊モニタリングに関する検討

加藤俊二* 三木博史** 恒岡伸幸*** 田中 衛**** 小川鉄平*****

1. はじめに

降雨に起因する土砂系の表層崩壊は、地形・地質条件や植生条件等により崩壊形態が多様であり、また発生箇所の予測が困難である。現在でも、伸縮計等の従来型センサでのモニタリングは実施されているが、点あるいは線的な計測で監視域の連続性が低い等の問題がある。このため、広範囲に連続する斜面を網羅的かつ面的に監視できるシステムが必要とされており、その一つとして光ファイバセンサの利用が挙げられる。

光ファイバセンサは、広範囲な斜面の不特定域で発生する変状の検知・計測、国土交通省で整備している光ファイバ網(情報BOX)を活用した工事事務所からの遠隔地の複数斜面のモニタリング等、効率的な斜面監視の実現のためにその実用化が期待されている。

しかしながら、光ファイバセンサで自然斜面をモニタリングするには、斜面変状への追従性や計測精度、動植物や気象の影響等を考慮した設置方法など、適用性を検討する必要がある。このため、平成11年度末より民間14社との共同研究「光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する研究」を開始し、実斜面に光ファイバセンサによるモニタリングシステムを設置し、フィールド試験方式で適用性の検討を行っている。ここでは、その状況について報告する。

2. 光ファイバセンサの概要^{1),2)}

一般的に光ファイバは、図-1に示すように、屈折率が異なるコア部とクラッド部(クラッド部の屈折率が大)の2層構造からなるガラス繊維であり、この屈折率の違いにより光が外部に漏れることなくコア部を進行する。この際に、ガラスの屈折率や密度の微小なゆらぎにより散乱光が発生し、この一部が反射光として後方に戻ってくる性質(後方散乱光)がある。光ファイバに曲げやひずみ等が生じると、この散乱光の波長分布や光強度が変化したり、クラッド部の外に光が放出されて

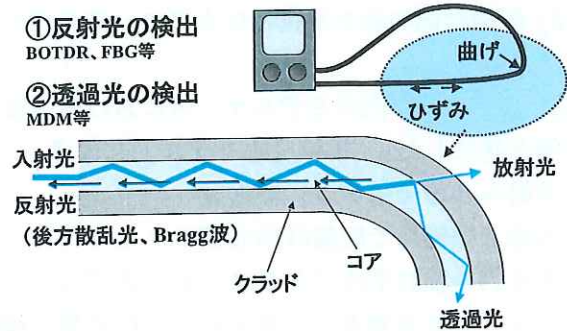


図-1 光ファイバセンサの計測原理の概要

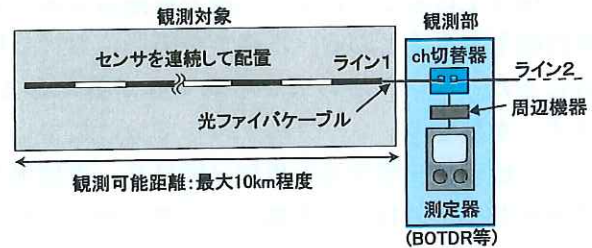


図-2 光ファイバセンサによるモニタリングシステムの構成イメージ

透過光強度が減少したりする。光ファイバセンサは、図-2に示すように観測対象に光ファイバケーブルをある間隔で固定したり、何らかの細工をして計測区間を連続的に設け、これら反射光や透過光の変化を観測して、ひずみや変位等を計測するラインセンサである。また、雨量や地下水位等も浮力やパイプ等の膨張等により、光ファイバにひずみ等を発生させることで計測できる。

本検討では、代表的なものとして以下に示す計測方式を用いている。

(1) 反射光の検出

1) BOTDR

(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)

図-3に示すように、散乱光にはレーリー、ブリルアン、ラマンの3種類がある。この方式は、このうちのブリルアン後方散乱光を利用してひずみ量を計測するものである。図-4に示すように、光ファイバにひずみが発生すると、ひずみ発生域におけるブリルアン後方散乱光の波長(周波数)分布がシフトする性質があり、このシフト量からひずみ量を求めるものである。またひずみ発生位置は、光パルスを入射してから受信部

Study on Monitoring system of Road Slope Failures using Optical Fiber Sensor

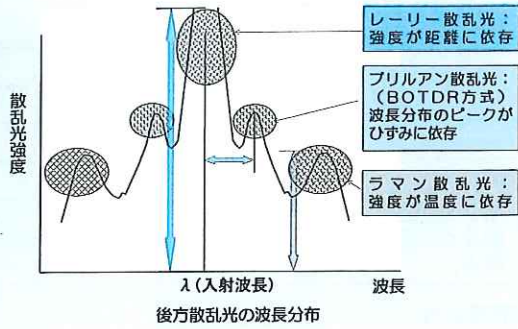


図-3 後方散乱光の概要

で後方散乱光が検出されるまでの時間差を測定することで特定される。

2) FBG (Fiber Bragg Grating)

光ファイバのコアの一部に紫外線等を照射すると、その部分の屈折率が高くなる。これを一定の間隔で形成した回折格子(グレーティング)を設け、回折格子により反射する光(Bragg波)の波長の変化を利用してひずみを計測するものである。図-5に示すように光ファイバにひずみが発生すると、回折格子の格子間隔(Λ)が変化するため、それに伴い反射するBragg波の波長(λ_B)も変化する。この波長の変化量からひずみ量を求めるものである。またひずみ発生位置は、センサ部(回折格子)の固定位置で特定される。

(2) 透過光の検出

1) MDM (Macro Distortion Monitor)

この方式は、光ファイバの屈曲率と透過光強度に一定の関係があることを利用している。図-6に示すように、ループ径 ϕ の円柱に光ファイバを長さ L だけ巻き付けているとき、変位が発生すると円柱が回転してさらに巻付けるかあるいは解放することにより、巻付き長が $(L + \Delta L)$ あるいは $(L - \Delta L)$ に変化する。このとき巻付き長に比例して曲げ損失が増減し透過光強度が増減する。この原理から、変位(巻付け量)と透過光強度の関係を求め、斜面の変位を計測するものである。また変位発生位置は、センサ部(巻付け部)の固定位置で特定される。

3. 光ファイバセンサの斜面観測への適用性

3.1 観測体制

上に述べたように違った計測原理を持つ光ファイバセンサは、検知精度、リアルタイム性など固有の特徴を有し、センサの性能向上のための開発が盛んに行われてきた。各種の構造物で使用されているように、計測性能の向上とともに道路斜面のモニタリングに関しても従来型センサと十分に

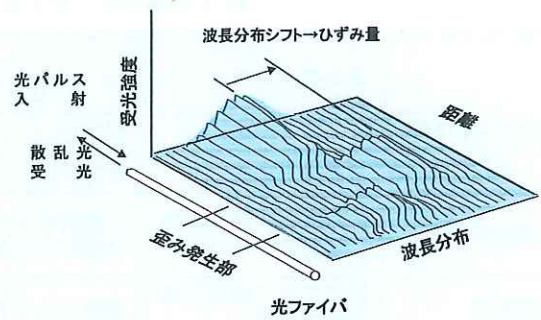


図-4 BOTDR 方式の計測原理

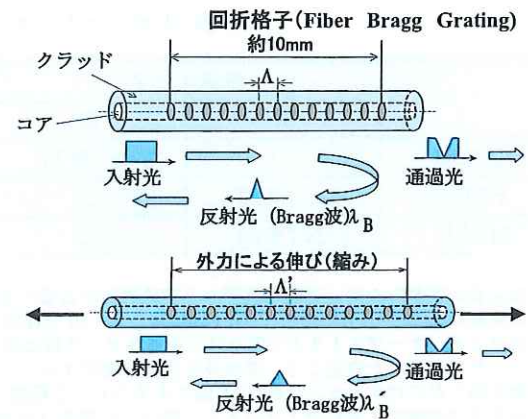


図-5 FBG 方式の計測原理

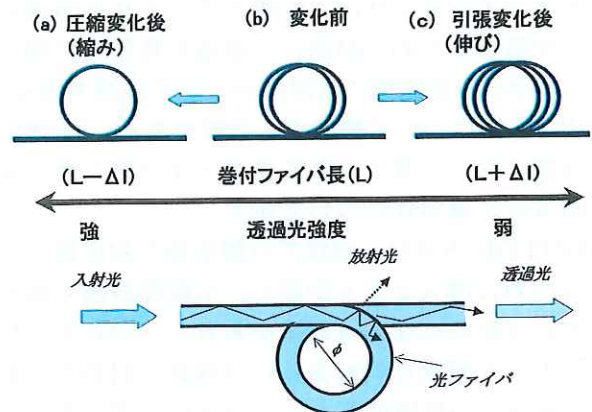


図-6 MDM 方式の計測原理

替われるものとする。表-1に、観測体制等について従来型センサと比較を行った結果を示す。

光ファイバセンサは、センサ部に電源が不要で電磁誘導の影響を受けないという特徴があり、長期にわたる斜面計測において非常に有利である。さらに、光ファイバセンサのセンサ部の機構・構造が簡単なため、従来型センサに比べ故障しにくいといった利点があり、メンテナンスの面においても優位である。また、地点毎の微小変位の短時間かつ高精度な計測や、変位発生箇所が特定できない広範囲な斜面の連続的な計測等、光ファイバセンサでは目的に応じて自在なモニタリングが可能になると考える。

表-1 従来型センサと光ファイバセンサの観測体制等の比較

	従来型センサ	光ファイバセンサ		
		BOTDR	FBG	MDM
電磁誘導の影響	受ける	受けない		
センサ部の電源	現場に電源要	電源不要		
観測体制	線的計測。計測範囲の連続性が低い。	広範囲なエリアの線または面的な計測に優れる。	小～中規模なエリアの線または面的な計測に優れる。	小～中規模なエリアの線または面的な計測に優れる。
管理施設	現場ごとに観測管理施設が必要	遠隔地より複数現場の一括管理が可		
計測時間	リアルタイム (自動計測化の場合)	5～10分間隔	リアルタイム	

表-2 光ファイバセンサの斜面監視適用性 (計測性能)

	観測エリア		変状の程度		リアルタイム性	変状位置
	広	狭	大	小		
BOTDR	○	△(※1)	○	○	△(※2)	○
FBG	△(※3)	○	○	○	○	△(※4)
MDM	△(※5)	○	○	△(※6)	○	△(※4)

○：適、△：要検討

- (※1) 測定器が高価なため、適切な観測エリアの検討が必要である。
- (※2) 測定器による分析時間が最低でも1測線当り5～10分程度必要であるため、崩壊速度が速いと微少な変状過程を捉えきれない場合がある。
- (※3) 光ファイバケーブル1ライン取り付け可能なセンサ数は最多で12個までのため、広範囲(多点計測)になる場合、線量の面で煩雑になる。
- (※4) センサを設置した位置より、変状発生位置を確認する。
- (※5) 測定器1台に対するセンサ数は16個であるため、広範囲(多点計測)となる場合、結線の面で煩雑になる。
- (※6) 従来型の伸縮計・変位計と比べると、読みとり精度は従来型の方が高い。

3.2 計測性能

光ファイバセンサは、計測方式によりその適用条件が異なるため、斜面への設置を具体的に検討する場合、対象斜面の状況に合わせて計測の項目、手法、方式について検討する必要がある。表-2に現段階において考えられる光ファイバセンサの各計測方式の適用性について示す。

BOTDR方式は、現状では観測部の測定器が高価なために導入コストが高く、小規模斜面の観測であれば割高になる可能性がある。このため、比較的中～大規模な斜面あるいは複数の斜面が存在する地域での利用が望ましい。FBG方式やMDM方式は、計測ライン(センサ部+計測線)を直列に設置して長いラインを確保したり、ハの字型等に並列するかたちで縦横の連続性を確保するものである。このためBOTDR方式と比べると、やや連続性が劣り、大規模なエリアを観測する場合には、回折格子(FBG)や巻付け部(MDM)のセンサ数やラインの結線量等のセンサ部のコスト検討が必要である。一方、BOTDR方式と比べると、測定器の価格が安いので導入コストが低く、小～中規模の斜面の観測に適している。また、変状の発生位置が特定できている場合、その地点の詳細な継続観測に適している。

実現場に適用する場合、モニタリングエリアは

路線に沿った大きな地域となり、その地域内に計測対象斜面と詳細計測対象地点が混在するため、複合的なシステム活用になると考える。

3.3 斜面への設置

設置方法としては、①地中埋設、②地表布設、③地上架設の3通りがある。

地中埋設は、写真-1に示すように、設置箇所を50cm程度掘削して固定位置に杭を打ち込み、固定治具で光ファイバを固定し、塩化ビニル管で保護し埋設する方法である。この方法は、動植物や風雪の影響を受けないことや外観上設置していることがわからないため景観に配慮できるといったメリットがあるが、施工面で植生や地形条件の制約を受けやすい。

地表布設は、写真-2に示すように、フレキシブル管で光ファイバを保護し、地表面を這うようにピンでフレキシブル管とともに光ファイバを固定し設置する方法である。この方法は、地形に対応した設置ができるが、竹などの繁茂性の高い植物の影響を受けやすい。

地上架設は、写真-3に示すように、設置箇所を杭を打ち込み、固定治具で光ファイバを固定し、塩化ビニル管で光ファイバを保護し、木杭等の上を架設する方法である。この方法は、地形や植生の影響を受けにくいですが、動物や積雪等の影響を



(a) 埋設前



(b) 埋設後

写真-1 地中埋設の例 (BOTDR の例)



(a) FBG の例



(b) BOTDR の例

写真-2 地表布設の例



(a) 地上設置



(b) 固定状況

写真-3 地上架設の例 (MDM の例)

表-3 光ファイバセンサ設置斜面の概要

対象箇所			対象斜面概要
1	一般国道 49 号	福島県いわき市三和町	ゆるいマサ土からなる崩壊性の斜面。FBG センサにより地表面変位・地盤傾動・地下水位、雨量・温度を計測。
2	一般国道 19 号	長野県上水内郡信州新町	崖錐表土による含水量の多い均一な斜面。坑口付近擁壁にも若干の変状あり。ブリルアン後方散乱光の検出により地表面変位・地盤傾動を計測。
3	一般国道 52 号	山梨県南巨摩郡身延町	泥岩の急崖及び崩積土の堆積している崩壊地よりなる。近傍にて H10.9 の豪雨による地すべり災害あり。FBG センサにより地表面変位・地下水位を計測。
4	一般国道 42 号	和歌山県西牟婁郡すさみ町	泥岩砂岩互層流れ盤へのモルタル吹付斜面(老朽化)。水平クラック、側溝の変状あり。ブリルアン後方散乱光の検出により地表面変位・亀裂変位・吹付表面温度を計測。
5	一般国道 28 号	兵庫県津名郡津名町	下方に厚い崖錐堆積物を伴う、風化花崗岩からなる崩壊性の急崖斜面。H9 以降 2 度の崩壊履歴があり、待ち受け擁壁施工済み。ブリルアン後方散乱光の検出により、地表面変位を計測。
6	一般国道 220 号	宮崎県日南市	崖錐表土の表層崩壊と上部砂岩の落石が想定される。その他連続する区間にも崩壊履歴多数あり。透過光の検出により地表面変位(表層崩壊部・岩石崩壊部)を計測。

受けやすい。

斜面に設置する際には、斜面の植生や地形条件、気候条件等を考慮して、斜面変状以外の要因で光ファイバに断線等が生じないような設置形態を選択する必要がある。また、設置する際の曲率(小さい曲率では設置できない)や不慮の断線、融着精度等、光ファイバ自体の取り扱いにも注意が必要である。

4. 光ファイバセンサのフィールド試験

4.1 フィールド試験の概要

フィールド試験では、光ファイバセンサによる斜面崩壊モニタリングシステムの構築のため、実斜面に光ファイバセンサを設置して設置方法や計測精度等を検証し、その結果を踏まえてこれらの改良を行っている。光ファイバセンサを設置した斜面は、国土交通省 6 工事事務所の協力により現地調査を行い、降雨浸透により斜面変状発生の可能性があると考えられる 6 箇所を選定した(図-7)。各斜面には前述した 3 つの計測方式のうちの 1 方式を選定し、現地調査結果をもとにセンサの設置位置等を決定した。表-3 に光ファイバセンサ設置斜面の概要を示す。

4.2 計測事例

2001 年 6 月の梅雨期に一般国道 220 号のフィールド試験現場で小規模の表層崩壊があり、その崩壊を光ファイバセンサで検知することができた。図-8 に光ファイバセンサの配置図、図-9 に崩壊当時の斜面変位と雨量の関係、写真-4 に崩壊面の状況を示す。現場は幅 100m × 斜高 50m 程度の斜面で、緩い尾根谷が連続しており、植生が竹藪の自生である。このため、光ファイバセンサは地上架設により谷に沿って 6 測線設置している。



図-7 フィールド試験実施箇所

また、計測間隔を 10m とし 1 測線当たり MDM センサを 5 個設置している。崩壊は、図-8 に示すように左側から 3 列目の測線の中央部近傍左側で発生した。

当時の状況は、6 月 20 日に 84mm、21 日に 99mm の日降雨があり、災害発生までの累計降雨は 243mm であった。この路線の降雨による事前通行規制基準が連続雨量 170mm と設定されており、21 日の正午過ぎに通行規制に入ったが、無降雨状態が続いたため、同日夕方に規制が解除されている。22 日の深夜から再度雨が降り始め、昼過ぎに前降雨を含む累積雨量が 240mm に達した当たりで崩壊が発生している。崩壊規模は崩壊土量が 15m³ 程度の小規模なものであり、道路には到達せず、幸い大きな災害には至らなかった。

光ファイバセンサでの斜面変位の計測状況は、3 側線目の斜面下方センサ NO.12 (道路側から NO.11~1) で、20 日の昼頃から崩壊の兆候らしき

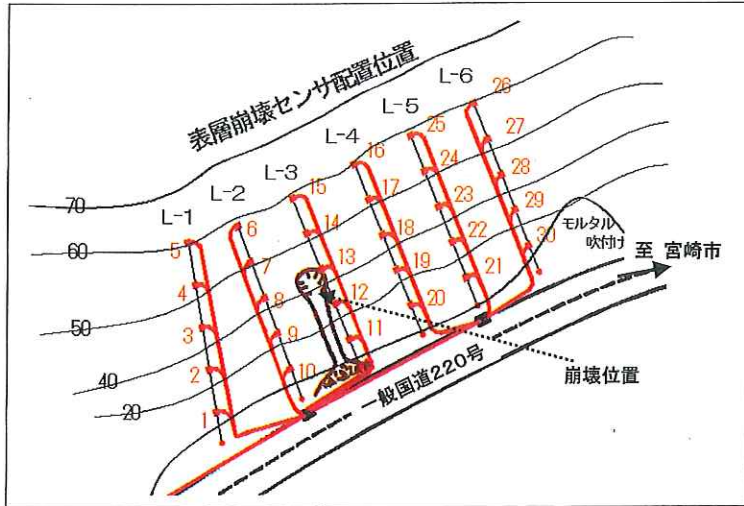


図-8 光ファイバセンサの配置図(一般国道220号、日南市)



写真-4 崩壊面の状況

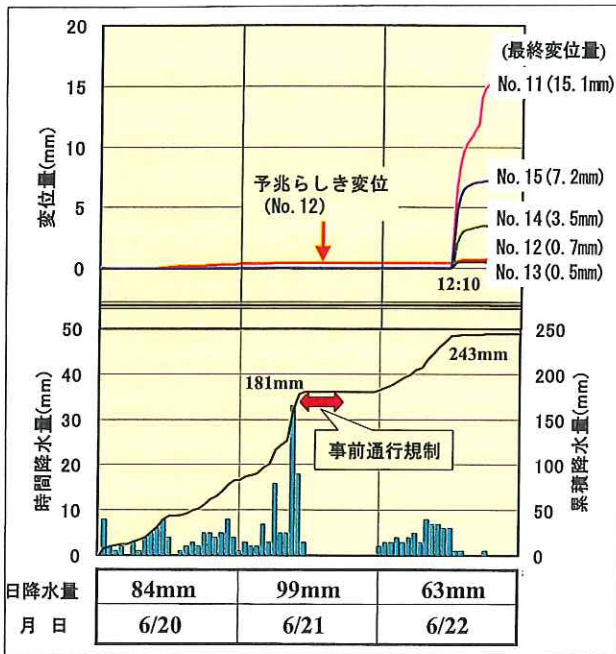


図-9 崩壊当時の斜面変位と雨量の関係

微小な変位を検知し、22日の昼過ぎにライン上のすべての計測位置で変位の急激な上昇を観測している。

5. まとめ

一般国道220号での崩壊検知事例では、光ファイバセンサで事前通行規制解除後の崩壊を検知できたことにより、工事事務所では現場確認および応急対策等の迅速な対応が可能となった。また、崩壊の予兆らしき変位も捉えており、崩壊予測につながるデータも得られた。これらの結果は、光ファイバセンサの道路管理への有効性および将来性を示すものである。今後は、さらに計測データを集積し、効率的な設置方法の検討やセンサの計測精度等の改善を行っていくとともに、最適な計測方式の選定方法や設置方法や運用方法等を整理し、「光ファイバセンサによる斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル(案)」の作成を行う予定である。

参考文献

- 1) 島田、村田：光ファイバケーブル, オーム社, 1987.
- 2) 川上、白石、大橋：光ファイバとファイバ形デバイス, 培風館, 1996.
- 3) 加藤、三木、恒岡他：光ファイバセンサを活用した表層崩壊モニタリングシステムの構築に関する取り組み, 豪雨時の斜面崩壊メカニズムと予測に関する論文集, 地盤工学会四国支部, 2001.8

加藤俊二*



独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ土質チーム研究員
Shunji KATO

三木博史**



同 材料地盤研究グループ長、工博
Dr.Hiroshi MIKI

恒岡伸幸***



同 材料地盤研究グループ土質チーム上席研究員
Nobuyuki TSUNEOKA

田中 衛****



同 土質チーム研究員
Mamoru TANAKA

小川鉄平*****



同 土質チーム交流研究員
Teppei OGAWA