ファラデー反射センサを用いた光ファイバ伸縮計の開発

日本電信電話株式会社　正会員　吉田安克　○島田　徹
国立大学法人京都大学防災研究所　正会員　藤田正治　堤　大三
国立大学法人京都大学大学院　学生員　武部真樹
NTT インフラネット株式会社　正会員　出口大志

1. はじめに

光ファイバセンシングは光ファイバをセンサとして用いた計測方法であり、光ファイバの特性から、耐腐食性・防爆性に優れる、落雷被害を受けない、配線がシンプル、センサ部に給電が不要、長距離伝送によって遠隔測定が可能など、屋外に設置する計測システムとしての長所を数多く持っている[1)]。現在、この光ファイバセンシングには様々な方式があり、センサも種々開発されてきているが、歪・変位を高精度で測定可能な FBG 方式や B-OTDR 方式は、測定器が高価であるため、地表面伸縮計のように同時に多数設置する用途では普及していない状況にある。一方、測定器が安価な OTDR 方式は、光強度損失変化による状態変化の有無の検出や、反射光強度の変化により状態を判別する ON-OFF センサに使用されているが、定量的な計測を行うセンサには適用されていない。

そこで筆者らは、地すべりの遠隔モニタリングシステムを安価に構築することを目的に、反射光強度の変化を OTDR により測定する光ファイバ伸縮計を開発した。本稿では、その伸縮計の概要と検証結果について報告する。

2. 光ファイバ伸縮計の概要

図-1 に開発した地表面伸縮計の概観を示す。従来の電気式地表面伸縮計と同様に、ワイヤー変位をワイヤー巻きつけ軸の回転量から換算する機構にした。

回転量検出には、光強度の低下量から回転量（変位）に換算するといった光学特性を応用したアナログ的計測ではなく、設置環境（外気温・湿度）が急激に変化した場合でも計測に影響を受けにくいデジタル的計測を採用した。

回転量検出のデジタル的計測には、磁場の変化により反射光の有無（強弱）が発生するファラデー素子[2)]による方式とした。ファラデー素子には図-2 に示すように素子に永久磁石を近づけると反射光強度がピークに達し（ON 状態）、磁石が離れると反射光強度は元に戻る（OFF 状態）特性がある。

図-3 に示すように、伸縮両方向の回転量を検出するため、このファラデー素子を２連でセットしたロータリーエンコーダ式回転センサを採用した。回転センサに連装されたファラデー素子 A,B は、表-1 に示すように反射あり、反射なしの 4 通りの組合せ状態を発生させる。状態が変化したときに 1 カウントとし、状態変化の方向で、右回り、左回りを判定する。回転量は、状態変化の回数をカウントし、磁石の設置角度を掛けることで算出される。今回製作した伸縮計の 1 カウント当りの回転量（変位）は、100mm 計では 0.8mm、50mm 計では 0.4mm である。

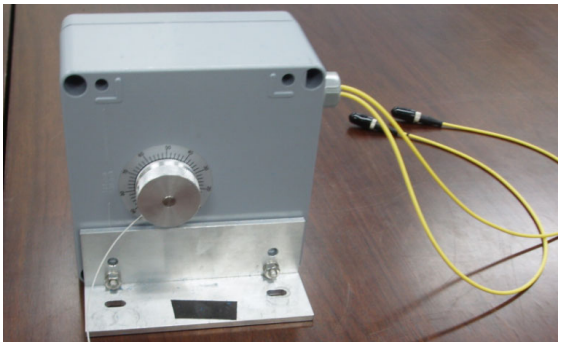

図-1　伸縮計概観

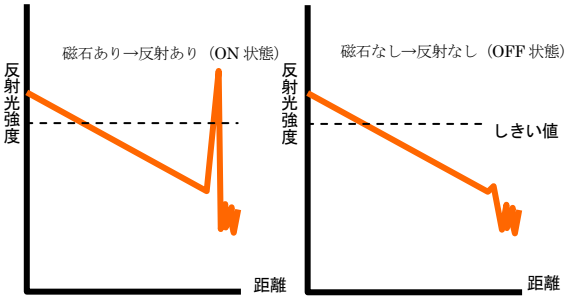

図-2 ファラデー素子の OTDR 波形イメージ

表-1　センサ状態変化

状態組み合わせ		
状態	素子A	素子B
a	反射あり	反射あり
b	反射あり	反射なし
c	反射なし	反射なし
d	反射なし	反射あり

状態変化					
右回り			左回り		
a	→	b	a	←	b
↑		↓	↓		↑
d	←	c	d	→	c

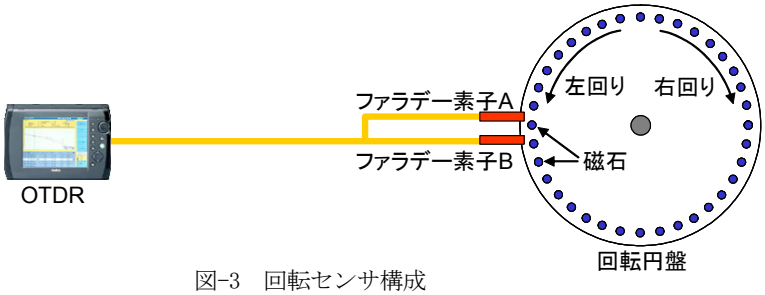

図-3　回転センサ構成

Key　Word：光ファイバセンサ、伸縮計、OTDR、ファラデー
連絡先：〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1　日本電信電話株式会社ｱｸｾｽｻｰﾋﾞｽｼｽﾃﾑ研究所　TEL029-868-6240

3. 光ファイバ伸縮計の室内実験

ON/OFF 状態を適切に判定するために、室内実験により最適な“しきい値”を検討した。

3.1 伸縮時の反射光強度変化

“しきい値”を設定するために、センサの反射光強度特性を OTDR を用いて測定した。50mm 伸縮計内部にある２つのファラデー素子 A,B の反射光強度と変位量の関係を図-4 に示す。横軸は実際に発生させた変位量を、縦軸は OTDR により測定した反射光強度（dB）を示している。

反射光強度はセンサ A,B ともピーク値が一定の平頭弾形であり、ON/OFF を判定する“しきい値”はピーク値を基準にすることで容易に設定できる。また、“しきい値”によって状態変化のタイミングに違いが生じることがわかる。100mm 計の結果も同様であった。

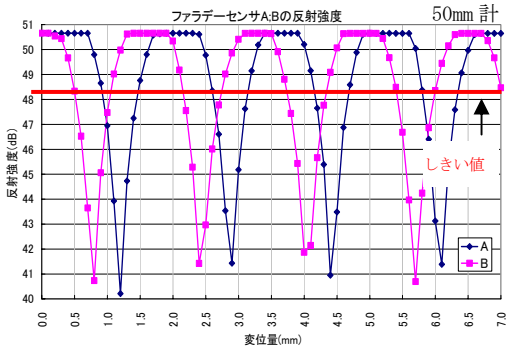

図-4　ﾌｧﾗﾃﾞｰ素子 A,B の反射光強度と変位

3.2 しきい値と測定精度

次に“しきい値”の違いによる測定精度を検証した。図-5 に 50mm 計の結果を示す。横軸は実際に発生させた変位量を、縦軸は計測値を示している。青いプロットはしきい値をピークから 0.5dB とした時で、緑のプロットは 2.0dB の時の結果である。また、赤いプロットはﾀﾞｲﾔﾙｹﾞｰｼﾞによる実測値である。どちらの場合においても伸縮計の１カウントの変位量内で計測可能である。100mm 計の結果も同様である。両伸縮計とも、目標とした±１%FS 以内の誤差範囲で計測できることを確認した。

フィールドで使用する場合は、外気温等が変動した場合でも安定した計測が可能になるように“しきい値”を 2.0dB 程度にすることが適当と考える。

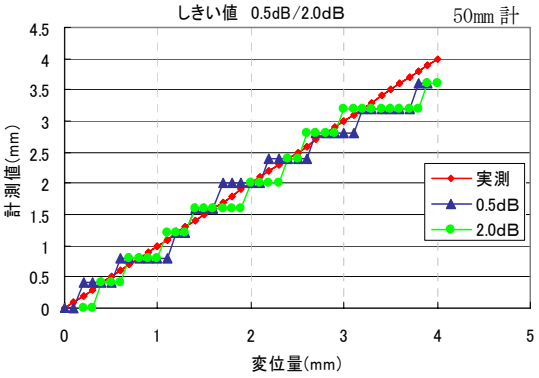

図-5　しきい値と計測値

4. 土砂崩壊モデル実験への適用

本伸縮計を使用し、土砂崩壊モデル実験を実施した。図-6 に示すように伸縮計を設置し、雨量強度 83±5mm/hr の人工雨を降雨させ、崩壊に至るまで計測した。なお、本実験の OTDR 計測は 4 秒に 1 回行っており、理論的には変位速度 6mm/分(0.4mm/4 秒)まで計測可能である。結果を図-7 に示す。

伸縮計 A では本格的に崩壊が始まる 5 分程前に、土層の微小な変位を捉えはじめ、崩壊に至るまで変位速度 5mm/分の地表変位を検出することができた。伸縮計 B においても崩壊に至るまで 3mm/分の地表変位を検出している。

また、両伸縮計とも、崩壊発生後は一定値を示している。これは急激な崩壊が発生し、瞬時にワイヤーが測定限界に達し、それ以降、計測光の状態変化が発生していないためである。崩壊の変位速度が本実験での計測可能速度(6mm/分)を超えたことを示している。

本実験では，降雨条件，土層の粒径，下流端条件において，崩壊土砂が非常に流動化しやすく，また崩壊の速度も大きい条件であった。実際の斜面崩壊においては、崩壊の直前まで本伸縮計により地表変位挙動を十分捉えることが可能と考える。

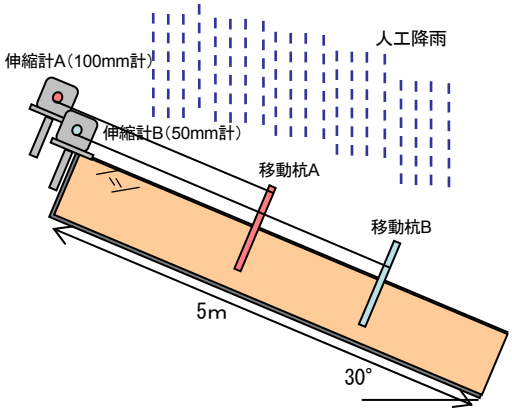

図-6　伸縮計設置方法

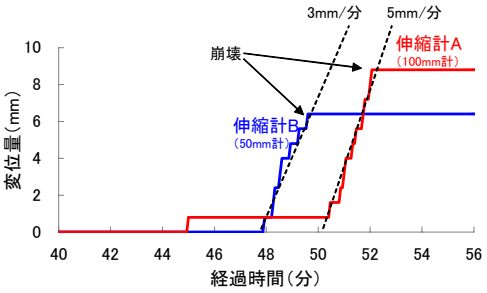

図-7　変位発生状況

5. おわりに

厳しい現場環境下でも安価で安定した計測を可能とするため、OTDR 方式の光ファイバ伸縮計を開発したが、目標はほぼ達成できたといえる。

今後は、屋外設置環境下での暴露試験を実施し、長期安定性について検証する予定である。

参考文献

1)藤橋ら：BOTDR･FBG･OTDR 各方式の光ファイバ変位計の開発，土木学会第 58 回年次学術講演会（6-159）
2)清水ら：ファラデー型近接スイッチの開発，平成 16 年度 神奈川県産学交流研究発表会資料　p44