光ファイバを用いた土木建築分野における計測

高濱 利光

坂田電機(株) (〒202-0022 東京都西東京市柳沢2-17-20)

Civil Measurement Technology Using Optical Fiber Sensor

Toshimitsu TAKAHAMA

SAKATA DENKI Co., Ltd., 2-17-20 Yanagisawa, Nisitokyo, Tokyo 202-0022

(Received May 10, 2010)

The sensor is small and is superior in immunity to electromagnetic interference (EMI), as well as robustness against lightning damage, and long-distance transmission. From this point of view, the sensor is being actively researched, and many sensors are being developed and produced. The relation between the measurement technology of civil engineering and the optical fiber sensor is introduced. Two examples of applications are the measurement of the landslide by using an optical time domain reflectometer (OTDR) and the measurement of banking construction by using a fiber bragg grating (FBG) sensor. The developed OTDR extensometer has an accuracy of ± 2 mm and the measurement range is 100 mm. The extensometer performed as well in the landslide field as the electric extensometer did. The FBG inclinometer has an accuracy of ± 0.015 degrees and the measurement range is ± 1.5 degrees. A multi-element FBG inclinometer (equipped with FBG inclinometers) showed precise measurement results in the boreholes and the banking construction field.

Key Words: Optical fiber sensor, Civil measuring, OTDR, FBG

1. はじめに

日本は高度成長期以降、ダム、発電所、ガスのパイプライン、高層建築物、工場などの巨大な建築物や、鉄道、道路、堤防などの広大な範囲に及ぶ構造物を次々に建設してきた。需要の急増に伴い、土木や建築といった分野の技術は飛躍的な進歩を遂げ、技術進歩を可能とするために土木計測分野でも計測技術の更なる向上が望まれてきた。これに応える為に差動トランス、ひずみゲージ、摺動抵抗といった従来の検出素子や、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を使った近代的なセンサを駆使して、温度、ひずみ、変位、角度、圧力といった物理量を捉える技術を磨いてきた。

土木計測は大別して、施工の安全性向上と合理的且つ経済的な施工を行うための「土木構造物の建設における計測」、土木構造物の劣化状態をモニタリングし、適切なタイミングで補修等を行うための「維持管理における計測」、地すべり、雪崩、河川堤防の監視を行い災害の発生検知や未然に防ぐための「防災における計測」に分けられる。

以上のように土木計測ではそれぞれ目的別に計測が行われているが、共通の要求事項として野外で長期間使用できるセンサが望まれている。現在の土木計測で使用さ

れているセンサは先に述べた電気信号による検出データの採取が主流であり、電子機器の発達に伴って、電気式センサで得られるデータは精密に検出可能となり、一見すると高精度の計測値が得られる。しかし、電気式のセンサでは、信号ラインの電気ノイズなどにより、必ずしも計測対象物の状態を検出しておらず、測定値が計測管理者へ誤解をおよぼすトラブルも少なくない。また、長期間の計測では、絶縁低下によるセンサ異常などが問題となり、センサや伝送ケーブルの耐久性が要求される。

野外計測における最大の故障、障害は、落雷時の誘導雷による機器の破損である。現状の雷保護を備えた計測システムは約90%その被害を防ぐと言われているが完璧ではない¹⁾。仮に、故障したセンサが交換の難しい位置に埋設されたセンサであった場合、管理上の安全性を低下させる危険があり、雷害を抑える計測システムの確立は、土木計測の重要な課題の一つである。

これらの問題を解決する方法の1つとして、光ファイバを用いたセンサが有用である。光ファイバは細径、耐電磁誘導性、耐雷性、長距離伝送性に優れていることから、新しいセンサ技術として期待されている。

本稿では、土木計測分野で利用されている主な光ファイバセンサの原理について述べ、光ファイバセンサの中でも比較的安価なシステム構築が可能なOptical Time

Domain Reflectometer(OTDR)方式による地すべり観測事例と高精度の計測が可能なFiber Bragg Grating(FBG)方式による多段式傾斜の盛土計測事例を紹介する。

2. 土木計測で用いられる 光ファイバセンサの種類と原理

土木計測で用いられる光ファイバセンサの測定方式として、OTDR方式²⁾、B-OTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)方式³⁾、FBG方式^{4,5)}は多くの研究成果報告が行われている。

OTDR方式は、光ファイバ中に光パルスを入射し、入射端側に帰ってくる後方散乱光のうち、レイリー後方散乱光の受光レベルと入射からの時間を測定する測定方式である。光ファイバに屈曲が生じると光ファイバ中を伝搬する光の一部はコアの外へと散乱する。これに伴いレイリー後方散乱光も減衰するため、入射から連続的に時間とレイリー後方散乱光の強度を測定することで、光ファイバ経路内で屈曲が発生した位置と損失量を特定することができる。変位や圧力といった物理現象を光ファイバの屈曲に変換する機構をセンサ部に設けてOTDR方式のセンサとして用いることが可能である。OTDR方式は屈曲位置が分かるため、1本の光ファイバに複数台のセンサを接続し、測定することが可能である。

B-OTDR方式もOTDR方式と同様に光ファイバ中に光パルスを入射し、後方散乱光が戻る時間を測定している。ただし、B-OTDR方式は後方散乱光のうち、ブリルアン後方散乱光の周波数を測定する。ブリルアン後方散乱光は光ファイバに発生したひずみに比例して周波数に変化する。センサとして使用する光ファイバに予め、ひずみが発生する位置と発生しない位置を設け、これらの周波数の相対変化量を求めることで、光ファイバに発生したひずみ量とその位置を知ることができる。周波数の変化量は、 $10,000 \times 10^{-6}$ のひずみに対して500 MHzである。ひずみ量は微小変位量 ΔL を元の長さ L で除算した値であるため、本来は無次元の値であり、 1×10^{-6} が基準値として取り扱われる。B-OTDR方式もOTDR方式と同様の理由から1本の光ファイバに複数台のセンサの接続が可能である。

一方、FBGは1本の光ファイバに複数の波長を入射し、情報量の拡大を行うDWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)技術で用いられる波長選択素子である。FBGは光ファイバのコア内に等間隔に格子を書き込んだ素子であり、広帯域の波長を持つ光を入射すると、格子間隔に依存する特定の波長 λ の光だけを反射し、残りの光は透過する。センサとしてFBGを利用する場合、光ファイバに加わったひずみにより格子間隔が変化し、FBG反射波長が変化する性質を用いてセンサとして利用する。

FBGの反射波長 $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ では、ひずみ変化に対する波長変化量は $1.2 \text{ pm}/1 \times 10^{-6}$ 、温度変化に対する波長変化量は $13.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 程度である。

OTDR、B-OTDR、FBG共にセンサとして用いる場合、

設置時の初期値を測定し、そこからの相対変化量に変換係数を乗算して、変位、傾斜、温度、圧力といった物理量に変換している。

これら3種類の測定方式を比較した表をTable 1に示す。

長距離伝送、細径、電磁誘導を受けない、防爆性、落雷による故障が無いという光ファイバセンサが有する特徴は共通である。OTDR、B-OTDR方式は長所として光ファイバ全体の分布計測が可能であり、位置情報は正確であるが、損失量やひずみ量の定量的な測定精度は、FBG方式に比べてやや落ちる。一方、FBG方式は1本の光ファイバに複数個のFBGを配置することで擬似分布計測が可能であるが、配置可能数は数十素子程度である。測定器のコストはOTDR方式が最も安価である。電気式センサの測定器に比べると、光ファイバセンサの測定器は3種類とも高価な計測機器を必要とするが、計測対象の重要性、大きさ、場所、防爆申請等の事務手続き費用、保守やメンテナンスフリーなどの条件を加味した場合、従来の電気式の計測システムと比べてコスト的に有利なケースが多々ある。

3. OTDR伸縮計による地すべり観測事例

地すべりモニタリングでは、地すべりの変位を計測する伸縮計がよく用いられている。地すべり地帯は山間部で広大な範囲を計測する場合が多いことから、光ファイバセンサによる計測システムの実用化に期待が寄せられている。

ここでは、(独)土木研究所と民間5社による共同研究で行われたOTDR方式による地すべりモニタリングシステムを現場に適用した事例を紹介する⁶⁾。

OTDR伸縮計はFig. 1に示したワイヤ部分が地すべりによって引き出されると、OTDR伸縮計内部に設けた巻き付けロッドに光ファイバが巻き付けられ、曲げ損失が発生する。変位量を曲げ損失に変換し、変位量と曲げ損失の関係を予め校正することで変位量を計測することができる。開発したOTDR伸縮計の測定範囲は100 mm、非直線性は $\pm 2 \text{ mm}$ の性能を有する。

本事例では、OTDR伸縮計を実際に地すべりが発生し

Table 1 Comparison of feature by measuring method.

Measurement method	OTDR	B-OTDR	FBG
Phenomenon	Bending loss	Strain	Strain
Distribution measurement	possible	possible	impossible
Gage length	1~5 m	3~10 m	10 mm
Accuracy (Standard Value)	Low precision ($\pm 5 \%$ of Reading)	Low precision ($\pm 100 \times 10^{-6}$)	Sensitive ($\pm 1 \times 10^{-6}$)
Cost of indicator (Compared to electrical meter)	Cheap ($\times 2$)	Very expensive ($\times 20$)	Expensive ($\times 8$)

Fig. 1 Photograph of a typical OTDR extensometer.

ている現場に従来型の既設センサと併設した。計測システムは、アンリツ社製パルス試験器MW9076Bを用いてパソコンにより毎正時の自動計測を行った。OTDR伸縮計は、1本の光ファイバに直列に5台設置し、国道沿いに整備されている既設の光ファイバ網を利用して、現場から約2.5 km離れた地点から計測を行った。

従来型センサとOTDR伸縮計の測定結果の一例をFig. 2に示す。縦軸は設置時からの累積変位を示している。

計測期間の2007年5月から2009年3月に掛けて両者の変位の傾向や発生時期は概ね一致している。特に2007年7月14日に発生している顕著な地盤の変位に対しても、従来型のセンサと同等の結果が得られている。定量的には、従来型のセンサと比べてOTDR伸縮計は2~3 mmのバラツキが見られた。バラツキは日周期で変化することから、原因の一つとして、気温の変化を考えている。

また、従来型の電気式センサに見られる2007年8月4日に発生している不規則な変化は1回の測定結果のみに見られることから、電気ノイズ等の外乱によるものと考えている。

システムの評価としては、センサの測定範囲が100 mmであるため、動きが速い地すべりなどの緊急時の監視に

Fig. 2 Comparison between the OTDR and the conventional electric extensometer.

は不向きであるが、光ファイバを用いた計測において、安価な方式といえるOTDR方式による自動計測システムは、道路やダムの維持管理における長期監視に適している。

4. FBG多段式傾斜計による盛土計測事例

土木計測の分野では地表の変位だけではなく、土中の変位計測も重要な計測項目の1つである。土中変位の計測によく使用されるセンサとして多段式傾斜計がある。これは、地盤にボーリングを行い、ボーリング孔内に任意の深度ピッチで細径の傾斜計を多段に設置し、比較的高精度の土中変位分布計測を可能とするセンサである。通常1 mピッチで各深度に多段式傾斜計が設置され、各傾斜計の両端は自由継ぎ手により連結されている。よって、測定結果は各深度における1 m区間の傾斜角度 θ となる。1 m区間の変位は $1000 \times \sin\theta$ mm/mの演算により評価される。また、最深部を不動点とすると、最深部から区間変位を累積することで、ボーリング孔の変形形状を得ることができる。

電気式の多段式傾斜計の場合、各深度に設置された傾斜計に計測ケーブルが必要となり、設置台数が限られる。そこで、FBG方式による傾斜計の開発を民間3社の共同で行った。開発したFBG傾斜計は、1本の光ファイバに最大で直列に12台接続することが可能であり、単独計測も可能である。

FBG傾斜計の模式図をFig. 3に示す。FBG傾斜計は、テコの原理を利用しており、FBGの一方の端部を不動点に固定し、他方の端部を作用点に取り付けている。振子が傾くことによりモーメントが発生し、FBGに張力変化として伝達する構造である。

多段式傾斜計として使用する場合、各深度で独立して角度の測定を行うので、深度方向に誤差が累積しない。開発したFBG傾斜計は、外径 $\phi 38$ mm、測定範囲 ± 1.5 deg., 分解能0.0028 deg., 精度 ± 0.015 deg.の性能を有する^{7,8)}。

Fig. 3 Principle of inclinometer utilizing the FBG.

実際のフィールドで適用性を確認するため、FBG傾斜計を現場で計測を行った。計測目的は、盛土工事に伴う既存住宅地沿いの近接建屋の地盤および周辺地盤の変形挙動監視である。Fig. 4の現場設置模式図のようにFBG傾斜計を $\phi 66$ mmのボーリング孔内に1 mピッチで25台設置した。計測システムは、現場敷地内でMicron Optics社製FBGセンサ測定器sm125を用いてパソコンにより毎正時の自動計測を行った。

Fig. 5にFBG傾斜計25台から求めた累積変位図を示す。凡例は、設置日からの日数と施工状況を示しており、グラフ右に土質区分を示している。地盤からの深度G.L. -22 m以浅は、過去に盛土によって作られた地盤である。事前に行った地盤の堅さを調査する標準貫入試験では、N値10程度の結果が得られており、比較的柔らかい地層であることがわかっている。

測定結果は、設置深度により3つの異なる傾向を示した。G.L. -6 m以浅は変位がプラス方向、G.L. -6 mからG.L. -20 mは変位がマイナス方向、G.L. -20 m以深は変化がない。したがって、G.L. -6 m以浅は盛土現場方向へ押され、G.L. -6 m以深からG.L. -20 mは盛土現場とは逆方向に押されていることを示している。

本現場では、土質区分にあるように、G.L. -15 m付近に土質層境があり、盛土施工を行うことで既設盛土が圧力を受け、その結果側圧が発生し、測定深度G.L. -8 mからG.L. -15 m付近でマイナス方向へ変形を示したと考えられる。このような動きは、比較的柔らかい地層の地盤での盛土工事等で観られる傾向である。盛土工事開始前から盛土工事完成後までの約300日間の長期的な計測が可能であることが示された。また、地表での計測では検知困難な地中の挙動を捉えることができ、工事に伴う地中の変形や、工事後の安定状況の確認に至るまでの一

Fig. 4 A schematic drawing of measuring setup of the multi-element inclinometer in a fill construction site.

Fig. 5 The results of the measurement with the multi-element inclinometer.

連の計測結果が得られ、現場計測への適用が可能であることが確認できた。

5. まとめ

光ファイバを用いた計測技術の実用化研究が10年ほど前から盛んに行われている。本稿で紹介したOTDR伸縮計による地すべり観測事例では、既設の通信用光ファイバ網を利用して、遠距離から地すべりの観測を実用化し、FBG多段式傾斜計を用いた盛土計測では、FBGの特徴を活かした高精度の計測を可能にしている。この他にも現在では多くの実用化レベルの報告が行われている。

しかし、光ファイバセンサを用いた計測は未だ完全に普及したとは言いきれる迄には至っていない。今後の課題として、光学知識を有する技術者の不足とシステムの導入コストが高価で在ることが挙げられる。

光ファイバセンサで使用される測定器の多くは光の通信機器の検査や研究用の物をそのまま利用しており、専門的な光学知識なしでは設計、運用が困難である。光学知識を持った技術者の育成と共に、専門的な知識や用語を知らなくても設定や運用が可能な測定機器の開発が必要である。

コストについては、通信分野と比べてビジネス規模が小さいこと、通信分野で利用される機器をそのまま利用していることから、使用する測定機器が普及レベルの価格に達していない。10年程度の保守、メンテナンス、リスクマネジメントを考慮し、システム設計の提案を行っていくことが必要である。

謝 辞

本研究の一部データ、施工情報等をご提供いただいた、(独)土木研究所、(独)都市再生機構、(株)エイトコンサルタント、NTTインフラネット(株)、(株)興和、古河電気工業(株)、(株)レイディック、大成基礎設計(株)、及び関係者各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 菅原 紀明：土と基礎 **52** (2004) 5.
- 2) 府川 隆：信学技報OFT2008-45 (2008) 57.
- 3) 岩城 英郎：第37回光センシング技術研究会講演論文集 (2006) 89.
- 4) 高濱 利光，横谷 篤至，黒澤 宏：電気学会論文誌E **127** (2007) 19.
- 5) Weigane Zhang, Enbang Li, Jiangtao Xi, Joe Chicharo, and Xiaoyi Dong: Measure. Sci. Tech. **16** (2005) 1600.
- 6) 藤澤 和範，小原 嬢子，池田 学，山越 重志，山本 宏幸，村上 恵司，高濱 利光：第47回日本地すべり学会研究発表会講演集 (2008) 349.
- 7) 高濱 利光，坂田 進，廣田 雅彦，横谷 篤至，黒澤 宏：地盤工学ジャーナル **1** (2006) 95.
- 8) 高濱 利光：ファイバーブラッググレーティングを応用した多段式傾斜計と波長測定器の開発(宮崎大学大学院工学研究科博士論文，2006) p.41.

レーザーワード

傾斜計(inclinometer)

地盤や土木建築物の鉛直に対する角度を測定する計器。センサの原理には振り子式，気泡管水準器式等がある。地すべり観測では，地表面にX，Yの各方向に傾斜計を設置し，地すべりの方向や度合の計測に用いている。さらに，地すべり観測や盛土工事では，地盤中の土塊の動きが施工管理上の重要な情報であることから，

ボーリング孔の深度方向に等間隔に傾斜計を設置し，角度変化と深度を基に三角関数演算により変位量を算出している。また，ビル，橋，トンネル等の大規模な建築工事を市街地で行う場合，近隣の建築物への影響が無いことを確認するために近隣の建築物の傾斜を計測する計器として広く用いられている。(高濱 利光)