

## 研究成果報告書

研究課題名	構造物・基礎地盤監視のための光ファイバによる ハイブリッドセンシングシステムの開発
研究開発組合代表者名	第一高周波工業株式会社
共同研究者	独立行政法人 農業工学研究所 造構部土木地質研究室

### 1. 研究目的

ダム及び周辺の構造物や地盤において「歪み」及び「温度」等の物理量を「経時的且つ分布的」に監視することは、危機管理及び、効率的な管理を実施する上で必要不可欠と思われる。一般にこれらの物理量の計測には、熱電対や抵抗線歪み計に代表される電氣的測定装置を用いているのが主流であるが、実用に関して以下のような問題点を有している。

- ① 熱電対や抵抗線歪み計計測は、点測定であり、被測定物が長大になると、面又は、3次元の分布的物理量を計測するためには膨大な数のセンサ及び計測ケーブルが必要となる。
- ② 計測センサの存在そのものが構造弱部の要因となる可能性がある。
- ③ 計測ケーブルから電磁ノイズや、誘導雷の浸入する可能性がある。
- ④ 水や雰囲気ガスに対する耐久性が不十分で、長期間の経時的な計測には適用できない。

現在、上記のような問題点を解消しうる計測技術として、光ファイバケーブルを利用した計測技術が期待されている。同技術は光ケーブル中に発生する種々の散乱光の特性を利用し、ケーブル線沿いの歪み及び温度の分布を連続的かつ高精度に計測するものである。

しかし、現状での光ファイバによる分布型歪み測定は、環境温度の変化によっても変動することが知られており、実際には歪変化がない場合でも温度変化によって見かけの歪量が増加するといった現象が見られ、温度変化の少ない条件では良い結果が得られるが、温度変化の激しい屋外等の条件では実際の歪量が判らないといった課題を残している。また、光ファイバセンサに関しても単に通信用光ファイバケーブルセンサとして利用し、被測定物に這わせただけといった、センサ自体及び施工方法等の問題もあり、本格的な普及と至っていない。

本研究はダム等の構造物及び周辺地盤の維持管理のための監視技術として、BOTDR方式による光ファイバ歪センサ及び分布型光ファイバ温度センサを複合させた、光ファイバによるハイブリッドセンシングシステムの開発を行なうものであり、従来の電氣式測定の問題点及び現状の光ファイバ測定の問題を解決しうるものである。

### 2. 研究内容

光ファイバによるハイブリッドセンシングシステムにもとづく、ダム等構造物とその基礎地盤および貯水池周辺斜面の地すべり等の監視システムの研究開発に以下のテーマを実施した。

- ① 光ファイバ歪センサの温度特性の確認
- ② 歪センサ及び温度センサのハイブリッド化技術の開発
- ③ ハイブリッドセンサユニットの開発
- ④ 施工方法の開発
- ⑤ 解析技術の研究開発

### 3. 目標とする成果

本「構造物・基礎地盤監視のための光ファイバによるハイブリッドセンシングシステム」が研究開発されることにより以下の効果が期待できる。

- ① 1本または、数本の光ファイバセンサで空間的及び時間的に連続した変状情報が把握できるため（歪み量及び、温度の分布的計測が可能）、膨大の量のセンサ及びケーブルが不要となる。
- ② センサ部及び、通信ケーブルが光ファイバであるため、従来の電氣的通信ケーブルで問題となった、誘導雷被害や絶縁低下等の問題が解消する。
- ③ 電氣的センサに比較し、長期耐久性が期待でき、メンテナンスコストを削減できる。
- ④ ダム監査廊や排水トンネル等地下構造物の歪、漏水監視を無人で行なえるため、安全性の確保、労力の低減ができる。
- ⑤ 光ファイバセンサの分岐によりダム周辺の構造物及び、斜面における広域モニタリングが可能となる。

### 4. 研究成果の状況（現地適用の状況、普及活動状況等）

現地適用試験として高知県「高瀬本村地区」に地盤変状監視光ファイバハイブリッドセンサユニットを設置した。同地区は平成10年より精査地区に指定され、平成16年度より直轄地すべり対策事業の事業実施地区となっている。

現地適用試験に先立ち、室内試験による光ファイバの温度特性試験を行った。

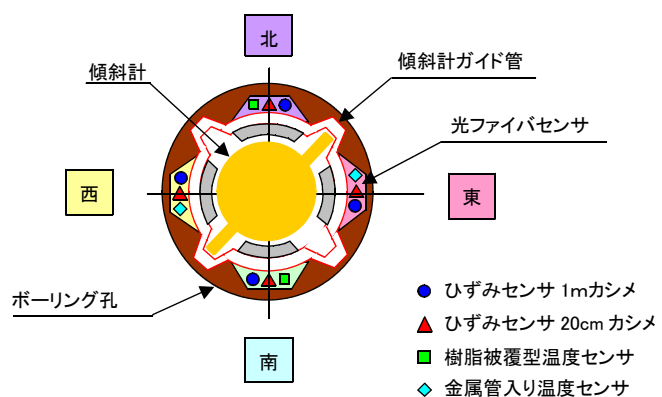
試験結果より、センサ環境温度と測定歪の間には明確な相関関係がみられ、環境温度1℃あたり歪0.002%の温度依存性が確認された。この事より、光ファイバセンサの環境温度を測定することにより測定歪の補正が可能であり、現地適用試験に用いた光ファイバセンサユニットでは光ファイバ歪センサと光ファイバ温度センサを同位置に平行に配置する構造とした。

#### i) 地盤変状監視光ファイバセンサユニットの概要

ボーリング孔軸方向の歪分布及び温度分布を連続的かつ高精度で計測し、地盤の変状を監視することを目的とし、ボーリング孔内設置型光ファイバハイブリッドセンシングユニットを開発した。本ユニットは、挿入式傾斜計ガイド管に光ファイバ歪センサ及び温度センサをそれぞれ機械的に固定して一体化させたものである。

用いた光ファイバセンサは金属管入りカシメ構造型の分布型歪センサ及び金属管入りの分布型温度センサであり、管軸方向に1mごと、断面内で4方位に固定した。ユニット長はボーリング深さに合わせ25mとした。金属管入り光ファイバを用いたことによりガイド管との機械的な固定が可能となり、一体化構造のセンサユニットを開発した。

（図－1参照）



図－1 ハイブリッドセンシングユニットの断面図

現地適用試験に用いた本ユニットの概念図を図-2に示す。

歪測定器としては、高精度光ファイバ歪アナライザ（安藤電気製 AQ8603）、温度測定器としては、高精度光ファイバ温度測定器（SENSA 製 DTS800-SR）を用いた。なお、本試験ではデータ検証用として挿入式傾斜計を用いているが、この場合、傾斜計の出し入れが可能なガイド管の変形範囲内での計測となる。

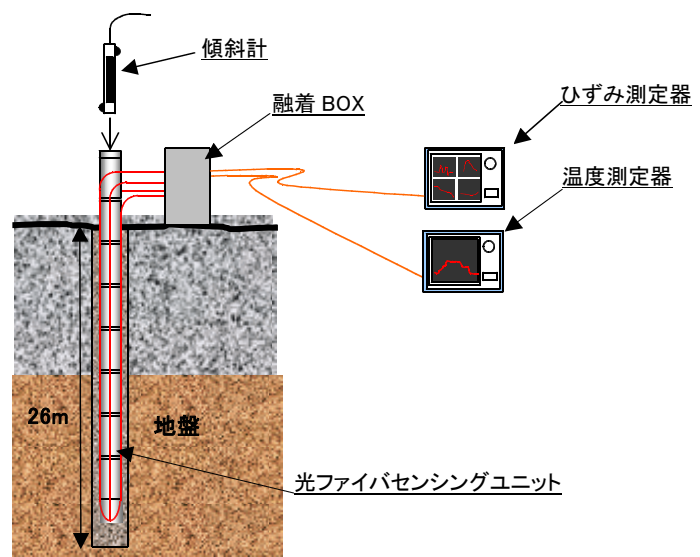


図-2 ハイブリッドセンシングユニットの概念図

ii) 施工方法の検討

地盤内に生じる歪を光ファイバ歪センサ素線に正確に伝えるため、本ユニットでは金属管入りカシメ構造の光ファイバ歪センサを用い、更に圧縮変形に対応するため、センサに0.6%～0.8%のプリテンションをかけた状態でガイド管に固定した。

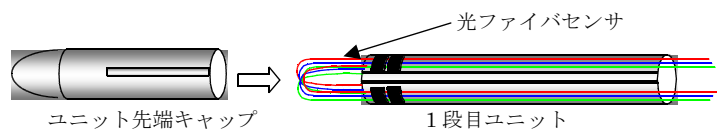


図-3 ユニット先端部

ボーリング孔の掘削はφ 66mm、深度 26m、孔壁保持のためケーシング（φ 86mm 及びφ 116mm）を設置した。

ボーリング孔へのユニットの挿入は光ファイバセンサに1mごとにプリテンションをかけながらガイド管に固定する治具を開発し、連続的にボーリング孔へ挿入した。ユニット挿入後、ケーシングを除去し、ユニットとボーリング孔の間をグラウトにより充填し地盤との一体化を処理を行った。（図-4参照）

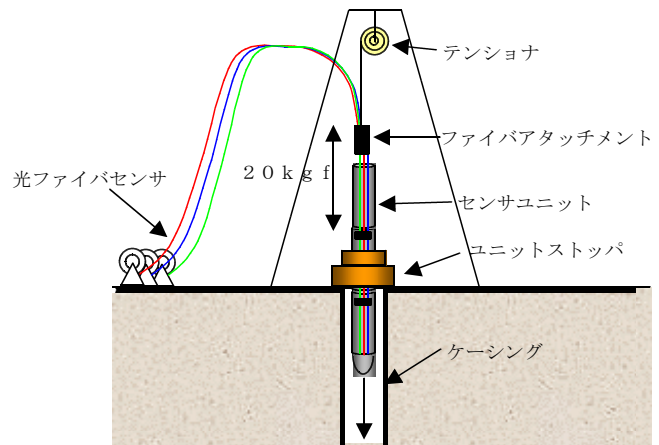


図-4 ユニットの設置方法

iii) 経時変化計測

平成 15 年 12 月施工後、平成 16 年 1 月、2 月、4 月、7 月、10 月に計測を行った。

図-5 に地中温度計測結果を示す。深さ 14 m 付近から孔底までの温度は各測定月に関係なく 17℃ とほぼ一定しているが、地表付近から 13 m 付近にかけては各測定月で温度変化が確認された。この区間においては気温の影響を受けていると考えられる。

これらの温度変化に対して、光ファイバセンサの測定歪も影響されており、地中歪計測では補正を行っていない場合、地表面から 9 m の間で最大 00.05 % の変位を確認できるが(図-6 参照)、各測定日の地中温度を基に補正を行うと最大でも 0.01 % の変位となる(図-7 参照)。

歪測定器の歪測定精度は± 0.01 % であり、現在のところ顕著な変位は確認できていないが、微小ながら 10m 地点で歪変化の兆候が見られる。また、傾斜計での測定でも顕著な変位は捉えていない。

この結果より従来問題となっていた光ファイバ歪測定の温度依存による見かけの歪変化をキャンセルすることで、より精度の高い歪分布計測が可能になると考えられる。

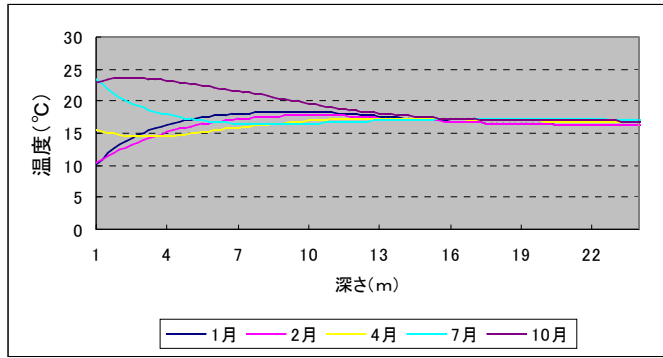


図-5 地中温度計測結果

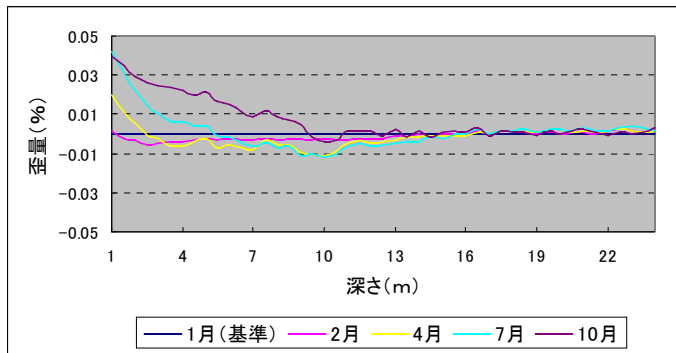


図-6 地中歪量経時変化 東方向 (補正前)

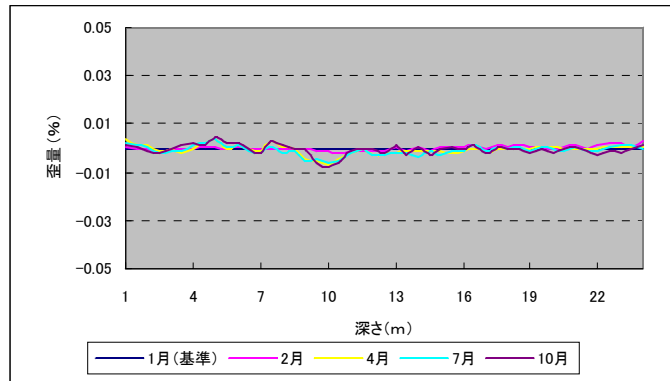


図-7 歪量経時変化 東方向 (補正後)

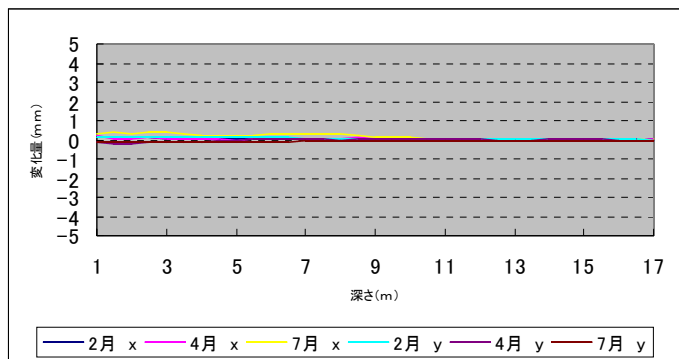


図-8 傾斜計区間歪経時変化 東西方向

#### iv) 通電加熱試験

地下水の挙動を把握するために光ファイバによる孔内温度検層の有効性が認められている。孔内温度検層においてはボーリング孔に温水を注入して強制的に温度差を与え孔内温度が平衡状態に至るまで温度分布の経時変化を分析する。本研究では温水注入の代わりに樹脂被覆した金属管入り光ファイバ温度センサに所定の電圧・電流をかけて通電加熱することをより温度差を与える方法を考案し、その有効性を検証した。

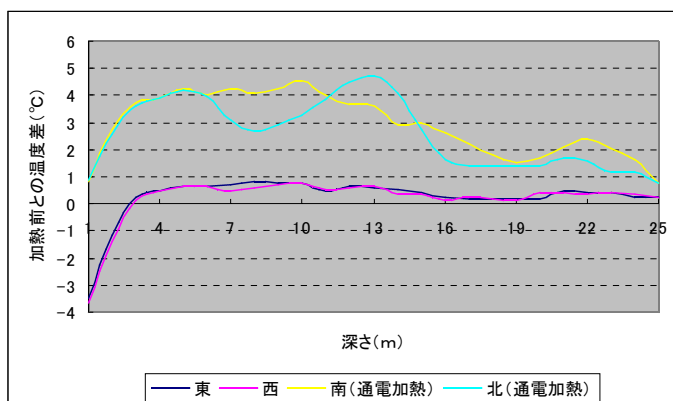


図-9 通電加熱時の温度分布計測結果

試験はボーリング孔に本センサユニットを挿入し、ケーシングを除去してグラウトする前の裸孔状態で、樹脂被覆金属管入り光ファイバ温度センサに通電加熱を行った。図-9に加熱前後の温度分布の計測結果を示す。

図-9より通電加熱した南-北方向の温度差は最大で4.7°C、加熱を行っていない東-西方向では1°Cであった。南方向と北方向では、深さ方向の温度分布に差異が認められる。原因として、温度センサと孔壁の接触、孔壁の崩れ、地下水の影響等が考えられる。このような加熱側センサ間での温度差の差異、加熱側と非加熱側のセンサ間での温度差の差異と歪センサによる計測結果を総合的に評価すると、地盤の変動に係る情報を得られると考えられる。

#### v) まとめ

本研究ではこれまで問題となっていた光ファイバ歪センサの温度特性の確認、現地適用試験を通じて基礎地盤監視のためのボーリング孔内設置型光ファイバハイブリッドセンシングユニットの開発、施工方法の開発、解析技術の研究を行った。現地での計測は今後も定期的な計測を継続し、長期的なデータを基にさらに解析を進める。

構造物監視については現在、室内試験による検証を計画実行中である。

### 5. 今後の課題

本研究により地盤監視への光ファイバによるハイブリッドセンシングシステムの有効性を確認したが、構造物の変状計測については今後、パイプラインやサイホンなど長大水理構造物等への展開が考えられる。また、得られた歪・温度情報を基にした構造解析等への利用が考えられ、更に詳細な解析手法の検討を行うと共に、ヘルスマニタリングシステムとしてのソフトウェアの開発が必要である。

