

光ファイバによるハイブリッドセンシングユニットの開発と 現場適用性確認試験

DEVELOPMENT AND VERIFICATION IN ENGINEERING PRACTICE OF THE HYBRID SENSING UNIT CONSISTED OF FIBER OPTIC DISTRIBUTED SENSORS

黒田清一郎*・検見崎千浩**・萱野帆高**・田畑和文***・永井哲夫****・廣木峰也*****

Seiichiro KURODA, Chihiro KEMMIZAKI, Hotaka KAYANO, Kazufumi TABATA, Tetsuo NAGAI, Minenari HIROKI

Fiber optic sensing has made remarkable progress recently in the field of civil engineering. In the case of distributed sensing such as BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) and ROTDR (Raman Optical Time Domain Reflectometry), optical fibers make it possible to measure the strain and temperature distribution directly along the entire length of a sensing cable. In this study, a hybrid sensing unit consisted of fiber optic distributed sensors is developed and verification in engineering practice is carried out as the second stage of R&D on the hybrid sensing system consisted of a combination of BOTDR with ROTDR.

Key Words: fiber optic sensing, distributed sensing, hybrid, strain, temperature

1. はじめに

分布計測型光ファイバによると、測定器から被測定物を含む光ファイバ全線がセンサとなるため、ひずみや温度などの各種物理量の線分布を簡便に直接計測できる。著者らは、構造物や基礎地盤の監視技術として、分布型の光ファイバひずみセンサおよび温度センサに着目し、これらをハイブリッド化した高精度センシングシステムの技術開発を実施している。その第一段階として、ひずみ分布の温度依存性について基礎的研究を行った¹⁾。恒温槽を用いた室内実験により、光ファイバセンサに沿うひずみ分布に及ぼす環境温度の影響について検討した。その結果をもとに分布型光ファイバひずみセンサを用いた現場計測に関する問題点を明確にし、分布型光ファイバ温度センサとのハイブリッド化による対策の有効性を示した。

本研究では、地盤変状の監視を目的として光ファイバによるハイブリッドセンシングユニットを開発し、ボーリング孔内への施工方法の検討を行い、現場への適用性確認試験を実施する。試験項目としては、樹脂被覆した金属管入り光ファイバ温度センサによる通電加熱試験、温水注入による環境温度変化試験、グラウト効果確認試験、経時変化確認試験である。それぞれの試験結果をもとに、本ユニットの現場での適用性に関して種々の観点から考察する。本文では、施工方法の検討、通電加熱試験、および環境温度変化試験についてまとめて示す。

* 独立行政法人農業工学研究所
** 第一高周波工業株式会社
*** 日鐵溶接工業株式会社
**** 正会員 博士 (学術) 株式会社ダイヤコンサルタント
***** 株式会社ダイヤコンサルタント

2. 光ファイバによるハイブリッドセンシングについて

著者は、構造物や基礎地盤の監視技術として、分布型光ファイバひずみ計測 (BOTDR: Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) および温度計測 (ROTDR: Raman Optical Time Domain Reflectometry) が有効であると考え、ひずみ分布および温度分布をとともに計測できるハイブリッドセンサやハイブリッドセンシングユニットの技術開発を行い、それらを用いて構造物や基礎地盤を対象とした高精度ハイブリッドセンシングシステムの構築に取り組んでいる。光ファイバによるハイブリッドセンシングにおいては、ひずみ分布および温度分布の経時変化データを併せて総合的に評価することにより、質の高い監視や維持・管理を目的としている。そこで、解決すべき課題として次のような項目が挙げられる。

- ① BOTDRの温度依存性の解明とROTDRを用いた補正方法の検討
- ② BOTDRとROTDRを一体として測定できるハイブリッドセンサ、ハイブリッドセンシングユニットの開発
- ③ ハイブリッドセンサ、ハイブリッドセンシングユニットの施工方法の検討（一体化施工）
- ④ ひずみ分布データおよび温度分布データの解析技術の検討

既報では、①を対象とした基礎的研究を行い、BOTDRの温度依存性、つまり光ファイバセンサに沿うひずみ分布に及ぼす環境温度の影響について、そのメカニズムを解明し、環境温度の影響を除去して真のひずみ分布を評価する方法について検討した¹⁾。本研究では、地盤の変状監視を目的としてハイブリッドセンシングユニットを開発し（上記②に対応）、ボーリング孔内への一体化施工方法の検討を行い（上記③に対応）、現場への適用性確認試験を実施する（上記④に対応）。

3. 地盤変状監視用ハイブリッドセンシングユニットの開発

(1) 開発目的

ボーリング孔軸方向のひずみ分布およ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て、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、挿入式傾斜計のガイド管に高精度の光ファイバひずみセンサおよ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。光ファイバセンサによるひずみ計測においては、地盤内に生じるひずみを光ファイバひずみセンサの素線に正確に伝えることが最重要であり、本ユニットではその点に十分配慮した一体化構造とする。

(2) 本ユニットの概要

地盤変状監視用光ファイバハイブリッドセンシングユニットにおいては、挿入式傾斜計のガイド管に金属管入りカシメ構造型の分布型光ファイバひずみセンサ¹⁾および金属管入りの分布型光ファイバ温度センサを管軸方向に1mごと、断面内で4方位に機械的に固定している(図-1参照)。

金属管入りカシメ構造型光ファイバびずみセンサとして、金属管のカシメ間隔をそれぞれ1mおよび20cmに設定したものの、金属管入り光ファイバ温度センサとして、通常のセンサと通電加熱用に金属管を樹脂被覆したセンサをそれぞれ用いている。

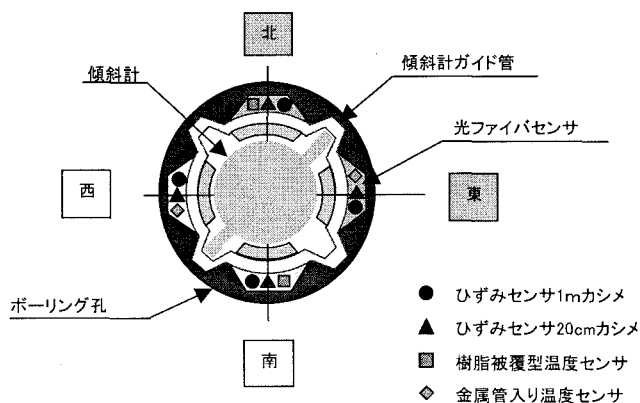
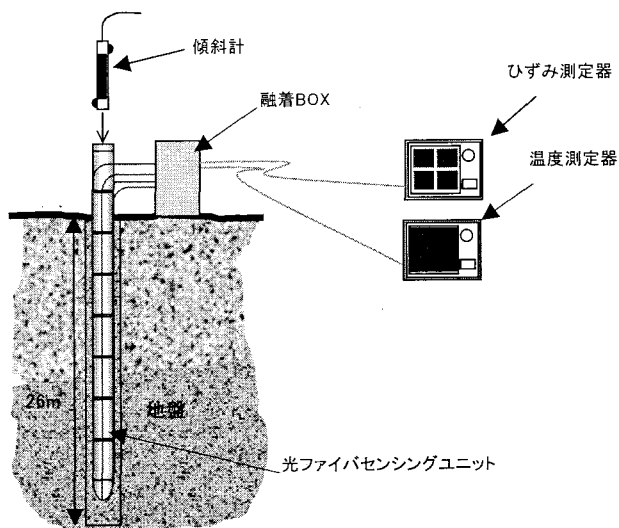


図-1 ハイブリッドセンシングユニットの断面図

現場適用性確認試験に用いた本ユニットの概念図および構成を図－２および表－１に示す。ひずみ測定器としては、高精度光ファイバひずみアナライザ（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分布計測システム（FOTM）で適用されている高精度光ファイバ温度計測装置（SENSA製，DTS800-SR）を用いる¹⁾。

なお，本試験では挿入式傾斜計ガイド管を用いることにより，分布型光ファイバひずみセンサと挿入式傾斜計の計測値をそれぞれ比較・検討できるようにしている。ただし，本ユニットの場合，微小変形から大変形まで計測可能であるのに対して，挿入式傾斜計の場合，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

表－１ 地盤変状監視用光ファイバハイブリッドセンシングユニットの構成

構成部材	名 称	仕 様
ひずみセンサ	金属管入りカシメ構造型 光ファイバひずみセンサ	・金属管（インコイロイ825），外径2.0mm，カシメ間隔1.0m ・光ファイバ（SM10/125） ・全長60m（中間点30mで折り返し）
		・金属管（インコイロイ825），外径2.0mm，カシメ間隔20cm ・光ファイバ（SM10/125） ・全長60m（中間点30mで折り返し）
温度センサ	金属管入り 光ファイバ温度センサ	・金属管（SUS304），外径2.0mm ・光ファイバ（GI50/125） ・全長60m（中間点30mで折り返し）
	樹脂被覆型金属管入り 光ファイバ温度センサ	・金属管（SUS304），外径1.2mm，センサ外径2.0mm ・樹脂被覆（PE），厚さ0.4mm ・光ファイバ（GI50/125） ・全長60m（中間点30mで折り返し）
ガイド管	挿入式傾斜計ガイド管	・ケーシング（アルミ製），外径60.5mm ・全長26m（1m×26本）

4. 現場適用性確認試験

(1) 試験概要

① 施工方法の検討

地盤内に生じるひずみを光ファイバひずみセンサの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型光ファイバひずみセンサを用い，ガイド管にはプリテンションをかけて固定することにより一体化できる構造としている。現場計測に際しては，本ユニットを地盤と一体化させる施工方法の検討が必要となる。本研究では，本ユニットのボーリング孔内への一体化施工に係る専用治具を開発し，種々の検討をもとに現場での適切な施工方法を考案した。その概要について以下に述べる。なお，現場適用性確認試験の実施場所としては破砕帯地すべりの斜面を選定している。

i) ボーリング孔の削孔

前述の斜面に、ボアホール（ $\phi 66\text{mm}$ 、深度26m）の削孔を行い、孔壁保持のために一部区間では2種類の内径（ $\phi 86\text{mm}$ および $\phi 116\text{mm}$ ）のケーシングを設置した。

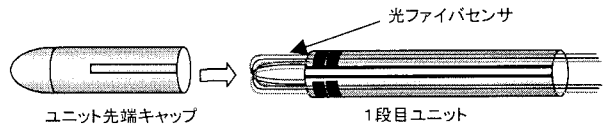


図-3 光ファイバ折り返し部の処理

ii) 本ユニットの組み立て（1段目）

ガイド管に光ファイバセンサ（ひずみ8本・温度4本）の折り返し部近傍を固定金具により4方位に取り付け1段目ユニットを組み立てた。続いて、折り返し部を覆うようにユニット先端キャップを1段目ユニットに取り付けた（図-3参照）。

iii) 本ユニットの組み立て（2段目以降）

ユニットストッパをボーリング孔口部にセットし、先端キャップ+1段目ユニットを固定した。これに2段目のガイド管を接続し、光ファイバセンサにファイバアタッチメントを取り付けた。テンショナにより光ファイバひずみセンサに20kgfのテンションをかけた状態でガイド管に光ファイバセンサを固定した（光ファイバ温度センサにはテンションをかけない）。固定完了後、ストッパを解除してボアホール内に2段目ユニットを挿入する。その後、26mの深度まで、光ファイバセンサの取り扱いに注意を払いながら、同じ動作を繰り返した（図-4参照）。

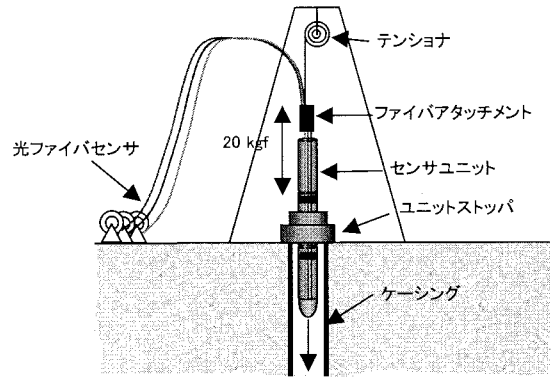


図-4 ボーリング孔へのユニットの設置方法

iv) 光ファイバセンサ終端部の処理

25mまで光ファイバセンサを取り付けた時点で、残りの部分をスプールから外し、孔壁保持用のケーシング除去のため一時的に本ユニットのガイド管内部にすべて挿入・格納した。

v) ケーシング除去

$\phi 86\text{mm}$ ケーシングは全て除去し、 $\phi 116\text{mm}$ ケーシングは坑口部から5mを残して除去した。その際、本ユニットがケーシングと同時に引き上げられ、最終的に約65cmが地上部に出た状態での設置となった。

vi) 光ファイバセンサ融着

ケーシング除去完了後、光ファイバセンサと通信用光ファイバケーブルの融着を行い、融着ボックス内に格納した。計測時には、融着ボックスから通信用光ファイバケーブルの端部を取り出して各測定器に接続する。

vii) グラウトによる本ユニットと地盤の一体化

通電加熱試験後、地盤内に生じるひずみを本ユニットに正確に伝えるため、本ユニットとボーリング孔の間をグラウトにより充填し、本ユニットと地盤の一体化処理を行った。この一体化処理の良否を評価するため、グラウト注入前、注入時、および注入後の温度分布およびひずみ分布を計測し、種々のデータ分析をもとに検討を加えている。なお、本研究ではグラウト充填から1週間後の計測値を初期値として取り扱う。

③試験内容

i) 通電加熱試験

地下水の挙動を把握するため、FOTMでは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¹⁾。孔内温度検層においては、ボーリング孔内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の温度分布の経時変化を分析する。本研究では、温水注入により温度差を与える代わりに、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により温度差を与える方法を考案し、その有効性を現場実験で検証した。なお、電圧・電流は事前室内試験結果より約60V、0.9Aと設定した。

ii) 環境温度変化試験

既報の室内実験で得られたBOTDRの温度依存性に関する知見¹⁾について、現場での適用性を確認するため、グラウト充填後、本ユニット内部に温水を注入することにより強制的に温度変化を生じさせて、ひずみ分布および温度分布の経時変化を計測した。

(2) 試験結果および考察

① ひずみセンサへのプリテンション

図-4に示したように、本ユニットの一体化施工のため、光ファイバひずみセンサには所定のプリテンションをかけている。グラウト充填から1週間後の初期状態でのひずみセンサに沿うひずみ分布の計測結果を図-5に示す。ひずみセンサ部分にはカシメ間隔が1.0mおよび20cmの場合ともに0.6~0.8%のプリテンションがかかっており、一体化施工が計画どおり遂行できたことを確認できる。

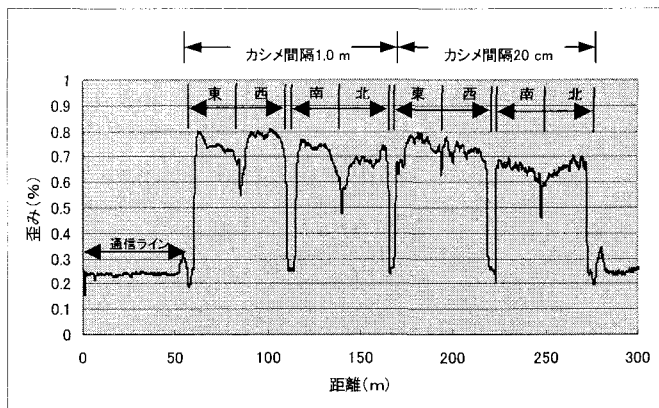


図-5 光ファイバ全長のひずみ計測結果

② 通電加熱試験

ケーシングを除去してグラウトを充填する前の裸孔状態で、樹脂被覆型金属管入り光ファイバ温度センサ(南~北方向)に通電加熱を行った。図-6および図-7に加熱前後の温度差分布、ひずみ分布(1.0mカシメの場合)の計測結果を示す。

図-6より、通電加熱した南~北方向の温度差は最大で4.7℃、加熱を行っていない東~西方向では1℃程度であった。南方向と北方向では、深さ方向の温度差の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、地下水の影響等が推測される。このような加熱側の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ひずみセンサによる計測結果を総合的に評価すると、地盤変状に係る多面的な情報が得られると考えられる。

一方、図-7より、ひずみセンサに沿うひずみ(見かけのひずみ)は全方位とも最大0.01%程度であり、今回の通電加熱による影響はほとんど見られない。温度変化が最大約5℃であることを考えると、妥当な結果であると考えられる。

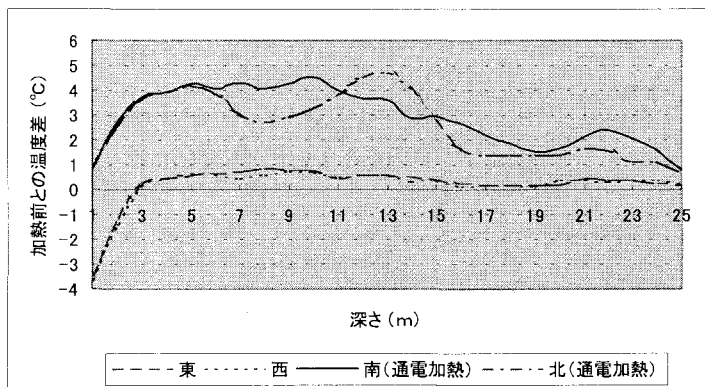


図-6 通電加熱試験時の温度分布計測結果

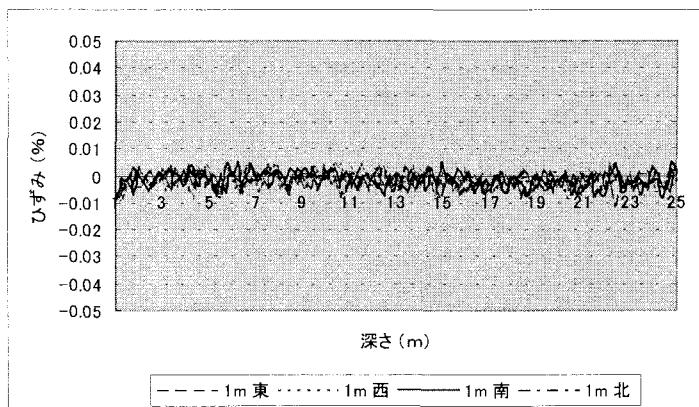


図-7 通電加熱試験時のひずみ分布計測結果

③環境温度変化試験

温水を注入することにより本ユニットに温度変化を生じさせた場合の温度分布の計測結果を図-8に、温度補正前後のひずみ分布（1.0mカシメの場合）の計測結果を図-9および図-10に示す。

17m以深では、温水注入による影響は全く見られず、ひずみ計測結果も全方位とも最大0.01%程度と変化が見られない。これらの計測結果と傾斜計が17m以深には挿入できないことを総合すると、グラウト充填時に本ユニット内部には17m～26mの区間にグラウト材が流入したものと考えられる。

一方、水位計の測定によると、本ユニット内の温水は10～17mの約7mの区間に注入されている。このことは、この区間の温度分布およびひずみ分布の顕著な変化と対応している。

図-9および図-10より、補正前には16m付近までは全て引張りひずみであったものが、補正により6～10mおよび14～17mの位置で圧縮ひずみが確認される。このことから、グラウトにより本ユニットの熱膨張による変形が拘束されているものと推測される。アルミおよびセメントの熱膨張係数を用いて、図-8の温度分布により理論ひずみ曲線を求めると図-10のようになる。補正後のひずみ計測値はセメントの理論ひずみ曲線に近い傾向が見られる。このことからグラウトによる熱膨張変形の拘束が考えられる。

【謝 辞】

本研究は、農林水産省の官民連携新技術研究開発事業「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」の一環として実施したものである。本研究の遂行に際しては、農業工学研究所の奥山室長をはじめ、関係各社の皆様のご協力を頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表する。

【参考文献】 1) 黒田, 検見崎, 田畑, 橋本, 永井 (2003) : 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.271-276

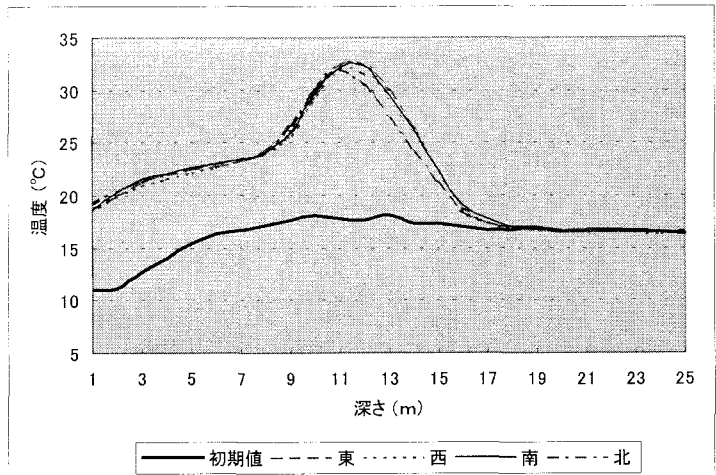


図-8 温水注入時の温度分布計測結果

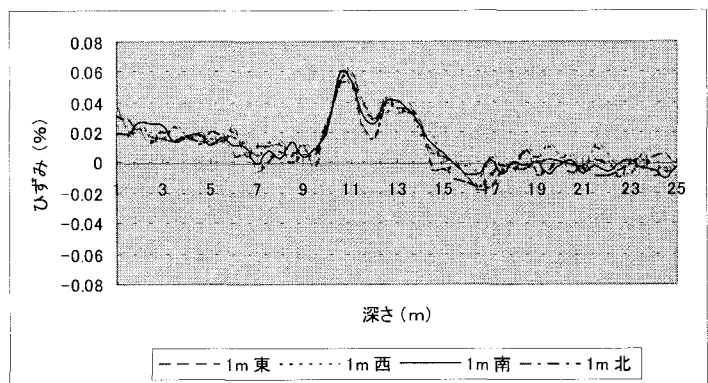


図-9 温水注入時のひずみ分布計測結果（補正前）

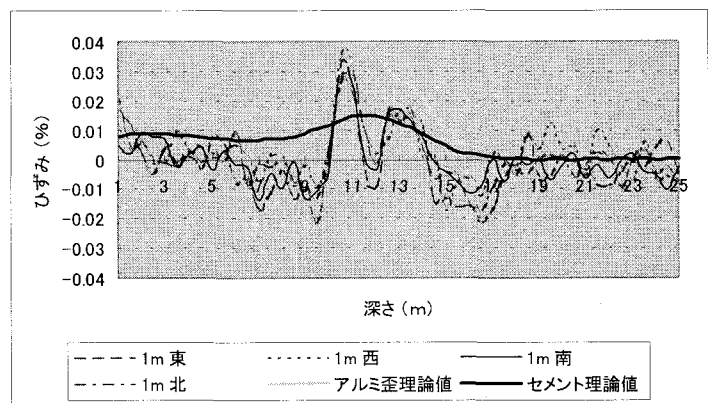


図-10 温水注入時のひずみ分布計測結果（補正後）