

光ファイバーセンサーを用いたトンネル支保の計測

Monitoring of Tunnel Supports with Optical Fiber Sensors

若林 成樹 (わかばやし なるき)

清水建設㈱技術研究所 主任研究員

渡辺 浩平 (わたなべ こうへい)

清水建設㈱土木東京支店 主査

熊谷 仁志 (くまがい ひとし)

清水建設㈱技術研究所 主任研究員

1. はじめに

光ファイバーは通信機能のほかに、各種の後方散乱光を利用することによって破断、温度、ひずみを測定できるセンサーとしての機能も有している。従来の電気的な計測器に比べ、長距離にわたって連続的な測定が可能、水や電磁誘導の影響を受けない、耐久性に優れているといった特徴がある。これらの特徴を活用してトンネル、河川堤防、斜面などの構造物の変状を計測するための技術開発が盛んに行われている。その一例としてコンクリート構造物を対象にコンクリートに直接埋込みが可能な「コンクリート埋込み型光ファイバーセンサー」¹⁾が開発されている。これは図-1に示すように通信用光ファイバーの周囲をアラミド繊維強化プラスチック (AFRP) で被覆補強し、表面に凹凸をつけてコンクリートと一体化しやすくしたものである。ひずみの計測は「BOTDR」と呼ばれるブリルアン散乱光の周波数がその地点のひずみによってシフトする原理を利用している。

今回、これらの技術をトンネル支保部材の各種計測に応用した。計測対象としたのは既設鉄道の地下化に伴い、活線の直下を掘削しているトンネルである。この工事では切羽の安定性確保と地表面沈下等の変位抑制のため、補助工法として長尺鋼管フォアパイリング工法 (AGF 工法) が採用され、掘削時には長尺鋼管 (AGF 鋼管)、

鋼製支保工、吹付けコンクリートの支保効果を確認するために水平傾斜計、ひずみゲージ、コンクリート有効応力計などを用いた変形や応力の計測が行われる。

本報では光ファイバーを用いた AGF 鋼管、鋼製支保工、吹付けコンクリートの応力や変形を計測するためのセンサーを開発し、従来型センサーと併設して比較検討を行った結果を報告する。

2. 光ファイバーセンサーの概要

AGF 鋼管計測用光ファイバーセンサーは、図-2に示すように直径50 mm のアルミパイプの上下・左右に光ファイバーセンサー (通信用光ファイバーを繊維強化プラスチック (FRP) 被覆して耐久性を高めたもので外径約1 mm) をエポキシ樹脂で貼り付け、鉛直方向と水平方向の曲げモーメントや変位も計測できるようにしたものである。当工事では、長さ12.5 m の AGF 鋼管を図-3のようにトンネルアーチ部の120°の範囲に打設間隔45 cm で23本施工している。従来型センサーの水平傾斜計は天端中央部に、光ファイバーセンサーは左肩部、天端中央部右隣、右肩部の3箇所に設置した。光ファイバーセンサーの設置後は、グラウトにより AGF 鋼管との一体化を図った²⁾。なお、現場計測に先立ち、同一構造の光ファイバーセンサーを長さ4 m の鋼管に挿入・グラウトして室内曲げ試験を実施し、鋼管との一体化の確認、および精度の検証を行った³⁾。

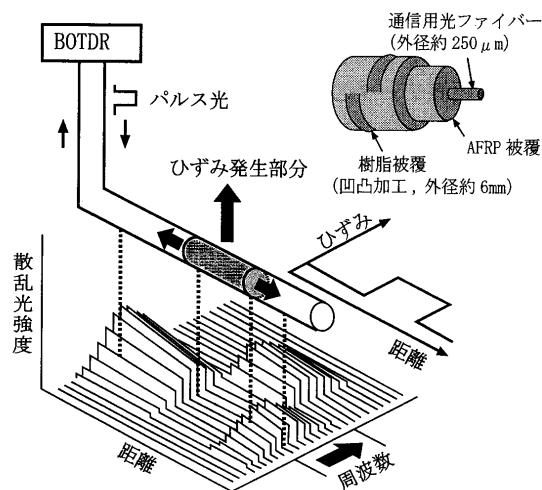


図-1 コンクリート埋込み型光ファイバーセンサーと BOTDR の測定原理

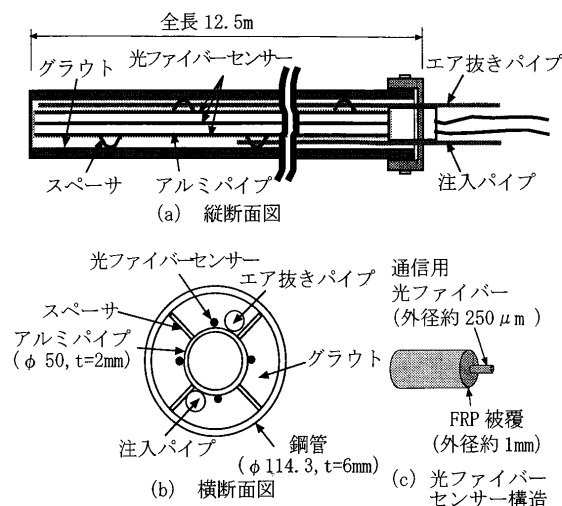
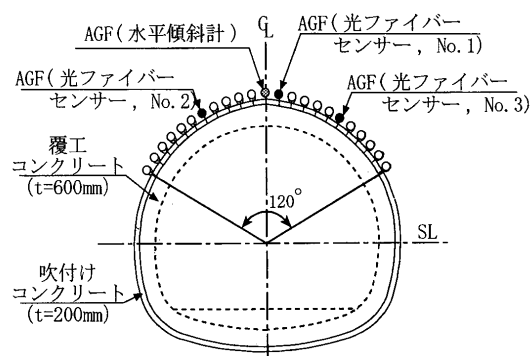


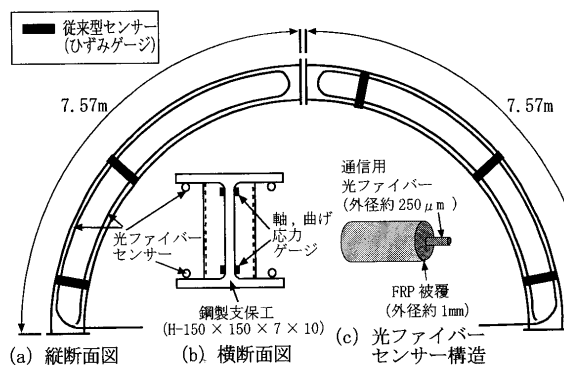
図-2 AGF 鋼管計測用光ファイバーセンサー

鋼製支保工計測用光ファイバーセンサーは、図—4 (a)の縦断面図に示すように、鋼製支保工の内空側のフランジ部分に沿って軸方向にエポキシ樹脂で貼り付け、天端部分でU字型に折り返した後、地山側のフランジ部分に沿って貼り付けた。使用した光ファイバーセンサーはAGF鋼管計測用光ファイバーセンサーと同様である。図—4 (b)は横断面図であるが、今回は切羽側と坑口側にそれぞれ対になるように取り付けけた。従来型のセンサーはひずみゲージによるもので上半の5箇所に取り付けけた⁴⁾。

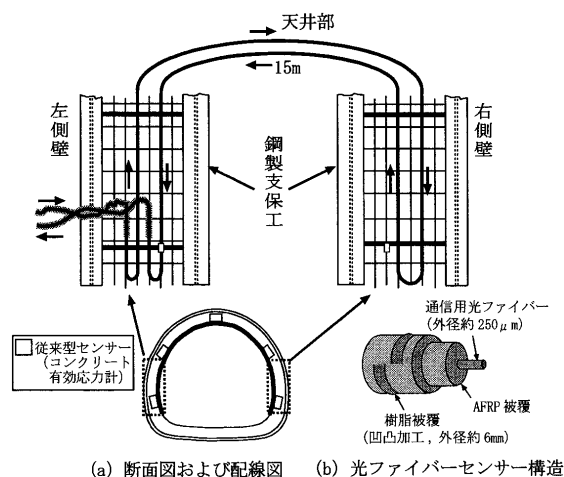
吹付けコンクリート計測用光ファイバーセンサーは、図—5 (a)に示すように、吹付けコンクリートの厚みの中心にあらかじめ取り付けけた金網に沿って上半の周方向に取り付けけた。使用した光ファイバーセンサー (図—5 (b))は、前述した「コンクリート埋込み型光ファイバー



図—3 AGF鋼管計測用センサー配置図



図—4 鋼製支保工計測用光ファイバーセンサー



図—5 吹付けコンクリート用光ファイバーセンサー

センサー」である。これを左側壁部から天井部、右側壁部と取り付け、U字型に折り返した後、天井部、左側壁部に取り付けた。なお、従来型センサーとして、コンクリート有効応力計を上半の5箇所に付けけた⁴⁾。

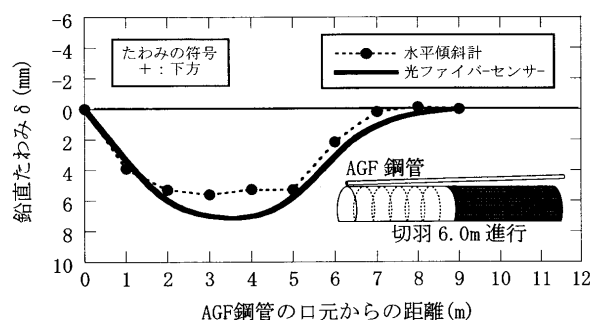
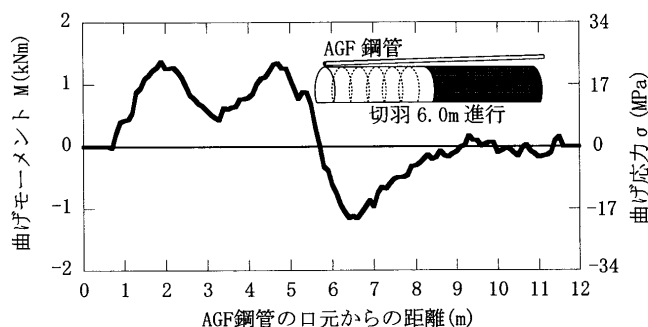
AGF鋼管計測用光ファイバーセンサー、鋼製支保工計測用光ファイバーセンサーと吹付けコンクリート計測用光ファイバーセンサーはトンネル坑内の端子ボックス内ですべてが一筆書きになるように接続し、約300 m離れた現場工事事務所内まで伝送用光ファイバーで配線した。計測は30分間隔、距離ピッチ10 cmで行い、事務所内のパソコンに常時最新の計測結果が表示され、同時にデータが保存されるシステムになっている。

3. 計測結果

例として図—6にAGF鋼管設置場所から切羽が6 m進行した場合の、天端中央部右隣のAGF鋼管の測定結果を示す。図—6 (a)には曲げモーメントおよび曲げ応力分布を示した。曲げモーメント分布を見ると切羽の位置から3 m先では曲げモーメントの値がほぼ0になることが、また、曲げ応力は最大値で約25 MPaとなっており、鋼管の許容応力度210 MPa以内に納まっていることが分かった。図—6 (b)には水平傾斜計と光ファイバーセンサーにより求めた鉛直たわみを示した。鉛直たわみは、水平傾斜計の場合は1 m毎の傾斜角を1回積分することにより、また、光ファイバーセンサーの場合はアルミパイプの上下の軸方向ひずみ ε_1 , ε_2 から次式により算定した曲率 $1/\rho$ を2回積分することにより求めた。

$$1/\rho = \alpha \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 / R_{AL} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ρ はAGF鋼管の曲率半径、 α はAGF鋼管とアルミパイプの半径比で2.286、 R_{AL} はアルミパイプの半径である。積分にあたって、境界条件としてAGF鋼管の口元と曲げモーメントの値がほぼ0になる切羽から3



図—6 AGF鋼管の計測結果

論文

m奥を固定点とした。鉛直たわみは、水平傾斜計の場合は折れ線のようにになっているのに対して、光ファイバーセンサーの場合は測定ピッチが10 cmと細かいため、滑らかな曲線となった。また、鉛直たわみの最大値は水平傾斜計、光ファイバーセンサーで、それぞれ、約6 mm、7 mmとほぼ一致しており、たわみ曲線の形状も良い対応を示している。

図-7に、設置位置から切羽が1 m進行した場合の鋼製支保工計測用光ファイバーセンサーの測定結果を示す。鋼製支保工の縁応力のひずみゲージによる計測結果を外縁部(●)と内縁部(○)で、また、光ファイバーセンサーによる結果を外縁部(実線)と内縁部(破線)で示した。これより、どちらのセンサーによっても、応力はおおむね圧縮となっていること、天端部と肩部で縁応力の大きさが逆転しているという結果が得られた。また、ひずみゲージと光ファイバーセンサーにより得られた計測値もおおむね良い対応を示していることが分かった。さらに、光ファイバーセンサーによると鋼製支保工の全周にわたって応力の変化を求めることができ、局所的な変化もとらえることができることも分かった。

同様に図-8に、設置位置から切羽が1 m進行した場合の吹付けコンクリート計測用光ファイバーセンサーの測定結果を示す。コンクリート有効応力計による値(○)と光ファイバーセンサーによる値(実線)を示した。なお、光ファイバーセンサーは一筆書きになるように往復で取り付けられているが、ここでは、平均値を図示した。これより、コンクリート有効応力計と光ファイバーセンサーにより得られた計測値は良い対応を示しており、値も天端部分で約1 MPaとなっている。また、鋼製支保工と同様に、光ファイバーセンサーによると全周にわたって応力の変化を求めることができることが分かった。

4. ま と め

今回、AGF 鋼管、鋼製支保工、吹付けコンクリート計測用光ファイバーセンサーをトンネル支保の計測に適用し、応力や変形の測定を行った。また、従来型センサーによる計測結果と比較したところ良い対応を示し、光ファイバーセンサーの有効性を確認することができた。さらに、光ファイバーセンサーによると従来、離散的にしか得られなかった情報が線として得られるなど非常に有効な計測手法であることが確認できた。

最後に今回の測定に当たり、ご協力いただいた東急電鉄㈱、アイレック技建㈱、日立電線㈱ならびに、関係各位に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 熊谷仁志ほか：コンクリート構造物用光ファイバセンサの開発と実証，コンクリート工学，Vol. 38，No. 7，pp. 17～21，2000.
- 2) 渡辺浩平ほか：東急東横線地下化工事光ファイバセンサによる AGF 鋼管計測，第36回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1911～1912，2001.
- 3) 渡辺浩平ほか：東急東横線地下化工事 AGF 鋼管計測用光ファイバセンサの開発，第36回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1909～1910，2001.
- 4) 風間広志ほか：東急東横線地下化工事光ファイバセンサによる支保部材の計測，第36回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1913～1914，2001.

(原稿受理 2002.3.13)

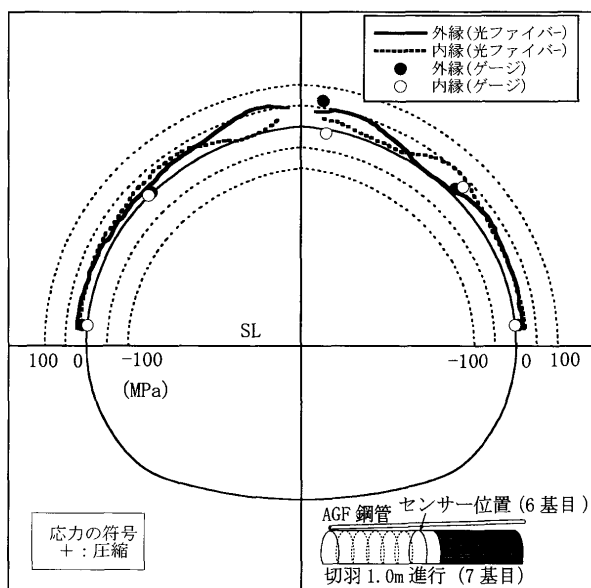


図-7 鋼製支保工の縁応力分布

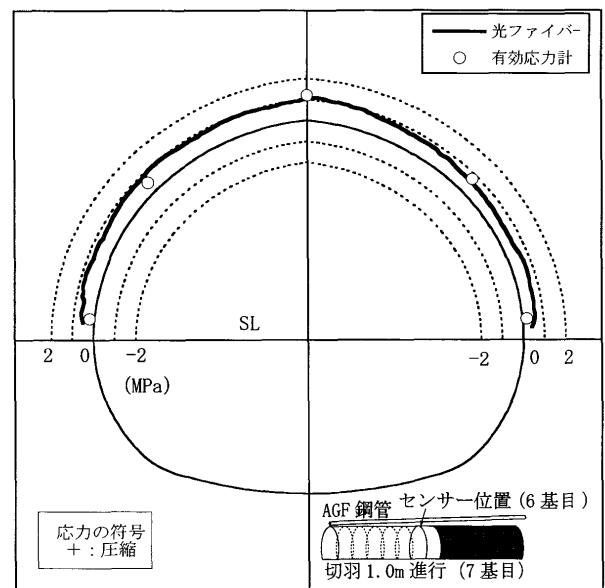


図-8 吹付けコンクリートの応力分布