

# 光ファイバセンサを用いたトンネル計測システム

若林 成樹 熊谷 仁志 渡辺 浩平 石井 利信 高田 英二  
(技術研究所) (技術研究所) (土木東京支店) (土木東京支店) (土木東京支店)

## Tunnel Monitoring System by Optical Fiber Sensor

by Naruki Wakabayashi, Hitoshi Kumagai, Kohei Watanabe, Toshinobu Ishii and Eiji Takada

### Abstract

Optical fiber sensor is characteristic of long distance measurement, no influence of electric noise and height durability. Tunnel measurement system by optical fiber sensor was newly developed and used to grasp the effect of tunnel supports such as AGF steel pipe, steel supports and shotcrete. Then, the results of measurement by the optical fiber sensor showed good correspondence with the results by the ordinary sensor such as the level clinometer, the strain gauge and the effective concrete stress meter. As a result, it was found out that this tunnel measurement system by optical fiber sensor was very effective in the field.

### 概 要

光ファイバセンサは長距離の計測が可能、水や電磁誘導の影響を受けない、耐久性が高いなどの特徴がある。この光ファイバセンサを用いたトンネル計測システムを新たに開発し、AGF鋼管、鋼製支保、吹付けコンクリートなどのトンネル支保部材に作用する応力や変形の計測に適用した。光ファイバセンサでは局所的な変化もとらえることができ、水平傾斜計、ひずみゲージ、コンクリート有効応力計などの従来型センサの計測結果と良い対応を示した。各種の計測結果より光ファイバセンサを用いたトンネル計測システムの有効性が確認された。

### § 1. はじめに

光ファイバは通信機能の他に、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や変形を計測するための技術開発が盛んに行われている。この場合、センサと構造物とをいかに一体化させるかが課題となる。当社ではコンクリート構造物を対象にNTTと共同で「コンクリート埋め込み型光ファイバセンサ」<sup>1)</sup>を開発してきた。これは図-1に示すように通信用光ファイバ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、コンクリートに直接埋め込むことが可能となっている。ひずみ計測は「BOTDR」と呼ばれる Brillouin 散乱光の周波数と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<sup>2)</sup>。

今回、これらの光ファイバの計測技術をトンネル支

保部材の計測に応用した。計測を行ったのは東急東横線地下化工事第4工区で、切羽の安定と地表面の沈下抑制のため、補助工法としてAGF工法が採用されている区間である。ここではトンネル掘削に伴う支保部材 (AGF鋼管、鋼製支保工、吹付けコンクリート) の効果を把握するため水平傾斜計、ひずみゲージ、コンク

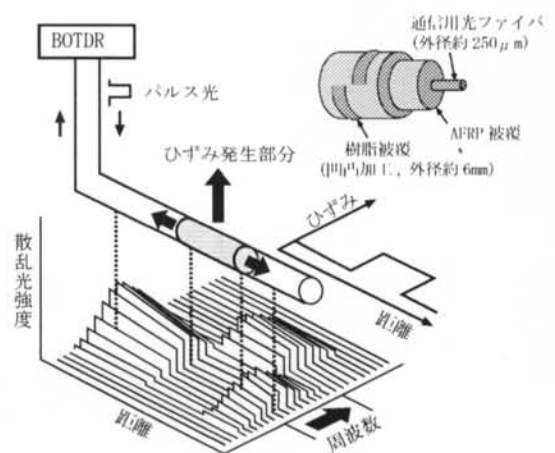


図-1 コンクリート埋め込み型光ファイバセンサの概要と BOTDR の測定原理

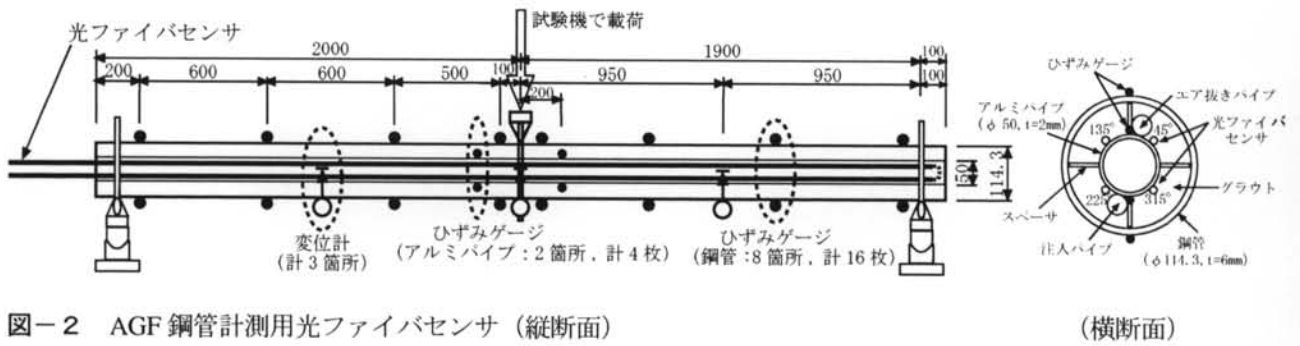


図-2 AGF鋼管計測用光ファイバセンサ (縦断面)

(横断面)

リート有効応力計といった従来型のセンサを用いたB計測が計画されている。この計測断面に新たに開発した光ファイバセンサを追加して計測を行った。従来型センサでは、離散的な計測値しか得られないのに対し、光ファイバセンサによれば設置した全線にわたって計測でき、局所的な変化もとらえることも可能である。

本報告では、実工事での適用に先立ち、AGF鋼管計測用光ファイバセンサが鋼管と一体化して挙動するかの確認と測定精度の検証のために行った室内曲げ試験結果<sup>3)</sup>、および実工事における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センサと従来型センサによる計測値<sup>4,5)</sup>を比較検討した結果を述べる。

## § 2. AGF鋼管の曲げ試験

### 2.1 AGF鋼管計測用光ファイバセンサ

AGF鋼管の応力やたわみは、従来は、ひずみゲージを貼り付けたアルミパイプを挿入する方法や水平傾斜計を用いて計測が行われていたが、データが1m程度の間隔でしか得られなかった。新たに開発したAGF鋼管計測用光ファイバセンサは全長にわたって連続的な計測が可能な構造となっている。図-2に、本センサの縦断面図と横断面図を示した。3次元的な変形を測定するために、光ファイバセンサ(通信用光ファイバを繊維強化プラスチック(FRP)被覆により耐久性を高めたもので外径約1mm)を直径50mmのアルミパイプの表面に45°、135°、225°、315°の4方向にエポキシ樹脂で接着したものである。

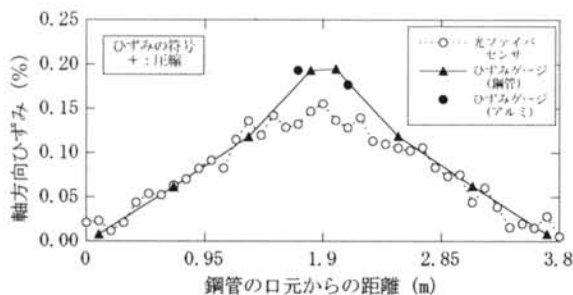


図-3 AGF鋼管上側(圧縮側)ひずみ分布

また、AGF鋼管計測用光ファイバセンサが鋼管と一体となって挙動するように鋼管とアルミパイプ間をグラウトで充填した。グラウトの圧縮強度は、材令1日、28日でそれぞれ約30MPa、60MPaであった。

なお、実工事で用いられるAGF鋼管の長さは12.5mであるが、曲げ試験では長さ4.0mの鋼管を用いた。

### 2.2 曲げ試験の概要

曲げ試験には、MTS社製油圧サーボ式高剛性試験装置を用いた。鋼管は、両端から10cmの位置を支持する単純梁とし、中央部に集中荷重を作用させた。荷重は変位制御で行い、鋼管中央部に鉛直方向(90°から270°方向)に1mm~40mmの変位を数段階に分けて与えた。図-2に示すように、ひずみゲージを上下対になるように鋼管表面に8箇所(計16枚)、アルミパイプ表面に2箇所(計4枚)、また、変位計を支持点より $l/4$ ( $l$ :支間長3.8m)、 $l/2$ 、 $3l/4$ の3箇所に設置して各変位段階において計測を行った。

なお、光ファイバの計測は距離ピッチ10cmで行った。

### 2.3 曲げ試験結果

図-3に鋼管中央部に40mmの変位を与えた際の鋼管上側(90°、圧縮側)における軸方向ひずみを以下に示す3つの方法で計測した結果を示す。鋼管上側表面の8箇所に貼り付けたひずみゲージで計測した場合(▲)、アルミパイプ上側表面135°に貼り付けた光ファイバセンサで計測した場合(○)、2箇所のひずみゲージで計測した軸方向ひずみ $\epsilon_{AL}$ を式(1)により鋼管表面における値 $\epsilon_{ST}$ に換算した場合(●)である。

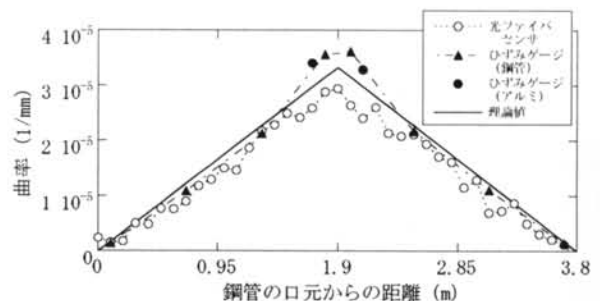


図-4 AGF鋼管の曲率の比較

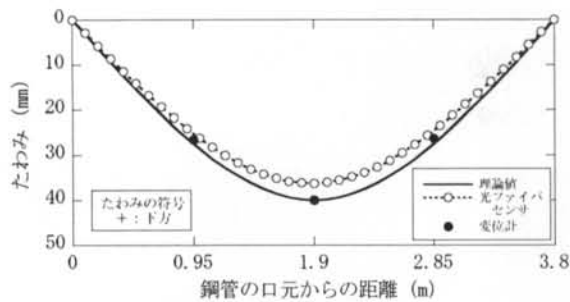


図-5 AGF鋼管のたわみ分布の比較

$$\epsilon_{ST} = \alpha \cdot \epsilon_{AL} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ は換算比で $135^\circ$ の光ファイバセンサの場合3.233、 $90^\circ$ のひずみゲージの場合2.286である。

ひずみゲージによる値は、鋼管表面、アルミパイプ表面から求めた場合とも良い対応を示し、AGF鋼管計測用光ファイバセンサが鋼管と一体化して挙動していることが確認できた。また、光ファイバセンサによる値は、鋼管中央部においてひずみゲージの値に比べてやや小さいものの全体的に良い対応が見られた。光ファイバセンサによる値がやや小さいのは設置位置が材軸線に最も近く、発生ひずみが小さいため測定精度が若干低下したことが考えられる。

図-4には、鋼管上側の軸方向ひずみ $\epsilon_1$ と下側の軸方向ひずみ $\epsilon_2$ から式(2)により算定した曲率 $1/\rho$ の値を、ひずみゲージ(▲:鋼管表面、●:アルミパイプ表面から換算)、光ファイバセンサ(○:アルミパイプ表面の $135^\circ$ と $315^\circ$ から換算)の3つの方法で求めた場合を示した。

$$1/\rho = (\epsilon_1 - \epsilon_2) / 2/R_{ST} \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ は鋼管変形後の材軸線の曲率半径、 $R_{ST}$ は鋼管の半径である。また、図には集中荷重を受ける単純梁の公式から求めた曲率の値を実線で示した。これより、曲率の値は、鋼管中央部において、理論値に比べ、ひずみゲージの場合はやや大きく、光ファイバセンサの場合にはやや小さいが、全体的には良い対応を示すことが分かった。

図-5には、鋼管のたわみを、光ファイバセンサ(○)および変位計(●)から求めた値を示した。なお、光ファイバセンサの場合には、曲率を2回積分することにより求めた2方向( $45\sim 225^\circ$ 、 $135\sim 315^\circ$ )のたわみを合成して鉛直方向( $90\sim 270^\circ$ )のたわみを求めた。また、図には集中荷重を受ける単純梁の公式から求めたたわみ曲線を実線で示した。鋼管中央部において、変位計に比べ光ファイバセンサによる値はやや小さいものの、両者の対応は良いことが分かった。

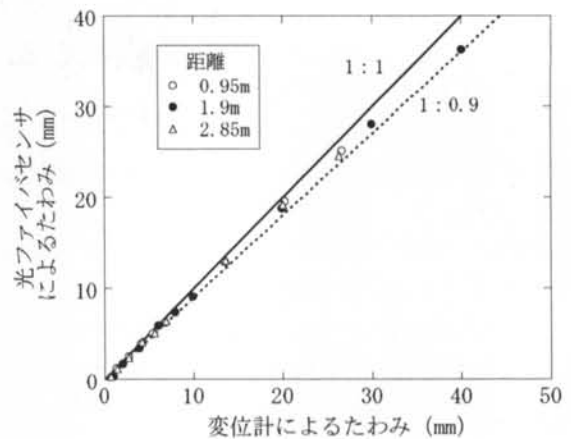


図-6 AGF鋼管のたわみの比較

図-6には、鋼管中央部に $1\text{mm}\sim 40\text{mm}$ の変形を与えた場合の光ファイバセンサと変位計によるたわみの計測値を3箇所と比較した結果を示した。光ファイバセンサのたわみは若干小さいものの、概ね良い対応を示すことが分かった。

以上より、AGF鋼管計測用光ファイバセンサが鋼管と一体化して挙動していること、光ファイバセンサの設置位置が中央断面に最も近く、測定精度が若干低下しているものの全体的には十分な精度を有していることが得られ、4方向に貼り付けた光ファイバセンサで鋼管の3次元的な変形を計測できることが確認できた。

### § 3. 光ファイバセンサを用いたトンネル計測

曲げ試験により有効性を確認したAGF鋼管計測用光ファイバセンサ、別途開発した鋼製支保工、吹付けコンクリート計測用光ファイバセンサをB計測実施箇所において従来型センサの水平傾斜計、ひずみゲージおよびコンクリート有効応力計に併設し、支保工の変形や応力を測定した結果を示す。

#### 3.1 光ファイバセンサの設置概要

B計測断面では図-7に示すように長さ12.5mのAGF鋼管がトンネルアーチ部の $120^\circ$ の範囲に打設間隔45cmで23本施工され、従来型センサの水平傾斜計は天端中央部に設置される。鋼製支保工のひずみゲージ、吹付けコンクリートの有効応力計はAGF鋼管打設位置から6m先に設置される。

AGF鋼管計測用光ファイバセンサは、図-8に示すように室内曲げ試験に用いたものとはほぼ同一の構造である。測定精度が低下しないように変形が想定される鉛直および水平方向に一致するようにアルミパイプの上下・左右に光ファイバセンサを貼り付けた全長

12.5m のセンサである。これを図-7に示すように左肩部、天端中央部右隣、右肩部の3箇所に設置した。光ファイバセンサの設置後は、グラウトにより AGF 鋼管との一体化を図った。グラウトの圧縮強度は曲げ試験と同じく材令1日、28日それぞれ約30MPa、60MPaであった。

鋼製支保工計測用光ファイバセンサは、図-9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ものである。なお、切羽側と坑口側にそれぞれ対になるように取り付けした。使用した光ファイバセンサは AGF 鋼管計測用光ファイバセンサと同様である。また、従来型のセンサはひずみゲージによるもので上半部の5箇所に取り付けられている。

吹付けコンクリート計測用光ファイバセンサは、図-9に示すように、厚み20cmの吹付けコンクリートの中心に位置するように10cmの位置にあらかじめ取り付けられた金網に沿って上半の周方向に取り付けた。使用した光ファイバセンサは、図-1に示した「コンクリート埋め込み型光ファイバセンサ」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、吹付けの際に骨材によって、光ファイバセンサが切断される危険性があったので、φ8mm 1本、φ

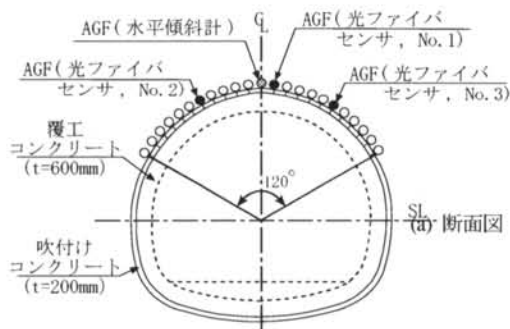


図-7 B計測実施箇所

6mm 3本を取り付けたが、断線は起こらなかった。このため、φ6mmの光ファイバセンサ1本を用いて計測を行った。また、従来型センサとして、コンクリート有効応力計を上半部の5箇所に取り付けした。

図-11に示すように、AGF鋼管計測用光ファイバセンサ、鋼製支保工計測用光ファイバセンサと吹付けコンクリート計測用光ファイバセンサはトンネル坑内の

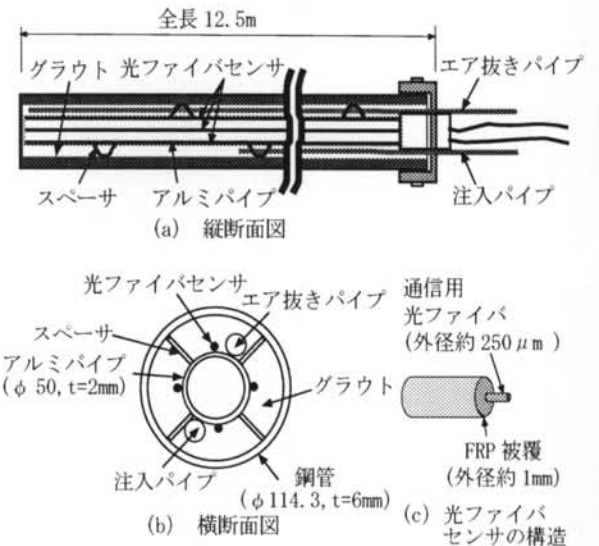


図-8 AGF鋼管計測用光ファイバセンサ

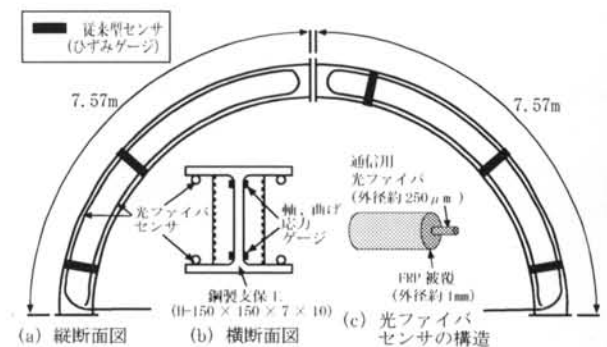


図-9 鋼製支保計測用光ファイバセンサの設置状況

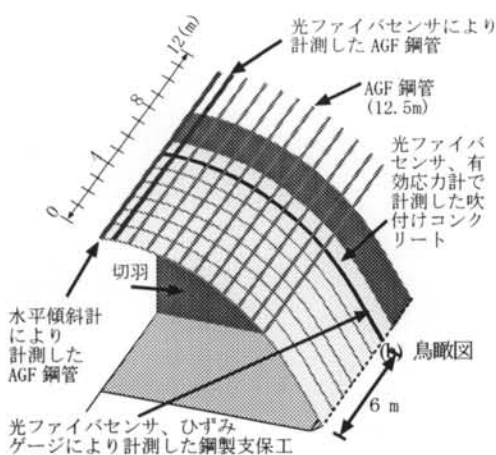


図-10 吹付けコンクリート計測用光ファイバセンサの設置状況

端子ボックス内で、すべてが1筆書きになるように接続し、伝送用光ファイバケーブルで約300m離れた現場工事事務所内まで配線した。計測は30分間隔、距離ピッチ10cm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。

### 3.2 トンネル支保の計測結果

AGF鋼管の計測例として天端中央部を取り上げ、設置位置から切羽が6m進行した場合について述べる。図-12(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、切羽から3m先の9m地点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25MPaとなっており、鋼管の許容応力度210MPa以内に納まっていることが分かった。図-12(b)には水平傾斜計と光ファイバセンサ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1mごとの傾斜角を1回積分することにより、また、光ファイバセンサの場合はアルミパイプの上下の軸方向ひずみ $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ から式(3)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。

$$1/\rho = \alpha \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 / R_{AL} \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ はAGF鋼管変形後の材軸線の曲率半径、換算比 $\alpha$ は2.286、 $R_{AL}$ はアルミパイプの半径である。

なお、積分にあたっては、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3m先の9m地点を固定点とした。

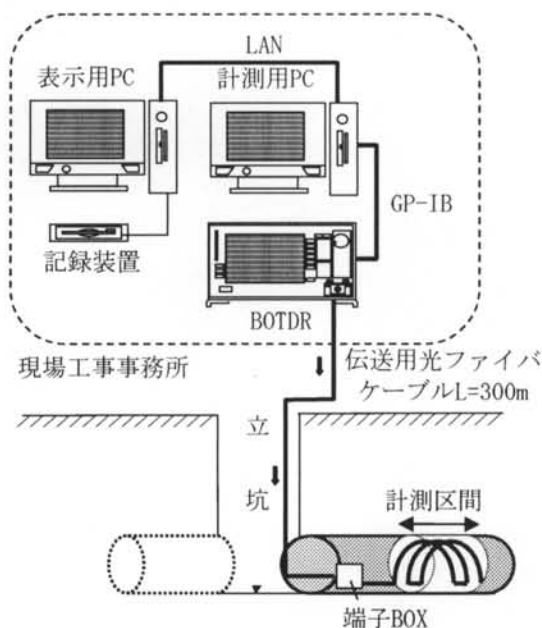


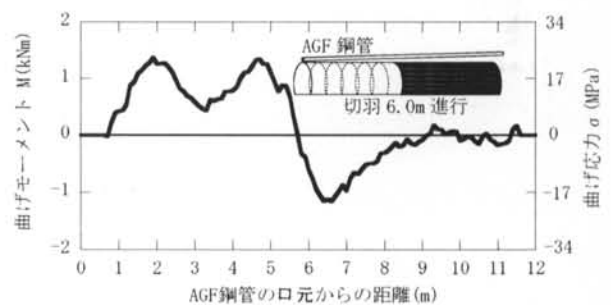
図-11 トンネル計測システムの概要

鉛直たわみは、水平傾斜計の場合は1mおきの計測のため折れ線のようになるのに対して、光ファイバセンサの場合は計測ピッチが10cmと細かいため、滑らかな曲線となった。鉛直たわみの最大値は水平傾斜計、光ファイバセンサで、それぞれ、約6mm、7mmとほぼ一致しており、たわみ曲線の形状も良い対応を示すことが分かった。

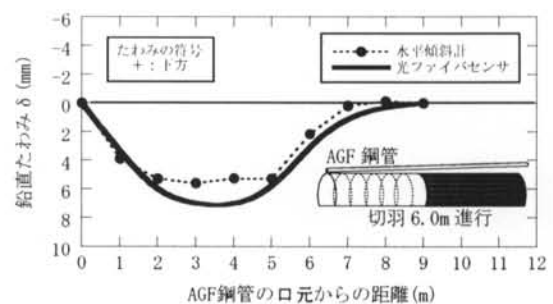
図-13には、センサ設置位置から切羽が1m進行した場合の鋼製支保工の縁応力の計測結果を示した。ひずみゲージによる縁応力の計測結果を外縁部(●)と内縁部(○)について、また、光ファイバセンサによる結果を外縁部(実線)と内縁部(破線)について示した。なお、光ファイバセンサは切羽側と坑口側の平均値を求めて示した。

これより、どちらのセンサによっても、応力は概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センサの計測値も概ね良い対応を示していることが分かった。さらに、光ファイバセンサ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、局所的な変化も計測できることが確認できた。

図-14には、センサ設置位置から切羽が1m進行した場合の吹付けコンクリート応力の計測結果を示した。コンクリート有効応力計による値(○)と光ファイバセンサによる値(実線)を示した。なお、光ファイバセンサは往復で取り付けられているが、ここでは、平均値



(a) 曲げモーメント、曲げ応力分布



(b) 鉛直たわみの比較

図-12 AGF鋼管の計測結果

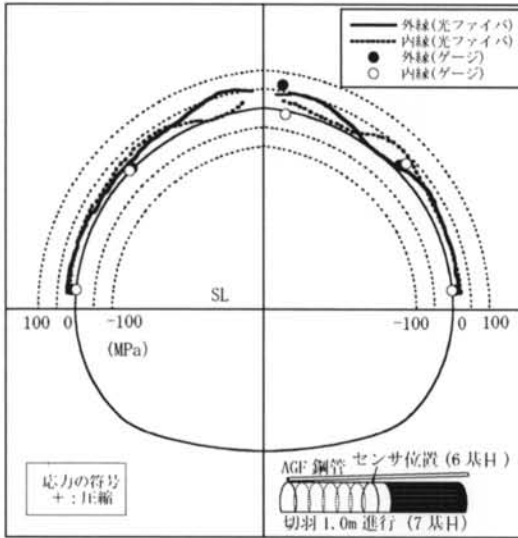


図-13 鋼製支保工縁応力の計測結果

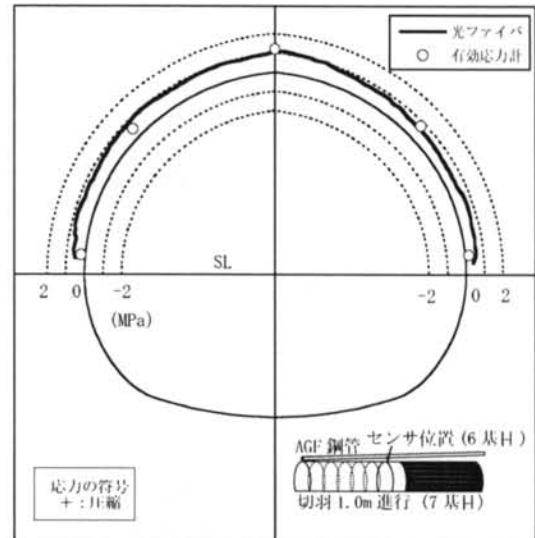


図-14 吹付けコンクリート応力の計測結果

を求めて図示した。

これより、コンクリート有効応力計と光ファイバセンサ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1MPaとなっている。また、鋼製支保工と同様に、光ファイバセンサ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。

以上より、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センサの計測結果は従来型センサと良く一致し、局所的な変化も計測でき、光ファイバセンサの実工事における有効性が確認された。

#### § 4. 結論

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センサの開発を行うとともに東急東横線地下化工事に適用し、応力や変形などの計測を行った。また、従来型センサによる計測結果と比較したところ良い対応を示し、光ファイバセンサの実工事における有効性を確認することができた。なお、光ファ

イバセンサによると従来型のセンサでは離散的にしか得られなかった情報が連続的に得られ、局所的な変化も計測できるなど非常に有効な計測手法であることが確認できた。

光ファイバセンサは計測箇所を追加しても坑内の端子ボックス内での再接続だけですみ、従来型センサのようなスイッチボックスの増設等の必要がなく、安価に計測できる可能性がある。

そのため、今後は広範囲にわたる計測を実施して地山挙動を的確に把握し、情報化施工によるコストダウンを目指す技術開発に取り組む予定である。また、光ファイバセンサは耐久性が非常に高いので施工中だけでなく、共用中の健全性のモニタリングシステムとして活用することも可能と考えられる。

#### 謝辞

今回の報告に当たり、ご協力頂いた東急電鉄(株)、アイレック技建(株)、日立電線(株)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)成瀬 央：“光ファイバひずみ計測技術”，地質と調査，第2号，pp.28～29，2000。
- 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，pp.1909～1910，2001。
- 4)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，pp.1911～1912，2001。
- 5)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，pp.1913～1914，2001。