

## 光ファイバによるトンネル断面内での連続的な支保応力計測

## Spatially Continuous Measurement of Rock Support Stress on Tunnel by Distributed Fiber Optic Strain Sensing

石井 雅子      宮嶋 保幸      黒川 紗季  
野中 隼人      今井 道男      川端 淳一<sup>1)</sup>

## 要 約

山岳トンネル工事では、安全性・経済性の観点から掘削中の地山状況に応じた最適な支保構造を選定することが重要である。選定された支保の妥当性を確認するため、鋼製支保工や吹付けコンクリートの応力を計測する支保応力測定（計測 B）が実施される。しかし、現在の支保応力計測は、ひずみゲージや有効応力計を用いたポイント型の計測であり、地質が複雑に分布する場合、応力が最大となる箇所を把握できずに、結果的に支保が破壊に至る可能性がある。そこで、センサケーブル上の全長に渡る連続的なひずみの分布を測定できる光ファイバ計測技術の導入に着手した。現場での試行の結果、光ファイバによる計測値は従来計器による計測値と整合し、トンネルの支保応力が周方向に連続的に計測されることが確認できたので、ここに報告する。

## 目 次

- I. はじめに
- II. 光ファイバによるトンネル支保応力計測
- III. 現場計測実績
- IV. おわりに

## I. はじめに

山岳トンネル工事では、安全性・経済性の観点から掘削中の地山状況に応じた最適な支保構造を選定することが重要である。選定された支保の妥当性を確認するため、鋼製支保工や吹付けコンクリートの応力を計測する支保応力測定（計測 B）が実施される。しかし、現在の支保応力計測は、Fig.1 の左に示すようなひずみゲージや有効応力計を用いたポイント型の計測であり、地質が複雑に分布する場合、局所的な応力集中を見落とし、結果的に過大な変状や支保の破壊に至る可能性がある。したがって、トンネル断面内の支保応力を空間的に連続かつ高精度に計測できれば、安全性や経済性が向上する可能性がある。

そこで、著者らは光ファイバによる分布型ひずみ計測技術<sup>1), 2)</sup>に着目した。本計測技術では、光ファイバ中を伝搬する光の後方散乱光を解析することで、センサケーブル沿いの連

続的なひずみ分布が計測できる。従来、光ファイバによるひずみ計測では、ブリルアン散乱光の周波数変化に着目する方式が主流であったが、ここでは、より高い精度と空間分解能での計測を実現するレイリー散乱光に着目する方式<sup>3)</sup>を採用した。今井ら<sup>4)</sup>は、光ファイバを接着した角パイプに強制変位を与える実験を行い、ブリルアン方式に比較して、レイリー方式でのひずみの計測精度が著しく高いことを示している。

本報では、トンネル断面内の支保応力を分布型光ファイバひずみ計測技術を用いて計測した結果を示した。その結果、トンネル周方向に連続的に発生応力が計測され、応力のピー

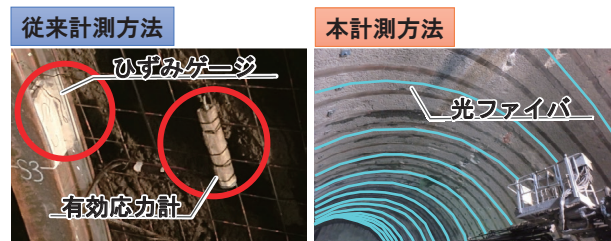


Fig.1 光ファイバによる支保応力計測  
(Rock Support Stress Measurement by Optical Fiber)

1) 土木管理本部      Civil Engineering Management Division

**キーワード** : 光ファイバ, 分布型ひずみ計測, トンネル, 支保応力計測

**Keywords** : optical fiber, distributed strain sensing, tunnel, rock support stress measurement

ク値とその位置を明らかにすることができた。また、その値は従来計器による計測値と整合することが確認できた。

## II. 光ファイバによるトンネル支保応力計測

### 1. 計測原理

石英ガラス等の材質で構成されている光ファイバ内に光が入射すると光ファイバ全長にわたって散乱光が生じる。これらの散乱光は、通信用途においては光信号が減衰する原因となるが、そのスペクトルは様々な物理現象と相関関係を持っている。例えば、ラマン散乱光の強度は温度に依存することから温度分布計測に広く利用されており、ブリルアン散乱光の波長は光ファイバのひずみに依存することから、ひび割れ検知<sup>5)</sup>やPCケーブル張力管理<sup>6)</sup>などに利用されている。

これに対し、今回利用しているレイリー散乱光は光の波長よりも小さい粒子によって発生するものであり、ラマン散乱光やブリルアン散乱光による計測に比べて格段に高い精度を得ることができる。これは、ラマン散乱光やブリルアン散乱光が分子振動など動的な現象によるものであるのに対し、レイリー散乱光が光ファイバを構成する分子のミクロな密度や組成の揺らぎの影響を受けるためである<sup>3)</sup>。

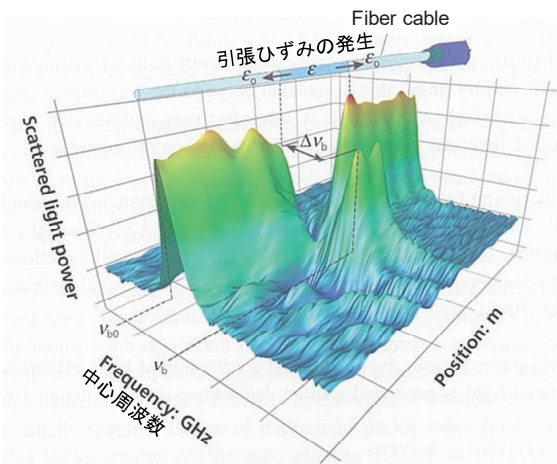


Fig.2 ひずみと散乱光の中心周波数シフト<sup>2)</sup>  
(Center Frequency Shift of Scattered Light)

Table 1 使用する光ファイバケーブル  
(Optical Fiber Cable)

	光ケーブル①	光ケーブル②	光ケーブル③
計測項目	温度のみ	温度、ひずみ	温度、ひずみ
敷設箇所	吹付けコンクリート	鋼製支保工	吹付けコンクリート
被覆材質	ステンレス	PVC	オレフィン系エラストマー
断面寸法	外径φ2mm	外径φ0.9mm	4.3mm(W)×1.7mm(H)
全体写真			

### 2. 使用する光ファイバケーブル

光ファイバ内を透過する光は温度とひずみの変化に反応し、発生する後方散乱光の中心周波数が変化する。その周波数差分を解析することで、光ファイバケーブル（以下、光ケーブルと表記）沿いのひずみ・温度の分布計測が可能となる。Fig.2 は光ファイバに発生した引張りひずみに伴い、同区間で中心周波数が $\Delta V_b$ だけシフトする状況を示している<sup>2)</sup>。ひずみを計測するためには、中心周波数の変化から温度変化分を取り除く必要があるため、本計測では Table 1 に示す温度とひずみの両者に反応する光ケーブルと、温度変化のみに反応する温度計測用光ケーブルを併用し、温度とひずみを分離した。なお、既報<sup>7)</sup>の室内試験により、Table 1 中の光ケーブル③は、計測対象となるコンクリートのひずみに良好に追従することが確認されている。

### 3. トンネル支保への実装方法

本試験で行ったトンネル支保への光ケーブルの敷設方法を示す。鋼製支保工への貼付け方法については、Photo 1 に示すように、建込み前の鋼製支保工の上下フランジの内側全周（内空側、地山側）にエポキシ系接着剤を用いて光ケーブル



Photo 1 鋼製支保工への貼付け  
(Optical Fiber Cable Placed on Steel Support)



Photo 2 吹付けコンクリートへの敷設  
(Optical Fiber Cable Placed in Shotcrete)



Photo 3 インバート吹付けコンクリートへの敷設  
(Optical Fiber Cable Placed in Invert)

ルを貼り付けた。吹付けコンクリート内への敷設方法については、Photo 2 に示すように、事前に鋼製支保工に一定間隔でガイダンス治具を設置し、支保工建込み後、治具の孔に光ケーブルを通し、その上から吹付けコンクリートを施工した。また、一次インバート吹付けコンクリート内への敷設（鋼製支保工がなく、吹付けコンクリートのみの場合）は、Photo 3 に示すように、インバート掘削面に一定間隔で鉄筋を設置した後、結束バンドで鉄筋に光ケーブルを結束し、その上から吹付けコンクリートを施工した。

4. 支保応力の評価方法

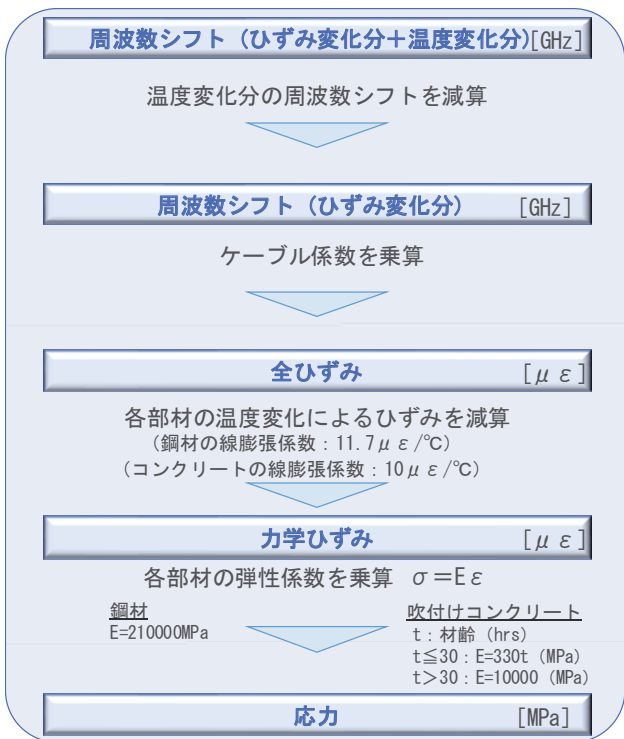


Fig.3 周波数シフトから応力への換算フロー (Flow Chart of Conversion Stress)

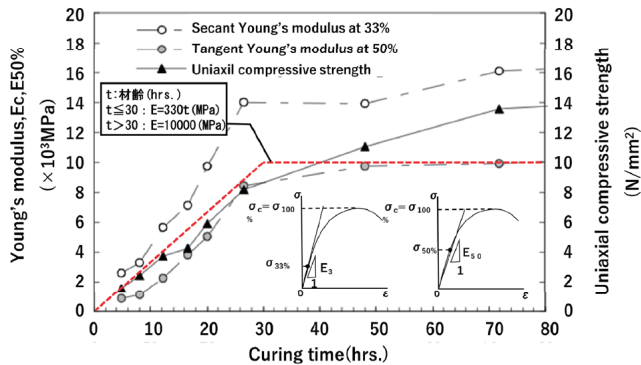


Fig.4 吹付けコンクリート供試体の弾性係数の時間推移 (文献 8) に加筆・修正 (Time Transition of Young's Modulus of Shotcrete)

トンネル掘削時に支保パターンの妥当性を評価しながら施工管理に活用するためには、光ファイバ計測によって得られる周波数シフトから応力に換算する必要がある。鋼製支保工と吹付けコンクリートの応力への換算フローを Fig.3 に示す。この換算方法では前述の通り、温度変化のみに反応する光ケーブルの周波数シフトを減算し、ひずみ変化分のみを抽出する。続いて、各部材自体も温度変化に伴ってひずみが発生するため、各部材の線膨張係数を用いて補正し、掘削に伴う力学ひずみのみを抽出する。最後に各部材の弾性係数を乗じることで応力を算出する。ここで、吹付けコンクリートの弾性係数については、時々刻々と変化するため、谷ら<sup>8)</sup>による吹付けコンクリートを模擬した供試体の室内圧縮試験結果に基づいて Fig.4 に示すようにバイリニア型の近似線で近似した。

III. 現場計測実績

1. 実証試験箇所の地質状況

今回適用試験を実施した延長 2,151m の A トンネルの地質縦断面図を Fig.5 に示す。掘削対象となる岩種は、礫岩・中粒砂岩・細粒砂岩・泥岩の 4 種類からなり、特に礫岩・砂岩質は固結度が低い。掘削には、ロードヘッダーが用いられた。光ファイバ計測断面は T.D.2066.4m に設置した。計測断面の切羽写真を Photo 4 に示す。計測断面の地質状況は、比較的硬質な砂質泥岩互層に、一部軟質な頁岩が混じっていた。土被りは約 26m であり、湧水状況は切羽面全体が湿る程度であった。地山変位計測の結果は、内空変位で 1~3mm であった。

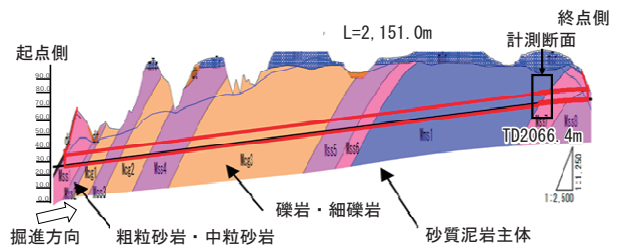


Fig.5 地質縦断面図 (Geological Profile)

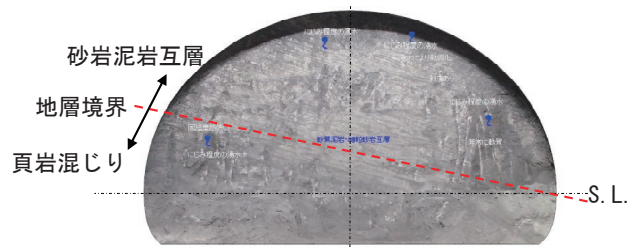


Photo 4 計測箇所の地質状況 (Geological Condition of Measurement Face)

## 2. 計測概要

今回実施した現場適用試験では、施工中のトンネル内で①吹付けコンクリート内部の温度変化、②鋼製支保工応力、③吹付けコンクリート応力の3項目について計測を行った。光ケーブルおよび従来のポイント型計器のレイアウトを Fig.6 に示す。光ファイバによる計測データと比較すべく、従来の支保応力の計器である有効応力計・ひずみゲージ・熱電対を上半3カ所(左肩・天端・右肩)に設置した。計測期間は計測データが収束するまで約1か月間、1回/時間の頻度で計測を継続した。

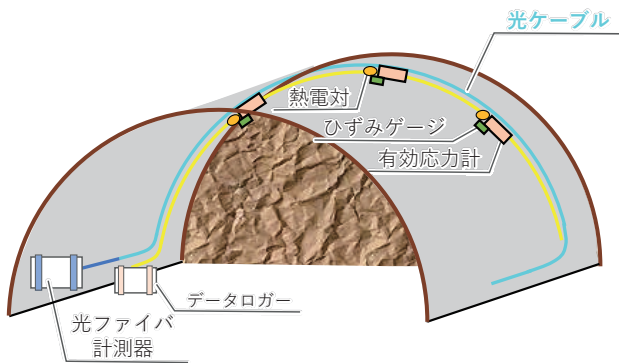


Fig.6 光ケーブルおよび従来計器のレイアウト (Rock Support Stress Measurement by Optical Fiber)

## 3. 計測結果

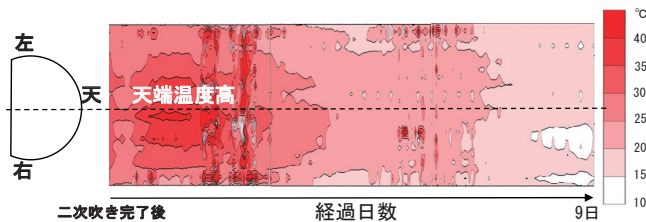


Fig.7 吹付けコンクリート温度分布の経時変化 (Time Dependent Change of Shotcrete Temperature)

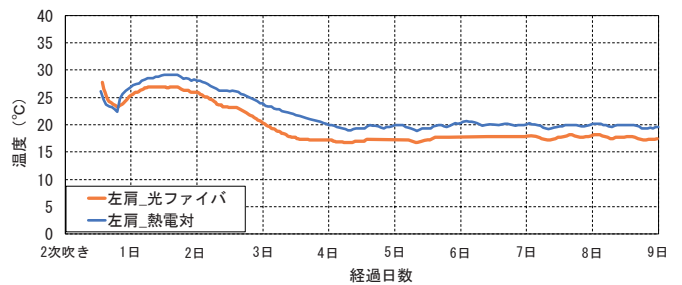


Fig.8 吹付けコンクリートの経時変化 (Comparison of Optical Fiber and Thermocouple)

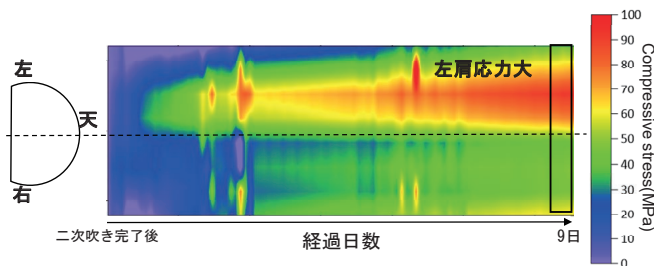


Fig.9 鋼製支保工応力分布の経時変化 (Time Dependent Change of Steel Support Stress)

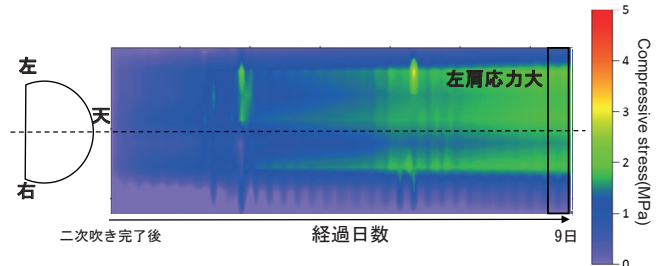


Fig.10 吹付けコンクリート応力分布の経時変化 (Time Dependent Change of Shotcrete Stress)

今回の光ファイバ計測では、高精度かつ連続的にデータ取得可能なレイリー散乱光を用いた計測方法を採用し、計測間隔 5 cm、空間分解能 10 cm とした。従来計器を設置した位置での光ファイバ計測結果と従来計器での計測結果を比較した。

### (1) 吹付けコンクリート内部の温度変化

温度計測用光ケーブルにより計測された吹付けコンクリートの温度分布を Fig.7 に示す。側壁に比較して天端の温度が高いことが確認できた。これは比較的高温の空気が天端部に滞留したためだと考える。次に、温度計測用光ケーブルと熱電対の比較結果を Fig.8 に示す。初期の温度上昇は、セメントの水和反応によるもので、その後、温度は 20℃程度に収束した。両者間では絶対値で最大 3℃程度の差異がみられるものの、変化の傾向はよく整合しているといえる。

### (2) 鋼製支保工と吹付けコンクリートの応力

Fig.9, Fig.10 に光ファイバ計測によって得られた空間連続的な、鋼製支保工(内空側)と吹付けコンクリートの圧縮応力分布の時間変化を示す。同図より、時間経過とともに、左肩部での応力の増大が確認できた。ここで Photo 4 に示したとおり、左側が頁岩混じりの脆弱部、右側が比較的硬質な砂岩泥岩互層であることから、左肩部での応力増大は妥当といえる。

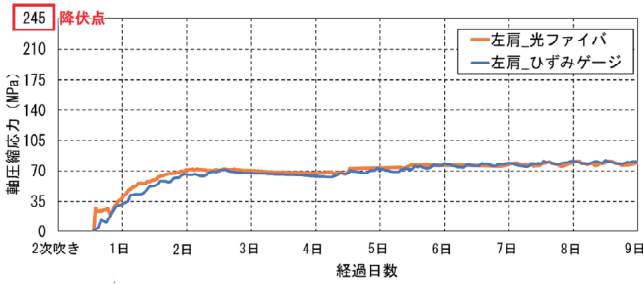


Fig.11 鋼製支保工応力の経時変化  
(Comparison of Optical Fiber and Strain Gauge)

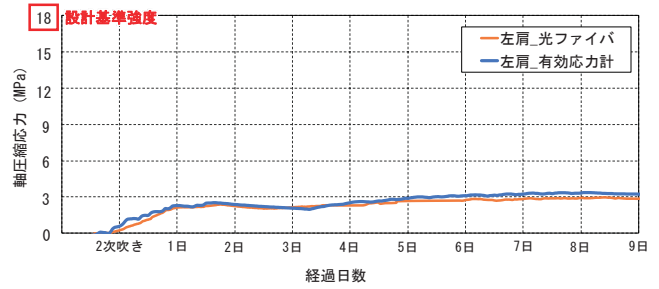


Fig.12 吹付けコンクリート応力の経時変化  
(Comparison of Optical Fiber and Effective Stress Meter)

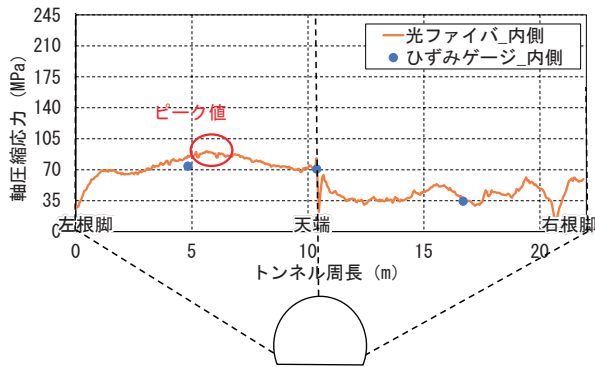


Fig.13 鋼製支保工の応力分布 (9日後 抽出)  
(Stress Distribution of Steel Support)

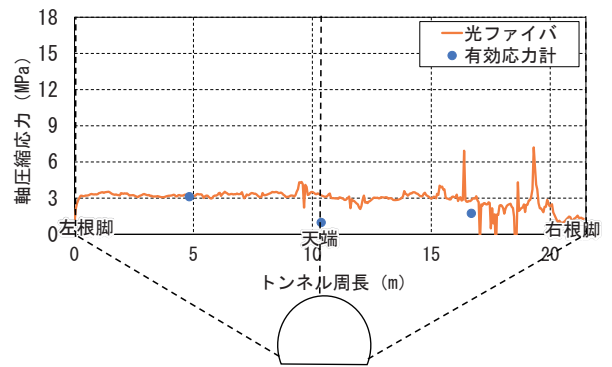


Fig.14 吹付けコンクリートの応力分布 (9日後 抽出)  
(Stress Distribution of Shotcrete)

次に、Fig.11、Fig.12 に左肩部における光ケーブルと従来計器（ひずみゲージ・有効応力計）の圧縮応力の比較結果を示す。同図より、左肩部では、鋼製支保工・吹付けコンクリートともに光ケーブルと従来計器がよく整合することが確認できた。続いて、Fig.13、Fig.14 に計測開始から9日後の応力値を縦軸に、トンネル周長を横軸として、鋼製支保工（内空側）と吹付けコンクリートの全周方向の応力分布を示す。Fig.13 に示すように、分布型光ファイバ計測により、従来のポイント型計測では捉えられなかった全体的なモードと、左側の応力のピーク値を取りこぼすことなく計測できることが示された。また、鋼材の降伏応力 245MPa に対し、発生応力は最大で 90MPa 程度であり、支保の合理化が図れる可能性が示唆された。一方、吹付けコンクリートにおいては、Fig.14 に示すように一部有効応力計との乖離がみられる。特に、天端部での有効応力計の値は 0.8MPa 程度と、有効応力計のフルスケール値の 2%程度と小さい。この原因として、今回の設置断面は土被りが小さかったことが考えられる。今回の試験結果だけでは計測精度の評価が困難であるため、引き続き、高土被り部など発生応力が大きい断面においても検証を重ねていく必要がある。今後は、現場導入に向け、光ケーブルの設置方法・光ファイバ計測のデータ処理技術に関して更なる改善を進めていく所存である。

#### IV. おわりに

本報では、トンネルの支保応力を断面内で連続的に計測することを目標に、分布型光ファイバひずみ計測技術の適用性を現場試験により検証した。得られた知見を以下に示す。

- ・ 分布型光ファイバひずみ計測技術により、トンネルの支保応力が周方向に連続的に計測され、その値は従来計器による計測値と整合することが確認できた。
- ・ 応力分布より、周辺地質分布に伴う地圧の不均質性を把握することができ、地質を評価する上でも有効であることがわかった。
- ・ ひずみを連続的に計測できることから、従来のポイント型計測では捉えられなかったピーク値とその位置を取りこぼすことなく計測できた。ピーク値を確実に取得できることから、支保の妥当性をより精度良く評価できるといえ、トンネル工事の安全性・経済性の向上に貢献できると考えられる。

また、地山の状況によっては、支保の応力が経時的に変化していくことも考えられ、耐腐食性が高い光ファイバを建設完了後も残置することで、トンネルの維持管理においても活用できると考える。今後は、現場導入に向け、光ケーブルの設置方法・光ファイバ計測のデータ処理技術に関して更なる改善を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 光防災センシング振興協会；光ファイバセンサ入門，2012.
- 2) Cedric Kechavarzi et al；Distributed Fibre Optic Strain Sensing for Monitoring Civil Infrastructure，Cambridge Centre for Smart Infrastructure & Construction，2016.
- 3) 岸田欣増ら；SMF におけるひずみと温度が識別できるハイブリッド分布測定システムの開発，電子情報通信学会 信学技報，Vol.112，No.403，2013，pp.37-42.
- 4) 今井道男ら；高精度光ファイバセンサを用いたひずみ・変位計測の検証実験，土木学会全国大会 第75回年次学術講演会，2020.
- 5) 今井道男ら；高精度光ファイバセンサを用いたひずみ・変位計測の検証実験，土木学会論文集 A1，75(1)，2019，pp.17-25.
- 6) 大窪一正ら；緊張管理・維持管理に適用可能な光ファイバを用いた PC 張力分布計測技術の開発，土木学論文集 E2，76(1)，2020，pp.41-54.
- 7) 黒川紗季ら；光ファイバによるトンネル支保の応力計測に関する室内検討，第75回年次学術講演会概要集，2020.
- 8) 谷卓也ら；弱材齢トンネル吹付けコンクリートの粘弾性特性に関する研究，大成建設技術センター報，Vo.40，2007，pp.15-1～8.

**Spatially Continuous Measurement of Tunnel Rock Support Stress  
by Distributed Fiber Optic Strain Sensing**

*Masako Ishii, Yasuyuki Miyajima, Saki Kurokawa, Hayato Nonaka,  
Michio Imai and Junichi Kawabata<sup>1)</sup>*

In tunnel construction, it is important to use the optimal support structure from the viewpoint of safety and economics, depending on the ground conditions during excavation. To confirm the validity of the selected supports, support stress measurement (measurement B) is conducted, for example, by measuring the stress of steel supports and shotcrete. However, point sensors cause local stress concentrations to be missed when the geology is complicated, which may lead to supports collapsing. Therefore, a field measurement was performed during tunnel construction, and the feasibility of continuously measuring the stress of the supports by using distributed optical fiber strain-sensing technology based on Rayleigh scattering was examined. The results showed consistency with the data from conventional sensors.