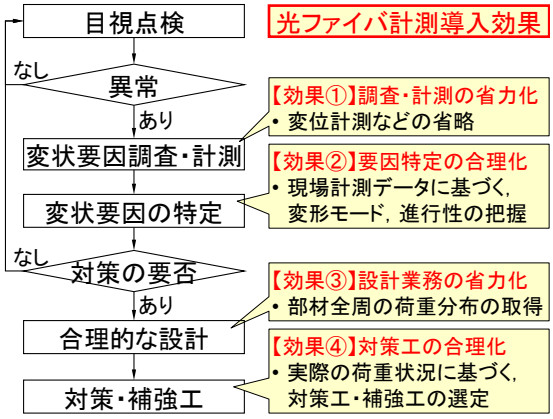
分布型光ファイバ計測による山岳トンネルの健全性モニタリング技術

鹿島建設（株）　　○野中　隼人、小池　胡楠、宮嶋　保幸、川端　淳一
八千代エンジニヤリング（株）　　坂本　昇
（一財）先端建設技術センター　　山本　拓治

１．　はじめに

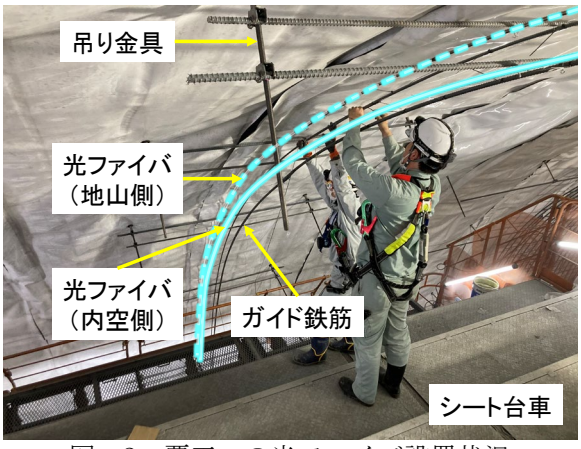
山岳トンネルでは、地山の劣化などに起因し、盤ぶくれなどの変状が顕在化することがある。そのため、維持管理において長期間安定的に健全性をモニタリングできる計測技術が求められていた。筆者らは、分布型光ファイバ計測技術を活用し、トンネルの健全性を長期かつ定量的に評価する技術の開発を進めている。本報では、本技術の実用化に向けて、実トンネルを対象に実施した実証試験について報告する。



図－1　維持管理での光ファイバの導入効果

２．トンネル維持管理への光ファイバの導入効果

トンネルで変状が確認された場合には、その変状要因や規模を把握するために詳細調査が行われる。変状計測では、一般的にひずみゲージなどの電気式センサが用いられるが、数年程度で絶縁抵抗が低下し､データの信頼性が低下するため、定期的なセンサの再設置が必要となり、事業者の大きな負担となっている。また、局所的な情報であり、変状モードを把握することができず、変状の最大箇所を見落とすことも課題である。これに対し、光ファイバはひずみゲージと同程度の精度で、長期間安定的に多点で連続的なデータを取得することが可能である。



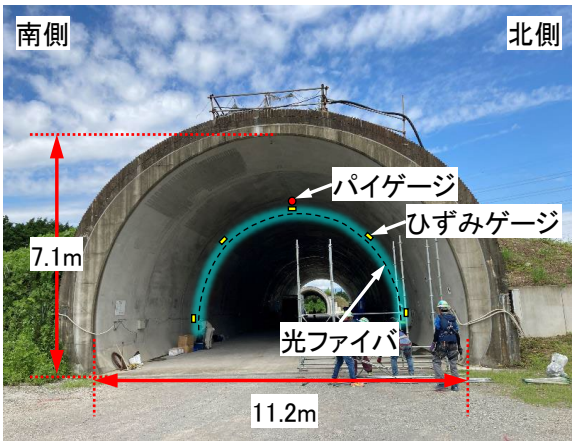
図－2　覆工への光ファイバ設置状況

図－1 に、山岳トンネルの維持管理における本技術の導入効果を示す。現在、変状が確認されたトンネルの補強設計は、変状確認後の調査や計測による限られた情報から、荷重や将来の挙動を想定し、これに基づいた設計が行われている。一方、建設時に覆工やインバートの中に光ファイバをあらかじめ設置すれば、断面力や残余耐力を正確に把握するとともに、構造物に沿って連続的な応力を把握できるため､構造物の状況を詳細に反映した合理的な設計と対策工の選定が可能になる。

３．実トンネルでの光ファイバ実装方法の検証

光ファイバの実装方法の確立に向け、建設中のトンネルで実証試験を行った。インバートと覆工の軸力と曲げモーメントを把握するため、コンクリート内部の地山側と内空側の 2 深度に光ファイバを設置した。図－2 に覆工への設置状況を示す。本試験では 3～4 人で作業を行い、1 測線当たりインバートでは 2～3 時間

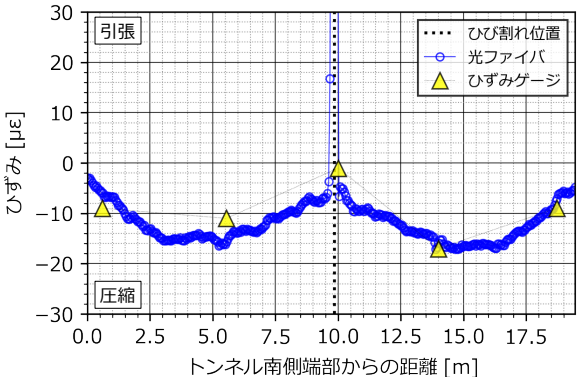
程度、覆工では 5～6 時間程度で設置が完了することを確認した。また、光ファイバの設置は、補強鉄筋の組み立てなどの本体工事で行われている施工作業と並行して実施できるため、工事工程に及ぼす影響は軽微であることが実証された。



図－3　光ファイバ、従来センサのレイアウト

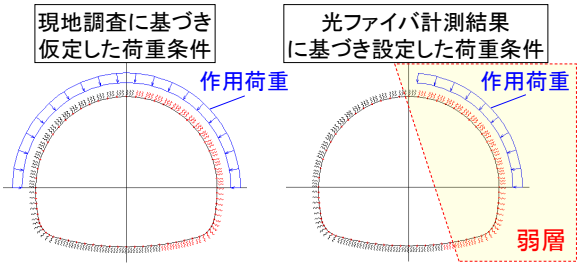
４．模擬トンネルにおける光ファイバの計測精度の検証

光ファイバの計測精度を確認する目的で、模擬トンネルにて載荷試験を行った。図－3 に光ファイバと従来センサのレイアウトを示す。光ファイバは覆工表面に貼付けており、比較として 5 箇所にひずみゲージを設置し、天端には縦断方向に発生しているひび割れの挙動を計測するためのパイゲージを設置した。試験はトンネル上部に最大 47t まで段階的に載荷を行った。図－4 に光ファイバとひずみゲージによる最大荷重載荷時のひずみ分布の計測結果を示す。光ファイバでは肩部に最大の圧縮が発生しており、天端部に載荷した時の一般的な傾向と整合した。また、ひずみゲージの計測結果とも概ね同等であった。また、天端のひび割れの挙動の計測についてもパイゲージと同様に計測できていることを確認した。



図－4　ひずみ分布計測結果（最大荷重載荷時）

４．光ファイバ計測結果に基づく補強設計とその効果



図－5　対策工設計での作用荷重分布の違い

補強設計における光ファイバ計測の効果を検証するため、既往の変状トンネルの補強工設計を対象に検討を行った。事例では、ひび割れの発生箇所などの限られた情報から、これを再現できるような作用荷重などの設計条件を解析によって決定しており、図－5 左図のように上半全体に荷重が作用するとされていた。一方、光ファイバでは、例えば図－5 右図のように実際に作用している荷重を直接取得し、補強設計に反映することができる。試行として、これに基づいてインバートの補強設計を行った結果、作用荷重が上半全体に作用しているとした場合には内巻補強厚が 250mm であるのに対し、右側だけに作用しているとした場合では 150mm と補強の規模を軽減することができた。このように、応力分布を詳細に直接的に把握することで、合理的な補強設計ができることが示唆された。

５．まとめと今後の展望

光ファイバ計測は、構造物の空間的に連続的な挙動を長期にモニタリングすることが可能である。これにより、既に変状が顕在化しているトンネルの長期的なモニタリングが可能となるとともに、新設トンネルで変状が懸念される箇所に実装できることを示した。本モニタリング技術によって、例えば、高速道路の 4 車線化に際し、変状が問題となっているトンネルを対象として、1 期線には 2 期線を掘削する際の影響監視に利用し、新設する 2 期線には建設時に光ファイバを実装し、長期モニタリングに利用することが可能となった．今後、多くの現場で利用されることを期待している。