光ファイバによる インバートの計測管理技術

石井 雅子1・黒川 紗季2・野中 隼人3・ 宮嶋 保幸4・今井 道男5・川端 淳一6

1正会員	鹿島建設株式会社	技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1) E-mail: miyaishi@kajima.com
2正会員	鹿島建設株式会社	技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1) E-mail: kurokaws@kajima.com
3正会員	鹿島建設株式会社	技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1) E-mail: nonakaha@kajima.com
4正会員	鹿島建設株式会社	技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1) E-mail: miyaj@kajima.com
5正会員	鹿島建設株式会社	技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1) E-mail: michio@kajima.com
6正会員	鹿島建設株式会社	土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂六丁目 5-11) E-mail: kawabata-j@kajima.com

山岳トンネルのインバートは、支保工や覆工と一体になってトンネルの断面をリングとして閉合するこ とにより、トンネルを力学的に安定させる構造であり、建設中のみならず、供用中のトンネルの長期的な 安定性を確保する重要な役割を担っている.しかしながら、地山状況によりインバートあるいは底盤の隆 起等の有害な現象が散見されており、適切な対策工を講じるためには建設中・供用中における底盤部の状 況を監視する計測が非常に重要となる.そこで、分布型光ファイバひずみ計測技術に着目し、光ファイバ によるインバートの応力計測、地中変位計測を行い、従来計器では捉えられない連続的な応力・変位分布 を取得し、地盤内の挙動を正確に把握することを試みたので、その結果について報告する.

Key Words: optical fiber, distributed strain sensing, invert, rock support stress measurement, ground displacement measurement

1. はじめに

山岳トンネルのインバートは、支保工や覆工と一体に なってトンネルの断面をリングとして閉合することによ り、トンネルを力学的に安定させる構造であり、建設中 のみならず、供用中のトンネルの長期的な安定性を確保 する重要な役割を担っている.しかしながら、供用中に インバートあるいは底盤の隆起やこれに伴う路盤や覆工 の損傷等の有害な現象が散見され、対策工が実施される が、供用中のトンネルで実施できる調査には限界があり、 合理的な設計を行うことが難しい.したがって、供用中 における底盤部の状況を監視する計測が非常に重要とな る.また、トンネル建設時において地質不良部に施工さ れる一次インバートは、施工後ただちに埋め戻されるた め、その健全性は直接確認できず、結果的に大きな変状 が発生するまで検知できない場合がある.したがって、 建設中もインバートの応力を計測することは重要である.

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^{1,2}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、著者らはよ 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³⁾を採用した.今井ら⁴⁾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.



図-1 光ファイバによる計測

本報では、図1 に示すように光ファイバによるインバ ートの応力計測,地中変位計測を行い,従来計器では捉 えられない連続的な応力・変位分布を取得し,岩盤内の 挙動を正確に把握することを試みたので,その結果につ いて報告する.

2. 光ファイバ計測概要

(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 光を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 との関係を持っている。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 ⁵や PC ケーブル張力 管理⁹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³.

(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. 図-2 は光ファイバに発生した引張ひ ずみに伴い,同区間で中心周波数が ΔV_b だけシフトする 状況を示している². 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,表-1 に示す温度とひずみの両者に反応する



図-2 ひずみと散乱光の中心周波数シフト

表-1 使用する光ファイバケーブル

	光ケーブル①	光ケーブル②		
計測項目	温度、ひずみ	温度のみ		
被覆材質	オレフィン系エラストマー	ステンレス		
断面寸法	4.3mm(W) × 1.7mm(H)	外径¢2mm		
全体写真	6			

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 の室内試験ⁿにより,**表-1**中の光ケーブル①と計測対象 となるコンクリートとのひずみの追従性は良好であるこ とが確認されている.

3. インバート支保応力計測

(1) 計測概要

今回実施したインバート支保応力計測における現場 適用試験では、施工中のトンネル内で吹付けコンクリー ト応力について計測を行った.当該箇所は地質不良部で あり、掘削にあたり脚部支持力不足が懸念され、一次イ ンバートへのコンクリート吹付けが提案された.一次イ ンバート吹付けは施工後ただちに埋め戻されるため、そ の後に変状が発生しても埋め戻した路盤が隆起するなど の不具合が発生するまで検知できない.そこで今回、イ ンバート吹付けコンクリート内部に光ケーブルを敷設し、 目視で直接確認することのできないひずみと応力の発生 状況監視を試みた.光ケーブルおよび従来のポイント型 計器(有効応力計)のレイアウトを図-3に示す.光



図-3 光ケーブルおよび従来計器のレイアウト



写真-1 インバート吹付けコンクリートへの敷設

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をインバート3カ所(左・中 央・右)に設置した.また,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5cm,空間分解能10 cmとした.計測期間は発生応力が収束するまでの約1か 月間,30分に1回の頻度で計測を継続した.

(2) インバート支保への実装方法

本試験で行った一次インバート吹付けコンクリート内 への光ケーブルの敷設方法を写真-1 に示す.インバート 掘削面に一定間隔で鉄筋棒を設置した後,鉄筋棒に一次 インバート吹付けコンクリートの仕上がり面をマーキン グする.掘削面とマーキング位置の中心に設置した鉄筋 棒に結束バンドを括り付け輪っかをつくる.この輪っか 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.

(3) 支保応力の評価方法

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. 吹付けコンクリートの応力への換算フローを図4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、吹付けコンクリート自体も温度変 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. 最後に吹付けコンクリート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



図4 周波数シフトから応力への換算フロー



については、時々刻々と変化するため、谷ら[®]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図-5 に示すようにバイリニア型の近似線で近似した.

(4) 計測結果

従来計器である有効応力計を設置した位置での光ファ イバ計測結果と有効応力計での計測結果を比較した結果 を図-6 に示す. 同図より,光ファイバと有効応力計の収 束した応力値がよく整合していることが確認出来る. 一 方で,初期の挙動に若干乖離が見られる. 乖離が生じる 原因として,応力を算出する際,ひずみに弾性係数を乗 じているが,若材齢時におけるコンクリート弾性係数が 適切ではない可能性が考えられる. 今後,実際の吹付け コンクリートの弾性係数を求めるべく,打球探査 %等で 評価する必要がある.

また、図-7に計測開始から14日後の応力値を縦軸に、

インバート周長を横軸として、吹付けコンクリートのイ ンバート全周方向の応力分布を示す.同図より、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、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.また吹付け コンクリートの設計基準強度18MPaに対し、軸圧縮応力 は最大で8MPa程度であり、安全に施工できていること が確認できた.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.





図-7 吹付けコンクリートの応力分布(14日後 抽出)

4. 地中変位計測

(1) 計測概要

今回実施した現場適用試験では、インバート部の地中 変位計測を行った.光ケーブルおよび従来のポイント型 計器(地中変位計)のレイアウトを図8に示す.光ファ イバを用いた新たな岩盤変位計測技術の適用性を検証す べく、光ファイバが設置された同断面に光ファイバ計測 孔から離隔 0.5m の位置に、既存の計測技術である地中 変位計を設置した.孔の深度はいずれも13mとした.ま た、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.坑内に計 測器や通信ケーブルを常設することができないため、1 ヶ月に1回の頻度で計測を実施している.

(2) 実装方法

本試験で行った光ケーブルの岩盤内への鉛直下向き敷 設方法を図9に示す.地下水の影響で光ケーブルの自重 のみでは設置が困難なため、あらかじめ表-1に示す光ケ ーブル①②の先端に錘を取り付け、ボーリング孔に錘を 降下させていくことで光ケーブルを設置した.その後、 ボーリング孔内にセメントベントナイトモルタルを充填 し、岩盤と一体化させた.充填材の要求仕様として、岩 盤の目開きや変形を拘束しない程度に低強度、低剛性で ある必要があると考えられた.強度試験およびブリージ ング試験により配合を検討し、表-2に示すセメント量 540kg/m³(水セメント比150%)のセメントベントナイト モルタルとした.本配合のセメントベントナイトモルタ ルの7日強度は σ₇=2.5N/mm²程度であった.既報¹⁰の室 内試験により、充填材~光ケーブル間の良好な引張ひず み追従性が確認されている.



図-8 光ケーブルおよび従来計器のレイアウト

(3) 計測結果

図-10に計測開始から3ヶ月後の地中変位計測結果を示 す. 左のグラフは5cmピッチに計測したひずみから各区 間の変位量を算出した結果、右のグラフは下端部を不動 点とした変位を示している. 従来計器である地中変位計 ではトータルで 0.19 mm程度の隆起が確認された.一方, 光ファイバ計測ではトータルで0.20mm程度の降起が確認 され、概ね整合する結果となった. また、地中変位計に おいて深度 2.7m で比較的大きな変位が確認されており、 光ファイバ計測でも同様の位置で比較的大きな変位が確 認された. また, 光ファイバ計測による5cmピッチの区 間変位を見ると、最深部から深度 3.5m あたりまで一様 に微小な変位が発生しており局所的な地質不良部は確認 されなかった. 一方で, 深度 3.5m から 2.3m あたりで局 所的な変位が確認されている. これは同深度の地質が影 響している可能性がある.今後,近傍のコアボーリング から地質分布を確認し、光ファイバ計測結果の妥当性を 検証する.引き続き定期計測を継続しデータを取得し、 光ファイバ計測により得られる変位量の信頼性について 検討を進める.

5. おわりに

本報では、インバートの応力計測、地中変位計測にお いて、従来計器では捉えられない連続的な応力・変位分 布を取得し、地盤内の挙動を正確に把握することを目標 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、インバート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概ね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示唆された。
- 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.
- インバート吹付けコンクリート内部に光ケーブ ルを敷設することで、インバート全体の変形モ ードを把握できたことから、路盤隆起等の不具 合の予兆を早期に検知し、掘削の中断や補強対 策工の判断を迅速に行える可能性が示唆された。



図-9 光ケーブル挿入方法

表-2 充填材配合

セメントベントナイトモルタル1m ³ 当たりの配合				
水	早強セメント	ベントナイト		
810kg	540kg	50kg		



地山の状況によっては、インバート支保の応力 や周辺の地中変位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

 光防災センシング振興協会:光ファイバセンサ入門, 2012.

- Cedric Kechavarzi et al : Distributed Fibre Optic Strain Sensing for Monitoring Civil Infrastructure, Cambridge Centre for Smart Infrastructure & Construction, 2016.
- 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.
- 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.

- 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.
- 9) 松本修治ら:打球探査法によるコンクリート若材齢時強度の推定に関する報告、コンクリート工学年次 論文集, Vol.38 (2016).
- 10) 小原隆志ら:光ファイバによるダム基礎処理工における施工管理法の高度化,第75回年次学術講演会概要集,2020.

(2021.8.6 受付)

INVERT MEASUREMENT MANAGEMENT BY DISTRIBUTED FIBER OPTIC STRAIN SENSING

Masako ISHII, Saki KUROKAWA, Hayato NONAKA, Yasuyuki MIYAJIMA, Michio IMAI and Junichi KAWABATA

Invert of mountain tunnel is a structure that dynamically stabilizes the tunnel by closing the cross-section as a ring closure with the support and lining. It is important to ensure long-term stability of tunnel. However, harmful phenomena such as heaving is sometimes seen in the poor geological conditions, and it is important to monitor the condition of invert during construction and operation in order to take appropriate counter-measures. Therefore, the authors focused on the distributed optical fiber strain sensing technology, we try to understand behavior in the ground by performing invert stress measurement and ground displacement measurement using optical fiber, and by acquiring continuous stress / displacement distribution that cannot be captured by conventional instruments. In this paper, we explain the result of the attempt.