

送水管の更新工事に伴う予防保全型維持管理法の確立 (2)グラウト充填温度計測

神戸大学 学生会員 ○秦 李科, 正会員 鋤田 泰子
阪神水道企業団 非会員 佐藤 隆浩, 非会員 高原 大知
ニューブレクス 非会員 岡林 泰広, 正会員 岸田 欣増

1. 研究の目的

本研究では、阪神水道企業団における 3 期芦部谷送水トンネルの芦部谷接合井～芦屋川管理坑区間において、送水トンネルをパイプイントンネル方式で更新する工事に合わせ、トンネルと新管の間に形成されるグラウト充填空間へ光ファイバセンサケーブル（以下、光ファイバ）を埋設し、送水トンネルを対象としたモニタリングによって送水管の予防保全型維持管理手法を確立することを目的としている。この研究枠組みの中で、分布型光ファイバセンシング（DFOS）は光ファイバ上で連続的な温度とひずみの変化量の計測が可能であることから、グラウト充填時における空間的な温度分布およびその経時変化を可視化することを目的に、DFOS のグラウト施工時への適用性について検討した。

2. 光ファイバのレイアウト

更新工事では、山岳トンネル（2.5 m×2.5 m の馬蹄形断面）と新設される鋼管（φ2.1 m）の間に形成される環状空間がグラウトで充填される。本研究では、グラウトの注入および硬化過程における温度挙動を把握するため、環状グラウト部に光ファイバを設置した。

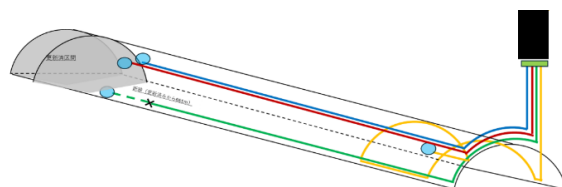


図-1 光ファイバの敷設配線図

具体的には、時計の 5 時方向から半時計回りに 7 時方向までのアーチ状に配置した光ファイバと、トンネル軸方向に沿って直線状に配置した光ファイバを設置し、時空間的な温度分布の計測を可能とした。断面方向の変化を計測するためアーチ状に敷設した光ファイバは、芦部谷接合井（上流側管路入口）から 100 m の区間のみであるが、10 m 毎に計 10 ヶ所が一筆書きで連続的に配置できるように設計した（図-1 参照）。

3. DFOS 温度計測の予備試験

現場適用に先立ち、実施工と同じグラウト材料および光ファイバを用い、ファイバを 4 つの小型セルに貫通させた室内模型実験を、2025 年 8 月に空調で室温を管理した実験室で実施した。計測は PPP-BOTDA（ブリルアン）と TW-COTDR（レイリー）の 2 つの方式で行った。その結果、熱電対が試験体中央に近いほど高い温度が記録された。これは、試験体中央部では熱の放散が小さく水和熱の影響が強く現れる一方、表面近傍では周囲環境との熱交換が大きいため、温度上昇が相対的に小さくなることを示している。

また、DFOS によるひずみ・温度の変化を熱電対による測定値と比較したところ、いずれも初期の温度上昇、最高温度の発現、その後の緩やかな冷却という典型的な水和反応の温度変化を示しており、最高温度および冷却過程の傾向のいずれにおいても良好な一致が確認された。これにより、グラウト充填時の温度監視に対する DFOS の有効性と信頼性が示された。

4. グラウト施工時の温度計測

芦部谷におけるグラウト充填施工では、トンネル内に 100 m 間隔で仕切りを設けており、アーチ状に光ファイバを配置した区間は、3 日間で充填が完了する。本区間では、1 断面あたりのグラウト充填を管路周囲の充填高さに応じて 3 回（3 日間）に分けて実施している。施工は、接合井から 25 m 毎に設置された注入口を 1～2 時間ごとに順次切り替えながら進めるため、温度変化の開始時刻は接合井からの位置で段階的に現れる。

キーワード 光ファイバ, グラウト充填, 温度計測

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 kuwata@kobe-u.ac.jp

図-2 は、下流側からみて 4 時方向の光ファイバ位置までグラウト充填が完了している様子を示している。図-3 は接合井から 100 m 先のアーチ状光ファイバ区間における温度変化を示したものであり、アーチ底部から 1/2 高さまでの範囲で 1 回目の充填が行われ、充填とともに緩やかな温度上昇が確認された。残りの充填は 2 回に分けて、2 回目は管路両側面から、3 回目は管頂部側からグラウトが投入されるため、注入口付近から温度が上昇する様子が確認できた。このように、DFOS は時空間的な温度変化を高密度に捉えることで、施工時に生じ得る空隙の有無や、非対称な事象の発生を詳細に把握することが可能となることがわかった。

図-4 は例として、接合井から 100 m 先の 4 時方向付近におけるファイバの温度変化を、グラウト最終日(2025 年 10 月 1 日) から 10 日間にわたり示したものである。10 月 1 日の注入完了後、温度は水和反応の進行に伴い約 1 日かけて急激に上昇し、最高温度に到達した。その後、水和反応速度の低下に伴って発生熱が減少し、5~7 日程度かけて緩やかに冷却し、最終的に安定した。

水和反応中は内部で継続的に熱が発生するため、温度は注入直後ではなく一定時間経過後に最高温度へ達する。その後、主要な水和反応がほぼ終了すると内部発熱は大幅に減少し、水和熱によって形成されていた高温領域は徐々に冷却され、断面内の温度分布はより均一になっていった。10 月 10 日頃までには、グラウトの硬化は概ね完了したと判断され、温度変化を支配する主要因は内部発熱から周囲環境温度の変動へと移行した。

5. まとめ

これらの結果から、DFOS はグラウト施工中の温度を連続的に監視する手法として有効であり、水和反応に伴う温度上昇、最高温度の発現、冷却、安定化といった典型的な温度変化を精度よく捉えられることが確認された。さらに、硬化完了後も温度変動の主要因が内部発熱から外部環境へ移行する過程を把握できることから、DFOS はグラウト施工における温度管理および品質評価に十分適用可能であるといえる。

謝辞：本研究は、令和 7 年度土木学会技術推進機構の新技术の地域実装に向けた研究助成の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

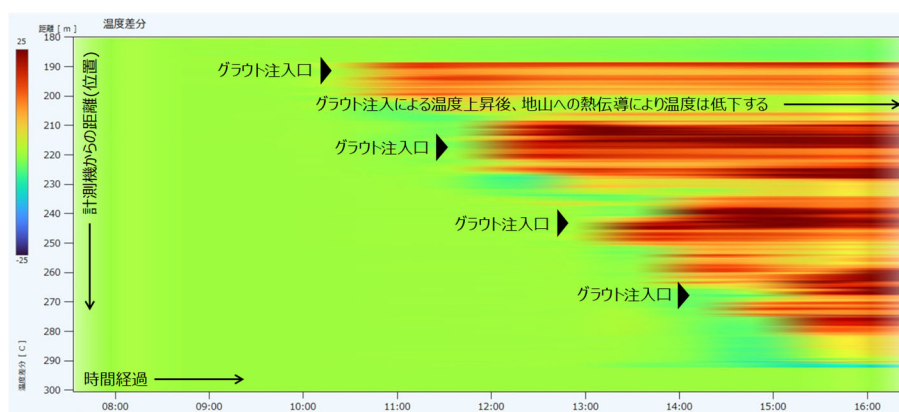


図-2 光ファイバによるグラウト充填作業時の温度分布変化
(TW-COTDR 方式、計測データは 4 時方向に設置した光ファイバ)

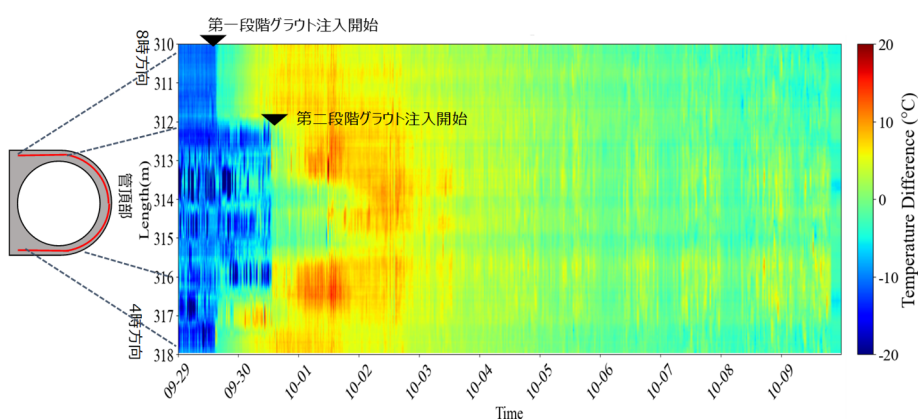


図-3 芦部谷接合井から 100 m 先（最も下流側）のアーチ部の温度分布

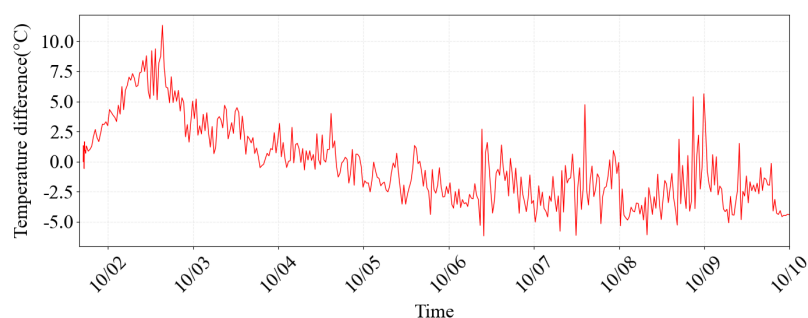


図-4 4 時方向のグラウト注入から 10 日後までの温度変化