

POF センサーを用いた地下鉄構造物の モニタリングに関する研究

伊藤 聡¹・小西 真治²・今泉 直也³・榎谷 祐輝⁴・田中 大介⁵・
水原 勝由⁶・町島 祐一⁷・芥川 真一⁸・増本 智紀⁹

¹ 正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail:sato.itou@tokyometro.jp

² 正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail:s.konishi.r4r@tokyometro.jp

³ 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail:n.imaizumi@tokyometro.jp

⁴ 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail:y.enokidani@tokyometro.jp

⁵ 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail:d.tanaka@tokyometro.jp

⁶ 正会員 地域地盤環境研究所 (〒113-0034 東京都文京区湯島 1 丁目 8 番 4 号)
E-mail:mizuhara@geor.co.jp

⁷ 正会員 株式会社 レーザック (〒124-0002 東京都葛飾区西亀有 1 丁目 5 番 3 号)
E-mail:machijima@lazoc.jp

⁸ 正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail:cadax@kobe-u.ac.jp

⁹ 学生会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail:193T132t@stu.kobe-u.ac.jp

経年劣化が予想される地下鉄構造物に対して効果的な維持・保守作業を行うためには、コンクリート構造物が有する亀裂からの漏水状態を的確に把握することが不可欠である。過去の研究から、プラスチック製光ファイバーセンサーを用いた漏水検知が有効であることが確かめられた。しかし、長期的な計測によるデータの変動傾向に漏水挙動だけでは説明できない部分があることが判明したため、その原因について調査した。その結果、漏水に伴う析出物の蓄積や、プラスチック製光ファイバーセンサーを製作した際の初期機能喪失などが要因となって計測データに影響が出ていたことが判明した。

Key Words: Aged concrete structure, crack, water leakage, plastic optic fiber sensor

1. はじめに

経年劣化を考慮せざるを得ない地下鉄構造物において、トンネル構造体のひび割れから発生する漏水に対して適切な処置が行われない場合、コンクリートの強度低下や鉄筋の腐食発錆につながる可能性があるため、メンテナンスの必要が発生する。したがって、定期的な調査とメンテナンス作業を適切に計画し実行するために、漏水挙動の経時変化を適切に把握することが重要であると考えられる。一方、プラスチック製光ファイバー (Plastic Optic Fiber, 略称 POF) で製作された各種センサーが芥川ら^{1), 2), 3), 4)}に

よって提案されており、その中で水の存在を明確に識別し記録することができるタイプのセンサー⁴⁾が漏水検知に適していることが分かっている。伊藤ら⁵⁾はこのセンサーを用いて地下鉄構内における漏水挙動の計測を実施したが、長期的なデータ変動を分析するにあたって、そのデータが漏水以外の要因に影響を受けている可能性が出たため、その要因を分析することとした。本報告は 2018 年夏に開始した漏水計測の概要と、その挙動、およびデータに影響を及ぼしたと思われる要因について分析した結果を述べたものである。



図-1 漏水箇所が上下に変動した例



図-2 漏水に伴う析出物の蓄積

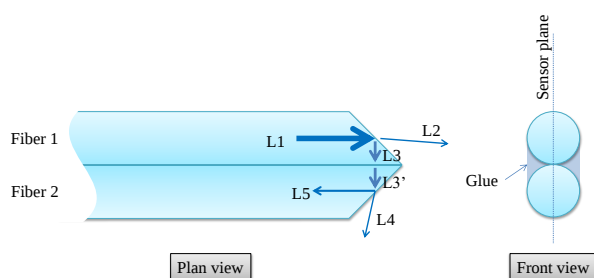


図-3 RR センサーの構造

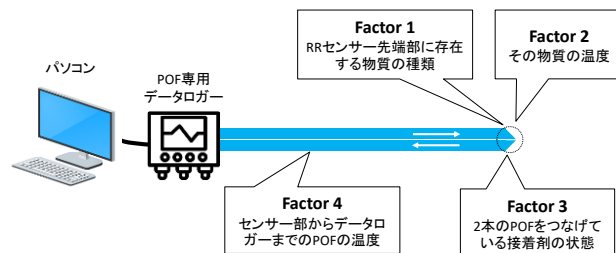


図-4 モニタリングシステムの全体像

2. 漏水計測に用いた POF センサー

(1) 漏水と析出物

地下鉄トンネルのような地下構造物においては、コンクリート構造物に生じたクラックや建設時の打ち継ぎ目などから漏水が発生することが知られており、その一例を図-1 に示す。この例では、漏水挙動が経年的に発生し、その跡が漏水に含まれる析出物の乾燥模様（縦の三角形）として確認できるとともに、現在の漏水箇所の最上点を肉眼で確認できる。また、漏水に含まれる物質が経年的に析出し、図-2 に示すようにコンクリート表面に付着・蓄積する挙動も発生する。

(2) 漏水を検知する POF センサー

このような実情を踏まえたうえで、実際に使用した漏水検知用の POF センサーの仕組みを述べる。ここで用いる水分検知センサーは、2 本の POF（それぞれ、直径は 1mm）を瞬間接着剤で結合した後、先端を斜めにカットしたものであり、その形状は図-3 に示されている。このセンサーは物理学における光の反射（Reflection）と屈折（Refraction）の原理に基づいて作動するため、それらの頭文字をとって RR センサーと呼ぶこととする。このセンサーでは、まず L1 として示される光がファイバー1 に送られ、その一部は L2 として屈折してファイバー1 に出て、残りは L3 としてファイバー1 内部で反射する。

その後、L3 の光はファイバー1 の側面に到達し、一部は反射され残りはファイバー1 から放出される。ファイバー1 を出たばかりの光の一部は、接着剤を透過してファイバー2 の側面に到達し、そこで一部が反射され残りは L3' としてファイバー2 に入射する。L3' もファイバー2 の側面に到達しファイバー1 と同様の現象が発生し、最終的には L5 が光専用データロガーに記録される。この時、L5 は POF（屈折率 1.49）と周辺物質の光の屈折率の差 Δn に依存する量になるため、周辺物質が空気（屈折率 1.000）か水（屈折率 1.33）であるかの違い（Factor 1）が分かることになる。具体的には、センサー先端部（POF の 2 つの切断面）が水に接触すると L5 の値が低下する現象が記録されることになる。

また、光の屈折率は一般的に物質の温度（Factor 2）にも依存することから L5 は空気や水の温度にも影響されることになる。

なお、2つの切断面で生じる光の反射・屈折のほかにデータロガーが記録する光 L5 は POF を連結している接着剤の状態 (Factor 3) やセンサー部から POF 専用データロガーまでの POF の温度 (即ち、POF が配置されている空間の気温, Factor 4) にもわずかながら影響を受けることが考えられるため、最終的に記録された光のデータは図-4 に示すような 4 つの Factor に影響されたものであることを認識した上で評価することが必要となる。

(3) RR センサーの基本性能と漏水検知の方法

2018 年度当初にモニタリングの計画をスタートした時点では RR センサーによって漏水検知を行うにあたって図-5 に示すような 2 つの方向を検討することとした。これは、設置の方向の違いによって漏水現象の見え方がどのようになるかを確認するためである。まず、漏水挙動が観察されるコンクリート壁に垂直な方向 (X direction) で RR センサーを設置した際の基礎実験の結果を図-6 に示す。この方向では、センサー先端部に水滴を供給した際に、それがしばらくの間、センサー先端にとどまる傾向が観察され、水に触れている間に光の強度が減少する様子が数十秒に渡って計測された。

次に、漏水挙動が観察されるコンクリート壁に添寄せた鉛直上向き方向 (Y direction) で RR センサーを設置した際の基礎実験の結果を図-7 に示す。この方向では、センサー先端部に水滴を供給した際に、その水滴はセンサー先端部を瞬時濡らした後、直ちに下方向に流下する傾向が観察され、光強度のグラフ上では漏水現象が下向きのスパイクのような形状として計測された。

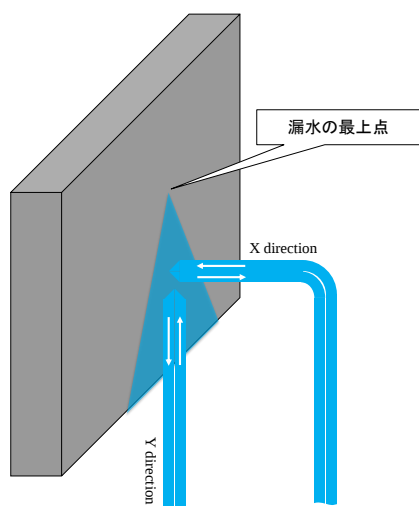
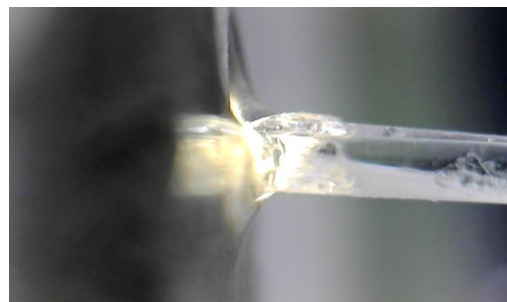
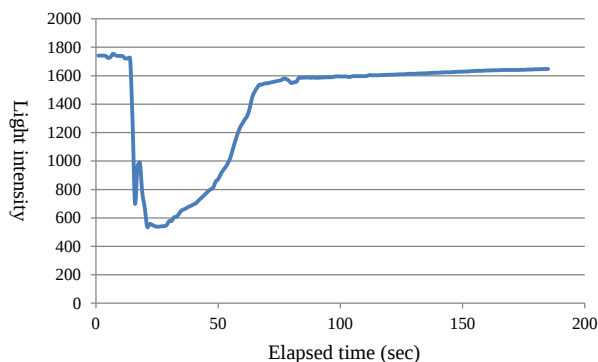


図-5 RR センサーの設置における 2 つの方向

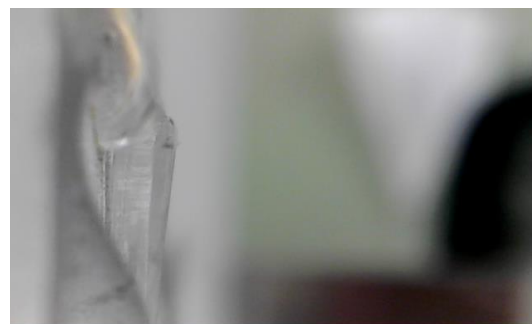


(a) X direction に設置したセンサーの先端

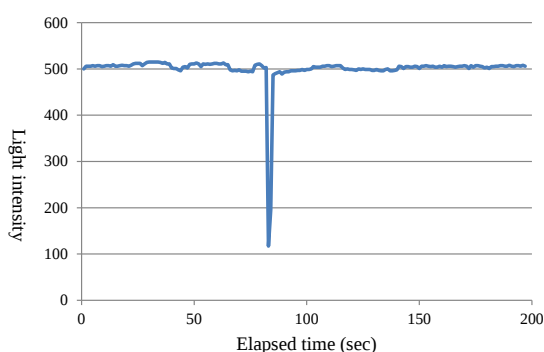


(b) 計測された光強度

図-6 X direction に設置した RR センサーが捉えた漏水挙動



(a) Y direction に設置したセンサーの先端



(b) 計測された光強度

図-7 Y direction に設置した RR センサーが捉えた漏水挙動

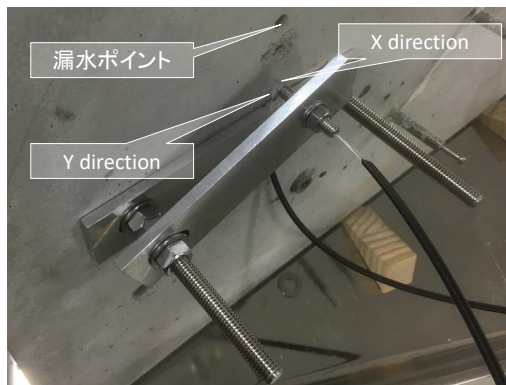


図-8 RR センサーを2つの方向で設置する際に使用した治具

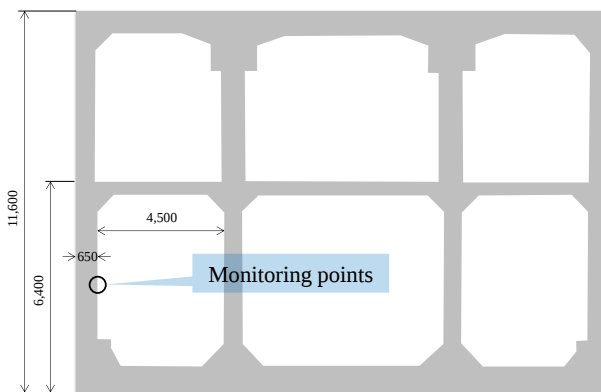


図-9 漏水計測を実施した場所のトンネル断面図
(単位：mm)



図-10 計測現場の断面図と2つのモニタリングポイント

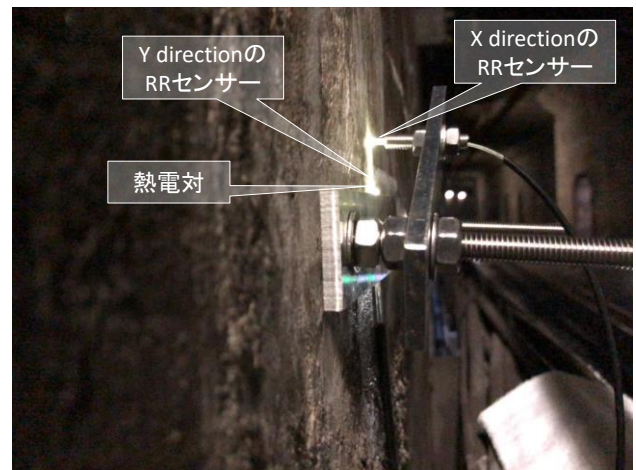


図-11 計測装置の詳細



図-12 RR センサー設置の外観

以上のような基本性能を確認した上で、現場においては図-8 に示すような治具を用いて、2 箇所の計測点において、それぞれ X と Y direction の2 方向で漏水挙動のモニタリングを実施することとした。

3. 現場計測

(1) 初期設定（モニタリング様式①）

東京メトロ管内で建設後約 50 年が経過した開削トンネル内に 2 箇所の漏水計測ポイントを設置した⁵⁾。図-9 にトンネル構造体（土被りは約 7m）の断面図と測定点の場所を示す。

ここで、数メートル離れた測点 1 と 2 を設け（図-10 参照）、それぞれ X direction と Y direction の2 方向に RR センサーを設置した。また、Y direction の RR センサーの近傍に熱電対温度センサーを取り付け、両測点で漏水の温度を記録できるようにした（図-11 参照）。

その後、RR センサーと治具全体をアルミ製のボックス内に収め（図-12 参照）、電車からの光が届かないようにした。この時の状態（モニタリング様式①）は図-13 のイラストで示すように、計測点ごとに、計 4 本の POF と熱電対温度センサーのケーブルがボックスの外側に引き出されて、約 25m 先の計測小屋まで伸ばされた状態とした。

また、装置を設置する前に、コンクリート表面に付着した析出物を除去し、ボックスの左右の端にはパッキンを入れるなどして電車の光が入らないようにした。また、ボックスの上下端は上部からの漏水がボックス内の RR センサーで計測された後に下側に流下するよう幅 2～3mm の隙間が残るようにした。

図-14 にモニタリング開始（2018 年 8 月）から 2019 年 9 月までの計測結果を示す。この間に計測されたデータから得た知見⁵⁾の概略は表-1 の通りである。

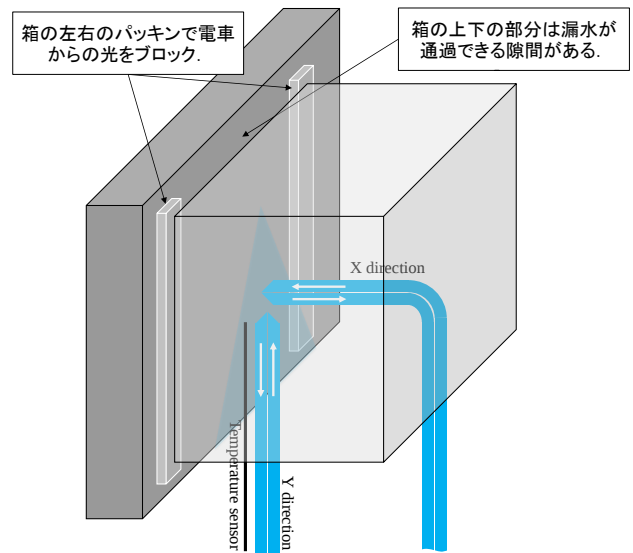


図-13 RR センサー設置当初の状態
(モニタリング様式①)

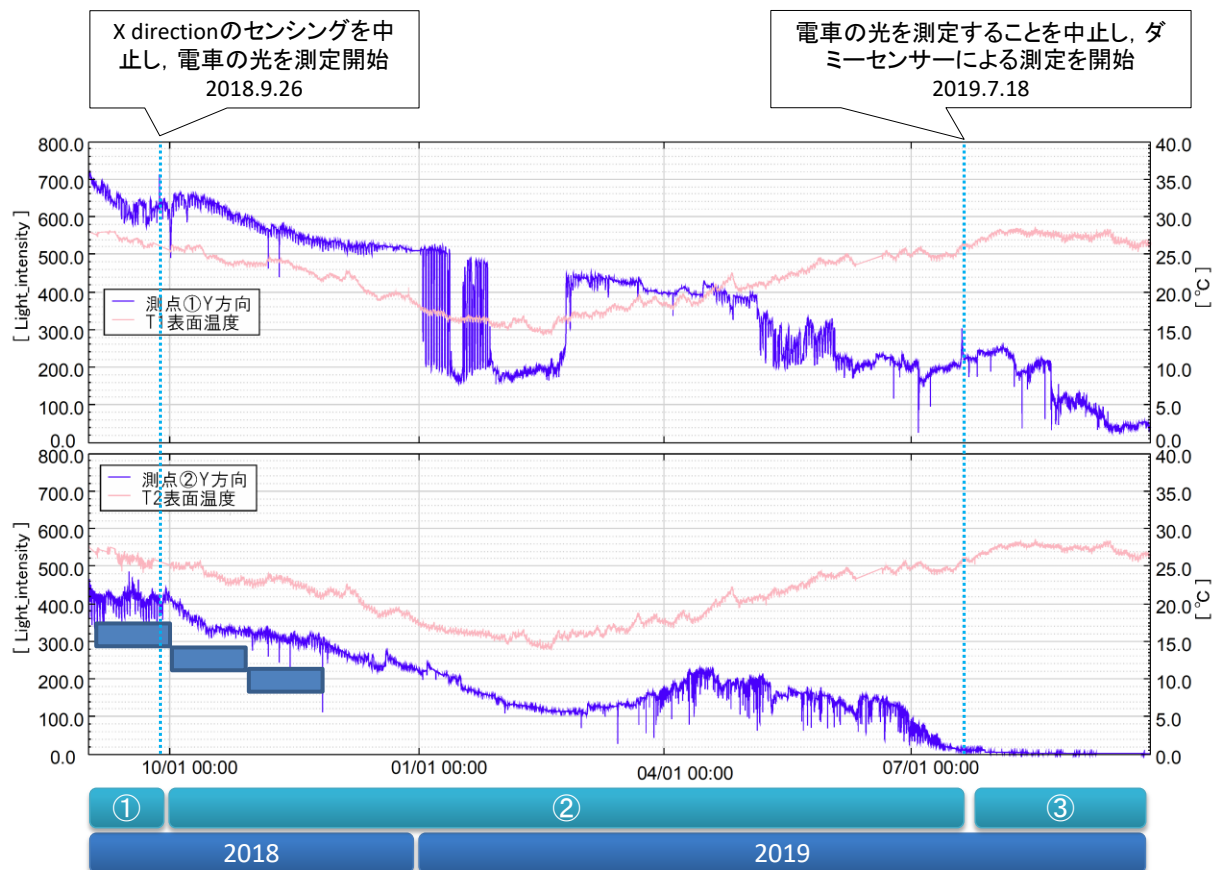


図-14 2018 年 8 月から 2019 年 9 月までの計測結果

表-1 現場計測で得られた知見

知見	内容
1	漏水が発生した際に、X direction と Y direction の RR センサーはどちらも急激な下向きのスパイク状のデータが記録したため、正常に作動していたと考えられる。
2	測点 1 では、2018 年 12 月までは漏水の程度は小さく、2019 年 1 月になると漏水の頻度が急激に高くなった。また、2019 年 2 月には漏水挙動を示す線がずっと下がったままになっており、RR センサーの先端が濡れっぱなし、すなわち漏水現象が連続的に生じていた可能性が確認された。
3	測点 1 では、2019 年 3、4、5 月には漏水現象は一旦落ち着き、2019 年 6 月以降には再び、漏水が多くなっていることが伺える。このように、もっとも気温が低くなった時期（コンクリートのクラック幅が大きくなる時期）と、降雨が多い時期に漏水が多く発生している現象はこれまでの経験とほぼ一致していた。
4	2019 年 5 月ごろまでは、両測点のグラフにおいて RR センサー捕らえた光強度のベースラインと、その場所で記録された温度のベースラインの全体的な形状が類似していることから、長期的データ変動の要因が温度変化（気温、もしくは漏水そのものの温度）に関係しているものと考えられる。
5	測点 2 については全体を通じて漏水現象があまり発生していなかった。
6	測点 1 では時間の経過とともに光強度の変動（全体的な低下傾向）が見られ、測点 2 では 2019 年 7 月ごろから急激な光強度の低下が見られた。

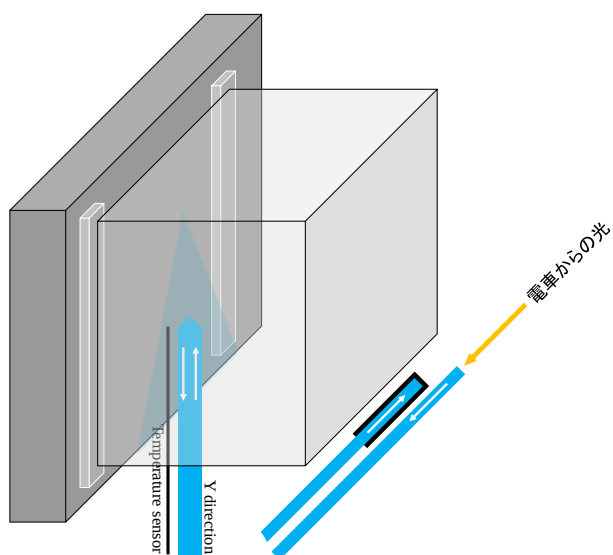


図-15 X direction の RR センサーを取り外した状態
(モニタリング様式②)



図-16 モニタリング様式を②にするためにボックスを取り外した様子

(2) X direction の RR センサー撤去 (モニタリング様式②)

表-1 の知見 1 によって、漏水現象を記録するには Y direction の RR センサーだけで充分であることが確認できたため、2018 年 9 月 26 日にそれぞれの測点において、壁に垂直な方向 (X 方向) に設置した RR センサーを取り外し、その POF の 1 本を通過する電車の方向に向け、電車通過のタイミングを光で確認することにした。残った POF には光専用データロガーから光が供給されていたが、それは使用せず黒いキャップをかぶせて (図-15 参照) これをモニタリング様式②として計測を続けた。この作業を行うためにボックスを外した際の様子が図-16 である。この段階では測点付近の析出物付着は少なく、計測に影響を及ぼす段階ではないことがわかる。図-17 は、作業が完了し X direction に使われていた POF の 1 本が通過する電車の光を記録する方向に向けられていることを示している。この電車通過記録⁵⁾は漏水メカニズムの解明に直接的に関与はしなかったが、計測データが非常に短い時間間隔で上下した際、それが通過する電車による計測誤差に関係するか否かを判定する際に有効利用した。



図-17 モニタリング様式②のセットが完了した様子

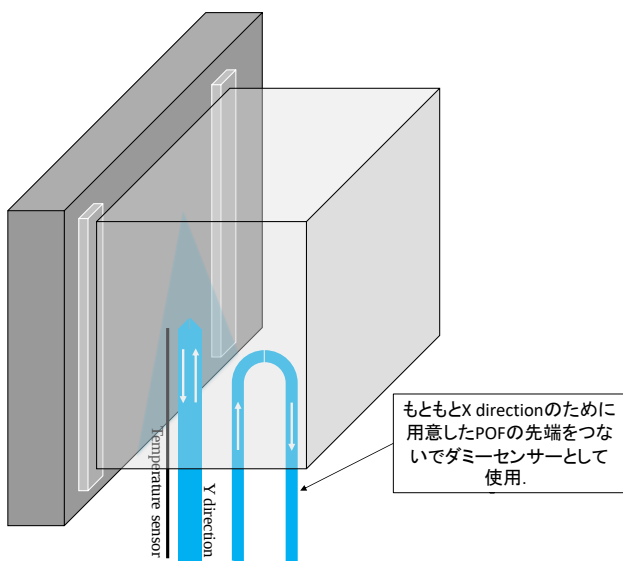


図-18 周辺環境の温度の影響を評価できるようにダミーセンサーを設置した状態 (モニタリング様式③)



図-19 ダミーセンサーを設置した状況



図-20 ダミーセンサーの設置を完了した状態

(3) ダミーセンサーの設置 (モニタリング様式③)

表-1 の知見 4 と 6 に関する情報を得るため、2019 年 7 月 18 日に、様式②で電車の光を捉える方向に向けられていた POF と、使用されていない状態だった POF の先端を黒いパイプ内で正対させて接着し、これをダミーセンサーとした (図-18 参照)。このダミーセンサーでは光専用データロガーが有する光源から送り込まれた光が、接着部位を通過する以外は何もセンシングせずにデータロガーに戻るため、その光が感じた情報は 2 本の POF (長さ約 25m) が感じた周辺の温度 (Factor 4) だけとなる。このことによって、ダミーセンサーが記録したデータと、RR センサーが記録したデータを比較すれば、周辺環境の温度の影響が評価出来ることになる。図-19 はダミーセンサーを現地でセットした際の状況で、光をブロックするためのボックスを外した際に、ボックス内には析出物が侵入しておらず、その外側では析出物の付着量が増大していた様子が確認できる。その様子は図-20 においても同様に確認できる。

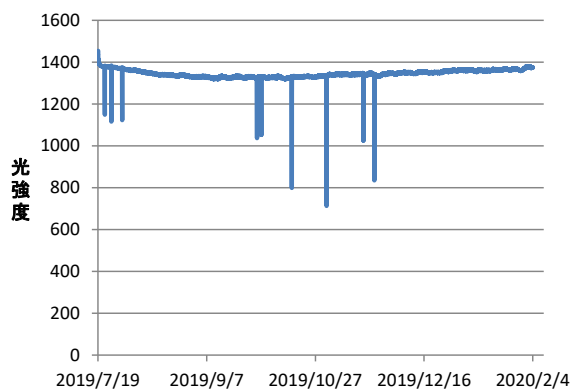


図-21 測点1のダミーセンサーの計測結果

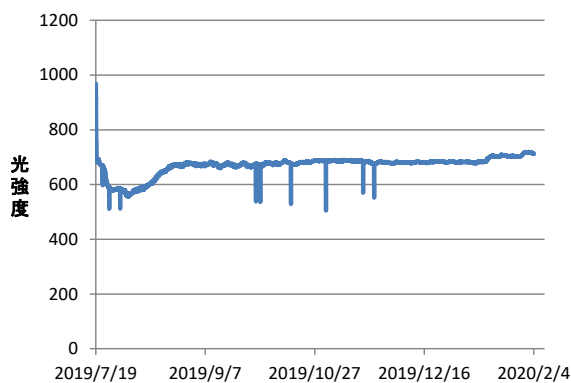


図-22 測点2のダミーセンサーの計測結果



図-23 水温の影響を調べる実験の様子

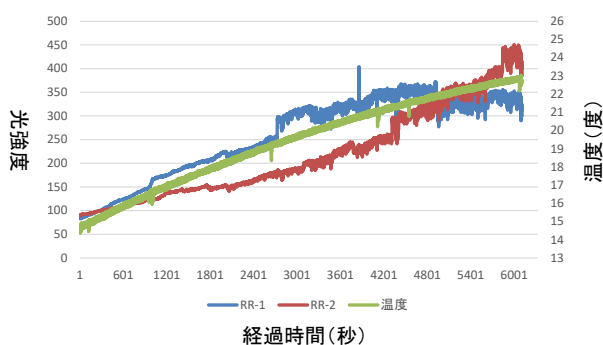


図-24 光強度と水温の関係

2019年7月から2020年2月までの期間にダミーセンサーが記録したデータを図-21、図-22に示す。測点1、測点2のそれぞれのダミーセンサーの光強度の変化は気温（図-14のピンクの線）の変化に対してほとんど相関がないことが分かる。特定の時刻における光強度の低下はダミーセンサーだけでなく、漏水を検知するRRセンサーにも発生しており、この原因はデータロガーや電源系統に原因があると思われる。このことから、RRセンサーが捉えた季節的なデータの変動はPOFが設置されていた計測経路（約25m）における気温変化に影響されたものではないことが分かる。

計測データの季節変動（表-1の知見4）の原因を確定するため、簡易実験を行った（図-23参照）。冷却したペットボトル内の水中に2つのRRセンサー（RR-1、RR-2）と熱電対を挿入し、それをボックス内に入れ外からの光が入らないようにして静置し、約100分間の計測を行った。

計測結果を図-24に示す。この図からも確認できるように、RRセンサーによって記録された光強度は水の温度と明確な相関があり、図-14で認められた光強度の季節変動は漏水の水温を直接反映したものであると評価できる。

(4) 装置の撤去とデータ変動（知見6）の原因究明

表-1の知見6に関する情報を得るため、2020年2月3日に測点1、2に設置していた装置を撤去した。撤去作業直前の測点1のボックスは図-25が示すように、その上部に漏水による析出物がべったりと付着していた。ボックスを撤去した様子は図-26が示す通りで、その内部には析出物がほとんど侵入せず、蓄積もしていないことが確認できた。また、図-27に示すように、測点2においてはRRセンサーを構成していた2本のPOFは、その接着剤の剥離（Factor 3）により機能不全の状態となっていたことが判明した。

以上のことから、測点1では電車の光を遮断するためのボックスの上部に析出物が蓄積したことで、漏水がボックス内に届かず、従ってRRセンサーが捉えたデータが次第に小さくなったことが推定される（図-28参照）。

測点2では、図-27のようにセンサー先端の接着材の剥離が認められた。この機能不全状態がどれだけの時間をかけて起こったかについては不明であるが、装置の取り付け具合、通過する電車からの振動など複雑な要因が絡んでいた可能性があり、それが2019年7月以降の計測データに影響を及ぼしていたと考えられる。



図-25 ボックス上部に蓄積した析出物



図-26 装置周辺の状態



図-27 接着剤が剥離した測点2のRRセンサー

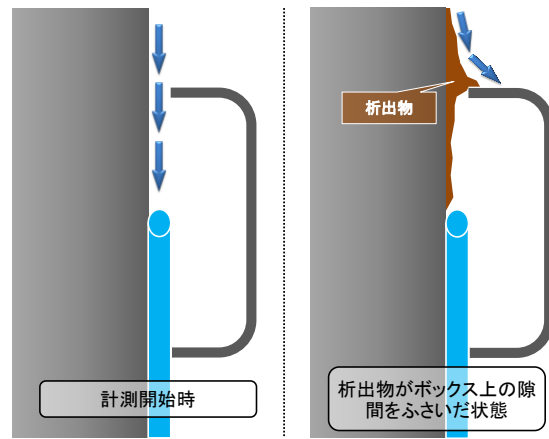


図-28 析出物の蓄積により漏水計測が影響を受けるメカニズム (測点1)

4. おわりに

本報告では、POF センサーを用いた長期的な地下鉄トンネルの漏水モニタリングの際に記録された計測データの変動傾向について、それに影響を及ぼす可能性のある4つの要因 (Factor) を取り上げ、それぞれの角度から分析を行った。その結果、基本的には2つの測点において漏水計測を可能とするRRセンサーの「水の存在を検知する」という主機能 (Factor 1) は周辺状況に問題がなければ、正常に発揮されることが確認できた。ただし、そのデータには漏水の温度 (Factor 2) が反映されていることを確認した。また、計測が長期に及ぶと、RRセンサーの製造過程で使用した接着剤 (Factor 3) に不具合が生じセンシングの機能が失われることがあること、また、漏水に含まれる物質が析出して計測装置付近に付着することで計測データに影響が出ることが判明した。さらにモニタリングを実施する場所の気温の季節変動が測点とデータロガー間のPOFの温度を変化させる点 (Factor 4) については、その影響は無視できるレベルであることが判明した。今後は、これらの事象の傾向をより深く理解し、長期的な漏水挙動の計測を高い精度で実施できる具体策を考案するとともに、測定場所を固定した計測に合わせて、漏水最上点位置の季節変動や漏水量の計測に対応できるモニタリングの仕組みを検討することが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 芥川真一：光ファイバーを利用したアナログ式 Off-Site Visualization の有効利用、On-Site Visualization のすすめ、土木技術、第72巻11号、pp.83-87、2017.11.
- 2) 芥川真一：光ファイバーを利用したデジタル式 Off-Site Visualization による任意変状の定性的評価、On-Site Visualization のすすめ、土木技術、第73巻1号、pp.82-87、2018.1.
- 3) 藤井宏和、芥川真一：光ファイバーを利用したデジタル式 Off-Site Visualization による定量的評価、On-

Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 73 巻 3 号, pp.83-87, 2018.3.

- 4) 芥川真一：光の屈折率の違いに注目した光ファイバーセンシング, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 73 巻 5 号, pp.60-64, 2018.5.
- 5) 伊藤聡, 小西真治, 今泉直也, 榎谷祐輝, 田中大介,

水原勝由, 町島祐一, 芥川真一, 増本 智紀：プラスチックファイバーセンサーを利用した地下鉄トンネルの漏水検知事例, 第 29 回トンネル工学研究発表会, 2019.11.

(2020. 8. 7. 受付)

STUDY ON MONITORING OF SUBWAY STRUCTURES USING POF SENSOR

Satoshi ITO, Shinji KONISHI, Naoya IMAIZUMI, Yuki ENOKIDANI,
Daisuke TANAKA, Katsuyoshi MIZUHARA, Yuichi MACHIJIMA,
Shinichi AKUTAGAWA and Tomonori MASUMOTO

Tokyo Metro operates a total of 195km of urban rail networks of which 167km is underground. There have been an increasing number of locations where a maintenance care has to be taken with respect to water leakage through cracks in aged tunnel linings, which might occasionally lead to damaged concrete or rusting of re-bars within the lining if proper treatment is not conducted. It is therefore regarded important that water leakage behavior be appropriately grasped over time such that periodical manual investigation and the following maintenance works can be properly planned and executed. Previous studies have shown useful results for water leakage detection using plastic optical fiber sensors. However, it may not be possible to measure accurately due to fluctuations in data observed in a long-term measurement. Therefore, in this report, the cause of the data fluctuation in a long-term measurement was investigated from several angles. As a result, it was found that temperature of ambient air and leakage water, accumulation of substance involved in leaking water and condition of adhesive used to glue two POFs, affect the measurement results in a complex way.