

光の屈折率に着目した物質相変化モニタリング に関する基礎的研究

田中良明^{1*}・芥川真一¹

¹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: tnkyshak@gmail.com

本研究グループでは、光の屈折率変化を観測できる光ファイバーセンサーを開発した。このセンサーは光の反射(Reflection)・屈折(Refraction)現象を利用するのでRRセンサーと呼んでいる。RRセンサーの利点は従来の光ファイバーセンサーとは異なる手法を用いることによって、比較的安価な装置で非常に局所的な箇所の情報を得ることが出来ることである。RRセンサーは既往研究では地盤などの物質中の水の検知を行うセンサーとして用いられてきた。本研究では物質の状態変化による屈折率の変化に着目し、このセンサーで物質の状態変化を観測できるかを調べた。更に光ファイバーセンサーの利点を活かすことで、岩盤内亀裂中の状態を観測できる可能性を考え、実験を行った。

Key Words : plastic optic fiber, refractive index, phase change, monitoring

1. はじめに

様々なインフラの広域的モニタリングに光ファイバーを利用した分布型ファイバーセンシング手法が注目されている。これらの方法¹⁾²⁾³⁾は、延長が数 km に及ぶ特殊な加工を施した 1 本の光ファイバーを一筆書き状態で構造物に設置し、特定の波長のレーザー光を光ファイバーに送ることで構造物に生じるひずみや温度変化を多数の点で感知できるメリットがある。一方で、この手法では地盤や構造物に生じている変状の内、ひずみや温度の変化を伴わない現象を計測できないというデメリットがある。この点を改善するために、著者らは数年来、光ファイバーの先端で地盤の中を直接見ることによって、これらの現象を反映した光情報を入手する方法⁴⁾⁵⁾⁶⁾を開発してきた。この方法は様々な要因によって影響を受ける光の状態 (Light State) 変化を記録する方式であることから、Light State Sensor System (略称: LS³) と呼ばれ、これまでに土粒子の動き、土粒子間にある水の濁り具合、地盤内でのセメントグラウト材料の移動、水中の気泡の移動、液状化が生じた際の土粒子の動きなどに関する定性的な状態変化を捉えることができることがわかっている⁴⁾⁵⁾。また、光ファイバーの先端を斜めにカットする形式のセンサーを用いると、屈折して先端の面外に出る光と内側で反射する光の比率が周辺物質の光の屈折率の変化に影響を受けることから、ファイバー先端にある物質

が空気か、水かを明瞭に判別することができることがわかっている⁶⁾⁷⁾。本論文では、ファイバー先端に存在する物質 (水やセメントモルタル) が液体の状態から固体の状態へ変化する相変化のプロセスをモニタリングできることがわかったのでその概要を紹介し、今後の岩盤工学問題への多様なアプリケーションが可能になることについて言及する。

2. 計測方法

著者らが提案しているプラスチック製光ファイバー (Plastic Optic Fiber, 略称 POF) を利用したセンシング手法では、様々な事象に起因する光の状態変化 (明るさや色) を光ファイバー先端で読み取る方式となっており、通常、光を供給するためのファイバーと、状態変化を読み取るためのファイバーの 2 本が対となる形式になっている。従って分布型のファイバーセンシングとは異なり、N 個の計測ポイントでモニタリングをする場合には 2N 本の光ファイバーを使用することとなる。以下に、実際に使用するハードウェアと、新たに提案している先端を斜めにカットした光ファイバーセンサーによる測定原理を述べる。



写真-1 POFを用いた光データ計測に使用する装置

(1) 光データ計測のためのハードウェアシステム

POF を用いた光データ計測のための装置一式を写真-1 に示す。LS³方式による光ファイバー専用データロガーには複数セットの発光ダイオード光の光源部と光の受光部が存在する。光ファイバーセンサーは二本の POF で構成されている。一本目のファイバーは光源の光を計測ポイントに届け、二本目のファイバーは計測ポイントの様々な要因によって影響を受ける光を読み取って受光部に届ける役割を果たす。

(2) 光の反射と屈折

本論文で提案する光データ計測の手法について解説する。ここでは、物質の光の屈折率が鍵となる。図-1 に概略的に示されているように、材料 A および B の屈折率を n_1 および n_2 とする。入射光が入射角 θ_i で A と B の境界に届くとなると光は反射と屈折により二方向に分かれる。この時、以下の関係が成立する。

$$\theta_i = \theta_r \quad (1)$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (2)$$

スネルの法則によると、 θ_i が 0 の場合、入射光 (Incident light) のエネルギーを仮に 1 とした時、反射光 (Reflected light) のエネルギー $R_{\text{reflected}}$ は、

$$R_{\text{reflected}} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (3)$$

で与えられることが知られている。従って、境界面を透過し、屈折物質 B に侵入する光のエネルギーは

$$R_{\text{refracted}} = 1 - R_{\text{reflected}} \quad (4)$$

となり、 $R_{\text{reflected}}$ と $R_{\text{refracted}}$ の両方が屈折率 n_1 と n_2 の関数であることが分かる。POF を利用したセンシングの場合、温度が一定であると仮定すると、 n_1 は POF の屈折率で一定であるため、 $R_{\text{reflected}}$ と $R_{\text{refracted}}$ は n_2 の変化によって変動すると考えてよい。この一般的な傾向は、次のセクションで示されるように、 θ_i がゼロでない場合にも成立する。

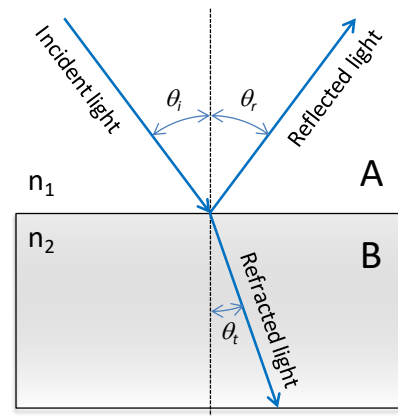


図-1 光の反射と屈折

(3) RRセンサー

二本の POF を用いた新しい光ファイバーセンサー^{6,7}を図-2 に示す。このセンサーは前項で述べた光の反射 (Reflection) と屈折 (Refraction) の原理を利用したものであることから、RR センサーと呼ぶこととする。このセンサーでは、まず L1 と示される光がファイバー1 に送られ、その一部はファイバー1 の端面を透過し、屈折して L2 として外部に出る。反射した光は L3 としてファイバー2 の方向に向かう。L3 の一部はファイバー1 を出て L3' としてファイバー2 の端部に到達し、ここでもう一度、屈折光 L4 と反射光 L5 に分かれる。最終的に光データロガーに記録される光 L5 の明るさは、POF の屈折率 1.49 が一定であると仮定すると、周辺物質の屈折率 n_2 に主に依存する量になる。芥川ら⁹⁾は、RR センサーの周辺に存在する物質が空気 (屈折率 1.0003) から水 (屈折率 1.33) に変わる事象や、センサー部が最初は水に覆われていて、その水がゆっくりと蒸発して無くなるプロセスにおいて、その状態変化が明瞭にモニタリングできることを示している。現在、このセンサーは手作業で作成されているため、同条件でもセンサー毎に異なる値が出る。よってこのセンサーは値の変化に着目して、単位は無単位として扱っている。

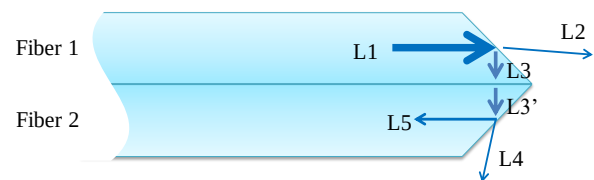


図-2 RR センサーの構造と光の経路

3. 水の相変化モニタリング

(1) 水の凍結・融解

RR センサーの適用範囲を探るための最初の実験例として、水が氷に変わり、水に戻る過程で L5 がどのよう

に変化するかを観測した。室内でプラスチックカップに水を入れた後に、冷凍庫に入れた。L5の光強度の変化は水サンプルが冷凍庫に保管された時点から観測された。冷凍庫内は約-35度 に設定されておりプラスチックカップ内の温度は約二時間かけて約-30度まで下がった。写真-2に示すように水サンプルを冷凍庫から取り出し約1時間に渡ってL5の変化を観測した。凍結過程と融解過程における測定結果を図-3、図-4に示す。

図-3より、L5が初期値の約50から約96分頃に800を超える値に急激に上昇したことから、水サンプル内の凍結前面が約96分でRRセンサーの位置に到達したと判断できる。この数値の上昇はRRセンサー周囲の水(屈折率1.33)が凍結され氷(屈折率1.31)になったことを反映するものだと考えている。対して、図-4の融解過程ではRRセンサー周囲の氷が解けて水に変化する過程が記録されており、約19分頃にL5の光強度が急激に低下している。図-3の初期値と図-4の融解後の値に差が生じているが、これは水サンプルを融解させるために移動したことによって光ファイバー内の光路が変化したから、光強度の初期値と最終値に差が生じたと考えている。



写真-2 冷凍庫から取り出した水サンプル

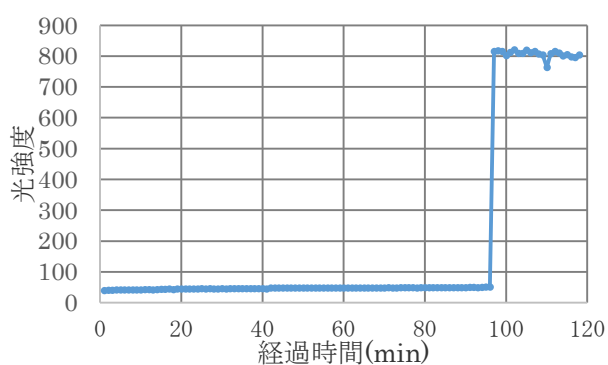


図-3 凍結過程の光強度

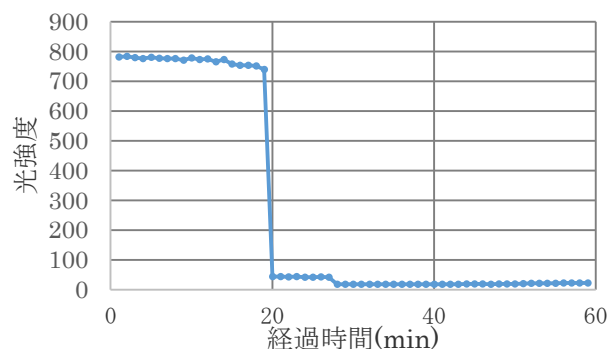


図-4 融解過程の光強度

(2) 水を含む砂層の凍結

本実験では、写真-3に示すようにビーカー内に豊浦砂を入れて下半分を飽和させた供試体を作成し、水を含む下層と、水を含まない上層のそれぞれにRRセンサーを設置した。その後、供試体全体を約-35度の冷凍庫にいれ、凍結プロセスにおけるL5の光強度を観測した。

図-5に示すように、水を含んだ下層で観測された光強度は段階的に上昇した。その原因は水の凍結とそれに伴う体積増加に伴って、RRセンサー周囲の砂粒子が微妙に動いたことを示している可能性があるが詳細は不明である。一方、図-6に示すように、乾燥した上層では光強度の急激な増加は見られなかった。これは、上層のRRセンサーの周りに水がないという事実に関連していると考えられる。データの小さな変化の原因は、下層の凍結に伴う膨張による上層内の砂粒子の微細な動きを反映したものであると考えられる。



写真-3 RRセンサーを設置したサンプル

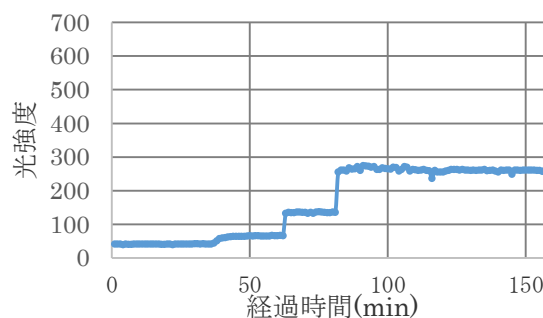


図-5 水分を含んだ下層内で記録された光強度

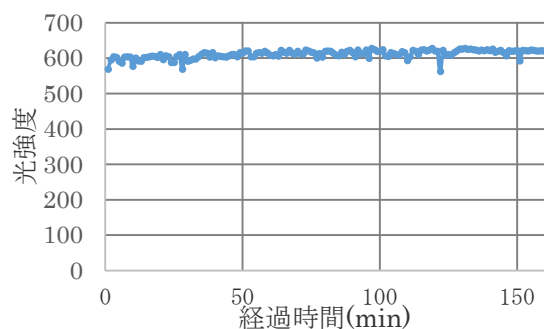


図-6 乾燥した上層内で記録された光強度

(3) 多点観測例

本実験では、ガラス製の立方体容器(150mm×150mm×150mm)に高さ100mmまで豊浦砂を入れ、全体を飽和させた供試体を作成した。本実験ではRRセンサーによってサンプル内の凍結面の進行をモニタリングできるかを調べた。写真-4に示すように、四つのRRセンサーを同一平面上の異なる点に設置することで凍結前面がx軸方向、z軸方向についてどのような進展するのかを見た。これらのRRセンサーの三次元x-y-z座標はそれぞれ、ポイント1(75mm, 75mm, 75mm)、ポイント2(75mm, 75mm, 50mm)、ポイント3(100mm, 75mm, 50mm)、ポイント4(125mm, 75mm, 50mm)である。

図-7に示す結果は、凍結前面が最初にポイント4、二番目にポイント3、三番目にポイント2、最後にポイント1に到達したことを示している。この順序は各RRセンサーと供試体境界面との間から予想される順序と一致しない場合があるが、その結果はRRセンサー周囲の飽和地盤がどのように凍結したかの時系列データを示している。この結果より、地中に設置した複数のRRセンサーを用いれば地盤の凍結プロセスの進捗状況を判断することができると言える。

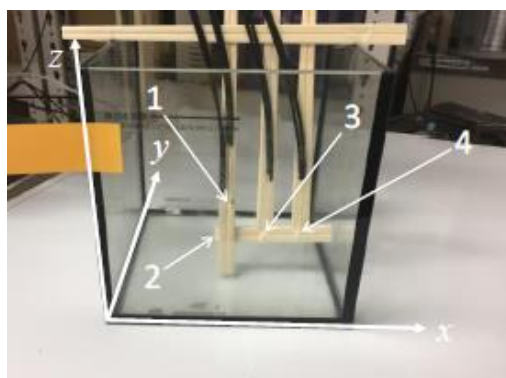


写真-4 RRセンサーを設置した測定ポイントの位置

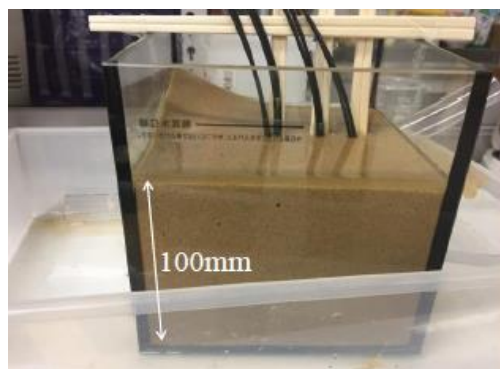


写真-5 凍結前のサンプル

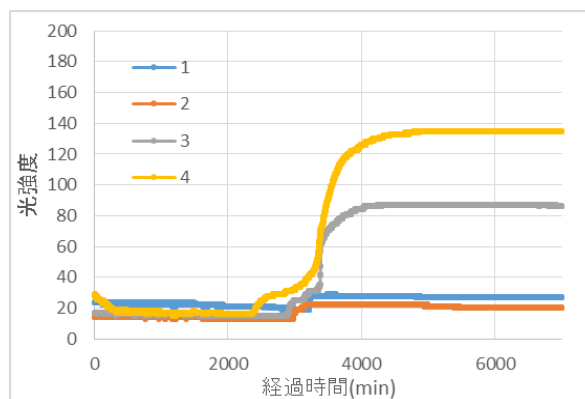


図-7 複数のRRセンサーを用いた飽和供試体の凍結実験結果

(4) 狭窄部での活用例

RRセンサーは先端のセンサー部分が縦1mm×横2mmのサイズであることから岩盤内亀裂などの狭窄部に設置することも検討できる。本実験では実験室で模擬的な狭窄部を作成しそこに水を流し込むことで、岩盤内亀裂に水が存在する状態を再現した。冷凍庫内でその水を凍結させることでRRセンサーが仮想的な地盤内亀裂中の水の凍結を観測できるかを調べた。

写真-6は実験室で作成した模擬的な狭窄部である。ガラス板にRRセンサーを設置し、もう1枚のガラス板で挟んで幅2mmの狭窄部を作成した。ここで光ファイバーの被覆部を合わせた直径2mmであるから、センサー部分以外の光ファイバーが2枚のガラス板で挟まれている状態である。センサーの部分は水の表面張力によりガラス板と接していた。

写真-7は実験装置を横から見たものである。左のセンサーはデータロガーのch1に繋がっていて、底面からの高さは5mmである。右のセンサーはデータロガーのch2に繋がっていて底面からの高さは10mmである。また水深は3mmとした。表面張力によりch1のセンサーは実験開始時から水に接していた。

計測結果を図-8に、実験後の状態を写真-8に示す。ch2のセンサーは実験中ずっと空気中にあったので大きな変化は生じなかった。本実験では前出の凍結実験の結果とは異なり、水に触れていたch1の光強度が凍結によ

て減少した. この結果については現在研究を行っている. しかし水の凍結による光強度が変化したデータが得られたので, 岩盤内亀裂中などの狭窄部の水の状態変化をRRセンサーは読み取れたといえる.



写真-6 狭窄部の再現

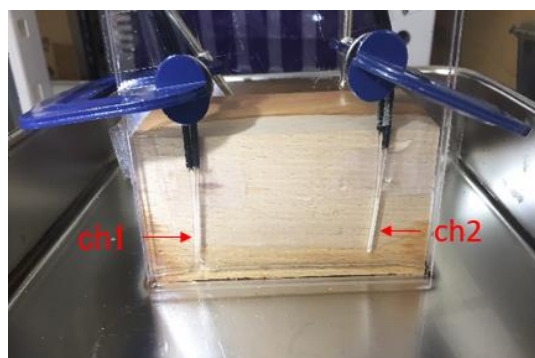


写真-7 実験前



写真-8 実験後

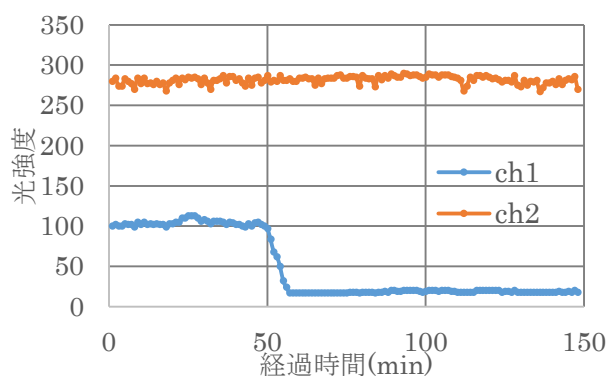


図-8 狭窄部の水の凍結

4. セメントモルタルの相変化モニタリング

本実験では, RR センサーを用いてセメントペーストが固化する過程を観測することができるかどうかを調べた. ポルトランドセメントに水を加え, 攪拌した直後に RR センサーを設置して, 観測を開始した. 水セメント比は 50% に設定した. また RR センサーは底面の直径 45 mm 高さ 35 mm の供試体の中央部に設置した. 写真-9 は実験開始直後の供試体の様子である.

二つの供試体を硬化させたときにどのように光強度が変化したかを示す結果を図-9 に示す. どちらの供試体も同じような傾向の光強度の増減を示した. 供試体 1 は 325 分後, 供試体 2 は 387 分後, 次の 1 分間で光強度が急増した. その後光強度は減少傾向を示したがこの期間の光強度の推移の原因は不明であり, 現在も研究が続けている.

二つの RR センサーの数値が異なる理由は, 現段階では RR センサーは手作業で作られており, 各 RR センサーに構造的な差異が生じることを避けられないためである. しかしながら, 本実験の結果から RR センサーによってセメントモルタルの水和反応の進行の途中でセンサー付近の自由水が極端に少なくなった現象が読み取れていると考えられる.



写真-9 作成直後のセメント供試体

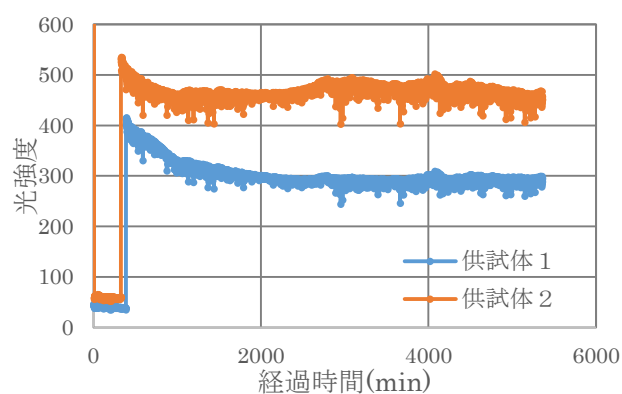


図-9 セメントの養生プロセス

5. 結論

本論文では、プラスチック製光ファイバー2本の先端を斜めにカットして作成できるRRセンサーを提案し、その計測原理の概要と数種類の実験的計測例を示した。その結果、RRセンサーの周辺に存在する任意物質の光の屈折率変化を明瞭に捉えることができることを示した。具体的には、水が凍結する現象、氷が融解する現象、セメントモルタルが水和反応によって次第に固化してゆく現象の一部などを光データの変動として計測できることがわかった。これによって、実地盤における凍結・融解現象のモニタリングや、コンクリート構造物の施工時における型枠内へのフレッシュコンクリートの充填、その水和反応の進捗状況などについて有益なデータを取得できる可能性が出てきた。RRセンサーの特性を活かすことで地盤内部や岩盤へのモニタリングに活用することができると考えられる。これらの可能性は実施工の品質管理、効率化、危険箇所のモニタリングなどに寄与することから、RRセンサーの様々な現場への実用化に向けた更なる研究を続けていく方針である。

参考文献

- 1) Hill, K.O., Y. Fujii, D.C. Johnson, B. S. Kawasaki : Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection fiber fabrication. Appl. Phys. Lett. 32 (10): 647, 1978
- 2) Meltz, G. et al. : Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. Opt. Lett. 14 (15): 823, 1989
- 3) Funnell, A., Xu, X., Yan, J., and Soga, K. : Simulation of BOTDA and Rayleigh COTDR systems to study the impact of noise on dynamic sensing. Int. J. Smart Sens. Intell. Sys. 8 (3), 2015
- 4) Akutagawa, S., A. Nishio and Y. Matsumoto, A. Takahashi and Y. Machijima : A new method for reading local deformation of granular material by using light, Proceedings of the 48th US Rock mechanics and Geotechnical Engineering Symposium, eds. Labuz, J. F. et al, ARMA 14-7723, Minneapolis, 2014
- 5) Akutagawa, S. Machijima, Y. : A new optical fiber sensor for reading RGB intensities of light returning from an observation point in geo-materials, Proceeding of the 49th US Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Symposium, ARMA 15-784, San Francisco, 2015
- 6) Akutagawa, S., Machijima, Y., Sato, T. and Takahashi, A. : Experimental characterization of movement of water and air in granular material by using optic fiber sensor with an emphasis on refractive index of light, Proceedings of the 51st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, ARMA 17-313, San Francisco, 2017
- 7) 芥川真一, 村越堅, 町島祐一, 佐藤毅, 高橋厚志 : 光の屈折率の違いを利用した水の検知に関する基礎的研究, 地盤工学会関西支部, Kansai Geo-Symposium, Vol.5, 2017

FUNDAMENTAL STUDY ON MATERIAL PHASE CHANGE MONITORING BASED ON CHANGE IN REFRACTIVE INDEX OF LIGHT

Yoshiaki TANAKA and Shinichi AKUTAGAWA

In this paper, we propose an RR sensor that can be made by obliquely cutting the tip of two plastic optical fibers, and outlined the measurement principle and several kinds of experimental measurement examples. As a result, it was shown that the refractive index change of the light of arbitrary substance existing around the RR sensor can be clearly grasped. Since these possibilities can also contribute to quality control and efficiency of actual construction, we believe that examination by field test will be necessary from now on.