

# 光ファイバーを用いた充填検知センサーの長距離伝送化

Brush up of filling sensor using plastic optical fiber for longer distance

角田晋相\*1 吉岡圭介\*2 松島 睦\*3

## 概 要

コンクリート打設やPC グラウト注入など充填性が品質に影響する施工においては、型枠やシース内部にセンサーを設置して充填状況を確認しながら施工することがよく行われる。

計測技術としては、プラスチック製光ファイバーを用いて光の強さを計測することで、センシング部の状態を確認するシステムが開発<sup>1)</sup>されており、コンクリートやグラウトの充填を検知するセンサーとしても実用化している<sup>2)~7)</sup>。

しかし、プラスチック製の光ファイバーはケーブル内を伝わる光の損失が大きく、充填検知センサーのケーブル長は数十mに限定していた。そこで、光ファイバーに与える光源とセンサー形状の見直しを行い、ファイバーケーブル内の光の伝送距離を長距離化することで、充填センサーの用途拡大を図り、シールド工事における二次覆工とセグメント間の中詰充填工の充填確認に適用した。

key words : 光ファイバー、充填検知、裏込め充填

## 1. はじめに

構造物のコンクリート打設やグラウト注入の施工では、ジャンカや未充填箇所の発生を防止するため、充填性が懸念される場所にセンサーを埋め込み、施工時の充填確認がよく行われる。充填検知システムとして、写真-1に示すプラスチック製光ファイバー（POF：Plastic Optical Fiber）によるセンシング技術<sup>1)</sup>を用いた充填センサー（以下、POFセンサー：図-1）を開発し実用化<sup>2)~7)</sup>しているが、プラスチック製光ファイバーは軽量で曲げに強く現場への適用性が高い反面、伝送損失が大きく長距離伝送に向かないといった課題がある。そのため、現場では POF センサーのセンシング部と測定器を結ぶファイバーケーブルの長さに限りをつけて運用している。

そこで、開発した充填検知システムの計測器から光ファイバーに与える光源やセンシング部の形状について再検討を行い、ファイバーケーブルを通して検出する充填検知に必要な光の伝送距離を長距離化する技術を構築することで、これまでよりも離れた場所で充填確認を行うことが出来るようにした。

本報では、POF センサーの長距離伝送の適用性について検証した室内実験と、充填検知システムの用途拡大としてシールド工事における二次覆工とセグメント間の中詰充填工に適用した事例について報告する。

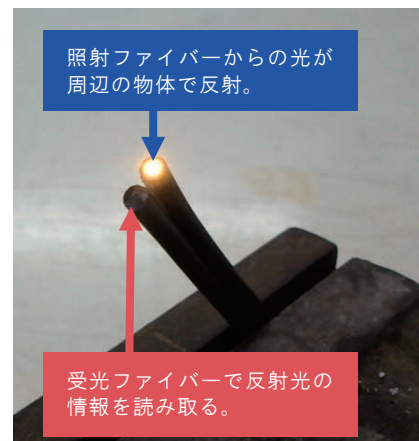


写真-1 POFによるセンシング技術

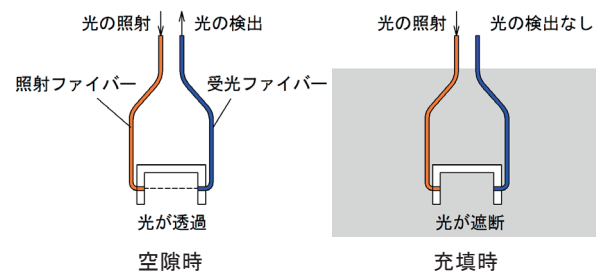


図-1 POFセンサーの概要

\*1 Shinsuke TSUNODA

技術本部技術研究所 主席研究員

\*2 Keisuke YOSHIOKA

名古屋支店土木部 副所長

\*3 Mutsumi MATSUSHIMA

名古屋支店土木部 作業所長

## 2. 充填検知システム

### 2.1 光の計測

充填検知システムの構成を写真-2 に示す。計測方法は、計測器に内蔵している LED 光源から照射する光が POF センサーを通して受光部に返ってくる光の強さ(光強度)を計測することで、センシング部の状態を検知する。

充填検知においては、図-1 に示すように空隙時はセンシング部を透過する光を受光部で検出するが、充填時には光が遮断されて光を検出しなくなる。計測においては、空隙時は光強度として値が得られ、光強度の値がゼロになることで充填を判断する。



写真-2 充填検知システムの構成

### 2.2 光ファイバーの特性

プラスチック製光ファイバーの光の低減率と伝送距離の関係を図-2 に示す。プラスチック製光ファイバーは伝送損失が大きく、50m の伝送距離で光の強さは約 10% 程度まで低下する。そのため、ファイバーケーブルが長くなると、光源から照射した光がケーブル内で減衰し受光部に届かなくなる。POF センサーをコンクリートの充填検知として用いる場合には室内での要素実験結果<sup>5)</sup>より、適用範囲はケーブル長 45m までとしていた。

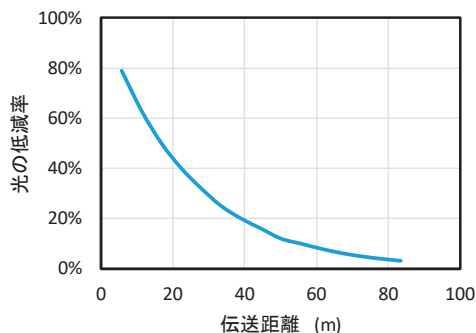


図-2 光の低減率と伝送距離の関係

プラスチック製ファイバーの伝送特性を図-3 に示す。ファイバーの特性として、波長により伝送損失が異なり、光の三原色の中では緑色が最も伝送損失が小さい。

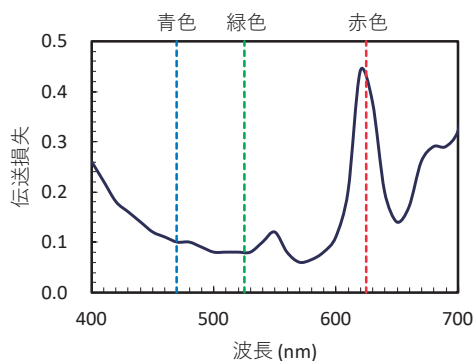


図-3 プラスチック製光ファイバーの伝送特性

## 3. 要素実験

### 3.1 LED 光源の変更

使用する計測器は、光の三原色である赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の各成分が測定できるように、LED 光源は 3 色合成の白色光を使用しているが、本システムでの充填検知は光の有無による判定のため色の識別は必要としない。

そこで、計測器の LED 光源を 3 色合成の白色光から緑色光 (G) 単色に変更することで、大幅な改良を行わずに同電力で 3 倍の照射強度を与えることができた。また、光源色には POF 内の伝送損失が小さい緑色光を採用することで、ファイバー内を伝達する光の減衰抑制を図った。

LED 光源を変更した計測器を写真-3 に示す。8 箇所ある計測口のうちの 4 箇所 (ch.1~ch.4) の LED 光源を緑色に変更した。同一の POF センサーを用いて、緑色光と白色光の LED 光源により受光部に返ってくる光強度を測定した結果を図-4 に示す。緑色光にすることで、白色光の約 3 倍の光強度が得られることが確認できた。



写真-3 LED 光源を変更 (ch.1~ch.4) した計測器

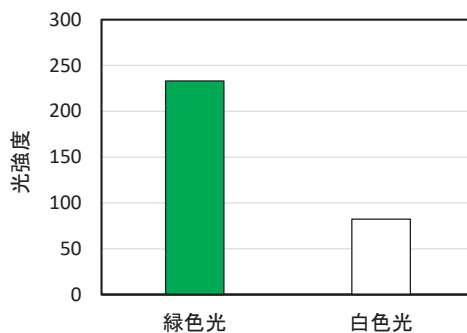


図-4 光源色の違いによる光強度の比較

### 3.2 光強度の距離減衰確認実験

光の長距離伝送化に向け、POF センサーについて光強度の距離減衰を把握する実験を行い、充填検知センサーとして適用可能な伝送距離を確認した。

POF センサーのセンシング部の形状を図-5に示す。充填を検知する部分である透過距離Dが長いほど、照射ファイバーからの光が散乱し、受光ファイバーへ入射する光が損失するため、計測器の受光部に到達する光強度が低下する。ここでは、写真-4に示す透過距離の異なる2種類のセンサー形状について実験を行った。実験ケースを表-1に示す。POF センサーの長距離伝送として、100m以上の伝送距離を確認するため、実験では100~150mのファイバーケーブルの長さで計測を行った。

実験によるファイバーケーブル長ごとの光強度の計測結果を図-6に示す。実験では、センサーの製作精度や測定チャンネルごとの光源強度のばらつきなどの要因を考慮し、受光部で検出する光強度の値が10以上を充填検知センサーとしての評価基準とした。

実験の結果、LED 光源を緑色光にすることで、透過距離がD=12mmではファイバーケーブル110mまで、D=6.8mmでは120m程度まで基準値を満足する結果が得られた。

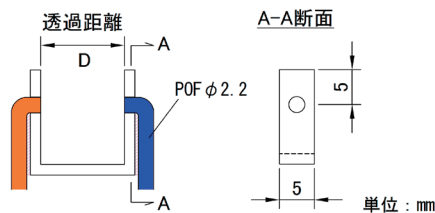


図-5 センシング部の形状

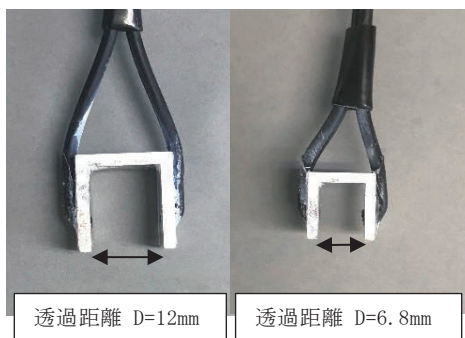


写真-4 実験に用いた POF センサー

表-1 実験ケース

形状 透過距離D	計測器の仕様		ファイバーケーブルの長さ L (m)
	光源LED	使用CH.	
6.8 mm	緑色色	1~4	100, 105, 110, 120, 130, 140, 150
	白色色	5~8	
12 mm	緑色色	1~4	100, 110, 120, 130, 140, 150

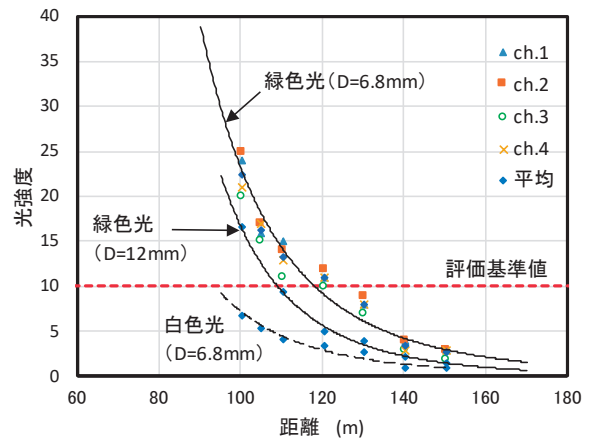


図-6 実験における光強度の測定結果

### 3.3 中詰充填材の反応実験

充填検知センサーとしての用途拡大として、シールド工事における二次覆工とセグメント間の中詰充填工への適用を想定し、POF センサーの充填材に対する反応実験を行い、充填検知性能を確認した。

充填材は、実施工で使用するエアームタルとした。エアームタルの配合および物性値を表-2、表-3に示す。性状であるフロー試験の状況を写真-5に示す。実験では、センサーを配置したテストモールドにエアームタルを流し込むことで、センシング部への回り込みとセンサーの反応状況を確認した。写真-6に実験状況を示す。実験には、センシング部の透過距離D=12mmとD=6.8mmのPOFセンサーを用い、ファイバーケーブルは110mとした。

表-2 エアームタルの配合 1m<sup>3</sup>当り

A 液				B 液		エアームタル
セメント	クレイサンド	減水剤	水	起泡剤	水	
320 kg	12 kg	1 kg	368 kg	1 kg	20 kg	500 L

表-3 エアームタルの物性値

フロー値 (φ80×H80シリンダー)	比重	空気量	圧縮強度 σ28
22×22 cm	0.71	50%	1.0 N/mm <sup>2</sup>

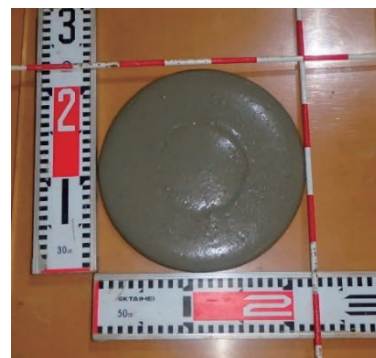


写真-5 エアームタルの性状(フロー試験)

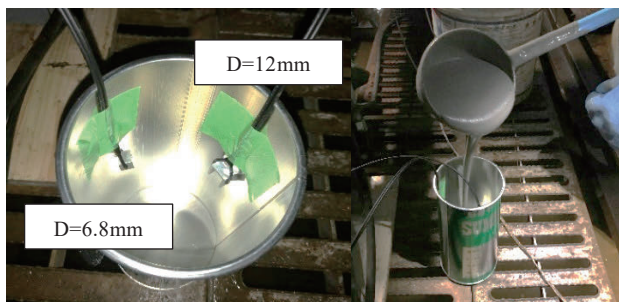


写真-6 充填材の反応実験状況

エアームタルの充填反応結果を図-7に示す。実験では、透過距離 D=12mm、D=6.8mm のセンサーとも充填を検知する反応を確認できた。実験での空隙時に計測器で受光する光強度は、前述の距離減衰確認実験時に比べて低い値となっており、透過距離 D=12mm では値が 3 程度であった。エアームタルに対しては、透過距離の狭い D=6.8mm のセンサーでも反応が検知できたことから、POF センサーのファイバケーブル長が 100m 程度の長距離化が必要となる中詰充填工には、受光できる光強度の高い D=6.8mm のセンサーを適用することとした。

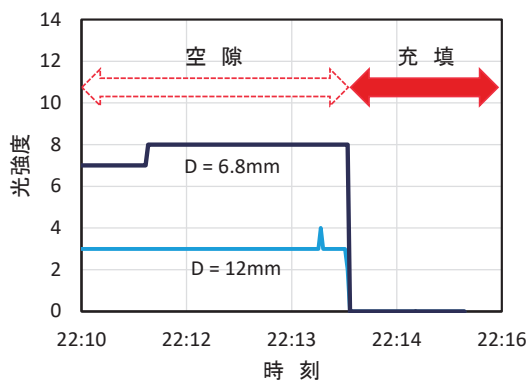


図-7 エアームタルの充填反応結果

#### 4. 現場適用事例

##### 4.1 施工概要

POF センサーを導入したシールド工事現場の概要を以下に示す。

- 工事名：犬山系導水路 A 管小牧市大字上末から春日井市鷹来町地内間 2000 耗整備工事
- 発注者：名古屋市上下水道局
- 施工者：銭高・アイサワ・昭和土木特別共同企業体
- 適用工種：二次覆工中詰充填工

図-8 に現場の施工平面図、図-9 に敷設する管路の断面を示す。現場は延長 L=2,380m のシールド工で、外径  $\phi$  2,950mm の鋼製セグメントによるシールドトンネル構築後、内側に呼径  $\phi$  2,000mm (外径  $\phi$  2,061mm) の二次覆工管を敷設し、中詰充填工としてエアームタルを充填する工事である。二次覆工の施工概要を図-10 に示す。POF センサーは天端部における充填確認を目的として、充填施工 1 スパンにつき妻側の間仕切壁から 20m 地点と 80m 地点の 2 箇所配置し、計測器に接続するための余長を含めファイバケーブル長はそれぞれ 35m と 95m とした。POF センサーの設置状況を写真-7 に示す。

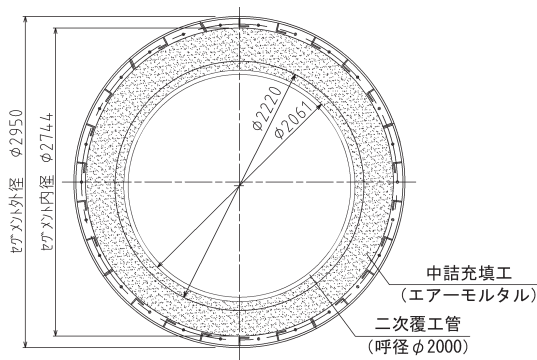


図-9 敷設管路の断面図

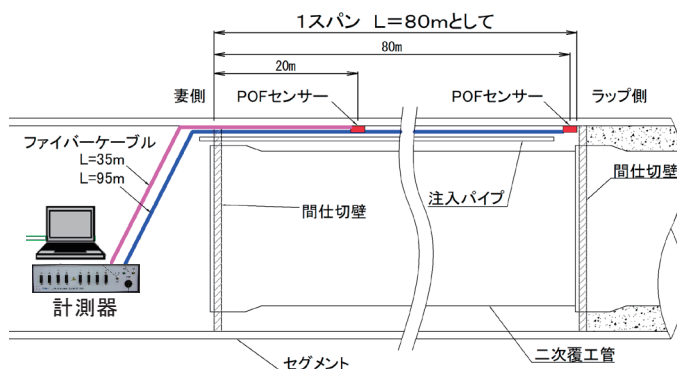


図-10 二次覆工の施工概要



写真-7 POF センサーの設置状況

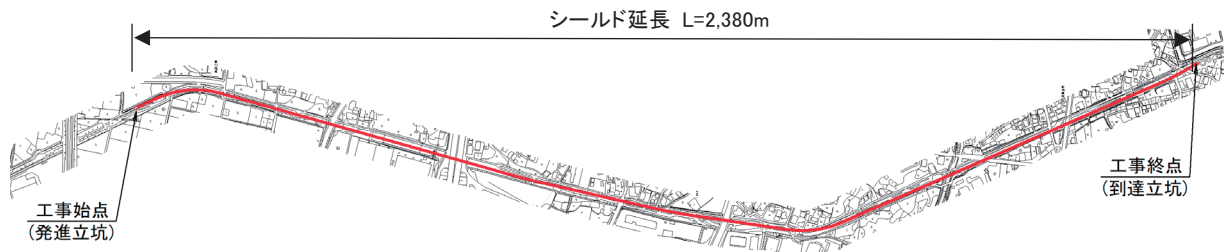


図-8 シールド施工平面図

## 4.2 充填計測

エアームタルの注入状況を写真-8、計測器による充填計測の状況を写真-9に示す。充填計測は、エアームタルを充填するスパンの妻側間仕切壁から7m程度離れた所に計測器とパソコンを配置して行った。

充填検知システムによる計測記録を図-11（ファイバーケーブル長 L=95m）、図-12（ファイバーケーブル長 L=35m）に示す。いずれのPOFセンサーも空隙から充填にかけて反応が確認でき、エアームタルの充填を検知することができた。



写真-8 エアームタル注入状況



写真-10 タブレット端末による遠隔操作



写真-9 充填検知システムによる計測状況



写真-11 タブレット端末による遠隔監視

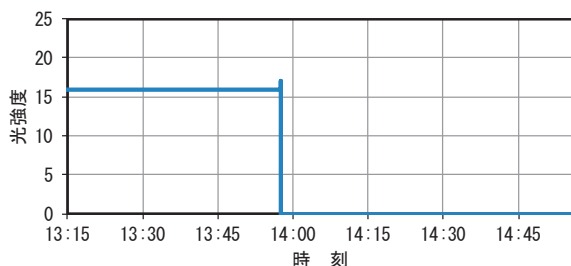


図-11 充填計測記録(L=95m)

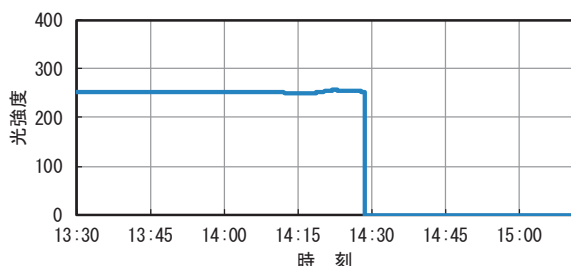


図-12 充填計測記録(L=35m)

## 5. まとめ

要素実験の結果、計測器から光ファイバーに与える光のLED光源を白色光から緑色光に変更する簡易な改良で、計測できる光強度が約3倍に上昇することが確認できた。光源色の変更とセンサー形状の見直しにより、これまで45mとしていた計測可能なケーブル長を120mまで長距離化することができた。

実施工においてもエアームタルの充填に対して確実な反応を示し、95mの長距離計測も問題なく行えた。

また、現場施工では無線LANによる場内ネットワークを構築しタブレット端末による遠隔操作・監視することで、担当者の負担軽減が図れた。

今後、積極的に現場適用を行い、実績を積み重ねるとともに本システムの適用範囲を広げていきたい。

**【参考文献】**

- 1) 松本優平、西尾彰宣、町島祐一、高橋厚志、芥川真一：  
粒状体に生じる諸変状を光の強度変化としてモニタリ  
ングするための基礎的実験、地盤の環境・計測技術に関  
するシンポジウム 2012 論文集、pp. 15-20、地盤工学会  
関西支部、平成 24 年 11 月
- 2) 角田晋相、白石雅嗣、岡本剛士、芥川真一：光ファイ  
バーによる PC グラウト充填確認の適用性、土木学会  
第 69 回年次学術講演会、V-038、pp. 75-76、平成 26  
年 9 月
- 3) 角田晋相、細野順平、渡辺淳、芥川真一：光ファイバ  
ーによるグラウト充填検知技術の開発、第 24 回プレ  
ストレストコンクリートの発展に関するシンポジウ  
ム論文集、pp. 361-364、プレストレストコンクリート  
工学会、平成 27 年 10 月
- 4) 角田晋相、細野順平、八若幹彦、渡辺淳：光ファイバ  
ーによるグラウト充填検知システムの開発、錢高組技  
報 No. 40、pp. 3-8、2015
- 5) 角田晋相、原田尚幸：光ファイバーを用いたコンクリ  
ート充填検知技術の開発（その 1）－要素実験による  
光ファイバーの適用性検討－、土木学会第 72 回年次  
学術講演会、VI-860、pp. 1719-1720、平成 29 年 9 月
- 6) 原田尚幸、角田晋相：光ファイバーを用いたコンクリ  
ート充填検知技術の開発（その 2）－充填検知性能確  
認実験－、土木学会第 72 回年次学術講演会、VI-861、  
pp. 1721-1722、平成 29 年 9 月
- 7) 角田晋相、原田尚幸、一井崇：光ファイバーを用いた  
コンクリート充填検知システムの開発、錢高組技報  
No. 42、pp. 3-8、2017