

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

Development of Detection System at Optical Concrete Filling Sensor

角田晋相*¹ 原田尚幸*² 一井 崇*³

概 要

コンクリート構造物の品質を確保するためには、未充填部などの欠陥を防止することが必要であり、施工ではコンクリートの充填状況を確認しながら打設を行うことが重要である。

現場では、型枠内に充填検知センサーを埋め込み、コンクリート打設時の充填確認がよく行われる。一方、計測技術では、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され実用化されてきている。

そこで、コンクリートの充填状況を検知する手法として光ファイバーによるセンシング技術の適用性について検討し、実用化に向けて開発を行った。

key words : 光ファイバー、コンクリート打設、充填検知

1. はじめに

コンクリート構造物の施工では、ジャンカや未充填箇所の発生を防止するため、型枠内に充填検知センサーを埋め込み、コンクリート打設時の充填確認がよく行われる。一方、計測技術では、プラスチック製光ファイバー (POF: Plastic Optical Fiber) を用いて光の状態をセンシングするシステムが開発¹⁾され実用化²⁾³⁾されている。

そこで、コンクリート打設時の充填状況を検知する手法として光ファイバーによるセンシング技術に着目し、実施工への適用性について検討した。

本報では、POFを用いたセンサー (以下、POFセンサー) によるコンクリート充填検知システムの開発に向けて実施した室内実験⁴⁾ および現場実証実験⁵⁾ について報告する。

2. システム概要

光ファイバーによるセンシング技術の概要を図-1に示す。センサーは2芯のファイバーケーブルで構成され、計測システムはセンシング部における物体の反射や透過による光の強さ (光強度) を測定することで状態を確認する技術である。

写真-1に充填検知システムの構成を示す。計測には、光計測器と計測管理用パソコンを使用する。

図-2にコンクリート充填検知用に検討した POF センサーの概要を示す。センシング部の形状は、互いの光ファイバー先端を対向させて配置する構造とした。

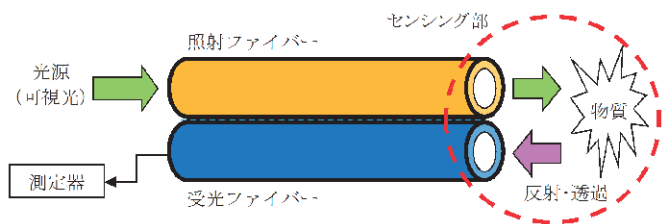


図-1 光ファイバーによるセンシング技術の概要



写真-1 充填検知システムの構成

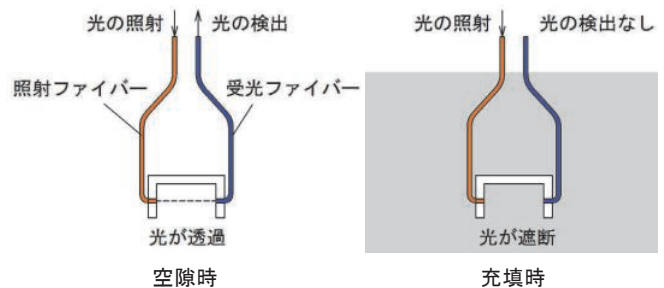


図-2 POF センサーの概要

*1 Shinsuke TSUNODA

技術本部技術研究所 主席研究員

*2 Naoyuki HARADA

技術本部技術研究所 副所長

*3 Takashi ICHII

東京支社土木支店土木部 作業所長

充填の判定方法は、光源を与えた照射ファイバーの先端から放たれる光がコンクリートの充填で遮られることにより、受光ファイバー側での光の検出がなくなることで行う。

製作した POF センサーを写真-2 に示す。コンクリートの充填検知にあたっては、打込み時の飛散や流動等によりセンシング部にコンクリートが付着し、充填が完了する前に検知不良を引き起こすことが懸念される。そのため、センシング部には撥水コートを実施し、コンクリートの付着を防止した。

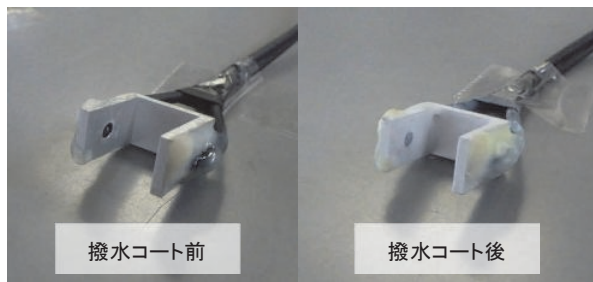


写真-2 POF センサー

3. 要素実験

3.1 実験目的および概要

実験に使用したセンサーの材料諸元を表-1 に示す。充填検知センサーに用いる POF は、ガラス製ファイバー (GOF : Glass Optical Fiber) に比べて軽量で曲げに強く、大口径で接続に高い精度が要求されないという特徴があるため現場への適用性が高い。しかし、POF は伝達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。

また、打込み時のコンクリート付着を防止するために塗布する撥水コート剤に半透明のものを用いた場合、センシング部を光が透過する際に光強度が低下する。

そこで、センシング部の透過距離およびファイバーケーブルの長さによる光の検出能力を把握するために室内での要素実験を行った。

表-1 POF センサーの材料諸元

材 料	種 別	仕 様	性 能
ファイバーケーブル	POF	ファイバー/被覆外径 1.0/2.2 (mm)	伝達損失 ≤ 0.18 dB/m
撥水コート剤	Type-A	半透明(乳白色)	接触角 170°
	Type-B	透明	接触角 100°

実験におけるセンシング部の形状を図-3 および写真-3 に示す。また、光強度計測の実験ケースを表-2 に示す。実験では、透過距離 D とケーブル長 L を因子にとり、空隙の状態を検出できる光強度を計測した。

光強度計測の実験概要を図-4 に示す。実験は、周囲からの光の影響を遮断するため、センシング部を暗所に設置して光強度の計測を行った。

ここでは、センシング部に塗布する撥水コート剤を表-1 に示す Type-A (半透明) とし、撥水コートによって受光する光強度の低減量を確認した。

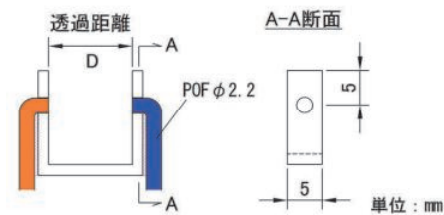


図-3 センシング部の形状

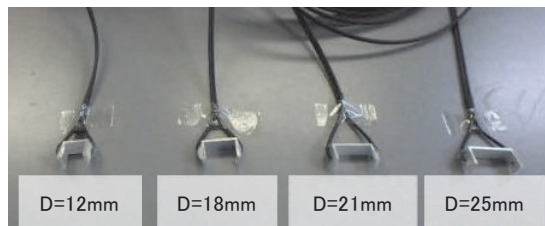


写真-3 実験におけるセンシング部の形状

表-2 実験ケース

透過距離 D (mm)	ケーブル長 L (m)	撥水コート
12	5, 15, 30, 45	無 / 有
18	5, 15, 30, 45	無 / 有
21	5, 15, 30, 45	無 / 有
25	5, 15, 30, 45	無 / 有

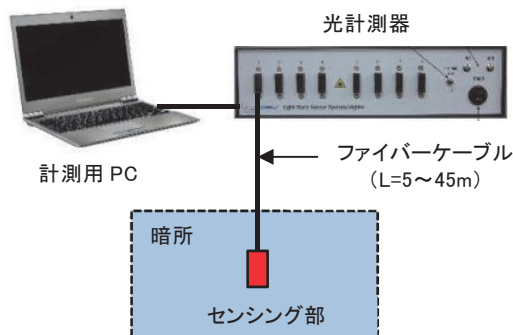


図-4 光強度計測の実験概要

3.2 実験結果

撥水コート剤塗布後のセンサーにおける光強度の計測結果を図-5 に示す。センシング部の透過距離については、間隔が広くなるに従い受光する光強度が小さくなり、D=12mm から D=18mm にかけては大きく低下した。

ケーブル長 L=5m での受光強度に対する各長さの受光強度の比率を減衰率として示した関係を図-6 に示す。受光できる光強度はケーブルの長さに依存し、ケーブル長 L=45m では L=5m に対し 2 割程度まで光強度が減衰する。

実際の現場では、ケーブル長が数十 m 程度必要になる

場合も考えられるため、ケーブル長 $L=45\text{m}$ においても光強度が十分検出できている透過距離 $D=12\text{mm}$ を採用することが望ましいと考えられる。

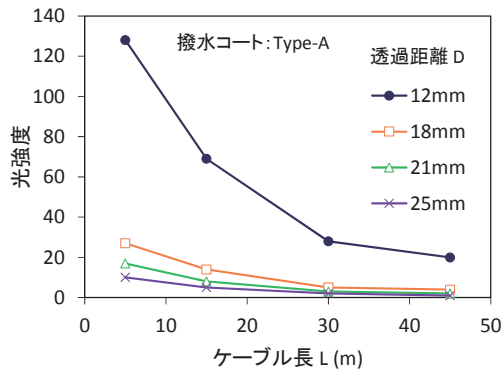


図-5 光強度の計測結果

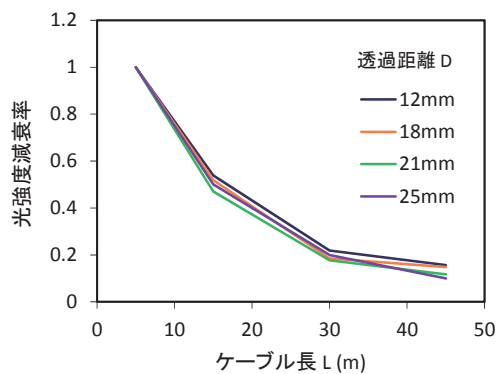


図-6 ケーブル長と光強度低減率の関係

撥水コート剤の塗布による光強度の低減率を図-7 に示す。半透明の Type-A の撥水コート剤では、受光する光強度は透過距離に応じて小さくなる傾向にあり、平均すると撥水コート剤の塗布により光強度は 26.5% に低減することが確認できた。Type-B の撥水コート剤は透明のため、塗布することによる光強度の低下はなかった。

また、2種類の撥水コート剤に対し、一部撥水コートを施した試験片を生コンクリートの中に挿入する実験を行い、撥水効果を確認した。

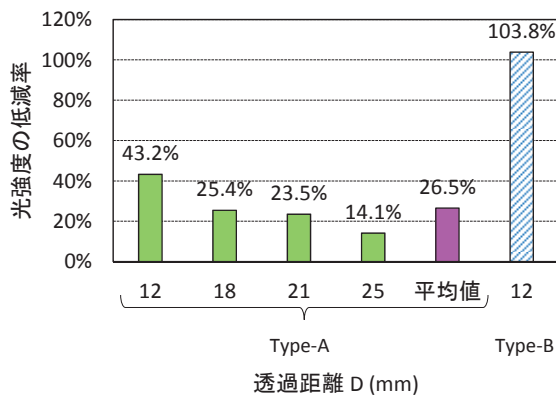


図-7 撥水コート剤による光強度の低減率

実験後の試験片の状態を写真-4 (Type-A)、写真-5 (Type-B) に示す。接触角 170° の Type-A には生コンクリートの付着は見られなかったが、接触角 100° の Type-B では部分的に付着が見られた。そのため、撥水コート剤の選定に当たってはコンクリートの充填実験を行い、実用性を検証することとした。



写真-4 Type-A の試験片の状態



写真-5 Type-B の試験片の状態

4. コンクリート充填実験

4.1 実験目的および概要

POF センサーのコンクリート充填および空隙が生じた場合の反応を確認するため、実験用型枠へのコンクリート打設実験を実施した。

実験用型枠には写真-6 に示すボックス型充填試験器を用い、流動障害は使用せずにコンクリートの充填・流動試験を実施した。



写真-6 実験用型枠

実験に使用した POF センサーの仕様を表-3 に示す。センシング部の形状は、前述の要素実験で実施工への適用性が高いと判断した透過距離 D=12mm を基本とし、D=18mm、D=21mm についても実験を行った。

コンクリートの付着を防止するための撥水コート剤は、Type-A、Type-B の 2 種類を用いた。

実験の手順を図-8 に示す。POF センサーは A 室の上部に設置し、コンクリートの打込みおよび締固めによる充填に対する反応と、B 室への流動により空隙が発生した場合の反応を確認した。

実験では、コンクリートの打込み開始前から B 室への流動が終了するまでの間、光強度の計測を行った。

表-3 実験センサーの仕様

センサー No.	透過距離 D (mm)	撥水コート剤
No.1-①	12	Type-A (接触角170°,半透明)
No.1-②	18	Type-A (接触角170°,半透明)
No.1-③	21	Type-A (接触角170°,半透明)
No.2	12	Type-B (接触角100°,透明)

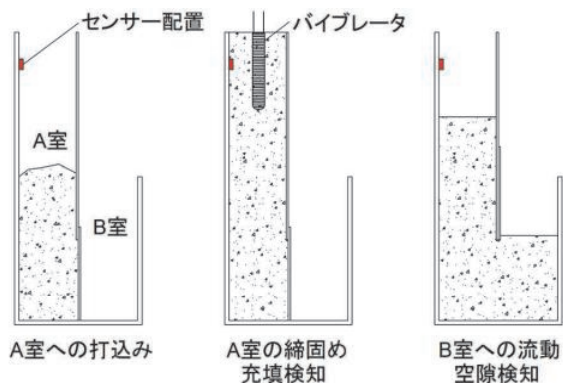


図-8 実験手順

4.2 実験結果

撥水コート剤として接触角 170° の Type-A を使用した No. 1 シリーズの計測結果を図-9 に示す。No. 1 シリーズでは、全てのセンサーでコンクリートの到達時に反応があり光強度が低下したが、写真-7 に示すように打込み時にはコンクリート内の空隙から光が透過していたため光強度の値は 1~2 を示していた。

コンクリート締固め時の状況を写真-8 に示す。バイブレータにより締固めを行うことで、コンクリート内の空隙がなくなりセンシング部の光が完全に遮断されて光強度がゼロになった。

また、A 室で充填・締固めを行ったコンクリートを B 室へ流動させ、A 室のコンクリート充填面をセンサー位置から低下させた時点で光強度が上昇し、センシング部に空隙が生じたことに対する反応が確認できた。

撥水コート剤として接触角 100° の Type-B を使用した

No. 2 センサーの計測結果を図-10 に示す。

計測の結果、No. 2 センサーでは、打込みによりコンクリートが到達した時点から光強度が低下し、締固めを行うことで光強度がゼロとなり充填に対する検知はできたが、その後、流動による空隙発生に対しては反応が見られなかった。

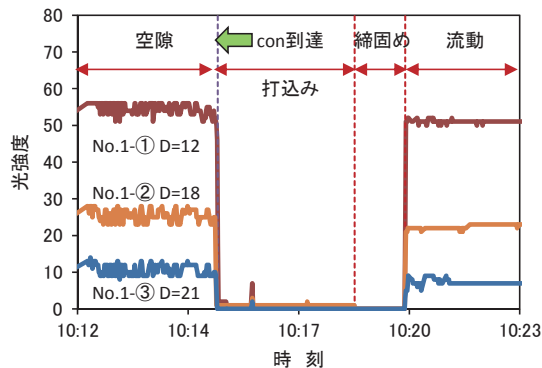


図-9 No.1 シリーズの計測結果



写真-7 打込み時の状況



写真-8 締固め時の状況

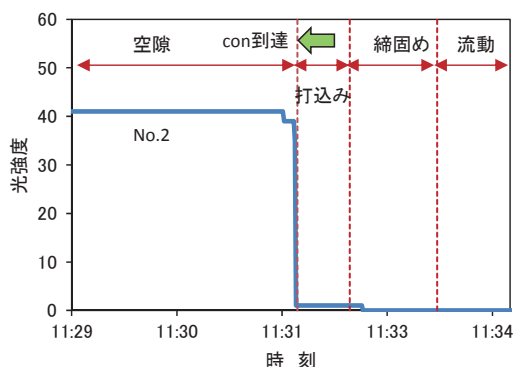


図-10 No.2 センサーの計測結果

5. 現場実証実験

5.1 実験概要

室内での実験結果から、実施工での充填検知に適していると考えられる No. 1-① (透過距離 $D=12\text{mm}$ 、撥水コート剤 Type-A) のセンサーを実際の施工現場に導入し実用性を検証した。

導入現場の概要を以下に示す。

工 事 名 : 大月バイパス桂川上部工事
 工事場所 : 山梨県大月市坂瀬地先
 工事内容 : PC片持箱桁製作工 $L=124\text{m}$
 発 注 者 : 国土交通省関東地方整備局

センサーの導入位置を図-11に示す。

導入位置はPC上部工の張出施工部と側径間との閉合部で、センサーはコンクリートの充填性が懸念されるウェブケーブルのシース下部に配置した(図-12)。

センサーの配置を図-13に示す。現場では、従来技術としてよく使用されている振動デバイス型の充填検知センサーも併せて設置し、コンクリート充填の検知性能を比較した。センサー設置状況を写真-9、写真-10に示す。

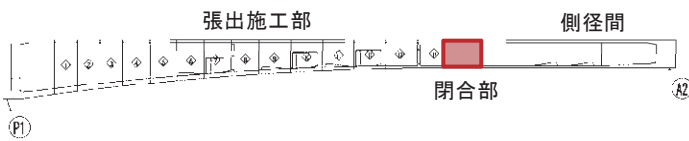


図-11 センサーの導入位置

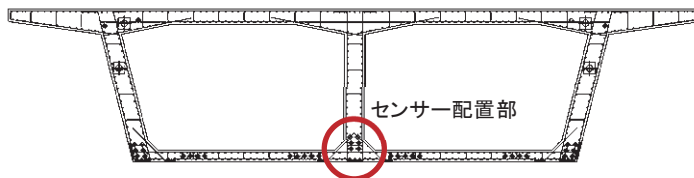


図-12 センサーの配置箇所

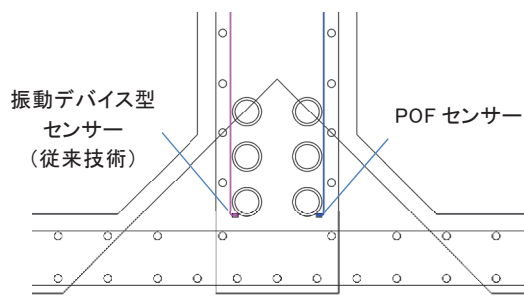


図-13 センサー配置詳細図

5.2 実験結果

POFセンサーおよび振動デバイス型センサーの充填計測結果をそれぞれ図-14、図-15に示す。POFセンサーは、現場での実施工においても光強度がゼロに低下することでコンクリートの充填を検知することが出来た。

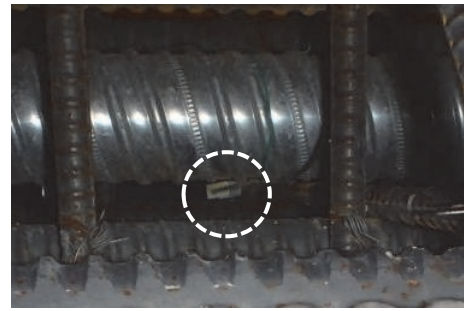


写真-9 POFセンサー設置状況

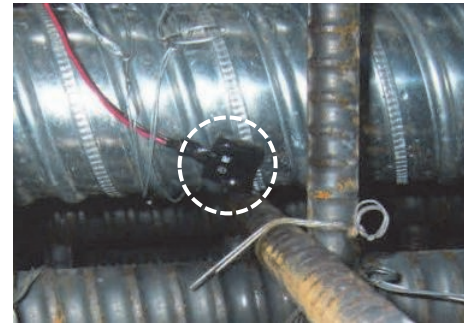


写真-10 振動デバイス型センサー設置状況



写真-11 充填検知計測状況

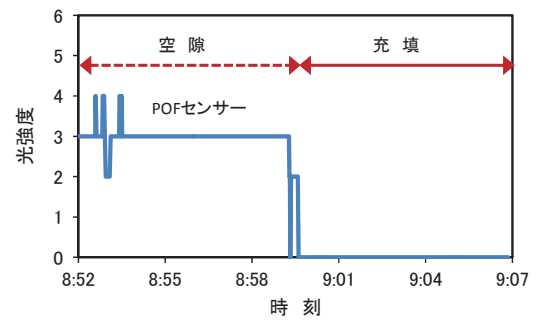


図-14 POFセンサーの計測結果

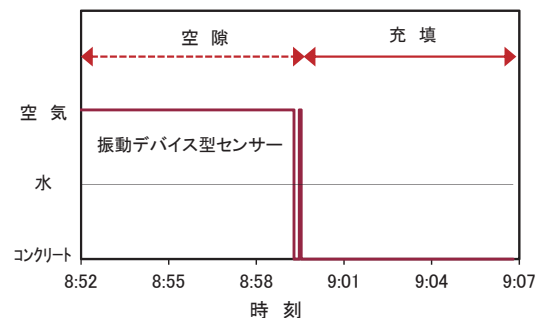


図-15 従来技術の計測結果

また、従来技術である振動デバイス型センサーともほぼ同時刻においてセンサーの反応が見られ、充填検知に対して同等の性能を有していることが確認できた。

6. まとめ

本システムの開発において実施した室内実験および現場実証実験の結果から、POF センサーの仕様としてセンシング部の透過距離を $D=12\text{mm}$ とし、接触角 170° の撥水コーティング剤を塗布することが実用的であることが確認できた。

実施工においてもコンクリートの充填に対して確実な反応を示し、従来技術とも同等の充填検知性能が確認でき、本システムの実用性が検証できた。

今後、積極的に現場適用を行い、実績を積み重ねていきたい。

【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、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
- 3) 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、銭高組技報 No. 40、pp. 3-8、2015 年
- 4) 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－、第 72 回土木学会年次学術講演会、pp. 1719-1720、平成 29 年 9 月
- 5) 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－、第 72 回土木学会年次学術講演会、pp. 1721-1722、平成 29 年 9 月