

# 光ファイバーによるグラウト充填検知システムの開発

## Development of Detection System at Optical PC Grout Filling Sensor

角田晋相\*1 細野順平\*2 八若幹彦\*3 渡辺 淳\*4

### 概 要

近年、PC グラウトの品質および充填性を向上させるため、シース内にセンサーを埋め込み、施工時においてグラウト充填状況の確認が行われることが多くなってきている。

そこで、PC グラウ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に着目し、グラウト充填検知システムを構築した。

本稿では、光ファイバーを用いたセンサーによるグラウト充填に対する検知性能を確認するために実施したグラウト注入実験と PC 橋梁工事への適用事例について報告する。

key words : PC グラウト、光ファイバー、充填確認

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) 構造物においては鋼材の腐食防止やコンクリートとの一体性を確保するため、シース内にはグラウトを隙間なく充填する必要がある。そのため、シース内にセンサーを埋め込み、施工時においてグラウト充填状況の確認が行われることが多くなってきている。

一方、計測技術では光ファイバーにより光の状態をセンシングするシステムが開発され実用化に向けて検討が進められている<sup>1)</sup>。

そこで、PC グラウ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に着目し、実施工への適用性について検討した。

### 2. 光ファイバーによるセンシング技術の概要

図-1 に光ファイバーによるセンシング技術 (以下、光ファイバーセンサー) の計測概要を示す。センサーは 2 芯の光ファイバーで構成され、物体の反射による光の強さを測定することでセンシング部の状態を確認する技術である。

計測方法は、照射用のファイバーに光を与えて先端から放射される光の反射や透過による光の情報 (光強度の変化) を受光用のファイバーを通して読み取ることで状態の変化を検知する。

センシング部の形状は、2 本のファイバーを平行に配置する Twin Fiber 方式とそれぞれのファイバーを対向して

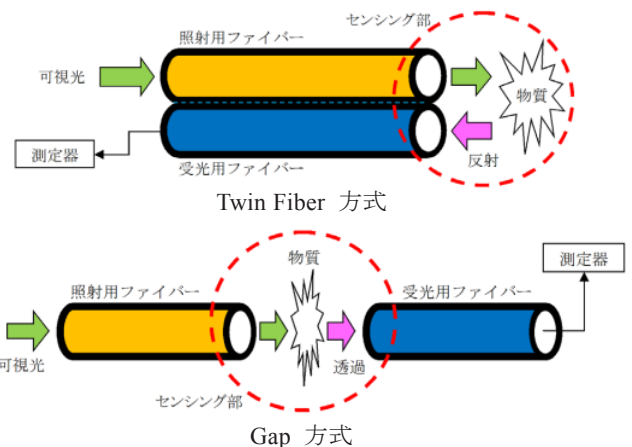


図-1 センシング技術の概要



写真-1 計測装置

配置する Gap 方式を用意し、グラウトの充填検知センサーとして適切な形状を実験により選定した。

\*1 Shinsuke TSUNODA

技術本部技術研究所 主任研究員

\*2 Junpei HOSONO

大阪支社土木統轄部 副所長

\*3 Mikihiko YAWAKA

東京支社土木支店土木部

\*4 Jun WATANABE

土木事業本部技術部 部長

表-1 室内モデル実験の材料諸元

グラウト材		試験体			計測点	
種別	JP漏斗流下時間	材質	内径	延長	光ファイバーセンサー	従来型センサー
高粘性型	14~23 s	半透明PE	70 mm	2.5 m	3箇所	3箇所

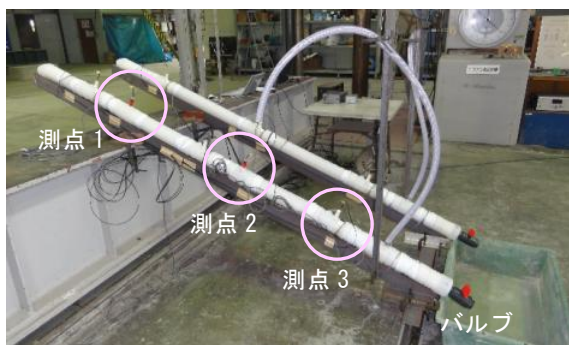


写真-2 室内モデル試験体

3. グラウト注入実験

3.1 室内モデル実験

(1) 実験内容

光ファイバーセンサーのグラウト充填に対する反応を確認するため、小規模モデルによるグラウト注入実験を行った。

モデル試験体を写真-2に示す。試験体はPCケーブルの下り勾配部を模擬し、20°の勾配で延長は2.5mとした。

光ファイバーセンサーの形状と試験体への取付け状況を図-2および写真-3に示す。

室内モデル実験では、Twin Fiber方式を採用し、センサーの先端はグラウトの先流れ時にセンシング部への付着を防止するため、光ファイバーをシース内面から外側へオフセットして配置した。

グラウトの充填計測点は3箇所とし、一般的に普及している温度センサーを応用したグラウト充填検知センサー（MSセンサー；以下、従来型センサー）も用いて比較した。

実験に用いた材料諸元を表-1に示す。グラウト材は高粘性型のものを使用し、試験体にはφ70mmの半透明ポリエチレン製シースを用いた。

実験のフローを図-3に示す。グラウト注入は、試験体上端から自然流下により行い、下端に設けたバルブからグラウトを排出することで繰り返し充填による検知を行った。これにより、先流れなどにより一度充填された区間に空隙が生じた場合における検知の可否を確認した。

実験は、試験体内を充填した状態で終え、グラウトの硬化後にシースを解体して目視による充填状況の確認を行った。

(2) 実験結果

各計測点の充填計測結果を図-4~図-6に示す。

ここで、光強度は物理量ではなく、階調を表しているため無単位である。

全計測点において、グラウトの充填および空隙に対し

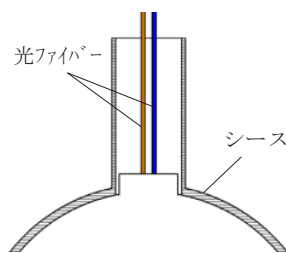


図-2 光ファイバーセンサーの形状



写真-3 センサーおよび取付状況

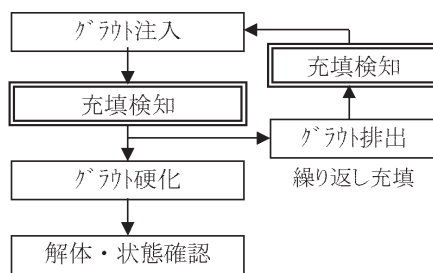


図-3 室内モデル実験のフロー

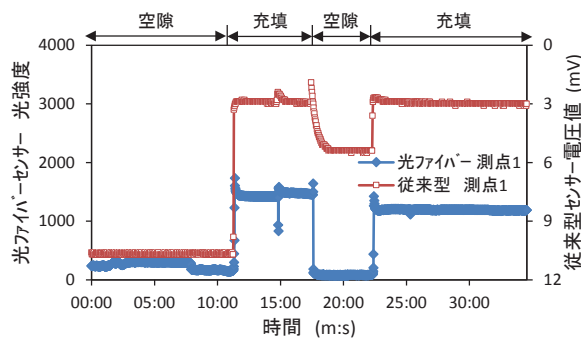


図-4 測点1の計測結果

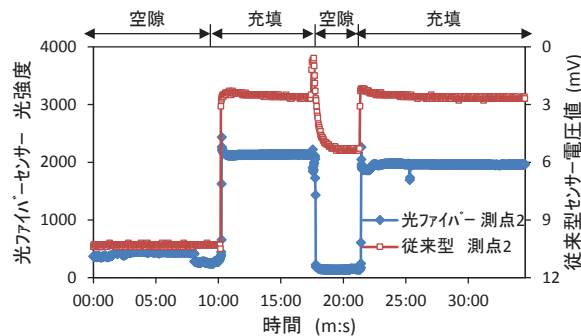


図-5 測点2の計測結果

て値が大きく変化しており、グラウト通過時のセンサー反応後に空隙が生じる状況も検知できることが確認できた。また、従来型センサーとも同様の反応を示すことが確認できた。

グラウト注入時の詳細な計測記録を図-7に示す。Twin Fiber方式では、グラウト充填の進行に伴ってセンサーと光の反射面であるグラウト界面の距離が短くなり反射光が強くなる傾向が見られた。これにより、注入時に空隙の程度についても把握することが可能であると考えられる。

グラウト硬化後に解体した試験体内部の状態を写真-4に示す。センサー部にはグラウトが充填されていることが確認できた。

室内モデル実験では、光ファイバーセンサーのグラウト充填検知に対する性能が確認できたが、充填時に計測される光強度の値は計測点ごとに異なり、充填完了に対する閾値の設定に課題が残った。

### 3.2 実物大グラウト充填試験

#### (1) 試験概要

丹波綾部道路由良川橋才原地区上下部工事において、PCグラウトの実施工に先立ち充填性を確認する実物大グラウト充填試験に光ファイバーセンサーを導入し、充填検知性能を確認した。

試験に使用した材料の諸元および試験状況を表-2、写真-5に示す。試験体には半透明のポリプロピレン製シースを用い、グラウト材は超低粘性型を使用した。

試験のフローを図-8に示す。試験は、実際のケーブル配置形状で、シース内を真空にした状態でグラウト注入を行い、グラウトの硬化後に試験体を切断し内部のグラウト充填状態を確認した。

試験に用いた光ファイバーセンサーの仕様を表-3に示す。センサーは試験体の勾配変化点に2箇所設置し、センシング部の形状はそれぞれ異なる検知方式とした。

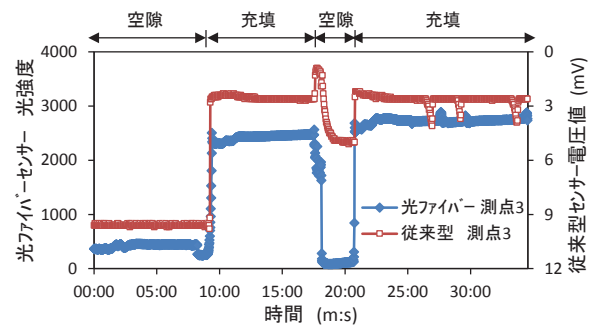


図-6 測点3の計測結果

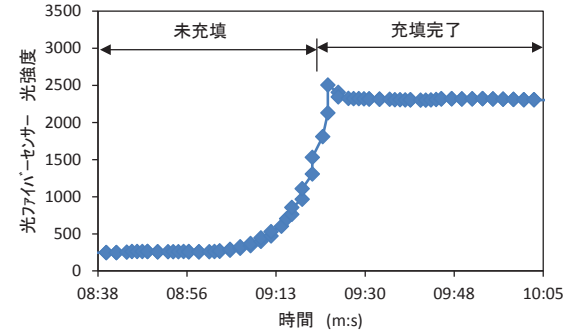


図-7 注入時の計測記録



写真-4 試験体内部の充填状態

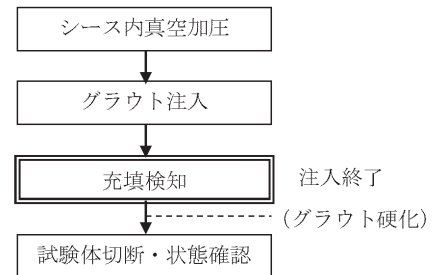


図-8 試験のフロー

表-2 実物大グラウト充填試験に用いた材料諸元

グラウト材		試験体			計測点	備考
種別	JP漏斗流下時間	材質	内径	延長	光ファイバーセンサー	
超低粘性型	3.5~6.0 s	半透明PP	106 mm	131.5 m	2箇所	真空グラウト



写真-5 実物大グラウト充填試験



表-3 光ファイバーセンサーの仕様


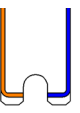


測点	センサー1	センサー2
計測方式	Twin Fiber方式	Gap方式
先端形状		
シース内取付状況		
判定基準	光強度の増加	光強度の低下(0)



写真-6 センサーの配置

充填の検知方式は、室内モデル実験で用いた Twin Fiber 方式と Gap 方式の 2 種類とし、先端にはグラウトの先流れ時の付着を防止するため撥水加工を施した。

Gap 方式では、対向する 2 本の光ファイバー間にグラウトが入り込むことで、照射用ファイバーからの光が遮断され、受光用ファイバーを通して検出される光強度の値が 0 となることで充填完了を判断することとした。

(2) 試験結果

各センサーのグラウト充填計測結果を図-9 および図-10 に示す。

Twin Fiber 方式では、センシング部にグラウトが到達した時点で一時的に光強度が増加したが、その後、光強度は 0 に低下したままとなった。これは、注入ポンプの脈動により飛散したグラウトが、シース内面からオフセットした空間内に侵入し、光ファイバーの先端に付着したため、以降の検知が不能になったと考えられる。

一方、Gap 方式のセンサーでは、グラウト到達時に光強度の値が低下し、その後しばらくは値の変動が続いた。このことから、グラウト到達後のポンプ圧送にともなうグラウトの流動により、シース内において空隙と充填が繰り返される状況が検知できている。

グラウト硬化後に取り外したセンサーの状態を写真-7~写真-9 に示す。Twin Fiber 方式では、オフセットした空間内部にグラウトが入り込んでいた。Gap 方式では、センシング部までグラウトが充填されていることが確認できた。

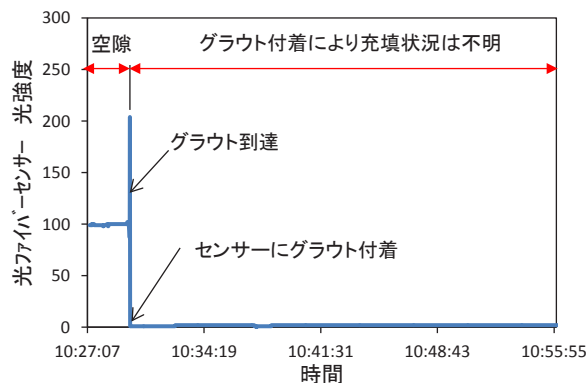


図-9 Twin Fiber 方式の計測結果

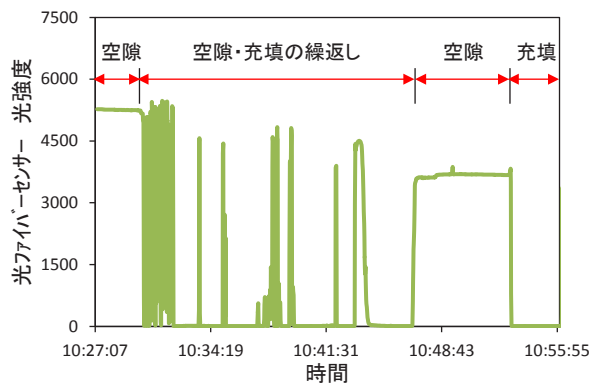


図-10 Gap 方式の計測結果



写真-7 充填後のセンサー状態(Twin Fiber 方式)



写真-8 充填後のセンサー状態(Gap 方式)



写真-9 Gap 方式の充填状態

また、切断した試験体の状態を写真-10に示す。シース内全体がグラウトで充填されていることが確認できた。

以上の結果から、グラウトの充填検知にはGap方式のセンサーが適していると判断し、実用化に向けて検討を進めた。

#### 4. 現場適用事例

##### 4.1 光ファイバーセンサーの実用化

グラウト充填実験の結果を基に実用化した光ファイバーセンサーを写真-11に示す。

センシング部はGap方式を採用し、シースには排気管を利用して取り付ける構造とした。

##### 4.2 外ケーブルへの適用事例

###### (1) 工事概要

工 事 名：中部横断自動車道田原川橋上部工事  
 工事場所：山梨県南巨摩郡身延町下田原地先  
 発 注 者：国土交通省関東地方整備局  
 適用橋梁：PC4径間連続ラーメン箱桁橋（橋長L=238m）

###### (2) 適用ケーブル

光ファイバーセンサーを適用したケーブルの配置およびグラウトの概要を図-11、表-4に示す。

センサーは主ケーブルである外ケーブルの一区間に設置しグラウトの充填検知計測を行った。グラウトは超低粘性型を用い大気圧下で注入を実施した。

###### (3) 充填計測結果

グラウト充填の計測記録を図-12示す。計測では、グラウトの空隙と充填に対し確実に反応し、充填完了と判定できる状態で注入を終えた。

外ケーブルでは、グラウトの硬化後にセンサーを取り外すことができ、シース内部を確認した結果、写真-13に示すようにセンシング部にはグラウトが充填されていた。



写真-10 切断した試験体の充填状態

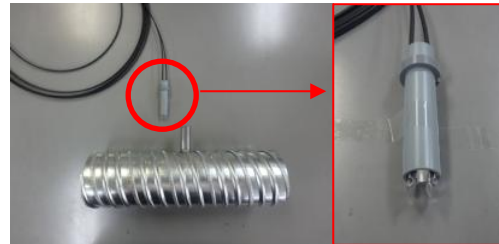


写真-11 実用化した光ファイバーセンサー



写真-12 外ケーブルの充填計測状況

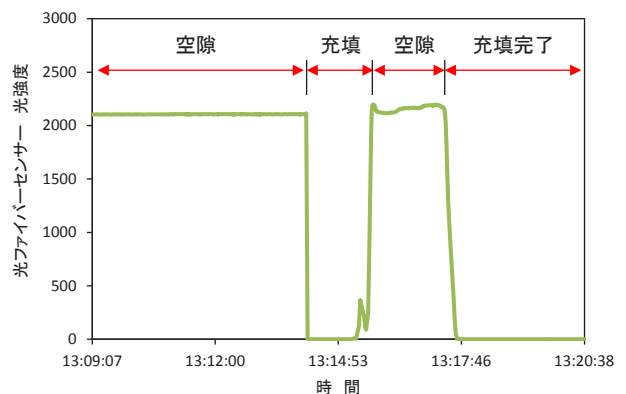


図-12 外ケーブルの充填計測記録



写真-13 グラウト充填状況

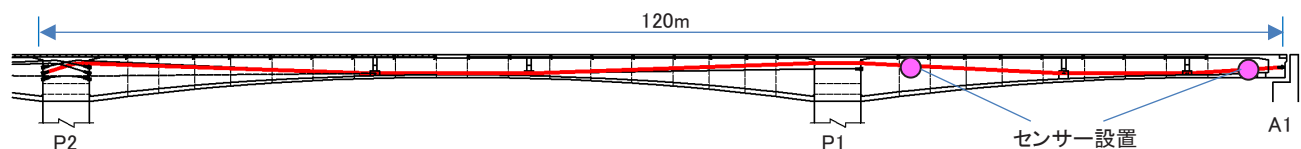


図-11 外ケーブルの鋼材配置縦断面図

表-4 グラウトの概要

対象鋼材			グラウト材	注入方法
ケーブル種別	仕様	延長		
外ケーブル	19S15.2	120m	超低粘性型	大気圧下での注入

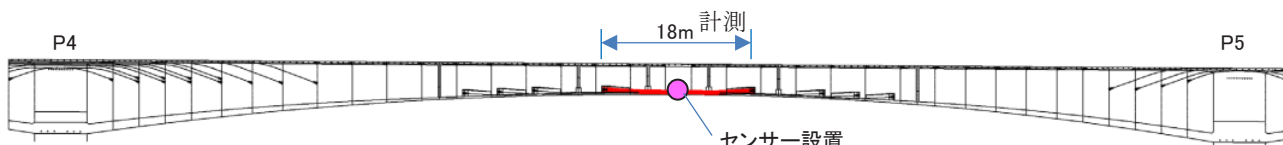


図-13 内ケーブルの鋼材配置縦断面

表-5 グラウトの概要

対象鋼材			グラウト材	注入方法
ケーブル種別	仕様	延長		
内ケーブル	12S15.2	18m	超低粘性型	真空グラウト注入

4.3 内ケーブルへの適用事例

(1) 工事概要

工事名：丹波綾部道路由良川橋才原地区上下部工事  
 工事場所：京都府船井郡京丹波町広野地先～才原地先  
 発注者：国土交通省近畿地方整備局  
 適用橋梁：PC3 径間連続ラーメン箱桁橋（橋長 L=285m）

(2) 適用ケーブル

光ファイバーセンサーを適用したケーブルの配置を図-13および図-14に示す。センサーはウェブケーブルに設置し、センサー配線は躯体内を通して橋面に引き出した。センサーの設置状況を写真-14に示す。ここでは、従来型センサーも同ケーブルに設置し充填に対する反応を比較した。

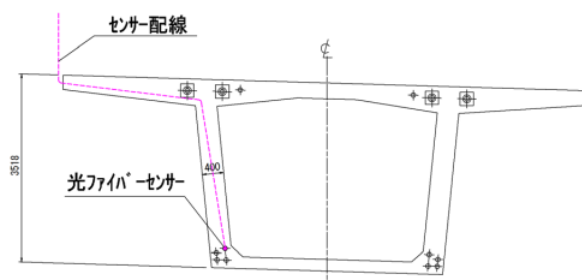


図-14 鋼材配置断面図

グラウトの概要を表-5に示す。本工事では超低粘性型のグラウト材による真空グラウト注入とした。

(3) 充填計測結果

グラウト充填の計測記録を図-15示す。計測では、グラウトの到達およびその後空隙と充填が繰り返される状況が確認できた。また、従来型センサーとも同等の検知性能を有することが確認できた。

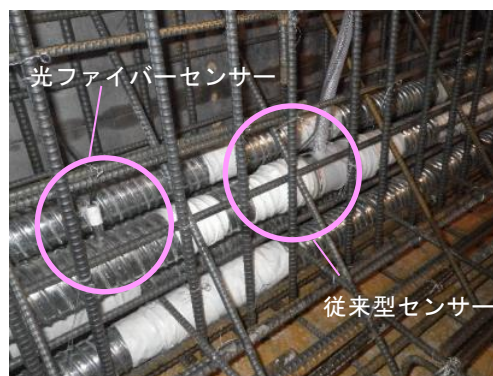


写真-14 センサー設置状況

5. まとめ

光ファイバーセンサーによるグラウトの充填検知は、Twin Fiber方式、Gap方式とも充填を検知することができたが、Twin Fiber方式ではグラウト到達時のセンシング部への付着や光強度に対する閾値の設定に課題が残った。

Gap方式による光ファイバーセンサーは、グラウトの充填・空隙に対して確実な反応を示し、従来型センサーとの比較においても同等の検知性能が確認でき、充填検知方法としての適用性が検証できた。

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。

なお、本開発においてご指導ご協力を頂きました神戸大学芥川教授および(株)レーザックに謝意を表します。

【参考文献】

1) 松本他：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

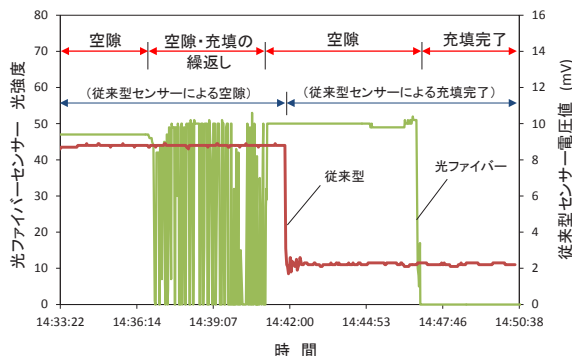


図-15 内ケーブルの充填計測記録

技術に関するシンポジウム 2012 論文集、地盤工学会 関西支部、平成 24 年 11 月

2) 角田他：光ファイバによる PC グラウト充填確認の適用性、第 69 回土木学会年次学術講演会、平成 26 年 9 月

3) 角田他：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、プレストレストコンクリート工学会、平成 27 年 10 月