

## 基礎構造物の施工時モニタリングに関する研究

鈴木 直子

## Monitoring Foundation Structure on a Construction Site

Naoko Suzuki

## Abstract

Remarkable recent progress in sensing technology has enabling monitoring in many fields. Whereas for underground structures such as piles and foundation slabs visual confirmation of structural integrity is challenging, sensing of foundation structures is one such promising field of application for sensing technology. In this study, an optical fiber sensor was installed within concrete and utilized to monitor the filling of a reinforced concrete structure with concrete. The optical fiber sensor was protected by a stainless-steel pipe against the harsh construction environment. Two mortar casting tests and one concrete casting test were carried out, confirming the effective performance of the sensor for monitoring concrete filling at the construction site.

## 概要

杭や基礎スラブなどの地中にある基礎構造物では、その健全性の目視確認は容易ではない。一方、近年のセンシング技術の進歩は目覚ましく、多くの分野に新型センサを用いたモニタリングが適用されている。基礎構造物も目視確認が難しいからこそ、センシングの適用が期待される。そこで本研究では、光ファイバーセンサによる高密度の温度計測に着目し、鉄筋コンクリート造の基礎構造物の品質評価の一つとして、コンクリートの充填確認モニタリングへの適用性を検討した。採用した光ファイバーセンサの最小計測間隔は1mm、分解能は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ で、センサに沿って連続的に温度を計測できる。コンクリートに埋設するため、光ファイバーセンサにはステンレス管で保護するという工夫を施した。屋内のモルタル打込み実験と屋外のコンクリート打込み実験により、センサの性能およびセンサでリアルタイムにコンクリートの充填状況を把握できることを確認した。

## 1. はじめに

近年のセンシング技術の進歩は目覚ましく、多くの分野に新型センサを用いたモニタリングが適用されている。センシングは目視できない情報の可視化に適していることから、地中において健全性の目視確認が難しい杭や基礎スラブなどの基礎構造物においてもセンシングの活用が期待される。その活用先の一つが、基礎構造物を鉄筋コンクリート造で構築する際の品質管理におけるコンクリートの充填確認である。

センサによるコンクリートの充填確認については、地上では、型枠や鉄筋に設置した圧力や温度、通電状態などを測るセンサを用いた充填確認技術が既に実用化されている(例えば1),2)。しかし、これらの技術を地中に適用する場合、圧力は地下水や地盤の孔壁保護に用いる安定液の水位変動の影響を受けやすい。また、通電状態については、空気中と比べて導電性が高い地中の場合、導体物質であるコンクリートにセンサが接触するか否かによる確認はできない。

センサによるモニタリングでは、その精度は計測データの空間分解能と時間分解能に依存する。よって、センサの設置位置とデータ収集頻度は、できるだけ密にすることが望まれる。近年、時間分解能については、計測機器の記憶装置の大容量化により地上、地中を問わず密に

しやすい。一方、空間分解能については、地上ではMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)センサのような小型で省電力、かつ低価格のセンサを無線通信と併用することで多くのセンサを容易に配置可能となっている。しかし、地中では、無線通信は電波を遮断する鋼材などが無い盛土のような環境でのみ可能であり、基礎構造物付近では難しい。そのため有線通信を使わざるを得ず、Fig. 1に示すように、センサの数が増えると、埋設する計測ケーブルによる構造物の断面欠損や施工の手間が問題となる。

そこで本研究では、地中構築する鉄筋コンクリート造

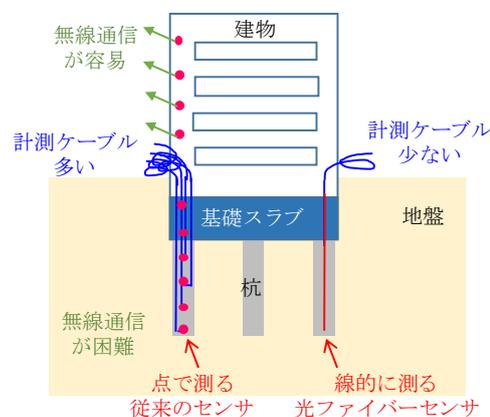


Fig. 1 従来の計測方法との比較  
Comparison with Conventional Measurement

の基礎構造物における品質管理の方法として、地中の水位や通電状態の影響を受けにくい温度に着目し、光ファイバーセンサを使った温度計測によるコンクリートの充填確認手法を検討した。光ファイバーセンサは、線状の光ファイバーに沿って連続的な計測が可能で、計測ケーブルを増やすことなく空間的な高密度計測が可能である。以下、屋内モルタル打込み実験と屋外コンクリート打込み実験で確認した光ファイバーセンサの性能およびコンクリートの充填確認への適用性について示す。

## 2. 光ファイバーセンサによる温度計測

### 2.1 計測システムの概要

本研究で採用した光ファイバーセンサの計測システムの構成をFig. 2に示す<sup>3)</sup>。計測システムは、光ファイバーからなるセンサ部、光源や受光器からなる測定器、測定器の制御や計測データを蓄積するためのパソコンで構成される。光ファイバーはガラス製で直径155 $\mu$ mと細く、わずかな隙間にも設置可能である。周期的に波長が変化する光を光ファイバーに入射すると、光ファイバー内にはガラス分子によって反射される反射光(レイリー散乱光)が生じる。光ファイバーが温度変化や外力によって歪むと、歪んだ位置の反射光の周波数が変化するので、この周波数の変化量を検出・分析することにより、温度やひずみの変化量を求めることができる。

測定器の光の分析方法は、OFDR(光周波数領域リフレクトメトリ, Optical Frequency Domain Reflectometry)である。この方式は、光ファイバーセンシングの中では比較的新しく、ミリ単位の細かな計測間隔が実現可能である<sup>4)</sup>。今回用いた測定器は、-50~300 $^{\circ}$ Cの範囲を最長50mまで最小計測間隔1mm、分解能 $\pm 0.2^{\circ}$ Cで計測可能である。なお、本計測システムでは、測定器の種類を変更すれば、システム構成を変更せずに最小計測間隔40mmで2kmまで計測可能である。光ファイバーはガラス製であるため折り曲げに弱く、曲率が極端に小さいとファイバー内の反射光の乱れにより計測精度の低下が懸念されるものの、本センサの最小曲げ半径は10mmであり、ある程度は細かな配線も可能である。

### 2.2 計測手順

本計測システムの計測手順は、次の通りである。

- 1) 光源から光ファイバーに向けて周期的に波長 $\lambda$ が変化する光( $\lambda=1510\sim 1570\text{nm}$ )を入射する。
- 2) 分光器1に到達した入射波は、光ファイバーに向かう光(測定光)と検出器に向かう光(参照光)に分光される。
- 3) 測定光により光ファイバー全体に散乱光が生じ、そのうち分光器2に到達した反射光が検出器に向かう。
- 4) 参照光と反射光は分光器3で合流し、干渉光となる。検出器では干渉光の光強度の変化を時系列で計測する。
- 5) 計測した光強度の時系列データをフーリエ変換し、光ファイバーの各位置における散乱光の周波数スペクトルを求める。
- 6) 各位置の散乱光の周波数スペクトルについて、光ファイバー設置時と計測時のシフト量を求め、そのシフト量から温度やひずみの変化量を求める。

本システムでは1)~6)の処理をパソコンで即時に処理することにより、温度やひずみの変化量をリアルタイムに表示することができる。

ここに、ひずみ $\epsilon$ 、温度 $T$ 、周波数 $\nu$ 、および波長 $\lambda$ には、式(1)の関係が成り立つ<sup>5)</sup>。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon \quad (1)$$

$K_T$  : 温度の校正係数( $1/^{\circ}$ C)

$K_\epsilon$  : ひずみの校正係数

本システムでは、標準的な通信用光ファイバーと同様、 $K_T=6.45\times 10^{-6}(1/^{\circ}$ C)、 $K_\epsilon=0.78$ を採用している。

式(1)のように、光ファイバーの周波数の変化は温度変化と外力によるひずみの両方に起因する。よって、温度のみを計測したい場合、光ファイバーは外力によるひずみが発生しないように設置する必要がある。

### 3. センサの基本性能の確認

施工中の鉄筋コンクリート造構造物の内部に温度計測を目的として光ファイバーを埋設する際は、次の配慮が必要である。

- ① 光ファイバーは、断線防止に十分な剛性と、セメントの水和熱が光ファイバーに伝達することを阻害しない高い熱伝導率を有する管に入れて保護する。
- ② 構造物の温度変化に応じて光ファイバーが自由に

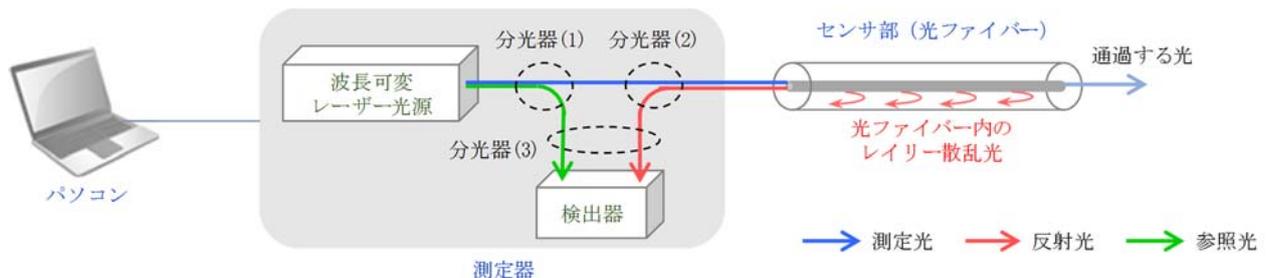


Fig. 2 光ファイバーセンサの計測システムの構成<sup>3)</sup>  
Measurement System of Distributed Optical Fiber Sensor

伸縮するよう、保護管と光ファイバーは縁が切れた状態とする。

以上を踏まえ、本研究では外径2.0mmのステンレス管(以下、SUS管)を保護管とした。この径であれば、保護管としての強度も有しつつ、現場での曲げ加工も容易である。ただし、保護管を用いると、保護管と光ファイバーの間にできる空気層の断熱効果が温度計測に与える影響の程度が懸念される。採用した光ファイバーセンサをSUS管で保護してコンクリートに埋設した前例がないことから、本研究ではまず、室内の気中でSUS管入りの光ファイバーを配線した小型容器にモルタルを打込み、センサの基本性能を確認した。

### 3.1 試験体

試験体をFig. 3、センサの配線状況をPhoto 1に示す。容器はプラスチック製で、一辺が23cmのほぼ立方体である。光ファイバーを保護するSUS管の外径は2.0mmの1種類であるが、内径は空気層の影響を確認するために0.7mmと1.5mmの2種類とした。光ファイバーの長さは2mで、1本の光ファイバーを一筆書きの要領で試験体の中央と外側を通るよう配線した。計測はモルタル打込み開始から96時間後までの連続計測とし、時間間隔は1分とした。光ファイバーに沿った計測間隔は、試験体の寸法、把握したい現象に対する必要な空間分解能、およびデータ処理のハンドリングを考慮した上で5mmとした。

モルタル内の絶対温度の計測および他の種類のセンサとの比較のため、熱電対を試験体中央にある内径0.7mmの光ファイバーの保護管に沿わせて3深度に設置した。熱電対はプローブ径0.3mmのK型であり、分解能は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、 $-50\sim 400^{\circ}\text{C}$ の範囲で計測可能である。室温も熱電対により試験体から1m離れた高さ1mの位置で計測した。熱電対の時間間隔も光ファイバーと同じ1分とした。

モルタルの諸元は、水セメント比が39%、スランプフ

ローが55cm、セメントは普通ポルトランドセメントである。モルタル打込みは小型のスコップで容器中央から行った。セメントの水和熱が十分に発現するよう、プラスチック容器は断熱性の高いポリエチレンシートで巻き、さらに厚さ2cmの蓋付きの発泡スチロール製の箱の中に設置した。箱の蓋はモルタル打込み直後に取り付けた後、計測終了まで保持した。

### 3.2 試験結果

容器中央の3深度において光ファイバーと熱電対で得た温度の経時変化をFig. 4に示す。(a)上部のグラフには熱電対で得た室温も記した。光ファイバーの計測値は温度の変化量であるため、熱電対で得たモルタル打込み開始時の絶対温度を初期値として図化した。いずれの深度でも光ファイバーと熱電対の計測値の差は $2^{\circ}\text{C}$ 以内と小さい。モルタル打込み時の温度変化をみると、モルタル打込み時の室温が $25^{\circ}\text{C}$ であったのに対し、モルタルの練上り時の温度は $22^{\circ}\text{C}$ と室温よりも $3^{\circ}\text{C}$ 低かったことから、計測点にモルタルが到達すると温度が $3^{\circ}\text{C}$ ほど低下している。この温度変化が起きた時間は、目視で確認したモルタルの打込み状況とよく対応した。このように、光ファイバーは熱電対と同様、セメントの水和熱の上昇と降下の様子をリアルタイムによく表している。また、光ファイバーの計測値にSUS管の内径の差は見られなかった。

Fig. 5は、モルタルの打込み開始から完了までの6分間における光ファイバーで得た温度変化量の分布である。縦軸はモルタル打込み直前を初期値とした温度の変化量である。Fig. 4のグラフ(1)と同様、打込みの進行とともに容器底部から順に充填範囲で温度が $3^{\circ}\text{C}$ ほど低下した。光ファイバーセンサの温度分布は局所的には分解能による影響と思われる細かな凹凸があるものの、温度変化を観察することにより、モルタルが光ファイバーセンサの位置に到達したことを捉えられた。

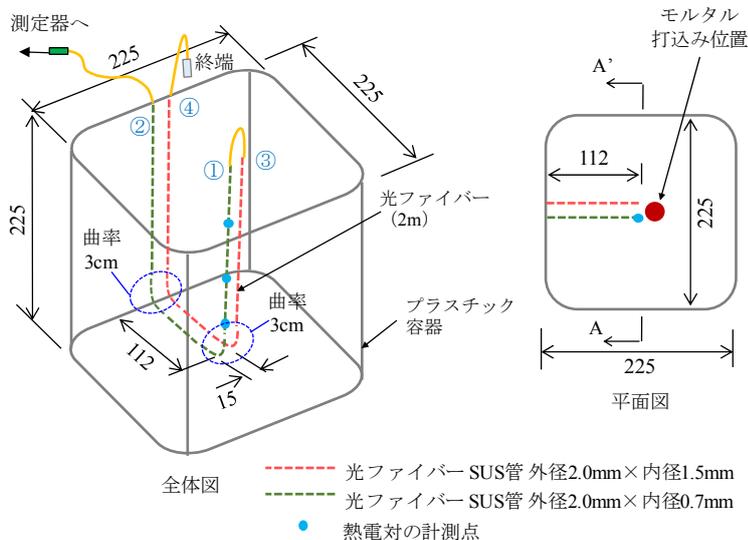


Fig. 3 センサの性能確認用の試験体  
Specimen for Confirmation of Sensor Performance



Photo 1 センサの配線状況  
Layout of Sensor

Fig. 6は、光ファイバーで得た温度のコンター図である。Fig. 4と同様、モルタル打込み開始時に熱電対で計測した気温を初期値として図化した。Fig. 6ではセメントの水和熱が容器外側よりも中央部の方で高い様子を確認できる。また、本センサの最小曲げ半径は10mmであるが、容器

底部の曲率半径3cmほどの折曲げ部でも計測は良好であった。

以上の試験結果から、SUS管で保護した光ファイバーセンサによる高密度の温度計測により、コンクリート打込み時の温度変化を計測可能であることを確認できた。

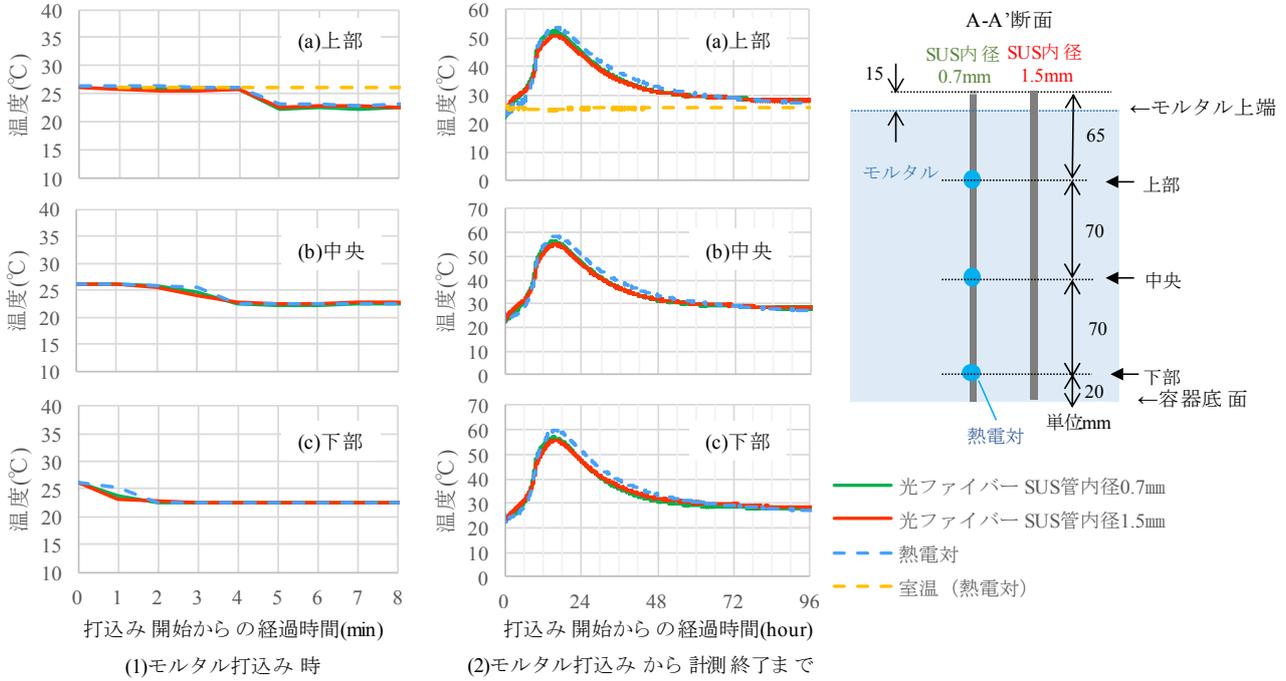


Fig. 4 温度の経時変化  
Time History of Measured Temperature

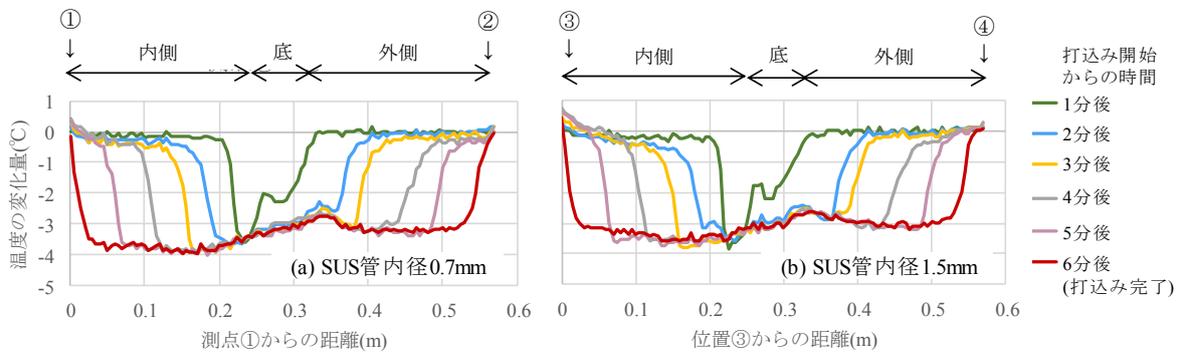


Fig. 5 モルタル打込み中の温度分布  
Distribution of Measured Temperature during Mortar Casting

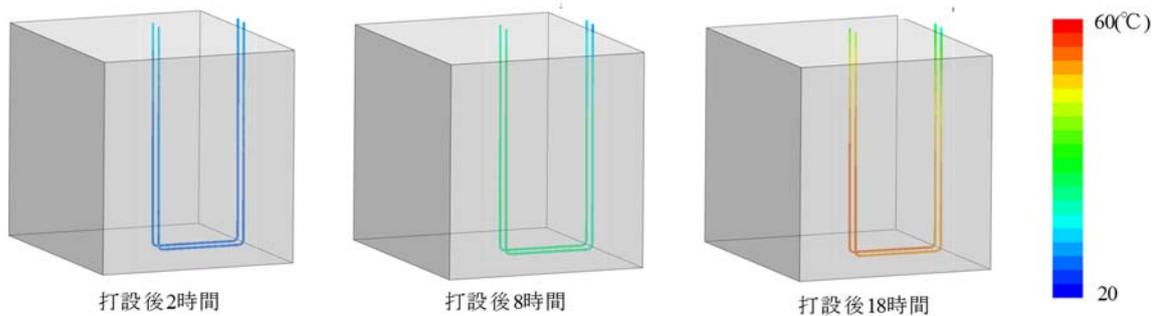


Fig. 6 温度コンター  
Contour of Measured Temperature

#### 4. 出来形確認への適用性の検討

前章の試験はモルタルが型枠内に完全に充填される条件であった。続いて本章では、モルタルの未充填部を模擬した凹凸のある型枠を用いて、屋内モルタル打込み実験により光ファイバーセンサの鉄筋コンクリート構造物におけるコンクリート出来形確認への適用性を検討した。

##### 4.1 試験体

試験体をFig. 7とTable 1に示す。モルタルを打込む容器は直径30cmのアルミ製の円筒である。試験体は2種類で、試験体Aのdエリア以外の外周部にアルミ板で大小の切欠き部を設け、モルタルの未充填部を模擬した。コンクリート内の鉄筋の影響を検討するため、試験体中央に鉄

筋籠を設けた。鉄筋は異形鉄筋で、鉛直方向の主筋はD16、水平方向のフープ筋はD6である。アルミ製の容器は内径50cmの発泡スチロール製の円筒容器に入れ、発泡スチロール容器とアルミ容器の間、アルミ容器の切欠き部内側に砂を充填し、地中を簡易的に模擬した。切欠き部の円周方向の幅は、主筋径の1~3倍とした。鉄筋籠と容器の距離は、建築基準法施行令で土に接する構造に求められる最小鉄筋かぶり厚さ(60mm)を参考に設定した。

Fig. 7には光ファイバーによる計測位置も付記した。光ファイバーの1本の長さは5mで、試験体ごとに鉄筋籠の内側に配線するファイバーと、切欠き部に配線するファイバーを1本ずつ用意し、それぞれ一筆書きの要領で配線した。鉄筋籠内側のセンサは確実に充填される位置での温度計測と鉄筋に設置したセンサの動作確認、切欠き部のセンサは未充填部分の大きさとの関係の把握を

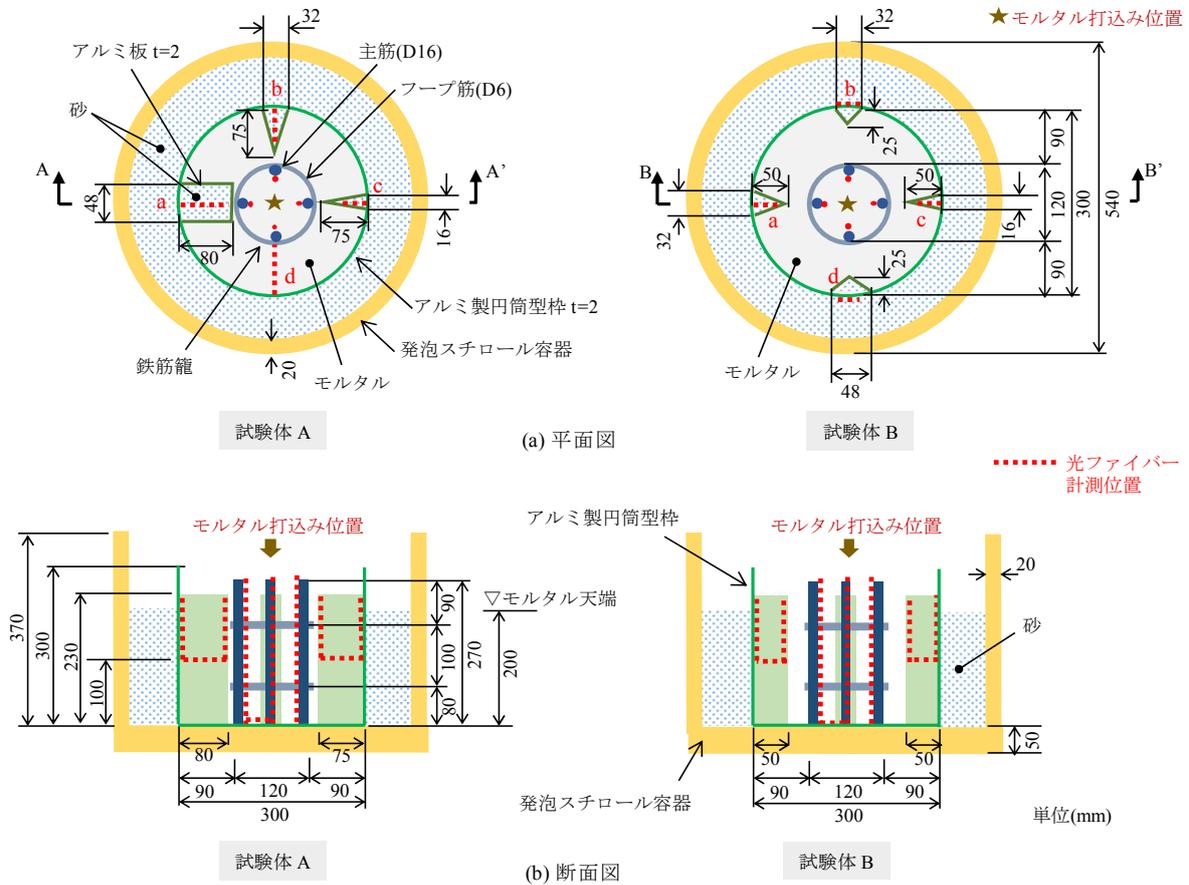
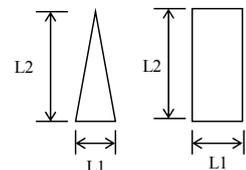


Fig. 7 出来形確認への適用性検証用の試験体  
Specimen for Confirmation of Finished Shape

Table 1 切欠き寸法  
Size of Notch

試験体A			
切欠き名	形状	L1(mm)	L2(mm)
a	矩形	48	80
b	三角形	32	75
c	三角形	16	75

試験体B			
切欠き名	形状	L1(mm)	L2(mm)
a	三角形	32	50
b	三角形	32	25
c	三角形	16	50
d	三角形	48	25



目的として設置した。切欠き部では容器内側への配線を基本としたが、試験体Bの切欠き部b,dは寸法が小さく、内側に配線すると光ファイバーの最小曲げ半径相当になるため、容器外側に配線した。光ファイバーの保護管は外径2.0mm、内径1.5mmとした。内径は、前章の試験で内径の大小によらず計測が良好であったことから、前章で用いた径のうち加工がしやすい大きい方を選択した。

モルタルの諸元は前章と同様で、スランプフローが55cmと高い流動性を持つ。モルタル打込みは漏斗を用いて容器中央で行った。

計測はモルタル打込み開始から打込み後48時間までの連続計測とし、時間間隔は1分とした。室内温度は、試験体から1m離れた高さ1mの位置で前章と同じ仕様のK型熱電対により計測した。光ファイバーに沿った計測ピッチは、前章と同じく5mmとした。

#### 4.2 試験結果

Fig. 8は、容器内が最高温度となるモルタル打込みから18時間後における光ファイバーで得た温度コンターである。(a)は鳥瞰図、(b)は立面図である。光ファイバーで得た温度の変化量を計測開始時に熱電対で測定した室温(20°C)を初期値として図化している。光ファイバーの配線はやや複雑で曲率が小さい部分もあるが、いずれの位置でも良好に計測できた。切欠き内部の温度を見ると、

切欠き寸法が最も大きい試験体Aのaエリアでは他の切欠き部よりも1°Cほど低いという差が見られるが、その他の切欠き部に温度差は見られなかった。このことから、モルタル打込み後におけるセメントの水和熱を用いた未充填部分の評価では、空間分解能が高い計測を用いれば、温度分布の大局的な様子から、未充填幅が主筋径の3倍を超えるような大きな欠損であれば検知できる可能性があることを確認した。

Fig. 8の立面図を見ると、主筋上端から容器中央にかけて温度が低くなっている。18時間後の室温は17°Cとセメントの水和熱よりも低く、鉄筋に取り付けた光ファイバーは、室温で鉄筋が冷やされた影響を受けたものと推察される。

Fig. 9はモルタル打込み開始から完了までの6分間に光ファイバーで得た温度変化量の分布である。代表として試験体Aのみ示した。モルタル打込み時の気温が20°Cであるのに対し、モルタルの練上り時の温度は22°Cと室温よりも2°C高かったことから、モルタル打込みの進行に応じて底部から順に、モルタルが充填された範囲の温度が2°Cほど上昇している。前章の試験と同様、モルタル打込み開始時の容器内温度とモルタルの練上がり温度に僅かでも差があれば、光ファイバーの位置にモルタルが到達したことを確認できることが分かった。

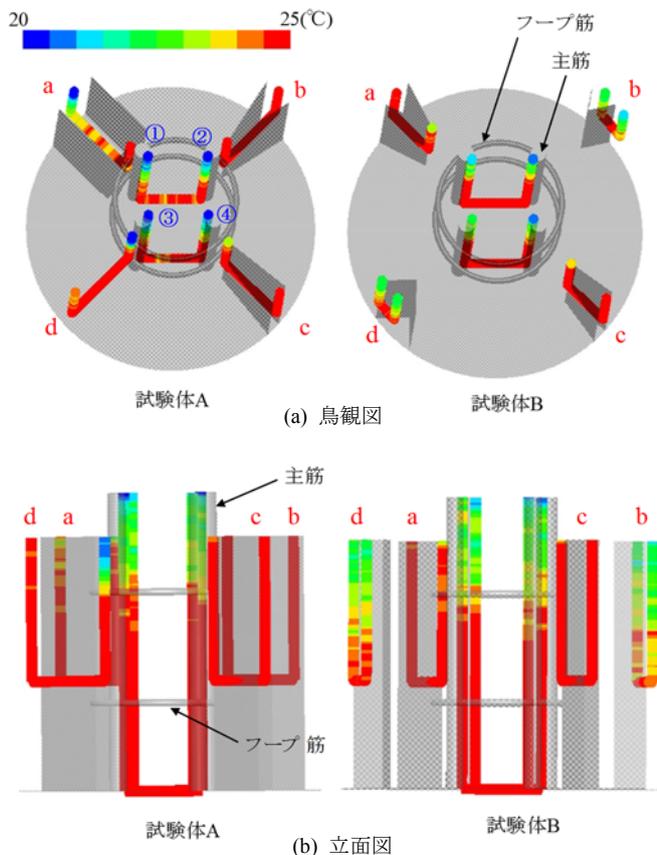


Fig. 8 モルタル打込み後18時間の温度コンター  
Contour of Measured Temperature at 18hours after Mortar Casting

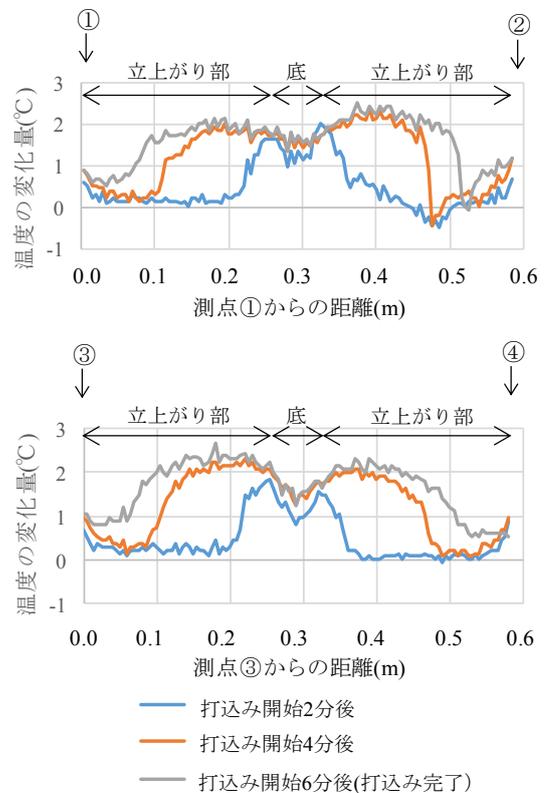


Fig. 9 モルタル打込み中の温度分布  
Distribution of Measured Temperature  
during Mortar Casting

## 5. 安定液中のコンクリート打込み時における出来形確認への適用性の検討

3章と4章で示した2つの室内モルタル打込み試験の結果を踏まえ、地中でのコンクリート打込みと同じく安定液を用いた屋外コンクリート打込み実験に光ファイバーセンサによる高密度の温度計測を適用し、その出来形確認への適用性を検討した。

### 5.1 試験体

試験体の概要をFig. 10に示す。型枠の寸法は幅0.6m、長さ1.5m、高さ1.0mである。型枠短辺の片側に網目状に組んだ鉄筋がある。鉄筋補強のため、型枠底部から40cm上方に1辺が75mm、厚さ6mmのL型アンクルがある。鉄筋側の型枠はコンクリートの充填性を目視確認できるようにアクリル板に、その他は木製となっている。トレミー管側の型枠短辺の上部には、安定液排出用の切欠きがある。

光ファイバーの保護管は、前述の2つの試験と同様、外径2.0mm、内径1.5mmのSUS管とした。光ファイバーは、鉄筋と型枠の間に配置した。このとき、光ファイバーは熱伝導率の低いプラスチック製の部品で主筋に取り付けた。コンクリートの打込みは、あらかじめベントナイト系の安定液が注入されている型枠に、直径200mmの鋼管をトレミー管として用いて鉄筋から離れた位置から行った。コンクリートの諸元は、水セメント比が42%、スランプが18cm、粗骨材の最大粒径が20mmで、セメントは普通ポルトランドセメントである。鉄筋と型枠の間にコンクリートの未充填部ができるよう、スランプは既往研究<sup>6)</sup>を参考に設定した。

計測はコンクリートの打込み開始から打込み後23時間におわたる連続計測で、時間間隔は2分とした。光ファイバーに沿った計測間隔は、試験体の寸法、把握したい現象に対する必要な空間分解能、およびデータ処理のハンドリングを踏まえた上で20mmとした。外気温は、試験体から3mほど離れた直射日光が当たらない壁の地上1.5mの位置で、測定可能範囲が-40~80℃、分解能が0.1℃の温度計を用いて計測した。外気温計測の時間間隔は、光ファイバーと同じく2分とした。

### 5.2 試験結果

Fig. 11は、コンクリートの打込み開始から完了までの16分間における光ファイバーで得た温度変化量の分布である。コンクリート打込み直前の安定液の温度が7℃であるのに対し、コンクリートの練上がり時の温度は9℃であったことから、コンクリートが十分に充填された型枠底部に近いほど、打込みの進行とともに2℃ほど温度が上昇している。コンクリート打込み開始から8分後まで温度変化が見られないのは、トレミー管が型枠から遠い位置にあり、コンクリートが光ファイバーがある鉄筋の外側

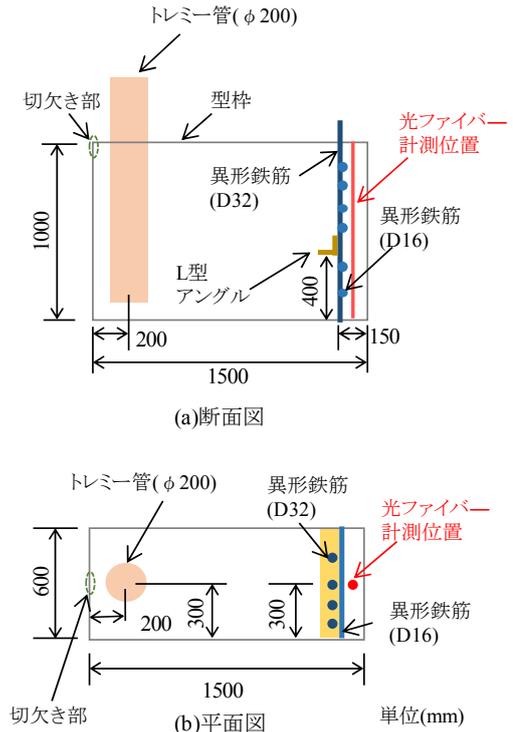


Fig. 10 屋外実験の試験体 Specimen for Field Experiment

まで到達していないためである。Photo 2には、型枠脱型後の試験体の写真も示した。コンクリート打込み完了時の温度分布は、光ファイバーを配した付近の出来形に対応している。空間分解能が低い温度計測では、温度変化量の僅かな違いを把握しきれずコンクリートの充填の有無の判断は難しいと考えられる。一方、高密度計測で連続的な温度分布を把握することにより、充填の有無、さらに出来形を把握できる可能性を見出せた。なお、未充填部は排出されない安定液が残った状態であり、この状態は計測終了まで保持された。

Fig. 12は、Fig. 11に示した3測点におけるコンクリートの打込み開始から計測終了におわたる温度の経時変化である。測点①と②はコンクリートの充填部、測点③は未充填部である。光ファイバーで得た温度変化量は、コンクリート打込み時の安定液の温度(7℃)を初期値として図化した。Fig. 12には熱電対で得た外気温も合わせて示した。測点①~③の温度に外気温の変動に伴う変化は認められなかった。コンクリート打込みから10時間を経過した頃から充填部の測点①②の温度は上昇したが、未充填部の測点③の温度はほぼ一定であり、充填部と未充填部の温度変化の差が認められた。マスコンクリートに係わる断熱温度上昇特性式<sup>7)</sup>から評価したセメントの水和熱の発熱開始時間は、コンクリートの打込みから9時間後であり、この差が現れ始めた時間と概ね対応している。以上より、コンクリート打込み時に安定液の温度とコンクリートの温度に差が無く、コンクリートの打込み直後にコンクリートの充填状況を把握できなかった場合でも、

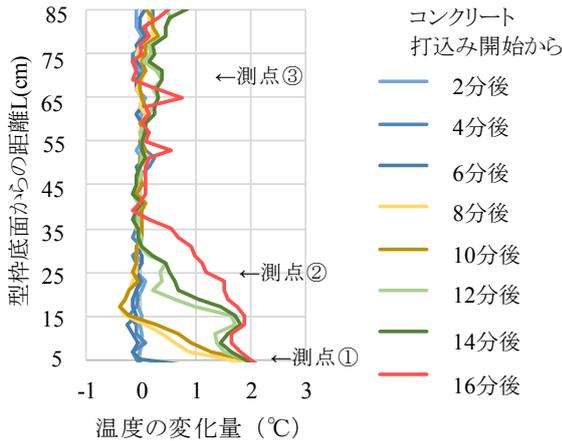


Fig. 11 コンクリート打込み中の温度分布  
Distribution of Measured Temperature  
during Concrete Casting and Finished Shape

長期的な温度計測でセメント水和熱による温度上昇を把握することによって、コンクリートの充填状況を把握できる可能性があることが分かった。

## 6. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリート造の基礎構造物における施工時のコンクリート充填確認への光ファイバーセンサによる高密度の温度計測の適用性を検討した。屋内モルタル打込み試験と屋外コンクリート打込み試験の結果から、以下の知見を得た。

- 1) SUS管で保護した光ファイバーセンサにより、気中および安定液中のコンクリート内部の温度をコンクリート打込み中から打込み後にわたりリアルタイムに把握することができる。
- 2) 空間分解能が高い温度計測は、計測点での局所的なコンクリートの充填確認に利用できるだけでなく、空間的なコンクリートの充填状況の評価、すなわち、出来形の確認にも有効である。
- 3) 地中のコンクリート打込み時において、練上がり時のコンクリートと安定液の温度差が2°C程度という僅かな差であっても、光ファイバーセンサは、その差を捉えることが可能であり、捉えた温度差をコンクリートの充填確認に用いることができる。
- 4) コンクリート打込み後におけるセメントの水和熱の温度変化を長期的に計測することにより、コンクリートの充填状況を把握できる可能性がある。

本研究を通じて光ファイバーセンサの新たな適用分野および高密度計測の有用性を見出すことができた。今後は実大構造物における検証や、より細かな充填状況の評価法の検討にも注力する予定である。また、得られた知見は、地中の基礎構造物のみならず地上の鉄筋コンクリート造の構造物全般にも展開可能である。鉄筋コンクリート造については、施工の省力化・高品質化の面から部材のプレキャスト化が進められているものの、未だそ

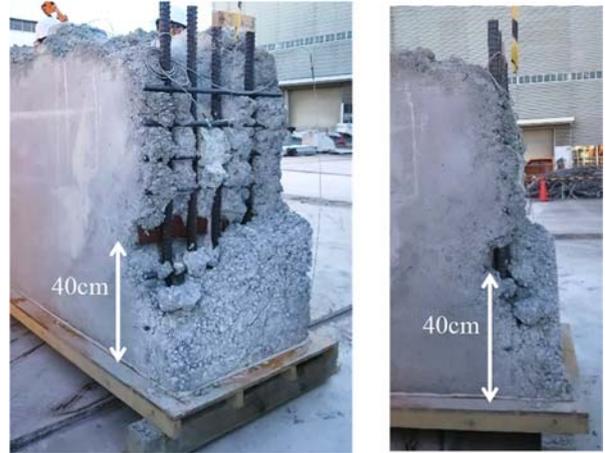


Photo 2 型枠脱型後の試験体  
Finished Shape of Specimen

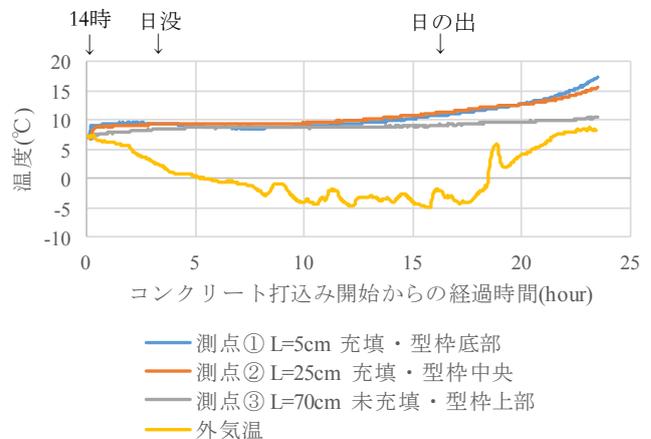


Fig. 12 温度の経時変化  
Time History of Measured Temperature

の多くは現場での施工である。本研究で得られた知見を鉄筋コンクリート造全般の高品質化に繋げていきたい。

## 参考文献

- 1) 阿部保彦, 他: 電気伝導性を利用したコンクリート充填検知システムの開発, 日本建築学会技術報告集, 第4号, pp. 15-18, 1997.3
- 2) 高橋昌彦, 他: 圏央道におけるFRP合成床版の施工—圏央道桶川加納インターチェンジCランプ橋—, 宮地技法, pp. 41-48, 2015.5
- 3) 高橋久範, 他: 光ファイバセンサによる金型の最新測定技術, 自動車技術会シンポジウム, 2013
- 4) 田仲正弘, 他: OFDR方式を用いたFBGセンサによる高位置分解能計測の適用性の検討, 土木学会第65回年次学術講演会, pp. 363-364, 2012
- 5) LUNA: ODiSI User Guide, 2016
- 6) 山内真也, 他: 大口径場所打ち杭を模擬したコンクリート打設実験, 土木学会第66回年次学術講演会, pp. 733-734, 2011
- 7) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針, p. 46, 2016