

# FBG 光ファイバセンシング技術による防災・構造物健全性監視

Monitoring for Disaster Prevention and the Maintenance of Civil Structures  
by means of FBG Optical Fiber Sensing

田村 琢之<sup>※</sup> 熊谷 幸樹<sup>※</sup> 松元 和伸<sup>※</sup>  
Takuyuki Tamura Koki Kumagai Kazunobu Matsumoto  
上明戸 昇<sup>※</sup> 本山 寛<sup>※</sup>  
Noboru Kamiakito Hiroshi Motoyama

## 【要旨】

近年安全・安心社会の実現が掲げられ、また既存構造物の維持管理が大きな問題となる中、防災監視および構造物健全性監視のための技術開発は重要な位置づけにあり、その中でも計測・モニタリングの役割は大きい。FBG (Fiber Bragg Grating) 光ファイバセンシング技術は、センサの耐久性が高く、また計測信号が電磁波の影響を受けない等の特長から、防災監視および構造物健全性監視のための計測・モニタリングに適しており、計測器の開発と計測業務への適用が進められている。本稿では、FBG 光ファイバセンシング技術の原理と、多点計測を可能とする時間分割多重化方式の特長を整理するとともに、開発した計測器を紹介する。また、その適用事例を、技術の特長を踏まえて報告する。

【キーワード】 計測技術 防災監視 健全性監視 光ファイバセンサ FBG

## 1. はじめに

近年、安全・安心社会の実現のための防災・維持管理への対応に向けて様々な技術開発が進められている。そのうち直接的な効果が得られる、補修・補強といった対策技術とともに、防災の必要性や構造物の劣化の程度(健全性)を判断するための計測・モニタリング技術が重要な役割を持つ。筆者らは、FBG (Fiber Bragg Grating) 光ファイバセンシング技術(以降FBGセンシングと略す)による計測技術の開発を進めているが、FBGセンシングは従来の電気式計測技術にない優れた特長を持っており、構造物の健全性や危険度を知るための計測技術として有効である。本稿では、FBGセンシングの原理および特長と、多点計測において有利な時間分割多重化(TDM: Time Division Multiplexing)方式について述べ、開発した計測器と適用事例を紹介する。

## 2. FBG センシングの原理と特長

FBGセンシングでは、光ファイバ上に形成された長さ約1cmの、回折格子の集合体(FBG)がセンサの機能を持つ。FBGは、光ファイバ内を通過する光信号に対する固有の反射波長を持ち、FBGに生じるひずみによって反射波長が変化する。この特性を利用し、波長変化量を計測することによりひずみを求めることができる(図-1)。

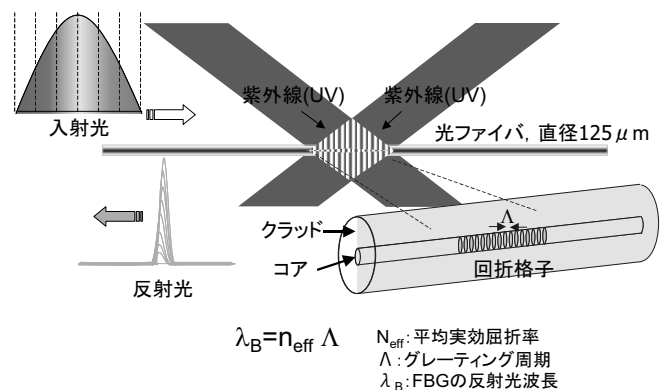


図-1 FBGによるひずみ計測

FBGセンシングは、従来から使用されている電気式計測技術に対し、表-1に示す特長を持つ。非通電・無誘導性により、防爆性が要求される環境でも計測が可能であり、また雷や工事用の高圧電流等によるノイズが生じず、データの信頼性低下を防ぐことができる。また光測定器や制御PCを設置する計測室を計測箇所の近傍に設置できない状況でも、信号伝送時の低損失性により伝送ケーブルを数km延長することが可能なため、計測室を任意の遠隔地に配置することができる。さらに光ファイバはガラス製であることから、従来の電気式計測器に比べ、長期間の使用にも十分耐えうる性能を持っている。また

分解能は、データロガーの計測によるひずみゲージの分解能と同じ $1\mu$ であり、同等の精度である。このようにFBGセンシングは建設分野への適用に対し様々な長所を持っている。

表－1 FBGセンシングの特長

	特長
非通電・無誘導	信号伝送は光信号を用いるのでセンサは通電されない。また外部電磁波の影響を受けない。
低損失	光測定器から数km先の計測が可能。
高耐久	センサ部はガラス製の光ファイバであり、比較的劣化が少ない。
計測精度	$5\mu$ ひずみ相当(分解能 $1\mu$ ひずみ相当)であり、ひずみゲージと同等。

### 3. FBGの多重化方式と光測定器

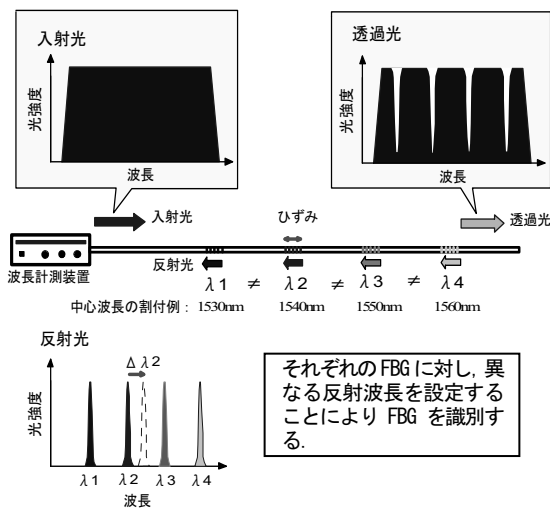
回折格子の集合体であるFBGを、同一光ファイバ上に複数配置(多重化)することにより、1本の光ファイバで複数のFBGの同時計測が可能となる。多重化技術のうち、波長分割多重化(WDM: Wavelength Division Multiplexing)方式は、図－2のように各FBG固有の反射波長の相違でFBGを識別する。FBGセンシングは光の伝送損失が最も少ない光の波長帯(Cバンド:  $1500\text{nm}$ 付近)のみを使用するため、WDM方式では多重化可能なFBGの個数が制限される。これに対し時間分割多重化(TDM)方式は、

同一ファイバ上のFBGの識別を、各FBGからの反射光の到達時間差で識別するため、Cバンド幅の制限を受けることなく多数のFBGを多重化することができる(図－3)。WDM方式では実用上最大十数個の多重化が限界となるのに対し、TDM方式では光損失がない場合、最大100個のFBGを多重化することができる。TDM方式による多重化により、WDMに比べ、1つの計測システムで多数のFBGを用いた大規模な計測が可能となる。

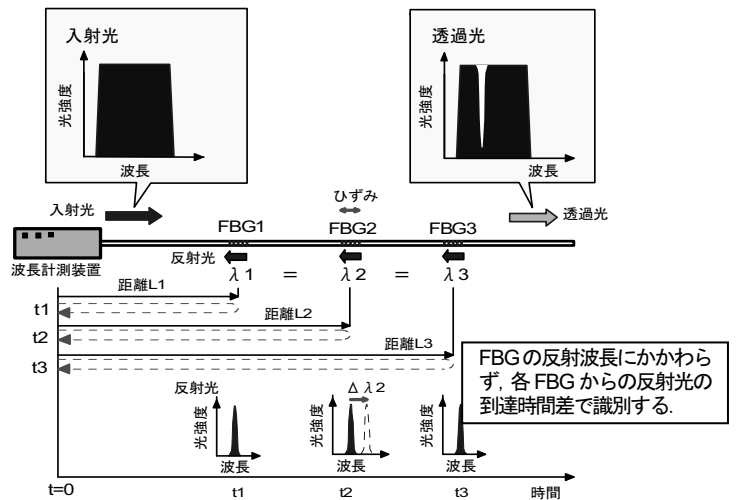
FBGセンシングは、FBGを利用した計測器とともに、光測定器を用いて計測を行う。光測定器には、反射光の中心波長等の波形を解析するスペクトルアナライザや波長計などの波長計測装置がある。光測定器から計測器へは電気信号を使用しないが、表－1に示した非通電・無誘導という特長は、このような計測原理に基づくものである。光測定器はFBGの多重化方式により仕様が異なり、TDM方式に使用する代表的な光測定器には英国インセンシス社が開発した「FSIユニット」(写真－1)があるが、アナライザと光源をユニット化しており、実用的な装置である。標準的なWDM方式の光測定器と比較し、表－2のような特長を持つ。

### 4. FBGセンシングによる計測器の開発

FBGセンシングは、ともに建設分野で用いられることが多いOTDR<sup>1)</sup>やBOTDR<sup>2)</sup>よりも精度が高く、 $1\mu$ の分解能



図－2 波長分割多重化方式(WDM)の原理



図－3 時間分割多重化方式(TDM)の原理



写真－1 FSIユニット外観  
(寸法 240×120×97mm)

表－2 光測定器の性能比較

項目	方式	TDM方式 (インセンシス社 FSIユニット)	WDM方式 (他社製光測定器)
波長範囲		1545-1555nm	1527-1567nm
最大センサ数/ch		100個	40個
分解能		1pm (ひずみ 0.8 $\mu$ 相当)	
スキャン周波数		最大 500Hz	最大 100Hz
FBGの測定範囲		最大 10,000 $\mu$	多重化FBG数に依存

で読み取り、5 $\mu$ 以下の計測誤差でひずみを検出することが可能であり、またひずみゲージのようにセンサ素子として機能する。この特性を利用し、筆者らは、ひずみだけでなく変位や傾斜、あるいは水圧等をFBG上のひずみに変換する機構をもつ計測器を開発している。

#### 4.1 防災監視のための計測器

防災監視のための計測器は、図-4に示す斜面防災監視に適用可能な、地盤構造物用の計測器を開発している。図中に示すFBG傾斜計は地表面や地盤内のボーリング孔に設置し、地盤の変化に伴う傾斜角の変化を計測する計測器である<sup>3)</sup>。その他、地表に現れる亀裂の広がりやを計測するFBG伸縮計、地すべりを誘発する地下水位を計測するFBG水位計とあわせて、地盤構造物の挙動を多角的に監視することができる。各計測器の仕様を、表-3～表-5に示す。

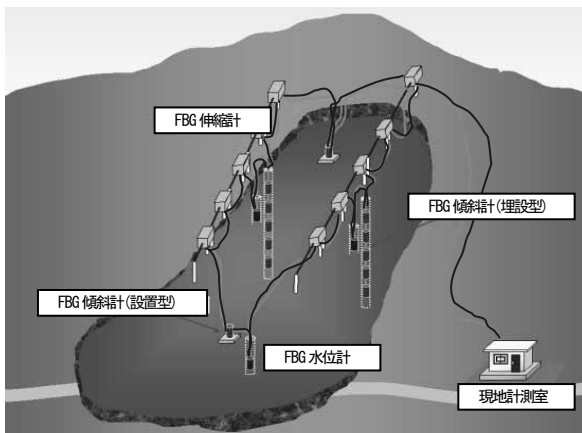


図-4 斜面防災監視への適用例

表-3 FBG伸縮計の仕様

寸法	L250×W108×H71mm
測定範囲	0～500(±250)mm
非直線性	±1%以内
分解能	0.2mm以下
許容動作温度	-20～+60℃

表-4 FBG水位計の仕様

寸法	φ48×L300mm
測定範囲	0～10m
非直線性	±1%以内
分解能	2.5cm以下
許容動作温度	0～+40℃ (氷結を除く)

表-5 FBG傾斜計の仕様

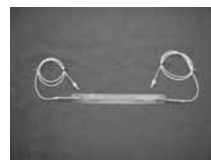
寸法	φ48×L457mm
測定範囲	±300分 (1軸)
非直線性	±1%以内
分解能	0.15分
許容動作温度	-20～+60℃

#### 4.2 構造物健全性監視のための計測器

コンクリート構造物を主な対象とする健全性監視用計測器としては、図-5に示す計測器(センサ)を開発しており、構造物のひずみや、長さ、ひび割れ幅の変化を計測することができる。これらの変化は、供用段階の長期間にわたる健全性の目安となり、また外力や温度変化に対する挙動も把握することができる。例えば、構造物のひび割れ幅の温度変化に伴う年周期や長期傾向の有無、繰り返し荷重によるたわみ量の変化が挙げられる。

防災監視・構造物健全性監視とも、計測サイトにおける風雨等の自然環境に対する耐久性や、雷などによる外部電磁波に対する信頼性が要求されるが、FBGセンシングは表-1に示す高耐久性と無誘導性により、従来の電気式計測と比較し、これらの悪条件下での計測にも十分に対応できる。

##### FBGポイントセンサ



添付箇所へのひずみを計測

寸法	250×25×0.5mm
測定範囲	±3000 $\mu$
精度	5 $\mu$

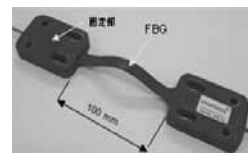
##### FBGケーブルセンサ



固定金具間の変位を計測

寸法	φ1.5mm
測定範囲	-5～+15mm
非直線性	±0.5%以内

##### FBG $\pi$ 型センサ



ひび割れ幅の変化を計測

寸法	190×50×25mm
測定範囲	水平方向±1.0mm 鉛直方向±5.0mm
非直線性	水平方向 2%(0.02mm) 鉛直方向 0.5%(0.025mm)

##### FBG温度センサブロック



ひび割れ幅の変化を計測

寸法	1000×65×10mm
測定範囲	-10～+50℃
非直線性	±0.5%以内

##### FBG埋設型ひずみ計



コンクリート内部のひずみを計測

寸法	3×3×240mm
測定範囲	±1000 $\mu$
非直線性	1%以下

##### FBG埋設型温度計



コンクリート内部の温度を計測

寸法	φ16×98mm
測定範囲	-30～+70℃
非直線性	1℃以内

図-5 健全性監視のためのFBGセンサの仕様

## 5. 開発した計測器の適用事例

### 5.1 多点計測を活用した適用事例

TDM方式によるFBGセンシングの特長である多点計測を活用した適用事例のうち代表的なものは以下の通りである。

- ・志河川ダム堤体上部法面の動態観測<sup>4)</sup>(センサ数52)
- ・第二東名上伊太橋のPC上部工計測管理<sup>5)</sup>(センサ数14)
- ・飛驒トンネル二次覆工のひずみ計測(センサ数40)

このうち飛驒トンネルでの適用事例を報告する。

飛驒トンネルは、平成20年に全線が開通した東海北陸自動車道の道路トンネルの1つである。本トンネルの非常駐車帯の二次覆工では、工程上通常のコンクリート打設に変えて、実施例の少ない繊維補強コンクリートの多層吹付け施工が行われたが、非常駐車帯は坑口から約235mに位置にあり、外気温変化の影響を受けやすいことから、覆工内部のひずみを計測し、変状の有無を観察している

(図-6). センサは図-5のFBGポイントセンサとFBG温度センサブロックを使用し、施工段階にあわせて図-7のように1断面当り9箇所、各箇所において2次層内の2箇所を設置し、2断面で計40基(うち温度センサ2基)のセンサを設置した。図-8に示した平成20年2月~21年1月の経時変化では、3箇所の計測点(P1,P2,P3)で比較的急激な引張りひずみが見られるが、現地観察では計測点の近傍にひび割れが確認されていることから、ひび割れ発生に至るまでのコンクリートに作用する引張応力が表れているものと推察される。なお、ひび割れ幅は小さく、対策を必要とする有害なものではない。本事例では、40基のセンサを埋設したが、電気式計測では通常1センサに1本の通信ケーブルが必要となるのに対し、FSIユニットに接続した3本の伝送用光ファイバケーブルで40基全てのセンサを接続していることから、ケーブルの本数は大幅に低減しており、多点計測の優位性が活かされている。

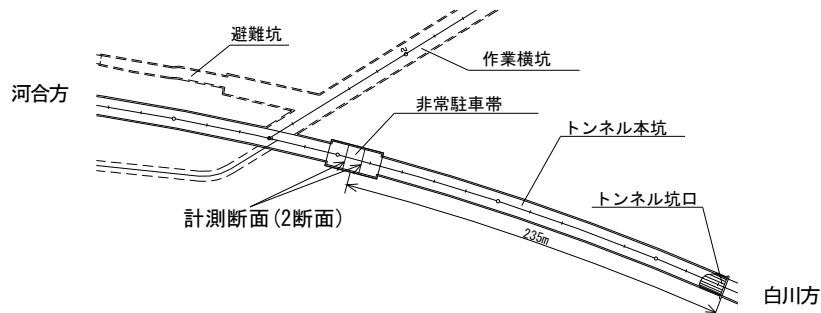


図-6 飛驒トンネル覆工ひずみ計測位置図

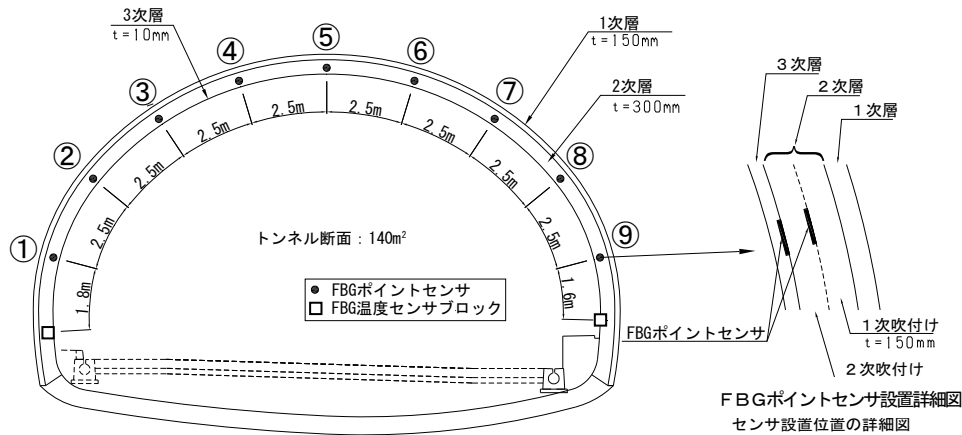


図-7 計測断面図 および詳細図

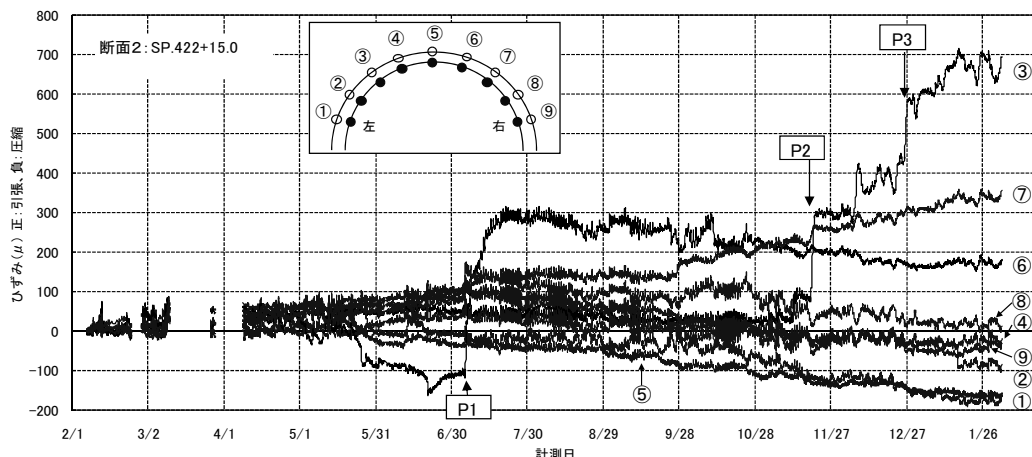


図-8 覆工ひずみの経時変化(平成20年2月~21年1月)

## 5.2 高精度・高耐久性を活用した適用事例

### (1) コンクリート構造物のひび割れ幅計測

高精度・高耐久性を活用した事例として、コンクリート構造物のひび割れ幅計測がある。本計測は、山口県が従来から進めているコンクリート構造物のひび割れ抑制対策に関連し、県道山口宇部線の高架橋橋台のひび割れ幅の経年変化を計測するものである。橋台内部の温度および外気温の季節変動に対し、ひび割れ幅が変化することを想定し、平成21年2月から平成22年2月の間、延べ5回の計測が予定されている。計測対象の橋台（松坂橋）とセンサ設置状況を、写真-2、3に示す。ひび割れ幅の計測にはFBG $\pi$ 型センサを使用し、ひび割れをまたいで2箇所に設置した。また小型ロガー付温度センサ（おんどとりTR-71U）を、深さ50cmの削孔内とセンサ付近に設置し、構造物内部の温度と外気温を計測している。

1回目となる平成21年2月頃の計測結果を図-9に示す。1月28日10:49の計測開始時点からのひび割れ幅変化について、5日間、10分に1回の頻度で自動計測を行った。ひび割れ幅は、5日間の計測において0.05mm程度のわず

かな変化が確認されており、短期間でもひび割れ幅に変化があることがわかる。引き続き3カ月おきに計測を行うことにより、ひび割れ幅の経年変化が明らかになるとともに、コンクリート温度または外気温の変化との関連が把握できると考えられる。

本計測は、1年間に渡る屋外の構造物のひび割れ幅計測を行うものであるが、FBG $\pi$ 型センサは炭素繊維強化プラスチック製であり、材料に金属を使用していないため、降雨による腐食や衝撃に対する耐久性がある。また計測精度は非直線性（ばらつきの程度）が0.02mm以下であり、既存のひび割れ変位計と同等の高い精度であることから、本事例のような計測でもFBGセンシングの特長が生かされている。

### (2) トンネル二次覆工の内部応力計測

高耐久性を生かした他の事例として、近接工事が予想されるトンネル二次覆工の内部応力計測がある。通常、供用トンネルに対する近接施工時の影響判定では、施工にともなう覆工応力増分値の解析結果を評価するが<sup>6)</sup>、この場合、近接施工時点ですでに発生している応力値は考



写真-2 松坂橋

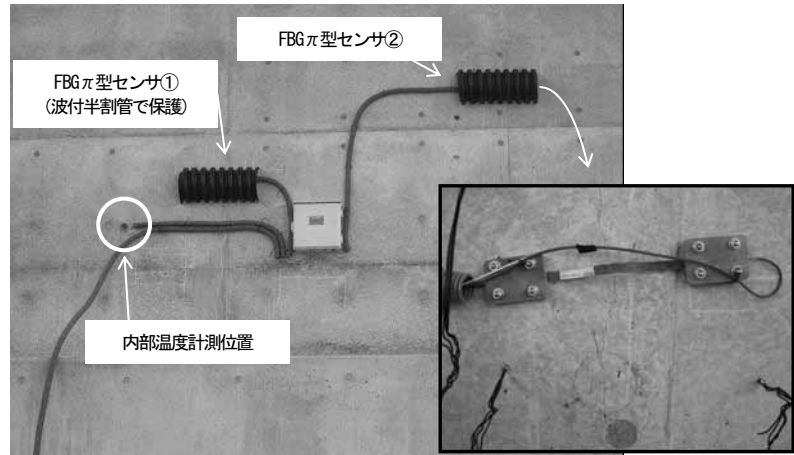


写真-3 センサ設置状況

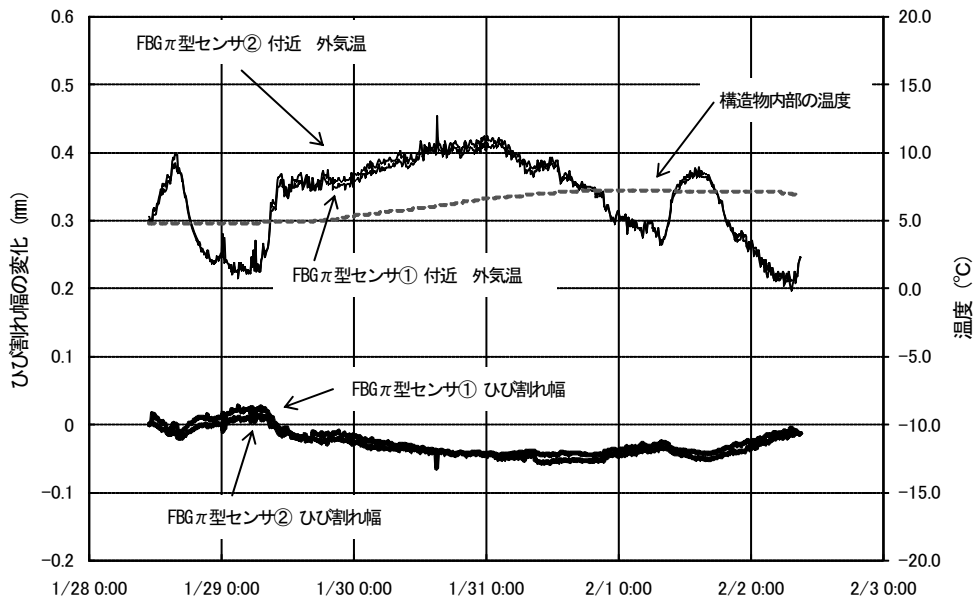


図-9 ひび割れ幅・温度の経時変化

慮されない。したがってその評価は、過大あるいは過小となる恐れがあるが、二次覆工の応力を完成後から計測することができれば、近接施工時の残存許容応力を精度よく推測することができる。写真-4は、県道山口宇部線小郡トンネル工事の二次覆工に設置した埋設型計測器の設置状況である。図-5に示したFBG埋設型ひずみ計とFBG埋設型温度計を使用している。ここでは、II期線施工の影響を受ける起点側の坑口付近に埋設型のFBGひずみ計を設置しており、覆工コンクリート打設後平成21年4月末からひずみの計測を行っている。なお応力値は、供試体試験により求めたコンクリートの弾性係数を用いて求めている。平成21年7月時点では乾燥収縮ひずみのみが計測されているが、今後供用期間にわたる長期間の覆工応力を計測し、II期線施工時の影響評価に有効なデータを蓄積していく予定である。

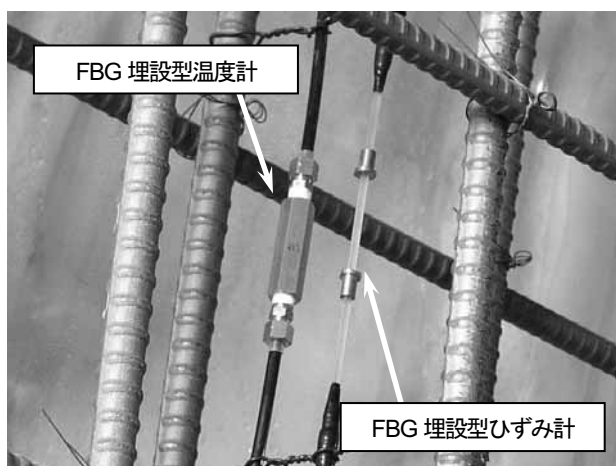


写真-4 小郡トンネル覆工内に設置した埋設型計測器

### 5.3 非通電を活用した適用事例

FBGセンシングでは、計測器（センサ）および計測信号伝送ケーブルとも非金属である光ファイバで構成され、通電しないことから、導電性材料の使用が不可能な環境での計測にも適している。例えば石油やLNG等引火性材料の貯蔵構造物の傾斜計測による不同沈下のモニタリングや、鉄道施設のひずみ・変位計測による変状計測等が挙げられる。非通電性は、光ファイバセンサ固有の特長であり、従来の電気式計測技術では適用自体が困難なことから、活用効果は大きい。

## 6. おわりに

長年の実績を持つ電気式計測技術は、建設分野においてもすでに十分な実績があり、実用化技術として一定の評価がある。これに対しFBGセンシングなどの光ファイバセンシング技術は、近年活用されつつある段階であり、また計測機器が電気式計測技術に比べ高価であるため、普及には至っていない。防災・構造物健全性監視を含めて建設分野に広く活用していくためには、その特長が認知されるよう、今後より一層適用実績を積む必要がある。新規の建設需要が減少していく中、リニューアルに貢献する計測技術としてこれからも技術開発・展開を進めていく所存である。

**謝辞：**本稿で報告したFBGセンシングの適用については、中日本高速道路㈱、(財)山口県建設技術センター、山口県土木建築部のご指導ご協力を賜りました。この場を借りまして皆様に感謝の意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 樋口佳意, 野村康裕ほか: OTDR方式により光ファイバを用いた地すべり変位検出センサの開発, 第44回日本地すべり学会研究発表会, 2005.
- 2) 奥野正富, 島垣司ほか: BOTDR技術を用いたトンネル監視システム, 電子情報通信学会技術研究報告, pp.31-36, 2002.
- 3) 田村琢之, 熊谷幸樹ほか: TDM方式FBG光ファイバ傾斜計の開発・検証と土留め計測への現地適用結果について, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2008, pp.137-142, 2008.
- 4) 松元和伸, 熊谷幸樹ほか: ダム切土法面の動態監視にWEB常時モニタリングシステムを適用, 第41回地盤工学研究発表会, pp.2249-2250, 2006.
- 5) 本山寛, 小林薫ほか: 第二東名上伊太橋下り線工事におけるFBG光ファイバセンシングによるPC上部工の計測管理, とびしま技報 No. 56, pp.129-135, 2007.
- 6) (株) 高速道路総合技術研究所: 設計要領第三集 トンネル編, 2006.4.

**Summary** Today, realization of safe and secured society is aimed for, and maintenance of existing structures is a big topic. Technologies for preventing damages and checking the soundness of structures are highly demanded, in which measuring and monitoring technologies play particularly important roles. Fiber bragg grating (FBG) optical fiber sensing is suitable for measuring and monitoring damages and checking the soundness of structures; and measuring instruments are being developed and tested for actual applications. This paper describes the principles of FBG optical fiber sensing, the characteristics of temporal decomposition multiplexing, which enables multipoint monitoring, and measuring instruments developed. Some applications are described together with the characteristics of the technology.

**Key Words :** Measurement, Disaster prevention, Health monitoring, Optical sensing, FBG