

# ヘルスマニタリング技術の建設構造物および地下埋設構造物への応用開発

## 光ファイバセンサ (FBG) によるコンクリート構造物のひずみ計測に関する研究

小山 潔、星川 洋 (電気電子工学科)

横田 理 (工学部・機械工学科)

上田 政人 (理工学部・機械工学科)

大滝 政博 (テクニカルリンク (株))

### 1. 緒言

ヘルスマニタリング技術の建設構造物および地下埋設構造物への応用開発の一環として、光ファイバセンサによるコンクリート構造物のひずみ計測に関する研究を推進し、その研究結果について報告する。

構造物を長期に亘って安全に安心して使用するためには、その状態を監視するヘルスマニタリング技術が重要である。構造物では荷重 (応力) によるひずみの計測が健全性の評価に有効であり、ひずみゲージによる計測が行われているが、電磁気的な雑音の影響を受けることや耐食性と耐久性が低い問題がある。一方、光ファイバはそれらの問題を受けることなく構造物のひずみを計測でき<sup>(1)~(7)</sup>、計測データの長距離伝送と遠隔地からの監視が可能である。光ファイバセンサによるコンクリート構造物のひずみ計測に関する研究は種々行われているが、橋梁などを対象としたコンクリート構造物への走行荷重に対する光ファイバセンサによるひずみ計測に関して筆者らが知る限りでは明確となっていない。本研究では、光ファイバセンサの1つであるFBG (Fiber Bragg Grating) センサ<sup>(1)~(7)</sup>を埋設したコンクリート試験体を作製し走行荷重実験を行い、走行荷重毎のひずみ計測を行いFBG センサと従来のひずみゲージとの性能検証を行った。

### 2. FBG センサによるひずみ計測の原理

光ファイバのコアに紫外線を照射すると光誘起屈折率変化により照射部の屈折率が変化する。FBG は、光ファイバのコアに周期的に異なる屈折率を書き込んだものであり、この部分が回折格子として働き、Fig.1 に示す様に光ファイバ中を透過する光のうち一部の光だけが反射し入力側で観測できる。反射光の波長 (ブラッグ波長)  $\lambda_B$  は、FBG の周期  $\Lambda$  と光ファイバの有効屈折率  $n$  とによって(1)式で表わせる<sup>(8)</sup>。また、温度変化  $\Delta T$  とひずみ  $\varepsilon = \Delta L/L$  およびブラッグ波長  $\lambda_B$  とには(2)式の関係がある<sup>(8)</sup>。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad \dots (1)$$

$$\frac{\Delta \lambda_B(\Delta T, \varepsilon)}{\lambda_B} = \left[ \left( \frac{dn}{dT} \right) \frac{1}{n} + \left( \frac{dn}{d\varepsilon} \right) \frac{1}{n} \right] \Delta T + (1 - P_e) \varepsilon \quad \dots (2)$$

ここで、 $P_e$  は実効光弾性係数である。FBG は、温度や力学的な作用に対して屈折率が変化しブラッグ波長がシフトする。このブラッグ波長のシフト量を計測することにより、力学的な作用であるひずみを測定する。

### 3. 実験方法

今回作製したコンクリート試験体の寸法は、Fig.2 に示す様に長さ 2800mm、幅 300mm、高さ 210mm

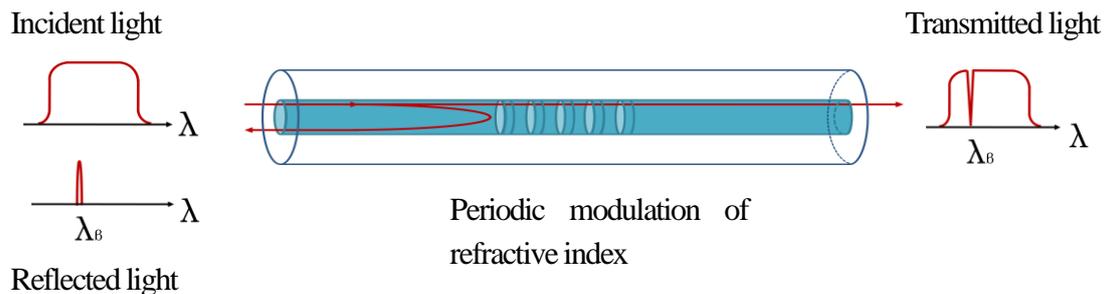


Fig.1 Bragg grating operating principle.

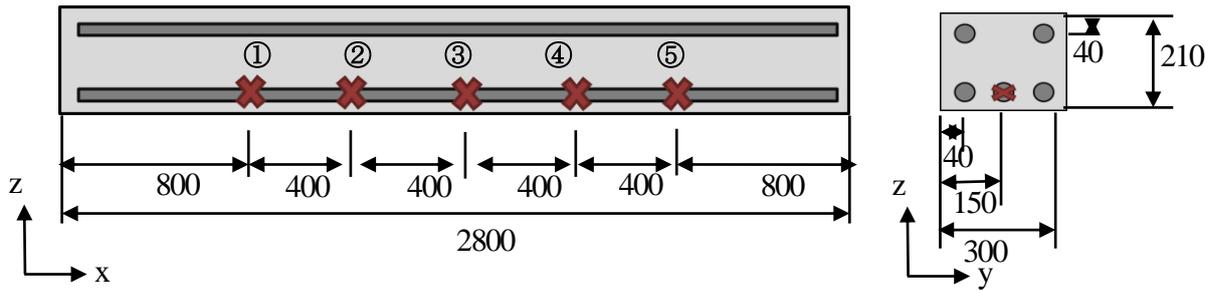


Fig.2 RC slab specimen

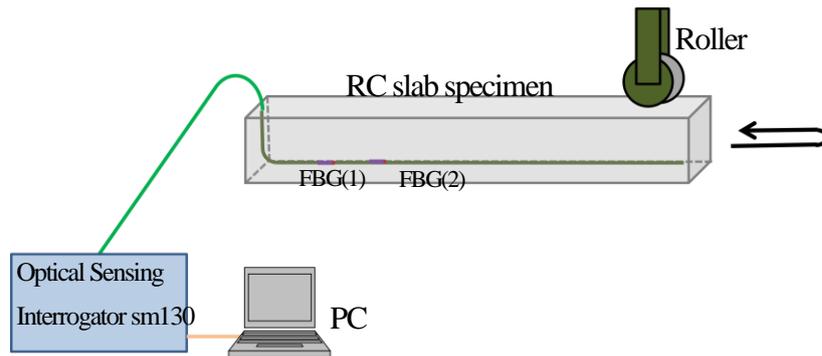


Fig.3 Measurement system of strain distribution

である。D16 の鉄筋を使用しフープ筋なしであり、かぶりを 40mm とした。FBG センサとひずみゲージをコンクリート試験体底面に 3 本ある中央の鉄筋の Fig.2 に示す”×”印の位置 5 ケ所に置き、FBG センサはスポット溶接で、ひずみゲージは接着剤で鉄筋の左右両サイドに貼り付けた。センサの間隔は、400mm である。各 FBG の初期波長は、FBG(1):1527.674nm、FBG(2) : 1535.809nm、FBG(3) : nm、FBG(4) : nm、FBG(5) : nm である。また、ひずみゲージは、型番 ZFLA-1-11 のものを使用した。Fig.3 に示すようにローラーにより荷重を加えコンクリート試験体を往復移動させ走行荷重実験を行った。往復時間は約 18 秒で、この間ローラーにより一定荷重を加えた場合と荷重を±30%で変動させた場合の 2 通りとした。荷重を変動させた周波数は 2Hz である。荷重を 5kN～80kN まで変えてひずみ量の計測実験を行った。なお、コンクリート試験体は端部から左右約 300mm の位置で 2 点支持されている。

#### 4. 実験結果

Fig.4 には、往復時間に対する荷重が異なる場合のひずみ量を示す。Fig.2 に示したセンサ位置③の計測値であり、Fig.(a)にはひずみゲージの場合を Fig.(b)

には FBG センサの場合をそれぞれ示す。ローラーがセンサの上を通過した時に最大のひずみ量を示し、コンクリート試験体の往復移動であるので 2 山の波形を呈する。ひずみゲージでは外来に起因すると考えられる雑音が大きい。

Fig.5 には、荷重に対するひずみの変化を示す。横軸のひずみは、Fig.4 の各荷重における最大のひずみ量（波形の頂点）である。ひずみゲージと FBG センサ共に荷重に対するひずみ量変化が良い一致を示している。20kN 以下の荷重に対してはひずみ量変化が小さく、20kN 以上から荷重に対してひずみ量がほぼ比例的に変化している。

Fig.6 には、荷重に対するコンクリート試験体のたわみを示す。たわみの計測は、埋設した各センサの設置位置とほぼ同じ位置のコンクリート試験体の外側で行った。Fig.7 には、たわみ量に対するひずみの変化を示す。コンクリート試験体のたわみと鉄筋に溶接し埋設した FBG センサによるひずみとがほぼ比例していることがわかる。

Fig.8 には、変動荷重を加えた場合の往復時間に対する FBG センサのひずみ量を示す。変動荷重の周波数 2Hz の正弦波を重畳したひずみ波形を計測できている。

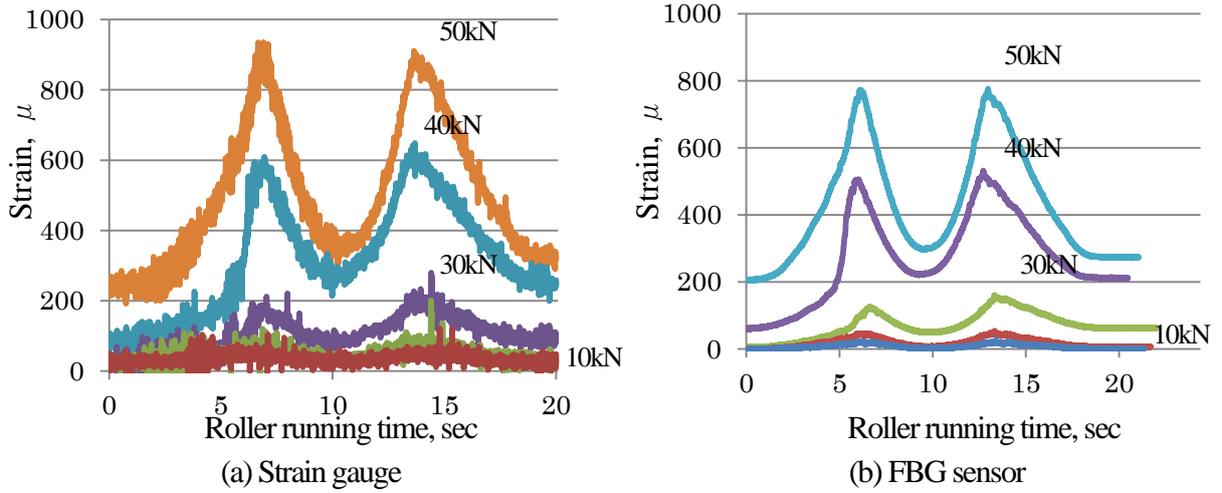


Fig.4 Change of strain for roller running time as parameter of load

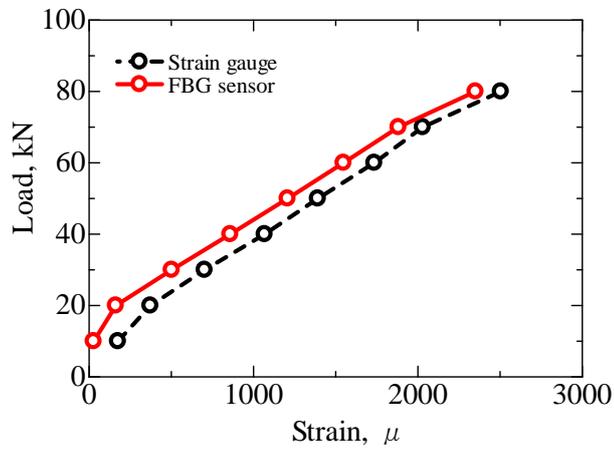


Fig.5 Strain vs. load

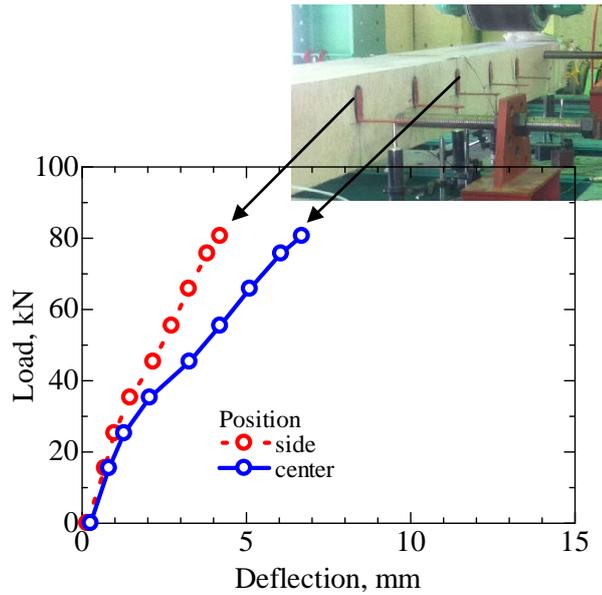


Fig.6 Deflection vs. load

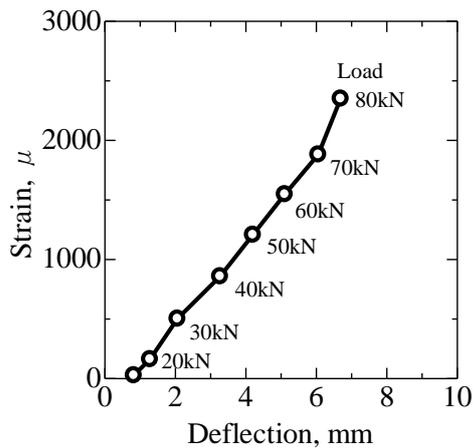


Fig.7 Deflection vs. strain

## 5. 結 言

ヘルスモニタリング技術の建設構造物および地下埋設構造物への応用開発の一環として、光ファイバを利用したコンクリート構造物のヘルスモニタリング技術に関する研究を行い以下の知見を得た。

- (1) コンクリート試験体に埋設した FBG センサは、荷重に対するひずみ量変化で従来のひずみゲージと良好一致を示した。
- (2) 20kN 以下の荷重ではコンクリートにより鉄筋の曲げ力がほぼ掛らずひずみ量が非常に小さいが、20kN 以上では荷重に対してひずみ量がほぼ比例的に変化した。
- (3) 大型車両の走行を模した周波数 2Hz の変動荷重に対しても良好にひずみ計測を行える。実用上 200Hz の振動周波数は計測可能である。

本研究の遂行に当たって、『研究グループ 1 : UFC および CF を用いた公共構造物の部材の安全性と再生化技術に関する研究』と連携して行った結果である。木田哲量教授、阿部忠教授、水口和彦助教の指導と協力に感謝致します。

## 参考文献

- (1) T.A.Berkoff, M.A.Davis, D.G.Bellemore and A.D.Kersey : Hybrid Time and Wavelength Division Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor Array, Proc. Of SPIE, 2444 (1995) p.288
- (2) ed. By J.Dakin and B.Culshaw : Optical Fiber Sensors, Volume I ~IV, Artech House Publishers (1997)

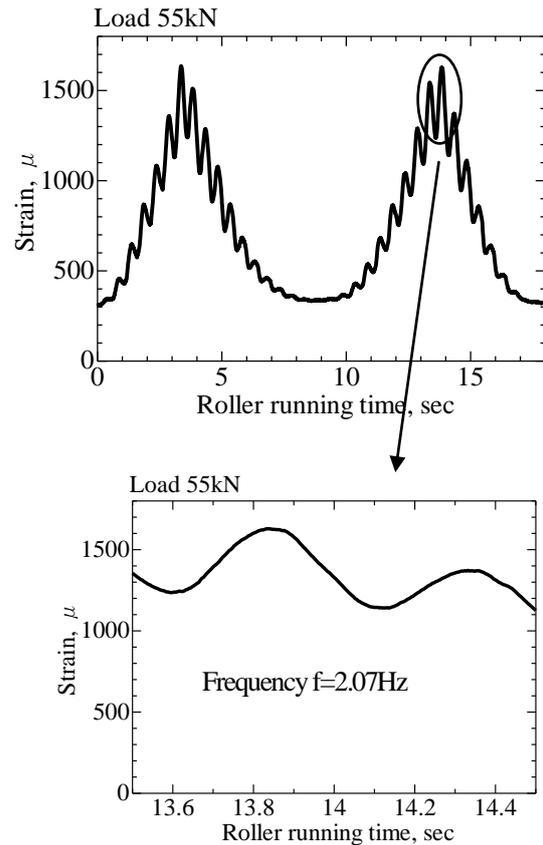


Fig.8 Change of strain for roller running time at FBG sensor

- (3) 景山和郎, 村山英晶 : 光ファイバセンサによる構造モニタリング, 非破壊検査, 50, 9 (2001) pp.595-600
- (4) 保立和夫 : 痛みの分かる材料・構造のための光ファイバ神経網技術, 計測と制御, 46, 8 (2007) pp.591-598
- (5) X.Chapeleau, M.Drissi-habti, 富山禎仁 : 土木構造物における FRP の健全性モニタリングのための埋設光ファイバ・センサ, 日本複合材料学会誌, 36, 1, (2010) pp.25-30
- (6) Y.G.Lee, B.W.Jang Y.Y.Kim, C.G.Kim C.Y.Park and B.W.Lee : Detection of Impact Locations on Composite wing Structure using FBG Sensors, Proc. APWSHM (2010) p.1A4
- (7) G.C.Kahandawa, J.A.Eppaarachchi, H.Wang and J.Canning : Effects of the Self Distortions of Embedded FBG Sensors on Spectral Response due to Torsional and Combined Loads, Proc. APWSHM (2010) p.1A5
- (8) R.Kashyap : Fiber Bragg Gratings (Optics and Photonics Series), Academic Press (1999), pp.576