

光ファイバーセンサを用いたコンクリート構造物の ヘルスマモニタリングに関する検討

日大生産工 (院) ○小菅 学

日大生産工 小山 潔、星川 洋

1. はじめに

ビルや橋梁といった社会インフラは多くの人々に利用される。このような公共施設には地震などの振動による応力でひずみが発生する。このひずみの量が許容範囲を超えると、その構造物は倒壊してしまう。このようなことになると経済的な損害を与えるだけでなく、人の命が失われる事態となる。このようなことを防ぐためにヘルスマモニタリング技術がある。ヘルスマモニタリングとは構造物の健全性の監視である。ひずみを計測する方法として従来では、銅線の伸縮による電気抵抗の変化を利用したひずみゲージが利用されてきた。しかし、ひずみゲージは電気を使用し、ひずみゲージ自体に電力を供給しなければならないため、近くに電源が必要になることや、火災が発生すると危険な施設では使用することが困難である。そのため近年では、光ファイバーをセンサとして使用する研究が行われている*1。これは光ファイバーを構造物に埋め込み人間の神経のような働きをさせようとするものである。光ファイバーセンサは、センサ自体に電力を供給する必要がなく、信号発信源のみに電力を供給すればいいので遠距離観測が可能であり、光を使用するので可燃性のある設備でも使用することが出来る。

本研究は光ファイバーセンサの一つであるFBG (Fiber Bragg Grating) センサを用い

たコンクリート構造物のヘルスマモニタリングに関する研究である。今回は FBG センサを埋設したコンクリートの床板にローラーによる走行加重及び振動を加え、FBG センサのひずみ量の計測と振動周波数の抽出を行い、振動加重による影響と亀裂発生前後の振動周波数について検討した。

2. FBG センサのひずみ計測

通常の光ファイバーの直径は約 1mm 程度で中心部に屈折率の大きいコアと呼ばれる部分があり、その周囲を屈折率の小さいクラッドが覆っている。コアの部分に光信号を入力することで情報のやりとりをする。コア内に何も障害が無いとすると、入力側から連続的な波長成分を持つ光信号を入れれば、出力側からは入力したものと同一信号が得られる。図 1 のようにコアの部分にフェイズマスクを通して紫外線を照射し、コア内に周期的に屈折率が変化した部分 (干渉縞) を作る。この部分が FBG センサと呼ばれる。この干渉縞がフィルターの様な役割をし、一部の波長のみを反射させ、他は透過させる。この反射光の波長は干渉縞 1 つ 1 つの間隔によって変化させることが出来るので、フェイズマスクのマスクピッチを変え、干渉縞の間隔を変えた FBG センサを同軸上に作成すれば、1 本の光ファイバーでも複数点の測定が可能となる。

Investigation of the health monitoring of concrete structure using an optical fiber sensor

Manabu KOSUGE, Kiyoshi KOYAMA and Hiroshi HOSHIKAWA

無負荷の時の反射波長はコアの屈折率を n_0 、干渉縞の間隔を Λ とすると、反射波長 λ_B は(1)式より求めることができる。

$$\lambda_B = 2n_0\Lambda \quad \dots \dots (1)$$

一方で、FBG センサに軸方向のひずみ $\Delta\varepsilon$ が加わったとすると、無負荷の時の反射波長 λ_B は変化し、 $\Delta\lambda_B$ となり(2)式より求めることができる。

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\varepsilon \quad \dots \dots (2)$$

P_e は実効光弾性定数であり、数値は0.213である。(1)式より得られた数値をゼロベースとすれば、測定して得られた反射波長と比較することで FBG センサ付近に圧縮、伸長の応力によるひずみ量の測定ができる。

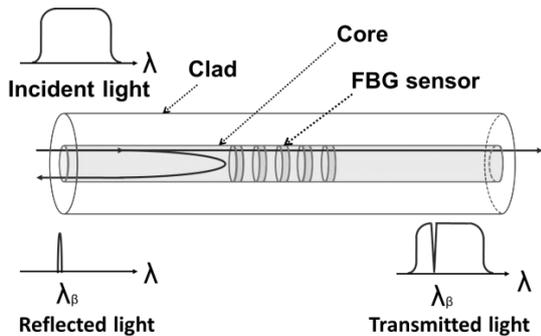


図1 FBG センサの原理

3. 高速フーリエ変換による信号処理

走行加重と振動を加え FBG センサより得られたひずみ量に対して周波数解析を行う。次に、今回周波数解析に用いた高速フーリエ変換 (FFT) について説明する。フーリエ変換は信号解析などに用いられる*2。例えば、大きさ (振幅) と時間で表された出力波形があるとする。これを FFT で処理することで時間領域が周波数領域に変換され、大きさ (振幅) と周波数で表される。よって処理した出力波形に、どの周波数がどれだけの成分含まれているかを抽出することができる。時間領域で $f(t)$ と表される信号が、周波数領域で角周波数 ω を変数とする関数 $F(\omega)$ によってあらわされる時、 $f(t)$ と $F(\omega)$ は(3)式の関係がある。

周期 2π の周期関数 $f(t)$ の複素フーリエ係数 C_k は、 $f(t)$ と e^{jkt} の内積で与えられ、関数 $f(t)$ は基本区間を $(0, 2\pi)$ とすると(4)、(5)式の関係がある。(5)式は(6)式のように表すことができ、これを離散的フーリエ変換 (DFT) という。FFT はこの DFT における計算の無駄を省き、三角関数の周期性を利用した計算技法である。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \dots \dots (3)$$

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jkt} \quad \dots \dots (4)$$

$$C_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) e^{-jkt} dt$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) e^{-jkt} dt \quad \dots \dots (5)$$

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)ki}$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad \dots \dots (6)$$

4. 実験方法

図2に実験に使用したコンクリート床板の側面図、図3に正面図を示す。全体の大きさは、縦300mm、横3000mm、高さ210mmで、コンクリート床板の内部には上から深さ38mm、172mmの位置に鉄筋 (D16) が埋め込まれている。FBG センサは図2,3に示すように床板下部の中央の鉄筋の端から900mm離れた箇所に sensor1、そこから300mm間隔で sensor2,3,4,5 と計5つ設置してある。

図4に実験装置図を示す。コンクリート床板の両端を装置に乗せ、その上をローラーが走行し、これによる FBG センサのひずみ量の変化を PC にて測定した。sensor1 から近いコンクリートの末端をローラーの始点とし、走行方法はコンクリート床板の上を往路9秒、復路9秒の計18秒で一往復させる方法をとった。この時ローラーには一定値の $\pm 30\%$ の振動加重を掛けている。振動加重を掛ける周波数は1,2,3Hzの3パターンとした。加重量

を上げる際は始点にて一度停止させた後、再び走行させた。ローラーの加重する間隔は 0～60kN まで 10kN 間隔で加重した。

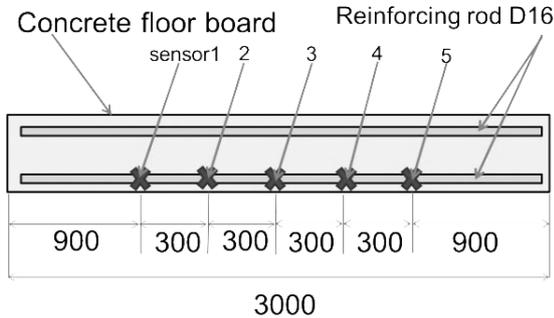


図 2 使用したコンクリート床板の側面図

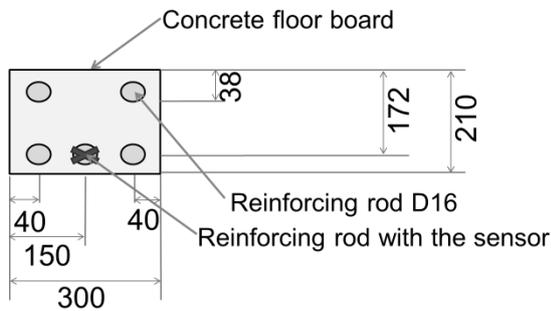


図 3 使用したコンクリート床板の正面図

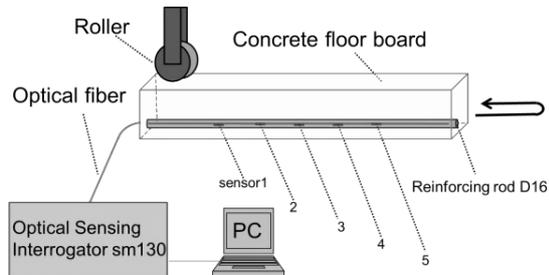


図 4 実験装置図

5. 実験結果

図 5 は 50kN±30% の 2Hz で走行させた時の FBG センサのひずみ量の変化の推移を表したものである。X 軸が走行時間、Y 軸がセンサ番号、Z 軸がひずみ量を表している。手前から sensor1,2,3,4,5 の順で並んでいる。まず走行開始 2 秒付近で往路における sensor1 のピークがあり、続いて 2,3,4,5 のピークが確認できる。そして 9 秒で折り返し、11 秒付近

で復路における sensor5 のピークが確認でき、続いて 4,3,2,1 と順に FBG センサのピークが確認できる。なお、コンクリート床板には 30kN の 1Hz で走行させた時に初期亀裂が発生した。

図 6 に sensor1、図 7 に sensor2、図 8 に sensor3 における各加重値のひずみ量の最大値を並べたものを示す。X 軸が加重値、Y 軸がひずみ量を表している。この最大値は 1 回の走行で発生する往路と復路の 2 つのピークの平均値をとったものである。理論上周波数を上げて振動回数が増加するだけで最大ひずみ量に差はないはずであるが、図 6,7 と図 8 を比べると、図 6,7 はどの周波数においても殆ど差はないが図 8 では 1Hz のみひずみ量が少ない値をとっている。これは 1Hz の振動回数が 2,3Hz より少ないため+30%の加重がかかる時に丁度 sensor3 の真上付近の床板を叩けなかったことで、隣の sensor2 より低いひずみ量となってしまったと考えている。

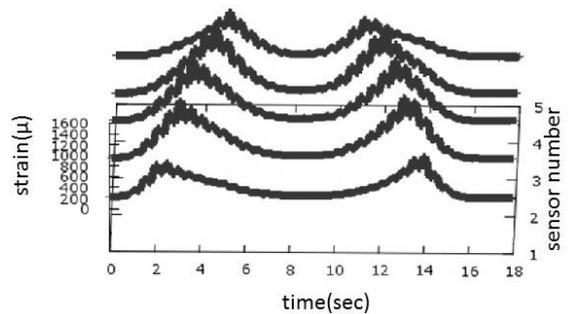


図 5 FBG センサの走行時刻に対するひずみ量の変化

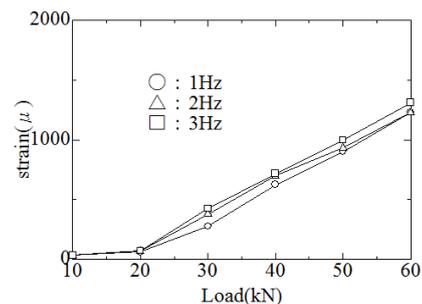


図 6 sensor1 における各周波数のひずみ量

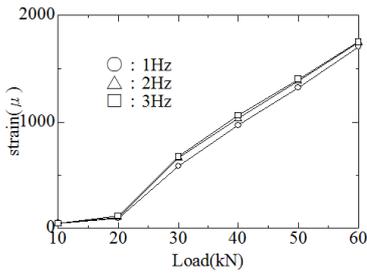


図7 sensor 2における各周波数のひずみ量

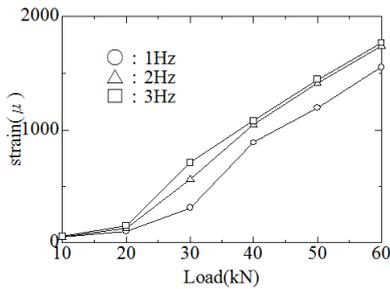


図8 sensor3における各周波数のひずみ量

図9に10kNの1Hz、図10に30kNの1Hz、図11の50kNの1Hzで走行加重を行った際に生じたひずみ量をFFTで処理した結果を示す。1回の走行で発生する2つのピークをそれぞれ分けてFFTを行った。どの図においてもローラーの移動による成分と掛けた振動である1Hzの部分に成分が抽出されていることが分かる。また、亀裂の発生した30kNをFFTした図10では往路(実線)に比べ復路(破線)の高域の周波数成分が減少している。高域周波数の4Hzで比較すると亀裂発生前の図9と図10の往路のでは $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 間の値を持つが、図10の復路と図11では $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 間の値を持っていることが分かる。

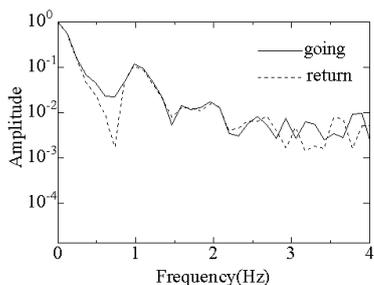


図9 センサ3における10kN-1Hzの加重の周波数解析

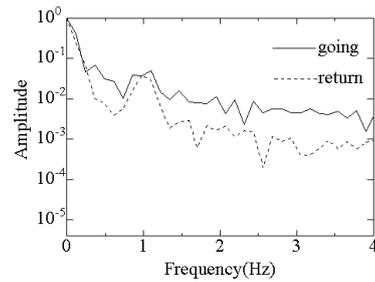


図10 センサ3における30kN-1Hzの加重の周波数解析

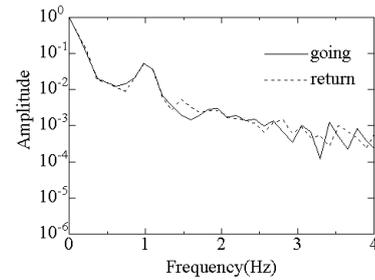


図11 センサ3における50kN-1Hzの加重の周波数解析

6. まとめ

FBG センサを用いた構造物のヘルスマニタリング技術に関する研究として、ローラーによる振動加重を掛けながら走行し、振動加重に対するFBG センサのひずみ量の計測を行った。振動加重によるFBG センサのひずみ量の計測では、周波数が増加しても同じ計測点でのひずみ量は差異がないが分かった。また、FBG センサのひずみ量をFFTで処理した結果、今回の実験では亀裂発生前後で高域の周波数成分が減少することが分かった。今後の予定として、温度変化によるひずみ量の変化の測定を行いFBG センサによる構造物のヘルスマニタリング技術の開発を行う。

参考文献

- 1) 影山和郎, 村山英晶, 光ファイバセンサによる構造モニタリング, 非破壊検査第50巻9, (2001), pp595-600
- 2) 雨宮好文, 佐藤幸男, 信号処理入門, (1987), pp.100~101.p.103.p.124.