

CFRP ケーブルに対するヘルスマニタリング技術に関する研究

日大生産工（院） ○ 江村 隼斗

日大生産工 小山 潔

1. はじめに

高度経済成長期以降に建設された構造物について、建設後50年を経過する施設の割合が加速度的に増加しており、インフラ設備の老朽化の対応が急務となっている。施設の定期点検の方法は、国土交通省が定めた「定期点検要領」では、近接目視、または近接目視と同等の評価が行えるほかの方法としている。^{*1*2}しかし、近接目視は人の五感に頼った検査方法であるため、技術継承が難しく検査場所に人を配置させる必要があるため、老朽化した設備の増加に対応できない。この問題の解決方法として、ヘルスマニタリング技術の導入が提案されている。

ヘルスマニタリングは検査対象物にセンサなどの計測機器を設置して物理量を測定することで健全度を診断する技術である。導入による利点として、得られるデータが客観性の高いものであることや、検査場所の無人化が可能であることなどが挙げられる。ただし、センサから得られるデータ量は膨大であるため、AIなどを併用して効率的にデータ解析を行う必要がある。

この研究ではCFRPケーブルを測定対象として、FBGセンサとニューラルネットワークを使用したヘルスマニタリングが可能であるかを検証した。

2. 原理

2. 1. CFRP ケーブル

CFRP ケーブルはCRRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics：炭素繊維強化プラスチック

ク）をケーブルに成形したものであり、従来品と比較して、軽量、高強度、耐腐食性などの利点がある。主な用途として、コンクリートの補強や橋梁のケーブルなどが挙げられる。

2. 2. FBG センサ

FBG (Fiber Bragg Grating) はFig.1に示すように、光ファイバのコアの内部に形成された屈折率変調（Grating：回路格子）を指す。回路格子はレーザーなどの強力な光源によって、等間隔で書き込まれており、書き込まれた部分は屈折率が変化している。

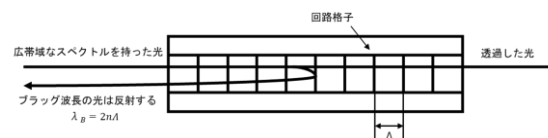


Fig.1 FBGセンサの原理

広帯域のスペクトルを持った光をFBGセンサ内部に入射すると、回路格子の間隔Λに合致した波長（ブラッグ波長 λ_B ）の光のみが反射し、その他の波長の光は通過する。ブラッグ波長 λ_B は回路格子の間隔Λに比例して変化する。下式にブラッグ波長 λ_B と回路格子の間隔Λの関係を示す。

$$\lambda_B = n\Lambda \quad (n: \text{コアの屈折率}) \quad (1)$$

FBGセンサに応力を加えて回路格子の間隔Λを変化させると、間隔の変化に比例して反射する光の波長が変動するため、ブラッグ波長を計測することで、センサに加えられた応力を検出することができる。

2. 3. ニューラルネットワーク

ニューラルネットワーク (NN) は機械学習の手法の1つであり、Fig.2 (a) に示すような人間の神経回路網を数理モデル化した人工ニューロンである。

ニューロンは生物の脳に存在する神経細胞を指し、ニューロン同士の結合が活発になることで、脳細胞を活性化させることができる。ニューロンは電気信号の強さが閾値を超えることでほかのニューロンと結合することができ、シナプスはこの電気信号を化学物質の信号に変換して情報を伝達する働きがある。

人工ニューロンには重み w とバイアス b の2つのパラメータが存在しており、NNの学習はこれらの調節によって行われる。重み w は人工ニューロン間の接続の強さを表しており、重要な特徴ほど大きな値となる。バイアスは人工ニューロンの活性化のしやすさを表している。人工ニューロンから出力される値は活性化関数 φ によって決定される。入力を x 、重みを w 、バイアスを b 、活性化関数を φ とすると、人工ニューロンの出力 y は、

$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^m w_i x_i + b \right) \quad (2)$$

で表される。

NNの構造をFig.2 (b) に示す。NNでは複数の人工ニューロンが複雑に絡み合うことで複数の層を成している。層は、入力層、複数の中間層、出力層から構成されており、重み w は層の間に設定されている。

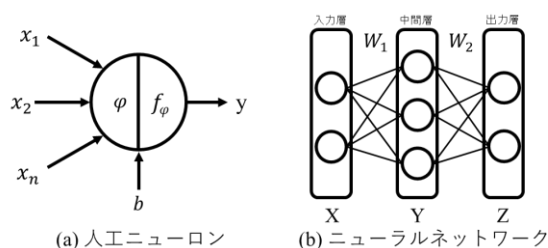


Fig.2 ニューラルネットワークの構造

3. 実験方法

実験装置のブロック図を Fig.3 に示す。計測器はAOS社製のFBGセンサモニター (AWE-CCD-1550) を用いた。FBGセンサをCFRPケーブルに対称になるように2個設置しており、CFRPケーブルの一端に動的荷重を与えた時の反応を計測する。動的荷重の大きさは100g、500g、1000g、1500gの4種類を用意して、計測はそれぞれ5回ずつ、計20回行なった。計測データはTable.1のように、荷重量ごとにグループ分けを行った。

NNの構造はFig.4に示すような、1つの入力層、2つの中間層、1つの出力層の4層から構成される順伝播型NNである。5組の計測データのうち、3組は学習用に、2組は評価用に振り分けた。



Fig.3 実験装置

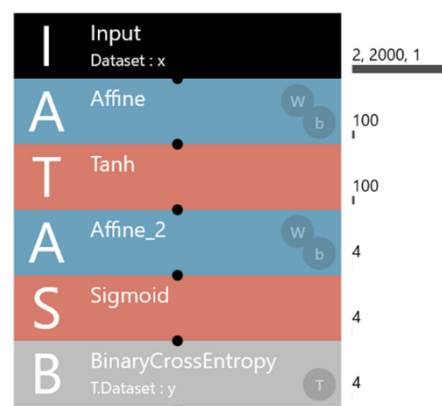


Fig.4 ニューラルネットワークの構造

Table.1 データのグループ分け

動的荷重量	y_1	y_2	y_3	y_4
100g	0	0	0	1
500g	0	0	1	0
1000g	0	1	0	0
1500g	1	0	0	0

4. 実験結果

FBG センサより得られた計測データを Fig.5 ~ 12 に示す。縦軸はブラッグ波長の変動量、横軸はサンプル数である。グラフより、荷重量とブラッグ波長の変動量は比例関係にあることがわかる。しかし、センサ X において、CFRP ケーブルが振動しているのにもかかわらず、グラフの波形は上下対称になっていないことや、センサ X とセンサ Y では波形の振幅が異なることから、センサの設置方法が適切でなかったことが考えられる。

計測データの NNC による評価結果を Table.2 に示す。与えられた動的荷重が 100g、500g、1500g である場合は、精度の高い判別ができていることがわかる。与えられた動的荷重が 1000g の場合は、上記の影響によって精度が低下していると考えられる。1500g も 1000g と同様に正確な計測ができていないが、波形の振幅が最も大きいため、正しく判別されていると考えられる。

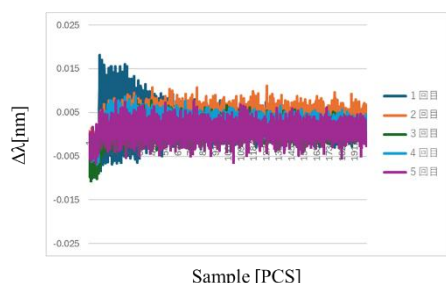


Fig.5 荷重を加えた時のセンサXの波長の変化量 (100g)

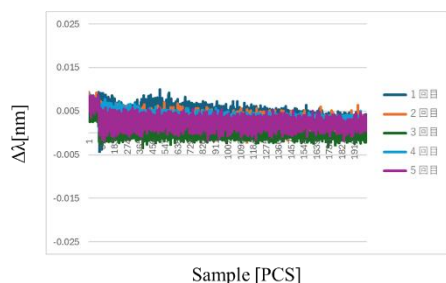


Fig.6 荷重を加えた時のセンサYの波長の変化量 (100g)

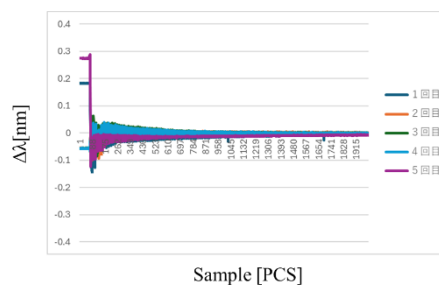


Fig.7 荷重を加えた時のセンサXの波長の変化量 (500g)

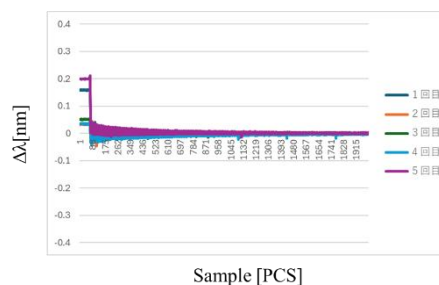


Fig.8 荷重を加えた時のセンサYの波長の変化量 (500g)

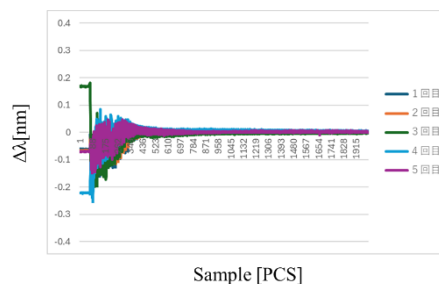


Fig.9 荷重を加えた時のセンサXの波長の変化量 (1000g)

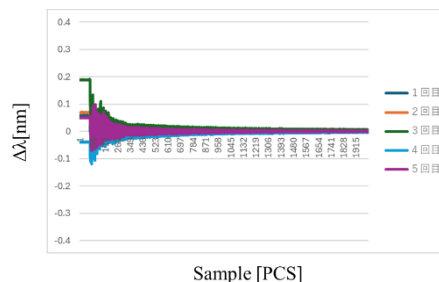


Fig.10 荷重を加えた時のセンサYの波長の変化量 (1000g)

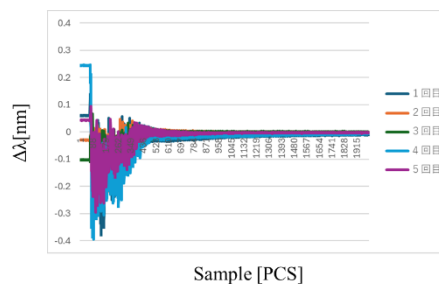


Fig.11 荷重を加えた時のセンサXの波長の変化量 (1500g)

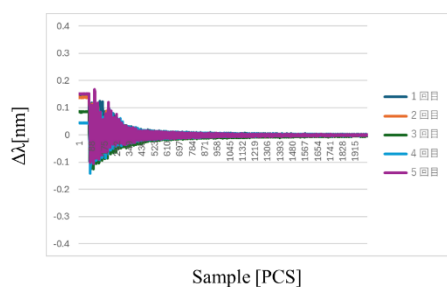


Fig.12 荷重を加えた時のセンサYの波長の変化量（1500g）

2) 国土交通省, 道路トンネル定期点検要領, (2024)

https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo7_7.pdf, (参照 2025-10-09)

Table.2 NNを用いた荷重量の推定結果

評価結果	y'_1	y'_2	y'_3	y'_4
評価データA1 (100g) [%]	0.1258	2.3706	11.4624	99.8491
評価データA2 (100g) [%]	0.6412	2.9905	3.3069	95.2832
評価データB1 (500g) [%]	24.9015	1.6281	98.9862	0.1242
評価データB2 (500g) [%]	2.2869	19.2945	99.9678	0.0001
評価データC1 (1000g) [%]	19.6596	21.3109	0.7800	15.7780
評価データC2 (1000g) [%]	1.4327	61.7060	0.0100	13.5390
評価データD1 (1500g) [%]	99.9515	64.9013	34.2260	0.0000
評価データD2 (1500g) [%]	99.3423	0.2185	0.0213	0.0058

5. まとめ

本研究では、FBG センサと NNC を使用した CFRP ケーブルのヘルスマニタリングについて検討を行った。FBG センサより得られた計測データは加重量ごとに異なる波形を示していたことや、NNC によるデータの判別は 1000g を除いて高精度であったことから、今回用いた手法でのヘルスマニタリングが可能であることが分かった。

今後の課題として、実験装置の改良が挙げられる。今回の実験では、大きな動的荷重を加えた際の計測が適切に行われなかったため、センサの設置位置を最適化させる必要がある。

また、NN の精度を向上させるために、学習データの数を増やすことや、荷重量ごとの計測データをフーリエ変換によって周波数成分に分解して、より詳細な特性を分析することについて検討を行う。

参考文献

1) 国土交通省, 道路橋定期点検要領, (2024)

https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo7_6.pdf, (参照 2025-10-09)