

# 光ファイバーセンサーを用いた斜張橋ケーブルの張力管理システムの開発

日大生産工(院) 清水 健介 日大生産工 木田 哲量  
日大生産工 和田 克哉 テクニカルリンク(株) 大滝 政博

## 1. はじめに

斜張橋や二ールセン橋等のケーブル構造を有する橋梁のケーブル張力測定方法には、従来から振動法が用いられてきた。この振動法における張力算定式は、単純な弦の式に加え曲げ剛性や質量等を考慮して、さらに、現場係数を乗じて現実と合わない部分を調整している。この現場係数は代表的なケーブルや張力範囲に特化しており、全ての状況に合うとは限らない。そこで、現在注目されている光ファイバーセンサーによる計測技術と光ファイバー通信網との接続による日常的な橋梁診断(橋梁モニタリング)技術の確立が挙げられる。この技術が確立すると、これまでの橋梁診断とは質・量・経費・頻度とあらゆる内容においてレベルアップされ、タイムリーに結果を求める事ができ、その期待は大きい。

本報は、斜張橋ケーブルの張力管理システムに光ファイバーセンサーFBG(Fiber Bragg Grating)を用いた時の結果と、光ファイバーセンサーによる橋梁モニタリングシステムについて提案するものである。

## 2. 従来の形状管理システムについて

コンピューター解析技術の発達に伴って、本四架橋時代から現在に至るまで、長大斜張橋は盛んに架設されてきた。斜張橋の架設は、ケーブルで主桁を吊るといった構造的な特徴を利用して、次々と張出していき張出し架設工法が採用される。しかし、斜張橋は高次の不静定構造で、かつ柔構造である事から、製作および架設精度は極めて重要である。張出し架設はケーブルを張った段階ごとに、桁や塔の形状、ケーブルの張力等を計画通りにするためにケーブルの張力を微調整して誤差を小さくする作業が行なわれる。そして架設の最終段階では、橋が所定の形状と張力で仕上がる事が望ましく、この事から架設途上の形状管理が、いかに大切かが伺える。

形状管理作業は、事前に橋面上の荷重等を調査して形状管理の目標値となる管理値を計算する。その後、現場における計測作業は温度変化の少ない夜間に実施する。次に計測値と予め計算してある設計計

算値とを比較して誤差を算出する。その誤差が予め設定した許容範囲に収まっているか否かをチェックし、調整の必要性の有無を判断する。仮に調整が行なわれた場合、再び計測、誤差計算、調整の必要性の判断を調整の必要が無くなるまで繰り返す。計測内容は橋桁の形状、塔の倒れ、ケーブル張力および温度の4種類である。そして、これまでこのケーブル張力測定に用いてきた方法が振動法であった。

## 3. 光ファイバーの基本原則

これまでのセンサー技術は、電子機器という一つの枠から脱する事ができず、周辺に存在する動力機械・電力・磁気等によるデータ信号への電磁誘導及び腐食・防爆等の問題が常に直面していた。これに対して光ファイバーセンサーは、電子機器という『電気』の枠から離れて、光を用いる事から電氣的ノイズが混入しない事が根本的に異なる点である。

通信用光ファイバーの断面を図3-1に、延長方向の基本的断面を図3-2に示す。光ファイバーは髪の毛ほどの太さからなる細いガラス繊維で、図3-1に示すように、屈折率の異なる2種類のガラスによる二重構造となっている。そして、図3-2に示すように、コア内に入射した光は屈折率の異なるコアとクラッドの境界面で反射を繰り返しながらコア内を伝搬していく。この時、コアの屈折率がクラッドよりも少し高くなっている事で境界面において光の性質である全反射により光がコア外に漏れる事なく伝搬される。

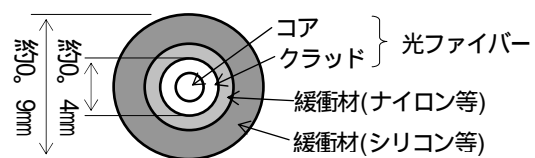


図3-1 光ファイバーの断面図

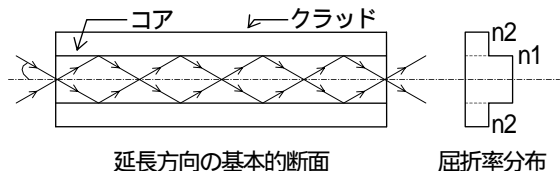


図3-2 光ファイバーの断面と屈折率分布

#### 4. ケーブル張力測定に適した光ファイバーセンサー

ケーブル張力測定という一項目のみを考えた場合、この測定は静的測定で充分である。しかし、これまで振動法を実施してきたように、動的測定からも張力の推定が実施でき、さらに、将来的に測定内容の幅を持たせる事を考えると、静的・動的の両面に強いセンサーが最適と考えられる。また、ケーブル内にセンサーを設置する事を考えるとセンサーの大きさが「小さい」という事が不可欠である。

光ファイバーセンサーは平成17年現在、その測定原理の異なる主なセンサー種類として以下の4種類が挙げられる。

FBG BOTDR  
SOFO マイクロベンディング

BOTDRは静的測定、SOFO・マイクロベンディングはセンサーという形を構成する必要上、やや大きいセンサーとなる。従って、上記の条件を全て満たす光ファイバーセンサーはFBGである。図4-1にFBGの原理を示す。

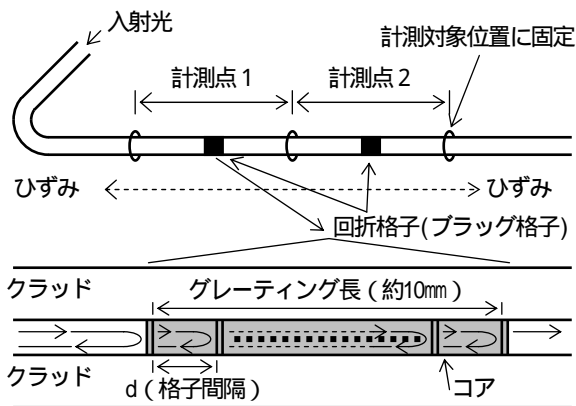


図4-1 FBGの原理

FBGは計測位置の光ファイバーのコアに回折格子(Bragg Grating)を作成し、その両側を計測対象部材に固定する。入射光がFBGに到達すると、回折格子はある特定の周波数、すなわちブラッグ波長と呼ばれる波長成分がFBGで反射され、残りの他の周波数成分は通過してしまう。このブラッグ波長のシフト量分がグレーチング間隔に依存しているため、力や温度によりひずみが発生する測定対象部材のひずみ測定が実施できる。FBGはこのような光ファイバー版のひずみゲージである。

### 5. 室内実験

#### 5.1 実験方法と目的

図5-1に示すケーブルの供試体にFBG1点と従来から使用されている抵抗線式ひずみゲージ1点を接着剤で貼り付け、引張り試験機によりひずみゲージの

ひずみ値と光ファイバーセンサーの波長変化を測定した。実験の目的は、以下の3項である

- 素線に撓りのあるケーブルは荷重(ケーブル張力)に対して素線のひずみに直線性があるか。
- FBGの出力は荷重に対して直線性があるか。
- FBGの出力とひずみゲージの出力は同レベルか。

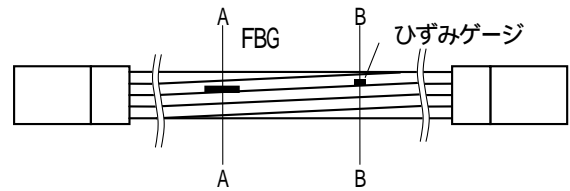


図5-1 ケーブルの供試体

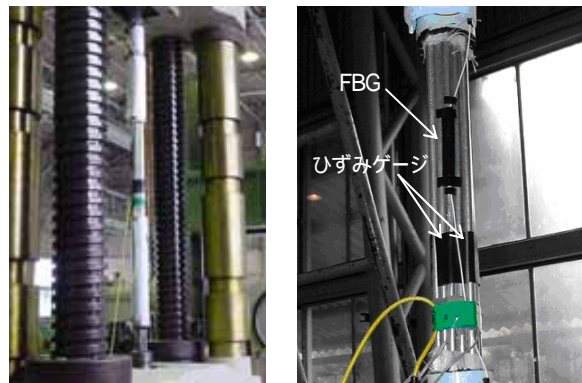


写真5-1 室内実験状況

#### 5.2 実験結果

実験は9.8kNピッチで引張荷重を加えて107.8kNまで上げ、19.6kNピッチで荷重を抜いていった。その結果を表5-1と図5-2に示す。

表5-1 測定結果

引張荷重 (kN)	ひずみゲージ ( $\times 10^{-6}$ )	FBG	
		波長(nm)	ひずみ( $\times 10^{-6}$ )
0.0	0	1556.50	0
9.8	77	1556.59	75
19.6	122	1556.65	125
29.4	179	1556.72	183
39.2	245	1556.80	250
49.0	321	1556.87	308
58.8	388	1556.95	375
68.6	459	1557.04	450
78.4	536	1557.12	516
88.2	607	1557.21	591
98.0	689	1557.30	666
107.8	765	1557.38	733
98.0	699	1557.30	666
78.4	551	1557.14	533
58.8	408	1556.98	400
39.2	260	1556.82	267
19.6	112	1556.65	125
0.0	15	1556.52	17

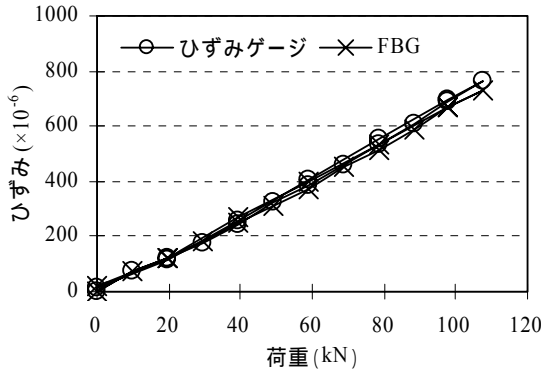


図5-2 ひずみゲージとFBG

### 5.3 まとめ

#### a) 荷重に対するひずみの直線性

図5-2に示す荷重ひずみ線図を見ると0~20kNの低い張力ではたるみが見られるが、それ以上の高い張力では直線性がある。従って数100kN~数1000kNオーダーの荷重(数10N/mm<sup>2</sup>~数100N/mm<sup>2</sup>以上の応力)が与えられる実橋のケーブルにおける荷重変化を『ひずみ出力』によって測定する事は十分に可能と思われる。

#### b) FBG出力の直線性

図5-2に示すように、FBG出力はひずみゲージ出力と同様に高い張力範囲において良い直線性を示した。

#### c) ひずみゲージとFBGのひずみ出力

図5-2に示す通り、ひずみゲージとFBGとに大きな違いがなく、107.8kNの引張荷重を与えた時、FBGのひずみ出力は $733 \times 10^{-6}$ 、ひずみゲージ出力は $765 \times 10^{-6}$ 、FBG出力はひずみゲージの96%の値を示している。一般的に光ファイバーセンサーの単純なひずみ出力は、ひずみゲージに比べて1/10程度の精度と言われているが数 $100 \times 10^{-6}$ 以上の大きなひずみ出力のレベルでは問題ないものと思われる。

## 6. 斜張橋ケーブルへの光ファイバーセンサーの適用

### 6.1 大師橋ケーブルへの適用

斜張橋の形状管理におけるケーブル張力測定は、架設時に振動法で行なわれてきた。しかし、今後の計測技術は架設現場という限定された期間だけでなく、モニタリングシステムを備えた長期測定技術の確立が必要となってくる。そこで、大師橋のケーブル架設において、試験的に光ファイバーセンサー(FBG)を素線に接着し測定を行なった(写真6-1参照)。また、光ファイバーセンサーはケーブルのモニタリングを前提に残置し、半年ごとの経年計測を1年間行ないケーブル張力の推移を調査する事とした。

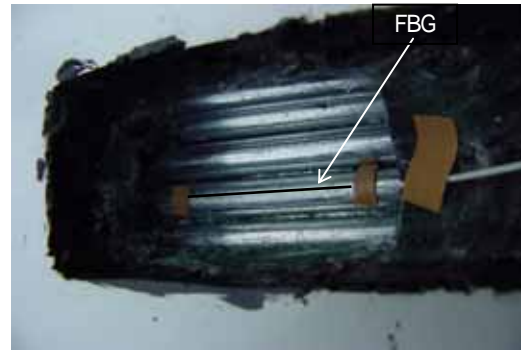


写真6-1 FBGの設置状況

### 6.2 測定結果

光ファイバーセンサー(FBG)を設置したケーブルは、最上段から2段目のケーブル(C2,C13)の2本としC2R・C13Rの両ケーブルともに張力を300kN~500kNに変化させ、その時の各張力に対するFBGの波長を測定した。また、同時に温度補正用のダミーケーブルも測定した。これらの測定結果を図6-1に示す。また、この時の計測装置による波長測定結果(スペクトル図)の代表例を図6-2に示す。この結果より、両ケーブル共に3つの測定結果に直線性があり、張力と波長変化には次の2つの近似式が得られた。

$$C2R \quad T = 2910.9x - 4465905.1$$

$$C13R \quad T = 3686.7x - 5702270.5$$

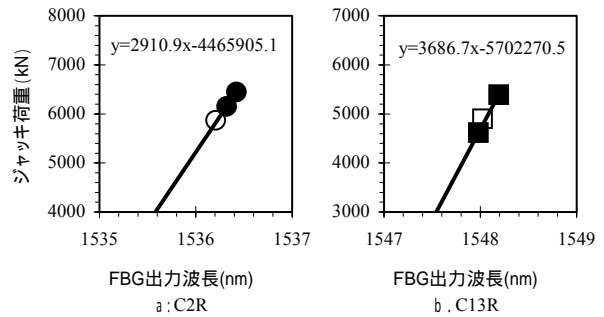


図6-1 測定結果

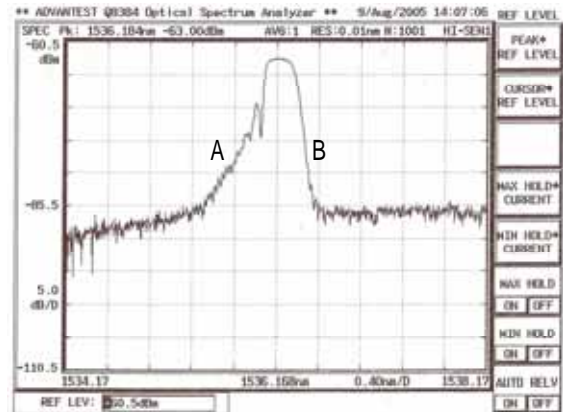


図6-2 波長測定結果(スペクトル図)

次に、今回は試験的にFBG設置方法として接着剤を用いた。しかし、接着剤は長期測定には不向きである。従って、今後の長期測定用に用いる設置方法として電気融着器による設置方法を検討している。これは、カプセル型ひずみゲージと同様に細いカプセル内にFBGを設置した光ファイバーセンサーを定着させ、そのカプセルと一体になったアルミプレートを電気融着器にて素線と一体化させるもので(写真6-2参照)、素線にはわずかな窪みが形成される(写真6-3参照)。



写真6-2 電気融着作業 写真6-3 電気融着状況

今回は、この設置方法により素線自体が受ける影響を確認するために引張強度試験と疲労強度試験を実施した。2つの材料試験はいずれもアルミプレートを融着させた素線と未処理の素線を用いて実施した。

まず、引張強度試験結果は、融着処理3本と未処理3本の各素線の引張強度を示し、3本の平均はそれぞれ以下の通りであった。

- ・電気融着処理 1585 N/mm<sup>2</sup>
- ・未処理 1580 N/mm<sup>2</sup>

上記のように、電気融着処理を施した素線の引張強度は未処理の素線に比べて低下する事は全くなかった。

次に疲労強度試験結果の図6-3は、実線が未処理の素線、破線が電気融着処理を施した素線の試験結果である。この未処理の近似線に対して電気融着の破線はわずかに下回る結果になり、多少の影響がある事が伺える。しかし、未処理の素線の試験結果は標準偏差が  $\sigma_n=4.23$  kN程度あり、電気融着の影響はこの不均一の中に位置する程度の劣化と考えられる。

以上の材料試験の結果から、電気融着の影響は非常に小さく、この程度の劣化は実橋におけるケーブルの安全率や余裕張力の中に吸収できる程度と考えられる。また数100本の中の1本の素線に対するこの

程度の疲労強度の低下よりも、ケーブル張力の常時モニタリングの効果は何倍もの価値を持つものと考えられる。

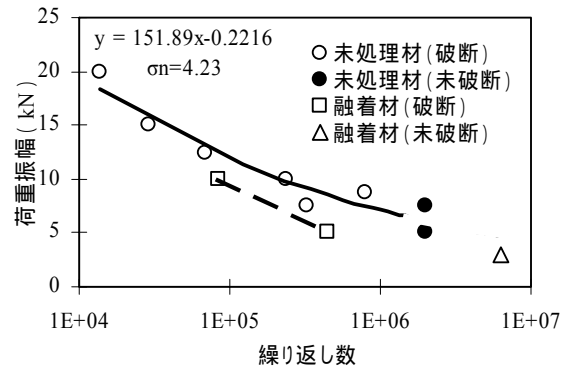


図6-3 疲労強度試験結果

## 7. モニタリングシステム

光ファイバーセンサーによるモニタリングは長期測定が基本である。そのため、センサーの設置方法及び設置位置は非常に重要である。設置方法は前述の電気融着により長期測定が可能である。そして、設置位置は雨水等の浸入を考慮すれば塔側の定着部付近が良い。この塔側に設置した光ファイバーセンサーと光ケーブル及び計測機器を用いたモニタリングシステムの構成図を図7-1に示す。このような通信システムに組み込まれたモニタリングシステムによってタイムリーなデータをより早く入手する事ができる。

### 「参考文献」

- 1) 山根正之：ハイパフォーマンスガラス ,pp2-102 ,コロナ社
- 2) 新家徹・広中邦汎・頭井洋・西村春久：振動法によるケーブル張力の実用算定式について、土木学会論文報告集, 第294号, 1980年2月

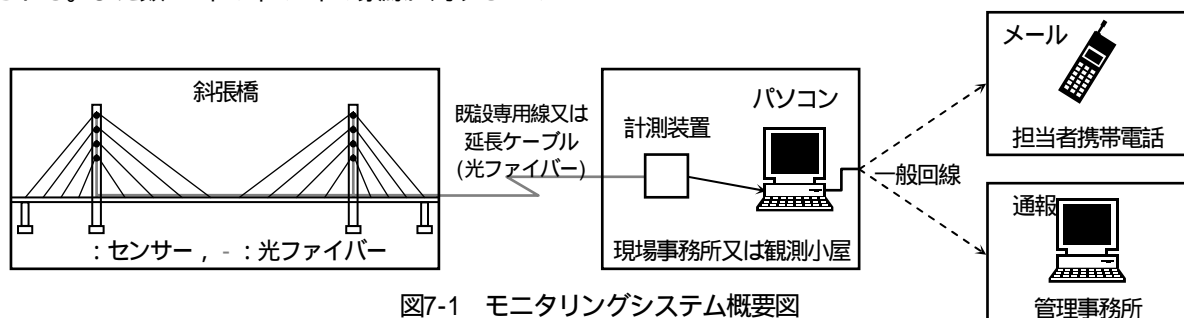


図7-1 モニタリングシステム概要図