

# 光ファイバ変位センサ (SOFO) による インフラ構造物のヘルスマニタリング技術

三上 隆男<sup>\*1</sup> 西沢 隆夫<sup>\*2</sup> 河野 豊<sup>\*3</sup>  
*Mikami Takao Nishizawa Takao Kawano Yutaka*

我が国では、1960年代の高度経済成長期に、道路や橋梁、上下水道、学校など多数の社会インフラが建設されたが、その多くが耐用年数とされる50年を超えて老朽化が進み、その寿命診断や維持管理を含む老朽化対策が大きな問題となっており、修理・改築・更新などの検討が進められている。老朽化だけでなくさまざまな要因により世界中で崩落などによる大事故が起きており、インフラ構造物のヘルスマニタリングの重要性が再認識されている。このような時代の到来は早くから予測されており、IICでは2000年代前半に光ファイバ変位センサ (SOFO) システムを Smartec 社 (スイス) から導入し、これを適用したインフラ構造物のヘルスマニタリングサービスを展開している。本稿では SOFO システムの概要とこれまでの適用事例の中から代表的な事例 (超高層ビル、鋼橋、コンクリート橋) をまとめて紹介すると共に今後の課題について述べる。

キーワード：光ファイバ変位センサ、SOFO、ヘルスマニタリング、インフラ構造物、ひずみ

## 1. はじめに

日本では1960年代に道路、橋梁、トンネルなどのインフラが一斉に整備された。これらのインフラは耐用年数とされる50年を超え、補修・更新の時期を迎えている。また、これらは耐震性基準が現在ほど整備されていなかった時期に建設されているので、今後、大規模震災が起きた時の健全性に不安がある。インフラ構造物は耐用年数前であっても大事故を起こすことがあり、事故は大きな被害をもたらす。韓国では聖水大橋の崩落事故 (1994年) と三豊百貨店の崩落事故 (1995年)、米国ではミネソタ州ミシシッピ川に架かる橋梁の

崩落事故 (2007年) などの大事故が起きている。日本では中央自動車道の笹子トンネルの天井板崩落事故 (2012年12月)、風車の落下事故 (2013年3月) などが起きており、インフラの健全性評価 (ヘルスマニタリング) の重要性が再認識されている。インフラをヘルスマニタリングするためには、その構造および機能に対応した適切なセンサを用いる必要があるが、さまざまなセンサの中で、光ファイバセンサが長期安定性、ゲージ長、精度などの面で優れた特徴を有するため最も注目を集めている。本稿では、光ファイバ変位センサ (SOFO) を用いたモニタリング事例と今後の課題について紹介する。

\*1：技師長 博士 (工学)、技術士 (機械部門)、環境計量士 (騒音・振動関係)、一般計量士、JSNDI ひずみ測定レベル3

\*2：計測事業部 計測技術部 磯子グループ 課長

\*3：研究開発センター 研究開発グループ 次長 コンクリート診断士

## 2. 光ファイバ変位センサ (SOFO) <sup>(2) (5)</sup>

構造物のヘルスマニタリング用センサとしては、種々のものが候補として考えられる。光ファイバセンサと従来センサの代表格であるひずみゲージについて、ヘルスマニタリングへの適用性を評価した結果を表1に示す。これによると、光ファイバ変位センサ (SOFO) は現状では最も適用性があると言える。

図1に静的計測用のSOFO Vシステムの概念図を示す。SOFO 本体にはセンサを最大12点まで接続することができる。点数が12点を超える場合はオプティカルスイッチにより拡張することが可能である。SOFO センサは図2に示すように2本の光ファイバで構成されている。測定ファイバには、あらかじめ引張り荷重が付与されており、測

定対象物に固定された2点間の変位に応じて伸縮する。もう一方の参考ファイバは螺旋状になっているため、その長さは固定点間の変位に左右されない。SOFO 本体はこの2本の光ファイバの長さの差 (= 測定対象物の2点間の変位) を測定するものである。測定方法は二重マイケルソン干渉計方式と呼ばれ、他の方式に比べて原理的にシンプルであり、精度、安定性とも高い。SOFO Vの分解能はセンサ長さに関係なく2 $\mu$ mである。センサはコンクリートに埋め込むことも、既設構造物の表面に取り付けることも可能である。センサとSOFO Vとの間は、最大5kmの延長光ファイバケーブルで接続することができる。図3に動的計測専用のSOFO Dynamicシステムの構成を示す。センサはSOFO Vと共通である。

表1 各種センサのヘルスマニタリングへの適用性評価

項目	必要条件 (インフラ構造物への適用)	光ファイバセンサ			ひずみ ゲージ
		SOFO	BOTDR	FBG	
分解能	2 $\mu$ m程度	Yes	No	Yes	Yes
計測精度	10 $\mu$ c	Yes	Yes	Yes	Yes
ゲージ長	0.1m~10m	Yes	No	No	No
温度補償	センサ自身の温度補償	Yes	No	No	No
測定範囲	-0.5%~1.0%	Yes	Yes	Yes	No
使用温度	-50℃~100℃	Yes	Yes	No	No
長期安定性	10年以上	Yes	Yes	No	No
寿命	10年以上	Yes	Yes	No	No
埋設性	コンクリートへの埋設	Yes	Yes	No	No
動的計測	0~100Hz	Yes	No	Yes	Yes
耐環境性	電磁波、防爆	Yes	Yes	Yes	No
〃	防水性	Yes	Yes	No	No
設置性	容易であること	Yes	No	No	No
コスト	安価	No	No	No	Yes

(注) SOFO : Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques

BOTDR : Brillouin Optical Fiber Time Domain Reflectometry

FBG: Fiber Bragg Grating

Yes : 満足 No : 満足しない

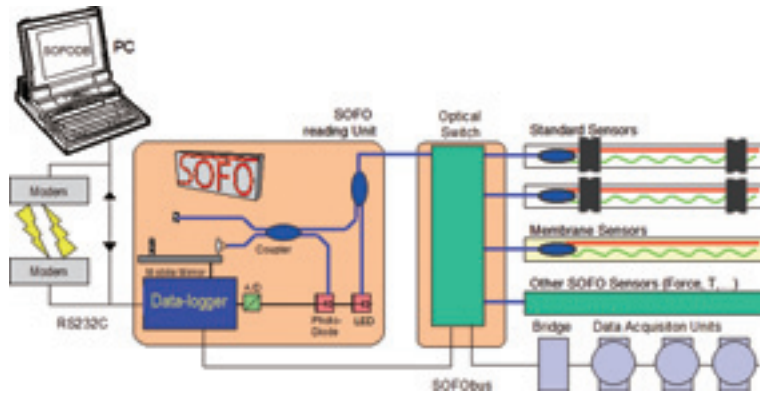


図1 SOFO V システム

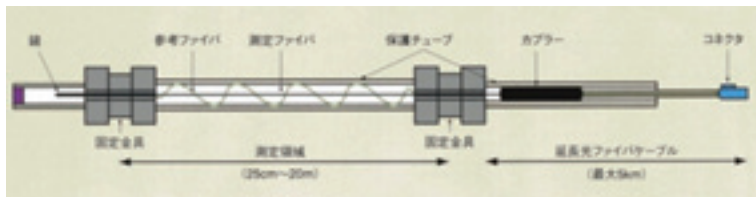


図2 SOFO センサ

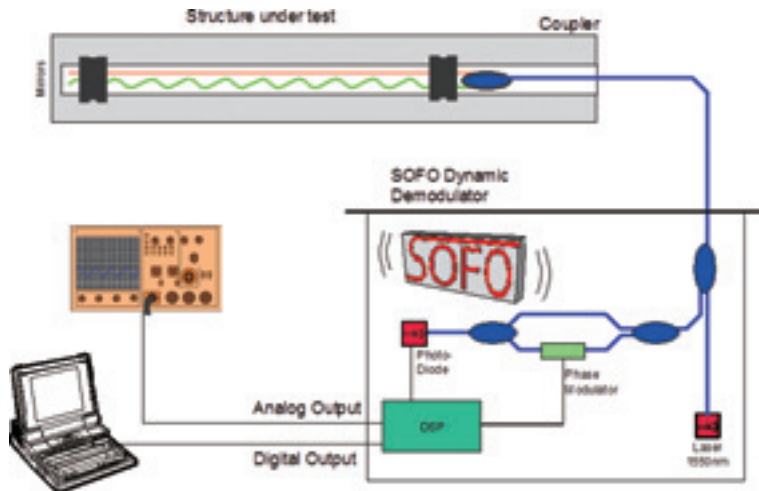


図3 SOFO Dynamic システム

SOFO Dynamic は、2本の光ファイバの長さの差を動的に測定するものである。SOFO Vと同様にレーザー光源から発射された光が本体に戻ってきた後、光信号検波干渉計で位相変調される。光信号を検出した後、SOFO Dynamic 本体はセンサにより導入された位相変調を検知し、これを動的

変位に変換する。0.01 $\mu\text{m}$ という高い分解能を有し、ひずみゲージでは検出できない微小なひずみを検出することができる。測定チャンネル数は8チャンネルである。

### 3. SOFO による測定事例

#### 3.1 超高層ビル<sup>(1)(2)(5)(7)(8)</sup>

対象とした東京都豊洲地区のビル（33階建て、高さ約147m）は2004年に建設開始、2006年8月に竣工した。図4に建設中のビルの外観を示す。

SOFO センサを建設工事中の2005年5月に2階の鋼製柱に設置した。33本の柱の中から代表的な柱5本（X4Y2、X4Y5、X6Y5、X7Y9、X8Y6）をモニタリングの対象とした。柱に作用する主な荷重は圧縮軸力であり、曲げ荷重は無視できる。このため、柱1本について1本のSOFO センサを表面中央部に設置した。センサ全体配置図を図5に示す。一例として柱X7Y9への設置状況を図6に示す。図7に柱の軸力変化のモニタリング結果を示す。ただし、X7Y9のセンサ類は竣工直前に不慮の事故で切断されてしまったので、このデータは除外し、4箇所を表示している。



図4 超高層ビル（東京都江東区）



図5 SOFO センサ配置図





図6 センサ設置状況 (X7Y9)

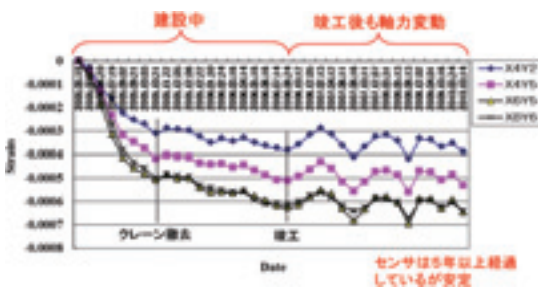


図7 柱のひずみ (軸力) 変化

ビル建設の初期段階には2基の巨大なクライミングクレーンが頂上に設置されていた(図4参照)。その内の1基が2005年10月～2005年11月22日の間に撤去された。撤去により柱に作用する荷重が減少するが、図7の当該期間に圧縮ひずみの減少傾向が明確に示されている。2006年8月末の竣工後は、柱のひずみ変動は小さくなり、ほぼ一定値を保つものと予想していたが、結果は図7に示すように大きく変動している。モニタリング対象の柱はCFT(Concrete filled steel tube)構造であり、柱の内部はコンクリートで充填されているため、この部分も荷重を負担する。コンクリートは打設後に熱膨張、乾燥収縮、自己収縮、クリープなど複雑な挙動を示す。竣工後に柱に作用する全荷重は一定と考えられるので、充填コンクリート部には図7とは逆方向の軸力変動が生じているものと推定される。

図8にSOFO Dynamicによる2006年3月の強風時の動的計測結果を示す。計測した柱はX6Y5で、建物の中央に近い柱である。同図にひずみ式加速度センサによる計測結果も表示している。SOFOセンサは振幅 $1\mu\text{m}$ 以下の微小な振動を捉えていることがわかる。一方、加速度センサでは加速度の値が小さく計測ができなかったため、ノイズのみの波形となった。なお、ひずみゲージでも同様にノイズのみの波形となり、振動を検知ができなかった。SOFOセンサで捉えた微小な振動波形を周波数分析した結果を図9に示す。0.38Hzが卓越しており、これはビルの1次曲げ固有振動数である。

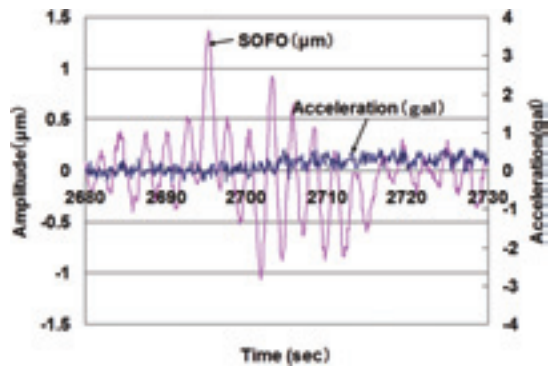


図8 強風時の柱 X6Y5 の振動

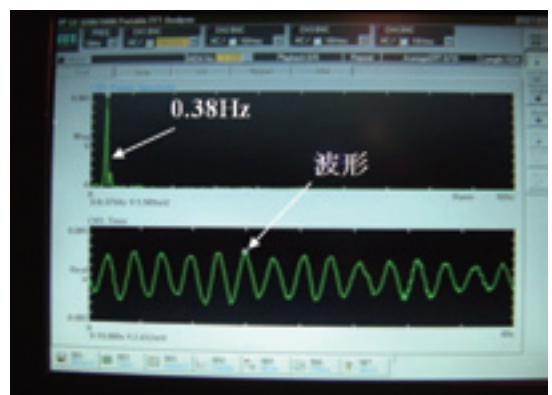


図9 周波数分析結果

一方、高層ビルは微風により励振されて常時微動していると考えられるため、2006年5月に風速

3m/s 以下の微風状態における計測を試みた。その結果、1次曲げ固有振動数である 0.38Hz を明確に捉えることができた。常時微動の微小な励振力でも SOFO センサの高い分解能により振動を検知できることを示した。なお、竣工してから約4年後の2010年10月の微風時に計測したところ、卓越周波数は 0.38Hz であり、1次曲げ固有振動数に変化はなくビルは健全であることを確認した。

### 3.2 不整形超高層ビル<sup>(9)</sup>

名古屋駅前のモード学園スパイラルタワーズ(高さ170m、地上36階：図10参照)はビル全体がねじれているような螺旋状の奇抜なデザインで、このビルの柱に SOFO センサを設置し、2007年2月からモニタリングを続けている。図11にセンサ配置図を、図12にセンサ設置状況を示す。合計6本の柱の内外(合計12箇所)にセンサを設置している。CFT構造の柱で、鋼製柱と充填コンクリートの両方を同時にモニタリングするのは世界で初めての試みである。モニタリング開始後6年を経過しているが安定したデータが得られている。データは顧客であり、このビルを設計した日建設計(協力：名古屋大学 福和研究室)で詳細な解析が行われている。動的計測では、常時微動レベルの小振幅でも超高層ビルの固有振動による柱の応力変動を捉えることができています。SOFO を設置して随時静的および動的計測を実施すれば、柱の軸荷重変化だけでなく、常時微動による振動特性の変

化も検出できることが実証された。一般に、常時微動の計測には高感度な常時微動計が必要であるが、SOFO のみにより計測が可能であり、長期ヘルスマニタリングに極めて有効であるといえる。

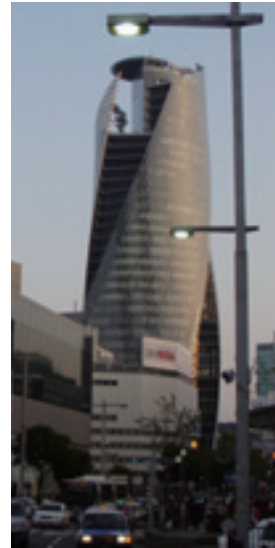


図10 モード学園スパイラルタワーズ

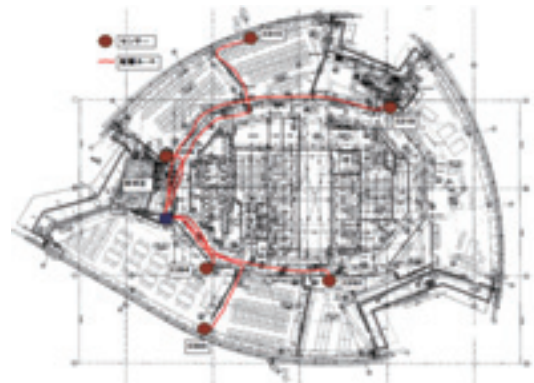


図11 センサ配置図(13F)



図12 CFT柱へのセンサ設置状況

### 3.3 鋼橋<sup>(3)-(5)</sup>

独立行政法人土木研究所の試験橋梁（スパン：30m、幅：7.8m）にSOFOセンサを橋軸方向の3箇所でガーダーに各2本平行に設置（合計6本）した。20ton ダンプカーによる静的載荷試験を行い、SOFOセンサの出力から曲率解析法により求めた変位とインダクタンス式変位計による測定結果の比較を行った。図13にセンサ設置の様子、

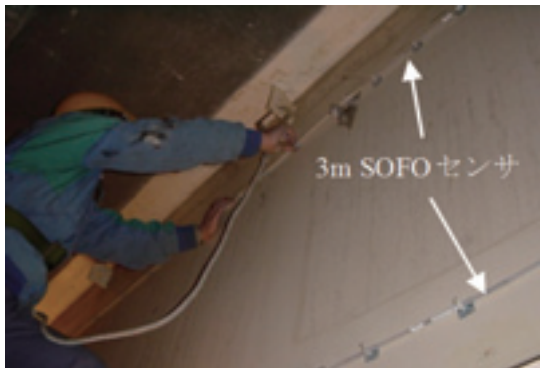


図13 センサ設置状況



図14 静的載荷試験の様子

図14に静的載荷試験状況を示す。図15に試験結果を示すが、誤差は1/4L部で1～9%、1/2L部で5～13%であった。6本のセンサで曲率解析法を用いれば十分な精度で測定できることがわかった。

次に、ガーダー下部にSOFOセンサ、ひずみゲージ、変位計、加速度センサを設置し、動的載荷試験を行った。質量1.71tonの車両が一定速度(20km/h、40km/h、60km/h、80km/h)で通過するときの動ひずみ、変位、加速度を計測した。動的載荷試験の様子を図16に示し、試験結果の一例として、走行速度40km/hおよび80km/h時の結果をそれぞれ、図17および図18に示す。

図17と図18から明らかなように、走行車両の移動重量によって橋桁は静的にたわむと同時に励振されるため、加速度、ひずみ、変位およびSOFOセンサの計測値が変動している。図17の各種センサの波形をFFT解析した結果、橋桁の1



図16 動的載荷試験の様子

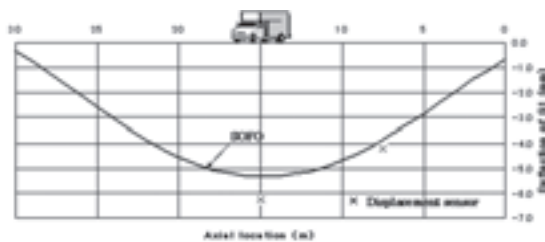
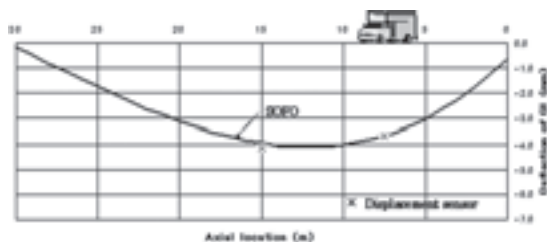


図15 静的載荷試験の結果



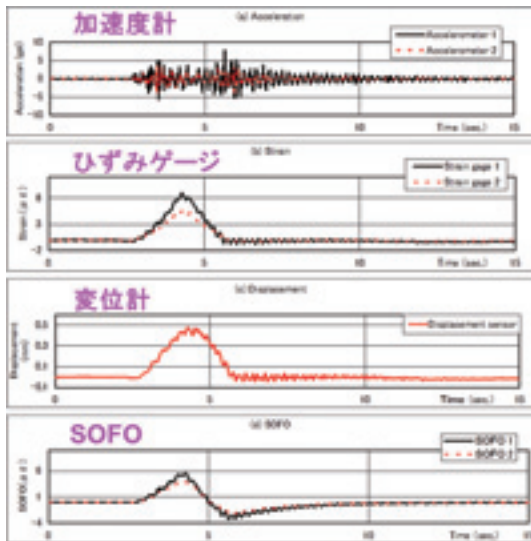


図 17 動的載荷試験の結果 (40km/h)

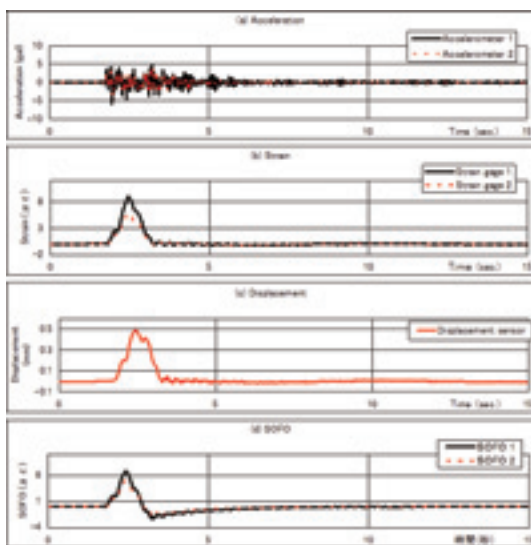


図 18 動的載荷試験の結果 (80km/h)

次曲げ固有振動数は 4.8Hz であることがわかった。SOFO センサにより、橋桁の動ひずみ振幅と固有振動数の変化をモニタリングすれば、橋桁の異常や劣化を検知することができる。

図 17 と図 18 のひずみゲージと SOFO センサの計測値を比較すると、ひずみゲージのひずみの最大値は走行速度に関係なく約  $9\mu\epsilon$  であるのに対して、SOFO センサは走行速度の増加とともに約

$6\mu\epsilon$  から  $7\mu\epsilon$  に増加した。これは、ゲージ長が長い SOFO センサの積分効果によるものであり、1本の SOFO センサで通過車両の速度を検知できる可能性を示している。

また、質量を 10% 増加して同様な試験を実施した結果、SOFO を含むすべてのセンサにより動ひずみ振幅が 10% 増加することを確認することができた。この結果は、橋梁上を走行中の車両重量の検知 (WIM: Weighing in motion) にも応用できる可能性を示している。

### 3.4 コンクリート橋<sup>(6)(10)</sup>

図 19 に示す関東の某私鉄 RC 高架橋 (全長: 24m、幅: 9.4m、支間: 8m) の中央支間中央部に SOFO センサ 6 本とレーザー変位計を設置し、電車が通過する際の動ひずみと変位を計測した。(芝浦工業大学との共同研究)



図 19 RC 鉄道高架橋

図 20 にセンサ配置図を、図 21 に計測結果の一例を示す。これらの図から、電車通過中は強制振動状態 (0.83Hz) にあり、通過後は自由減衰振動状態 (19.5Hz) にあることが明確に捉えられた。この 19.5Hz は橋桁の 1 次曲げ固有振動数である。

また、図 22 に示すように、SOFO の変形データから曲率解析法により得られた橋桁の変位はレーザー変位計の計測結果とよく一致した。



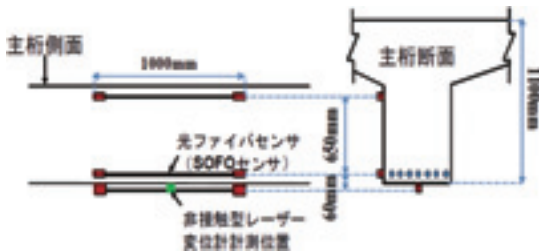


図 20 センサ配置図

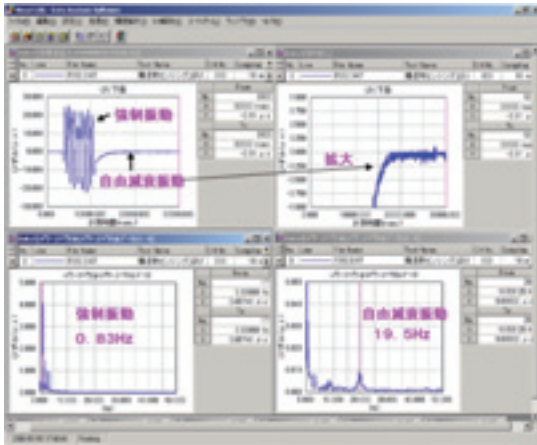


図 21 主桁下面の SOFO センサによる計測結果の一例

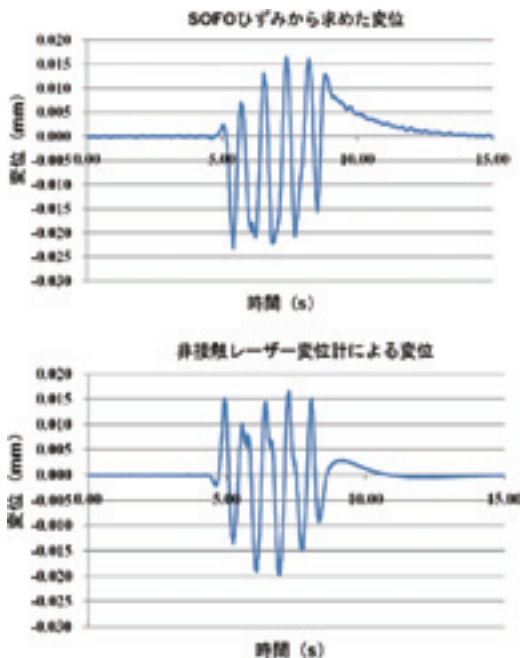


図 22 主桁の変位 (SOFO センサとレーザー変位計の比較)

同一重量の車両通過時の橋桁の動ひずみ振幅および変位、固有振動数をモニタリングすれば、橋桁の異常や劣化を検知することができる。

#### 4. 今後の課題

今後の課題として以下の事項が挙げられる。

##### 4.1 適切なモニタリング期間の選択

要求されるモニタリング期間は構造物の劣化状況やモニタリング予算により相違し、下記の中から適切なものを選択する必要がある。

- (1) テンポラリー (損傷発見時や大地震、大型台風、大雪、大雨などの後)
- (2) 定期検査時
- (3) 常時 → 計器常設、有線または無線で現地事務所にデータを送信
- (4) 遠隔常時 → 計器常設、Web や無線 (GSM、3G、衛星)などを介してモニタリングセンタにデータを送信

##### 4.2 センサ数の最小化とセンサ配置の最適化

老朽インフラ構造物の数が膨大であり、すべてをモニタリングすることはできない。例えば老朽橋梁の数は、現在でも 10 万橋を超えているが、10 年後には 30 万橋になると予測される。予算は限られており、少ないセンサ数で効果的なモニタリングすることが望ましい。これまでの経験から、必要最小限のモニタリング項目とセンサ数として下記を提案する。

- (1) 橋梁  
橋桁の動ひずみ、曲率 (変位)、固有振動数変化を SOFO センサ 2～4 本によりモニタリングする。
- (2) 斜張橋や吊橋  
構造的に巨大であり、構成部材が多いので、多数のセンサが必要である。斜張橋のケーブル

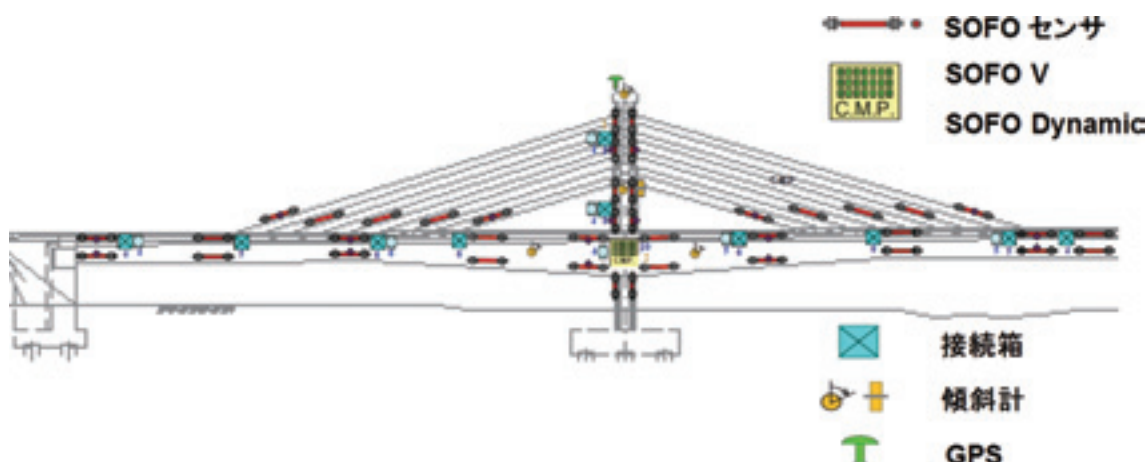


図 23 斜張橋のモニタリング例

ル、桁、主塔などのモニタリングのためのセンサ配置例を図 23 に示す。この例では SOFO センサ 40 本の他に、GPS や傾斜計も使用している。

(3) コンクリート橋

橋桁の動ひずみ、曲率（変位）、振動数変化を SOFO センサ 2～4 本によりモニタリングする。

(4) 超高層ビル

軸力、動ひずみ、振動数変化を SOFO センサ 4～12 本によりモニタリングする。

東日本大震災以後、長周期地震動に対する高層ビルの健全性評価が問題となっているが、大地震がいつ発生するか不明なため、計器を現地に常設する必要がある。

5. まとめ

本稿の内容をまとめると、

- (1) 代表的なインフラ構造物のヘルスマニタリングについて IIC の取り組みを紹介した。
- (2) センサは主として光ファイバ変位センサ（SOFO）を適用した。
- (3) SOFO によりインフラ構造物の静的および動的な長期モニタリングが可能である。

最後に、ヘルスマニタリングの利点を列挙すると、以下のとおりである。

- (1) 劣化・損傷をタイムリーに検知⇒維持管理費用の節約
- (2) 安全性の向上
- (3) 設計検証（建設初期からモニタリングした場合、設計の妥当性を確認できる）
- (4) 新たな知見の取得（設計では想定できなかった事象の検知）

我が国では老朽インフラの延命化はこれから益々重要になってきている。今後、IIC のヘルスマニタリング技術の適用範囲をさらに広げてゆく所存である。

## 参考文献

- (1) Takao Mikami, Takao Nishizawa and Mitsutaka Nagasaka : Structural Health Monitoring with Fiber Optic Sensors, IABSE Symposium, A-0150, Budapest, 2006
- (2) 三上隆男：光ファイバセンサによる高層ビルのヘルスマニタリング、IIC Review No.36、2006/10、pp.2-8
- (3) 三上隆男：光ファイバ変位センサによる橋梁ヘルスマニタリング技術（その1）、IIC Review No.37、2007/4、pp.35-43
- (4) 三上隆男：光ファイバ変位センサによる橋梁ヘルスマニタリング技術（その2）、IIC Review No.38、2007/10、pp.15-25
- (5) 三上隆男：光ファイバ変位センサ（SOFO）による構造物のヘルスマニタリング、IHI 技報、Vol.47、No.4、2007/12、pp.179-191
- (6) 河野豊：SOFOによる橋梁ヘルスマニタリング、IIC Review No.41、2008/10、pp.24-30
- (7) 三上隆男：光ファイバ変位センサによる超高層ビルのヘルスマニタリング（続報）、IIC Review No.43、2010/4、pp.22-29
- (8) 三上隆男、西沢隆夫：光ファイバ変位センサによる高層ビルのヘルスマニタリング、日本機械学会論文集、C編、75巻750号、2009/2、pp.249-255
- (9) 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：光ファイバセンサによる高層建築物建設時の柱軸力変化の計測、日本建築学会技術報告集、第15巻、第31号、2009、pp.751-756
- (10) 寺田恭平、勝木太、河野豊：光ファイバセンサによるRCラーメン鉄道高架橋の構造ヘルスマニタリングに関する研究、第35回土木学会関東支部技術研究発表会、V-044、2010



技師長 博士(工学)、技術士  
(機械部門)、環境計量士(騒音・  
振動関係)、一般計量士、JSNDI  
ひずみ測定レベル3

三上 隆男

TEL. 03-6404-6583  
FAX. 03-6404-6044



計測事業部 計測技術部  
磯子グループ  
課長

西沢 隆夫

TEL. 045-759-2085  
FAX. 045-759-2119



研究開発センター  
研究開発グループ  
次長 コンクリート診断士

河野 豊

TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547