

# 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」

三上 隆男\*  
Takao Mikami

独立行政法人土木研究所内の鋼製試験橋梁に光ファイバ変位センサ（SOFO）を設置し、橋桁の動的な計測を試みた。その結果、SOFO センサにより動的な計測が可能であることを実証した。本報ではその概要について紹介する。

キーワード：SOFO、光ファイバ、変位センサ、橋梁、振動、WIM

## 1. はじめに

前号では「その1」として、独立行政法人土木研究所構内の鋼製試験橋梁を供試体とし、SOFO を使用して実施した静的載荷試験の結果について報告した<sup>(4)</sup>。本号では「その2」としてSOFO センサの特徴について解説した後、試験橋梁における動的載荷試験の結果について報告する。

## 2. SOFO センサの特徴

図1にSOFO標準センサの構造を示すが、本センサは固定金具間の軸方向変形量（ひずみ）を測

定するものである。構造物のひずみ測定に一般的に使用されている‘ひずみゲージ’とは種々の点で相違する<sup>(1)~(7)</sup>。

SOFO センサはひずみゲージと比べると多くの長所を有しているが、最も重要な点はゲージ長（測定領域）が長いということである。ゲージ長が長いことで、計測の際にひずみゲージと比べてどのような違いが生じるのかを代表的な2つの計測を例として解説する。

### 2.1 軸力計測の場合<sup>(8)</sup>

簡単のため、丸棒を力： $P$ で引張る場合（図2参照）を考える。応力： $\sigma$ は、

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

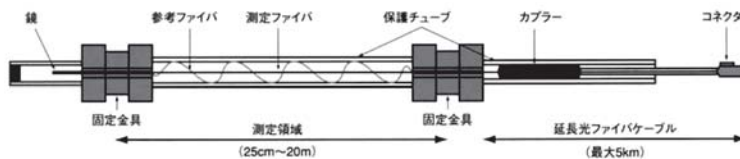


図1 SOFO標準センサの構成

\* 計測事業部 計測エンジニアリング部 部長 技術士（機械部門）環境計量士（騒音・振動関係）

で表されるが、引張力によって生じる応力を引張応力、圧縮力によるものを圧縮応力と言う。

引張応力が作用すると、図2(b)に示すように丸棒には力が加わった方向に伸びを生じ、最初の長さ $l$ は $l+\Delta l$ となる。その結果、丸棒には以下に示す垂直ひずみ： $\varepsilon$ （無次元数）を生じる。

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

ひずみ： $\varepsilon$ と応力： $\sigma$ の間には、フックの法則により以下の関係が成立する。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

ここで、比例定数： $E$ を縦弾性係数またはヤング率と言う。

したがって、が未知な場合、(1)(3)式から

$$P = \sigma A = E\varepsilon A \quad (4)$$

となり、 $\varepsilon$ を計測することによりを求めることができる。

図2(a)に示すように、丸棒の中央部に貼り付けたゲージ長10mmのひずみゲージと、長さ1mのSOFO センサによる計測結果について比較する。

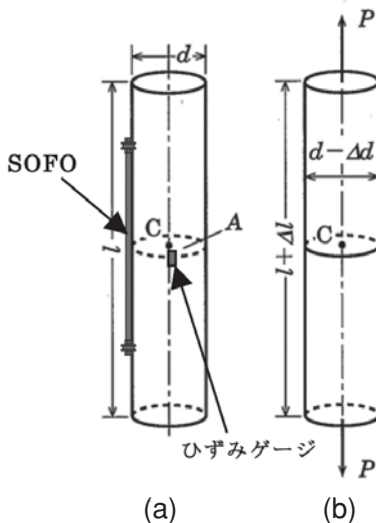


図2 引張力を受ける丸棒

$l = 2m$  とすると、ゲージ長10mmのひずみゲージ1枚の出力で、その200倍の長さの丸棒の平均ひずみを評価するのは誤差が大きく適切でない。軸方向に多数のひずみゲージを貼り付け、それらの計測結果を平均する必要がある。また、ひずみゲージは貼り付け角度誤差の影響も受ける（10°傾くと約4%の計測誤差を生じる）ので、貼り付けには高い技能と多大な労力を要する。

SOFO センサは設置が容易であり、計測された変形量をセンサの元長（例えば1m）で除せば平均ひずみが得られる。ゲージ長が長いので、1本のSOFO センサで、ひずみゲージよりもはるかに広い範囲をカバーすると同時に、高い分解能（2 $\mu$ m）で計測することができる。ひずみゲージは局所型センサであるが、SOFOは積分型センサと言える。ひずみゲージでは検出できない微小なひずみでも、SOFO センサは適切なセンサ長さを選べばその積分効果により検出が可能である。

## 2.2 曲げ応力を計測する場合<sup>(9)</sup>

### 2.2.1 片持梁の場合（図3参照）

長さの片持梁ABの右端Bを固定し、自由端Aに1個の集中荷重が作用する場合を考える。自由端Aより右方の距離にある任意断面に作用する

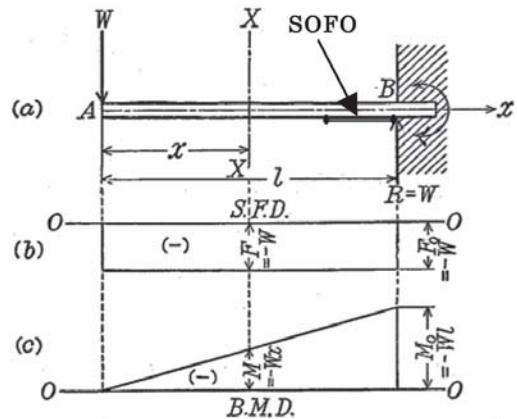


図3 自由端に集中荷重を受ける片持梁

曲げモーメントは次式で与えられる。なお、モーメントは梁を上向き凹に曲げる向きのものを正とし、その逆の場合を負としている。

$$M = -Wx \quad (5)$$

図3にせん断力図(S.F.D)と(5)式を線図化した曲げモーメント図(B.M.D)を示す。

もし、SOFOセンサを $l_1 \sim l_2$ 間に設置した場合、センサに作用する曲げモーメントは $\bar{M}$ この間の曲げモーメントを積分平均することにより得られる。

$$\bar{M} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} -Wxdx}{l_2 - l_1} \quad (6)$$

例えば、センサ長さが $\frac{l}{4}$ の場合、すなわち $l_1 = \frac{3}{4}l, l_2 = l$ とした場合、(6)式から $\bar{M} = -\frac{7}{8}Wl$ となる。

ひずみゲージの場合は、もし固定部(B点)近傍に貼付ければゲージ長が数mmと短いのので、近似的に最大曲げモーメント $M_0 = -Wl$ がゲージに作用すると考えて良い。

梁に曲げモーメントが作用しているとき、それにより生じる曲げ応力は梁の断面2次モーメントをとし、中立軸からの距離をとすると、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y = \frac{M}{Z} \quad (7)$$

ここで、 $Z = I/y$ は梁の中立軸に関する断面係数と呼ばれ、 $I$ と同様に断面の形状寸法のみにより定まる。(7)式からが $Z$ 最小になる位置、すなわち、梁の上面または下面で曲げ応力 $\sigma_b$ が最大になることがわかる。

SOFOの場合、センサには上述のように平均曲げモーメント $\bar{M}$ が作用し、結果として平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ が計測される。 $\bar{\epsilon}$ は断面形状を一定とすると、(3)(6)(7)式から次式のように表すことができる。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\bar{M}}{EZ} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} -Wxdx}{EZ(l_2 - l_1)} \quad (8)$$

## 2.2.2 単純支持梁の場合 (図4参照)

橋桁は複数の橋脚に支えられた連続梁であるが、1つのスパンは単純支持梁と考えて良い。そこで、代表的な例として図4(a)に示すように長さの梁を両端A、Bで単純に支持し、両端から $l_1, l_2$ の距離にある任意の点Cに1個の集中荷重Wが作用する場合を考える。

AC間 ( $0 < x < l_1$ ) では、

$$M = R_1 x = \frac{l_2 W}{l} x \quad (9)$$

CB間 ( $l_1 < x < l$ ) では、

$$M = R_2 (l - x) = \frac{l_1 W}{l} (l - x) \quad (10)$$

図4(b)(c)にせん断力図(S.F.D)と(9)(10)式を線図化した曲げモーメント図(B.M.D)を示す。

もし、SOFOセンサをC点を挟む $l_3 \sim l_4$ 間に設置した場合、センサに作用する曲げモーメント $\bar{M}$ はこの間の曲げモーメントを積分平均することにより得られる。

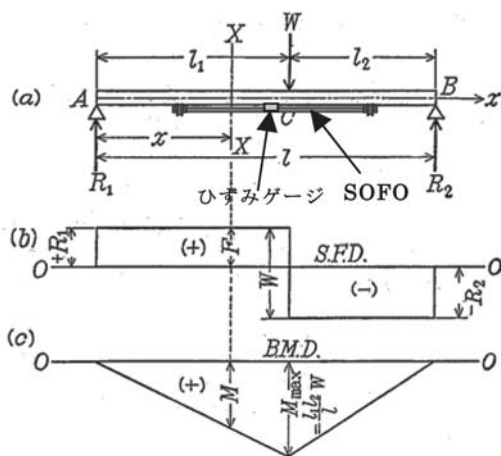


図4 任意の位置に集中荷重を受ける単純支持梁

$$\bar{M} = \frac{\int_{l_3}^{l_4} \frac{l_2 W}{l} x dx + \int_{l_1}^{l_4} \frac{l_1 W}{l} (l-x)}{l_4 - l_3} \quad (11)$$

例えば、荷重点と SOFO センサがスパン中央にあり ( $l_1 = l_2 = \frac{l}{2}$ )、センサ長さが  $\frac{l}{2}$  の場合 ( $l_3 = \frac{1}{4}l, l_4 = \frac{3}{4}l$ )、(11) 式から  $\bar{M} = \frac{3}{16}Wl$  となる。

ひずみゲージの場合、同じ条件下では、 $M_{max} = \frac{Wl}{4}$  となる。

SOFO センサが検出する平均ひずみ  $\bar{\epsilon}$  は、断面形状を一定とすると (8) 式と同様にして、以下の式で表すことができる。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_{l_3}^{l_4} \frac{l_2 W}{l} x dx + \int_{l_1}^{l_4} \frac{l_1 W}{l} (l-x)}{EZ(l_4 - l_3)} \quad (12)$$

### 2.3 まとめ

2.2 項では静的計測の観点から SOFO センサの特徴を考察した。結果は以下の2点に要約される。

- ①ゲージ長が長いので柱状構造物の軸力計測のように広い範囲のひずみを精度良く計測するのに適している。
- ②曲げ応力計測の場合はゲージ長全体にわたって平均化されるので、最大値を計測することはできない。

静的には上述のような特徴を有する SOFO センサを動的計測に適用するとどうなるか？

動的計測の目的は、通常、構造物の健全性を評価するために危険部位の動ひずみを計測すること、および固有振動数や振動モードを把握することにある。後者の目的に対しては、ゲージ長が長く、また計測分解能が高い SOFO センサは、適切なセンサ長さを選定すれば、1本のセンサで構造物の高次の振動モードも検出できるので非常に適している。分解能はひずみゲージの分解能よりも約100倍高い驚異的な分解能  $0.01 \mu m$  を有している。したがって、ひずみゲージや加速度センサでは検出できない微小な振動も計測可能である。こ

れについては超高層ビルの柱の固有振動計測で実証済みである<sup>(3)</sup>。

### 3. SOFO Dynamic の概要<sup>(2)</sup>

動的計測には SOFO Dynamic を使用する。図5にシステム構成図を示す。センサは SOFO V(静的計測用)と共通である。

アナログ出力は表示および保存用のデータ収録装置に取り込む。デジタル信号は USB を介してパソコンに直接取り込み、保存および解析することもできる。

写真1に本体部の写真を示す。

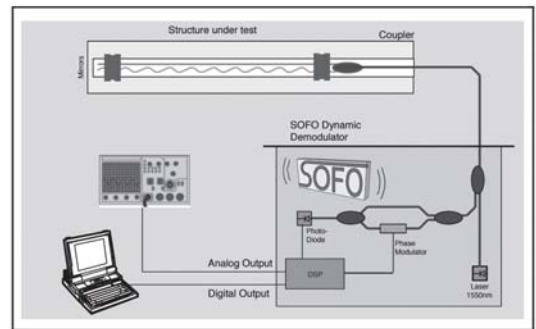


図5 SOFO Dynamic のシステム構成



写真1 SOFO Dynamic 写真

側面図 S=1/100

横断面図 S=1/100

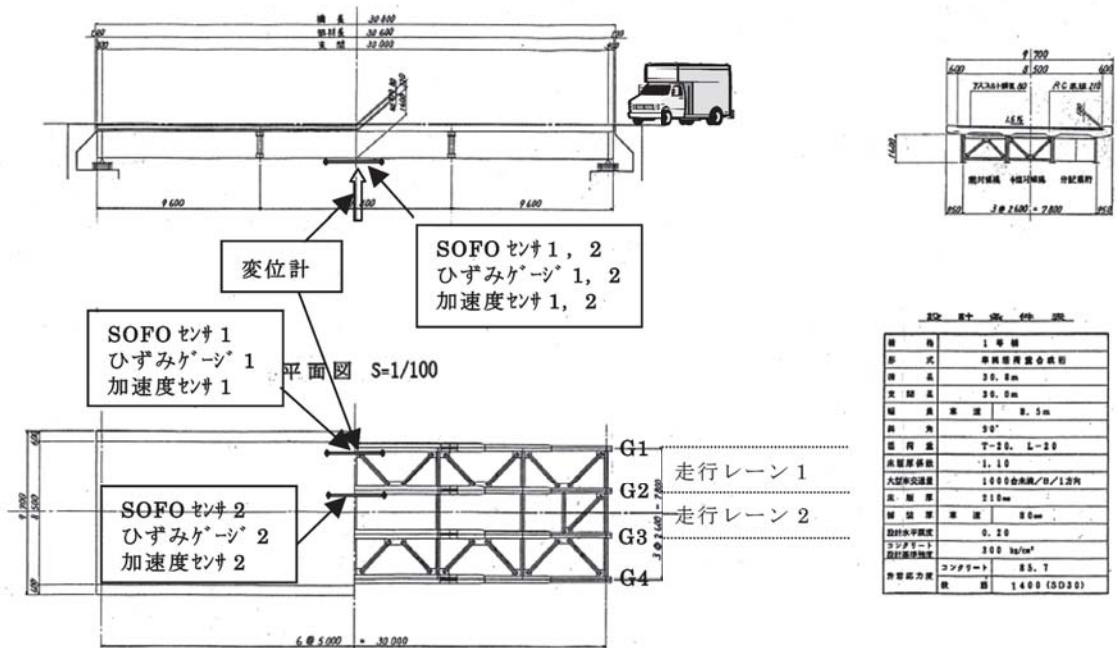


図6 試験橋梁の構造とセンサ配置

#### 4. 試験橋梁における動的荷荷試験

##### 4.1 供試体 (図6参照)

- ・橋名 : 試験橋梁
- ・架設場所 : 独立行政法人土木研究所 試験  
走路内
- ・橋種 : 鋼製純非合成
- ・橋長 : 30.0m
- ・有効幅員 : 7.8m

##### 4.2 計測項目 (図6参照)

- ・桁の曲げひずみ  
G1桁及びG2桁の下フランジ中央部にSOFOセンサ (長さ3m) を橋軸方向に設置。(写真2参照)  
SOFOセンサの中央部付近にひずみゲージを橋軸方向に設置。(写真3参照)
- ・桁の鉛直方向加速度  
G1桁及びG2桁の下フランジ中央部に加速

度センサ (共和電業: ASW-1A) を設置。(写真3参照)

・桁の鉛直方向変位

G1桁の下フランジ中央部にひずみゲージ式変位計 (共和電業: DT-50A) を設置。(写真3参照)



写真2 SOFO センサ (G2桁)



写真3 その他のセンサ (G1 桁)

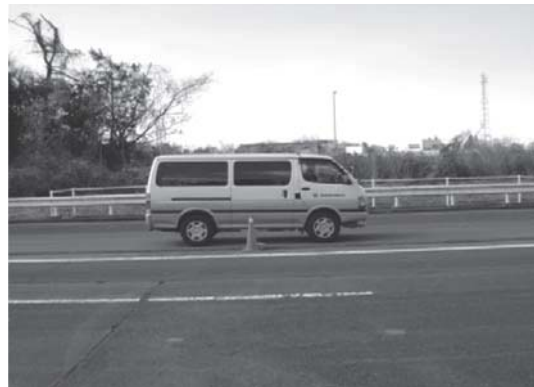


写真5 走行車 (トヨタハイエース)

#### 4.3 計測条件

試験橋梁のレーン1を使用し、走行車1台(トヨタハイエース)を通過させて計測を実施した。(写真4参照)

走行車の重量は1710kg(車体重量1,640kg+運転者体重70kg)である。(写真5参照)

走行速度は20km/h、40km/h、60km/h、80km/hの4ケースで試験した。

なお、走行車の重量の影響をみるために、その重量を約10%増の1880kgにした場合の計測も行った。このケースは走行速度40km/hのみで試験した。

SOFO Dynamic、動ひずみ計、データレコーダ

等の計測計器を写真6に示す。

#### 4.4 試験結果及び考察

各走行速度に対する加速度センサ、ひずみゲージ、変位計及びSOFOセンサの計測結果を図7～図10に示す。

40km/h走行時の各センサの出力波形を周波数解析した結果を図11に示す。

図7～図10から走行車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、SOFO計測値が変動している。

変動成分は非常に小さいが、その周波数は図11の周波数解析結果によるとどのデータも約4.8Hzである。橋桁の1次曲げ固有振動数が約



写真4 レーン1 (試験橋梁) 上の走行車



写真6 計測装置

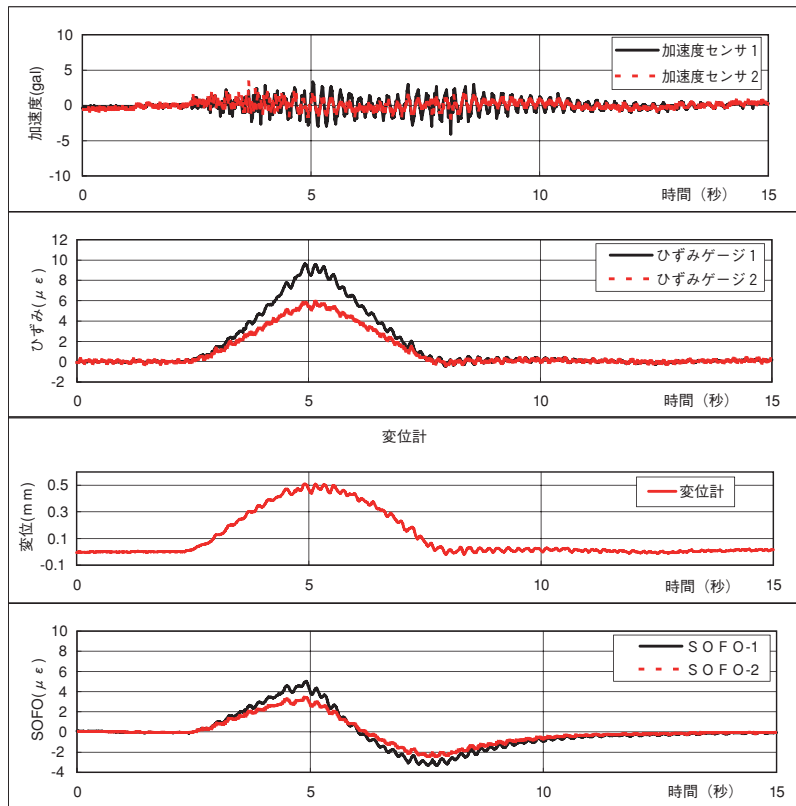


図7 走行速度：20km/hの時の計測結果

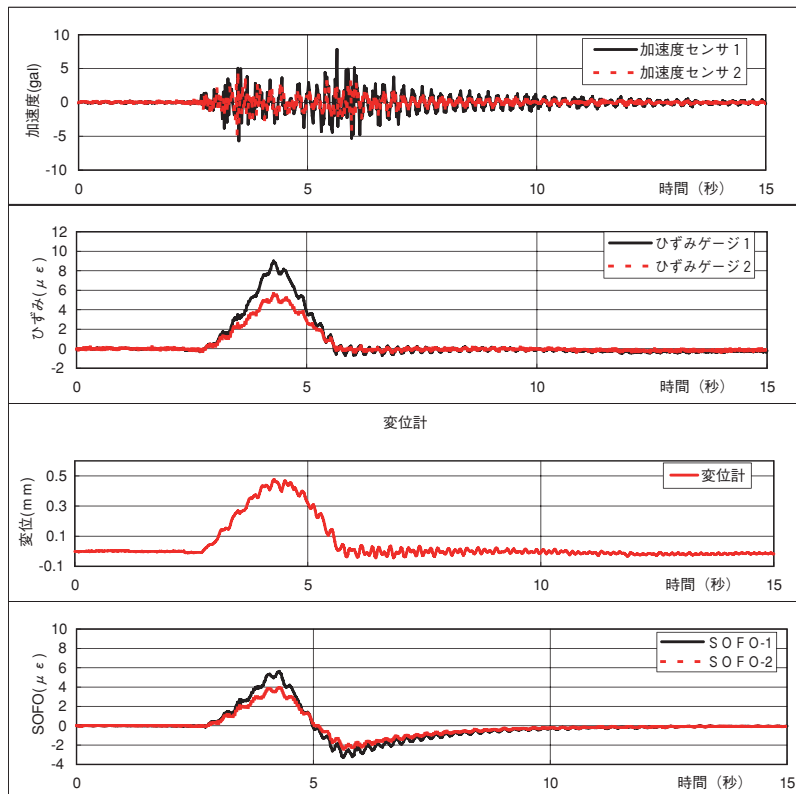


図8 走行速度：40km/hの時の計測結果

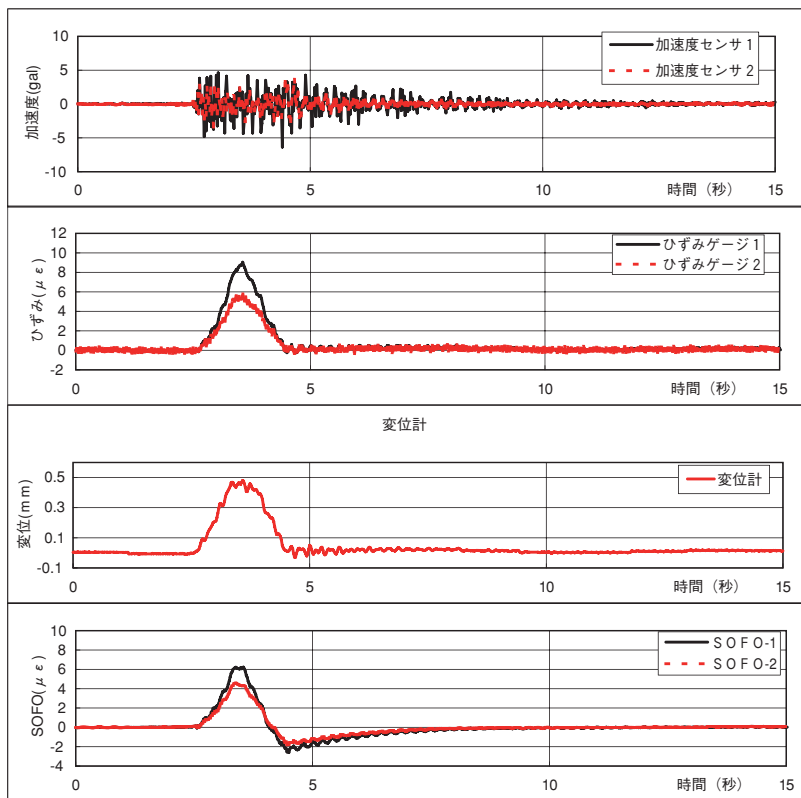


図 9 走行速度：60km/hの時の計測結果

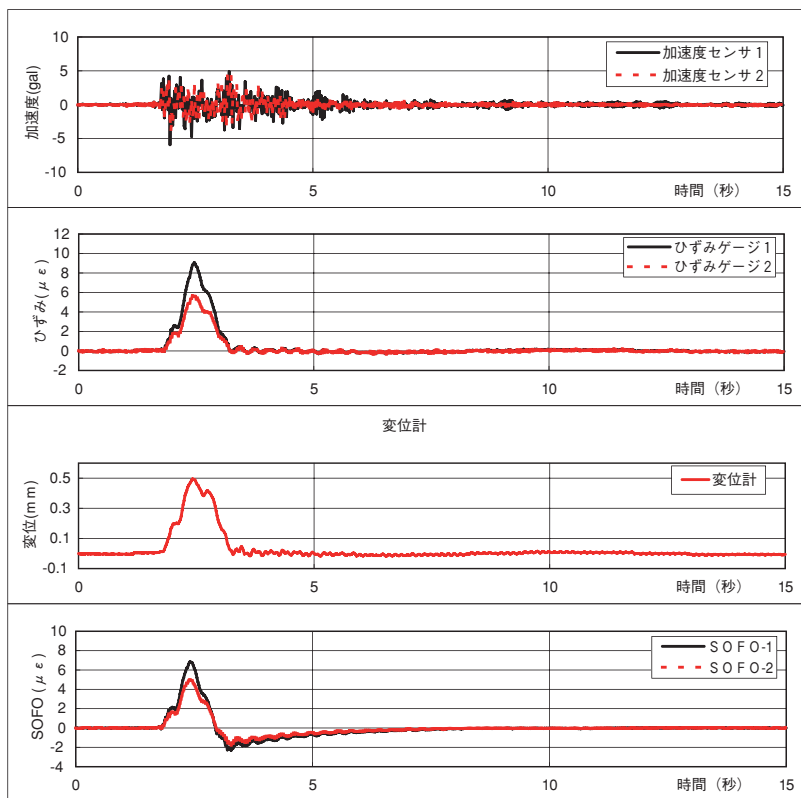


図10 走行速度：80km/hの時の計測結果



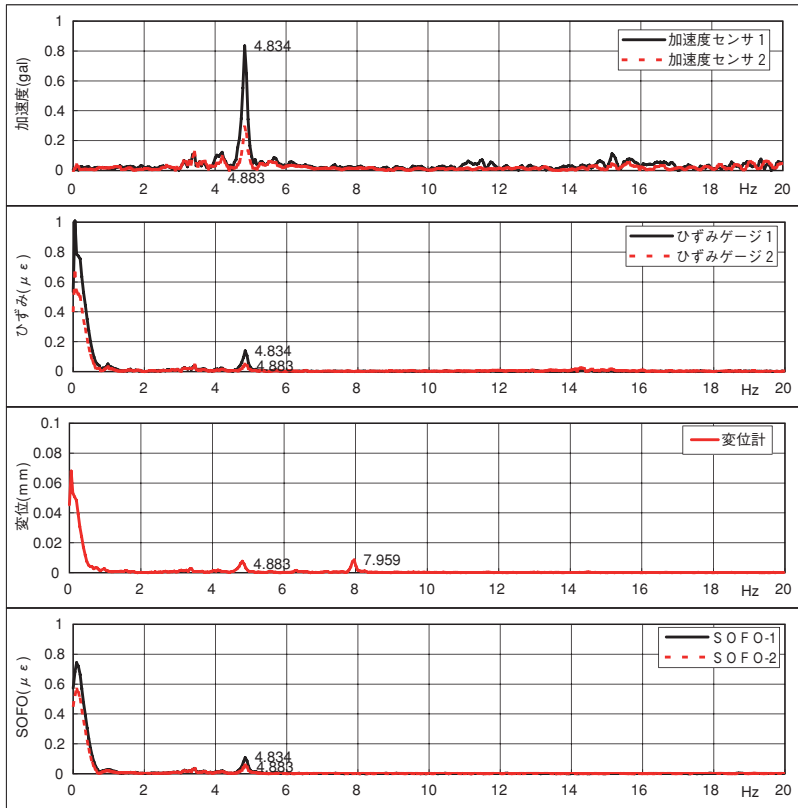


図11 各種計測データの周波数分析結果（走行速度：40km/hの時）

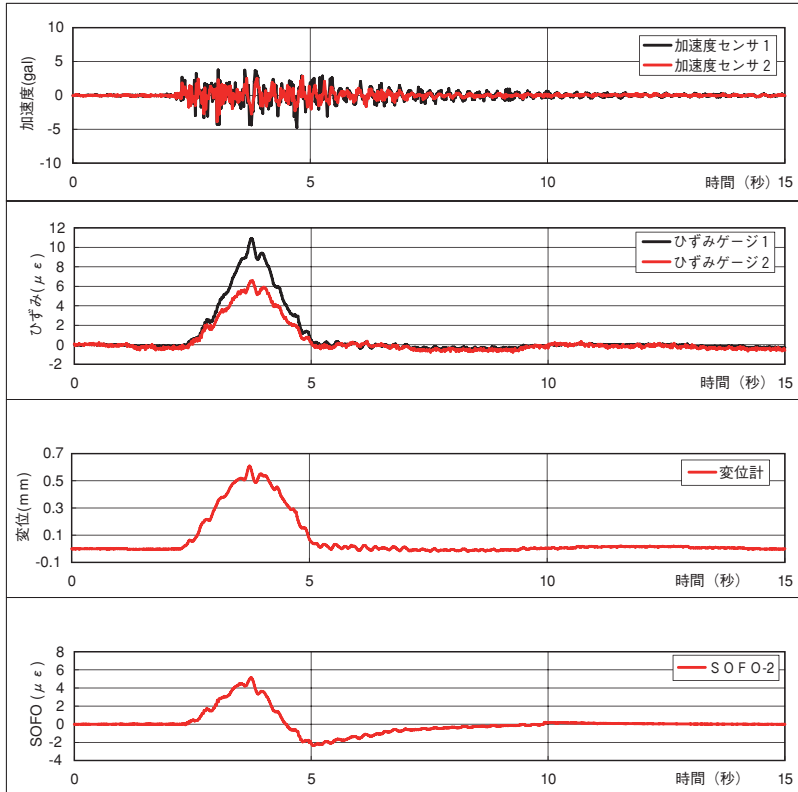


図12 走行速度：40km/h（重量1880kg）の時の計測結果

4.8Hzであることがわかる。

走行速度が20km/hの場合、走行車は約5.4秒で橋を通過する。橋桁は走行車が通過後は自由減衰振動するので、振動がゼロに戻るまでの時間は5.4秒より長い。(図7) 橋桁の応答時間は走行速度が増加するにつれて減少することが、図7～図10から明らかである。

ひずみゲージとSOFO計測値を比較すると、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は走行速度の増加とともに約 $5\mu\epsilon$ から $7\mu\epsilon$ に増加している。2章で述べたSOFOセンサの特徴によるものであり、1本のセンサで通過車両の走行速度を検知できる可能性を示している。

また、SOFOは走行車通過後に引張から圧縮に変化した後、次第にゼロに戻って行く様子を示している。この結果から、橋桁は走行車が橋上に進入してからセンサ部を通過する間は下に凸に曲がり、通過後はリバウンドにより橋桁の一部が上に凸に曲がるものと推定される。一方、ひずみゲージは引張状態を維持していることから、ひずみゲージではリバウンド現象を捉えることができていない。この結果から、橋桁の全体挙動を把握するためには、ゲージ長の長いSOFOセンサがひずみゲージより優れていることが明らかである。

重量10%増の場合の計測結果を図12に示す。走行速度が同じ40km/hの場合の図8と比較すると、ひずみゲージ、変位計、SOFO計測値とも静的成分は約10%増加している。SOFOセンサは移動する車両の重量変化を的確に捉えており、橋梁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がある。

## 5. おわりに

光ファイバ変位センサ：SOFOを橋梁の動的載

荷試験に適用した。その結果、SOFOセンサの動的性能を確認することができた。動的に計測する場合の分解能は驚異的な $0.01\mu m$ であり、サーボ式加速度計よりも高感度である。

センサは静的計測と動的計測兼用なので、新設あるいは既設橋梁の静的及び動的な挙動(静ひずみ、動ひずみ、固有振動数)を長期的にモニタリングして健全性を評価することができる。本件については、実橋で試験することを計画中である。

また、SOFOでWIMが可能なので常時監視カメラシステムと組合せれば過積載車検知にも応用できると考えられるが、実際の橋梁上の交通状態は複雑であり、実用化のためには種々の試験が必要である。具体的には、複数の車両の同時走行、車間距離、橋梁の長さ、センサ長さ等をパラメータとしてSOFOセンサの応答を調査する必要がある。上述の実橋における試験時に可能な限り調査する予定である。

8月初めに米国ミネソタ州で架設後40年経過した古い鋼製アーチ橋が崩落した。原因は調査中だが、健全性モニタリングの必要性を実感させる事故である。日本国内にも老朽化した橋梁が多数あり、SOFOによるモニタリングを提案してゆきたい。

## 謝 辞

本研究を実施するに際し、独立行政法人 土木研究所 構造物研究グループ主任研究員の麓 興一郎氏に試験場所の提供等の御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 三上, “SOFO システム”, IIC REVIEW / 2000 / 10, No.24, p29 ~ p33
- 2) 三上, “光ファイバによる動的変位計測システ

- ム (SOFO Dynamic)", IIC REVIEW / 2006 / 4. No.35, p54 ~ p58
- 3) 三上, "光ファイバによる高層ビルのヘルスマニタリング", IIC REVIEW / 2006 / 10. No.36, p2 ~ p8
- 4) 三上, "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 / 2007 / 4, No.37, p35 ~ p43
- 5) Takao MIKAMI, Takao NISHIZAWA, "Structural Health Monitoring with Fiber Optic Sensors", SEWC2002, Yokohama, Japan
- 6) Takao MIKAMI, et al, "High-rise Building Monitoring by Fiber Optic Sensors", IABSE 2006 Annual Meeting and Symposium, Budapest, Hungary
- 7) S. Vurpillot, G. Krueger, D. Benouaich, D. Clement and D. Inaudi, "Vertical Deflection of a Pre-Stressed Concrete Bridge Obtained Using Deformation Sensors and Inclinator Measurements", ACI Structural Journal/ September-October 1998, p518 ~ p526
- 8) 「ひずみ測定Ⅱ」社団法人 日本非破壊検査協会
- 9) 鶴戸口, 河田, 倉西「材料力学 上巻」裳華房



計測事業部 計測エンジニアリング部  
部長  
技術士(機械部門), 環境計量士(騒音・振動関係), 一般計量士

三上 隆男

TEL. 045-759-2160  
FAX. 045-759-2161