

光ファイバ変位センサ（SOFO センサ）による構造物のヘルスマニタリング

Structural Health Monitoring with Fiber Optic Deformation Sensor (SOFO)

三 上 隆 男 石川島検査計測株式会社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）

光ファイバ変位センサ（SOFO センサ）はゲージ長が長い、コンクリートに埋込みができる、高精度である、長寿命である、長期に安定であるなどの特長があり、大型構造物のヘルスマニタリングに適用されている。SOFO センサの計測装置には静的計測用（SOFO V）と動的計測用（SOFO Dynamic）の2種類がある。本稿では、両者の計測原理について解説した後、鋼管の熱膨張試験、橋桁の静的および動的載荷試験、高層ビルの柱の軸力モニタリングに適用した結果を報告する。以上の結果から、SOFO センサの静的および動的性能を明らかにした。

The fiber optic deformation sensor, SOFO, has excellent characteristics such as ease of use, long gage, usable in concrete, high precision, long life and long-term stability and has therefore been applied to structural health monitoring in the area of civil engineering. This paper describes the principles of the SOFO V for static measurement and SOFO Dynamic for dynamic measurement. This paper also expresses results of applications to thermal expansion tests on steel pipes, static and dynamic loading tests in a bridge and monitoring of the axial stress at pillars in a high-rise building. Through these results, the performance of the SOFO system on the static and dynamic measurements was clarified.

1. 緒 言

社会基盤構造物の安全性を確保するためには、定期的なモニタリング、メンテナンスおよび修理が必要である。近年、戦後の復興期や高度経済成長期に建設された多くの構造物が理論寿命を超えて供用される状況であり、これらの構造物の安全性に対する知見がますます重要になってきている。そのためには、何らかのセンサを使って短期的あるいは長期的モニタリングを行い、構造物の挙動を把握する必要がある。

モニタリングすべき最も重要なパラメータは、一般には変形であり、高精度で長期的に安定なシステムを用いて計測し、評価する必要がある。従来のモニタリングに使用されているインダクタンス式変位計、機械式伸縮計、GPS、加速度計などのセンサは長期安定性に問題があるため、光ファイバ変位センサが構造物モニタリングの分野でますます重要性を増している。光ファイバ変位センサは取扱いが容易なうえに長期安定性をもつので、長期モニタリング手法として適している。

筆者らは光ファイバ変位センサ（以下、SOFO センサと呼ぶ）を各種構造物のモニタリングに適用している^{(1)~(7)}。SOFO とは、フランス語の Surveillance

d' Ouvrages par Fibres Optiques の略称で、日本語では「光ファイバによる構造物のモニタリング」を意味する。SOFO センサの計測装置は静的計測用（以下、SOFO V と呼ぶ）と動的計測用（以下、SOFO Dynamic と呼ぶ）の2種類がある。センサは共通であり、計測の目的に応じて計測装置を使い分けている。

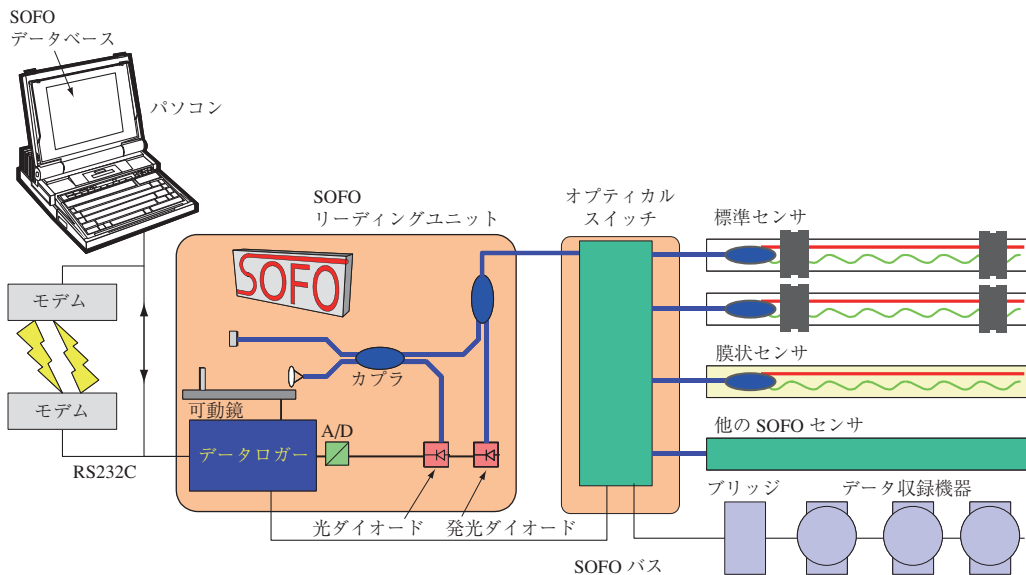
本稿では、SOFO センサと計測装置（以下、SOFO システムと呼ぶ）の概要について解説した後、代表的な適用事例として、鋼管の熱膨張試験、橋梁の静的および動的載荷試験、高層ビルのヘルスマニタリングに適用した結果について報告する。

2. SOFO システムの概要⁽¹⁾

2.1 SOFO V システム

第1図にSOFO V システムの概念図を示す。標準センサ、膜状センサ、ほかのSOFO センサ（力、温度など）などがオプティカルスイッチを介してSOFO リーディングユニット（以下、SOFO 本体と呼ぶ）に接続されている。

SOFO 本体には標準センサを最大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って拡張することが可能である。12点以下の場合、第1図のオプティカルスイッチは不要である。



第1図 SOFO V システム
Fig. 1 SOFO V system

SOFO 標準センサは第2図に示すように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、こ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。発光ダイオードから発射された光がセンサに送られ、カプラによって分割された後、2本の光ファイバに送られる。その光はセンサ端部についている鏡で反射され、カプラによって再び集光され、SOFO 本体に戻ってくる。そこで再び2本の光ファイバに分光される。一方の光ファイバの端部は固定されているが、もう一方の端部は可動式の鏡になっている。測定時には、鏡の動きによる光の干渉強度の変化からセンサ部のファイバ長さの差、すなわち、測定対象物の2点間の変位を測定する。この測定方法は2重干渉計方式と呼ばれ、ほか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 $2\ \mu\text{m}$ である。センサはコンクリートに埋め込むことも、既設建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 5 km の延長光ファイバケーブルで接続することができる。

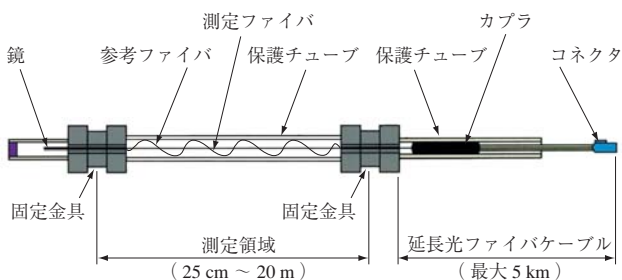
計測の際に、電磁波、振動、湿度などの影響を受けないという優れた特長をもつ。SOFO 本体はバッテリー駆動であり持ち運びができる。また、防水性にも優れているため、建設現場のようにほこりや湿気の多い環境での使用に適している。

1回の計測には約7秒の時間を必要とする。計測は手動、自動(時間間隔設定機能)の両方で可能である。標準センサの長さは 25 cm ~ 20 m で、計測精度は計測変位に対して 0.2% である。計測範囲はセンサ長さに対して圧縮側が 0.5%、引張側が 1.0% である。第1表に SOFO V の仕様を示す。

2.2 SOFO Dynamic システム⁽²⁾

第3図に SOFO Dynamic システムの構成を示す。センサは SOFO V 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ができる。

SOFO Dynamic は、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



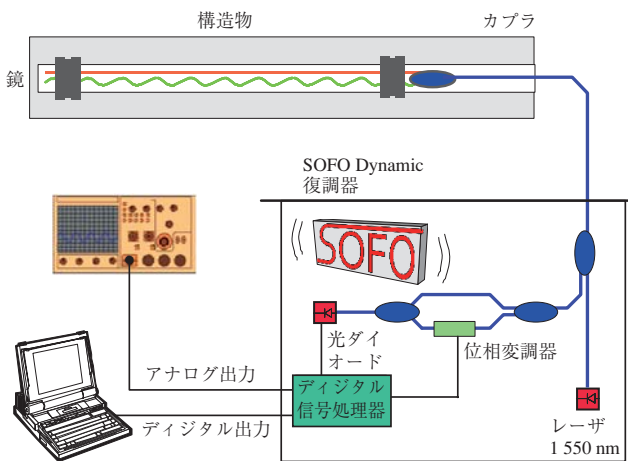
第2図 SOFO 標準センサ
Fig. 2 SOFO standard sensor

第1表 SOFO V の仕様
Table 1 Specifications of SOFO V

パラメータ	単位	仕様	備考
標準センサ長さ	m	0.25 ~ 10 (20)	() はオプション
延長ケーブル長さ	km	5	最大
分解能	μm	2	センサ長さに無関係
計測範囲	圧縮側	%	センサ長さに対して
	引張側	%	
防水性	bar	5	水中 50 m まで
校正	—	不要	
計測精度	%	0.2 以上	計測変位に対して
計測時間	s	約 7	1 点に対して
最大チャンネル数	—	12	100 まで拡張可能

第2表 SOFO Dynamic の仕様
Table 2 Specifications of SOFO Dynamic

パラメータ	単位	仕様	備考
計測周波数範囲	kHz	0 ~ 1	10 kHz まで拡張可能
計測範囲	mm	± 5	最大変形
ひずみ速度	$\mu\text{m/s}$	$\pm 10\,000$	最大変形速度
分解能	μm	0.01	
	$\mu\text{m/s}$	< 0.003	1 時間暖機後
ドリフト	$\mu\text{m/d}$	< 0.5	ドリフト補償機能使用
	—	8	同時計測
計測チャンネル数	—	8	同時計測
	—	1	USB 2.0
デジタル出力	kHz	1	USB 2.0
	bit	32	
アナログ出力	kHz	10	8 チャンネル
	bit	20	
寸法	mm	480 × 180 × 440	
質量	kg	12	



第3図 SOFO Dynamic システム
Fig. 3 SOFO Dynamic system

戻ってきた後、光信号は検波干渉計で位相変調される。光信号を検出した後、SOFO Dynamic 本体はセンサによって導入された位相変調を検知し、これを動変位に変換する。本方式はヘテロダイン低コヒーレンス干渉計と呼ばれる。

第2表に SOFO Dynamic の仕様を示す。0.01 μm という高い分解能をもち、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。ただし、ドリフト補償機能を使用する場合は、7 チャンネルとなる。

2.3 センサの特長

SOFO センサはひずみゲージと比べると多くの長所をもち、最も特長的な点はゲージ長（測定領域）が長いことである。

SOFO センサはひずみゲージと比べると設置が容易である。計測された変形量をセンサの元長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 μm ）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 センサは積分型センサといえる。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って検出が可能である。

SOFO センサは静的には上述のような特長をもち、動的計測に適用する場合を以下に示す。

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したり、固有振動数や振動モードを把握したりすることにある。後者の目的に対して、ゲージ長が長く計測分解能が高い SOFO センサは 1 本で構造物の高次の振動モードも検出できる。分解能はひずみゲージの分解能よりも約 100 倍高く、ひずみゲージや加速度計では検出できない微小な振動も計測可能である。

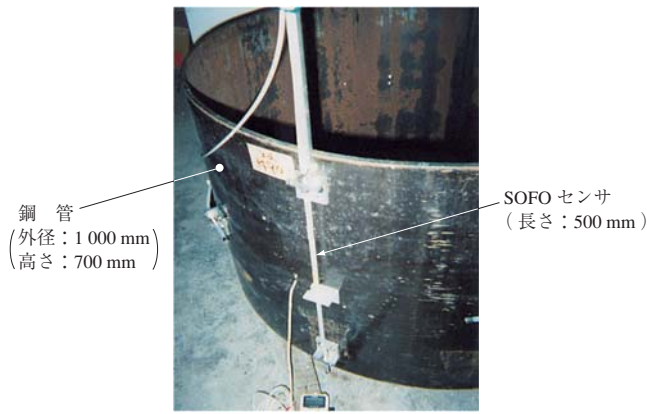
3. 適用事例

SOFO センサは全世界で約 200 件（2007 年 8 月現在）の適用実績がある。以下に、我が国での代表的な適用事例についてその概要を示す。

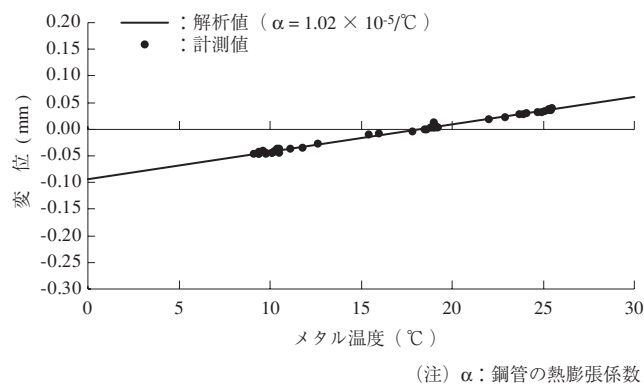
3.1 鋼管の熱膨張試験⁽⁶⁾

第4図に鋼管の熱膨張計測状況を示す。外径 1 000 mm の鋼管（高さ 700 mm）に、長さ 500 mm の SOFO センサを軸方向に設置し、これを恒温室内に置いて室内温度を 10℃から 25℃まで徐々に上昇させた。鋼管には機械的な力は作用させず、温度変化による熱膨張だけが生じるようにした。この間、SOFO V で 30 分ごとに自動計測を行った。

第5図に鋼管の熱膨張の計測結果を示す。横軸は鋼管



第4図 鋼管の熱膨張計測
Fig. 4 Thermal expansion measurement of steel pipe



第5図 鋼管の熱膨張計測結果
Fig. 5 Results of thermal expansion of steel pipe

表面のメタル温度を、縦軸は SOFO センサの変位を示す。図において、鋼管の熱膨張係数を α とすると、計測データの傾きが α となる。最小二乗法で解析した結果、 α は $1.02 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ となり、これは一般的に知られている鋼の熱膨張係数 ($1.0 \sim 1.2 \times 10^{-5}$) と一致する。データのばらつきが小さく、SOFO センサの高い計測精度を確認できた。

3.2 橋桁の静的荷重試験⁽⁴⁾

橋梁は、橋桁のたわみがモニタリングすべき重要なパラメタである。橋桁のたわみを低コストで連続的に計測するには、変位センサをコンクリートの中に埋め込むか、構造物の表面に設置することによって可能となる。

しかし、SOFO センサは前述したように 2 点間の相対変位を計測するものであり、これを橋軸方向に設置した場合、得られる変形は橋軸方向の変位となる。この橋軸方向の変位を曲率解析法の適用によって垂直変位に変換する。

以下に曲率解析法について解説した後、橋梁での静的載

荷試験の結果について示す。

3.2.1 曲率解析法⁽⁸⁾

3 個以上の支点をもつ梁、すなわち、スパンが 2 個以上ある連続梁の場合は、梁のスパン数を n 個とすると、この梁の変位関数 (たわみ) は、各スパンの境界で連続性をもつ n 個の 4 次式で表される。各スパンの変位関数を $P_i^4(x)$ ($i = 1, \dots, n$) とすると、これを 2 回微分したものが曲率関数 $P_i^2(x)$ となる。

したがって、変位関数は、各スパンの $P_i^2(x)$ を求めた後、これをスパン間の連続性 (境界条件) を考慮しながら 2 回積分して決定する必要がある。

3.2.2 曲率測定

Bernoulli の仮説に従えば、単純梁のひずみと曲率は以下のように関係づけられる。

$$\frac{1}{r(x)} = -\frac{\varepsilon(x)}{y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

- r : 曲率半径
- x : 梁の横座標
- ε : ひずみ
- y : 中立軸からの距離

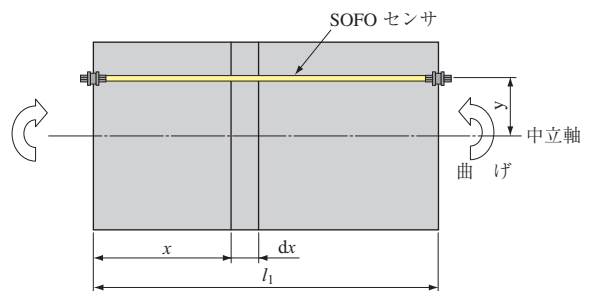
中立軸に平行に設置された SOFO センサによる部材長さ l_1 の変形を測定する。第 6 図に単純曲げによるセンサの変形を示す。(1) 式を積分すると、

$$\frac{1}{r_m} = \frac{-(l_2 - l_1)}{l_1 y} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

- r_m : 平均曲率半径
- l_1 : SOFO センサの初期長さ
- l_2 : SOFO センサの最終長さ

(2) 式は、中立軸に平行に設置された 1 本の SOFO センサによって梁要素の平均曲率 $\frac{1}{r_m}$ が計算できることを示す。



第6図 単純曲げによるセンサの変形
Fig. 6 Deformation of a sensor for simple bending

3.2.3 梁の曲率関数 $P^2(x)$ の計算

各スパンの曲率関数は以下の2次式で表すことができる。

$$P^2(x) = ax^2 + bx + c \quad \dots\dots\dots (3)$$

曲率関数 $P^2(x)$ は3個の未知数をもっているのので、一つの梁で独立した3か所の曲率を計測する必要がある。

3.2.4 変位関数 $P_i^4(x)$ の計算

3.2.1項で述べたように曲率関数 $P_i^2(x)$ を2回積分すると変位関数(たわみ) $P_i^4(x)$ が得られる。

$$P_i^4(x) = \iint P_i^2(x) dx + \alpha_i x + \beta_i, (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式は各梁要素が2個の未知数を持ち、全体として $2n$ 個の未知数が存在することを示す。隣り合う梁要素間の変位の連続性およびたわみ角の連続性、梁両端部でのゼロ変位から、それぞれ $(n-1)$ 個、 $(n-1)$ 個、2個で全体として $2n$ 個の境界条件式が得られるので、未知数 α_i, β_i が求まり、変位関数 $P_i^4(x)$ が決定される。

3.2.5 橋梁における静的載荷試験

第7図に示す独立行政法人土木研究所内の試験橋梁(橋種:鋼製純非合成, 橋長:30.0m, 有効幅員:7.8m)に, SOFO センサを設置して静的載荷試験を実施した。

3.2.1 ~ 3.2.4項では梁の曲率解析の一般論について述べたが, 実際の橋梁では曲げと軸力の組合せや温度分布などが存在する。このため, 中立軸に平行に2本の変位センサを設置して平均曲率を計測する必要がある。

この場合, (2)式を応用すれば, 各組の SOFO センサ出力から $\frac{1}{r_i}$ は以下のように計算できる。

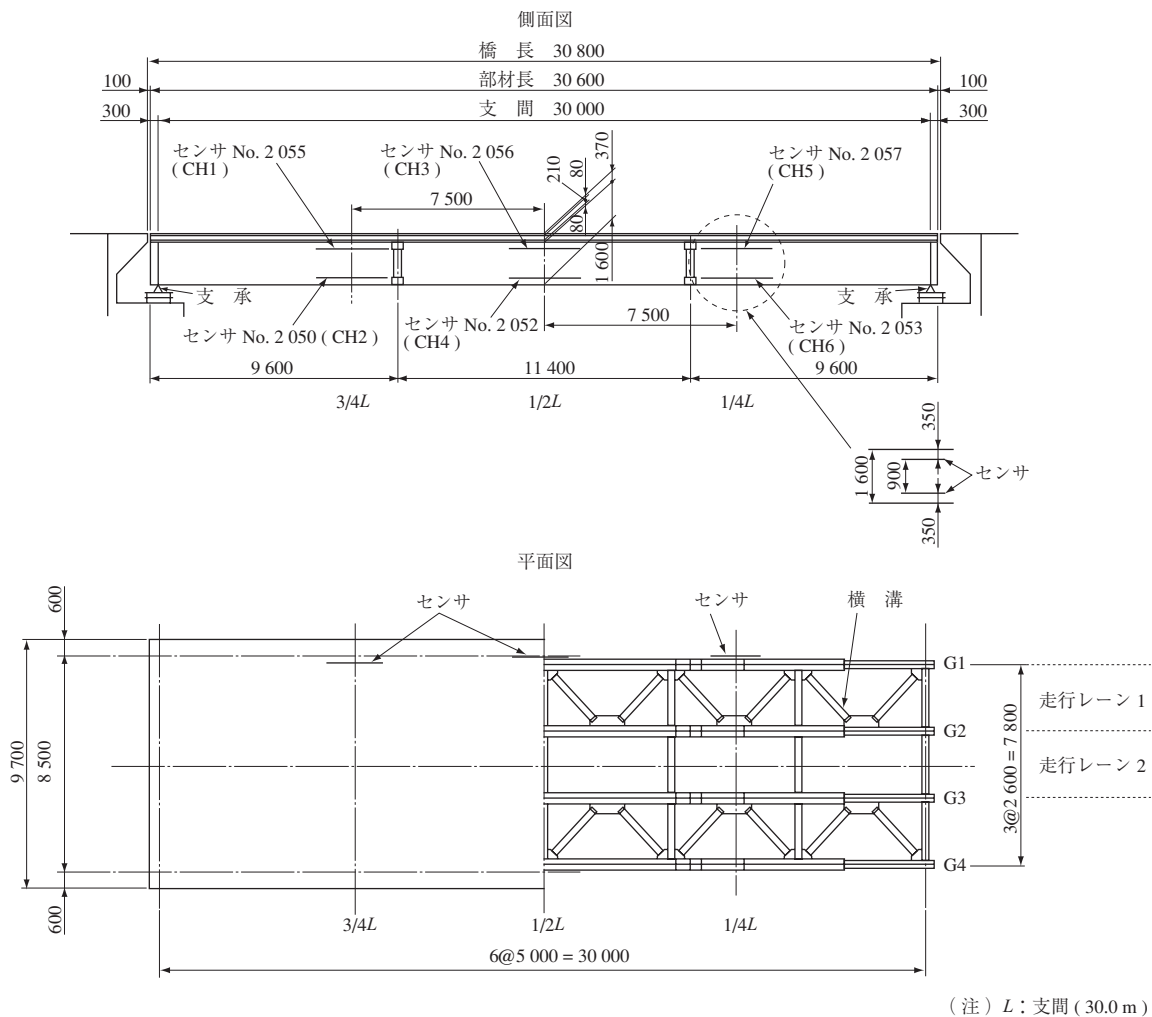
$$\frac{1}{r_i} = \frac{\Delta l_{up} - \Delta l_{down}}{l \times d} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし,

Δl_{up} : 上部 SOFO センサの変形量

Δl_{down} : 下部 SOFO センサの変形量

l : SOFO センサの元長



第7図 試験橋梁およびセンサ配置図 (単位: mm)
Fig. 7 Tested bridge and sensor arrangement (unit: mm)

d : 上部 SOFO センサと下部 SOFO センサ間の距離

計測対象の G1 桁は 2 個の支点をもつ 1 スパン梁である。G1 桁における $1/4 L$, $1/2 L$, $3/4 L$ の位置に合計 6 本 (各 2 本 \times 3 か所), 3 m 長さの SOFO センサ (CH1 ~ CH6) を設置した。それぞれの位置で 2 本の SOFO センサを 900 mm の間隔で上下平行に設置した。

3 か所の平均曲率と支承部の境界条件 ($x = 0 : P^4(0) = 0, x = L : P^4(L) = 0$) から, 前述の曲率解析法を用いて桁のたわみを解析した。静荷重は, 総重量 20 t のダンプカーで与えた。

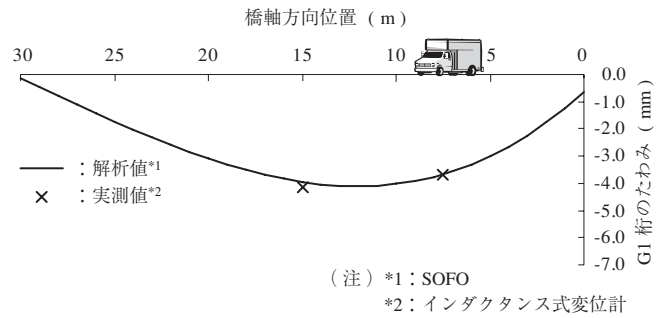
CH1 と CH2 のデータから $3/4 L$ における橋桁の曲率を解析し, 同様に CH3 と CH4 から $1/2 L$, CH5 と CH6 から $1/4 L$ における曲率を解析した。第 8 図に載荷試験状況を示す。

曲率解析法では剛体変位の解析はできないため, 剛体変位を別途計測して SOFO センサによって計測した変位関数に重ね合わせる必要がある。本試験ではインダクタンス式変位計によって支承部の垂直変位を実測したが, これを剛体変位と仮定し, SOFO センサによる計測結果に線形的に重ね合わせた。第 9 図 ~ 第 11 図に G1 桁の $1/4 L$, $1/2 L$, $3/4 L$ の載荷位置におけるたわみ解析結果とインダクタンス式変位計による実測結果との比較を示す。載荷位置が $1/4 L$ および $3/4 L$ の場合, たわみ分布が中心に対して非対称になることが分かる。

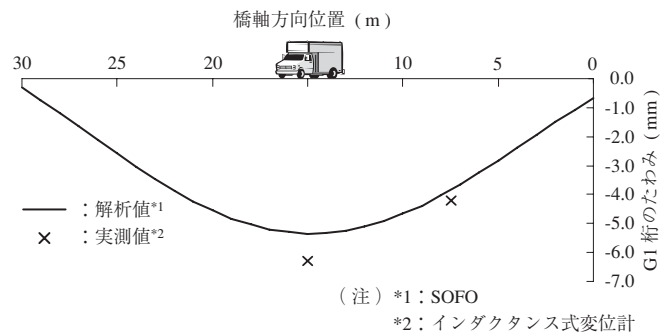
SOFO センサによる計測結果を実測値と比較すると, $1/2 L$ 部で 5 ~ 13%, $1/4 L$ 部で 1 ~ 9% の差があり, 全体的に SOFO センサの方が実測値より小さい結果となった。わずか 6 本のセンサで橋桁のたわみを計測していることを考慮すれば, 十分な計測精度といえる。



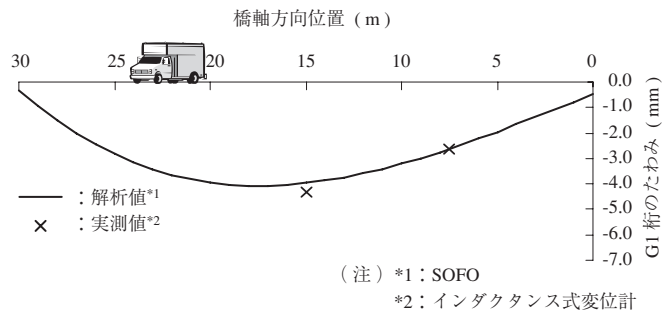
第 8 図 載荷試験状況
Fig. 8 Status of loading tests



第 9 図 G1 桁のたわみ (載荷位置: $1/4 L$)
Fig. 9 Deflection of G1 girder (loading position: $1/4 L$)



第 10 図 G1 桁のたわみ (載荷位置: $1/2 L$)
Fig. 10 Deflection of G1 girder (loading position: $1/2 L$)



第 11 図 G1 桁のたわみ (載荷位置: $3/4 L$)
Fig. 11 Deflection of G1 girder (loading position: $3/4 L$)

本計測では $1/4 L$, $1/2 L$, $3/4 L$ に 3 m 長さの SOFO センサを設置したが, これらのセンサ間の距離が水平方向に 4.5 m あり, センサ自身の長さよりも離れている。これが曲率関数を求める際の誤差要因になっている。橋桁の長さに対応した適切な長さ (例: 5 m 程度) のセンサを設置するか, センサ数を増加 (例: 3 m センサを 4 ~ 5 組設置) することによって, さらに計測精度を向上させることが可能である。

3.3 橋桁の動的載荷試験⁽⁵⁾

3.3.1 計測項目

前述の試験橋梁を供試体として、SOFO Dynamic などによって動的な計測を行った。計測に用いたセンサを次に示す（第12図）。

(1) 桁の曲げひずみ

G1 桁および G2 桁の下フランジ中央部に SOFO センサ（長さ 3 m）を橋軸方向に、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した。

(2) 桁の鉛直方向加速度

G1 桁および G2 桁の下フランジ中央部に加速度センサを設置した。

(3) 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を設置した。

3.3.2 計測条件

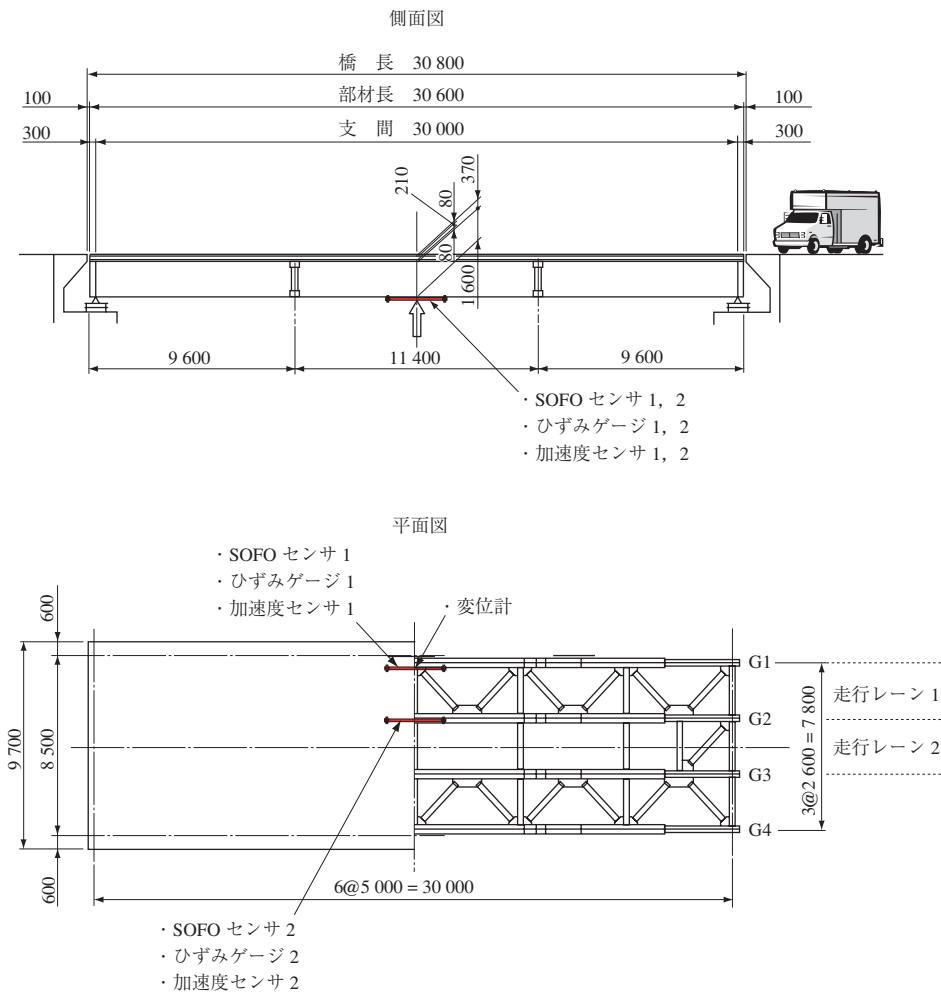
試験橋梁の走行レーン 1 を使用し、走行車 1 台を通過させて計測を実施した。走行車の総重量は 1 710 kg（車体重量 1 640 kg + 運転者体重 70 kg）である。走行速度は 20, 40, 60, 80 km/h の 4 ケースで試験した。

なお、走行車の重量の影響を調査するため、この重量を約 10% 増の 1 880 kg にした場合の計測も行った。ただし、走行速度は 40 km/h のみで試験した。

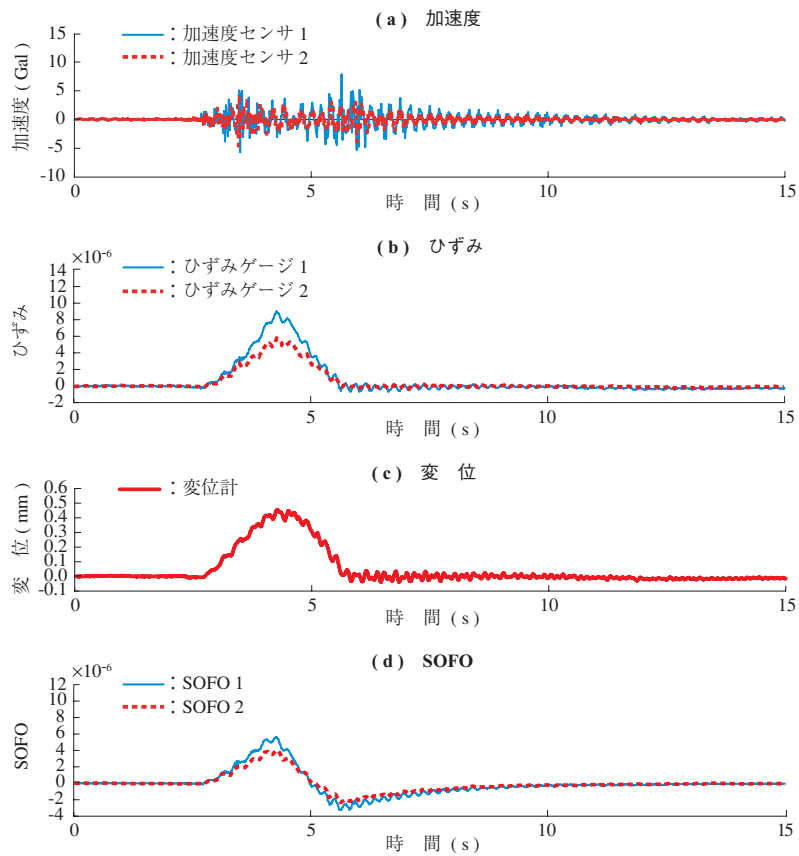
3.3.3 試験結果および考察

計測結果の一例として、走行速度 40 km/h および 80 km/h の時の結果を第 13 図および第 14 図に示す。走行速度 40 km/h の時の各センサの出力波形を周波数分析した結果を第 15 図に示す。

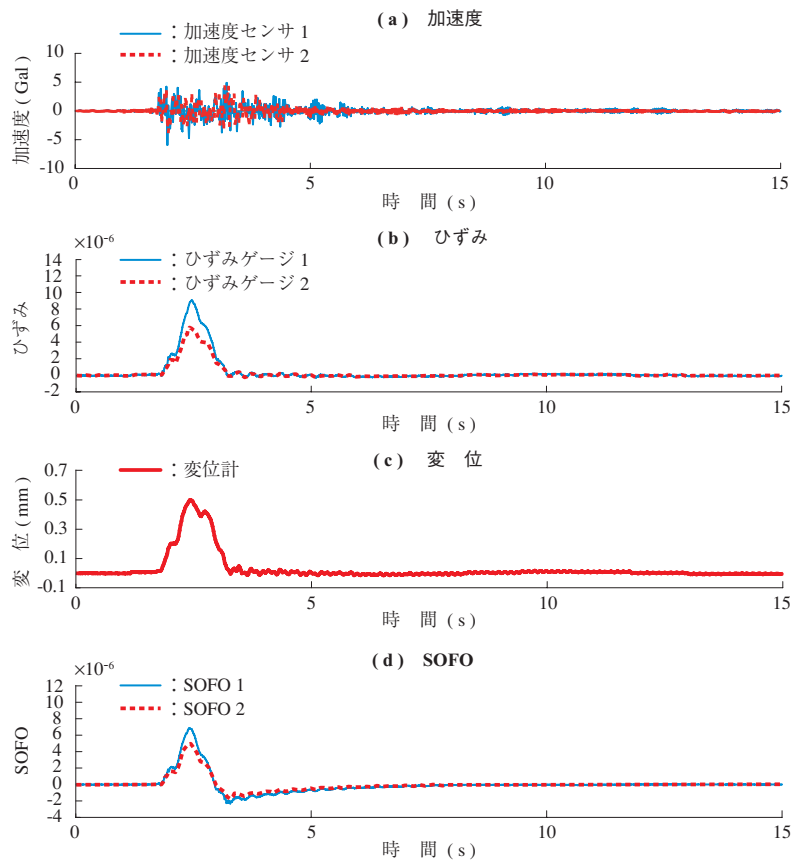
走行車の重量移動に伴って橋桁は静的にたわむと同時に励振されるため、加速度、ひずみ、変位、SOFO センサ計



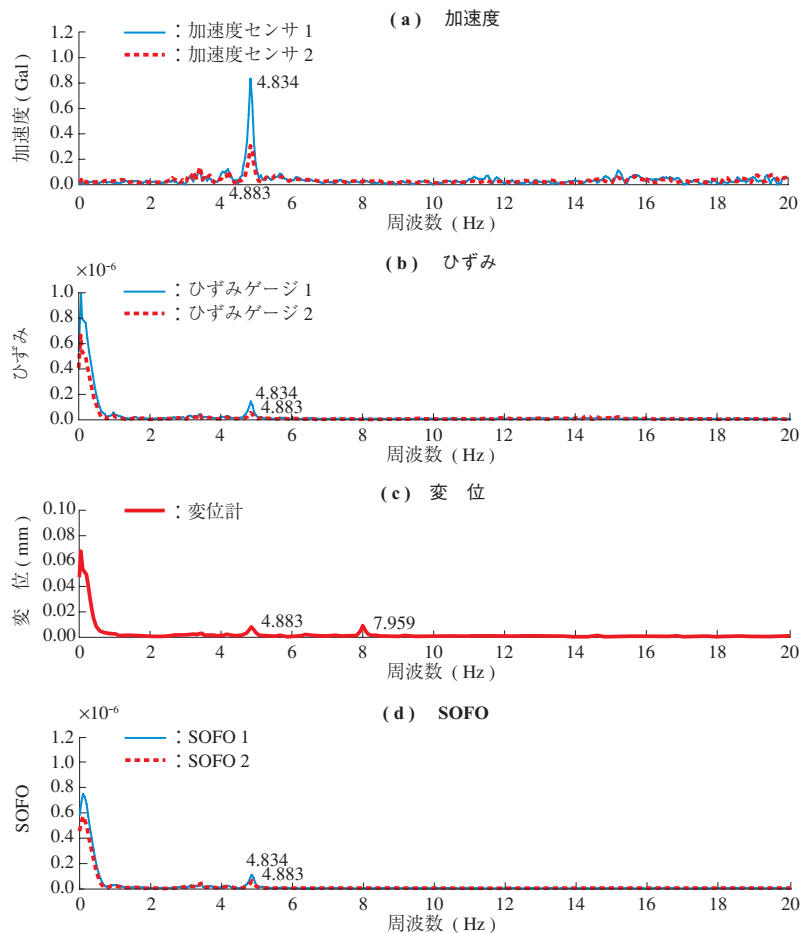
第 12 図 動的試験時のセンサ配置図（単位：mm）
Fig. 12 Sensor arrangement at dynamic loading tests (unit : mm)



第 13 図 走行速度：40 km/h の時の計測結果
Fig. 13 Measurement results at speed of 40 km/h



第 14 図 走行速度：80 km/h の時の計測結果
Fig. 14 Measurement results at speed of 80 km/h



第 15 図 走行速度：40 km/h の時の周波数分析結果
 Fig. 15 FFT analysis results at speed of 40 km/h

測値が変動している。変動成分は非常に小さいが、その周波数は第 15 図の周波数解析結果によるとどのデータも約 4.8 Hz である。橋桁の 1 次曲げ固有振動数が約 4.8 Hz であることが分かる。

走行速度が 40 km/h の場合、走行車は約 2.7 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 2.7 秒より長い（第 13 図参照）。橋桁の振動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、第 13 図および第 14 図から明らかである。

ひずみゲージと SOFO センサ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 $9 \mu\epsilon$ (9×10^{-6}) 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 $6 \mu\epsilon$ (6×10^{-6}) から $7 \mu\epsilon$ (7×10^{-6}) に増加している。2.3 項で述べた SOFO センサの積分効果によるものであり、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。

重量 10% 増の場合の計測結果を第 16 図に示す。走行速度が同じ 40 km/h の場合の第 13 図と比較すると、ひ

ずみ、変位、SOFO センサの各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とらえており、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。

3.4 高層ビルの柱の軸力モニタリング^{(3), (7)}

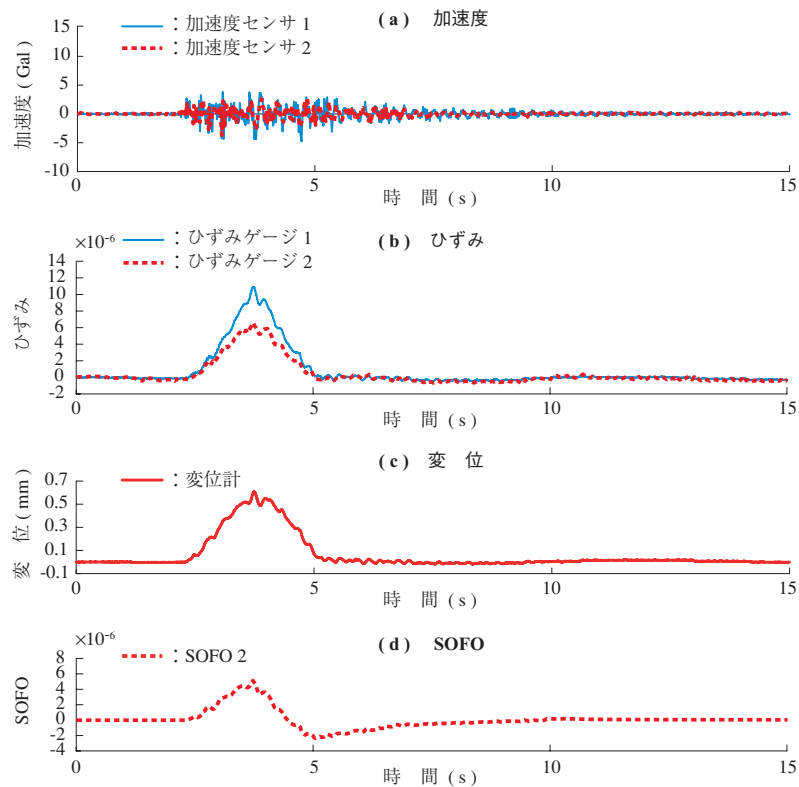
3.4.1 高層ビルの概要

対象とした高層ビル（東京都豊洲地区）は、33 階建て、高さ約 147 m であり、2004 年に建設開始、2006 年 8 月に竣工した。

3.4.2 モニタリングの目的

このビルの柱に SOFO センサを設置し、以下の目的でモニタリングを実施した。

- (1) 建設中は柱に作用する荷重変化を SOFO V で連続的にモニタリングし、構造設計検証の一助とする。
- (2) 建設後は、地震、台風、地盤沈下などによる柱の荷重分布変化を長期的に SOFO V でモニタリングし、ビルの健全性を監視する。
- (3) 建設中および建設後に SOFO Dynamic によって動



第 16 図 走行速度：40 km/h（重量 1 880 kg）の時の計測結果
 Fig. 16 Measurement results at speed of 40 km/h (weight : 1 880 kg)

的計測（固有振動数，振動モードなど）を行い，ビルの動的挙動を把握するとともに健全性を監視する。

3.4.3 センサの設置

SOFO センサを 2005 年 5 月に 2 階の柱に設置した。2 階は機械室であり，柱は化粧タイルなどで覆われず，センサの設置とモニタリングが容易である。33 本の柱の中で代表的な柱 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 センサを表面に設置した。一例として柱 X7Y9 への設置状況を第 17 図に示す。柱の高さ（3 m）とコンクリート床高さなど現場の状況を考慮して SOFO センサ長さとして 1 m を選定した。柱の熱膨張による変形を評価するため，SOFO センサの中央部付近に熱電対を設置し，参考としてひずみゲージも 1 点貼り付けた。

柱は最終的には断熱材が吹き付けられるため，すべてのセンサの端末コネクタは小さな接続箱に導いた。また，バッテリー作動の小型温度ロガーがこの接続箱の中に納められており，計測時に温度データをパソコンに取り込んだ。

3.4.4 SOFO V による静的モニタリング

SOFO センサは 2005 年 5 月 18 日に設置を完了し，同

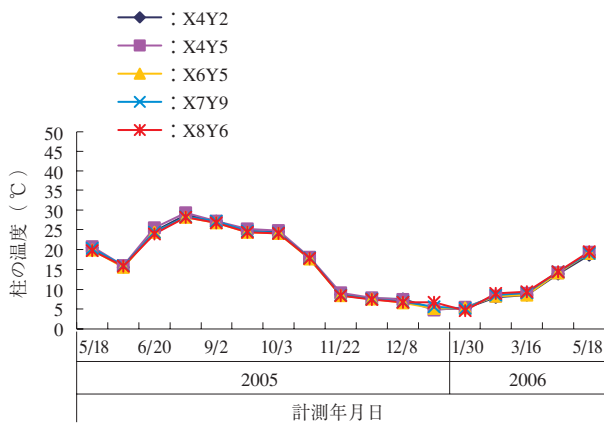
SOFO センサ
 （長さ：1 m）



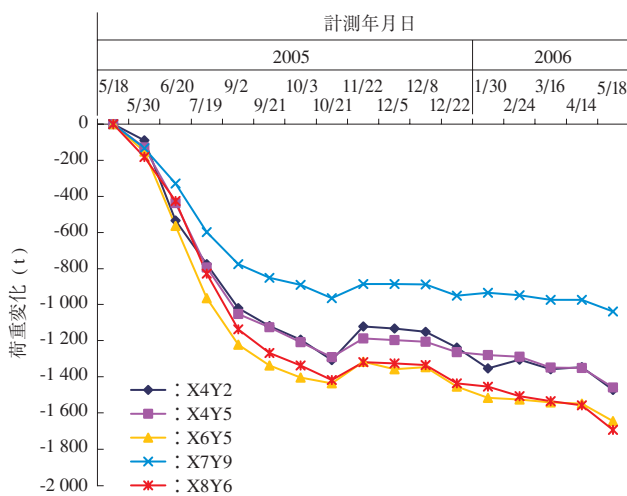
第 17 図 SOFO センサ（柱：X7Y9）
 Fig. 17 SOFO sensor (column : X7Y9)

日からモニタリングを開始した。この日の計測データを基準とし，以後，原則として 1 か月ごとに計測を行っている。第 18 図に柱の温度変化を示す。5 本の柱の温度は同じではない。それらの位置による日照の違いでわずかではあるが，相違している。

柱の荷重変化を第 19 図に示す。ただし，熱膨張によるひずみは除外している。第 20 図に建設中のビルの外観を



第 18 図 柱の温度変化
Fig. 18 Temperature changes of columns



第 19 図 柱の荷重変化
Fig. 19 Changes of normal loads of columns

示す。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ビルの頂上に設置されていた。その内の 1 基が期間 1（2005 年 10 月 21 日～2005 年 11 月 22 日）の間に撤去された。また、もう 1 基が期間 2（2005 年 12 月 22 日～2006 年 1 月 30 日）の間に撤去された。これらの撤去は柱に作用する荷重分布を減少させるが、第 19 図に示すようにその影響が明確に現れている。期間 1 に、すべての柱の圧縮荷重が減少している。この期間には、クライミングクレーンだけでなくほかの物（重機、ストックされていた鋼材、足場など）が撤去されたものと推定される。一方、期間 2 では、圧縮荷重の減少が少ない。内装工事（コンクリート床、配管、コンクリート壁など）による荷重の増加が期間 1 の時に比べて大きかったものと推定される。



第 20 図 建設中のビルの外観
Fig. 20 Building under construction

(注) キャプションの数字は建設中のビルでの計測年月日を示す。

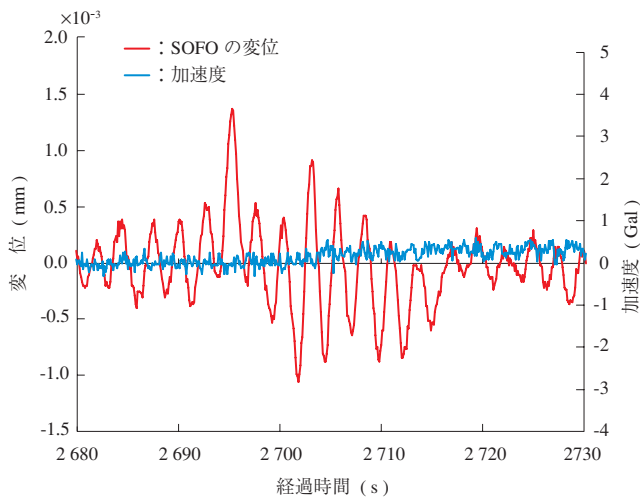
ビルが竣工した 2006 年 8 月以降も約 2 か月ごとにモニタリングを継続中である。

3.4.5 SOFO Dynamic による動的計測

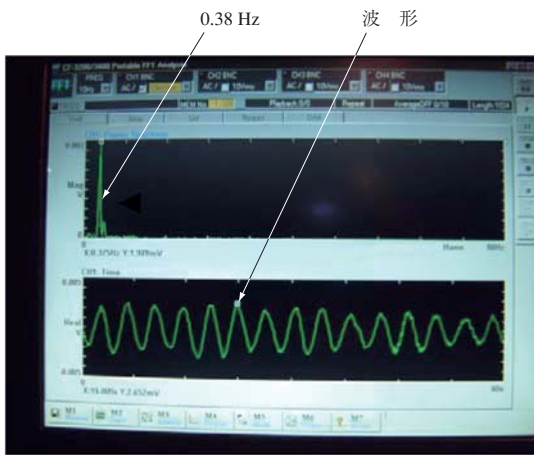
柱が振動するためには大きな励振力が必要であり、強風下での計測を行った。2006 年 3 月 17 日に最大瞬間風速 15 m/s を記録し、同日、動的計測を実施した。

計測した柱は X6Y5（第 18 図参照）で、建物の中央に近い柱である。風速が最大となった 10 時 50 分から約 1 分間の計測結果を第 21 図に示す。同時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。同図から SOFO センサは振幅 1 μm 以下の微小な振動をとらえていることが分かる。この振動を周波数分析した結果を第 22 図に示す。

ビルの 1 次曲げ固有振動数、0.38 Hz が明確に現れてい



第 21 図 強風時の柱 X6Y5 の振動
Fig. 21 Vibration of column X6Y5 in strong wind



第 22 図 周波数分析結果
Fig. 22 Results of FFT analysis

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、ひずみゲージにおいても同様に検知ができなかった。さらに、2006 年 5 月 19 日に微風状態における計測を試み、固有振動数を明確にとらえることができた。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って振動を検知できることを示した。

柱の荷重分布変化と固有振動数変化を長期的にモニタリングすることによって、ビルの健全性を評価することができ、大型地震時の評価に役立つものと考えている。

4. 結 言

光ファイバ変位センサ (SOFO センサ) の概要について解説し、鋼管の熱膨張試験、橋桁の静的および動的載荷試

験、高層ビルの柱の軸力モニタリングに適用した結果を報告した。以上の結果から SOFO センサの静的および動的性能を明らかにした。センサは ① ゲージ長が長い ② コンクリートに埋め込みができる ③ 高精度である ④ 長寿命である ⑤ 長期に安定である、などの特長があり、大型構造物のヘルスマニタリング用センサとして最適と考えている^{(9)~(12)}。

2007 年 8 月初めにミネソタ州 (アメリカ) 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、構造物ヘルスマニタリングの必要性を全世界に知らしめた事故である。我が国では戦後の復興期に建設された多くの構造物が理論寿命を超えて供用される状況になっている。これらのヘルスマニタリングに SOFO センサが効果的であると考えられる。

SOFO センサによる超高層ビルや免震建物の軸力などのモニタリング・プロジェクトが 2007 年 2 月からスタートしており、新しい知見が得られている⁽¹²⁾。今後、建築分野でも SOFO センサが広く適用されていくものと確信している。

— 謝 辞 —

試験橋梁における SOFO センサ関連試験の実施に当たっては、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など、多くのご協力をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 三上隆男：SOFO システム IIC REVIEW No.24 2000 年 10 月 pp. 29 - 33
- (2) 三上隆男：光ファイバによる動的変位計測システム (SOFO Dynamic) IIC REVIEW No.35 2006 年 4 月 pp. 54 - 58
- (3) 三上隆男：光ファイバによる高層ビルのヘルスマニタリング IIC REVIEW No.36 2006 年 10 月 pp. 2 - 8
- (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 1」 IIC REVIEW No.37 2007 年 4 月 pp. 35 - 43
- (5) 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 年 10 月 pp. 15 - 25

- (6) T. MIKAMI and T. NISHIZAWA : Structural Health Monitoring with Fiber Optic Sensors SEWC (2002.10)
- (7) T. MIKAMI et al : High-rise Building Monitoring by Fiber Optic Sensors IABSE Annual Meeting and Symposium Budapest Hungary (2006.9)
- (8) S. Vurpillot, G. Krueger, D. Benouaich, D. Clement and D. Inaudi : Vertical Deflection of a Prestressed Concrete Bridge Obtained Using Deformation Sensors and Inclinometer Measurements ACI Structural Journal (1998.9 - 10) pp. 518 - 526
- (9) 河合郁朗, 清水 明 : 光ファイバーを用いたコンクリート構造物のひずみ測定手法に関する検討 (その1 光ファイバーによるひずみ測定の概要と基本特性の把握) 日本建築学会大会 (東海) 学術講演梗概集 2003 年 9 月 pp. 1 019 - 1 020
- (10) 北島幸一郎, 小柳光生 : 光ファイバーを用いたコンクリート構造物のひずみ測定手法に関する検討 (その2 RC 長期試験) 日本建築学会大会 (東海) 学術講演梗概集 2003 年 9 月 pp. 1 021 - 1 022
- (11) 池内敏浩, 宮田博嗣 : 光ファイバーを用いたコンクリート構造物のひずみ測定手法に関する検討 (その3 PCCV 取付け試験) 日本建築学会大会 (東海) 学術講演梗概集 2003 年 9 月 pp. 1 023 - 1 024
- (12) 西澤崇雄, 大野富男 : 不整形超高層ビルの柱歪モニタリング報告 計測の目的と概要 日本建築学会大会 (九州) 学術講演梗概集 2007 年 9 月 pp. 83 - 84