

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」

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、ダンプカーによる静的載荷試験中の橋桁のたわみを計測した。その結果、6本のSOFOセンサにより橋桁のたわみを十分な精度で計測できることを実証した。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, 曲率関数, たわみ

1. はじめに

戦後の復興期に建設された多くの構造物は耐用年数を迎えている。また、1980年代の高度成長期に建設された膨大な量の建造物や施設も近い将来、耐用年数になる。このような状況から、我が国では構造物のヘルスマニタリング（長期的な健全性診断）が重要な課題となっている。

構造物の中でも、橋梁は公共性が高く、使用停止による影響も大きいので、長期的なヘルスマニタリングを行うことが重要である。しかし、何をどの様にモニタリングすべきか基準が確立されていないのが現状である。

このような背景の下で、独立行政法人土木研究所殿の協力を得て同研究所内の鋼製試験橋梁を供試体として光ファイバ変位センサ（SOFO）によるヘルスマニタリングの研究をH15年から実施してきた。研究内容は静的載荷試験と動的載荷試験

に分けられる。なお、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」という意味で、分散型（単点計測）に属する光ファイバセンサである^{(1)~(4)}。

本号では「その1」として試験橋梁における静的載荷試験の概要について報告する。

2. 概要

橋梁においては、橋桁のたわみがモニタリングすべき重要なパラメータの一つと考えられるが、現在の伝統的な計測方法（三角測量、水レベル計、機械的変位計等）は時間がかかり、かつ、専門技術者が必要である。その結果、コストが高くなり、これらの方法では計測回数が制限されてしまう。また、センサを設置した局所的な場所のデータしか得られないので、橋桁全体の変形を把握することはできない。

* 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）

橋梁のたわみを低コストで継続的に計測するためには、変位センサをコンクリートの中、または構造物の表面に設置することがひとつの解決策である。継続的な計測のためには、長期安定性に優れたセンサが必要である。

SOFO センサは長寿命かつ耐候性に優れた特徴を有し、この目的に合致したセンサである。しかし、SOFO センサは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である。橋桁の健全性評価のためには垂直変位（たわみ）が必要であり、SOFO により計測された橋軸方向の変位を曲率解析法の適用により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、試験橋梁での静的載荷試験の結果について報告する。

3. 曲率解析法について⁵⁾

3.1 梁の変形

梁の曲げ変形解析に当たっては、梁の横断面は梁が曲がった後も平面を保ち、かつ、曲がった後の縦軸線に直交する位置をとるという Bernoulli の仮説を適用する。

3 個以上の支点を有する梁、即ち、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有する n 個の4 次式で表される。各スパンの変位関数を $P_i^4(x)$ ($i=1\cdots n$) 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 曲率測定

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

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

ただし、

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

中立軸に平行に設置された変位センサにより部材長さ l (図1 参照) の変形を測定する。(1) 式を積分すると、

$$\int_0^{l_1} \frac{dx}{r(x)} = -\int_0^{l_1} \frac{\varepsilon(x) dx}{y} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{1}{l_1} \int_0^{l_1} \frac{dx}{r(x)} = -\frac{\int_0^{l_1} \varepsilon(x) dx}{l_1 y}$$

左辺は平均曲率を表し、右辺の分子はセンサの長さ変化を表すので、

$$\frac{1}{r_m} = \frac{-(l_2 - l_1)}{l_1 y} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

- r_m = 平均曲率半径
- l_1 = 変位センサの初期長さ
- l_2 = 変位センサの最終長さ

(3) 式は、中立軸に平行に設置された1 本の変位センサにより梁要素の平均曲率： $1/r_m$ が計算できることを示す。

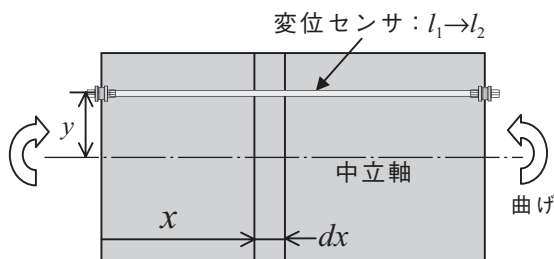


図1 単純曲げによるセンサの変形

3.3 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ように2次式で表すことができる。

$$P^2(x) = ax^2 + bx + c \quad \dots\dots(4)$$

曲率関数 $P^2(x)$ は3個の未知数を有しているので、一つの梁で独立した3箇所の曲率を計測する必要がある。図2に示すように、2個の支点で支えられた1スパンの梁を考える。梁要素2(Section 2)の部分を例にとると、3箇所に設置した変位センサにより、(3)式から以下の平均曲率を得ることができる。

$1/r_1 : (x_1' ; x_1'')$ の平均曲率

$1/r_2 : (x_2' ; x_2'')$ の平均曲率

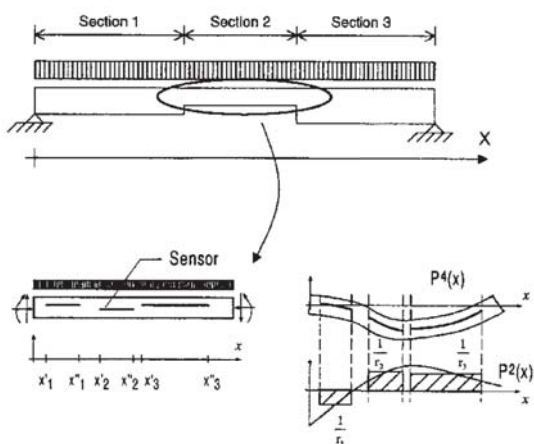


図2 梁要素の曲率関数計測 (Section 2の計測例)

$1/r_3 : (x_3' ; x_3'')$ の平均曲率

係数は以下の連立方程式の解として得られ、 $P^2(x)$ が決定される。

$$\frac{1}{r_i} = \frac{\int_{x_i'}^{x_i''} (ax^2 + bx + c) dx}{x_i'' - x_i'} \quad (i=1,2,3) \quad \dots\dots(5)$$

3.4 変位関数： $P^4(x)$ の計算

3.1で述べたように曲率関数： $P^2(x)$ を2回積分すると変位関数(たわみ)： $P^4(x)$ が得られる。

$$P_i^4(x) = \iint P_i^2(x) dx + \alpha_i x + \beta_i, (i=\dots, n) \quad \dots(6)$$

(6)式は各梁要素が2個の未知数を有し、全体として2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及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： $P^4(x)$ が決定される。

4. SOFO センサによる橋桁の曲率計測

3項では梁の曲率解析の一般論について述べたが、この理論を橋梁に適用する。実際の橋梁では曲げと軸力の組合せや温度分布等が存在するため、中立軸に平行に2本のセンサを設置して平均曲率を計測する必要がある。

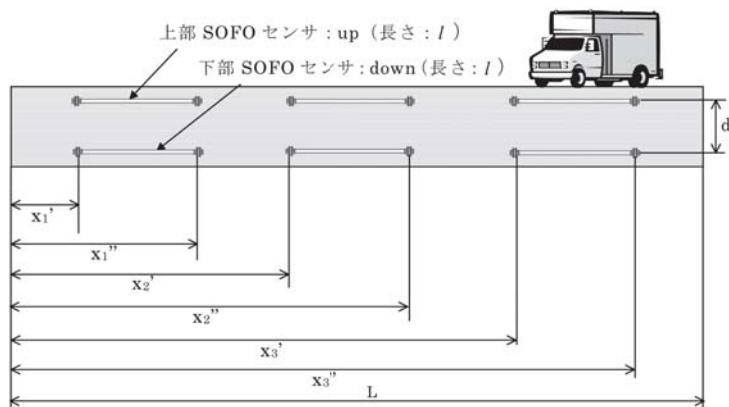


図3 SOFO センサによる橋桁の曲率計測

そこで、図3のようにSOFOセンサを適当な間隔で平行に設置して平均曲率を計測する。この場合、(3)式を応用すれば、各組のSOFOセンサ出力からは以下のように計算できる。

$$= \frac{\Delta l_{up} - \Delta l_{down}}{l \times d} \quad \dots\dots(7)$$

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 センサの原長
- d : 上部 SOFO センサと下部 SOFO センサ間の距離

5. 試験橋梁における静的載荷試験

5.1 供試体 (図4参照)

- ・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

5.2 計測項目

- ・主桁および垂直補鋼材のひずみ, 変位, 温度 (土木研究所殿担当)
- ・SOFO センサによる主桁のひずみ (IIC 担当)
本計測には静的計測システム: SOFO V(1)を使用した。

5.3 計測条件

- ・全重量 20 トンのダンパーにより各種の荷重を与え、静的載荷試験と動的載荷試験を実施したが、本号では静的載荷試験の結果のみを以下に述べる。

5.4 試験結果

計測対象の G1 桁は 2 個の支点を有する 1 スパン梁である。G1 桁の 1/4L, 1/2L, 3/4L の位置に合計 6 本 (各 2 本 × 3 箇所) の 3m 長 SOFO センサ設置した。平均曲率を計測するため、それぞれの位置で 2 本の SOFO センサを 900mm の間隔で上下平行に設置した。

図4にセンサの配置図を示す。写真1にはセンサ設置状況を示す。3箇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、前述の曲率解析法により桁のたわみを解析する。

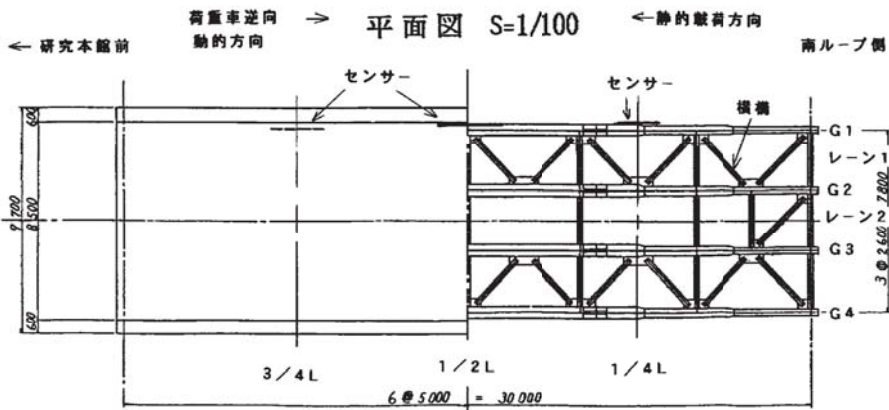
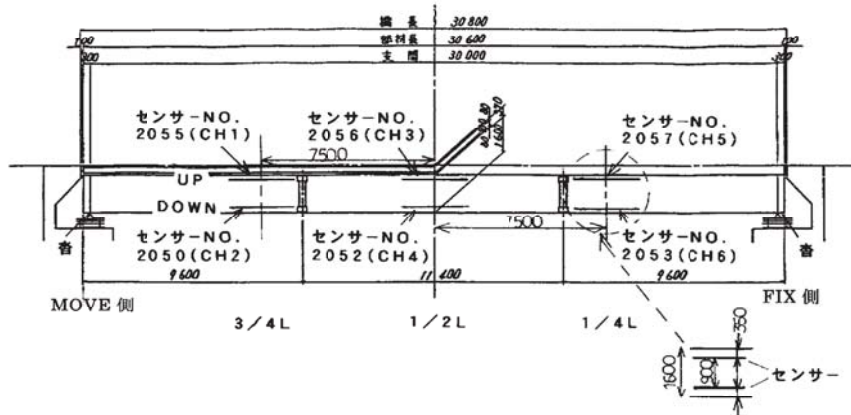
静的載荷試験は‘変状’の有無、載荷レーン、載荷点をパラメータとして実施された。なお、‘変状’とは、橋の異常を模擬するために支承部の自由度を拘束したり、構造部材のボルトを緩めたりすることを意味する。

表1にSOFOセンサによる計測結果の一例を示す。UPとDOWNは各位置における上部側及び下部側SOFOセンサを表す。計測結果は試験前の初期値からの変化を示している。CH1とCH2のデータから3/4Lにおける橋桁の曲率を解析し、同様にCH3とCH4から1/2L、CH5とCH6から1/4Lにおける曲率を解析する。写真2に載荷試験状況を示す。

静的試験は‘変状’の有無に対して、各ケースとも2回実施されているが、計測結果に大きな相違は認められなかった。したがって、たわみ解析は‘変状’なしのケースの1回目のデータについて実施した。

図5～図7に解析結果の一例(載荷ケース1-1, 1-2, 1-3)を示す。載荷点が1/4L及び3/4Lの場合、たわみ分布が中心に対して非対称になることがわかる。なお、曲率解析法では剛体変位の解析はできないので、剛体変位を別途計測してSOFOで解析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り支承部

側面図 S=1/100



横断面図 S=1/100

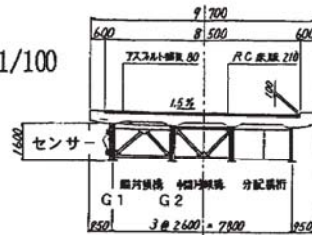


図4 試験橋梁及びS O F O センサ配置図



写真1 G1 桁 SOFO センサ設置

の垂直変位が実測されているが、これを剛体変位と仮定する。G1 支承部の MOVE 側と FIX 側の実測垂直変位を線形補間し、SOFO の解析結果に線形的に重ね合わせた。表2に各載荷ケースにおける G1 支承部の垂直変位の実測値を示す。

表3にたわみの解析結果とインダクタンス式変位計による 1/4L と 1/2L 部の実測結果との比較を示す。また、載荷ケース 1-1, 1-2, 1-3 の結果を図8～図10に図示した。なお、変位計は 1/4L

表 1 静的載荷試験時の SOFO 実測値

載荷ケース	状態	載荷レーン	載荷点	SOFO実測値(単位mm)					
				初期値からの変化を表示					
				ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6
				3/4UP	3/4DOWN	1/2UP	1/2DOWN	1/4UP	1/4DOWN
1-1	静的(変状なし) 1回目	1	0	0	0	0	0	0	0
1-2			1/4	0.0031	0.0421	0.011	0.0971	0.0203	0.1532
1-3			1/2	0.0072	0.0983	0.0269	0.1888	0.0047	0.0945
			3/4	0.0117	0.145	0.01	0.095	0.0051	0.0431
			0	-0.0007	0.0029	-0.0034	0.0032	-0.0021	-0.0006
1-4	静的(変状なし) 1回目	2	0	0	0	0	0	0	0
1-5			1/4	0.0044	0.0303	0.0073	0.063	0.0028	0.0555
1-6			1/2	0.0046	0.0545	0.009	0.1003	0.0055	0.0526
			3/4	-0.0032	0.0569	0.0082	0.0634	-1E-04	0.029
			0	0.0009	0.0006	0.0012	0.0023	0.0041	-0.0023
1-1	静的(変状なし) 2回目	1	0	0	0	0	0	0	0
1-2			1/4	0.002	0.0442	0.0119	0.0968	0.0204	0.1494
1-3			1/2	0.0057	0.0989	0.0259	0.1922	0.0069	0.096
			3/4	0.0117	0.145	0.01	0.095	0.0051	0.0431
			0	-0.0007	0.0039	-0.0023	0.0038	-0.0022	0.002
1-4	静的(変状なし) 2回目	2	0	0	0	0	0	0	0
1-5			1/4	0.0015	0.0301	0.0093	0.062	0.0025	0.059
1-6			1/2	0.0024	0.0602	0.0122	0.0975	0.0051	0.0561
			3/4	-0.0032	0.0569	0.0082	0.0634	-1E-04	0.029
			0	-0.0001	-0.0008	0.0015	0.0006	0.001	-0.0011



写真2 載荷状況 (2レーン, 1/4 L点)

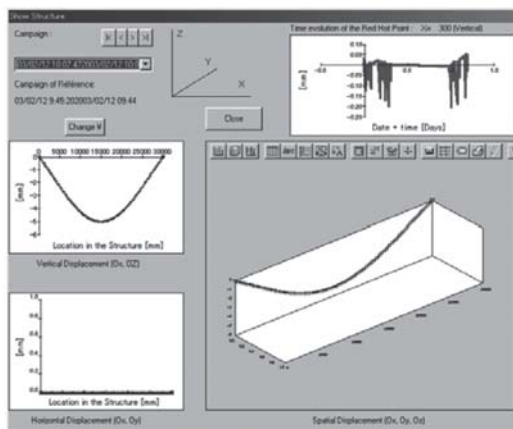


図6 解析結果 (載荷ケース1-2)

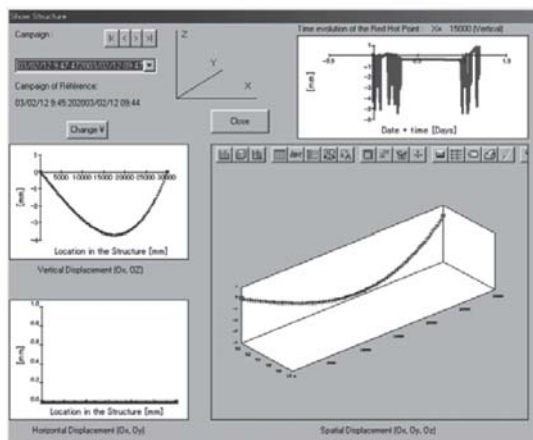


図5 解析結果 (載荷ケース1-1)

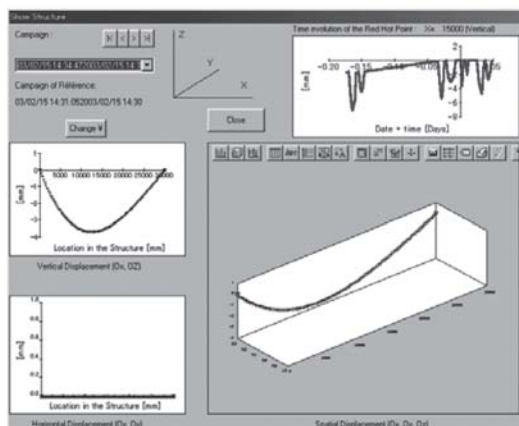


図7 解析結果 (載荷ケース1-3)

表2 G1 支承部の垂直変位 (単位: mm)

荷重ケース	FIX側	MOVE側
1-1	0.644	0.158
1-2	0.690	0.315
1-3	0.487	0.332
1-4	0.275	0.104
1-5	0.364	0.171
1-6	0.240	0.142

と 1/2L の 2 箇所に設置されている。

SOFO による解析結果を実測値と比較すると、1/2L 部で 5%～13%、1/4L 部で 1%～9%の差があり、全体的に SOFO の方が実測値より小さい結果となったが、わずかに 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、十分な計測精度と言える。

表3 たわみ解析結果と実測結果の比較

荷重ケース	状態	荷重レーン	荷重点	区分	たわみ (mm)			備考
					3/4L	1/2L	1/4L	
1-1	静的荷重	1	1/4L	SOFO	2.48	3.98	3.70	3/4 スパンには変位計が設置されていない。
				変位計	—	4.16	3.67	
1/2L			SOFO	3.80	5.51	3.98		
			変位計	—	6.28	4.20		
1-3		3/4L	SOFO	3.54	3.97	2.62		
			変位計	—	4.30	2.64		
1-4		2	1/4L	SOFO	1.37	2.11	1.73	
				変位計	—	2.37	1.85	
1/2L	SOFO		2.09	3.04	2.16			
	変位計		—	3.50	2.37			
1-5	3/4L	SOFO	1.81	2.23	1.54			
		変位計	—	2.44	1.51			

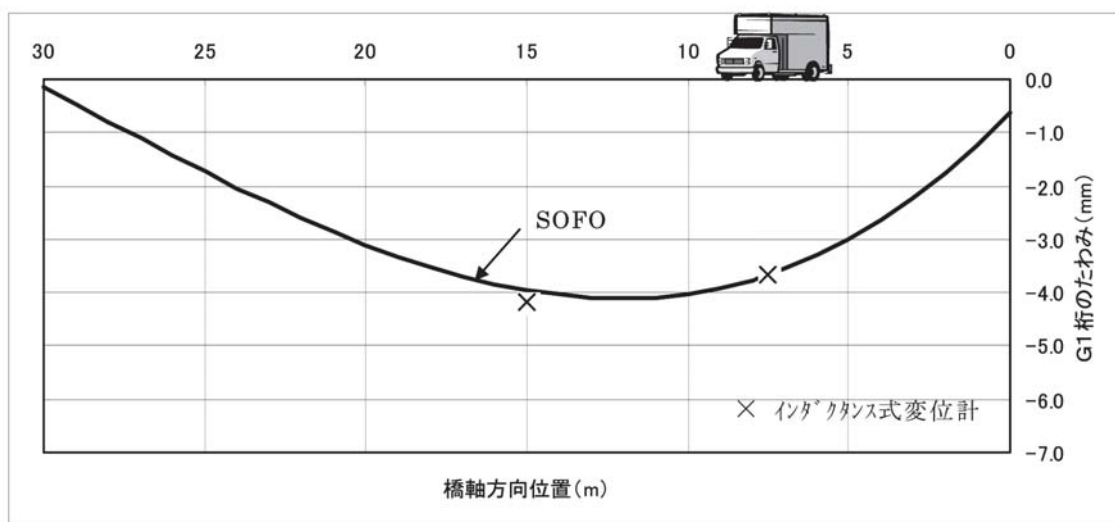


図8 G1 桁のたわみ図 (荷重ケース1-1)

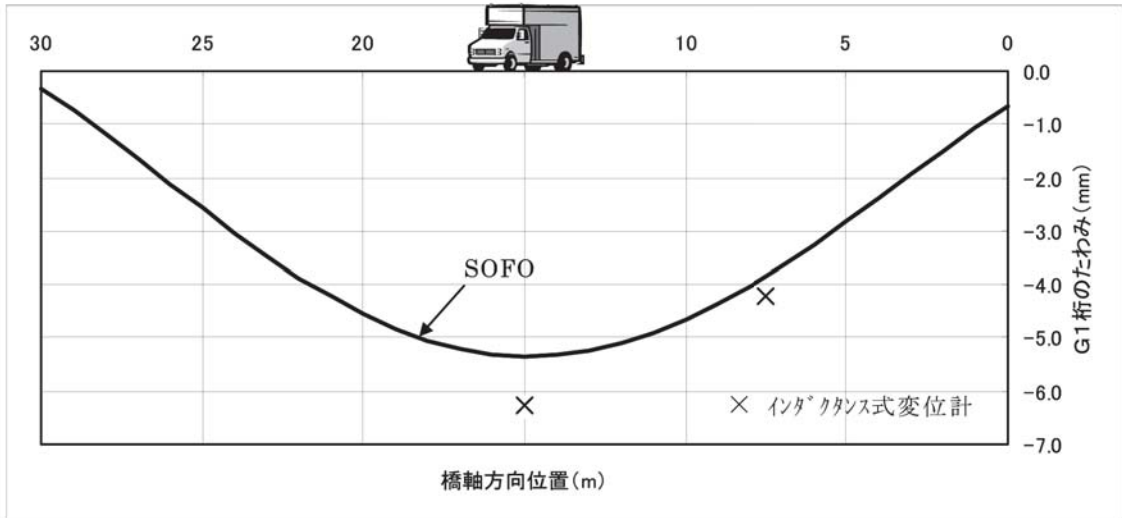


図9 G1桁のたわみ図 (载荷ケース1-2)

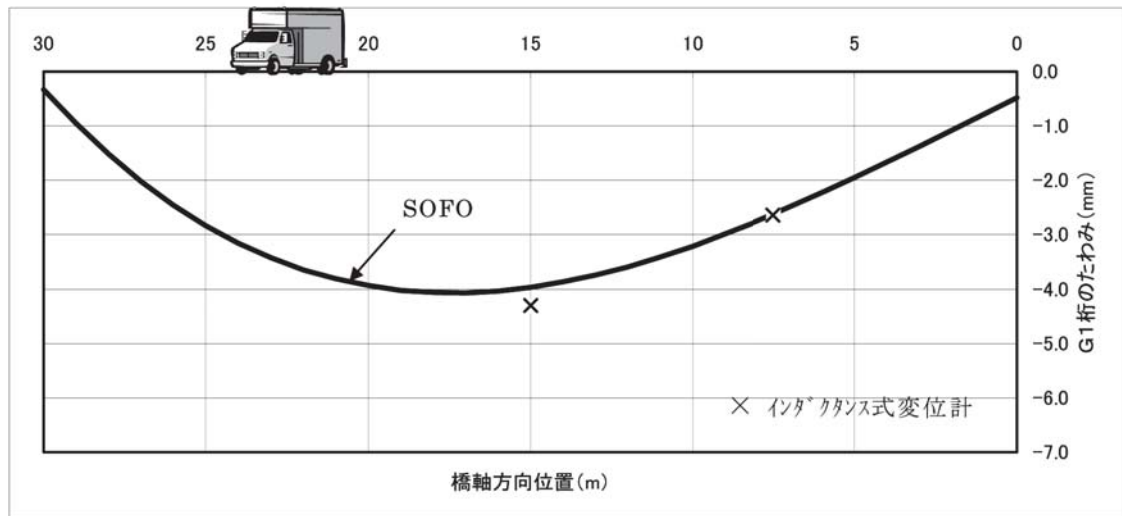


図10 G1桁のたわみ図 (载荷ケース1-3)

本計測では $1/4L$ 、 $1/2L$ 、 $3/4L$ に 3 m -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 4.5m 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: 5m 程度) のセンサを設置するか、センサ数を増加 (例: 3m センサを 4~5 組設置) することにより、さらに誤差を小さくすることができる。

6. おわりに

光ファイバ変位センサ: SOFO を橋梁の静的载荷試験に適用した。3 組の SOFO センサを利用して橋桁のたわみ分布解析が可能であることが実証された。

定期的に本試験を実施することにより、たわみの変化から橋梁の劣化の程度を把握できる。近年、プリストレスコンクリート橋 (PC 橋) のプリストレス損失の把握が重要な課題になっている

が、たわみ変化からプリストレス損失の評価も可能で、この方面へ適用して行きたい。

また、現在は SOFO センサを SOFO Dynamic⁽²⁾ に接続することにより、車両等が通過中の動的な変位計測が可能となっている。センサは静的計測と動的計測兼用なので、少ないセンサ数で橋梁の静的及び動的な挙動を長期的にモニタリングすることができる。

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、データ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 / 2005 / 10. No.34、p54 ~ p58

(3) Takao MIKAMI, Takao NISHIZAWA, "Structural Health Monitoring with Fiber Optic Sensors", SEWC2002, Yokohama, Japan

(4) Takao MIKAMI, et al, "High-rise Building Monitoring by Fiber Optic Sensors", IABSE 2006 Annual Meeting and Symposium, Budapest, Hungary

(5) S. Vurpillot, G. Krueger, D. Benouaich, D. Clement and D. Inaudi, "Vertical Deflection of a Pre-Stressed Concrete Bridge Obtained Using Deformation Sensors and Inclinometer Measurements", ACI Structural Journal/ September-October 1998, p518 ~ p526



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)

三上 隆男

TEL. 045-759-2160

FAX. 045-759-2161