

光ファイバセンサ変位計における 地盤変位計測法に関する考察

小野紘一¹・大島義信²・杉浦邦征³

¹正会員 Ph.D. 京都大学教授 国際融合創造センター融合部門 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 博(T.) 京都大学助手 大学院工学研究科都市環境工学専攻 (同上)

³正会員 Ph.D. 京都大学助教授 大学院工学研究科都市環境工学専攻 (同上)

本論文では、光ファイバセンサであるFBGセンサを用いた地盤変位計の開発に際し、その基本原理として曲率-変位変換方法およびその精度の検討結果をまとめた。曲率-変位変換に先だって曲率分布の近似が重要となるが、本研究では、多項式による近似法と、スプライン関数による補間法を比較した。また精度評価において、仮想的な曲率分布とそのばらつきを用いた数値実験に基づき検討を行い、また地盤変位計の曲げ変形試験によっても基本性能の確認を行った。以上の結果、任意の地盤変形に対して、センサ設置断面を多くかつ均等に配置し、スプライン補間による変位算定をおこなうことで、より高い精度が期待されることがわかった。今後、以上の検討結果を踏まえ、実地盤での計測により、実大スケールでの地盤変位計測への適用性を検討する必要がある。

Key Words: optical fiber sensors, FBG, strain

1. 概要

近年、次世代のセンサとして光ファイバセンサが登場し、構造物の診断などへの適用に関する研究が進められてきている²⁾。光ファイバセンサは、軽量、非腐食、また電氣的な影響を受けないという特徴を有し、長距離を多点計測することが可能である。一般に光ファイバセンサは、ひずみ・温度・圧力・磁界・電界などの計測が可能であるが、これらのうちで温度やひずみ計測を目的とするものは、計測原理により数種類に分類可能である。代表的な計測原理としては、光強度計測方式、光干渉計測方式、光スペクトル計測方式などがあるが、土木分野で特に研究が盛んな B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) や FBG (Fiber Bragg Grating) センサは、どちらも光スペクトル計測方式に属している³⁾。これらのセンサは、長所と同時に短所を持ち合わせており、計測目的により適宜選択すべきである。特に、分布計測が可能な B-OTDR に対し、多点計測が可能な FBG センサは、精度が $\pm 4\mu$ 程度と高く局所的なひずみ計測に適し、電気抵抗式ひずみ計測に準じている⁴⁾。

一方、現在行われている土中構造物の変状計測では、計器の保護や耐久性が必ず問題となる。従来のひずみゲージでは、長期計測における安定性や腐食、通電による影響など、電気式の計器である以上耐久性に

問題が生じてくる。一方、変位計測として多用されている傾斜計などでは、計測に多大な労力を要し、リアルタイムでの計測や長期間におよぶ計測が困難である。したがって、計測に光を用いる光ファイバセンサを地中変位計などに適用すれば、連続計測や遠隔計測が可能であり、常時モニタリングも可能となる。これは、長期的な計測を行う地すべり地帯の変状計測において、画期的な計測器となりうると考えられる¹⁾。

著者らはこれまで、光ファイバセンサであるFBGセンサを利用した変位計FODD (Fiber Optic Displacement Device)の開発を行い、室内試験による算定変位の確認を行った。しかしこの変位計を実地盤へ適用するためには、適切な変位算定の方法を確立し、かつ精度に関する検討を行う必要がある⁴⁾。

しかし基本原理による変位計測の算定精度は、変位計に発生する曲率分布や、変位計を構成するセンサの数や配置に大きく依存する。また地盤内の水平変位の鉛直分布を一般的な形で与えることはできない。そのため、変位計の精度をセンサの感度として表現することは可能であっても、変位の算定精度を一般的な形で表現することは極めて困難である。

よって本研究では、いくつかの曲率分布を想定し、センサ数やセンサ配置が算定結果に及ぼす影響を検討した。ただし、ここで与えた曲率分布が限定的であるという意味では、一般的な精度の検討を行ってはいない。し

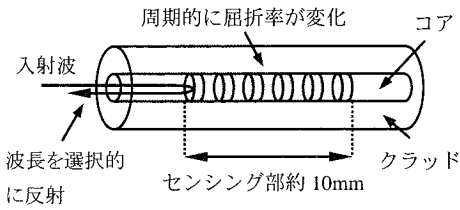


図-1 FBG センサの概要

かし、本計測器が未知の曲率分布に対して曲率-変位変換を行うという点を勘案すれば、本検討結果は、より高い精度が期待できるセンサ配置やアルゴリズムを与えるために不可欠であると考えられる。

2. FBG センサ³⁾

FBG センサは、光ファイバ上の特定位置におけるひずみ量を計測するセンサである。図-1 に FBG センサの概要を示す。センサ化された光ファイバにおいて、センシング部分はグレーティング部と呼ばれ、紫外線の照射により光ファイバの屈折率が周期的に変化している。光源から出力された光がグレーティング部に入射すると、特定の波長 (Bragg 波長) の光のみを選択的に反射し、それ以外の光は FBG を通過する。反射波長である Bragg 波長 λ_B は、コアの屈折率 n と格子間隔 Λ を用いて次式で表される。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

外力によりひずみが発生した場合、光弾性効果による屈折率変化および格子周期の変化が生じる。その結果 Bragg 波長がシフトし、そのシフト量から発生したひずみ量を検出する。また、格子間隔の周期が異なるグレーティングを同一ファイバ上に形成すれば、複数のセンサを同一ファイバ上で識別することが可能となる。ただし、有限の光帯域から各センサの許容シフト波長帯域を割り振ることになるので、センサ数が増えるほど各センサの許容シフト量が減少することになる。また、FBG センサで使用される波長帯は、光ファイバの伝送損失が最も小さくなる 1550nm や 1330nm を中心とした帯域が利用される。光源のスペクトル特性や Bragg 波長の検出方式によりセンサが利用できる帯域幅が決まることになるため、一概に許容シフト量を定めることはできない。しかし、仮に動作波長範囲が 40nm である測定器を用いた場合、ひずみに換算して最大 33,333 μ m まで計測可能である。またセンサ長は Bragg 波長の反射率と関係しており、高

い反射率 (90%程度) を確保するためには、通常センサ長が 10mm は必要となる。センサ長を小さくすることは可能であるが、反射率が減少する結果となるため、波長検出システムによっては計測結果が不安定になる可能性がある。ただし、FBG センサの検出システムによっては、意図的に反射率を小さくし、多重化数の増大を可能にしているものもある³⁾。

次にひずみ感度および温度感度であるが、外的要因 (発生ひずみや温度変化) による波長シフト量は次式で表される²⁾。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = G_\epsilon\Delta\epsilon + S_T\Delta T \quad (2)$$

ここで、波長 1550nm 帯におけるひずみ変化 $\Delta\epsilon$ の係数は $G_\epsilon = 0.78 \times 10^{-6}/\mu$ 、温度変化 ΔT の係数は $S_T = 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であり、これらの量は材料に起因する特性値である。温度変化がない場合、波長シフトの変化を 0.001nm の精度で検出することが可能であれば、理論上約 1 μ m 程度のひずみを検出することが可能となる。現在、Fabry Perot Tunable Filter 方式による波長検出方式では、 $\pm 4\mu$ m 程度のひずみ分解能を実現している³⁾。一方、温度変化が生じた場合、熱膨張による格子周期変化および屈折率の変化が生じるが、シリカガラスの熱膨張係数 (0.5 μ / $^\circ\text{C}$) は小さいため、 S_T において後者が支配的となる。また式(2)より、外力によるひずみ変化が生じないとすれば、温度上昇による FBG センサのみかけのひずみ量、すなわち温度依存性は 8.55 μ / $^\circ\text{C}$ となる。ひずみゲージに対し FBG センサの温度依存性は比較的大きく、しかもそのほとんどはガラスの屈折率変化によるものである。よって土木構造物の現場計測など温度変化を受ける環境下では、何らかの温度補償が不可欠である。

本研究で用いる FBG センサは、反射率 95%以上、半値幅 0.37nm で、アポダイゼーションがないのものを使用した。またポリイミドコーティングを施しており、光ファイバの弾性係数は約 7.3×10^{10} Pa、また引張強度は 1.0~5.0 GPa 程度である³⁾。

3. FODDの変位計測原理

(1) FODDの概要および計測原理⁵⁾

著者らが提案する Fiber Optic Displacement Device (FODD) は、非腐食材料である塩化ビニル材料 (弾性係数 3.0×10^3 MPa) と光ファイバセンサを利用した変位計である (図-2)。FODD では、塩化ビニル管の円形断面内に 120° 間隔で存在する深さ 2mm 幅 2mm の軸方

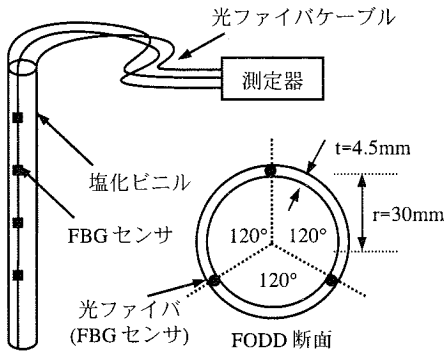


図-2 FODD の概要

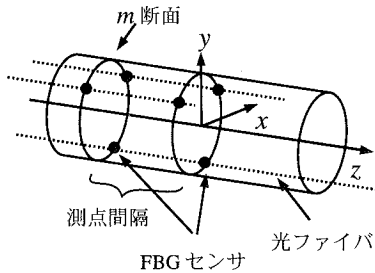


図-3 FODD 上の座標

向溝に、FBG センサを有する光ファイバをエポキシ充填により定着させている。ただし各 FBG センサは、同一断面内に 3 箇所配置するよう設定した。よって塩化ビニル管に変形が発生した場合、各断面でのひずみを計測することで曲率が得られ、さらに軸方向の曲率分布を積分することで塩化ビニル管のたわみ変形が得られる。

FBG センサの計測には、Fabry Perot Tunable Filter 方式を採用している Microm Optics 社製 FBG-IS Ver3.3 の利用を想定している。FBG-IS は動作波長 1530～1570nm、測定分解能 1μ以下、測定精度±4μである。通常光源は内蔵の光源を利用し、光損失が大きい場合は外部光源を利用する。また FODD におけるセンサーつあたりの測定レンジを 2000μ程度と考えれば、FBG-IS を使用した場合の光ファイバ線に設定可能なセンサ数は 10 程度となる。一方 FODD は、運搬や設置の利便性等を考慮して単体を 4m とし、ジョイントにより単体を継ぎ足す方式とした。ジョイント部では MU 型光コネクタにより光ファイバを接続する。よって最下部に位置する単体より光ファイバを延長していき、最大センサ数に達した場合はそのまま測定器へと延長し、新たに光ファイバを並置してセンサを設定する。ただし現段階では、コネクタの光損失が大きいことや接続が不安定になる可能性があるため、光ファイバの接続は融着により行って

いる。また FODD から計測器までは、塩化ビニル被覆を施したファイバにより伝送する。

いま図-3 のように座標をとり、センサが設定されている変位計の各断面において、曲げ変形に対して平面保持を仮定すれば、この断面内でのひずみ $\epsilon(x, y, z)$ は次式で与えられる。

$$\epsilon(x, y, z) = \epsilon_0(z) + x \cdot \varphi_x(z) + y \cdot \varphi_y(z) \quad (3)$$

ここで、式中の記号は以下の通りである。

$\epsilon_0(z)$: 軸方向ひずみ

$\varphi_x(z)$: x 軸回りの曲率

$\varphi_y(z)$: y 軸回りの曲率

いま断面のひずみ定義において、式(3)に含まれる未知数は、 $\epsilon_0(z)$ 、 $\varphi_x(z)$ 、 $\varphi_y(z)$ の 3 つであり、これらは断面上の 3 つの測定値 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 により決定される。すなわち、測点 i の座標を (x_i, y_i, z_m) ($i=1, 2, 3$) とすれば、以下の式により断面上の曲率が求まる。

$$\begin{cases} \varphi_x(z_m) \\ \varphi_y(z_m) \end{cases} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} y_1 - y_3 & -y_1 + y_2 \\ -x_1 + x_3 & x_1 - x_2 \end{bmatrix} \begin{cases} \epsilon_1 - \epsilon_2 \\ \epsilon_1 - \epsilon_3 \end{cases} \quad (4a)$$

ただし、

$$\Delta = (x_1 - x_2)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_1 - y_2) \quad (4b)$$

以上より得られた x 、 y 軸回りの曲率を軸方向に 2 回積分すれば、 x 、 y 方向の変位 $u_x(z)$ 、 $u_y(z)$ が以下のように得られる。

$$u_x(z) = -\iint \varphi_x(z) dz dz + C_1 z + C_2 \quad (5a)$$

$$u_y(z) = -\iint \varphi_y(z) dz dz + C_3 z + C_4 \quad (5b)$$

式中の積分定数 $C_1 \sim C_4$ は、境界条件を与えることで決定できる。また境界条件は、事前の土質調査から得られた地中深くの不動領域の始点を固定端と仮定することも可能であるし、地表面における回転量および移動量を起点と考えることも可能である。

(2) FODDにおける曲率-変位変換法

a) 2回積分の方法

FODDでは、曲げひずみすなわち曲率を離散点で計測するので、以上のような連続関数の積分ではなく、離散値に対して積分を行う必要がある。そこで本研究では、離散値に対してスプライン補間もしくは多項式近似を行い、得られた近似関数に対して2回積分を行うことにする。なお、温度補正に関しては、曲率が同断面内のひずみの差で評価されるので(式(4a)参照)、断面内で温度が一定と仮定すれば、土中の実計測においても積極的な温度補正を行う必要はないと考えられる。

b) スプライン関数における次数および誤差処理

FODDに作用する土圧の分布を線形に仮定した場合、曲げモーメントは3次関数で表される。よってこの場合、3次のスプライン関数により、曲げモーメント分布すなわち曲率分布を関数補間することが最適であると予想される。また土圧分布を2次以上で想定する場合、最適な関数は4次以上となるが、この場合スプライン関数における端条件が3つ以上必要となり、条件の想定が困難である。よってスプライン補間では3次多項式の適用を検討する。ただし、3次のスプライン関数を決定するには、あらかじめ微係数を2つ与える必要がある。本研究では、それぞれの端点から4個のデータを通る3次多項式を想定し、その関数を微分することで両端の微係数を与えた。

またスプライン補間を行う場合、計測値に含まれる誤差を処理することができない。本研究では、式(6)に示す移動平均に準拠したスムージングの方法で誤差処理を行う。

$$\bar{\varphi}_i = \omega_{i,i-1}\varphi_{i-1} + \omega_{i,i}\varphi_i + \omega_{i,i+1}\varphi_{i+1} \quad (6)$$

ここで、式中の記号は以下の通りである。

- $\bar{\varphi}_i$: i 番目の計測値に対する補正值
- φ_i : i 番目の計測値
- $\omega_{i,j}$: i 番目の補正值における j 番目の計測値に対する重み

また上記の重みについては、式(7)に示すように距離に反比例するよう決定する。

$$\omega_{i,j} = \begin{cases} 0.25 \times (\hat{h}/h_j) & (i \neq j) \\ 1 - \omega_{i,j-1} - \omega_{i,j+1} & (i = j) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、式中の記号は以下の通りである。

- h_j : 測点 i と測点 j での区間長
- \hat{h} : 区間長の最小値

c) 多項式近似および最適次数

多項式近似の場合、データ数を m とすれば、最小二乗法により最大 $(m-1)$ 次までの多項式を決定することができる。しかしこの場合、ある次数においての最適解は得られるが、最適な次数を決定することができない。よって本研究では、式(8)で定義される AIC(赤池情報量基準)⁹⁾を用いて最適次数を決定する。ただし、測定値の誤差分散が不明であるため、誤差分散の不偏推定量を用いた定義式を用いる。

$$AIC = m \cdot \ln(S) + 2n \quad (8)$$

ここで、式中の記号は以下の通りである。

- n : 次数
- m : 観測値の数
- S : 残差二乗和

従って、以上で定義される AIC 値の最も小さいモデルを、多項式近似における最適なモデルとする。

4. 仮想計測による検討

(1) はじめに

FODDの曲率-変位変換において、微小変形理論が厳密に成り立つならば、変位の算定精度は曲率の推定精度に依存する。よって以下では、変位変換の最適な手法や算定精度について、仮想的な計測値を与えて検討を行った。ただし前述のとおり、ここで行った検討は限定的・定性的なものであり、実計測等の一般的な状況に対しての計測精度の定量的評価を示すものではない。

(2) 検討方法

想定する曲率分布は、区間ごとに三角形分布で与えられるとし、乱数による誤差を擬似的に与え仮想的な計測値を表現した。誤差の程度は、FBGのひずみ測定精度 $\pm 4.0\mu$ (m/m) から、曲率に換算して $\pm 1.33 \times 10^{-4}$ (1/m) とした。また変位算定の原点は地盤内深くの不動点を想定し固定端、計測深度 L は 20m、

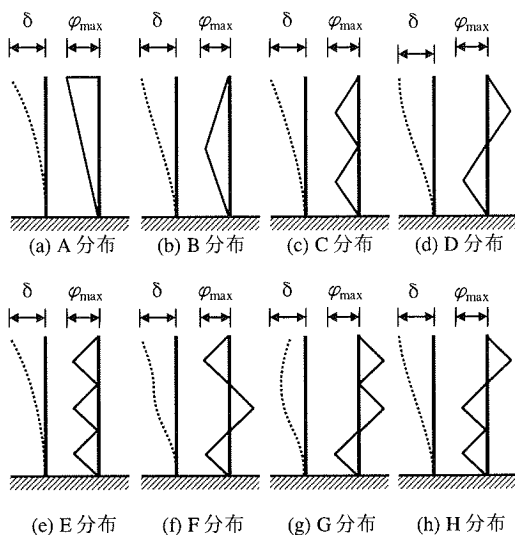


図-4 想定した曲率分布および変位概形

表-1 測点配置

配置	測点数	間隔および配置方法
a	3	2等分割 (10.0m間隔)
b	4	3等分割 (6.6m間隔)
c	6	5等分割 (4.0m間隔)
d	11	10等分割 (2.0m間隔)
e	21	20等分割 (1.0m間隔)
f	41	40等分割 (0.5m間隔)
b 01*	4	3不等分割 (10.0m, 5.0m間隔)
b 10*	4	
c 03*	6	5不等分割 (10.0m, 2.5m間隔)
c 30*	6	

* 全区間を2等分割し、原点側から各区間に含まれる測点数を添え字として表している。例えばa30ならば、原点側区間を4等分割し、残る区間には測点のない配置を示している。

表-2 各想定分布における曲率の最大値

分布形状	曲率の最大値*		比率**	
	δ=1.0m	δ=0.5m	δ=1.0m	δ=0.5m
A	1.50	0.75	0.89%	1.77%
B	1.00	0.50	1.33%	2.66%
C	1.00	0.50	1.33%	2.66%
D	2.00	1.00	0.67%	1.33%
E	1.00	0.50	1.33%	2.66%
F	3.00	1.50	0.44%	0.89%
G	4.50	2.25	0.29%	0.59%
H	1.29	0.64	1.03%	2.06%

* : $\times 10^{-2}$ (1/m)

** : 曲率の最大値に対する仮想誤差 1.33×10^{-4} (1/m) の比

表-3 各想定分布によるたわみの平均値および偏差

分布形状	たわみの平均値*		偏差**	
	δ=1.0m	δ=0.5m	δ=1.0m	δ=0.5m
A	0.253	0.126	8.15	2.04
B	0.294	0.147	9.49	2.37
C	0.325	0.163	9.02	2.25
D	0.503	0.251	14.94	3.74
E	0.331	0.166	8.99	2.25
F	0.479	0.240	8.96	2.24
G	0.619	0.310	13.53	3.38
H	0.397	0.199	11.38	2.85

* : (m) 積分値を区間長 (20.0m) で割ったもの

** : $\times 10^{-2}$ (m) たわみの平均値に対する標準偏差

発生する最大変位δは1.0mおよび0.5mとした。測点の配置は最小で0.5m間隔、また不均等な測点配置や極端に測点が少ない場合も考慮した。表-1に測点配置を示す。また図-4に、想定した曲率分布形状および発生変位の概形を示す。ただし想定分布において頂点が複数ある場合は、それぞれの頂点の高さは等しいものとし、最大変位δが1.0mおよび0.5mになるように形状を決定した。

本論文では、算定変位と厳密解との差異を表す指標として、以下に定義する標準偏差σを用いた。以下ではこの標準偏差が小さい場合、算定精度が高いと表現する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^M (h(z_i) - f(z_i))^2}{M}} \quad (9)$$

ここで、式中の記号は以下の通りである。

z_i : 全長LをM分割した場合のi番目の節点位置 (ただしM=200とする)

$h(z_i)$: 位置 z_i での変位の厳密解

$f(z_i)$: 位置 z_i での推定値による算定変位

また、各想定分布における曲率の最大値、および最大値に対する想定誤差の比を表-2に示す。曲率の最大値が最も大きい分布はG分布 (δ=1.0m) であり、誤差の比率は0.29%程度である。一方曲率の最大値が最も小さくなる分布はB, C, E (いずれもδ=1.0m) であり、誤差の比率は最大で2.66%である。

また、各曲率分布に対し仮想誤差 $+1.33 \times 10^{-4}$ (1/m) を一律に加えた場合に、厳密解により計算される標準偏差は 1.19×10^{-2} m である。すなわち、ひずみ計測の計測誤差のみにより、変位算定値に 1.2×10^{-2} m 程度の変動が生じる。

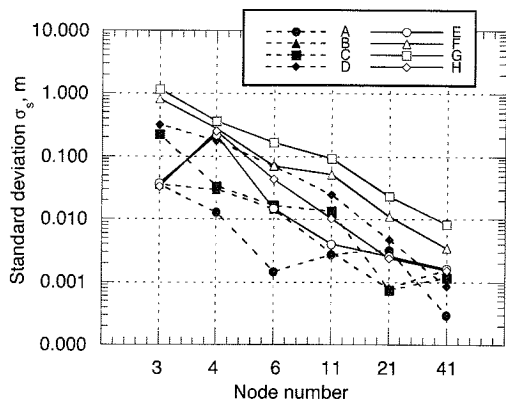


図-5 スプライン補間での標準偏差 ($\delta=0.5\text{m}$)

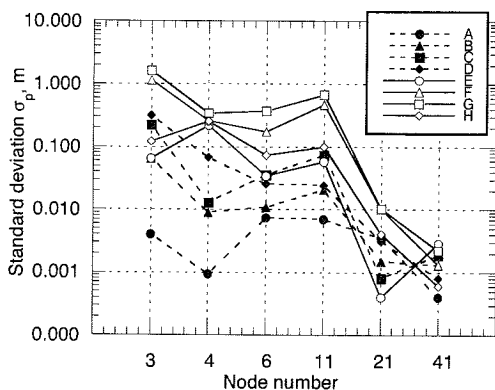


図-7 多項式近似での標準偏差 ($\delta=0.5\text{m}$)

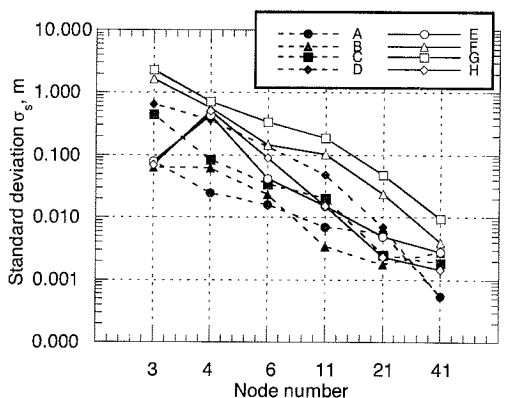


図-6 スプライン補間での標準偏差 ($\delta=1.0\text{m}$)

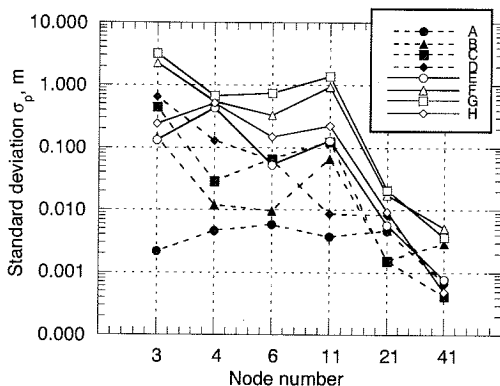


図-8 多項式近似での標準偏差 ($\delta=1.0\text{m}$)

一方、各想定曲率分布によって生じるたわみの平均値と、その平均値に対する標準偏差を表-3に示す。たわみの平均値が最大となるのは G 分布であるが、偏差が最大となるのは D 分布である。また D 分布は、G 分布の次にたわみの平均値が大きく、H 分布・G 分布とならんで変位変動の大きい分布である。

また、地盤の不動域が明確でない場合、固定端位置の設定により誤差が生じる可能性がある。よって、分布形状 E に対して、固定端位置を 1.0m および 0.5m 浅く設定し、算定変位に及ぼす影響について検討した。ただし、この場合の測点配置は e および f とする。

(3) 検討結果および考察

a) 測点数の単純増減による影響

測点数が単純に増減する a 配置から c 配置までの結果を以下に示す。また以下では、測点配置の区別を記号ではなく測点数で表現する。はじめにスプライン補間による結果を示す。ただしスムージングは 1 回のみ行った。まず最大変位が 0.5m である場合の標準偏差 σ を、対数軸により図-5 に示す。図より、測点数の増加に伴い標

準偏差の値も減少する傾向にあることがわかる。

ただし E 分布および H 分布において、測点数 4 の場合の標準偏差が、測点数 3 の場合よりも大きくなっている。これは以下の理由によると考えられる。測点数 4 の場合、全ての測点が曲率分布の谷部に位置し、形状的確に捉えることができない。一方測点数 3 の場合、第 2 番目の測点が曲率分布の山部に位置している上、発生曲率自体が小さいため、比較的良好に曲率形状を推定している。よって以上の逆転現象が生じたと考えられる。また分布形状 F および G の標準偏差が比較的大きくなっているのは、想定した曲率が他の分布に比べて大きいためである。

次に、最大変位が 1.0m の場合の標準偏差 σ を対数軸により図-6 に示す。これより、最大変位が倍 (0.5m から 1.0m) になった場合、それぞれの値も倍程度大きくなっている。ただし、計測精度を標準偏差ではなく、最大変位に対する標準偏差の比として定義すれば、変位の増加にとまない精度 (比率) も増加する結果となることを付記する。

次に多項式近似による検討結果として、最大変位が

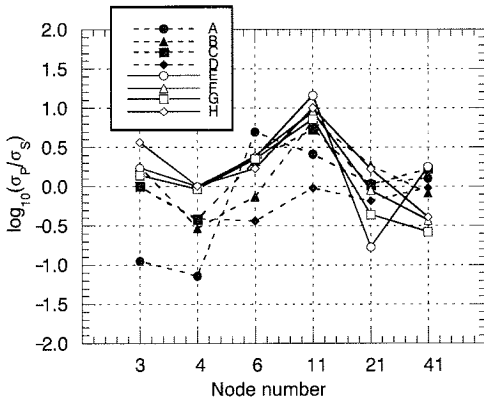


図-9 標準偏差の比(δ=0.5m)

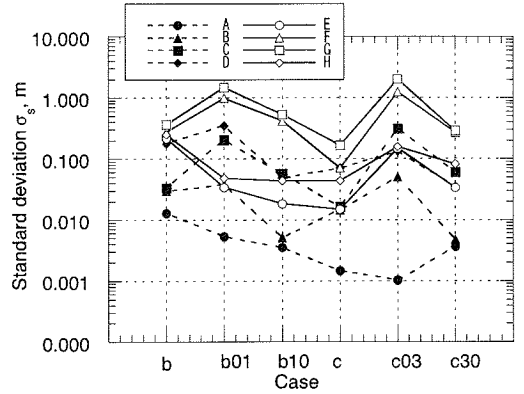


図-11 スプライン補間での標準偏差(δ=0.5m)

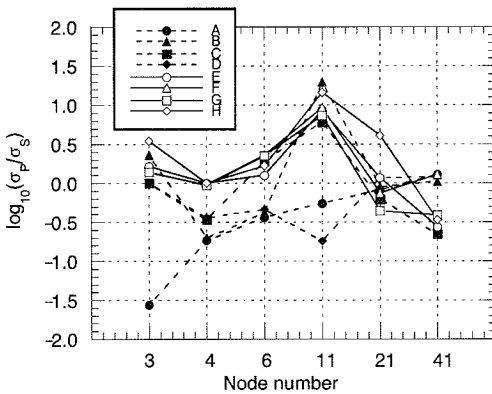


図-10 標準偏差の比(δ=1.0m)

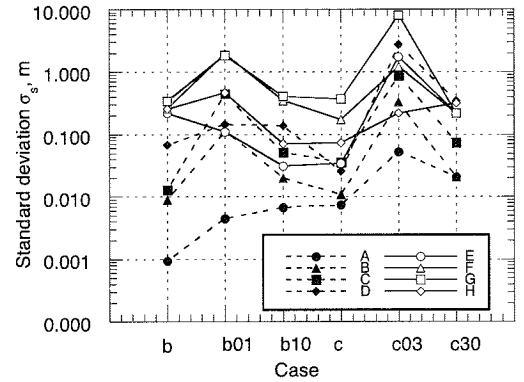


図-12 スプライン補間での標準偏差(δ=1.0m)

0.5m の場合の標準偏差を図-7 に、最大変位が 1.0m の場合の標準偏差を図-8 に示す。両図より、スプライン補間による結果と同様に、最大変位の増加に伴い標準偏差の値も大きくなる傾向にあることが分かる。またいずれの最大変位においても、測点数が 3 から 11 までは、全ての分布に対して標準偏差の増減に明確な傾向はない。ただし、E 分布および H 分布に対して、測点数が 4 の時に算定精度が減少することはスプライン補間の場合と同様であるが、F 分布および G に分布に対して、測点数 11 よりも測点数 4 および 6 の方が算定精度が低くなっている。これらは、以下のような多項式の性質に起因すると思われる。多項式による近似では、次数が大きくなるに従い、区間端部付近で大きな振動を起こす現象を伴う場合がある。一方、AIC による最適次数判断では、単に曲率分布の近さのみを判断しており、端部以外で優良な一致を示している場合、最適と判断されてしまう。例えば F 分布における測点数が 11 の場合、AIC により最適次数は 10 次と判断されるが、10 次では原点付近で関数値が増大している。変位算定では、原点から順次積分値を累積していくことになるため、原点付近

での誤差が全体の算定精度に影響を及ぼしていると考えられる。ただし F 分布および G 分布では、仮想曲率が大きいことも誤差を拡大している原因となっている。

次に図-9 および図-10 に、多項式近似による標準偏差 σ_p に対するスプライン補間による標準偏差 σ_s の比 σ_p/σ_s を、最大変位が 0.5m および 1.0m の場合に分けて示す。ただし比率は常用対数を用いて表している。例えばこの値が正の場合、スプライン補間による結果がより高い精度を示すことを意味する。

図-9 より、測点数を 3, 4, 6 と設定した場合、分布形状が複雑である E, F, G, H に対して、スプライン補間による算定結果が多項式近似よりも良好な傾向にある。また測点数を 41 とした場合、ほぼ全ての分布形状に対して、多項式近似による算定結果がスプライン補間よりも良好な傾向にある。それ以外のケースに関しては、両算定方法による明確な差異は見られない。また図-10 より、最大変位が増加しても、以上の傾向に大きな変化はない。ただし多項式近似による算定法では、測点数の増加が必ずしも算定精度を向上させないのに対し、スプライン補間による算定法では、測点数の増加に伴い算定

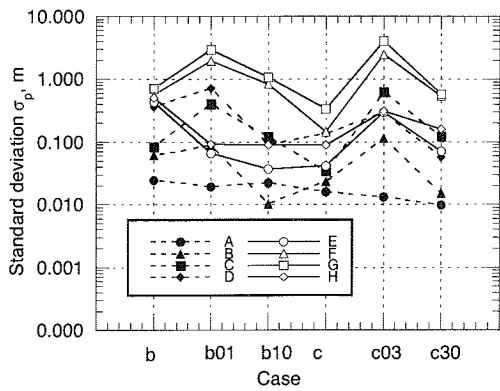


図-13 多項式近似での標準偏差 ($\delta=0.5m$)

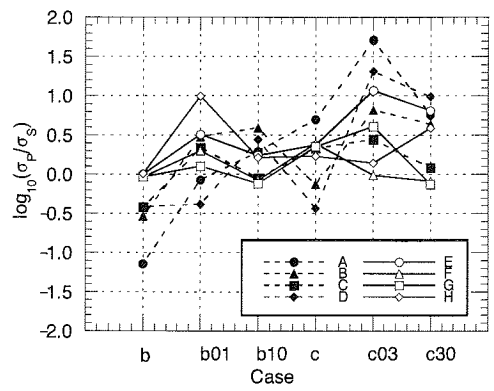


図-15 標準偏差の比 ($\delta=0.5m$)

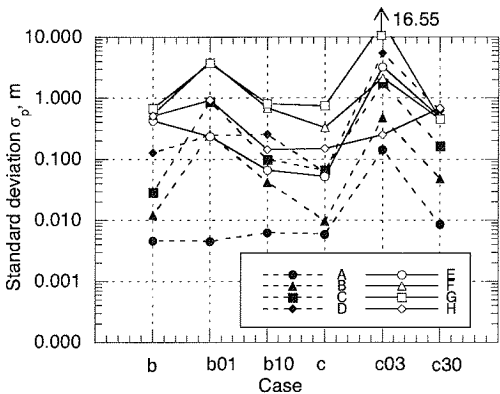


図-14 多項式近似での標準偏差 ($\delta=1.0m$)

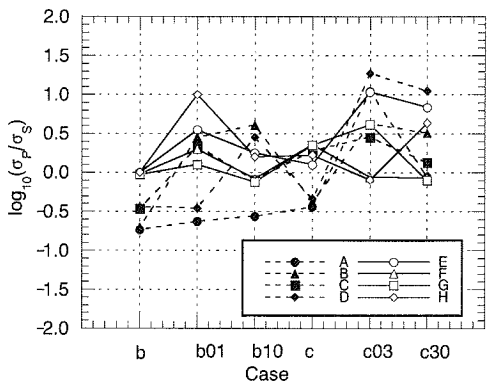


図-16 標準偏差の比 ($\delta=1.0m$)

精度も向上する傾向を示している。以上の点を加味し、不確かな曲率分布に基づき変位を算定することを考えれば、より多くの測点を設定し、かつスプライン補間による算定法を用いることで、より高い精度を期待できるといえる。

b) 測点配置による影響

次に、測点配置の影響について、b01, b10, c03, c30の結果を示す。はじめにスプライン補間について、最大変位が 0.5m および 1.0m の場合の標準偏差をそれぞれ図-11 および図-12 に示す。また多項式近似についても同様に、最大変位が 0.5m および 1.0m の場合の結果を図-13 および図-14 に示す。これらの図には、均等配置 (b 配置および c 配置) の場合の結果も示す。これらの図より、算定法によらず、最大変位が増せばそれぞれの標準偏差もほぼ増加することが分かる。また算定法、および最大変位によらず、ほぼ全てのケースにおいて不均等配置の標準偏差は均等配置の標準偏差よりも大きくなっている。また測点が積分区間の前半に存在しない b01 配置, c03 配置は、測点が積分区間の前半に存在する b10 配置, c30 配置に比べて標準偏差が大きくな

っている。また測点総数が少なく区間後半に測点が少ない b01 配置よりも、区間後半に測点の多い c03 配置の方が、測定精度が低くなっている。特にその傾向は、多項式近似による算定結果に顕著に見られる。これは、区間前半の誤差が、区間後半の変位算定に一定のドリフトを生じさせる結果となるためである。また図-15 および図-16 には、最大変位 0.5m および 1.0m における標準偏差について、多項式近似での値に対するスプライン補間での値の比を、常用対数により表したものをそれぞれ示す。最大変位によらず、E, F, G, H といった複雑な分布に関して、スプライン補間による方法がより精度の高い結果を示してしる。特に測点数が区間前半に少ない c03 などの場合、スプライン補間による方法の優位が顕著である。またそれ以外の場合では、両算定法に明確な差異は見られなかった。

よって不均等配置の場合、前半区間に測点を集中させ、スプライン補間を用いることで、より高い精度が期待できる。ただし、均等配置を行った場合のほうが、不均等配置を行う場合よりも良好な結果となっているため、均等配置を行うことが望ましいといえる。

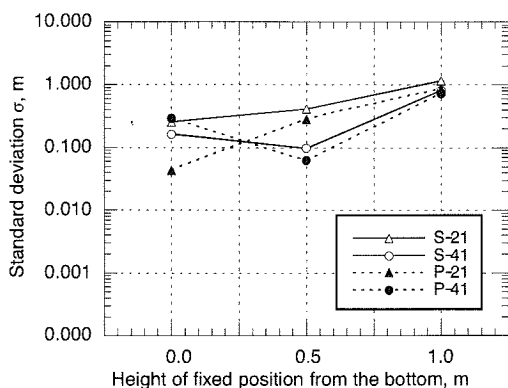


図-17 境界条件の影響($\delta=0.5\text{m}$)

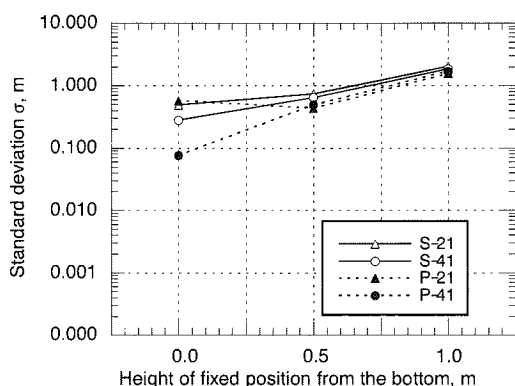


図-18 境界条件の影響($\delta=1.0\text{m}$)

c) 境界条件による影響

以下では、原点から 0.5m および 1.0m 浅い位置に固定端を想定し、その位置を始点として積分した結果と厳密解とを比較する。図-17 および図-18 には、最大変位がそれぞれ 0.5m および 1.0m の場合の、スプライン補間および多項式近似により計算された標準偏差 σ を示す。図中において S, P はそれぞれスプライン補間および多項式近似を表し、それに続く数字は測点数を表す。図-17 より最大変位が 0.5m のとき、測点数を 41 とすれば、ずれの増加に伴い精度も低下している。また測点数を 21 とした場合、ずれが 0.5m 生じたとき若干精度が向上しているものの、ずれが 1.0m 生じれば精度が低下している。また、図-18 より最大変位が 1.0m の場合、測点数にかかわらず、ずれの増加とともに精度も低下している。また両図から、最大変位の増加に伴い、各ずれに対する精度が低下することがわかる。よって、固定端のずれによる影響は、ずれの増加により増大し、また最大変位の増加によっても増大することがわかった。またいずれの場合を通して、算定法による顕著な差異は見られなかった。

5. 実計測による検討

(1) 計測実験概要

FODD のキャリブレーションを目的として、センサ測点を 5 箇所有する 4m の供試体に対して、曲げ試験を行った。ただしここで行う検討は、三点曲げによる変位の算定という限定された条件で行われたものであり、一般的な算定精度の評価ではない。しかし実計測を行うことにより、供試体作成精度や計測器誤差の影響を含めた、より実測に近い性能を確認できると考えられる。

(2) 供試体概要

図-19 に供試体を示す。内半径 25.5mm の塩化ビニル製(弾性係数 3.0×10^3 MPa)供試体は 4m あり、平面上に設置され、水平方向に両端を支持されている。センサを有する断面は 5 断面あり、各光ファイバは深さ 2mm、幅 2mm の溝にエポキシ充填により固定されている。また载荷は中央部に対して強制変位を与える形で行い、1 ステップ 10mm として 5 ステップ、すなわち 50mm まで载荷を行う。中央部(A 点)、および支点から 1000mm 離れた位置(B 点)に変位計を設置し、変位を計測した。また FBG の設置されている断面では、引張が発生する FBG センサ(図中 FBG)に対して、载荷軸線に対称にひずみゲージ(図中 Gauge)を貼付し、ひずみの計測を行った。

また本実験で使用した FODD では、同じ FBG センサの組み合わせを有するファイバ 3 線を使用した。すなわち、それぞれの光ファイバ 1 線中に中心波長が 1552.5nm, 1557.5nm, 1563.5nm, 1567.5nm であるグレーティング部を 5 箇所設定した。また FODD 末端に位置する外部接続用コネクタ(SC 型)に、1m の光ファイバケーブルを介し計測器(FBG-IS)を接続した。光源は内部光源を利用した。また室内を一定温度に保っており、FBG によるひずみ計測における温度補償は行っていない。ただし変位算定の場合、前述の通り積極的な温度補償は必要としない。

(3) 実験結果

図-20 に、各ステップに対応する FBG およびゲージによるひずみを示す。ただし、表面に貼付されたひずみゲージの値は、ひずみ分布が線形であると仮定し、FBG 位置での値に変換している。また図中の数字は断面位置を表す。各ステップにおいて、ひずみゲージによる値と、FBG による値はほぼ一致している。よって、円管上に発生するひずみの計測に対しても、FBG センサはひずみゲージと同等の性能を有するといえる。

次に、FBG により計測されたひずみを用いて、変位の算定を行った。ただしこの実験の場合、曲率分布が

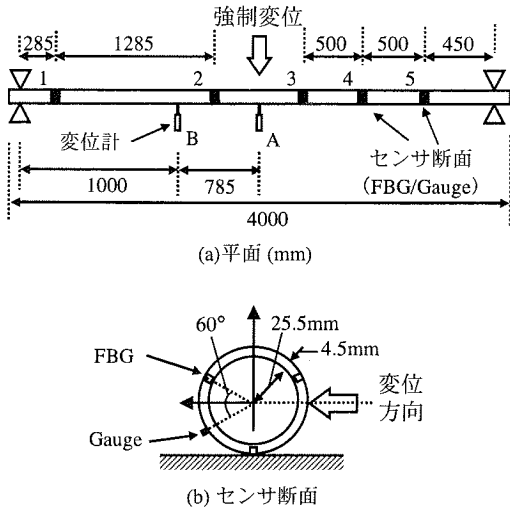


図-19 供試体概要

三角形分布となることが明確である。また本実験は、算定法ではなく物理的な原因による精度を評価することが目的である。よってあらかじめ三角形分布を想定し、その形状を最小二乗法により決定する方法で変位算定を行った。図-21 に、各ステップに対応する中央(A点)およびB点での算定変位および実測値を示す。図より、中央点での算定変位と実測値と差異が、B点での差異よりも大きい。これは、積分により変位算定を行う際、積分区間が長いほど誤差の累積も大きくなり、より中央に近づくほど誤差が大きくなったためであると考えられる。しかし、中央点においても、最大で6.7%程度の誤差(実測値に対する算定値と実測値の差異の比)の範囲内で計測が行えることを確認した。

6. 結論

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 仮想計測に基づく曲率-変位算定法の検討結果から、算定精度は、算定法、最大変位、曲率分布および曲率の測点数に依存することがわかった。また、不確定の曲率分布に対して、より高い精度を期待するには、より多くのセンサを均等に配置し、スプライン補間により算定を行うことが望ましい。
- (2) 測点配置を不均等にすることは、固定端付近に測点を多く設定し、スプライン補間を用いるのが望ましい。ただし、均等に配置した場合、より高い精度が期待される。
- (3) 固定端位置のずれによる影響を検討した結果、ずれの増加および最大変位の増加に伴い、算定変

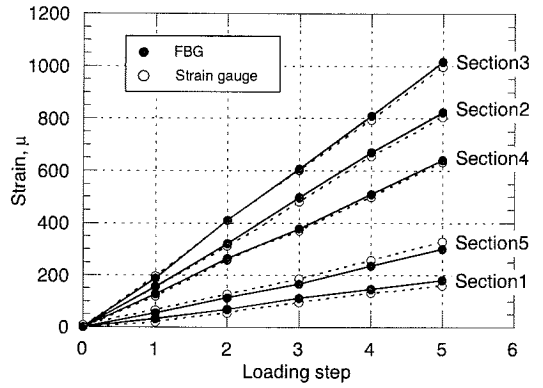


図-20 FBG およびゲージによるひずみ

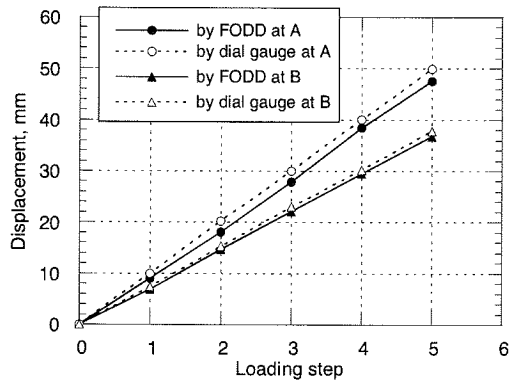


図-21 各ステップに対応する算定変位

位に対するずれの影響が大きくなることがわかった。また算定法による顕著な差異は見受けられなかった。

- (4) 実計測実験において、センサ断面を5つ有する4mの供試体を用いて曲げ試験を行った。その結果、FBGがひずみゲージと同等の性能を有することが確認された。また変位算定に関して、算定位置が中央点に近づけば、誤差が累積し、算定精度が低下することがわかった。また中央位置での変位算定において、6.7%程度の誤差で算定が行えることを確認した。

以上より、FODDの基本的な性能が確認された。また不明確な曲率分布に対してFODDを適用する場合、センサ断面をできるだけ多く均等に配置し、さらにスプライン補間による算定を行えば、より高い算定精度が期待されるといえる。本結論は、変位算定のアルゴリズムを選定し、センサの配置を設計する上で、重要な参考情報となるであろうが、本検討は限定的な条件下で行ったものであり、今後、実地盤における実計測による誤差要因も

考慮し、実用性、精度等について詳細に検討する必要がある。

謝辞: 本研究における実計測は、EE 産学連携研究会・FODD 部会の調査研究として行われた。研究会委員各位に貴重な意見を頂いたことに感謝を表す。また、本研究の一部は科学研究費補助金(No.13555132)の補助を受けて行った。

参考文献

- 1) 藤田寿雄：地すべり防止対策の現状と今後の課題，土と基礎，Vol.45, No.473, pp.1-4, 1997.6.
- 2) 大島俊之：光ファイバーなど先端材料の利用技術，Intelligent Bridge/ Structure and Smart Monitoring に関する公開講演会，土木学会・構造工学委員会・橋梁振動モニタリング研究小委員会，pp.9-21, 1999.11.

- 3) Measures, R. M.: *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*, Academic Press, 2001.
- 4) 熊谷仁志, 三田彰, 岡公隆, 大野博重：コンクリート構造用光ファイバセンサの開発と実証，コンクリート工学，Vol.38, No.7, pp.17-21, 2000.7.
- 5) 小野紘一, 大島義信：光ファイバセンサを用いた地中変位計の開発，構造工学論文集，土木学会，Vol.47A, pp.1557-1564, 2001.3.
- 6) 中川徹, 小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，1991.

(2003.02.27 受付)

ASSESSMENT ON GROUND MEASUREMENT USING FIBER OPTIC DISPLACEMENT DEVICE

Koichi ONO, Yoshinobu OSHIMA and Kunitomo SUGIURA

This paper focuses on the measurement of ground deformation using fiber optic sensor, called Fiber Bragg Grating (FBG) sensor. A displacement transducer based on FBG sensors was developed and tested in the laboratory. Additionally based on experimental and numerical observations, an assessment on sensor arrangement of the transducer as well as the displacement estimation procedure was made. As a result of the experiment, it was found that FBG sensors agreed well with resistive gauges for strain measurement on vinyl chloride pipe and the proposed transducer estimated the displacement with an accuracy of about 6.7% in the bending test. It was also found from numerical evaluations that although there was no significant difference between two algorithms, the spline interpolation and the uniform sensor arrangement may be preferable for uncertainty in displacement distribution.