

光ファイバセンサを用いた地中変位計の開発

Development of a ground displacement measuring device ground using fiber optic sensor

小野紘一*, 大島義信**

Koichi Ono*, Yoshinobu Oshima

*Ph.D., 京都大学教授, 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

**工修, 博士課程学生, 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

This paper reports on the development of a displacement measuring device using fiber optic sensor, called fiber Bragg grating (FBG) sensor. The principle of the two-dimensional displacement measurement is described. An analytical approach to retrieve the displacement from the discrete information is also discussed. Adoption of polynomial functions for interpolation of displacement is feasible for a loading condition. The developed displacement device (FODD) was tested to measure displacement of a 2m long vinyl chloride pipe. Measured strain by FBG sensors agreed well with that by electrical strain gages. The vertical displacements measured by FODD also agreed well with the value measured by conventional dial gages.

Key Words: measurement, fiber optic sensor, FBG, displacement device

キーワード: 計測, 光ファイバセンサ, FBG, 変位計

1. はじめに

急峻な山岳地帯を数多く有する日本では, 毎年 1000 件以上¹⁾の土砂災害が生じており, 宅地造成に伴い土砂災害発生危険箇所も増加の傾向にある. 土砂災害のうち地すべり災害は, 直接的な破壊による人命への脅威のほか, 河川埋塞による上下流域への甚大な 2 次災害の可能性, 道路・鉄道の被災による広範囲における社会・経済活動の停滞など, その影響の及ぼす範囲は大きい²⁾.

一般に地すべり地帯の変状計測は, 空中写真による地形判読という初期段階の調査から, 計器設置による現地踏査までが行われる. 現在では, 計測技術の向上や経験の蓄積が進んではいるが, いまなお地すべり運動を的確に捉える調査法や崩壊予測の技術は確立されていない. このような状況の中, 初期調査などで判明した活動の危険性の高い斜面に対しては, 崩壊の予測が困難であるがゆえに, 計器設置による頻繁なモニタリングが非常に重要な管理手段となる. 現在, 地すべり運動に対する直接的なモニタリングは, 標柱, 伸縮計, 地中傾斜計, パイプひずみ計などによって行われている^{3,4)}. しかしながらこれらの計測は, 伸縮計を除き, 断続的にしか行

うことができない. さらに, 計測に大きな労力を要する上, 崩壊の危険性のある現場で計測を行わなければならないという人命に関わる問題もある. また伸縮計の場合でも, 正確なモニタリングを行うには, 明確な亀裂の存在が不可欠である.

一方で, 光ファイバによるモニタリング技術が近年開発され, 様々な分野への適用が始まっている⁵⁾. 土木分野においては, 光ファイバセンサによるコンクリートの温度測定やひずみ計測などが行われているが⁶⁾, 今なお開発段階である. 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⁷⁾, これらのうちでひずみ計測を目的とするものは, 分布型と離散型の二つに大別することが可能である. 両者とも, 一本の光ファイバ上のひずみを計測することになるが, その測定距離は数キロメートルと長距離である^{8,9,10)}. B-OTDR (Brillouin Optic Time Domain Reflectometer) などの分布型センサは, 光ファイバ上に発生するひずみに対して, ひずみ分布を計測することが可能である. しかしその測定時間は数分程度と長く, ひずみ測定精度は $\pm 100.0 \mu$, 距離分解能は 1.0m 程度である⁸⁾. 一方, 離散型のセンサである FBG (Fiber Bragg Grating) センサは, 離散点での測定という制約を有するが, 測定精度は $\pm 4.0 \mu$ と高く, 従来のひずみゲージの

ような扱いが可能である⁹⁾¹⁰⁾。

したがって、以上の特徴を有する光ファイバセンサを地中変位計に適用すれば、連続計測や遠隔計測が可能な上、光ケーブル通信ネットワークや衛星通信などを介して、多数の危険地帯の情報を一極管理することが可能となり、集中的な災害監視ネットワークの構築が実現できる。また、耐腐食性に優れる塩化ビニル材料と光ファイバを利用することで、計測の長期安定性が得られ、長期間のモニタリングも可能となる。

以上の理由により本研究では、光ファイバセンサとしてFBGセンサを利用した変位計 FODD (Fiber Optic Displacement Device)の開発を目的としている。本稿では、変位算定のための基礎理論の展開と、光ファイバセンサの適用性を確認した基礎実験の結果を報告する。

2. FBG センサのひずみ測定原理

FBG センサは、Fiber Bragg Grating (FBG)を光ファイバ上の任意の位置に設定し、FBG 部でのひずみ量を測定するセンサである。ここで FBG とは、光ファイバ上に紫外線で縞模様(格子)を焼付けることにより、光ファイバの屈折率をある一定の間隔で変化させた部分のことを言う。光源から出力された光が FBG に入射すると、グレーティング部分において特定の波長(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。この時外的要因(ひずみや温度変化)が発生すれば格子模様の間隔が変化し、Bragg 波長がシフトする。そのシフト量を検出することで、ひずみを算定することが可能である。また、Bragg 波長の異なるFBGを直列に作成することで、1本のファイバ上での多点計測が可能となる。図-1に模式図を示す。

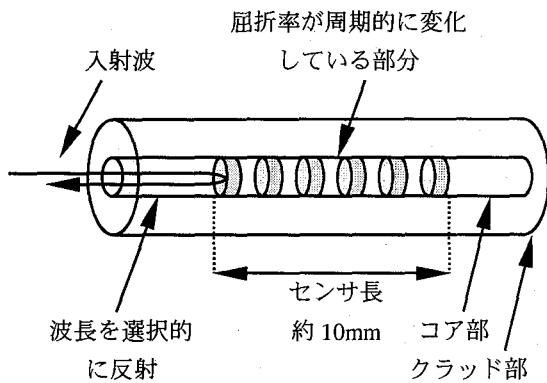


図-1 FBG センサ

ただし、1本の光ファイバ上におけるFBGの設定数には限度がある。測定器における測定可能な波長の範囲は40nmであり、この波長範囲がひずみ測定の範囲を規定する。すなわちこの領域を複数のFBGに対して振分けることになるが、設定するFBG数が少ないほど1ヵ所あたりの測定レンジが大きく割当てられることになる。逆に言えば、設定するFBG数が増えるに従って、割振られる波長範囲は小さくなり、測定でき

るひずみの範囲も小さくなってしまう。測定レンジと設定センサ数の関係を表-1に示す。例えば1本の光ファイバに10ヶ所のFBGを設定するならば、その測定範囲は2883μ(約±1440μ)となる。

表-1 センサ数と測定レンジ

センサ数	測定レンジ
1	33,333.3 μ
5	6,266.7 μ
10	2,883.3 μ
20	1,191.7 μ

またFBGセンサでは、波長変化は温度変化と線形関係にあり、FBGセンサの波長領域に関係なく成立する。よってFBGセンサは、ひずみ計測と同時に温度計測も行うことが可能であり、ひずみ計測の場合でもダミーゲージを利用することで温度補正を行うことができる。

3. 変位算定

3.1 FODDの概要

FODD (Fiber Optic Displacement Device)は、非腐食材料である塩化ビニル材料と光ファイバセンサを利用した変位計である(図-2)。FBGセンサを軸方向に貼付した塩化ビニル管に対し、軸方向のひずみ分布を離散点で測定し、発生するひずみ量からビニル管の変位を算定する。またFODDでは、一線ではなく三線のファイバを利用して断面上の三点のひずみを測定するので、断面上のひずみ平面が得られ、2方向の変位が算定可能である。

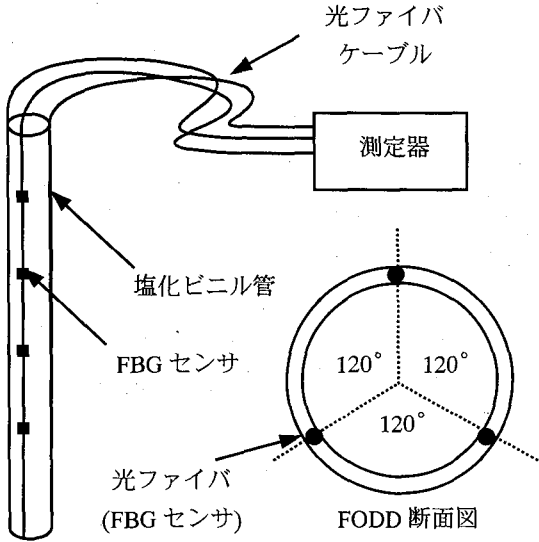


図-2 FODD の概要

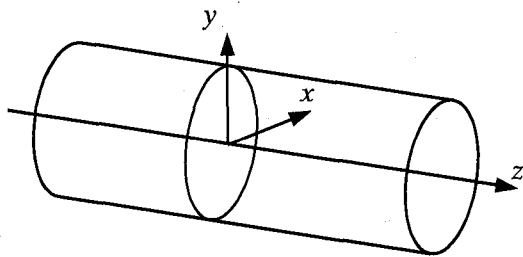


図-3 FODD 上の座標

センサが設定されている変位計の各断面において断面保持を仮定すると、以下のようなひずみ平面が得られる (図-3)。

$$\varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_0(z) + x \cdot \varphi_x(z) + y \cdot \varphi_y(z) \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon(x, y, z)$ はある断面上でのひずみ、 $\varepsilon_0(z)$ は軸方向ひずみ、 $\varphi_x(z)$ 、 $\varphi_y(z)$ はそれぞれ x, y 方向の曲率である。断面 $z = z_m$ 上において式(1)に含まれる未知数は3つであり、これらは3つの測定値 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ により決定される。すなわち、測点 i の座標を $x_i, y_i (i=1,2,3)$ とすれば、以下の式により未知数が求まる。

$$\varepsilon_0(z_m) = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \varphi_x(z_m) \\ \varphi_y(z_m) \end{Bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} y_1 - y_3 & -y_1 + y_2 \\ -x_1 + x_3 & x_1 - x_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $\Delta = (x_1 - x_2)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_1 - y_2)$ である。よって x, y 方向の曲率を2回積分すれば、以下のように x, y 方向の変位 u_x, u_y が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= -\iint \varphi_x(\xi) d\xi d\xi + C_1 z + C_2 \\ u_y(z) &= -\iint \varphi_y(\xi) d\xi d\xi + C_3 z + C_4 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また軸方向の伸び u_0 も、以下のように $\varepsilon_0(z)$ を積分することで得られる。

$$u_0(z) = \int \varepsilon_0(\xi) d\xi + C_5 \quad (6)$$

以上の積分定数は、境界条件を与えることで決定できる。

ここで特筆すべきことは、断面上で温度分布が一定であるならば、軸方向の温度変化は変位に対して影響を与えないことである。すなわちこの場合、温度補正を考える必要はない。これは、式(4)においてひずみの差を利用して曲率を算定していることから明白である。

また FODD では、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、離散関数積分する必要がある。本研究では以上の問題を、離散点による関数の補間と捉えなおし、補間により得られた近似関数に対して2回積分を行うことにする。

3.1 曲率と荷重系

連続関数である曲率関数の離散点による補間を行う際に、理論上の誤差が生じることになる。よってひずみを利用して正確な変位を算出するには、離散点で与えられたひずみの情報をいかにして有効に利用するかが重要となる。以下では、荷重系と曲率関数の関係を利用して、近似式という観点から想定すべき荷重系と最適な近似式の条件について検討する。

(1) 端部のみに集中荷重や曲げを与えた場合

端部のみに集中荷重や曲げを与えた場合を想定する。部材の微小部分のつりあいから、位置 x における曲げモーメント $M(x)$ に対する以下の微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2 M(x)}{dx^2} = 0 \quad (7)$$

よって、上式を2回積分することで、 x を変数とする曲げモーメントの関数が得られる。

$$M(x) = a_1 x + a_2 \quad (8)$$

ただし、 a_1, a_2 は積分定数である。

他方、部材の剛性を EI とし平面保持を仮定すれば、以下のように曲率 ϕ と曲げモーメントの関係が得られる。

$$\begin{aligned} M(x) &= \phi \cdot EI \\ \therefore \phi &= \frac{M(x)}{EI} = \frac{1}{EI}(a_1 x + a_2) \end{aligned} \quad (9)$$

これより、曲率も x の関数として表され、それは一次式であることがわかる。この曲率を2回積分すれば、以下のように変位 v が得られる。

$$v = -\iint \phi dx \quad (10)$$

この変位関数を厳密に得るには、曲率関数を厳密に記述することが必要である。しかし実際には、曲率は関数として与えられず、離散的な関数値として与えられる。観測により得られたひずみを ε_i とし半径を y_i とするなら、曲率 ϕ_i は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \phi_i \cdot y_i \\ \therefore \phi_i &= \frac{\varepsilon_i}{y_i} \end{aligned} \quad (11)$$

今、関数近似の方法として一次式による補間を考える。曲率が f という関数で表されるとするならば、区間 $[x_{i-1}, x_i]$ において、関数 $f(x)$ は関数値 f_i を用いて以下のように補間される。

$$f(x) = \frac{x-x_{i-1}}{x_i-x_{i-1}} f_i + \frac{x-x_i}{x_{i-1}-x_i} f_{i-1} \quad (12)$$

上式を2回積分すると変位がえられる。

前述のように端部に集中荷重や曲げのみが作用する場合、曲率は一次関数となる。よって関数値が離散点で与えられたとしても、一次式で関数を補間すれば、与えられた関数と一致する。すなわちこの場合、一次式を用いて補間を行うならば、算出される変位は理論上真値と完全に一致する。

(2) 等分布荷重を想定した場合

前節での考察から、端部のみに曲げや集中荷重作用する場合、曲げモーメントの関数は一次式となることが分かった。一方、分布荷重 q が全区間に作用する場合、曲げモーメントは一次式とはならず分布荷重の関数に依存する。このときつりあい式から、以下の方程式が得られる。

$$\frac{d^2 M(z)}{dz^2} = -q(z) \quad (13)$$

分布荷重が定数 q であるとき、式(13)を積分すれば、 a_1 、 a_2 、 a_3 を定数として、

$$M(z) = -\frac{q}{2} z^2 + a_1 z + a_2 \quad (14)$$

が得られる。このとき曲率の関数も2次式となるので、各区分内での近似式として以下のような2次式を想定する。

$$\phi_i(z) = c_1 z^2 + c_2 z + c_3 \quad (15)$$

ただし、 c_1 、 c_2 、 c_3 は定数である。このように近似式には未知数が3つ含まれるので、関数値が3つ以上与えられるならば、関数を規定することができる。しかし、各区分に与えられた観測情報は端点での関数値2つのみである。よって未知数を決定するには、さらに何らかの条件式を与える必要がある。定義域の分割数が少ない FODD では、スプライン近似の方法を採用する。

ここで、想定されるモデルに対して集中荷重が作用しないと仮定するなら、せん断力も連続となる。よって、せん断力が連続性をもつならば、曲げモーメントの一次微分も連続であることがいえるので、この条件を近似式に与える。

いま、測点が n 個与えられたとする。このとき近似式は $n-1$ 発生し、そこに含まれる未知数は $3 \times (n-1)$ 個生じる。はじめに、各点で与えられた関数値をとるという条件は、観測値を l_i として、

$$\left. \begin{aligned} \phi_i(z_i) &= l_i \\ \phi_i(z_{i+1}) &= l_{i+1} \end{aligned} \right\} 2 \times (n-1) \text{ 個} \quad (16)$$

である。他方、隣接する近似式が区間端点で微分係数を共有するという条件は、

$$\phi'_i(z_{i+1}) = \phi'_{i+1}(z_{i+1}) \quad n-2 \text{ 個} \quad (17)$$

である。さらに、いずれかの点で微分係数 m_1 を直接与えると、

$$\phi'_1(z_1) = m_1 \quad (18)$$

となる。よってこのとき、未知数の数と条件式の数は一一致し、近似式を完全に規定することができる。しかし、現実には端点での微分係数を直接与えることは困難である。しかし、変位計を完全な不動部分深くまで挿入するという仮定を設けるならば、せん断力=0 という条件も想定可能であろう。これは、従来の傾斜計と同じ仮定条件でもある。

一方微分係数の与え方として、最終区間における2点の傾きを利用する方法がある。これは、端部の傾きを直線近似により与えるものである。関数を直線で近似することは、すなわち荷重が作用していないことを仮定することになるので、外力の影響が最も少ないと予想される最終区間に適用する。

以上のように等分布荷重が作用する場合、端点における微分係数を仮定することで、はじめて論理的な誤差が生じることになる。

(3) 線形分布する分布荷重を想定した場合

次に、分布荷重が以下のように一次式で表される場合を考える。

$$q(z) = q_1 z + q_2 \quad (19)$$

このとき曲げモーメントは、次のように3次式となる。

$$\begin{aligned} M(z) &= -\iint q(z) dx \\ &= -q_1 \frac{z^3}{6} - q_2 \frac{z^2}{2} + a_1 z + a_2 \end{aligned} \quad (20)$$

よって、近似式としては3次式が望ましい。しかし、近似式に3次式を用いると、一つの近似式に含まれる未知数は4つとなり、この未知数を決定するにはさらに条件式が必要となる。

いま、曲げモーメントの2次微分が、式(13)のように分布関数そのもので表されていることを考えると、分布関数が連続である限り、曲げモーメントの2次微分も連続であることがわかる。よってこのような状況が仮定できる場合は、2次微分が連続であるという条件を加味することにする。すなわち、式(16)、式(17)に加えて、以下の条件式を付加する。

$$\phi''_i(z_{i+1}) = \phi''_{i+1}(z_{i+1}) \quad n-2 \text{ 個} \quad (21)$$

未知数の総数は $4 \times (n-1)$ であるが、条件式の総数は $4n-6$ であり、いまだ未知数を決定することができない。未知数決定の方法として、この場合も2つの方法を考える。1つ目は最終区間を直線近似する方法であり、一次微分が線分の傾きとなり、2次微分がゼロとなる。2つ目は、下端点での1次2次微分をゼロと仮定する方法であり、これは下端点でのせん断力および分布荷重がゼロであることを意味している。

(3) 高次の分布荷重を想定する場合

想定する分布荷重が高次の関数で表現されるとき、曲率関数もそれ以上の次数を有することになるので、これらを近似するには高次の関数が必要である。しかしこの場合、関数に含まれる未知数が増加し、未知数決定のための境界条件の仮定も増加するので、高次に設定することのメリットが少なくなる。また、曲率関数の3次微分の数値を力学的に想定することも難しい。よってFODDでは、これらの場合においても3次関数を利用する。

(4) まとめ

曲率関数を近似する上で、近似関数の次数を多くとれば、より多くの地盤条件に対応できると考えられる。しかし3次関数以上の関数を想定する場合には、境界条件の仮定が困難であり、高次に設定するメリットが少なくなる可能性がある。よってFODDでは、3次関数を利用して曲率関数を近似することにする。

3.2 数値積分

以下では、線形関数、2次関数および3次関数で補完した場合の積分値の導出を示す。以下 $v(z_i)$ は測点 i での変位、 f_j は z_i における曲率を表す。

(1) 線形近似した場合

$$v(z_i) = -\sum_{j=0}^{i-1} \Delta_j^2 \frac{f_{j+1} + 2f_j}{6} - \sum_{j=0}^{i-2} \Delta_j \frac{f_{j+1} + f_j}{2} (z_i - z_{j+1}) \quad (22)$$

ただし、 $\Delta_j = z_{j+1} - z_j$ である。

(2) 2次関数で近似した場合

$$v(z_i) = -\sum_{j=0}^{i-1} \Delta_j^2 \left\{ \frac{f_{j+1} + f_j}{4} - \frac{1}{12} \Delta_j A_{j+1} \right\} - \sum_{j=0}^{i-2} \Delta_j \left\{ \frac{2f_{j+1} + f_j}{3} - \frac{1}{6} \Delta_j A_{j+1} \right\} (z_i - z_{j+1}) \quad (23)$$

ただし、 D_i, Δ_i は以下の漸化式で定義される。

$$\begin{aligned} \Delta_i &= x_{i+1} - x_i \\ D_i &= \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta_i} \end{aligned} \quad (24)$$

また式に含まれる数列 A_i は、以下のように境界条件の仮定によって異なる漸化式により規定される。

① 微分係数をゼロとする場合

$$A_0 = 0, A_j = 2D_j - A_{j+1}$$

② 最終区間を線形近似する場合

$$A_{n-1} = D_{n-1}, A_j = 2D_j - A_{j+1}$$

となる。

(3) 3次関数で近似した場合

$$v(z_i) = -\sum_{j=0}^{i-1} \Delta_j^2 \left\{ \frac{3f_{j+1} + 2f_j}{10} + \frac{\Delta_j}{60} (3\Delta_j Q_{j+1} - 8P_{j+1}) \right\} - \sum_{j=0}^{i-2} \Delta_j \left\{ \frac{3f_{j+1} + f_j}{4} + \frac{\Delta_j}{12} (\Delta_j Q_{j+1} - 3P_{j+1}) \right\} (z_i - z_{j+1}) \quad (25)$$

ただし、

$$\begin{cases} Q_{j+1} = \frac{3}{\Delta_j} (D_j - P_j) - 2Q_j \\ P_{j+1} = 3D_j - 2P_j - \Delta_j Q_j \end{cases} \quad (26)$$

以上の漸化式の初期値は、境界条件の仮定により異なる。

① 微分係数をゼロとする場合

$$Q_0 = 0, P_0 = 0$$

② 最終区間を線形近似する場合

$$Q_{n-1} = 0, P_{n-1} = D_{n-1}$$

3.3 境界条件の処理（積分定数の決定）

曲率を積分した際に、積分定数が2つ生じる。この2つの未知数を処理するために境界条件が2つ必要となるが、下端部を固定端と想定した場合、未知数は両者ともゼロとなる。しかし、境界条件として固定端を想定する場合、不動点の設定位置が問題となる。すなわち、下端部の変位がゼロであったとしても、回転角の影響で全体の変位量が大きく変わってしまう可能性がある。そこで、トランジットによる測量により上端部の変位を測定する方法や、上端部に傾斜計を設置し上端部角度を計測する方法などを用いてキャリブレーションを行うものとする。ただし、とりもなおさず下端が不動であるという条件は必要である。

3.4 変位算定に関するまとめ

本節ではFODDにおける変位算定について、その概要を示した。また変位算定という問題を、離散点による連続関数の近似および積分と捉え直し、荷重系と曲率という観点から近似関数の妥当性を検討した。その結果、地盤条件を勘案し、3次関数によるスプライン近似法を採用した。またいくつかの仮定を確認するためには、トランジットや傾斜計などを用いて上端部の変位や角度を計測し、算定変位をキャリブレーションする必要がある。

ただし算定誤差に関しては、理論上、想定する荷重系に依

存するので、必ずしも一般的な議論は成り立たない。すなわち算定誤差を論じるには、実際の地盤条件と同じ荷重系を想定する必要がある。よって今後は、実地盤等を使った算定実験などによって誤差を検討していく予定である。

4. 基礎実験

4.1 実験概要

塩化ビニル材料に対する FBG センサの適用性を、単純梁の2点荷重曲げ試験により検討する。また FODD では、現場での施工性等を考慮して、1 ユニットを 4m で設定している。すなわち計測対象が 4m を超える場合、ユニットをつなぎ合わせる必要があり、必然的に接合部が存在することになる。よって基礎実験として、接合部が全体の変位算定に与える影響についても検討を行う。以下に、実験手順と結果および考察を示す。

4.2 FBG センサ適用性試験

(1) 供試体および荷重方法

図-4 に、供試体の寸法および荷重状況を示す。また使用する塩化ビニル管の物理的性質を表-2 に示す。荷重方法は2点荷重で行い、中央点における変位の計測をダイヤルゲージにより、曲げモーメント一定区間におけるひずみの計測を FBG および電気式ひずみゲージにより行った。ひずみゲージは3点の平均値を用い、FBG センサは中央点の値のみを計測した。

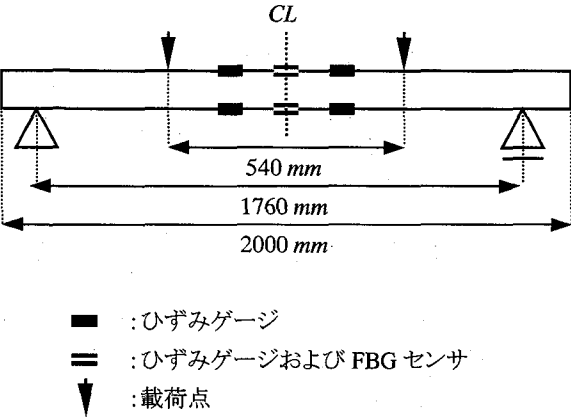


図-4 供試体および荷重状況

表-2 塩化ビニル管の物理的性質

外径	48.0 mm
内径	40.0 mm
弾性係数	$3.0 \times 10^3 \text{ MPa}$
断面 2 次モーメント	$1.35 \times 10^5 \text{ mm}^4$

(2) 結果および考察

下縁側のひずみと曲げモーメントの関係を図-5 に示す。また

図-6 は上縁側のひずみと曲げモーメントの関係である。ただし理論値は、管の剛性と載荷荷重により直接得られる値である。

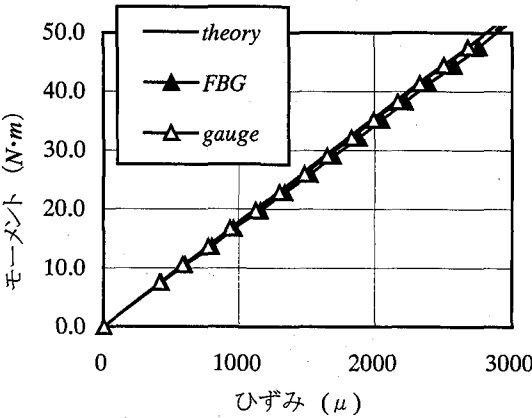


図-5 ひずみ - モーメント関係 (引張)

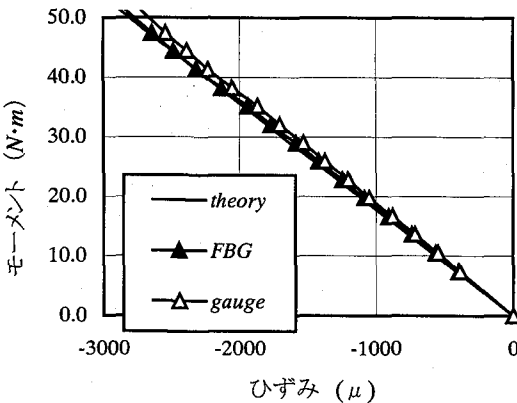


図-6 ひずみ - モーメント関係 (圧縮)

下縁側のひずみに関しては、ひずみゲージそして FBG センサともに理論値に近い値を示している。一方上縁側のひずみでは、FBG センサは理論値に近い値を示すが、ひずみゲージでは、ひずみが大きくなるにつれ理論値との差が拡大している。しかしそのずれは比例的に生じているので、ずれの原因として、下縁側のひずみゲージと FBG センサを並列して貼付した際に、下縁よりも多少内側にゲージを貼付したためであると考えられる。よってひずみゲージを正確に下縁に貼付するならば、ひずみゲージの信頼性から正確な測定ができるものと考えてよい。いずれにせよ FBG センサに関しては、理論値と非常に近い値を示しており、塩化ビニル材料に対しても正確なひずみ計測が行えるものと結論づけられる。

4.3 接合部試験

接合部では、変位計自体のつなぎあわせとともに、光ファイバ自体の接続も行う必要がある。光ファイバのコネクタは物理的な圧着方式であり、接合部に大きな曲率が生じた場合、コネクタの圧着が切断される可能性がある。また接合部の存在が変位計剛性の変化をもたらし、曲率の分布が変化する。す

なわら接合部を横断して曲率を補間する場合、剛性の変化率を考慮して曲率曲線を設定する必要がある。よって以下では曲げ試験により、接合部の剛性の算定と、ファイバコネクタ圧着の限度を検討する。

(1) 接合部構造

FODDにおける接合部構造を図-7に示す。接合部は、3方向に存在するアダプタを考慮して三角形の形状を採用した。この三角形の各辺上にアダプタが位置し、中心位置において光ファイバを接続する。そして接合部保護のために、外側からカバーを設置している。またこれら部材のはめ込みには、塩化ビニル材料用の接着剤を使用している。

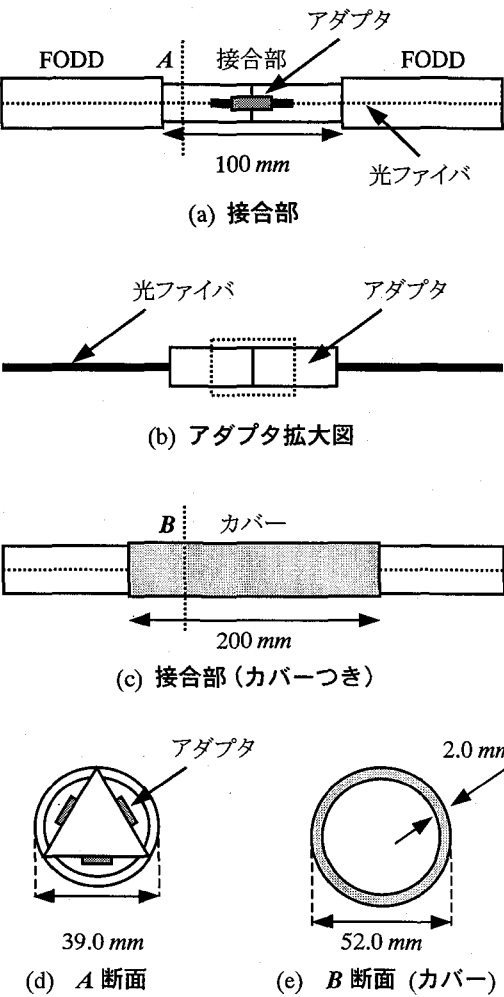


図-7 接合部構造

(2) 供試体および荷重方法

接合部試験における供試体寸法と荷重状況を図-8に示す。ただしひずみの測定は、事前実験での結果を踏まえてFBGセンサではなく、その代替として利用可能なひずみゲージにより行う。本実験でFBGセンサは、コネクタの接続確認のためだけに使用する。さらに中央点での変位量を、ダイヤルゲージにより測定した。

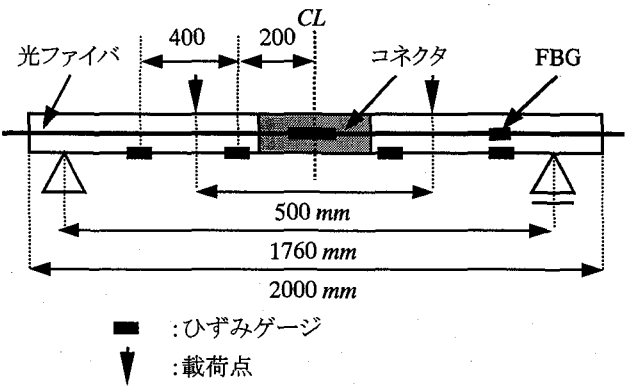


図-8 接合部試験概況

(3) 結果および考察

図-9に、接合部中央点での変位と荷重の関係を示す。ただし比較のために、接合部を有しない供試体において同様の実験を行った結果も併記している。

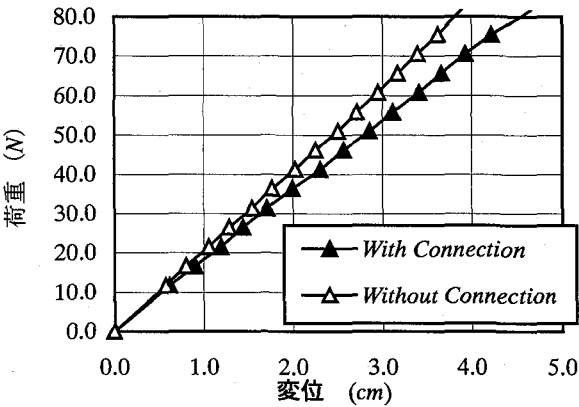


図-9 荷重 - 変位関係

図-9から、接合部が存在する場合、接合部を有しない場合と同じ荷重に対して、変位が増加しており剛性が低下していることがわかる。また荷重-変位関係が線形関係を示している領域において、接合部の曲げ剛性を算定した。その結果、接合部の曲げ剛性は塩化ビニル管一般部の0.71倍であることがわかった。

次に、測定したひずみ量から変位を算定した結果を図-10に示す。ただし、接合部の剛性変化を考慮に入れた場合と、考慮に入らずそのまま補間して積分した場合、および実測値を併記している。ここでの荷重系は集中荷重のみであり、曲率の分布形状も集中荷重の作用位置を頂点とした台形となるので、補間方法は一次式とし、関数形状として台形を仮定している。ただし、接合部での剛性変化を考慮に入れる場合は、剛性変化率 $\alpha=0.71$ を接合部全区間で一定として、図-11のように関数を定義しなおす。

図-10から、接合部の剛性変化を考慮に入れない場合、中央点における変位の換算値と実測値は大きく算定されており、その誤差率は11.0%である。これは、接合部の曲げ剛性がその他の部分の剛性よりも小さいため、剛性の大きい部分で算

定された値を直接用いると変位を過小評価することになる。

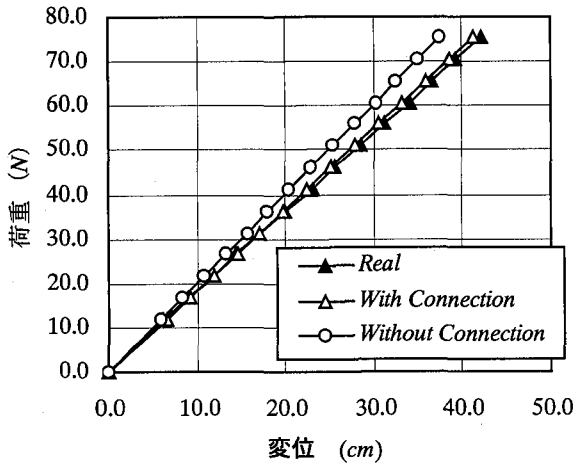


図-10 算定変位の結果

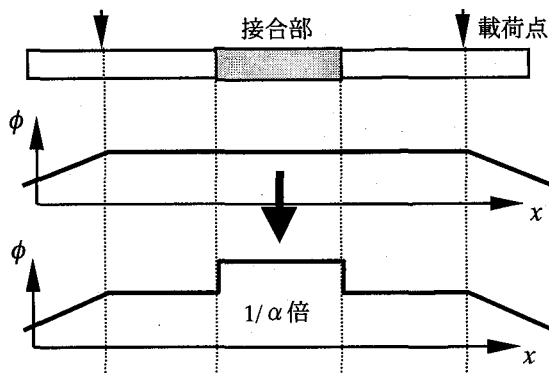


図-11 接合部の考慮

一方、曲率関数の形状を補正して変位を算定した場合は、実測値との誤差率 1.8% で非常によく一致している。よって、FODD において接合部を含む場合、曲率関数の補正を行うことで、変位の正しい算定が行えることがわかった。

また、これらの実験を通して FBG センサのコネクタが切断することはなく、同位置に設置したひずみゲージとほぼ同じ値を表示しつづけた。よって、実験の最大荷重からコネクタの位置での曲率に換算して 1.88×10^{-4} 程度の変形までは接続が確認できた。

5. 結論

本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 光ファイバセンサを 3 線利用することで、2 方向の変位計測が可能である。
- (2) 変位計の断面上で温度が一定ならば、軸方向の温度変化は変位計測には影響を与えない。
- (3) 変位算定に利用するスプライン関数を 3 次式とすれば、線形分布する荷重条件に理論上対応できる。ただし変位算定誤差は想定する荷重系に依存するので、実地盤を対象に算定誤差実験をする必要がある。

- (4) 塩化ビニルパイプの曲げ試験を行った結果、FBG センサによる計測値は理論値とほぼ一致した。よって FBG センサは、ひずみや変位計測に適用できるといえる。
- (5) 接合部を含んだ塩化ビニルパイプの曲げ試験を行った結果、接合部の剛性は一般部の 0.71 倍であることがわかった。また、以上の試験におけるひずみを計測し、近似式における剛性部の曲率を $1/0.71$ 倍に設定すれば、算定される変位は実測値とほぼ一致することがわかった。
- (6) 変形時における FODD 接合部の光ファイバのコネクタは、 1.88×10^{-4} 程度の曲率まで接続を確認できた。

今後、FODD の精度を正確に検討するために、実地盤を利用した実験を予定している。

参考文献

- 1) 防災白書 平成 11 年度版, 国土庁, pp.179-180, 1999.4.
- 2) 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 45-6(473), pp.1-4, 1997.6
- 3) 空中写真による地すべり調査の実例, 日本測量調査技術協会, 鹿島出版会, pp.72-82, 1982.4.
- 4) 地盤工学ハンドブック, 地盤工学会地盤工学ハンドブック編集委員会編, 地盤工学会, pp.516-518, 1999.3
- 5) 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.
- 6) 鈴木哲也ほか: 光ファイバーを利用した斜面変状監視のためのモデル実験, 第 32 回地盤工学研究発表会(熊本), 地盤工学会, pp.2639-2640, 1997.7
- 7) 大越孝敬編著: 光ファイバセンサ, オーム社, 1986.7
- 8) 熊谷仁志, 三田彰, 岡公隆, 大野博重: コンクリート構造物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
- 9) G. Meltz: Overview of Fiber Grating-Based Sensors, SPIE, Vol.2838, pp.2-21, 1996.
- 10) 石川真二: 光ファイバグレーティングによる精密計測技術, 応用物理, 第 69 巻 第六号, pp.648-654, 2000.

(2000 年 9 月 14 日受付)