

FBG光ファイバセンサを用いた地盤ひずみ計測

佐藤忠信¹・本田利器¹・柴田俊次郎¹・竹川直希¹

¹ 京都大学 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

It is widely recognized that the dynamic behavior of the soil is essential to discuss the characteristics of ground behavior during earthquakes. Dynamic property of the soil is still not fully understood and many problems are left unsolved. One of the reasons for this, is lack of a means to measure the strain in the real ground. This paper presents a system to measure the ground strain using the fiber Bragg grating (FBG) sensors. Employment of optical fiber sensor makes the device simple in mechanism and highly durable. Two types of prototypes of the ground strain measuring device are made and their applicability are examined in the dynamic shaking table experiments. The experimental results indicate that it is possible to measure the ground strain by the presented system.

Keywords: FBG optical fiber sensor, Ground Strain, Dynamic Measurement

1 はじめに

強震時の表層地盤の挙動は地震動災害と密接に関わっている。しかし、実際の地盤内での動的ひずみを計測するシステムは実用化されていないため、地盤のひずみ量と動的変形特性との関係は必ずしも明確ではない。

本研究では光ファイバーを用い、地盤内に生じるせん断ひずみを直接計測する装置を開発することを目的とする。地盤内のひずみを知ることにより、地盤剛性のひずみ依存性などの地震時の地盤の挙動についてより詳細な情報を得ることができると期待される。

地盤ひずみを計測するメカニズムとしては、Sawaguchi¹⁾によるものがあり、これは Matsuo ら²⁾により地盤モデルを対象とした実験で用いられている。しかし、その機構はかさばるものであり、実地盤に適用できるものではない。

本研究では、現在通信、計測など多分野で注目かつ活用されている光ファイバーを導入し、せん断ひずみ測定システムの開発の足がかりとなるモデル装置の試作を行い、実験を通してその有効性を検証する。光ファイバーは材質の変化が少なく、長期的な安定性を有する。また装置の構造を単純化できるため、実地盤に計測装置を設置する際に周辺地盤への影響を小さくできる。

佐藤ら^{3, 4)}は、地盤のせん断ひずみ計測装置を提案し、実験によりその性能等について検討した。本研究では同装置に改良を加えた装置を提案するとともに、新たなメカニズムを有するひずみ計測装置を提案した。そして、その適用性について実験により検討した。

2 ひずみ計測装置

本検討では2種類のひずみ計測装置を提案する。これらの装置をそれぞれタイプA及びBとする。タイプAの計測装置は、地盤の変形にともなう生じる計測装置のたわみ角により、地盤のせん断ひずみを計測するものである。タイプBの計測装置は、変形勾配テンソルを介して地盤ひずみを計測するものである。

以下に、各装置のひずみ計測のメカニズムについて述べる。

(1) タイプAの計測装置

タイプAのひずみ計測装置の計測メカニズムの概念図を図-1に、計測装置の概要を図-2に示す。地盤のせん断ひずみは、地盤の変形にともなう生じる計測装置のたわみ角により求められる。

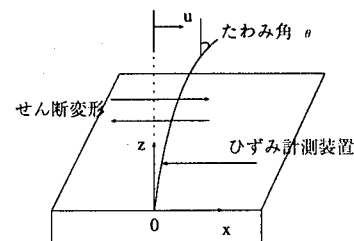


図-1 地盤ひずみ計測のメカニズム (タイプA)

タイプAの計測装置は厚さ0.5mm、幅25mm、長さ210mmのリン青銅板に厚さ2mmのアルミ板と光ファイバー、ひずみゲージ、ゴムを貼り付けたものである。アルミ板を貼り付けた部分は剛体的に変化するように

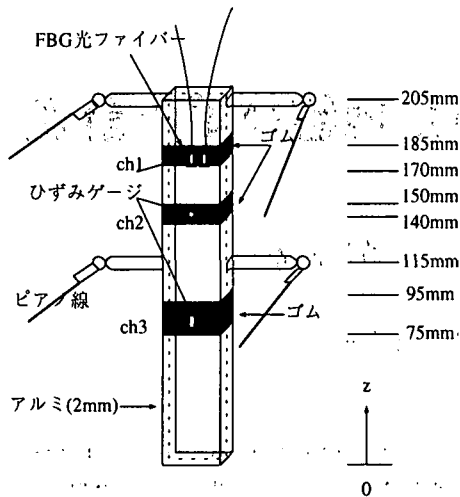


図-2 タイプ A のひずみ計測装置

なっており、ゴムを貼り付けた三か所の部分だけが曲げを生じる。その曲げひずみから、曲率たわみ角、たわみを求める。ひずみゲージは装置の下端から、それぞれ 85mm, 145mm, 177.5mm の位置に貼り付けた。装置に貼り付けたひずみゲージを上方から順に ch1, ch2, ch3 とする。ch1 と表裏同位置には光ファイバーセンサーを貼り付けた。

佐藤ら³⁾は、リン青銅板上の 4 箇所のひずみゲージから算出される曲率を線形補間することにより曲率分布を算出する機構と本検討で検討しているメカニズムと同様の機構について検討し、前者は後者に比較して計測誤差が大きいことを指摘した。そこで、ここでは後者について検討するものとした。

提案する装置の目的は地盤のせん断ひずみを計測することである。しかし、実際のひずみの値を直接計測する方法はない。したがって、タイプ A のひずみ計測装置については、変位計から求められる変位と提案する計測装置により計測される変位とを比較することによってその有効性を確認する。そのためここでは変位の計測方法について述べる。

なお、タイプ A の計測装置は、装置の下端から 115mm 及び 205mm の地点にジュラルミン棒を固定して、その両端を、ユニバーサルジョイントを用いて変位計から延びているピアノ線と接続した。これにより、地盤変形にともないひずみ計測装置が変形してしても、変位計により変位を計測することができる。

計測装置のリン青銅板の表側、裏側にはりつけたひずみゲージから求まるひずみをそれぞれ ϵ_+ , ϵ_- とすると曲率は

$$\chi = \frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_+ - \epsilon_-}{h} \quad (1)$$

となる。ここで χ は曲率、 h はプレートの厚さ、 ρ は曲

率半径である。たわみと曲率の関係は

$$\frac{1}{\rho} = \chi = \frac{u''}{(1 + u')^{\frac{3}{2}}} \approx u'' \quad (2)$$

となる。装置の下端を原点として鉛直上向きに z 軸をとる。装置はその下端が固定端となるように、鉛直上向きに固定した。原点において、たわみ、たわみ角がともに 0 であることを境界条件として、ひずみゲージから求まる曲率を用い積分するとたわみ、たわみ角の分布形が次式のように求まる。

$$u(z) = \iint x(z) dz dz \quad (3)$$

$$\theta(z) = \frac{du}{dz} = \int x(z) dz \quad (4)$$

以上によって算出された変位を変位計から計測される変位と比較することによって計測装置の有効性を検証する。

なお、本検討では、光ファイバーはタイプ A の計測装置のみに使用した。光ファイバーはその高い耐久性や装置のメカニズムの簡易化においてその効果を発揮するものである。本研究では地盤内の動的ひずみを計測するメカニズムの開発に重点をおいており、装置の有効性を検証するには必ずしも光ファイバーを用いる必要性は無いと判断したからである。

(2) タイプ B の計測装置

タイプ B の計測装置は、変形勾配テンソルを介して地盤ひずみを Green-Lagrange ひずみテンソルとして計測する装置である。

装置の概要を図-3 に示す。タイプ B の計測装置は厚さ 2mm、幅 25mm、長さ 188mm のプラスチック製の板三枚から構成される三角形の装置である。三角形の各辺の midpoint の表裏同位置にひずみゲージを貼り付けた。各辺の両端は自由端となるように計測装置を作成した。

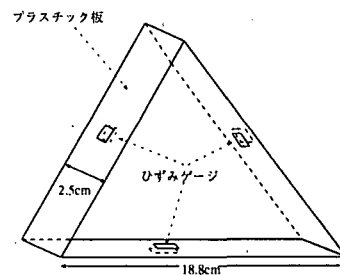


図-3 タイプ B のひずみ計測装置

以下にタイプ B の計測装置によるひずみ算出方法を示す。

Green-Lagrange ひずみテンソル 時刻 $t_0 = 0$ の基準配置における物質点 \mathbf{X} およびその近傍の点 $\mathbf{X} + d\mathbf{X}$

の現時刻 t における位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{x}(\mathbf{X}, t)$, $\mathbf{x}(\mathbf{X}+d\mathbf{X}, t)$ とする。

$d\mathbf{X}$ が微小であれば

$$d\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X} + d\mathbf{X}, t) - \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) \quad (5)$$

は $d\mathbf{X}$ に対して線形の関係にあると考えられ、線形変換

$$d\mathbf{x} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X} \quad (6)$$

を定義することができる。ここに、 \mathbf{F} は変形勾配テンソルである。 \mathbf{F} はある物質点近傍の相対的な変形を表し絶対的な変位に関する情報を含まない。変形勾配テンソル \mathbf{F} は直交テンソル \mathbf{R} 及び対称テンソル \mathbf{U} を用いて

$$\mathbf{F} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{U} \quad (7)$$

の形に右極分解できる。すなわち、変形勾配テンソル \mathbf{F} は、まず \mathbf{U} により \mathbf{C} の主軸方向に伸縮する変換を行い、次に、剛体回転 \mathbf{R} を与える変換を行うという変換を意味するものである。このとき、右 Cauchy-Green 変形テンソル \mathbf{C} は、

$$\mathbf{C} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T = (\mathbf{R} \cdot \mathbf{U})^T \cdot (\mathbf{R} \cdot \mathbf{U}) = \mathbf{U}^2 \quad (8)$$

で与えられる。

Green-Lagrange ひずみテンソル \mathbf{E} は次式で定義される。

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{C} - \mathbf{I}) \quad (9)$$

したがって、式 (8), (9) より \mathbf{E} は変形に含まれる剛体回転の影響を受けない。なお、以下に示すように \mathbf{E} は微小ひずみ理論におけるひずみテンソルに相当する。

変位勾配テンソル \mathbf{Z} は基準配置におけるベクトル場 \mathbf{u} の勾配 *gradu* として

$$\mathbf{Z} \equiv \mathbf{u} \otimes \nabla_{\mathbf{x}} \quad (10)$$

で与えられる。ただし

$$\nabla_{\mathbf{x}} \equiv \frac{\partial}{\partial X_J} \mathbf{e}_J \quad (11)$$

である。なお、式 (11) および以下の式展開においてはこの総和規約を用いる。

$$\mathbf{Z} \cdot d\mathbf{X} = \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial X_J} \otimes \mathbf{e}_J \right) \cdot dX_I \mathbf{e}_I = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial X_I} dX_I = d\mathbf{u} \quad (12)$$

であり、したがって、

$$(\mathbf{I} + \mathbf{Z}) \cdot d\mathbf{X} = d\mathbf{X} + d\mathbf{u} = d\mathbf{x} \quad (13)$$

なので、式 (6) と比較して

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + \mathbf{Z} \quad (14)$$

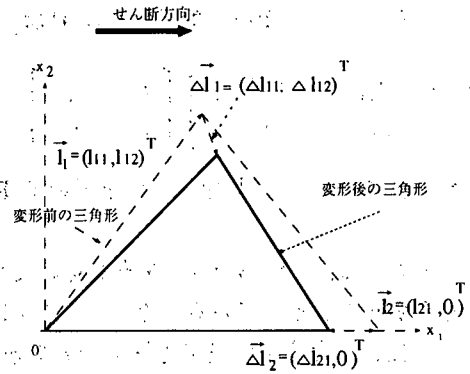


図-4 変形前と変形後の三角計の位置の関係

が得られる。今、変位の成分 U_I を用いて

$$\mathbf{u} = U_I \mathbf{e}_I \quad (15)$$

とし、これを式 (10) に代入すると

$$\mathbf{Z} = \frac{\partial U_I}{\partial X_J} \mathbf{e}_I \otimes \mathbf{e}_J \quad (16)$$

を得る。式 (8), (14), (16) を (9) に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \frac{1}{2} \left\{ \mathbf{u} \otimes \nabla_{\mathbf{x}} + (\mathbf{u} \otimes \nabla_{\mathbf{x}})^T + (\mathbf{u} \otimes \nabla_{\mathbf{x}})^T (\mathbf{u} \otimes \nabla_{\mathbf{x}}) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_I}{\partial X_J} + \frac{\partial U_J}{\partial X_I} + \frac{\partial U_K}{\partial X_I} \frac{\partial U_K}{\partial X_J} \right) \mathbf{e}_I \otimes \mathbf{e}_J \quad (17) \end{aligned}$$

微小変形を仮定すると、 $\frac{\partial U_I}{\partial X_J}$ の 2 次の項は無視でき、

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_I}{\partial X_J} + \frac{\partial U_J}{\partial X_I} \right) \mathbf{e}_I \otimes \mathbf{e}_J \quad (18)$$

となり、これは微小ひずみ理論におけるひずみと一致する。

変形勾配テンソル \mathbf{F} の算出 変形勾配テンソル \mathbf{F} は並進および剛体回転を無視できることを考慮して、図-4 のように変形前と変形後の三角形の一辺と一点をかさねて考える。

今一様なひずみ場を仮定すると、

$$d\mathbf{X}_1 = (l_{11}, l_{12})^T \quad (19)$$

$$d\mathbf{X}_2 = (l_{21}, 0)^T \quad (20)$$

とおける。また、変形後の三角形は以下のように表すことができる。

$$d\mathbf{x}_1 = d\mathbf{X}_1 + (\Delta l_{11}, \Delta l_{12})^T \quad (21)$$

$$d\mathbf{x}_2 = d\mathbf{X}_2 + (\Delta l_{21}, 0)^T \quad (22)$$

このとき変形勾配テンソル \mathbf{F} は

$$(l_{11} + \Delta l_{11}, l_{12} + \Delta l_{12})^T = \mathbf{F} \cdot (l_{11}, l_{12})^T \quad (23)$$

$$(l_{21} + \Delta l_{21}, 0)^T = \mathbf{F} \cdot (l_{21}, 0)^T \quad (24)$$

を満たす。したがって、変形勾配テンソル \mathbf{F} は、

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} l_{11} + \Delta l_{11} & l_{21} + \Delta l_{21} \\ l_{12} + \Delta l_{12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} \\ l_{12} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (25)$$

と求められる。これより、式 (8), (9) を用いて \mathbf{E} が算出できる。

提案する装置では、三角形の変形量を3辺の長さの変化により評価することとしている。そこで、以下に、三角形の各辺の長さの変化量の検出方法について述べる。

三角形の各辺を等分布荷重が作用する梁であると仮定する。境界条件として、両端でたわみ及び曲げモーメントが0、また、対称性により梁の中心でたわみ角が0であることを考慮すると、たわみ曲線は以下のように求められる。

$$EIu = q \left(\frac{1}{24}x^4 - \frac{L}{12}x^3 + \frac{L^3}{24}x \right) \quad (26)$$

このとき、等分布荷重 q と曲率 χ の関係は、式 (26) を二回微分した式 (27) と式 (2) により、

$$EIu'' = q \left(\frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}Lx \right) \quad (27)$$

と求められる。ひずみゲージは三角形の各辺の中心に貼り付けてあるので式 (27) に $x = \frac{L}{2}$ を代入すると、

$$\frac{q}{EI} = \frac{8\chi}{L^2} \quad (28)$$

となる。

変形後の三角形の各辺の長さの算出方法は以下の通りである。変形前の三角形の辺の長さを L 、変形後の辺の長さを ℓ とすると、両者の関係は

$$L = 2 \int_0^{\frac{\ell}{2}} \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (29)$$

と得られる。したがって、

$$f(\ell) = L - 2 \int_0^{\frac{\ell}{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{du}{dx} \right)^2} dx \quad (30)$$

とおき、 $f(\ell) = 0$ となる ℓ をニュートンラプソン法により求めることにより変形後の各辺の長さが算出される。なお、式 (29) の右辺は台形公式による数値積分により評価した。これより変形後の三角形の形状が決定でき、式 (25) により \mathbf{F} を求めることができる。

タイプ A の計測装置は装置の下方から積分をおこないたわみ角を算出するものであるため、ある点で誤差が生じると、それより上方の計測値はすべてその影響を受ける。しかし、タイプ B の計測装置は局所的な値のみを用いることによってひずみを計測するのである点での誤差が他の点へ影響を及ぼさない。これがタイプ B に期待される利点である。

(3) FBG 光ファイバセンサ

本実験では Fiber Bragg Grating Sensor を用いる。光ファイバーのひずみを計測する区間ではコア部分にグレーティングが刻み込まれており、そのグレーティングによりファイバーは、ある特定の波長 λ の波を反射し、他の波長の波を透過させる。ファイバーにひずみが生じた場合には、ファイバー内のグレーティング間隔が変化し、反射する波長がシフトする。その波長の変化を検出することによりひずみ量が計測される。

なお、厳密には、検出されたひずみから、温度変化等によるひずみの変化を取り除くことによって、物理的なひずみを計測することができることになるが、本実験では、振動により生じる熱や、環境の変化による光ファイバの温度変化に起因するひずみ量は、物理的なひずみ量と比較して非常に小さく、無視し得るものであると考えられるため、その影響は考慮しない。

3 有限要素法による検討

ひずみ計測装置を地盤内に設置することによって、ひずみ計測装置が地盤の挙動に影響を与え、地盤のひずみ量を正確に計測できない可能性が考えられる。そこで、ひずみ計測装置が地盤の挙動に与える影響を検討するため、タイプ A の計測装置について、計測装置を回転バネで連結された梁でモデル化し、平面ひずみ状態を仮定した有限要素法による解析を行った。

計測装置として 2mm 厚、5mm 厚のアルミ板を用いた場合と、計測装置を地盤内に設置しない場合の 3 種類について解析を行った。地盤は比較的やわらかいものに設定した。解析で用いる材料特性を表-1 に示す。

表-1 有限要素法で用いた材料特性

砂の単位体積重量 [kN/m ³]	1.6 × 10 ³
砂のせん断速度 [m/sec]	50
リン青銅板のヤング率 [N/m ²]	1.20 × 10 ¹¹
リン青銅板の密度 [kN/m ³]	87.5 × 10 ³
リン青銅板の厚さ [mm]	0.5, 5.0
アルミのヤング率 [N/m ²]	7.03 × 10 ¹⁰
アルミの密度 [KN/m ³]	23.4 × 10 ³
アルミ板の厚さ [mm]	2.0, 3.0, 5.0
ゴムのヤング率 [N/m ²]	3.0 × 10 ⁴
ゴムの厚さ [mm]	2.0, 3.0

計測装置上端の変位の時刻歴を図-5 に示す。同図より、リン青銅板の厚さによらず、計測装置を地盤内に設置することによる地盤の挙動に対する影響は非常に小さいことが分かる。なお、実験で用いる装置では、2mm 厚のアルミ板を用いることとした。

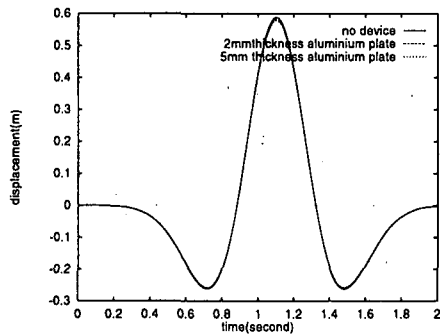


図-5 計測装置上端の変位の時刻歴の比較

4 静的実験

(1) 実験方法

本研究で提案した装置は、動的状態での地盤のせん断ひずみを測定する装置であるが、上述したように、変位による比較によってその有効性を検討する。なお動的実験を実施する前に、この章で述べる静的状態での変位を比較することによって、装置の有効性を確認する。

すなわち、振動台実験で用いる土槽内に、計測装置を設置し、砂を入れない状態で、装置の $z=205\text{mm}$ の部分を x 方向に 1cm 程度変位させたときに計測される変位と変位計により直接計測される変位とを比較する。

(2) タイプ A の装置の実験結果

計測装置の上端に変位を与えた時の変位の深さ方向の分布図を図-6に示す。ここで、変位計により計測された変位として示されているのは、計測された地点の変位を計測装置の機構を考慮して変位分布に換算したものである。両者はよく一致する結果を与えた。

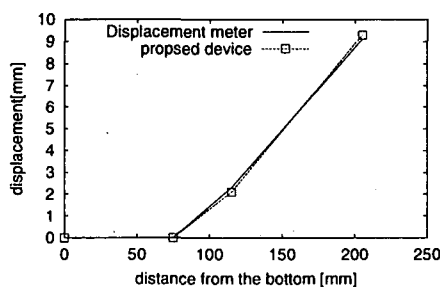


図-6 タイプ A の装置を用いた静的実験で得られた変位の分布の比較 (変位計により計測された変位は変位の分布に換算した値)

(3) タイプ B の装置の実験結果

せん断土槽に砂を入れた状態で、せん断土槽の左側面に、底面からの距離に比例する変位を与える。せん断土

槽の左側面が鉛直方向となす角が 5 度、10 度、15 度となるように変位を与えた。地盤モデルの左側面に与える傾斜角度を 2β とするとせん断ひずみは $\tan \beta$ と与えられる。実験によって得られたせん断ひずみを図-7に示す。実験によって得られたせん断ひずみの値は $\tan \beta$ に比べてかなり小さな値となった。

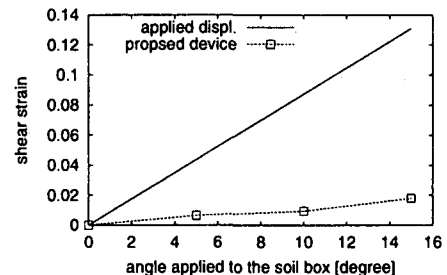


図-7 タイプ B を用いた静的実験で得られたせん断ひずみと一様変位を想定した場合のひずみの関係

地盤モデルの片側に変形を与えた場合に生じる変形は一様ではないので、実際に生じるひずみはこれより小さいものとなる。これを有限要素法による静的解析により検討し、生じるひずみはおおむね 0.6β 程度となるという結果を得た。

しかし、計測により得られた値はこの解析により得られる値よりも小さいものであるため、本メカニズムについてはさらに検討が必要である。

5 振動台実験

(1) 実験方法

タイプ A の計測装置について、地盤モデルを用いた振動台実験を行った。振動台実験のセットアップを図-8に示す。

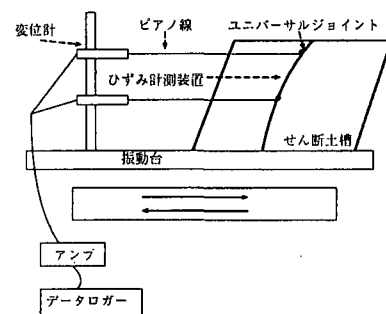


図-8 振動台実験のセットアップ

地盤材料としては、乾燥した豊浦標準砂を使用し、空中落下法により、せん断土槽の中に地盤モデルを作成した。せん断土槽は 19 枚のローラー付きの層 (厚さ 1cm 、幅 19cm 、長さ 45cm) と一枚の最上層 (深さ 2cm) の計

20層からなっており、各々のローラーにより互いに長手方向へのスムーズな移動が可能となっている。計測装置の下端は土槽の土台に直交するように固定し、その固定点でのたわみとたわみ角が、ともに0となるようにした。 $z=115\text{mm}$ 、 205mm における変位について、ひずみ計測装置から求まる変位と変位計から求まる変位とを比較し、装置の有効性を検証した。光ファイバーとひずみゲージと変位計はアンプに接続し、データロガーによって100Hzサンプリングでデータを収録した。振動台に与える入力波は、継続時間20秒間程度の周期3Hzの正弦波とした。

(2) 実験結果

計測装置のひずみゲージから得られた曲げひずみと、光ファイバーから得られた曲げひずみの時刻歴を図-9に示す。光ファイバーにより計測された曲げひずみの値には加振開始後時刻4秒付近に異常値と考えられる値が見られるが、この値を除くと、光ファイバーから求まる曲げひずみとひずみゲージから求まる曲げひずみはおおむね一致した。しかし、両者の差異は最大で約20%となった。

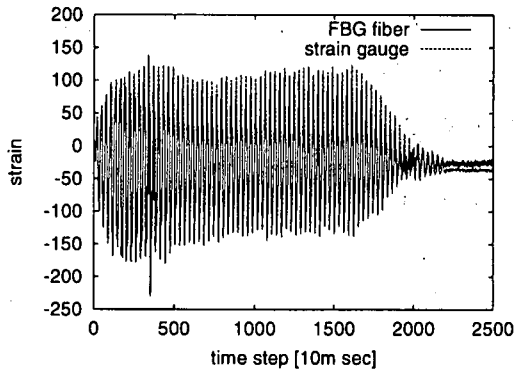


図-9 光ファイバーとひずみゲージより求まる曲げひずみの時刻歴

変位計から求まる変位と計測装置から求まる変位とを比較した図を図-10に示す。 $z=205\text{mm}$ における変位について、両者は加振開始後約2秒まではある程度一致している。しかし、それ以後は両者には一致度が低下した。加振開始後約0.5秒間での両者の差は $z=205\text{mm}$ における変位について最大で約10%であった。また、加振開始後約2秒間での両者の差異は $z=205\text{mm}$ における変位について最大で約25%であった。それ以降、両者の差は大きくなっているが、佐藤ら^{3,4)}の報告にあるような位相のずれは生じなかった。

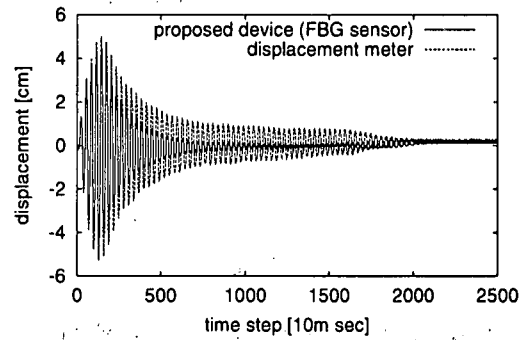


図-10 タイプAの計測装置を用いた振動台実験において得られた $z=205\text{mm}$ における変位の時刻歴の比較

6 まとめ

本研究では光ファイバーおよびひずみゲージを用いた2種類の地盤内動的ひずみ計測装置を試作し、静的実験と振動台実験によりそれらの装置の有効性について検証した。

今後、これらの装置の計測精度の向上を図るとともに実地盤への適用を含めた検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) M. Sawaguchi, "Measurement of shear strain in soils with new gauges," *Soils and Foundation* 24(1), pp. 148-150, 1984.
- 2) Y. Koga and O. Matsuo, "Shaking table test of embankment resting on liquefiable sandy ground," *Soils and Foundations* 30(4), pp. 162-172, 1990.
- 3) 佐藤忠信・本田利器・柴田俊次郎: 光ファイバーを用いた地盤内動的ひずみ計測システムに関する研究, 第34回地盤工学研究発表会概要集, pp.233-234, 1999年7月
- 4) Tadanobu Sato, Riki Honda and Shunjiro Shibata: Ground Strain Measuring System using Optical Fiber Sensors, Proceedings of the SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Vol.3670, pp.470-479, March 1999