

光ファイバセンサによる地盤ひずみ計測実験

佐藤忠信¹・本田利器¹・柴田俊次郎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

(1) 装置の概要

光ファイバひずみセンサを用いたひずみ計測装置は、リン青銅板製のプレートの表側に光ファイバひずみセンサを貼付したものである。各点の曲げひずみを測定し、その曲げひずみから、曲率、たわみ角、たわみを測定する仕組みになっている。地盤のせん断ひずみはたわみ角から求まる。地盤変形を計測するメカニズムを図-1に示す。

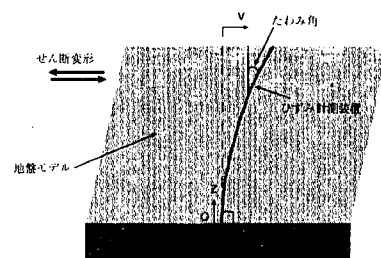


図-1 地盤変形を計測するメカニズム

ひずみセンサを付けた点での曲げひずみから曲率 χ を計算し、曲率の分布を n 次曲線で近似し、その係数を最小二乗法を用いて評価する。曲線は

$$\chi(z) = v''(z) = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i z^i \quad (1)$$

となる。ひずみ計測装置の下端を原点とする鉛直上向きの z 軸をとる。原点において、たわみ角及びたわみがと

もに0であることを境界条件として2回積分することにより、たわみの分布が求められる。

(2) 光ファイバーひずみセンサ

光ファイバーひずみセンサは、

- 多点計測が可能。
- 数十 km オーダーの長距離電送が可能である。
- 電氣的ノイズの影響が少ない。
- 耐久性に優れる。

などの利点がある。こうした利点が期待される中で、最も実用化に近い光ファイバーひずみセンサであるのが、動的な計測が可能で、多重化も可能なブラッグ格子型光ファイバー (FBG) センサである。

FBG センサはファイバーブラッググレーティング (Fiber Bragg Grating) をセンサーとしており、ブラッグ格子の間隔および屈折率の変化に応じて反射するブラッグ波長が変化する。したがって、センサ部分に温度やひずみがかかることによってそれらの値が変化すれば、ブラッグ波長のシフトとして検出することが可能である。図-2 にブラッグ波長のイメージ図を示す。

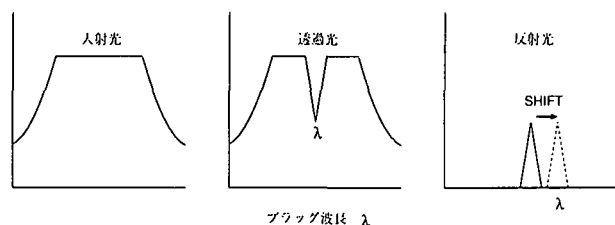


図-2 ブラッグ波長の原理

光源から出力された広帯域の光が 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) の光のみを反射し、それ以外の波長の光は通過する。このグレーティング部分にひずみが生じると Bragg 波長がシフトするため、そのシフト量を検出することによりひずみの計測が可能となる。この波長変化を計測する事により、グレーティング区間におけるひずみを評価することができる。また、Bragg 波長の異なるグレーティングを1本のファイバー上に直列に作成することでひずみの多点計測が可能になる。実験には Micron Optics 社製の FBG-IS を用いた。

3 振動台実験

(1) ひずみ計測装置

光ファイバひずみセンサを用いたひずみ計測装置は、厚さ 3mm、幅 50mm、長さ 530mm のリン青銅板製のプレートの表側に光ファイバーひずみセンサをに6カ所

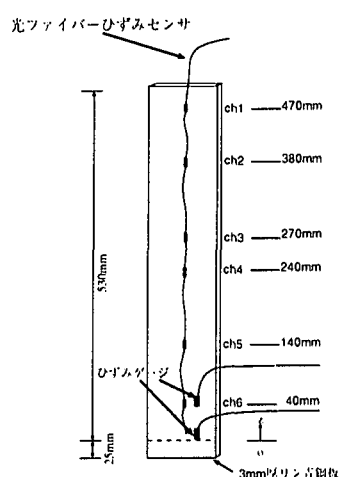


図-3 光ファイバを用いたひずみ計測装置

貼り付けたものである。各点の曲げひずみを測定し、その曲げひずみから、曲率の分布を近似、さらに、たわみ角、たわみを測定する仕組みになっている。地盤のせん断ひずみはたわみ角から求まる。リン青銅板の曲率の近似曲線を求める際には、銅板の上端において曲率 $\chi = 0$ という境界条件も加える。曲率の近似曲線は5次曲線とした。

また、ひずみ計測装置の ch6 ($z=40\text{mm}$) と装置の下端 ($z=0\text{mm}$) にはひずみゲージを貼付した。ch6 においては、光ファイバーひずみセンサから求まる曲げひずみの値と、ひずみゲージから求まる曲げひずみの値を比較することによって、光ファイバーひずみセンサの有効性を検証するためである。下端のセンサは予備的に設けた計測点である。

(2) 実験概要

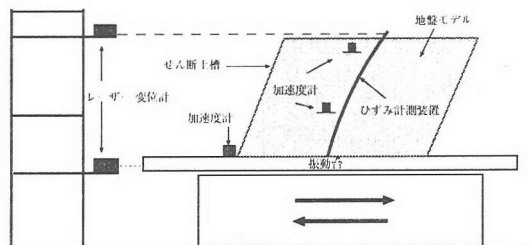
振動台実験の仕組みを図4に示す。地盤材料としては乾燥したケイ砂6号を使用し、空中落下法により土槽の中に地盤モデルを作成した。

せん断土槽は20枚のローラー付きの層からなっており、各々のローラーにより互いに長手1方向への移動が可能になっている。各層は、深さ26mm、幅300mm、長さ650mmである。せん断土層の深さは520mmとなる。最下層は土台に固定されている。ひずみ計測装置は土槽の土台に直交するように固定し、その固定端でのたわみとたわみ角が、ともに0となるようにした。

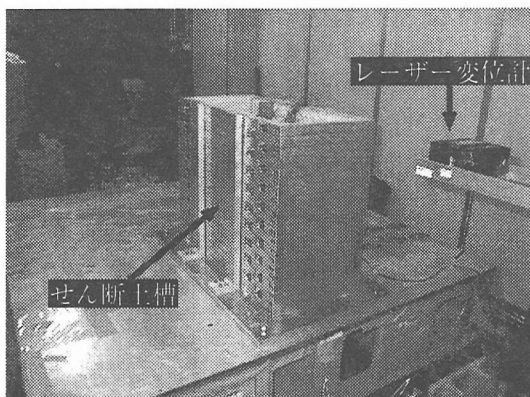
振動台に与える入力波は正弦波とし、データロガーによって100Hz サンプリングでデータを収録した。ただし光ファイバーひずみセンサは計測装置の性能の上限である33Hz サンプリングでデータを収録した。

本来実験の目的はせん断ひずみをひずみ計測装置で測定することであるが、今回の実験では変位によって計測装置の有効性を検証することにする。すなわち、振動

台実験において、レーザー変位計から求まる変位と、ひずみ計測装置から求まる変位とを比較する。実験では地盤モデル内に加速度ピックアップを埋め込み、加速度ピックアップから求まる加速度を2回積分して求まる変位と、ひずみ計測装置から求まる地盤の変位とを比較することによって、地盤とひずみ計測装置が同じ変形をしているかを検証した。



(a) 構成



(b) 写真

図-4 振動台実験セットアップ

(3) 予備実験

予備実験として、砂の影響のない場合の測定精度について検討した。

せん断土槽内に、ひずみ計測装置を設置し土槽内に砂が入っていない状態でひずみ計測装置を静的に変形させた後、自由振動させた。振動中の変位の時刻歴について、ひずみ計測装置により求められた値と、レーザー変位計により計測された値とを比較した。変位の時刻歴の一部を図-5に示す。

両者はほぼ一致したが、図-5からも分かるように、サンプリングが若干不十分である。データを収集する際には、計測する対象が動的に変形する時、対象の1周期あたりデータが8個あることが好ましい。しかし、前述したように、ひずみ計測装置の自由振動時の振動数は約7 Hzであるのに対し、光ファイバーひずみセンサは最高33 Hz サンプリングでしかデータを収録できない。そのため光ファイバーひずみセンサは装置が変形する1周期の間にデータを4または5回しか収録することができ

ない。そのため、計測装置の自由振動を計測する実験では十分な精度を確保することができなかった。この点を考慮して、振動台実験においては入力波は3 Hzの正弦波とした。

(4) 振動台実験

入力波を3 Hzの正弦波、最大加速度約250galとして、光ファイバーひずみセンサを用いたひずみ計測装置を地盤モデル内に設置し、振動台実験を行った。

ひずみ計測装置を中型せん断土槽内に設置した後、空中落下法により土槽内に地盤モデルを作成し、振動台実験を行った。

ひずみ計測装置のch6($z=40\text{mm}$)における光ファイバーひずみセンサから求まる曲げひずみと同じ深度のひずみゲージから求まる曲げひずみとを比較した結果を図-6に示す。両者は一致し、光ファイバーひずみセンサの計測妥当性を確認することができた。

ひずみ計測装置から求まる変位とレーザー変位計から求まる変位とを比較した。変位の時刻歴を図-7に示す。両者はほぼ一致し、提案するひずみ計測装置の有効性を確認することができた。

次に地盤内に設置した4個の加速度計の記録に基づき、ひずみ計測装置から求まる変位と加速度計から求まる地盤の変位量とを比較し装置が地盤に追従して変形しているかを検証した。この結果を図-8に示す。今回の実験では、加速度計から求まる地盤の変位とひずみ計測装置から求まる変位とは一致し、装置が地盤に追従して変形したことが確認できた。

また、ひずみを、加速度計を設置した異なる2点の間の変位の差の平均値として求め、その時刻歴を算出した。結果を、ひずみ計測装置の与える変位の時刻歴とともに図-9に示す。加速度計の記録に基づくひずみの評価方法が正確なものでないため、振幅の絶対値には大きい誤差が見られるが、振幅の時間変化や位相は良く一致している。

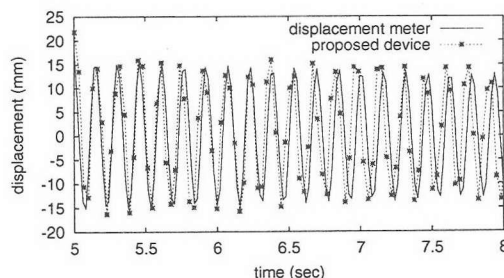


図-5 ひずみ計測装置による変位と、レーザー変位計による変位の時刻歴の比較 (5-8 秒)

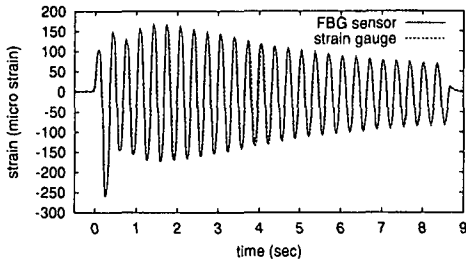


図-6 ひずみ計測装置の ch6 における曲げひずみ。光ファイバひずみセンサによる値とひずみゲージによる値の比較

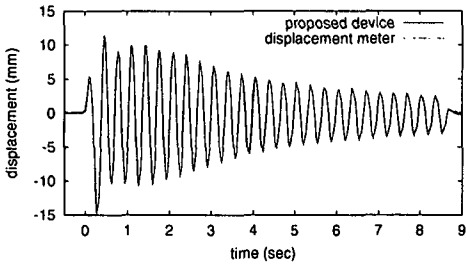


図-7 (振動台実験) ひずみ計測装置による変位とレーザ変位計による変位の時刻歴の比較

(5) せん断応力時刻歴の推定方法

鉛直に z 軸をとり、水平に x 軸を持つ直交座標系を考える。地震動が鉛直に伝播する波動のみ考えると、一次元の波動方程式に帰着する。

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2)$$

したがって、この式を積分することにより、深さ z におけるせん断応力次式のようになる。

$$\tau_{zx}(z, t) = \int_0^z \rho(z) \alpha(z, t) dz \quad (3)$$

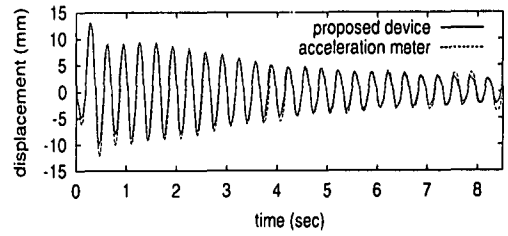
(α は加速度) 以上により求められた地盤モデルの応力を用い、応力-ひずみ関係を図-10 に示す。応力ひずみ関係は非線形の履歴曲線を描き、地盤モデルが振動によって締め固まり剛性が増えていく過程が認められた。

4 ひずみ計測メカニズムの検討

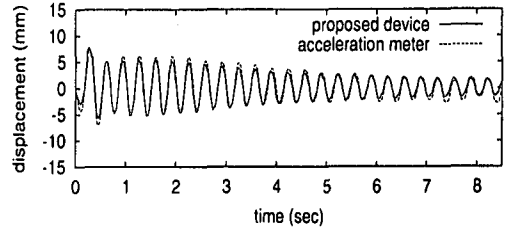
今回、実験で用いた光ファイバひずみセンサは計測装置の性能上、33Hz 以下でしかデータを収録することができず、高速でのデータ収録は困難である。しかし、より高周波数でサンプリングできるものも開発されつつあるため、それらを想定した実験も行った。

実験の概要は、光ファイバを用いた実験とほぼ同様である。

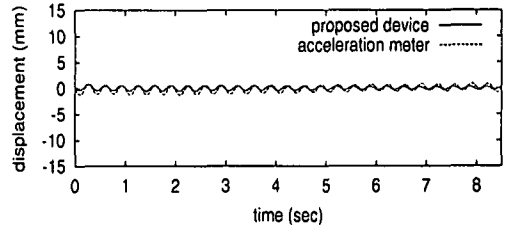
ひずみ計測装置は、厚さ 3mm、幅 50mm、長さ 530mm のリン青銅板製のプレートにひずみゲージを表裏同位置



(a) 地盤表面付近 (ch1 $z=495$ mm)

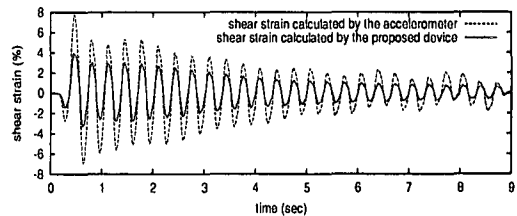


(b) 地盤モデルの中心付近 (ch2 $z=335$ mm)

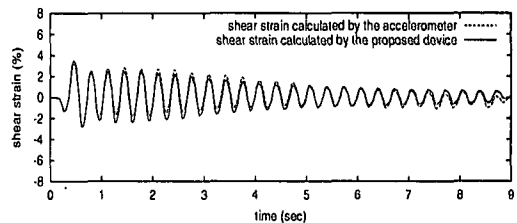


(c) 地盤モデルの底部付近 (ch4 $z=95$ mm)

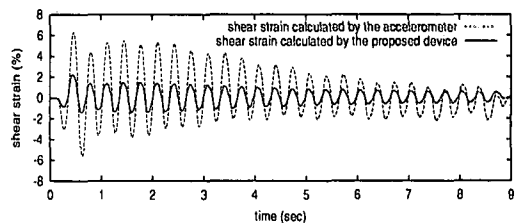
図-8 加速度計による変位とひずみ計測装置による変位との比較



(a) 浅い層



(b) 中間層



(c) 深い層

図-9 加速度計による平均せん断ひずみとひずみ計測装置による値の比較

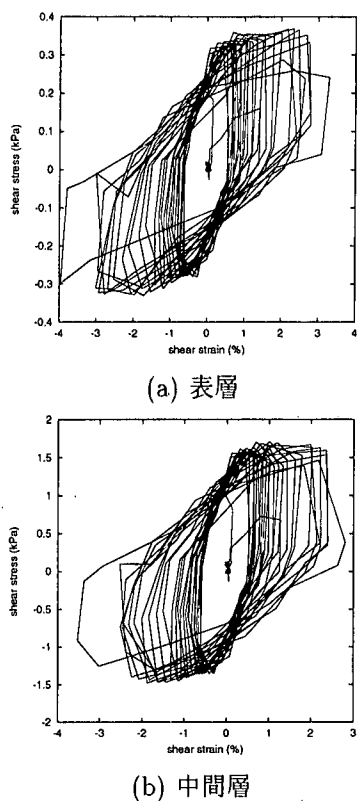


図-10 観測されたせん断応力とひずみとの比較

に10カ所貼り付けたものである。ここで用いたひずみ計測装置の概要を図-11に示す。データ収録は100Hzサンプリングで行った。また、入力波は4Hzの正弦波とした。

ひずみ計測装置を用いて算出した変位量とレーザー変位計で計測した変位量の比較を図-12に示す。両者は良く一致しており、高い精度で計測できることが確認された。

また、地盤内に設置した加速度計のデータからせん断応力を算出し、応力-ひずみ関係を評価したものを図-13にしめす。

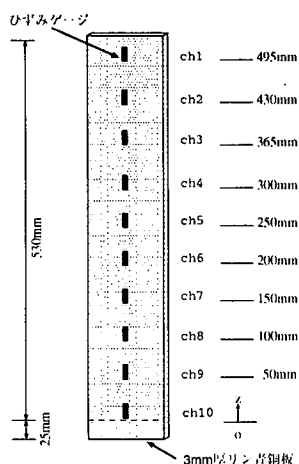


図-11 ひずみ計測装置 (光ファイバを用いていない)

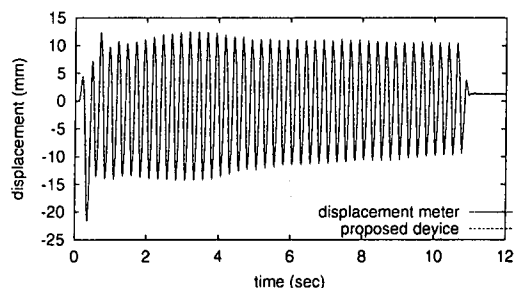


図-12 ひずみ計測装置とレーザー変位計による変位時刻歴の比較

これらの結果より、現在の光ファイバを用いた装置よりも高い周波数でデータ収録を行うことにより、さらに詳細な実験データが得られることが期待される。

(1) 近似分布曲線の次数について

曲率の分布を高精度に検出するためには、ひずみを連続に計測できることが好ましい。しかし、光ファイバによるひずみの連続観測が動的問題には使用できない現状では、有限の観測点数を設ける必要がある。有限の観測点数から曲率の分布を評価する方法としては近似曲線を用いることが、本報告の実験結果からも分かる。一方、近似する曲線については、次数が高い方が自由度が高まり、観測値を良く説明することが予想される。しかし、観測点数等の制約条件により、次数には上限がある。ここでは、近似曲線の次数を合理的に検討するため、想定する次数についてAIC(Akaike Information Criteria)を用いて検討した。

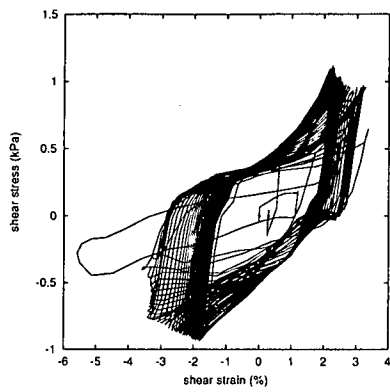
各時点において、ひずみ計測装置の曲率の最適な近似曲線を求め、近似曲線の最適な次数を求めた。図-14に最適な次数の時間的変化を示す。ここで用いたひずみ計測装置ではリン青銅板上10点でひずみを計測しているため、曲率の近似曲線の最高次数は8次である。図より、最適な次数は、ほとんどの場合最高次数の8となっており、さらに観測点数を増やす必要性も示唆する結果となっている。

5 まとめ

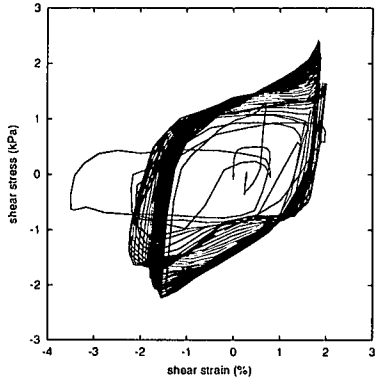
本研究では光ファイバひずみセンサーおよびひずみゲージを用いた2種類の地盤内動的ひずみ計測装置の試作を行った。

計測装置は厚さ3mm、幅50mm、長さ530mmのリン青銅板からなる装置である。装置の表裏にそれぞれ6ヶ所光ファイバひずみセンサーを貼り付けてある。

また、計測装置として、上と同仕様のリン青銅板からなる装置に、ひずみセンサーとしてゲージを用いたものも検討した。この計測装置はリン青銅板の10ヶ所の表



(a) 表層付近



(b) 地盤中央付近

図-13 振動台実験で得られた応力-ひずみ関係

裏にひずみゲージを貼り付けてある。

振動台実験において、レーザー変位計により直接計測された変位とひずみ計測装置から算出される変位とを比較することによって、装置の有効性を確認した。

地盤モデルの深さ方向に4ヶ所加速度計を埋め込み、加速度計から求まる変位と加速度計を埋め込んだ地点での計測装置の変位とを比較した。両者は4ヶ所ともほぼ一致し、計測装置が地盤に追従して変形したことが確認できた。

また、曲率分布を近似する関数について、多項式を仮定しその次数について検討した結果、ほとんどの場合において、とりうる最大次数を用いることを示唆する結果となり、計測点数をさらに増やすことの必要性を示唆する結果となった。

加速度計から算出される地盤のせん断応力と、ひずみ

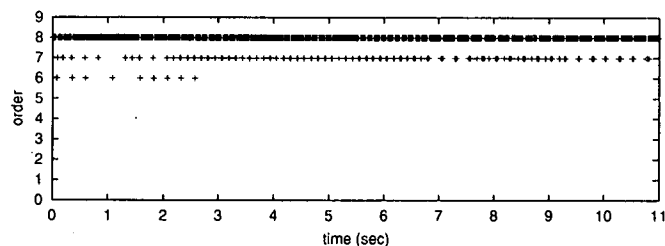


図-14 近似曲線の最適な次数の時間変化

計測装置から求まるせん断ひずみを用いて応力ひずみ関係を求めた。その結果非線形の履歴曲線を得ることができ、地盤モデルが振動中に剛性が変化する過程が履歴曲線からも分かった。

今後の課題としては、より大規模な地盤に適用する際のリン青銅板の仕様の決定、より高周波サンプリング可能な光ファイバ計測装置の導入による実用性の向上などが挙げられる。

また、ここで得られた地盤内応力の妥当性についての検討をするとともに、加速度計を用いずに地盤内応力を評価するための手法についても検討することも重要な課題である。

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
- 5) Tadanobu Sato, Riki Honda, Shunjiro Shibata and Takegawa Naoki: Ground Strain Measuring System using Optical Fiber Sensors, Proceedings of the SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Vol.3986, pp.180-190, March 2000