

# 光ファイバを用いた地盤変形計測システムの 大型振動台実験への適用

佐藤忠信<sup>1</sup>・本田利器<sup>1</sup>・竹川直希<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Authors have been working on development of the system to measure the dynamic deformation of the ground. For the purpose of verifying the efficiency of the measuring system, it is applied to the shaking table test of a large scale ground model. Shaking table test was conducted at National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (Tsukuba, Japan). Ground model is setup in the soil box with the scale of 11.6 m long, 3.1 m high and 4 m high. The experimental results of the test is reported in this paper. In order to estimate the accuracy of the proposed measuring system, displacement of the ground surface is measured by both the proposed system and the laser displacement meters. Accuracy to measure the deformation of the deep part of the ground, the velocity measured by the proposed system is compared with that measured by the acceleration meter buried in the ground. They show good agreement in both cases and usability of the proposed system is verified.

**Keywords:** *FBG optical fiber sensor, ground deformation, dynamic measurement, shaking table test*

## 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、地震時における実際の地盤内の変形量を計測するシステムは、現状では地震計を除くと実用化されていないと言える。このため、地盤のひずみ量などに代表される地盤の変形量と、動的変形特性との関係は必ずしも明確ではない。

地盤変形を計測するメカニズムとしては、地盤ひずみを計測するものとして Sawaguchi<sup>1)</sup>によるものがあり、これは Matsuo<sup>2)</sup>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。

筆者ら<sup>3)-9)</sup>はこれまでに光ファイバを用いた地盤変形計測システムの開発を行ってきた。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。

これまでの研究では地盤変形計測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してきた。本研究ではこれまでに開発してきた地盤変形計測装置を実際の地盤に適用することを想定し、大型の地盤変形計測装置への適用を試みたものである。本研究は、作成した地盤変形計測装置を実地盤大の地盤モデルを用いた大型振動台実験に適用し、作成

した装置の大規模地盤における有効性を検証することを目的とする。また、液状化地盤に対する装置の有効性もあわせて検証する。

## 2 地盤変形を計測するメカニズム

### (1) 動的な地盤変形を計測するメカニズム

動的な地盤変形を計測するメカニズムを図-1に示す。地盤変形計測装置が地盤の動的な変形に追従して変形すると仮定し、計測装置の変形量が地盤の変形量に等しいとする。本研究では装置の変形量を計測することにより、地盤の変形量を評価する。

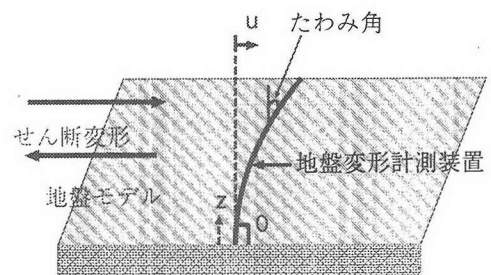


図-1 地盤変形を計測するメカニズム

装置の変形量を評価する方法を以下に述べる。ひずみ

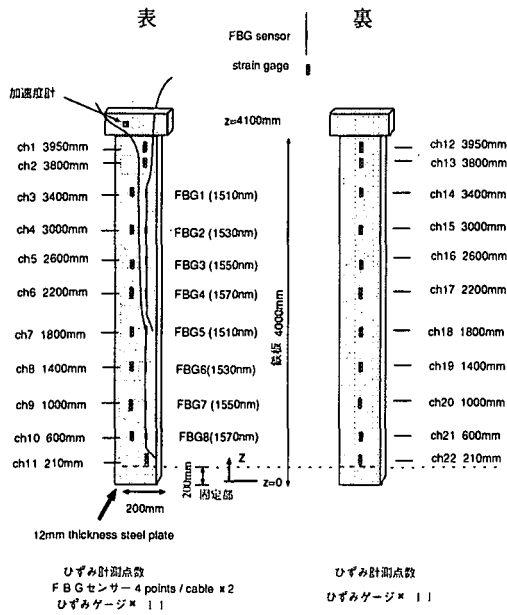


図-2 地盤変形計測装置の概観

センサによって計測される装置の曲げひずみから曲率を算出し、各点の曲率から曲率の分布形状  $\chi(z)$  を推定する。装置の下端を境界条件として曲率  $\chi(z)$  を積分することにより、装置のたわみ角、たわみの分布形を次式のように得ることができる。

$$u'(z) = \int \chi(z) dz \quad (1)$$

$$u(z) = \iint \chi(z) dz dz \quad (2)$$

計測装置のたわみ角は地盤の水平方向せん断ひずみとして評価される。また、計測装置のたわみは地盤の変位量として評価される。また、上式で得られた地盤の変位を時間で微分することにより、地盤の変形速度、変形加速度を得ることができる。

## (2) 地盤変形計測装置

本研究において用いた地盤変形計測装置の概観を図-2に示す。地盤変形計測装置は、鉄板およびFBG光ファイバひずみセンサ、ひずみゲージによって構成される。鉄板の表側には8点のFBGセンサと11点のひずみゲージを貼付けた。また、鉄板の裏側にはひずみゲージのみを11点貼り付けた。鉄板は長さ4000mm、幅200mm、厚さ12mmである。鉄板の上端部には長さ200mm、幅300mm、厚さ12mmの鉄板を継ぎ足した。FBG光ファイバひずみセンサは2本の光ファイバケーブルにそれぞれ4点ずつ、40cm間隔で取りつける。

佐藤ら<sup>5,6)</sup>、Sato et al.<sup>8)</sup>は本研究で用いた地盤変形計測装置と同じメカニズムを持つ装置を作成し振動台実験により作成した装置の精度を検証した。Satoらが用いた光ファイバひずみ計測装置は計測装置の性能の制約の

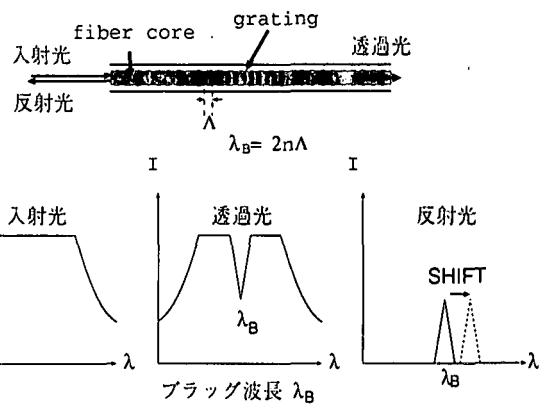


図-3 FBG センサの原理

ため、FBG センサによって計測されるひずみを、サンプリング周波数 30 Hz 程度以下でしか収録することができない。地震時における地盤変形を計測するためには、より高いサンプリング周波数でのデータ収集が可能な光ファイバひずみ計測装置を用いる必要がある。そこで、本研究ではサンプリング周波数最大 200 Hz でのデータ収録が可能な光ファイバひずみ計測装置 IFOS を使用した。IFOS は 1 台で一本の光ファイバケーブル上の FBG センサによって計測されるひずみを最大 4 点まで同時計測することが可能である。本研究では IFOS を 2 機用いて計測を行った。

ひずみセンサとしては光ファイバひずみセンサのみを用いることが望ましい。しかし、光ファイバによる動的なひずみ計測の精度は、まだ評価段階であると言え、実績のあるひずみゲージセンサ等と比較すると信頼性に劣る。また、IFOS を用いたひずみの計測点数は最大 8 点という上限がある。これまでの研究から、ひずみの計測点数が少ない場合には地盤変形計測装置の精度が悪くなることもわかっているため、今回の実験ではひずみの計測点数を増すことを目的として、光ファイバセンサに加え、ひずみゲージも用いて計測を行った。

提案する装置では、ひずみセンサによって各点の曲げひずみを測定し、その曲げひずみから、曲率の分布を近似し、たわみ角、たわみを測定する仕組みになっている。

本研究では上述したように、地盤変形計測装置の変形量を計測することによって、地盤の変形量を評価する。地盤のせん断ひずみは装置のたわみ角として検出され、また、地盤の変位量は装置のたわみとして検出される。

## (3) 光ファイバひずみセンサ

光ファイバひずみセンサを利用することによって、期待されている利点としては下記のような点が挙げられる。

- 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。

- 電磁ノイズの影響を受けない。
- 耐久性に優れる。(経年変化が小さい)

光ファイバセンサのうちファイバ自体にセンサ機能を持たせるタイプの計測原理としては、後方散乱光を利用するもの、光の干渉を利用するものなどがある。前者としてはB-OTDRセンサが、後者はFBGセンサが近年普及しつつある。本研究では、動的な計測が可能であり、また、同時多点計測(多重化)が可能であるFBGセンサを用いた。

FBGセンサとは、ファイバーブラッググレーティング(Fiber Bragg Grating)を施した光ファイバをセンサとしており、ブラッググレーティング(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ことによって、ひずみなどを計測するものである。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-3にブラッグ波長のイメージ図を示す。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。またBragg波長の異なるFBGを1本のファイバー上に複数設けることでひずみの多点計測が可能になる。

### 3 振動台実験

#### (1) 実験概要

本研究では茨城県つくば市防災科学技術研究所の大型振動台、及び大型せん断土槽を用いて実験を行った。振動台実験の構成を図-4に示す。振動台上にはせん断土槽および側面支持梁が設置されている。加振方向はせん断土槽の長手方向の一方加振であり、側面支持梁は、

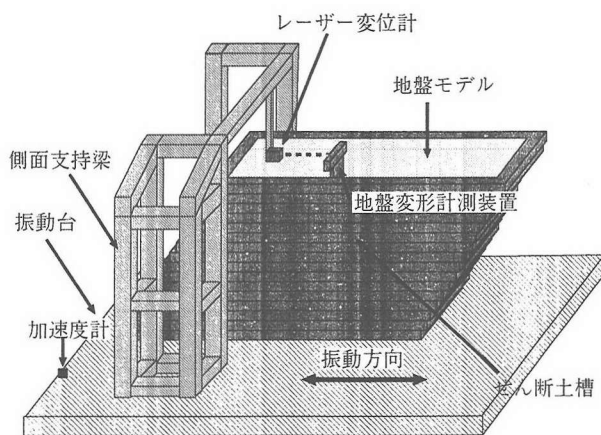


図-4 振動台実験の構成

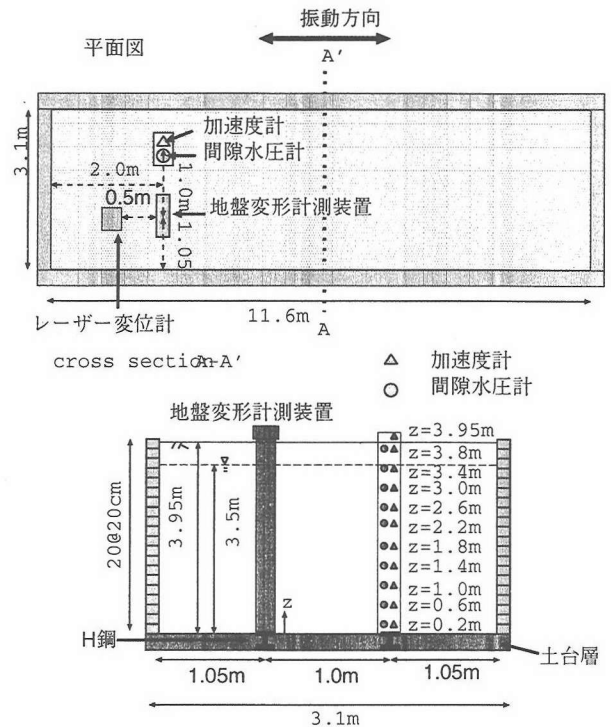


図-5 せん断土槽内の計測機器の配置

せん断土槽が加振方向以外の方向に動くのを防止する。せん断土槽の両側面に設置された側面支持梁上に振動方向と垂直な方向に梁を設置し、この梁にさらに鉛直方向に梁を取りつける。この鉛直な梁にレーザー変位計を取りつけ、レーザー変位計によって装置上端部の振動方向のたわみ量を計測する。また、振動台には加速度計を取りつけ、入力波の加速度を計測する。

地盤材料としては霞ヶ浦砂を使用し、水中落下法によりせん断土槽内に地盤モデルを作成した。地盤モデル内には間隙水圧計、及び加速度計をそれぞれ10点、11点設置した。これらをそれぞれ下から順にwp1, ..., wp10, acc1, ..., acc11とする。せん断土槽内における地盤変形計測装置および、加速度計、間隙水圧計の位置を図-5に示す。

実験に使用したせん断土槽について述べる。せん断土槽は、振動台に固定された土台層と、20枚のローラー付きの層からなっており、各層間のローラーにより互いに長手方向への移動が可能になっている。各層は、深さ200mm、幅3,100mm、長さ11,600mmである。せん断土層の深さは4,000mmとなる。水位は土槽底面から3,500mmの高さに調整されている。地盤変形計測装置は土槽の土台層に取りつけられたH鋼に直交するように固定し、その固定端でのたわみ量とたわみ角が、ともに0となるようにした。せん断土槽の外観を図-6に示す。

本研究では変位を比較することによって計測装置の精度を検証するものとする。すなわち、振動台実験におい

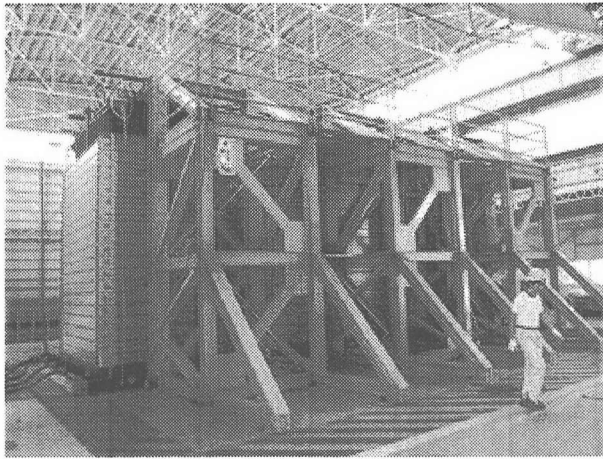


図-6 せん断土槽の外観

て、レーザー変位計によって計測される装置上端の変位と、地盤変形計測装置によって計測される装置上端の変位とを比較する。

また、地盤の変形速度と、装置の変形速度とを比較することによって地盤変形計測装置が地盤の変形に追従して変形しているかを検証する。振動台に設置した加速度計によって計測される振動台の加速度と、地盤内に設置した加速度計によって計測される地盤の加速度より、振動台に対する地盤の相対加速度を算出することができる。この相対加速度を時間で積分することにより地盤の変形速度を算出することができる。また、計測装置のたわみを時間で微分することにより装置の変形速度を算出することができる。両者の変形速度を比較することにより地盤変形計測装置が地盤の変形に追従して変形しているかを検証する。

## (2) 実験結果

振動台に入力する加速度は兵庫県南部地震の際に、ポートアイランドにおいて得られた強震記録を、最大加速度が150 galになるよう振幅調整したものをを用いた。振動台に設置した加速度計によって計測された入力加速度の時刻歴を図-7に示す。

地盤モデル内に設置した間隙水圧計によって計測された過剰間隙水圧比の時刻歴を図-8に示す。過剰間隙水圧

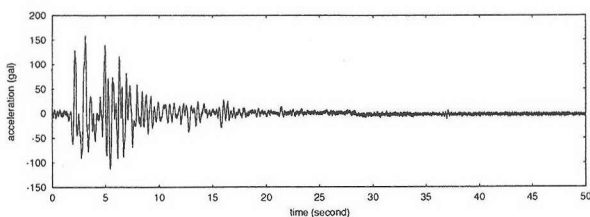


図-7 入力加速度の時刻歴

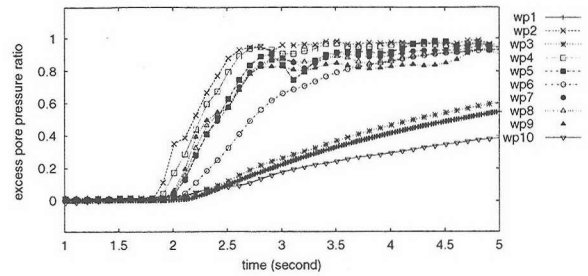


図-8 過剰間隙水圧比の時刻歴 (1~5秒)

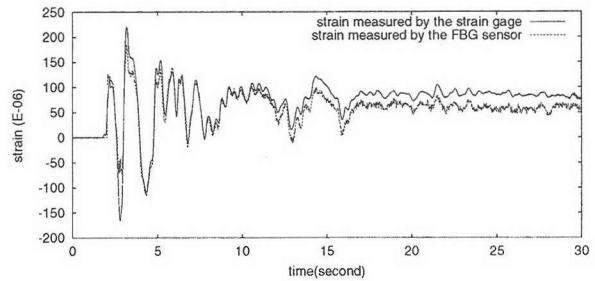


図-9 地盤変形計測装置の  $z=1,400$  mm の位置における光ファイバひずみセンサによって計測されたひずみの値とひずみゲージによって計測されたひずみ値の比較

比の値は計測開始後約2~3秒の間に急激に増加し、その値はほぼ1となっている。この結果より地盤モデルは計測開始後約2~3秒の間に完全に液状化していることがわかる。

地盤変形計測装置の  $z=1,400$  mm の位置における光ファイバひずみセンサによって計測されたひずみと、同じ深度に設置されたひずみゲージによって計測されたひずみとを比較した結果を図-9に示す。この図に示されるように、光ファイバによって計測されたひずみとひずみゲージによって計測されたひずみは概ね一致している。

しかし、光ファイバひずみセンサによって計測されたひずみには長周期および短周期のノイズが混入していることがわかる。また、2~3秒付近においてはひずみゲージによって計測されたひずみとの間に大きな差が生じている。光ファイバによって計測されたひずみが、ひず

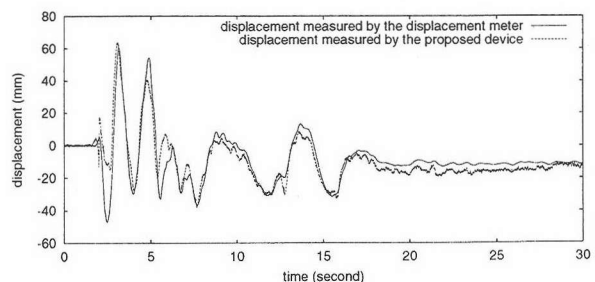
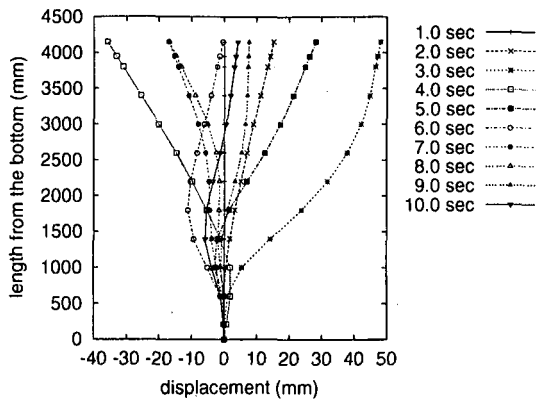
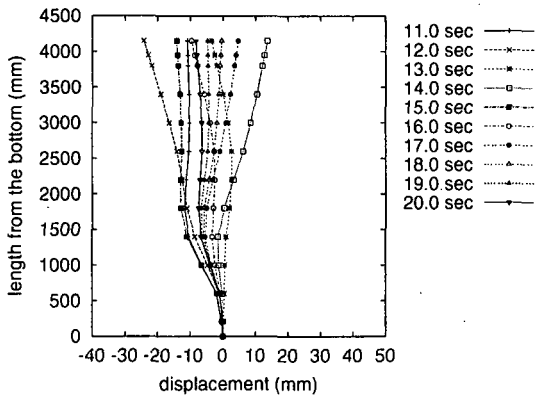


図-10 レーザー変位計により計測された変位と地盤変形計測装置により計測された変位の時刻歴の比較



(a) 0 - 10 秒



(a) 10 - 20 秒

図-11 地盤変形計測装置の深さ方向のたわみ分布図 (0 - 20 秒)

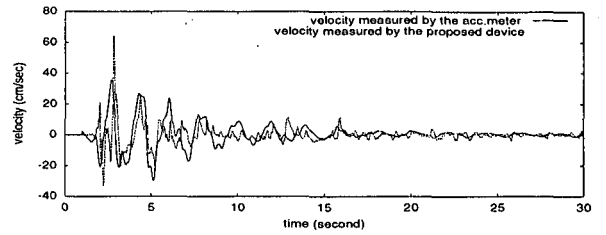
みゲージの値に一致しなかった原因としては、光ファイバひずみ装置の精度が不十分であったことが考えられ、いっそうの検討が求められる。

レーザー変位計によって計測された装置上端部のたわみと、地盤変形計測装置によって計測されたたわみの比較を図-10に示す。両者はよく一致しており、提案する地盤変形計測装置の有効性を確認することができた。

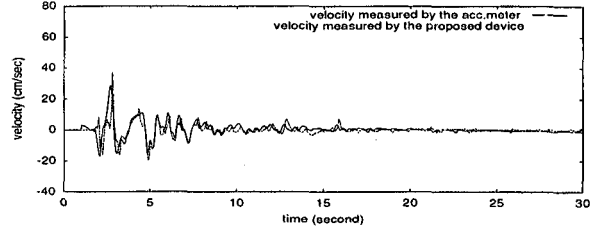
地盤変形計測装置の深さ方向のたわみの分布を示したものを図-11に示す。この図より、地盤変形計測装置及び地盤の振動が、一次モードだけではなく、高次モードも含むものであることを確認することができる。このために、観測点数が少ないと観測精度が低下することになるのである。

次に地盤モデル内に設置した加速度計によって計測される地盤の変形速度と、地盤変形計測装置の変形速度を比較した。両者の比較を図-12に示す。

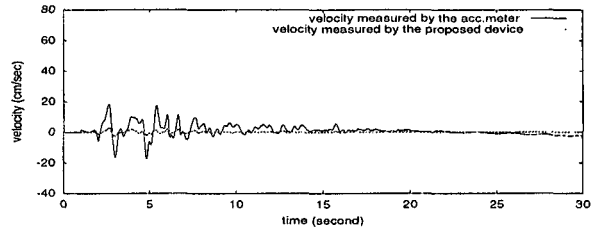
地盤モデルの表面付近、および中央付近においては両者の変形速度はよく一致しており、地盤変形計測装置が地盤の変形に追従して変形していることを確認することができた。しかし、地盤モデルの底部付近においては、



(a) 地盤表面付近 ( $z = 3,800$  mm)



(b) 地盤モデルの中心付近 ( $z = 2,200$  mm)



(c) 地盤モデルの底部付近 ( $z = 600$  mm)

図-12 加速度計によって計測される地盤の変形速度と地盤変形計測装置の変形速度との比較

地盤変形計測装置の変形速度は、地盤の変形速度に比べてかなり小さなものとなっている。この理由としては、地盤変形計測装置はその下端が土台層に固定されているため、この拘束力によって地盤変形計測装置が地盤の変形に追従して変形できなかったことが考えられる。

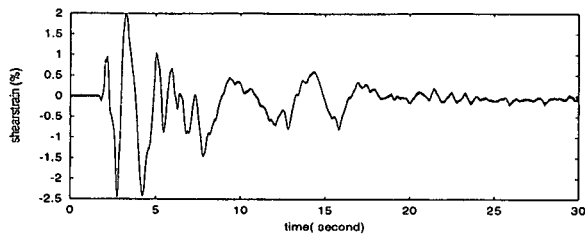
地盤の水平方向せん断ひずみの時刻歴を図-13に示す。地盤の水平方向せん断ひずみは計測開始後約2~3秒において約 $10^{-2}$ 程度に達しており、間隙水圧が急激に上昇すると同時に、せん断ひずみも最も大きな値に達していることが分かる。

#### 4 まとめ

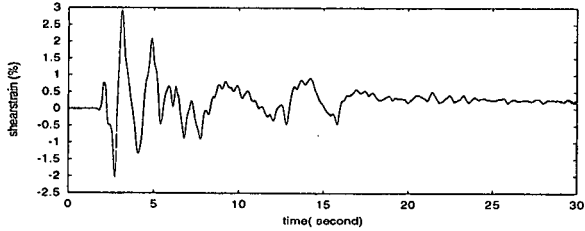
本研究では光ファイバひずみセンサーおよびひずみゲージを用いた地盤変形計測装置を作成し、大型せん断土槽を用いた大型振動台実験へ適用し、作成した装置の有効性を検証した。

計測装置は厚さ120 mm、幅200 mm、長さ4,000 mmの鉄板にFBG光ファイバひずみセンサおよびひずみゲージを貼付したものである。

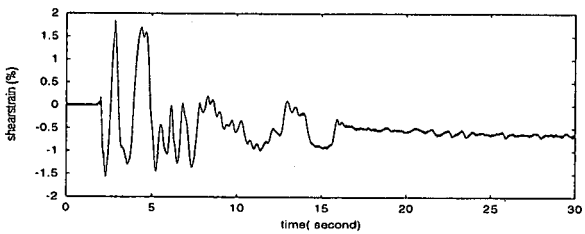
振動台実験において、レーザー変位計により直接計測された変位とひずみ計測装置によって計測された変位とを比較することによって、装置の精度を検証した。両者



(a) 地盤表面付近 ( $z = 3,800$  mm)



(b) 地盤モデルの中心付近 ( $z = 2,200$  mm)



(c) 地盤モデルの底部付近 ( $z = 600$  mm)

図-13 地盤の水平方向せん断ひずみの時刻歴

はよく一致し、作成した地盤変形計測装置の精度を確認することができた。

地盤モデル内に加速度計を設置し、加速度計から算出される地盤の変形速度と加速度計を埋め込んだ地点での計測装置の変形速度とを比較した。両者は地盤の表面付近および中央付近ではほぼ一致し、計測装置が地盤に追従して変形したことが確認できた。

以上の結果より作成した地盤変形計測装置は、大規模な地盤モデルにおいても地盤の変形量を正確に計測可能であることを確認することができた。また、液状化地盤に対する装置の有効性を確認することができた。

現段階では高速でデータを収録可能な光ファイバによるひずみ計測装置の精度は十分であるとは言えないが、光ファイバによるひずみ計測の精度を向上させることによって、地盤変形計測装置の精度を向上させることが可能である。

本研究では計測した地盤のひずみは数%オーダーであり、かなり大きいひずみレベルに分類される。ひずみレベルが小さい場合の装置の精度を検証することは、今後の課題として挙げられよう。

## 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) 光ファイバーを用いた地盤ひずみ計測装置の振動台実験, 柴田俊次郎・本田利器・佐藤忠信, 第36回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1389-1390, 2001年6月
- 5) 佐藤忠信・本田利器・柴田俊次郎・竹川直希: FBG光ファイバセンサを用いた地盤ひずみ計測, 構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集 Vol.1, pp.23-28, 2000年3月
- 6) 佐藤忠信・本田利器・柴田俊次郎・竹川直希: 光ファイバセンサによる地盤ひずみ計測実験, 構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集 Vol.2, pp.35-40, 2000年3月
- 7) 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
- 8) Tadanobu Sato, Riki Honda, Shunjiro Shibata and Naoki Takegawa: 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
- 9) Tadanobu Sato, Riki Honda, Shunjiro Shibata and Naoki Takegawa: Ground Strain Measuring System using Optical Fiber Sensors, Proceedings of the SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Vol.4328, pp.35-46, March 2001