

# 免震層層間変位モニタリングシステムの開発 —ジョイスティック変位計の概要—

## Development of Interlayer Displacement Monitoring System for Seismic Isolation Layer - Outline of Displacement Sensor using a Joystick -

免制震技術部 長谷川 毅 TAKESHI HASEGAWA  
免制震技術部 川島 学 MANABU KAWASHIMA  
免制震技術部 西村 佳也 KAYA NISHIMURA  
免制震技術部 神山 圭佑 KEISUKE KAMIYAMA  
免制震技術部 原田 浩之 HIROYUKI HARADA

免震層の地震時挙動を把握するために、ジョイスティックを使用した変位計を考案した。本変位計は直交する2方向の変位を同時に計測できるものであり、最大で±800mmまでの変位に対応している。本変位計の実用性を確認するために、試作機を製作し、加振実験を実施した。その結果、地震時における免震層の不規則な動きにも十分に追従して変位を計測できることが確認できた。

キーワード：免震建物，地震観測，モニタリング，変位計，ジョイスティック

The authors devised the displacement sensor using a joystick in order to grasp the displacement of the seismic isolation layer during an earthquake. This sensor can measure displacements in two orthogonal directions at the same time, and supports displacements up to ± 800mm. To confirm the utility of this sensor, we made the prototype and conducted vibration tests. As a result, it was confirmed that this sensor can measure the displacement by sufficiently following the irregular movement of the seismic isolation layer during an earthquake.

**Key Words:** Seismic isolated building, Seismic response observation, Monitoring, Displacement sensor, Joystick

### 1. はじめに

地震後における建物の健全性や継続使用の可否を適切に判断する手段として、建物応答のモニタリングシステムは非常に有効である。免震建物の場合、地震時の建物応答は免震層の振動特性に支配されるため、免震層の挙動、特に層間変位を正確にモニタリングできるシステムが必要である。

免震層の層間変位をモニタリングするシステムとしては、板に針で傷をつける簡易な記録計<sup>例えば1)</sup>(以下、けがき式記録計と称する)が多く採用されている。ただし、けがき式記録計で得られるのは層間変位の軌跡であるため、免震層の最大変位やその発生方向はわかるものの、層間変位の時刻歴はわからない。層間変位の時刻歴を得るために、ワイヤー式やレーザー式の変位計を設置

する場合もあるが、これら変位計は1方向の変位しか計測できないため、水平2方向に動く免震層の層間変位を計測するためには最低2台が必要となり、設置空間の確保や経済性に課題が残る。一方、免震層の上下に加速度計を設置し、加速度の時刻歴を数値積分して変位の時刻歴を得る方法もあるが、加速度計の基線ずれや電気ノイズの影響を軽減するための手法の違いによって積分結果に差が出ることや、残留変位が評価できないことがあるため、変位を直接計測する方が良いと考えられる。

本報では、以上の状況を鑑みて開発を進めている免震層層間変位モニタリングシステムの概要を示すとともに、免震層の層間変位を直接計測するために開発した、角度センサにジョイスティックを使用した変位計(以下、ジョイスティック変位計)の構造と加振実験について報告する。

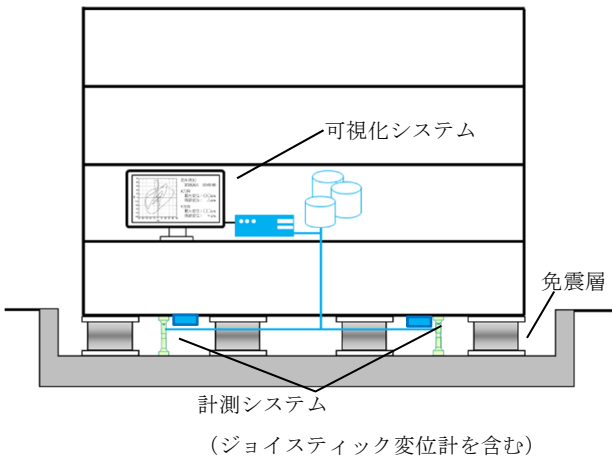


図-1 免震層層間変位モニタリングシステム

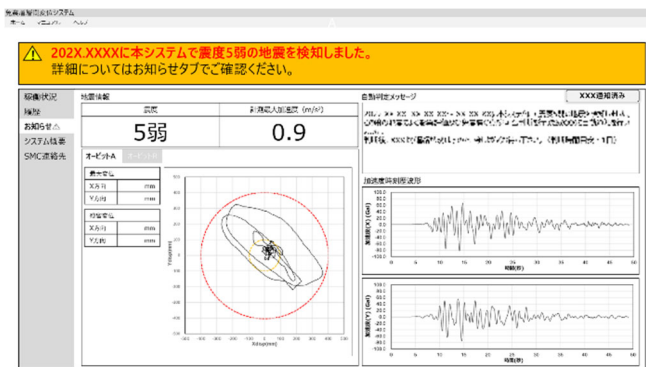


図-2 モニター画面

## 2. 免震層層間変位モニタリングシステム

図-1 にモニタリングシステムの構成例を示す。本システムは計測システムと可視化システムからなり、図-1 の例では、計測システムは層間変位を計測するジョイスティック変位計とそれに付属する制御箱（データ変換器）各2台、免震層下部における地震動の加速度を計測する加速度計1台である。計測システムで測定されたデータは、LAN を介して建物内の可視化システムに送られる。リアルタイムにパソコンの画面に表示され、同時にデータストレージに保存される。可視化システムは、通信機器（ルータ）を介して遠隔地からも即時にデータの確認や分析が可能である。

図-2 に大地震時発生後のモニター画面の例を示す。モニター画面には免震層層間変位の水平2方向の移動軌跡（以下、オービットと称する）、地震動の加速度波形の時刻歴、計測震度と地震動の最大加速度および免震層の最大層間変位が表示される。また、免震層が想定外の動きをした場合にはアラームを発し、行動を促すメッセージを表示するようになっている。

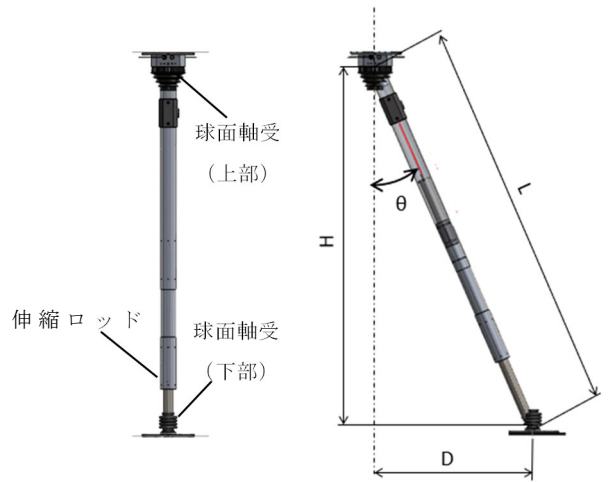
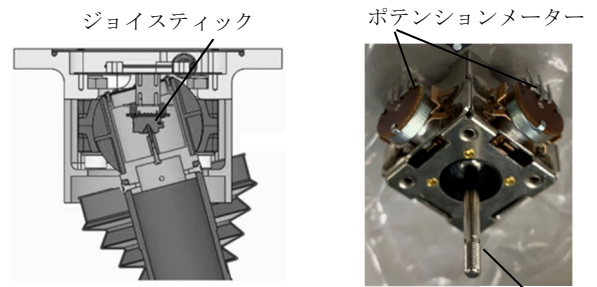
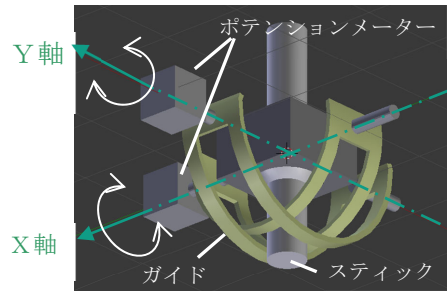


図-3 ジョイスティック変位計 全体図



(a) 球面軸受(上部) (b) ジョイスティック



(c) 模式図

図-4 ジョイスティック概要

## 3. ジョイスティック変位計の概要

図-3 にジョイスティック変位計の全体図を示す。本変位計の主要な構成要素は、ジョイスティック、球面軸受、伸縮ロッドである。水平変位により生じる伸縮ロッドの傾き(角度  $\theta$ )をジョイスティックで計測し、上下球面軸受間の距離  $H$  から幾何学的計算で水平変位  $D$  に換算する。図-4 にジョイスティックの概要を示す。ジョイスティックはスティック、ガイド、ポテンションメーターで構成される。スティックの動きはガイドを介してポテンションメーターに伝達され、直交する2方向の角度情報として出力される。なお、本変位計には計測精度を確保するために、スティックとガイドの間隔を最小にするなどのカスタマイズを施した専用のジョイスティックを使用している。

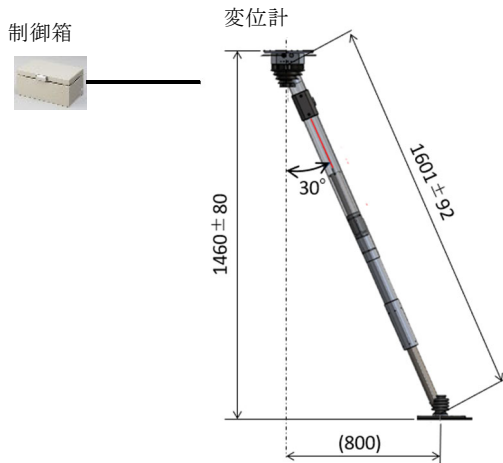


図-5 試験体

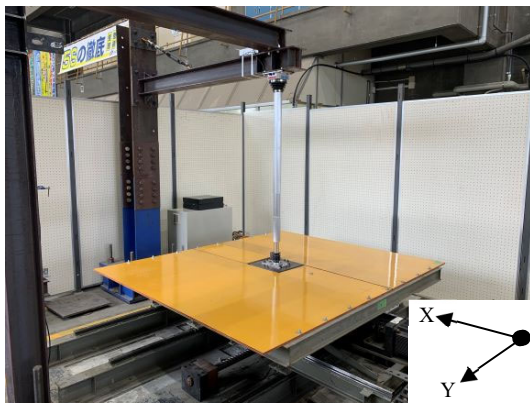


写真-1 試験体設置状

図-4 から明らかなように、ジョイスティックに内蔵されたポテンションメーターの回転軸は常に一定に保たれるため、計測角度  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  はそれぞれ式(1), 式(2)により水平変位  $D_x$ ,  $D_y$  に変換される。

$$D_x = H \tan\theta_x \quad (1)$$

$$D_y = H \tan\theta_y \quad (2)$$

ここで、 $H$  はジョイスティック変位計設置時、つまり水平変位=0 の時の上下球面軸受間の距離である。したがって、免震層の上下間に相対変位が生じれば  $H$  は変化し、計測結果に誤差が含まれる。その影響は小さいと考えられるが、上下間の相対変位の影響を考慮する手段として、伸縮ロッドの伸縮を計測するセンサや  $H$  を補正するプログラムも準備している。

#### 4. ジョイスティック変位計の加振実験

本変位計が免震層の層間変位に追従して無理なく稼働し、所要の精度で変位を計測できることを確認するために、試験体として試作機を製作し、加振実験を行った。

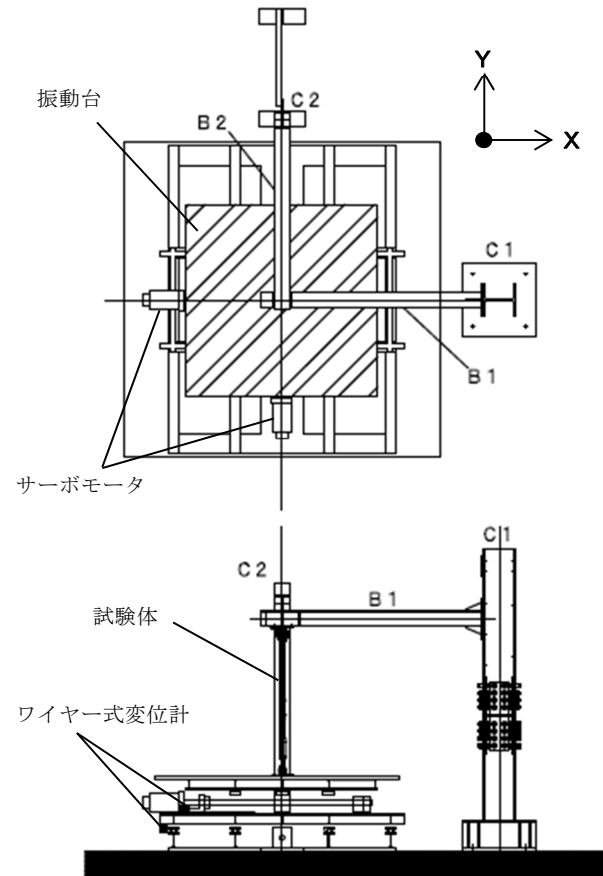


図-6 振動台

##### (1) 試験体概要

図-5 に試験体の概要を示す。試験体の計測レンジは  $\pm 800\text{mm}$  に設定した。ジョイスティックの許容可動範囲は  $\pm 30^\circ$  であるため、水平変位=0 の標準設置時における上下球面軸受間距離は  $1386.5\text{mm}$ 、変位計全高は  $1,460\text{mm}$  とした。制御箱（データ変換器）はサンプリング  $100\text{Hz}$  で AD 変換を行い、角度を変位に変換するのみのシンプルなものとした。

##### (2) 実験概要

写真-1, 図-6 に試験体の設置状況を示す。床に固定した 2 本の H 形鋼柱 (C1, C2) の各々に取り付けた H 形鋼梁 (B1, B2) の交点を不動点とみなし、試験体を梁交点と振動台との間に設置した。振動台の水平変位は振動台のガイドレールに平行に取り付けた 2 本のワイヤー式変位計（東京測器研究所社製, DP-2000G）で計測した。計測データの収録サンプリングは  $200\text{Hz}$  とし、KEYENCE 社製のデータロガー (NR-500) を用いて、ノートパソコンに保存した。なお、振動台の各方向の可動範囲は  $\pm 600\text{mm}$ 、最大速度  $80\text{cm/s}$ 、最大加速度  $800\text{cm/s}^2$  である。

表-1 加振項目

名称		最大変位 [mm]	
		X方向	Y方向
1 方向 加振	X方向加振	540	-
	Y方向加振	-	540
2 方向 加振	円加振	550	550
	地震応答波加振	457	364

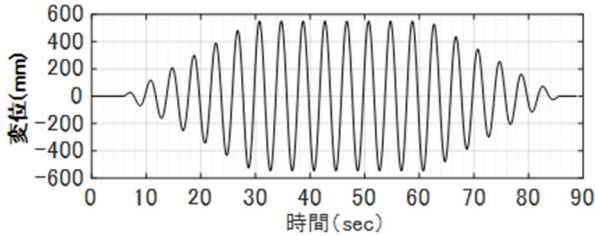
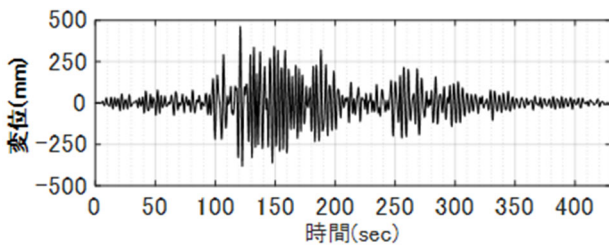
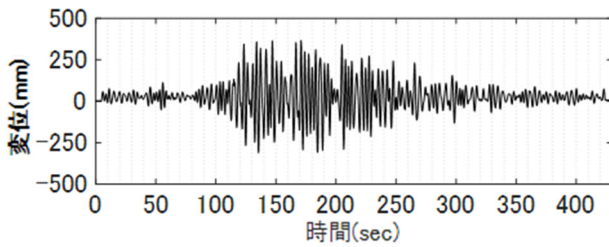


図-7 入力波形 (円加振)



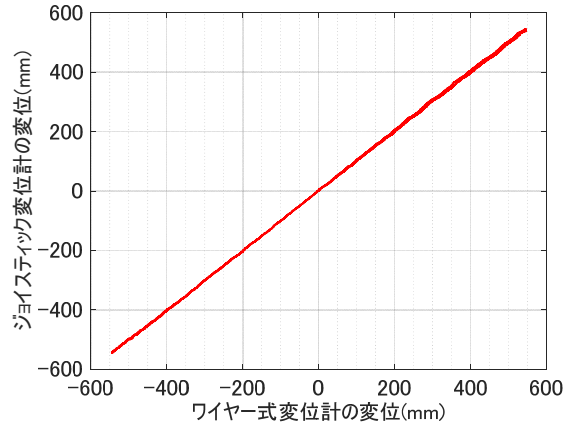
(a) X 方向



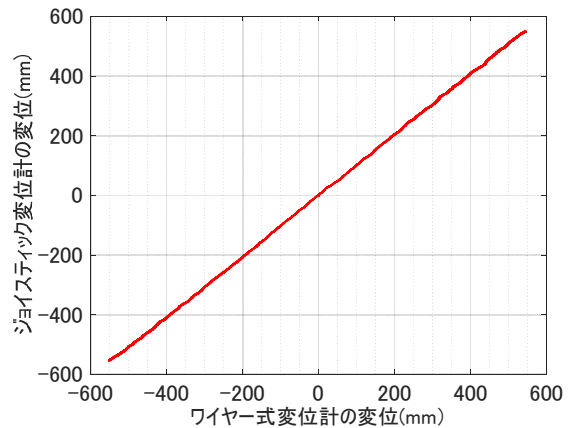
(b) Y 方向

図-8 入力波形 (地震応答波加振)

表-1 に加振項目を示す。加振は 1 方向加振と 2 方向加振の 2 種類とした。1 方向加振では X または Y 方向に -540mm から +540mm まで 470 秒で 2 往復させた。2 方向加振では円加振と地震応答波加振を実施した。円加振では X・Y 両方向に図-7 に示す周期 4 秒の正弦波を位相差 90 度で入力した。最大振幅まで漸増的に 6 サイクル加振した後、最大振幅 (±550mm) で 8 サイクル、その後漸減的に 6 サイクル加振した。地震応答波加振では、愛知県設計用入力地震動研究協議会で作成された三の丸 (NGY) における地表面模擬波<sup>2)</sup>に対する周期 4 秒、減衰定数 20% の 1 質点系モデルの応答変位を、一般的な免震建物の大地震時における免震層の層間変位とみなして入力した。X 方向を EW 方向、Y 方向を NS 方向とした。図-8 に加振波形を示す。X 方向の最大変位は 457mm、Y 方向の最大変位は 364mm であった。



(a) X 方向



(b) Y 方向

図-9 計測結果 (1 方向加振)

(3) 実験結果

a) 1 方向加振

図-9 にそれぞれ X 方向、Y 方向におけるジョイスティック変位計とワイヤー式変位計の計測値の比較を示す。X 方向、Y 方向ともに、両変位計の計測値はほぼ一致していることが確認できる。ここで若干見られる両者の差異の理由としては、ジョイスティック内部において、スティックからガイドを介してポテンションメーターで信号を検出する過程におけるガタ等の影響が考えられる。

b) 2 方向加振

図-10 に円加振時のオービットを示す。図の横軸は X 方向の変位、縦軸は Y 方向の変位である。同図より、赤実線で示したジョイスティック変位計による計測値と青破線で示したワイヤー式変位計による計測値は、試験開始直後の振幅 10mm 時から最大振幅の 550mm 時に至るまでほぼ一致していることが確認できる。

図-11 に円加振時における累積変位の時刻歴を示す。同図より、赤線で示したジョイスティック変位計による累積変位と青破線で示したワイヤー式変位計による累積変位の時刻歴波形はほぼ一致していることが確認できる。

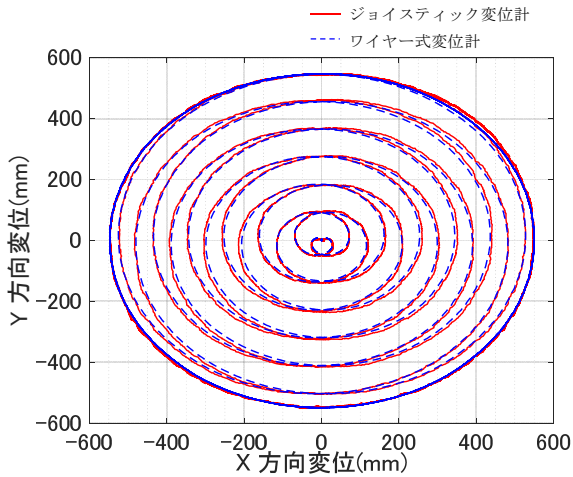


図-10 オービット (円加振)

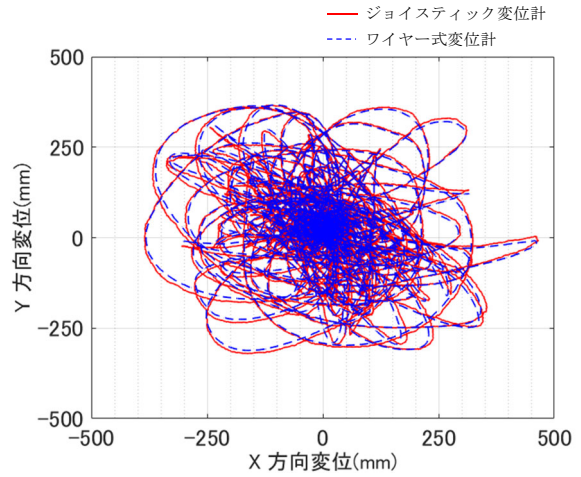


図-12 オービット (地震応答波加振)

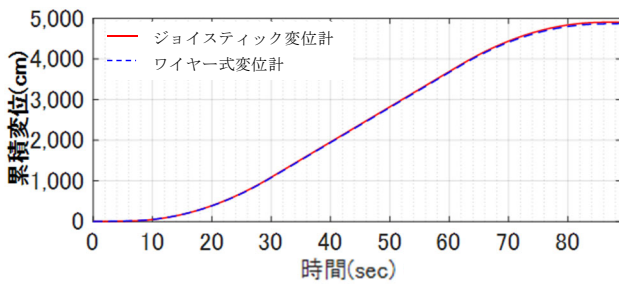


図-11 累積変位 (円加振)

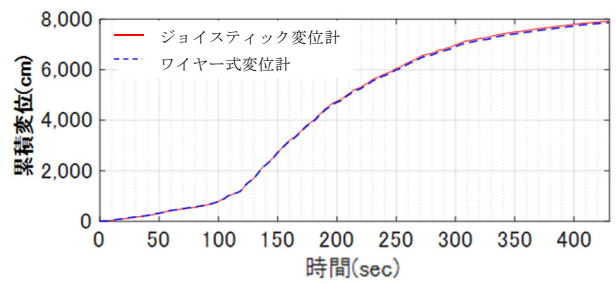


図-13 累積変位 (地震応答波加振)

表-2 試験結果

		最大変位 [mm]		累積変位 (2方向合成)			
		ジョイスティック変位計 [mm]	ワイヤー式変位計 [mm]	ジョイスティック変位計 [cm]	ワイヤー式変位計 [cm]	変位差 [cm]	変位差 / ワイヤー式変位計 [%]
円加振	X方向	549	550	4,906	4,870	35	0.7
	Y方向	551	550				
地震応答波加振	X方向	464	462	7,910	7,861	50	0.6
	Y方向	366	367				

加振開始から終了までの累積変位量は、ジョイスティック変位計で4,906cm、ワイヤー式変位計で4,870cmであった。

図-12に地震応答波加振時のオービットを示す。図の横軸はX方向の変位、縦軸はY方向の変位である。同図より、両者の計測値はほぼ一致しているものの、X方向最大値(+462mm)近傍におけるY方向の値など、一部の箇所では整合性がやや悪くなっていることが確認できる。その理由としては、加振波形の不規則性に起因する、時刻歴波形では確認できない程度のごくわずかな位相のずれが考えられる。

図-13に地震応答波加振時における累積変位の時刻歴を示す。同図より、赤線で示したジョイスティック変位計による累積変位と青破線で示したワイヤー式変位計による累積変位の時刻歴波形はほぼ一致していることが確認できる。加振開始から終了までの累積変位量は、ジョイスティック変位計で7,910cm、ワイヤー式変位計で7,861cmであった。

表-2に各加振時における最大変位と累積変位の比較を示す。最大変位の差は最大で2mm、累積変位の差は最大で50cmであり、本試験の範囲では、ジョイスティック変位計はワイヤー式変位計と同程度の計測精度を有しているといえる。

## 5. おわりに

免震層の地震時挙動を把握するために、ジョイスティック変位計を開発した。試作機を製作し、加振実験を行った結果、地震時の不規則な動きにも十分に追従し、所要の精度で変位を計測できることが確認できた。

今後は、遠隔より免震層の挙動を確認するとともに、免震建物の健全性と継続使用の可否を判断することのできるユーザーインターフェースを構築し、ジョイスティック変位計を用いた免震層間変位モニタリングシステムを完成させる所存である。

## 参考文献

- 1) 株式会社免震テクノサービス社オービター,  
<http://menshin-techno.co.jp/orbiter/>
- 2) 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成，南海トラフ地震に対する地震動評価報告書，2018