

振動台実験による MEMS 傾斜計の加速度応答振幅特性の検討

日本大学 正会員 ○仲村 成貴 元日本大学学生 非会員 柿原 英人
西松建設 非会員 新井 寿昭

1. はじめに

これまでの地震被害において、上部構造の損傷が軽微であっても、杭基礎が損傷したため取り壊された事例があった^{例えば1)}。上部構造に比べて基礎構造の被害を把握することは容易ではなく、モニタリングを活用した迅速な被害把握が期待される²⁾。基礎構造のモニタリング指標には加速度やひずみに加えて、変位や傾斜角構造物の状態を示す指標として有効とされる³⁻⁴⁾。ところで、近年流通している高精度な MEMS 傾斜計の特性を活かして、傾斜計を加速度計測に活用しようとする事例も報告されている⁵⁾。そこで本研究では傾斜計を活用した杭基礎モニタリングシステムの開発を念頭に置いて、振動台実験に基づいて MEMS 傾斜計の加速度応答特性の検討を通じて、傾斜計の性能を把握することを試みた。

2. 傾斜角と加速度

図 1(1)に示すように、静止した斜面上に傾斜計を設置したとき、傾斜計の Y 軸（斜面と平行な軸）方向に生じる加速度 a_y は、重力加速度 g と傾斜計で計測される傾斜角（斜面の傾斜角） θ を用いて次式で示される。

$$a_y = g \cdot \sin \theta \quad (1)$$

図 1(2)に示すように、水平面上に設置された傾斜計に加速度 a が水平方向（y 軸）に生じるとき、重力加速度 g 、傾斜計で計測される見掛けの傾斜角 φ には次式が成立する。

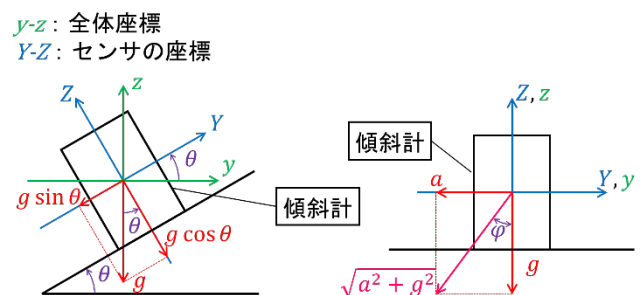
$$a = g \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

ここで、 θ と φ が小さく、 $\tan \varphi \approx \sin \theta$ が成立する範囲では、式(1)と式(2)は等しく、 $a_y = a$ となる。よって、水平面上に設置した傾斜計の出力（傾斜角） φ から水平加速度を算出することができる。

3. 実験概要

表 1 に使用センサの主な諸元を示す。傾斜計の分解能について、式(2)より傾斜角から換算した加速度

は $1.71 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ であり、サーボ加速度計とほぼ同等である。振動台実験では、写真 1 に示すように両センサを振動台に固定し、水平 1 軸方向に定常加振した際の応答を計測した。加振振動数は 0.2～2.0Hz では 0.1Hz 間隔、2.0～10Hz では 1.0Hz 間隔とした。加振振幅については、傾斜計の測定範囲の加速度換算値 0.86 m/s^2 を超えないように振動台を制御した。サンプリング周期を 10ms、計測時間を 81.92s として、各加振振動数の応答を 4 回計測した。なお、加速度計の後段ではカットオフ 20Hz の 3 次バターワース型ローパスフィルタを介した。



(1)斜面上に設置した場合 (2)水平面上に設置した場合
図 1 傾斜計に作用する加速度

表 1 センサの主な諸元

センサ	加速度計	傾斜計
種別	サーボ型	MEMS型
製造会社	サンシステムサプライ	マコメ研究所
型番	SSS00	CM-961A
感度	2 V/G	0.4 V/degree
分解能	$5 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$	0.001 degree
測定範囲	$\pm 50 \text{ m/s}^2$	$\pm 5.0 \text{ degree}$



(1)加速度計 (2)傾斜計 (3)振動台

写真 1 振動台とセンサ

キーワード MEMS 傾斜計, 加速度, 傾斜角, 振動台実験, 杭基礎, モニタリング

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部まちづくり工学科 TEL03-3259-0689

4. 実験結果

傾斜計で得られた傾斜角応答を式(2)により加速度へ換算し、サーボ加速度計による加速度応答と比較した。図2に振動台を静止させた状態で計測した両センサ応答のパワースペクトルを示す。使用した傾斜計の自己ノイズは加速度計よりやや大きい程度である。なお、傾斜計にはカットオフ1Hz±30%の1次RCローパスフィルタが内蔵されている。

(1) 加速度時刻歴とパワースペクトル：

両センサによる定常加振時の応答計測結果の一例として、(1)0.5Hz加振時、(2)1.0Hz加振時、(3)5.0Hz加振時の加速度応答時刻歴を図3に、パワースペクトルを図4にそれぞれ示す。両図(1)より、加振振動数0.5Hzでは加速度計と傾斜計とで概ね類似した応答が得られた。両図(2)では、0.5Hz加振時と比べて加速度計よりも傾斜計の出力振幅は小さく、位相遅れも増加した。両図(3)では、加速度計に比べて傾斜計の出力振幅は非常に小さく、加振振動数を捉えられなかった。振動数の増加に伴い、加速度計に比べて振幅は低下し、位相遅れが増大する傾向が確認された。

(2) 振幅比：

各加振振動数における振幅比として、加速度計に対する傾斜計のパワースペクトル振幅比の平方根を評価した。各加振振動数での振幅比を図5に示す。図中にはカットオフ1.0Hz±30% (0.7, 1.0, 1.3Hz)の1次ローパスフィルタゲインを実線で示す。2Hz以下では、振幅比はカットオフ1.0Hzのローパスフィルタゲインに近似した。2.0~4.0Hzでは、振幅比は内蔵RCフィルタのカットオフ1.0Hz±30%範囲内に得られ、4.0Hz超では急激に減少する結果が得られた。

5. おわりに

振動台実験に基づいてMEMS傾斜計の応答特性を検討した結果、加速度を指標として振幅特性を把握することができた。今後は位相特性についても検討する予定である。

謝辞 振動実験に際しては、(株)サンシステブサプライ・小幡聡氏のご協力をいただいた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2016年熊本地震災害調査報告，2018。
- 2) 崔井圭他：杭基礎の間接／直接総合ヘルスマonitoringに関する振動台実験，日本建築学会論文集，第76巻，第661号，pp.471-480，2011。
- 3) ベターリビング：基礎構造の耐震診断指針（案），2013。
- 4) 杉崎光一他：慣性計測を用いた鉄道橋モニタリングのためのセンサ評価，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，

Vol.69, No.2, pp.315-328, 2013。

- 5) 西川隼人他：高精度傾斜センサを用いた振動測定装置の試作，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71, No.4(地震工学論文集第34巻)，pp.L995-L1003，2015。

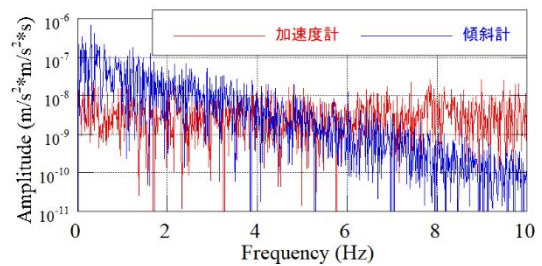


図2 自己ノイズ

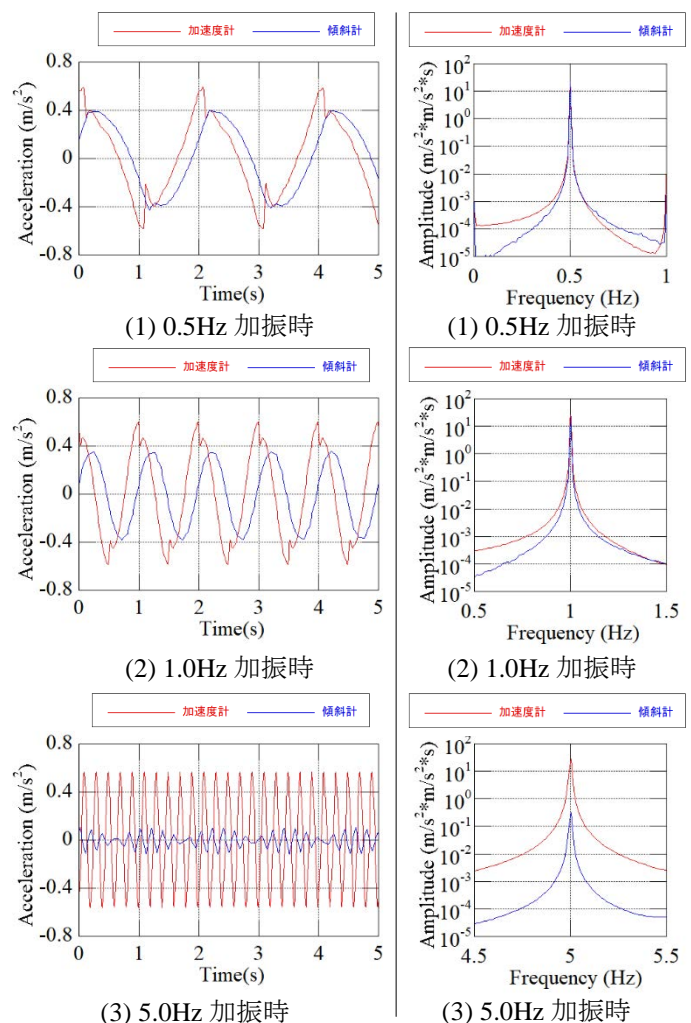


図3 加速度応答時刻歴

図4 パワースペクトル

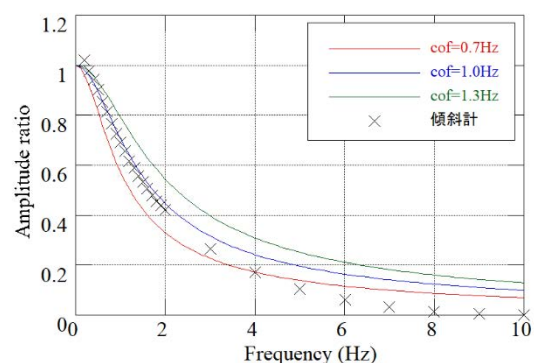


図5 振幅比