

傾斜角と加速度の同時モニタリングシステム開発に向けたセンサ特性の把握

日本大学 学生会員 ○柿原 英人

日本大学 正会員 仲村 成貴

西松建設 新井 寿昭

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震では、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。地震後の建造物の健全性を把握するために、上部構造に加えて杭基礎のモニタリングも重要とされる¹⁾。近年、建造物のモニタリングにMEMS加速度計を利用した事例が増えているが、一般にMEMS加速度計は低周波数帯域の計測精度が低いとされ²⁾、加速度信号を積分して算出する変位の推定精度に大きな影響を及ぼす。一方、現在流通している比較的安価なMEMS傾斜計には、サーボ加速度計に匹敵する高感度なものもあり、低周波数帯域において高精度に計測できる可能性がある。そこで、低周波数領域でも高精度に杭基礎の傾斜角と加速度をモニタリングできるシステムの開発を目指し、振動台実験に基づいてMEMS傾斜計の加速度応答特性を把握することを本研究の目的とする。

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 、重力加速度 g 、斜面の傾斜角 θ には次の関係が成立する。

$$\sin \theta = \frac{a_y}{g} \quad (1)$$

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。

$$\tan \varphi = \frac{a}{g} \quad (2)$$

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)より $a_y = a$ となる。よって、理論上は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

写真1にセンサの外観、表1にセンサの主な諸元を示す。図2に示すようにセンサを振動台に設置し、定常

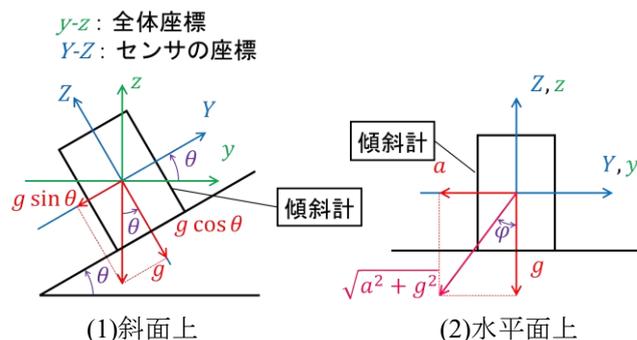


図1 傾斜計に作用する加速度



(1)加速度計 (2)傾斜計

写真1 使用センサ

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
感度	2V/G	0.4deg/V
分解能	$5 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$	0.001deg
測定範囲	$\pm 5.0 \text{ m/s}^2$	$\pm 5.0 \text{ deg}$

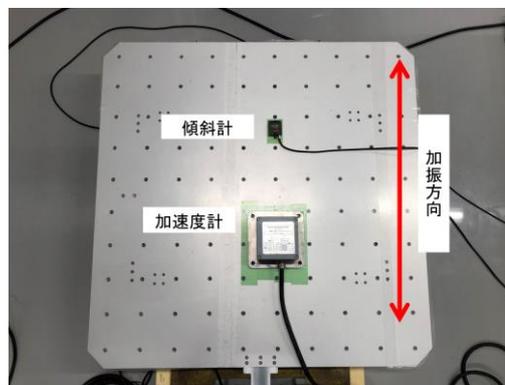


図2 振動台とセンサ

キーワード 杭基礎, 傾斜角, 加速度, 振動台実験, 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 E-mail : csei18025@g.nihon-u.ac.jp

加振時の応答を計測した。加振振動数 f を $0.2 \sim 2\text{Hz}$ では 0.1Hz 間隔, $2 \sim 10\text{Hz}$ では 1Hz 間隔で変化させ, 各加振振動数においてサンプリング周期を 10ms , 計測時間を $32/f$ [s]³⁾とした実験ケース 1 セットを 4 回実施した。計測システムを図 3 に示す。加速度計の後段ではカットオフ 20Hz のローパスフィルタを介している。傾斜計の出力(傾斜角)を式(2)により加速度へ換算し, サーボ加速度計の出力と比較した。

4. 実験結果

(1)時刻歴応答

各センサの加速度応答の一例として, 図 4 に(1)静止時, (2) 0.5Hz 加振時, (3) 1.0Hz 加振時, (4) 5.0Hz 加振時の応答をそれぞれ示す。同図(1)より, 高周波成分は傾斜計よりも加速度計で目立つ。両者の RMS 値を算出したところ, 傾斜計の RMS 値は加速度計の約 0.88 倍であった。使用した MEMS 傾斜計による自己ノイズレベルはサーボ加速度計とほぼ同等といえる。同図(2)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。同図(3)では, 0.5Hz 加振時と比べて加速度計よりも傾斜計の振幅は小さく, 位相遅れも増加した。同図(4)では, 加速度計に比べて傾斜計の振幅は非常に小さく, 加振振動数を捉えられていない。振動数の増加に伴って, 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)RMS 比

傾斜計と加速度計の出力から, それぞれ RMS 値を求め, 加速度計に対する傾斜計の比を RMS 比と定義した。各加振振動数での RMS 比を図 5 に示す。 $0.2 \sim 0.5\text{Hz}$ での RMS 比は概ね 0.8 以上であり, 加速度計とほぼ同じ振幅が傾斜計で得られた。しかし, 0.9Hz 以上では振動数の増加に伴い RMS 比が急激に低下し, 4Hz 以上では約 0.1 に漸近する。図中にはカットオフ 0.7Hz および 1.3Hz の 1 次バターワースフィルタ振幅を実線で示す。RMS 比は概ねフィルタに沿っており, 傾斜計に内蔵されたローパスフィルタを含む出力振幅の特性を概ね把握することができた。

5. おわりに

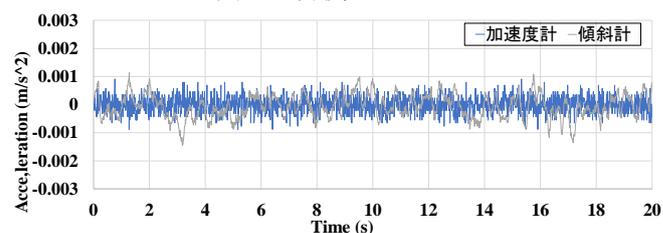
振動台実験に基づいて傾斜計の加速度応答を検討した結果, 振幅特性を概ね把握することができた。今後は振動数領域での分析を実施して振幅に加えて位相特性についても検討する予定である。

参考文献

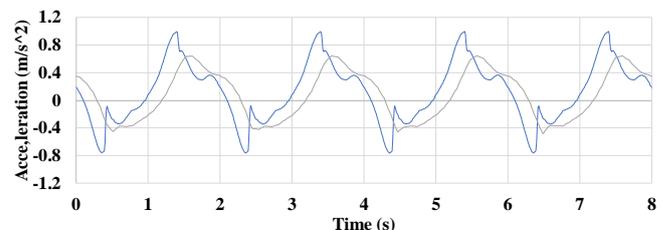
- 1) 崔井圭, 浜本卓司, 小豆畑達哉, 野口和也, 森田高市, 飯場正紀: 杭基礎の間接/直接総合ヘルスマonitoringに関する振動台実験, 日本建築学会論文集, 第 76 巻, 第 661 号, pp.471-480, 2011.
- 2) 杉崎光一, 阿部雅人, 奥水聡: 慣性計測を用いた鉄道橋モニタリングのためのセンサ評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.2, pp.315-328, 2013.
- 3) 花田和史: 地盤-構造物系の動特性と動剛性の同定法, 電力中央研究所総合報告, UO5, 1988



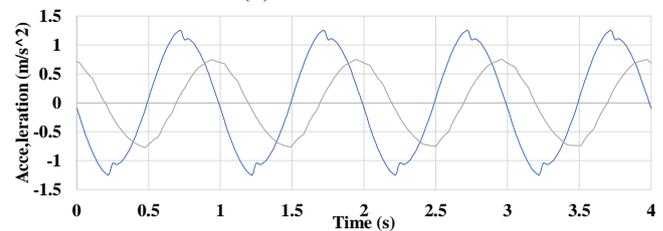
図 3 計測システム



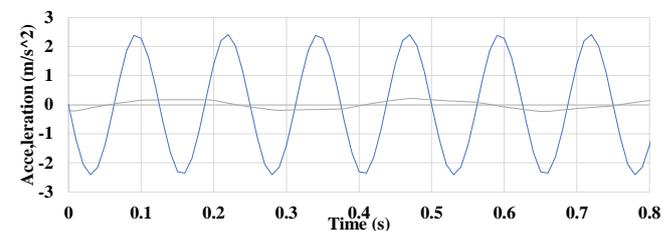
(1) 静止時



(2) 0.5Hz 加振時



(3) 1.0Hz 加振時



(4) 8.0Hz 加振時

図 4 加速度応答時刻歴

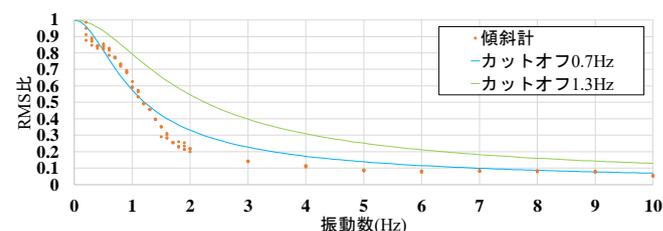


図 5 RMS 比