

MEMS センサを用いた構造物の振動特性の評価に関する検討

金沢大学 大学院自然科学研究科 学生会員○石倉 昇
金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系 正会員 池本 敏和, 村田 晶
石川工業高等専門学校 建築学科 正会員 小川 福嗣

1. はじめに

地震被害の軽減のためには構造物の耐震性の評価が必要であるため、近年、構造物の実際の性能や健全性を診断する構造ヘルスマモニタリング¹⁾への関心が高まっている。しかしモニタリングに用いる振動計が高価かつ設置にスペースを要することにより、構造物に用いられる例は限られている。本研究では、安価で小型なセンサを研究対象とし、その性能を常時微動計測や微小振動実験から確かめ、構造物の地震時安全性の評価に用いられるかを検討する。

2. 本研究で対象とした計測機器及び解析概要

本研究では、小型センサとして半導体の技術 (MEMS : Micro Electro Mechanical Systems) により制作された傾斜センサ (村田製作所 SCL3300-D01 写真-1) と、水晶微細加工技術 (QMEMS : QUARTZ MEMS) を用いた 3 軸加速度計 (EPSON M-A351AU 写真-2) を評価対象のセンサとする。以下、村田製作所社製の傾斜センサを MEMS センサ、EPSON 社製の 3 軸加速度計を QMEMS センサと称する。機器類の性能を比較するために携帯用振動計東京測振 SPC-51A 及びサーボ型速度計 (東京測振 VSE-15D, 写真-3 参照, 加速度計測) を用いる。(以下 A センサと称す。)



写真-1 MEMS センサ 写真-2 QMEMS センサ



写真-3 サーボ型速度計

性能比較を行うにあたり、まず振動台上に各計測機器を設置し微小な振動でも計測できるかの予備実験を行う。昨年は伝統木造建物の計測を行うことで、各センサの適応性を評価した²⁾。本稿では RC 造を対象とし、構造物の固有振動数や減衰定数などの振動特性を求める。計測はサンプリング周波数 100Hz で計測時間は約 30 分間とする。得られた波形データの中から安定している 1 区間 2048 点, 4096 点, 8192 点, または 16384 点を 1 単位とする 10 区間を抽出し、高速フーリエ変換を行い、フーリエ振幅を求める。構造物の応答は各階での入力波やノイズの影響を受けるため、最上階の応答を最下階の応答で除し、基準化することで応答倍率を求め、バンド幅 0.4Hz の Parzen Window で平滑化する。また、減衰定数を算出するためにハーフパワー法³⁾を用いる。本稿では紙面の都合上、1 単位 8192 点の結果について言及する。

3. 振動台を用いた微小振動実験

振動台上に各センサを設置し、1~3Hz の間において振動振幅が約 0.1~0.2cm/s² の正弦波で振動台を微小に揺らす。A センサによる加速度計測と各センサから求められる振動数や減衰定数を比較することで各振動数帯において正確に振動特性を評価できるか検証する。使用した振動台は永久磁石振動加振器を使用した振動試験装置 (サンエス TBH-1K-2D) を用いた。これらの計測機器は全て A センサのマウンタ上に固定し計測を行った。一例として、2Hz 正弦波入力による加速度フーリエスペクトルを図-1 に、各振動数を対象に得られた振動数と減衰定数を表-1 に示す。QMEMS センサは A センサと同程度にフーリエスペ

表-1 振動数(上)と減衰定数(下)

	1Hz	2Hz	3Hz
MEMSセンサ	1.00	2.01	3.01
QMEMSセンサ	1.00	2.00	3.00
サーボ型速度計	1.00	2.00	3.00
	1Hz	2Hz	3Hz
MEMSセンサ	3.48	2.42	1.18
QMEMSセンサ	3.48	1.76	1.18
サーボ型速度計	3.48	1.76	1.20

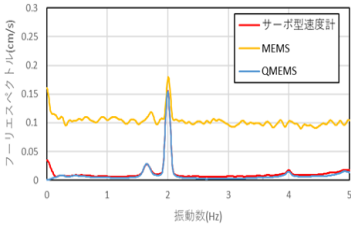


図-1 2Hz 入力でのフーリエスペクトル

クトル, 振動数, 減衰定数を求められている。振幅が約 0.2cm/s^2 程度の振動（常時微動レベル相当）であれば, $1\text{Hz}\sim 3\text{Hz}$ の固有振動数を有する構造物はセンサによる振動特性の評価が可能であると考えられる。一方, MEMS センサにおいては, A センサと QMEMS センサに比べ明確ではないもののピーク的位置を読み取ることができ, 振動数の評価は可能であるが, 減衰定数は評価できないことがわかる。この原因として MEMS センサはスペクトルのピークが明確に現れていないためと考えられる。

4. RC 造への MEMS センサ類の適用

対象建築物である金沢大学角間キャンパス自然科学 2 号館は, 地上 7 階・地下 2 階の RC 造である。1 階床と 7 階床に計測機器を設置し, 微小振動の測定を行った。一例として, 微小振動計測結果よりデータ数 8192 点を 1 単位とした, H/H スペクトル比による応答倍率と固有振動数, 減衰定数の振動特性を図-2, 表-2 にそれぞれ示す。なお, 今回得られた微動の振幅レベルは振動台による微小振動よりも小さい値であった。図に示すように各計測機器から求めた固有振動数は一致しており, 固有振動数については評価できると考えている。しかし減衰定数については, A センサを基準とした場合 2~3% 程度の誤差が生じた。この原因として, 応答倍率のグラフの形状が A センサのものと比べ QMEMS は鋭く,

MEMS センサは緩やかであることから, ハーフパワー法から減衰定数を算出するため誤差が生じたと考えられる。そこで, 各計測機器における 1 階と 7 階のフーリエスペクトルを図-3, 図-4 にそれぞれ示す。7 階でのフーリエスペクトルのピーク値

は, QMEMS センサは $0.061(\text{cm/s})$, A センサは $0.067(\text{cm/s})$ であり誤差 $0.006(\text{cm/s})$ と少ないが, 1 階でのピーク値については QMEMS センサで $0.006(\text{cm/s})$, A センサで $0.027(\text{cm/s})$ となり, QMEMS センサにおけるピーク値が小さい。このことが QMEMS センサの応答倍率が大きくなった原因である。また, MEMS センサでは 7 階でのフーリエスペクトルのピーク値が $0.091(\text{cm/s})$ であるのに対して, 1 階でのピーク値は $0.073(\text{cm/s})$ と大きいので, 応答倍率の最大値が小さくなった。これらは自己ノイズレベルが A センサと比べ QMEMS センサは小さく, MEMS センサは大きいために生じたものであると考えられる。

5. まとめ

振動台上の各種センサの実験において, 高性能計測機器 (A センサ) を基準として, 2 つの MEMS センサの性能を比較した。その結果, 波形振幅が約 $0.1\sim 0.2\text{cm/s}^2$ 程度の微小な振動において, QMEMS センサは $1\text{Hz}\sim 3\text{Hz}$ の固有振動数を有する構造物の振動特性を高性能な機器と同程度に評価することができた。一方, MEMS センサでは固有振動数は評価できるが, 減衰定数は評価できない結果となった。また RC 造を計測対象に常時微動相当の振動振幅の計測を実施し, 小型センサと A センサの性能比較を行った結果, A センサとほぼ同程度に振動特性を評価することができたと考えている。今後は, 木造や RC 造以外の構造物においても振動特性を把握できるか検討する。

参考文献

- 1) 小川修一, 亀田浩紀, 佐藤宏, 三田彰: 構造ヘルスモニタリングの実用化に関する研究—データモデルを含む基盤システムの構築—, 日本地震工学会論文集, 第 9 巻, 第 5, pp. 79-93, 2009. DOI https://doi.org/10.5610/jaee.9.5_79
- 2) 米田涼華, 池本敏和, 小川福嗣, 石倉昇, 宮島昌克: 小型 MEMS センサを用いた伝統木造建物への振動計測の試み, 土木学会中部支部研究発表会, 2021. 3
- 3) 日本建築学会: 建築物の減衰, pp. 103-106, 日本建築学会, 2000. 10

表-2 振動特性

	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
サーボ型速度計	1.7	11.7
MEMSセンサ	1.7	8.0
QMEMSセンサ	1.7	9.0

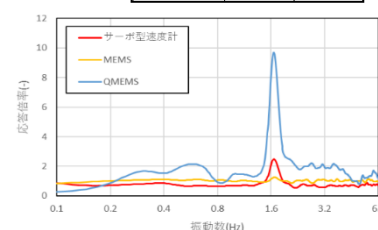


図-2 RC 造での応答倍率

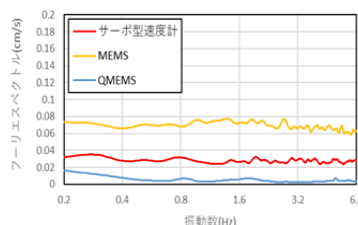


図-3 1階でのフーリエスペクトル

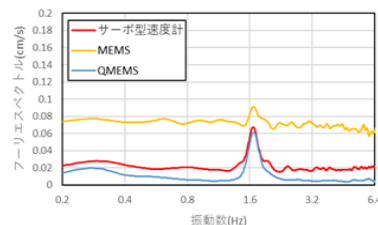


図-4 7階でのフーリエスペクトル