

免震建物に設置してあるけがき式変位計の時間特性を補充する 加速度センサーマイコンボードの開発と四国に設計・建設された免震建物への実装

高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科
まちづくり・防災コース（建築構造・地震工学）准教授 池田 雄一

1. はじめに

地面から建物を絶縁した免震建物は、大きな地震が起こった際でも建物の揺れを大幅に抑えることができるため、多くの建物用途に採用されている。免震建物の地震応答特性を取得する場合には、地震計を設置することが一般的であるが、地震計を設置している免震建物はほとんどない。この大きな要因の一つは、地震計本体や設置費用、維持管理費用に高額なコストがかかるためである。そのため、比較的安価で容易に免震建物の地震応答特性を取得することのできるけがき式変位計を設置している免震建物が多い。しかし、けがき式変位計は、時間特性を観測できないという大きな欠点がある。

そこで、本報告では、加速度データを取得し、2回積分して変位データと、時間特性の両方を取得できる簡易で安価な加速度センサマイコンボード（以後、加速度センサ）を開発した。この開発した加速度センサについて、振動台実験を行い、その計測精度を検証した。そして、高知県内の既存免震建物の14棟への設置を行った。

なお、本研究は、一般社団法人四国クリエイト協会の『2024年度建設事業に関する技術開発支援』に関する助成を受けて実施いたしました。

2. 研究方法

図1に加速度センサの計測精度を確かめる振動台による実験の様子を示す。実際に記録されている地震のデータを用いて振動台に入力する地震波を作成する。

地震波は地表と相対加速度の2種類を各地震波で作成する。相対加速度とは地震時の建物自体の揺れを表したものであり、図2に示すように本体の加速度センサが地表の揺れを、衛星の加速度センサが建物の揺れの大きさを記録している。振動台実験から取得した加

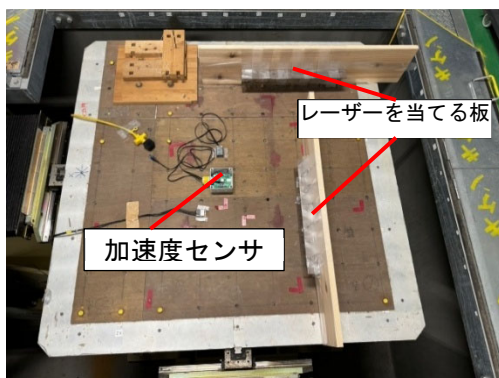


図1 実験全景

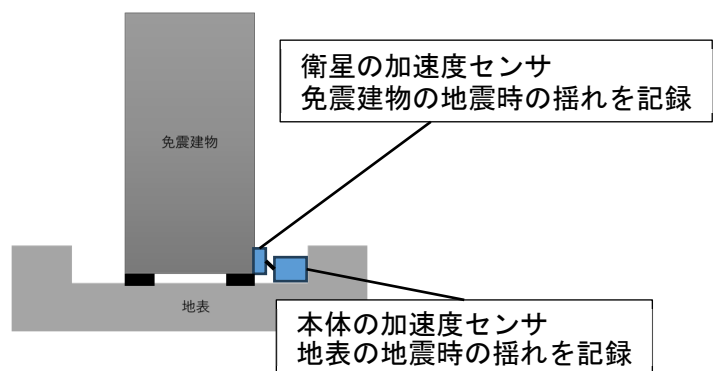


図2 地表と相対加速度の仕組み

速度データを2回積分し変位を求め、レーザー変位計の変位と比較して加速度センサの計測精度の検証を行った。

振動台実験に用いる強震動は、2024 年能登半島地震の珠洲市正院町と 1995 年兵庫県南部地震の鷹取、2016 年熊本地震・本震の宮園、2023 年トルコ・シリアの地震 3123 の地表と、それぞれ同じ地震の免震建物の相対加速度の合計 8 つの強震動データを用いて振動台実験を行った。

3. 振動台実験による加速度センサの計測精度検証

地表の強震動の中でレーザー変位計と加速度センサの誤差が一番小さかった鷹取と、相対加速度の強震動の中で誤差が一番大きかった宮園の震動台実験の変位軌跡結果を図 3 及び図 4 に示す。

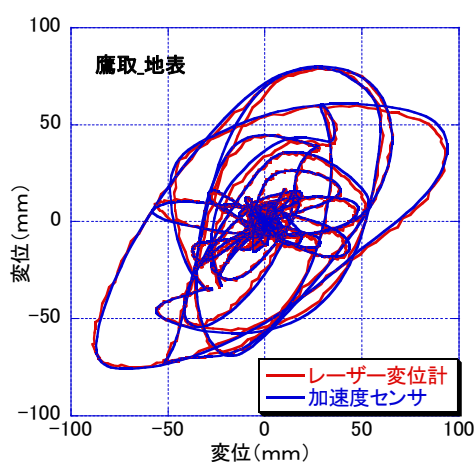


図 3 鷹取_地表 (1995 年兵庫県南部地震)

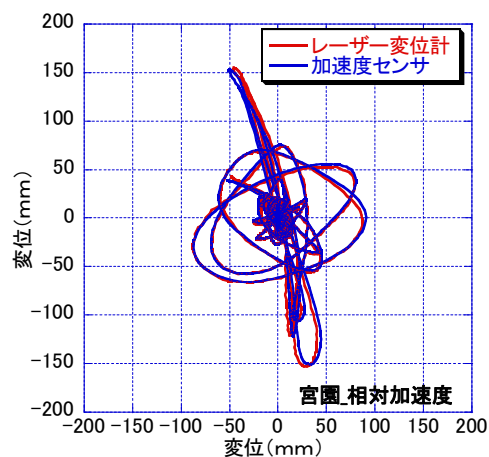


図 4 宮園_相対加速度 (2016 年熊本地震本震)

図 5 には鷹取の地表の振動台 X 軸に関するレーザー変位計の変位時刻歴の絶対値と、レーザー変位計と加速度センサの変位誤差の絶対値を併記して示す。

図 5 から X 軸に関しては、誤差が約 18mm となった。なお、Y 軸に関しては約 26mm となっている。図 3 の鷹取の地表の変位軌跡を見ると少し誤差はあるが、概ね一致していることがわかる。レーザー変位計の変位時刻歴と、レーザー変位計と加速度センサの誤差を分析してみると、レーザー変位計の変位が大きい箇所において誤差が大きくなっていることがわかった。

図 6 に示す宮園の X 軸のレーザー変位計の変位時刻歴の絶対値と、レーザー変位計と加速度センサの変位誤差の絶対値については、相対加速度のレーザー変位計と加速度センサの誤差は X 軸が約 25mm で Y 軸が約 32mm となっている。レーザー変位計と加速度センサの誤差は、8 つの強震動データの中において、熊本地震・本震の宮園の相対加速度の Y 軸 32mm が一番の大きな誤差となった。しかし、先の図 4 の宮園相対加速度の変位軌跡を見ると、こちらも概ね一致していることがわかる。

また図 6 のレーザー変位計と加速度センサの誤差比較を見ると、図 5 の鷹取の地表と同じように変位が大きくなっている箇所でレーザー変位計との誤差が大きくなっていることがわかる。

振動台実験を行った 8 つの強震動のレーザー変位計と加速度センサの誤差をまとめたものを表 1 に示す。

実験を行ったほとんどの強震動において、レーザー変位計の変位と加速度センサの変位の誤差の値が最大20～30mmとなっていることがわかる。表1から最大誤差は約30mm程度であり、免震層内に置かれたけがき式変位計の時間特性を補完するには十分であると考えられる。

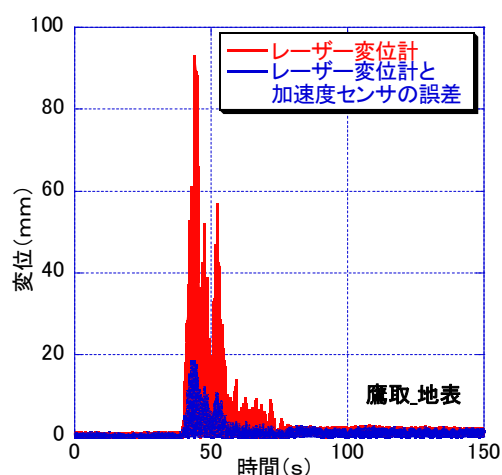


図5 レーザー変位計と誤差比較 X 軸（絶対値）
鷹取_地表（1995 年兵庫県南部地震）

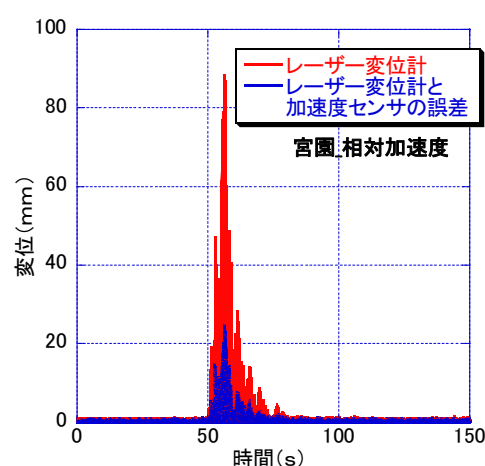


図6 レーザー変位計と誤差比較 Y 軸（絶対値）
宮園_相対加速度（2016 年熊本地震）

表1 レーザー変位計と加速度センサの変位誤差

	最大値X軸 (mm)	平均値X軸 (mm)	最大値Y軸 (mm)	平均値Y軸 (mm)
正院 (地)	25.39	2.05	26.94	2.30
正院 (相)	24.47	2.70	27.46	2.14
鷹取 (地)	18.4	1.23	25.85	0.81
鷹取 (相)	18.37	1.58	26.14	1.09
宮園 (地)	29.35	1.08	27.87	1.07
宮園 (相)	24.6	0.75	32.18	1.07
トルコ (地)	29.97	1.05	28.57	1.47
トルコ (相)	23.26	1.13	28.32	1.15

4. 高知県内に設計・建設された免震建物への加速度センサの実装

4. 1 四国4県の免震建物の設計・建設状況

免震構造を採用した免震建物の四国4県における建設状況を把握する目的として、本研究室では数年前から、現地調査を行ってきた。

現地調査においては、免震建物の建設場所・階数・免震層設置位置（免震層が基礎位置にある基礎免震、免震層が中間層にある場合は中間層免震として分類）・上部構造種別（RC造、S造）、そして計測可能であれば免震層クリアランスを計測した。

四国に設計・建設されている免震建物については、文献やインターネットサイトから四国4県の免震建物分布状況を把握して、免震建物の現地調査を行った。現地調査を行った四国4県の免震建物は合計96棟である。

4. 2 加速度センサの免震建物への設置と設置作業上の留意点

4. 2. 1 設置協力依頼と免震層内の下見

加速度センサの設置協力を高知県内の免震建物の所有者にお願いし、了承を得られた免震建物については、設置作業の前に、免震層内部の下見を行った。加速度センサの設置が可能な場所を検討し必要な道具などを事前に用意することができるため設置時の作業時間の短縮につながった。

4. 2. 2 設置場所の選定

加速度センサは、非常用電池を内蔵しているが、通常時は電気供給が必要となる。そのため免震層内において、電源に近い場所を選んだ。また湿気の多い免震層では、延長コードの利用、コンセントカバーを使用するなどの方法で防水対策して設置を行った。

4. 2. 3 設置方法

加速度センサの設置方法は、図7に示すように、アイソレータの上部に衛星の加速度センサ、下部のコンクリート部分に開発した加速度センサを固定する。これにより上部のセンサで建物の揺れを、下部のセンサで地面（地表）の揺れを記録することで、免震層相対変位を求めることができる。また、このときコンクリートに直接貼り付けることができないため、アセトン液でコンクリート表面の埃・汚れを取り、スチレンボードを土台として強力な 接着ボンドで加速度センサをコンクリート面に固定した。

表2に加速度センサを設置した高知県14棟の免震建物の構造、階数及び免震形式を示す。



図7 加速度センサを実際に設置した様子

表2 加速度センサを設置した免震建物構造・階数・免震形式

No.	建物名称	設置	構造	階数	免震形式
1	民間分譲マンション1	○	RC造	14	基礎免震
2	民間分譲マンション2	○	RC造	12	基礎免震
3	民間分譲マンション3	○	RC造	13	基礎免震
4	民間分譲マンション4	○	RC造	15	基礎免震
5	民間分譲マンション5	○	RC造	14	基礎免震
6	民間分譲マンション6	○	RC造	14	基礎免震
7	市町村庁舎1	○	RC造	4	中間層免震
8	市町村庁舎2	○	RC造	7	基礎免震
9	市町村庁舎3	○	S造	7	基礎免震
10	私立病院	○	RC造	6	基礎免震
11	私立中学校・高等学校	○	RC造	6	基礎免震
12	高知県施設	○	上部SRC造、下部RC造	3	中間層免震
13	私立専門学校	○	S造	8	基礎免震
14	地方施設	○	RC造+W造	6	中間層免震

また、表2（No.6）分譲マンション6では、アイソレータ周辺の防腐作業があるとのことから、加速度センサを作業の妨げにならない場所に配置する必要があったため、図8に示すようにアイソレータ上部のコンクリートに本体の加速度センサを設置して建物の揺れを、壁面は建物ではなく地面の擁壁であったため、衛星の加速度センサをここに取り付けることで地面の揺れを記録できるようにした。通常であれば、本体加速度センサを基礎側（地面）に設置し、衛星加速度センサを免震建物上部構造側に設置するところを、逆の配置をとった。

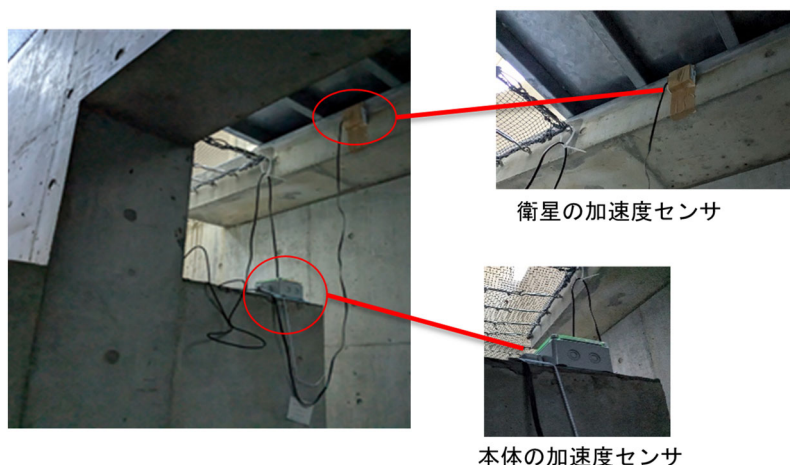


図8 分譲マンション6の加速度センサの設置時の様子

4. 2. 4 留意点

加速度センサを設置するにあたり、全体の作業時間は、約2時間ほどかかり、免震層内は風通しが悪く湿気が多いため、夏季には熱中症対策が必要となった。

4. 3 加速度センサ設置後判明した問題点とその解決策

4. 3. 1 小動物による加速度センサの誤作動

表2, No.8, 市町村庁舎2に設置した加速度センサには、LTE（インターネット環境を通してデータの取得が可能）を付加している。この機能により、この市町村庁舎2に設置した加速度センサから、2024年8月26日に、0.4G（400cm/s²）超の瞬間的な加速度の揺れを感知した記録が得られた。しかしこの日は、高知県では地震は発生していなかった。市町村庁舎2に問い合わせたところ、免震層においても作業も特に行われていないという返答をもらった。このことから、小動物による衝突や接触の衝撃を、加速度センサが感知したと考えられた。そして実際に免震層に点検に行った際、センサ周辺に鳩の糞のようなものも多く確認できた。現在は、図9に示すように、センサの周辺にプラスチック製の鳥よけスパイクとカラスと猫を模した鳥よけを配置し対策を施している。



図9 設置した鳥よけとスパイク

4. 3. 2 配線コードの切断

表2（No.5）分譲マンション5では、設置済みの加速度センサを点検した際に、加速度センサの電源コードが、切断されたケースがあった。マンションの管理人に連絡し確認したところ、子供の狸のような動物の出入りが何度か見られたとのことだった。この物件の加速度センサについては、新品の加速度センサを再設置し、センサ周辺にホームセンターで購入した、図10に示すように簡単な小動物対策を施して対処した。

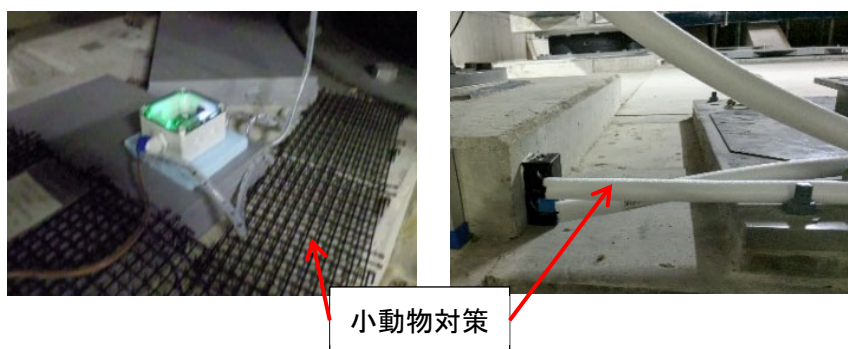


図10 再設置した加速度センサ

5. まとめ

本報告では、免震建物に設置してあるけがき式変位計の不足している時間特性を補充するために開発した加速度センサマイコンボードの精度の確認を、高知高専所有の3次元振動台を用いて8つの強震動を入力して振動実験を行った。

そして、その加速度センサを県内の既存の免震建物14棟に設置した。

以上から、以下の知見を得た。

- 1) 振動実験において比較を行うレーザー変位計のローパスフィルター設定は、少しガタツキはあるものの100Hzに設定することで加速度センサとの誤差が小さくなる。
- 2) 加速度センサとメーカー製品の加速度計は、振動実験を複数回行えば応答変位の結果にずれが生じた。変位算出解析を行う際のバンドパスフィルター設定を $T=0.01-10.0$ 秒から $T=0.01-5.0$ 秒に変更することによって、概ねそのずれがなくなることがわかった。
- 3) 8つの強震動のレーザー変位計と加速度センサの応答変位の比較を行った。変位軌跡は概ね、一致しており、レーザー変位計と加速度センサの応答変位の誤差は、最大30mm程度となった。
- 4) 加速度センサは、現在県内14か所の免震建物に取り付けを行った。今後の加速度センサの設置については、建物管理者から、設置許可を得られた免震建物への取り付けを行いながら、免震建物への加速度センサの設置を増やして行く。
- 5) 加速度センサについては、誤検知や電気コードの小動物による切断が生じたため、小動物対策は行いながら、定期的な点検が必要である。
- 6) 14棟の免震建物に加速度センサを設置した経験から、免震建物毎に設置に関する問題点が生じた。この問題点を随時解決することによって、対処方法や設置作業の時間短縮につながった。

1)～3)から、この加速度センサは、けがき式変位計による地震観測の時間特性を補完計測できる精度を有していると判断できる。

また、4)～6)の設置留意点と対策を行うことによって、免震建物の地震時の応答観測が継続できると判断している。

参考文献

- 1) 森田慶子，高山峯夫，大野敦弘，石橋宏一郎：免震建物の地震時挙動に関する研究，その2 熊本市内免震建物のけがき記録，日本建築学会学術講演梗概集，pp761-762，2020.9
- 2) 上田真也，池田雄一：免震建物に設置してあるケガキ式変位計の時間特性を補充する加速度センサマイコンボードの開発と高知県内の免震建物への実装，高知高専研究報告，2025.3（掲載予定）

謝辞

本報告に関する振動実験及び加速度センサの設置に関しては、一般社団法人四国クリエイト協会の『2024年度建設事業に関する技術開発支援』に関する助成を受けて実施いたしました。加速度センサの設置許可に関しましては、免震建物管理者の多く方々の協力の下に、行われました。

以上、諸機関及び諸氏に関してここに記して、深甚の謝意を申し上げる次第です。