

積雪時の地震の際に倒壊したカーポートに関する基礎的検討*

弘前大学 片岡俊一

弘前大学工学部地球環境防災学科 岸 恵里菜

1. はじめに

2021年2月13日に福島県沖で起きた地震（マグニチュード7.3）の際に、山形県内では最大震度5弱を観測し、20棟を越えるカーポートが倒壊した¹⁾。震度5弱はそれほど強い地震動ではなく、倒壊にはカーポートの屋根に積もっていた雪の影響が少なからずあると思われるが、カーポート本来の振動性状が不明であり、積雪がどの程度の影響であったかの定量的検討は行われていない。

青森県は積雪期が長く、政府地震本部がまとめた全国地震動予測地図を見ると、青森県内において今後30年以内に震度5弱以上の揺れに見舞われる確率は非常に高い。更に、弘前市の市街地を見る限り、問題となる構造形式のカーポートは普及しているようである。つまり、山形県において生じたカーポートの倒壊と同様の被害は今後青森県でも起こり得る。カーポートが倒壊し、自動車が利用できなくなると、避難や移動、あるいは自動車内での避難生活が困難になり、個人の財産の消失ではすまされない。

我々は積雪時の地震によるカーポートの倒壊原因を探り、将来に備えるために、被害状況だけではなく被害当時の山形県の地震記録と気象記録を収集した。さらに、青森県弘前市周辺ではあるがカーポートの振動性状、問題となるカーポートが存在する割合などを調べている。以下にはカーポートの振動性状と被害を受けたカーポートに近い地点の強震動の特徴を述べる。

2. 被害概要

山形県がまとめたカーポートの被害¹⁾と震度をまとめて表1に示す。震度計が被害を受けた地点に近接して設置されている訳ではないが、山形大学の三辻和弥教授は震度計の位置と被災建物の位置を確認しており、三辻によると中山町、村山市、河北町は被災地と震度計の位置は近いとのことである。参考のために、被害が発生した市町と震度計、K-NETの位置、AMeDAS観測点の位置を図1に示す。

さらに、地震時の積雪の影響を確認するために、山形県内の代表的なAMeDAS観測点の被害当日の日最大積雪深を最近の被害地震の日付けのものと比べて表2に示す。2011年東北地方太平洋沖地震や2022年3月16日の地震でも山形県内は震度5程度の揺れであったが、カーポートの倒壊は報告さ

表1 カーポートの被害とその市町村の計測震度

市町名	被害棟数	計測震度	震度計の位置
中山町	11	4.7	中山町長崎元町
村山市	6	4.2	村山市中央
東根市	2	4.2	東根中央
米沢市	1	4.8	米沢市林泉寺
寒河江市	1	3.7	寒河江市中央
河北町	1	4.4	河北町谷地

* A fundamental study on collapsed carports during snowy earthquake by Shunichi Kataoka and Erina Kishi

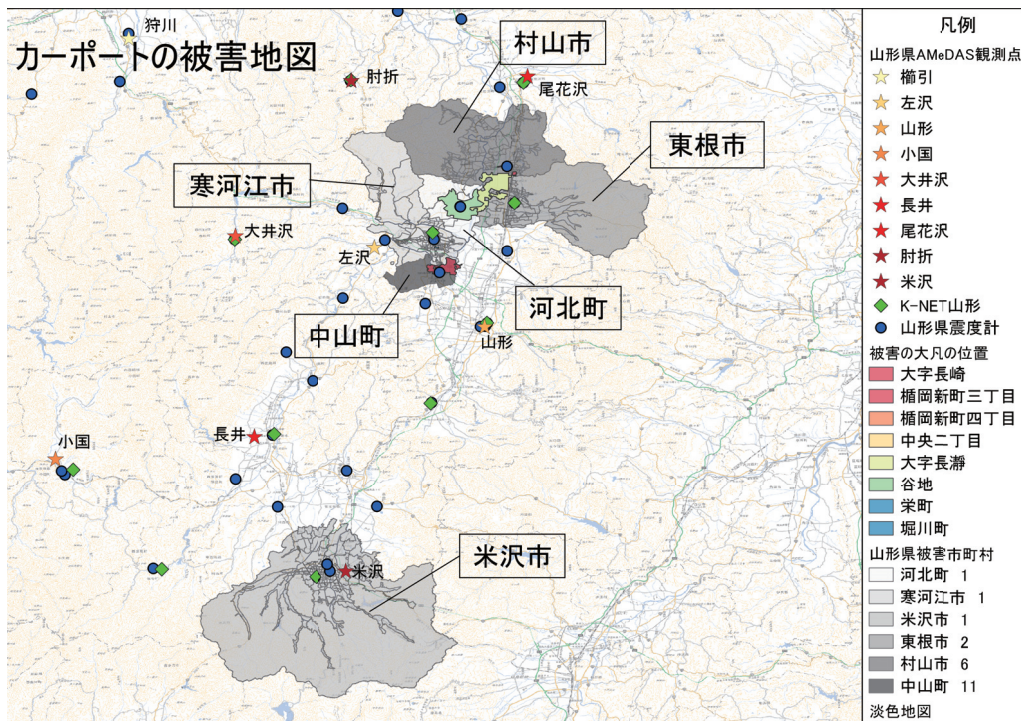


図1 山形県内でカーポートが倒壊した市町村の位置および強震計，AMeDAS観測点の位置

れていない。地震が起きた日付けで比較すると、2021年2月13日の日最大積雪深は多くの点で最大であることが分かる。

3. 問題となるカーポートの構造

倒壊の原因の一つとして

カーポートの構造形式が挙げられている。三辻による報告²⁾や新聞記事内での解説あるいは私信を総合すると、倒壊したカーポートは間口から見る方向（梁間方向）にはフレーム構造となっているが、奥行き方向（桁行方向）にはそのフレームが並べられて屋根部材が置かれているだけのものである。場合によっては、奥行き方向のフレーム同士を梁に比べて極めて小さな断面の部材で繋いでいるものも見られるが、販売パンフレットではこの水平材はオプションの扱いである。このような構造では、梁間方向と桁行方向で振動特性が大きく異なることが想像される。

破壊は柱脚頭部の接合部分に見られるので曲げ剛性が足りないことが直接の原因であるが、方向によって振動特性が異なることも被害に結びついた可能性がある。

表2 最近の被害地震の際のAMeDAS観測点における日最大積雪深

観測点名	2021年2月13日	2022年3月16日	2011年3月11日
左沢	73	41	65
尾花沢	165	102	151
米沢	99	77	84
肘折	227	235	322
山形	35	6	19

4. 振動実験

このような構造の固有振動数を求めるために、図2に示すカーポートを用いて振動試験を行った。スパン方向をX方向、桁行方向をY方向とする。

用いた振動計は3成分の加速度が計測できるMEMSセンサーで、電池と合わせて12gと軽量なものである。計測レンジを $\pm 2G$ (19.6m/s/s)とし、サンプリング振動数を100Hzとしてデータを取得した。分解能は12bitである。センサーはAndroidデバイスとBluetooth接続され、計測の制御やデータ保存はデバイス側で行う。

今回の実験では道路よりのフレームを構成する2本の柱(図中の柱1, 柱2)および、奥行き方向に1つはなれた柱(図中の柱3)の高さ約180cmに位置に各1台のセンサー(図ではLogtta)をPPベルトで柱に固定した。図に赤矢印で示したように高さ205cm程度の部分を人力で衝撃を加えた。衝撃は各柱毎にX方向、Y方向に対して行った。

柱1と柱4を打撃した際の衝撃波形をフーリエ解析して得られたフーリエスペクトルを図3に示す。顕著なピークは、4.2Hz, 4.8Hz, 2.7Hzに見られ、それはセンサーによらないことが多い。各図の一つのスペクトルが他と異なっているが、これは打撃した柱に取り付けたセンサーの信号に対応するものであり、打撃による衝撃で固定が緩んだものと考えている。さらに、詳細に見ると、図の凡例ではS3としてある柱4に取り付けたセンサー(図3ではLogtta3)のピーク振動数は他のものに比べてやや高い。

ピーク振動数と振動モードとの関係は次のように解釈している。X方向、Y方向のいずれの打撃でも4.8Hz付近でピークとなるが、詳細に見るとこのピークは柱3をX方向に打撃した場合には励起されておらず(図の(d))、柱1をX方向に打撃した際のセンサー3では励起されていない(図の(a))。このことから、この振動数はねじれ振動に対応したものと考えられる。ねじれ振動モードであるから、端部に位置する柱1を打撃した場合には、センサー1, 2はX方向、Y方向で

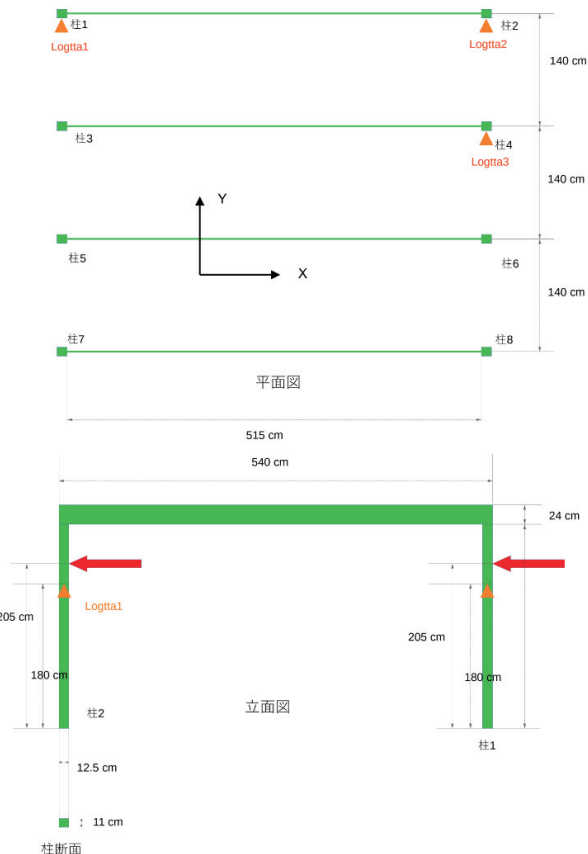


図2 振動実験を行ったカーポートの平面図と立面図

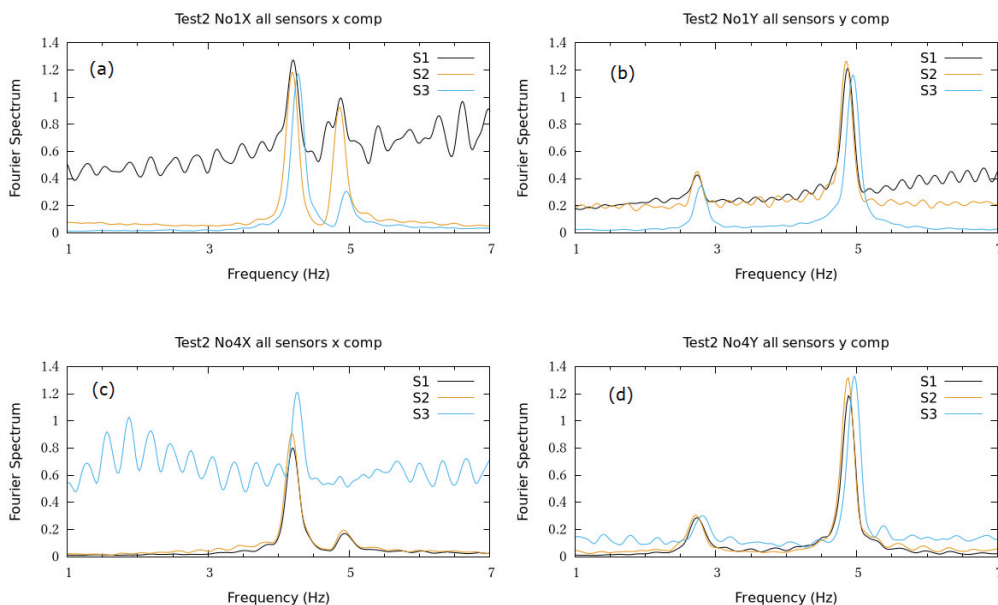


図3 衝撃波形のフーリエスペクトル。上段にある(a)と(b)は柱1を打撃した際のもので、(a)はX方向、(b)はY方向。下段は柱4を打撃した際のもので、(c)はX方向、(d)はY方向。

あっても振動が励起され、振れ中心に近い柱3に設置したセンサー3ではその影響が出にくい。柱3をX方向に打撃すると、振れ中心方向に打撃したことになるので、Y方向の振動は励起しないが、Y方向に打撃すると振れ中心に対して回転させる動きになるので、Y方向の振動が励起されるのであろう。さらに、ねじれ振動が顕著である事は、屋根材の水平剛性が有効的にカーポートの振動に寄与していることを表している。

上述の振動数をねじれ振動と考えると、X方向の固有振動数は4.2Hz、Y方向のそれは2.7Hzとなる。柱幅は間口の見つけで12.5cm、奥行きに11cmとそれほど異ならないので、水平方向のピーク振動数が大きく異なる理由は、構造形式の違いと考えるべきであろう。さらに、柱4に取り付けたセンサー3のピーク振動数が他に比べてやや高いのは両側の柱に拘束されている為であろう。

減衰定数を求めるために、センサー3のX方向、Y方向の振動データに対して、ピーク振動数付近のみをバンドパスフィルターで取り出し、自己相関関数を求めた。これを1自由度系の減衰と見なして、減衰定数を求めた。自己相関関数とそれにフィットさせた1自由度系の減衰振動とを図4に示す。X方向の減衰定数は0.7%、Y方向は2.9%となった。水平2成分で大きく異なっているがその理由は不明である。

5. 地震動の特徴

カーポートが倒壊した2021年2月の地震の際には積雪深が深かったことは前述したが、本節では地震動強さについて、最近の被害地震と比較してみる。被害が多かった中山町の震度計データ

は気象庁によって公開されている³⁾。それに加え、K-NET 米沢の記録⁴⁾を用いて、応答スペクトルを求めてみた。地震動とカーポートの設置方向との関係は分からないので、水平2成分の記録を用いて、水平面内の最大応答値とする二次元応答スペクトルで比較する。さらに、前述したように水平2成分で減衰定数が大きく異なるが、本報告では1%とした。破壊w考えるために、慣性力に対応する絶対加速度応答と変形に対応する相対変位応答を図5に示す。横軸はフーリエスペクトルと対応させるために振動数としている。

図の上段にある中山町の記録では赤線で示した2021年2月13日の記録は3Hz弱で他の地震動よりも強いことが分かる。前述した弘前のカーポートが中山町にあった場合は、他の記録に比べて大きな応答になったことになる。一方で、カーポート上に雪が堆積している場合には固有振動数が低下するので、逆に応答は3つの記録で最も小さいことになる。

下段にあるK-NET 米沢の記録では赤線で示した地震動は2011年のものより小さく、2011年と2021年の積雪深はほぼ同程度なので、米沢でのカーポートに倒壊には積雪の影響があった可能性が高い。

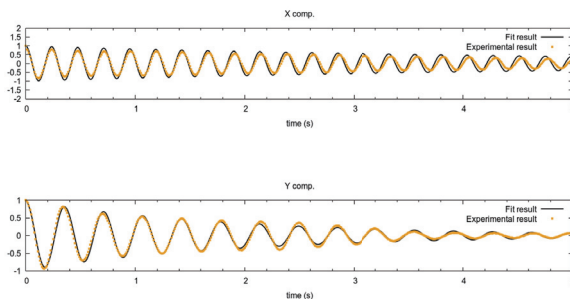


図4 バンドパスフィルターを施した振動データから求めた自己相関関数（黄色の線）とそれにフィットさせた1自由度系の減衰振動（黒色の線）

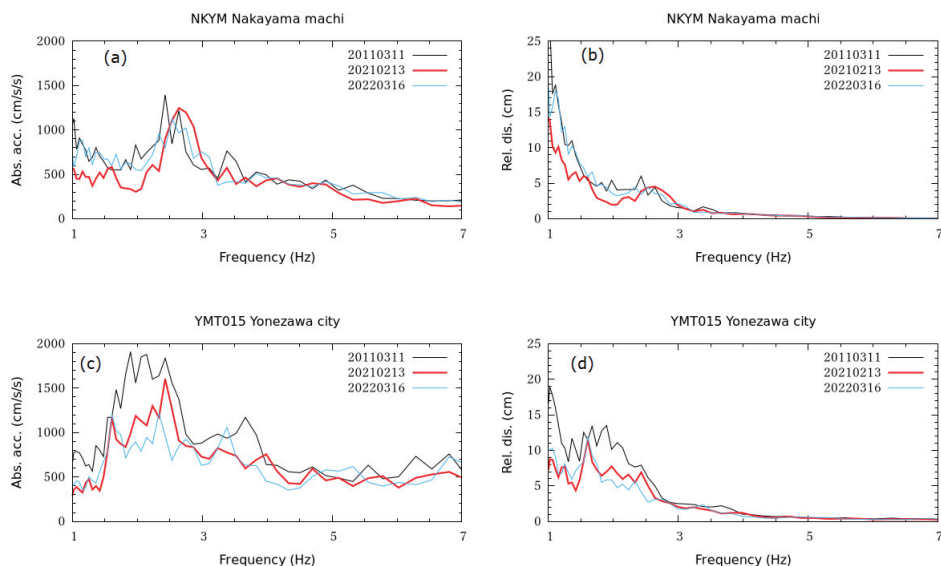


図5 中山町の震度計と K-NET 米沢の記録から求めた応答スペクトル。上段：中山町，下段：K-NET 米沢。左側が絶対加速度応答，右側が相対変位応答。減衰定数はいずれも1%。

6. まとめ

2021年2月13日に福島県沖で起きた地震の際に、山形県内で20棟を越えるカーポートが倒壊したことから、本報告では被害の概要と震度、積雪深のデータを整理した。さらに、弘前市内にあるカーポートの振動実験を行った。その結果、梁間方向と桁行方向で固有振動数が大きく異なっており、奥行き方向の振動数が間口方向の振動数よりも低いことが分かった。また、カーポートは振れ振動が励起され安いことも分かった。さらに、最近の被害地震の地震動と強さを比較してみた。K-NET米沢の記録は最近の被害地震の記録に比べて強くないことから、カーポートの倒壊に積雪の影響があることが示唆された。一方で、被害がもっとも多かった中山町の記録は最近の被害地震の記録に比べて強いものであり、積雪深の影響は判断できなかった。

参考文献

- 1) 山形県防災くらし安心部：福島県沖を震源とする地震に関する被害状況について（2/15 12:00 まとめ）
- 2) 三辻和弥：2021年2月13日福島県沖地震における建物被害への表層地盤の影響について、第56回地盤工学研究発表会，13-9-5-03，2021年7月
- 3) 気象庁 令和3年（2021年）2月13日23時07分 福島県沖の地震
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/2102132307_fukushima-oki/index.html（2023年1月15日閲覧）
- 4) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004