

壁長と壁倍率から評価した伝統的木造家屋の耐震性

—被害を受けた熊本県益城町の伝統的木造家屋の熊本地震強震動に対する地震応答性状—

Earthquake resistance of traditional wooden house evaluated from length of wall and coefficient effective wall-length (Kabe-bairitsu)

- Earthquake response properties of traditional wooden house in the Mashiki where the strong ground motion of the 2016 Kumamoto earthquake was input -

池田雄一¹

Yuichi Ikeda

¹高知工業高等専門学校准教授 ソーシャルデザイン工学科 まちづくり防災コース
(〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

Assoc. Prof., National Institute of Technology, Kochi College, Dept. of Social Design Engineering,
Architecture and Civil Engineering and Disaster Prevention Course

Focus was given to the investigation of a traditional wooden house in a field investigation by the author for building damage in Mashiki after the 2016 Kumamoto Earthquake. The vibration analysis model was applied from the length of the wall and the coefficient effective wall-length (Kabe-bairitsu). Earthquake resistance was evaluated through earthquake response analysis.

Keywords: *The 2016 Kumamoto Earthquake, traditional wooden house, length of wall and coefficient effective wall-length (Kabe-bairitsu)*

1. はじめに

日本列島では、どの地域においても地震の強い揺れによる建物の被害が生じる可能性がある。例えば、1995年兵庫県南部地震、最近においては2016年熊本地震及び2018年北海道胆振東部地震が挙げられ、内陸地震の強震動による建物被害が日本各地において発生している。特に、1995年兵庫県南部地震と2016年熊本地震では、強震動による木造家屋の被害が甚大となった¹⁾²⁾。

ところで、国や地方自治体が作成する防災・減災計画において、想定地震の強震動による建物被害に用いられる木造家屋の被害率は、過去の地震被害を参考に算定されるが、しばしば1995年兵庫県南部地震における地震建物被害のデータが用いられるケースが多く見受けられる。過去の地震被害に関する木造家屋の被害データは、木造家屋被害を想定する上において貴重であり、マクロな木造家屋の被害を把握するには有効な情報となる。しかし、木造家屋の耐震性は、建設年、工法種類、維持管理の違いによって左右され、地震に対する被害の情報を蓄積することが大切である。

そこで本論文では、2016年熊本地震の著者による益城町の建物被害の現地調査を行った調査区域において、平面図の聞き取り調査を行った7棟のうち、1棟の伝統的木造家屋に着目する。この伝統的木造家屋の壁長と壁倍率から振動解析モデルを作成して、地震応答解析による伝統的木造家屋の耐震性と、熊本地震の強震動に対する地震応答性状を把握した。

在来軸組構法の木造家屋に比べ、一般的に土壁を有する伝統的木造家屋は比較的剛性や耐力が小さく、耐震性は低い。このような伝統的木造家屋に熊本地震の強震動が作用したときの地震応答性状を把握することは、今後の伝統的木造家屋の地震被害評価の一つの技術資料になると著者は考えている。なお、本論文では、壁が土壁、屋根が瓦屋根で構成された在来軸組式の古い木造家屋を伝統的木造家屋として取り扱っている。

2. 2016年熊本地震における被害木造家屋の目測調査

(1) 調査区域における伝統的木造住宅の被害について

著者は、本震の約一週間後、図1に示す熊本県益城町の主要地方道28号線（熊本高森線）以南と秋津川に挟まれた区域の目測による建物の被害状況を確認し、そして、102棟の木造家屋の被害及び被害が生じた方向を詳しく調査して報告した³⁾。

本論文の調査対象区域の中において、古い伝統的木造家屋の被害が数棟確認された。その被害写真の一例を図2に示す。古い伝統的木造住宅は、地震後益城町では図2のように、屋根を残して柱・壁は押しつぶされていた。図1に示す調査区域における倒壊・全壊被害方向を調査した102棟の被害木造家屋のうち7名の被災者に、被害木造家屋の平面図の聞き取り調査を行って、7棟の被害木造家屋の平面図を再現した⁴⁾。その7名のうち1人であるA氏の被害木造家屋が、今回本論文にて取り扱う伝統的木造家屋である。

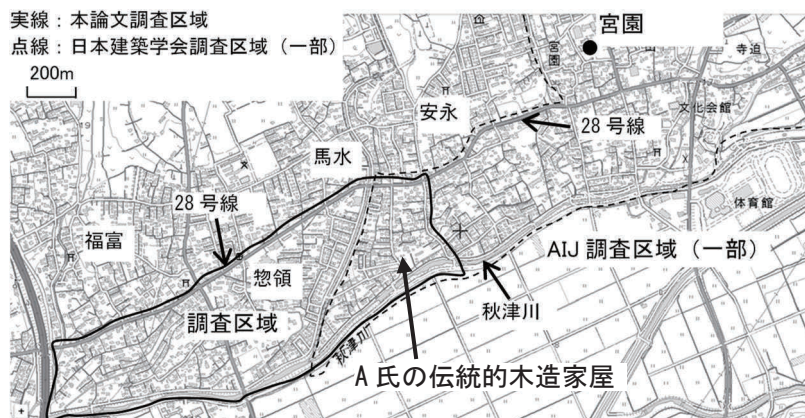


図1 本論文の調査範囲と宮園観測強震点(国土地理院地図に加筆)



図2 伝統的木造家屋の被害

(2) 被害を受けた伝統的木造家屋の平面図

図3にA氏邸の被害木造家屋の平面図を、またA氏より提供された被害写真を図4～図7に示す。この木造家屋の建設年は、1945年（昭和20年）と古い。1992年に屋根瓦の葺き替え改修工事を行っている。さらに2008年に1階東側の離れ部分の増築を行っている。1階中心部には、和室が4つ配置されて、ふすま・障子で間仕切りされて耐力壁が少ない。中心部南側・東側の3つの和室には、廊下が併設している。1階南側は、廊下・和室の開口部に、サッシ・ふすま・障子を多く使用しているために、開口部が多い平面計画となっている。2階には、和室が3つ配置されている。

屋根は瓦屋根、壁は土壁である。敷地内には、自宅と併設して倉庫もあり、その倉庫も被害を受けた。

A氏によると、前震の強震動において、倒壊に近い全壊被害を受けたとの回答を得ている⁴⁾。

図3の凡例には被害者・建設年・各階床面積・被害方向を、さらに下の凡例には、木造家屋のX方向（桁行）、Y方向（梁間）を示している。図3の平面図には写真撮影方向も示している。A氏の被害木造家屋のX方向は、東西軸から傾いて敷地配置されていたため、東方向を基準として反時計回りに木造家屋のX方向が傾

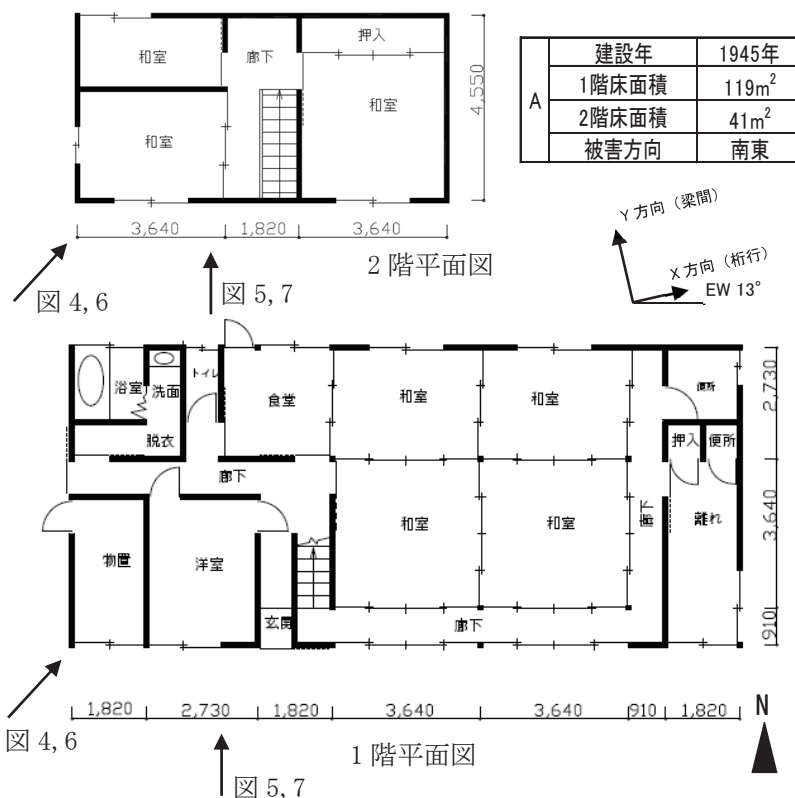


図3 A氏の伝統的木造家屋の平面図

いている角度を、図3の凡例の「EW13°」は表している。

3. 壁長及び壁倍率に基づいた伝統的木造家屋の地震応答解析

(1) 解析諸量及び振動解析モデル

本論文では、A氏の伝統的木造家屋は土壁であることを考慮し、無開口耐力壁について壁倍率を1（1.96kN/m（基準耐力）×1）として、耐力評価を行った。壁倍率については、建設年代毎に外壁・内壁の平均壁倍率に関する報告⁵⁾がある。この報告では、外壁は1960年以降では平均壁倍率が2を上回り、内壁は平均壁倍率が2を下回る。そこで本論文では、伝統的木造家屋の無開口耐力壁については外壁・内壁共に壁倍率を1とした。

また、非耐力壁の影響の違いを把握するために、非耐力壁を考慮する場合と考慮しない2つのケースとした。非耐力壁を考慮した場合には、非構造部材等の余力等も含めて、無開口耐力壁の1/2の壁倍率を0.5と仮定した⁶⁾。

重量については、入手できた図面や被害写真から、屋根（重い屋根（葺き土無））、外壁（土塗り壁）、内壁（土塗り）、床（室内床）の部材・材料種類毎及び積載荷重を考慮した⁷⁾。1層重量については3kN/m²、2層重量については3.2kN/m²の重量となった。振動解析モデルは、2質点せん断系モデルとする。減衰評価は、初期剛性に対して剛性比例型とし減衰定数は5%で解析を行った。

復元力特性については、図8に示すようにバイリニアール・スリップモデルとした。モデルの諸定数については既往文献^{8),9)}を参考にして以下のように定めた。各階の壁長に基準耐力（1.96kN/m）と壁倍率を乗じて降伏耐力を求め、これを第2折れ点耐力 Q_{y0} とし、その第2折れ点耐力の1/5倍を第1折れ点耐力 Q_{y1} とする。第2折れ点降伏耐力 Q_{y0} の変位 δ_{y0} を層間変形角1/180とする。また、第1折れ点耐力の変位 δ_{y1} は層間変形角1/720とする。最大耐力 Q_{max} は降伏耐力 Q_{y0} の1.5倍とし、最大耐力 Q_{max} における第3折れ点変位 δ_u を層間変形角1/30とする。第3折れ点変位 δ_u 以上の剛性 K_{s3} は、初期剛性 K_1 の-0.1倍（負、 $\alpha = -0.1$ ）とする。バイリニアールモデル及びスリップモデルのそれぞれの各剛性については、バイリニアールスリップモデルの初期剛性 K_1 及び2次剛性 K_2 の半分ずつを振り分けた。

(2) 伝統的木造家屋の1次固有周期とベースシェアー係数

A氏の被害木造家屋の初期剛性 K_1 に対して固有値解析を行い、X方向・Y方向の1次固有周期を図9に示す。図9からX方向・Y方向ともに非耐力壁を考慮してもA氏の伝統的木造家屋の1次固有周期は0.5秒以上となり、非耐力壁を考慮しない場合は、さらに長くなる。



図4 A氏伝統的木造家屋の被害写真



図5 A氏伝統的木造家屋の被害写真



図6 A氏伝統的木造家屋の被害写真



図7 A氏伝統的木造家屋の被害写真

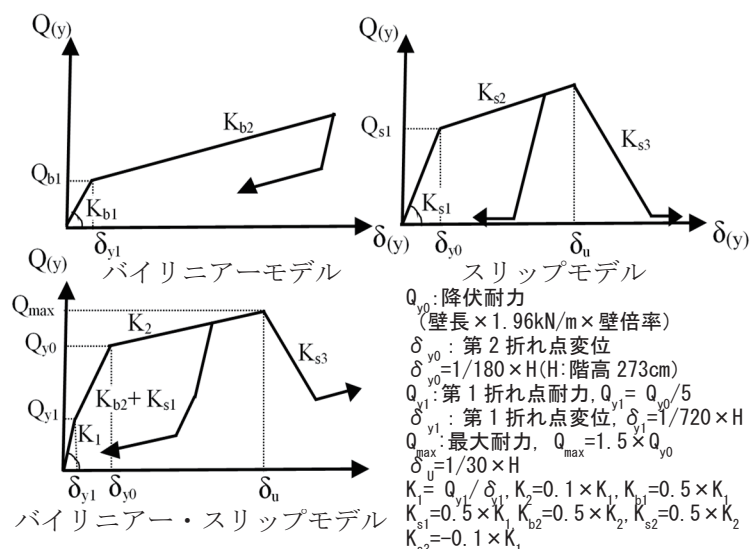


図8 振動解析モデル復元力特性

238棟の木造住宅の微動測定による固有周期に関する報告¹⁰⁾では、建設年が新しくなるにつれて固有周期が短くなり、およそ固有周期は0.1秒～0.25秒程度に分布する。しかしこれに比べると、図9に示すように伝統的な木造家屋の1次固有周期はかなり長くなっている。

次に、降伏耐力 Q_{y0} を層せん断力として計算したX方向及びY方向のベースシヤ係数を図10に示す。X方向及びY方向のベースシヤ係数が小さいのは、A氏は土壁の壁倍率を1で評価していることと、重量が一般の木造家屋よりも重いためであると考えられる。

ところで、耐震診断等によって算出された1次固有周期と、実木造住宅の微動測定や振動実験のスィープ試験から得られた1次固有周期には違いが見られて、しばしば耐震診断によって算出された1次固有周期が大きいことが知られている。設計図書の耐力壁から求められた剛性は、その割線剛性の取り方によってその剛性の値が異なって、剛性が変化して1次固有周期に違いが生じる。また、微動振動観測や振動実験の1次固有周期は、木造住宅の非構造部材の影響が含まれて、剛性が大きくなり1次固有周期は短くなる傾向がある。

以上から、本研究の聞き取り調査の平面図の壁長と壁倍率から算出した伝統的な造家屋の剛性や耐力は、実木造住宅の微動振動観測や振動実験から得られた剛性や耐力よりも小さくなる傾向がある。特に土壁を有する伝統的な木造家屋の剛性や耐力は、在来軸組構法の木造家屋よりもさらに小さくなりやすい。これについては平面図の聞き取り調査を行った他の6棟の木造家屋と比較しても、図9の1次固有周期及び図10のベースシヤ係数からも読み取れる。

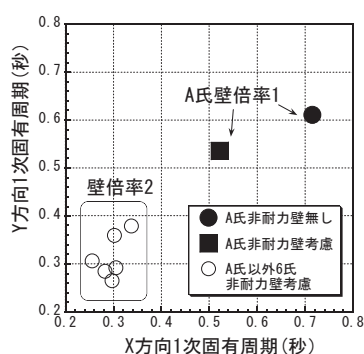


図9 1次固有周期

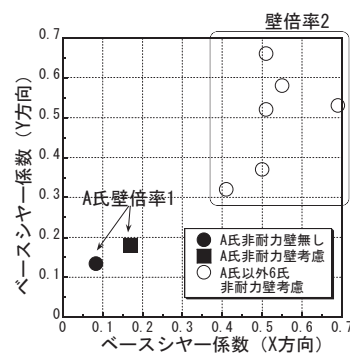


図10 ベースシヤ係数

(3) 解析に用いた2016年熊本地震の強震記録

益城町で観測された2016年熊本地震の前震・本震の強震記録は、防災科学技術研究所強震観測網KiK-net益城(KMMH16、以後益城)と、地方公共団体によって観測された益城町役場の宮園の強震記録がある。2つの観測点強震記録を表1に示す。本論文では、この宮園及び益城の2つの強震記録を取り扱う。なお、調査範囲と宮園の観測点位置関係については、先に示した図1に表示している。調査区域に近い強震観測点は、調査対象区域一角から約800m離れた宮園である。2つの強震記録については、水平動のみを分析及び地震応答解析の対象とし、上下動については取り扱っていない。なお、前震及び本震の強震動はそれぞれ単独入力して地震応答解析を行った。ただし、後述する3.8節では、前震・強震動と本震・強震動を時刻歴において繋げた連続・強震動を作成して解析を実施している。

表1 強震記録

No.	年	地震名	観測点	Amax (cm/s/s)	Vmax (cm/s)
1	2016 4/14	熊本 前震	宮園NS	632	118.4
2			宮園EW	732	135.9
3			益城NS	1399	55.7
4			益城EW	925	91.0
5	2016 4/16	熊本 本震	宮園NS	775	97.1
6			宮園EW	825	176.3
7			益城NS	653	86.1
8			益城EW	1156	128.7

(4) 速度応答スペクトル

表1に示した2つ観測点における強震動は、NS成分よりもEW成分の方が大きい。そこで、図11及び図12には前震及び本震の水平EW成分の速度応答スペクトルを示す。図12の本震・益城EWでは周期1秒前後において300～400cm/s程度の速度応答量となり、本震・宮園EWでは周期1～3秒の周期帯域において200～500cm/s程度の大きな速度応答量となっている。また、図11の前震・宮園EWは、周期1～2秒付近において、本震益城よりも同等若しくはそれを上回る速度応答量となっている。

(5) 強震動の入力方向について

A氏の伝統的な木造家屋のX方向（桁行方向）に強震動のEW成分を、Y方向（梁間方向）に強震動のNS成分を入力した。ただし、A氏の被害木造家屋（図3）は、東方向から木造家屋のX方向のなす角度が反時計回りに、13°の角度をもって敷地に配置されていた。そこで、この敷地配置角度を考慮するために、図13に示すように、原波水平動2成分を東方向から反時計回りに13°傾けたX'軸を設け、これに直交するY'軸に対して、原波強震動をそれぞれの軸に座標変換し、これらX'軸及びY'軸に関して作成した強震動成分を入力した解

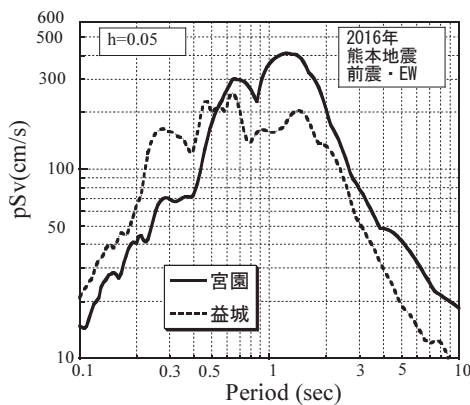


図 11 前震の速度応答スペクトル

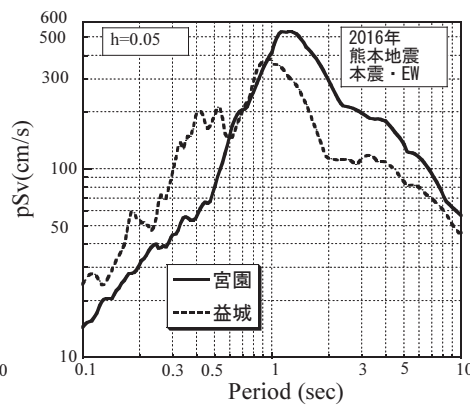


図 12 本震の速度応答スペクトル

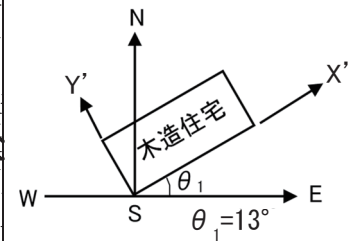


図 13 強震動の入力方向に関する座標変換

析も行った。

(6) 伝統的木造家屋の1階地震応答変位

伝統的木造家屋の振動解析モデルによる地震応答解析を行い、木造家屋の倒壊・全壊被害に大きな影響を及ぼす木造家屋1階の最大地震変位応答量に着目する。

熊本地震の前震及び本震強震動の宮園及び益城に対するA氏の伝統的木造家屋1階のX方向及びY方向の最大地震変位応答量を、それぞれ横軸及び縦軸に表示して図14-1～図14-4に示す。なお、図14-1～図14-4に示す斜線は、X方向1階応答変位とY方向1階応答変位の割合が2:1を示す斜線である。

図14-1の前震・宮園及び図14-2の前震・益城については、伝統的木造家屋のX方向がY方向よりも、おおよそ2倍程度大きな応答量となっている。図14-1～図14-2のX方向の1階応答変位に関して、大きな変位応答量が生じる強震動は、前震・宮園であり、40cm程度の応答変位である。前震・益城については、非耐力壁の影響はあまり見られない。13°の敷地配置とした1階応答変位は、非耐力壁を考慮することによって前震・宮園についてはY方向応答変位は減少し、X方向の応答変位がやや増加する傾向にある。前震強震動では、敷地配置角度13°におけるX方向の1階地震変位応答が、前震・宮園では40cm程度、前震・益城では25cm程度となる。これらの応答量は層間変形角では1/10程度以上となり、倒壊や全壊の被害を受ける可能性がある。

次に、図14-3の本震・宮園及び図14-4の本震・益城については、Y方向よりもX方向の応答変位が、前震（図14-1～図14-2）よりもいっそう強くなる。図14-3の本震・宮園は、本震・益城に比べてその傾向がより顕著になっている。X方向に着目すれば、1階応答変位に大きな応答量が生じる強震動は、本震・宮園であり、X方向は65cm～80cm程度の応答変位となる。これは層間変形角に換算すると、1/4.55～1/3.41程度となり、木造家屋の倒壊する層間変形角1/10を大きく上回る層間変形角が生じることになる。本震・益城では、非耐力壁を考慮しない場合、40cm程度の応答量となっている。

図14-3～図14-4の13°の敷地配置を考慮した1階応答変位では、前震と比べてよりX方向の応答変位が大きくなる傾向が強くなる。ただし、図14-3の本震・宮園の強震動では、敷地配置角度を考慮した方が、また非耐力壁を考慮した方が、X方向・Y方向ともに応答変位量は減少する。

以上から、2016年熊本地震の強震動に対する伝統的木造家屋1階の地震応答変位は、非耐力壁の有無、そして、敷地配置角度による違いによって、特に1階のX方向変位応答量がY方向よりも大きくなりやすい傾向にある。

(7) 敷地配置角度の違いによる伝統的木造家屋の1階地震応答変位

前節の図14-1～図14-4では、A氏の伝統的木造家屋が13°に敷地配置された場合と、敷地配置角度0°（X方向：原波EW入力、Y方向：原波NS入力）ではX方向やY方向の1階地震応答量に差が生じる結果となった。

そこで、伝統的木造家屋のX方向が東方向から反時計回りにある角度を持って敷地に配置されていたと仮定した場合、その時の伝統的木造家屋のX方向及びY方向の木造家屋1階応答変位を求めた。計算方法は、3.5節に述べた同様の手法によって、今回は10°毎に原波強震動を座標変換して解析を行った。作成した強震動の角度は0°～170°としている。

図15-1～図15-2の前震・強震動に着目すると、敷地配置角度の変化に対するX方向及びY方向の1階の地震変位応答に10cm以上の違いは見られるが、20cm以上の応答量の違いは生じていない。また、非耐力壁を考

慮した場合でも、非耐力壁無しと同程度となっている。図15-1の前震・宮園では、敷地配置角度 $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$ において、非耐力壁を考慮した場合、X方向の応答変位が40cmを超える。敷地配置角度が 90° になると、X方向にNS成分が、Y方向にEW成分が入力されて、入力強震動の各成分が敷地配置角度が 0° とは入れ替わる。敷地配置角度 90° 以上となる $120^{\circ} \sim 130^{\circ}$ のときには、非耐力壁を考慮した場合、Y方向の応答変位が40cmを超える。

次に、図15-3～図15-4の本震・強震動に着目すると、敷地配置角度に対する伝統的木造家屋のX方向・Y方向の1階地震応答は、前震・強震動とは異なり、本震・宮園において、変位応答量が非常に大きく変化する。

図15-3の本震・宮園では、敷地配置角度 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ において、非耐力壁を考慮した場合、X方向の応答変位が60cmを超える大きな1階の応答変位となる。また、敷地配置角度 $70^{\circ} \sim 150^{\circ}$ のときには、同じく非耐力壁を考慮した場合、Y方向の応答変位が50cmを超える。

このように本震・宮園の強震動は、敷地配置角度により、伝統的木造家屋の1階の地震応答変位が非常に大きく、かつ、敷地配置角度に対する1階応答変位の変動が大きい。

(8) 本震・強震動の敷地配置角度に対する1階地震応答変位の変動応答量と、その変動応答量の1995年兵庫県南部地震の強震動との比較

前節の図15-3の本震・宮園では、敷地配置角度によって1階応答変位が約80cmから25cm程度まで変動し、大きな応答量の差が生じた。これは本震・宮園の強震動が、強い方向性を持つ入力地震動特性を有していると考えられる。

そこで図16-1は、横軸を敷地配置角度とし、縦軸に前震・宮園及び本震・宮園、そして前震と本震の強震記録を時間軸で繋げて作成した連続宮園に関するX方向1階応答変位を示す。また、比較するために1995年兵庫県南部地震のJMA KobeとTakatoriの強震動に対するA氏の伝統的木造家屋のX方向1階応答変位も併せて示す。図16-1から本震・宮園、連続・宮園及びTakatoriは、敷地配置角度に対してX方向の1階応答変位が大きく変化する。一方、JMA Kobeは、他の

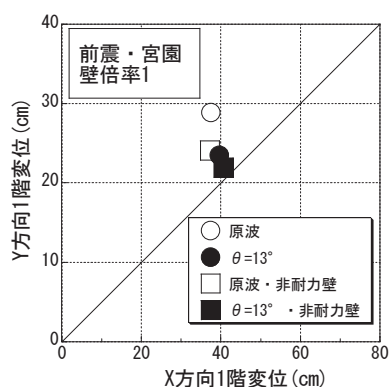


図 14-1 1階地震応答変位 (前震・宮園)

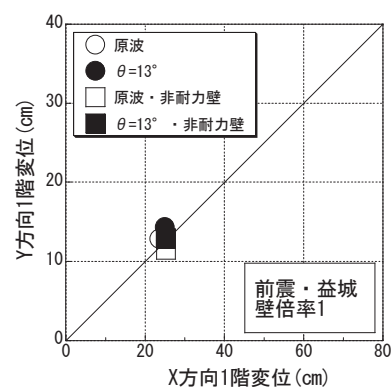


図 14-2 1階地震応答変位 (前震・益城)

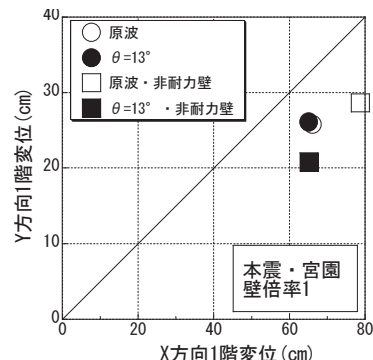


図 14-3 1階地震応答変位 (本震・宮園)

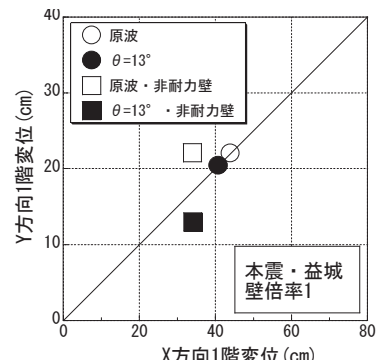


図 14-4 1階地震応答変位 (本震・益城)

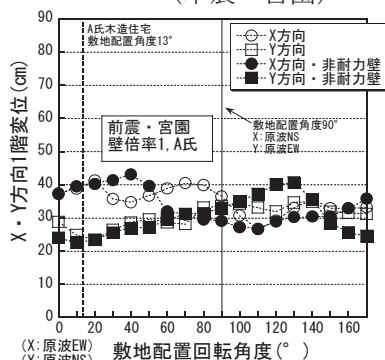


図 15-1 敷地配置角度の応答変位 (前震・宮園)

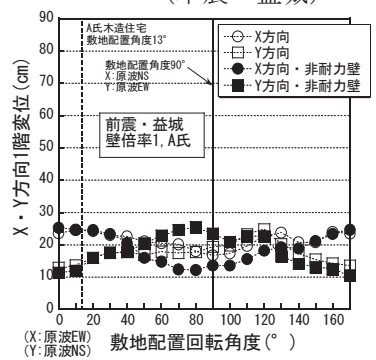


図 15-2 敷地配置角度の応答変位 (前震・益城)

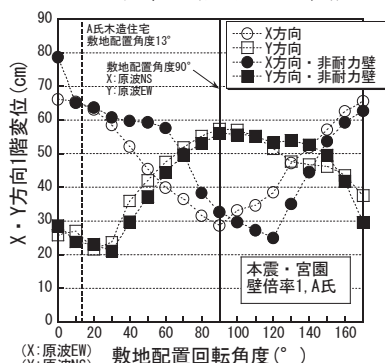


図 15-3 敷地配置角度の応答変位 (本震・宮園)

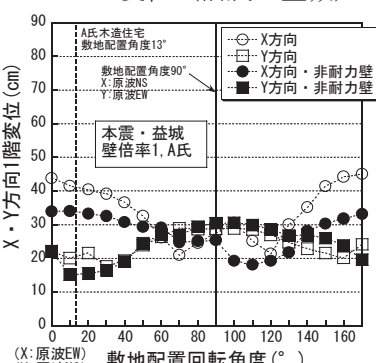


図 15-4 敷地配置角度の応答変位 (本震・益城)

強震動に比べて敷地配置角度に対する応答量の変動が小さい。連続・宮園は、本震・宮園よりも1階応答量については同等もしくはやや小さい。

次に、図16-2から図16-4には、配置角度 0° すなわちX方向に強震動のEW成分を入力した場合を規準として、これよりも応答変位量が増加すれば(+) プラス、減少すれば(-) マイナスとする、配置角度 0° の応答量との差を表す変動応答量を縦軸に示す。横軸は同じく敷地配置角度である。図16-2の本震・宮園は、変動応答量が(-) 50cmを超えて非常に大きい。換言すると、配置角度 0° の時が、応答量が一番大きくなっている。

図16-3の本震・益城では、前震・本震・連続ともに、最大変動応答量は20cm以内となり、図16-2の本震・宮園に比べるとその変動応答量は小さいことがわかる。

図16-4の兵庫県南部地震のJMA Kobeは、変動応答量(±) 10cm程度であり、最も小さい。一方、図16-4のTakatoriは、最大(-) 28cm程度の変動応答量となっている。

(9) 熊本地震の本震・強震動と兵庫県南部地震の強震動の加速度軌跡

前節において変動応答量について比較した本震・宮園、本震・益城、JMA Kobe及びTakatoriについて、周期0.5秒～2秒のバンドパスフィルターを施した加速度軌跡を図17-1～図17-4に示す。図には強震動の強震動軸を示している。

図17-1の本震・宮園及び図17-2の本震・益城の加速度軌跡の強震方向軸は、熊本地震の布田川・日奈久断層帯¹¹⁾とおおよそ平行である南西-北東方向にある。図17-3のJMA Kobe及び図17-4のTakatoriでは、兵庫県南部地震の野島断層及び六甲断層帯¹²⁾に対して、ほぼ直交する南東-北西軸に強震方向軸があることがわかる。

図16-3の本震・益城及び図16-4のJMA Kobeでは、1階応答変位の変動応答量は、図16-2の本震・宮園や図

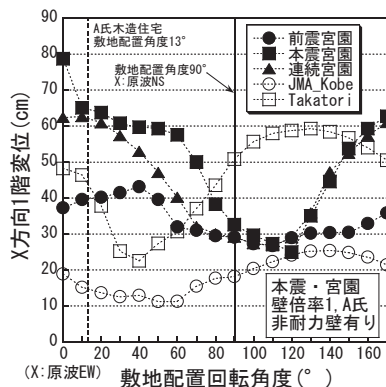


図 16-1 敷地配置角度の応答変位 (前震・宮園)

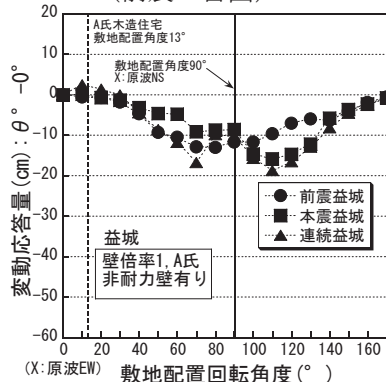


図 16-3 1階地震応答変位量の差 (益城)

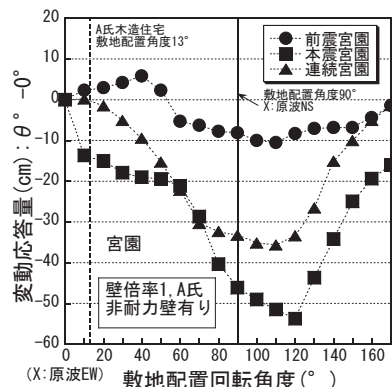


図 16-2 1階地震応答変位量の差 (宮園)

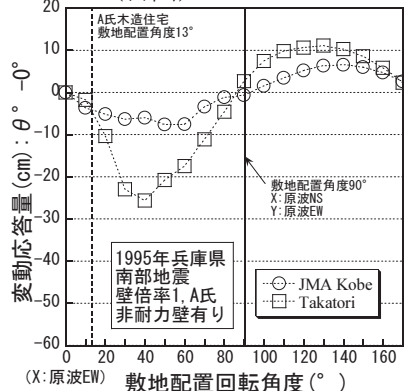


図 16-4 1階地震応答変位量の差 (JMA Kobe, Takatori)

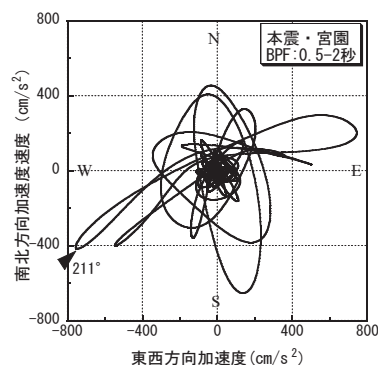


図 17-1 本震・宮園の加速度軌跡

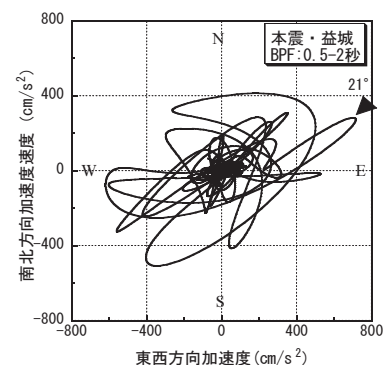


図 17-2 本震・益城の加速度軌跡

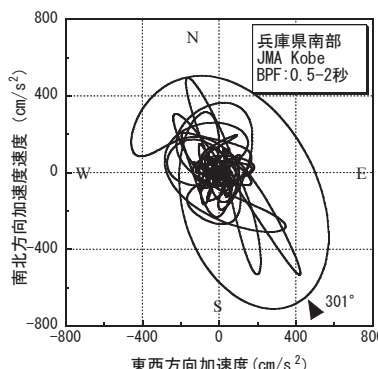


図 17-3 JMA Kobe の加速度軌跡

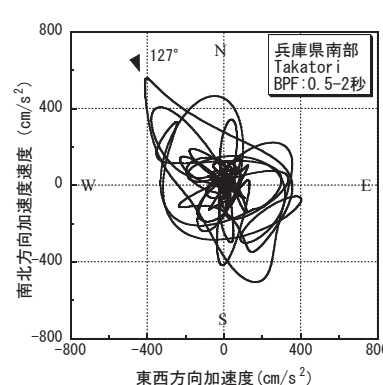


図 17-4 Takatori の加速度軌跡

16-4のTakatoriに比べると小さかった。しかし、図17-2の本震・益城及び図17-3のJMA Kobeの加速度軌跡では、図17-1の本震・宮園や図17-4のTakatoriと同じような強震方向軸の方向性が見て取れる。

このことから、変動応答量の大きい本震・宮園及びTakatoriと、変動応答量の比較的小さい本震・益城及びJMA Kobeでは、加速度軌跡において明確な違いは見られなかった。変動応答量の大小の違いについては、伝統的木造家屋のX方向及びY方向の1次固有周期や耐力との関係があり、今後の検討課題としたい。

4. 結語

2016年熊本地震の益城町の伝統的木造家屋に関し、聞き取り調査により再現した平面図に基づいて、壁長と壁倍率から振動解析モデルを作成した。この作成した振動解析モデルを用い、熊本地震において観測された強震動による地震応答解析を行って、以下の知見を得た。

- 1) 伝統的木造家屋は、前震強震動において敷地配置角度 13° におけるX方向の1階地震変位応答が、前震・宮園では40cm程度、前震・益城では25cm程度となり、これらの応答量は層間変形角換算すると1/10程度、若しくはそれ以上となり、倒壊や全壊の被害を受ける地震応答量となる。
- 2) 伝統的木造家屋のX方向及びY方向の1階の地震変位応答は、前震・強震動において、敷地配置角度による1階の地震変位応答に比較的大きな変動は見られない。しかし、本震強震動の宮園では敷地配置角度による1階の地震応答変位に大きな変動が見られた。本震・宮園のような入力地震動特性を持つような強震動については、伝統的木造家屋の敷地配置角度によって、1階の地震変位応答が大きく変動する可能性がある。

謝辞：被害木造家屋の聞き取り調査に応じていただきました7名の被災者の方には、御見舞い申し上げますとともに、心から厚く御礼申し上げます。強震記録については、気象庁及び国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網による観測記録を使用させていただきました。

本論文に関しては、一般社団法人四国クリエイト協会による令和2年度研究助成を受け実施いたしました。以上、諸氏・諸機関に関して記して謝意を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：7.8木造建築物, 阪神・淡路大震災調査報告, 共通編-1, pp.420~426, 2000.3
- 2) 日本建築学会：第4章益城町における地震被害（悉皆調査）, 2016年熊本地震災害調査報告書, pp.29-53, 2018.6
- 3) 池田雄一:平成28年熊本地震における熊本県益城町の木造家屋の傾斜・倒壊方向に及ぼす前震・本震強震動の水平2成分軌跡とその強さの影響, 日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.33-34, 2017.9
- 4) 池田雄一：平成28年熊本地震における益城町被害木造住宅の平面計画の再現と調査対象区域の敷地内配置角度に着目した木造住宅の被害に関する一考察, 自然災害科学Vol.38, 特別号, pp.153-183, 2019.10
- 5) 西生建, 野中悠貴, 宮澤健二：木造住宅の耐震診断法に関する研究, その2壁仕様の実態調査と建設年代モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.171-172, 2003.9
- 6) 鈴木祥之, 中治弘行, 岩井哲, 北原昭男：在来木造住宅の実大水平力載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, 第49号, pp.69-76, 1997.9
- 7) 日本建築防災協会：2012年改訂版木造住宅の耐震診断と補強方法, 例題編・資料編, 資料編, I 耐震診断法の参考資料, 2固定荷重・積載荷重, 2.2床均し荷重, pp.127-128, 初版第3刷, 2013.5.
- 8) 日本建築構造技術者協会：木造建築構造の設計, 第9章既存軸組構造の耐震診断と補強, 9.1耐震診断手法の内容と特徴, オーム社, 第1版, pp.139-146, 2005.5
- 9) 河合直人, 岡部実, 渡辺一正：在来軸組構法耐力壁の耐震性能, その2仮動的試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.135-136, 1998.9
- 10) 田端千夏子, 大橋好光：微動測定とその耐震診断への応用の可能性, 一木造建築物の耐震診断法に関する研究その2一, 日本建築学会構造系論文集, 第616号, pp.141-147, 2007.6
- 11) 日本建築学会：2.1 2016年熊本地震の地震活動, 第2章 地震と地震動の特性, 2016年熊本地震災害調査報告書, pp.4-8, 2018.6
- 12) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：第2章 地震断層・活断層と第四紀後期の地震テクトニクス, 阪神・淡路大震災調査報告, pp.41-72, 1998.3