

平成28年熊本地震の熊本県益城町の木造家屋被害報告及び
被害木造家屋の傾斜・倒壊に及ぼした強震動特性に関する一考察

池田 雄一*

Report of Wooden House Damage of Mashiki-machi in Kumamoto of the 2016 Kumamoto Earthquake, and the Influence of the Characteristics of Strong Ground Motion due to the Collapse of the Damaged Wooden Houses

Yuichi IKEDA *

Summary

This paper reports the field investigation results of wooden building damage in Mashiki-machi, Kumamoto Prefecture during the 2016 Kumamoto earthquake, which measured 7 on the Japanese intensity scale. Wooden buildings damaged by the earthquakes had a common direction of inclination and collapse. The analysis was conducted by using the orbit of two horizontal strong ground motion sensors and its intensity to clarify the factors of the direction of inclination and collapse of wooden buildings.

Keywords : The 2016 Kumamoto earthquake, Seismic intensity of 7, Direction of inclination and collapse of wooden buildings damaged by the 2016 Kumamoto earthquake, Orbit of horizontal in strong ground motion, Intensity of strong ground motion

1. はじめに

平成28年熊本地震では、4月14日の前震(M6.5)から約28時間後の翌々日4月16日に本震(M7.3)が発生して、熊本県益城町においては震度7の揺れに二度襲われ、特に木造家屋を中心に甚大な被害が生じた。益城町にあった建物にとっては、二度の強い揺れに襲われることになり、建物の耐震設計を論じる上において、大きな問いを投げかけている。また熊本地震は過去の内陸直下地震に比べても余震が長い間続き¹⁾、被災後の建物の安全確保についても同時に問題となった。

そこで本報告では、最初に、平成28年熊本地震の前震及び本震による熊本県・益城町の木造家屋を中心とした地震建物被害を報告する。次に、熊本地震の前震・本震において観測された強震動を用いて、これまでの観測された過去の強震動と比較して、その強震動強さを考察する。さらに、熊本県益城町の被害調査をふまえた、観測された強震動が木造家屋に与えた影響について一考察を行う。そして最後に、熊本県阿蘇市にある免震病院施設の本震に対する免震建物挙動について報告する。

* 高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 准教授

2. 熊本県益城町の木造家屋の被害状況

2.1. 木造家屋の被害調査

第一回調査は平成28年4月23日から4月25日の三日間をかけ、平成28年熊本地震において震度7の揺れに二回襲われた熊本県益城町の福富地区、惣領地区、馬水地区及び安永地区における国道28号線（熊本高森線）よりも以南と秋津川に挟まれた約1,300棟の建物被害目測調査を行い、建物の被害状況を確認した。また、第二回調査は平成28年8月27日から8月28日の二日間実施し、第一回調査と同じ範囲内の建物の被害状況を再度調査した。

益城町木造家屋の被害状況については、古い伝統的木造家屋（農村住宅を含む）とそれ以外の比較的新しい木造家屋の大きく二つにおおむね分類²⁾して調査を実施した。その判断は目視によるものであるが、土壁の有無、柱・梁接合部の接合方法、柱・土台の接合方法及び施工面から判断した。

2.2. 古い伝統的木造家屋（農村住宅を含む）の被害

土壁を有する古い伝統的木造家屋は、写真1～6に示すように、1階は崩壊して全壊し、これに屋根が覆い被さっている場合が多かった。また、写真3に示すように農業を職業とする農村住宅の敷地にある農業用倉庫の家屋も被害を受けていた。



写真1



写真2



写真3



写真4



写真5



写真6

古い伝統的木造家屋

2.3. 比較的新しい木造家屋の被害

先に示した伝統的木造家屋よりも比較的新しい木造家屋の被害写真を写真7～12に示す。被害を受けた比較的新しい木造家屋の外壁仕上は、写真10～11に示すように柱・間柱に下地板を張りこれに黒い防水紙・ラスシートを張って、モルタル仕上³⁾している木造家屋の被害が目立った。



写真7



写真8



写真9



写真10



写真11



写真12

比較的新しい木造家屋

2.4. 被害を受けた比較的新しい木造家屋の接合部

先に示した写真7～12の被害を受けた比較的新しい木造家屋の柱と土台の仕口は、短柄が多く、数本若しくは一本の釘打ちをしてある程度であり、柱と土台の仕口を込栓や角金物を施してあるような接合部は、調査した被害木造家屋においては見る事ができなかった。また、柱・梁の接合部においても、接合金物を用いている接合部は少なかった。



写真13



写真14



写真15

比較的新しい木造家屋の接合部

3. 平成28年熊本地震の前震・本震において観測された強震動強さ

3.1. 前震・本震の強震動と過去に観測された強震動との比較

本報告では、熊本地震の前震・本震において観測された水平動成分11成分について表1に示す。表1に示すように前震の強震動は、水平動5成分、本震の強震動は水平動6成分である。表1に示すNo.6 Yufuin EW (OIT) は、大分県湯布院の観測点であり、他はすべて熊本県の観測点である。

表1に示す平成28年熊本地震の前震・本震において観測された強震動と、比較する過去に観測された強震動を表2に示す。表2には、高層建物や免震建物の地震応答解析にしばしば用いられてきた汎用地震動 (El Centro 1940, Taft 1952, Hachinohe 1968) と、並びに22年前に発生した内陸直下地震である1995年兵庫県南部地震、地震規模の大きなプレート境界地震である2003年十勝沖地震、及び6年前の2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) において観測された主要な強震動の水平動24成分である。表1及び表2には示された各観測点において、得られた強震記録の最大加速度振幅及び最大速度振幅についても記載している。なお、汎用地震動は最大速度振幅Vmaxを50cm/sに規準化して用いている。

表1及び表2の強震動について、横軸に最大速度振幅 (Vmax) を、縦軸に最大加速度振幅 (Amax) をとり、プロットしたものを図1及び図2 (汎用地震動は除く) に示す。過去の強震動に比べて熊本地震の前震及び本震の強震動は、最大速度振幅及び最大加速度振幅ともに、過去の地震における主要強震動と同等の最大加速度・速度振幅を有する強震動であることがわかる。図1には十勝沖地震や東北地方太平洋沖地震のプレート境界地震の強震動も含まれているため、図2には内陸直下地震である兵庫県南部地震の強震動と、この度の熊本地震・前震及び本震の強震動を比較する。

図2より熊本地震・前震の強震動は、最大加速度振幅については兵庫県南部地震の強震動に比べて同等若しくはやや大きい傾向にある。最大速度振幅は、100cm/sを超える強震動があるものの、兵庫県南部地震の強震動の最大速度振幅に比べて、同等若しくはやや小さい傾向にある。

一方、熊本地震・本震の強震動は、水平成分3つが最大速度振幅100cm/sを上回って、200cm/sを超える強震動水平成分もあることがわかる。しかし最大加速度振幅は、1000cm/s²を超える強震動が1つあるものの、総じて本震・強震動の最大加速度振幅は際立って大きくはない。

表1 平成28年熊本地震の強震動

No.	年	地震名	観測点	Amax (cm/s/s)	Vmax (cm/s)
1	2016 4/14	熊本 前震	Kumamoto NS	574	70.5
2			Mashiki-2 4	1399	55.7
3			Mashiki-2 5	925	91.0
4			Miyazono NS	632	118.4
5			Miyazono EW	732	135.9
6	2016 4/16	熊本 本震	Yufuin EW(OIT)	717	82.0
7			Ichinomiya EW	347	80.8
8			Kumamoto NS	827	66.6
9			Mashiki-2 5	1157	128.8
10			Miyazono EW	825	176.3
11			Nishihara Komori EW	770	240.9

表2 過去の強震動

No.	年	地震名	観測点	Amax (cm/s/s)	Vmax (cm/s)	
1	1940	インベリアル・バレー	El Centro NS	489	50.0	
2			El Centro EW	263		
3	1952	カーン・カウンティ	Taft N21E	477		
4			Taft S69E	500		
5	1968	十勝沖	Hachinohe NS	345		
6			Hachinohe EW	243		
7	1995	兵庫県南部	JMA Kobe NS	818		90.9
8			Kobe Port Island NS	341		90.4
9			Shin Kobe NS	511		84.2
10			Kobe-JI-S N317E	502		102.4
11			Fukiai EW	802		122.7
12			Takatori NS	606		121.4
13	2003	十勝沖	Atsuma-2 NS	256	76.9	
14			Atsuma-2 EW	377	90.2	
15			Taiki NS	366	75.1	
16			Taiki EW	346	73.7	
17			Chokubetsu NS	739	68.3	
18			Chokubetsu EW	785	125.4	
19	2011	東北地方 太平洋沖	Furukawa EW	572	90.4	
20			Sendai NS	1517	74.3	
21			Iwanuma NS	411	76.1	
22			Inawashiro NS	242	46.4	
23			Haga-2 5	1197	71.7	
24			Edosaki-2 5	192	45.1	

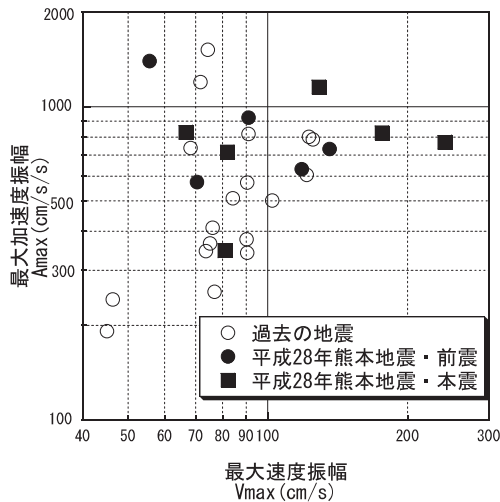


図1 解析に用いた強震記録の最大速度振幅と最大加速度振幅との関係

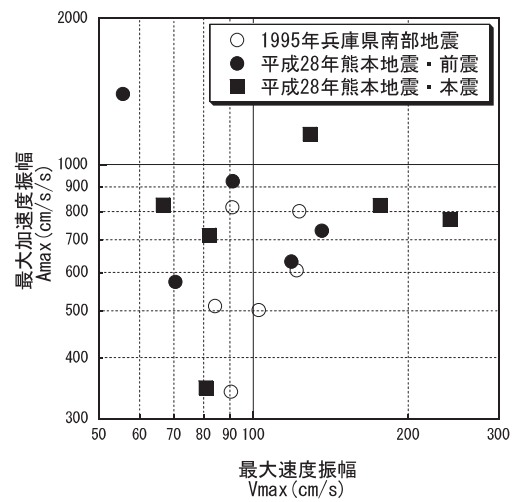


図2 解析に用いた強震記録の最大速度振幅と最大加速度振幅との関係(内陸直下地震)

3.2. 速度応答スペクトル

表2に示した解析に用いた過去の強震記録と、表1に示す熊本地震・前震及び本震の強震記録に関する速度応答スペクトルを図3-a~fに示す。

図3-aの汎用地震動については、周期0.6秒以上において、速度応答量の上限レベルを概ね100cm/s以下で包絡することができる。よって高層建物や免震建物においては、地震応答解析のレベル2入力地震動の強さとして、速度応答スペクトルが $S_v \approx 100\text{cm/s}$ が耐震構造設計における一つの速度応答スペクトル強さになっている。

汎用地震動の速度応答量100cm/sを一つの比較する評価指標とすると、図3-b兵庫県南部地震の主要動は、周期1.5秒付近において200~400cm/sの速度応答量となっている。また図3-c 2003年十勝沖地震のAtsuma-2 EWは、周期2秒付近において500cm/s程度となる大きな速度応答量となっている。

図3-d 2011年東北地方太平洋沖地震の主要な強震動においても、速度応答量100cm/sを超えて、周期0.6秒以上においては、いくつかの強震動では200~300cm/sの速度応答量となっている。

図3-a~dより、近年観測された主要な強震動は、周期0.6秒以上において速度応答量 $S_v \approx 100\text{cm/s}$ を大きく上回る強震動が近年の地震において観測されている。

図3-e熊本地震・前震(M6.5)において観測された強震動Kumamoto NSは、汎用地震動と同等レベルの大きさとなっており、他の強震動は速度応答量100cm/sを上回る速度応答量となっている。Miyazono EWは周期1.3秒付近では速度応答量が400cm/sとなって、図3-b Takatori NSと同じレベルの速度応答スペクトル強さを有している。

図3-f 熊本地震・本震のMiyazono EWは、周期1.2秒付近において500cm/sを超える速度応答量となり、Ichinomiya EWは周期3秒付近において300cm/s、Nishihara Komori EWは周期2~4秒の周期帯域において300cm/s以上の速度応答量となっている。本震・強震動の速度応答スペクトル周期1秒以上に着目して他の主要強震動の同じ周期帯域と比較すると、図3-c Atsuma-2 EWの速度応答量を上回る強震動強さとなっている。

平成28年熊本地震・本震の主要強震動は、周期1秒以上の周期帯域において過去及び近年観測された強震動並びに前震の強震動よりも、大きな速度応答スペクトル強さを有する強震動である。

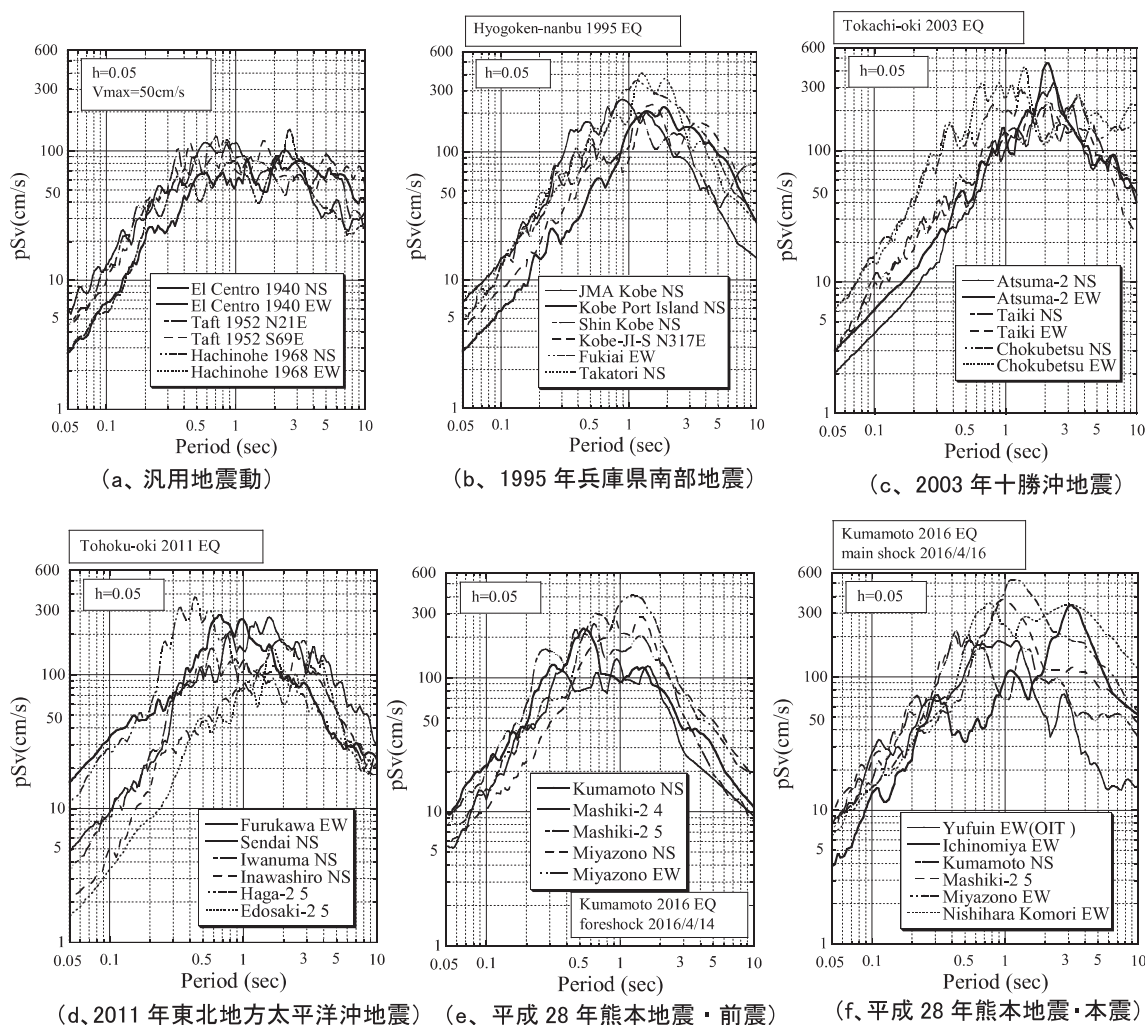


図3 速度応答スペクトル

4. 木造家屋の傾斜・倒壊方向に及ぼす強震動の影響についての一考察

4.1. 目測による木造家屋の傾斜・倒壊方向

第一回調査一日目（4月23日）の調査を行って、被害を受けた比較的新しい木造家屋には、写真16～18（写真に示す矢印は傾斜・倒壊方向）に示すように、一定方向に傾斜・倒壊する共通する方向性が見られた。そこで調査二・三日目（4月24日・25日）は、地図上に木造家屋の傾斜・倒壊方向を記録した。傾斜・倒壊方向の判断基準は、倒壊した木造家屋は基礎に連結されている土台と、1階柱や1階壁の移動位置を判断材料とした。先の写真1～6に示したような倒壊した伝統的木造家屋は、屋根を残して柱・壁は押しつぶされており、このようなケースでは倒壊方向を判断できないとして地図に記載せず、傾斜・倒壊方向を示す棟数から除外した。

よって、本報告では地図に記載した木造家屋の傾斜・倒壊方向は、目視によってある程度、傾斜・倒壊の方向が読み取れる伝統的木造家屋を除く比較的新しい木造家屋の半壊・全壊・倒壊から判断している。

木造家屋の傾斜・倒壊方向は、強震動水平動成分の強軸方向^{4) 5)}、道路と敷地による木造家屋の配置・形状との関係、及び木造家屋の耐力壁配置に伴う主軸・副軸の関係によって、木造家屋の傾斜・倒壊方向の角度は変わると考えられる。本調査では傾斜・倒壊方向を北(N)・南(S)・東(E)・

西(W)・北東(NE)・南東(SE)・南西(SW)・北西(NW)の8方向に分類した。

傾斜・倒壊方向を確認できた103棟(木造家屋だけでなく、数棟の農業倉庫も含む)の倒壊8方向別の棟数を表3に示し、図4には木造家屋の傾斜・倒壊方向(矢印)を記載し、表3の棟数を反映した傾斜・倒壊方向ベクトル図も図4左上に示す。表3・図4から傾斜・倒壊方向は、北東方向が32棟と一番多く、南西、東、及び西の順序となった。図4より被災した木造家屋は、北・北西方向については非常に少なかった。そのため、表3・図4から被害を受けた木造家屋は、北東-南西方向からの強震動による影響を受けたと考えられる。

表3 傾斜・倒壊

方位	倒壊方向
北(N)	2
北東(NE)	32
東(E)	15
南東(SE)	5
南(S)	8
南西(SW)	25
西(W)	14
北西(NW)	2
全棟	103



写真16



写真17



写真18

木造家屋の傾斜・倒壊方向

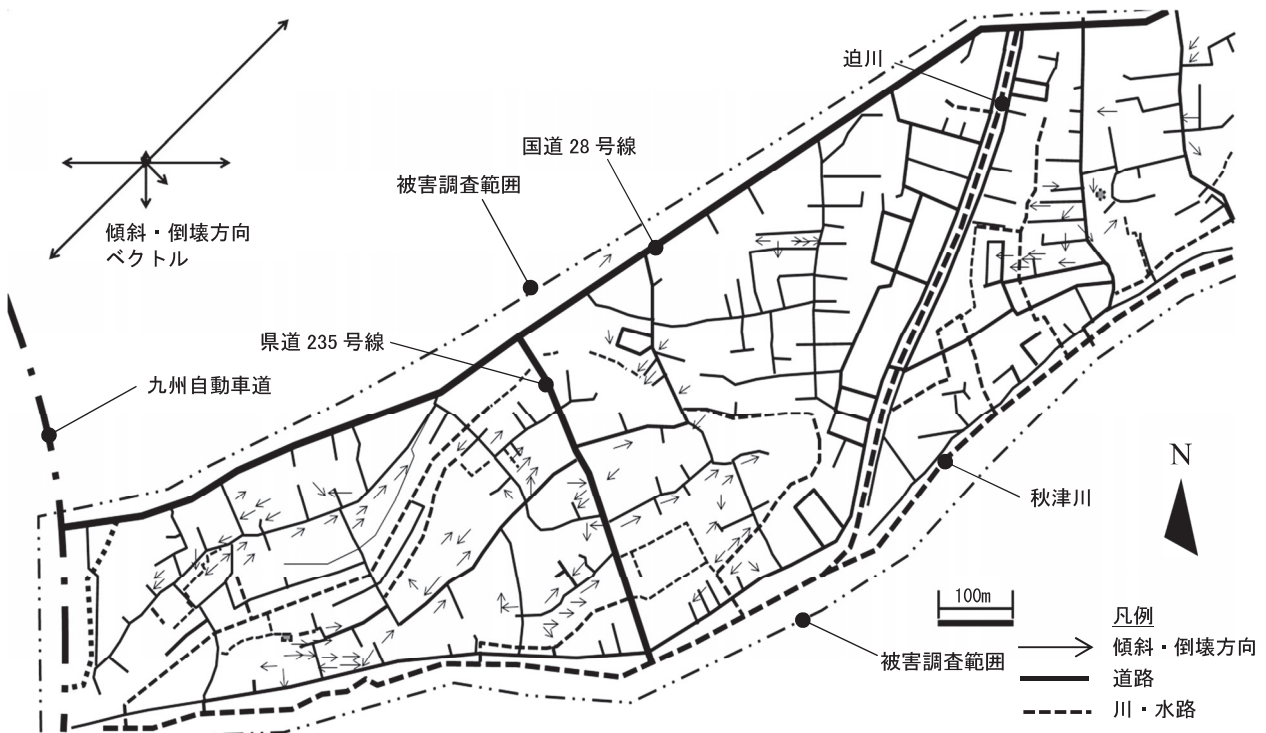


図4 木造家屋の傾斜・倒壊方向

4.2. 4月14日・前震及び4月16日・本震の水平動2成分平面軌跡

前震及び本震における益城の水平動2成分観測記録加速度時刻歴に、周期0.5~2秒のバンドパスフィルターを施し、その得られた加速度の水平動成分平面軌跡を図5に示す。

図5から益城は、前震では強震動の平面軌跡強軸が北西-南東の方向、若しくは東西方向に傾い

ており、一方、本震・強震動の平面軌跡強軸は北東－南西方向に傾いている。

本震・強震動水平2成分平面軌跡の強軸は、益城町に多く建てられている木造家屋の壁量が不足している桁行方向に及ぼす影響が大きかったと思われる。その傾向は先に示した図4に示すように国道28号線に平行な道路に沿って、傾斜・倒壊した木造家屋が多い。これは図4の被害調査範囲の西側に位置する福富地区及び惣領地区に、北東－南西方向に傾斜・倒壊している木造家屋の棟数の多さからも伺える。

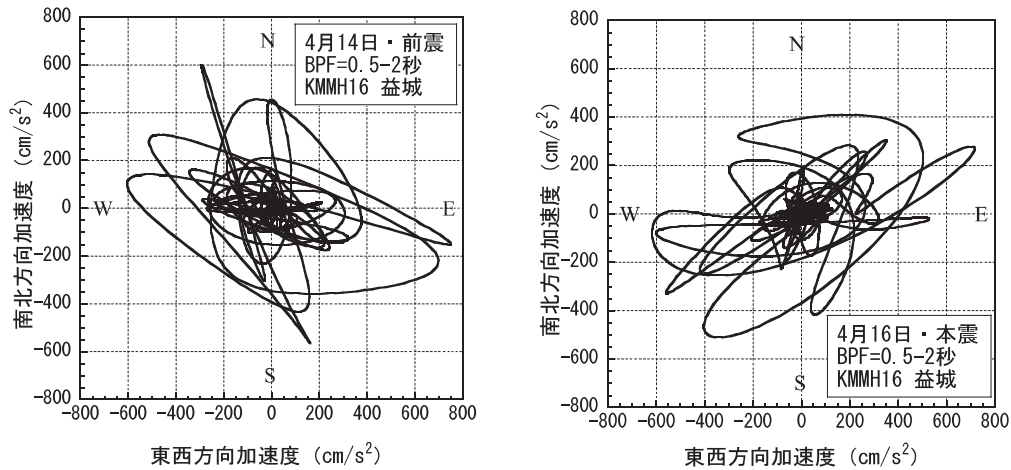


図5 益城水平動2成分平面軌跡

付記. 免震構造を採用した病院施設の免震層変位応答

南阿蘇での免震構造を採用した病院施設の平成28年熊本地震本震の強震動に対する地震応答について報告する。本報告の題目及び目的からやや逸れる感が否めないが、建築構造・耐震設計の研究については重要な研究テーマであることから、報告を行うこととする。平成28年熊本地震の第三回調査は、9月30日から10月3日の4日間実施し、10月3日に南阿蘇地域を訪問して建物被害調査を行った。写真19に示す熊本県阿蘇市黒川にある病院施設は、免震構造を採用して平成26年に竣工した。そして平成28年4月16日熊本地震・本震の揺れを受けた。病院施設は、エキスパンションジョイント部や犬走り部の破損が生じた⁶⁾。また停電も発生したが3日間は運転できる電気バックアップの機能を有していたため、医療行為に支障は生じていない。4月17日18時頃には、四国電力の電源車から仮送電が開始された。他の阿蘇市の病院が機能停止に陥る中、災害医療を継続した⁶⁾。

病院施設の免震ピットには、写真20に示す野書き計が設置されて、免震層の変位野書き記録がとれている。その野書き変位記録を写真21に示す。免震層変位応答量は最大46cm (片振幅)、全長92cm (全振幅)になる。この病院施設の免震層クリアランスは、写真22・23に示すように50cmであるため、免震層変位応答量があと4cm大きかったならば免震層クリアランス50cmと同じ応答変位となり、これを超えると免震建物と擁壁との衝突が発生した可能性が高い。

図6に示す変位応答平面軌跡は、病院施設から約3km離れたところに位置する防災科学技術研究所の強震観測網の観測点である一の宮 (K-net) の強震記録を用いて、免震構造のアイソレータ周期 T_f を3.5秒、ダンパーせん断力係数 a_s を0.05と仮定して、1質点系弾塑性地震応答解析を行って得られた変位応答平面軌跡である。なお、減衰定数は15% ($h=0.15$) である。最大変位は写真21と図6ではかなり違いが見られるものの、北東－南西方向に変位軌跡強軸の傾きが類似している点も見られる。写真21の野書き計による免震層変位応答量と、図6の解析による変位応答量の最大変位

の大きな違いは、病院施設の建設地の表層地盤特性や構造特性（杭基礎）による効果もあると考えられる。



写真19 阿蘇市にある病院施設



写真20 免震ピット野書き計



写真22
免震層クリアランス

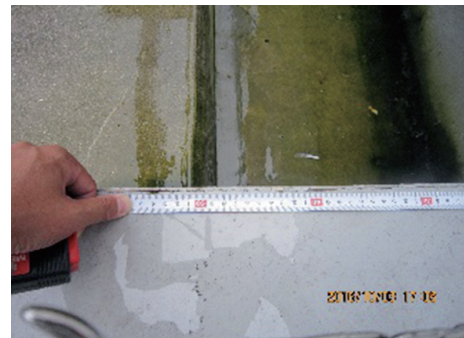


写真23 免震層クリアランス50cm



写真21 野書き計による免震層変位応答の軌跡

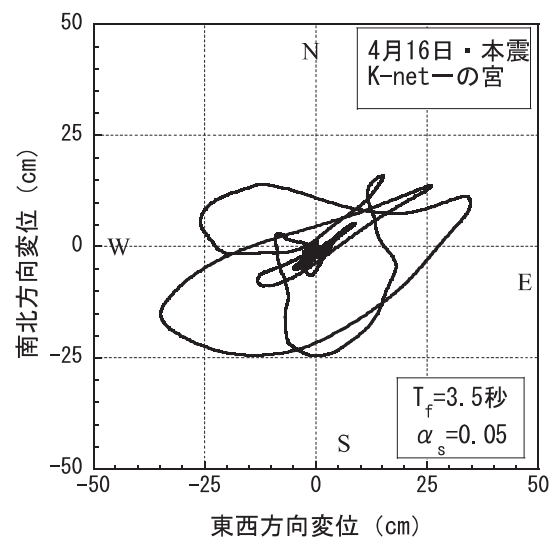


図6 変位応答平面軌跡 (k-net一の宮)

5. まとめ

本報告では、平成28年熊本地震の前震・本震による熊本県益城町の木造家屋の地震被害の特徴を報告し、前震・本震で得られた強震動を過去の強震動と比較検討した。観測された強震動の特性を分析して、熊本県益城町の地震被害が生じた傾斜・倒壊した木造家屋の方向性から、その被害要因

の一考察を行った。最後に、免震構造を採用した病院施設の免震ピットで観測された罫書き変位記録を報告した。本報告をまとめると下記の通りである。

- 1) 調査した範囲において被害を受けた木造家屋の柱・土台及び梁・柱の接合部には、接合金物をしていなかったため、木造家屋の大きな被害につながった。
- 2) 熊本地震・本震の主要強震動は、周期1秒以上の周期帯域においてこれまでの近年観測された強震動及び熊本地震・前震の強震動よりも大きな速度応答スペクトル強さを有する強震動強さである。
- 3) 表3・図4から被害を受けた木造家屋の傾斜・倒壊方向は、本震・強震動の平面軌跡より北東-南西方向からの強震動による影響を受けたと思われる。
- 4) 熊本県阿蘇市にある免震建物の免震層変位応答量は最大46cm(片振幅)、全長92cm(全振幅)となり、大きな免震層変位応答量が生じた。

謝 辞

地震発生から僅か一週間後、自宅が半壊・全壊、倒壊しているにも関わらず、平成28年熊本地震における益城町の地震時状況を証言していただいた住民の方々に、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。

阿蘇市の病院施設総務管財係の井野洋様には、日常業務のご多忙の中、病院施設の免震ピットを含む施設の見学、及び本震時の病院施設の様子、本震後の病院の状況を時系列で詳しく御教授いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

熊本県益城町の傾斜・倒壊方向を記載した地図(図4)については、高知工業高等専門学校環境都市デザイン工学科池田研究室所属の山本紘範君に御協力いただきました。

強震記録については、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。

なお、本現地調査及び本研究の一部に関しては、一般社団法人四国クリエイト協会による平成28年度研究助成金、一般社団法人高銀地域経済振興財団による平成27年度研究助成金の助成を受けました。

以上、諸氏及び諸機関に関してここに記して、謝意を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 気象庁：内陸及び沿岸で発生した主な地震の地震回数比較(毎月1回、上旬に更新)、入手先<http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html>、参照日：2016/10/16
- 2) 坂本功監修：阪神大震災に見る木造住宅と地震、鹿島出版、pp.26~87, 1997. 4
- 3) 建築図解辞典編集委員会編：図解辞典 建築のしくみ、彰国社、pp.132-133, 2001. 2 第1版
- 4) 松田高明、竹村厚司：1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊様式と倒壊方向、人と自然、資料、第8号、pp.159-174, 1997.12
- 5) 久田嘉章：1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向データの数値化、及び強震記録との関係、日本建築学会構造系論文集、第512号、pp.105-110, 1998.10
- 6) 病院施設：病院施設/熊本地震の現地調査報告、2016.10. 3 調査日入手

受理日：2016年10月31日