

2007年能登半島地震における被災木造建物の耐震性能と地域特性の評価

SEISMIC PERFORMANCE AND STRUCTURAL REGIONALITY OF
DAMAGED WOODEN HOUSES IN THE 2007 NOTO HANTO EARTHQUAKE

清水秀丸*, 新井 洋**, 森井雄史***, 山田真澄****, 林 康裕*****

Hidemaru SHIMIZU, Hiroshi ARAI, Takeshi MORII, Masumi YAMADA, and Yasuhiro HAYASHI

This study performed a damage survey and seismic performance evaluation in the Kuroshima district, which was subjected to strong shaking during the 2007 Noto Hanto earthquake. From the results, the base shear coefficient for wooden structures is relatively high; 0.51 for wooden houses and 0.78 for mud-walled storehouses. The mud plaster wall, hanging walls, and spandrel walls are also an important seismic resistant element. Structural regionality of the wooden house is found in equivalent height, peculiar mode, and base share coefficient. As a conclusion, high strength of wooden structures cannot always reduce the maximum response deformation angle.

Keywords: The 2007 Noto Hanto earthquake, Wooden house, Traditional structure, Mud plaster wall, Seismic performance, Structural regionality

2007年能登半島地震、木造住宅、伝統構法、土塗り壁、耐震性能、地域特性

1. はじめに

2007年3月25日に発生した能登半島地震(気象庁マグニチュードM_j6.9)¹⁾では、石川県鳳珠郡穴水町、輪島市、七尾市で気象庁発表震度6強を記録し、鳳珠郡穴水町の市街地や輪島市門前町を中心に多くの建物に甚大な被害が発生した。地震直後に実施された被災調査によると、木造建物に被害が多く、土塗り壁などを有する伝統的な軸組構法の家屋か店舗併用住宅が多数倒壊したと報告された²⁾⁻⁴⁾。その一方で、大きな被害を受けた木造建物と同じ地域に建ち、同じ構法で建設されたにも関わらず、倒壊を免れた建物も多く存在する。建物への入力地震動については、門前総合支所(走出)に設置された震度計の情報(3成分合成加速度1303.8cm/s²、計測震度6.4)⁵⁾などから、門前町地区が比較的大きかった可能性が示されている。また、門前町走出において実施された建物被害調査、微動観測、墓石調査から、この地域の最大地動速度は、平地部で100cm/s程度以上と推定されている⁶⁾。これら、入力地震動が大きかった可能性が有るにも関わらず、被害の小さかった木造住宅の耐震性能を適切に評価して、その原因を調査・研究することは、今後の木造住宅の地震被害を軽減する上で重要である。なお、本論文では、土塗り壁を主な水平抵抗要素とした木造建物を「伝統木造」、面材や筋かいを主な水平抵抗要素とした木造建物を「在来木造」と称する。

伝統木造は、在来木造よりも変形性能が高いことが、近年の研究で明らかとなってきた⁷⁾。また、伝統木造には、各地域の気候風土に適応した構造的・意匠的な特徴があり、これらは耐震性能にも影響を与えることが指摘されている⁸⁾。2007年能登半島地震において大きな被害が発生した地域には、伝統木造が多く、その耐震診断を行う際には、構造的な特徴(高い変形性能、建物の振動特性、全面壁以外の耐震要素)を適切に評価する必要があると考えられる。現在、木造軸組建物の耐震性能評価手法として、保有耐力による手法(精密診断法1)⁹⁾が挙げられる。その他にも、建物の経年劣化や蟻害・腐朽が無いなどの前提条件が有るものの、木造軸組建物の耐震性能評価手法として、限界耐力計算による手法¹⁰⁾や、許容応力度設計による手法¹¹⁾などが挙げられる。

以上の背景から、本論文では、被害が大きかった輪島市門前町黒島町(以下、黒島地区)において伝統的な軸組構法の木造建物を対象とした耐震性能評価を行う。また、比較的被害が小さかった被災木造建物の構造特性を調査し、黒島地区の木造建物被害から能登半島の木造建物が有する構造的な地域特性を検討する。第2章では、現地調査の概要および調査から明らかとなった黒島地区の木造建物の構造的な特徴や振動特性について述べる。第3章では、調査建物のベースシア係数および偏心率を求め、地震被害との関係を考察し、建物の耐震性能を評価する。そして、第4章では、2000年鳥取県西部地震、2003年宮城

* 防災科学技術研究所 研究員・博士(工学)

** 建築研究所構造研究グループ 主任研究員・博士(工学)

*** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)

**** 京都大学次世代開拓研究ユニット 助教・Ph.D.

***** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Research Engineer, Nat'l Res. Inst. for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.

Senior Research Engineer, Dept. of Structural Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

Assist. Prof., Pioneering Research Unit for Next Generation, Kyoto Univ., Ph.D.

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

県北部の地震など、近年の被害地震で被災した木造住宅の耐震性能との比較を行う。各地域の木造建物が持つ構造的な地域特性が最大応答変形角に与える影響について、等価1質点系に置換した力学モデルを用いて検討する。

2. 黒島地区における被災木造建物の構造的特徴と振動特性

2.1 木造建物の概要

石川県輪島市門前町黒島町は、能登半島外浦の南北に細長い海岸沿いに住宅が多い地域である(図1)。この地域は、輪島市門前町の中でも特に積雪が少ないが、冬季は強風によって日常生活に制約を受ける¹²⁾。その一方で、江戸時代には北前船の寄港地として栄え、多くの木造建物(県指定有形文化財で回船問屋であった角海家など)が建設された。しかし、現在の黒島地区は平成18年度末時点で輪島市が過疎地域¹³⁾に指定されたように、人口が減少して建築年代の古い木造建物が多い。

黒島地区の木造建物の大きな外観的特徴は、外壁仕上げに下見板と呼ばれる木材を貼り付けること、屋根に黒く光沢のある能登瓦を使うことである。この特徴は土蔵に多く見られ、下見板は強風による土壁の劣化対策、能登瓦は強風対策かつ耐寒性に優れている点など、北陸地方の気候条件に適した仕様となっている。強風対策は土蔵と住宅の間にも見られ、建物間を廊下で連続させる場合が多い。そのため、土蔵と住宅の建物間距離が近い。また、建物の海側に面した構面は開口部が少ない(写真1)。

黒島地区の木造建物の構造的な特徴を把握するため、アンケ

ート調査を実施した。アンケートは、A4用紙2枚の表裏に予め記載された項目を選択する形式で計19問とした。黒島地区の全世帯(225世帯)を対象に配布し、回収箱は公民館に約1ヶ月間設置した(有効回答53枚)。アンケート結果より、住宅の構造に関連する項目を図2に示す。築年数は築21-40年の住宅が約6割と多く、築21年以上が約9割であった。構造種別は9割以上が木造、構法では伝統構法が約5割、在来構法が約3割である。階高は部分2階や総2階を含む2階建てが約9割、屋根材は瓦が約9割、外壁仕上げは下見板が約8割であった。

2.2 木造建物の詳細調査

黒島地区において、2007年4月上旬および下旬の5日間、被害を受けた木造建物の詳細調査を実施した。調査方法は文献14)と同じとし、

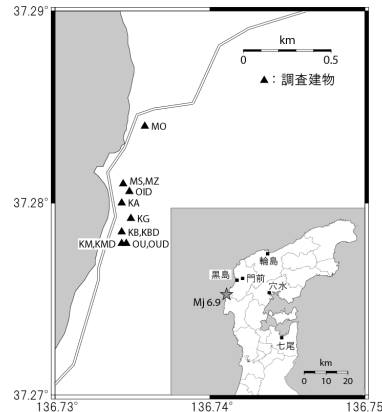


図1 2007年能登半島地震の震源と黒島地区および調査建物の位置関係

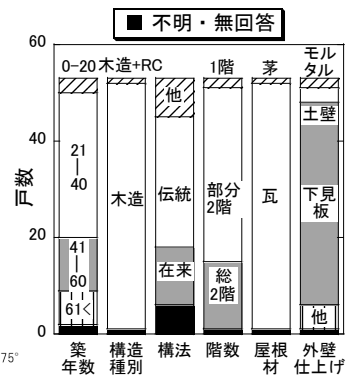


図2 黒島地区で実施した構造に関するアンケート調査結果



写真1 黒島地区の代表的な外観を持つ住宅(海側から山側に向けて撮影)



写真2 黒島地区の住宅OU邸(山側から海側に向けて撮影)



写真3 黒島地区の土蔵 OUD 邸(海側から山側に向けて撮影)

表1 詳細調査を実施した建物および被災度の概要

建物名	張り間方向	築年数(年)	高さ ¹⁾ (m)		床面積(m ²)		ベースシア係数 ⁴⁾		固有振動数(Hz)		重量(kN)		外壁仕上げ	内壁	外観調査 ⁶⁾	被災度					
			1層 ²⁾	2層 ³⁾	1階	2階	けた行	張り間	けた行	張り間	1階	2階				判定	基礎	内壁	外壁	屋根	
住宅	MO	NW	60	2.8	2.0	115.1	46.4	0.50	0.77	3.1	4.3	213.7	106.8	下見板 ⁵⁾	土塗り	D1-D3	被害中	-	有	有	-
	MS	N	100以上	2.8	1.9	147.0	34.0	0.68	0.65	3.7	4.5	250.8	153.7	下見板 ⁵⁾	土塗り	D0	軽微	-	有	-	-
	MZ	E	59	3.5	2.8	69.6	49.7	0.48	0.34	5.3	4.8	200.1	116.9	下見板 ⁵⁾	土塗り	D0	軽微	-	有	-	-
	KA	NW	30	3.3	2.9	87.8	59.6	0.47	0.38	4.1	5.0	144.8	96.4	下見板 ⁵⁾	石膏ボード	D0	無被害	-	-	-	-
	KG	E	60-70	2.8	-	113.6	-	0.53	0.68	3.9	5.3	274.7	-	下見板 ⁵⁾	土塗り	D1-D3	被害小	-	有	有	有
	KB	N	36	3.1	2.7	128.7	58.0	0.70	0.47	4.1	3.3	342.2	136.4	下見板 ⁵⁾	土塗り	D0	軽微	-	有	-	-
	KM	N	46	3.4	2.6	105.9	61.9	0.35	0.32	3.2	2.5	313.5	130.2	下見板 ⁵⁾	土塗り	D0	軽微	-	有	-	-
	OU	N	45	3.2	2.7	108.1	32.8	0.47	0.37	4.0	3.0	305.4	159.6	下見板 ⁵⁾	土塗り	D1-D3	被害小	-	有	有	-
	土蔵	OID	NW	100以上	2.5	1.3	16.6	16.6	0.87	0.81	4.3	4.9	58.1	55.8	下見板 ⁵⁾	土塗り	D0	被害中	有	有	有
KBD		N	40	2.8	2.5	32.0	24.0	0.69	0.66	3.8	4.0	108.1	92.5	下見板 ⁵⁾	土塗り	D0	無被害	-	-	-	-
KMD		N	100以上	2.7	1.3	22.8	22.8	0.89	0.58	6.5	欠測	89.9	96.5	土塗り	土塗り	D1-D3	被害小	-	有	有	-
OUD	E	80	2.5	1.4	19.7	19.7	0.97	0.75	5.4	5.3	69.9	67.5	下見板 ⁵⁾	土塗り	D0	無被害	-	-	-	-	

*1: KG 邸のみ平屋、その他は2階建て

*4: 建物の層間変形角 1/30rad

*2: 建物1階の基礎から桁までの長さ

*5: 仕上げ内部の壁は内壁と同じ

*3: 建物2階の床から桁までの長さ

*6: 文献14)に基づく悉皆調査

被害の比較的小さかった木造住宅8棟と土蔵4棟を対象とした(表1)。表1は上側より、黒島地区の北部に位置する建物から順に住宅と土蔵を区別して並べた。写真2、3に、黒島地区で多く見られる外壁仕上げに下見板、屋根に瓦を持つ代表的な住宅(OU邸)および土蔵(OD邸)を示す。

調査建物の概要を表1に示す。建物の建築年数は、30-100年程度以上であった。建物の基礎は、土台の下をコンクリートで整地した形式が多く、また、壁は、KA邸を除いて、土塗り壁(以下、土壁)であった。屋根は、調査した12棟とも瓦屋根であり、葺き土は用いず銅線によって緊結されていた。建物のけた行、張り間方向は、最上階の屋根の棟の稜線から判断し、棟と平行な向きをけた行方向とした。例えば写真2の場合、2階左の屋根は増築部分であるため2階右の屋根から判断し、図の誌面に対して縦方向をけた行方向、写真の横方向を張り間方向とした。各階の床面積には、構造的に分離した離れなどは含まれない。なお、KG邸は、増築した2階部分が母屋と構造的に分離していたため、平屋建てとした。外壁仕上げには、木板の長手を横方向にして互いに少しずつ重ねる様式の南京下見板貼り(別名:イギリス下見板貼り)¹⁵⁾が多用されていた。

地震による被災程度と耐震性能(3.2節)との関係を検討するため、詳細調査から建物内の被害も考慮した被災度判定を行った。被災度の判定は、文献14)の目視による基準を用い、被害大、被害中、被害小、軽微、無被害の5段階とした。表1に、被災度の判定結果と被害が認

められた箇所を示す。なお、調査建物の近傍で倒壊した一部の建物からは、蟻害による軸組の劣化も確認されたが、詳細調査建物に蟻害は認められなかった。参考のため、岡田・高井¹⁶⁾の方法で外観調査から判定した被災度も同表に示す。約4割の建物が外壁に被害が無くても内壁に被害が見られ、詳細調査の被災度と文献16)に基づく被災度が必ずしも一致しない。このことは、外壁が下見板のような仕上げ材で覆われている場合には、外観調査だけでは建物の被災度を適切に評価できない可能性のあることを示唆している。

2.3 木造建物の構造的特徴と地震被害

調査建物の中から、黒島地区の木造建物の代表的事例として、住宅(OU邸)と土蔵(OD邸)の平面図を図3に示す。柱の太さは、住宅115mm角、土蔵125mm角、柱間距離(1スパン)は住宅・土蔵ともに905mmである。OU邸の全面壁・小壁・腰壁は、ほぼすべてが壁厚65mmの土壁である。なお、本論文中で用いる「小壁」とは、文献17)の内法長押から天井周り縁との間にある壁等を指す。全面壁の内壁は2階に多いが1階には少なく、2階の全面壁の真下の1階に全面壁や柱が無い場合もある。例えば、2階X5通り、Y6通りには全面壁が多いが、1階和室4部屋の中央X5-Y6付近には全面壁が無く、柱と小壁のみである。また、2階の隅柱X1-Y11の真下の1階には柱や全面壁が無い。上階の耐震要素の直下または同一壁線上に耐震要素等が無い傾向は、調査した住宅の約5割で確認された。

土蔵のOD邸は、外周の柱がすべて通し柱、柱間は壁厚140mmの全面壁の土壁が室内側で真壁、室外側は大壁仕様で構成されている。調査した土蔵のほとんどが総2階建てで、けた行方向に細長い平面形状を有し、調査した土蔵4棟の出入り口はすべて長手構面の中央付近に有った。OD邸の入り口には、OU邸の廊下を通らないとどりに着くことが出来ず、外観上は住宅と土蔵が一体のように見える。

OU邸の地震被害は各階に見られ、1階では、図3中の「★」で示したY6構面のX1-X5間(柱間距離3620mm)の小壁中央において、束の抜けが発生した。束の抜け量は微小であり、軸組に亀裂などは無いが、襖が閉まらなくなったためジャッキアップによる修理を行ったことをヒアリングで確認した。このため、OU邸の被災度は「被害小」とした。その他、OU邸の被害は、図中「☆」の位置で1階下屋の瓦の一部が落下したこと、また、2階「◎」の位置で全面壁表面にひび割れが生じたことであった。

2.4 微動計測による木造建物の振動特性

黒島地区の木造建物の基本的な振動特性を把握するため、詳細調査を行った建物で微動計測を実施した。例として、図3に示すOU邸およびOD邸では、地表面1点(A)、住宅(OU邸)2階の5点(B-F)、土蔵(OD邸)2階の2点(G、H)の計8点に加速度センサを設置し、各センサけた行、張り間方向の計16成分の微動を、サンプリング周波数100Hzで5分間、同時計測した。計測された微動データから、風や交通振動等のノイズが少ない40.96秒の区間を複数個選び、FFTおよびブロック平均法¹⁸⁾により、2階B-H各点の地表面A点に対する伝達関数および相対加速度スペクトルを算定した。求めた伝達関数のピーク振動数から、建物の固有振動数を読み取った。また、固有振動数における伝達関数の位相と相対加速度スペクトルの値から、建物の平面振動モードを求めた。他の建物においても、同様の計測および処理解析を行った。

OU邸およびOD邸の微動計測から得られた伝達関数(絶対値)と平面振動モードを図4、5に示す。図4から、OU邸の固有振動数は、け

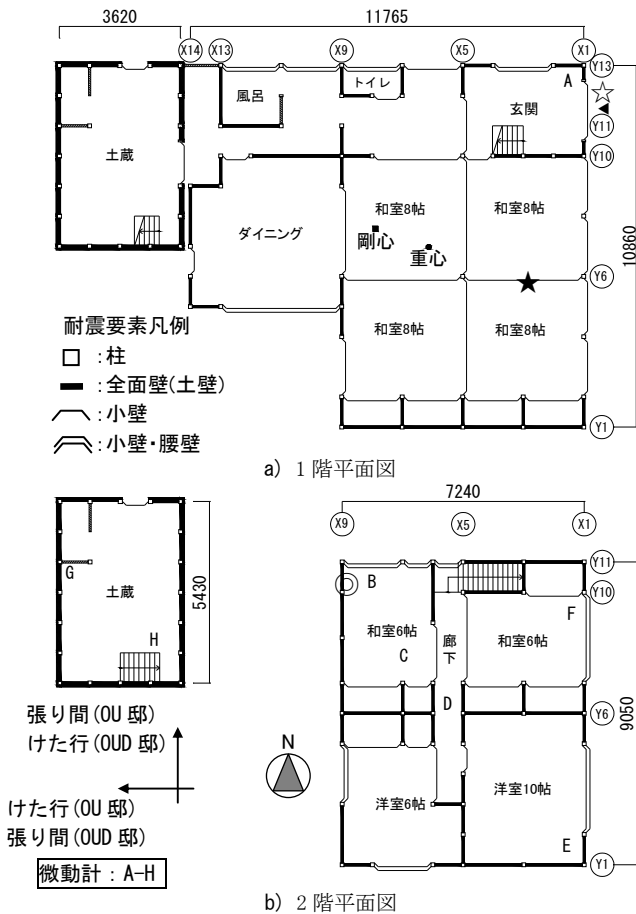


図3 OU邸(住宅)およびOD邸(土蔵)各階平面図(単位:mm)

た行方向4.0Hz、張り間方向3.0Hz、OUD邸のそれは、けた行方向5.4Hz、張り間方向5.3Hzと読み取れる。ここで、図5aから、OU邸のけた行方向固有振動数(4.0Hz)においてOUD邸も振動する傾向が見られる。一方、OU邸の張り間方向、OUD邸の各方向については、隣接建物の固有振動数では殆ど振動しておらず、隣接建物の影響は小さいと考えられる。他の隣接する建物でも、別々の固有振動数で振動している事例が多い。以上より、黒島地区の木造住宅と土蔵は、一見して1棟に見えるほど近接した外観を有しているが、各建物は独立した振動特性を持ち、連成効果は大きくないと考えられる。

3. 被災木造建物の耐震性能と地震被害との関係

3.1 耐震性能評価方法

調査建物の耐震性能を、木造建物の限界耐力計算に用いられる耐力算定手法^{10)、19)}により評価した。この際、建物の各構面の耐力は、けた行、張り間方向ごとの荷重-変形角関係を、剛床を仮定して、図6のように加算した。加算の方法は、各耐震要素で設定された規則によって行い、文献14)と同様とした。所定の層間変形角(1/120rad、1/60rad、1/30rad、1/15rad)における建物1階の耐力を各階の質点系重量の和で除することによって、ベースシア係数を算出した。

各耐震要素の耐力の加算則を以下に例示する。土壁などの全面壁の耐力は、柱スパン距離を基準柱スパン距離(1820mm)で除した値に基準耐力を乗じることで求めた。土壁の基準耐力は、基準壁厚(60mm)に対する補正を行うが、階高による補正は行わない。なお、能登半島の土壁の荷重-変形角関係が不明なため、本論文では、文献10)の京都の土壁のそれを用いた。下見板、石膏ボード、構造用合板の耐力は、ファスナーの種類や間隔を問わず、文献10)の値を用いた。小壁・腰壁の耐力は、壁材に関わらず柱スパン数による比例倍とし、壁長・壁厚に

よる補正は行わない。ただし、壁高が基準高さ(910mm)より低い場合には、耐力の補正を行った。なお、小壁・腰壁が下見板貼りされている場合は、下見板が無いものとして評価した。軸組などの貫、柱ほぞの耐力は、基準柱高さ(2730mm)を対象建物各階の柱長さで除することで補正した。貫の耐力は、横方向の貫のみ考慮した。柱ほぞの形状は、耐力が低い評価となる短ほぞと仮定して耐力を求めた。

耐力の算定に用いる建物各階の質点系重量は、固定荷重と積載荷重の和として求めた。固定荷重については、建築基準法施行令(以下、令)第84条に定められる単位面積当たりの値から算出した。具体的には、屋根重量は、瓦の葺土無しとして、屋根勾配や軒の出を考慮して算出した。土壁の重量は、住宅と土蔵で壁厚が大きく違うため、両者を区別した。住宅の壁厚は53-80mm程度と標準的なため、「木造の建築物の小舞壁」の値830N/m²を壁厚に関係なく用いた。なお、各住宅の小屋裏にあたる桁-天井間の土壁も重量として考慮した。一方、土蔵の壁厚は130-190mmであったため、土壁の単位体積重量を0.01N/cm³と仮定して²⁰⁾重量を算定した。また、土蔵の屋根瓦の下にある防火用の土壁も各建物の壁厚と同じとして重量を算出した。積載荷重については、令第85条から、地震力を計算する場合の600N/m²とした。

3.2 ベースシア係数

調査建物の耐震性能を把握するため、層間変形角1/30radにおける耐力を建物重量(地震力算定重量)で除したベースシア係数(以下、 C_B)を求めた。各建物の C_B と各耐震要素の負担割合を図7に示す。図は、文献6)から黒島地区の住宅被害率が南北および東西方向で変化することが示されたため、住宅被害率が高い北側に位置する建物から左に示す。図では、主要な耐震要素として、全面壁、小壁・腰壁、軸組(貫を含む)の3種類に分類した。各建物の全面壁とは、表1に示す内壁(土壁、石膏ボード、構造用合板の何れか)であり、表1に示す外壁仕上げが下見板の場合は、全面壁の下見板も含む。小壁・腰壁の壁材は各建物の全面壁と同じである。図7は左側より、黒島地区の北部に位置する建物から順に並べた。

図7より、住宅の C_B は、けた行方向0.35-0.70(平均0.52)、張り間方向0.32-0.77(平均0.50)、土蔵のそれは、けた行方向0.69-0.97(平均0.85)、張り間方向0.58-0.81(平均0.70)となっている。けた行、張り間の各方向を平均した C_B は、住宅0.51、土蔵0.78である。また、 C_B に対する全面壁の負担割合は、住宅で約3-7割、土蔵で約7-9割である。ただし、住宅では、小壁・腰壁の負担割合も約1-5割と高い場

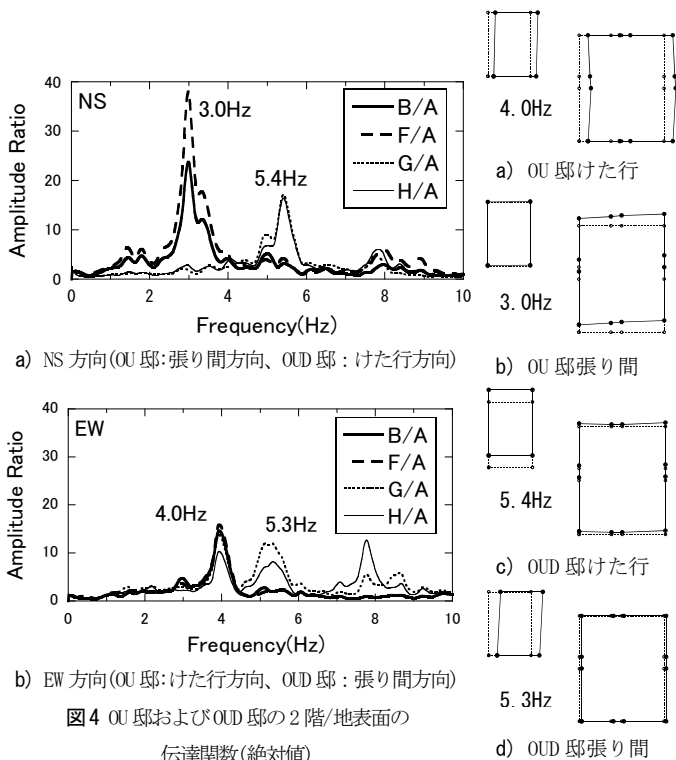


図4 OU邸およびOUD邸の2階/地表面の伝達関数(絶対値)

図5 OU邸およびOUD邸平面振動モード

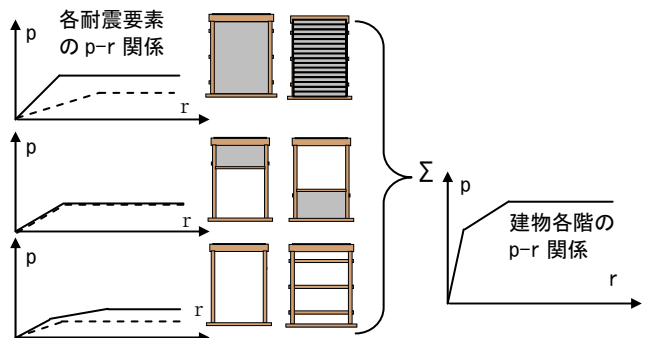


図6 木造建物の限界耐力計算に用いられる各階の耐力算定手法の概要(グラフのpは荷重、rは層間変形角、実線と点線はそれぞれグラフ右側の個別耐震要素の荷重-層間変形角関係の概要を表す)

合もあり、全面壁とともに重要な耐力要素となっていることがわかる。

詳細に見ると、図 7a, b より、調査した住宅のうち、被災度が最も大きかった MO 邸 (被害中) の C_B は、けた行方向 0.50、張り間方向 0.77 と比較的大きい。その一方で、被災度が軽微であった KM 邸の C_B は、けた行、張り間方向とも、調査した範囲では最小である。また、図 7c, d より、調査した土蔵のうち、被災度が最も大きかった OID 邸 (被害中) の C_B は、けた行方向 0.87、張り間方向 0.81 であり、無被害または被害小であった他の 3 棟の C_B と大きな差異は見られない。このように、木造建物の被災度の大小と C_B の高低との間には、明確な対応関係は認められない。なお、MO 邸、KM 邸、OID 邸の被災度を決定した要因は、それぞれ表 1 被災度における内壁被害とした 1 階の内壁の一部脱落・室内柱の残留傾斜・鴨居の下がり (MO 邸)、内壁被害とした 1 階の内壁表面ひび割れ数カ所 (KM 邸)、内壁・外壁・基礎被害とした 2 階内壁の一部脱落・1 階外壁表面の脱落・基礎のずれ (OID 邸) である。

3.3 偏心率

調査建物の床構面を剛床と仮定して、建物 1 階の偏心率を算出し、地震被害との関係を検討する。まず、1 階各通りの C_B を求めた耐力から $1/30\text{rad}$ の割線剛性を算定し、けた行、張り間の各方向の剛性を求めた。次に、部分 2 階など 1 階以外の影響を考慮して、各建物の重心を求めた。算定事例として、OU 邸における剛性と重心を図 3 に示す。各方向の剛性と重心から、偏心距離、ねじり剛性、弾力半径を求め、偏心率を算出した。各建物で求められたけた行、張り間方向の偏心率を、被災度ごとに図 8 に示す。図では、住宅と土蔵を区分して表示している。

図 8a から、住宅の偏心率は、けた行方向 0.04-0.18 (平均 0.11)、張り間方向 0.08-0.43 (平均 0.18) であり、けた行方向よりも張り間方向の偏心率が大きい場合が多い。一方、土蔵の偏心率 (図 8b) は、けた行方向 0.01-0.13 (平均 0.08)、張り間方向 0-0.09 (平均 0.04) であり、全ての土蔵において、張り間方向よりもけた行方向で偏心率が大き

なっている。

図 8 から、調査した住宅・土蔵の中で被災度が最大 (被害中) の MO 邸および OID 邸は、それぞれ張り間およびけた行方向の偏心率が最大となっていることがわかる。しかし、各邸の被害箇所は、3.2 節で述べたとおり、MO 邸では建物 1 階の内壁や軸組、OID 邸では各階壁の脱落と基礎のずれであり、これらの被害が建物のねじれに起因するとは考えにくい。また、図 8 から、被害小の OU 邸でも、張り間方向の偏心率が 0.25 と比較的大きいが、OU 邸の被害は、建物の 1 階中央付近や 2 階で発生しているため、これも偏心率に起因するものとは考えにくい。図 4a および図 5b から、OU 邸の張り間方向の固有振動モードには、ねじれ成分が見られるが顕著ではない。

以上より、黒島地区の木造建物は、剛床仮定の場合には大きな偏心率となる場合もあるが、微動計測からは、ねじれ振動は顕著ではない。また、偏心率と地震被害の間に明確な対応関係は認められない。

4. 被災木造住宅が持つ構造的な地域特性と建物応答との関係

4.1 耐力(ベースシア係数)の比較

黒島地区の木造建物の構造的な地域特性を把握するため、3 章で求めた詳細調査建物の C_B と、2000 年鳥取県西部地震や 2003 年宮城県北部の地震で被災した、2 階建て木造住宅^{8), 14), 21)} (以下、それぞれ鳥取の住宅、宮城の住宅と称する) の C_B との比較検討を行う。鳥取の住宅の調査棟数は 10 棟であり、 C_B は文献 21) の図 3、4 を、宮城の住宅の調査棟数は 7 棟、 C_B は、文献 14) の図 15 を用いた。この際、土壁を全面壁、その他を小壁・腰壁として扱い、軸組の耐力はそのままの値としている。また、黒島地区の調査建物のうち平屋は KG 邸だけのため、ここでは 2 階建ての住宅と土蔵 (以下、それぞれ黒島の住宅、黒島の土蔵) のみを対象とした。

C_B による比較を行う前に、単位床面積当たりの重量・耐力について考察する。これは、対象建物の規模 (床面積) によって部屋数に違いが

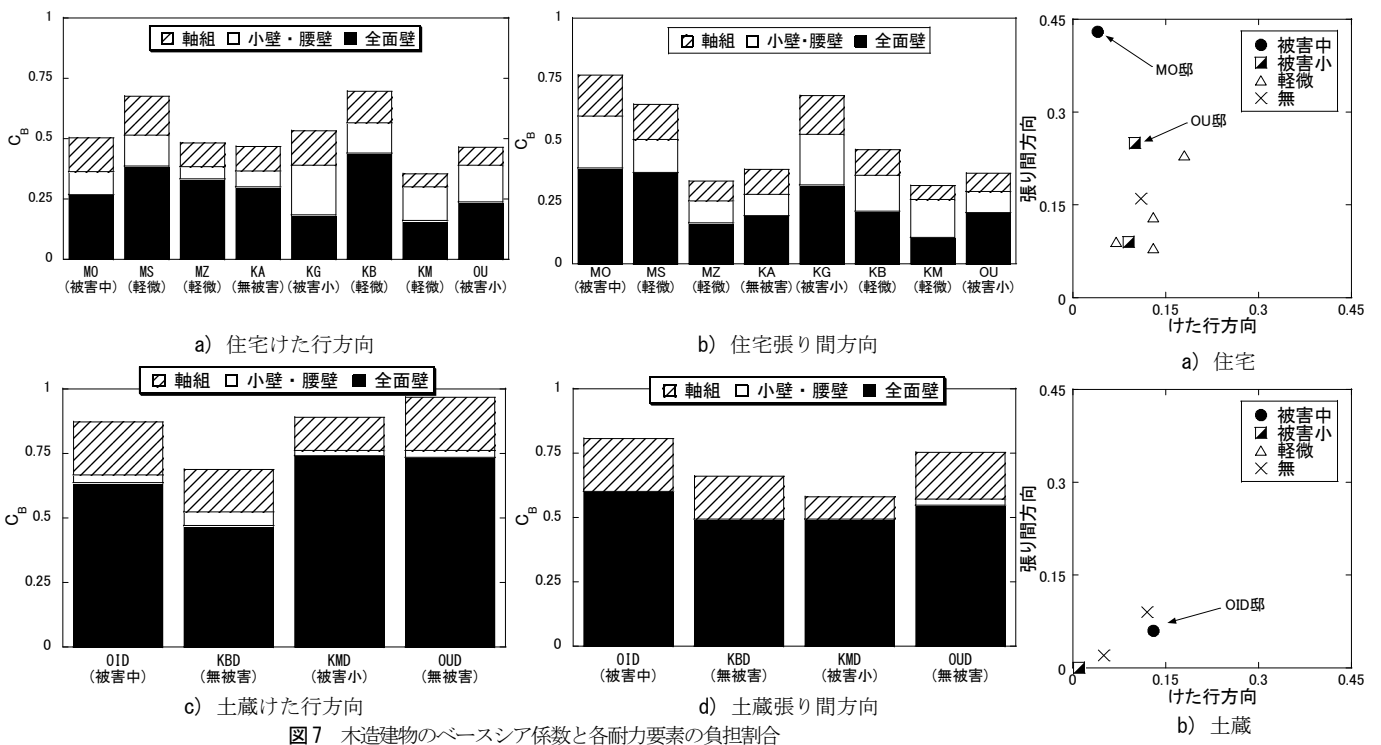


図 7 木造建物のベースシア係数と各耐力要素の負担割合

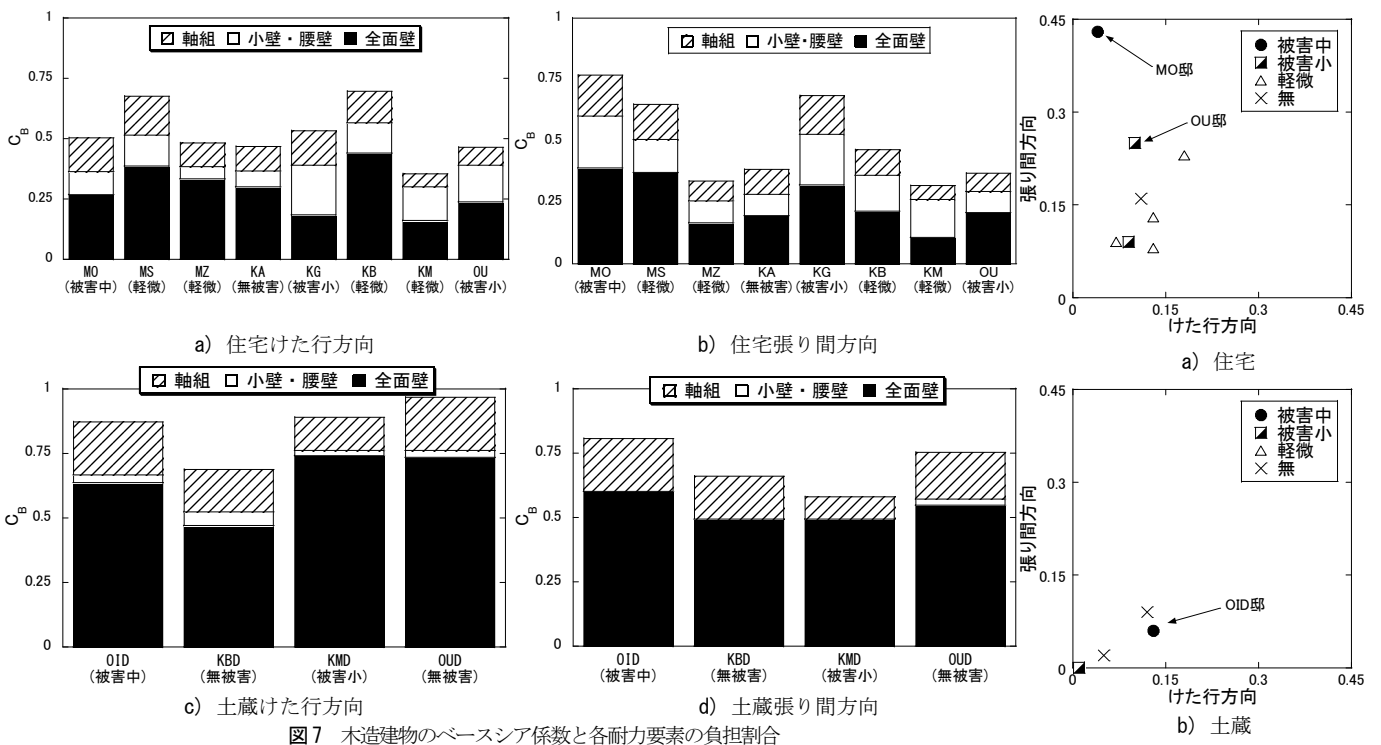


図 8 木造建物の偏心率と地震被害

生じ、部屋間を隔てる壁の耐力・重量に違いが生じるためである。そこで、本論文では、1階床面積を基準とした単位床面積当たりの耐力・重量に変換して、地域間の比較を行う。まず、 C_B を計算する際の建物重量を1階床面積で除して1階単位床面積当たりの建物重量を求めた。次に、1階耐力を1階床面積で除したけた行、張り間方向の単位床面積当たりの耐力を求めた。1階単位床面積当たりの建物重量と1階耐力の関係を図9に示す。図では、住宅と土蔵を別にして、けた行、張り間方向のデータを区別無くプロットしている。

図9a, bから、黒島の土蔵は、各地域の木造住宅に比べて、単位床面積当たりの重量・耐力ともに大きい値を示し、 C_B は概ね0.5-0.9の範囲に分布している。また、図9aより、各地域の木造住宅の C_B は、概ね0.3-0.7の範囲に分布している。ここで、木造住宅の単位床面積当たりの重量(図9a縦軸)には、地域による大きな差異は認められない。一方、単位床面積当たりの耐力(図9a横軸)は、黒島や宮城の住宅に比べて、鳥取の住宅では小さな値を示す傾向が認められる。

図10に、各地域の2階建て木造建物の C_B の平均と標準偏差を、けた行、張り間の方向別に示す。図には、 C_B に占める各耐力要素の負担割合も示す。図10より、各耐力要素が C_B に占める負担割合には地域による大きな違いは認められない。一方、各地域の C_B を値の小さい方向で比較すると、黒島の住宅(張り間方向0.47)は、宮城の住宅(けた行方向0.41)の約2割、鳥取の住宅(けた行方向0.34)の約4割大きく、最大で0.13の差がある。これは、図9aの考察で述べたように、単位床面積当たりの耐力(図9a横軸)の方が、単位床面積当たりの重量(図9a縦軸)より各地域で異なっていることが主な原因と推察される。

4.2 等価高さ、上下階の耐力バランス(固有モード)の比較

各地域の2階建て木造建物の耐震性能のうち、 C_B 以外の構造的な地

域特性について検討する。ここでは、簡単のため、建物を等価1質点系に置換した力学モデルを用いて考察する。具体的には、各調査建物の1階層間変形角1/30radの C_B を文献21)の降伏せん断力係数 C_y (以下、 $C_y=C_B$)として等価1質点系に置換し、等価高さ H_{et} 、等価質量 M_e と質量 M の比 μ 、建物上下階の耐力バランスである固有モード u_2/u_1 を求め、これらの値について、建物種別や地域による差異を検討する。なお、 H_{et} は(1)式より、 u_2/u_1 は(2)式より求める。

$$H_{et} = \frac{\sum m_i \delta_i H_i}{\sum m_i \delta_i} \quad (1)$$

$$u_2/u_1 = \frac{(k_1 + k_2) + m_1 \omega^2}{k_2} \quad (2)$$

ここで m_i は*i*階の質量、 δ_i は3.1節で示した所定の層間変形角時の*i*階の変位、 H_i は*i*階の基礎からの高さ、 k_i は*i*階の剛性、 ω は固有振動数である。表2に、黒島・宮城・鳥取の住宅および黒島の土蔵に対して求めた C_B 、 H_{et} 、 μ 、 u_2/u_1 の平均値を、けた行、張り間方向ごとに示す。表2より、 μ の値は、いずれの地域の住宅・土蔵とも0.9ないし1.0となっており、ほとんど差異が無い。しかし、 H_{et} および u_2/u_1 の値は、建物種別や地域によって大きく異なっている。

各地域の木造建物において、 H_{et} および u_2/u_1 に違いが見られた要因を分析する。 H_{et} と u_2/u_1 は、建物各階の耐力、階高や重量の関係から求められる。また、 u_2/u_1 は、 H_{et} を求める際に用いられる。そこで、各建物の2階の耐力・重量・高さを1階のそれらで除した2階/1階重量比、2階/1階耐力比、2階/1階高さ比を、けた行、張り間方向ごとに算定した。得られた重量比と耐力比の関係を、けた行、張り間方向ごとに図11に示す。図から、黒島の土蔵の2階/1階重量比および耐力比は、けた行、張り間方向とも、1程度の値となっている。ここで、

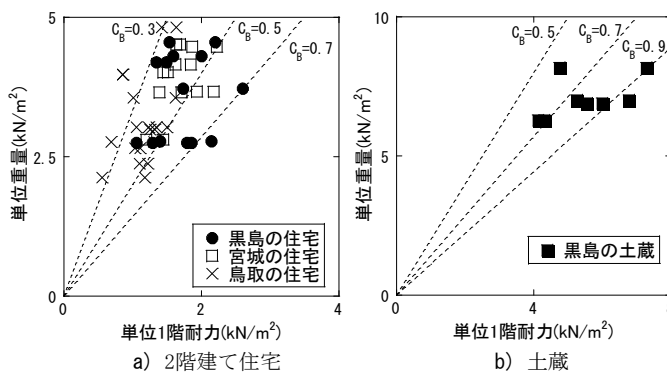


図9 木造建物の1階単位床面積当たりの1階耐力と重量

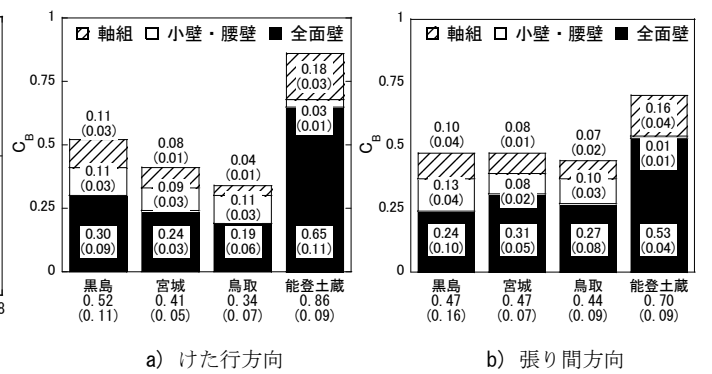


図10 各地域における2階建て木造建物のベースシア係数の平均(括弧内は標準偏差)

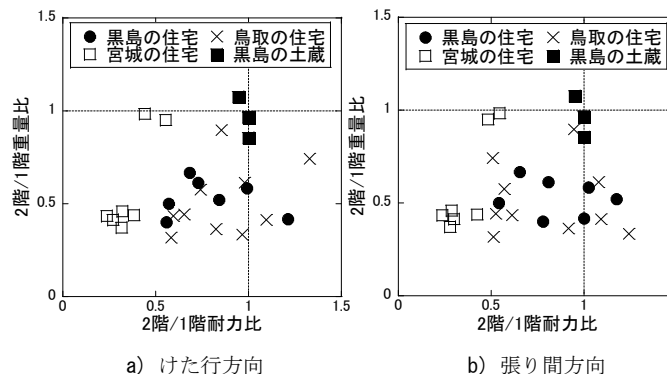


図11 各地域における2階建て木造建物の2階と1階の重量比と耐力比

表2 各地域における2階建て木造建物の降伏せん断力係数、等価高さ、固有モードおよび等価質量と質量の比(括弧内は調査棟数)

	C_B		H_{et} (m)		u_2/u_1		μ	
	けた行方向	張り間方向	けた行方向	張り間方向	けた行方向	張り間方向	けた行方向	張り間方向
黒島の住宅(7棟)	0.52	0.47	4.2	4.2	1.5	1.4	1.0	1.0
宮城の住宅(7棟)	0.41	0.47	5.0	5.0	2.2	2.2	0.9	0.9
鳥取の住宅(10棟)	0.34	0.44	4.0	4.0	1.5	1.5	1.0	1.0
黒島の土蔵(4棟)	0.86	0.70	3.4	3.4	1.3	1.4	1.0	1.0

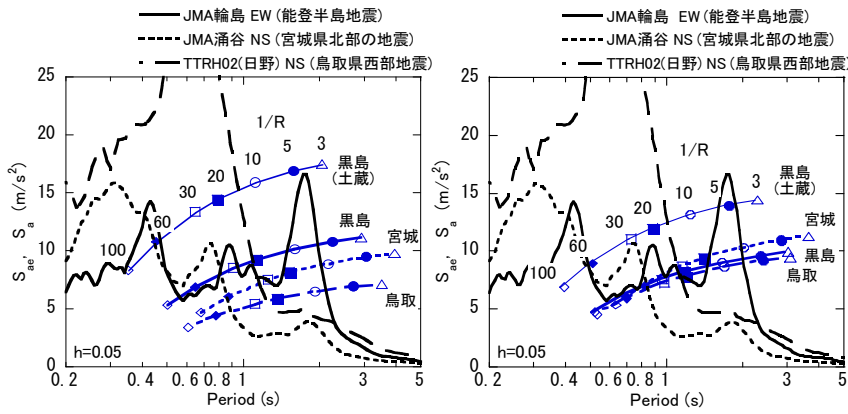


図 12 2007 年能登半島地震、2003 年宮城県北部の地震、2000 年鳥取県西部地震における強震記録の加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)と木造建物の性能等価加速度応答スペクトル

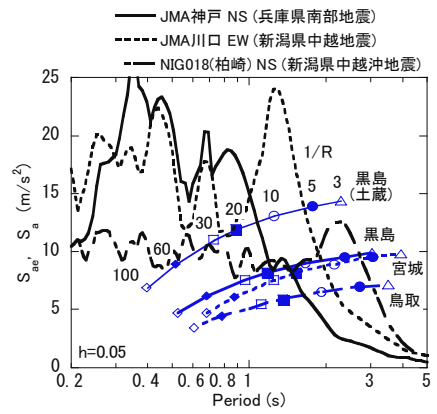


図 13 1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震における強震記録の加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)と木造建物の性能等価加速度応答スペクトル

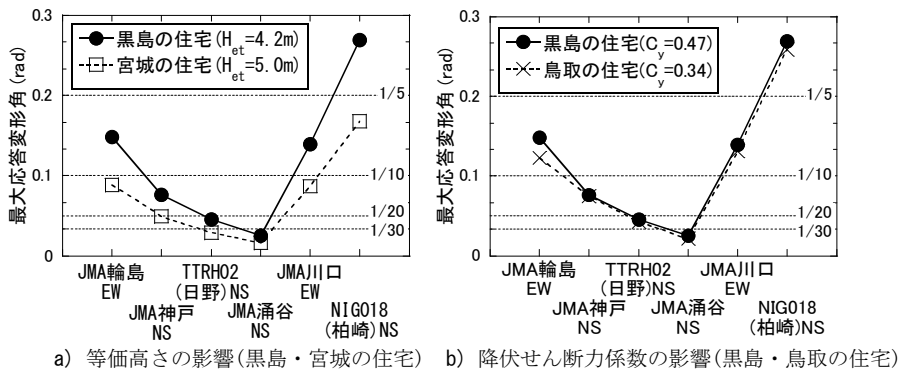


図 14 近年の国内の強震記録における木造住宅の最大応答変形角

住宅の重量比(図 11 縦軸)の値は、地域によらず、概ね 0.3-1 程度の範囲に分布している。一方、住宅の耐力比(図 11 横軸)の値は、宮城では 0.2-0.5 程度に集中しているが、鳥取および黒島では 0.5-1 程度の範囲に分布している。図は省略するが、得られた 2 階/1 階高さ比の値は、地域によらず、概ね 0.5-1 程度の範囲に分布しており、その耐力比との関係は図 11 とほぼ同様であった。以上から、各地域の 2 階建て木造建物の構造的な地域特性は、 C_b 以外にも、 H_{et} および u_2/u_1 に見られること、また、これらは 2 階と 1 階の耐力バランスの影響を強く受けていることが示唆される。

4.3 地域特性が建物応答に与える影響

4.1 および 4.2 節の検討を踏まえ、木造建物の構造的な地域特性の違いが最大応答変形角(以下、R)に与える影響について、性能等価加速度応答スペクトル²²⁾を用いて検討する。建物の性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} は、設計用地震荷重や地震記録の加速度応答スペクトル S_a (減衰定数 5%)との直接的な比較が可能となるよう、建物の限界性能(限界耐力、限界変形)を等価な加速度応答スペクトルに換算したものである²²⁾。すなわち、任意の地震動入力に対する建物の R は、地震動の S_a と建物の S_{ae} との交点から推定できる。

4.2 節で用いた建物の等価 1 質点系モデルから、黒島・宮城・鳥取各地域の住宅および土蔵の性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} を、けた行、張り間方向ごとに求めた。また、入力地震動として、2007 年能登半島地震、2003 年 7 月 26 日宮城県北部の地震、2000 年鳥取県西部地震において気象庁(JMA)および防災科学技術研究所の強震観測網で

得られた本震記録のうち、筆者らが木造建物の詳細調査^{6), 14), 21)}を実施した地域近傍の観測点(JMA 輪島、JMA 涌谷、TTRH02 日野)の水平動記録^{23), 24)}(直交 2 成分のうち最大速度の大きい方)を用いた。得られた木造建物の S_{ae} (けた行、張り間方向)と入力地震動の S_a を図 12 に示す。さらに参考のため、図 12 の各地域の木造建物の C_b が小さい方の S_{ae} と、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震および 2007 年新潟県中越沖地震の強震記録(JMA 神戸、JMA 川口、NIG018 柏崎)^{23), 24)}の S_a (水平 2 成分のうち最大速度の大きい方)を図 13 に示す。図 12 より、各地域の木造建物の耐震性能には、構造的な地域特性によって違いが見られる。また、図 12, 13 から、木造建物の R の値を決定する地震動特性の要因は、多くの場合、 S_a の速度一定領域のスペクトル形状であることがわかる。

H_{et} および C_b の違いが R に与える影響を検討するため、図 12, 13 から、6 つの入力地震動に対する各建物の R を求め、図 14 に示す。図 14a から、用いた全ての強震記録に対して、 H_{et} が高い宮城の住宅(けた行方向)の方が、 H_{et} が比較的低い黒島の住宅(張り間方向)よりも、R の値が小さいことがわかる。このことは、 H_{et} の算定に u_2/u_1 が用いられることを勘案すると、 H_{et} が高く u_2/u_1 の値が良い(値が 2 に近く、すなわち、2 階と 1 階の耐力バランスが良い)建物では、R を小さく抑えられることを示している。一方、図 14b から、 C_b が比較的大きな黒島の住宅(張り間方向)と C_b が小さい鳥取の住宅(けた行方向)の R は、いずれの地震動入力に対しても、同程度の値となっている。このことは、文献²⁶⁾でも述べられるように、木造建物では耐力を高くするこ

とが必ずしも地震時最大応答の抑制には繋がらないことを示唆している。ただし、図 13 から、NIG018 柏崎のように、 S_a の速度一定領域の短周期側のピーク値が比較的小さい地震動に対しては、黒島の土蔵のように、 C_B の高い建物では、 S_{ae} が S_a を上回るため、 R が小さく抑えられる場合もあると考えられる。

5. まとめ

2007 年能登半島地震において、輪島市門前町黒島町の被災木造建物の現地調査を行い、耐震性能と構造的な地域特性を評価した。また、構造的な地域特性が地震被害に及ぼす影響を把握するため、性能等価加速度応答スペクトルを用いて、2000 年鳥取県西部地震や 2003 年宮城県北部の地震で被災した木造住宅の耐震性能との比較検討を行った。本論文で得られた知見を以下に記す。

- 1) 黒島地区の木造住宅と土蔵は、外観から 1 棟に見えるほど近接した外観を有しているが、各建物は独立した振動特性を持ち、連成効果は大きくない。また、剛床仮定では大きな偏心率となる場合もあるが、微動計測からはねじれ振動が顕著ではない。
- 2) 黒島地区での調査木造建物の層間変形角 $1/30\text{rad}$ の平均ベースシア係数は、住宅で 0.51、土蔵は 0.78 である。 $1/30\text{rad}$ のベースシア係数に占める全面壁（土壁など）の負担割合は住宅で約 3-7 割、土蔵で約 7-9 割と全面壁が主要な耐力要素である。また、住宅では小壁、腰壁の負担割合が約 1-5 割と高い場合もあり、全面壁とともに重要な耐力要素である。
- 3) 黒島、宮城、鳥取の木造建物が持つ構造的な地域特性は、 $1/30\text{rad}$ のベースシア係数、等価高さ、上下階の耐力バランス（固有モード）に見られた。そのうち、等価高さが高く、上下階の耐力バランスが良い建物は、最大応答変形角が小さくなる。近年の国内の強震記録に対しては、 $1/30\text{rad}$ のベースシア係数が高い木造建物でも最大応答変形角が小さくならない場合が多い。

本論文では、木造建物の最大応答変形角を小さくするためには、地震動のスペクトル特性にも依存するが、耐力を高くするだけでは不十分であることを指摘した。ただし、本論文では、主要な耐力要素とした土塗り壁の荷重-変形関係が能登半島の壁土以外を用いて検討しており、今後、構造的な地域特性に対して更なる検討が必要である。

謝辞

本研究で用いた木造住宅の被災調査には、著者らの他に、京都大学工学部、同大学院工学研究科の学生諸君にご協力を頂きました。詳細調査でお伺いした住宅の皆様や黒島地区の川端一人氏（区長）には、地震後のご多忙中にも係わらず、調査に多大なご協力を頂きました。強震記録は、気象庁および防災科学技術研究所から提供頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 気象庁：2007 年 3 月 25 日 9 時 42 分ころ能登半島沖で発生した地震について（第 4 報）、（オンライン）、
<<http://www.jma.go.jp/jma/press/0703/26a/kaisetsu200703261030.pdf>>、（参照 2007-4）。
- 2) 榎本敬大、鈴木修治、河合直人、山口修由、中川貴文、杉本健一、村上智

- 徳：平成 19 年能登半島地震による木造建築物の被害概況、日本建築学会大会梗概集 C-1、pp. 5-6、2007. 8.
- 3) 中村匠、菅原裕太、五十嵐さやか、三辻和弥、前田匡樹：2007 年能登半島地震による木造建築物の被害と地震動（その 2:地震動と建物被害の関係）、日本地震工学会大会 2007 年梗概集、pp. 416-417、2007. 11.
 - 4) 土木学会：2007 年能登半島地震被害調査報告書、pp. 290-301、2007. 12.
 - 5) 気象庁：平成 19 年 3 月 地震・火山月報（防災編）、pp. 49、2007.
 - 6) 新井洋、森井雄史、山田真澄、清水秀丸、林康裕：2007 年能登半島地震の震源域における最大地動速度の評価と木造建物被害の要因分析、日本建築学会構造系論文集、No. 624、pp. 227-234、2008. 2.
 - 7) 山田真澄、鈴木祥之、後藤正美、清水秀丸：単位木造フレームを用いた動的・静的実験による木造軸組の耐震性能評価、日本建築学会構造系論文集、No. 582、pp. 95-102、2004. 8.
 - 8) 北原昭男、林康裕、奥田辰雄、鈴木祥之、後藤正美：2000 年鳥取県西部地震における木造建物の構造特性と被害、日本建築学会構造系論文集、No. 561、pp. 161-167、2002. 11.
 - 9) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法、木造住宅の耐震精密診断と補強方法（改訂版）、pp. 45-107、2004. 8.
 - 10) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル 限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法、学芸出版社、pp. 75-97、2004. 3.
 - 11) 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計、pp. 23-119、2002. 6.
 - 12) 石川県風至郡門前町：門前町史、門前町史編集委員会、pp. 15-16、1970.
 - 13) 総務省自治行政局 過疎対策室：過疎地域市町村等一覧（平成 19 年 3 月 31 日）、（オンライン）、
<<http://www.soumu.go.jp/c-gyousei/2001/kaso/h14kasoichiran.htm>>、（参照 2007-4）。
 - 14) 清水秀丸、林康裕、鈴木祥之、齋藤幸雄、後藤正美：2003 年 7 月 26 日宮城県北部の地震による被災木造住宅の構造的特徴と耐震性能、日本建築学会構造系論文集、No. 598、pp. 43-49、2005. 12.
 - 15) 建築知識スーパーブック：和風デザイン図鑑 意匠・しつらい・造作、pp. 218-220、1998. 1.
 - 16) 岡田成幸、高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン、日本建築学会構造系論文集、No. 524、pp. 65-72、1999.
 - 17) 彰国社：建築大辞典、pp. 558、2002. 6.
 - 18) Capon, J. : High-Resolution Frequency-Wave Number Spectrum Analysis、Geophysics、Vol. 34、No. 1、pp. 21-38、1969.
 - 19) 鈴木祥之、齋藤幸雄、榎原健一、五十子幸樹、野島千里：木造軸組の耐震性能評価法、小変形から大変形・倒壊の領域まで評価する限界耐力計算、第 11 回日本地震工学シンポジウム、pp. 1523-1528、2002. 11.
 - 20) 中治弘行、鈴木祥之、後藤正美、岩本いつみ、山田耕司：東三河伝統構法民家の耐震性能評価のための静的繰り返し加力実験、日本建築学会構造系論文集、No. 612、pp. 133-140、2007. 2.
 - 21) 須田達、林康裕、森井雄史：鳥取県西部地震における日野町の木造建物被害の分析その 2 木造建物の耐震性能の分析、日本建築学会大会梗概集 B-2、pp. 69-70、2003. 9.
 - 22) 林康裕：性能等価応答スペクトルに基づく建築物の地震荷重評価、第 11 回日本地震工学シンポジウム、pp. 651-656、2002. 11.
 - 23) 気象庁：強震波形ホームページ、（オンライン）、
<<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/seismo.html>>、（参照 2007-11）。
 - 24) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網 KiK-net ホームページ、（オンライン）、
<<http://www.kik.bosai.go.jp/>>、（参照 2007-11）。
 - 25) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET ホームページ、（オンライン）、
<<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>>、（参照 2007-11）。
 - 26) 森井 雄史、林 康裕、更谷安紀子：耐震性能評価と地震被害経験に基づいた木造住宅の地震時損傷度予測手法、地域安全学会論文集、No. 7、pp. 281-289、2005. 11.

(2007 年 11 月 9 日原稿受理、2008 年 6 月 16 日採用決定)