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

STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND EARTHQUAKE DAMAGE OF WOODEN HOUSES
IN THE 2000 WESTERN TOTTORI EARTHQUAKE

北原昭男*, 林 康裕**, 奥田辰雄***, 鈴木祥之****, 後藤正美*****

Akio KITAHARA, Yasuhiro HAYASHI, Tatsuo OKUDA,
Yoshiyuki SUZUKI and Masami GOTO

In this paper, the damage situation of the wooden houses built near by the epicenter of the 2000 Western Tottori Earthquake was shown on the basis of the result of the earthquake damage investigation. As a result, there were no collapsed buildings and the damage of most wooden buildings was stopping at the level with middle degree in spite of strong earthquake motion. It was made clear that the traditional houses that were composed of wooden frame and mud walls in that area had excellent earthquake-resistant ability based on the high quality of timbers and the high building technique.

Keywords : Wooden house, Earthquake damage, Earthquake-resistant ability, Damage distribution, Damage investigation,
Western Tottori Earthquake

木造建物、地震被害、耐震性能、被害分布、被害調査、鳥取県西部地震

1. はじめに

平成12年10月6日に発生した鳥取県西部地震によって、鳥取県西部から島根県東部にかけての震源近傍地域で木造建物を中心に多くの被害が発生した。しかしながら、地震の規模・発生場所から推測される被害規模に比べると実際の建物被害や人的被害が小さかったことから、その原因について様々に議論されてきている。

一方、建築物の性能を考慮した設計法に移行しようとする現在、震源近傍の強い地震動のもとで、建物がどのように挙動し、どのような性能を発揮したのかを明らかにしておくことは非常に重要であると考えられる。そこで、日本建築学会「木構造と木造文化の再構築」特別研究委員会では、筆者らを含むメンバーによる調査団を組織し被害調査を行った^{1)~3)}。

震源近傍の地震動レベルについて、筆者らはこの調査の一環として行われた墓石転倒率調査の結果をもとに、震源域での最大地動速度分布の推定を行った。その結果、地震動レベルは兵庫県南部地震の「震災の帯」の周辺に相当する80~100cm/s以上であったと推定された⁴⁾。また、翠川・藤本も震源近傍における最大地動速度を墓石転倒率から60~80cm/sであると推定している⁵⁾。

さらに、筆者らは、上述の調査の一部として、被害の多かった日野町5地区におけるほぼ全数の木造建物を対象として外観被害調査を行い、各地区の被害程度(被害率)を求めると共に、上述の地震

動レベルと木造建物被害との関係について分析を行った。その結果、「震災の帯」周辺に相当する地震動レベルであったにもかかわらず、兵庫県南部地震の被害と比較すると、甚大な被害を受けた木造家屋は非常に少なかったことが示された⁴⁾。

本論文では、上述の被害調査の結果をもとに、1) 木造建物の被害特性・被害分布特性の解明、2) 震源近傍の木造建物の構造・構法の特徴・特性の解明、を行うと共に、これら双方より、3) 木造建物の耐震性、甚大な被害が少なかった原因等についての考察を行う。

2. 被害調査の概要

被害調査は地震発生直後より数次にわたって行われたが、ここではその概要についてまとめる。

2.1 調査対象地域

調査対象地域は、鳥取県日野郡日野町のうち、黒坂、下黒坂、下榎、安原、根雨の5地区に絞らされた。選定理由としては、地震発生直後に行った予備調査の結果から、これらの地区が被災地の中で特に木造家屋被害率が高いと判断されたこと、ならびに、断層直交方向に走る道路沿いに位置し被害の変化が明瞭に把握できると考えられたことが挙げられる。

日野町は鳥取県の西南部に位置し、大部分は小起伏面の地形から

* 鳥取環境大学 助教授・工博

** 京都大学防災研究所 助教授・工博

*** 木四郎建築設計室 主宰

**** 京都大学防災研究所 教授・工博

***** 金沢工業大学 助教授・工博

Assoc. Prof., Tottori University of Environmental Studies, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.
Chief, Kishirou Architectural Design Office

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng.

成り、周辺には標高700～1,100mの急峻な山々が広がっている。北は溝口町から米子市のある平野部へ、西は日南町から島根県境、南は岡山県境に接している。平成12年度の国勢調査の結果によると人口は4,517名、家屋数は1,549棟である。

日野川は日野町の西部を源流とし、米子市を通過して日本海に注いでいるが、今回調査を行った日野町の5つの地区はこの日野川沿いに、上流から下流に向かって、黒坂、下黒坂、下榎、安原、根雨の順に位置している。

2.2 調査内容

1) 簡易（外観）調査による全数被害調査

5地区のほぼ全数の木造建物について、建物外観の目視調査により建物の特徴や被害程度を調べた。主な調査項目としては、屋根・壁・基礎などの形式や種類、屋根・壁・基礎・周辺地盤・門扉などの被害程度、建物全体の総合的な被害程度が挙げられる。

2) 木造建物の詳細調査

建物の構造特性と被害の関係を明らかにすることを目的として、各地区の典型的な木造建物の中から、住民の方の協力が得られた建物について、建物平面や軸組をはじめとする構法・構造に関する項目ならびに被害状況の詳細な調査を行った。

3) 常時微動観測

詳細調査を行った建物のうち、構造特性と振動特性との関係を明らかにするため、状況の許す範囲で、1・2階の床上・周辺地盤上にピックを設置して微動観測を行った。

4) ヒアリング調査・現地調査

地元の5つの工務店（大工棟梁）へのヒアリング調査、ならびに木材加工場2件、施工中の現場5件の現地調査を行い、この地域の建物構法・構造ならびに使用木材の特徴について調べた。

1)～3)の調査の対象となった建物棟数を表1にまとめた。簡易調査の対象建物数は、調査結果に不備があったものなどを除くと802棟となった。そのうち、黒坂地区と根雨地区がほぼ同数でそれぞれ300棟弱を占め、下榎は120棟、下黒坂78棟、安原20棟程度となった。このうち黒坂5棟、下榎6棟をはじめ計16棟について詳細調査を行った。また、簡易調査については表に示す建物種類に分けて整理した。蔵・寺社建築については、絶対数が少ないことに加え調査できなかった建物も多く、調査棟数は住宅に比べると小さい。

3. 震源近傍における木造建物被害の特徴

3.1 主要な被害状況

調査対象地域において見られた主要な建物被害について、その概要をまとめる。なお、より詳細な建物被害状況については文献1)2)を参照されたい。

黒坂や根雨地区の旧街道沿いには、街道に面して間口が狭く奥行きが深い、過去に何らかの店舗を営んでいたと考えられる町家風の併用住宅が建ち並んでいる。古くからのこのような住宅においては、隣棟間隔は数cm程度であるが、建替えがなされた住宅については、隣棟間隔は20～30cm程度の空きがあるものも多い。このような町家風建物の中には築100年を越すものも多く存在する。

町家風建物の典型的な被害例を写真1に示す。その多くは、1階部分の剛性の不足により1階部分に大きな変形が生じているものであった（写真1）。特に、角地に建つ建物には大変形を生じた建物

が多く見られた。この理由としては、道路に面する2面の壁量が少ないこと、片面に隣接する建物がないため変形が制約される度合いが少なかったことなどが考えられる。

その内部の被害状況を見ると、柱・建具等が大きく傾斜・破損しており、特に開口部の多い街道に沿った方向に大きく振動・変形し残留変形を生じている様子がうかがわれた。しかしながら、最大残留せん断変形角で約1/10～1/7rad.に達しながら倒壊を免れている建物が多く見られた。

下榎・安原地区では、ほぼ全ての建物が戸建て住宅であるが、構造体に大きな被害を受けたものは概して少なかった。一方で、屋根瓦・外壁の被害が全域で発生し、屋根面をブルーシートで応急処置している家屋が多く見られた（写真2）。

また、調査した5地区に共通するものであるが、川に沿った地点では、基礎と土台がずれたり基礎部が破壊するなどの基礎部の被害や局部的に家屋が傾斜する被害が多く観察された。

また、土蔵の被害は調査地域全域に比較的多く見られ、中には、多くの壁が剥落し土蔵全体が大きく傾斜しているものも見られた。

3.2 各地区の建物被害分布

簡易外観調査の結果に基づき、建物各部位及び建物全体の被害の地域分布を求めた。なお、建物全体の被害程度については、以下の尺度によって総合的に判断した。

倒壊 : 建物全体、または1階部分が崩れ落ちているもの

被害大 : 建物全体に被害がおよび修復不能と思われるもの

表1 調査建物棟数一覧

地 区	簡易調査における対象建物棟数							詳細調査 対象建物	微動観測 対象建物
	戸建住宅	戸建店舗	町家風建物	蔵	寺・神社	その他	計		
黒坂	148	9	77	2	7	46	289	5	3
下黒坂	51	4	0	12	1	10	78	0	0
下榎	102	5	0	2	0	11	120	6	5
安原	21	1	0	0	0	3	25	1	0
根雨	158	26	89	5	0	12	290	4	0
計	480	45	166	21	8	82	802	16	8

写真1 角地に建つ町家風建物の被害例(黒坂)

写真2 屋根の被害例(下榎)

被害中 : 各部に被害が発生しているが修復可能なもの

被害小 : ひび割れ・屋根のずれなどの軽い被害がある程度まで
まわって発生しているもの

被害軽微 : 軽い被害が局所的に発生しているもの

調査は数チームに分かれて行ったが、調査に先立って全員で共通の建物数棟を判定することにより、被害が同等に判定できるように尺度のすりあわせを行った。

図1、図2に、黒坂、下榎における建物全体被害および屋根被害の分布を示す。全体被害の図では、黒灰色は倒壊・被害大、薄灰色は被害中・被害小、白色は被害軽微・無被害を、また、屋根被害の図では黒灰色は小屋組が破損したもの、薄灰色は屋根材の落下・ずれを生じたもの、白色は無被害・その他不明のものをそれぞれ示している。また、各図とも北が上になるように示している。その他の地区の被害分布については、文献1)を参照されたい。

1) 建物全体被害分布の特徴

黒坂地区は古くから拓けた城下町で、日野川とJR伯備線に囲まれるようにして集落が広がっており、南北方向に旧街道（図中央部の黒い太線）が通っている。全体被害の分布を見ると、この街道沿いに被害程度の重い建物が多く存在している様子がわかる。一方、この旧街道の西には平行な道路が2つ通っているが、この地域の被害レベルはかなり小さくなり、無被害の建物も多く存在している。街道沿いには町家風建物が集中している一方、旧街道を離れた通り沿いでは戸建ての比較的新しい建物がほとんどであり、被害程度が異なる原因の一つとして、これら2種の建物が持つ耐震性に差があったことが考えられる。

下榎地区は、南面から東面にわたってJR伯備線が通り、その外側に日野川が流れている。図の左下部に位置する旧来からの集落に加え、昭和40年代から50年代にかけて数次にわたり図中央部が形成されてきた。地区北西部の山手にはRC造の集合住宅も存在するが、ほとんどは戸建ての木造住宅が分布している。安原地区は下榎地区の北に隣接した30棟弱が集まった小さな集落である。建物は下榎地区と同じように戸建ての木造住宅が中心である。

下榎では、程度の大きな被害は図中の左下部および中央近くの2地点のみである。そのうち左下部は、旧来からの集落の古い建物に被害レベルの大きい被害が発生したものである。一方で被害小～中程度の被害が下榎・安原地区のほぼ全域に分布している。これは、比較的新しい戸建て住宅が中心で壁もある程度入っていたため大被害に至らなかった一方で、その壁は後述のように土壁が主であったためひび割れ・壁士の剥落などの被害が認められ、被害小から中程度の被害と判定されたことが一因であると考えられる。

一方で、黒坂の旧街道沿いでも被害程度に差があり、北部に比べ南部の方に重い被害が集中しているように見て取れる。また、下榎・安原でも、山手では相対的に被害程度が小さいように見てとれる。これらのそれぞれの地域内では建物構造・建物種類に有意な差があるとは考えられず、地域内の地表動の特性に何らかの差があったことが推測される。

2) 屋根被害分布の特徴

黒坂では、小屋組の破損が全体被害の大きかった街道沿いに数件見られる。しかし、屋根材の落下・ずれはそれほど多くは見られず、屋根被害の無かった建物も多く分布している。一方、下榎・安

原では、黒坂とは異なり、ほぼ全域で屋根材の落下・ずれの被害が発生している。黒坂の町家風建物に関しては、剛性が低く固有振動数が低いことで、小屋レベルの加速度が大きくならなかったものと推測されるが、黒坂の他地域でも屋根被害が小さかったこと、それに比して下榎・安原では屋根被害が大きかったことなどは、建物側のみからでは推測できない。これについても、地域内の地表動の強度分布、周波数特性の分布などを明らかにし、それらを含めて総合的に検討を行う必要がある。

3) その他の地域の被害

根雨地区は日野町の行政・商業の中心で国道181号線、日野川、JR伯備線と南側に広がる山地とで囲まれた地域に建物が集積している。黒坂と同様、地区内を旧街道が通っており、この街道沿いに町家風建物が多く見られるが、この街道をはざると戸建て住宅が中心となる。建物全体被害については街道沿いの町家風建物に程度の重い被害が見られたが、全般的には、震源に近い黒坂および下榎・安原地区よりも被害程度は低い。

下黒坂地区は黒坂地区の北東に位置しており、田畑が広がる中に母屋・離れ・倉庫などからなる家屋群が散在している。比較的古い蔵・倉庫・作業所が多く、それらの多くに被害中～大程度の被害が発生していた。

3.3 簡易調査に基づく建物被害統計

1) 調査地域の建物

建物種類の地区別分布は表1に併せて示されているが、黒坂・根雨では町家風建物が77棟、89棟と全体の3割程度を占め、戸建て住

図1 建物全体被害の分布(左:黒坂、右:下榎)

図2 屋根被害の分布(左:黒坂、右:下榎)

宅は5割程度である。加えて根雨は一部の商業の中心地であるために店舗建築が1割程度存在している。下榎・安原・下黒坂ではほとんどの建物が戸建て建物であり町家風建物は皆無である。このように黒坂・根雨地区とそれ以外では建物種別の構成に大きな差異が見られる。なお、その他には簡易な造りの倉庫・作業場、老朽化した空き家、分類不能な物等が含まれている。

屋根については各地区とも多くが和瓦であったが、黒坂・根雨地区の古い建物では、老朽化のため瓦をおろして鉄板葺・スレート葺に改めたものも多く見られた。

外壁については、外観調査からでは判断し難い部分が多く精度の良いデータは得られなかったが、モルタル塗りおよび土壁が半数から7割程度以上を占め、その他は板壁・鉄板壁であった。サイディング壁などの新しい構法による壁はほとんど見あたらなかった。

2) 建物被害の程度分布

簡易調査の結果をもとに、建物各部および建物全体の被害について各地区毎に被害程度の割合を求めた。ここでは、屋根被害について図3に、建物全体被害について表2、図4に示す。各図中においては重い被害になるほど積み重ねグラフの下部に示している。

屋根については、小屋組が破損するなどの重い被害は非常に少なかった。しかし、屋根材の落下・ずれの被害は下榎では8割を越す建物で発生している。その他の地区ではやや低く、根雨で4割、黒坂などで5割程度の被害率となっている。

建物全体被害については、目視調査では倒壊建物は黒坂で1棟のみ判定されたが、大変形を引き起こし隣棟建物に寄りかかってしまったものであったため、ここでは被害大に含めて処理している。被害大以上の率は安原が一番大きく16%程度であり、以下、下黒坂11.5%、黒坂7.6%、下榎5.8%の順となっている。根雨は1.4%であり、他の地区より被害程度はかなり低かった。一方、被害小以上の被害率を見ると、下榎・安原・下黒坂ではほぼ7割程度、黒坂では5割、根雨では4割程度の被害率を示している。

表3、図5には、建物全体の被害程度を構造種別毎に示した。戸建て建物に較べると町家風建物の被害は被害中レベル以上の被害がかなり多い。また、無被害率も低く、戸建て建物に較べるとやや耐震性が劣っているように判断される。また、調査棟数が少ないが、蔵は他の建物種別に較べるとかなり大きな被害を受けていることがわかる。これは、震源近傍であるため表層地震動が比較的高い周波数成分を持ち、壁が主体で相対的に高い固有振動数を持つ蔵への入力が大きくなったこと、全般的に壁の施工があまり良い精度ではなかったことが一因であると考えられよう。

3.4 罹災証明に関するデータに基づく建物被害分布

図6(a)には、日野町から得られた罹災証明に関する資料をもとに、日野町内5地区の建設年代別被害を示した。ここに示した全壊・半壊・一部損壊の定義は、罹災証明発行に際して日野町が判定に用いた被災度(尺度)であり、本調査の被害程度とは異なる。

これを見ると、日野町における現存木造建物の多くが後述するような旧来からの構法によるものであり、建築年代の影響は少なく、全壊率はおよそ10%前後、半壊率は50%前後の値を示している。築100年を経過した住宅でも全壊率は20%程度、1980年以降の住宅の全壊率の2倍程度でしかなく、被災地域の建物は旧来からほぼ変わらない耐震性を持つことが示されている。図4に示した外観調査に

よる被害率と較べると、被災度判定の全壊は被害大+被害中の一部に、半壊はほぼ被害小以上の被害レベルに対応している。

図6(b)には兵庫県南部地震における芦屋市の住宅の建築年代別被害率を同様に示す。芦屋市では都市型の住宅が主体であり、一般に言われるように建築年代が古い住宅ほど被害率が高くなっている。特に1970年以前では40%以上、1950年以前では70%以上が全壊になっており、1980年以降の数%に比べ格段に大きくなっている。

80年代以後の建物に関して両者を比較すると、日野町の建物は、柱・梁と土壁による構法のため変形が大きくなり、中程度以上の被害が出やすく、それに相当する半壊判定は芦屋市に比して多くなっているが、全壊率レベルではあまり差が見られない。一方、80年代以前の建物に関しては、逆に、都市型の芦屋市の建物に比べ全壊率・半壊率ともに日野町の方が小さい値を示している。

図3 屋根被害の被害分布

表2 建物全体の被害率

	被害大	被害中	被害小	軽微	無被害	不明	総計
黒坂	7.6	17.6	22.5	38.8	13.1	0.3	100
下黒坂	11.5	28.2	33.3	21.8	5.1	0.0	100
下榎	5.8	22.5	38.3	26.7	5.0	1.7	100
安原	16.0	28.0	28.0	16.0	8.0	4.0	100
根雨	1.4	14.1	24.8	41.4	16.6	1.7	100
総計	5.7	18.5	26.9	35.5	12.2	1.1	100

図4 建物全体の被害分布

表3 建物種別毎の建物全体被害率

	被害大	被害中	被害小	軽微	無被害	不明	総計
戸建住宅	4.0	13.1	29.2	40.2	13.1	0.4	100.0
戸建店舗	3.4	14.9	24.1	36.8	18.4	2.3	100.0
町家風建物	6.6	28.9	25.9	28.9	8.4	1.2	100.0
蔵	33.3	38.1	9.5	4.8	0.0	14.3	100.0
総計	5.3	17.5	27.3	36.3	12.3	1.2	100.0

図5 建物種別毎の建物全体被害の分布

4. 木造建物の構法・構造的特徴

本章では、詳細調査ならびにヒアリング調査の結果をもとに、調査地域における木造建物の構法・構造的特徴についてまとめる。

4.1 調査地域の木造建物の特徴

調査地域の木造建物は、大きく分けると以下の2種に分けられる。

1) 旧街道沿いの町家風建物：黒坂、根雨などの旧街道に面した家々は、間口2.5間から5間程度の商店風の造りで、街道に面した部分の間口は大きく、壁の存在は希薄である。外壁は荒壁に漆喰塗、内部は綿壁または聚楽塗仕上のものが多い。住宅の平面は、間口が狭く奥行きが深い町家風であり、間口方向の壁が非常に少ないプランである。また、建築年代の古い住宅では差し鴨居工法も見られ階高・軒高とも比較的低い。基本モジュールは半間(柱芯)985mmから990mmと、京間に近いゆったりとした空間を確保している。

2) 戸建て建物：下榎、安原、下黒坂の住宅は、敷地面積も比較的大く住宅の廻りに空地を擁しており、床面積も広く平均的には60坪から70坪程度、大きい住宅では100坪を越す床面積を有するものもある。建物平面は田の字型平面の変形であり、平面形態はどの家も概ね良く似たプランを有している。また、新しい住宅も基本モジュールは半間(柱芯)985mmから990mmであり街道沿いの住宅と同じであった。屋根は瓦葺き入母屋造りが多く、外観からの目視では重い印象がある。なお、両者の標準的な間取りについては文献3)に示されているので参照されたい。

4.2 ヒアリング調査による建物構法の特徴

現地の工務店(大工棟梁)へのヒアリング調査、施工現場・木材加工場の調査の結果を総合して、当該地域における建物構法の特徴、建物生産に関する背景についてまとめる。

1) 前節の2種の建物に共通して、構造材としては、管柱は12cm角・通し柱は13.5cm角、土台は12cm角が標準で、都市型の住宅よりは太い傾向にある。梁幅も柱と同寸である。旧来からの古い建物についても、使用部材の寸法はほぼ変わっていないとのことである。

2) この地域は中山間地域であり木材生産地が近く、林業が古くから発達していることもあり、檜材が多く使われるなど、総じて使用

木材の質が良い。また、磨き丸太を用いた縁桁が多く住宅で見られることに象徴されるように、木材がふんだんに使われている。

3) 古くから林業が主要な地域産業であることで、住民・施工者ともに木材に対しての知識や木造建築に対しての造詣が深い。また、施工地域が非常に狭い範囲に限定され、地縁的なつながりで工事を受注していることにより、工事内容や施工状況が住まい手に理解しやすい状況である。また、相互信頼の下で施工が行われるために、精度の高い仕事が行なわれている。加えて、このような状況の下、優秀な技能が長年にわたり伝え育まれてきている。

4) 耐震性に関する工夫としては、写真3に示すような非常に手の込んだ仕口によって断面欠損を少なくする、柱のほぞを長くして込み栓で止めることによりほぞの抜けを防ぐなどの工夫が随所に見られる。また、小屋梁を幾層も設けて小屋束の長さを短くすることにより束の座屈を防ぐなど、積雪に対する工夫も行われている。

5) 壁については、比較的建築年代の新しい住宅でも筋かいは施工されておらず、3段貫に土壁という施工が多数を占める。また、壁下地には比較的太径の竹が半割に近い形で用いられている例が見られるなど、きめ細かい施工が行なわれているとは言い難い。写真4には典型的な内壁の被害例を示す。調査では建物の大きな変形により壁土が、あるいは壁の種類によっては下地ごと落下している状況が観察された。

4.3 壁量・木材使用量に関する分析

詳細調査によって得られた住宅平面図を用いて床面積、壁長を求めて表4に示した。ここで、壁長は全面張りの壁(耐力壁)の長さの合計として求めている。また、併せて大黒柱を除く主要な柱の寸法、建物被害程度を示している。

壁長さでは、戸建て建物が15m~40mくらいの値となっているのに対し、町家風建物では、少ない物は5m~10m程度しかない建物も存在している。また、町家風建物では、縦横2方向における壁長の差が非常に大きいことがわかる。

土壁の特性には未だ分からない部分が多いが、鈴木・中治らの実験⁶⁾によれば、竹小舞下地と荒壁からなる土壁の壁倍率はほぼ1程度となる結果が得られている。ここでは、この結果に基づき壁倍率を1と仮定して壁率計算を行った。その結果を表4、図7に示す。図7の横軸は桁行・梁間方向の壁率のうち小さい方、縦軸は大きい方を示す。これらより、1階部分の桁行・梁間方向共に必要壁率(重い屋根・2階建ての建物の1階部分とすると33cm²/m²、図7中に点線で示す)を満たす建物はほとんど存在しないことが見て取れる。また、2方向のうち小さ

(a)日野郡日野町(鳥取県西部地震)

(b)芦屋市(兵庫県南部地震)

図6 建設年代別の被害率(罹災証明による)

写真3 仕口の丁寧な仕事の一例

写真4 土塗り壁の被害状況

い方の壁率と被災程度を較べると、壁率が小さいほど被害が大きくなる傾向はある程度見られ、壁の多寡が軽微な被害で留まるか、中レベル以上の被害に進展するかを分けた可能性も考えられる。

次に、詳細調査を行った建物のうちの3棟について木材使用量を求め、柱と横架材について単位床面積当たりの使用量 ($\text{m}^3/\text{坪}$) を算出し図8に示した。また、関西都市圏における建売住宅3棟についても同様の方法で木材使用量を算出し図8に併せて示した。

図8に示すように、柱の単位面積当たりの使用量を見ると、調査地域の値は都市部のものより小さい。この要因については、この地域の建物は、床面積が広いのに対し部屋数が少なく、和室を主とした間取りであることに起因すると考えられる。一方、都市型は各部屋の独立性が高い平面形態で、間仕切りが多い分、柱の使用量も多くなると思われる。横架材の単位面積当たりの使用量は調査地域の値は都市部とほぼ同等であり、調査地域では、相対的に柱に対して横架材の使用量が多い傾向にあることが示されている。

4.4 微動観測の結果に基づく建物の振動特性

詳細調査を行った建物のうち、下履および黒坂における8棟を対象に常時微動計測を行った。携帯用振動計（サーボ型速度計、東京測振(株)製SPC-35F）を用い、主に、周辺地盤、1階床、2階床、小屋梁の上にピックアップを置いて、梁間・桁行方向の振動をサンプリング周波数100Hzで5分間ずつ計測した。

得られたデータより各計測点のフーリエスペクトルを、さらには地盤上と2階床（1階床）のスペクトルから伝達関数を求め、そのピークより建物の1次固有振動数を求めて、建物種類・全体被害程度と共に表5に示した。

1次振動数は2Hz程度から5.7Hz程度まで分布している。下履の戸建て建物では方向による振動数の差は小さかったが、黒坂の町家風建物ではやや差が見られ、開口部が多い間口（梁間）方向で振動数が低くなる傾向を示している。

図9には、上記の結果を●印で示した。また、図中には筆者らによる兵庫県南部地震の際の芦屋市⁷⁾ (×)、芸予地震の際の西条・黒瀬町⁸⁾ (○)、釧路沖地震の際の釧路市⁹⁾ (+)、三陸はるか沖地震の際の八戸市¹⁰⁾ (△)における微動観測の結果、および京都における実大建物の加力実験時に行った微動観測結果¹¹⁾ (□)を併せて示す。

芦屋市の場合における対象建物は全て筋かい・大壁による「都市型」の住宅であるが、その振動数は3Hzから12Hzの範囲で大きくば

らついている。また、釧路・八戸についても「都市型」の住宅が対象であるが、釧路では厳寒地であり壁が厚く屋根が軽いため振動数は高く、7~10Hzに分布する。八戸については、構法としてはほぼ本州の都市部に共通する構法であり、振動数は5~9Hzあたりに分布している。

一方、日野町と西条・黒瀬町における対象建物は、構法の細部

表4 詳細調査対象建物の諸元と被災程度

地区	名前	建物種別	床面積(m^2)		1階壁長(m)		2階壁長(m)		1階壁率(cm/m^2)		柱寸法(cm)	建物被害
			1階	2階	桁行	梁間	桁行	梁間	桁行	梁間		
下履	NH邸	戸建て	136.6	46.1	40.5	15.8	12.9	10.9	29.7	11.6	12×12	被害小
	NS邸	戸建て	114.3	30.7	23.5	24.6	7.8	15.5	20.6	21.5	11.3×11.3	軽微
	NY邸	戸建て	152.2	30.7	35.3	18.1	6.9	19.6	23.2	11.9	11.3×11.3	被害中
	M邸	戸建て	104.8	36.9	23.2	15.8	13.8	8.9	22.1	15.0	11.3×11.3	軽微
	I邸	戸建て	144.6	58.8	25.7	23.2	14.9	16.8	17.8	16.1	11.5×11.5	被害中
安原	I邸	戸建て	165.7	-	25.1	28.7	-	-	15.2	17.3	12×12	被害大
	S邸	戸建て	164.1	54.3	24.6	23.6	11.8	15.8	15.0	14.4	12×12	被害中
黒坂	O邸	町家風	97.5	-	20.0	4.8	-	-	20.5	4.9	13×13	被害中
	A邸	町家風	96.1	91.0	20.4	15.8	22.9	14.5	21.2	16.4	12×12	軽微
	S邸	町家風	86.0	78.0	24.0	10.0	22.0	12.0	27.9	11.6	12×12	被害小
	N邸	町家風	90.4	-	21.1	5.8	-	-	23.4	6.4	11.3×11.3	被害大
	T邸	戸建て	118.5	-	29.5	30.5	-	-	24.9	25.7	11.3×11.3	軽微
根雨	K邸	町家風	191.8	97.0	39.4	18.1	27.6	16.9	20.6	9.4	12×12	被害小
	T邸	町家風	76.5	76.5	17.8	11.1	18.8	10.0	23.3	14.5	10.5×10.5	被害中
	M邸	町家風	98.4	77.8	38.2	14.2	33.3	13.7	38.8	14.4	11.3×11.3	軽微
	E邸	町家風	95.1	65.3	19.6	8.8	20.6	6.9	20.6	9.3	11.3×11.3	被害中

図7 壁率の分布と被害との関係

図8 単位床面積あたりの木材使用量(○:都市型建売住宅、●:日野町)

表5 微動観測による1次固有振動数と建物被害

地区	名前	建物種類	簡易調査による建物全体被害	桁行方向(Hz)	梁間方向(Hz)
下履	NH邸	戸建(部分2階建)	被害小	3.2	2.7
	NS邸	戸建(部分2階建)	軽微	3.7	3.4
	N邸	戸建(部分2階建)	被害中	3.5	3.1
	I邸	戸建(部分2階建)	被害大	2.1	2.3
	M邸	戸建(部分2階建)	軽微	4.7	3.9
黒坂	O邸母屋	町家風(平屋建)	被害中	4.2	3.2
	O邸奥	町家風(総2階建)	被害中	2.7	3.6
	A邸	町家風(総2階建)	軽微	5.7	3.1

図9 固有振動数の比較

は異なるものの、基本的に柱貫による軸組と土壁（真壁）による構法であり、その振動数は2～4Hzに集中している。また、京都における計測結果は昭和初年に建てられた建物（軸組と土壁による構法）2棟の結果であるが、やはり同等の範囲に収まっている。

このように、柱貫による軸組と土壁からなる構法、いわゆる「田舎造り」による建物は、2～4Hzあたりにまとまった振動数を示すことがわかる。筋かいや合板などによる壁を主体とした「都市型」の構法に較べると振動数は低く、従って一般的には建物の初期剛性（微小変形時の剛性）も低いものと推測される。

5. まとめ―被災地域における木造建物の被害と耐震性―

本論文では、簡易全数調査および詳細調査の結果より、調査地域における木造建物の被害の特性についてまとめると共に、詳細調査やヒアリング調査により得られたデータをもとに木造建物の耐震性についてまとめた。これらを総合して被災地域の木造建物の被害と耐震性についてまとめる。

1) 建物被害の特性

震源近傍の地区では、広い範囲で壁の被害や屋根の被害など、中程度までの被害は広く発生していた。その中で、黒坂に多く存在する町家風建物では大変形が生じたものがある程度見られたが、倒壊まで至ったものは皆無であった。建物被害分布は全般的に建物の分布特性の影響が多く見られたが、それだけでは説明できない部分もあり、各地点の表層地震動の特性に差があったことが考えられる。

2) 建物の構造・構法の特徴

a) 壁率は規準値に満たないかなり小さな値を示す建物が多い。微動観測による建物固有振動数も低い値を示すが、同様の構法を持った他地域の建物が持つ振動数の範囲からはずれるものは無かった。単位床面積あたりの使用木材量は都市型住宅に比べてやや少ないか同等で、柱に較べると横架材の使用量は相対的に多い。

b) 調査地域のほぼ全ての木造建物が、柱貫による軸組と土壁による構法であるが、部材寸法は概して太く、全般的には質は良い木材が使用されている。その結果、仕口部の断面欠損が少なくなり大変形に対して柱が折れにくくなったことが考えられる。

c) 住まい手・施工者共に地域の木造建物に対する理解が深く、優秀な技能が長年にわたり伝え育まれてきている。このような状況の中で、ほぞを長くする等の耐震性に関する工夫がなされ、大きな変形に対して仕口部での抜け落ちが抑えられたことなどにより建物に十分な粘りがあったものと推測される。

3) 建物の耐震性と被害の関係

被災地域の建物は概して壁量は少なく、またその壁が土壁であったことから、震源域における、高い周波数成分を持った強い地震動により壁の破壊や屋根の被害などの中程度までの被害が広く発生したものと考えられる。また、相対的に壁量の少ない町家風建物ではより被害が進展し大変形を生じたものもあったが、2)に示したように、質の高い部材、断面欠損が少なく折れにくい柱、抜け落ちにくい仕口などによって建物に十分な粘りがあり、倒壊まで至らなかったものと考えられる。加えて、もともと建物の固有振動数が低く、壁等が壊れてさらに振動数が低下したことにより、地震入力が低減したことも、被害が留まった一つの要因であると推測される。

ただし、現状では各地区内における地震動分布が明らかになって

おらず、被害と地震動・構造特性に関するこれ以上の分析は難しい。今後のデータの蓄積を待つてさらなる研究が必要となろう。

近年の木造建物では、耐力壁の量やその壁倍率だけで耐震性能を評価する状況にあり、重要な構造要素である軸組に対しての評価はなされていない。しかしながら、今回の調査では、被災地域の木造住宅は壁量は少なかったにもかかわらず、強い揺れに対して倒壊せず、損傷も限られたものに収まっていたことが明らかにされた。このことは、中山間地域に存在する軸組と土壁によるいわゆる「田舎造り」の木造家屋についても、十分な材料・施工によるものならば、現代の筋かい壁や合板壁などによる「都市型」住宅に劣らない耐震性を与えることができる可能性を示すものである。

ただし、現状では軸組のもつ耐震性に関する評価手法、「田舎造り」の構法に対する構造設計法は確立されているとはいえず、構造物の性能規定化が進む中でこの様な建物を建てるためには数々の困難を伴うようになっている。事実、今回の被災地でも、建物の再建・補修をする上で困難が伴い、一部の建物で「都市型」の構法へ変更されている事例も見かけられる。

中山間地・農村に長い年月をかけて培われてきた構法を、さらには歴史的な町並みを守り伝えていくためには、先ずこの種の構法に関する構造解析手法や構造設計手法の構築を進めていく必要がある。そのためには、軸組・土壁などの耐震性に関するデータを構造実験などを行うことにより蓄積していくことも重要であろう。

一方で、この構法には自然素材・手作業による木材加工の技術、それらを護り育んできた木造建物に対する文化など、数値化が困難な要素が多く含まれる。これらについても地道に整理して可能な限り評価に組み込むこと、これまでの技術・伝統を守り伝えていく仕組みを再構築していくことなども重要な問題であると考えられる。

謝 辞：

本論文で用いた調査データは、日本建築学会「木構造と木造文化の再構築」特別研究委員会のメンバーを中心とした調査団（団長：京都大学防災研究所 鈴木祥之教授、メンバーは筆者らの他に高岡短期大学の秦 正徳教授、福井大学の石川浩一郎助教授、豊橋技術科学大学の中治弘行助手、損害保険料率算定会の小嶋伸仁氏、岡山県木材加工技術センターの玉王泰義氏、アラキ工務店の荒木正宣氏、および京都大学・金沢工業大学の学生諸君）によるものである。また、現地の大工・工務店および詳細調査でお伺いした住民の皆様には、ご多忙中、調査に多大なご協力を頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献：

- 1) 北原昭男・鈴木祥之・後藤正美：木造建物の被害状況―鳥取県西部地震―木造建物被害調査報告、日本建築学会「木構造と木造文化の再構築」特別研究委員会、日本建築学会近畿支部、木構造と木造文化の再構築、pp. 159-183、2001. 8.
- 2) 鈴木祥之・北原昭男・後藤正美：鳥取県西部地震による木造建物の被害（その1）（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集B-2、pp. 159-162、2001. 9.
- 3) 奥田辰雄：木造住宅の構法と耐震性―鳥取県西部地震―木造建物被害調査報告、日本建築学会「木構造と木造文化の再構築」特別研究委員会、日本建築学会近畿支部、木構造と木造文化の再構築、pp. 194-202、2001. 8.
- 4) 林康裕・北原昭男・平山貴之・鈴木祥之：2000年鳥取県西部地震の地震動強さの評価、日本建築学会構造系論文集、No. 548、pp. 35-41、2001. 10.
- 5) 翠川三郎・藤本一雄：2000年鳥取県西部地震の震源域での地震動強さ、日本建築学会構造系論文集、No. 549、pp. 59-65、2001. 11.
- 6) 鈴木祥之・中治弘行：木造住宅土塗り壁の美大実験による耐震性能の再検討、日本建築学会構造系論文集、No. 515、pp. 115-122、1999. 1.
- 7) 鈴木祥之・東樋口護・中地弘行・標 智仁・北山宏貴：芦屋市における木造建物の微動計測による振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 9-10、1995. 8.
- 8) 林康裕・鈴木祥之・後藤正美・小嶋伸仁：芸予地震における木造家屋被害の分析、日本建築学会「木構造と木造文化の再構築」特別研究委員会、日本建築学会近畿支部、木構造と木造文化の再構築、pp. 203-215、2001. 8.
- 9) 北原昭男・藤原保三・鈴木 有・市川信夫：常時微動計測による釧路市内の建築物の振動特性、京都大学防災研究所年報、第38号B-1、pp. 27-42、1995. 4.
- 10) 鈴木有・後藤正美・北原昭男・福本和正：1994年三陸はるか沖地震災害調査報告―第6章 木造建物の被害―、日本建築学会、pp. 417-419、1996. 9.
- 11) 中治弘行・鈴木祥之・岩井 哲・北原昭男：在来構法木造住宅の振動計測と水平力載荷実験（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp. 117-118、1996. 9.

(2002年2月10日原稿受理、2002年8月26日採用決定)