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 木造住宅被害の要因分析

PEAK GROUND VELOCITY AND CAUSE OF DAMAGE TO WOODEN HOUSES ESTIMATED IN NEAR-SOURCE AREA DURING THE 2007 NOTO HANTO EARTHQUAKE

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

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

We performed a field survey of damage to wooden houses, tombstone overturning, and microtremor measurements within the near-source area of the 2007 Noto Hanto earthquake. Based on results of the field investigation, peak ground velocity (PGV) and the seismic response of wooden houses during the main shock are estimated in the source region. From the tombstone data, we estimated PGV values over 80-100 cm/s within the area. The maximum values of building drift evaluated are consistent with the damage statistics in the area, which could mainly be controlled by structural performance and strong ground motion amplified due to S-wave velocity profile and soil nonlinearity, i.e., local site effects.

Keywords: the 2007 Noto Hanto earthquake, near-source area, peak ground velocity, wooden house, damage ratio, surface soil

2007年能登半島地震, 震源域, 最大地動速度, 木造住宅, 被害率, 表層地盤

1. 序論

2007年能登半島地震(3月25日発生)では, 震源域に比較的近い輪島市門前町(以下, 門前町)の中心部, 同市および穴水町の中心部などの地域において, 多くの木造住宅に甚大な被害が生じた。木造住宅の地震被害に最も大きな影響を与える要素として, 対象地域の地震動特性(強さや周期), 工学的基盤以浅の地盤特性(土質やS波速度構造)および建物の耐震性能(耐力や変形性能)の3点が挙げられる。すなわち, これらに関する情報を把握することが, 被害原因を究明する検討の第1歩として必須である。

地震動特性については, 最近10年間に飛躍的發展を遂げた国内各種の強震観測網により, 多くの情報が得られるようになった。図1に, 能登半島において, 防災科学技術研究所 K-NET¹⁾, KiK-net²⁾および気象庁(JMA)³⁾の強震計のうち本震記録(加速度波形)が得られている地点を□印で, 自治体の震度計のうち本震の計測震度 I_{JMA} と最大加速度(PGA)が公表されている地点⁴⁾を△印で示す。図の☆印は, 防災科学技術研究所 Hi-net による震央(北緯 37.24 度, 東経 136.65 度)⁵⁾である。図から, 地震計による本震記録は, 能登半島全体をカバーす

るようになっている。しかし, 地震計設置の空間的密度が低く, これらの情報のみから震源域の地震動特性の分布を把握することは難しい。とくに, 木造住宅に甚大な被害が生じた門前町の中心部で得られた本震記録は, 門前総合支所の震度計による情報(計測震度 6.4, 3成分合成 $PGA = 1303.8 \text{ cm/s}^2$)⁴⁾のみであり, この地域の地震動特性には不明な部分が多い。また, 門前町の地盤特性および木造住宅の耐震性能に関する情報も, 現時点では限られている。

地震記録のみに頼らずに地震動強さを推定する方法として, 墓石の転倒率に基づく方法⁶⁻⁸⁾がある。また, 地盤のS波速度構造に関する先験的情報を得るための方法として, 微動のH/Vスペクトルに基づく方法⁹⁻¹¹⁾が挙げられる。墓石調査と微動観測は, その簡便性から, 被害調査と平行して実施可能であり, 地震後できるだけ早い時期に被害要因の解明に繋がる情報を得る手段として有効と考えられる。

以上の背景から, 本論文では, まず, 震源域周辺において墓石調査を行い, 本震時の地震動強さ(最大地動速度PGV)の分布を推定する(2章)。また, 門前町の中心部(門前総合支所周辺の和田・走出・清水・門前・館・鬼屋および黒島町:以後, 本論文では, 前者を走出地

* 防災科学技術研究所 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. 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.

区、後者を黒島地区と呼ぶ：図 1)において、木造住宅の被害調査および地盤の微動観測を行い、住宅被害の特徴および表層地盤構造を把握する(3章および4章)。さらに、これらの調査結果に基づく地盤および木造住宅の簡易地震応答解析を行い、木造住宅被害の要因を分析する(5章)。なお、調査した住宅は、伝統的な木造軸組構法によるものが多い。

2. 墓石転倒率に基づく震源域の最大地動速度

墓石調査は、図 1 に○印で示す 44 地点の墓地において、3 月下旬から 4 月にかけて実施した。調査では、墓地ごとに、墓石の全体数と転倒数を記録した。この際、竿石の幅が 20cm 程度以下の小さな墓石は除外した⁸⁾。また、携帯型 GPS を用いて、墓地の緯度・経度を計測した。いくつかの墓地では、任意に抽出した計 34 基の竿石の寸法(幅と高さ)をメジャーで計測した。調査を行った墓地では、液状化など大きな地盤変状の痕跡は認められず、墓石の転倒は概ね震動によるものと推察される。なお、4 月以降の調査では、転倒した墓石を修復した形跡が認められた墓地もあったが、そのような墓地は対象外とした。

図 2(a)に、調査した各墓地の墓石転倒率と断層最短距離(以下、断層距離)との関係を示す。断層距離の算定では、震源過程の逆解析で仮定された断層面(図 1)⁵⁾を用いた。図から、調査した墓地の墓石転倒率は 0-0.95 程度、断層距離は 0.4-40km 程度の範囲に分布しており、断層距離が小さいほど墓石転倒率が大きくなる傾向が認められる。このことは、既往の研究⁶⁾⁻⁸⁾で指摘されているとおり、墓石転倒率が各地点の地震動強さを反映したものであることを示唆している。

墓石の転倒率が PGA と PGV いずれの地震動強さと関係付けられるかは、その竿石寸法(幅 B, 高さ H)から次式で算定される周期 T_b と地震動の卓越周期 T_e との大小関係によって決まる^{7),8)}。

$$T_b = H^{0.5} (1 + B/H)^{1.5} / 15.6 \quad (1)$$

$T_e > T_b$ の場合には、墓石の形状比より定まる静的な転倒加速度 $A_g = (B/H)g$ (g は重力加速度)を PGA が超えると墓石が転倒しやすくなるが、 $T_e < T_b$ の場合には、 A_g を PGA が超えても、墓石はロッキング振動し、PGV が一定値以上にならないと転倒しにくくなる。このため、 $T_e < T_b$ であれば、墓石転倒率は PGV と関係している可能性が高い^{7),8)}。

ここで、計測された竿石寸法の平均値は、幅 $B = 29\text{cm}$ 、高さ $H = 72\text{cm}$ ($B/H = 0.40$)、その変動係数は、ともに 0.1 程度であった。この場合、(1)式から、 T_b は 0.9 秒程度となる。一方、地震動の卓越周期 T_e は、本震記録が公開されている全ての地点について、次式により推定した。

$$T_e = 2\pi / (PGA/PGV) \quad (2)$$

この際、PGV は、K-NET、KiK-net、JMA 強震観測点では、加速度波形の 1 自由度系(固有周期 20 秒、減衰定数 0.707)の相対速度応答から求め、水平 2 成分のうち大きい方の値とした。また、計測震度 I_{JMA} と PGA の情報のみの震度観測点では、藤本・翠川¹²⁾による次の回帰式を用いて PGV を逆算した。

図 1 墓石調査点および地震観測点の位置と推定および観測された最大地動速度 (PGV) の分布 (走出地区と黒島地区の詳細は図 3 を参照)

図 2 (a) 墓石の転倒率, (b) 本震水平動の卓越周期, (c) 推定または観測された最大地動速度 (PGV) と断層最短距離との関係

$$I_{MA} = 1.291 + 1.017 \log(PGA \cdot PGV) \quad (3)$$

図 2(b)に、各観測点で推定された地震動卓越周期 T_e と断層距離との関係を示す。図から、断層距離 100km 程度以上の観測点では、 T_e は 0.1-5 秒程度の範囲でばらついている。一方、断層距離 10-100km 程度の観測点では、 T_e は、1-1.3 秒程度となる場合も若干あるが、多くの観測点では T_e (0.9 秒程度) 以下となる場合が多い。断層距離 10km 程度以下の範囲に観測点はほとんど無いが、図から、この範囲においても T_e は概ね T_0 以下となっている可能性が高いと推察される。

以上から、本検討の場合、墓石転倒率 P は PGV と関係付けられ、両者の関係は、標準正規分布関数 ϕ を用いて次式^{7),8)}で表される。

$$P = \phi((\ln(PGV) - \ln(V_0)) / 0.4) \quad (4)$$

ここに、 $V_0 = 10(B/H^{0.5})(1+B/H)^{2.5}$ である。図 2(c)に、墓石転倒率 P (図 2(a) から(4)式を用いて推定した各基地の PGV と断層距離との関係を ●印で示す。図には、地震動の卓越周期 T_e の推定 (2)式)の際に算定した本震記録の PGV も示している。本震記録の PGV は、各観測点の

地盤特性の影響を大なり小なり受けているが、明瞭な距離減衰傾向を示している。墓石から推定された PGV -断層距離関係は、本震記録の PGV の距離減衰特性と、断層距離 10-30km 程度において滑らかに連続している。図には参考のため、司・翠川¹³⁾の PGV 距離減衰式 (マグニチュード $M_w = 6.7$, 震源深さ 11km)^{3),5)}を実線および破線で示す。この経験式の絶対値は、地表の墓石や地震記録に基づく PGV とは直接対応するものではないが、両者の距離減衰の傾向は概ね調和的である。以上から、墓石転倒率から推定した震源域の PGV (図 2(c)) は、概ね妥当なものと考えられる。

図 1 には、各墓石調査点および地震観測点における推定および観測 PGV の値を、図中のレジェンドに示す濃淡・記号を用いて示している。図から、地震記録と墓石転倒率の両方のデータがある輪島、走出地区、穴水、富来、田鶴浜、羽咋では、推定 PGV の値は観測 PGV のそれと概ね調和的であり、推定結果の妥当性が再確認される。また、墓石調査によって、震源域 (断層距離 10km 程度以下の範囲) における PGV 分布の情報が格段に増えたことが確認される。震源域では、門前町の中心部 (概ね走出地区-黒島地区の範囲) において PGV が最大となっており、その値は少なくとも 80-100 cm/s 程度以上と推定される。

図 3 木造住宅の悉皆調査範囲、微動観測点および墓石調査点 (()内の数値は微動 H/V スペクトルのピーク周期(秒)。(-)は H/V スペクトルに明瞭なピークが認められないことを示す。[]内の数値は墓石の転倒率。)

3. 走出地区と黒島地区の木造住宅被害

3.1 木造住宅の悉皆調査および被害率

80-100cm/s 程度以上の大きな PGV が推定された門前町の中心部では、木造住宅に大きな被害が生じている可能性が高い。そこで、木造住宅の被害状況を把握するため、走出地区および黒島地区の図 3 に太点線で示す範囲において、2007 年 4 月上旬および下旬の 5 日間、住宅の悉皆調査を行った。調査では、2-3 人を 1 チームとする複数のチームを組み、チームごとに、住宅各棟の被災度を判定した。住宅被災度の判定基準は、岡田・高井¹⁴⁾の方法に基づき、D0 (無被害)、D1-D3 (一部破損・半壊)、D4-D5 (全壊) の 3 段階とし、判定方法は外観目視に基づく合議とした。地震被害により解体中あるいは撤去済みの住宅は、D4-D5 に分類した。調査した住宅の棟数は、走出地区 286 棟、黒島地区 196 棟である。

図 4(a), (b)に、悉皆調査から得られた走出地区および黒島地区の木造住宅の被害率の分布を示す。この際、図 3 に示すように、走出地区を 5 ブロック (Aa, Ab, Ac, Ad, Ae)、黒島地区を北部 3 (Ba, Bb, Bc)、中部 3 (Ca, Cb, Cc)、南部 4 (Da, Db, Dc, Dd) ブロックに分割し、ブロックごとに被害率を算定した。走出地区 (図 4(a)) では、木造住宅の全壊率 (D4-D5 被害率) は、Aa ブロックでは 0.05 程度、

図 4 木造住宅の被害率の分布 (()内の数値は調査した住宅の棟数)

それ以外のブロックでは概ね 0.2 程度となっており、各ブロックの位置と面積（図 3(a)）から、この地区全体における住宅被害率の場所による変化は比較的小さいと言える。一方、黒島地区（図 4(b)）では、南部（Da-Dd）ブロックに比べて、中部（Ca-Cc）および北部（Ba-Bc）ブロックにおいて住宅被害率が大きくなる傾向が認められる。また、黒島地区の北部および中部では、西側（Ba, Ca）および東側（Bc, Cc）ブロックに比べて、中央（Bb, Cb）ブロックにおいて住宅全壊率が高くなっており、その値は 0.3 程度である。このように、黒島地区の住宅被害率は、南北および東西方向に大きく変化している。

3.2 木造建物の特徴

3.1 節の悉皆調査における観察から、走出地区と黒島地区の木造建物の特徴として、以下の点が指摘される。

両地区に共通する特徴として、土塗り壁を持つ伝統的な木造軸組構法による建物が多いこと、その建築年が比較的古いことが挙げられる。また、建物の用途は、住宅とともに土蔵が多い。屋根には耐寒性のある黒光沢の能登瓦が使用され、葺き土無しで屋根と銅線により固定されている場合が多い。

走出地区では、總持寺の表通りに沿って町並みが発達したため、建物の間隔および間口が狭く、奥行きが長い場合が多い。この表通りは商店街でもあるため、建物の間口方向には全面壁が少なく、また、建物の外壁は、下見板貼りかモルタル仕上げが多い。

黒島地区では、冬季の海からの強風対策として、外壁にはモルタルを用いず、全面下見板貼りとして開口部を小さくした建物が多い。住宅・土蔵とも、下見板や瓦を固定する釘や銅線は、海からの強風により劣化するため、20-30 年周期で交換されることが多いが、建物自体が建て直されることは少ない。また、強風対策として、住宅と土蔵との間隔を短くし、両者を繋げて通路とする場合が多い。なお、倒壊した建物のうち数棟では、蟻害による軸組の劣化が確認された。

3.3 木造住宅の詳細調査および固有周期

この地域の木造住宅の構造的特性を把握するため、黒島地区の住宅 8 棟を対象に、詳細調査を行った。調査では、住宅の室内の寸法計測から、平面図および立面図を記録した。また、ヒアリングにより、住宅の建設年代と増改築履歴を確認した。対象とした木造住宅の概要

表 1 詳細調査を行った木造住宅の概要

住宅	張り間方向	築年数	固有周期 (s)		外壁仕上げ	内壁	階数	被災度
			けた行	張り間				
MO	NW	60	0.32	0.23	下見板 ¹	土塗り	2	D1-D3
MS	N	100以上	0.27	0.22	下見板 ¹	土塗り	2	D0
MZ	E	59	0.19	0.21	下見板 ¹	土塗り	2	D0
KA	NW	30	0.24	0.20	下見板	石膏ボード	2	D0
KG	E	60-70	0.26	0.19	下見板 ¹	土塗り	2	D1-D3
KB	N	36	0.24	0.30	下見板 ¹	土塗り	2	D0
KM	N	46	0.31	0.40	下見板 ¹	土塗り	2	D0
OU	N	45	0.25	0.33	下見板 ¹	土塗り	2	D1-D3

*1 仕上げ内部の壁は土塗り

を表 1 に示す。対象住宅の多くは、外壁仕上げには下見板貼りを、内壁には土塗り壁を用いた伝統的な木造軸組構法によるものであり、築年数は 30-100 年程度以上である。地震時の被害は、屋根瓦の一部落下や、室内壁のひび割れなど軽微なものが多かったが、住宅内部の柱に残留変形が見られた場合もあった。

詳細調査を行った 8 棟では、建物と地盤の同時微動観測も行った。観測では加速度計を用い、建物・地盤とも、けた行および張り間方向の水平 2 成分の微動をサンプリング周波数 100Hz で記録した。記録波形が定常性を保っていると考えられる区間を選び、各成分 40.96 秒のデータを 8-16 セット程度作成して、FFT により、建物と地盤のフーリエ振幅スペクトル比を求め、そのピーク周期から建物の固有周期を読み取った（表 1）。得られた固有周期の値は、建物のけた行方向で 0.2-0.3 秒程度、張り間方向で 0.2-0.4 秒程度である。

4. 走出地区と黒島地区の表層地盤構造

4.1 微動の移動 1 点観測と H/V スペクトル

走出地区および黒島地区の表層地盤の S 波速度構造を把握するため、図 3 の被害地域を南北および東西に縦断する A-A' 測線（A1-A8 地点）および B-B', C-C', D-D' 測線（B1-B5, C1-C4, D1-D4 地点）において、微動の移動 1 点観測を行った。走出地区の A2-A7 地点は八ヶ川沿いの平地部に、A1 および A8 地点は平地部より標高が 30-40m 程度高い山地部に、それぞれ位置している。黒島地区の B-B', C-C', D-D' 測線では、

図 5 微動および基本モード表面波の H/V スペクトル

海際の B1, C1, D1 地点から東側に向かって標高が高くなっている。B1-B5, C1-C4, D1-D4 各地点間の標高差は 20, 30, 15m 程度である。

観測は、固有周期 2 秒の 3 成分速度計を用いて、2007 年 4 月に行った。観測波形は増幅後、サンプリング周波数 100Hz で A/D 変換 (24bit) し、ノートパソコンに記録した。各地点において、記録波形が定常性を保っていると考えられる区間を選び、各成分 20.48 秒のデータを 10-20 セット程度作成して、文献 11) と同様の方法により、H/V スペクトル^{9), 11)}を求めた。

図 5 に、走出地区の A1, A4, A6, A7 地点および黒島地区の B1, B3, B5, C2, D1, D3 地点で得られた微動の H/V スペクトルを○印で示す。図から、走出地区の山地部の観測点 (A1) および黒島地区の中部 C-C'、南部 D-D' 測線の観測点 (C2, D1, D3) では、H/V スペクトルに明瞭な周期特性が認められない場合が多い。一方、走出地区の平地部の観測点 (A4, A6, A7) および黒島地区の北部 B-B' 測線の観測点 (B1, B3, B5) では、H/V スペクトルに比較的光明瞭なピークが認められる。そのピーク周期の値は、走出地区では 0.5-1 秒程度、黒島地区の北部 B-B' 測線では 0.3-0.7 秒程度の範囲で、場所により変化している。図 3 には、各地点の微動 H/V スペクトルのピーク周期を示してある。図から、黒島地区の北部 B-B' 測線では、H/V スペクトルのピーク周期が海側の地点ほど長くなる傾向が認められる。

4.2 H/V スペクトルとボーリング資料に基づく S 波速度構造の推定

A4 地点近傍の門前東小学校では、深度 40m までのボーリング調査が行われている。調査結果に基づく同小学校の N 値と土質の深さ方向分布を図 6(a) に示す。地表から深度 9m までは N 値 10-25 程度の砂礫層、深度 9-35m は N 値 3-9 程度のシルト層、それ以深は風化帯を挟んで N 値 50 以上の礫岩となっている。これよりも深い地盤構造に関する情報は、現時点では見当たらない。そこで、A4 地点の表層地盤を 3 層 (最下層は半無限体) にモデル化し、観測 H/V スペクトルの周期特性が表面波 (レイリー波) 基本モードによるものと考え¹⁰⁾、逆解析¹¹⁾を行って、各層の S 波速度を推定した。

図 6(b) に、推定された S 波速度構造を実線で示す。図 5(b) の実線は、推定地盤構造に対応する基本モード表面波の理論 H/V スペクトル¹¹⁾である。理論 H/V の周期特性は、観測 H/V のそれと良く対応している。また、図 6(a) の N 値と土質から太田・後藤¹⁵⁾の回帰式を用いて S 波速度を求め、これを図 6(b) に○印で示す。微動から推定された S 波速度は、N 値と土質から求めた値ともほぼ整合している。

図 6(b) の推定 S 波速度構造から求めた微小ひずみレベルにおける地盤せん断振動の 1 次固有周期 (以下、初期固有周期) は 1.1 秒であり、これは、同地点の微動 H/V スペクトルのピーク周期 (1 秒程度、図 3, 5(b)) とほぼ対応している。すなわち、図 3, 5, 6 の比較から、走出地区の微動 H/V スペクトルのピークは、N 値 50 以上の礫岩 (工学的基盤) と堆積層 (主にシルト) の S 波速度コントラストを反映したものと考えられる¹⁰⁾。そこで、A1-A8 地点の表層地盤を 2 層構造に近似し、図 6(b) から、堆積層および工学的基盤の平均 S 波速度を 140-150m/s および 520m/s と仮定して、各地点の微動 H/V スペクトルに対して前述と同様の逆解析を行い、堆積層の厚さを推定した。また、黒島地区では、A4 地点のように直接参照できるボーリング資料は見当たらないが、同地区北部の微動 H/V スペクトルには比較的光明瞭なピークが認められること (図 5(e)-(g)) から、走出地区と同様、2 層地盤モデルを仮定して、B1-B5, C1-C4, D1-D4 地点の微動 H/V スペクトルに対して同様の

逆解析を行い、S 波速度構造を推定した。この際、層厚と S 波速度の両方を変数としたが、各層の S 波速度が B-B', C-C', D-D' 測線ごとにほぼ同一となるよう拘束条件を与えた。

図 7 に、各地点の逆解析結果に基づく走出地区 A-A' 測線および黒島地区 B-B', C-C', D-D' 測線に沿う推定 S 波速度構造を示す。ここで、図 5 の破線は、各地点の推定地盤構造に対応する基本モード表面波の理論 H/V スペクトル¹¹⁾である。いずれの地点でも、理論 H/V と観測 H/V の周期特性は良く対応しており、逆解析が適切に行われたことが示唆される。また、各地点の推定 S 波速度構造から求めた地盤の初期固有周期は、微動 H/V スペクトルに比較的光明瞭なピークが認められる場合、そのピーク周期 (図 3) とほぼ対応することを確認している。

図 6 門前東小学校 (A4 地点) のボーリング調査結果および推定 S 波速度構造

図 7 走出地区の (a) A-A' 測線および黒島地区の (b) B-B', (c) C-C', (d) D-D' 測線に沿う推定 S 波速度構造

図7から、走出地区では、山地部のA1およびA8地点では工学的基盤がほぼ露頭しているが、それ以外の平地部では基盤は厚さ20-40m程度の堆積層（主にシルト）に被われている。黒島地区では、北部のB-B'測線では、堆積層（厚さ10-25m程度）と基盤のS波速度コントラストは比較的明瞭であり、海側ほど堆積層が厚いと推定される。一方、中部および南部のC-C'およびD-D'測線では、南側ほど堆積層のS波速度が大きくなり、基盤とのコントラストが不明瞭になっている。このS波速度コントラストの傾向は、黒島地区の南部の木造住宅被害率が北部のそれに比べて小さかったこと（図4(b)）と調和的である。なお、黒島地区の堆積層の土質は、文献16)によれば、走出地区のそれ（シルト）とは異なり、砂質土が卓越している。

5. 走出地区と黒島地区の木造住宅の本震時の最大応答

本章では、4章および3章の結果に基づいて、走出地区と黒島地区の表層地盤モデルおよび木造住宅モデルを作成し、2章の結果を参考に本震地震動のスペクトルを仮定して、木造住宅の全壊率が高かった地区の最大応答変形角を推定する。

5.1 木造住宅の簡略的地震応答解析手法

木造住宅の最大応答の推定は、既報^{17), 18)}で提案した簡略的な地震応答解析手法により行う。まず、堆積層と工学的基盤から成る2層（表層）地盤モデルを考え、解放工学的基盤上面で仮定した入力地震動の加速度応答スペクトル S_{ab} （減衰定数5%）から、応答スペクトル法に基づいて、地表面の加速度応答スペクトル S_{as} を推定する。次に、木造住宅を基礎固定の等価1質点系に置換し、その性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} ¹⁸⁾と S_{as} との交点から、最大応答変形角 R_b を算定する。解析における入力地震動、表層地盤モデルおよび木造住宅モデルのパラメータは、以下のように設定する。

入力地震動の加速度応答スペクトル S_{ab} は、荷重指針¹⁹⁾のそれを用い、最大速度 V および最大加速度と最大速度の比 A/V により規定される¹⁷⁾。最大速度 V については、図2(c)を参考に、 $V=80, 100\text{cm/s}$ と仮定する。また、 A/V については、図2(b)および(2)式から、入力地震動の卓越周期 $(=2\pi/(A/V))$ が1秒程度となるよう、 $A/V=6$ とする。

表層地盤モデルは、走出地区と黒島地区（北部、中部、南部）の推定地盤構造（図7）に基づいて、地区ごとに表2のように設定する。この際、地盤の初期固有周期 T_0 を、各地区の微動H/Vスペクトルの

表2 地盤モデルの解析パラメータ

地区	土質	初期固有周期 T_0 (s)	堆積層の V_{s0} (m/s) [1.8]	工学的基盤の V_{SB} (m/s) [2.0]
走出	粘性土	0.5, 0.7, 1	145	520
黒島北部	砂質土	0.3, 0.5, 0.7	145	380
黒島中部		0.3, 0.5	215	380
黒島南部		0, 0.3, 0.5	275	400

[]内の数値は単位体積重量(tf/m^3)

ピーク周期（図3）に基づいて変化させる。なお、黒島地区南部では、H/Vスペクトルに明瞭なピークが認められないことから、堆積層を無視したケース（ $T_0=0$ ）を加える。堆積層の土質は、4章の検討から、走出地区では粘性土、黒島地区では砂質土とし、土のせん断剛性と減衰定数のひずみ依存性（非線形性）には古山田ら²⁰⁾のモデルを用いる。

木造住宅の性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} は、等価1質点系の等価高さ H_{eq} 、降伏せん断力係数（以下、耐力） C_y および系の復元力特性により規定される¹⁸⁾。住宅の等価高さ H_{eq} は、2階建てが多いこと（表1）から4.5mとする¹⁸⁾。また、耐力 C_y は0.2, 0.4, 0.6と仮定し、復元力特性は降伏変形角1/100の完全弾塑性型とする。なお、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 C_y は概ね0.2-0.6程度、微動観測から求めた固有周期は0.2-0.5秒程度であり^{21), 22)}、仮定した上記 C_y の値および黒島地区における木造住宅の微動観測結果（表1）と概ね対応している。

5.2 入力地震動の最大速度と表層地盤特性および木造住宅の耐力が最大応答変形角に与える影響

5.1節に示した解析手法およびパラメータを用いて、走出地区および黒島地区（北部、中部、南部）の木造住宅の最大応答変形角 R_b を推定した。図8に、各地区における地表面の推定地震動の加速度応答スペクトル S_{as} （減衰定数5%、工学的基盤での入力地震動の最大速度 $V=80\text{cm/s}$ ）を実線・破線・鎖線で、木造住宅の性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} ¹⁸⁾をシンボル付き細線で示す。図から、いずれの地区においても、表層地盤の初期固有周期 T_0 および木造住宅の耐力 C_y によって、 S_{as} と S_{ae} との交点すなわち住宅の最大応答変形角 R_b が変化している。

図8 木造住宅の性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} ¹⁸⁾と推定された地表地震動の加速度応答スペクトル S_{as} （減衰定数5%、工学的基盤での入力地震動の最大速度 $V=80\text{cm/s}$ ）

図9 表層地盤の初期固有周期 T_0 と推定された木造住宅の最大応答変形角 R_b との関係
(入力地震動の最大速度 V による変化, 住宅の耐力 $C_y = 0.4$)

図10 表層地盤の初期固有周期 T_0 と推定された木造住宅の最大応答変形角 R_b との関係
(住宅の耐力 C_y による変化, 入力地震動の最大速度 $V = 80\text{cm/s}$)

そこで、各地区における木造住宅の最大応答変形角 R_b と表層地盤の初期固有周期 T_0 との関係について、入力地震動の最大速度 V による変化 ($C_y = 0.4$ の場合) を図9に、住宅の耐力 C_y による変化 ($V = 80\text{cm/s}$ の場合) を図10に示す。

図9から、いずれの地区においても、入力地震動の最大速度 $V = 80\text{cm/s}$ の場合に比べて、 $V = 100\text{cm/s}$ の場合の方が、木造住宅の最大応答変形角 R_b が大きくなっている。また、図10から、木造住宅の耐力 $C_y = 0.2, 0.4$ の場合、表層地盤の初期固有周期 T_0 が大きいほど、住宅の最大応答変形角 R_b が大きくなる傾向が認められる。しかし、 $C_y = 0.6$ の場合、表層地盤の初期固有周期 T_0 が走出地区では1秒、黒島地区北部では0.7秒の地域で、住宅の最大応答変形角 R_b が顕著に低下している。これは、図8から、地盤の初期固有周期 T_0 が大きいほど、強震時の地盤の固有周期の伸び率（非線形化の程度）が大きく、したがって、地表面地震動の加速度応答スペクトル S_{as} のピークの周期は大きくなるが、地盤の非線形化に伴う減衰の増大が顕著になるため、 S_{as} のピークの絶対値は小さくなり、耐力の高い住宅の性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} を下回る場合があるためと考えられる。

また、図9, 10において、入力地震動の最大速度 $V = 80\text{cm/s}$ 、木造住宅の耐力 $C_y = 0.2, 0.4$ の場合、走出地区では、住宅の最大応答変形角 R_b が1/10程度を超えている。黒島地区の北部でも、同様の傾向が認められる。しかし、黒島地区の中部および南部では、木造住宅の最大応答変形角 R_b は、南側ほど小さくなり、黒島地区南部では、 R_b は1/15程度以下となっている。これは、表2および図8から、黒島地区では、南側ほど、堆積層のS波速度が大きく、すなわち表層地盤が非線形化しにくいいため、地表面地震動の加速度応答スペクトル S_{as} のピーク周

期の伸びが比較的小さく抑えられたことが原因と考えられる。同様の指摘は、2004年新潟県中越地震における小千谷の木造住宅被害を対象とした検討²³⁾にも見られる。

なお、解析における地盤の有効せん断ひずみの値は、いずれの場合も1-2%程度以下であり、本解析手法の概ね適用範囲内¹⁷⁾となっている。また、表2のS波速度の値を1割程度変化させても、解析結果(図8-10)がほとんど変わらないことを確認している。

5.3 木造住宅の最大応答変形角と全壊率との関係

5.2節の検討から、推定された木造住宅の最大応答変形角 R_b の分布は、被害率のそれと概ね調和的である可能性が示唆される。そこで、入力地震動の最大速度 $V = 80\text{cm/s}$ 、木造住宅の耐力 $C_y = 0.4$ とした場合について、推定された木造住宅の最大応答変形角 R_b と図4に示した全壊率 (D4-D5被害率) との関係を図11に示す。ただし、図10に示したように、走出地区の表層地盤の初期固有周期 $T_0 = 1$ 秒、黒島地区北部の $T_0 = 0.7$ 秒の地域では、木造住宅の耐力 C_y の値によって最大応答変形角 R_b が大きく変動してしまうため、図11では、これらのブロック (Ab および Ba: 図3) を除外している。図から、推定された最大応答変形角 R_b が大きいほど木造住宅の全壊率も大きくなる傾向が認められる。入力地震動の最大速度 $V = 80\text{cm/s}$ とした場合でも、住宅全壊率が0.1程度を超えるブロックでは、最大応答変形角 R_b が0.1-0.14程度に達している。この傾向は、木造住宅の耐力 $C_y = 0.2, 0.6$ とした場合でも変わらない。

なお、図11において、黒島地区中部のCbブロックでは、木造住宅の全壊率が高いにも関わらず、最大応答変形角 R_b が小さめの値となっている。黒島地区では、図4に示したように、被害率を算定するため

図 11 木造住宅の全壊率 (D4-D5 被害率) と推定された最大応答変形角 R_b との関係 (住宅の耐力 $C_y = 0.4$, 入力地震動の最大速度 $V = 80\text{cm/s}$: C_b ブロックの位置は図 3(b)を参照)

の各ブロックの住宅の棟数が十分でないこと、被害調査を行った時期が遅く、被災住宅が既に撤去されていた場合もあることから、住宅全壊率を過大評価している可能性もある。

6. 結論

2007 年能登半島地震時に強震記録がほとんど得られなかった震源域周辺において、墓石の転倒率調査を行い、最大地動速度の分布を推定した。また、木造住宅に甚大な被害が生じた門前町の中心部 (走出地区および黒島地区) において、被害調査および微動探査を行った。これらの調査結果に基づく地震応答解析から、木造住宅被害の要因を分析し、以下の結論を得た。

- 1) 門前町の中心部では、本震時の最大地動速度は、少なくとも 80-100cm/s 程度以上と推定される。
- 2) 木造住宅の全壊率は、走出地区では、概ね 0.2 程度となっている。一方、黒島地区では、南部に比べて、北部において住宅被害率が大きくなる傾向が認められる。また、黒島地区の北部では、住宅全壊率は、東西方向にも変化しており、その中央付近において最大 0.3 程度となっている。
- 3) 走出地区および黒島地区北部では、堆積層と工学的基盤の S 波速度コントラストが比較的明瞭であり、表層地盤の初期固有周期は 0.5-1 秒および 0.3-0.7 秒程度となっている。一方、黒島地区南部では、堆積層と基盤のコントラストは不明瞭である。
- 4) 工学的基盤における地震動の最大速度を 80cm/s 程度とすれば、木造住宅の最大応答変形角は、走出地区および黒島地区北部では 1/10 程度以上、黒島地区南部では 1/15 程度以下となり、表層地盤の S 波速度構造および非線形性の差異により、被害を概ね説明できる。
- 5) 木造住宅の全壊率が 0.1 程度以上の地域では、最大応答変形角が 1/10 程度を超えている。

謝辞

本論文で用いた強震記録は、防災科学技術研究所および気象庁から提供されたものである。木造住宅の調査では、京都大学教授 James Mori 博士、同研究員 朴舜千 博士、同工学部・工学研究科の学生諸君および門前町の住民の方々にご協力頂いた。門前東小学校のボーリング資料は輪島市教育委員会から提供して頂いた。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 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，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>
- 2) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網 KiK-net ホームページ，<http://www.kik.bosai.go.jp/>
- 3) 気象庁：強震波形 (平成 19 年(2007 年)能登半島地震) ホームページ，http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2007_03_25_noto/EVENT1/NOTO_kyosin.html
- 4) 気象庁：平成 19 年 3 月 地震・火山月報 (防災編)，p49, 2007.
- 5) 防災科学技術研究所：高感度地震観測網 Hi-net ホームページ，<http://www.hinet.bosai.go.jp/>
- 6) 岡田成幸，鏡味洋史：震度による地震被害系統評価のためのパルナラビリティ関数群の構成，地震 2，第 44 巻，pp. 93-108, 1991.
- 7) 金子美香，林康裕：剛体の転倒率曲線の提案，日本建築学会構造系論文集，No. 536，pp. 55-62, 2000.
- 8) 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.
- 9) 中村豊，上野真：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み，第 7 回日本地震工学シンポジウム，pp. 265-270, 1986.
- 10) 時松孝次，宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文集報告集，No. 439，pp. 81-87, 1992.
- 11) Arai, H. and K. Tokimatsu: S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, BSSA, Vol. 94, No. 1, pp. 53-63, 2004.
- 12) 藤本一雄，翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法，地域安全学会論文集，No. 7，pp. 214-246, 2005.
- 13) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No. 523，pp. 63-70, 1999.
- 14) 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.
- 15) 太田裕，後藤典俊：S 波速度を他の土質的諸指標から推定する試み，物理探査，第 29 巻，第 4 号，pp. 31-41, 1976.
- 16) 石川県鳳至郡門前町：門前町史，門前町史編集委員会，842pp, 1970.
- 17) 森井雄史，林康裕：表層地盤の地震動増幅特性と入射地震動特性が木造建物応答に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，No. 568，pp. 75-82, 2003.
- 18) 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.
- 19) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，pp. 406-409, 1997.
- 20) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，pp. 52-57, 2006.
- 21) 須田達，森井雄史，林康裕，鈴木祥之：地震被害に基づく木造建物の限界変形性能の評価 (2000 年鳥取県西部地震に基づく検討事例)，日本地震学会大会-2003 梗概集，pp. 32-33, 2003.
- 22) 清水秀丸，林康裕，鈴木祥之，斎藤幸雄，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.
- 23) 時松孝次，新井洋，関口徹：2004 年新潟県中越地震時に表層地盤の非線形震動増幅特性が小千谷の木造住宅被害に与えた影響，日本建築学会構造系論文集，No. 620，pp. 35-42, 2007.

(2007 年 5 月 15 日原稿受理，2007 年 11 月 9 日採用決定)