

2011 年長野県北部の地震の震源近傍における高密度の地震動推定と 木造建物被害との比較

山田真澄¹⁾、山田雅行²⁾、福田由惟³⁾、スマイス・クリスティン⁴⁾、藤野義範⁵⁾、羽田浩二⁶⁾

1) 正会員 京都大学防災研究所、助教、Ph.D.

e-mail: masumi@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

2) 正会員 株式会社ニュージェック、博士(工学)

e-mail: yamadams@newjec.co.jp

3) 株式会社ニュージェック、修士(工学)

e-mail: fukudayi@newjec.co.jp

4) 京都大学防災研究所、研究員、Ph.D.

e-mail : christine@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

5) 株式会社ニュージェック

e-mail: fujinoys@ newjec.co.jp

6) 株式会社ニュージェック、修士(工学)

e-mail: hadakj@ newjec.co.jp

要 約

我々は、2011年長野県北部の地震(Mj6.7)の震源域で木造建物の全棟調査及び高密度の常時 微動計測を行った。木造住家の全壊率は、長野県栄村の青倉地区と横倉地区で30%を超え ており、観測記録の得られている森地区では10%以下であった。また、震源近傍で得られ た地震観測記録と常時微動記録から青倉地区と森地区での強震時の地震動を推定した。推 定された地震動は、地区の中の揺れやすさを反映することができ、その特徴的をとらえた 分布を示した。推定した地震動(PGA, PGV)と木造建物被害率との相関は概ね良く、被害分 布と矛盾しない地震動分布を推定できたことを示している。本研究で求められた被害率曲 線では、150cm/sを境にして木造建物の倒壊率が急増し、倒壊率が半数を超える結果が得ら れた。

キーワード: 長野県北部の地震、建物被害調査、木造建物、強震動、常時微動、H/V スペクトル

1. はじめに

2011 年 3 月 12 日に発生した長野県北部の地震は、最大震度 6 強という強い地震動を観測したにも関わらず、東北地方太平洋沖地震の翌日ということもありマスメディアの関心も低く、被害の情報もあまり多くはなかった。しかしながら、この地震では震源近傍で 110 cm/s を超える地動速度を観測し

ており、木造建物の被害も顕著であることが確認されている ¹⁾。 震源付近で公開されている地震観測記録は震源から半径 10km 以内に 2 点だけであり、震源近傍での地震動分布は明らかでない。震源に近い長野県栄村は、山間の農村で集落が点在しており、場所によって被害の程度も異なり、地震動にも違いがあったと考えられる。 そこで我々は、長野県栄村および隣接する新潟県津南町において木造建物の全棟調査を行って被害の実態を把握すると同時に、栄村役場で得られた本震の観測記録と微動観測から本震時の地震動を推定した。本論文では、推定された地震動と木造建物被害との関係を明らかにするとともに、過去の地震で得られた被害率曲線との比較を行う。

2. 地震および強震記録について

2011年長野県北部の地震は、2011年東北地方太平洋沖地震に誘発されて翌3月12日午前3時59分に発生した。震源の深さは8km、気象庁マグニチュードは6.7、最大震度は栄村において6強を観測している $^{2)}$ 。余震分布から推定される断層面は、北西傾斜にて断層サイズは概ね10km×20kmと推定される(図1)。

長野県栄村役場では長野県によって震度計が置かれており、波形記録が公開されている 3 。図 2 に本震の加速度波形と速度波形を示す。震度計は加速度を記録しており、得られた加速度記録から DC 成分を取り除き、Boore 4 の手法で基線補正を行った後、時刻歴で積分することによって速度記録を得た。加速度記録は、EW、NS ともに $900 \, \mathrm{cm/s}^2$ を超えており、最大速度は EW 成分で $110 \, \mathrm{cm/s}$ を超えている。図 3 は同記録の加速度応答スペクトル(5%減衰)を示している。特に EW 成分は 0.9 秒あたりに大きなピークがあり、木造建物の構造被害に大きな影響を与えるといわれている 1-2 秒の周期と近い 5 。これらの結果から、震源近傍の地震動は、木造建物に被害を生ずる可能性があると考えられる。

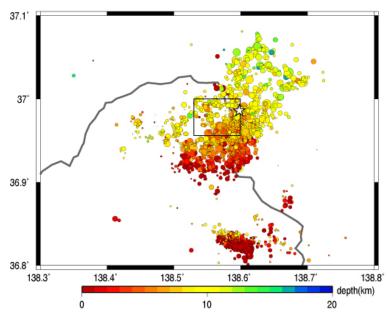


図1 3月1日~31日の気象庁一元化地震カタログの震源分布図。丸印のカラーは震源の深さを示す。中央の四角は図4の範囲、星印は震源を示す。太線は長野県と新潟県の県境を示す。

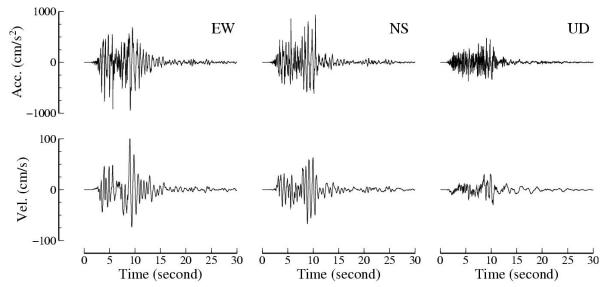


図2 本震時に長野県栄村で観測された加速度波形(上)と速度波形(下)。左からEW、NS、UD成分をプロットしている。

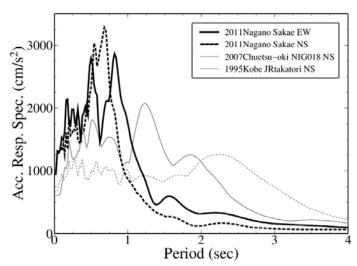


図3 長野県栄村で記録された波形の加速度応答スペクトルと、2007年中越沖地震K-NET柏崎、1995年 兵庫県南部地震JR鷹取駅で記録された波形の加速度応答スペクトル(すべて5%減衰)。

3. 現地調査について

3.1 建物被害調査

現地調査は地震発生後約3カ月経過した6月6日~9日に行った。調査範囲は、長野県栄村の北東部 (森、青倉、横倉、小滝、月岡、箕作、雪坪の7地区)と新潟県津南町の北西部(羽倉、寺石、逆巻、亀岡、子種、の5地区)の東西5km、南北3kmの領域である。対象とした地区の位置を図4に示す。 断層面積に比べて調査範囲は狭く、すべての地区が断層面の地表投影面上に入っている。

建物の調査は 2 名ずつ 3 チームに分かれ、地区内のすべての建物の被害度判定を目視で行った。木造建物の被害度判定は、岡田・高井の木造建物破壊パターン 5 に基づき、D0 (無被害)、D1 ~ D2 (一部破損)、D3 (半壊)、D4 ~ D5 (全壊) で外観から被害度を判定し、住宅地図に記録した。建物の用途(住家、店舗、オフィス、倉庫等)と構造種別(木造、S 造、RC 造)もあわせて記録した。同時に全体及び細部の写真撮影と、GPS による緯度経度計測を行った。なお、調査時期が被災後かなり経過していたこともあり、一部の建物ではすでに修復されていた。このような建物についても、修復され

た部材(構造材・非構造材、等)から、地震直後の被害をできる限り推定して被害度を判定した。目視で修復が確認されたのは住家の約11%であり、判定に多少の誤差を含んでいても大勢には大きく影響しないと考える。また、撤去された建物については、修復が不可能なほど被害を受けたと考えられることから、すべて全壊(D4 あるいは D5)として扱った。調査した建物の合計は880棟である。

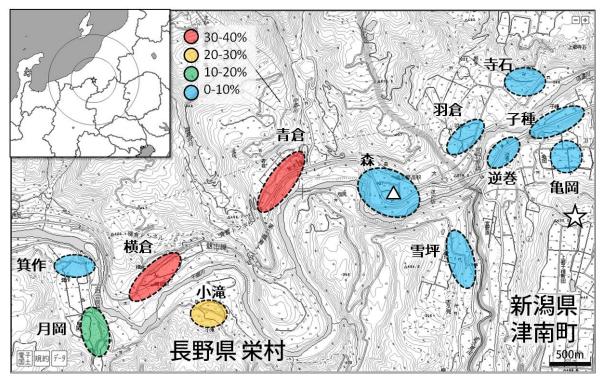


図4 各地区の全壊建物 (D4以上) の割合。特に被害率が高かったのは青倉・横倉の2地区である。森 地区の三角印は地震観測点、星印は震源を示す。

3.2 常時微動観測

建物の被害調査と同時期に地盤の常時微動観測も行った。微動観測については、白山工業(株)製のJU210を4台使用し、1か所あたり11分の常時微動計測とハンディGPSによる緯度経度計測を行った。JU210は水平2成分上下1成分の加速度センサー、ロガー、バッテリーが装備された一体型の微動計であり、風の影響をさけるためにケースをかぶせて計測した。サンプリング周波数は100Hz、ハイカットフィルターはカットオフ周波数30Hzとした。特に被害の大きかった長野県栄村の青倉地区および、観測記録の得られている森地区では約40m間隔の高密度計測を行い、それ以外の地区では中心部および被害の大きかった地点1-2か所で計測した。各地区での代表的な常時微動観測点の位置を表1に記す。

表1 調査した地区の木造建物被害率及び常時微動計測の結果。建物のD3以上、D4以上の被害率の単位 は%。

No	地域	場所	住家			住家+店舗			∕汉庄	(会) 庄	H/V
			D4以上	D3以上	母数	D4以上	D3以上	母数	経度	緯度	(Hz)
1	森	地震観測点	5.4	18.9	74	11.6	26.3	95	138.577	36.988	2.64
2	青倉	中心	32.3	46.2	65	33.8	47.1	68	138.564	36.990	1.86
3	横倉	中心	30.6	61.1	36	31.7	61.0	41	138.551	36.981	3.27
4	横倉	被災地区	30.6	61.1	36	31.7	61.0	41	138.548	36.979	2.93
5	小滝	中心	21.1	52.6	19	20.0	55.0	20	138.557	36.977	5.25
6	月岡	中心	13.0	46.3	54	12.3	45.6	57	138.544	36.975	6.57
7	月岡	被災地区	13.0	46.3	54	12.3	45.6	57	138.543	36.976	4.66
8	箕作	中心	3.6	16.1	56	6.5	17.7	62	138.541	36.981	9.13
9	箕作	被災地区	3.6	16.1	56	6.5	17.7	62	138.540	36.982	5.86
10	雪坪	中心	0.0	12.5	16	0.0	22.2	18	138.586	36.981	2.95
11	羽倉	中心	2.6	15.4	39	2.5	15.0	40	138.584	36.993	3.05
12	寺石	中心	3.7	25.9	27	3.3	23.3	30	138.592	36.998	6.74
13	逆巻	中心	0.0	0.0	35	0.0	0.0	44	138.588	36.991	3.00
14	子種	中心	0.0	15.8	19	4.2	20.8	24	138.595	36.995	4.27
15	亀岡	中心	7.4	14.8	27	7.1	14.3	28	138.595	36.990	1.90

4. 微動観測結果と地震動推定

4.1 建物被害率の算出

建物全棟調査の結果に基づいて、地区ごとの被害率を算出した。構造が木造でかつ住家として利用されている建物を対象として、全壊建物(D4~D5)および全半壊建物(D3~D5)の割合を算出した。全壊建物の割合を図4にあわせて示す。栄村の青倉・横倉地区で被害率が高く30%強にも上る。この被害率は、2007年能登半島地震で被害の大きかった門前町の走出地区(25%程度)よりも高い⁶。また、観測記録のある森地区では全壊建物の割合は10%弱であり、青倉・横倉地区では地震動が観測記録より大きかった可能性もある。対象を拡大して、住家のみならず店舗・オフィスなどの商業施設として利用されている木造建物も含めて、被害率を同様にして算出した(表1)。被害率は多少変動するものの、地区ごとの被害率の傾向はあまり変わらない。

地震動推定地点との比較を容易にするため、青倉地区と森地区では常時微動観測点での地震被害率を推定した。常時微動観測は非常に高密度で行われているため、観測点近傍の建物被害を反映させる必要がある。しかしながら、狭い範囲で被害率を算出すると、サンプル数が十分に確保できずばらつきが大きくなるという欠点がある。このトレードオフを解消するため、我々は常時微動観測点から半径 100m 以内にある木造住家(建物数 n)を対象とし、観測点と建物 i の距離(R_i)で重みをつけ、D3 あるいは D4 以上の建物の割合を算出した。

被害率(DR_{Dx}) =
$$\sum_{i=1}^{n} w_i f_i / \sum_{i=1}^{n} w_i \times 100$$
 (1)

ここで、

 f_i =1, 建物 i の被害度が D3 あるいは D4 以上の場合 =0, 建物 i の被害度が D3 あるいは D4 未満の場合

 $W_i = 1/R_i$, R_i が 0.02km 以上の場合 =1/0.02, R_i が 0.02km 未満の場合

被害の閾値を D3 とした時の被害率は DR_{D3} 、D4 としたときの被害率を DR_{D4} と表示することにする。 重み付けをすることにより、観測点近傍の建物の被害をより被害率に反映することができる。半径 100m 以内の建物数が 10 未満の 11 地点は、解析の対象から除外した。推定した建物被害率(DR_{D4})を 図 5 に示す。青倉中心部および、森地区の北西部で被害率が高い。森地区の北西部は、国道 117 号線 から千曲川にかけて急な傾斜地となっており、現地調査の際に約 100m に渡って斜面がひび割れて滑っているのが確認された。この地盤変状が建物被害に影響したと考えられるので、傾斜地の 4 点に関しては地震動との比較検討の対象から外している。

4.2 常時微動観測に基づく地震動推定

常時微動観測のデータから各地点でのH/Vスペクトルを算出した。H/Vスペクトルは、11分間のデータから4096点(40.96秒)のデータを含む5区間をランダムに切り出し、それぞれの区間でフーリエ振幅スペクトルを算出した。このランダムな切り出し区間の選択を100回試行し、5つのスペクトルのばらつきが最小となるような切り出し区間を選んだ。水平成分は直行する2成分の二乗平均の平方根とした。水平成分、鉛直成分共に0.05HzのParzenウィンドウを用いてスペクトルを平滑化した。表1に各地区のH/Vスペクトルのピーク周波数を、図6に青倉地区(中心部)と森地区(地震観測点)のH/Vスペクトルを、図7に青倉、森地区のH/Vスペクトルのピーク周波数およびピーク振幅を示す。青倉地区と森地区のスペクトルはかなり異なっており、青倉地区の方がピーク周期も長く、ピーク振幅も大きい。

青倉地区と森地区では高密度の微動観測を行っているので、H/Vスペクトルと森地区の本震記録から、微動観測点における本震時の地震動を推定した。本震が記録された地震観測点と微動観測点は、最大でも1.2kmしか離れていないことから、地震基盤への入力地震動は等しいと仮定して、次式により求めた。

$$A(\omega) = A_0(\omega) \times AMP(\omega) / AMP_0(\omega)$$
 (2)

ここで、 $A_0(\omega)$ 、 $A(\omega)$ はそれぞれ地震観測点、微動観測点における加速度時刻歴のフーリエ変換、 $AMP_0(\omega)$ 、 $AMP(\omega)$ はそれぞれ地震観測点、微動観測点における地震基盤〜地表間のサイト増幅特性を示す。すなわち、地震観測点における本震記録に対して、地震観測点と微動観測点のサイト増幅特性の比で補正を行う。

地震観測点と微動観測点のサイト増幅特性の比は、長尾ほか⁸⁾の手法を応用して算出した。H/Vスペクトルの理論的背景については、様々な解釈があり議論されているが、長尾ほか⁹⁾では、レーリー波およびラブ波のミディアムレスポンスを詳細に検討し、常時微動は表面波,実体波の波動成分の混入によって説明できるとしている。本手法は、長尾らによって提案されている解釈に基づき、H/V スペクトルの振幅と地盤増幅に相関性があると仮定して構成されている。この手法では、長周期側の補正をするときにH/Vスペクトルのノイズが大きく影響する場合があることから、観測点によって地震動の変化がそれほど顕著ではないと考えられる長周期側では地震観測点での記録をそのまま利用した。具体的には、0.5Hz未満を1.0、1.0Hz以上は長尾ほか⁸⁾で求めた補正係数とし、その間をコサインカーブでスムーズに補完した。

地震観測点での本震記録には、地盤の非線形効果が含まれていると考えられる。このプロセスでは、各地点での強震時の非線形性の違いは考慮できておらず、地震観測点の記録に含まれる非線形性をそのまま各常時微動観測点に適用していることになる。また、サイト増幅特性、すなわち、振幅の補正のみを行っているため、地震観測点の記録に含まれる位相をそのまま各常時微動観測点に適用していることになる。非線形性や位相特性については、今後の課題と考えている。

推定した地震動の最大地動加速度 (PGA)と最大地動速度(PGV)を図8に示す。本論文では、水平2成分のうち大きい方を最大地動加速度、最大地動速度として採用した。青倉地区では、中心部において地震動が大きくなっていることがわかる。これは建物被害率の傾向とも一致する。森地区では、地震動に変化は見られるものの、その偏差はあまり大きくないことが分かる。

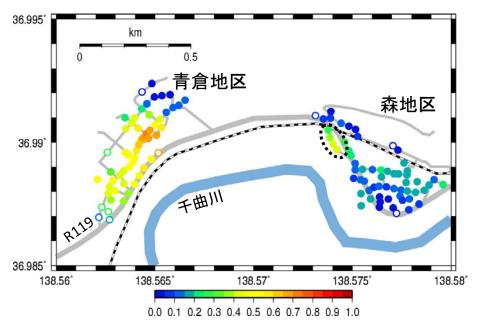


図5 青倉地区、森の常時微動観測点におけるD4以上の建物被害率。青倉中心部および、森地区の北西部で被害率が高い。白抜きはサンプルが10点未満のため参考地点。森地区の点線円は傾斜地で建物被害の大きかった場所を示す。

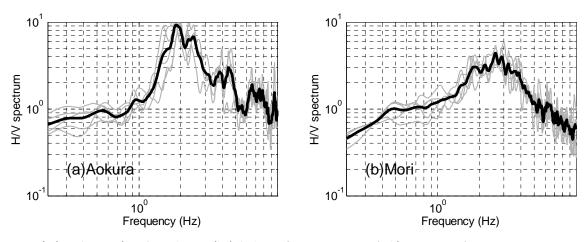


図6 青倉(左)、森(右)地区の常時微動のH/Vスペクトル。細線は5区間の個々のスペクトル、太線は5区間の平均のスペクトルを示す。

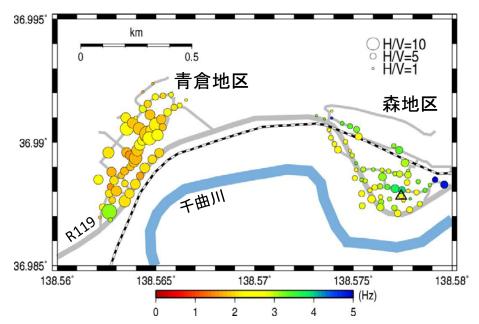


図7 青倉、森地区の常時微動のH/Vスペクトルのピーク周波数と振幅値。丸印の色がピーク周波数、 大きさがピーク振幅値を示す。三角印は地震観測点の位置を示す。

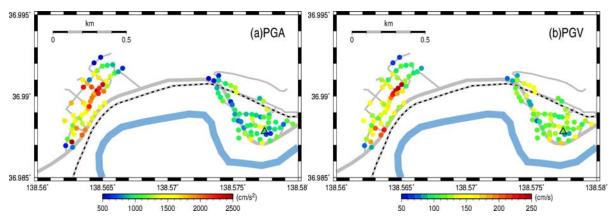


図8 常時微動記録から推定した本震時のPGAとPGV。三角印は地震観測点の位置を示す。

5. 議論

青倉地区、森地区での建物被害率と常時微動から推定した本震時の地震動との比較を行う。図 5 と 図 8 を目視で比較する限り、青倉の中心部で地震動も建物被害率も大きくなっているなど、大局的な 傾向は一致している。両者を詳細に比較するため、PGA 及び PGV と建物被害率の関係を図 9 に示す。 青倉地区のデータは、森地区のデータに比べて地震動、建物被害共に偏差が大きい。これは、森地区 では地盤条件がそれほど大きく変化せず、建物被害率が大きく変わらなかったのに対し、青倉地区で は中心部で地震動が大きく増幅し、建物被害が大きくなったことが影響していると考えられる。建物 被害率に関しては、建物の耐震性能のばらつきを含むものの、平均的に見れば地震動の大きさを反映していると考えられるので、推定された地震動と建物被害率が概ね良い相関を示していることは、推定された地震動が概ね現実的であることを示している。

建物被害率と地震動との関係を、累積正規分布関数 Φ を用いて回帰した。建物被害率と推定した地震動はどちらも誤差を含んでいるため、幾何平均回帰によって回帰式を求めた。最も良くデータを説明できる回帰式は、次式で表わされる。

PGA: $DR_{D3} = \Phi[(\ln(PGA) - 7.276)/0.551]$	(2)
---	-----

PGV: DR_{D3}=
$$\Phi[(\ln(PGV)-4.978)/0.393]$$
 (3)

PGA:
$$DR_{D4} = \Phi[(\ln(PGA) - 7.491)/0.535]$$
 (4)

PGV:
$$DR_{D4} = \Phi[(ln(PGV) - 5.133)/0.381]$$
 (5)

50%の建物全壊率を与える地震動は、PGAで1792cm/s²、PGVで170cm/sである。この被害率曲線を過去の被害地震の調査結果^{5,10-12)}と比較した。既往の研究で得られたPGV-被害率のサンプルと、被害率曲線を図10に示す。長野県栄村の被害率は1995年兵庫県南部地震の震災復興都市づくり特別委員会が行った被災調査の被害率¹⁰⁾よりは小さく、2000年鳥取県西部地震¹¹⁾や2004年新潟県中越地震⁵⁾と比較すると、120 cm/s以下ではほぼ同等、それ以上では被害率が大きくなっている。栄村は日本有数の豪雪地であり、積雪に備えた建物のメンテナンスが耐震性につながった可能性も考えられる。被害率曲線は、ある閾値を境にして急激に被害率が増加するため、150 cm/s以上でサンプルのない2000年鳥取県西部地震と2004年新潟県中越地震は、地震動が大きい場合適切に評価できない。本研究で求められた被害率曲線では、150cm/sを境にして木造建物の倒壊率が急増し、倒壊率が半数を超える結果が得られた。

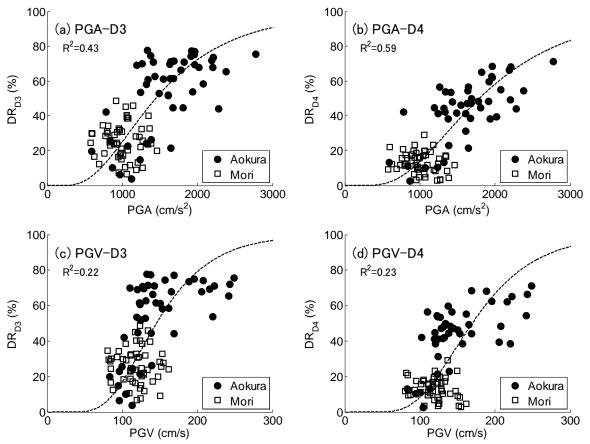


図9 建物の被害率 $(DR_{D3} \triangleright DR_{D4})$ と推定した最大地動加速度及び最大地動速度の関係。黒丸は青倉地区、白抜き四角は森地区のデータを示す。関係を最もよく説明する近似曲線を表示している。 R^2 は決定係数。

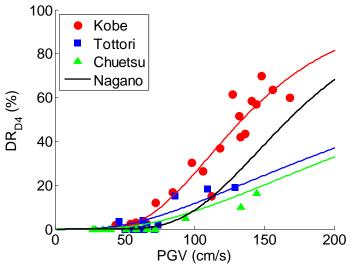


図10 過去の被害地震における全壊建物の割合^{5,10-12)}と最大地表速度の関係。

6. まとめ

本研究では、2011年長野県北部の地震(Mj6.7)の震源域で木造建物の全棟調査及び高密度の常時微動計測を行った。木造住家の全壊率は、長野県栄村の青倉地区と横倉地区で30%を超えており、観測記録の得られている森地区では10%以下であった。また、震源近傍で得られた地震観測記録と常時微動記録から、青倉地区と森地区での強震時の地震動を推定した。推定された地震動は、地区の中の揺れやすさを反映することができ、その特徴的をとらえた分布を示した。推定した地震動(PGA, PGV)と木造建物被害率との相関は概ね良く、被害分布と矛盾しない地震動分布を推定できたことを示している。本研究で求められた被害率曲線では、150cm/sを境にして木造建物の倒壊率が急増し、倒壊率が半数を超える結果が得られた。

謝辞

東京大学地震研究所 SK-net の地震記録、JR 鷹取駅の兵庫県南部地震の地震記録、防災科学技術研究所の K-NET の地震記録を使用させていただきました。長野県栄村役場、新潟県津南町役場には、被災直後のお忙しい中、貴重なデータを提供していただきました。現地調査には、香川敏幸氏にもご協力いただきました。一部の図の作成には GMT(Generic Mapping Tools)ソフトウェア ¹³⁾を使用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 山田真澄:長野県北部の地震被害調査速報

http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/~masumi/eq/tohoku/index.htm

- 2) 気象庁:初動発震機構解 http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/mech/ini/mc201103.html
- 3) 東京大学地震研究所: 首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net) http://www.sknet.eri.u-tokyo.ac.jp/
- 4) Boore, D.: Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 2001, pp. 1199–1211.
- 5) 境有紀、中村友紀子 、大月俊典、小杉慎司: 2004年新潟県中越地震で発生した地震動と建物被害の対応性、日本建築学会構造系論文集 No. 601、2006年、pp.69-73.
- 6) 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報告集, No.524, 1999年、pp.65-72.

- 7) 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 速度の評価と木造住宅被害の要因分析、日本建築学会構造系論文集, No.624、2008年、pp.227-234.
- 8) 長尾毅、山田雅行、野津厚:常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究,構造工学論文集Vol.56A, CD-ROM, 2010年.
- 9) 長尾毅、山田雅行、野津厚:常時微動H/Vスペクトルを構成する波動成分に関する一解釈,土木学会論文集,印刷中.
- 10) 村尾修、山崎文雄: 震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した兵庫県南部地震の建物被害関数、日本建築学会構造系論文集 No. 555、2002年、pp.185-192.
- 11) 林康裕:木造住宅の地震被害率と建築年代の関係に関する考察-兵庫県南部地震と鳥取県西部地震の被害経験を踏まえて-、日本建築学会 総合論文誌、No.2、2004年、pp.71-75.
- 12) Yamada, M., S. Park, and J. Mori: The 2007 Noto Peninsula, Japan Earthquake(Mw6.7): Damage to Wooden Structures. Seismological Research letters, No.79-1, 2008, pp.20-24.
- 13) Wessel, P. and Smith, W.: New, improved version of Generic Mapping Tools released. Eos Transactions 79, 1998, 579-579

(受理: 2011年8月26日)

(掲載決定: 2011年11月30日)

Estimation of Strong Motion and Building Damage Survey for the 2011 Northern Nagano Earthquake

YAMADA Masumi ¹⁾, YAMADA Masayuki ²⁾, FUKUDA Yui³⁾, SMYTH Christine⁴⁾, FUJINO Yoshinori⁵⁾, and HADA Koji ⁶⁾

Member, Assistant Professor, DPRI, Kyoto University, Ph.D.
 Member, NEWJEC Inc., Dr. Eng.
 NEWJEC Inc., M.S. Eng.
 Researcher, DPRI, Kyoto University, Ph.D.
 NEWJEC Inc.
 NEWJEC Inc., M.S. Eng.

ABSTRACT

We conducted a damage survey of wooden structures and collected very dense ambient noise measurements in the near-source region of 2011 Northern Nagano earthquake. The percentage of totally collapsed buildings exceeded 30% in Aokura and Yokokura districts in Sakae village, Nagano prefecture. The percentage in Mori district, where strong motion was recorded during the mainshock, was less than 10%. We estimated the strong motion in the Aokura and Mori districts from the ambient noise measurements and strong motion records. The estimated strong motion distribution reflects the soil conditions, and varies in that small area. The correlation of estimated strong motion and damage ratio of wooden structures is reasonably high, which indicates the estimated ground motions are realistic. The damage curve obtained from this research shows the collapse ratio exceeds 50% around 150 cm/s of input ground motion.

Key Words: 2011Northern Nagano earthquake, Building damage survey, Wooden structure, Strong motion, Ambient noise, H/V spectrum