

2007年能登半島地震における地震動推定と 建物被害との関係

村田 晶¹・小野寺大²・宮島昌克³・池本敏和⁴

¹金沢大学理工研究域環境デザイン学系 助教
(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:murata@t.kanazawa-u.ac.jp

²愛知県建設部(前金沢大学大学院自然科学研究科 大学院生)
(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:onodera@pbousa9.ce.t.kanazawa-u.ac.jp

³金沢大学理工研究域環境デザイン学系 教授
(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

³金沢大学理工研究域環境デザイン学系 助教
(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:tikemoto@t.kanazawa-u.ac.jp

建物の地震被害に大きな影響を与える要素として、地震動特性については、近年飛躍的に発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。しかし、能登半島地震のように地方では震度情報しか得られない事例も見られ、被害を推定するためにはより正確な地震動の推定が求められる。そこで本研究では、このように情報の少ない地区で地震動を推定するために、周辺の地震記録と常時微動観測を用いた地震動波形の推定を行うことで、建物被害との関係について検討を行う。その結果、推定した地震動と建物被害との関係を地震動の強さだけでなく地震動と建物の共振による被害について考察した。

Key Words : 2007 Noto Peninsula earthquake, Estimation of earthquake motions,
Microtremour obserbations, Wooden structural damages

1. はじめに

石川県輪島市西南西沖30kmの日本海を震源に2007年能登半島地震が発生した。震源の深さは約11km、地震の規模を示すマグニチュードはM6.9であった。本震では、石川県の七尾市、輪島市、穴水町で震度6強(計測震度の最大地点:輪島市門前町走出6.4)を観測し、県内全域で震度4以上を観測したほか、北海道南部から中国・四国地方まで広範囲で揺れが感じられた。震源を中心に道路崩落や土砂崩れ、また、電気・ガス・水道などのライフライン被害が発生したが、特に住宅被害は石川県で全壊684棟、半壊1,732棟、一部破損26,901棟を数えた。

建物の地震被害に大きな影響を与える要素として、対象地区の建物耐力、地盤動特性および地震動特性が挙げられるが、地震動特性については、近年、飛躍的に発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。しかしながら、今回の能登半島地震では建物に甚大な被害が生じた輪島市門前町で得られた本震記録が、走出地区の門前総合支所の震度計による情報(計測震度6.4, 3成分合成最大加速度1303.8gal)しか得られず、この地区の地震動特性には不明な部分が多い。他の被害地区についても、輪島市のように近接した観測点で地震動特性がかなり異なる事例も見られ、被害を推定するためにはより正確な地震動の推定が求められる。建物被害との関係については新井ら¹⁾が輪島市門前町走出地区と道下地区において、墓石の転倒率調査等から最大地動速度の分布を推定し、被害調査および微動観測調査結果に基づく地震応答解析から、建物被害の要因を分析している。しかしながら、この研究ではそれ以外の地区における被害要因の分析がされていないこと、地震動の振動数特性による影響等を考察していない。

そこで本研究では、このように情報の少ない地区で地震動を推定するために、周辺の地震記録と常時微動観測を用いた地震動波形の推定を行うことで、建物被害との関係について検討を行う。

2. 能登半島地震による建物被害

能登半島地震の建物被害の特徴を述べるために、建物被害が多かった輪島市門前町、輪島市、穴水町における現地悉皆調査で得られたデータを用いて地区ごとの被害レベルの分布図を作成する。建物としての被害はレベル別に以下（D0～D6）のように分ける。ここで、各レベルの被害定義については以下の通りとする。D0：無被害、D1：一部破損（壁面の亀裂、外装材の若干の剥離）、D2：一部破損（屋根瓦、壁面のモルタル等の大幅な剥離）、D3：半壊（柱、梁の一部が破壊されたもの）、D4：全壊（柱、梁が破壊され、内部空間が欠損する）、D5：全壊（破壊がかなり及ぶもの、あるいは瓦礫化したもの）、D6：倒壊。

さらに、地震動特性、地盤動特性と比較検討しやすいようにD0～D2を薄い黄色、D3を橙色、D4、D5～D6を赤色で着色する。以上により地区ごとに作成した被害分布図を図1から図5にそれぞれ示す。

図1に示すように輪島市門前町黒島地区は、全棟数288棟、うち全壊23%、半壊15%、無被害・一部破損62%である。北部に全壊、半壊が多く、南部には無被害・一部破損が多く、北部と南部に被害の違いが見られる。図2に示すように輪島市門前町道下地区は、全棟数413棟、うち全壊32%、半壊27%、無被害・一部破損41%である。全壊が3割を超えており、地区全体に分布していることがわかる。図3に示すように輪島市門前町走出地区は、全棟数463棟、うち全壊23%、半壊22%、無被害・一部破損55%である。八ヶ川の南部の住宅密集地帯に全壊や半壊が多いことがわかる。しかし、八ヶ川の北部は棟数が少ないものの、被害をあまり受けていないことがわかる。図4に示すように輪島市中心部は、全棟数686棟、うち全壊4%、半壊7%、無被害・一部破損89%である。西部の一部の半壊が見られるが、地区全体ではほとんど被害を受けていないことがわかる。図5に示すように穴水町中心部は、全棟数299棟、うち全壊8%、半壊8%、無被害・一部破損84%である。この地区の中心部に全壊、半壊が見られるが、北部と南部は被害をあまり受けていないことがわかる。

以上より全地区を見ると全壊、半壊した建物の多数は非常に古い木造家屋であったことから、古い耐震設計基準で建築されたことによる耐震性の欠如や建物の老朽化・腐朽化による耐震性の低下が大きく関わっていると考えられる。しかしながら、同様な建物形態であるにもかかわらず健全である建物が存在していることや、地区内で被害の集中している所もあることから、地震動の大きさや震動特性の違いにより被害差が生じていると考えられるため、以下

に能登半島地震の地震動推定と被害との関係を考察する。

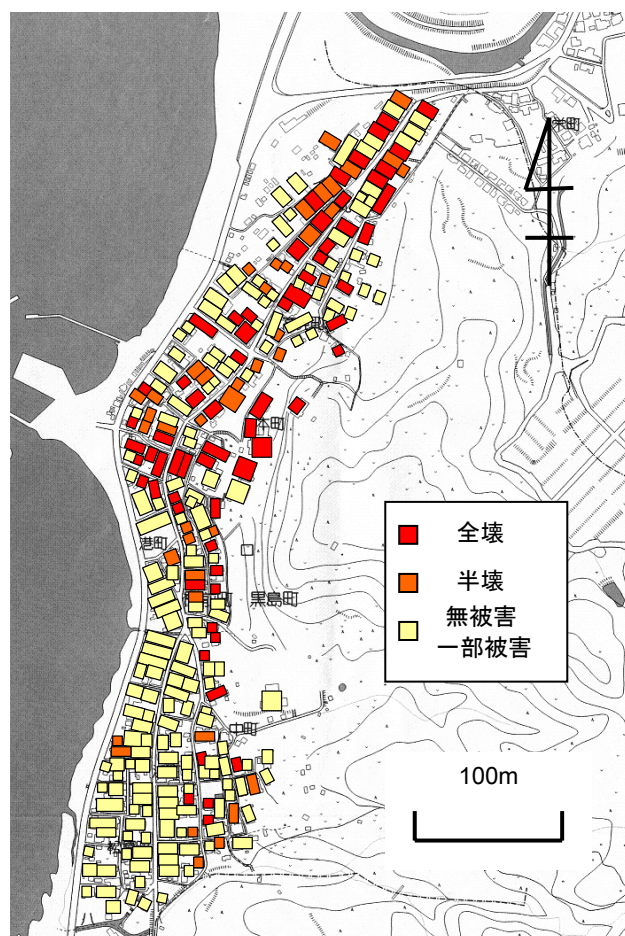


図1 黒島地区の建物被害分布

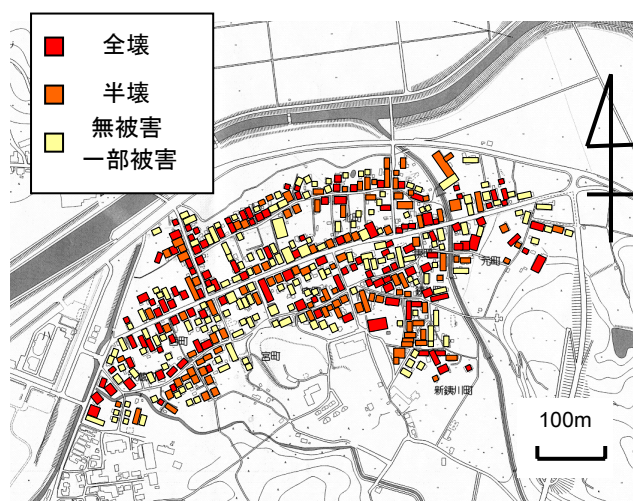


図2 道下地区の建物被害分布

3. 常時微動観測を用いた能登半島地震の地震動推定

地震動を推定する方法は、直接地震動観測により空間変動を把握する方法が考案されているが、この方法では地震の発生頻度が低いので効率が悪い。そのため、地表での地震観測記録から計算した工学基盤での地震動を補間し、対象地点での基盤から地表までの地盤増幅率を考慮して、地表の地震動を推定する方法が考案されている。しかし、この方法では基盤から地表の地震動を推定するときにボーリングデータなどの地盤情報が必要であり、多くの場所で地盤情報が未知であるかあるいはボーリング調査自体に困難が伴うためどこでも適用できるとは限らないという問題がある。

そこで本研究では大町²⁾や大熊³⁾、丸山⁴⁾による手法と類似した、能登半島地震の被害地域を対象とした常時微動観測を用いて地震動推定を行う。地震動推定の手法としては、鶴来⁵⁾による地震観測が実施されているA地点の観測記録とその地点での常時微動観測の結果、ならびに地震観測が実施されていない任意のB地点における常時微動観測の結果よりB地点の地震動を推定する方法を採用する。その方法については以下に説明する。

両地点における地震動のフーリエスペクトルは下記のように示される。

A地点における地震動のフーリエスペクトル

$$O_A(f) = S_A(f) \times P_A(f) \times G_A(f) \quad (1)$$

B地点における地震動のフーリエスペクトル

$$O_B(f) = S_B(f) \times P_B(f) \times G_B(f) \quad (2)$$

ここで、 $S_A(f)$ 、 $S_B(f)$ ：地点AおよびBに及ぼす震源特性、 $P_A(f)$ 、 $P_B(f)$ ：地点AおよびBまでの伝播経路特性、 $G_A(f)$ 、 $G_B(f)$ ：地点AおよびBにおけるサイト増幅特性、である。震源特性は同一と仮定できることから $S_A(f) = S_B(f)$ とする。よって両地点のフーリエスペクトル比は、

$$\frac{O_B(f)}{O_A(f)} = \frac{P_B(f)}{P_A(f)} \times \frac{G_B(f)}{G_A(f)} \quad (3)$$

と表すことができる。以上より、B地点における地震動のフーリエスペクトルは、

$$O_B(f) = \frac{P_B(f)}{P_A(f)} \times \frac{G_B(f)}{G_A(f)} \times O_A(f) \quad (4)$$

で定義される。

また、伝播経路特性 $P(f)$ は次式で示される。

$$P(f) = \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{Q(f) V_s}\right) \quad (5)$$

X は震央距離、 $Q(f)$ は伝播経路における Q 値で、西川⁶⁾により求められた能登地方の値として $Q(f) = 167.1f^{0.70}$ を用いる。 V_s は伝播経路におけるせん断波速度であり、K-NET輪島、K-NET穴水それぞれ震央距離とS波の到達時間より算出し、平均したものを用いる。

次に、サイト増幅特性 $G(f)$ の比はA地点とB地点

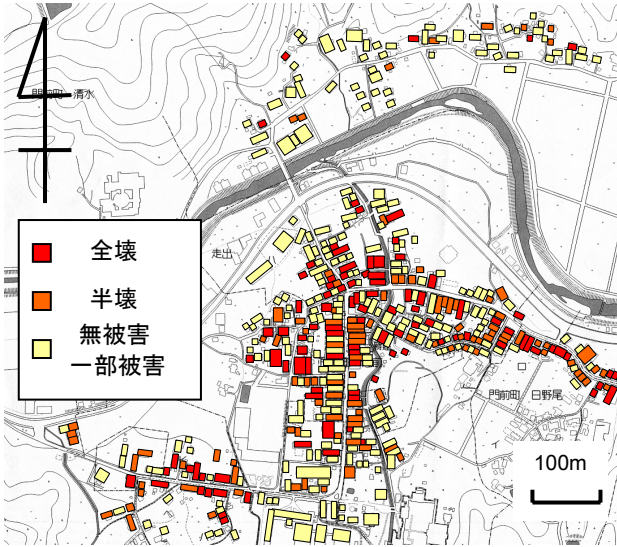


図3 走出地区の建物被害分布

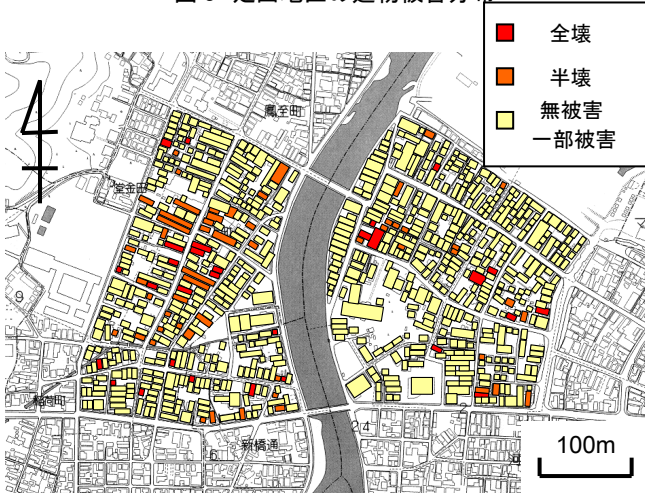


図4 輪島市中心部の建物被害分布

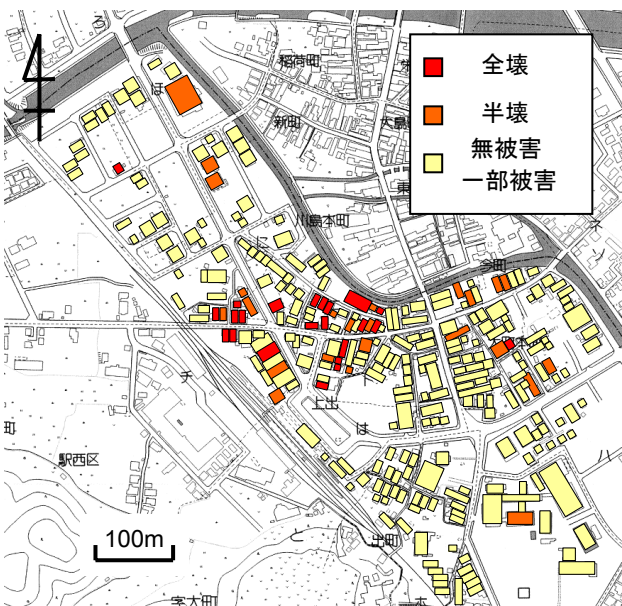


図5 穴水町中心部の建物被害分布

の常時微動の H/V スペクトル比の比で近似できる。
すなわち、

$$\frac{G_B(f)}{G_A(f)} = \frac{\frac{H_B(f)}{V_B(f)}}{\frac{H_A(f)}{V_A(f)}} \quad (6)$$

で求められる。ここで、 $H_A(f)$ 、 $H_B(f)$ はA地点およびB地点における常時微動の水平動のスペクトル、 $V_A(f)$ 、 $V_B(f)$ はA地点およびB地点における常時微動の上下動のスペクトルである。

以上のように、式 (5) と式 (6) による伝播経路特性とサイト増幅特性を求めたものを式 (4) に代入することで任意のB地点における地震動のフーリエスペクトルが算出され、その値をフーリエ逆変換することにより加速度が算出される。

ここで一例としてK-NET穴水における推定結果の精度を確認する。図6の波形の比較では、推定にはK-NET輪島における観測記録の位相を利用しているため、振幅の包絡形状が違う面も見られるが、特にEW成分は、かなりの精度で推定ができていることがわかる。また、NS成分は、振幅形状は若干異なるが最大加速度値はほぼ一致していることがわかる。次に図7のスペクトルの比較では、EW成分とNS成分ともに概ね調和的な傾向が見られるものの、推定結果の卓越周期より観測記録の卓越周期が長周期側にある。これは地盤非線形化の影響によるものと考えられる。また、EW成分とNS成分ともに、推定結果のスペクトル値がやや大きくなっている。これは本手法が線形計算によって推定しているためである。しかしながら、振幅形状はほぼ一致していることがわかる。さらに最大加速度ならびに計測震度を比較すると、最大加速度は2成分合成で実測値902cm/s²に対して推定値914 cm/s²、計測震度は実測値6.2に対し推定値6.3とほぼ同じ値となっている。以上より、簡易的な手法ではあるものの概ね妥当な精度を有していることから、4章では推定した地震動と建物被害の関係について考察する。

4. 推定地震動と建物被害との関係

地震動の強さが建物被害にどのような影響を与えたか検討するために、一例として3章で示す方法により算出した計測震度と被害分布を比較する。以下、図8に黒島地区、図9に道下地区、図10に走出地区、図11に輪島市中心部、図12に穴水町中心部における建物被害分布と計測震度分布をそれぞれ示す。

図8に示すように黒島地区では、震源に近かったこともあり震度7と6強の強い地震動が推定されている。また、強い地震動が推定されている地点周辺は全壊が多いことがわかる。地区の北部と南部では震度6弱が推定されている。しかしながら北部では全壊、半壊が多いが、南部ではあまり被害を受けていないことがわかる。この違いは、北部では八ヶ川河口近くの砂が堆積しているやや柔らかい地盤で震動

が推定されている。また、この地点周辺はあまり被害を受けていないことがわかる。以上より、この地区では、地震動の強さと建物被害は相関性があると考え、北部では地震動が強かったことにより、建物被害が生じたと考えられる。

図9に示すように道下地区の建物被害は、全体的に全壊、半壊が分布しているが、計測震度にはばらつきがある。震度7や6強の強い地震動が推定されている地点の被害は地震動の強さと相関性があると考えられ、震度6弱が推定されている右上部の周辺も半壊が多く、相関性があると考えられる。しかし、建物が全壊、半壊にまでいたらないような地震動の強さである震度5強が推定されている地点の周辺でも全壊、半壊が多く見られる。これは建物の耐震性能がもともと高くなかったか地震動と建物の共振の影響によるものと考えられる。

図10に示すように走出地区は、震度7の強い地震動が推定されている地点周辺は全壊が多いことがわかる。震度6強が推定されている地点周辺も概ね全壊、半壊が多いことがわかるが、同じ震度6強が推定されている、八ヶ川より北部の地点周辺はあまり被害を受けていないことがわかる。この地点周辺は微動観測調査などにより、沖積層のあまりない地

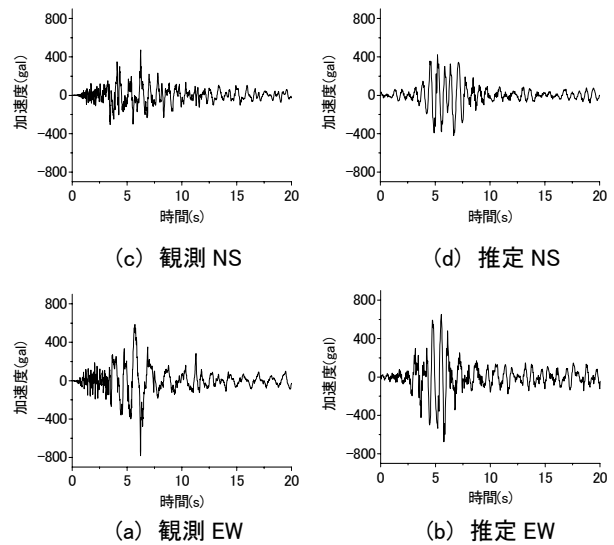


図6 K-NET 穴水における観測地震動と推定地震動の比較

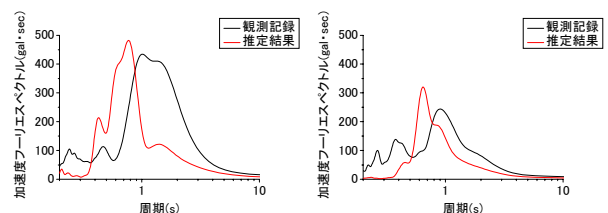


図7 K-NET 穴水における観測地震動と推定地震動のフーリエスペクトルの比較

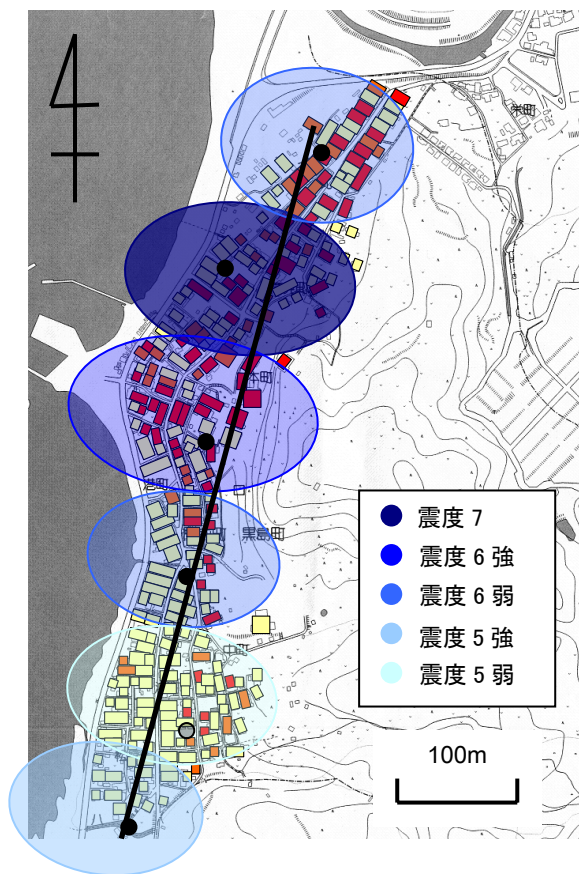


図 8 黒島地区の建物被害分布と推定震度

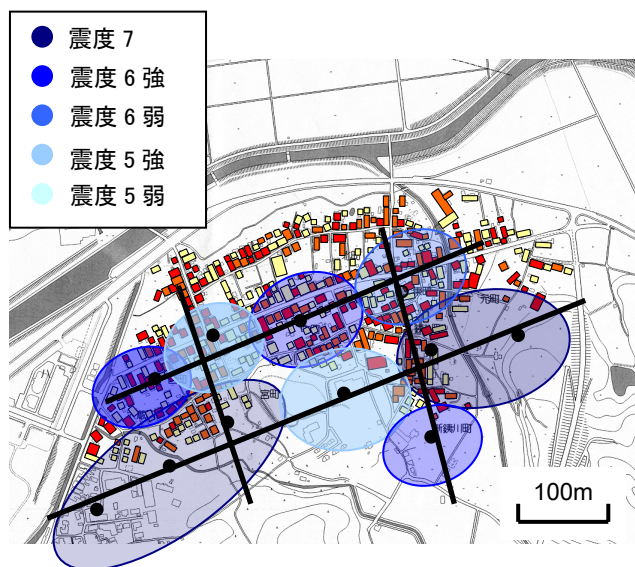


図 9 道下地区の建物被害分布と推定震度

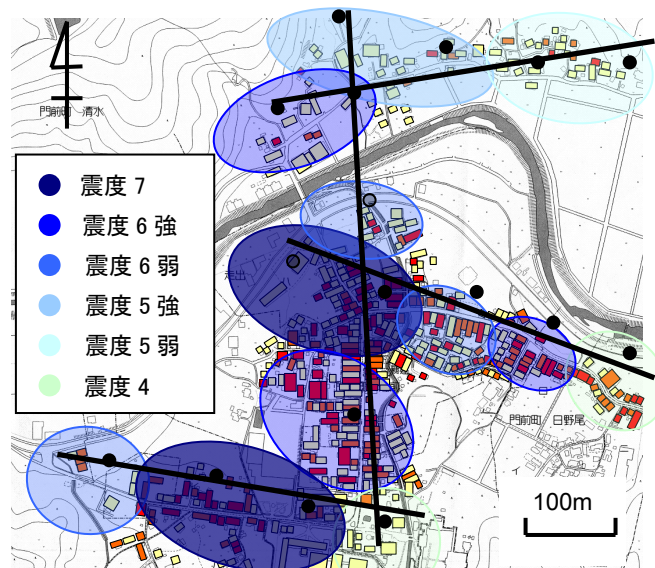


図 10 走出地区の建物被害分布と推定震度

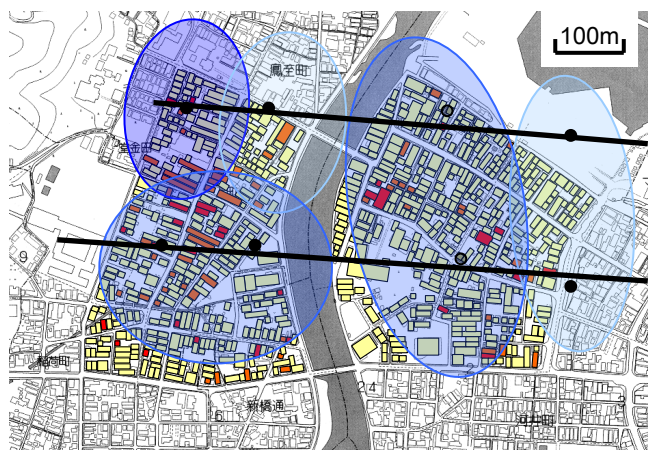


図 11 輪島市中心部の建物被害分布と推定震度

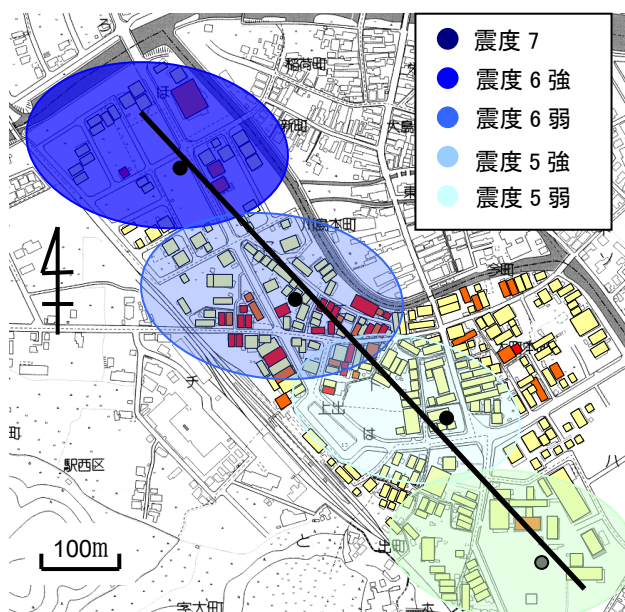


図 12 穴水町中心部の建物被害分布と推定震度

盤であることが分かっている。そのため、地震動の卓越周期が高いと考えられることから、地震動と建物の共振が見られなかったと思われる。震度 5 強, 5 弱, 4 が推定されている地点では、中央横側線右部以外の地点はあまり被害を受けていないことがわかる。中央横側線右部の被害については、旧河道堆積地盤に起因する地震動と建物の共振による影響と考えられる。以上よりこの地区では、地震動の強さと建物被害が一致していない地点はあるが、八ヶ川より北部では建物が全壊、半壊にまでいたらないような地震動の強さが多く推定されていて、実際にあまり被害を受けていない。また、川より南部では建物を全壊、半壊させるような強い地震動が多く推定されていて、実際に被害を受けている建物が多い。地震動の強さと建物被害について相関性があると考え、南部では地震動が強かったことにより、建物被害が生じたと考えられる。

図 11 に示すように輪島市中心部は、全体的にあまり被害をうけていないが、震度 6 強や 6 弱の全壊、半壊が起こりうる強い地震動が推定されていて相関しているとはいえない。よって、この地区では地震動の強さではなく、他の要因で建物被害が生じたと考えられる。

図 12 に示すように穴水町中心部は、北部地点に K-NET 穴水の観測点があり、震度 6 強を観測しているが、この地点周辺では、あまり被害を受けていないことがわかる。これは耐震性能の高い建物が多く見受けられたことから、あまり被害をうけなかったと考えられる。震度 6 弱が推定された地点は全壊が多く、それより南の地点ではそれぞれ震度 5 弱, 4 が推定され、あまり被害を受けていないことがわかる。しかし、この地区では地震時に地盤が非線形化した影響で、計測震度も弱くなると考えられることから、より詳細な検討が必要であると思われる。

5. まとめ

本研究をまとめると以下のようなものである。推定地震動の作成に既存の強震記録と常時微動観測結果を用いることで、簡易的な方法であるにもかかわらず、概ね妥当な地震動を推定できることが明らかとなっ

た。また、推定した地震動と建物被害との関係を検討した結果、被害各地区ともに地震動の強さと建物被害について相関性が見られるが、局所的に地盤特性に起因する建物被害や地震動と建物の共振による被害も見られた。また、輪島市中心部については地震動そのものより建物の脆弱性に起因する被害が選択的に発生したことが明らかとなった。今後は、被災建物に対し詳細解析を行うことで、能登地区のような建物形式に対する被害メカニズムを明らかにする予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、能登半島地震建物悉皆調査データ作成として日本建築学会北陸支部、関東支部、東海支部、近畿支部、日本建築学会災害委員会の各関係者、ならびに本学地震工学研究室の学生諸氏に多大な御支援・協力をいただきました。また、データの集計整理では、情報通信研究機構の柴山明寛先生にご協力いただきました。地震動波形については気象庁、防災科学技術研究所 (K-NET) の記録を使わせていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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, 第 73 巻, 第 624 号, pp.227-234., 2008.2.
- 2) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄 巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.489, I-27, pp. 251-260, 1994.
- 3) 大熊裕輝, 松岡昌志: 宮崎県における常時微動 H/V スペクトル比を用いた地震動の推定, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.261-272, 2002.1.
- 4) 丸山喜久, 山崎文雄: 常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.261-272, 2001.4.
- 5) 鶴来雅人: 2007 年能登半島地震の能登有料道路盛土崩壊現場における地震動推定について, 2008.2.
- 6) 西川隼人: 経験的手法による地震動特性の評価と計測震度予測への適用, 平成 17 年度金沢大学博士学位論文, pp.9-14, 2006.

Estimation of ground earthquake motions on the 2007 Noto Peninsula Earthquake and relationship between wooden structural damages and earthquake motions

Akira MURATA, Hiroshi Onodera, Masakatsu Miyajima and Toshikazu IKEMOTO

The characteristic of an earthquake motion which affects wooden structural damages can acquire much information by a network of seismic stations. However, only seismic intensity information may be acquired in many local regions. In order to evaluate earthquake damages, a more accurate earthquake motion needs to be estimated. In this research, an earthquake motion is estimated by using the earthquake record and microtremors observation of the ground to presume an earthquake motion in the area of such limited information, and considers the relation with wooden structure damage. As a result, not only the relation between the strength of an earthquake motion and damage but the relation between an earthquake motion and the damage by resonance of a structure was clarified by using the estimated earthquake motion.