

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 observations, 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おらず、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、筆者らも加わった現地悉皆調査²⁾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。

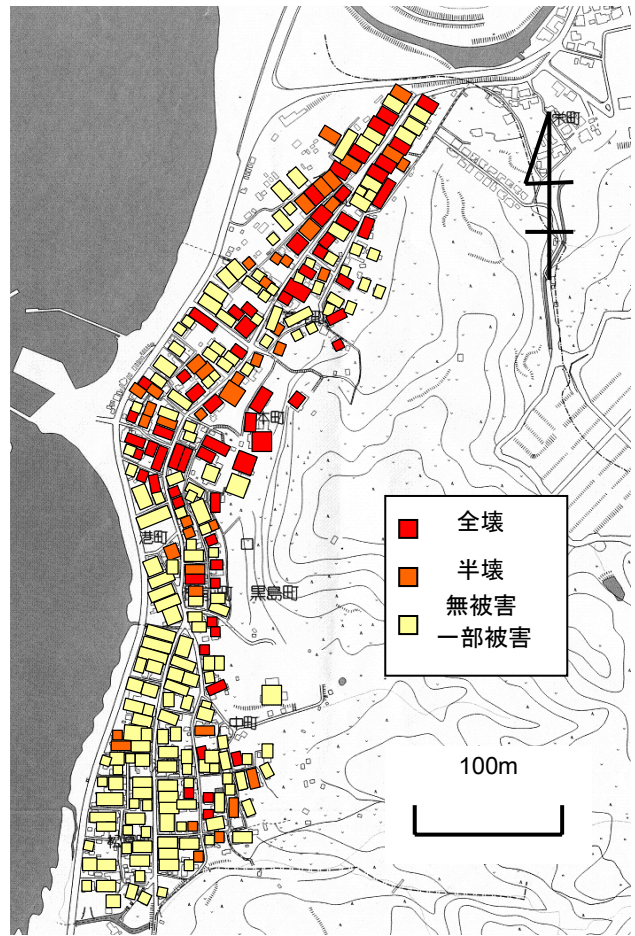


図1 黒島地区の建物被害分布

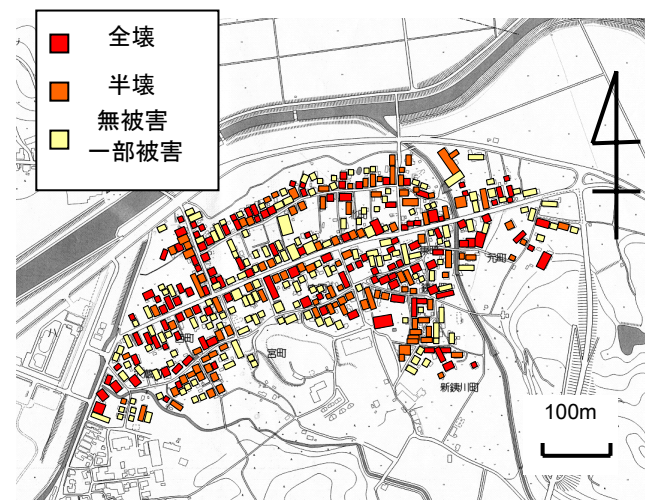


図2 道下地区の建物被害分布

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³⁾や大熊⁴⁾、丸山⁵⁾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。本研究による地震動推定の手法としては、鶴来⁶⁾による手法を採用する。すなわち、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である。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 は震源距離、 $Q(f)$ は伝播経路における Q 値で、西川⁷⁾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、平均したものをを用いる。

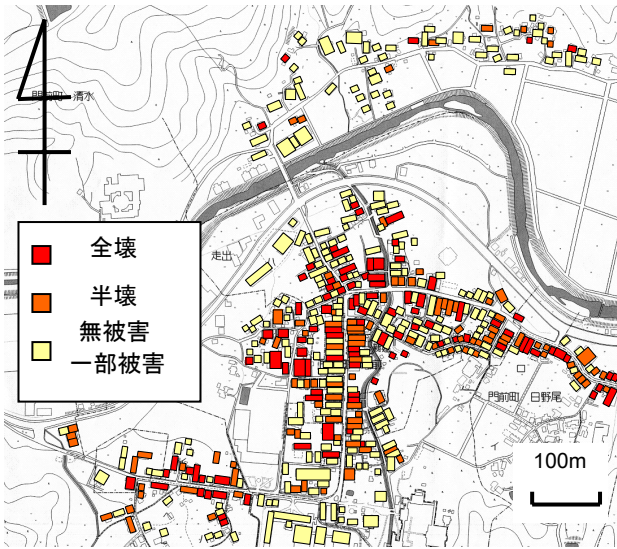


図3 走出地区の建物被害分布

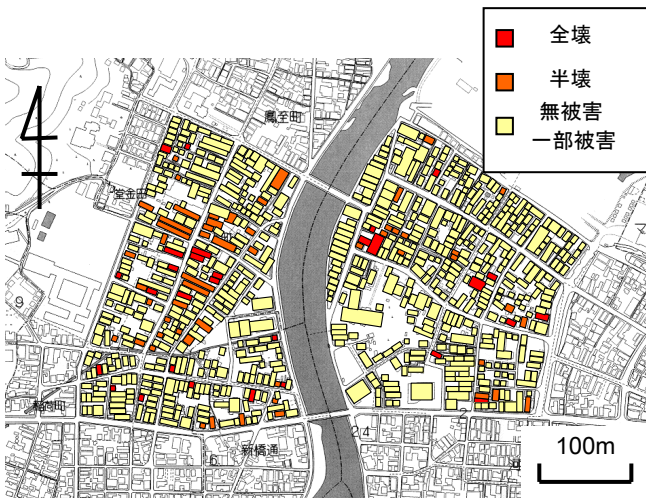


図4 輪島市中心部の建物被害分布

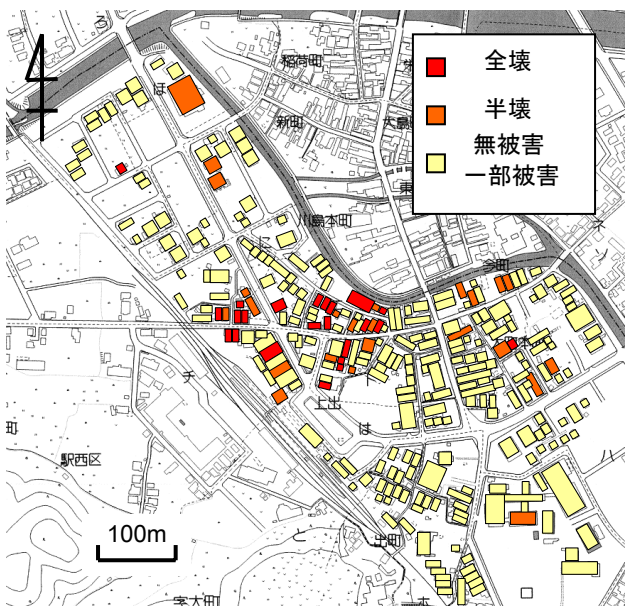


図5 穴水町中心部の建物被害分布

観測点位置と震源の位置的關係については図 6 に示す。

次に、サイト増幅特性 $G(f)$ の比は A 地点と B 地点の常時微動の 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。例として、算出に用いた K-NET 輪島と K-NET 穴水における微動 H/V 比を図 7 に示す。ここで、サイト増幅特性に常時微動 H/V 比の結果を用いていることから、対象となる推定振動数範囲は 0.5Hz~10Hz となるため、本研究ではその範囲で考察を行う。また、常時微動の H/V 比を用いた振幅レベルの補正については、強い相関があると言えない面があることから、本研究では一例として、震源断層から遠くなく、観測点周辺で建物被害が発生している、K-NET 穴水における推定結果の精度から確認する。図 8 に示す加速度波形の比較では、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

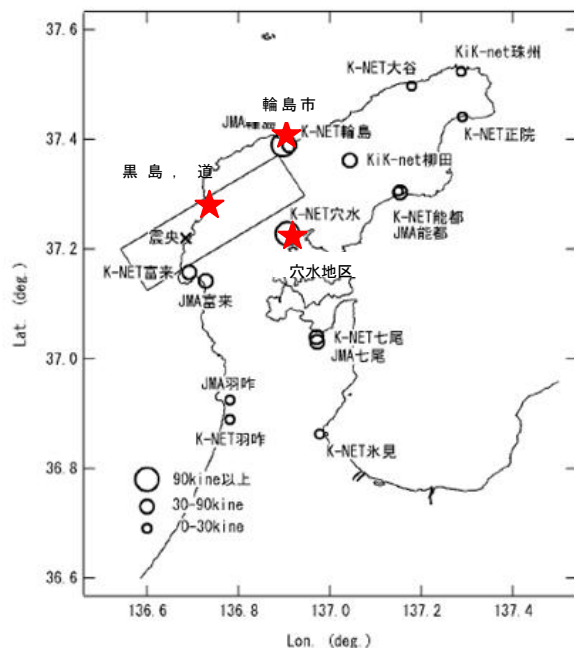


図 6 強震観測点と震源との位置的關係 (文献 8) に加筆

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 9 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

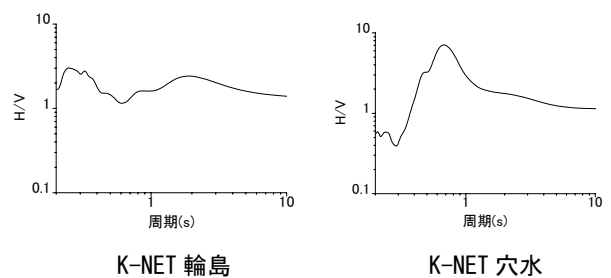


図 7 微動 H/V 観測結果 (Parzen Window 0.4Hz)

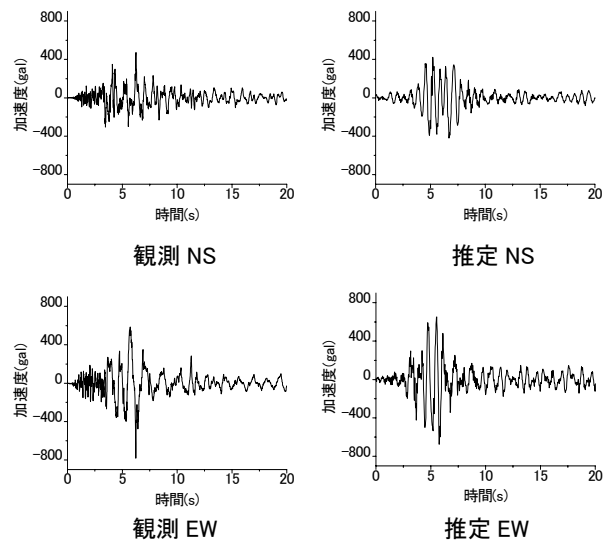


図 8 K-NET 穴水における観測地震動と推定地震動の比較

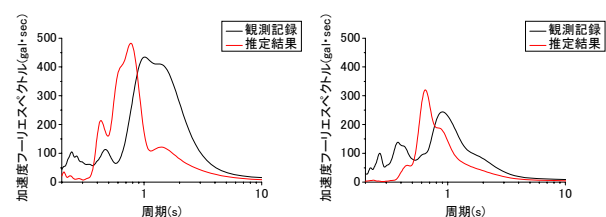


図 9 K-NET 穴水における観測地震動と推定地震動のフーリエスペクトルの比較

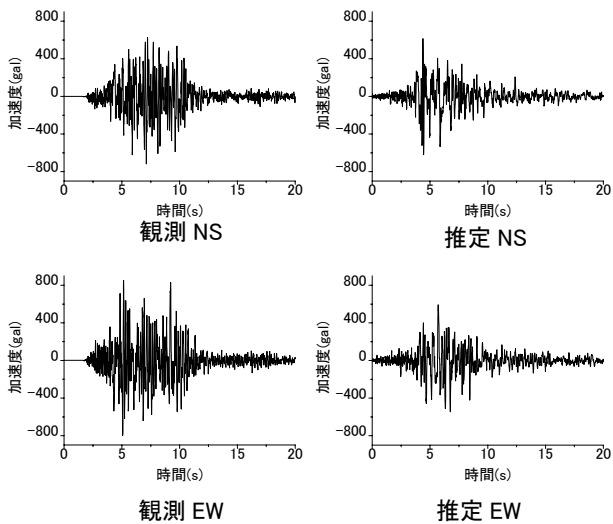


図 10 K-NET 富来における観測地震動と推定地震動の比較

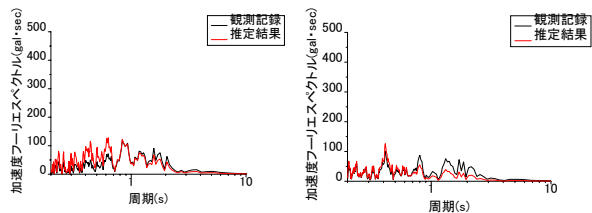


図 11 K-NET 富来における観測地震動と推定地震動のフーリエスペクトルの比較

ると、最大加速度は2成分合成で実測値 902cm/s^2 に対して推定値 914cm/s^2 、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。しかしながら、スペクトルのピークに差が生じている。この原因としてはK-NET穴水観測点特有の地盤非線形性に起因する長周期化が、微動H/Vでは表現できないためであると考えられる。そのため、地盤非線形の起きにくいK-NET富来においても同様な検討を行う。検討結果を図 10、図 11 にそれぞれ示す。図に示すように、K-NET穴水で見られたスペクトルのピークのずれは見られず、良好な一致が見られる。以上より、簡易的な手法ではあるものの、本研究で用いた手法は振動数分布、振幅レベルの推定について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。計測震度の算出に用いた観測記録は K-NET 輪島を用いる。以下、図 12 に黒島地区、図 13 に道下地区、図 14 に走出地区、図 15 に輪島市中心部、図 16 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。ここで図中の黒丸は常時微動観測点を、黒実線は測線をそれぞれ示す。また、計測震度分布は建物被害分布と対応させるため、観測点から半径約 100m の範囲とし、その部分を同一震度としてマーキングする。

図12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では全壊の多いことがわかる。ここで、地区の最北部と中央南部では同じく震度6弱が推定されている。しかしながら、北部では全壊、半壊が多いのに対して、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の影響でやや長周期の震動が増幅している。一方、南部では沖積層が薄く、やや長周期の震動がそれほど増幅されていないために、この地点周辺はあまり被害を受けていないと考えられる。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。また、震動の周期特性が建物被害に影響していると考えられる。

図 13 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

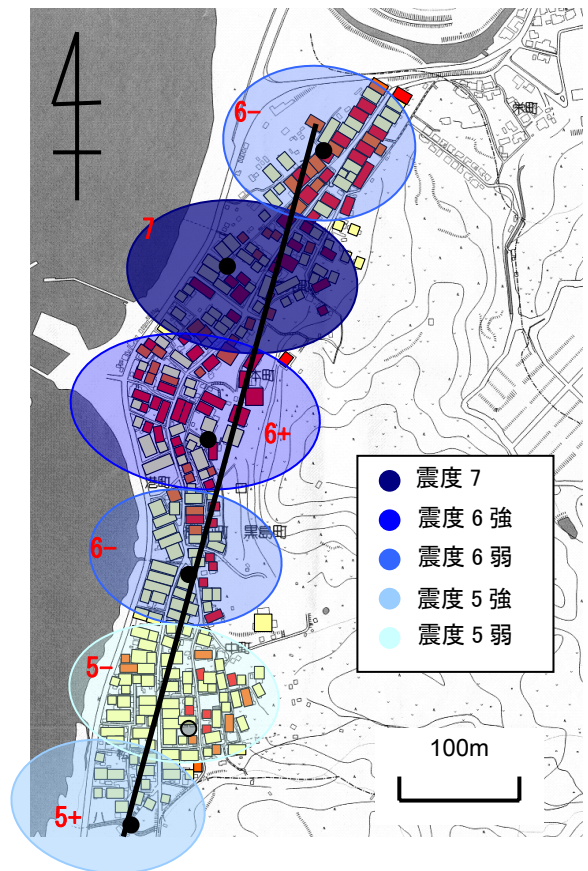


図 12 黒島地区の建物被害分布と推定震度

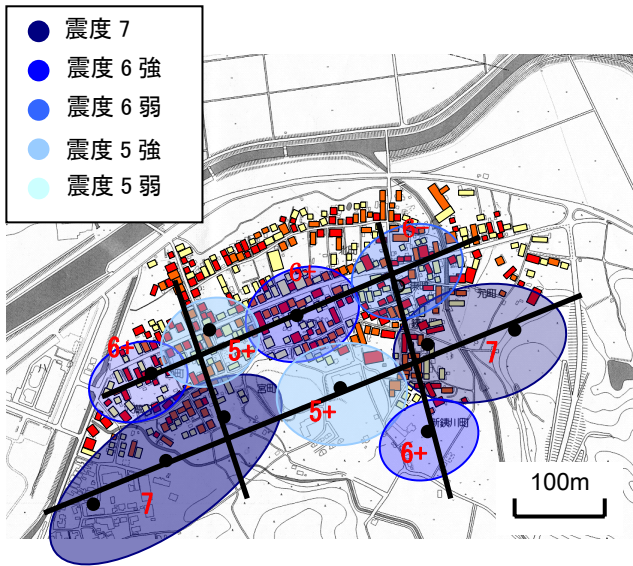


図 13 道下地区の建物被害分布と推定震度

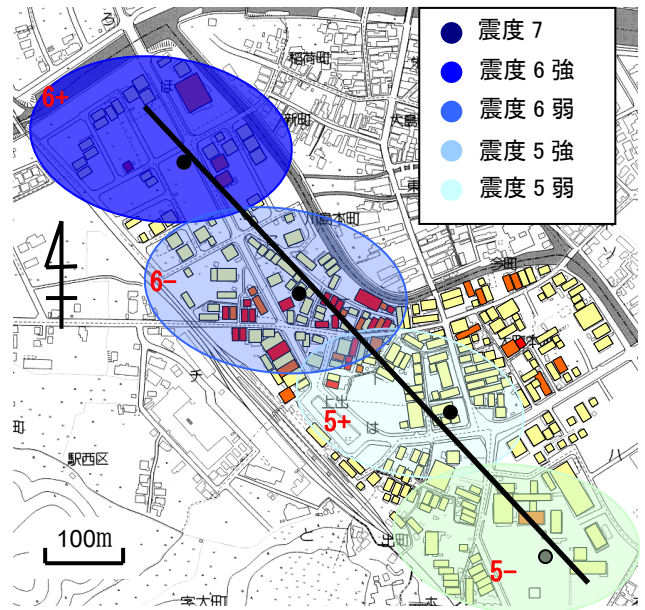


図 16 穴水町中心部の建物被害分布と推定震度

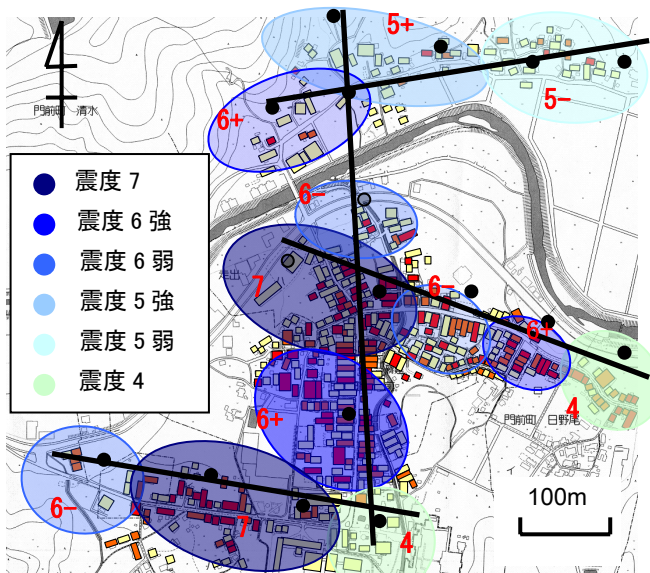


図 14 走出地区の建物被害分布と推定震度

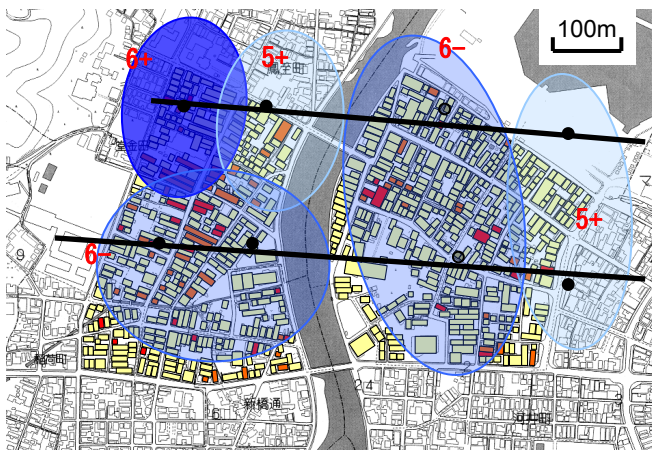


図 15 輪島市中心部の建物被害分布と推定震度

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、地震動の卓越周期と建物固有周期（約 0.4s~1s）が一致したことによる共振の影響が考えられる。

図 14 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 15 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るため、相関が良いとはいえない。微動観測がより稠密に行われることにより、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と関係付けられるのではないかと考えられる。また、他の調査地域と異なり、この地域は輪島塗の工房が家屋と一体となっているところが多く、構造的に若干耐震性の低いものが見られており、そのような構造の弱さが選択的に被害を生じさせているとも考えられる。そのため、この地区では地震動の強さではなく、他の被害要因による再検討が必要と思われる。

図 16 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) 後藤正美, 村田晶, 他: 2007 年 3 月 25 日能登半島地震の災害調査速報, 日本建築学会災害委員会・日本建築学会北陸支部, pp.36-42, 2007.5.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 鶴来雅人, 田居優, 入倉孝次郎, 古和田明: 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震, 第 2 輯, 50, pp.215-227, 1997.
- 7) 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.
- 8) 野津 厚, 西川 隼人: 強震動から見た 2007 年能登半島地震の特徴, 第 35 回地盤震動シンポジウム, pp.13-22, 2008.

(原稿受理2009年6月28日)

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.