

応答スペクトル特性および木造建物振動特性を 考慮した地震被害予測に関する研究

村田 晶¹・宮島昌克²・池本敏和³・榎波智仁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同 教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

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

³同 講師 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

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

⁴福井県土木部 (〒910-8580 福井市大手3-17-1)

現在、地震リスク評価の代表的なものとして、地震ハザードステーションJ-SHIS（以下、J-SHIS）の地震動予測地図がある。現在の地震動予測地図では、地震動を最大加速度、最大速度、あるいは計測震度で表現している。しかしながら、地震動を一つの物理量によって表現することから、スペクトル特性等の本来地震がもつ有用な情報がいくらか欠落し、損傷度評価の精度を犠牲にすることになる。そのため、建物の耐震性能が異なる地域では被害関数の適用が難しい。そこで本研究では、地震動のスペクトル特性および木造建物の振動特性を考慮できる被害予測手法の構築を目的とする。その結果、震源からの距離にかかわらず予測精度の良い手法を提案することができた。

Key Words : *Damage Estimate of Wooden Houses, Earthquake Response Spectrum, Frequency Characteristic of Wooden Houses*

1. はじめに

現在、地震リスク評価の代表的なものとして、地震ハザードステーションJ-SHIS（以下、J-SHIS）の地震動予測地図¹⁾がある。このような地震リスク評価において構造物の被害予測を行う過程は、ある震源を仮定した際の評価地点における地震動の評価と、その地震動を用いた構造物の損傷度評価に分割できる。現在の地震動予測地図では、地震動を最大速度、あるいは計測震度で表現している。これらは予測手法が簡易的であり、被害関数によって建物被害との対応もしやすい。しかしながら、地震動を一つの物理量によって表現することから、本来地震がもつ有用な情報がいくらか欠落し、損傷度評価の精度を犠牲にすることになる。犠牲になる情報には、地震動の周期領域における特性（以下、スペクトル特性）がある。さらに、被害関数は地震動と被害率との経験的な関係を記述しているため、建物の振動における特性（以下、振動特性）が考慮されていない。そ

のため、被害関数を構築するために対象とした地域と建物の耐震性能が異なる地域では、被害関数の適用が難しい。

構造物の損傷度評価に関しては、経験的手法と地震応答解析による手法とに大別できる。一般的に、経験的手法としては、地震動と建物被害率の関係を記述した関数（以下、被害関数）による被害予測が行われる。経験的手法には、地震動が予測できていれば被害が簡易的に求まるという利点があるが、以下のような問題点が考えられる。

まず被害関数の既往研究の多くは、地震被害データを用いて回帰分析した結果から、最大速度や計測震度などの地震動と関係付けられる被害関数を構築する。建物の耐震性能分布は気候・風土等の関連により地域により異なっていると示唆されることから、その構築に用いたデータと異なる地域へ適用するには注意を要し、建物の耐震性能の分布が著しく異なる場合には、これを考慮する何らかの工夫が必要である。また、その問題を解消するために、特定の地

域を対象にした被害関数を構築しようとしても、そこに十分な量の地震被害データがなければ精度のよい被害関数の構築は難しい。これに対して、地震応答解析による被害予測手法は、対象地域の建物の振動特性を表すパラメタの情報が必要であるが、想定される地震動が与えられれば建物の損傷度は応答計算によって求まる。そのため、地震被害データが十分にない地域では、地震応答解析による被害予測手法が適しているといえる。

次に、現在の地震動予測地図や一般的な地震被害関数^{たとえば2)}には、最大速度、あるいは計測震度が地震力として用いられているが、これらは周期の関数ではない。また、被害関数は地震力と被害率との関係を経験的に示しているに過ぎないので、建物の振動特性が考慮されているわけではない。そのため、現在の経験的手法による被害予測では、地震動のスペクトル特性、および建物の振動特性を考慮できない。この問題を解消するために、境ら³⁾は、建物の塑性化による固有周期の伸びを考慮した特定の周期帯の平均応答スペクトルを被害関数構築の際の地震動とすることを提案している。この研究では過去の地震被害データから、日本の建物の地震による被害率は周期1.0秒から1.5秒までの弾性速度応答スペクトルの平均値と高い相関をもつことが示されている。ただし同時に、建物には地域的な構造の違いがあるため、被害率と相関が高くなる周期帯は地域によって変動する可能性がある^{と示唆している}。実際に、西川ら⁴⁾は2007年能登半島地震の被災地区を対象として、自治体で観測された最大加速度と計測震度から平均応答スペクトルを推定し、周期0.7秒から1.2秒の弾性速度応答スペクトルの平均値と木造建物の被害率とが高い相関を示すことを確認している。塑性化による固有周期の伸びは、等価線形化法によって説明できる。このことから、笠井ら⁹⁾は等価線形化法の考えを取り入れ、等価応答スペクトルを用いた最大応答値予測の理論的背景と精度について論じている。これは、建物を1質点弾塑性構造においた簡易的な最大応答変位の予測法であり、必要となる建物の振動特性のパラメタも比較的少なく済む。以上まで述べた2つの理由より、地震による被害データが少ない地域では地震応答解析による被害予測手法が適しているといえ、また、等価線形化法を用いることによって、木造建物の少ない情報で振動特性を考慮して最大応答値を求めることができる。本手法では、等価線形化法を用いて、木造建物の振動特性を考慮した地震応答解析を行い、損傷度の評価を行う。

2. 加速度応答スペクトルの予測手法について

地震動の支配要因には震源特性と伝播経路特性および地盤の増幅特性があるといわれている。このことから、加速度応答スペクトルに対して以下の関係式が成り立つ。

$$S_a(T) = F \{O(T), P(T)\} \cdot G(T) \quad \dots (1)$$

ここで T は地震動の周期 (s) , $S_a(T)$ は地表の加速度応答スペクトル(本手法では減衰定数0.05とし、単位は cm/s^2)、 $O(T)$ は震源特性、 $P(T)$ は伝播経路特性、 $G(T)$ は地盤の増幅特性である。本手法では、地震動のスペクトル特性を考慮するために、地表面における加速度応答スペクトルを予測する。その予測には、基盤の加速度応答スペクトルの距離減衰式と、増幅率の経験式を用いる。なお、増幅率においては、周期0.1(s)から1.5(s)までは表層地盤の影響を考慮した経験式、周期1.5(s)以上では深層地盤の影響を考慮した経験式の2つのタイプを用いる。基盤における加速度応答スペクトルとして、内山らの距離減衰式⁵⁾で算定する。ここで、 $G(T)$ は内山、翠川 (2003) によって改良されたNEHRPの方法⁶⁾、およびStevenら⁷⁾の経験式を用いる。なお、計算上必要となる地盤情報などのパラメタは、J-SHISの国土数値情報を用いて算定する。以上によって、本手法では、標準地域メッシュの250mメッシュごとに地表加速度応答スペクトルを予測する。

予測の精度については、2007年能登半島地震を想定した場合の地震動を予測し、地震動の加速度応答スペクトル特性に関して検証を行う。検証で比較に用いる観測値は、被災地区に近いK-NET観測点 (ISK003 (輪島) , ISK006 (富来)) における本震の強震記録から得られるNS, EW方向それぞれの加速度応答スペクトル (減衰定数0.05) の幾何平均値である。なお、同じく被災地区に近いISK005 (穴水) に関しては、強震記録に地盤の塑性化の影響が強く働いていると考えられることから、比較対象から外した。表1、表2には、ISK003, ISK006それぞれの地震動予測に用いるパラメタを示す。なお、表中のVS30、堆積層厚さ Z は、観測点が属する250mメッシュ、または第三次地域区画におけるJ-SHISの国土数値情報から得た値である。また、断層最短距離 X は観測点の位置から算定した断層最短距離である。

予測した加速度応答スペクトルと観測値との比較を図1、図2に示す。図に示すように、予測結果は観測値と一致していない部分も見られるが、木造建物の被害予測を行う上で着目する周期帯である1秒前後では両者はおおむね一致しているといえる。したがって、本研究の想定においては、本手法の地震動予測によって、被災地周辺における地震動のスペクトル特性を観測値に近い形で予測できると考えられる。

3. 木造建物の損傷度評価手法について

本手法における木造建物の損傷度評価では、地震動のスペクトル特性と木造建物の振動特性を考慮するために等価線形化法を用いる。1質点1自由度系とした建物モデルの等価周期 T_{eq} と等価減衰定数 h_{eq} を求め、それらに対応した等価応答スペクトルから塑

表 1 地震動予測に用いるパラメタ

想定地震のパラメタ		値
断層面	上端の緯度	37.19 度
	上端の経度	136.55 度
	上端の深さ	1.2 km
	長さ	21.2 km
	幅	13.9 km
	走向	55 度
	傾斜角	63 度
	すべり角	137 度
モーメントマグニチュード		6.7
震源深さ		11 km

表 2 推定地点の諸元

	ISK003	ISK006
X(km)	17.7	9.4
VS30(m/s)	243.0	401.2
Z(m)	48	702

性領域を考慮した最大応答を計算する。本手法における建物の振動特性とは、個別の木造建物のせん断力-変位関係（以下、復元力特性）と定義する。これに初期減衰定数、等価質量 m 、等価高さ H 、降伏層間変形角 R_y 、降伏せん断力 Q_y を設定する。履歴曲線が描く形状（以下、履歴形状）については剛性低下型バイリニアモデルと仮定する。個別の木造建物は対象地域の代表的な木造建物とし、等価質量および等価高さは代表的な木造建物の値を用いる。初期減衰定数 h_0 は0.05とし、降伏層間変形角は、限界耐力計算法で用いられている1/120を用いる。ここで、等価周期 T_{eq} と等価減衰定数 h_{eq} は以下の式により示し、 T_0 を建物固有周期、 h_0 を初期減衰定数とする。また、 α は2階建て木造建物における限界耐力計算で安全側と考えられる0.2を用いる。

$$T_{eq} = \sqrt{\mu} T_0$$

$$h_{eq} = \alpha \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) + \frac{h_0}{\sqrt{\mu}} \quad \dots (2)$$

ここで建物の振動特性のばらつきを考慮して、降伏せん断力を分布させた建物群モデルを構築する。降伏せん断力に関しては、以下に示す式により定義する。

$$Q_y = 4\pi^2 m \frac{\alpha_y H R_y}{T_0^2} \quad \dots (3)$$

ここで α_y は降伏点剛性低下率である。 α_y は本来、既存木造建物の引き倒し実験や実大振動実験等によって求めなければならないが、被災地区における2階建て木造建物の α_y が求められていないため、本研究

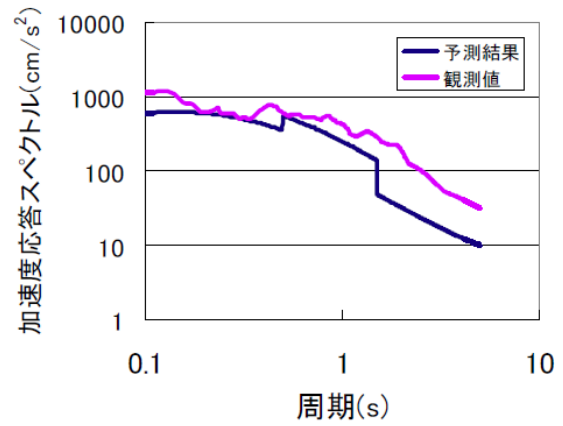


図 1 ISK003（輪島）における予測結果と観測値との比較

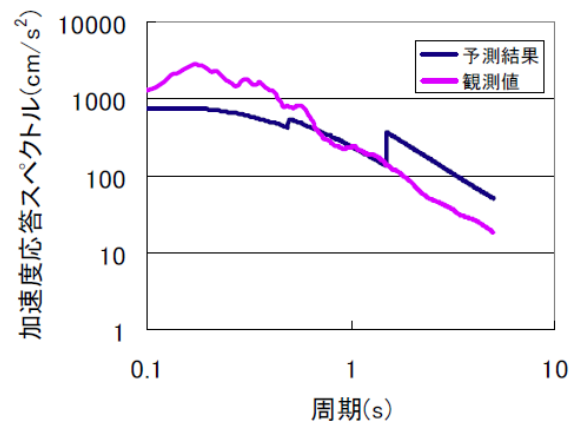


図 2 ISK006（富来）における予測結果と観測値との比較

では α_y を0から0.01刻みで増加させて地震被害予測を行い、実被害を最も精度良く予測できたときの α_y を真値として定義する。

降伏せん断力は固有周期と関係があるため、固有周期のばらつきを確率密度関数として表し、それによって降伏せん断力のばらつきを表す。固有周期のばらつきは、木造建物の築後年と固有周期の関係性を利用する。これは、境ら⁹⁾による日本全国の木造建物を対象とした、木造建物の固有周期を各築後年に対して正規分布でばらつく確率変数として表した関係である。木造建物の築後年のばらつきは、総務省統計局が各市でまとめている木造建物の建築年代別棟数⁹⁾から推定する。2007年能登半島地震では木造建物の被害が顕著で、特に2階建て木造建物の割合が高い¹⁰⁾。そのため、想定例では2階建て木造建物を対象としてモデル化を行う。等価質量、等価高さについては等価質量を30(t)、等価高さを4.2(m)とする。さらに、固有周期のばらつきをモデル化するために、参考文献⁹⁾でまとめられた輪島市の木造建物の建築年代別棟数（平成15年度）から築後年のばらつきを対数正規分布の確率密度関数で近似する。これら築後年と固有周期の関係から、木造建物の固

有周期のばらつきを推定する。推定に用いる輪島市の木造建物棟数データを表3に、推定結果について図3にそれぞれ示す。図に示すように固有周期は0.24(s)をピークとする分布形状となる。

本手法では、想定例のようにして推定した固有周期のばらつきを250mメッシュごとに与え、木造建物の振動特性のばらつきを表す。本手法では等価線形化法に基づき、地表加速度応答スペクトルと建物群モデルから、塑性領域を考慮した各固有周期での応答塑性率、すなわち、応答塑性率の応答スペクトル（以下、応答塑性率スペクトル）を求める。本手法では、250mメッシュごとでの応答塑性率スペクトルから、250mメッシュごとの被害率を算定する。

ここで、被害率を算定する際には破壊基準が必要となる。本手法では、破壊基準として木造建物が大破するときの応答塑性率 μ_{cr} を以下に示す東京都防災会議(1991)式のように定義する。

$$\mu_{cr} = \mu_0 \sqrt{\frac{0.5}{T_0}} \quad \dots (4)$$

また、判定基準となる塑性率 μ_0 については4以上を中破、8以上を大破として定義する。以上より、破壊基準を上回った固有周期の範囲で確率密度の和をとり、それを被害率と定義する。

4. 応答スペクトル特性および木造建物振動特性を考慮した地震被害予測について

本章では、本手法による地震被害予測とその精度について述べる。精度の検証は、2007年能登半島地震を想定した場合の地震被害予測（想定例）から、予測被害率と実被害率とを比較して誤差を見ることによって行う。さらに、既往の被害関数を用いた地震被害予測手法⁶⁾（以下、既往手法）でも同様な想定地震で地震被害予測を行い実被害と比較し、本手法と既往手法の精度を比較する。

最初に、3章で示した方法により実被害率を250mメッシュごとに評価する。実被害は日本建築学会の建物悉皆調査によって2007年能登半島地震の被災地区（門前町黒島（以下、黒島）、門前町道下（以下、道下）、鳳珠郡穴水町（以下、穴水））における実際の被害状況の分布図を用いる。図4～図6に示した被害程度（無被害～倒壊）は岡田らによる方法¹¹⁾で定義され、無被害を被害レベル0～倒壊を被害レベル5とする。この分布図から250mメッシュごとの実被害率を算定する。その際、破壊基準を大破と定義したことから、実被害率を計算するためにカウントする建物は、大破以上を意味するレベル5とレベル4のみとする。なお、250mメッシュを選定して実被害率を計算する際に留意すべき点として次のことが考えられる。想定例では前章で述べた建物群モデルを設定し、それを構成する個別建物を2階建て木造建

表3 輪島市における建築年代別棟数

建築年度	棟数
1960年以前	2,330
1961～1970年	1,010
1971～1980年	1,750
1981～1985年	710
1986～1990年	420
1991～1995年	430
1996～2000年	210
2001年～	100

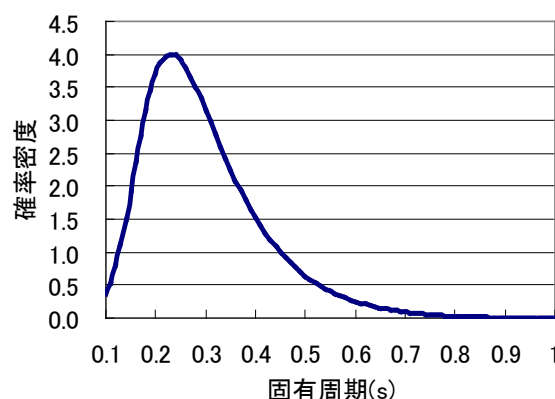


図3 輪島市における木造建物の固有周期分布

物としている。この建物群モデルは石川県輪島市の木造建物すべてを参考に構築したものであり、また、被災地区全体では2階建て木造建物の存在割合が大きいため、予測被害率と比較するために実被害率を求める250mメッシュ内には多くの建物が存在する必要がある。そのため、メッシュ内に建物が密集している250mメッシュのみ対象にして実被害率を算定する。予測精度を検証する指標として、参考文献³⁾と同様に、実被害率と予測被害率の差の絶対値をとり、その平均値（以下、誤差平均）を求める。本研究では誤差平均が0に近い値であるほど、予測精度が良いことを意味する。指標に誤差平均を用いた理由としては、相関係数を用いた場合、実被害率と予測被害率の関係が直線状に並ぶ程度が評価されてしまうが、誤差平均では、実被害率と予測被害率がより近いかの程度を評価することができるためである。また、誤差の割合（（予測被害率－実被害率）÷実被害率）の平均でなく、誤差の絶対値の平均としたのは、誤差の割合を用いると、被害率が小さい250mメッシュの誤差が過大に評価されてしまうためであり、被害率が大きい重要な250mメッシュを重視していることを意味している。例として、実被害率60%を30%と予測する場合と2%を1%と予測する場合とでは、どちらも割合では倍の差だが、前者は誤差30%、後者は誤差1%となり、前者に30倍重

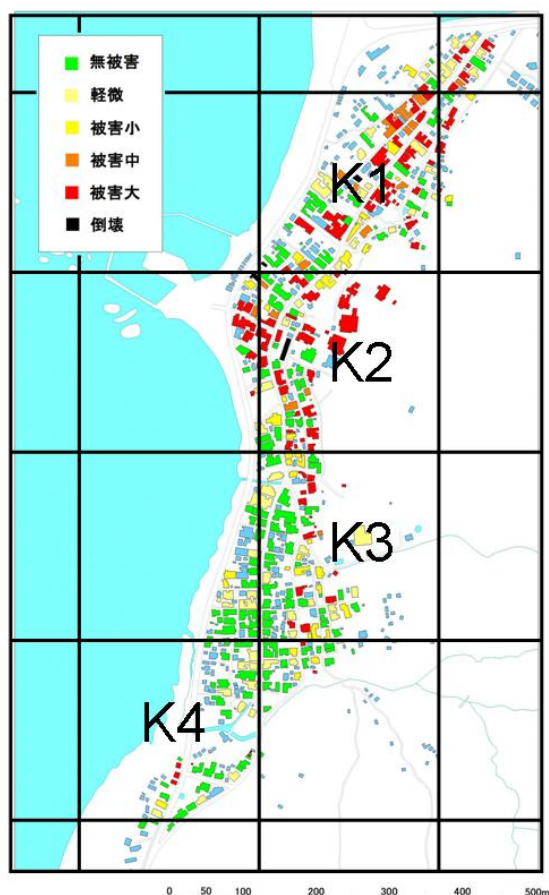


図4 輪島市黒島地区における建物被害分布

きが置かれていることになる。

3章で示した手法により、最も誤差平均が小さくなる時の α_y の値を評価するために、 α_y の値を0から0.01刻みで増やして各パターンで被害予測を行った。その結果、 α_y が0.18のときに最も誤差平均が小さくなり、そのときの誤差平均は約0.10であった。次に、既往手法で2007年能登半島地震を想定したときの地震被害予測を行った。既往手法では、工学的基盤における最大速度の距離減衰式と地盤増幅率の経験式を用いる。距離減衰式のパラメタであるモーメントマグニチュードおよび震源深さは、想定例と同様に2007年能登半島地震のものを用いる。断層最短距離についても、想定例と同様の方法によって250mメッシュごとで求める。また、地盤増幅率の経験式のパラメタであるVS30も、本手法と同様にJ-SHISの国土数値情報を用いる。これによって、2007年能登半島地震を想定したときの250mメッシュごとの地表最大速度が予測できる。既往手法との比較については、構造物の損傷度評価を被害関数によって行う。被害関数は山口・山崎（2000）¹²⁾を用いる。この被

害関数では建築年代区分を考慮した被害率が求まる。そこで、輪島市における木造建物の築後年のばらつきを近似した対数正規分布関数より、各建築年代区分の存在割合を算定する。各250mメッシュにおいて、被害関数から各建築年代区分の被害率を求め、各建築年代区分の存在割合を各建築年代区分の被害率に乗じて、それらの総和をとり全体の予測被害率を求める。両方法による予測被害率と実被害率とを比較した結果を図7、図8に示す。図に示すように、既往手法の誤差平均は約0.23となること、全般的に危険側の予測となることから、本手法の方が精度良く予測できることを明らかにした。特に、実際には被害があった穴水で、既往の方法では被害を0と予測していることから、予測としては問題があるのではないかと考えられる。また、同様に震源から近い黒島地区についても、被害率を過小評価していることがわかり、本手法が震源近傍でも予測可能となる優位性を明らかにした。

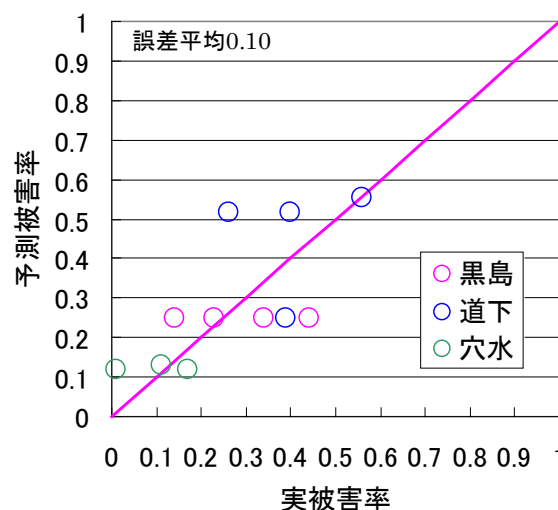


図7 本手法による予測結果

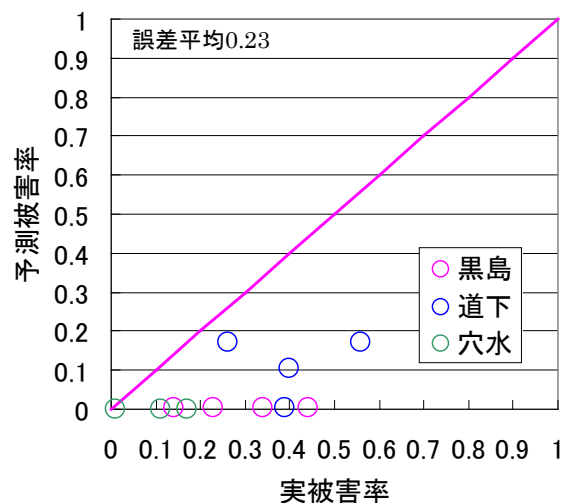


図8 既往手法による予測結果

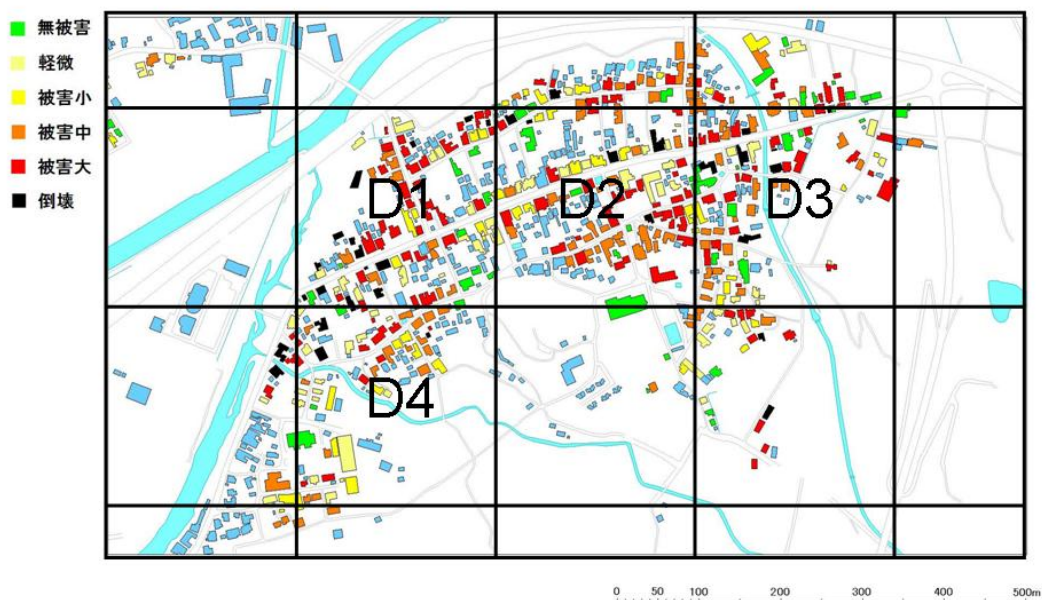


図5 輪島市道下地区における建物被害分布

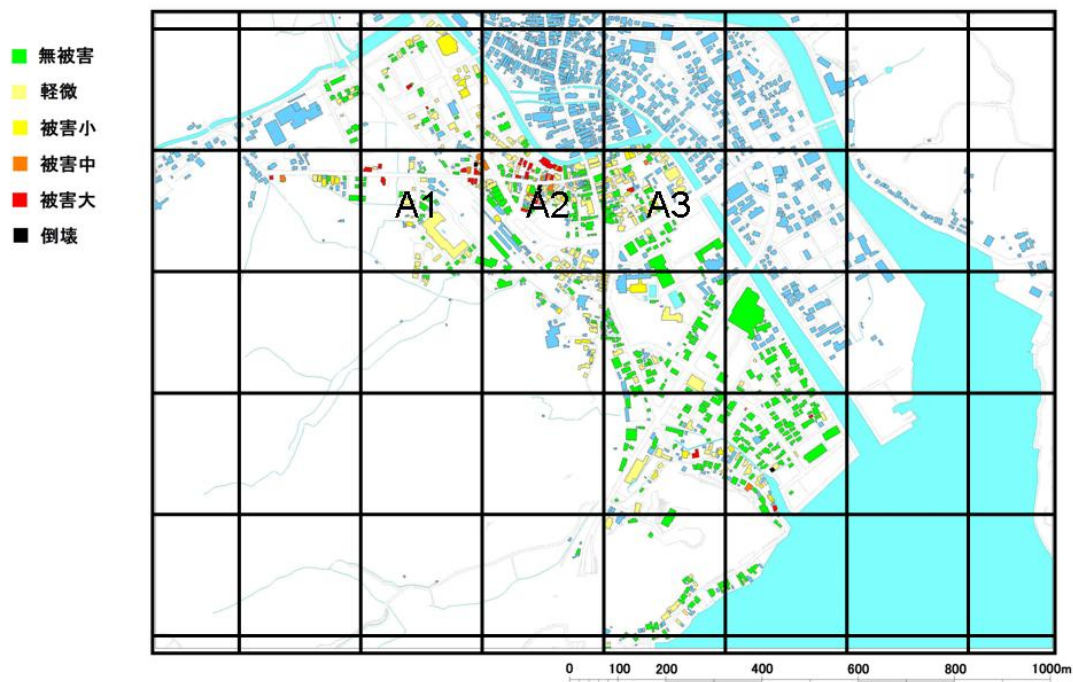


図6 穴水市中心部における建物被害分布

5. まとめ

本論では他に、本手法の精度を検証するために2007年能登半島地震を想定して被害予測を行い、実際の被害と比較検証を行った。予測被害率と実被害率とを比較した結果、本手法で降伏点剛性低下率 $\alpha_y=0.18$ のとき最も予測精度が高くなり、その誤差平均は約0.10であった。既往手法の誤差平均は約0.23であり、本手法の方が倍以上良い精度で被害率を予測できることがわかった。さらに、既往手法では予測できない、震源近傍や震源から離れた地域の被害

率も精度良く予測できることも示された。

謝辞：本研究では、地震ハザードステーションJ-SHISの国土数値情報、K-NETの強震記録、および日本建築学会の建物悉皆調査結果を利用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 地震ハザードステーションJ-SHIS：地震動予測地図，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/#>，2010年現在。
- 2) 内閣府（防災担当）：地震防災マップ作成技術資料，<http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050513siryou.pdf>，

- pp.118-121, 2005年.
- 3) 境有紀, 綾瀬一起, 神野達夫: 建物被害率の推定を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.85-91, 2002年.
- 4) 西川隼人, 宮島昌克: 2007年能登半島地震における自治体観測点を対象とした周期1秒前後の速度応答スペクトルの推定, 日本地震工学会論文集, 第8巻, 第2号, pp.11-21, 2008年.
- 5) 内山泰生, 翠川三郎: 震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第606号, pp.81-88, 2006年.
- 6) 翠川三郎, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の地震動応答スペクトルに見られる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第477号, pp.31-37, 1993年.
- 7) Steven M. Day, Robert Graves, Jacobo Bielak, Douglas Dreger, Shawn Larsen, Kim B. Olsen, Arben Pitarka, and Leonardo Ramirez-Guzman: Model for Basin Effects on Long-Period Response Spectra in Southern California, Earthquake Spectra, Volume 24, No.1, pp.257-277, 2008.
- 8) 境有紀, 飯塚裕暁: 非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした平均的な木造建物群モデルの構築, 日本地震工学論文集, 第9巻, 第1号, pp.32-45, 2009年.
- 9) 総務省統計局: 政府統計の総合窓口,
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/toukeidb/GH07010101Forward.do;jsessionid=Gg3sNQHPV2QWVW7tQ1hky88T3zMwKprC2YXvZBn2vnCC2xYDBSh!67438956!-211486671>, 2010年現在.
- 10) 後藤正美, 大窪建史, 吉江文晴: 能登半島地震における被害調査と耐震性評価, 金沢工業大学学位論文, 2008年.
- 11) 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, 第524号, pp.65-72, 1999年.
- 12) 山口直也, 山崎文雄: 西宮市の被災度調査結果に基づく建物被害関数の構築, 地域安全学会論文集, No.2, pp.129-138, 2000年.

EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATION TO WOODEN HOUSES CONSIDERING THE CHARACTERISIC OF EARTHQUAKE RESPONSE SPECTRA AND THE FREQUENCY CHARACTERISIC OF WOODEN HOUSES

Akira MURATA, Masakatsu MIYAJIMA, Toshikazu IKEMOTO
and Tomohito ENAMI

A seismic hazard maps is one of typical things of earthquake risk assessment. The seismic force is expressed on the ground peak acceleration (PGA), the ground peak velocity (PGV) or the seismic intensity at most all seismic hazard maps. But seismic force is expressed by one physical quantity, accuracy of earthquake damage evaluation is made into a sacrifice in order that some useful information may be missing, especially spectral information. Therefore, it is difficult to apply the damage function in the area where is different earthquake performances of wooden houses. In this study, the damage prediction in which the spectral characteristics of an earthquake motion and oscillation characteristics of wooden houses can be taken into consideration is proposed. As the result, accurate prediction was able to be proposed irrespective of the distance from the epicenter.