

屋根形式を考慮した木造建物被害関数

Fragility Function of Wooden House Considering the Roofing Type

清水 智¹, 小丸 安史¹, 若浦 雅嗣¹, 時実 良典¹, 中村 洋光², 藤原 広行²

Satoshi SHIMIZU¹, Yasushi KOMARU¹, Masatsugu WAKAURA¹,
Yoshinori TOKIZANE¹, Hiromitsu NAKAMURA² and Hiroyuki FUJIWARA²

¹ 応用アール・エム・エス株式会社

OYO RMS Corporation

² 国立研究開発法人防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Most of fragility functions for wooden house have only attributes of structure and built year, though it has been recognized that roof weight is correlated to damage. In this study we tried to improve the prediction accuracy by considering the roofing type and stories. The fragility function was proposed on the basis of the distribution of seismic capacity score, building data and damage data around the observation stations as well as observed records of past earthquakes. As a result, the predicted values of this study can explain the actual damage more accurately than those of Central Disaster Management Council.

Keywords: fragility function, wooden house, roofing type

1. はじめに

建物被害を対象とした地震リスクを把握するためには、建物被害関数が重要である。国・自治体の地震被害想定で用いられている建物被害関数の多くは、建物構造や建築年代区分といった属性しか保有していない。一方、建物重量と壁量の相対的なバランスが建物被害に関係していることは、1995年兵庫県南部地震の調査報告¹⁾から指摘されており、木造建物の耐震診断²⁾にも反映されている。実際、文献²⁾には建物重量の大小を判断する例として、壁面や屋根材の違いが挙げられている。また、建物の被害把握には航空写真を利用した研究³⁾も進んでおり、Google Maps⁴⁾などの航空写真の公開状況を考えると、事前に対象地域の屋根材分布をデータ化することが可能な状況となっている。これらの点を踏まえ、本稿では、被害予測の精度向上を目的とし、建物の屋根形式を考慮できる建物被害関数を構築した。構築した被害関数は、過去の被害地震の観測波形や建物被害調査結果を利用して検証を実施するとともに、近年の地震被害想定で一般的に利用されている中央防災会議⁵⁾の被害関数（以降「中防」と称す。）による予測値との比較も実施した。

2. 被害関数の作成方針

既往研究⁶⁾では地震動と被害率の関係から正規分布または対数正規分布の累積分布関数の形状を利用して被害

関数を作成するものが多い。一方、岡田らの一連の研究⁸⁾⁹⁾では全壊・半壊といった被害の発生が耐震評点と地震動被害の関係で表されるとし、損傷度関数と耐震評点分布から被害関数を作成する手順を提案している。この方法の利点としては、耐震評点と被害の関係を推定できれば、任意の属性区分の耐震評点分布を推定することで、直接被害関数を作成するほど十分な被害データ数が得られていない属性であっても被害関数を作成することが可能な点である。本稿では、岡田らの手法と同様に、設定した属性毎に耐震評点分布を推定し、推定した評点分布・地震動・被害データから損傷度関数を作成した上で、属性毎の被害関数を作成することとした。損傷度関数については、過去の被害地震の観測点周辺の罹災証明に基づく木造建物被害データを収集・整理した上で、これらの建物属性とその被害データおよび観測点の地震動から損傷度関数を推定した。被害は全壊、全半壊、一部損壊以上を対象とした。地震動指標は、最大速度（以下「PGV」と称す）、計測震度、SI値のほか加速度応答スペクトルの周期帯の平均値を対象とした。

3. 耐震評点分布の作成

(1) 評点分布を示す関数形の検討

木造建物の耐震評点のデータとしては、日本木造住宅耐震補強事業者協同組合（以降「木耐協」と称す）の2004年に改訂され2012年まで適用された耐震診断による

耐震評点データ（約22,000棟分）を利用した。中嶋・岡田(2008)⁹では、木耐協の2004年以前の耐震評点データを元に建築年代区分毎の耐震評点分布を対数正規分布で仮定していた。本稿でも同様に評点分布をパラメトリックに表現するが、分布形状を示す関数については実際の評点分布を精度よく表現できることが望ましい。このため、正規分布、対数正規分布、ワイブル分布、それぞれの累積分布関数で回帰式を作成し（式[1]～[3]参照）、最もあてはまりの良い関数形を利用することとした。回帰分析は、建築年代区分別の耐震評点データを用いた場合とデータ全体を用いた場合の両方で実施した。図1には、一例として、データ全体を用いた場合の評点データと評点分布を示す関数の比較を示した。表1には得られた回帰係数とAICを示した。その結果、いずれの場合でもワイブル分布のAICが最も小さく、精度よく評点分布を表現できていることから、以降ではワイブル分布を利用して建物の耐震評点分布を示すこととした。

$$F(x) = \Phi \left[\frac{x-\mu}{\sigma} \right] \quad [1]$$

$$F(x) = \Phi \left[\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right] \quad [2]$$

$$F(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{\eta} \right)^m \right) \quad [3]$$

ここで、 $F(x)$ ：累積分布関数、 x ：耐震評点、 μ 、 σ 、 λ 、 ξ 、 m 、 η ：回帰係数を示す。

表1 評点分布を示す回帰係数とAIC

		-1960年	1961-70年	1971-80年	1981-90年	1991年	-1980年	1981年	全体
Normal	μ	0.389	0.422	0.468	0.567	0.776	0.449	0.662	0.547
	σ	0.274	0.272	0.248	0.270	0.325	0.258	0.321	0.298
Lognormal	λ	-1.296	-1.231	-1.104	-0.874	-0.471	-1.155	-0.724	-0.924
	ξ	0.814	0.760	0.694	0.692	0.721	0.721	0.709	0.761
Weibull	m	1.529	1.613	1.902	2.091	2.174	1.772	2.074	1.817
	η	0.422	0.452	0.500	0.609	0.854	0.481	0.708	0.590
AIC	Normal	8.011	4.984	6.773	9.027	10.092	5.712	12.139	7.571
	Lognormal	-0.227	7.737	9.547	7.989	7.029	9.137	6.133	4.693
	Weibull	-16.868	-26.665	-26.254	-24.516	-35.637	-26.846	-21.196	-33.611

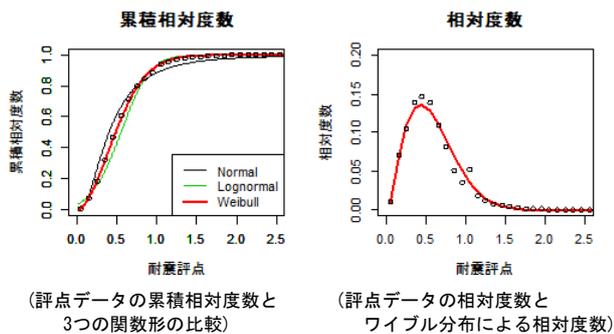


図1 耐震評点データと評点分布を示す関数の関係（データ全体）

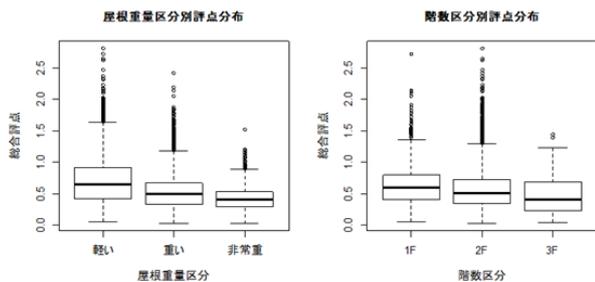


図2 木耐協データによる屋根重量区分・建物階数と耐震評点の関係

(2) 屋根重量区分・建物階数別の耐震評点分布の検討

本項では、(1)項の結果に基づき、様々な属性の耐震評点分布を作成した。木耐協の耐震評点データには、各建物の建物階数（平屋建・2階建・3階建）、屋根形式から推定される屋根重量区分（軽い・重い・非常に重い）、建築年、耐震評点等のデータがある。このうち木耐協の耐震評点データにおける評点と屋根重量区分・建物階数の関係を図2に示した。図2からは、屋根の重量区分が重いとされるほど、建物階数が高くなるほど、評点が小さくなる傾向がみられた。このため、(1)項の建築年代区分に加え、建物階数や屋根の重量区分毎にワイブル分布の累積分布関数を利用して耐震評点分布を作成した。作成した耐震評点分布を示すパラメータを表2に、作成例を図3に示した。

表2 評点分布を示す回帰係数

建築年代	階数	屋根重量区分							
		軽い		重い		非常に重い		区分なし	
		m	η	m	η	m	η	m	η
～1960年	平屋建	4.489	0.665	1.925	0.603	2.139	0.408	1.855	0.558
	2階建	1.555	0.470	1.545	0.368	1.526	0.301	1.522	0.386
	3階建	-	-	-	-	-	-	-	-
	区分無	1.556	0.496	1.563	0.413	1.690	0.329	1.529	0.422
1961～70年	平屋建	2.005	0.756	1.924	0.629	2.178	0.443	1.874	0.608
	2階建	1.569	0.488	1.630	0.414	1.777	0.349	1.615	0.432
	3階建	-	-	-	-	-	-	-	-
	区分無	1.570	0.506	1.590	0.445	1.929	0.361	1.613	0.452
1971～80年	平屋建	1.818	0.819	2.108	0.657	1.910	0.465	1.838	0.648
	2階建	1.886	0.570	1.976	0.479	1.928	0.398	1.919	0.495
	3階建	1.568	0.331	-	-	-	-	1.265	0.255
	区分無	1.845	0.578	1.957	0.489	1.980	0.388	1.902	0.500
1981～90年	平屋建	2.491	0.885	2.539	0.783	3.631	0.480	2.299	0.742
	2階建	2.129	0.729	2.181	0.580	2.079	0.455	2.079	0.611
	3階建	2.386	0.587	2.459	0.289	-	-	1.861	0.466
	区分無	2.154	0.722	2.181	0.580	2.119	0.450	2.091	0.609
1991年～	平屋建	3.117	1.245	2.167	0.998	2.776	0.585	2.334	1.020
	2階建	2.351	0.969	2.238	0.734	2.353	0.507	2.165	0.862
	3階建	1.845	0.579	-	-	-	-	1.863	0.576
	区分無	2.309	0.958	2.262	0.737	2.397	0.512	2.174	0.854
全体	平屋建	1.944	0.852	2.031	0.698	2.061	0.468	1.891	0.674
	2階建	1.809	0.730	1.889	0.535	1.919	0.416	1.784	0.597
	3階建	1.629	0.555	1.327	0.302	-	-	1.461	0.485
	区分無	1.814	0.727	1.887	0.542	1.962	0.412	1.817	0.590
～1980年	平屋建	2.017	0.770	2.001	0.635	1.986	0.447	1.885	0.610
	2階建	1.741	0.538	1.830	0.456	1.867	0.372	1.780	0.471
	3階建	1.644	0.350	1.576	0.150	-	-	1.323	0.267
	区分無	1.716	0.551	1.805	0.473	1.906	0.372	1.772	0.481
1981年～	平屋建	3.642	1.030	2.533	0.879	2.716	0.552	2.137	0.851
	2階建	2.201	0.865	2.176	0.628	2.098	0.466	2.045	0.718
	3階建	1.955	0.587	1.571	0.376	-	-	1.682	0.553
	区分無	2.215	0.856	2.179	0.630	2.126	0.466	2.074	0.708

※表中の「-」はパラメータ推定ができるほどのサンプルが無かった区分を示す。

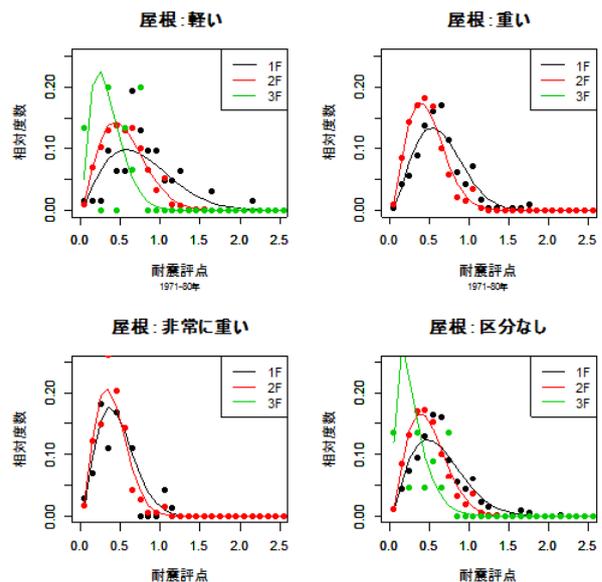


図3 屋根重量区分・建物階数別耐震評点データと評点分布を示す関数（1971～80年築）

4. 損傷度関数の作成

(1) 観測点周辺の木造建物の耐震評点分布の作成

損傷度関数は着目した被災度の被害が発生する建物の上限評点と地震動の関係である。この関係を作成するため、本稿では過去の被害地震の被害調査結果を整理するとともに、表2に示した耐震評点分布を利用し、建築年代区分・建物階数・屋根形式の違いを反映した強震観測点周辺の建物の耐震評点分布を作成した。なお、被災度の定義としては建物構造被害に着目したのではなく、地震被害想定で一般に利用されている罹災証明ベースの被害判定基準とし、それに準じた被害データを収集・整理した。具体的には、①下村ほか(2016)¹⁰⁾の新潟県中越地震・岩手宮城内陸地震の広域的な個別建物の被害データから作成した観測点周辺の被害データ、②西村(2016)¹¹⁾の熊本地震の観測点周辺の被害データ、③翠川ほか(2011)⁷⁾の宮城県北部地震以降の観測点周辺の被害データ、④門馬ほか(2014)¹²⁾の東北地方太平洋沖地震で被害が発生した建物のみ建物属性情報のある被害データと観測点周辺の建物被害調査結果¹³⁾¹⁴⁾を組み合わせ作成した建物被害データ、⑤1995年兵庫県南部地震の被害調査結果¹⁵⁾を利用して作成したJR鷹取の観測点周辺の被害データから1995年兵庫県南部地震以降、2016年熊本地震までの9地震66地点の被害データセットを作成した。なお、①～⑤のデータで作成されるデータで観測点周辺の建物棟数が30棟未満の地点はデータセットから除外した。表3にデータセットの概要を示す。このうち、②の西村(2016)¹¹⁾のデータは岡田・高井(1999)¹⁶⁾のDamage Gradeによる評価であるが、本検討では、岡田・高井(1999)¹⁶⁾の提案に基づき、D4以上を全壊、D3を半壊、D1・D2を一部損壊として被害データを整理した。④については、被害情報は罹災証明による門馬ほか(2014)¹²⁾のデータを利用し、建物属性情報については観測点周辺を網羅的に調査している林ほか(2013)¹³⁾や飯塚ほか(2013)¹⁴⁾のデータを利用して作成した¹⁾。⑤のデータの元となった建設省建築研究所(1996)¹⁵⁾のデータは建物構造に着目した被害調査結果であるが、同データから作成したJR鷹取周辺の「大破率」は翠川・藤本(2002)¹⁷⁾による同地点の罹災証明の「全壊率」とほぼ同じであったことから、データとして利用することとした。

観測点周辺の耐震評点分布は、表2に示した属性区分毎に、評点0.1毎の相対度数として離散的に作成し、観測点周辺の建物に占める割合を重みとして利用して統合することで、観測点周辺の建物全体の耐震評点分布を作成した。建物属性情報に関しては可能な限り詳細な情報を利用することとしたが、不明な属性に関しては表2の「区分なし」欄のパラメータを利用して評点分布を作成した。作成した観測点周辺の評点分布の例を図4に示した。

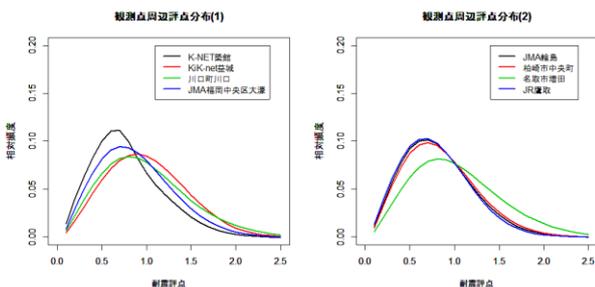


図4 観測点周辺の建物の耐震評点分布の算出例

(2) 損傷度関数の作成

損傷度関数の作成に先立ち、観測点毎の被害率と作成した建物の耐震評点分布から、着目した被害となる上限評点を推定した。具体的には、観測点毎に被害率（全壊率、全半壊率、一部損壊以上率）を算出するとともに、観測点周辺の耐震評点分布を累積分布の形で考えた場合に、被害率が累積相対度数を示す（即ち上限評点以下の評点の建物はすべて被害を受ける）と考え、その際の耐震評点を上限評点とした。表3には推定した各観測点の上限評点を示した。

次に、表3の上限評点と表6に示した各観測点の地震動指標から損傷度関数を作成した。なお、表6のPGV、SIは水平2成分合成の値、加速度応答スペクトルの周期帯平均値は式[4]により算出した値で、式[4]のSaも水平2成分合成の値である。

$$S_a = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} S_a \quad [4]$$

ここで、 S_a ：加速度応答スペクトル(h=5%)の周期帯の平均値[gal]、 T_1 ：周期帯の下限値[s]、 T_2 ：周期帯の上限値[s]を示す。 T_1 および T_2 の値は、境ほか(2004)¹⁸⁾を参考に「全壊」「全半壊」「一部損壊以上」の各被害と相関が高いと考えられた周期を含んだ表5に示す8個の値とした。

表3 対象とした各観測点の被害データ概要と上限評点

No	地名名 (内は発生年)	観測点名	建物 情報 ヘル	建物 データ の 出典	被害率			上限評点			
					一部 損壊 以上	全半壊	全壊	一部 損壊 以上	全半壊	全壊	
1	岩手宮城内陸(2008)	K-NET長岡	5	①	211	0.0047	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	新潟県中越(2004)	K-NET長岡	4	①	166	0.0241	0.0241	0.0000	0.0520	0.0520	0.0000
3	新潟県中越(2004)	JR長岡駅	4	①	30	0.3687	0.1333	0.0000	0.2728	0.1312	0.0000
4	新潟県中越(2004)	JR新長岡変電所	4	①	59	0.2373	0.0000	0.0000	0.2375	0.0000	0.0000
5	新潟県中越(2004)	川口町川口	3	①	47	0.6809	0.5319	0.2340	0.7091	0.5646	0.3171
6	新潟県中越(2004)	K-NET小千谷	3	①	56	0.1984	0.1984	0.0000	0.2207	0.2207	0.0000
7	新潟県中越(2004)	JMA小千谷	3	①	136	0.9853	0.2059	0.0784	1.2730	0.2612	0.1473
8	新潟県中越(2004)	十日町市千歳町	2	③	65	0.3846	0.1846	0.0154	0.3873	0.2396	0.0579
9	新潟県中越(2004)	新潟川西町水口沢	2	③	117	0.7436	0.0171	0.0000	0.6367	0.0546	0.0000
10	新潟県中越(2004)	新潟中野村田沢	2	③	148	0.4122	0.0135	0.0000	0.4034	0.0531	0.0000
11	新潟県中越(2004)	見附市昭和町	2	③	129	0.4419	0.0000	0.0000	0.4193	0.0000	0.0000
12	新潟県中越(2004)	栃尾市大町	2	③	103	0.2852	0.0097	0.0097	0.7329	0.0397	0.0397
13	新潟県中越(2004)	新潟三島町上野井	2	③	78	0.6923	0.0128	0.0000	0.7156	0.0673	0.0000
14	新潟県中越(2004)	堀之内町堀之内	2	③	111	0.7477	0.0991	0.0000	0.6666	0.1568	0.0000
15	新潟県中越(2004)	守門村須原	2	③	31	0.6452	0.0000	0.0000	0.6008	0.0000	0.0000
16	新潟県中越(2004)	広神村今泉	2	③	33	0.4848	0.0000	0.0000	0.4445	0.0000	0.0000
17	新潟県中越(2004)	入込瀬村六沢	2	③	65	0.1846	0.0154	0.0000	0.2289	0.0546	0.0000
18	新潟県中越(2004)	小出町小出島	2	③	271	0.2103	0.0000	0.0000	0.2617	0.0000	0.0000
19	新潟県中越(2004)	六日町伊勢町	2	③	109	0.6842	0.0000	0.0000	0.1152	0.0000	0.0000
20	新潟県中越(2004)	塩沢町塩沢	2	③	148	0.0676	0.0000	0.0000	0.1270	0.0000	0.0000
21	新潟県中越(2004)	安塚町安塚	2	③	42	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	新潟県中越(2004)	津南町下船渡	2	③	122	0.4426	0.0000	0.0000	0.3975	0.0000	0.0000
23	新潟県中越(2004)	JMA長岡	2	③	75	0.9333	0.0000	0.0000	0.9747	0.0000	0.0000
24	宮城県北部(2003)	JMA吉川	2	③	178	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	宮城県北部(2003)	JMA石巻	2	③	38	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	宮城県北部(2003)	JMA涌谷	2	③	394	0.0736	0.0000	0.0000	0.1225	0.0000	0.0000
27	福岡県西方(2005)	JMA福岡中央区大塚	2	③	45	0.2222	0.0000	0.0000	0.0701	0.0000	0.0000
28	福岡県西方(2005)	福岡西区今宿	2	③	173	0.0058	0.0000	0.0000	0.0313	0.0000	0.0000
29	福岡県西方(2005)	JMA福岡志摩町	2	③	33	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	福岡県西方(2005)	埴井町上井	2	③	66	0.2273	0.0000	0.0000	0.2546	0.0000	0.0000
31	福岡県西方(2005)	JMA久留米	2	③	72	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32	福岡県西方(2005)	粕谷町仲原	2	③	63	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
33	福岡県西方(2005)	稲波町志原	2	③	81	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	熊本県(2007)	JMA輪島	2	③	230	0.9857	0.1565	0.0478	0.8426	0.1941	0.0966
35	熊本県(2007)	JMA志賀	2	③	81	0.5082	0.0328	0.0000	0.4644	0.0848	0.0000
36	熊本県(2007)	JMA熊谷	2	③	330	0.1273	0.0000	0.0000	0.1697	0.0201	0.0000
37	新潟県中越(2007)	柏崎市中央区	2	③	224	0.9866	0.4063	0.1161	1.2575	0.3780	0.1688
38	新潟県中越(2007)	柏崎市西山町池浦	2	③	55	0.6273	0.4727	0.0727	1.0963	0.5551	0.1787
39	新潟県中越(2007)	新潟市手川	2	③	46	0.0533	0.0000	0.0000	0.1474	0.0000	0.0000
40	新潟県中越(2007)	上越市精進区神崎	2	③	128	0.3438	0.0156	0.0078	0.3643	0.0600	0.0406
41	新潟県中越(2007)	上越市吉川区原之町	2	③	40	0.4750	0.0000	0.0000	0.4445	0.0000	0.0000
42	新潟県中越(2007)	長岡市上野井	2	③	80	0.1875	0.0000	0.0000	0.2896	0.0000	0.0000
43	新潟県中越(2007)	柏崎市高柳町野野町	2	③	51	1.0000	0.0588	0.0000	2.5000	0.1259	0.0000
44	新潟県中越(2007)	上越市大島区島	2	③	81	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
45	新潟県中越(2007)	長岡市浦	2	③	73	0.0411	0.0000	0.0000	0.1128	0.0000	0.0000
46	新潟県中越(2007)	三条市新堀	2	③	43	0.0698	0.0000	0.0000	0.1386	0.0000	0.0000
47	新潟県中越(2007)	上越市鏡地区百箇町	2	③	63	0.0159	0.0000	0.0000	0.0565	0.0000	0.0000
48	新潟県中越(2007)	上越市牧区柳島	2	③	49	0.1224	0.0000	0.0000	0.1745	0.0000	0.0000
49	新潟県中越(2007)	JMA上越	2	③	122	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50	新潟県中越(2007)	新潟市中央区	2	③	78	0.0128	0.0000	0.0000	0.0504	0.0000	0.0000
51	新潟県中越(2007)	上越市蒲川原区釜淵	2	③	43	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
52	新潟県中越(2007)	上越市安塚区安塚	2	③	36	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
53	新潟県中越(2007)	中野市豊津	2	③	71	0.0141	0.0000	0.0000	0.0516	0.0000	0.0000
54	新潟県中越(2007)	上越市大島区土徳浜	2	③	142	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
55	新潟県中越(2007)	十日町市松代	2	③	90	0.0111	0.0000	0.0000	0.0446	0.0000	0.0000
56	新潟県中越(2007)	十日町市千歳町	2	③	63	0.0159	0.0000	0.0000	0.0602	0.0000	0.0000
57	新潟県中越(2007)	JMA南魚沼	2	③	109	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
58	東北地方太平洋沖(2011)	名取市増田	1	④	147	0.5442	0.1156	0.0340	0.5956	0.2171	0.1090
59	東北地方太平洋沖(2011)	東松島市本本	1	④	173	0.7341	0.2775	0.0000	0.7684	0.3489	0.0000
60	東北地方太平洋沖(2011)	大崎市鹿島台	1	④	91	0.4066	0.0889	0.0000	0.4448	0.1791	0.0000
61	東北地方太平洋沖(2011)	K-NET小川	1	④	117	0.0256	0.0256	0.0085	0.0814	0.0814	0.0430
62	東北地方太平洋沖(2011)	宇都宮市白沢町	1	④	95	0.0105	0.0105	0.0000	0.0566	0.0566	0.0000
63	東北地方太平洋沖(2011)	鎌石町不持沼	1	④	133	0.5489	0.2030	0.0526	0.5439	0.2632	0.1148
64	兵庫県南部(1995)	JR鷹取	1	⑤	308	0.9351	0.8636	0.5942	0.9130	0.7613	0.4634
65	熊本(2016)	益城町宮園	3	②	77	0.8442	0.5455	0.3117	0.9132	0.5677	0.3817
66	熊本(2016)	KIRK-長岡	3	②	85	0.7412	0.2471	0.0706	0.8367	0.3751	0.1913

※表中の①～⑤は本文中の被害データの種類に対応する。建物情報レベルは表4に示す通り。

表4 表3の建物情報レベル別に保有する属性情報

情報レベル	屋根形式	階数	建築年代(10年毎)	建築年代(新耐震・旧耐震)	備考
5	○	○	○	×	
4	×	○	○	×	
3	×	×	○	×	
2	×	×	×	○	
1	×	×	△	×	観測点の所在する平均的な建築年代区分を利用

※表中の○は保有する属性区分, ×は保有していない属性区分を示す.

表5 Saの周期帯の平均値の上限値・下限値

T ₁ [s]	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	0.1	0.5	1.0
T ₂ [s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0

表6 対象とした全観測点の地震動

No	地震名 (内は発生年)	観測点名	PQV (cm/s)	計測震度	SI (cm/s ²)	Sa [cm/s ²] の階層別の平均値 (n=5%)							
						高層		中層		低層		全層	
						0.1-0.5[s]	1.0[s]	1.0-1.5[s]	1.5[s]	1.0-1.5[s]	1.5[s]	0.1-1.0[s]	1.0[s]
1	岩手宮城内陸(2008)	K-NET築館	50.95	5.73	65.38	1662.1	652.8	435.9	248.2	212.9	1101.4	544.3	342.0
2	新潟県中越(2004)	K-NET長岡	50.25	5.51	43.66	3279.8	2992.9	1775.9	688.1	354.7	3120.4	2384.4	1222.0
3	新潟県中越(2004)	JR長岡駅	31.34	5.44	39.97	1177.3	454.8	292.3	240.4	119.8	775.9	373.5	266.3
4	新潟県中越(2004)	JR新長岡駅	41.28	5.58	50.74	1084.0	690.6	561.8	320.6	243.9	865.5	626.1	441.1
5	新潟県中越(2004)	川口川口	143.92	6.52	157.29	2149.8	1445.3	2035.8	1228.8	623.8	1758.4	1740.6	1632.3
6	新潟県中越(2004)	K-NET小千谷	132.33	6.73	168.31	2751.8	3888.4	1148.1	757.2	496.6	3388.8	2532.2	952.6
7	新潟県中越(2004)	JMA小千谷	91.87	6.34	113.89	2457.4	1921.9	1067.7	675.2	454.9	2159.9	1494.8	871.4
8	新潟県中越(2004)	十日町小千谷	58.37	5.93	82.02	2159.4	871.1	323.9	167.7	124.8	1443.7	557.5	245.8
9	新潟県中越(2004)	新潟川西町水口沢	51.78	5.70	57.47	1290.7	716.4	364.7	218.9	155.1	971.6	540.5	291.8
10	新潟県中越(2004)	新潟川西町水口沢	71.88	5.97	84.10	1060.0	1212.6	437.2	220.4	116.2	1388.3	824.9	328.8
11	新潟県中越(2004)	見野町昭和町	36.08	5.36	43.34	705.2	549.2	460.8	318.8	231.5	618.5	505.0	389.8
12	新潟県中越(2004)	栃尾町大町	33.82	5.51	40.79	1168.6	751.4	182.2	118.1	74.3	936.8	466.8	150.1
13	新潟県中越(2004)	新潟三島町上岩井	52.78	5.54	39.10	882.9	953.4	343.5	230.8	148.5	922.1	648.5	287.1
14	新潟県中越(2004)	越中内野地区内	30.91	5.91	64.84	1142.5	1231.6	685.1	318.1	254.2	1192.0	658.4	501.6
15	新潟県中越(2004)	守門村須原	42.82	5.78	45.98	1229.3	1024.9	245.5	168.0	109.5	1115.7	658.2	206.7
16	新潟県中越(2004)	広神村今泉	33.76	5.56	37.87	1469.5	414.8	338.3	133.3	75.4	883.5	376.5	235.8
17	新潟県中越(2004)	入込瀬村穴沢	23.74	5.53	30.76	1354.9	297.3	131.4	109.4	82.7	767.3	214.3	120.4
18	新潟県中越(2004)	小出町小島	26.78	5.21	36.20	683.8	498.6	345.0	278.5	112.4	590.8	418.1	311.8
19	新潟県中越(2004)	六日町伊勢町	27.80	5.22	38.24	350.6	425.7	620.0	296.6	108.5	392.4	522.9	458.3
20	新潟県中越(2004)	塩沢町塩沢	21.66	5.22	30.12	906.2	461.0	139.4	90.3	65.2	658.9	300.2	114.8
21	新潟県中越(2004)	安塚町安塚	18.31	5.30	23.07	1020.9	248.7	70.8	55.9	35.5	591.9	159.7	63.3
22	新潟県中越(2004)	津波町下船渡	36.94	5.17	44.55	955.0	475.1	247.6	149.6	111.7	701.7	361.4	198.6
23	新潟県中越(2004)	JMA長岡	37.51	5.50	40.79	1226.7	433.7	282.4	246.4	123.8	786.1	358.1	264.5
24	宮城県北部(2003)	JMA吉川	19.23	5.07	26.79	632.0	417.0	398.2	151.0	117.4	512.6	362.6	229.8
25	宮城県北部(2003)	JMA石巻	20.41	5.28	25.29	984.0	262.3	144.4	105.5	76.5	583.0	203.4	125.0
26	宮城県北部(2003)	JMA涌谷	54.19	5.89	64.58	1501.9	1073.6	361.1	336.0	211.4	1264.0	717.4	346.8
27	福岡県西方沖(2005)	JMA福岡中央区大塚	33.89	5.14	30.56	454.7	473.1	356.2	179.7	135.8	464.8	414.6	267.9
28	福岡県西方沖(2005)	福岡西区今宿	22.01	5.30	29.77	592.2	524.3	293.3	126.9	91.0	554.5	408.8	210.0
29	福岡県西方沖(2005)	JMA福岡志賀町初	33.27	5.34	37.15	925.1	955.4	256.0	152.9	95.1	725.3	410.7	204.4
30	福岡県西方沖(2005)	磯井町上臼井	24.26	5.24	28.39	895.6	415.5	103.8	85.5	71.5	629.8	259.6	99.8
31	福岡県西方沖(2005)	JMA久留米	24.27	5.17	31.78	444.5	567.9	228.3	98.1	50.1	513.1	398.1	163.7
32	福岡県西方沖(2005)	粕谷町神原	34.26	5.09	28.83	602.4	391.1	224.2	143.0	134.6	465.0	307.7	183.6
33	福岡県西方沖(2005)	穂波町志保	20.30	5.00	20.22	516.2	338.6	106.9	56.8	45.2	417.5	222.7	81.9
34	熊本県(2007)	JMA輪島	98.52	6.20	112.31	961.2	1121.2	1018.4	1432.1	633.4	1059.2	1070.3	1225.7
35	熊本県(2007)	JMA志賀	54.66	5.66	59.80	884.9	1080.1	484.2	280.4	181.5	962.2	772.2	382.3
36	熊本県(2007)	JMA能登	52.14	5.68	62.09	375.4	424.6	779.9	622.0	254.1	402.7	602.2	700.9
37	新潟県中越(2007)	122.96	6.33	124.52	1168.7	1053.7	1057.9	1216.8	1396.3	1105.3	1055.8	1137.4	
38	新潟県中越(2007)	柏崎市西山池津	82.26	6.30	98.06	1654.1	2172.5	683.7	401.3	258.8	1842.0	1428.0	542.5
39	新潟県中越(2007)	飯綱町宇川	81.32	6.19	96.07	1351.1	2125.9	678.6	227.1	129.5	1781.5	1402.2	452.9
40	新潟県中越(2007)	上越市碓氷郡碓氷	93.80	5.89	82.06	795.6	976.3	811.4	565.4	342.3	896.0	893.9	688.4
41	新潟県中越(2007)	上越市吉川区区之町	63.61	5.80	66.65	867.8	1050.1	645.6	348.0	204.6	969.1	847.9	496.8
42	新潟県中越(2007)	長岡市上岩井	44.29	5.66	53.22	783.5	972.9	571.8	289.6	189.4	888.7	772.3	260.8
43	新潟県中越(2007)	柏崎市高柳町野野町	52.31	5.66	49.71	1120.8	748.8	273.4	250.5	91.8	914.1	511.1	261.9
44	新潟県中越(2007)	上越市大島区間	23.19	5.42	30.25	1556.8	267.4	177.1	82.4	60.3	840.5	222.2	129.7
45	新潟県中越(2007)	長岡市浦	26.64	5.35	38.68	627.7	683.4	368.7	181.8	85.0	658.6	526.0	275.2
46	新潟県中越(2007)	三条市新街	29.98	5.35	44.25	848.9	638.1	427.6	273.2	168.4	731.8	532.8	350.4
47	新潟県中越(2007)	上越市頸城区百間町	50.51	5.38	48.27	418.6	636.9	376.0	375.6	278.4	539.9	506.5	378.8
48	新潟県中越(2007)	上越市牧区藤島	30.95	5.35	35.40	893.1	552.6	174.8	107.9	70.5	703.9	363.7	141.3
49	新潟県中越(2007)	JMA上越	34.71	5.37	43.13	736.9	635.5	198.0	111.8	73.1	680.6	416.7	154.9
50	新潟県中越(2007)	飯綱町幸礼	25.32	5.34	32.34	626.1	597.4	163.4	62.8	39.6	610.2	380.4	113.1
51	新潟県中越(2007)	上越市蒲川原区釜淵	31.72	5.23	27.32	936.4	423.5	113.1	79.3	81.9	651.4	268.3	98.2
52	新潟県中越(2007)	上越市安塚区安塚	25.46	5.14	27.88	605.3	477.0	222.4	113.0	70.2	534.0	349.7	167.7
53	新潟県中越(2007)	中野市豊津	30.88	5.11	33.86	555.9	504.5	260.4	95.1	52.0	527.3	382.4	177.8
54	新潟県中越(2007)	上越市大浜区土産尾	33.07	5.09	27.83	675.7	263.1	215.9	210.4	156.5	466.5	239.5	213.1
55	新潟県中越(2007)	十日町市松代	21.10	5.03	23.00	546.5	432.5	169.5	99.7	75.5	483.1	301.0	134.6
56	新潟県中越(2007)	十日町市千歳町	27.86	5.02	29.03	611.1	393.6	185.4	146.8	99.1	490.2	289.5	166.1
57	新潟県中越(2007)	JMA南魚沼	21.22	5.02	28.57	189.3	401.7	517.4	210.3	101.3	307.3	459.6	363.9
58	東北地方太平洋沖(2011)	名取市増田	107.55	6.19	108.22	1650.5	1728.6	884.9	404.5	315.1	1693.9	1296.7	634.7
59	東北地方太平洋沖(2011)	松島町失本	71.22	6.13	83.90	1398.5	1798.9	1007.3	556.0	346.2	1620.9	1403.1	781.6
60	東北地方太平洋沖(2011)	大崎町鹿島台	50.83	6.01	61.90	2270.6	953.3	411.9	292.4	191.1	1538.7	682.6	352.1
61	東北地方太平洋沖(2011)	K-NET小川	73.96	5.98	87.79	1037.7	1008.5	1354.1	755.5	294.8	1021.5	1181.3	1054.8
62	東北地方太平洋沖(2011)	宇都宮市白沢町	55.30	6.01	56.08	2238.9	900.8	296.5	142.0	144.9	1495.5	593.7	214.3
63	東北地方太平洋沖(2011)	鶴石町不持沼	64.87	6.08	75.92	2431.8	1108.7	435.8	323.7	266.1	1696.8	772.3	379.8
64	兵庫県南部(1995)	JR豊取	156.17	6.48	171.53	1895.5	1632.9	2157.5	1318.0	1064.0	1749.6	1885.2	1737.7
65	熊本(2016)	益城町宮園	187.72	6.78	208.16	1078.0	2007.0	2807.0	1497.9	719.7	1595.2	2407.0	2152.4
66	熊本(2016)	KK-net益城	134.78	6.50	138.37	2412.8	2263.1	1628.6	612.9	335.9	2329.6	1944.8	1119.7

損傷度関数の形状は中嶋・岡田(2008)⁹⁾を参考に、計測震度については式[5]、その他の地震動指標については式[6]を利用した。

$$S = \left\{ \frac{I-a}{b} \right\}^{1/c} \quad [5]$$

$$S = \left\{ \frac{\log_{10} I - a}{b} \right\}^{1/c} \quad [6]$$

ここで、S:耐震評点, I:被害地震動指標, a, b, c:係数を示す。

係数a, b, cの推定にあたっては曲線あてはめ法を利用した。観測点周辺の被害データセットは地震動の小さい観測点が多くを占める(表6)。このため、データセット

をそのまま利用すると、地震動の小さい範囲での関数形へのあてまはりの良さが係数が決まってしまう、地震動の大きな範囲では実被害を再現できない可能性がある。このため、曲線あてはめ法を適用する際は、階級毎に区分し階級内の上限評点の平均値と、地震動の平均値を使って係数を推定した。表7に損傷度関数作成のための各階級の平均地震動と上限評点の平均値の設定例を示す。

曲線あてはめ法により得られた損傷度関数のパラメータを表8に示すとともに、その一例として、66観測点の地震動-上限評点のプロットと推定した損傷度関数を図5に示した。その結果、階級に区分した上で曲線あてはめ法を適用することで、地震動が小さい範囲でも大きな範囲でも推定した損傷度関数はプロットの平均的な上限評点を表現できているとともに、地震動が大きくなるにしたがって上限評点も増加しており、既往の地震動の範囲では矛盾は生じていない。

表7 損傷度関数作成のためのデータセット作成例 (計測震度) (Sa 周期0.5-1.5秒の平均値)

計測震度(階級)	計測震度(平均)	上限評点			Sa (階級)	Sa (平均)	上限評点			
		一部損壊以上	半壊以上	全壊			一部損壊以上	半壊以上	全壊	
5.0	5.00	0.0000	0.0000	0.0000	100	100	-	-	-	
5.0	5.2	0.0637	0.0000	0.0000	100	200	159.66	0.0000	0.0000	0.0000
5.2	5.4	0.1411	0.0000	0.0000	200	300	239.41	0.0613	0.0061	0.0000
5.4	5.6	0.3880	0.0369	0.0059	300	500	387.98	0.1679	0.0081	0.0020
5.6	5.8	0.3862	0.0280	0.0000	500	1000	601.06	0.2915	0.0320	0.0019
5.8	6.0									

表8 損傷度関数のパラメータ一覧

	一部損壊以上			半壊以上			全壊		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
PGV	1.25004	0.98753	0.89046	1.38156	0.90380	0.24833	1.36914	0.95704	0.16408
計測震度	4.90324	1.64317	0.75774	4.99670	1.78121	0.27667	-8.75876	15.55745	0.01603
SI値	1.40064	0.95496	1.12939	1.48288	0.89213	0.35733	1.57932	0.86444	0.28308
Sa(0.1-0.5s)	2.51054	1.51492	1.20103	2.59022	2.04592	0.73060	2.94652	56.12096	2.26239
Sa(0.5-1.0s)	2.54311	1.09552	1.25442	2.62056	1.31712	0.66576	2.95683	9.43383	1.99640
Sa(1.0-1.5s)	0.24564	3.17583	0.25736	-0.83558	4.09506	0.07281	0.57528	2.94891	0.07429
Sa(1.5-2.0s)	1.63630	1.64757	0.65542	0.25285	3.16692	0.12881	-4.71293	8.12971	0.02867
Sa(2.0-2.5s)	1.31385	1.68349	0.55357	1.81669	1.60478	0.45826	1.87694	1.76218	0.36735
Sa(0.1-1.0s)	2.53113	0.91777	0.81777	2.62203	1.92711	0.68967	2.94664	10.00713	1.76899
Sa(0.5-1.5s)	2.31199	1.12995	0.84678	2.37914	1.07759	0.30576	0.37018	3.10904	0.05723
Sa(1.0-2.0s)	1.14149	2.16018	0.38858	-3.65863	7.00473	0.03728	-3.06447	6.45690	0.02663

5. 被害関数の作成

4 (2) 項の損傷度関数と 3 (2) 項の建物の耐力分布から被害関数を作成した。具体的には、損傷度関数における任意の地震動Iにおける評点Xと耐震評点分布の評点Xにおける累積相対度数から、図6に示すような形で被害関数を作成した。作成した被害関数の例を図7に示した。

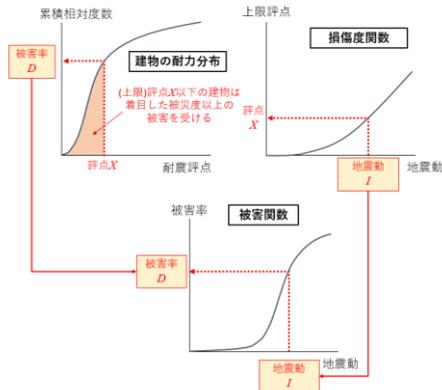


図6 被害関数の作成方法

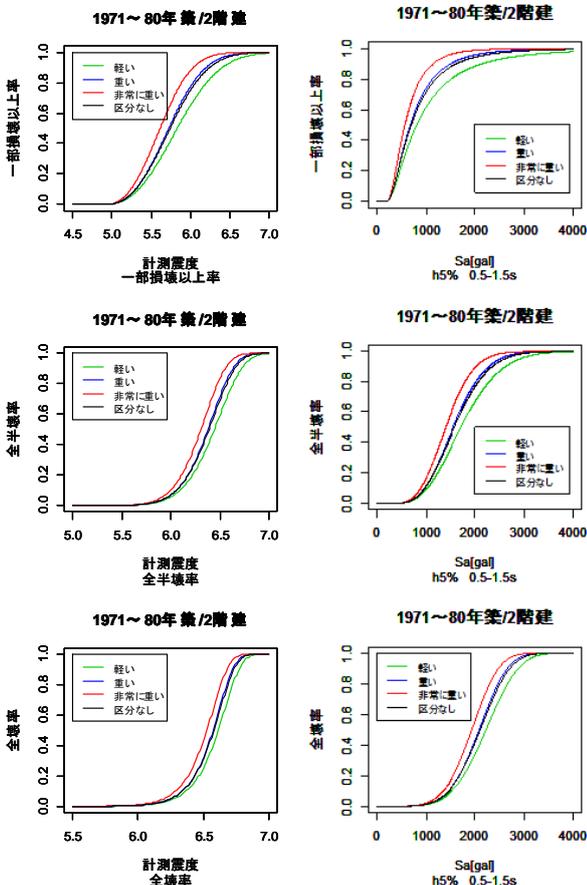


図7 被害関数の作成例

6. 再現性の確認と検証

(1) 観測点周辺データを利用した再現性の確認

本項では、表3・6に示した観測点周辺の建物データと地震動指標を利用して、本検討で作成した被害関数による予測値を算出し実被害と比較を行った。実被害と予測値の誤差指標は式[7], [8]を利用した。

$$E_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \{(D_{ir} - D_{ip})^2\} / N} \quad [7]$$

$$E_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \{(\log_{10} D_{ir} - \log_{10} D_{ip})^2\} / N} \quad [8]$$

ここで、 E_1 : 誤差指標 1、 E_2 : 誤差指標 2、 D_{ir} : 観測点iの実被害率、 D_{ip} : 観測点iの予測被害率、 N : 観測点数を示す。なお、誤差指標 2は被害率が0%の場合は0.01%として誤差指標を算出した。

初めに、応答スペクトルの周期帯平均値を地震動指標としたケースのみを実被害との比較の対象とした。具体的には全壊・全半壊・一部損壊以上のそれぞれに関してすべての周期帯で誤差指標を算出した(表9)。算出結果から被災度毎に誤差指標が小さくなる周期帯を被害と関連の高い周期帯(表9の黄色欄の周期帯)とし、以降の加速度応答スペクトルを地震動指標とした被害関数として検証に利用した(2)。本検討において被害と関連が高いと特定された周期帯は、全壊、全半壊、一部損壊以上と被害程度が軽くなるにつれて短周期側に移動している点や、全壊被害と関連の高い周期帯は周期1.0-2.0s程度となっている点は既往研究(18)と整合した結果となっている。

以降では、「Sa①」は全壊で1.0-1.5s、全半壊で0.5-1.5s、一部損壊以上で0.5-1.0s、「Sa②」は全壊で1.0-2.0s、全半壊で1.0-1.5s、一部損壊以上で0.1-1.0sの加速度応答スペクトルの平均値を地震動指標とした被害関数であることを示す。

表9 加速度応答スペクトルの周期帯毎の誤差指標

		0.1-0.5s	0.5-1.0s	1.0-1.5s	1.5-2.0s	2.0-2.5s	0.1-1.0s	0.5-1.5s	1.0-2.0s
E_1	一部損壊以上	0.29392	0.26598	0.28988	0.28518	0.28305	0.26328	0.27150	0.28692
	全半壊	0.14140	0.13383	0.09310	0.10698	0.10397	0.12895	0.12130	0.09436
	全壊	0.08293	0.07809	0.05234	0.05723	0.06336	0.07874	0.10255	0.05227
E_2	一部損壊以上	1.55634	1.25698	1.46540	1.29933	1.37705	1.38505	1.25746	1.40893
	全半壊	1.77006	1.30286	1.26157	1.28334	1.20571	1.54419	1.06139	1.18467
	全壊	1.50399	1.18119	0.88089	0.91969	0.93859	1.16816	0.97924	0.78849

※表中の黄色欄は誤差指標が最も小さかった周期帯。

次に、本検討で作成した「Sa①」「Sa②」「PGV」「計測震度」「SI値」を地震動指標とした被害関数による誤差指標を比較した(表10)。その結果、誤差指標 1では一部損壊以上ではSI値、全半壊ではSa①、全壊ではSa②で誤差が最小となった。誤差指標 2では一部損壊以上でSI値、全半壊で計測震度、全壊でPGVで誤差が最小となった(3)。

また、実被害との乖離の仕方は地震動指標によって異なっている。例えば、K-NET小千谷では計測震度は6.73と非常に大きな値であるが実全壊率は0%となっている。同地点の加速度応答スペクトルは周期0.7秒付近にピークがありその値は5000galを超えているが、周期1~2秒の値は実全壊率30%以上であった益城町宮園の半分以下の値となっている。このような地点ではSaによる被害関数のほうが乖離が少ない結果となった。逆に、柏崎市西山町池浦の全半壊被害のようにSaのターゲットとした周期帯の値が小さい場合、Saの被害関数による予測値は過小評価となる傾向がある。この点に関しては、より詳細な建物属性を保有する建物データの収集等を通して、対象と

する周期帯や減衰定数等の検討が今後も必要と考えらる。

表10 本検討で作成した被害関数の誤差指標

	Sa①	Sa②	PGV	計測震度	SI値	
E ₁	一部損壊以上	0.26598	0.26328	0.26982	0.26496	0.26257
	全半壊	0.12130	0.09310	0.09678	0.11789	0.09771
	全壊	0.05234	0.05227	0.05768	0.12758	0.06053
E ₂	一部損壊以上	1.25698	1.38505	1.27563	1.23887	1.17181
	全半壊	1.06139	1.26157	0.81632	0.79281	0.86082
	全壊	0.88089	0.78849	0.57742	0.69893	0.61060

※表中の黄色欄は誤差指標が最も小さかった地震動指標。

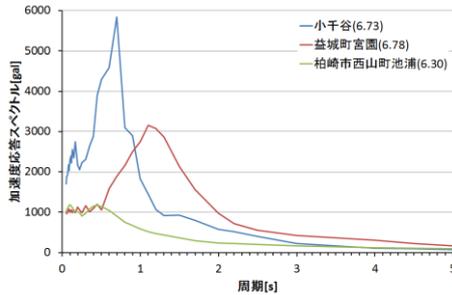


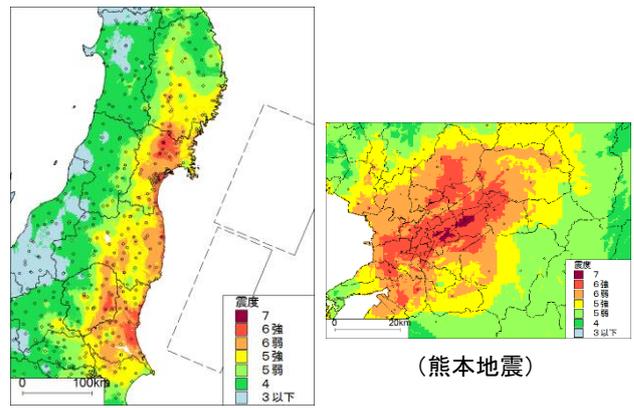
図8 加速度応答スペクトルの比較

(2) 広域検証

広域検証はK-NET, KiK-netが整備され、いずれの地域でも一定の距離間隔で観測波形のデータを得ることが可能となった2000年鳥取県西部地震以降の被害地震(15地震)を対象に地震全体の実被害と予測値の比較を行った。具体的には、強震観測点や震度観測点の観測波形から空間補間により面的に地震動分布を推定した上で、住宅建物データと被害関数から地震全体の被害棟数を予測し実被害と比較を行った。対象とした被害関数は(1)項と同様に本検討で作成した「Sa①」「Sa②」「PGV」「計測震度」「SI値」の被害関数と中防の被害関数⁵⁾である。

a) 地震動分布の推定方法

地震動分布は観測点(地表)の観測記録から工学的基盤面(Vs=500m/s相当)の地震動を推定した上で、観測点が存在しない断層近傍でも地震動が大きくなるように観測点の工学的基盤の地震動より最小二乗法で推定した距離減衰式をトレンド成分としたsimple Kriging法により空間補間を行った¹⁹⁾。この工学的基盤上の補間結果と表層地盤データから地表面の地震動を250mメッシュ単位で面的に推定した。表層地盤のデータはWakamatsu and Matsuoka(2013)²⁰⁾の微地形区分によるAVS30のデータを利用した。AVS30と増幅率の関係は、PGV・SI値は藤本・翠川(2006)²¹⁾、計測震度は末富ほか(2005)¹⁹⁾、加速度応答スペクトルはKanno et al.(2006)²²⁾を利用した。断層モデルは国土地理院等により地殻変動量に基づき推定された断層モデル²³⁾²⁴⁾を利用した。観測記録はK-NET, KiK-netの他²⁵⁾、気象庁及び地方公共団体の震度観測点²⁶⁾、土木学会より公開されたJR東日本の観測波形²⁷⁾等を利用した。推定した地震動分布の例として、東北地方太平洋沖地震・熊本地震における計測震度分布を図9に示した。



(東北地方太平洋沖地震)

図9 地震動分布の推定例(計測震度)

b) 検証用の住宅建物データの作成

広域検証では消防庁の被害報の住家被害棟数と比較を行う。このため検証に使用する住宅建物データが必要となる。本検討では藤原ほか(2018)²⁸⁾の1998・2003・2008・2013年時点の250mメッシュ別構造別建築年代区分別住宅建物データを利用した。ただし、同データには屋根重量区分を判断できる屋根形式や建物階数区分の属性はない。以降ではこれらの属性の設定方法を示した。

本検討で作成した被害関数に必要な屋根重量の区分は3区分である。文献2)では非常に重い建物の例として土葺瓦、重い建物の例として椽瓦葺が挙げられている点から、住宅建物データに設定する屋根形式については、屋根重量区分「非常に重い」「重い」「軽い」にそれぞれ対応するものとして、「瓦葺(土葺)」「瓦葺(椽葺)」「その他(スレート葺・鋼板葺など)」の3区分とすることとした。これらの区分設定には住宅金融公庫の住宅・建築主要データ調査報告²⁹⁾④)を利用し、都道府県別建築年代区別に設定した。ただし、同調査報告で屋根材が調査され、かつ資料が入手できたのは、1988年・1989年・1995年・1999年・2002年・2012年のみであった。そこで、同調査報告の1988年・1989年の集計値から建築年代区分「1981~90年築」の、1995年・1999年の集計値から「1991~2000年築」の、2002年の値から「2001~10年築」の、2012年の値から「2011年以降築」の瓦葺住宅棟数の割合を設定した。

一方、「1971~80年築」「1961~70年築」「1960年以前築」については、兵庫県南部地震の被災地(①神戸市長田区西通り4丁目、②灘区大石北町、③東灘区本山中町)において実施された悉皆調査結果¹⁵⁾を利用した(表11)。具体的には、表11から1971~80年築における瓦葺建物の割合を1.0とした場合の各年代における瓦葺割合の比を利用して、都道府県毎に瓦葺住宅棟数を推定した。なお、悉皆調査結果から兵庫県南部地震の被災地の瓦葺の割合等は直接推定できることから、被災地が位置する兵庫県の阪神・神戸地域については表11の建築年代別の木造建物における瓦葺の割合をそのまま利用した。また、熊本地震で大きな被害を受けた益城町に関しては益城町役場周辺の建物登記情報³⁰⁾を収集し推定した木造建物の建築年代別瓦葺の割合を用いた(表12)。

瓦葺に占める土葺・椽葺の割合については、①東日本は関東大震災を契機として、西日本は阪神・淡路大震災を契機として土葺が使われなくなったこと³¹⁾、②1948年福井地震の被害調査において被災地の建物の特徴として椽葺であった旨の記載があること³²⁾、以上2点から、近畿地方以西については表11の建築年代別の土葺の割合から、

1980年以前築の木造住宅に対して建築年代別に土葺・椀葺の割合を設定した。1981年以降築に関しては、建築年が新しくなるほど土葺の割合が減少すると考えらえることから、1981～90年築は1971～80年築の半分の値とし、1991年以降築はすべて椀葺と仮定した。

表11 悉皆調査における木造建物の屋根の葺き方

瓦葺棟数	～1960 1961～70 1971～80 1981～90 1991～				
	椀葺	土葺	その他	合計	瓦葺の割合
	26	10	22	5	0
	26	6	5	2	0
	5	0	1	2	6
	57	16	28	9	6
	91.2%	100.0%	96.4%	77.8%	0.0%
81～90年の瓦葺の割合を1.0とした場合の各年代の瓦葺割合の比					
	1.17	1.29	1.24	1.00	0.00
瓦葺全体に対する土葺の割合					
	50.0%	37.5%	18.5%	28.6%	0.0%

表12 益城町役場周辺の木造建物に占める瓦葺の割合

建築年	木造全棟数	瓦葺	瓦以外	瓦葺の割合
～1960	14	13	1	92.9%
1961～70	18	15	3	83.3%
1971～80	24	23	1	95.8%
1981～90	20	18	2	90.0%
1991～00	15	11	4	73.3%
2001～10	8	1	7	12.5%
2011～	14	4	10	28.6%

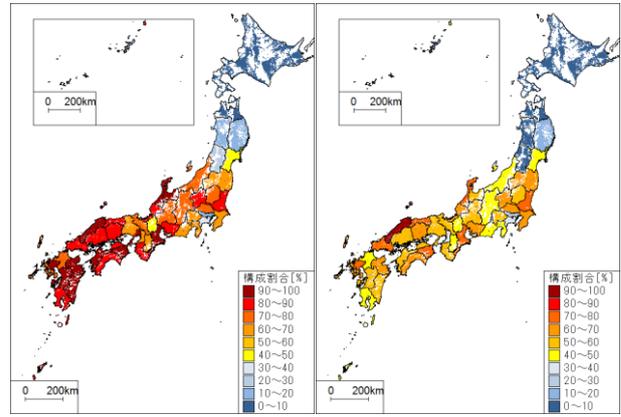
表13 都道府県別の瓦葺の割合

	～1960		1961～70		1971～80		1981～90		1991～2000		2001～10		2011～	
	瓦葺に占める土葺の割合	瓦葺率(全体)	瓦葺に占める土葺の割合	瓦葺率(全体)	瓦葺に占める土葺の割合	瓦葺率(全体)	瓦葺率	瓦葺率	瓦葺率	瓦葺率	瓦葺率	瓦葺率	瓦葺率	瓦葺率
北海道	0.0%	1.8%	0.0%	1.9%	0.0%	1.9%	1.5%	0.7%	1.0%	0.0%				
青森	0.0%	2.7%	0.0%	3.0%	0.0%	2.9%	2.3%	1.5%	0.0%	0.0%				
岩手	0.0%	14.8%	0.0%	16.3%	0.0%	15.7%	12.7%	11.3%	12.5%	8.8%				
宮城	0.0%	41.4%	0.0%	45.4%	0.0%	43.8%	35.3%	30.9%	46.2%	35.4%				
秋田	0.0%	11.5%	0.0%	12.6%	0.0%	12.2%	9.8%	3.7%	7.1%	6.7%				
山形	0.0%	25.0%	0.0%	27.4%	0.0%	26.4%	21.3%	14.2%	0.0%	0.0%				
福島	0.0%	58.3%	0.0%	63.9%	0.0%	61.6%	49.7%	42.6%	61.5%	50.0%				
茨城	0.0%	78.4%	0.0%	86.0%	0.0%	82.9%	66.9%	62.6%	71.8%	93.1%				
栃木	0.0%	70.6%	0.0%	77.4%	0.0%	74.7%	60.2%	55.5%	54.8%	62.7%				
群馬	0.0%	81.9%	0.0%	89.7%	0.0%	86.5%	69.8%	70.6%	67.9%	75.0%				
埼玉	0.0%	69.2%	0.0%	75.8%	0.0%	73.1%	59.0%	47.6%	65.2%	72.1%				
千葉	0.0%	65.0%	0.0%	71.3%	0.0%	68.7%	55.4%	44.8%	62.0%	89.1%				
東京	0.0%	18.0%	0.0%	19.7%	0.0%	19.0%	15.3%	26.6%	28.8%	66.7%				
神奈川	0.0%	29.6%	0.0%	32.4%	0.0%	31.3%	25.2%	24.4%	37.8%	75.0%				
新潟	0.0%	67.6%	0.0%	74.1%	0.0%	71.5%	57.6%	38.1%	40.6%	50.0%				
富山	0.0%	94.7%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%	80.7%	59.8%	50.0%	39.1%				
石川	0.0%	95.4%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%	81.3%	62.1%	77.8%	68.3%				
福井	0.0%	80.1%	0.0%	87.8%	0.0%	84.7%	68.3%	48.4%	64.3%	52.9%				
山梨	0.0%	65.3%	0.0%	71.5%	0.0%	69.0%	55.6%	45.7%	56.3%	88.0%				
長野	0.0%	66.8%	0.0%	73.2%	0.0%	70.6%	57.0%	42.0%	41.5%	49.4%				
岐阜	0.0%	73.7%	0.0%	80.8%	0.0%	77.9%	62.9%	57.2%	59.5%	58.9%				
静岡	0.0%	61.5%	0.0%	67.4%	0.0%	65.0%	52.4%	49.2%	45.9%	80.9%				
愛知	0.0%	82.0%	0.0%	89.9%	0.0%	86.7%	69.9%	61.6%	65.8%	65.3%				
三重	0.0%	96.3%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%	82.1%	64.3%	72.3%	71.7%				
滋賀	50.0%	45.1%	37.5%	49.5%	18.5%	47.7%	38.5%	56.1%	48.8%	69.8%				
京都	50.0%	66.3%	37.5%	72.7%	18.5%	70.1%	56.3%	42.5%	55.2%	75.7%				
大阪	50.0%	57.3%	37.5%	62.8%	18.5%	60.5%	48.8%	33.8%	36.4%	58.3%				
兵庫	50.0%	62.0%	37.5%	67.9%	18.5%	65.5%	52.8%	52.3%	52.2%	72.6%				
奈良	50.0%	64.6%	37.5%	70.8%	18.5%	68.3%	55.1%	50.3%	47.1%	68.3%				
和歌山	50.0%	79.8%	37.5%	87.5%	18.5%	84.3%	68.0%	57.5%	52.0%	74.2%				
鳥取	50.0%	78.2%	37.5%	85.7%	18.5%	82.7%	66.7%	69.1%	77.8%	75.0%				
徳島	50.0%	96.8%	37.5%	100.0%	18.5%	100.0%	82.6%	68.7%	100.0%	100.0%				
岡山	50.0%	83.1%	37.5%	91.1%	18.5%	87.8%	70.9%	62.9%	69.2%	76.0%				
広島	50.0%	82.3%	37.5%	90.3%	18.5%	87.0%	70.2%	62.9%	58.3%	67.2%				
山口	50.0%	84.3%	37.5%	92.4%	18.5%	89.1%	71.8%	60.9%	70.1%	77.8%				
徳島	50.0%	88.8%	37.5%	97.1%	18.5%	93.8%	75.5%	63.7%	76.5%	72.7%				
香川	50.0%	78.9%	37.5%	86.5%	18.5%	83.4%	67.3%	66.8%	55.8%	53.6%				
愛媛	50.0%	88.1%	37.5%	96.6%	18.5%	93.1%	75.1%	63.2%	58.5%	55.6%				
高知	50.0%	81.5%	37.5%	89.4%	18.5%	86.2%	69.5%	68.8%	68.8%	70.0%				
福岡	50.0%	69.3%	37.5%	76.0%	18.5%	73.3%	59.1%	48.5%	45.7%	64.1%				
佐賀	50.0%	89.4%	37.5%	98.0%	18.5%	94.5%	76.2%	69.2%	73.3%	81.8%				
長崎	50.0%	71.4%	37.5%	78.3%	18.5%	75.5%	60.9%	57.8%	64.7%	79.2%				
熊本	50.0%	89.6%	37.5%	98.2%	18.5%	94.7%	76.4%	51.3%	55.7%	72.5%				
大分	50.0%	89.1%	37.5%	97.7%	18.5%	94.2%	76.0%	66.1%	62.5%	77.3%				
宮崎	50.0%	99.1%	37.5%	100.0%	18.5%	100.0%	84.5%	68.3%	55.8%	71.4%				
鹿児島	50.0%	79.6%	37.5%	87.3%	18.5%	84.2%	67.9%	62.6%	47.5%	65.1%				
沖縄	50.0%	11.7%	37.5%	12.9%	18.5%	12.4%	10.0%	54.8%	0.0%	0.0%				
阪神・淡路	50.0%	91.2%	37.5%	100.0%	18.5%	96.4%	77.8%	0.0%	0.0%	0.0%				
益城	50.0%	92.9%	37.5%	83.3%	18.5%	95.8%	90.0%	73.3%	12.5%	28.6%				

建物階数は住宅・土地統計調査³³⁾における木造・防火木造における都道府県(及び政令市)別の建築年代毎の階数別住宅数の割合を利用して設定した。

作成した住宅建物データの例を図10に、都道府県別の瓦葺の割合を表13に示した。作成した住宅建物データからは、①耐震性の低い1980年以前築の木造建物は関東・東海地方の都市部では比較的構成割合が低く中国・四国地方の山間部では高いこと、②木造平屋建は東京・大阪

を中心とした大都市部と北陸で構成割合が低く、逆に宮崎・鹿児島といった地域では構成割合が高いこと、③屋根重量が重いと判定される瓦葺建物は西日本で構成割合が高く、逆に北日本では構成割合が低い、といった点がわかる。



(1971～80年築の瓦葺割合) (2001～10年築の瓦葺割合)
図10 住宅建物データの例

c) 検証結果と考察

本項では、本研究で作成した被害関数と中防の被害関数の予測値と実被害を比較した。ただし、本研究で作成した被害関数は、中防の関数と異なり「屋根形式」「建物階数」別の関数となっている。b)項ではこれらの属性を保有する住宅建物データを作成したが、中防の予測値との比較という観点からは、b)項で作成した住宅建物データに対して屋根形式・建物階数を考慮した被害関数を適用すると、中防とは異なる空間分解能に基づく住宅建物属性を利用することとなり、同条件での比較とはいえない。そこで、本研究で作成した被害関数も屋根形式・建物階数を不明とした評価分布と損傷度関数から作成した建築年代区分のみを考慮した被害関数による予測値を算出し、これと中防の予測値や実被害と比較を行った。その上で、屋根形式・建物階数区分も利用した場合の比較も行った。表14には対象とした15地震の地震全体の実被害(全壊・全半壊)と建築年代区分のみを利用した場合の予測値と中防の予測値及び式[7], [8]の誤差指標を、表15には建築年代区分・屋根形式・建物階数区分を利用した場合の結果を示した。実被害は消防庁の被害報³⁴⁾の住家被害棟数である。また、東北地方太平洋沖地震については、津波被害の影響を除外するため、太平洋沿岸の市町村を除外した内陸部の市町村のみを対象とした。

表14に示した通り、住宅建物データの空間解像度を合わせた建築年代区分のみを利用した場合でも、全壊・全半壊とも本検討の被害関数のほうが誤差指標は小さくなっており、中防の誤差指標 E_2 は1.294～1.387なのに対し、本検討で作成した被害関数では0.757～1.073であり、中防の被害関数よりも相対的に実被害に近い予測結果を得られたと考えられる。また、建築年代区分・屋根形式・建物階数区分を利用した場合(表15)、本検討で作成した被害関数(全壊・全半壊)の誤差指標 E_2 は0.762～1.066となった。図11には、建築年代区分・屋根形式・建物階数区分を利用した場合と建築年代のみを利用した場合の誤差指標 E_2 の関係を示した。その結果、全壊ではPGVと S_a ②、全半壊ではPGVではやや誤差指標は大きくなったものの、それ以外の地震動指標では階数・屋根形式を利用した場合のほうが誤差指標 E_2 は小さくなった。

一方、表14からは、実被害との乖離が大きくかつ中防よりも予測精度が劣る結果となった地震として、宮城県北部の地震の全壊・全半壊被害が挙げられる。宮城県北部の地震の実被害（全壊1276棟、全半壊5085棟）に対し、本検討で作成した被害関数による予測値は全壊で7~30棟、全半壊で105~635棟とかなり過少評価となった。全壊に関しては、中防の予測値でも177棟に過ぎない。検証に利用した観測点は観測波形が記録された地点のみを利用しており、震源近傍で計測震度6.0以上を観測した矢本町矢本、鳴瀬町小野といった観測点は広域検証の地震動分布に反映されていない。そこで、この2地点を含む2003年宮城県北部の地震の観測点周辺の建物被害データと計測震度の値⁷⁾を利用し、本検討で作成した計測震度の被害関数（建築年代区分のみ利用）と中防の予測値について実被害と比較を行った（表16）。その結果、全壊・全半壊ともに11観測点中8観測点で本検討で作成した被害関数の予測値のほうが実被害と近い結果が得られた。しかし、実被害の大きい矢本町矢本や鳴瀬町小野では実被害を過小評価する傾向があり、特に全半壊率を過少に評価する傾向が強い。本検討によるこれら2地点の一部損壊以上率は実被害とほぼ整合する結果となっており、実被害と予測値における被害を受けた建物に対する半壊と一部損壊の割合の違いが結果に表れたものと考えられる。また、検証では2003年7月26日の7時13分に発生したMj6.2の地震動を利用しているが、この2地点は、同日0時13分に発生したMj5.5の地震でそれぞれ計測震度5.5、5.9を、7月28日の4時8分に発生したMj5.0の地震で計測震度4.4、4.5を観測しており、これらの地震による影響により、一部損壊相当の被害が半壊相当の被害となった可能性もあり、前震や強い余震の多い地震ではこれらの影響について検討する必要があると考えられる。

表14 広域検証結果（建築年代区分のみ利用）
（全壊）

No	発生日月 (yy/mm/dd)	地震名	Mw	実被害	本検討						中防 (2012)
					PGV	計測震度	SI値	Sa			
								①	②		
1	2000/10/06	鳥取県西部地震	6.8	435	454	623	463	362	242	3,075	
2	2001/03/24	茨子地震	6.8	70	21	67	21	55	33	183	
3	2003/05/26	宮城県沖地震	7.0	2	32	207	92	86	51	1,143	
4	2003/07/26	宮城県北部の地震	6.1	1,276	7	28	14	30	16	177	
5	2003/09/26	十勝沖地震	8.0	116	582	357	726	1,293	1,089	2,173	
6	2004/10/23	新潟県中越地震	6.7	3,175	4,048	5,019	4,914	2,584	2,273	10,581	
7	2005/03/20	福岡県西方沖地震	6.5	144	19	20	14	46	29	59	
8	2007/03/25	能登半島地震	6.6	686	1,907	2,255	2,063	729	846	7,087	
9	2007/07/16	新潟県中越沖地震	6.7	1,331	5,075	1,774	4,296	1,010	1,701	6,428	
10	2008/06/14	岩手・宮城内陸地震	7.0	30	20	170	62	95	45	995	
11	2009/08/11	駿河湾の地震	6.3	0	22	53	37	68	36	257	
12	2011/03/11	東北地方太平洋沖地震(内陸)	9.0	8,467	3,066	7,609	5,125	6,219	4,224	34,579	
13	2014/11/22	長野県北部の地震	6.3	77	30	8	8	5	4	51	
14	2016/04/16	熊本地震	7.0	8,425	8,595	6,230	7,128	5,616	4,189	18,640	
15	2016/10/21	鳥取県中部の地震	6.16	18	10	45	35	5	5	332	
誤差指標					E ₁	1,776	943	1,380	1,045	1,623	7,844
					E ₂	0.988	1.073	1.063	1.058	1.034	1.387

（全半壊）

No	発生日月 (yy/mm/dd)	地震名	Mw	実被害	本検討						中防 (2012)
					PGV	計測震度	SI値	Sa			
								①	②		
1	2000/10/06	鳥取県西部地震	6.8	3,536	1,832	2,609	2,735	2,673	3,194	16,177	
2	2001/03/24	茨子地震	6.8	844	246	361	263	603	1,523	7,550	
3	2003/05/26	宮城県沖地震	7.0	23	323	1,184	849	540	1,746	13,626	
4	2003/07/26	宮城県北部の地震	6.1	5,085	105	183	280	410	635	2,604	
5	2003/09/26	十勝沖地震	8.0	484	3,482	2,426	4,524	6,621	7,549	19,421	
6	2004/10/23	新潟県中越地震	6.7	16,985	10,759	13,975	13,423	14,902	10,112	32,371	
7	2005/03/20	福岡県西方沖地震	6.5	497	243	134	185	359	954	1,679	
8	2007/03/25	能登半島地震	6.6	2,426	4,820	9,107	6,099	3,922	4,313	24,014	
9	2007/07/16	新潟県中越沖地震	6.7	7,041	11,380	7,794	11,027	6,206	5,240	20,185	
10	2008/06/14	岩手・宮城内陸地震	7.0	176	280	1,002	795	918	1,552	7,043	
11	2009/08/11	駿河湾の地震	6.3	6	217	383	396	571	815	3,894	
12	2011/03/11	東北地方太平洋沖地震(内陸)	9.0	60,075	17,022	39,569	28,600	39,227	42,311	184,629	
13	2014/11/22	長野県北部の地震	6.3	213	164	56	78	56	116	748	
14	2016/04/16	熊本地震	7.0	41,712	22,483	25,153	26,231	36,700	24,213	67,749	
15	2016/10/21	鳥取県中部の地震	6.16	330	113	333	347	31	78	2,600	
誤差指標					E ₁	12,447	7,212	9,360	5,937	7,080	34,536
					E ₂	0.757	0.839	0.805	0.830	0.896	1.294

※黄色欄は実被害に最も整合した結果、青色欄は実被害の0.5~2.0倍以内の結果を示す。

表15 広域検証結果
（全壊）

No	発生日月 (yy/mm/dd)	地震名	Mw	実被害	本検討						中防 (2012)
					PGV	計測震度	SI値	Sa			
								①	②		
1	2000/10/06	鳥取県西部地震	6.8	435	584	836	568	371	245	3,075	
2	2001/03/24	茨子地震	6.8	70	21	57	21	44	29	183	
3	2003/05/26	宮城県沖地震	7.0	2	27	146	66	60	39	1,143	
4	2003/07/26	宮城県北部の地震	6.1	1,276	5	19	9	20	11	177	
5	2003/09/26	十勝沖地震	8.0	116	454	287	567	1,003	827	2,173	
6	2004/10/23	新潟県中越地震	6.7	3,175	4,060	5,274	4,912	2,539	2,239	10,581	
7	2005/03/20	福岡県西方沖地震	6.5	144	17	18	14	35	23	59	
8	2007/03/25	能登半島地震	6.6	686	1,983	2,540	2,175	744	874	7,087	
9	2007/07/16	新潟県中越沖地震	6.7	1,331	5,061	1,808	4,254	954	1,637	6,428	
10	2008/06/14	岩手・宮城内陸地震	7.0	30	14	119	41	61	29	995	
11	2009/08/11	駿河湾の地震	6.3	0	21	46	33	55	31	257	
12	2011/03/11	東北地方太平洋沖地震(内陸)	9.0	8,460	2,301	5,895	3,753	4,692	3,178	34,579	
13	2014/11/22	長野県北部の地震	6.3	77	26	7	7	4	3	51	
14	2016/04/16	熊本地震	7.0	8,425	8,234	6,110	6,657	5,133	3,843	18,640	
15	2016/10/21	鳥取県中部の地震	6.16	18	10	48	35	5	5	332	
誤差指標					E ₁	1,934	1,206	1,652	1,366	1,863	7,845
					E ₂	1.004	1.066	1.061	1.049	1.042	1.387

（全半壊）

No	発生日月 (yy/mm/dd)	地震名	Mw	実被害	本検討						中防 (2012)
					PGV	計測震度	SI値	Sa			
								①	②		
1	2000/10/06	鳥取県西部地震	6.8	3,536	2,211	3,310	3,195	3,053	3,389	16,177	
2	2001/03/24	茨子地震	6.8	844	246	349	258	508	1,236	7,550	
3	2003/05/26	宮城県沖地震	7.0	23	267	905	615	402	1,188	13,626	
4	2003/07/26	宮城県北部の地震	6.1	5,085	79	140	197	283	426	2,604	
5	2003/09/26	十勝沖地震	8.0	484	2,681	1,970	3,475	5,154	5,687	19,421	
6	2004/10/23	新潟県中越地震	6.7	16,985	10,841	14,483	13,500	14,985	9,996	32,371	
7	2005/03/20	福岡県西方沖地震	6.5	497	212	129	169	300	759	1,679	
8	2007/03/25	能登半島地震	6.6	2,426	5,036	10,208	6,443	4,089	4,435	24,014	
9	2007/07/16	新潟県中越沖地震	6.7	7,041	11,416	8,030	11,017	6,101	5,054	20,185	
10	2008/06/14	岩手・宮城内陸地震	7.0	176	193	742	551	630	1,043	7,043	
11	2009/08/11	駿河湾の地震	6.3	6	206	355	354	493	674	3,894	
12	2011/03/11	東北地方太平洋沖地震(内陸)	9.0	60,075	13,488	32,915	22,434	31,026	33,388	184,629	
13	2014/11/22	長野県北部の地震	6.3	213	146	51	68	48	96	748	
14	2016/04/16	熊本地震	7.0	41,712	21,557	25,086	25,132	35,500	22,743	67,749	
15	2016/10/21	鳥取県中部の地震	6.16	330	116	369	364	31	76	2,600	
誤差指標					E ₁	13,348	8,603	10,862	7,900	8,871	34,536
					E ₂	0.762	0.828	0.789	0.811	0.853	1.294

（一部損壊以上）

No	発生日月 (yy/mm/dd)	地震名	Mw	実被害	本検討						中防 (2012)
					PGV	計測震度	SI値	Sa			
								①	②		
1	2000/10/06	鳥取県西部地震	6.8	22,080	46,548	42,382	43,439	36,426	40,814		
2	2001/03/24	茨子地震	6.8	49,838	24,714	46,922	25,274	75,315	104,080		
3	2003/05/26	宮城県沖地震	7.0	2,427	45,887	52,290	38,552	29,754	93,003		
4	2003/07/26	宮城県北部の地震	6.1	16,061	17,077	10,734	15,733	18,773	22,458		
5	2003/09/26	十勝沖地震	8.0	2,064	139,803	63,590	72,157	64,593	67,401		
6	2004/10/23	新潟県中越地震	6.7	122,667	85,573	79,820	75,171	68,452	93,447		
7	2005/03/20	福岡県西方沖地震	6.5	9,835	26,435	10,124	15,729	21,508	16,203		
8	2007/03/25	能登半島地震	6.6	29,384	53,760	60,820	47,687	45,036	38,602		
9	2007/07/16	新潟県中越沖地震	6.7	44,674	60,800	49,279	52,512	52,798	55,350		
10	2008/06/14	岩手・宮城内陸地震	7.0	2,697	34,357	20,630	26,631	29,318	29,188		
11	2009/08/11	駿河湾の地震	6.3	8,678	19,283	19,462	16,330	20,700	36,855		
12	2011/03/11	東北地方太平洋沖地震(内陸)	9.0	551,425	690,415	597,523	511,018	811,612	930,482		
13	2014/11/22	長野県北部の地震	6.3	1,839	5,418	3,279	3,766	3,392	4,736		
14	2016/04/16	熊本地震	7.0	204,058	180,878	170,361	160,512	179,488	170,699		
15	2016/10/21	鳥取県中部の地震	6.16	15,409	7,602	9,517	7,543	2,706	8,957		
誤差指標					E ₁	55,184	29,778	30,758	72,214	104,321	
					E ₂	0.690	0.592	0.600	0.612	0.674	

※黄色欄は実被害に最も整合した結果、青色欄は実被害の0.5~2.0倍以内の結果を示す。

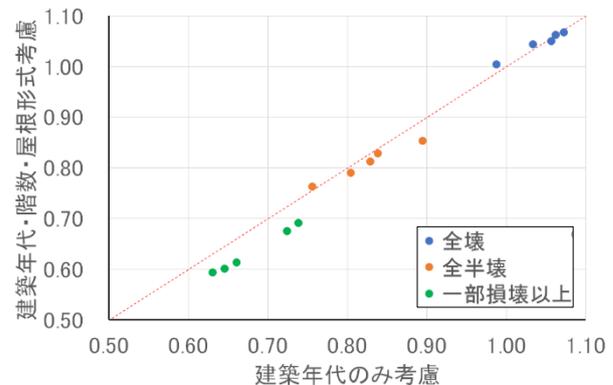


図11 本検討で作成した被害関数において階数・屋根形式を考慮した場合としない場合の誤差指標E₂の比較

なお、前震で震度7を観測し、強い余震も多かった熊本地震の結果でも全半壊棟数の予測値は実被害の半分~4分

の3程度に対し、一部損壊以上は実被害の5分の4以上となっており、宮城県北部の地震と同様の傾向が伺える。

表16 宮城県北部の地震の観測点周辺の被害率の検証

観測点名	計測震度	建物棟数			全壊率			全半壊率			一部損壊以上率	
		旧耐震	新耐震	計	実被害	本検討	中防	実被害	本検討	中防	実被害	本検討
矢本町矢本	6.2	66	86	152	7.9%	2.7%	15.4%	40.8%	16.9%	38.9%	55.9%	75.3%
鳴瀬町小野	6.0	17	20	37	2.7%	0.6%	6.4%	35.1%	5.5%	27.3%	86.5%	61.4%
鹿島台町平渡	5.9	113	51	164	0.0%	0.4%	5.0%	4.3%	3.6%	29.7%	68.9%	59.4%
宮城松山町千石	5.4	14	9	23	0.0%	0.01%	0.04%	0.0%	0.0%	2.5%	4.3%	15.1%
宮城田尻町沼部	5.1	43	24	67	0.0%	0.0007%	0.0008%	0.0%	0.0%	0.2%	3.0%	1.8%
古川市三日町	5.0	148	30	178	0.0%	0.0004%	0.0002%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.4%
宮城河南町前谷地	5.7	30	21	51	15.7%	0.1%	0.9%	25.5%	0.6%	12.5%	37.3%	38.9%
松生町中津山	5.5	39	23	62	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	4.8%	0.0%	22.7%
石巻市泉町	5.2	16	22	38	0.0%	0.001%	0.003%	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	3.8%
小牛田町北浦	5.5	105	33	138	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%	5.7%	0.0%	24.9%
湧谷町新町	5.8	318	76	394	0.0%	0.2%	2.8%	0.0%	1.9%	24.9%	7.6%	53.7%
誤差指標	E ₁	-	-	-	-	0.050	0.054	-	0.137	0.119	-	-
	E ₂	-	-	-	-	0.972	1.288	-	0.966	1.868	-	-

※黄色欄は本検討の計測震度の被害関数と中防の被害関数のうち、実被害に近いものを示す。

一方、東北地方太平洋沖地震でも全半壊棟数の予測値は実被害の5分の1～2分の1程度に対し、一部損壊以上棟数は実被害と同等か地震動指標によってはやや過大評価となった。実被害の大きい岩手県・宮城県・福島県・茨城県・栃木県・千葉県の実半壊棟数の予測値を確認すると(表17)、岩手県・宮城県ではほぼ整合する結果が得られたが、福島県や千葉県でかなり過小評価する結果となっていた。千葉県に関しては液状化被害の影響と考えられるが、福島県については、4月11日に発生した福島県南東部の地震の影響や地震動分布・建物データ・被害関数の精度等、様々な問題点が重なった結果と考えられる。

表17 東北地方太平洋沖地震(内陸部)における都道府県別住家被害の予測値と実績値の比較

	全壊			全半壊			一部損壊以上				
	実被害	本検討	中防	実被害	本検討	中防	実被害	本検討	中防		
岩手県	147	214	237	2,424	1,846	998	1,465	14,732	11,000	22,507	27,077
宮城県	1,402	1,073	2,687	23,722	10,805	5,542	10,282	91,875	40,856	66,610	70,018
福島県	5,216	51	154	5,256	23,034	465	1,184	38,528	101,422	47,581	60,160
茨城県	989	272	1,211	24,391	12,455	2,269	10,009	108,053	144,889	166,895	193,495
栃木県	261	100	612	3,985	2,379	819	4,041	22,760	73,850	64,419	77,805
千葉県	401	38	68	22	9,024	417	528	8,655	47,823	96,394	62,691

(3) 屋根形式を反映した効果

(2)項の広域検証において、中防の被害関数よりも予測精度が改善されたことを示すとともに、PGV等の一部の地震動指標を除くと建物階数・屋根形式の属性を考慮した被害関数のほうが誤差指標E₂は小さくなった結果を示した。検証対象とした15地震において、建物階数・屋根形式を考慮した結果、予測精度が改善した地震は2003年宮城県沖の地震、2003年十勝沖地震、2008年岩手宮城内陸地震、2009年駿河湾の地震などで、東日本の地震が多い。これらの地域では瓦葺住宅の割合は他地域と比較して低く、屋根形式を考慮することで建物耐力が相対的に高くなる点を被害予測に反映したことも予測値が実被害に近づいた一因として考えられる。

一般論として、何らかの予測モデルを構築した場合、予測精度が担保されるのであれば、モデルの変数の数は少ない方が好ましい。中防は建築年代区分別被害関数でシンプルではあるが、被害関数の形状はなだらかで、そこには多くのばらつきを含んでいると考えられる。本検討で新たに属性を追加した屋根形式や建物階数は建物外観から容易に判断可能かつ耐震評点分布に異なる傾向も見られたこと、2016年熊本地震の益城町において(新耐震基準も含め)被害が大きかった木造住宅の多くは瓦葺であったこと³⁵⁾、表13からは瓦葺建物の分布には地域性があり同じ建築年代であっても建物の耐力分布に違いが

あると推定されること等から、被害予測の改善を図るにはこれらの属性を区別した被害関数の検討が必要と考えられる。

中防のように建築年代区分しか持たない被害関数と比較すると、本検討で作成した被害関数は建物階数や屋根形式が被害予測に反映されるため、より詳細な情報が被害予測に反映される点では地域内の建物脆弱性を反映した評価が可能となったと考えられる。以下では熊本地震の益城町を例として示す。

具体的には、図12に示した益城町役場の南側と西側の区画の建物を対象に建物登記情報³⁰⁾を収集・整理し、木造建物の屋根形式と被害の関係について整理した。対象となった木造建物棟数は71棟でこのうち建築年代が判明した建物は69棟であった。なお、外観から明らかに木造建物と推察される建物であっても登記情報と関連付けられない場合は本検討の対象外とした。表18には建物建築年代-屋根形式-被害の関係を示した。なお、被害は文献³⁾による航空写真による判読結果である。対象地域の木造建物は、2000年築以前は瓦葺が多く、2001年以降築では瓦葺以外の建物が多くを占める。1981~2000年築では瓦葺が23棟、瓦葺以外が6棟あるが、その被害率は瓦葺のほうが明らかに高い。本検討で作成した被害関数による被害率予測値(表19)でも、益城町震度計の計測震度6.78に対応する全壊率は、瓦葺が98.4%に対し瓦葺以外が59.4%と2倍近くの差があり、屋根形式で表現される建物の脆弱性の違いを詳細に評価することが可能である。今日、航空写真がweb上で無料公開されており、建物の屋根形式に関する情報は建物建築年代よりも容易に取得可能な状況にある。屋根形式の属性を保有する建物データを整備し、本検討で作成した被害関数を利用することで、建物の脆弱性の地域性をより反映した被害予測が可能となると考えられる。

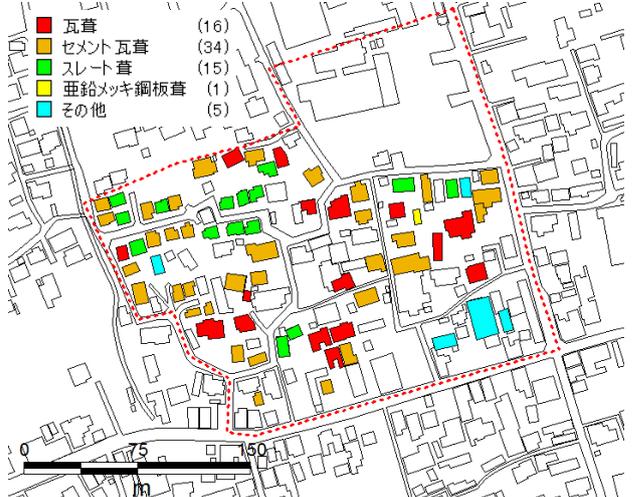


図12 検討対象地域(益城町)と木造建物の屋根形式
※凡例の()内の値は棟数を示す

表18 建築年代・屋根形式・被害の関係

建築年代	屋根形式		全体	被害無	被害小	被害中	被害大
			棟数	割合	棟数	割合	棟数
~1980	瓦葺	棟数	24	3	3	10	8
		割合	100.0%	12.5%	12.5%	41.7%	33.3%
	瓦葺以外	棟数	1	1	0	0	0
		割合	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
1981~2000	瓦葺	棟数	23	1	5	8	9
		割合	100.0%	4.3%	21.7%	34.8%	39.1%
	瓦葺以外	棟数	6	5	1	0	0
		割合	100.0%	83.3%	16.7%	0.0%	0.0%
2001~	瓦葺	棟数	1	1	0	0	0
		割合	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	瓦葺以外	棟数	14	9	5	0	0
		割合	100.0%	64.3%	35.7%	0.0%	0.0%
計			69	20	14	18	17

表19 本検討で作成した被害関数による予測値(全壊率)

	瓦葺(桟葺)	瓦葺以外
1971~80	97.5%	91.8%
1991~2000	98.4%	59.4%
2001~10	81.6%	59.4%

7. まとめと課題

本検討では地震リスク評価における建物被害関数の精度向上を目的とし、被害関数の検討を行った。得られた成果を挙げると以下のとおりである。

- ① 木耐協の耐震評点データを利用し、建築年代・建物階数・屋根形式の属性毎に耐震評点分布を推定した。この評点分布と観測点周辺の建物属性から、各観測点周辺の建物の耐震評点分布を推定し、地震動・被害データから属性毎に損傷度関数を推定した。得られた損傷度関数と評点分布から建築年代・階数・屋根形式別の木造建物被害関数を構築した。
- ② 作成した被害関数は、過去の被害地震における観測点周辺被害状況の再現性を確認するとともに、広域検証の結果から過去の被害地震全体の数量を、ある程度の精度で予測できること、中央防災会議(2012)⁹⁾の予測値よりも誤差が少ないことを確認した。加えて、建物階数・屋根形式を考慮することで、東日本で発生した地震を中心に予測値が実測値に近くなることを示した。また、同じ建築年代であっても実際に屋根形式の違いによって被害程度に差が出ており、本検討で作成した被害関数は屋根形式の違いによる被害率の相違を表現できることを示した。
- ③ 広域検証を実施するため、構造・屋根形式・建物階数・建築年代区分の属性を保有する住宅建物データを作成した。その結果、建築年代や地域によって瓦葺建物の割合が変化していることを定量的に明らかにした。

本検討を踏まえた今後の課題を示すと以下の通りである。

- ① 本検討ではPGV、計測震度、SI値、加速度応答スペクトルの周期帯の平均値といくつかの指標で被害関数を作成したが、ひとつの指標に特定することはできなかった。
- ② 本検討で作成した被害関数による全壊・全半壊被害の予測値は、被害の大きな地震において実被害をやや過小評価する場合もあり、被害データの収集・整備により更なる精度向上が必要である。
- ③ 宮城県北部の地震においては、観測点周辺の被害棟数は概ね整合しているが一部損壊と半壊の割合が実態と大きく異なる結果となった。これらの地点では前震や強い余震を観測しており、複数回の地震が被害予測に及ぼす影響について検討する必要がある。
- ④ 損傷度関数を作成するにあたり、観測点周辺の評点分布を推定しているが、実データとして観測点周辺で被害と関連付けられた屋根形式の属性を保有する被害データはほとんど利用できておらず、今後の被害調査の際にこれらのデータの取得方法について、事前に検討しておく必要がある。

建物階数や屋根形式は航空写真からの判読は容易であり、AI等の利用で大規模にデータを整理することが可能と考えられる。屋根形式の属性を保有する建物データを整備し、本検討で作成したような屋根形式を考慮した被害関数を用いて被害予測を行うことができれば、地域の建物の実態を考慮した被害予測をより精度よく行うこと

が可能となると考えられる。

謝辞

本研究は国立研究開発法人防災科学技術研究所の「ハザード・リスク評価に関する研究」の一環として行われたものである。また、国立研究開発法人防災科学技術研究所の K-NET・KiK-net、気象庁及び自治体、鉄道総合技術研究所、JR 東日本設備部から提供いただいた観測波形、及び日本木造住宅耐震補強事業者協同組合の耐震診断データを利用させて頂くとともに、2名の査読者より有益な助言を頂いた。記して謝意を表します。

補注

(1) 本検討では損傷度関数を作成する際、観測点周辺の対象建物全体の耐震評点分布と実被害率から着目した被害レベルが発生してしまう上限評点を推定している。このため、設定した属性区分毎の被害量は必要なく、観測点全体での被害量と観測点周辺の対象建物の属性区分毎の建物棟数さえあれば、損傷度関数を作成するためのデータとして利用可能である。このような理由で、東北地方太平洋沖地震のデータでは、実被害データは門馬ほか(2014)¹²⁾、建物データは林ほか(2013)¹³⁾、飯塚ほか(2013)¹⁴⁾を利用している。

(2) 表 9 にあるように、全半壊・一部損壊以上に関しては、誤差指標 $E_1 \cdot E_2$ が最小となる周期帯が異なった結果、2つの周期帯を相関が高い周期帯 (Sa①・Sa②) として、以降の検討に利用している。一方、全壊に関しては $E_1 \cdot E_2$ が最小となる周期帯がともに「1.0-2.0s」であったものの、「1.0-1.5s」の E_1 の値も 0.05324 と、「1.0-2.0s」の E_1 の値 0.05227 にかなり近い値であったことから、「1.0-1.5s」も全壊被害と相関の高い周期帯として以降の検討に加えた。

(3) 本検討で被害関数を作成する際、翠川ほか(2011)⁷⁾で観測波形がなかったため利用できなかった観測点周辺の建物被害データ(28地点)を利用して、本検討で作成した計測震度の被害関数(建築年代区分のみ利用)と中防の被害関数による予測値を実測値と比較した(表 20)。その結果、全壊では 22 地点、全半壊では 23 地点で本検討の被害関数による予測値のほうが実被害に近い結果となるとともに、誤差指標も小さくなる結果となっており、本検討の被害関数はある一定の精度改善を果たしたと考えられる。

表 20 観測点周辺の建物被害データを利用した検証

地震名	観測点名	計測震度	建物棟数			全壊率			全半壊率		
			旧耐震	新耐震	計	実被害	本検討	中防	実被害	本検討	中防
2003年 宮城県北部 の地震	矢本町大木	6.2	66	86	152	7.9%	2.7%	15.4%	40.8%	16.9%	38.9%
	鳴瀬町小野	6.0	17	20	37	2.7%	0.6%	6.4%	35.1%	5.5%	27.3%
	鹿島台町平渡	5.9	113	51	164	0.0%	0.4%	5.0%	4.3%	3.6%	29.7%
	宮城松山町千石	5.4	14	9	23	0.0%	0.01%	0.04%	0.0%	0.0%	2.5%
	宮城田原町沼部	5.1	43	24	67	0.0%	0.0007%	0.0008%	0.0%	0.0%	0.2%
	宮城河南町前谷地	5.7	30	21	51	15.7%	0.1%	0.9%	25.5%	0.6%	12.5%
	桃生町中津山	5.5	39	23	62	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	4.8%
小牛田町北浦	5.5	105	33	138	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%	5.7%	
2004年 新潟県中越 地震	越路町浦	5.6	27	46	73	0.0%	0.0%	0.2%	5.5%	0.2%	5.1%
2005年 福岡県西方 沖地震	福岡東区東浜	5.5	26	19	45	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	4.4%
	前原市前原西	5.5	46	23	69	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	5.1%
	須恵町須恵	5.3	44	54	98	0.0%	0.002%	0.010%	0.0%	0.0%	0.9%
	春日市原町	5.1	48	35	83	0.0%	0.0006%	0.0008%	0.0%	0.0%	0.2%
	二丈町深江	5.0	16	28	44	0.0%	0.00019%	0.00018%	0.0%	0.0%	0.1%
	北茂安町東尾	5.6	42	15	57	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%	0.3%	9.6%
2007年 能登半島地 震	白石町有明	5.1	25	16	41	0.0%	0.0007%	0.0008%	0.0%	0.0%	0.2%
	磐城市戸辺町戸辺	5.1	30	8	38	0.0%	0.0008%	0.0009%	0.0%	0.0%	0.3%
	輪島市門前町走出	6.4	54	12	66	9.1%	16.6%	48.6%	40.9%	50.1%	77.4%
	穴水町大町	6.3	109	46	155	14.8%	7.6%	32.9%	30.3%	32.8%	63.5%
	中能登町能登郡下	5.7	93	45	138	0.0%	0.1%	1.1%	0.0%	0.7%	14.2%
	輪島市河井町	5.5	157	27	184	0.5%	0.0%	0.2%	2.2%	0.1%	6.4%
	志賀町志賀千古	5.5	63	51	114	0.0%	0.0%	0.1%	2.6%	0.1%	4.3%
能登町松波	5.5	126	38	164	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%	5.8%	
2007年 新潟県中越 沖地震	珠洲市庄内町	5.1	50	13	63	0.0%	0.0008%	0.0009%	0.0%	0.0%	0.3%
	上越市五智	5.2	100	63	163	0.0%	0.001%	0.003%	0.0%	0.0%	0.5%
	十日町市高山	5.0	22	14	36	0.0%	0.0003%	0.0002%	0.0%	0.0%	0.1%
	飯山市飯山福寿町	5.0	25	14	39	0.0%	0.0003%	0.0002%	0.0%	0.0%	0.1%
	福渡町柏原東裏	5.0	43	27	70	0.0%	0.0003%	0.0002%	0.0%	0.0%	0.1%
誤差指標	E_1	-	-	-	-	0.037	0.069	-	0.090	0.116	
E_2	-	-	-	-	-	0.6643	0.9855	-	0.8378	1.7149	

※黄色欄は本検討の計測震度の被害関数と中防の被害関数のうち、実被害に近いものを示す。

(4) 文献 29)の調査報告は住宅金融公庫によるものだが、後継組織である住宅金融支援機構の web サイトに掲載されている。

参考文献

- 1) 日本消防協会：阪神淡路大震災誌，1996.
- 2) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法(改訂版)，2004.
- 3) 門馬直一ほか：空中写真判読による熊本地震の建物被害の特徴，JpGU-AGU Joint Meeting 2017，HCG37，pp.10，2017.
- 4) Google Maps：<https://maps.google.com/>
- 5) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要，2012.
- 6) 村尾修・山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく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，第 65 巻，第 527 号，pp.189-196，2000.
- 7) 翠川三郎ほか：兵庫県南部地震以降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討，日本地震工学会論文集，第 11 巻，第 4 号，pp.34-47，2011.
- 8) 岡田成幸・高井伸雄：木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用：地震動入力を確定的に扱う場合，日本建築学会構造系論文集，第 69 巻，第 582 号，pp.31-38，2004.
- 9) 中嶋唯貴・岡田成幸：時間軸上の死者低減率最大化を主目標とした木造住宅耐震化戦略の策定：東海・東南海連動型地震を対象とした東海 4 県への適用事例，日本建築学会構造系論文集，第 623 号，pp.79-86，2008.
- 10) 下村博之ほか：新潟県中越地震と岩手・宮城内陸地震の震度分布と建物被害の関係，日本地震工学会・大会-2016，P2-23，2016.
- 11) 西村綾乃：2016 年熊本地震における益城町の建物被害分布に及ぼす地盤震動特性の影響に関する研究，2016，<http://www.hues.kyushu-u.ac.jp/education/student/pdf/2016/2HE15017W.pdf>，(2017 年 8 月 1 日確認)
- 12) 門馬直一ほか：東北地方太平洋沖地震の建物被害情報データベースの構築，第 14 回日本地震工学シンポジウム，2014.
- 13) 林佑樹ほか：2011 年東北地方太平洋沖地震の宮城県における強震観測点周辺の被害状況と地震動との対応性，日本地震工学会論文集，第 13 巻，第 5 号，2013.
- 14) 飯塚裕暁ほか：2011 年東北地方太平洋沖地震の茨城、栃木、福島県における強震観測点周辺の被害状況と地震動との対応性，日本地震工学会論文集，第 13 巻，第 5 号，2013.
- 15) 建設省建築研究所：平成 7 年兵庫県南部地震被害調査最終報告書 第 I 編 中間報告書以降の調査分析結果，1996.
- 16) 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.
- 17) 翠川三郎・藤本一雄：計測震度と住家被害率の関係—罹災調査結果を用いた検討—，日本地震工学会論文集，第 2 巻，第 2 号，2002.
- 18) 境有紀ほか：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 69 巻，第 585 号，pp.71-76，2004.
- 19) 末富岩雄ほか：空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討，第 28 回土木学会地震工学研究発表会報告集，No.27，2005.
- 20) Wakamatsu, K. and M. Matsuoka：Nationwide 7.5-Arc-Second Japan Engineering Geomorphologic Classification Map and Vs30 Zoning, Journal of Disaster Research, 8, pp.904-911,2013.
- 21) 藤本一雄・翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係，日本地震工学会論文集，第 6 巻，第 1 号，pp.11-22，2006.
- 22) T. Kanno et al.：A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp.879-897，2006.
- 23) 国土地理院：防災関連 web ページ，<http://www.gsi.go.jp/bousai.html>，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 24) 小澤拓：地震に伴う地殻変動の検出を目的とした緊急観測データの解析，平成 26 年度地震 SAR 解析 WG 課題別成果報告票，2014.
- 25) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET,KiK-net)，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 26) 気象庁：強震観測結果，<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 27) 土木学会観測地震記録ダウンロードサイト：http://committees.jscs.or.jp/jscs_download/，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 28) 藤原広行ほか：全国を対象とした地震リスク評価手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第 415 号，2018.
- 29) 住宅金融公庫：住宅建築・主要データ，https://www.jhf.go.jp/about/research/tech_data.html，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 30) 民事法務協会：登記情報提供サービス，<http://www1.touki.or.jp/>，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 31) 石川県瓦工事協同組合：瓦屋根のウソ・ほんとは，<http://www.kawara-ishikawa.jp/faq/a0003.html>，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 32) 福井市：福井烈震誌，1978.
- 33) 総務省統計局：住宅・土地統計調査，<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200522>，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 34) 総務省消防庁：災害情報，<http://www.fdma.go.jp/>，(2018 年 8 月 1 日確認).
- 35) 清水智ほか：建物登記情報を利用した被害予測・分析のための建物データ整備，第 15 回日本地震工学シンポジウム，pp.2934-2943，2018.

(原稿受付 2018.8.24)

(登載決定 2019.1.12)