

# 罹災証明の被害の定義に基づいた 広域的な被害予測のための応答スペクトルの建物被害関数の検討 Study of the Fragility Function of the Response Spectrum based on the definition of disaster victim certificate

○清水 智<sup>1</sup>, 藤原 広行<sup>2</sup>, 中村 洋光<sup>2</sup>, 森川 信之<sup>2</sup>, 佐伯 琢磨<sup>2</sup>,  
小丸 安史<sup>1</sup>, 若浦 雅嗣<sup>1</sup>, 時実 良典<sup>1</sup>, 早川 譲<sup>3</sup>  
Satoshi SHIMIZU<sup>1</sup>, Hiroyuki FUJIWARA<sup>2</sup>, Hiromitsu NAKAMURA<sup>2</sup>,  
Nobuyuki MORIKAWA<sup>2</sup>, Takuma SAEKI<sup>2</sup>, Yasushi KOMARU<sup>1</sup>,  
Masatsugu WAKAURA<sup>1</sup>, Yoshinori TOKIZANE<sup>1</sup>, Yuzuru HAYAKAWA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 応用アール・エム・エス株式会社 災害リスク事業部

Risk Management Dept., OYO RMS Corporation

<sup>2</sup> 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門

Integrated Research on Disaster Risk Reduction Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience.

<sup>3</sup> 応用地質株式会社 社会システム事業部

Social System Business Division, OYO Corporation.

Fragility function based on definition of the disaster victim certificate is important from standpoint of the damage statics and the seismic risk management. Furthermore, it is necessary to take account of the accuracy of ground motion prediction and the correlation between building damage and period of response spectrum due to improvement of the damage estimation. Therefore, we tried to create the fragility function of the response spectrum based on the damage data defined by the disaster victim certificate. Additionally, this function was validated by the comparing with the predicted number of collapsed buildings to actual number in past earthquakes.

**Keywords :** Fragility Function, Response Spectrum, Disaster Victim Certificate

## 1. はじめに

建物の大きな被害は速度応答スペクトルの周期 1~2 秒と相関が高いことが既往研究で指摘されている。新井・境(2011)<sup>1)</sup>では速度応答スペクトルの特定の周期帯の平均値を説明変数とした建物の構造的被害を示す建物全壊率関数を提案している。しかし、実際の被害や被災後の支援施策等は自治体の罹災証明に基づき実施されるため、建物の構造的被害よりも罹災証明による被害を示す被害関数の方が国・自治体の地震被害想定やリスクマネジメントに適用しやすい。

また、強震観測点周辺の建物被害データを元に建物被害関数を構築することも出来るが、観測記録の地震動のみから広域的被害量を面的に予測することはなく、実際には、シミュレーションで面的に推定した地震動や観測記録を補間して推定した地震動に基づき被害量を予測する。そのため、地震全体の被害量を適切に見積もるためには、これら面的な地震動予測の精度もある程度は考慮に入れた被害関数の構築も重要であろう。

そこで、本稿では、①罹災証明の被害の定義に基づく、②広域的な被害予測に適した、③応答スペクトルの建物被害関数の構築を試みた。

## 2. 建物被害と相関の高い周期帯の検討

新井・境(2011)<sup>1)</sup>では建物の構造的被害に基づく全壊被

害と相関の高い周期帯が 1.0~1.5 秒であるとしているが、被災度の定義を罹災証明ベースにした場合も同様の結果になるか検討する必要がある。そこで、表 1 に示した過去の被害地震における観測点周辺の罹災証明に基づく建物被害データと観測点の疑似速度応答スペクトル (h=5%) から、建物被害と相関の高い周期帯を被災度毎に求めた。観測点周辺の建物被害データは 2013 年淡路島付近の地震は三浦ほか(2013)<sup>2)</sup>を、その他の地震は翠川ほか(2011)<sup>3)</sup>を利用した。

表 1 検討に用いた地震毎の観測点数

No	地震名	M	地点数	
			木造	非木造
1	2003年宮城県北部の地震	6.4	3	3
2	2004年新潟県中越地震	6.8	22	11
3	2005年福岡県西方沖地震	7.0	9	8
4	2007年能登半島地震	6.9	5	4
5	2007年新潟県中越沖地震	6.8	25	22
6	2008年岩手宮城内陸地震	7.2	17	10
7	2008年岩手県沿岸北部地震	6.8	22	16
8	2013年淡路島付近の地震	6.3	7	0
計			110	74

表 2 検討対象とした周期帯

周期0.1~0.5秒	周期1.5~2.0秒	周期0.5~1.5秒
周期0.5~1.0秒	周期2.0~2.5秒	周期1.0~2.0秒
周期1.0~1.5秒	周期0.1~1.0秒	周期1.5~2.5秒

具体的には、表 2 に示した疑似速度応答スペクトルの周期帯の平均値を地震別観測点別に求めた。この平均値

を説明変数、各観測点周辺の建物被害率を被説明変数とした回帰式を作成した。ただし、表 1 に示した観測点のうち、建物被害率がゼロの地点や建物棟数が 100 棟未満の地点は対象外とした。回帰式の形状は式(1)で示す対数正規分布の累積分布関数とし、決定係数  $R^2$  を求めた(表 3 参照)。

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right) \quad (1)$$

ここで、 $F(x)$ は被害率、 $x$  は疑似速度応答スペクトルの周期帯の平均値、 $\Phi[\cdot]$ は正規分布の累積分布関数、 $\lambda$ と $\xi$ は対数正規分布のパラメータを示す。

この結果、全壊・全半壊ともに、木造建物で周期 0.5~1.5 秒、非木造建物で周期 1.0~2.0 秒で  $R^2$  が最も大きくなった。そこで、被害関数の説明変数を、これらの疑似速度応答スペクトルの周期帯の平均値とすることとした。

表 3 各周期帯の決定係数一覧

周期帯 [s]	全壊						全半壊					
	木造			非木造			木造			非木造		
	$\lambda$	$\xi$	$R^2$	$\lambda$	$\xi$	$R^2$	$\lambda$	$\xi$	$R^2$	$\lambda$	$\xi$	$R^2$
0.1-0.5	5.23	0.75	0.413	-18.28	-14.19	0.003	4.63	0.57	0.457	11.26	7.40	0.002
0.5-1.0	5.83	0.60	0.540	9.37	2.68	0.050	5.40	0.51	0.482	6.03	1.03	0.067
1.0-1.5	6.70	1.03	0.713	7.87	1.62	0.909	5.95	0.86	0.656	5.93	0.70	0.974
1.5-2.0	7.44	1.48	0.499	8.42	1.98	0.973	6.32	1.19	0.499	6.10	0.92	0.907
2.0-2.5	7.18	1.48	0.534	9.55	2.78	0.795	6.05	1.19	0.537	6.35	1.37	0.666
0.1-1.0	5.48	0.56	0.575	12.44	4.74	0.017	5.07	0.47	0.542	6.19	1.46	0.037
0.5-1.5	6.13	0.71	0.769	6.98	1.10	0.771	5.61	0.60	0.707	5.65	0.47	0.859
1.0-2.0	7.02	1.22	0.607	8.00	1.70	0.998	6.11	1.00	0.585	5.99	0.77	0.986
1.5-2.5	7.30	1.46	0.524	8.90	2.31	0.893	6.18	1.17	0.527	6.21	1.11	0.788

※表中の黄色は各被災度・構造で最も  $R^2$  が大きくなった周期帯を示す。

### 3. 被害関数の作成

#### (1) 被害関数の作成 (初期モデル)

建物の耐震性能が建築時の建築基準法の耐震規定により異なるため、建物被害関数は建築年代区分毎に設定されることが一般的である。しかし、強震観測点周辺の罹災証明に基づく建物被害データで建築年代区分の情報が得られたデータは少ない。特に、非木造建物では実被害が少なく被害関数の構築に十分な数のデータが得られていない。また、構築する被害関数は、被害想定、リスク評価、地震発生後の被害の即時予測等、面的に予測した地震動分布に適用して地震全体の適切な被害量を求めることが目的である。このような観点から、被害関数の構築に利用するデータも面的に整備された建物被害データと面的に推定した地震動分布を利用することも一つの方法と考えられる。

そこで、建物被害データに関しては、罹災証明の被害の定義に基づき広域的に整備され、かつ、建物の構造・建築年代等の属性をもつ文献 4)の建物被害データを利用した。このデータは、2004 年新潟県中越地震の旧長岡市・小千谷市、2007 年新潟県中越沖地震の柏崎市、2008 年岩手宮城内陸地震の栗原市の個別建物の被災度が記録されたデータである。地震動分布は、各地震の強震観測点で得られた観測記録を工学的基盤で空間補間し、これに表層地盤の増幅を考慮して 250m メッシュ単位の地表の疑似速度応答スペクトル ( $h=5\%$ ) を面的に推定した。この地震動分布を利用し、各建物の地震動を推定した。地震動指標は、表 3 の検討結果から、木造は周期 0.5~1.0 秒、非木造は 1.0~2.0 秒の疑似速度応答スペクトルの平均値とした。

被害関数の作成の際は、求めた地震動指標を階級に分け、階級毎に建物棟数と被害棟数を集計して被害率を算出した。算出した階級毎の被害率をデータセットとして利用した。表 4 に被害率の算出例として木造旧耐震の場合の被害棟数の度数分布表を示す。ただし、度数分布の

作成に用いた地震動分布は観測値ではなく空間補間によって得られた値で、予測誤差が含まれている。このため、階級毎の適切な被害率の算定には一定数のメッシュ数が必要と考え、メッシュ数が 100 未満の階級は除外した。また、対象とした 3 地震の 4 つの地域では、兵庫県南部地震の神戸市や新潟県中越地震の川口町などの地震動の大きな地域のデータが十分に含まれていない。このため、地震動の大きな領域の被害率を補うため、兵庫県南部地震の JR 鷹取、葺合供給所、新潟県中越地震の川口町震度計の 3 地点の観測点周辺の罹災証明ベースの被害率のデータを加えたものを被害関数作成のためのデータセットに加えた。追加した 3 地点の被害データうち川口町は翠川ほか(2011)<sup>3)</sup>によるものを用いた。残りの JR 鷹取と葺合供給所は建設省建築研究所(1996)<sup>5)</sup>と 1993 年住宅統計調査から推定した構造別年代区分別被害データを用いた。なお、建設省建築研究所(1996)<sup>5)</sup>は建物の構造的被害に基づくデータであるが、作成した 2 地点の被害データの被害率は罹災証明に基づく翠川・藤本(2002)<sup>6)</sup>の被害率とほぼ同じ被害率であったため、これを利用した。

表 4 被害棟数の度数分布表の例 (木造:旧耐震)

階級 (pSv) [kine]	階級値 [kine]	旧耐震					
		メッシュ数	建物棟数	全壊棟数	半壊棟数	全壊率	全半壊率
0 - 20	10	1	3	0	0	0.0%	0.0%
20 - 40	30	305	3,878	18	66	0.5%	2.2%
40 - 60	50	1213	19,723	53	515	0.3%	2.9%
60 - 80	70	1935	29,894	134	665	0.4%	2.7%
80 - 100	90	1941	33,216	253	1,698	0.8%	5.9%
100 - 120	110	817	20,353	345	2,088	1.7%	12.0%
120 - 140	130	483	8,196	278	1,094	3.4%	16.7%
140 - 160	150	314	5,690	374	1,164	6.6%	27.0%
160 - 180	170	199	2,883	230	702	8.0%	32.3%
180 - 200	190	329	9,380	665	1,703	7.1%	25.2%
200 - 220	210	198	4,225	286	763	6.8%	24.8%
220 - 240	230	133	2,981	300	568	10.1%	29.1%
240 - 260	250	24	480	25	102	5.2%	26.5%
260 - 280	270	19	513	58	119	11.3%	34.5%
280 - 300	290	31	769	59	193	7.7%	32.8%
300 - 320	310	23	701	27	158	3.9%	26.4%
320 - 340	330	46	1,315	59	336	4.5%	30.0%
340 - 360	350	26	721	78	244	10.8%	44.7%
360 - 380	370	10	104	28	50	26.9%	75.0%
380 - 400	390	4	13	1	4	7.7%	38.5%
400 - 420	410	2	3	1	0	33.3%	33.3%
420 - 440	430	2	42	4	18	9.5%	52.4%
440 - 460	450	2	7	1	1	14.3%	28.6%

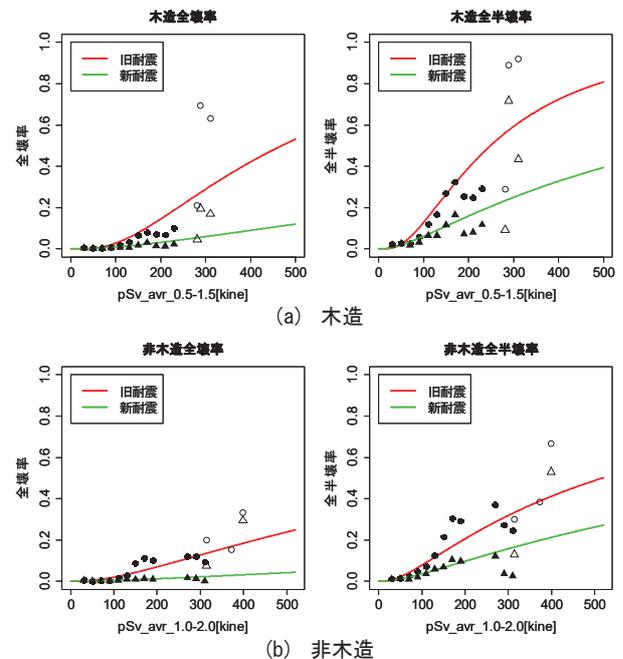


図 1 作成した被害関数 (初期モデル)

(図中の●は度数分布の旧耐震の実被害率、▲は度数分布の新耐震の実被害率を示す。また、○は追加した 3 地点の旧耐震の実被害率、△は追加した 3 地震の新耐震の実被害率を示す。)  
被害関数の形状は式(1)と同様の対数正規分布の累積分

布関数と仮定し、算出した被害率を被説明変数、疑似速度応答スペクトル（階級値）を説明変数とし、回帰分析を行って被害関数を作成した。被害関数の建築年代区分は旧耐震・新耐震の2区分とした。本項で得られた被害関数(初期モデル)のパラメータと決定係数を表5に、被害関数の形状を図1に示す。

表5 被害関数(初期モデル)のパラメータ

	周期帯	旧耐震			新耐震			
		$\lambda$	$\xi$	$R^2$	$\lambda$	$\xi$	$R^2$	
全壊	木造	0.5-1.5[s]	6.152	0.804	0.734	7.775	1.327	0.659
	非木造	1.0-2.0[s]	7.063	1.193	0.792	9.241	1.746	0.206
全半壊	木造	0.5-1.5[s]	5.516	0.801	0.712	6.552	1.255	0.566
	非木造	1.0-2.0[s]	6.249	1.158	0.831	7.094	1.383	0.531

## (2) 被害関数(初期モデル)の検証

図1に示した被害関数を用いて、兵庫県南部地震以降に発生した被害地震(11地震)の実被害が再現可能かどうか検証を行った。検証には、強震観測点で得られた観測波形を工学的基盤で補間して得られた地表の250mメッシュ別疑似速度応答スペクトルのデータを用いた。住宅建物データは、地震発生前の調査年の住宅・土地統計調査とその直近の国勢調査地域メッシュ統計から作成した1kmメッシュ単位の市区町村別構造別建築年代区分別住宅棟数データを用いた。表6に予測値と実被害<sup>7)</sup>の地震毎の集計値一覧を示した。実被害は消防庁の災害情報に基づく値である。表6からは、全壊・全半壊ともに実被害の小さい地震で過大評価する傾向を確認した。

表6 被害関数(初期モデル)の検証結果

	全壊		全半壊	
	実被害	予測値	実被害	予測値
1995年兵庫県南部地震	104,906	38,720	249,180	160,506
2000年鳥取県西部地震	439	804	3,540	5,890
2001年芸予地震	70	591	844	6,136
2003年宮城県沖の地震	2	415	23	5,056
2003年十勝沖地震	116	2,029	484	13,225
2004年新潟県中越地震	3,175	3,673	16,985	15,564
2005年福岡県西方沖地震	144	397	497	4,833
2007年能登半島地震	686	653	2,426	3,325
2007年新潟県中越地震	1,331	2,754	7,041	13,632
2008年岩手宮城内陸地震	30	620	176	5,146
2011年東北地方太平洋沖地震※	8,203	14,230	66,070	73,428

※東北地方太平洋沖地震は沿岸部の市区町村は対象外とした。

## (3) 被害関数の下限値の設定

パラメトリックに被害関数を設定した場合、実際には被害が発生しないような小さな地震動でも、関数形状により被害が計上される。表6の検証結果で、図1の被害関数が、実被害の小さな地震で過大評価する傾向となった一つの原因と考えられる。そこで、被害が実際に発生し始める適切な下限値(以降、「下限値」と称す)を検討した。具体的には、過去発生した地震の強震観測点周辺の建物被害データから、全壊または全半壊被害を1棟以上発生させた最も低い疑似速度応答スペクトルの値を求めた(表7参照)。しかし、表7の1棟以上の被害が発生した場合の下限値は、図1の被害関数とあまり変わらない結果となった。本稿で作成する被害関数は広域的な被害予測やリスク評価に用いることが目的である。個々の観測点の被害予測の正確性よりも、地震が発生した場合の地震全体の被害数量の把握の精度向上が主眼である。このため、地震全体の被害予測の精度向上という観点から、ある程度の量の被害が発生し始める値を下限値とすることとした。具体的には、対象とする被災度以上の被害建物が1棟以上かつ、観測点周辺の建物棟数を母数とした場合にその被害率が1%以上に当たる場合で最も小さな地震動指標を下限値とした。設定した下限値

を表7に示す。下限値は以下の方法で被害関数に反映させた。下限値の補正を行った被害関数を図2に示した。

$$\bullet pS_v \leq pS_{vl} \text{ の場合} \\ f(pS_v) = 0.0 \quad (2)$$

$$\bullet pS_v > pS_{vl} \text{ の場合} \\ f(pS_v) = \{f(pS_v) - f(pS_{vl})\} / \{1.0 - f(pS_{vl})\} \quad (3)$$

$f(pS_v)$ : 被害発生下限値設定後の被害率

$f(pS_{vl})$ : 被害発生下限値設定前の被害率

$pS_v$ : 地震動指標

$pS_{vl}$ : 地震動指標の下限値

表7 観測点周辺の被害発生下限値

単位: kine	1棟以上の被害が発生した下限値		1棟以上かつ1%以上の被害が発生した下限値	
	全壊	全半壊	全壊	全半壊
木造 (pSv_avr_0.5-1.5s)	60.2	17.9	79.0	29.4
非木造 (pSv_avr_1.0-2.0s)	33.9	13.8	54.2	28.1

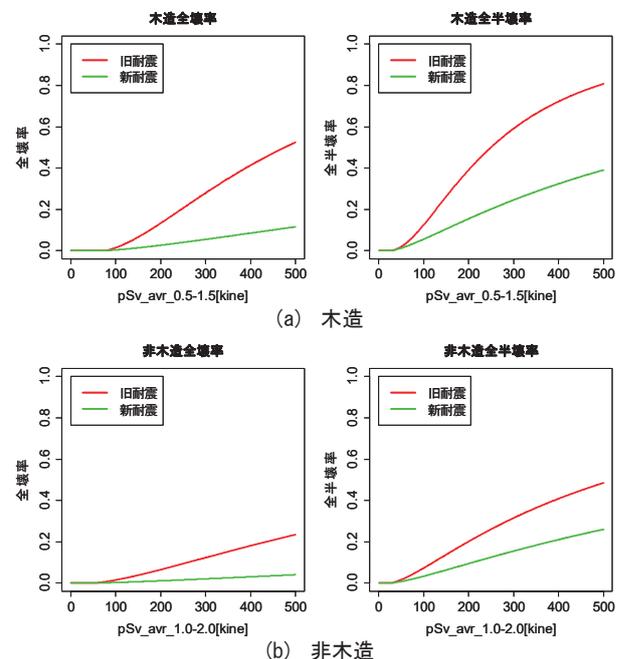


図2 被害発生下限値補正後の建物被害関数

## 4. 被害関数(最終モデル)の検証

作成した被害関数(図2参照)の妥当性を確認するため、強震観測点周辺の建物被害データを利用した検証、および地震全体の被害量の検証を行った。

### (1) 強震観測点周辺の検証

強震観測点の強震波形と観測点周辺の建物被害データを利用して検証を行った。検証は、本稿で作成した被害関数(図2参照)と、中央防災会議(2012)<sup>8)</sup>・東京都防災会議(2013)<sup>9)</sup>の被害関数(以降「中防」と称す)で、建物全壊・全半壊棟数を予測し、実被害と比較した。表8には観測点毎の予測結果を地震毎に集計したものを示す。

地震毎の集計結果では、本稿で作成した被害関数による予測値は8地震中6地震で中防の被害関数よりも実被害に近い結果が得られた。また、全壊では8地震中6地震で実被害の0.5~2.0倍または±10棟の範囲内に収まる結果が得られた。一方、全半壊は全壊と比べ実被害との乖離が大きい結果となった。

表 8 強震観測点周辺の検証結果のまとめ

	地点数	全壊				全半壊		
		実被害	予測値		実被害	予測値		
			本手法	中防		本手法	東京都	
1995年兵庫県南部地震	11	338	204	486	580	594	1,065	
2003年宮城県北部の地震	3	0	4	25	0	45	146	
2004年新潟県中越地震	22	97	115	336	264	314	593	
2005年福岡県西方沖地震	9	1	4	1	5	16	11	
2007年能登半島地震	5	18	37	99	73	156	272	
2007年新潟県中越地震	25	44	39	151	192	169	319	
2008年岩手宮城内陸地震	17	0	36	26	1	402	251	
2008年岩手県沿岸北部地震	22	0	0	12	0	136	254	
計	114	498	441	1,136	1,115	1,834	2,911	

(2) 広域検証

広域検証では、3. (2) で用いた 250m メッシュ別の地震動分布、1km メッシュ単位の市区町村別構造別建築年代区分別住宅棟数データを用いて検証を行った。被害関数は以下の3つの手法を用いた。

手法①：本稿で作成した被害関数 (図2 参照)

手法②：中防の被害関数

手法③：観測点周辺の被害データのみから作成した構造別被害関数。建築年代区分の設定はない。木造は表3の周期 0.5-1.5 秒の、非木造は周期 1.0-2.0 秒のパラメータλ・ξから設定した。なお、被害発生下限値は3. (3) と同様に設定した。

これらの地震動分布と建物データから、手法①～③による予測値と実被害<sup>7)</sup>を比較した (表9 参照)。また、式(4)で示される誤差指標を作成し、3つの被害関数の予測精度を比較した。

手法①の予測値は、全壊の場合12地震中7地震で、全半壊の場合12地震中6地震で実被害の0.5~2.0倍以内に納まる結果が得られた。また、全壊被害については、本稿で作成した被害関数 (手法①) は手法②よりも誤差指標が小さいだけでなく、観測点周辺の被害データから作成した手法③よりも誤差指標が小さくなり、様々な地震に対して、地震全体の被害を精度よく予測できることを示した。一方、全半壊被害については、手法①の誤差指標は手法②とほぼ同等であったものの、手法③よりも誤差が大きい結果となった。

表 9 広域検証結果のまとめ

	全壊				全半壊			
	実被害	予測値		観測点	実被害	予測値		観測点
		本手法	中防			本手法	東京都	
1995年兵庫県南部地震	104,906	24,732	73,879	24,654	249,180	134,033	227,641	80,369
2000年鳥取県西部地震	439	781	1,501	1,114	3,540	5,203	7,043	3,663
2001年芸予地震	70	58	78	74	844	5,168	3,308	1,332
2003年宮城県沖の地震	2	32	472	37	23	3,685	6,303	848
2003年十勝沖地震	116	994	715	1,484	484	10,739	6,935	6,265
2004年新潟県中越地震	3,175	2,342	6,611	3,324	16,985	12,604	21,388	9,656
2005年福岡県西方沖地震	144	54	47	104	497	3,511	1,184	952
2007年能登半島地震	686	361	1,649	402	2,426	2,610	5,038	1,432
2007年新潟県中越地震	1,331	1,526	5,113	2,202	7,041	10,435	15,125	7,315
2008年岩手宮城内陸地震	30	210	695	256	176	5,524	5,395	1,994
2011年東北地方太平洋沖地震※	8,203	10,028	21,096	12,612	66,070	69,985	125,720	46,488
2016年熊本地震	8,127	13,664	21,561	22,792	36,845	54,836	68,575	59,352
誤差指標 E	-	0.57	0.89	0.62	-	0.93	0.93	0.67

※東北地方太平洋沖地震は沿岸部の市区町村は対象外とした。

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\log_{10} P_i - \log_{10} R_i)^2}{N}} \quad (4)$$

ここで、E：誤差指標、P<sub>i</sub>：地震 i の予測値、R<sub>i</sub>：地震 i の実被害数、N：地震数

5. おわりに

本稿では、①罹災証明の定義に基づいて、②広域的な被害予測に適した、③応答スペクトルの被害関数を構築した。構築した被害関数は、過去の被害データを利用し、強震観測点周辺および広域的な検証を実施した。

全壊被害に関しては中央防災会議(2012)<sup>8)</sup>の被害関数よ

りも精度良い被害関数を構築することができた。加えて、観測点周辺のみ被害データから作成した被害関数よりも精度よく推定できることを確認した。これは、広域的な被害データと地震動分布から被害関数を作成したことが寄与したものと考えられる。また、下限値の設定にあたっては、強震観測点周辺で被害1棟以上かつ被害率1%以上となった地点の地震動指標の最低値を採用し、被害関数を補正した。検証結果から考えると、全壊被害の下限値は、地震全体の予測値と実被害とを整合させるのに妥当な値であったと考えられる。

一方、全半壊被害関数は、被害の小さい地震で実被害を過大評価する傾向が大きく課題の残る結果となった。全半壊被害の下限値を仮に50kineとした場合、式(4)の誤差指標は0.93 (表9参照) から0.74まで低下する。広域的な全半壊被害を精度よく予測するための下限値をどの程度に設定すべきかについては今後の検討課題である。

被害関数の高精度化に向けた課題としては、上述した下限値の課題以外にも、建物被害と相関の高い減衰定数の検討のほか、更なる被害データの収集・整理等が必要と考えられる。また、防災対策の取組を定量的に反映させるため、建物の耐震補強や経年劣化等の効果を被害関数に反映させる枠組みの検討にも取り組む予定である。

謝辞

本研究は国立研究開発法人防災科学技術研究所による「自然災害ハザード・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、気象庁及び自治体の震度観測点、関西地震観測協議会、港湾地域強震観測、鉄道総合技術研究所の観測記録を利用させて頂いた。

参考文献

- 1) 新井健介・境有紀：建物被害と相関を持つ地震動強さ指標を用い構造種別や層数を考慮した地震被害推定システムの開発、日本地震工学会論文集、第11巻、第4号、2011。
- 2) 三浦弘之・真鍋良輔・翠川三郎：2013年淡路島付近の地震(M6.3)における強震観測点での地震動特性と住家被害、日本地震工学会大会2013梗概集、pp.221-222、2013
- 3) 翠川三郎・伊東佑記・三浦弘之：兵庫県南部地震以降の被害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、2011。
- 4) 下村博之・藤原広行・中村洋光・門馬直一・山田哲也・藤澤誠二：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、2016.9。
- 5) 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、1996.3。
- 6) 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。
- 7) 消防庁：災害情報、<http://www.fdma.go.jp/bn/2016/> (2016年8月31日確認)。
- 8) 中央防災会議：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。
- 9) 東京都防災会議：南海トラフ巨大地震等による東京の被害想定報告書、2013.5