

西宮市の被災度調査結果に基づく建物被害関数の構築

Development of Fragility Curves for Buildings based on Damage Survey Data of Nishinomiya City after the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake

山口 直也¹, 山崎 文雄¹Naoya YAMAGUCHI¹ and Fumio YAMAZAKI¹¹ 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, University of Tokyo.

After the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, highly valuable data about building damage were obtained by several coordinated damage surveys. In order to improve the accuracy of fragility curves for buildings, it is important to utilize the building damage data from this earthquake. In this paper, the fragility curves for buildings considering detailed characteristics of buildings were constructed based on the damage survey data of Nishinomiya City Government compiled for the purpose of property tax reduction. The fragility curves considering the structural type and construction period were developed using the damage data and the estimated distribution of strong motion indices. It was identified that each fragility curve reflects the actual situation of building damage.

Key Words: the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Nishinomiya City, building damage, fragility curve, construction period, structural type

1. はじめに

兵庫県南部地震の後、国や地方自治体、ライフライン事業者などで兵庫県南部地震レベルの地震を想定した地震被害想定が盛んに行われてきている。そこでは、地震による建物被害の推定に関することも行われており、その際に用いられている建物被害関数は主に経験式であり、過去の地震の記録に基づいて構築されているが、データの量が豊富でなかったり質がよくなかったりするために精度の向上が必要と考えられる。兵庫県南部地震では、直後からさまざまな機関によって被災状況調査が行われ、建物や地震動に関して質的にも量的にもこれまでにないほど豊富な情報が得られた。そこで、この地震による豊富なデータを盛り込むことにより被害関数の精度を向上させたり構築することは極めて重要である。

建物被害関数の構築に関する研究としては、岡田・鏡味¹⁾が、建築物・屋内収容物・屋外構造物など56項目の被害発生累積率および被害程度を表すバルナビリティ関数を気象庁震度階について構築している。しかし、関数の構築のもとになるデータが東京都防災会議の震度階解説表であり、実際の被害データを用いているわけではないために、その精度については十分な確証を得ることは出来ていなかった。兵庫県南部地震後、この地震によって得られた豊富な被害データを用いた建物被害関数に関する研究がいくつか行われている。林ら^{2,3)}は、地盤モデルのFEM解析による再現地震動と建設省建築研究所がまとめた建物被害調査結果⁴⁾を用いて、被災地域全域での最大地動速度分布を推定し、低層建物および中高層建物の用途別の被害関数を

求めている。宮腰ら⁵⁾は、この最大地動速度分布²⁾と神戸市で行った建物被災度調査結果から構造・建築年代別の建物被害関数を構築している。また長谷川ら⁶⁾は、建築研究所データ⁴⁾と村上ら⁷⁾が神戸市東灘区西部地区で行った建築年代別の建築物の被害調査結果と、既往の研究から推定した最大地動速度分布を用いて、木造建築物の建築年代別の被害関数を作成している。村尾・山崎⁸⁾は、強震観測記録⁹⁾と低層独立住宅被害データ⁴⁾から推定された阪神地域の最大速度分布¹⁰⁾を、神戸市が行った灘区についての建物被災度調査結果を用いて灘区に関して再推定し、この推定最大速度分布¹¹⁾と灘区の被災度調査結果から、構造・建築年代別の建物被害関数を構築している。

筆者らはこれまでに、強震観測記録⁹⁾とその周辺の低層独立住宅被害データ⁴⁾を用いて、阪神地域の地震動分布を推定した¹⁰⁾。しかしその住宅被害データ⁴⁾には建物の建築年代の情報がないために、推定された地震動分布には建築年代ごとの建物存在率の影響が含まれていると考えられ、また、建物数不足のために地震動が推定されていない地域も存在する。そこで、西宮市が行った詳細な建物情報を含む建物被災度調査結果を用いて、西宮市に関して地震動分布の再推定を行い、推定地震動分布の精度を高めた¹²⁾。そこで本研究では、建物被害関数の精度を上げるためには兵庫県南部地震の建物被害データを取り入れることが重要であると考え、西宮市に関して再推定した地震動分布¹²⁾と西宮市の建物被災度調査結果を用いて、構造・建築年代別の建物被害関数を構築した。また、その被害関数と既往の研究による被害関数との比較を行い、提案した建物被害関数の適用性の考察を行った。

表-1 各構造ごとの被害データの区分数と区分棟数

構造		区分数	区分棟数		
木造	全体	30	2,250		
	年代別	-1951	30	460	
		1952-61	30	310	
		1962-71	30	540	
		1972-81	30	530	
		1982-94	30	390	
木質系プレハブ造		10	150		
RC造	全体	20	530		
	年代別	-1971	20	155	
		1972-81	20	165	
1982-94		20	200		
鉄骨造	全体	10	480		
	年代別	-1971	10	85	
		1972-81	10	150	
		1982-94	10	240	
軽量鉄骨プレハブ造		10	400		
	年代別	-1981	10	125	
		1982-94	10	280	
木造	瓦	全体	30	1,710	
		年代別	-1951	30	390
			1952-61	30	250
			1962-71	30	420
			1972-81	30	450
			1982-94	30	190
	スレート		30	290	
金属		30	160		

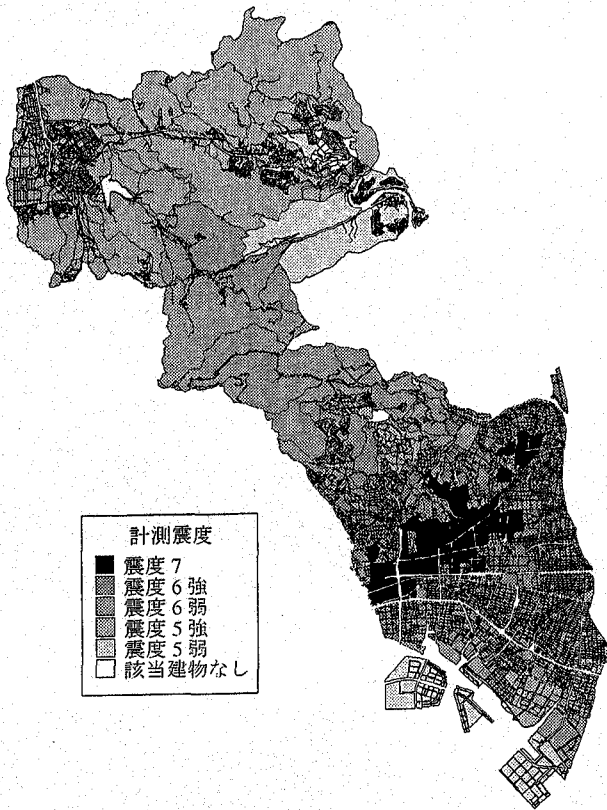


図-1 建物被害関数構築に用いた西宮市の推定地震動分布 (計測震度)

2. 使用したデータ

本研究で用いている西宮市の被災度調査データは、西宮市税務部情報システム課から提供されたものであり、西宮市が市内の建物について、固定資産税の減免のために固定資産台帳に基づいて行った調査結果である。これには、建物の構造形式や建築年、被害状況等の情報が含まれている。被災度判定は、減免率によって全壊(10割減免)・半壊(5割減免)の2種類であり、西宮市ではそれ以外の建物すべてに1割の減免を行い一部破損と被害なしの区別は行っていない。被災度の評価は、国の被害認定統一基準に従って西宮市独自の調査票を作成し、それに基づいて項目ごとにチェックした後、調査員により全壊・半壊の判定が下された。西宮市では構造種別に調査票を区別しておらず、木造・非木造とも同一の調査内容で被害判定を行っている。調査内容は、基礎や屋根、外壁被害等の外観目視項目と、階段や内壁、建具被害、電気、ガス、水道設備といったような内部項目で構成されている¹³⁾。この調査結果中の建物を、個々の建物データが持つ位置座標を用いて地理情報システム(GIS)で表示し、住宅地図¹⁴⁾と照合して分譲マンションや長屋等の所有者が複数に別れている建物を一棟化することで西宮市建物被害データベースを作成した¹²⁾。本研究ではこのうち、木造、木質系プレハブ造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、軽量鉄骨プレハブ造建物についての被害データを用いる。

図-1に示すのは、西宮市における推定地震動分布(計測震度)である。この地震動分布は、筆者らが兵庫県南部地震の強震観測記録¹⁵⁾と低層独立住宅被害データ¹⁶⁾を用いて推定した地震

動分布¹⁰⁾を、西宮市の建物被災度調査結果を用いて西宮市に関して再推定を行い、その精度を向上させたもの¹²⁾である。この推定地震動分布と西宮市の被災度調査データを用いて、建物特性を考慮した建物被害関数の構築を行う。

3. 西宮市の被災度調査データに基づく建物被害関数

(1) 構造別被害関数

ここでは、再推定を行うことで精度を向上させた推定地震動分布¹²⁾と西宮市が実施した建物被災度調査結果を用いて、詳細な建物特性を考慮した建物被害関数を構築する。ここで用いた建物被災度調査データは町丁目単位であるため、建物棟数が不十分であったり、被害の少ない町丁目があるなど、町丁目によってその棟数にばらつきがある。そこで、地震動指標の大きさを町丁目を並び替えた上で、十分な棟数が得られるよう、棟数に応じて被害データの統合し、被害関数の構築を行った。各被害関数ごとの区分数、区分ごとの棟数は、表-1に示すとおりである。区分数は、各構造において各年代で同じ区分数になるようにした。なお、被害データを統合した際には、棟数による重みつき平均により区分ごとの地震動値を求めている。

ここで、ある地震動 x (PGA, PGV, SI)のときに被害率 R 以上が発生する確率 $P_R(x)$ は、標準正規分布の累積確率分布関数 $\Phi(x)$ を用いて、対数正規分布で表せると仮定した。すなわち、

$$P_R(x) = \Phi((\ln x - \lambda) / \zeta) \quad [1]$$

となる。また計測震度 I のときに被害率 R 以上が発生する確率 $P_R(I)$ は、正規分布で表せると仮定した。すなわち、

表-2 西宮市の建物被害関数の回帰係数 (全壊率)

構造	建築年代	PGA (cm/s ²)			PGV (cm/s)			SI (cm/s)			計測震度		
		λ	ξ	R ²	λ	ξ	R ²	λ	ξ	R ²	λ	ξ	R ²
木造	全体	6.76	0.613	0.984	4.60	0.538	0.984	4.77	0.568	0.984	6.35	0.500	0.962
	-1951	6.38	0.571	0.975	4.27	0.501	0.975	4.42	0.529	0.975	6.05	0.477	0.976
	1952-61	6.62	0.585	0.954	4.48	0.525	0.957	4.64	0.554	0.957	6.25	0.600	0.882
	1962-71	6.67	0.561	0.970	4.52	0.493	0.970	4.69	0.520	0.970	6.29	0.468	0.972
	1972-81	6.93	0.547	0.945	4.75	0.480	0.946	4.93	0.507	0.946	6.51	0.455	0.949
	1982-94	7.58	0.682	0.854	5.32	0.599	0.853	5.53	0.632	0.853	7.06	0.574	0.840
木質系プレハブ	全体	8.05	1.01	0.883	5.74	0.891	0.880	5.97	0.939	0.881	7.49	0.880	0.849
	-1981	7.63	0.863	0.863	5.37	0.759	0.863	5.58	0.801	0.863	7.11	0.741	0.865
	1982-94	8.29	0.993	0.944	5.95	0.873	0.944	6.19	0.921	0.944	7.66	0.836	0.943
RC造	全体	8.03	0.970	0.868	5.71	0.849	0.867	5.94	0.898	0.867	7.35	0.750	0.817
	-1971	7.75	0.907	0.876	5.46	0.789	0.884	5.68	0.833	0.884	7.22	0.798	0.832
	1972-81	7.94	0.996	0.806	5.64	0.876	0.806	5.86	0.925	0.806	7.36	0.847	0.802
	1982-94	10.5	1.97	0.348	7.89	1.73	0.346	8.24	1.83	0.347	9.56	1.68	0.332
鉄骨造	全体	7.90	0.939	0.961	5.60	0.824	0.961	5.83	0.870	0.961	7.32	0.781	0.961
	-1971	7.35	0.731	0.871	5.12	0.642	0.871	5.32	0.678	0.871	6.86	0.607	0.872
	1972-81	8.03	1.13	0.865	5.71	0.995	0.865	5.94	1.05	0.865	7.42	0.940	0.865
	1982-94	7.86	0.714	0.970	5.57	0.627	0.970	5.79	0.662	0.970	7.29	0.598	0.970
軽量鉄骨プレハブ造	全体	8.61	1.20	0.866	6.23	1.05	0.868	6.49	1.11	0.867	7.88	0.984	0.883
	-1981	8.57	1.35	0.709	6.18	1.18	0.711	6.44	1.25	0.710	7.85	1.11	0.723
	1982-94	8.84	1.23	0.846	6.43	1.08	0.847	6.70	1.14	0.847	8.09	1.03	0.855

表-3 西宮市の建物被害関数の回帰係数 (全半壊率)

構造	建築年代	PGA (cm/s ²)			PGV (cm/s)			SI (cm/s)			計測震度		
		λ	ξ	R ²	λ	ξ	R ²	λ	ξ	R ²	λ	ξ	R ²
木造	全体	6.33	0.622	0.985	4.22	0.546	0.985	4.37	0.576	0.985	6.00	0.503	0.982
	-1951	5.97	0.673	0.957	3.91	0.591	0.957	4.04	0.624	0.957	5.71	0.562	0.956
	1952-61	6.18	0.616	0.944	4.08	0.555	0.942	4.22	0.585	0.942	5.79	0.640	0.851
	1962-71	6.22	0.557	0.966	4.12	0.489	0.967	4.27	0.516	0.967	5.92	0.465	0.968
	1972-81	6.41	0.508	0.956	4.30	0.446	0.957	4.45	0.471	0.957	6.08	0.422	0.962
	1982-94	6.94	0.718	0.967	4.76	0.629	0.967	4.94	0.665	0.967	6.52	0.595	0.964
木質系プレハブ	全体	7.47	0.839	0.971	5.00	0.737	0.971	5.20	0.778	0.971	6.74	0.698	0.970
	-1981	7.08	0.936	0.636	4.88	0.820	0.643	5.07	0.866	0.640	6.62	0.771	0.692
	1982-94	7.50	0.948	0.984	5.25	0.833	0.984	5.46	0.880	0.984	6.97	0.784	0.982
RC造	全体	7.34	0.912	0.888	5.11	0.798	0.887	5.31	0.844	0.887	6.83	0.723	0.829
	-1971	7.19	0.947	0.848	4.97	0.825	0.852	5.16	0.871	0.852	6.72	0.821	0.801
	1972-81	7.29	1.01	0.788	5.06	0.887	0.786	5.26	0.936	0.786	6.82	0.859	0.769
	1982-94	8.05	1.18	0.637	5.73	1.04	0.636	5.97	1.10	0.636	7.45	0.989	0.627
鉄骨造	全体	7.18	0.894	0.940	4.97	0.784	0.940	5.16	0.828	0.940	6.72	0.744	0.938
	-1971	6.88	0.951	0.886	4.71	0.835	0.886	4.88	0.882	0.886	6.47	0.791	0.885
	1972-81	6.99	0.861	0.953	4.81	0.755	0.953	4.99	0.797	0.953	6.56	0.714	0.952
	1982-94	7.61	1.08	0.899	5.35	0.949	0.899	5.56	1.00	0.899	7.08	0.904	0.897
軽量鉄骨プレハブ造	全体	7.45	0.852	0.904	5.20	0.747	0.904	5.41	0.789	0.904	6.93	0.705	0.907
	-1981	7.51	1.13	0.764	5.26	0.988	0.768	5.47	1.04	0.766	6.97	0.924	0.795
	1982-94	7.77	1.06	0.971	5.49	0.927	0.971	5.71	0.979	0.971	7.21	0.880	0.974

$$P_R(I) = \Phi((I - \lambda) / \xi) \quad [2]$$

となる。ここでλ, ξは、ln x と I の平均値および標準偏差であり、最小二乗法により導いた。表-2 と表-3 は、そのようにして得られた構造形式ごとの被害関数の回帰係数を、全壊率と全半壊率 (全壊率+半壊率) について示したものである。この表を見ると木造建物は、どの地震動指標においても決定係数 (R²) の値が、もっとも小さいもので全壊率に対する計測震度の 0.962 と 1 にかなり近くなっており、全壊率・全半壊率ともに相関が非常に高いことがわかる。他の構造を見ても、決定係数は相関係数に換算して考えた場合どれも 0.9 以上になっており、相関が高いといえるであろう。

図-2 は、木造、木質系プレハブ造 (木質系 P 造)、鉄筋コンクリート造 (RC 造)、鉄骨造 (S 造)、軽量鉄骨プレハブ造 (軽

量 SP 造) の各構造に対する建物被害関数のうち最大速度に関するものを、全壊率・全半壊率にわけて示したものである。木造建物については、被害関数構築の際に用いた原データ (30 点) を図中に示した。全壊率・全半壊率のどちらにおいても、木造建物に対する曲線の立ち上がり早く、被害率は地震動の範囲によらず大きくなっている。逆に軽量 SP 造建物は、5 つの構造の中では一番耐震性があるように見える。しかし、軽量 SP 造が S 造や RC 造より耐震的であると考えるのは早計であり、軽量 SP 造は建築年の新しいものが多いことや重量や階高の低い個人住宅が多数を占めることの影響が大きいと思われる。また、本研究で用いている建物被害データは、固定資産税の減免のために行った調査結果であり、建物の耐震性能に関して調べたものではないので、この結果のみから構造種別間の耐震性の違い等について議論するのは難しいであろう。同じ木質系の建物である木造建物と木質系 P 造建物を比べてみると、明らかに被害

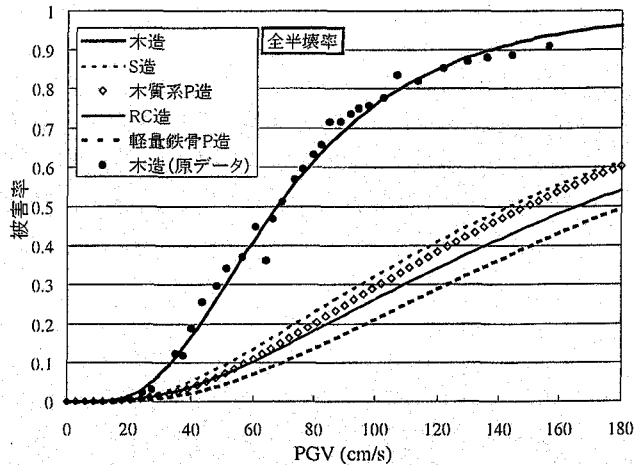
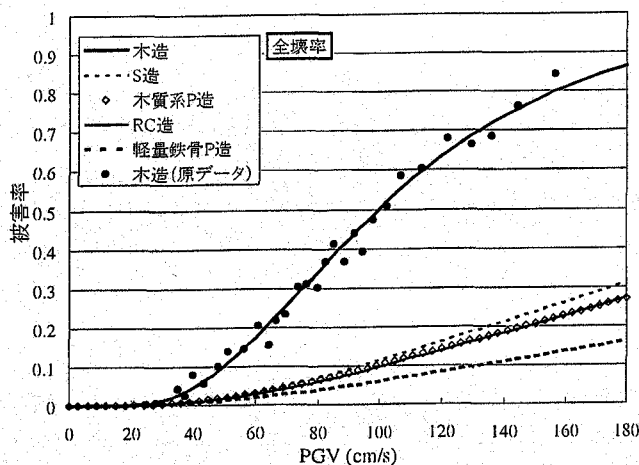


図-2 構造別建物被害関数

曲線は異なっている。このことから地震による被害想定等をする場合、木質系とひとまとまりにして考えるのではなく、それぞれの構造について検討を行わなくてはならないといえよう。また、木質系P造、RC造、S造建物の被害曲線は全壊率・全半壊率とも非常に似かよっている。これは実際の被害の傾向と一致している¹⁵⁾。

(2) 建築年代別被害関数

前節では構造形式別の建物被害関数の構築を行ったが、ここではそれぞれの構造について、建築年代別の建物被害関数の構築を行った。各構造の建築年代区分は、RC造、S造建物については耐震基準改正による影響を考慮し、1971年と1981年を境に1971年以前、1972-81年、1982-94年の3区分とし、木造建物に関しても比較検討のために同様の区分で、1951年以前、1952-61年、1962-71年、1972-81年、1982-94年の5区分である。木質系P造、軽量SP造建物は、耐震基準改正による影響とプレハブ造建物同士の比較、他の構造との比較検討を考慮したが、棟数の関係から1981年を境にした、1981年以前と1982-94年の2区分とした。被害関数の構築方法は構造別の建物被害関数の方法と同じであり、棟数に応じた被害データの統合を行っているが、各被害関数ごとの区分数、区分ごとの棟数は表-1に、それぞれの被害関数の回帰係数は表-2と表-3に示してある。図-3から図-7はそれぞれ、木造、木質系P造、RC造、S造、軽量SP造建物における建築年代別建物被害関数のうち、最大速度に関するものを示したものである。

どの構造形式においても、建築年代の古い建物ほど小さい地震動で被害が発生し始め、被害率は地震動の範囲によらず古い建物のほうが大きくなっている。木造建物に関して見てみると、とくに全半壊率の被害関数について1952-61年と1962-71年の曲線がほぼ重なってしまい大きな差が見られないが、実際の被害の分析においてもこの2つの年代に大きな差が見られず¹⁵⁾、その被害状況をよく反映しているものと考えられる。RC造建物について見てみると、全壊率・全半壊率の両方において、1971年以前と1972-81年の曲線に大きな差が見られないが、1982年以降のものを見ると被害率が大きく下がっている。実際の被害の傾向を見た場合¹⁵⁾、RC造建物とS造建物は同じような被害傾向であったが、S造建物に関する被害関数を見てみた場合、

RC造建物のものほど1981年以前と1982年以降で大きな差は見られない。RC造建物の被害関数だけを見た場合、耐震基準改正が大きな効果を発しているために被害率が大きく下がっているとも考えることが出来るが、S造建物では顕著ではないのでこの考察は適当でないと思われる。RC造建物だけで大きな差が出たのは1982-94年に対する被害関数の決定係数が小さいことが影響しているものと考えられる。決定係数が小さくなってしまった理由として考えられるのは次のようなことである。被害関数を構築する際には十分な棟数が得られるように建物被害データを統合して構築を行ったが、建築年代が新しく地震動指標の小さい点では被害がほとんど発生していないこともあり、全壊率や全半壊率がほぼ0になってばらつきが大きくなる原因になっている。このことは木造を除く他の構造形式で同じように見られることだが、RC造建物の場合、この点が多くなってしまい、また使用した他の点もばらつきが大きかったので決定係数が他に比べて小さくなってしまったものと思われる。

それぞれの構造について、全建物の被害関数を建築年代別の被害関数の図と一緒に表示してあるが、建築年代によって被害関数がかかなり異なるので、実際に被害想定などに建物被害関数を用いる場合には、建築年代を考慮した被害関数を組み合わせて用いることが必要になってくるものと思われる。

(3) 木造屋根種別被害関数

前節までに西宮市の建物に関する、構造別、建築年代別の建物被害関数を構築してきた。ここでは、中でも一番棟数が多く屋根構造の影響が大きいと思われる木造建物に関して屋根種別に被害関数の構築を行った。西宮市の建物被災度調査データにおける屋根分類は、瓦、スレート、亜鉛鉄板、トタン、板、草、ルーフィング、金属・合成樹脂板、陸屋根の10分類であるが、ここでは棟数の関係から、瓦、スレート、亜鉛鉄板の3種類について被害関数の構築を行った。なお本研究の中では、亜鉛鉄板を金属としている。被害関数の構築方法は前節までの方法と同じであり、被害データを統合する際の各被害関数ごとの区分数、区分ごとの棟数は表-1に示してある。表-4と表-5はそれぞれの被害関数の全壊率と全半壊率に関する回帰係数であり、図-8はそれぞれの屋根種に対する被害関数のうち、最大速度に関するものを示したものである。これを見ると、瓦屋根の建物

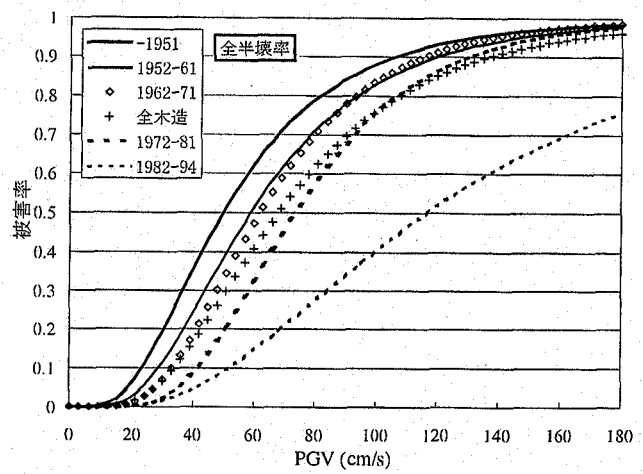
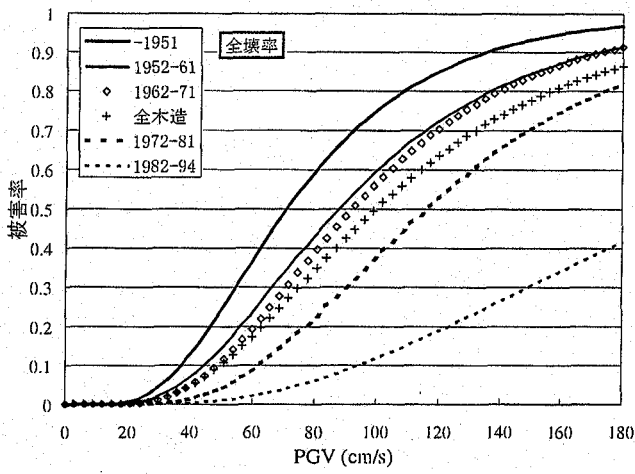


図-3 木造建物の建築年代別被害関数

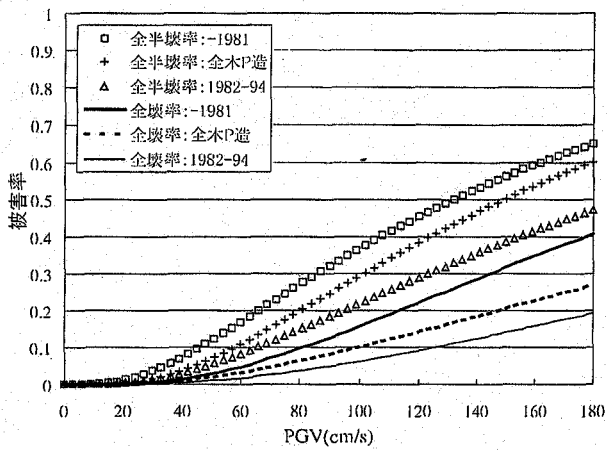


図-4 木質系プレハブ造建物の建築年代別被害関数

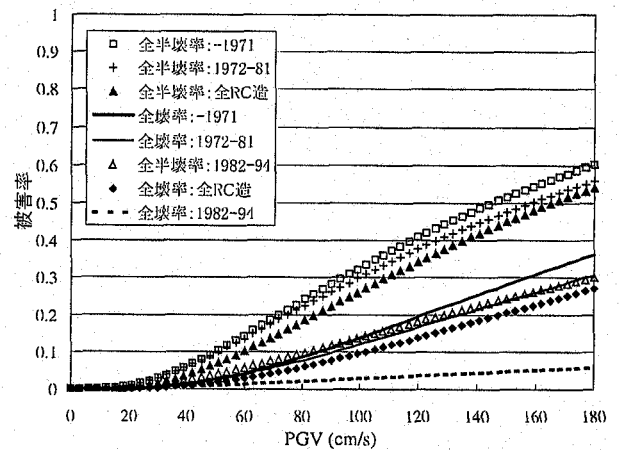


図-5 鉄筋コンクリート造建物の建築年代別被害関数

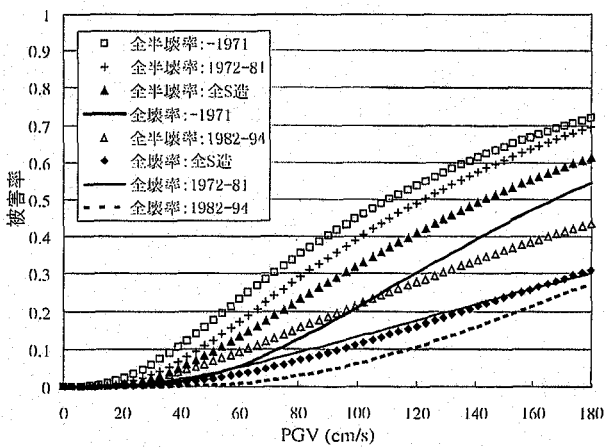


図-6 鉄骨造建物の建築年代別被害関数

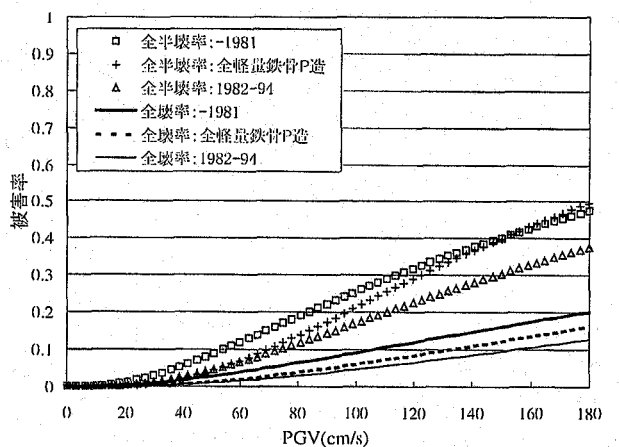


図-7 軽量鉄骨プレハブ造建物の建築年代別被害関数

表-4 西宮市の木造建物の屋根種別被害関数の回帰係数（全壊率）

屋根構造	建築年代	PGA (cm/s ²)			PGV (cm/s)			SI (cm/s)			計測震度		
		λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²
瓦	全体	6.64	0.584	0.983	4.50	0.512	0.984	4.66	0.541	0.984	6.27	0.486	0.985
	-1951	6.30	0.546	0.979	4.20	0.480	0.979	4.34	0.506	0.979	5.99	0.456	0.980
	1952-61	6.53	0.567	0.972	4.40	0.498	0.972	4.56	0.526	0.972	6.18	0.478	0.971
	1962-71	6.57	0.512	0.959	4.43	0.449	0.960	4.59	0.474	0.960	6.21	0.428	0.961
	1972-81	6.88	0.522	0.961	4.71	0.458	0.961	4.89	0.483	0.961	6.47	0.434	0.962
	1982-94	7.42	0.669	0.792	5.18	0.589	0.790	5.38	0.621	0.791	6.93	0.570	0.775
スレート	全体	7.63	0.821	0.940	5.36	0.720	0.940	5.57	0.761	0.940	7.09	0.682	0.941
金属	全体	6.88	0.62	0.939	4.71	0.544	0.939	4.88	0.575	0.939	6.47	0.517	0.942

表-5 西宮市の木造建物の屋根種別被害関数の回帰係数（全半壊率）

屋根構造	建築年代	PGA (cm/s ²)			PGV (cm/s)			SI (cm/s)			計測震度		
		λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²
瓦	全体	6.18	0.545	0.988	4.09	0.478	0.988	4.24	0.505	0.988	5.89	0.454	0.989
	-1951	5.87	0.600	0.962	3.82	0.527	0.962	3.95	0.556	0.962	5.63	0.501	0.961
	1952-61	6.06	0.556	0.961	3.98	0.489	0.961	4.12	0.517	0.961	5.78	0.470	0.960
	1962-71	6.11	0.483	0.973	4.03	0.424	0.973	4.17	0.448	0.973	5.83	0.404	0.974
	1972-81	6.35	0.468	0.964	4.24	0.411	0.964	4.39	0.434	0.964	6.03	0.390	0.966
	1982-94	6.67	0.621	0.960	4.52	0.545	0.960	4.69	0.575	0.960	6.29	0.515	0.959
スレート	全体	6.97	0.686	0.937	4.79	0.602	0.937	4.97	0.636	0.937	6.54	0.568	0.939
金属	全体	6.45	0.612	0.960	4.33	0.538	0.960	4.49	0.568	0.960	6.12	0.510	0.960

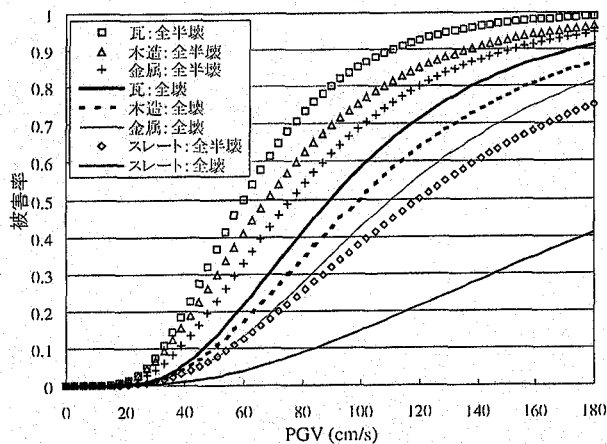


図-8 木造建物の屋根種別被害関数

の被害率が全壊率・全半壊率の両方で大きくなっており、次が金属屋根のものであり、3種類の中ではスレート屋根の建物の被害率が非常に小さくなっているのがわかる。同じ面積で考えた場合の重量はスレート、金属、瓦の順で重くなっていくことから、屋根の重量が被害率の大きさに影響を及ぼしているものと考えることが出来る。

この3種類の木造建物のうち、瓦屋根の建物は棟数が十分に多いので、前節の木造建物と同じ建築年代区分で建築年代別の被害関数の構築を行った。被害データを統合する際の各年代ごとの区分数と区分ごとの棟数は表-1に、それぞれの建築年代ごとの被害関数の回帰係数は表-4と表-5に、全壊率と全半壊率にわけて示してある。図-9はそれぞれの建築年代ごとの被害関数を、全壊率・全半壊率にわけて示したものであるが、どちらも建築年代の古い建物ほど小さい地震動で被害が発生し始め、

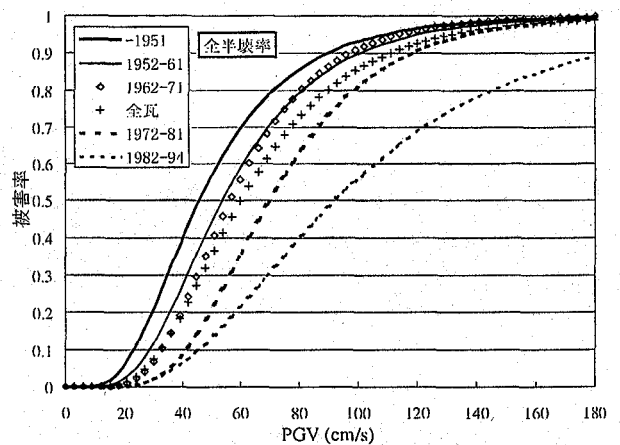
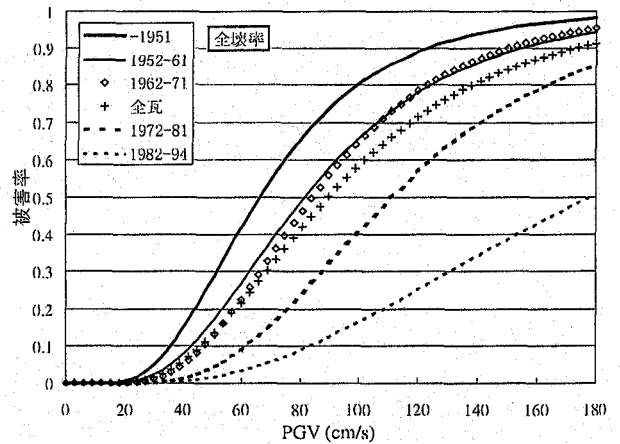


図-9 木造瓦屋根建物の建築年代別被害関数

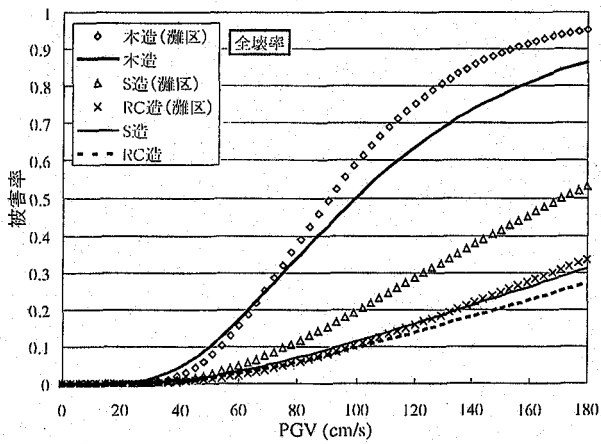


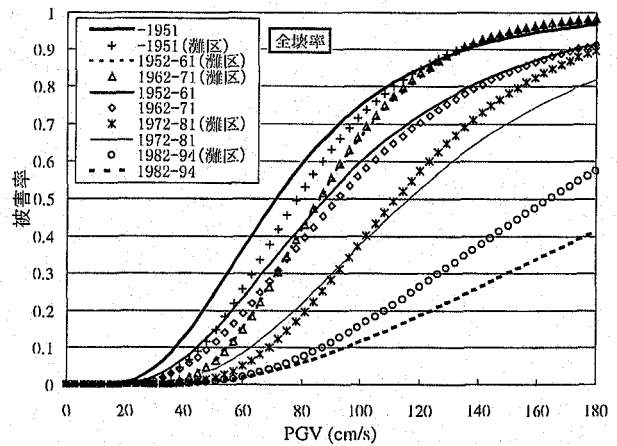
図-10 村尾・山崎⁸⁾の建物被害関数との比較 (構造別)

被害率は地震動の範囲によらず古い建物のほうが大きくなるという、前節での建物構造別建築年代別の被害関数の傾向と同じになっている。また、1952-61年と1962-71年の曲線がほとんど重なっており、これは木造建物全体で建築年代別の被害関数を構築した際の傾向と同じである。瓦屋根の建物は木造建物全体の約75%を占めていることから、木造建物全体の被害傾向と瓦屋根の建物の被害傾向が似かよってきて、そのため被害関数も木造建物のもと同じような傾向を示すためではないかと思われる。なお、スレート屋根の建物は新しいものが多いとも考えられ、それが図-8において被害が小さい原因とも考えられるが、図-9に示す最も新しい瓦屋根建物より被害が小さいので、程度の差こそあれ、強いことは確かであろう。

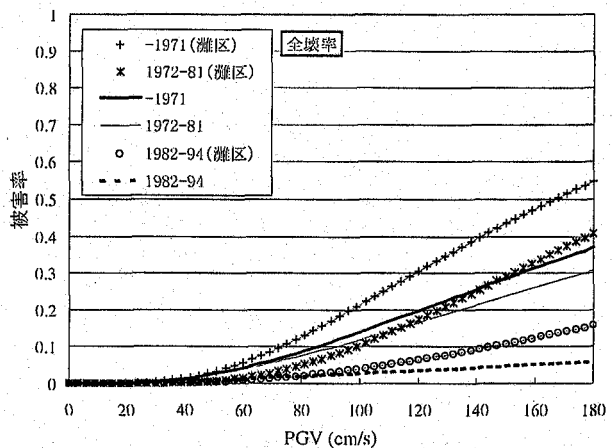
4. 他の建物被害関数との比較

建物被害関数の構築に関する研究は、岡田・鏡味¹⁾や宮腰ら⁹⁾などによっていくつか行われてきており、その構築方法や用いているデータも様々である。ここでは、本研究で構築した建物被害関数とこれまでに構築されてきているものの比較を行う。

村尾・山崎⁸⁾は、神戸市が行った建物被災調査結果を用いて、灘区についての建物被害関数の構築を行っている。その際に用いている地震動分布は、阪神地域全域について推定したもの¹⁰⁾を、本研究と同様の方法で灘区について再推定¹¹⁾を行って精度の向上を図ったものである。図-10は木造、鉄筋コンクリート造(RC造)、鉄骨造(S造)の各構造別の全壊率に対する被害関数について、本研究のものと村尾・山崎のものとの比較を行った結果である。これを見るとどの構造に関する被害関数も村尾・山崎の方が被害が大きい傾向を示している。全半壊率に対する被害関数も同様である。村尾・山崎の研究で用いている最大速度分布¹¹⁾は本研究と同じ方法で推定されたものであることを考えると、両者の被害関数の違いは、用いている建物被災調査結果の違いや、被災調査結果ごとの被災判定の基準が異なる¹³⁾ことによる違いが影響しているのではないかとと思われる。図-11は、木造建物とRC造建物の建築年代別の被害関数のうち、全壊率のものについて比較を行った結果である。木造建物について見てみると、全体的には構造別のものと同様



(a) 木造建物



(b) 鉄筋コンクリート造建物

図-11 村尾・山崎⁸⁾の建物被害関数との比較 (建築年代別)

に村尾・山崎の方が被害が大きい傾向を示しているが、最大速度値の小さい方では本研究の関数の方が被害が大きい傾向を示している年代もある。村尾・山崎の用いている最大速度分布¹¹⁾には30cm/s未満の地域が存在していないために、この範囲の被害関数は外挿ということになるので、その影響で本研究の被害関数の方が被害が大きい傾向を示しているのではないかとと思われる。建築年代の古い建物に対する被害関数がこの傾向を示していることも、その根拠としてあげられる。なぜならば、本研究で構築した建築年代別の被害関数を見ればわかるように古い年代の建物ほど小さい地震動で被害が発生するので、小さい地震動値を用いている本研究の関数の方が被害が大きくなる傾向を示していると考えられるからである。ここでは示していないが、全半壊率についての被害関数でも同様の傾向が見られる。RC造建物の被害関数で木造建物のもののような逆転現象が見られないのは、木造建物に比べてRC造建物は小さい地震動値で被害が発生しないために、最大速度30cm/s未満の地域が存在していないことの影響があまり現れないためであると思われる。

図-12は、宮腰ら⁹⁾が構築した構造別建物被害関数(木造、

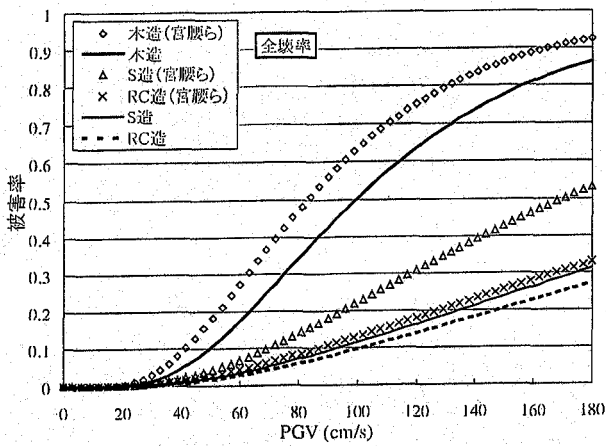
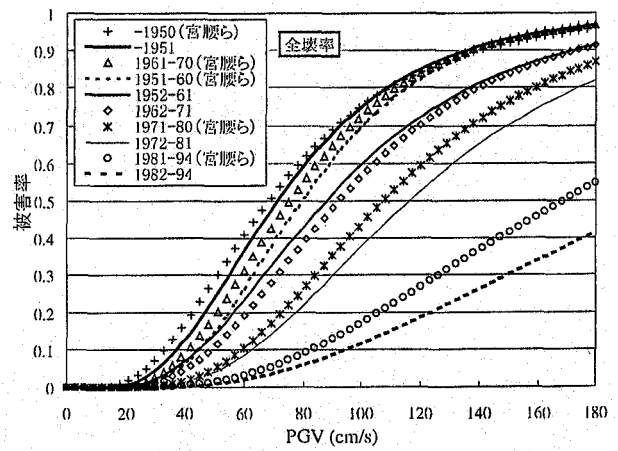


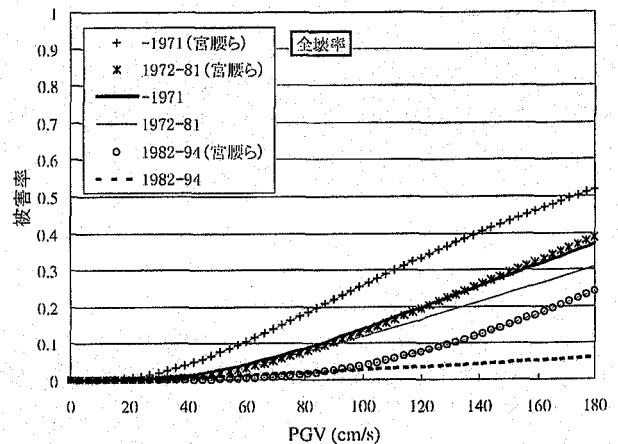
図-12 宮腰ら⁵⁾の建物被害関数との比較 (構造別)

RC造、S造)と本研究のものを比較した結果である。宮腰らの被害関数は、自治体(神戸市)が行った建物被災度調査結果を用いているという点では本研究と同じであるが、地震動分布は地盤モデルのFEM解析による再現地震動と建築研究所がまとめた建物被害調査結果⁴⁾から求めた被災地域全域での最大速度分布²⁾である。図を見ると、宮腰らの関数と本研究のものとの差は、村尾・山崎のものより大きくなっている。この違いが生じた理由として考えられるのは、村尾・山崎のものとの違いの検討のときに挙げた、建物被災度調査結果の違いや被災度判定の基準が異なる¹³⁾ことに加え、用いている地震動分布の推定方法の違いがある。用いている被害データとともに自治体の調査によるものであること、そして本研究の推定地震動分布¹²⁾は建物の建築年代ごとの建物存在率の影響を除いたものであるのに対し、宮腰らの用いているものはそれらの影響を受けているものであることを考えると、地震動分布の推定方法の違いが被害関数の違いに大きく影響しているものと思われる。ここでは全壊率についてのものを示したが、全半壊率についてのものも同様の傾向を示している。図-13に木造建物とRC造建物の建築年代別の被害関数のうち全壊率に関するものの比較を示しているが、これらにおける両者の違いも構造別の被害関数の違いと同様の理由で説明できるものとする。

岡田・鏡味¹⁾は、東京都防災会議の震度階解説表をもとに建築物などに関する被害関数(バランラビリティ関数)を気象庁震度階について構築している。この中に木造建物とRC造建物についてのものがあるので、気象庁震度階と計測震度の違いはあるが比較を行った。図-14は木造建物、図-15はRC造建物について比較した結果である。木造建物に関して岡田・鏡味¹⁾は、建築年代の新旧にわけて被害関数を構築しているため、本研究の建築年代別被害関数との比較を行った。図-14を見ると、岡田・鏡味の古い年代の建物に対する被害関数は、全壊率・全半壊率のどちらに対するものもかなり小さな震度において被害が発生することを示しているが、これは実際の被害データを用いていないことの影響ではないかと思われる。しかし新しい建物に対する関数は、本研究における新しい年代に対する被害関数と同じような傾向を示しており、比較的よい精度で被害を推定できるものと思われる。RC造建物について見てみると、本研究の全壊率に対する被害関数と岡田・鏡味の全半壊率に対する



(a) 木造建物



(b) 鉄筋コンクリート造建物

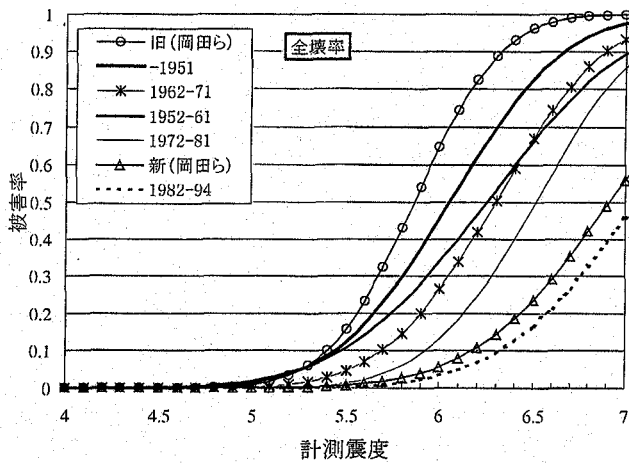
図-13 宮腰ら⁵⁾の建物被害関数との比較 (建築年代別)

被害関数がよく似た傾向を示しているのがわかる。岡田・鏡味の他の2本の被害関数が本研究のものより大きく異なっていることをあわせて考えると、被害の判定基準の違いも両者の被害関数の違いに影響を与えているものと思われる。

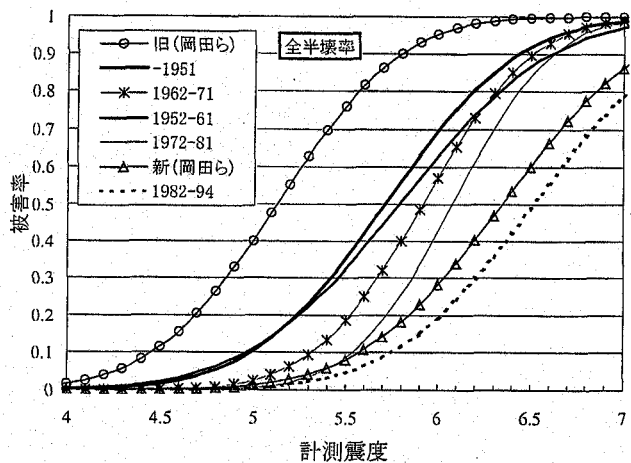
5. まとめ

本研究では、建物被害関数の精度を向上させるためには、兵庫県南部地震の豊富で質のよいデータを盛り込むことが重要であると考え、西宮市が行った固定資産税の減免のための被災度調査結果と、過去に推定した詳細な地震動分布を用いて、建物特性を考慮した建物被害関数の構築を行った。構築した被害関数は、構造別(木造・木質系プレハブ造・鉄筋コンクリート造・鉄骨造・軽量鉄骨プレハブ造)、木造屋根種別(瓦・スレート・金属)および建築年代別(木造5区分、鉄筋コンクリート造・鉄骨造3区分、木質系プレハブ造・軽量鉄骨プレハブ造2区分)である。

構造別の建物被害関数では、木造建物の被害は小さい地震動



(a) 全壊率



(b) 全半壊率

図-14 岡田・鏡味¹⁾の建物被害関数との比較(木造建物)

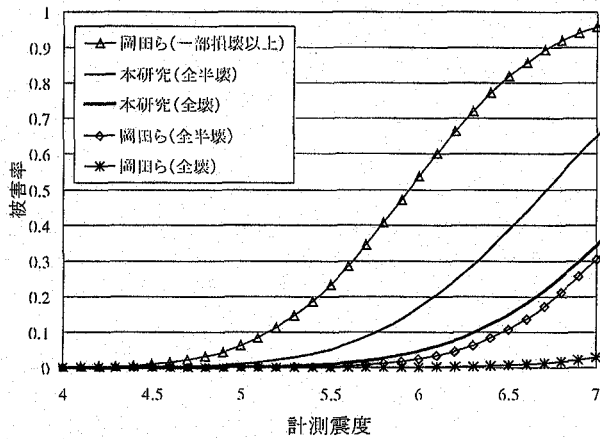


図-15 岡田・鏡味の建物被害関数との比較
(鉄筋コンクリート造建物)

から発生し始め、どの地震動値においても被害率が他のどの構造よりも大きくなっていった。また、同じプレハブ造でも木質系の方が被害が大きくなっていった。建築年代別の被害関数を見てみると、木造建物の1952-61年と1962-71年の曲線がほぼ重なってしまい大きな差が見られないといったような点もあるが、全体としては建築年代が古い建物ほど小さい地震動で被害率が上がり始め、どの地震動値においても新しい建物より高い被害率を示していた。これらの傾向は、これまでに行った建物被害分析の結果と同様のものであり、それぞれの被害関数が実際の被害状況をよく反映したものであるといえるであろう。

また、本研究で構築した建物被害関数とこれまでに提案されている被害関数の比較を行った。その結果、構築の際に用いている建物被害データの違いや地震動分布の推定方法の違いなどのために、それぞれの被害関数間でいくつかの違いが見られたが、全体的な傾向はよく似ていると考えられる。

今回構築した建物被害関数は、実際の地震被害に基づく経験

的な関数であるので、あらゆる条件を含んだ汎用性に富むものではないが、これまでの被害関数に比べると精度の面での向上は図れたものと考えられるので、この被害関数を用いることにより、被害推定や危険度判定の精度の向上にもつながるものと思われる。また、より汎用性の富む被害関数を構築するには、周辺の自治体の建物被災度調査結果から構築した被害関数を組み合わせて一つのものを構築したり、様々な条件のもとでの数値解析による方法¹⁶⁾が必要になってくるものと考えている。

参考文献

- 1) 岡田成幸, 鏡味洋史: 震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成, 地震, 第2輯第44巻, pp.93-108, 1991.
- 2) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 川瀬暉: 1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文報告集, 第494号, pp.59-66, 1997.
- 3) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫: 1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第502号, pp.61-68, 1997.
- 4) 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, 1996.
- 5) Miyakoshi, J., Hayashi, Y., Tamura, K., and Fukuwa, N.: Damage Ratio Functions of Building using Damage Data of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Proceedings of the 7th International Conference on the Structural Safety and Reliability, pp.349-354, 1997.
- 6) 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志: 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測-その2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第505号, pp.53-59, 1998.
- 7) 村上雅英, 田原賢, 藤田宜紀, 三澤文子: 阪神・淡路大震災にみる在来木造都市型住宅の問題点, 日本建築学会構造系論文報告集, 第481号, pp.71-80, 1996.
- 8) 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報告集, 第527号,

- pp.189-196, 2000.
- 9) 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集，1996.
 - 10) 山口直也，山崎文雄：1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.325-336，1999.
 - 11) 村尾修，山崎文雄：構造・建築年を考慮した建物被害データに基づく灘区の地震動分布の再推定，日本建築学会構造系論文報告集，第523号，pp.141-148，1999.
 - 12) 山口直也，山崎文雄：詳細な建物情報を含む被災度調査結果に基づく西宮市の地震動分布の再推定，土木学会論文集，No.640/I-50，pp.203-214，2000.
 - 13) 村尾修，山崎文雄：兵庫県南部地震における建物被害の自治体による調査法の比較検討，日本建築学会計画系論文集，第515号，pp.187-194，1999.
 - 14) ゼンリン：ゼンリン住宅地図'94西宮市（南部，北部，郊外），1994.
 - 15) 山口直也，山崎文雄：兵庫県南部地震の被害分析—その4 西宮市における建築物被害のマクロ分析—，生産研究49巻7号，pp.28-31，1997.
 - 16) 山口直也，山崎文雄：地震応答解析に基づく建物被害関数の構築，生産研究52巻8号，pp.17-20，2000.

(原稿受付 2000.6.20)