

//_/ 第 6 章 _/_/_/

構造別・建築年代別を考慮した建物被害関数

6.1	はじめに	6-2
6.2	自治体の建物被害調査に基づく灘区の建物被害関数	6-5
6.3	建物被害関数による推定値と実被害との比較	6-14
6.4	まとめ	6-18

//_/_/_/_/_/_/_/_/_/

6.1 はじめに

本章では、神戸市によって実施された灘区の建物被害調査データを用いて、建物被害関数の構築を試みている。

これまで我が国では、1930年代の物部(1926)による研究を皮切りとして、岡田・鏡味(1991)によるものなど、様々な震害の経験に基づく、建物被害関数あるいは建物被害率曲線(バルナビリティ関数またはフラジリティカーブ)に関する研究が報告されてきた。しかし、建物被害関数のもとなるデータは限られていたため、その精度についての十分な確証は得られていなかった。最近では、兵庫県南部地震による膨大な被害データを用いた被害関数に関する研究が、いくつかの研究グループにより報告されている。建物被害関数を構築するためには、対象地区の地震動分布と建物被害データが必要であるが、兵庫県南部地震時の強震記録はそれほど多くは観測されていなかったため、地震動分布を何らかの方法で推定する必要がある。また第2章で述べたように、実施されたいくつかの建物被害調査もその目的・方法によって判定基準が異なっていたため、これまでに報告されてきた被害関数も、使用したデータによる違いを見せている。鏡味(1998)が建築学会等で報告しているようにこれらの被害関数を使用する際には、作成された被害関数がどのデータを用いたものが正しく認識しておく必要がある。

林・宮腰・田村(1997b)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(1996)のデータを用いて推定された林・宮腰・田村・川瀬(1997)の最大地動速度分布から、低層建物および中高層建物の用途別の被害関数を構築しているが、建築年代については考慮していない。Miyakoshi, Hayashi, Tamura, and Fukuwa(1997)は、同推定地動速度分布と神戸市の調査データから構造・建築年代別の被害関数を求めているが、ここで用いた地震動分布は、町単位であり、比較的大きな強震記録のみから推定されたものである。また長谷川・翠川・松岡(1998)は、建設省建築研究所(1996)のデータと東灘区西部地区の建物について村上・田原・藤田・三澤(1996)が行った建築年代別被害調査結果を用いて、木造建築物の建築年代別被害関数を作成しているが、他の構造については行っていない。本研究では、低い地震動レベルや微地形分類を考慮した町丁目単位の推定地震動分布と3万棟を超える灘区の詳細な建物被害データを用いることにより、構造・建築年代別の建物被害関数を構築し、その精度を上げることを目的としている。

本章は、神戸市から提供された建物被害データ(第4章参照)と独自の方法で推定した灘区の地震動分布を用いて建物被害関数を構築する。それらを多くの自治体が固定資産管理のために所有している構造・建築年別の建物データに適用することにより、被害想定や建物倒壊危険度の算定に役立てることが可能となるであろう。

建物被害関数を構築するためには、建物被害データとその地域の地震動分布が必要である。地震動分布を推定するためには、翠川・藤本(1996)の行ったように墓石の転倒率や太田・小山・中川(1998)の行ったアンケート調査を用いる方法等があるが、本研究では、神戸市から提供された3万棟の建物データが、そのデータ数ゆえに地震動推測の尺度として有効であると考え、それらの被害率を用いて地震動分布を推定した。図-6.1のフローチャートに建物被害関数構築までの過程を示す。まず強震観測記録と建設省建築研究所(1996)がまとめた周辺地域の低層独立住宅被害データとを用いて低層独立住宅の被害関数()を求め、その関数を同データのもととなった調査地域に適用し、阪神地域の地震動分布を推定する。次にこの地震動分布の推定結果と神

戸市から提供された灘区の建物被害データ（最も被害率が高く，絶対数も多い木造のデータ）を用いて木造建物の年代別の建物被害関数（ ）を構築する．そしてそれぞれの関数を再度灘区に適用することにより地震動分布を再推定し，地震動推定の精度を高める．ここまでは山口・山崎（1999）の研究および第5章で行っている．本章（図中，太線で囲った部分）では，第5章で推定された灘区の地震動と，神戸市の調査に基づく約3万棟の灘区の建物被害データを用いて，構造・建築年代別の建物被害関数（ ）を構築し，さらにその結果を実被害と比較し，精度が向上したことを確認している．

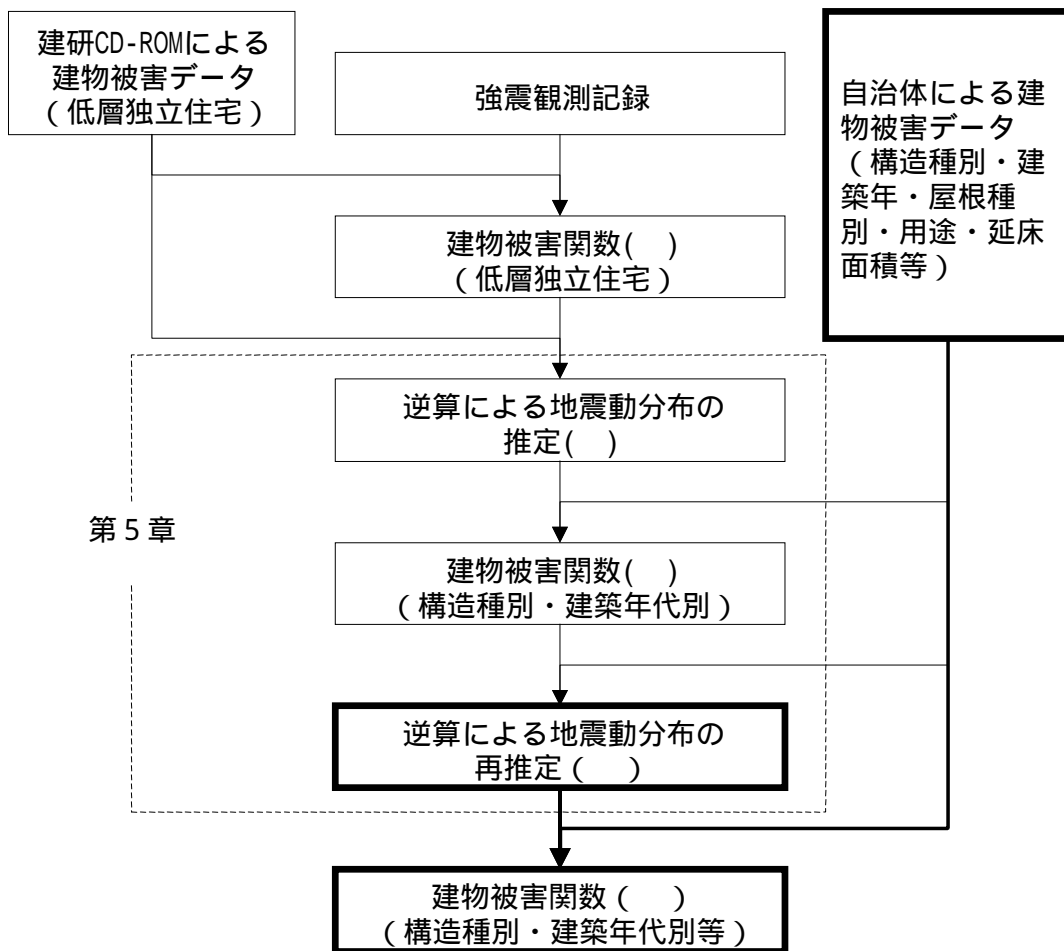


図-6.1 建物被害関数構築までのフローチャート

6.2 自治体の建物被害調査に基づく灘区の建物被害関数

ここでは第5章で推定された図-5.15 に示す灘区の地震動分布（町丁目単位の最大速度）を用いて、自治体調査に基づく建物被害関数を求める。液状化の影響による被害が大きかった臨海部と、被害が著しく少なかった山麓地域を除いた灘区を対象地域としている。これにより4.4の建物被害分析で、特殊な傾向が見うけられた1961年以前のS造建物は大幅に減少し、かつS造の被害関数は1971年以前を一区分としているため、図-4.7における特殊な傾向による被害関数への影響は取り除かれている。

(1) 建物被害関数構築の方法と回帰係数

ここで用いた建物被害データは町丁目を単位としているが、建物被害関数を構築するうえで、建物棟数が不十分であったり、被害の少ない町丁目が存在するため、表-6.1に示すように地震動指標の大きさで並び替えた上で、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を行った。各構造・建築年代ごとの棟数と区分分類は表-6.2に示す通りである。木造以外は、棟数が比較的少ないため、建築年代を3区分とした。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。

ここで求めた地震動強さ（最大速度 = PGV）と被害率の関係から、建物被害推定式を求める。ある地震動 x のときに被災ランク R 以上の被害が発生する確率 $P_R(x)$ 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、

$$P_R(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda) / \zeta) \quad (6-1)$$

となる。ここで係数 λ , ζ は、 $\ln x$ の平均値および標準偏差であり、図-6.2に示すような確率紙を用いた最小二乗法により求めた。その結果得られた回帰係数を表-6.3に示す。相関係数を構造別（全年代）にみると、S造が全壊、全半壊ともに0.7前後とやや低いが、それ以外の構造については全て0.9以上と高い相関を示している。各構造ごとの建築年代別の係数をみると、木造が1982-94（全壊）と1951（全半壊）を除く全てにおいて1.0に近く、相関が高い。しかし、ここで回帰分析に用いた地震動はもともとと同じ木造建物データから推定したものであるため、木造の相関が高いのは当然ともいえる。その他の構造についても一部0.7程度のものがあるがほとんどは0.9以上であり、建築年代別についても高い相関を示していると言えよう。ただし、中には建築年代別の ζ の値が、全年代のものよりも大きくなってしまったもの、すなわち分散が増えたものがいくつかある。これらは構造別のデータを年代別に区分したために、確率的処理をする上で十分なデータ数を得られなかったものと思われる。今後、これらのパラメータを被害推定等に使用するうえでは、その点を理解し注意する必要がある。

(2) 構造別建物被害関数

図-6.3、図-6.4に(1)から求めた構造別の被害関数を示す。全壊率、全半壊率ともに木造の被害率が最も高く、RC造が最も低い。また全壊率、全半壊率ともに木造は小さな地震動での立ち上がりがあるが、その他の構造は比較的滑らかなカーブを描きながら、徐々に被害率が上がって

いるのがわかる。

ここで、神戸市の建物被害データ（地域・データ数などの詳細は示されていないが被害区分・定義は同じと思われる）と建設省建築研究所（1996）のデータから林・宮腰・田村・川瀬（1997）により推定された地震動を用いて Miyakoshi, Hayashi, Tamura, and Fukuwa（1997）（以下、宮腰・林ら）により構築された構造・年代別の被害関数と比較する。図-6.5、図-6.6 に各構造ごとの被害関数の比較を示す。全壊率、全半壊率ともに、全ての構造において傾向は似ているが、宮腰・林らのカーブはいずれも立ち上がりが高く、小さな地震動で被害が発生している。宮腰・林らの用いた林・宮腰・田村・川瀬（1997）による推定地震動が被害の大きかった地域のみを観測記録をもとにしているのに対し、本章で用いた推定地震動は、被害率の小さかった大阪府の観測記録も考慮して推定された山口・山崎（1999）による地震動を、発展させたものである。そのため低い観測値が式に反映され、被害率曲線の違いとして表れているものと思われる。

(3) 各構造の建築年代別建物被害関数

ここでは（1）で求めた建築年代別被害関数について考察する。

まず木造の建築年代別の被害関数を図-6.7、図-6.8 に示す。これを見ると、1952-61、1962-71の曲線は全壊率、全半壊率ともに近接したカーブを描いている。同様の傾向は第4章の図-4.5でも見られた。全体的にはそれぞれのPGVにおいて古いものほど高く、新しいものほど低い被害率となっているが、古い3曲線は120 cm/sを超えたあたりからほとんど重なってしまっている。本章で扱ったデータの中には明治時代初期の建物もあり、それらも1951年以前の建物に含まれている。これら古くから残っている建物に関しては、強度の高い良好なもののみが残っている可能性があり、新しい年代の曲線と地震動の高い付近で重なることもありうると思われる。全壊率では1951年以前の建物は30cm/sを超えたあたりで被害が発生し始めるのに対し、1982年以降に建てられたものは60 cm/sあたりから被害が発生し始めている。また全半壊率ではそれよりも小さなPGVでそれぞれ被害が発生し始めている。

図-6.9にRC造についての被害関数を示す。全壊率について見ると、1971年以前のものは40 cm/sあたりから被害が発生し、1982-94のものは80 cm/s位まで被害が出ないのがわかる。180 cm/sでの1971年以前（耐震基準改正以前）のRC造建物全壊率は50%強であり、これは図-6.7に見られる最も新しい木造建築物の全壊率よりも小さく、RC造建物が被害を受けにくいことがわかる。

S造、軽量S造については図-6.10、図-6.11に示す通りであるが、木造、RC造と同様に、いずれも古い建物ほど小さなPGVで被害を受けていることがわかる。また図-6.11 軽量S造の1971年以前の建物被害率曲線は他の2つの建築年代の違いに比べて著しく立ち上がりが高くなっているが、軽量S造の年代別被害率を示した第4章の図-4.6にもこれと同様の傾向が見られる。

表-6.1 統合された地域区分の例（1951年以前の木造の場合）

区分コード	町丁目コード	町丁目名	PGV	木造（-1951）棟数	区分棟数
11	：	：	：	：	380
	：	：	：	：	
	105	篠原南町二丁目	104.3	38	
	304	城内通五丁目	102.6	23	
12	〃	〃	102.6	9	380
	214	福住通三丁目	102.3	112	
	215	福住通四丁目	102.3	103	
	219	福住通八丁目	101.1	7	
	287	味泥町	100.0	7	
	220	中原通一丁目	99.8	113	
	227	倉石通一丁目	99.8	29	
13	〃	〃	99.8	55	380
	285	大石南町二丁目	99.4	23	
	：	：	：	：	
	：	：	：	：	

表-6.2 被害関数作成のための構造・年代区分の分類

	木造(20区分)		RC造(10区分)		S造(10区分)		軽量S造(10区分)	
	建物棟数	区分棟数	建物棟数	区分棟数	建物棟数	区分棟数	建物棟数	区分棟数
-1951	7,603	380						
1952-61	4,707	230						
1962-71	4,498	220	913	90	481	48	450	45
1972-81	2,875	140	1,195	120	526	52	243	25
1982-94	2,374	120	1,455	140	848	85	442	44
全体	22,507	1,100	3,563	360	1,855	180	1,135	110

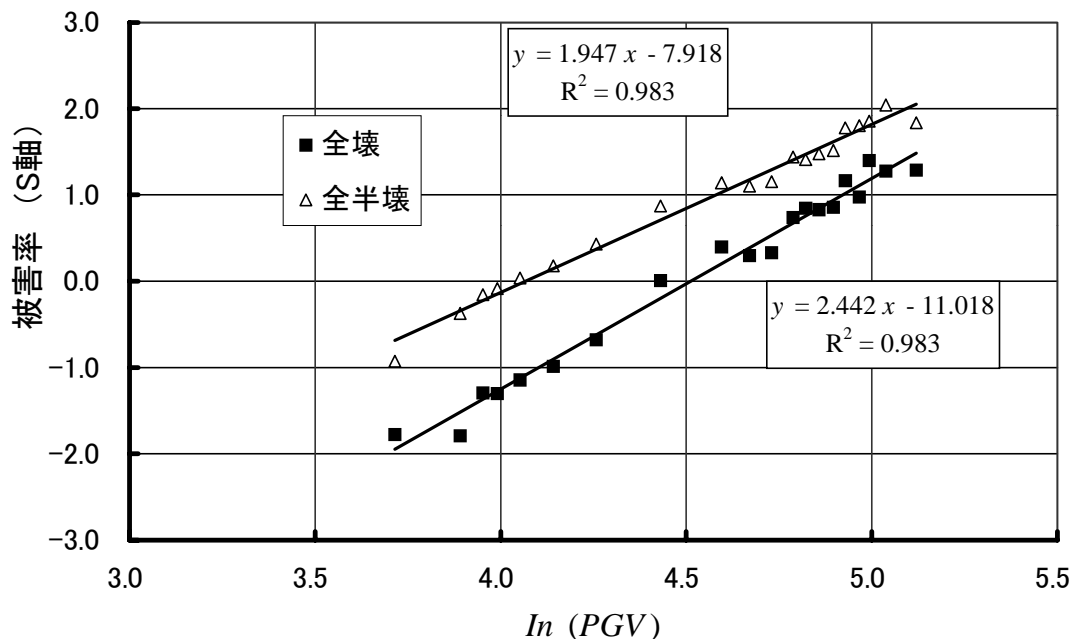


図-6.2 最大速度と木造建物被害率の関係の確率紙表示

表-6.3 建物被害関数の回帰係数

		全壊			全半壊		
		λ	ζ	R^2	λ	ζ	R^2
木造	-1951	4.36	0.411	0.957	3.66	0.674	0.880
	1952-61	4.44	0.353	0.976	3.97	0.490	0.952
	1962-71	4.45	0.342	0.977	4.02	0.456	0.966
	1972-81	4.73	0.378	0.974	4.25	0.395	0.976
	1982-1994	5.12	0.496	0.881	4.61	0.474	0.969
	全年代	4.51	0.410	0.983	4.07	0.514	0.983
RC造	-1971	5.12	0.646	0.954	4.72	0.691	0.929
	1972-81	5.33	0.575	0.941	4.85	0.612	0.844
	1982-94	6.00	0.789	0.902	5.33	0.789	0.917
	全年代	5.50	0.705	0.968	4.99	0.716	0.924
S造	-1971	4.64	0.619	0.718	4.25	0.712	0.788
	1972-81	4.97	0.490	0.941	4.49	0.549	0.797
	1982-94	5.64	0.731	0.893	5.01	0.733	0.824
	全年代	5.14	0.628	0.752	4.69	0.672	0.686
軽量S造	-1971	4.70	0.550	0.928	4.41	0.504	0.913
	1972-81	5.82	0.972	0.728	4.95	0.855	0.783
	1982-94	6.19	1.101	0.858	5.28	0.865	0.849
	全年代	5.03	0.564	0.944	4.73	0.601	0.970

は全年代よりも分散が大きくなってしまったもの

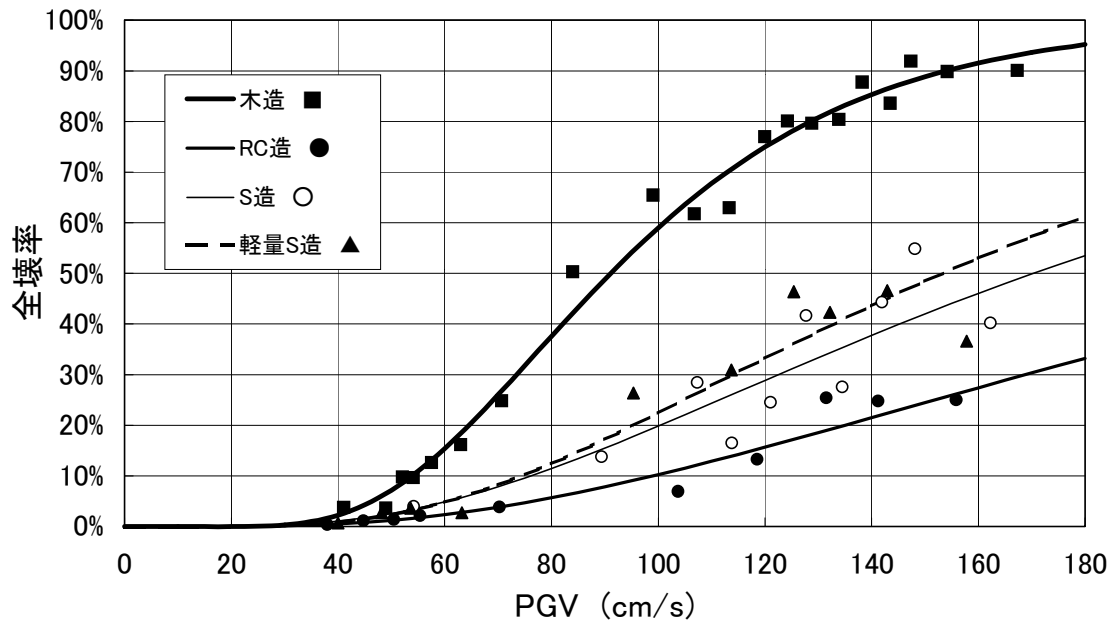


図-6.3 構造別建物被害関数（全壊率）

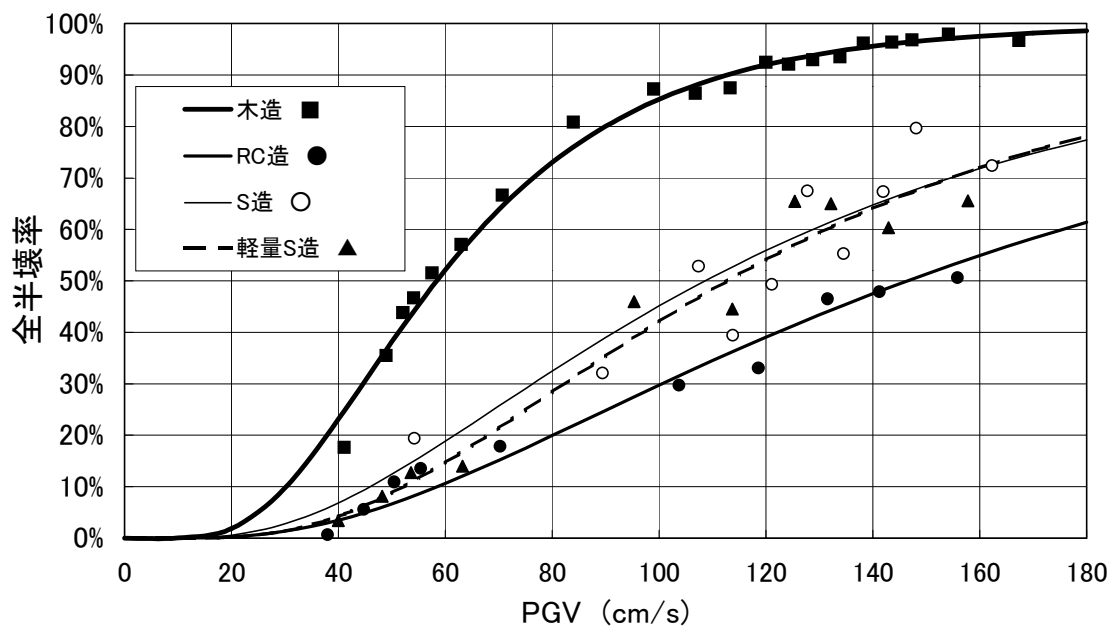


図-6.4 構造別建物被害関数（全半壊率）

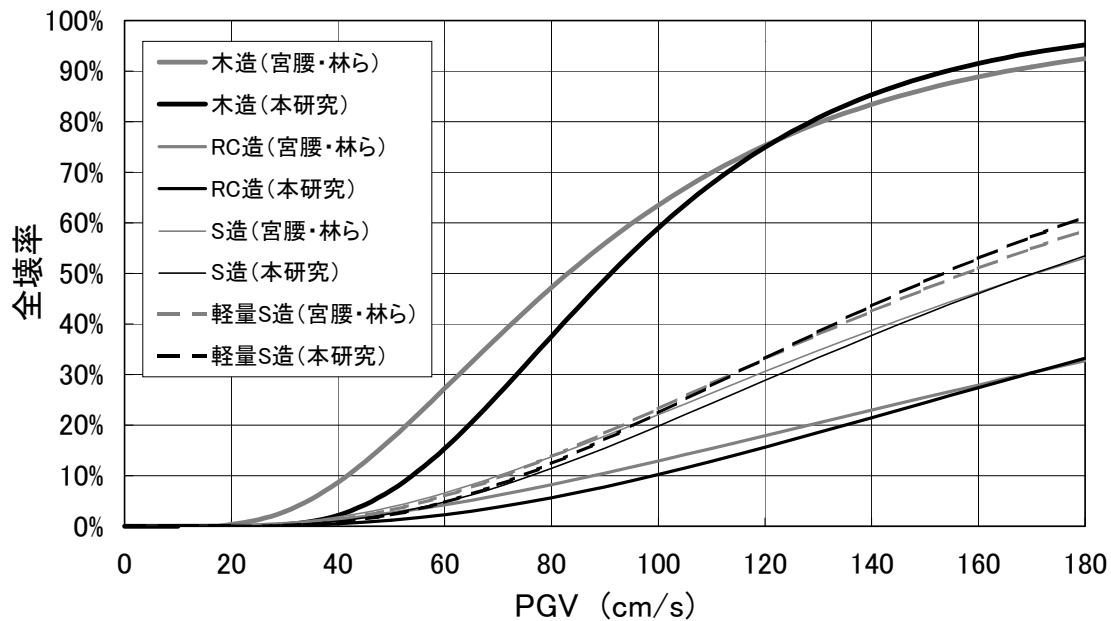


図-6.5 被害関数の比較（全壊率）

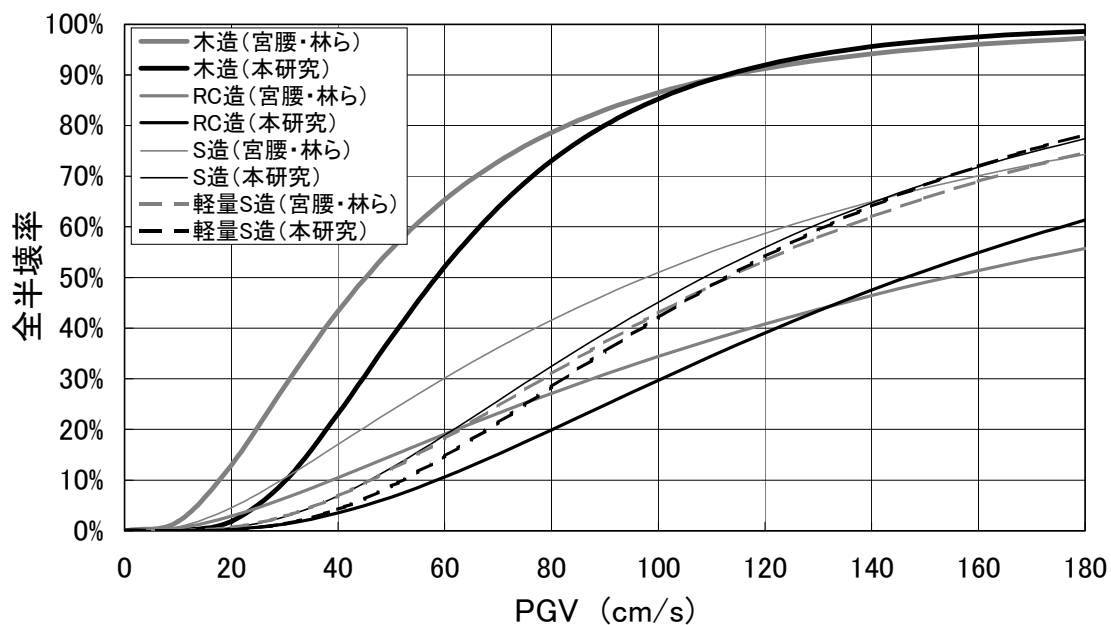


図-6.6 被害関数の比較（全半壊率）

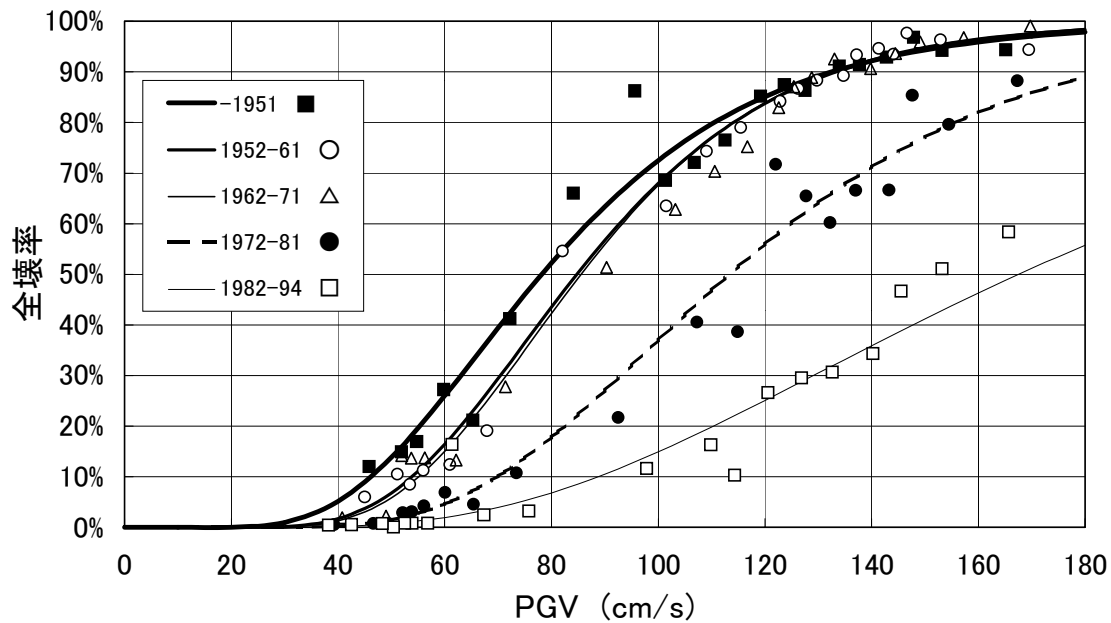


図-6.7 木造の建築年代別被害関数（全壊率）

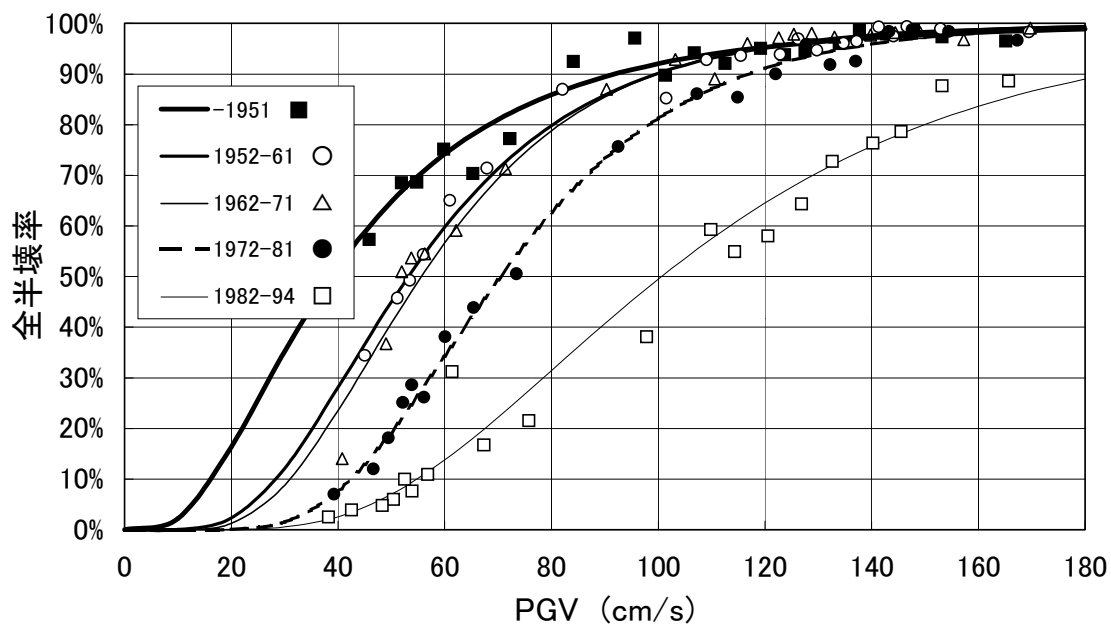


図-6.8 木造の建築年代別被害関数（全半壊率）

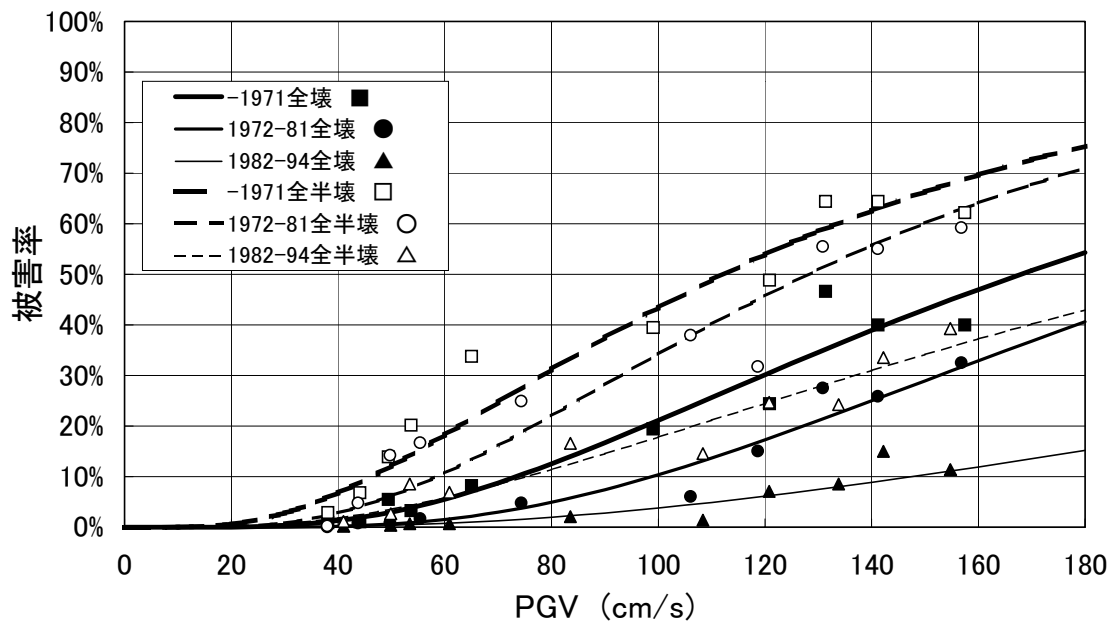


図-6.9 RC造の建築年代別被害関数

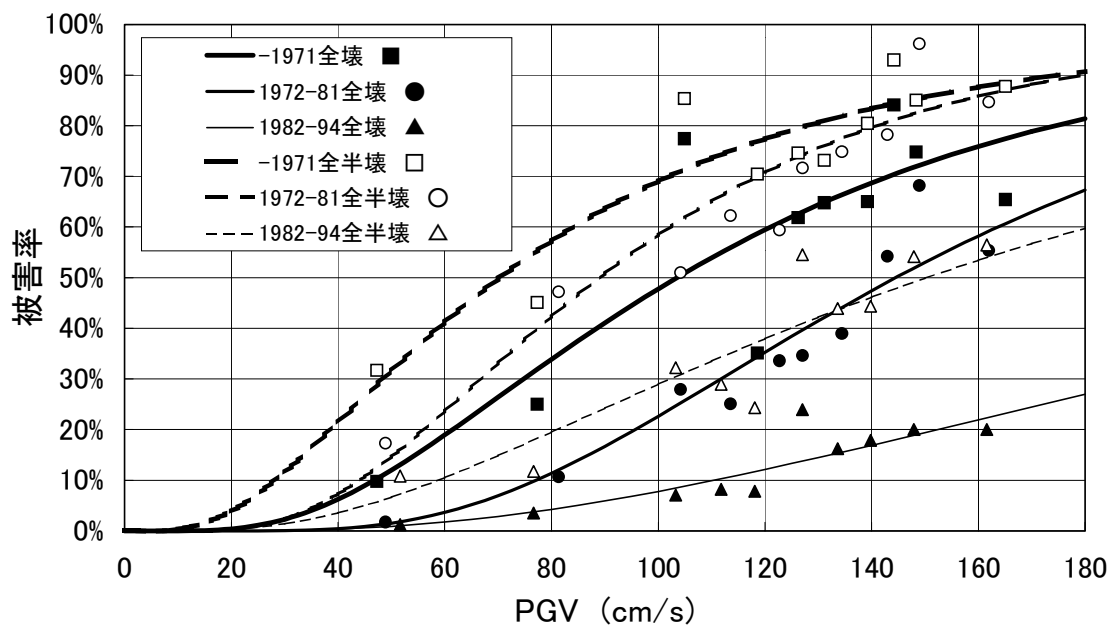


図-6.10 S造の建築年代別被害関数

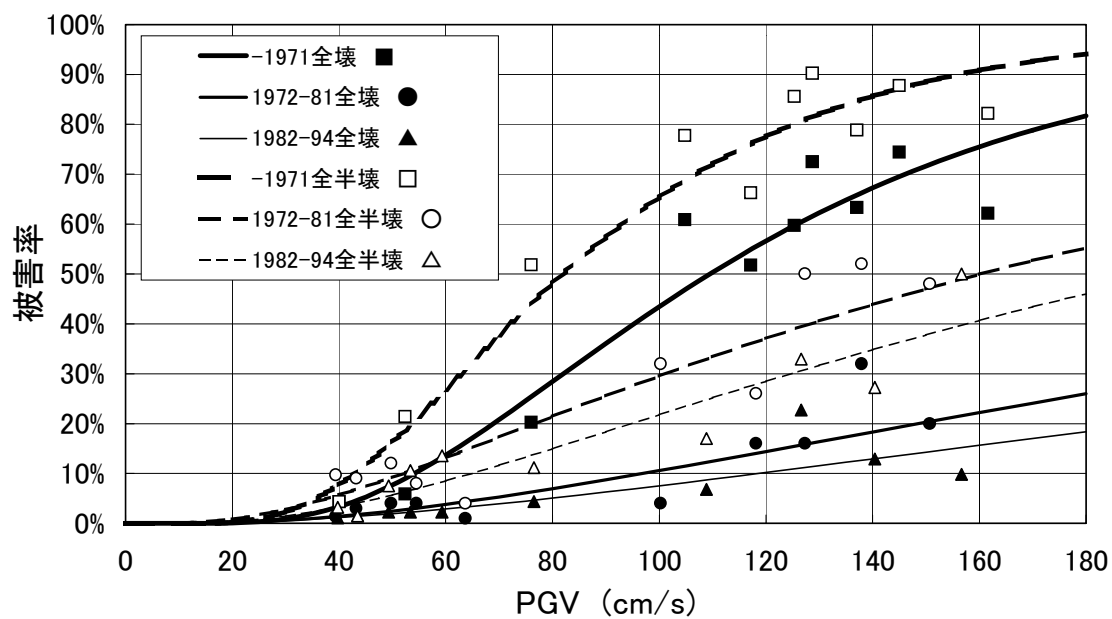


図-6.11 軽量S造の建築年代別被害関数

6.3 建物被害関数による推定値と実被害との比較

第5章では、山口・山崎（1999）による推定地震動を用いて建物被害関数（ ）を求め、それをもとにして灘区における地震動分布を再推定した。その結果、建築年代ごとの棟数分布が地域によって異なることの影響を取り除くことができ、町丁目ごとの微地形も考慮した精度の高い地震動を推定することができた。本章はこの再推定した地震動をもとにして、より精度の高い建物被害関数（ ）を求めることを目的としている。この建物被害関数（ ）とは6.2で求めたものであり、図-6.1のようなプロセスを得てようやく得られるものである。被害関数を構築するためには建物被害データと地震動分布が必要であるが、兵庫県南部地震の際の観測記録は限られており、町丁目ごとの正確な地震動分布を測定することは不可能であった。そこで図-6.1に示したように、地震動のような推定値と仮説（建研低層独立住宅データを木造建物と仮定して計算するなど）を含む過程を経て、最終的な被害関数構築へと至ったのである。ここでは、これらの過程の最終段階として、建物被害関数（ ）と（ ）を町丁目ごとの実被害との関係から比較し、精度が上がったことを確認する。

(1) 町丁目ごとの建物被害関数計算値と実被害との比較

ここでは灘区の推定地震動分布と二つの木造被害関数（ ）と（ ）を用いて、町丁目ごとの建物被害棟数を計算し、実際の建物棟数と比較する。図-6.12、図-6.13は木造（全半壊）の被害関数による比較である。前者が被害関数（ ）と山口・山崎（1999）による推定地震動を用いたものであり、後者は被害関数（ ）と第5章で求めた再推定地震動を用いたものである。左上には近似直線の式と相関係数が示されている。被害関数（ ）よりも第5章で構築された被害関数（ ）の方が、実被害との相関が高く、また直線の傾きが1.00に近くなっている。これは図-6.1に示したように、微地形や建物分布の偏りを考慮することにより、地震動を再推定し、さらにその地震動の再推定値から被害関数を構築することにより、精度が高くなったことを示している。6.2で得た構造別および建築年代別全ての被害関数で同様の比較を行ったところ、全ての関数において精度が上がっていることが確認された。また木造の建物被害関数（ ）と（ ）の比較は図-6.14のようになる。これらのカーブの違いは、被害関数構築の基となった地震動の違いを示している。

(2) 灘区における建物被害推定棟数と実被害との比較

最後に本章によって得られた建物被害関数（ ）を用いて、灘区全体（対象地域内）の建物被害棟数を求め、実被害と比較する。表-6.4に建物被害棟数の推定値と実被害との比較を示す。上段の表は構造別の被害関数を用いた場合、下段は建築年代別の被害関数を用いた場合であり、合計という欄は各年代ごとの被害関数による推定値を合計したものである。どの項目も推定値と実被害が良く近似していることがわかる。実被害に対する推定値の平均比率（構造・建築年代別18種の平均）は、全壊の場合が99.6%、全半壊の場合が100.9%と高い精度であった。また木造のようにデータ数の多いものに比べて、軽量S造のように少ないデータから構築した被害関数（特に建築年代別）は、表-5.4に見られるように相関が低いものが一部あるため、その精度に多少の問題があると思われたが、これを見る限りかなり良い結果となっている。構造別の関数も建築年代

別の関数も、同精度に見えるが、それは灘区全体の合計としてとらえているためであり、町丁目毎の棟数で見れば、建築年代別の被害関数を用いる方がより良い被害想定ができると思われる。今後、各自治体で被害想定等を行う場合に、可能ならば建築年代別の被害関数を使用した方が良い。しかし、建築年代別の建物データがない場合あるいは簡易的なシステムを作る場合には構造別被害関数を用いるなど、状況に応じて使い分けることも可能であろう。

以上(1),(2)の結果から、本章によって構築された構造別・建築年代別の建物被害関数は、建物被害の状況をかなりの高精度で再現するものであるということが出来る。

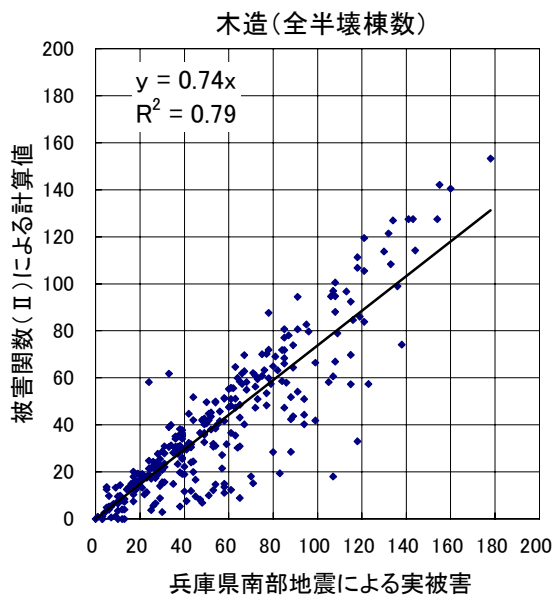


図-6.12 建物被害関数(Ⅱ)による町丁目ごとの推定被害棟数と実被害との比較

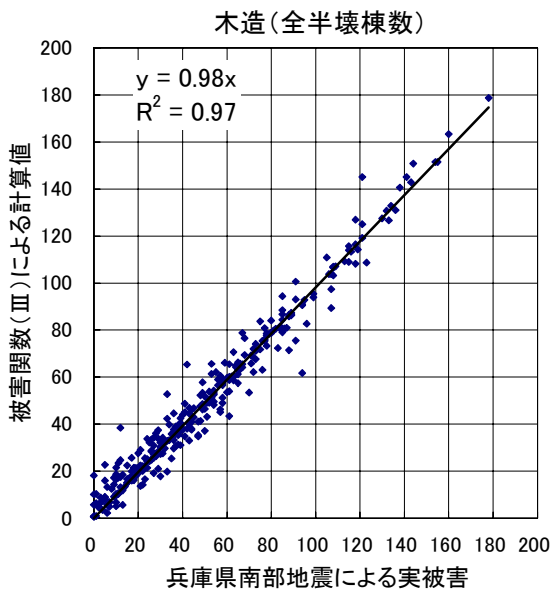


図-6.13 建物被害関数(Ⅲ)による町丁目ごとの推定被害棟数と実被害との比較

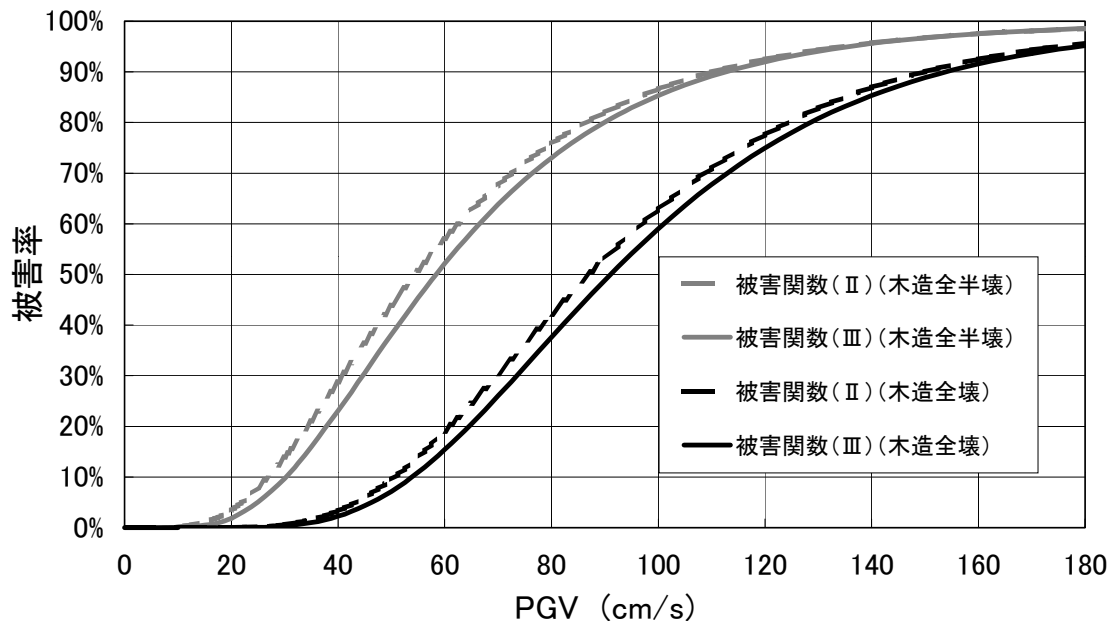


図-6.14 建物被害関数(II)と(III)の比較(木造)

表-6.4 灘区における推定建物被害棟数と実被害との比較

構造別の建物被害関数(III)を用いた場合

構造	全壊棟数		全半壊棟数	
	推定値(III)	実被害	推定値(III)	実被害
木造	11,868	11,901	16,625	16,693
RC造	367	373	914	921
S造	506	520	935	940
軽量S造	258	263	423	425

建築年代別の建物被害関数(III)を用いた場合

構造	建築年	全壊棟数		全半壊棟数	
		推定値(III)	実被害	推定値(III)	実被害
木造	-1951	5,031	5,029	6,691	6,659
	1952-61	2,915	2,897	3,836	3,831
	1962-71	2,626	2,585	3,500	3,510
	1972-81	1,021	1,006	1,771	1,767
	1982-94	390	384	962	926
	合計	11,983	11,901	16,760	16,693
RC造	-1971	170	169	316	320
	1972-81	137	137	351	359
	1982-94	61	67	240	242
	合計	368	373	907	921
S造	-1971	232	231	300	298
	1972-81	183	182	344	335
	1982-94	104	107	307	307
	合計	519	520	951	940
軽量S造	-1971	212	214	287	291
	1972-81	23	25	70	62
	1982-94	27	24	76	72
	合計	262	263	433	425

6.4 まとめ

本章では、神戸市によって実施された兵庫県南部地震による灘区の建物被害データと、第5章で推定した詳細な地震動分布を用いて、構造別（木造・鉄筋コンクリート造・鉄骨造・軽量鉄骨造）および建築年代別（木造5区分，その他の構造は3区分）の建物被害関数を構築した。

構築された構造別の建物被害関数では、木造の被害は小さい地震動から発生し始め、かつどの最大速度値においても他の構造に比べて被害率が高くなるのに対し、RC造は高い地震動になっても被害率が低かった。また建築年代別では、木造以外の全てにおいて古い建物ほど小さい地震動で被害率が上がり始め、それぞれの地震動においても新しい建物より高い被害率を示した。これらと同様の傾向は、第4章の建物被害分析の結果からも見られた。木造に関しては、基本的にそれぞれのPGVにおいて古いものほど高く、新しいものほど低い被害率となっていたが、古い3曲線は120 cm/sを超えたあたりからほとんど重なってしまっていた。本章で扱ったデータの中には明治時代初期の建物もあり、それらも1951年以前の建物に含まれている。それらの建物は強度が高く良好なものばかりであった可能性もあり、そのような理由から、新しい年代の曲線と地震動の高い付近で重なることもありうると思われる。

また、本章の中で詳細な地震動分布を用いて構築された建物被害関数と、第4章で構築した建物被害関数とを町丁目ごとの実被害を用いて比較した。その結果、本章により、建物被害関数の精度が向上したことが確認された。

以上の結果から、本章によって構築された構造別・建築年代別の建物被害関数は、兵庫県南部地震の建物被害の状況を高精度で再現するものであり、固定資産管理のための建物データを所有する自治体等が被害推定や危険度評価を実施する際に、有用な被害推定式を提供すると思われる。ただし、中には建築年代別の ζ の値が、全年代のものよりも大きくなってしまったもの、すなわち分散が増えたものがいくつかある。これらは構造別のデータを年代別に区分したために、確率的処理をする上で十分なデータ数を得られなかったものと思われる。今後、これらのパラメータを被害推定等に使用するうえでは、その点を理解し注意する必要がある。また本研究で構築された建物被害関数における全壊・半壊の定義は神戸市が実施した調査の判定基準に基づくものであり、第2章、第3章で述べたように他の自治体や震災復興都市づくり特別委員会による建物調査の基準とは異なっている。一般に適用する際には、その旨を理解し、それらを示したうえで利用することが重要であり、関数が一人歩きしないよう注意すべきである。

今回用いた建物被害データには、構造・建築年の他に階数・用途・屋根種別・延床面積等の属性が含まれている。これまでに行ってきた分析によれば、それぞれの属性が少なからず建物被害に影響を与えており、各属性に応じたさらに細かい被害関数を構築することも可能かと思われる。しかし、「木造は住宅が多い」、「古い建物は瓦屋根が多い」など各属性がお互いに関係しており、被害関数を更に細かくしていくためには、数量化理論等を用いて、どの属性による影響が最も大きいかが検討する必要がある。本章では、多くの自治体が所有している構造・建築年別の建物データに適用出来るよう、構造・建築年別の被害関数のみを構築した。用途・屋根等の被害関数構築に関しては、今後の課題としたい。