

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

DEVELOPMENT OF FRAGILITY CURVES FOR BUILDINGS BASED ON
DAMAGE SURVEY DATA OF A LOCAL GOVERNMENT
AFTER THE 1995 HYGOKEN-NANBU EARTHQUAKE

村尾 修*, 山崎文雄**

Osamu MURAO and Fumio YAMAZAKI

This paper presents fragility curves for buildings based on damage data due to the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. The fragility curves in terms of the structural type and construction period were constructed using the building damage data of Nada Ward surveyed by Kobe City for the purpose of property tax reduction. It was also demonstrated that the number of damaged buildings in Nada Ward estimated by the fragility curves fits the actual damage by the earthquake. The fragility curves thus obtained may be useful for damage assessments of buildings in Japan.

Keywords: the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, building damage, strong ground motion, Nada Ward, fragility curve, damage assessments

兵庫県南部地震, 建物被害, 地震動, 灘区, 被害関数, 被害想定

1. はじめに

兵庫県南部地震では, 全壊が約 11 万棟, 半壊が約 14 万 7 千棟¹⁾という膨大な数の建物が被害を受け, 地震直後にはそれぞれ異なる目的でいくつかの建物被害調査が行われた²⁾. これらの調査結果の中には, 今後の都市防災研究に役立つ大変貴重なデータが数多く含まれている. 本研究では, 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 年代の物部による研究を皮切りとして, 岡田・鏡味³⁾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⁴⁾. しかし, 建物被害関数のもとに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²⁾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. 学会等でも報告されている⁵⁾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か正しく認識しておく必要がある.

林ら⁶⁾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データ⁷⁾を用いて, 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構築しているが, 建築年代については考慮していない. 宮腰・林ら⁸⁾は, 同推定地動速度分布⁹⁾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・翠川ら¹⁰⁾は, 建築研究所データ⁷⁾と東灘区西部地区の建物について村上ら¹¹⁾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.

筆者らの研究グループは, 地震動強さと建物被害との詳細な被害関数を構築するために, これまでに兵庫県南部地震による建物被害データを各自治体から収集し, 分析を行ってきた¹¹⁾⁻¹⁷⁾. 本研究は, 神戸市から提供された建物被害データ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

* 東京大学生産技術研究所 助手・博士(工学)

** 東京大学生産技術研究所 助教授・工博

Research Assoc., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

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、墓石の転倒率¹⁸⁾やアンケートを用いる方法¹⁹⁾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その周辺地域の低層独立住宅被害データ⁷⁾を用いて低層独立住宅の被害関数(I)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(II)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

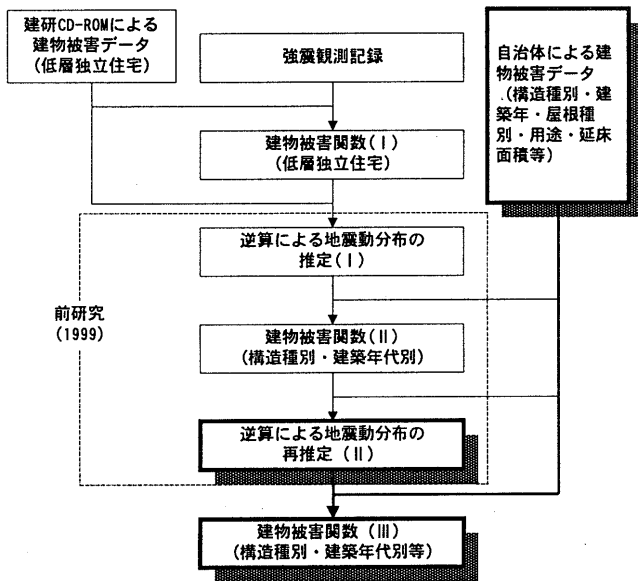


図1 建物被害関数構築までのフローチャート

表1 灘区の建物被害棟数

構造	建築年代	全壊	半壊	その他	計
木造	-1951	5,032	1,636	1,138	7,806
	1952-61	2,897	936	992	4,825
	1962-71	2,588	928	1,126	4,642
	1972-81	1,006	764	1,218	2,988
	1982-94	384	542	1,523	2,449
	計	11,907	4,806	5,997	22,710
RC造	-1951	10	5	18	33
	1952-61	30	27	125	182
	1962-71	131	123	623	877
	1972-81	126	224	906	1,256
	1982-94	57	153	1,256	1,466
	計	354	532	2,928	3,814
S造	-1951	2	1	32	35
	1952-61	11	9	121	141
	1962-71	227	92	145	464
	1972-81	185	157	288	630
	1982-94	107	203	593	903
	計	532	462	1,179	2,173
軽量S造	-1971	221	77	245	543
	1972-81	25	39	231	295
	1982-94	26	48	389	463
	計	272	164	865	1,301
その他		133	89	324	546
全建物		13,198	6,053	11,293	30,544

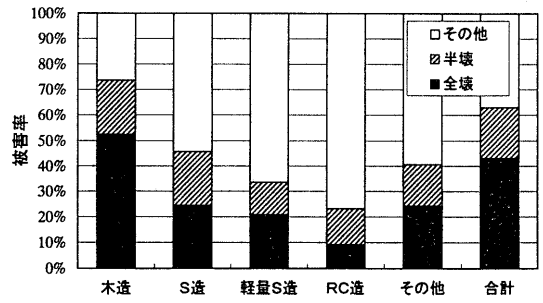


図2 建築物の構造別被害率

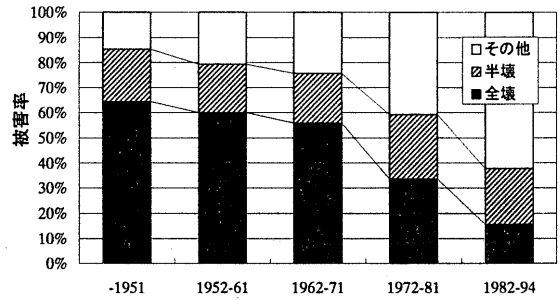


図3 木造の建築年代別被害率

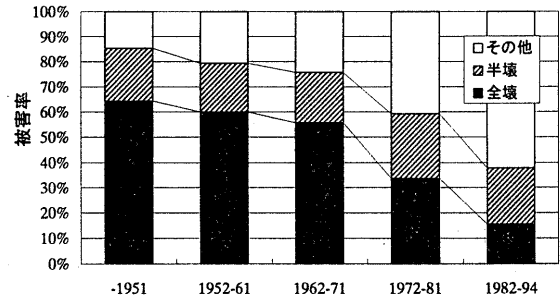


図4 RC造の建築年代別被害率

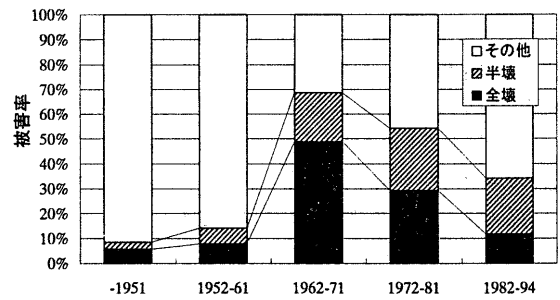


図5 S造の建築年代別被害率

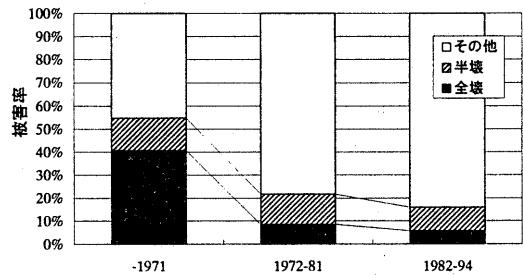


図6 軽量S造の建築年代別被害率

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²⁰⁾および著者ら^{21)、22)}により既に報告されている。本研究(図中、陰影をつけて示した部分)では、以上の研究によって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(Ⅲ)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。

2. 灘区における建物被害の概要

ここでは、筆者らによってこれまでに報告されてきた灘区の建物被害分析¹⁰⁾の概要を述べる。

(1) 灘区の被害概要

兵庫県南部地震により、神戸市は他地域に比べてより大きな被害を受けた。神戸市の中でも副都心と位置付けられている灘区において、良好な環境の住宅地である北部は兵庫県南部地震による被害が比較的少なかったが、中央部以南では、火災が発生し焼失した地区や、住宅がほとんど倒壊した地区もある。神戸市の統計によれば、灘区全体では全壊 12,757 棟、半壊 5,675 棟、全焼 327 棟、半焼 43 棟、死亡者 924 人という被害を受けた²³⁾。神戸市内においてこれらの被害は、全壊数では長田区(15,521 棟)、東灘区(13,687 棟)について、全焼数では長田区(4,759 棟)、兵庫区(940 棟)について、死亡者数では東灘区(1,461 人)について被害が大きかった²³⁾。

(2) 使用したデータ

本研究に使用した建物被害データは、兵庫県南部地震後に神戸市によって実施された建築物被災度調査に基づくもので、調査項目は一棟ごとの町丁目、建築構造(7分類:木造、軽量鉄骨造、鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造、コンクリートブロック造、レンガ造)、建築日付、合計床面積、屋根(5分類:瓦葺き、スレート葺き、金属葺き、板葺き、その他)、階層、被害区分(3分類:全壊、半壊、全焼)である。被害区分に関して、「一部損壊」という区分を取り入れた自治体もあるが、神戸市では、どの建物も何らかの被害を受けており「一部損壊」と「無被害」の区別をするのは難しい、という判断をしたため、「全壊」、「半壊」、「全焼」以外のものを「その他」としている²⁾。これらのデータの内、床面積 10 m²未満のデータ(2,542 件)、地上階のないデータ(213 件)、建築日付が特定されていないデータ(35 件)を削除した後、住宅地図²⁴⁾と照合したうえで、約3万件の灘区建築物被害データベースを作成し、被害の分析を行った。

表1に各主要構造の建築年代別の建物被害棟数を示す。これらの建物データを構造別に見ると、全体の約4分の3を木造建築物が占め、次いで鉄筋コンクリート造(以下、RC造)、鉄骨造(以下、S造)、軽量鉄骨造(以下、軽量S造)が全体のほぼ残りを占め、コンクリートブロック造、鉄骨鉄筋コンクリート造およびレンガ造はわずかであった。

(3) 建築物の被害分析

灘区の建築物の構造別被害率を図2に示す。全壊率および全半壊率ともに、木造が最も高く、次いでS造、軽量S造、RC造と低くなっている。棟数が全体の4分の3を占める木造と残りの約半分を占めるRC造とを比較すると、木造の全壊率(52.4%)は鉄筋コンクリート造(9.3%)の約6倍となっている。

次に木造、RC造、S造および軽量S造の建築年代別の被害を図3から図6に示す。非木造建築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10年ごとに区切り分析したが、

木造建築物に関しても比較検討のため同様の区分を施した。

S造の1961年以前を除いて、建築年代の古いものほど全壊率および全半壊率が大きくなっている。また各構造について、1年ごとに区分した被害率の変化も調べてみたが、ほぼ連続的に年代が古くなるほど被害率の増加が見られ、経年による劣化の影響を受けていると思われる。とくに木造では1971年と1981年、RC造では1981年、軽量S造では1981年を境に全壊率の減少率が大きくなっており、耐震基準改正による影響かと思われる。古い建物ほど被害率が高いという傾向は、他の地域における建物被害分析¹²⁾⁻¹⁷⁾でも見られるため、S造の1961年以前の被害率が低い傾向(図5)は特殊な状況と考えられる。この時期の建物分布を調べた結果、それらの多くは臨海部に位置しており、液状化の影響を強く受けている。またこの建物群の中には製鋼所の工場・倉庫などが多く含まれており、他の地域の鉄骨造と違う特性を持っていたことも考えられる。

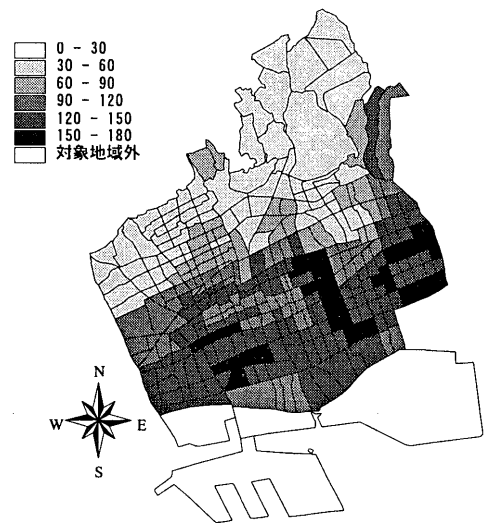


図7 灘区における推定地震動と対象地域

表2 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3 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

3. 自治体の建物被害調査に基づく灘区の建物被害関数

ここでは筆者ら²²⁾により推定された図7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5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2に示すように地震動指標の大きさと並び替えた上で、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3に示す通りである。木造以外は、棟数が比較的小さいため、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、

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

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、

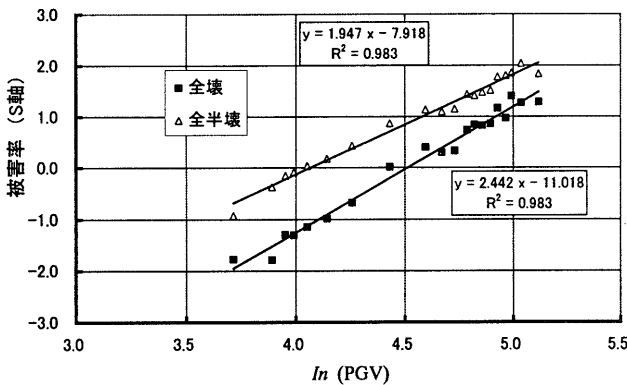


図8 最大速度と木造建物被害率の関係の確率紙表示

表4 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	0.718	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

図8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4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

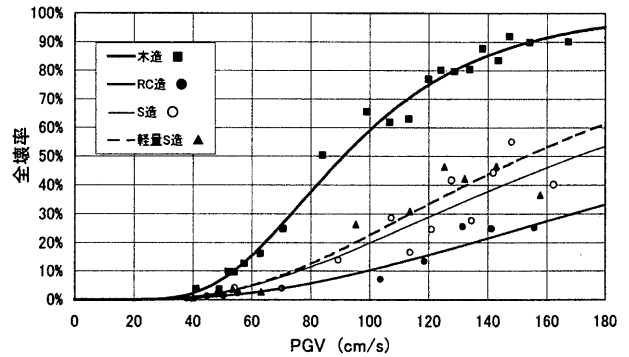


図9 構造別建物被害関数(全壊率)

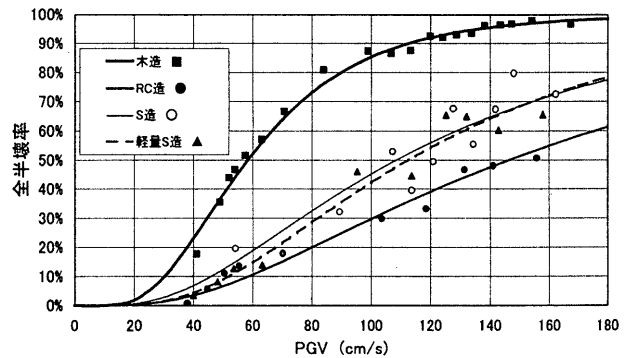


図10 構造別建物被害関数(全半壊率)

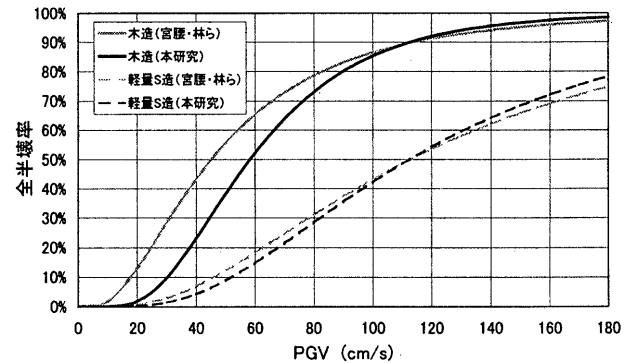


図11 被害関数の比較(全半壊率:木造・軽量S造)

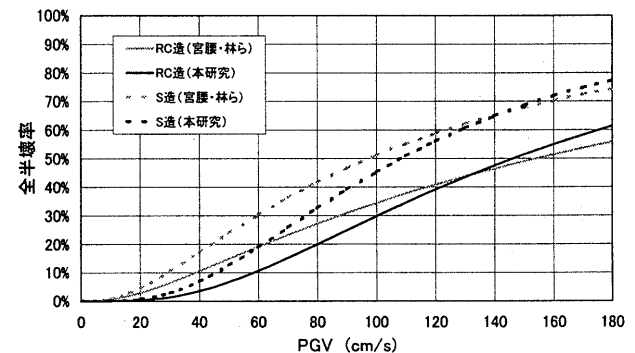


図12 被害関数の比較(全半壊率:RC造・S造)

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木造建物データから推定したもので、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程度のあるものがほとんどは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。

(2) 構造別建物被害関数

図9, 図10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)と建研データ⁷⁾から推定された地震動^{9), 9)}を用いて宮腰・林ら⁸⁾により構築された構造・年代別の被害関数と比較する。図11, 図12に各構造ごとの被害関数(全半壊率)の比較を示す。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早く, 小さな地震動で被害が発生している。宮腰・林らの用いた推定地震動^{9), 9)}が被害の大きかった地域からの観測記録をもとにしているのに対し, 本研究で用いた推定地震動²²⁾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・山崎による地震動²⁰⁾を, さらに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。また全壊率の被害関数についても比較したが, 全半壊率と同様の傾向が見られた。

(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13, 図14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。同様の傾向は図3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。本研究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考えられる。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

木造: 建築年代別被害関数(全壊)

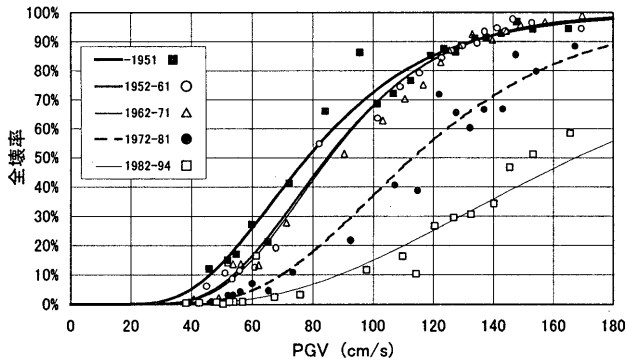


図13 木造の建築年代別被害関数(全壊率)

木造: 建築年代別被害関数(全半壊)

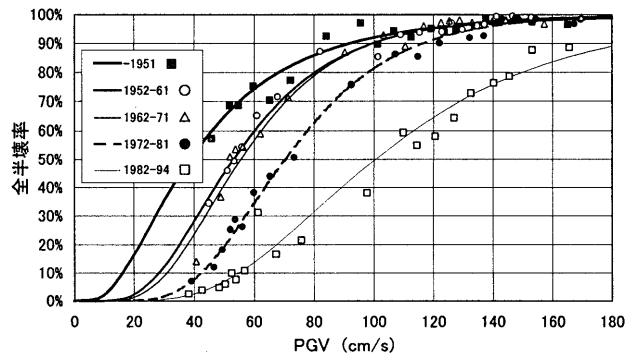


図14 木造の建築年代別被害関数(全半壊率)

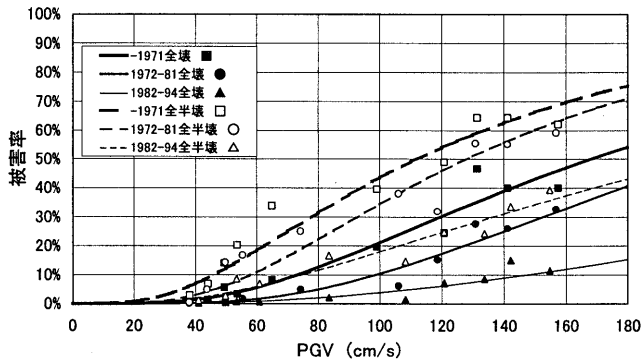


図15 RC造の建築年代別被害関数

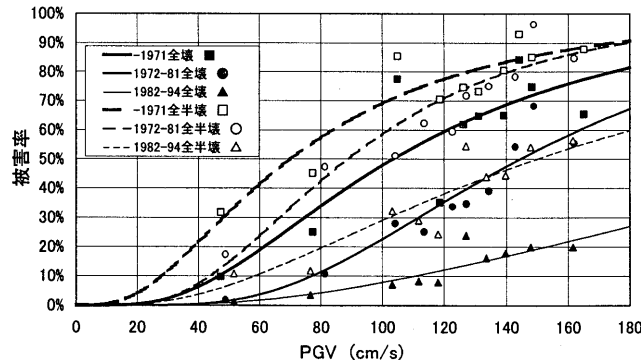


図16 S造の建築年代別被害関数

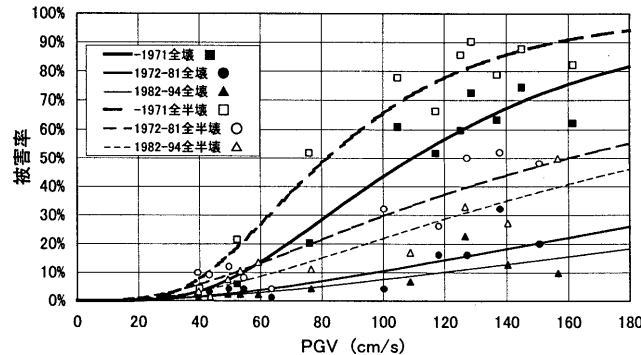


図17 軽量S造の建築年代別被害関数

れ被害が発生し始めている。

図 15 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 13 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 16、図 17 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 17、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早く上がっているが、軽量 S 造の年代別被害率を示した図 6 にこれと同様の傾向が見られる。

4. 建物被害関数による推定値と実被害との比較

第 1 節でも述べたように、前研究^{21), 22)}では、山口・山崎²⁰⁾による推定地震動を用いて建物被害関数(Ⅱ)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。本研究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(Ⅲ)を求めることを目的としている。この建物被害関数(Ⅲ)とは前節で求めたものであり、図 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。そこで筆者らの研究グループは、図 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(Ⅱ)と(Ⅲ)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(Ⅱ)と(Ⅲ)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 18 は木造（全半壊）の被害関数による比較である。上が被害関数(Ⅱ)と山口・山崎²⁰⁾による推定地震動を用いたものであり、下は被害関数(Ⅲ)と著者らによる再推定地震動²²⁾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(Ⅱ)よりも本研究により構築された被害関数(Ⅲ)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 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。3 節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(Ⅱ)と(Ⅲ)の比較は図 19 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

最後に本研究によって得られた建物被害関数(Ⅲ)を用いて、灘

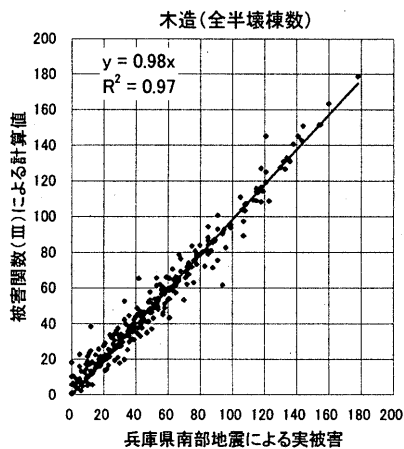
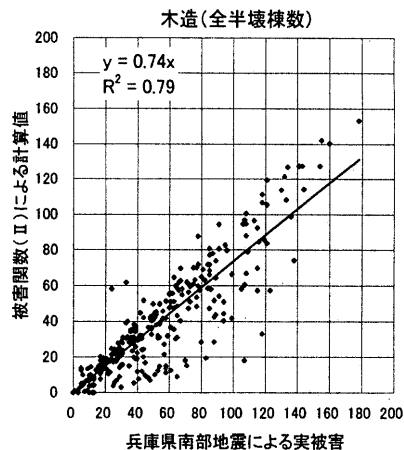


図 18 建物被害関数(Ⅱ)と(Ⅲ)による町丁目ごとの推定被害棟数と実被害との比較

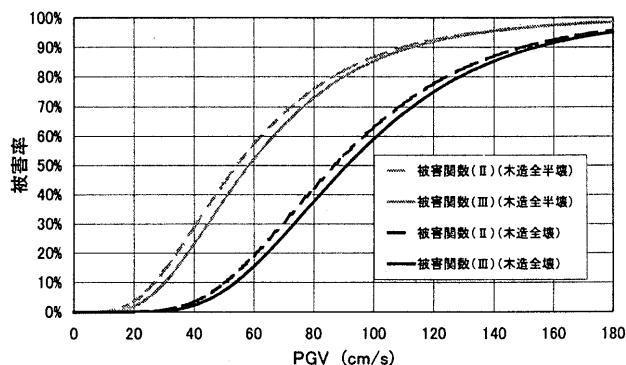


図 19 建物被害関数(Ⅱ)と(Ⅲ)の比較(木造)

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 5 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

表5 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

に建築年代別)は、表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、町丁目毎の棟数でみれば、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よい。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、本研究によって構築された構造別・建築年代別の建物被害関数の精度が向上したことが確認された。

5. まとめ

本研究では、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、過去に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、過去に行った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。本研究で扱ったデー

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、本研究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、以前に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、本研究により、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、本研究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、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²⁾。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。本研究では、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。

謝辞

本研究においては、兵庫県南部地震後に神戸市が調査した建物被害データを利用させていただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 国土庁：防災白書平成9年版，1997.
- 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.187-194，1999.1.
- 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ビリティ関数群の構成，地震，第2巻，第44巻，第2号，pp.99-108，1991.
- 鏡味洋史：地震動特性と建物被害の関係，地震動の特性と建築物の被害—経験と予測—，日本建築学会災害委員会，pp.3-8，1998.9.
- 林康裕，宮腰淳一，田村和夫，川瀬博：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集，第494号，pp.59-66，1997.4.
- 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集，第502号，pp.61-68，1997.12.
- 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.
- 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 (ICOSSAR), pp.349-354, 1997.
- 9) 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, 1998.3.
 - 10) 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, 1996.3.
 - 11) 村尾修, 山崎文雄: 兵庫県南部地震における灘区の建物被害分析, 第 24 回地震工学研究発表会論文集, pp.1261-1264, 1997.7
 - 12) 後藤寛子, 山崎文雄, 若松加寿江, 浅野進一郎: 兵庫県南部地震における尼崎市の建物被害分析, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1233-1236, 1997.7.
 - 13) 杉浦正美, 山崎文雄: 兵庫県南部地震における伊丹市の建物被害分析, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1257-1260, 1997.7.
 - 14) 山口直也, 山崎文雄, 若松加寿江: 兵庫県南部地震における西宮市の建物被害分析, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1237-1240, 1997.7.
 - 15) 村尾修, 山崎文雄: 兵庫県南部地震における北淡町の建物被害分析, 第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.367-370, 1997.11.
 - 16) 杉浦正美, 山崎文雄: 兵庫県南部地震の宝塚市域被害データに基づく建物被害推定式, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3385-3390, 1998.11.
 - 17) 杉本寛子, 山崎文雄, 西村明儒, 佐藤修: 兵庫県南部地震における芦屋市の建物被害と人的被害の関係, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3439-3444, 1998.11.
 - 18) 翠川三郎, 藤本一雄: 墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 490 号, pp.111-118, 1996.12.
 - 19) 太田裕, 小山真紀, 中川康一: アンケート震度算定法の改訂-高震度領域— 自然災害科学, Vol.16, No.4, pp.307-323, 1998.
 - 20) 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, 1999.1.
 - 21) Murao, O., and Yamazaki, F.: Development of Fragility Curves for Buildings based on Damage Data due to the Hyogoken-Nanbu Earthquake, Proceedings of Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (APSSRA 99), pp.259-269, 1999.2.
 - 22) 村尾修, 山崎文雄: 兵庫県南部地震の被害分析 —その 10 建築年代を考慮した木造建物被害に基づく灘区の地震動分布—, 生産研究, Vol.51, No.2, pp.17-20, 1999.2.
 - 23) 神戸市: 神戸市統計要覧 1996, 1996.
 - 24) ゼンリン: ゼンリン住宅地図'94 神戸市灘区, 1994.

(1999年2月10日原稿受理, 1999年8月2日採用決定)