

地震による木造建物の損傷度を反映する被害関数の構築

Development of Fragility Functions based on Damage Levels of Wooden Buildings due to Earthquake

堀江 啓^{1,2}, 林 春男^{1,3}, 田中 聡³, 長谷川 浩一¹, 牧 紀男¹, 沖村 孝²

Kei HORIE^{1,2}, Haruo HAYASHI^{1,3}, Satoshi TANAKA³,
Kouichi HASEGAWA¹, Norio MAKI¹ and Takashi OKIMURA²

¹ 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター

Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED

² 神戸大学大学院自然科学研究科

Graduate School of Science and Technology, Kobe University

³ 京都大学防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

To protect human lives from earthquake disaster is essential for disaster management. In the case of the 1995 Hanshin-Awaji earthquake disaster, especially, the building completely collapsed pattern without survival space was major killer. Therefore, it is important issue that revealing of how many buildings are facing to such risk and how to treat the risk against a post-earthquake disaster.

In this paper, the fragility functions reflecting building damage levels with consideration of the building characteristics are developed based on the analysis of building damage patterns using photographic images. It will be a useful tool to estimate the occurrence of completely collapsed buildings.

Key Words : building damage pattern, damage photograph, building characteristic, complete collapse, Nishinomiya city, Hanshin-Awaji earthquake disaster

1. はじめに

わが国の防災の基本的な考え方は、1995年に発生した阪神・淡路大震災を契機として、これまでの被害抑止力の向上を目指したハードな対策に傾倒したものから、ソフト面を含めて総合的に被害を軽減するための対策へと推移している。防災対策の第1目標として「いのちを守る」ことが挙げられる。地震時の人的被害の軽減を考えると、阪神・淡路大震災では発災が早朝であったこともあり、関連死を除いた5,500名あまりの死者のうち、8割以上が家屋の倒壊に起因したと報告¹⁾されている事実に着目すべきである。したがって、人的被害の軽減を図るためには、まず、このような家屋の倒壊を発生させない、次に万一発生した場合に備えて、逸早い救命・救助活動を行うための対策を事前に準備することが必要となる。このような二段構えの対策を講じるためには、人的被害発生の主要因と位置づけられる建物被害の中で、建物内の生存空間が失われる「層破壊」の発生機構を解明し、層破壊発生の危険性が高い建物や地域を精度良く事前に評価することは重要な課題である。

建物の被害発生を評価するための有効なツールの一つとして建物被害関数がある。建物被害関数の構築に関する研究^{例えば2), 3), 4), 5)}はこれまでにいくつか行われているが、その多くは実際の地震被害調査結果から求められた統計的被害関数である。その基礎となった被害調査には層破壊に着目して実施されたものが少なく、「層破壊」

は「全壊」というカテゴリーの中に含まれる形で評価されている。これまでに、著者らの研究グループ^{6), 7)}は、阪神・淡路大震災において「全壊」と評価された建物の破壊状態に関する分析を行い、「全壊」には、完全に瓦礫状態のものから外観上の被害は軽微なものまで、様々な破壊パターンが含まれているということを明らかにしている。呂ら⁸⁾は、建物被害と人的被害の関係について、建物被害評価指標である全壊建物数または全壊率と人的被害の間には有意な相関性がないことを指摘しているが、その要因として上述のような「全壊」という定義が明確ではなかった点が挙げられる。また、2001年に内閣府により家屋の被害認定基準が改定され、その新基準による評価は阪神・淡路大震災での評価よりも厳しい判定になる傾向があることが著者ら⁷⁾のシミュレーション結果により明らかにされている。したがって、人的被害の推定に限らず、例えば瓦礫量や建物解体数の推定、避難者数の推定を行う際の根拠として建物被害を用いる場合、「全壊・半壊」といった指標よりも損傷レベルに則した被害評価が今後の防災対策を推進する上で必要となろう。

岡田ら⁹⁾は、こういった要因による人的被害の推定精度の問題を指摘しており、木造建物の層破壊を含めた崩壊パターンに立脚した人的被害発生予測式を提案している。また、崩壊パターン別の建物被害の発生を評価するために、1975年を境とした木造建物の被害関数を構築している。しかし、構築対象とした地域は、東灘区東部地区に限られており、さらに建物の破壊に関する資料を蓄

積し、特に層破壊がどのような条件下で発生したのか、その発生機構を解明する必要がある。

本研究では、人的被害を軽減するための対策を講じる上で必要となる人的被害の推定精度の高度化を最終目的とし、そのために阪神・淡路大震災ではどのような建物の破壊がどのような要因により発生したのかを明らかにすることを目的としている。具体的には、震災時に撮影された被害写真から建物の損傷度を判定し、損傷度を反映した被害関数を構築する。その中で特に、木造建物の層破壊に焦点を当て、その発生実態を解明するために、層破壊の発生と地震動強さや建築年などの建物属性との関係について検討を行う。それらの結果から層破壊の発生を推定するための被害関数を構築する。

2. 使用データ

(1) 西宮 Built Environment データベース

防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センターでは兵庫県西宮市を対象として、阪神・淡路大震災 GISデータベース「西宮 Built Environment データベース¹⁰⁾」(以下、西宮BEDB)の構築を行っている。このデータベースには、西宮市の96,176棟の建物について、建物属性、人的被害、建物被害調査結果、被害写真などのデータが建物1棟単位でリンクされている。これらのデータの内、建物属性情報データは、西宮市から提供されたものであり、用途、構造、階数、建築年、建築面積、延床面積などの詳細な情報がリンクされている。

また、被害イメージデータとして、日本都市計画学会関西支部と日本建築学会近畿支部による調査¹¹⁾(以下、二学会合同調査)の時に撮影された11,426枚の被害写真がデジタル化され撮影位置とその方向が矢印として表現されたポイントデータとリンクされている。これらの被害写真には26,075棟の建物が撮影されている。

(2) 地震動データ

地震動データは、Kohiyama ら¹²⁾が西宮 BEDB を用いて佐藤ら¹³⁾の手法により西宮市南部地域について地震動分布シミュレーション解析を行った結果を用いた。シミュレーション解析は断層の破壊点から観測点までの地震動の伝播経路の影響および地盤の増幅特性を考慮するため、断層モデルは Sekiguchi ら¹⁴⁾の断層破壊過程モデルを使用し、深層地盤モデルおよび 109 地点のボーリングデータに基づく表層地盤モデルを構築し、1 次元重複反射理論により地表面の地震動のフーリエスペクトルを求めたものである。西宮 BEDB には解析結果から求められた最大地表加速度 (PGA)、最大地表速度 (PGV)、スペクトル強度 (SI) が建物 1 棟単位でリンクされている。

(3) 層破壊建物データ

阪神・淡路大震災では様々な機関によって建物の被害調査が実施されたが、層破壊に着目した調査は少なく、その発生実態に関するデータは十分ではない。そこで、著者ら¹⁵⁾は西宮BEDBを用いて、西宮市における層破壊被害建物の同定を行っている。具体的にはこのデータベースの被害写真に撮影された26,075棟の建物について、岡田、高井^{16), 17)}により提案された被害パターンチャートに基づく被害分類、航空写真を用いた被害判読、および現地聞き取り調査による被害確認の3段階の手法により層破壊の発生有無を判別した。なお、判別にあたり層破壊建物とは図1に示すような岡田、高井による被害パターンチャートのダメージグレードD5以上と定義した。ただし、建物の2階部分が層破壊を起こすパターンであるUd5(+,-)については、内部空間の損失量から細分類を行い、図2に示すようにPd5(+,-)を新たに設定した。その結果、1,114棟を層破壊と判定した。図3に層破壊パターンの詳細を示す。2階建て建物の1階が層破壊するパターン (Gd5) が最も多く、次に多い全ての層が層破壊するパターン (Cd6) と合わせると全体の89.1%を占めていた。

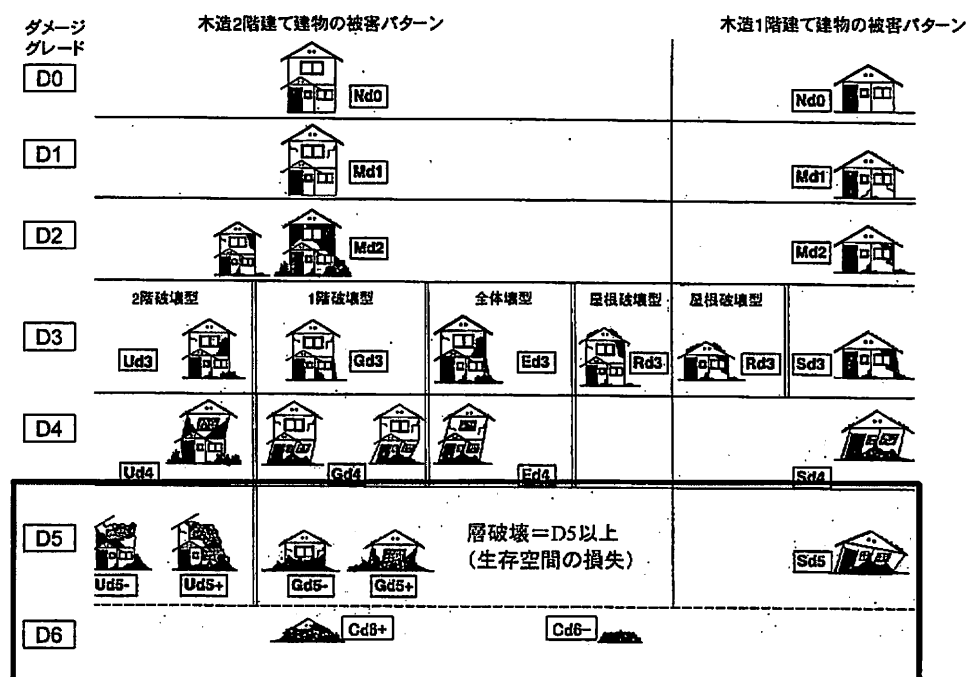


図1 被害パターンチャート (岡田・高井^{16), 17)}による)

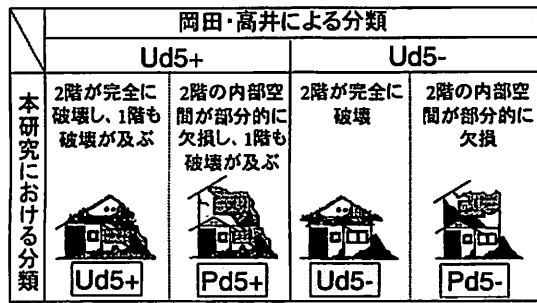


図2 被害パターンの新規設定

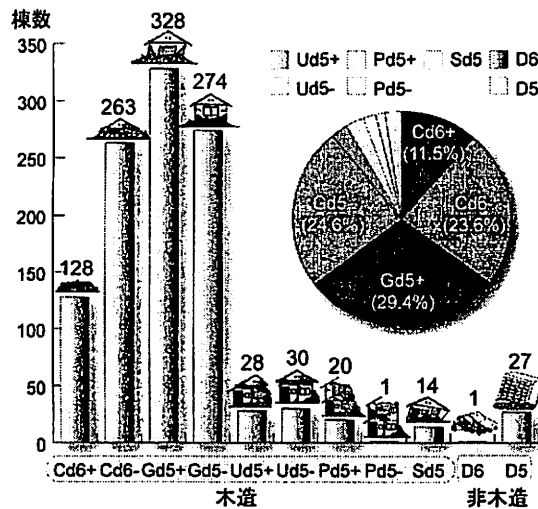


図3 層破壊建物の被害パターン

(4) データセットの構築

被害写真によって層破壊を同定した結果、西宮市における層破壊建物の97%は木造建物であり、以降において、木造建物を対象として層破壊発生要因の分析を行うためにデータセットを構築した。構築の流れを図4に示す。西宮BEDBの96,176棟の建物に地震動データを空間結合によりリンクさせた。地震動分布の解析は内挿計算を行い評価されたものである。したがって、図5に示すようにボーリングポイントで囲まれる解析結果の信頼性が高い範囲を分析対象エリアとして設定した。

対象エリア内の建物数は西宮BEDB全体の約8割にあたる75,240棟である。この建物に属性情報をリンクさせ、木造建物32,825棟を分析対象建物として設定した。属性情報のリンクは無作為に行われており、これらのデータを分析することで対象エリア内の木造建物全体の傾向を把握することが可能と仮定している^(注1)。さらに、このデータから写真データを持つ建物11,908棟をサンプルデータとして抽出した。ただし、写真は無意識のうちに被害の大きい建物や写り映えの良い建物を撮影している可能性があるが、著者ら¹⁵⁾はχ²乗検定によりサンプルデータが建物属性および建物被害の面で偏って抽出されていないことを確認している。抽出データの概要を表1に示す^(注2)。

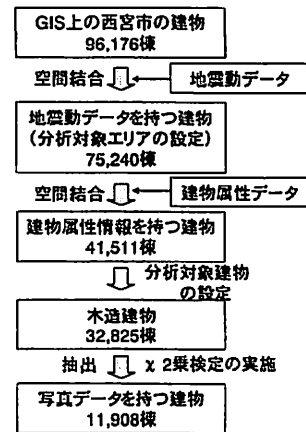


図4 データセット構築の流れ

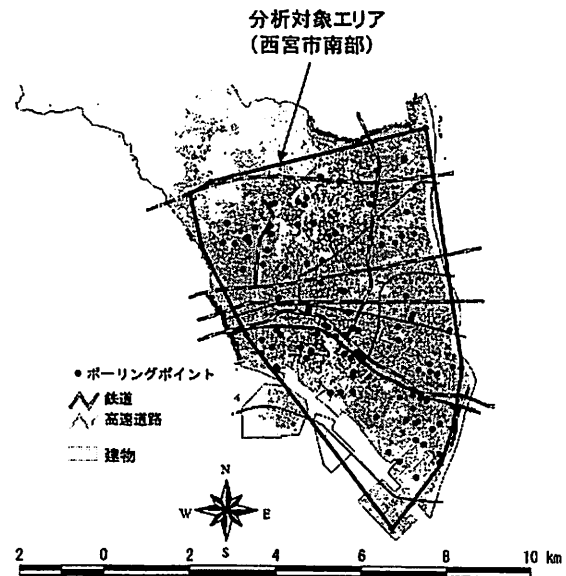


図5 分析対象エリア

表1 抽出建物データの概要

グループ名	建物数	平均 築年数 (年)	建物規模			西宮市罹 災調査 全壊率(%)
			平均階 数	平均建築 面積(m ²)	平均面 積比	
一戸建住宅	10645	26.6	2.0	71.6	1.8	35.0
共同住宅	802	26.9	2.0	158.0	1.9	53.9
長屋建住宅	181	37.6	1.8	159.9	1.7	41.4
農家住宅	80	68.2	1.5	216.7	1.2	83.8
商工業施設	95	33.8	1.9	188.6	1.8	32.6
その他	105	35.3	1.5	291.7	1.4	12.4
全体	11908	27.2	2.0	82.6	1.8	36.5

3. 層破壊を評価するための地震動強さ指標の検討

(1) 層破壊被害と地震動強さ指標の関係

被害関数を構築する際の地震動強さの指標として、PGA、PGV、SIなどが用いられている。そこで、層破壊被害がそれらの指標とどのような関係にあるかを明らかにするために検討を行った。図6、図7、図8にPGA、PGV、SIの分布と層破壊が発生した建物の分布を示す。なお、SIは減衰率5%の速度応答スペクトルを周期0.1~2.5秒で積分して求めたものである。図6~8を比較すると、層破壊はPGVおよびSIの大きい地域で多く発生

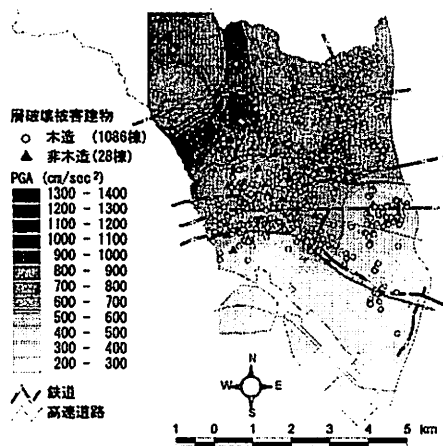


図6 PGAと層破壊建物の分布

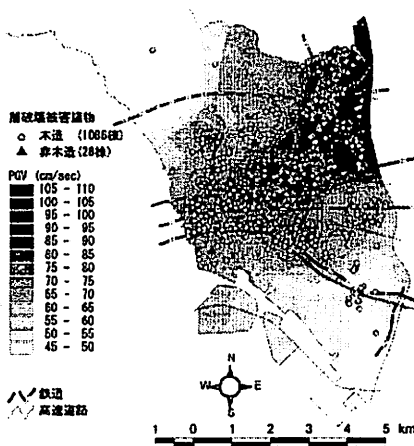


図7 PGVと層破壊建物の分布

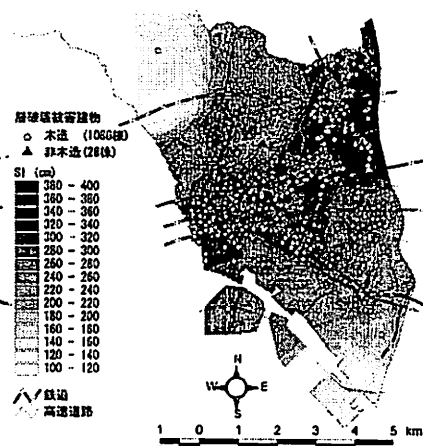


図8 SIと層破壊建物の分布

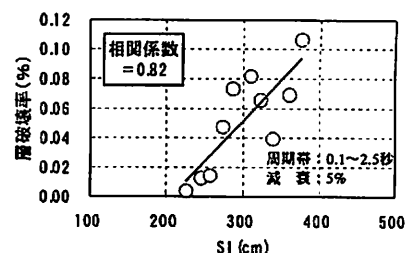
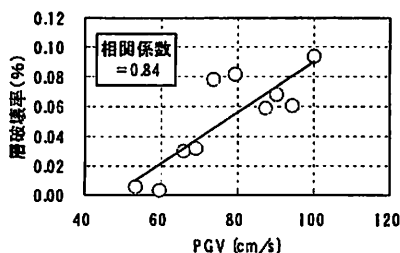
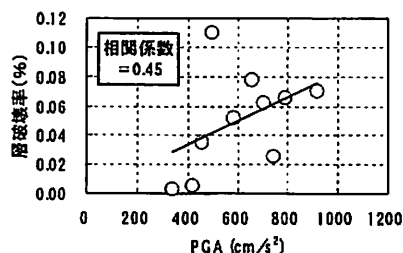


図9 地震動強さ指標と層破壊率の関係

表2 地震動強さ指標と木造建物の層破壊被害の詳細

	階級No.	建物棟数	値範囲		平均値	2階建層破壊パターン数								1階建層破壊パターン数		
			最小値	最大値		Cd6+	Cd6-	Gd5+	Gd5-	Ud5-	Ud5+	Pd5+	Pd5-	Cd6+	Cd6-	Sd5
PGA (cm/sec²)	1	1200	272.2	375.9	336.4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	1200	376.0	448.6	418.7	1	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	1200	448.6	460.3	453.5	4	14	9	5	3	3	0	0	1	2	2
	4	1200	460.3	534.5	493.8	14	21	39	41	4	2	2	0	2	4	3
	5	1200	534.7	627.3	583.0	4	11	18	22	1	1	2	0	0	2	2
	6	1200	627.4	682.6	656.1	10	7	36	23	3	1	3	0	4	5	2
	7	1200	682.6	724.5	703.2	8	11	23	22	1	0	0	0	1	4	5
	8	1200	724.5	758.9	742.1	3	3	9	8	2	4	1	0	0	0	1
	9	1200	758.9	831.1	790.0	5	18	23	19	5	2	3	0	2	1	1
	10	1090	831.1	1312.1	915.1	9	22	16	15	1	6	2	0	4	1	1
PGV (cm/sec)	1	1200	47.9	57.4	53.2	1	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0
	2	1200	57.4	62.8	59.5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	1200	62.8	67.7	65.9	3	9	8	5	3	3	1	0	1	1	2
	4	1200	67.7	71.1	69.2	6	6	15	8	0	0	0	0	0	1	2
	5	1200	71.1	76.0	73.7	6	15	24	40	1	2	1	0	1	2	2
	6	1200	76.0	85.2	79.5	11	18	29	19	4	4	5	0	3	3	2
	7	1200	85.2	89.0	87.3	5	16	18	20	3	3	2	0	0	2	2
	8	1200	89.0	91.9	90.2	8	10	34	17	0	1	1	0	3	3	5
	9	1200	91.9	96.4	94.3	7	8	19	21	6	2	1	0	1	6	2
	10	1090	96.4	107.1	100.2	11	24	28	24	3	4	2	0	5	1	0
SI (cm)	1	1200	194.2	240.1	225.2	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0
	2	1200	240.2	250.4	245.0	1	3	5	6	0	0	0	0	0	0	0
	3	1200	250.4	266.3	256.9	3	5	1	4	0	1	1	0	1	0	1
	4	1200	266.3	279.9	273.4	9	15	13	8	4	3	0	0	1	2	2
	5	1200	279.9	299.1	287.3	9	10	29	25	3	2	4	0	0	3	3
	6	1200	299.1	317.4	309.6	6	22	26	32	0	2	2	0	2	3	3
	7	1200	317.4	325.9	322.4	5	10	30	20	2	4	3	0	1	2	2
	8	1200	325.9	351.4	339.0	1	11	17	11	3	1	0	0	1	1	1
	9	1200	351.4	368.8	360.7	10	7	27	20	4	2	2	0	2	4	5
	10	1090	368.8	392.9	377.0	14	26	28	29	4	4	1	0	6	4	0

している。一方、PGAは北部の山間地で大きくなっているが、層破壊が多く発生した地域は異なっている。

さらに、詳細に各指標と層破壊発生関係を分析するために、データセットとして抽出した木造建物 11,908 棟のうち、層破壊の有無が不明を除く 11,890 棟を対象として層破壊率との対応を検討した。図9に各地震動強さ指標-層破壊率関係を示す。図9の各指標における階級数（プロット数）は 10 点に統一し、表2に各階級の建物棟数、地震動強さの値範囲、平均値および層破壊パ

ターンの詳細を示すように、各階級に含まれる建物棟数は各階級の重みを等しくするために、原則として 1,200 棟としている。また、各階級を代表するそれぞれの指標値は、階級に含まれる建物の平均値で表し、層破壊率は各階級に属する層破壊建物数を建物総数で除して算定している。図9の相関係数を比較すると PGV および SI と層破壊率は良好な関係が得られ、これらの指標により層破壊発生の評価が可能と思われる。

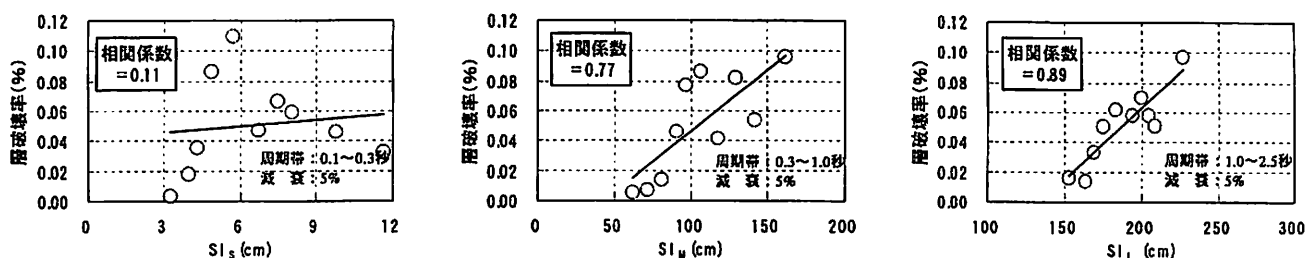


図 10 表層地盤震動の周期特性と層破壊率の関係

(2) 地震動周期特性の影響

建物および地震動の周期特性を考慮することにより層破壊発生 の推定精度の向上が期待できる。そこで、表層地盤の地震動の周期特性が層破壊発生に与えた影響をみるために、SI の周期帯を短周期から長周期に分けて算出したスペクトル強度との対応について検討を行った。周期帯は3種類とし、SI_Sは0.1~0.3秒、SI_Mは0.3~1.0秒、SI_Lは1.0~2.5秒を積分範囲とした。それぞれの減数定数は5%である。図10に周期帯別のスペクトル強度と層破壊率の関係を示す。各図の階級数および階級に含まれる建物棟数は前述どおりである。相関係数で比較すると、1.0~2.5秒の周期帯との対応が最も良い。一方、0.1~0.3秒の短周期帯の相関係数は小さく、今回の検討では層破壊発生への寄与が少ないことが示された。

境ら¹⁸⁾は、地震動の破壊力指標と建物被害率との関係を検討し、建物被害は塑性化による周期の伸びを考慮した1.2~1.5秒の等価周期帯における影響が大きいことを指摘しており、今回の結果と整合している。これより、層破壊の発生過程は、一瞬の衝撃力による部材の破壊というよりも、他の「全壊・半壊」といった破壊の延長上にあり、建物の変形が進展した結果として、層破壊に達したと考えられる。

村上ら^{19), 20)}は層破壊発生機構に関して、層破壊と建築年代、規模、屋根種別との関係を明らかにし、さらに倒壊限界必要壁率、倒壊限界変形角、必要終局せん断係数に関する検討を行っている。その結果、阪神・淡路大震災における倒壊は、入力地震波の大振幅の第1波もしくは第2波で大きく変形し発生したと推察しており、その倒壊限界変形角を1/10~1/7.5 rad.と指摘している。したがって、木造建物の層破壊を防止するためには、このような限界変形を設定し、その変形までは、層破壊を発生させない、その変形を超えるような変形は起こさせないといった考え方が重要である。

4. 層破壊被害関数を構築するための建築年代区分の設定

(1) 層破壊被害と建物属性の関係

汎用的な被害関数を構築するためには、建物の耐震性を適当にグループ化し、耐震性を考慮した被害関数を作成することが有効である。その耐震性について木造建物の場合には、壁量や耐震診断結果など、直接的に耐震性を評価した指標を用いることが理想であるが、建物内部の詳細調査などが必要であり、とくに層破壊を対象とした場合、実際に層破壊した建物のこのような指標データを十分に得ることは困難である。著者ら¹⁹⁾は、自治体が保有している建物情報と層破壊被害との関係について分析を行っている。建物の各種属性と層破壊率の関係を建物種類ごとにまとめた結果を表3に示す。結果として、以下の結論を得ている。

- 1) 建築年が古いほど層破壊率が高くなる傾向がある。
- 2) 屋根に瓦を使用している方が瓦以外を使用している場合よりも層破壊率が高くなる傾向がある。
- 3) 2階建て建物の方が1階建てより層破壊率が高くなる傾向がある。
- 4) 建築面積が大きくなると層破壊率が高くなる傾向がある。
- 5) 共同住宅、農家住宅の層破壊率が一戸建住宅、長屋建住宅、商工業住宅、その他の住宅（寺社、付属屋、倉庫など）に比較して高い。
- 6) 建物の形状が層破壊発生要因の一因となっている。
- 7) 2階建て一戸建住宅について、建物の属性が1階層破壊型、2階層破壊型、全体破壊型のように、層破壊の被害状態に影響を与えている。

以上の結果の中で、建築年数は層破壊の発生に顕著に影響を与えており、耐震性を表す総合的な指標として用いることができると考える。以下では被害関数を構築するにあたり、適当な建築年代区分を設定するため、建築年数と層破壊被害の関係を考察する。

表3 建物種類、構造、階数別の層破壊率

階数	種類	一戸建住宅		共同住宅		長屋建住宅		農家住宅		商工業施設		その他		総計	
		%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)
1	在来(瓦屋根)	4.0	(29)	7.1	(1)	0.0	(0)	25.8	(10)	0.0	(0)	0.0	(0)	4.9	(40)
	在来(瓦以外)	1.7	(1)	-	-	0.0	(0)	-	-	0.0	(0)	4.3	(2)	2.5	(3)
	プレハブ	0.0	(0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	(0)
	小計	3.9	(30)	7.1	(1)	0.0	(0)	25.8	(10)	0.0	(0)	3.8	(2)	4.6	(43)
2	在来(瓦屋根)	5.1	(399)	14.7	(97)	7.0	(8)	23.1	(9)	17.9	(7)	0.0	(0)	5.9	(520)
	在来(瓦以外)	0.7	(9)	11.3	(12)	0.0	(0)	-	-	2.9	(1)	12.5	(5)	1.7	(27)
	プレハブ	0.0	(0)	0.0	(0)	0.0	(0)	-	-	-	-	-	-	0.0	(0)
	小計	4.3	(408)	14.0	(109)	5.8	(8)	23.1	(9)	11.0	(8)	9.8	(5)	5.2	(547)
3以上	在来(瓦屋根)	0.9	(2)	0.0	(0)	-	-	-	-	0.0	(0)	-	-	0.9	(2)
	在来(瓦以外)	0.0	(0)	0.0	(0)	-	-	-	-	0.0	(0)	0.0	(0)	0.0	(0)
	プレハブ	0.0	(0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	(0)
	小計	0.4	(2)	0.0	(0)	-	-	-	-	0.0	(0)	0.0	(0)	0.4	(2)
総計		4.1	(440)	13.8	(110)	4.4	(8)	24.4	(19)	8.4	(8)	6.7	(7)	5.0	(592)

※括弧内の数字は層破壊棟数を示している。

(2) 建築年数と層破壊被害

図 11 に建築年と層破壊率の関係を示す。ここで、建築年次ごとの建物棟数のばらつきにより、層破壊率が 1 年ごとに大きく変動していたため、建築年の前後 2 年を含めた 5 年平均から移動平均線を求めた。図 11 に併せて示す。前述したように建築年が古いほど層破壊率が高くなる傾向があり、1960 年くらいから緩やかに低下している。図 11 に建築法規の改正年を併せて示す。牧、林²⁾は西宮市を対象として、建築年と被害の関係を建築法規の有効性の観点から分析し、木造建物の場合、建築法規改正の影響は少なく、被害率は緩やかに低下することを明らかにしており、この傾向と一致している。

1940 年から 1960 年までは層破壊率はあまり大きくならず、むしろ新しい年次よりも小さい場合がみられる。この要因として、図 11 に建築棟数、屋根の瓦の使用率、2 階建て以上の建物が占める割合の推移を併せて示しているが、この 1940 年から 1960 年は戦中、戦後期であり、建設された建物数が少なく、屋根の瓦使用率が下がり、2 階建て建物の建設が減って相対的に平屋建ての建物が増えるなど特殊な建築事情であった時期であり、その影響が考えられる。このように住宅の耐震性に影響する要因には、建築法規以外にも考える必要がある。

(3) 建築年代区分の設定

鈴木²⁾は、住宅の変容要因を 1) 外からの影響（社会的状況の変化、技術の発達、外来文化との接触）、2) 内からの要求（家族形態の変化、住要求・住意識の変化）、3) 計画の力（法的規制などの人為的な変革）の 3 種に分類し、第二次大戦後の住宅変容過程を次の 3 期に時代区分している。

- 1) 戦後復興期（1945～1955 年）
- 2) 高度成長期（1955～1973 年）
- 3) 低成長期（1973 年～）

したがって建築年代区分を考える場合、基本的には上記の区分に従い、建築法規の改正は、耐震性に関する住宅の変容を左右する要因として捉えることにした。

ここで、建築年代区分は基本的には細かい方が良いが、細かすぎると使用面で煩雑となる。また、被害関数を統計的に構築する場合、十分な建物棟数が必要となるため、細分化は現実ではない。一方、区分解像度が最も必要な時期として、1955 年～1973 年の高度成長期がある。この時期は空前の建設ブームにあたり、住宅の質も分散が大きく、その結果として住宅の不良ストックが多い。そこで、この時期の代表的な社会変動を考慮して、以下のような細区分を本研究では提案する。

- 1) 高度成長期前期（1955～1959 年）：1959 年の皇太子様ご成婚により、テレビが爆発的に普及し、それまでのマスメディアの役割を大きく変容させた。テレビの普及によって全国的に画一化された情報提供が促進され、住宅に対する意識にも大きな影響を与えたと推測される。
- 2) 高度成長期中期（1959～1964 年）：国家プロジェクトとしての 1964 年の東京オリンピック開催は、我が国の都市基盤整備を大きく促進させ、建設ラッシュを生んだ。
- 3) 高度成長期後期（1965～1973 年）：オイルショックによって低成長期へと移行するまでの間、関西圏での 1970 年の大阪万国博覧会の開催をはじめ、経済成長の影響が全国に拡大していったと考える。

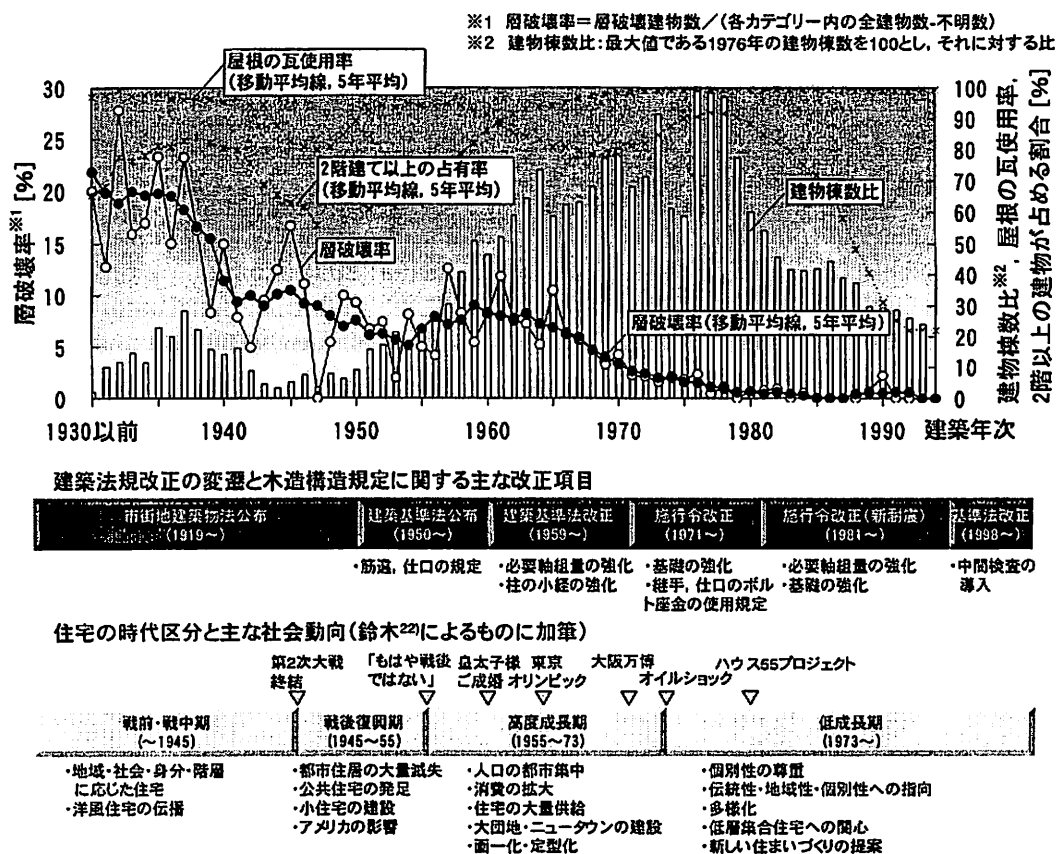


図 11 建築年数と層破壊率の関係

以上のような高度成長期の細区分を含め、最終的には表4のように建築年代を7区分に設定した。

建築年代区分	設定に考慮した事項
～1945	戦前・戦中期
1946～1955	戦後復興期。1950年に建築基準法が公布されているが、この時期の建物棟数が少ないため、区分することができない。
1956～1960	高度成長期前期。1959年の建築基準法改正も考慮した。
1961～1964	高度成長期中期。
1965～1971	高度成長期後期。1971年の建築基準法施行例改正も考慮した。
1972～1981	低成長期前期。1981年の建築基準法施行例改正を考慮した。また、社会的には、1980年から、当時の建設省と通産省が推進した国家的事業として、高品質の住宅を低廉な価格で供給することを目的とした「ハウス55プロジェクト」がスタートしたことも考慮した。
1982～1994	低成長期後期。

5. 損傷度を反映した被害関数の構築

(1) 層破壊被害関数

a) 構築方法

被害関数は、ある地震動強さ (x) に対して被害率 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、式[1]を用いて構築した。

$$P_R(x) = \Phi\left\{\frac{(\ln(x) - \lambda)}{\zeta}\right\} \quad [1]$$

ここで、 λ 、 ζ は $\ln(x)$ の平均値および標準偏差であり、確率紙を用いた最小二乗法により求めた。また、地震動強さは、3章において層破壊の発生率と PGA, PGV, および SI との相関を比較した結果、相関が高く、SI に比較して簡便に求めることができる指標として PGV を採用した。被害関数を構築するにあたり、まず、最大地表速度の大きさに応じて建物を並べ替え、一定の単位に統合した。また、各階級に含まれる建物棟数は原則として等しくなるようにした。各階級を代表する PGV の値は、階級に含まれる建物の平均値である。層破壊率は各階級に属する層破壊建物数を建物総数で除して算定している。図12に λ 、 ζ の算定例として、木造建物全体について、PGV と層破壊率の関係から得られた回帰式を示す。ここで、表3をみると木質系プレハブ造の建物には層破壊が発生が確認されていない。そのため、これ以降では被害関数を構築するにあたり、木造建物とはプレハブ造を除いた建物を対象としている。

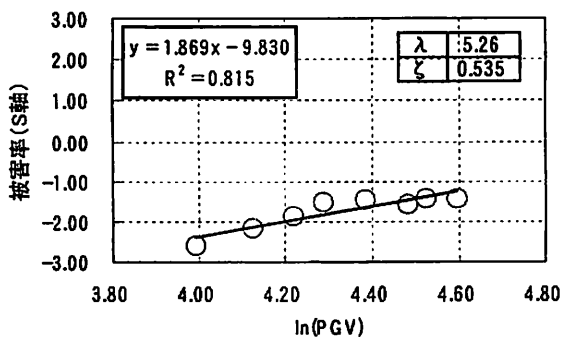


図12 PGV と層破壊被害率の関係 (確率紙表示)

b) 建築年代別被害関数

木造建物の層破壊について建築年代を考慮した被害関数を構築した。建築年代の設定は4章における検討結果をもとに表4の通り7区分とした。表5に各年代の回帰係数の一覧を示す。1965年以降の比較的新しい年代における決定係数 R^2 が低くなっているが、これは新しい建物の層破壊の発生が少なかったことによるものである。図13に構築した建築年代区分毎の被害関数を示す。図をみると、ほぼ建築年が古くなるに従い、層破壊の発生率が高くなる傾向が見られるが、戦後復興期と高度成長期前期の関係が逆転している。これは、4章で指摘したように、建物属性の影響により戦後復興期の建物は見かけ上の耐震性が向上したためと考える。各被害曲線の立ち上がりを見ると、層破壊発生時の PGV の大きさは、戦前・戦中期の建物は約 40cm/s、戦後復興期から高度成長期に建設された建物は約 50cm/s、低成長期の建物は、60cm/s 程度である。

また、参考として、同じ対象地域において、同様の手法により構築した非木造建物の回帰係数と被害曲線をそれぞれ表5および図13に併せて示す。ただし、対象地域内の非木造建物の層破壊は、写真により28棟が確認できただけであり、その少ないデータを用いて作成している点に留意が必要である。木造建物全体と比較すると発生率は小さいが、1982年～1994年の木造建物よりも発生率が高くなっている。

表5 建物の属性を考慮した層破壊被害関数の回帰係数

構造	用途	階数	屋根種	建築年代	PGV (cm/s)		
					λ	ζ	R ²
木造	全体	全体	全体	5.26	0.535	0.815	
			—1945	4.72	0.380	0.879	
			1946—1955	4.97	0.420	0.668	
			1956—1960	4.94	0.402	0.747	
			1961—1964	5.07	0.454	0.681	
			1965—1971	5.31	0.551	0.607	
			1972—1981	5.97	0.735	0.618	
			1982—1994	7.36	1.135	0.634	
		瓦	全体	5.21	0.527	0.829	
			—1945	4.69	0.392	0.880	
			1946—1955	4.83	0.374	0.785	
			1956—1960	4.93	0.408	0.743	
			1961—1964	5.03	0.451	0.678	
			1965—1971	5.24	0.537	0.620	
			1972—1981	5.62	0.545	0.673	
			1982—1994	6.52	0.814	0.797	
		2階建	全体	全体	5.23	0.520	0.784
			瓦	全体	5.18	0.511	0.802
	一戸建住宅	全体	全体	全体	5.30	0.533	0.790
	共同住宅	全体	全体	全体	4.91	0.508	0.745
非木造		全体	全体	6.12	0.685	0.580	

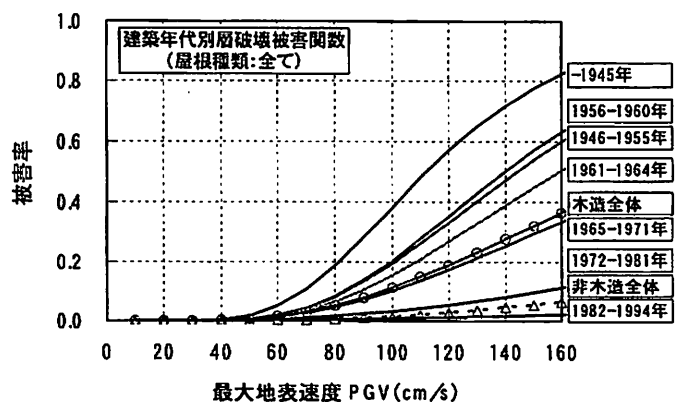


図13 建築年代別層破壊被害関数

c) 階数，屋根種別被害関数

図 13 に示したように，戦後復興期と高度成長期前期の関係が逆転していたが，この要因として考えられる建物階数および屋根の種類を考慮した被害関数を構築した。図 14 に階数，屋根種類別の被害関数を，表 5 に回帰係数の一覧を示す。ただし，1 階建て建物および瓦屋根以外の建物は層破壊発生棟数が少ないため，被害関数を構築することができなかった。木造全体と瓦屋根建物を比較すると瓦屋根建物の方が層破壊発生率が高くなっている。また，木造全体と 2 階建て建物を比較すると，2 階建て建物の層破壊発生率が高い。

十分なデータが得られた瓦屋根の住宅について，建築年代別の被害関数を図 15 に，回帰係数の一覧を表 5 に示す。図 13 と比較すると，どの建築年代においても瓦屋根の方が全層根種類を用いて構築した被害関数よりも被害発生率が高くなっている。また，戦後復興期と高度成長期前期の関係は年代順になっており，これより戦後復興期の瓦屋根使用率の減少がこの時期全体の層破壊発生率の低下に寄与したものともみることができる。

わが国の典型的な住宅は，1 階にパブリックスペースを配し，2 階にプライベートスペースを計画した 2 階建ての建物が多い。そのように計画すると 1 階に比較的大きな空間が必要なため，耐震的に十分な壁量を確保することが難しくなる。一方，2 階は小部屋が多くなるため，1 階と同程度の壁量，もしくは 1 階よりも壁量が多くなる場合がある。その結果，2 階の剛性が高くなり，1 階に変形が集中する一つの要因となっている。また，2 階の重量や屋根重量は，1 階へ入力される層せん断力の大きさに関係するため，耐震性の観点からは重量が軽い方が望ましいが，2 階建て瓦屋根の住宅であっても，大地震動に耐えた建物は多く存在していることも事実であり，今後，層破壊発生機構を解明する上で，層破壊に到らなかった建物に関する検討が必要と考える。

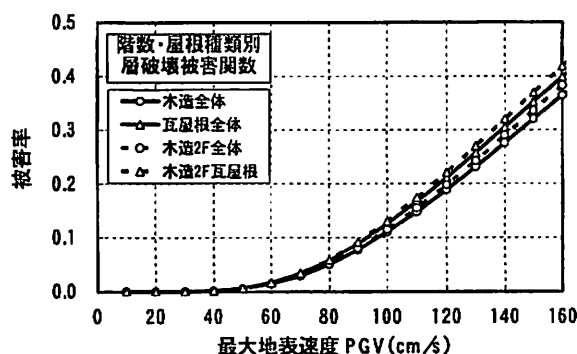


図 14 階数，屋根種類別層破壊被害関数

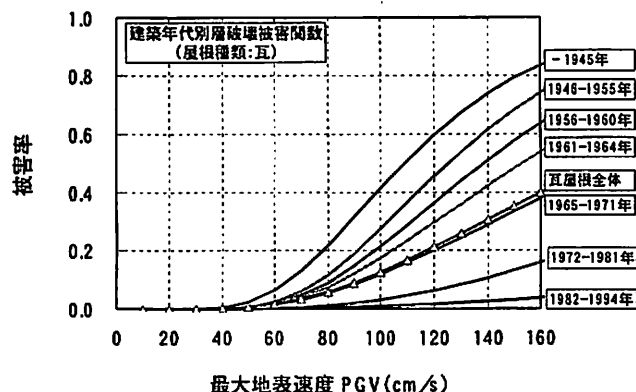


図 15 建築年代別層破壊被害関数（瓦屋根）

d) 建物用途別被害関数

建物の用途が層破壊発生に及ぼす影響を検討するため，図 16 に示すように用途別の被害関数を構築した。ただし，一戸建住宅，共同住宅以外の建物は被害関数の構築に足る十分な資料が得られなかったため作成できなかった。一戸建住宅と木造共同住宅を比較すると共同住宅の方が層破壊発生率が高いことが分かる。共同住宅の特徴について，著者らは¹⁵⁾西宮 BEDB を用いて分析を行っており，その結果によると，共同住宅は総 2 階に近い建物形状が多く，2 階のボリュームが大きい。また，共同住宅の場合，各階の各戸に出入り口や窓を設けるなど，特に間口側の壁量が少なくなると考えられ，これらの相乗効果により層破壊の発生が高くなったものとする。本研究で構築した被害関数は，このような耐震性に直接寄与する壁量の影響などは考慮されていないが，より精度の高い評価を行う場合には，検討が必須な項目であり今後の課題としたい。

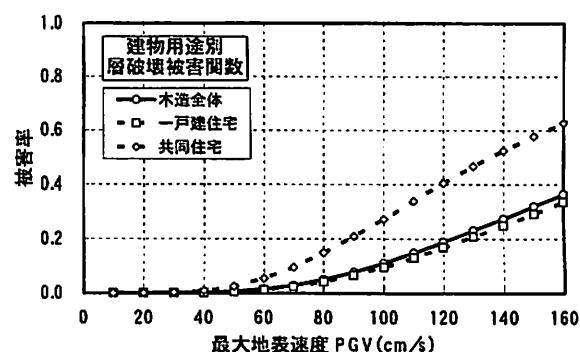


図 16 建物用途別層破壊被害関数

(2) 層破壊以外の損傷度別被害関数

層破壊以外の損傷度別被害関数を作成するため，層破壊以外の破壊状態と判定された建物について，被害写真と被害パターンチャートを用いて，被害パターン分類を

表 6 木造建物の損傷度を反映した被害関数の回帰係数

損傷度 (ダメージグレード)	被害レベル	PGV (cm/s)		
		λ	ξ	R^2
D6	全壊	5.93	0.731	0.838
D5以上		5.26	0.535	0.815
D4以上		4.77	0.422	0.805
D3以上	半壊以上	4.65	0.442	0.764
D2以上	一部損壊以上	4.58	0.474	0.772
D1以上		4.25	0.381	0.857

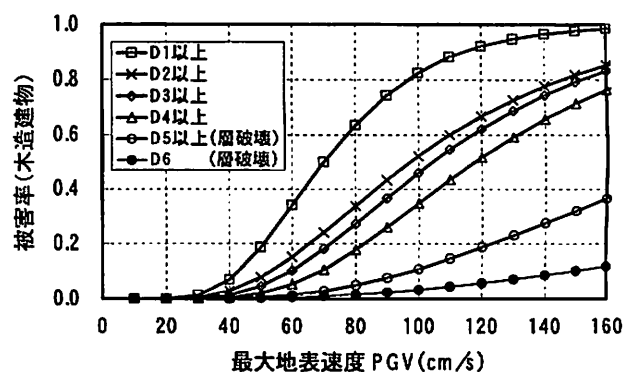


図 17 木造建物の損傷度を反映した被害関数

行い、その結果をダメージグレード D0～D6 に整理した。その結果を用いて、層破壊被害関数を構築するときと同様の手法により被害関数を求めた。表 6 に損傷度別の被害関数の回帰係数一覧を、図 17 に構築した被害関数を示す。図 17 の各曲線の立ち上がりを見ると、被害率 1% を超える PGV のおおよその値は、D6 で 70 cm/s、D5 で 55 cm/s、D4 で 45 cm/s、D3 で 40 cm/s、D2 で 35 cm/s、D1 で 30 cm/s である。

6. 被害関数の妥当性の検証

(1) ダメージグレード別被害関数との比較

構築した被害関数の妥当性を他の被害調査結果に基づいて作成された被害関数と比較することで検証を行った。岡田、高井¹⁰⁾は、東京都防災会議の震度階解説表をもとに木造建物のダメージグレード別被害関数を構築している。表 7 に比較に用いた岡田、高井によるダメージグレード別の被害関数の回帰係数を示す。図 18 に示す比較図を見ると、損傷度の高い D4 以上は、岡田、高井による被害関数の方が本研究より被害率が低く、反対に損傷度の低い D2 以下は岡田、高井による被害関数の方が高くなっている。このような差がみられた理由として、構築に使用した被害データや地震動データ、および構築対象建物の構造特性の相違を挙げることができる。具体的には、岡田、高井が使用した被害データは、東京都防災会議の震度階解説表の被害記載内容から震度と被害率の関係を読みとり、気象庁震度階が 6 以上については兵庫県南部地震の建物被害調査資料により補正したものであり、実被害データのみを用いたものではない。また、地震動データはアンケート震度を基にし、気象庁震度を Muramatsu²³⁾ による提案式を用いて最大地表速度に換算したものを使用している。構造特性については、使用データの中に淡路島北淡町の建物データが含まれており、本研究の西宮市とは異なる可能性がある。したがって、構築した被害関数の妥当性を検証するためには、被害関数の構築条件を考慮する必要がある。

(2) 西宮市における調査結果に基づく被害関数との比較

被害関数の構築条件を揃えるため、阪神・淡路大震災において、西宮市の建物を対象として実際に行われた被害調査結果に基づいて構築された被害関数との比較を行った。比較に用いた被害関数は、1)自治体による罹災調査結果に基づく被害関数、および、2)学術的な目的で行われた調査結果に基づく被害関数である。

自治体の調査結果に基づく被害関数は、西宮市が罹災証明書を発行するための調査結果をもとに、山口、山崎²⁴⁾により構築されたものである。表 7 に山口、山崎による被害関数の回帰係数を、図 19 に比較図を示す。図より、西宮市による全壊は、立ち上がり部分はほぼ D2 に等しく、PGV が增大すると D3 に対応している。また、西宮市の全半壊はおおよそ D1 に対応していると読みとることができる。

一方、学術的な調査との対応について、二学会合同による調査¹¹⁾は、被害を外観目視で評価した結果であり、その結果と構築した被害関数との比較を行った。ここで、西宮 BEDB には二学会合同による調査結果が備わっており、このデータを用いて、西宮市の本研究対象地域における被害関数を新たに構築した。その被害関数は西宮

表 7 比較検証用の被害関数の回帰係数

比較に用いた被害関数	被害レベル	PGV (cm/s)		
		λ	ζ	R^2
ダメージグレード別被害関数 (岡田、高井による)	D5	5.07	0.582	—
	D4以上	4.55	0.565	—
	D3以上	4.12	0.600	—
	D2以上	3.66	0.621	—
	D1以上	2.74	0.574	—
西宮市による罹災調査に基づく被害関数 (山口、山崎による)	全壊	4.60	0.538	0.984
	半壊以上	4.22	0.546	0.985
西宮市における二学会合同調査に基づく被害関数 (西宮BEDBを用いて構築)	大破または全壊	4.72	0.344	0.754
	中程度の損傷以上	4.54	0.350	0.826
	軽微な損傷以上	4.23	0.304	0.895

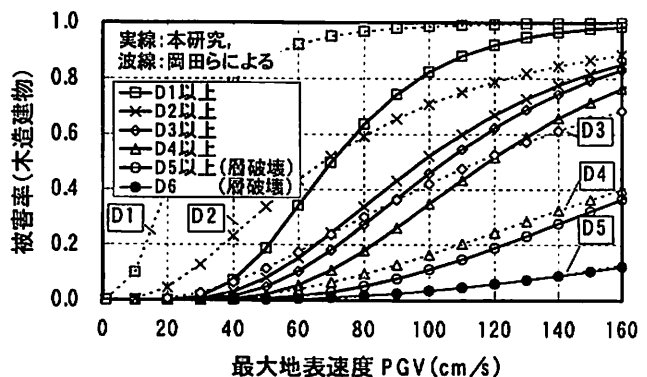


図 18 ダメージグレード別被害関数との比較

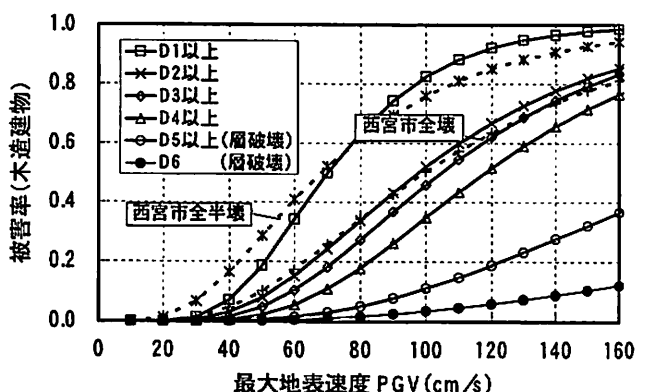


図 19 罹災調査結果に基づく被害関数との比較

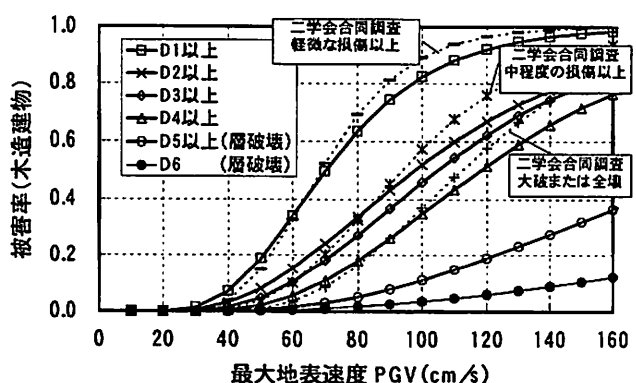


図 20 学術的な調査結果に基づく被害関数との比較

BEDB により木造建物を抽出し、その建物に二学会合同の調査結果をリンクさせることにより作成している。表 7 に被害関数の回帰係数を併せて示す。図 20 の比較図より、各曲線の立ち上がり部分については、二学会合同調査の「大破または全壊」が D4 に、中程度の損傷以上が D3 に、「軽微な損傷」が D1 に対応している。

以上の結果は、著者ら⁷⁾によるダメージグレードと阪神・淡路大震災で実施された被害調査結果との対応に関する分析の中で、西宮市の全壊には D2 レベルのものが含まれていることを確認しており、また、二学会合同調査との関係についても、その分析結果と整合している。したがって、構築された被害関数は妥当なものとする。

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 阪神・淡路大震災で撮影された被害写真から層破壊建物を同定し、代表的な地震動強さ指標である PGA, PGV, SI と層破壊被害の発生率の関係について検討した結果、PGV および SI との相関が比較的高いことが示された。
- (2) 層破壊率と周期帯を考慮したスペクトル強度との検討から、周期帯 1.0~2.5 秒との相関が高くなる結果が得られた。
- (3) 住宅の変容と社会変動を考慮して、被害関数構築のための建築年代区分を設定し、上記の地震動強さに関する検討結果を踏まえた建築年代別の木造建物の層破壊被害関数を構築した。
- (4) 建物階数、屋根種類、住宅用途を考慮した層破壊被害関数を構築した。
- (5) 層破壊以外の木造建物の損傷度を反映した被害関数を構築した。
- (6) 他の被害調査結果と比較することで、構築した被害関数の妥当性について検証を行い、良好な結果が得られた。

以上の結果を踏まえ、人的被害の軽減に役立つ推定手法を構築していきたい。そのためには、今回の検討はあくまでも阪神・淡路大震災における西宮市で起きた事象を記述したものであり、今後、構築した被害関数が西宮市以外の他地域において、適用可能かどうか有効性の検証を行う予定である。また、汎用的な被害関数を構築するためには、層破壊の発生メカニズムの究明が不可欠であり、その観点からの研究を進めていく予定にしている。

補注

- (注1) 西宮市から提供された建物属性データはポイントデータで作成されており、建物ポリゴン（家枠）との位置関係から、ポリゴン内に含まれるポイントをその建物の属性としてリンクした。その結果、位置関係によってはリンクが不可能であった建物が存在している。
- (注2) 西宮 BEDB では建物種類は 26 種類に分類されているが、建築年数や建物規模、被害率を考慮して、1)一戸建住宅、2)共同住宅、3)長屋建住宅、4)農家住宅、5)商工業施設、6)その他の 6 グループに統合している。

参考文献

- 1) 西村明徳他：わが国の災害医療対策の新たな構築に向けての法医学的検討—わが国の災害医療体制の新たな構築に向けて—、厚生省の指標、42 巻 13 号、1995。
- 2) 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パナラビリティ関数群の構成、地震、第 2 輯第 44 巻、pp.93-108、1991。
- 3) 林康裕他：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、No.502、pp.61-59、1997。
- 4) 長谷川浩一他：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集、No.505、pp.53-59、1998。
- 5) 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被害関数、日本建築学会構造系論文集、No.527、pp.189-196、2000。
- 6) 牧紀男他：阪神・淡路大震災における建物被害調査結果の分析、地域安全学会論文集、No.3、pp.117-122、2001。
- 7) 堀江啓他：外観目視による建物被災度評価手法の検討—建物被災判定トレーニングシステムの構築、地域安全学会論文集 No.4、pp.167-174、2002。
- 8) 呂恒俊、宮野道雄：地震時の人的被害と家屋被害の関係に対する震源距離の影響、自然災害科学、Vol.14-2、pp.287-296、1995。
- 9) 岡田成幸他：木造住家の破壊パターンを用いた地震時死者推定法の提案、東海地震科学研究所報告、Seq. No.7、地震防災分野、pp.77-84、2001。
- 10) 堀江啓他：災害における Built Environment データベースの構築と防災への活用、情報処理学会・人文科学とコンピュータシンポジウム論文集、pp.275-282、2001。
- 11) 震災復興都市づくり特別委員会：阪神・淡路大震災被害実態緊急調査 被災度別建物分布状況図集、1995。
- 12) Kohiyama, M. et al.: Expansion of Nishinomiya Built Environment Database, Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Volume 29, Issue 3, pp. 501-522, 2003。
- 13) 佐藤忠信他：兵庫県南部地震で発生した強震域での加速度応答スペクトルの推定、土木学会論文集、No.563/I-39、pp.149-159、1997。
- 14) Sekiguchi, H. et al.: 1996, Minute locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion, J. Physics of the Earth, Vol. 44, pp. 473-487。
- 15) 堀江啓他：地震による建築構造物の層破壊発生要因に関する研究、神戸大学大学院自然科学研究科紀要、第 21 号-B、PP.101-110、2003。
- 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、No.524、pp.65-72、1999。
- 17) 高井伸雄、岡田成幸：地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン分類、日本建築学会構造系論文集、No.549、pp.67-74、2001。
- 18) 境有紀他：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案、日本建築学会構造系論文集、No.555、pp.85-91、2002。
- 19) 村上雅英他：東灘西部と中心とした被害調査とその考察、1995 年兵庫県南部地震—木造建物の被害—、日本建築学会近畿支部、pp.49-68、1995。
- 20) 村上雅英他：阪神淡路大震災における木造住宅の倒壊原因に関する考察、日本建築学会構造系論文集、No.527、pp.189-196、2003。
- 21) 牧紀男、林春男：建築基準法の被害抑止効果—すまいの災害対応—、地域安全学会論文集、No.2、pp.243-250、2000。
- 22) 鈴木成文：住まいを読む—現代日本住居論、建築資料研究社、1999。
- 23) Muramatsu I.: Expectation of maximum of earthquake motion within 50 years throughout Japan, Sci. Rep. Gifu Univ., 3, 470-481, 1966。
- 24) 山口直也、山崎文雄：詳細な建物情報を含む被災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。

(原稿受付 2003. 5. 23)