

地震時の家財被害額の予測手法に関する研究

STUDY ON METHODOLOGY TO ESTIMATE SEISMIC DAMAGE OF HOUSEHOLD GOODS

金子美香*, 吉村昌宏**, 山田和樹**, 名取晶子**

*Mika KANEKO, Masahiro YOSHIMURA, Kazuki YAMADA
and Akiko NATORI*

The vulnerability functions which express the relationships between damage ratios of household goods and seismic intensities of floor responses have been developed from the results of questionnaire surveys for recent five earthquakes. It has become cleared that the damage ratios of household goods of five earthquakes are relatively equal, if they are classified according to the structural damage levels of buildings. Then, the developed vulnerability functions of household goods are classified into three structural damage levels of buildings. Using the developed functions, seismic damage of household goods can be easily estimated for each family and for various earthquakes.

*Keywords : Household goods, Seismic damage, Questionnaire survey, Distribution of seismic intensity,
Vulnerability function*

家財, 地震被害, アンケート調査, 震度分布, 被害関数

1. はじめに

地震時には、建物に構造的な被害がほとんど無い場合でも、家具の転倒、内容物の散乱などの大きな室内被害が発生する可能性がある。このため、建物自体の修復が必要ではない場合でも、建物内の状態を正常に戻すために費用面で大きな負担がかかる場合も多い。特に住宅の場合には、地震後の困難な生活状況の中での費用負担が、生活をますます困窮させることにもなりかねない。このため、地震時の各世帯における家財被害額を精度よく推定し、把握しておくことは、防災上の観点からも重要である。

地震時における家具の転倒に関する研究は、地震被害調査^{例えば 1), 2)}、実験的および解析的な研究^{例えば 3)~5)}など多数行われている。しかし、各世帯における家財被害額を推定するためには、家具の転倒以外にも食器類の破損、日用品や洋服等の破損・汚損など多くの家財の被害程度を推定する必要がある。家財全体の被害額を推定する研究としては、損害保険料率算定会（現・損害保険料率算出機構）の研究⁶⁾がある。この研究では、兵庫県南部地震の家財被害状況についてアンケート調査を実施し、そのデータを基に家財の被害関数を構築している。全家財を10種類に分類し、各家財分類の被害関数を構築しており、家財全体の被害を総合的に捉える上で貴重な研究である。一方、兵庫県南部地震以降にも、家財に被害を被る地震が多数発生

しており、これらの被害データを用いることにより、被害関数の精度向上が図られると考えられる。

本研究では、最近発生した4地震（2005年福岡県西方沖地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震）の家財被害を調査し、文献6)の調査と併せた5地震の調査結果を基に、家財被害関数を構築した。2章には、4地震のアンケート調査の概要を兵庫県南部地震のアンケート調査⁶⁾と比較して示した。3章には、アンケート回答世帯が居住する建物の居住階での震度の推定方法を示した。4章には、アンケート調査結果に基づいた居住階震度ごとの家財被害率を示した。また、建物被災度別に整理すると、5地震の家財被害率は同程度になる傾向が見られたため、建物被災度別に5地震の家財被害データを統合し、被害関数を構築した。5章には、構築した家財被害関数を用いて各世帯の家財被害額を推定する手法と推定例を示した。なお、ここで対象とする家財は、家具、家電製品から衣類、生活雑貨までを含む住宅内の全ての生活用動産である。但し、建物に作り付けの家具や食料品は対象外とした。また、家財被害関数については、床応答指標が最大速度のものと震度のものの2種類の関数を作成したが、ここでは紙面の関係で床応答震度を指標にした場合のみについて示した。

* 清水建設株式会社研究所
** 損害保険料率算出機構

Institute of Technology, Shimizu Corporation
Non-Life Insurance Rating Organization of Japan

2. 家財被害のアンケート調査

本章では、本研究に用いた 1995 年兵庫県南部地震、2005 年福岡県西方沖地震、2007 年能登半島地震、2007 年新潟県中越沖地震、2008 年岩手・宮城内陸地震の計 5 地震の家財被害調査の概要について述べる。兵庫県南部地震の被害データには、損害保険料率算定会（現・損害保険料率算出機構）のアンケート調査結果⁶⁾を用いた。その他 4 地震の被害データには、本研究で実施したインターネットによるアンケート調査結果を用いた。各地震のアンケート調査の対象地域、調査時期、回答数を表 1 に示す。

調査時期は、福岡県西方沖地震で地震後 3 年程度経過している以外は、いずれも地震発生 3 カ月～1 年後である。調査対象地域は、兵庫県南部地震以外の 4 地震では広範囲であるが、兵庫県南部地震の場合には比較的被害の大きかった地域に限定されている。このため、各地震の調査データを組み合わせる場合には注意が必要である。本研究では、4 章で述べるように、建物被災度別に分類すると各地震の家財被害率が同程度になることを確認した上で、建物被災度別に 5 地震のデータを統合した。調査方法は、兵庫県南部地震ではアンケート用紙の配布による調査、他の 4 地震ではインターネット調査である。インターネット調査では、設問によっては回答に偏りが生ずる危険性があることが指摘されている⁷⁾。本調査の回答は、パソコンが破損しなかった比較的被害の小さい世帯に偏っていることが懸念されるが、対象とする 4 地震では、パソコンが破損するほど大きな被害を受けた世帯の割合はそれほど多くないと考えられること、調査時期が地震発生から 3 ヶ月以上経過しており、破損後に再購入した可能性も高いと考えられることから、回答に対する大きな偏りはないと考えた。また、インターネット調査では、回答の簡便性から回答結果の信頼性についても懸念されている。回答の信頼性を向上させるため、調査会社を選定する際には、重複登録の防止対策、不良モニターの排除などモニターの質の確保への取り組みを考慮した。

インターネット調査は、スクリーニング調査(SC 調査と記す)と本調査の二段階で実施した。対象地域に住むインターネット調査会社の全モニターを対象に SC 調査を実施し、家財被害を受けた世帯を対象に本調査を実施した。また、SC 調査の結果を見て、以下のモニターも本調査の対象からはずした。() 内はその理由である。

- ・年齢・性別がモニター登録情報と一致しないモニター（回答の信頼性を高めるため）
- ・住居建物の構造や階数が不明のモニター（被害関数の構築の際に、居住階の震度を推定する必要があるため）
- ・本調査に「協力しない」と回答したモニター

SC 調査と本調査の調査項目を表 2 に示す。SC 調査では回答者や居住建物の属性、本調査では世帯属性や耐久財の所有数と被害数、非耐久財の保有金額に対する被害金額のおよその割合などについて尋ねた。ここでの被害にはキズ程度も含めた。

表 3 に、本研究で用いた家財分類と調査家財品目を示す。本研究の家財分類は、文献 6) と同様に A～J の 10 分類とした。文献 6) では、家財を耐久財と非耐久財に分けた上で、所有形態が似ているもの、地震による被害の受け方（倒れる、落下・転落する、潰される、ガラス等で汚損・毀損される等）が似ているものをひと

表 1 アンケート調査の対象地域・調査時期・回答数

地震	地震発生日	調査時期	対象地域	調査方法	SC調査		本調査	
					対象数	有効回答数	対象数	有効回答数
兵庫県南部	1995年1月17日	1995年10～12月	阪神・神戸地域	用紙の配布	—	—	1,450	965 (67%)
福岡県西方沖	2005年3月20日	2008年7～8月	福岡県佐賀県	インターネット調査	33,387	10,139 (30%)	2,865	1,927 (67%)
能登半島	2007年3月25日	2007年7月	石川県富山県		7,819	3,071 (39%)	585	477 (82%)
新潟県中越沖	2007年7月16日	2007年10～11月	新潟県長野県		16,306	5,921 (36%)	812	670 (83%)
岩手宮城内陸	2008年6月14日	2008年9月	岩手、宮城、秋田、福島、その周辺		34,540	12,999 (38%)	1,766	1,447 (82%)

() 内は回収率=有効回答数/対象数

表 2 アンケート調査の調査項目
(兵庫県南部地震を除く 4 地震)

SC調査	回答者属性	性別、年齢
	居住建物	構造、階数、建築時期、建物被害、家財被害の有無、住所
本調査	世帯属性	世帯人数、世帯主の年齢
	耐久財	所有数、被害数、被害状況
	非耐久財	被害割合(被害額/保有額)、被害状況
	その他	家具固定の有無、家具設置階など

※ 兵庫県南部地震も類似の調査項目。但し、非耐久財の被害割合の設問は無い

表 3 家財分類と調査家財品目

家財分類(主な被害モード)		調査家財品目
耐久財	A 大型縦置き家具(転倒)	たんす、本棚、食器棚
	B 家事用家電製品(転倒)	冷蔵庫、洗濯機
	C 家事用家電製品(落下)	電子レンジ等(電子レンジ、食器洗い機)
	D 娯楽用家電製品(落下)	AV機器、カメラ、通信機器、パソコン、楽器
	E 床上の生活家具(圧壊)	食卓セット、応接セット、学習机・椅子
F 冷暖房機器(圧壊・転倒)	エアコン、ストーブ	
非耐久財	G 室内装備・雑貨類(圧壊)	かばん、靴、書籍、スポーツ用品、保険医療器具、カーテン、敷物
	H 食器類(落下)	食器・調理器具
	I 娯楽用品・雑貨類(落下)	玩具、照明器具、時計、生活雑貨、音楽映像用メディア、ペット園芸用品
	J 衣類、寝具(汚損)	寝具、衣類

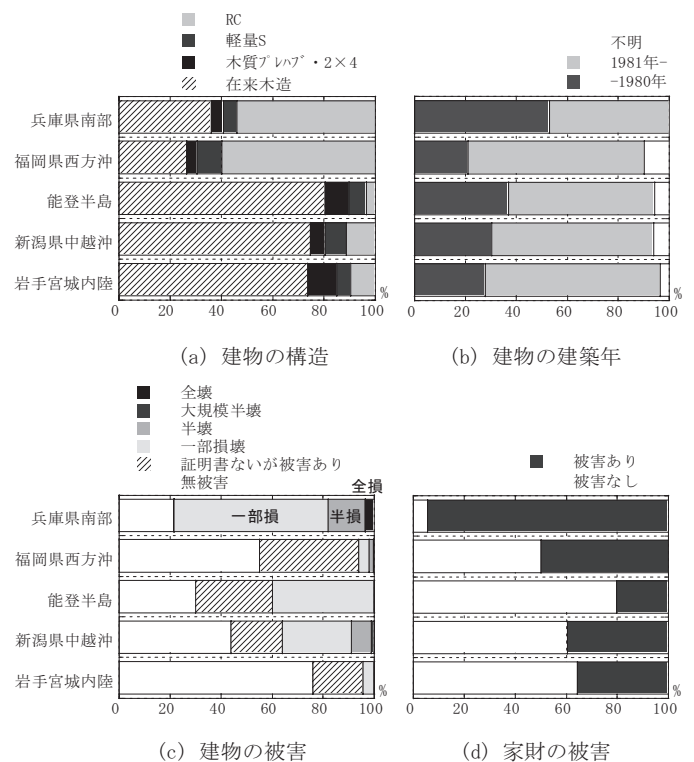


図 1 SC調査回答世帯の属性
(推定地表震度 5.0 以上の世帯、建物の構造・階数が不明の世帯を除く)

まとめにし、被害率が大きく異なるものは分けて分類している。調査家財品目は、文献 6) を参考に表 3 に示す耐久財 16 種類、非耐久財 16 種類とした。

SC調査回答世帯の属性を兵庫県南部地震の調査回答世帯と比較して図1に示す。図1では、3.1節で推定される地表震度が5.0以上の世帯を対象にした。建物被害の分類として、兵庫県南部地震の調査では地震保険⁸⁾における分類である「無被害、一部損、半損、全損」、他の4地震の調査では国の災害被害認定統一基準⁹⁾による分類を基に、「無被害、証明書ないが被害あり、一部損壊、半壊、大規模半壊、全壊」を用いている。この内、「一部損壊、半壊、全壊」は、その定義からそれぞれ「一部損、半損、全損」に概ね相当すると見做した。図1の建物の構造を見ると、兵庫県南部地震や福岡県西方沖地震では、その他の3地震に比べて非木造建物が多い。建物の建築年を新耐震施行前後(1980年以前と1981年以降)で分けると、兵庫県南部地震で新耐震前の建物の割合がその他の4地震に比べてやや多いものの、それほど顕著な違いではない。一方、建物および家財の被害を見ると、兵庫県南部地震の被害が他の地震に比べて顕著に多い。建物の被害を見ると、兵庫県南部地震では一部損以上の世帯が80%程度あるのに対して、その他の4地震では一部損壊以上の世帯が5~40%程度になっている。家財被害についても、兵庫県南部地震ではほとんどの世帯に被害があるのに対して、その他の4地震で家財被害を受けた世帯は20~50%程度である。これは、兵庫県南部地震のアンケート調査の対象地域が、比較的被害の大きかった地域に限定されていることと関係していると考えられる。

3. アンケート回答世帯の居住階震度の推定

アンケート回答世帯の居住階の震度(居住階震度と呼ぶ)は、地表震度に居住建物における震度増分(地表震度に対する居住階震度の増加分)を加えることで推定した。

3.1 地表震度の推定

各地震の地表震度分布は、藤原ら(2005)¹⁰⁾による地震観測記録を補完情報とした地震動分布推定手法の改良手法を用いて、250mメッシュで推定した。図2に推定フローを示す。図2中に示す①~⑧の各ステップについて以下で説明する。

①計測震度(観測値)から地表最大速度への換算

K-NET等で観測された地表観測点*i*の計測震度 I_i を以下の藤本・翠川(2005)の式¹¹⁾で最大速度 V_i [cm/s]に換算する。

$$I_i = \begin{cases} 2.165 + 2.262 \cdot \log_{10}(V_i) & (I_i < 4) \approx (V_i < 7) \\ 2.002 + 2.603 \cdot \log_{10}(V_i) - 0.213 \cdot \log_{10}(V_i)^2 & (I_i \geq 4) \approx (V_i \geq 7) \end{cases} \quad (1)$$

②地表最大速度から基盤最大速度の推定

地表最大速度を藤本ら(2006)¹²⁾の地盤増幅率 ARV で除すことにより、各観測点の基盤(せん断波速度 $V_s=600$ m/s相当)での最大速度 $V_{b,i}$ [cm/s]を推定した。地盤増幅率 ARV は、深さ30mまでの地盤平均せん断波速度 $AVS30$ [m/s]を用いて(3)式で表されている。 $AVS30$ はWakamatsu et al(2006)¹³⁾、松岡ら(2005)¹⁴⁾の方法で250mメッシュ^{注1)}で算定した。

$$V_{b,i} = V_i / ARV \quad (2)$$

$$\log_{10}(ARV) = 2.367 - 0.852 \cdot \log_{10}(AVS30) \quad (3)$$

③距離減衰式を用いた基盤最大速度の推定

各地震の断層モデル^{15)~18)}と司・翠川(1999)¹⁹⁾による距離減衰式

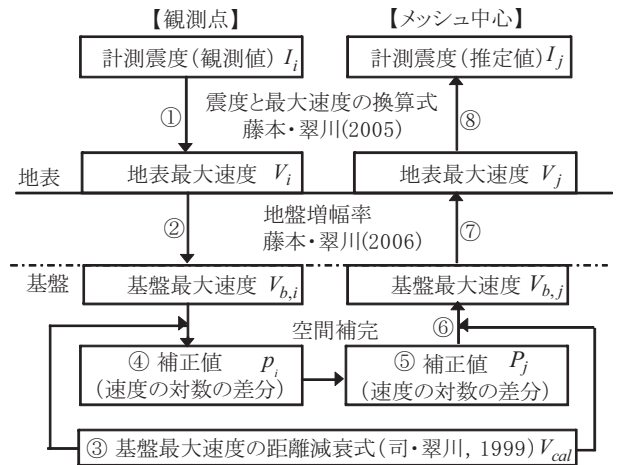


図2 地表震度分布の推定フロー

により、基盤での最大速度分布を推定した。

$$\log_{10} V_{cal} = 0.58 M_w - \log_{10}(X + 0.0028 \cdot 10^{0.50 M_w}) - 0.002X + 0.0038h - 1.29 + d \quad (4)$$

V_{cal} : 基盤での距離減衰式による最大速度 [cm/s]

M_w : モーメントマグニチュード

h : 断層面の平均的な深さ [km]

X : 断層最短距離 [km]

d : 断層タイプ別の係数(地殻内地震 0.00, プレート間地震 -0.02, プレート内地震 0.12)

④各観測点での補正値の算定

②で推定した基盤最大速度 $V_{b,i}$ と、距離減衰式による観測点*i*の基盤最大速度 $V_{cal,i}$ から、(5)式を用いて各観測点での補正値 p_i を求めた。

$$p_i = \log_{10} V_{b,i} - \log_{10} V_{cal,i} \quad (5)$$

⑤各メッシュ中心の補正値の算定

本研究では、250mメッシュで地震動を推定した。各メッシュ中心での補正値は、④で求めた補正値 p_i を用いて、(6)式で表される逆距離加重法²⁰⁾で求めた。(6)式では、任意の点*j*と観測点*i*までの距離 $r_{j,i}$ のべき指数の値が大きいほど、近傍の観測点の情報を重視することになる。ここでは $r_{j,i}$ の4乗の値を用いた。

$$P_j = \left[\sum_{i=1}^n p_i \times \frac{1}{r_{j,i}^4} \right] / \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{j,i}^4} \right] \quad (6)$$

P_j : 任意の点*j*における補正値

p_i : 観測点*i*における補正値

n : 観測点の数

⑥各メッシュ中心の基盤最大速度の推定

各メッシュ中心の基盤最大速度 $V_{b,j}$ は、③の距離減衰式を用いて推定したメッシュ中心*j*の基盤最大速度 $V_{cal,j}$ を、⑤の補正値で補正することにより推定した。

$$V_{b,j} = V_{cal,j} \cdot 10^{P_j} \quad (7)$$

⑦各メッシュ中心の地表最大速度の推定

各メッシュ中心の地表最大速度は、⑥で推定した基盤最大速度から②と逆の操作で推定した。

⑧各メッシュ中心の計測震度(地表)の推定

各メッシュ中心の計測震度は、⑦で推定した地表最大速度から(1)

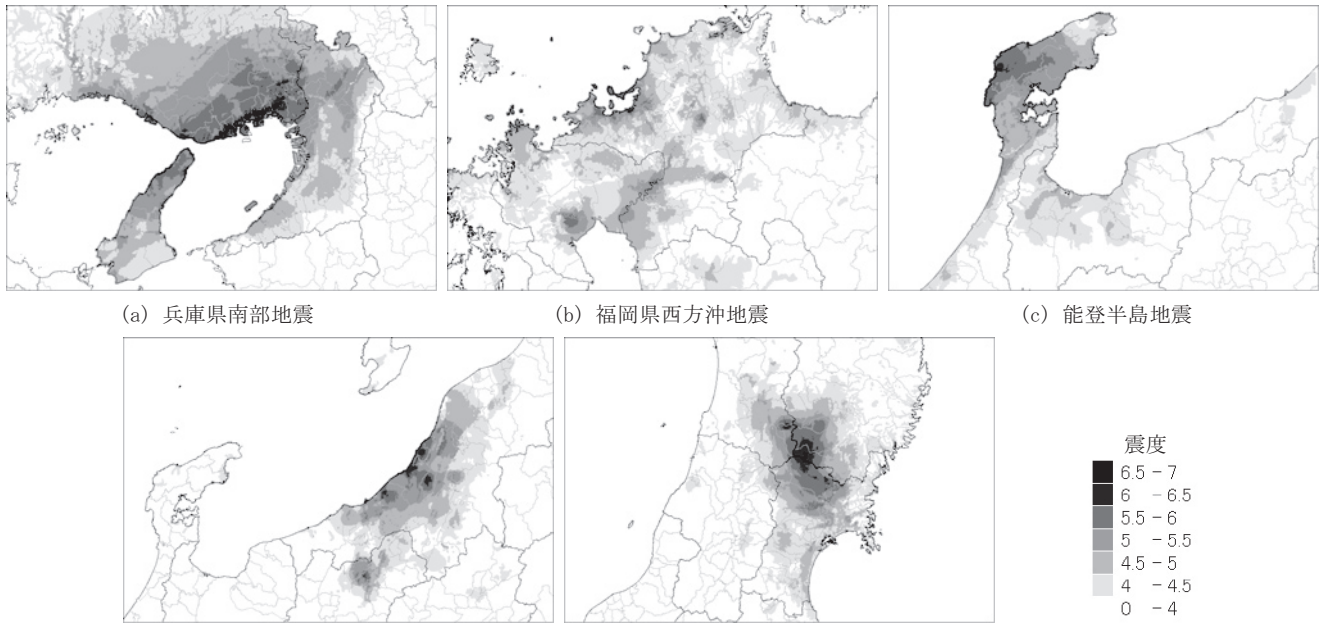


図3 各地震の推定震度分布

式により算定した。

但し、兵庫県南部地震では揺れの大きかった地域での観測記録が少ないため、図2の方法では揺れの大きかった地域の地震動を精度良く推定することができない。そこで兵庫県南部地震では、地表震度の推定方法として、低層建物の被害率²¹⁾から林ほか²²⁾の被害率曲線を用いて地表速度を推定し、藤本・翠川の式¹¹⁾で計測震度に交換する方法も併用した。林ほか²²⁾の被害率曲線の適用範囲が地表速度50cm/s程度以上であるため、低層建物の被害率から推定される地表速度が50cm/s以上の地域については、その地表速度の震度換算値を用い、低層建物の被害率から推定される地表速度が50cm/s未満の地域や低層建物の被害率が不明の地域については、図2の方法で地表震度を推定した。また、アンケート調査では、居住地の住所を町丁目まで尋ねており、町丁目の重心が含まれるメッシュの震度を、その居住地の震度とした。

なお、3.2節に述べるように、建物各階での震度を算定する上で地震動のA/V（最大加速度と最大速度の比）の値を考慮することも考えているため、地表の最大加速度分布と最大速度分布についても推定した。最大速度分布の推定方法は、観測値に地表最大速度の値を用いること以外は図2のフローと同じである。最大加速度分布の推定でも、観測値に地表最大加速度値を用いること、距離減衰式による推定値として(8)式で表される地盤上の最大加速度の距離減衰式¹⁹⁾の値を係数1.4で除した基盤上の最大加速度値を用いること、(3)式の代わりに(9)式で表される加速度の地盤増幅率の値¹²⁾を用いること以外は、震度の場合と同じである。

$$\log_{10} A_{cal} = 0.50M_w - \log_{10}(X + 0.0055 \cdot 10^{0.50M_w}) - 0.003X + 0.0043h + 0.61 + d \quad (8)$$

A_{cal} : 地盤上の最大加速度 [cm/s²]

d : 断層タイプ別の係数 (地殻内地震 0.00, プレート間地震 0.01, プレート内地震 0.22)

$$\log_{10}(ARA) = b \cdot \log_{10}(AVS30/600) \quad (9)$$

ARA: 基盤($V_s = 600\text{m/s}$)の最大加速度に対する地盤増幅率

$$b = \begin{cases} -0.773 & (\gamma < 3 \times 10^{-4}) \\ 2.042 + 0.799 \cdot \log_{10} \gamma & (\gamma \geq 3 \times 10^{-4}) \end{cases}$$

γ : 擬似有効ひずみ

擬似有効ひずみ γ は、地表最大速度 V [m/s]から(10)式で算出した。

$$\gamma = 0.4 \cdot V / AVS30 \quad (10)$$

なお、地盤増幅率を表す(3)式と(9)式の適用範囲は有効ひずみ 1×10^{-3} 程度までであるが、本検討では、地表最大速度の大きい一部の観測点では、これらの式を外挿して用いている。

3.2 震度増分の推定

次に、建物各階の震度増分を推定した。建物の地震観測や実大振動実験に関する既往の文献^{例えば 23), 24)}を調査したが、建物各階の応答増幅に関する記述は少ない。また、応答増幅に関する記述がある場

表4 建物モデルの諸元

建物	木質プレハブ ² ×4			RC造		
	2階建	2階建	2階建	5階建	10階建	15階建
質点数 N	2	2	2	5	10	15
一次固有周期 [sec]	0.50	0.37	0.32	0.07N (Nは建物階数)		
重量分布 *1	2/3	2/3	0.36	1.0 (各階一様)		
剛性分布	耐力に比例			1階:最上階=1:2の台形分布		
耐力分布 *2	1.5	1.5	1.56	Ai分布		
復元力特性 せん断ばね比率 (Tri:Bi)	トリニア+スリップ型バイリニア 6:4		バイリニア 3:7	Takedaモデル —		
第一折点の層間変形角	1/480	1/480	—	周期から定まる剛性と第一折点の力から設定		
第一折点の力 *3	0.3Qy	0.275Qy	—	Qy/3		
降伏時の層間変形角	1/120	1/120	1/250	1/150	1/150	1/150
降伏時のせん断力係数 *4	0.45	0.90	0.60	0.90	0.59	0.50
減衰 *5	5%	5%	3%	2%		

*1 1階に対する各階の重量の比

*2 木造在来、木質プレハブ²×4、軽量鉄骨造の数値は、1階に対する2階の耐力の比

*3 Qyは耐力

*4 耐力Qyは、(降伏時のせん断力係数)×(対象階および対象階より上の階の総重量)

*5 瞬間剛性比例型とした。数値は1次モードの値。

合でも、加速度応答に関する記述が多く、各階の震度に関する記述はほとんど見られなかった。このため本研究では、建物モデルの時刻歴応答解析を実施して、建物内の震度増分を設定することにした(震度増分モデルと呼ぶ)。建物モデルとしては、在来木造2階建て、木質プレハブ・2×4の2階建て、軽量鉄骨造2階建て、鉄筋コンクリート造(RC造)5階建て、10階建て、15階建ての6種類とし、それぞれ多質点系一本棒せん断型弾塑性モデルでモデル化した。各建物モデルの諸元を表4に示す。在来木造2階建てと木質プレハブ・2×4の2階建ては、北原・藤原(1990)²⁹⁾を参考に、トリリニアとスリップ型バイリニアのせん断ばねを並列につないだモデルで表した。軽量鉄骨造2階建ては、バイリニア型のせん断ばねモデルとし、一次固有周期と耐力は柳井・他(2002)²⁹⁾を参考に設定した。RC造建物の復元力特性はTakedaモデルを用いた。降伏時のせん断力係数は、埼玉県(1998)²⁷⁾を参考に設定した。

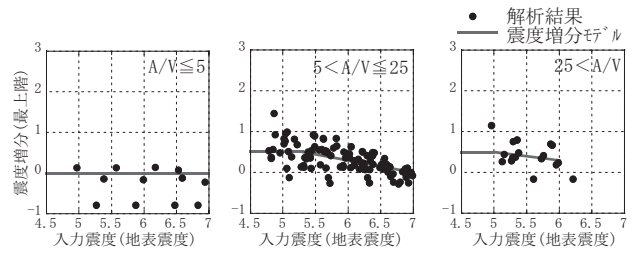
入力波としては、 A/V の異なる42波の地震観測記録を用いた。入力波の最大値を少しずつ変えて各モデルに入力し、建物種類(構造・階数)別、地震波の A/V 別、入力震度別に震度増分を求めた。地震波の A/V は $A/V \leq 5$ 、 $5 < A/V \leq 25$ 、 $25 < A/V$ の3区分に分類した。これは、解析に用いた建物モデルの一次固有周期が0.3~1.1秒(A/V 換算値で6~20)の範囲にあり、 $5 < A/V \leq 25$ の範囲外では、建物の応答増幅が比較的小さいと考えたためである。

建物最上階の震度増分の解析結果の例を図4に黒丸で示す。同程度の入力震度でも、波により震度増分にばらつきが見られる。本研究で設定した震度増分モデルを図4に実線で示す。震度増分モデルは以下の方針で設定した。

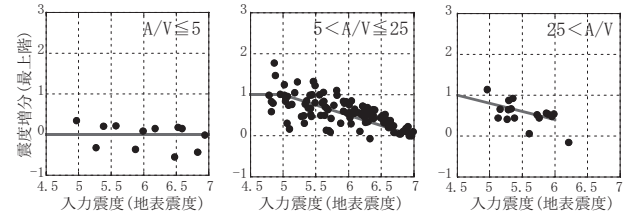
- ・入力震度に関わらず震度増分が一定の領域と、入力震度により震度増分が変化する領域に分け、入力震度により変化する領域では震度の一次関数で表すものとする。
- ・入力震度の小さいところでは、建物が弾性応答すると考えて、震度増分が頭打ちになるように設定する。頭打ちされた震度増分の値は、弾性範囲内での解析結果を基に設定する。

なお、ここでの震度増分モデルは、解析結果を厳密に回帰したものではなく、家財被害予測に用いることを想定して、比較的簡便なモデルになるように設定したものである。また、実際の被害予測では A/V を精度よく求められない場合もあるので、 A/V で区分しない場合についても震度増分モデルを設定した。

設定した建物最上階の震度増分モデルを図5に示す。 $A/V \leq 5$ の地震動ではRC造10階建てや15階建ての中高層建物の震度増分が大きく、 $A/V > 25$ では、RC造5階建てや軽量鉄骨造2階建ての震度増分が大きいこと、地表震度が大きくなると建物が塑性化して震度増分は小さくなることなどの傾向が表現できている。また、既往の文献を調べると、表・他²⁹⁾は、1978年宮城県沖地震の際に10~15階建ての住宅でアンケート震度を調査し、上階ほど震度が大きく最上階の震度は地上(震度3~5程度)より1程度大きいことを示しており、岡田²⁹⁾は、1987年千葉県東方沖地震の際に14階建ての高層住宅でアンケート震度を調査し、最上階の震度は地上(震度4.4程度)より0.6~0.7程度大きいことを示している。図5のRC造10階建ておよび15階建ての「 A/V 区分なし」、または $5 < A/V \leq 25$ の最上階の震度増分も震度5以下で0.9~1.2と、文献^{28),29)}と同程度の値になっている。



(a) 木造プレハブ・2×4 2階建て



(b) RC造5階建て

図4 震度増分の解析結果と本研究で設定した震度増分モデル(建物最上階)

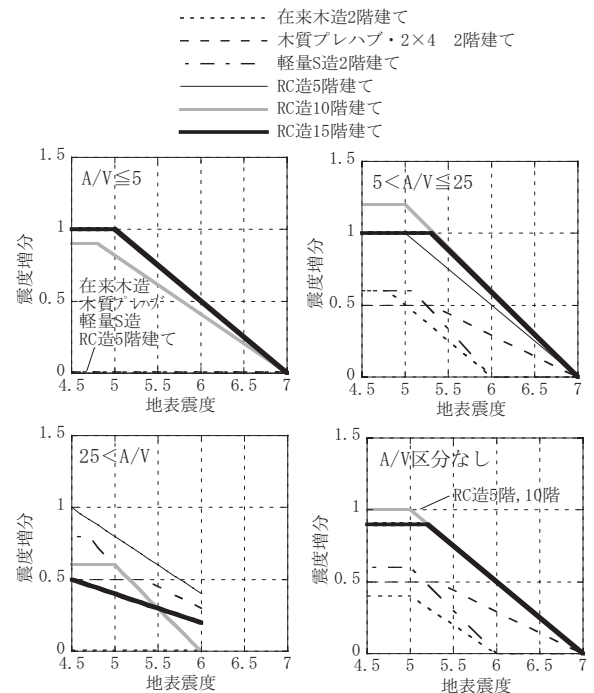


図5 6種類の建物の最上階の震度増分モデル

アンケート回答帯の震度増分を設定する際には、居住地点の地震の A/V と建物の構造により、図5に示す震度増分モデルを使い分けた。兵庫県南部地震では低層建物の被害率から地震動を推定し、 A/V が推定できないデータが多かったため、「 A/V 区分なし」の震度増分モデルを用いた。建物の構造の分類方法としては、まず、居住建物を在来木造、木質プレハブ・2×4、軽量鉄骨造、RC造の4種類に分類した。さらにRC造では階数で分類し、7階建て以下は5階建ての震度増分モデル、8~12階建ては10階建ての震度増分モデル、13階建て以上は15階建ての震度増分モデルを用いた。1階の震度増分は0(地表震度と同じ)、1階から最上階の震度増分は直線分

布として居住階の震度増分を算定した。2階建ての戸建て住宅では、1階と2階の震度の平均を居住階震度とした。各アンケート回答世帯の居住階震度は、3.1節に示した推定地表震度に居住階での震度増分を加えて算定した。

なお、本検討で設定した建物モデルが、実際のさまざまな建物の平均的なモデルであることが確認されているわけではなく、応答解析結果から設定した震度増分モデルも十分に妥当性が検証できていないわけではない。今後、実大建物の振動台実験や地震観測結果から建物の応答増幅データが多数得られれば、震度増分モデルを改良していくことが必要と考えている。

4. 家財被害関数の構築

2章で述べたアンケート調査の結果と3章で推定した居住階震度を用いて、居住階震度ごとの家財被害率を算定し、家財被害関数を構築した。

4.1 家財被害率の算定方法

本研究の目的は家財被害額を求めることであるため、被害率の定義は「家財被害額/家財保有額」とするのが望ましい。しかし、全ての家財について保有額に対する被害額の割合をアンケート調査で尋ねることは難しく、アンケート調査から被害額の割合のデータが得られるのは、兵庫県南部地震を除く4地震の非耐久財の被害についてのみである。このため本研究では、以下の①～③の3種類の方法で被害率を算定した。

$$\text{① 被害率(被害数ベース)} = \frac{\text{対象家財の被害数(個)}}{\text{対象家財の保有数(個)}}$$

$$\text{② 被害率(被害戸数ベース)} = \frac{\text{対象家財に被害が発生した戸数(戸)}}{\text{対象家財を保有している戸数(戸)}}$$

$$\text{③ 被害率(被害額ベース)} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (w_{i,j} R_{i,j})}{N}$$

$R_{i,j}$: アンケート回答 i 、家財品目 j の被害額の割合

$w_{i,j}$: 各家財分類における回答 i 家財品目 j の保有額の重み
(文献30)に示された各家財品目の保有額の値から算定)

n : ある家財分類に属する家財品目数

N : 本調査の回答数

耐久財 A～F の被害率は①の方法で算定した。耐久財では、被害を受けた家財の個数の割合が被害額の割合にほぼ等しいと考えたためである。非耐久財 G～J の被害率は、②と③の方法で算定した。②の方法では、対象家財の被害が軽微な場合でも被害が重大な場合と同等に扱われるため、被害を過大評価する恐れがある。しかし、兵庫県南部地震のアンケート⁹⁾では、調査項目の関係で③の方法による被害率の算定ができなため、5地震で共通の比較をするために②の方法でも被害率を算定した。また、兵庫県南部地震を除く4地震のアンケート調査では、SC調査で「家財の被害あり」と回答したモニターのみに本調査を実施しているため、①～③の方法で算定した本調査の被害率に、「SC調査で家財被害ありの回答数/SC調査の回答数」を掛けて全体の被害率を計算した。

なお、アンケートでは家具の固定状況についても尋ねており、たんす等を固定している世帯は2～3割あったが、これには一部の家具のみを固定している世帯も含まれていること、固定方法の半数以上は足元にストッパーを挟む程度の簡単な方法であることから、ここでは家具固定の影響は考慮しなかった。

4.2 家財被害率の算定

地震別、建物被災度別の家財被害率を A～J の家財グループにつ

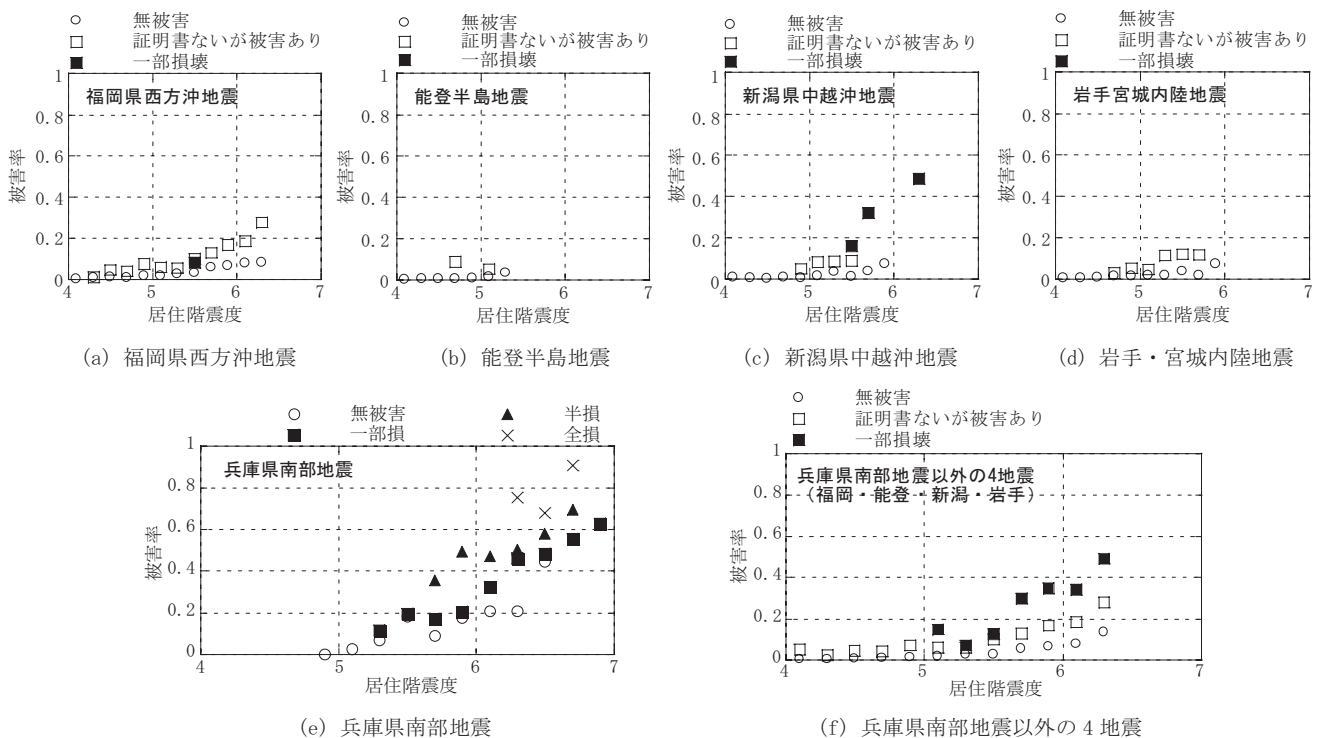


図6 地震別・建物被災度別の家財被害率 (家財A;被害数ベースの被害率)

いて算定した。家財被害率は居住階震度 0.2 刻みで算定した。ここでは、算定される結果の信頼性から、いずれも本調査の回答数 10 以上の震度区分を対象とした。家財 A の被害率の算定結果の例を図 6 に示す。(a)~(d)は兵庫県南部地震以外の 4 地震の結果である。これらの地震では半壊以上の被害を受けた建物は少ないため、被害率を算定したのは一部損壊までである。同じ建物被災度で比較すると、これら 4 地震の被害率は概ね同程度になっている。(e)は兵庫県南部地震の結果である。兵庫県南部地震については、建物「無被害」から「全損」まで被害率が求められている。推定した居住階震度が同じでも、建物被害が大きくなるほど家財被害率も大きくなっていることがわかる。この理由としては、3 章の方法で簡易に推定した床応答震度では、個々の建物の揺れやすさの違いまでは反映できていないこと、構造被害の大きい建物では天井や壁の損傷等が直接的に家財被害に影響を与えた可能性もあること、などが考えられる。

(f)は、(a)~(d)の 4 地震のデータを統合して被害率を算定したものである。(e)と(f)を比較すると、兵庫県南部地震で建物「無被害」の家財被害率は、その他の 4 地震の「証明書ないが被害あり」の被害率と同程度であり、兵庫県南部地震で建物「一部損」「半損」の家財被害率は、その他の 4 地震の「一部損壊」の被害率と同程度である

表 5 建物被災度別の家財被害関数と関数算定に用いるデータ

建物被災度別の家財被害関数の種類	被害関数算定に用いるデータ	
	兵庫県南部地震	福岡県西方沖地震 能登半島地震 新潟県中越沖地震 岩手・宮城内陸地震
建物；無被害	「無被害」のデータ	「無被害」または「証明書ないが被害あり」のデータ
建物；一部損・半損	「一部損」または「半損」のデータ	「一部損壊」または「半壊」のデータ
建物；全損*	「全損」のデータ	「大規模半壊」または「全壊」のデータ

* 建物全損のデータは少ないため、被害率を参考値として求め、被害関数は算定しないこととした。

ことがわかる。このように、建物被災度別に整理すると、5 地震の家財被害率には大きな違いがないことがわかる。

4.3 家財被害関数の構築

4.2 節の検討より、3 章の方法で推定した床応答震度で整理しても、建物被災度により家財被害率に違いがあることがわかった。このことから、ここでは、推定した居住階震度と建物被災度の 2 つの指標で家財被害率を推定することとした。建物被災度を「無被害」「一部損・半損」「全損」の 3 種類に分類して家財被害率を算定した。それぞれの被害率算定に用いるデータは、表 5 に示したとおりである。

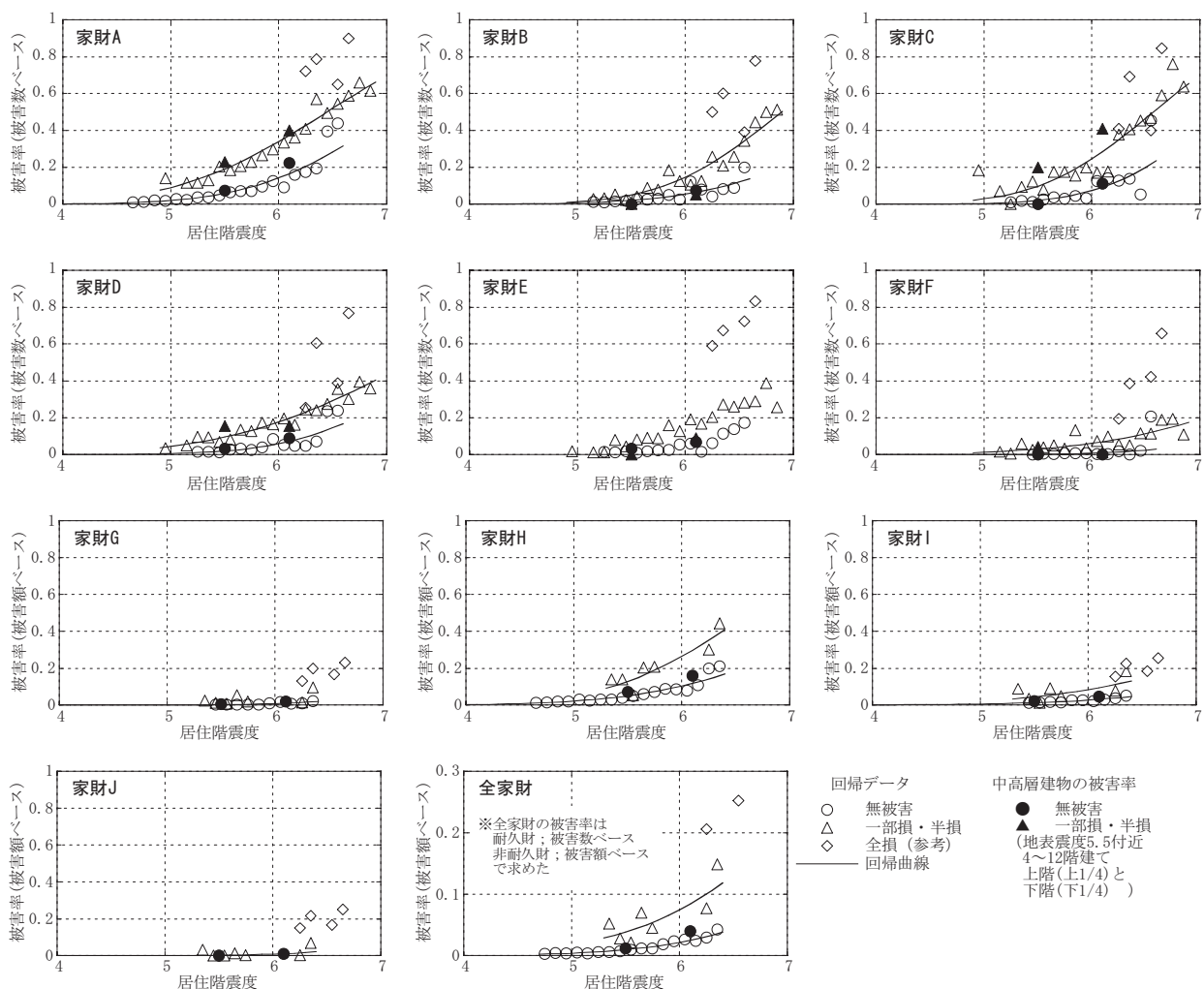


図 7 5 地震のデータを統合した建物被災度別の家財被害率とその回帰曲線

耐久財 A～F の被害関数は被害数ベース、非耐久財 G～J の被害関数は被害額ベースで算定し、さらにこれらを統合した全家財の被害関数も算定した。以下に被害関数の算定手順を示す。

- ①5 地震のアンケート回答を、それぞれ「無被害」「一部損・半損」「全損」の3つに分類した。
- ②各分類で地震毎に居住階震度 0.1 刻みの被害率を求めた。
- ③各地震の被害率を統合するため、震度区分ごとに、各地震の本調査数による重み付け平均を求めた。
- ④兵庫県南部地震のアンケートでは被害額の割合を尋ねていないため、「全損」の被害額ベースの被害率のデータは少なく、精度のよい被害率は算定できない。参考値として、「全損」の被害戸数ベースの被害率に、「無被害」と「一部損・半損」の(被害額ベースの被害率/被害戸数ベースの被害率)を掛け、「全損」の被害額ベースの被害率を求めた。
- ⑤全家財の被害率 R_{all} は、下式のように各家財の保有額の重み付き平均で計算した。

$$R_{all} = W_A R_A + W_B R_B + \dots + W_J R_J$$

(R_A : 家財 A の被害率, W_A : 家財 A の保有額の割合)

保有額の割合 W は、文献 31) で推定した世帯人数別・世帯主年齢別の保有額の割合に、文献 32) の世帯人数・世帯主年齢の構成比を掛けて算定した。

- ⑥被害関数は震度の正規分布とし、中央値と標準偏差は確率紙を用いた最小二乗法³³⁾により求めた。回帰には、本調査の回答数の合計が 10 以上のデータのみを用いた。

5 地震のデータを統合した建物被災度別の家財被害率(○△◇)とその回帰結果を図 7 に示す。また、構築した家財被害関数の中央値と標準偏差を表 6 に示す。「全損」のデータは震度 6 以上の 4 点のみであるため、回帰は行わなかった。家財被害率は、家財 J のように被害率が 0 に近い場合を除き、居住階震度の正規分布でほぼ表現できている。図 7 より、被害率が比較的大きいのは、家財 A(大型縦置き家具)、C(家事用家電製品)、H(食器・調理器具)であり、F(冷暖房機器)や J(衣類・寝具)は、建物が無被害の場合にはほとんど被害が無いことがわかる。

また、図 7 の●▲は、地表震度 5.5 付近 (5.3 以上 5.7 以下) の地点にある中高層建物の上階と下階の家財被害率の平均値を比較して示したものである。対象とした建物は 4 階～12 階建てで、上 1/4 を上階、下 1/4 を下階とした。条件に当てはまる世帯の居住階震度の平均値は、上階で 6.1、下階で 5.5 であった。耐久財 (家財 A～F) では、建物被災度が無被害の場合と一部損・半損の場合、非耐久財 (家財 G～J) と全家財では、無被害の場合のみの被害率をプロットした。居住階震度と家財被害率の関係は、一部の家財を除き、概ね回帰曲線と整合する結果となっている。このことから、地表震度 5.5 付近では、中高層建物の震度増分の設定が概ね妥当であったと考えられる。

5. 家財被害額の推定手法と推定例

4.3 節で構築した全家財の被害関数を用いることにより、世帯の家財被害額を推定することができる。図 8 に家財被害額の推定フローを示す。居住地の地震動と建物情報から居住階震度を推定し、家

表 6 家財被害関数の中央値と標準偏差

	建物無被害		建物一部損・半損	
	中央値	標準偏差	中央値	標準偏差
家財A	7.08	1.01	6.45	1.08
家財B	7.86	1.16	6.89	0.85
家財C	7.20	0.82	6.57	0.83
家財D	7.55	0.99	7.21	1.31
家財E	7.75	1.03	7.13	1.03
家財F	8.69	1.11	8.28	1.48
家財G	8.89	1.21	9.78	2.03
家財H	7.67	1.32	6.63	1.00
家財I	9.31	1.72	8.16	1.56
家財J	*	*	8.56	1.08
全家財	9.22	1.59	8.20	1.52

* 震度によらず被害率はほぼ 0

財被害関数を用いて建物被災度別の家財被害率を求める。これに家財保有額を掛けることにより建物被災度別の家財被害額を算定する。さらに、点線で示したように建物被災度が想定できれば、対象世帯の家財被害額を推定できる。ここでは、建物被災度別の家財被害額の推定例を示した。

推定ケースは、在来木造 2 階建て、または RC 造中高層住宅に住む 40 代 4 人の世帯(平均家財保有額は約 1200 万円³⁰⁾)で、地表震度は 5.5、6.0、6.5、地震動の A/V は $5 \leq A/V < 25$ の場合である。図 9 は、在来木造 2 階建てに住む世帯の震度別・建物被災度別の家財被害額の推定例である。震度が大きくなるほど、建物被災度が大きくなるほど家財被害額が増加している。地表震度 6.5 の場合には、建物「無被害」の場合の家財被害額は約 50 万円、「一部損・半損」の場合の被害額は約 150 万円と 3 倍の違いがある。

図 10 は、RC 造 5 階建て、10 階建て、15 階建て建物に住む対象世帯の震度別・居住階別の家財被害額の推定例である。建物被災度は一部損または半損とした。どのケースでも上階ほど家財被害額が大きくなっており、地表震度 5.5 の場合には、1 階の世帯の家財被害額が 50 万円程度であるのに対して、最上階の世帯の家財被害額は 150 万円程度と約 3 倍の違いが見られる。地表震度 6.5 の場合でも、1 階の世帯の家財被害額が 150 万円程度、最上階の世帯の家財被害額は 220 万円程度と約 1.5 倍の違いが見られる。

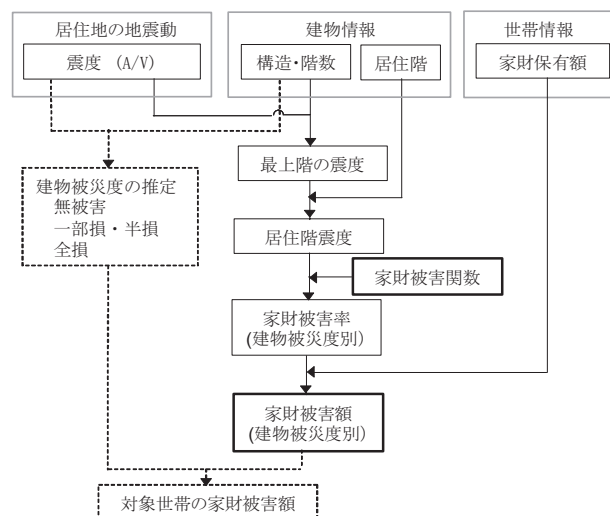


図 8 家財被害額の推定フロー

6. まとめ

本研究では、地震時の家財被害額の予測手法を提案した。居住地の地震動と建物情報から居住階震度を推定し、家財被害関数を用いて建物被災度別の家財被害率を求め、家財被害率に保有額を掛けることにより建物被災度別の家財被害額を算定する方法である。家財被害関数は、1995年兵庫県南部地震、2005年福岡県西方沖地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震の計5地震の家財被害に関するアンケート調査結果を基に構築した。また、居住階震度は、推定した地表震度に、建物応答解析結果を基に設定した震度増分を加えることで推定した。

今後、建物応答増幅特性についての観測または実験データが多数収集できれば、応答増幅モデルを改良して、精度の高い居住階震度の推定方法を考える必要がある。また、建物被害が大きい場合を含め、より多くの家財被害データが得られれば、家財被害予測手法の精度を高めていくことができるものと考えている。

謝辞

本研究に用いた地盤増幅データは、関東学院大学の若松加寿江氏と産業技術総合研究所の松岡昌志氏にご提供いただきました。ここに記して謝意を表します。また、インターネット調査には、株式会社インテージにご協力いただきました。

本研究は、地震保険調査研究費による調査研究事業の一環として実施したものです。

参考文献

- 1) 日本建築学会建築計画委員会：阪神淡路大震災住宅内部被害調査報告書、1996.9
- 2) 村上ひとみ、柳沙織里：2005年福岡県西方沖地震における集合住宅の室内被害と人的被害実態調査、日本地震工学会・大会-2005梗概集、pp.66-67、2005
- 3) 目黒公郎、吉村美保、伊東大輔、佐藤芳仁：市販の家具転倒防止装置の効果に関する実験・数値解析的検証、日本地震工学会論文集、第7巻第4号、pp.23-32、2007
- 4) 金子美香：地震時における家具の転倒率推定方法、日本建築学会構造系論文集、第551号、pp.61-68、2002.1
- 5) 正月俊行、翠川三郎、大堀道広、三浦弘之：超高層建物におけるオフィス内の家具群の地震時挙動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第620号、pp.43-49、2007.10
- 6) 損害保険料率算出定会（現・損害保険料率算出機構）：地震時の家財被害予測に関する研究、地震保険調査研究46、1998
- 7) 朝日新聞：ネット調査信頼できるか、2006年10月5日朝刊
- 8) 損害保険料率算出機構：日本の地震保険、2008.4
- 9) 内閣府 防災情報のページ：災害に係る住家の被害認定の概要〈<http://www.bousai.go.jp/hou/pdf/gaiyou.pdf>〉(参照2009.11.20)
- 10) 藤原賢也、岩橋平和、吉村昌宏：インターネット上で提供される強震観測記録を活用した地震動分布の推定、地域安全学会論文集、No.7、pp.231-240、2005.11
- 11) 藤本一雄、翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法、地域安全学会論文集、No.7、pp.1-6、2005.11
- 12) 藤本一雄、翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係、日本地震工学会論文集、第6巻、第1号、pp.11-22、2006
- 13) Kazuo Wakamatsu and Masashi Matsuoka: Development of the 7.5-Arc-Second Engineering Geomorphologic Classification Database and its Application to Seismic Microzoning, *Bulletin of Earthquake Research Institute*, The University of Tokyo, Vol.81, pp.317-324, 2006
- 14) 松岡昌志、若松加寿江、藤本一雄、翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メ

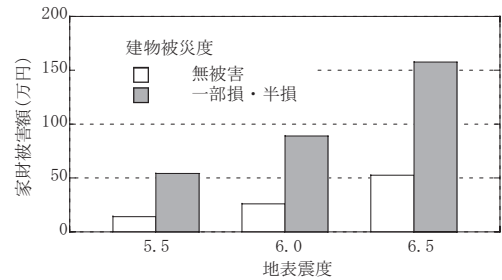


図9 震度別・建物被災度別の家財被害額の推定例 (在来木造2階建て、 $5 \leq A/V < 25$)

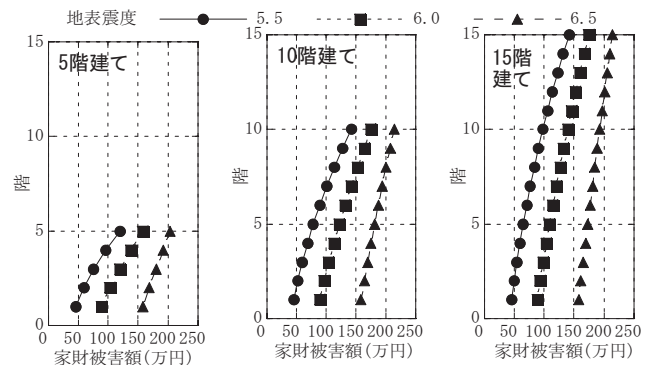


図10 震度別・居住階別の家財被害額の推定例 (RC造、建物一部損・半損、 $5 \leq A/V < 25$)

- 15) 国土地理院のHP：平成17年(2005年)福岡県西方沖地震の震源断層モデルの概念図〈<http://www.gsi.go.jp/common/000040252.jpg>〉(参照2008.9.9)
- 16) 国土地理院のHP：平成19年(2007年)能登半島地震の震源断層モデルの概念図〈<http://www.gsi.go.jp/common/000037244.pdf>〉(参照2007.11.27)
- 17) 国土地理院のHP：平成19年(2007年)新潟県中越沖地震の震源断層モデルの概念図〈<http://www.gsi.go.jp/common/000037099.pdf>〉(参照2007.11.27)
- 18) 国土地理院のHP：平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の震源断層モデルの概念図〈<http://www.gsi.go.jp/common/000043769.pdf>〉(参照2008.9.25)
- 19) 司宏俊、翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第523号、pp.63-70、1999.9
- 20) 損害保険料率算出機構：250mメッシュデータを用いた地震被害想定システムに関する研究、地震保険研究20、2009.9
- 21) 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
- 22) 林康裕、宮腰淳一、田村和夫：1995年兵庫県南部地震の地震動強さと建物被害の検討、清水建設IRI研究報告97-01、1997.3
- 23) 綿引誠、町田健一、大橋好光、坂本功：実物大建物振動台実験に基づく木造軸組工法住宅の耐震性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第599号、pp.103-110、2006.1
- 24) 原田浩之、井上芳生、長岡徹、谷垣正治、山岸邦彰：2005年7月23日に発生した千葉県北西部の地震における23階建超高層建築物の地震観測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集B-2、pp.147-148、2006.9
- 25) 北原昭男、藤原悌三：都市における建築構造物の地震被害推定に関する基礎的研究(3)木造構造物群の地震被害推定、京都大学防災研究所年報、B-1、pp.163-177、1990.4
- 26) 柳井裕俊、青木博文、池田勝利：鉄鋼系工業化住宅における等価線形化法の検証(その1試設計による構造特性の推定)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp.921-922、2002.8
- 27) 埼玉県：埼玉県地震被害想定調査報告書(平成10年)、1998.3

- 28) 表俊一郎、楢橋秀樹：アンケートによる建物階別震度の決定と大地震時の人間心理・行動の調査・解析(その1)(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.459-462、1979
- 29) 岡田成幸：地震に伴う室内環境変容と人的被害の発生危険性との関係－1987年千葉県東方沖地震の構想建物の震度調査にもとづく－、日本建築学会大会学術講演梗概集B、pp.679-680、1989.10
- 30) 損害保険料率算出機構：家財の地震被害予測手法に関する研究(その1)家財の所有・設置状況に関する調査、地震保険研究13、2007.11
- 31) 山田和樹、金子美香、村田明子：家財の地震被害予測手法の検討(その1)世帯の家財保有額の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集B-2、pp.313-314、2009.8

- 32) 厚生労働省統計データベースシステム：平成18年国民生活基礎調査
- 33) 塩見弘、三薺武、斉藤元雄、益田昭彦：信頼性における確率紙のつかい方、日科技連信頼性工学シリーズ4、日科技連、1983

注

注1) 本研究では、標準地域メッシュ(昭和48年7月12日行政管理庁告示第143号「統計に用いる標準地域メッシュおよび標準地域メッシュ・コード」)における4分の1地域メッシュを250mメッシュと呼ぶ。

(2009年11月24日原稿受理、2010年4月6日採用決定)