

耐震診断データに基づく木造建物の被害関数  
- 加速度応答スペクトルによる一部損壊以上の被害評価 -  
VULNERABILITY FUNCTIONS FOR WOODEN BUILDINGS  
BASED ON THE DATA FROM SEISMIC DIAGNOSIS  
-Evaluation of Minor and More Damages Using Acceleration Response Spectrum-

小檜山 雅之\*, 山崎 文雄\*\*  
Masayuki KOHIYAMA and Fumio YAMAZAKI

The vulnerability function of wooden-frame houses using the results of seismic diagnosis and a response spectrum was proposed. It employs a probability density function of seismic performance indices of wooden houses, which are separated into an index of horizontal resistance force and other indices. The input seismic motion is evaluated based on an acceleration response spectrum and natural periods determined by indices of horizontal resistance force. The application results to the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake are compared with the damage statistics at the five sites, which have seismic records. Though the proposed vulnerability function is not based on the damage statistics, the estimated ratios for minor and more damages coincide fairly well with the actual damage surveyed by local governments.

**Keywords:** vulnerability function, wooden buildings, seismic diagnosis, acceleration response spectrum, minor damage, the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake

被害関数, 木造建物, 耐震診断, 加速度応答スペクトル, 一部損壊, 1995 年兵庫県南部地震

## 1. はじめに

地震直後の災害対応を迅速かつ円滑に進めるため、国や自治体で防災情報システムの導入が進んできている。多くは地震計ネットワークにより地震動分布を把握し、地震動強さと建物被害率の関係を記述した建物被害関数により建物被害分布の推定を行っているが、その精度については依然として課題を残している。

既往の建物被害関数の研究<sup>例えば<sup>1)</sup>-<sup>6)</sup></sup>の多くは、被害統計を用いて回帰分析した結果から、最大速度や震度などの地震動指標と関係づけられる経験的被害関数を構築している。しかし、著者ら<sup>7)</sup>は、木造建物の耐震性能分布が地域により顕著に異なっていることを耐震診断結果から明らかにしている。したがって、経験的被害関数は、その構築に用いたデータと異なる地域へ適用するには注意を要し、建物耐震性能の分布が著しく異なる場合には、これを考慮する何らかの工夫が必要である。

一方、耐震診断や耐震改修への助成制度は全国のいくつかの自治体で始まっており、横浜市や兵庫県などでは無料診断が既に多くの住宅について実施されている。十分な診断データが集まれば建物群の耐震性能の分布をある程度把握することができ、これを用いた被害関数により推定精度を向上することが期待できる。梅村・山崎<sup>8)</sup>

は、1995年兵庫県南部地震の神戸市灘区の建物被害に対する村尾・山崎<sup>4)</sup>の被害関数を、耐震診断の総合評点分布を用いて横浜市へ応用する手法を提案している。しかしここでは、横浜市と東灘区の総合評点分布を同一と仮定している。また建物重量と壁率に基づく水平抵抗力の評点が固有周期に影響することから、周期特性を考慮した手法を新たに構築する必要がある。本研究では上記を踏まえ、耐震診断データと応答スペクトルを用い、地域的な耐震性能の特性を反映することができる木造軸組建物の被害関数を提案する。

## 2. 耐震診断データに基づく被害関数

### 2.1 木造建物の耐震診断

木造住宅の耐震診断法はこれまでにさまざまな提案がなされているが、全国で広く普及したのものとしては、まず昭和54年に(財)日本建築防災協会で作成された診断法が挙げられる。この診断法は昭和60年に改定され、一般向けの簡易な評価方法を解説した「わが家の耐震診断と補強方法<sup>9)</sup>」(以下、この診断法を簡易診断法と略す)、建築技術者用の詳細な評価法をまとめた「木造住宅の耐震精密診断と補強方法<sup>10)</sup>」(以下、この診断法を精密診断法と略す)が出版され、現在広く実施されている<sup>11)</sup>。注<sup>1)</sup>。精密診断法は、建築物の耐震改修の促

\* 東京大学生産技術研究所 助手・博士(情報学)

\*\* 東京大学生産技術研究所 助教授・工博

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

進に関する法律（平成7年10月27日公布，同年12月25日施行，略称：耐震改修法）における耐震診断の指針の一部と同等以上の効力を有すると国土交通大臣が認定している。

精密診断法は，壁の量と配置から評点が与えられるため，太い柱・梁で構成される貫構法などの伝統構法は診断対象外となっている。石川県<sup>12)</sup>は，県内の伝統構法の特徴を踏まえた木造住宅の診断法を作成している。また，静岡県<sup>13), 14)</sup>でも地域性や簡便さを考慮し，伝統構法に適用可能な診断法を開発している。

阪神・淡路大震災では，6400人を超える死者の約8割が住宅の倒壊・損壊により発生し，さらに瓦礫による道路閉塞が避難・救出・消火活動を妨げ，火災の拡大による大きな被害をもたらした。その後，耐震改修法により公共建物の耐震性能の改善が進んできているが，一般住宅の耐震改修はなかなか進まず，木造住宅密集地区の問題改善が大きな課題として残っている。この問題を受け，耐震性の低い住宅の建替えを推進するため，密集市街地における防災街区の整備の促進に関する法律（平成9年5月9日公布，同年11月8日施行，略称：密集法）が創設された。これに関連して，建替促進建築物・延焼等危険建築物を判定するための木造建築物の耐震診断基準<sup>15), 16)</sup>が開発された（以下，この診断法を密集診断法と略す）。

精密診断法は，建築基準法で規定している所要壁量分の水平抵抗力と住宅1階の水平抵抗力の比から判定を行う。すなわち，建物のほぼ弾性限の耐力が，供用期間中に1度遭遇すると想定される中地震による水平力を上回っているかを診断する。診断対象となる建物としては，在来軸組構法等，主な耐力要素として壁により地震時水平力を負担する構造形式に限定されている。一方，密集診断法では，建物の保有限界エネルギーと基準入力エネルギーの大小により判定を行い，保有耐力レベルの診断により倒壊の有無を見極めている。密集診断法は精密診断法と同様，専門的な知識を前提とした診断法となっており，混構造や伝統構法といった，精密診断法の対象外となっている建物についても診断が可能である。

また，国土交通省は，地方公共団体による木造住宅密集地区への効果的な取り組みを支援するため，精密診断を要する倒壊危険性の高い家屋を，外観目視調査により把握する簡易な耐震診断法の開発も行っている<sup>17)</sup>。

## 2.2 耐震性能分布を考慮した建物被害推定手法

地震時における建物被害の予測・推定手法において，都市に存在する建物の耐震性能分布のデータを積極的に利用した既往研究を挙げ，その特徴を述べる。まず，表・檜橋<sup>18)</sup>は，木造家屋の復元力モデルを構築し，福岡市の新築建物297棟の建物用途別の壁率分布から固有周期分布特性を明らかにし，地盤種別ごとの人工地震波を用いたシミュレーションにより予測される被害について述べている。建物応答と被害の関係については，既往の実験結果と経験から，層間変形角1/100を壁体の力学性状が変化するところであると共に家屋に被害の認められる限界変形，3/100の変形を中被害程度としている。

柴田<sup>19)</sup>は，都市の建築群をばらつきのある耐震性能を有する建築物の集合体と考え，作用する応答地震力もまたばらつきのある量としてとらえ，信頼性理論を適用し建築群の被害率を求めている。柴田・赤松<sup>20)</sup>は1978年宮城県沖地震の仙台地域における木造建物の被

害率と地表面加速度の関係，建物の固有周期と加速度応答倍率の関係から，木造建築群の降伏震度分布を推定し，弾塑性応答解析モデルを用いたシミュレーションを行い，最大塑性率により被害判定（塑性率を $\mu$ とすると，無被害： $\mu < 1$ ，一部壊：1~2，半壊：2~3，全壊： $\mu > 3$ ）を行う手法を提案している。同地震によるシミュレーション結果と実被害とが対応していない箇所については，(1)地域により木造建物の耐震強度の分布が異なること（建物の新旧など），(2)表層地盤分類モデルの妥当性の問題，(3)局所的な地盤の地震動に及ぼす影響（崖地・盛土），(4)地盤崩壊や液状化の程度を指摘している。

北原・藤原<sup>21)</sup>は，壁率の分布から木造建築群の耐力分布を推定し，動的解析モデルによるシミュレーションにより，最大応答変位の分布を求める手法を提案している。しかし，全壊，半壊と最大応答変位の関係は経験値を紹介するにとどまっている。

一方，建築群の耐震性能については，耐震診断結果を活用することでその分布を推定することができる。木造住宅の耐震診断結果を活用した被害想定手法については，損害保険料率算定会<sup>22), 23)</sup>で既に行われている。提案される手法は，精密診断法の診断データを用いており，昭和35年以前の専用住宅，昭和36年以降の専用住宅，店舗併用住宅の3つの建物グループに分け，それぞれ平屋，2階建て別に合計6グループについて，水平抵抗力の評点(D×E)の確率密度関数を推定し，これをもとに変形が1/120の復元力（層せん断力係数表示）をさらに推定，いくつか想定した地盤条件，入力地震動に対する木造建物の復元力特性モデルを用いた動的解析結果の変位から，被害レベルを判定している。したがって，基礎・地盤の評点(A)，偏心の評点(B×C)，老朽度の評点(F)については用いられていない。また，被害率については，動的解析結果をもとに，変形角1/120, 1/60, 1/30, 1/15を閾値として無被害，小破，中破，大破，倒壊を分類している。

精密診断法による全国の診断データを分析した著者ら<sup>7)</sup>の研究では，東北地方において評点(B×C)，(F)の低い建物が多いといった地域性が見出されている。耐震性能の低減率を表す評点(A)，(B×C)，(F)の評点選択肢の値は工学的判断により定められたものであるが，本研究では，耐震性能分布の地域性をなるべく反映できるように，これらの低減率は耐力算定においても妥当なものであると考え，全ての評点を考慮し被害関数を構築する。なお，建物被害については，震動による部材被害のみを考え，傾斜・沈下といった液状化などの地盤変状に起因した被害は，本研究では対象外とする。

前記の既往研究における変形角の閾値と被害レベルの関係については，概して妥当とはいえるものの，全壊など大きな被害では建物によるばらつきがあるため，被害予測精度を落とす要因となるといえる。一方，小さな変形角については，文献<sup>23)</sup>では1/120を非耐力部分の破損，亀裂，1/60を修復可能限界の閾値としている。実大建物の実験<sup>24)</sup>においては，1/120での内装仕上げの亀裂発生，1/60で内外壁の亀裂発生との報告がある。被災後の残留変形に関して，内閣府の「災害に係る住家の被害認定基準運用指針<sup>25)</sup>」では，外壁または柱の傾斜が1/60未満であれば，傾斜による判定は行わず，部位による判定を行うとしている。また応急危険度判定<sup>26)</sup>においても，1階の傾斜に関しては1/60以下までは危険なしとしている。阪神・淡路大震災における木造建物の学術的被害調査では，建物の傾斜に関しては1/60以下までを軽微な被害とした例もある<sup>27)</sup>。そこで本論では，

被害レベルについて一部損壊以上の被害発生率（以下、損壊率と略す）のみに着目し、層間変形角1/60で被害が発生しはじめるものとして被害関数の構築を行う。

大きな変形角が生じる領域では剛性・減衰の非線形挙動を考慮する必要があるが、実大建物の水平加力実験<sup>28)</sup>では、1/120で剛性の低下を開始するものの、1/60程度まで概ね線形の荷重・変位関係を保つことが確認されている。よって、変形角1/60までの領域では剛性を線形と仮定しても予測精度に与える影響は小さいものと考えられる。減衰定数については、層間変形角0と本論における一部損壊の閾値1/60の中間値である1/120前後の値として、既往の実験結果<sup>例えば29)</sup>

<sup>30)</sup>を参考に、10%を用いて加速度応答スペクトルを求めるものとする。

入力地震動については、加速度応答スペクトルを用い、水平抵抗力の評点(D×E)に対応した固有周期の違いを考慮する。固有周期は階高と、2階建てであれば2層の質量比、剛性比によっても変化するが、精密診断法の耐震診断結果のみからは、これらの情報を得ることは困難である。そこで本論では、平均的な階高、2層の質量比、剛性比を固定値として基本的な定式化を行う。

### 2.3 被害関数の定式化

以下、建築基準法で規定される建物の耐力と地震力との関係に着目し、精密診断法の評点との関係から被害関数の構築を行う。建築基準法施行令において一般的な木造建築物は、地震層せん断力係数  $C_i = Z R_t A_i C_o = 0.2$  の地震に対し、層間変形角1/120までが許容される。ここで、 $C_o$ : 標準せん断力係数（一般に0.2）、 $Z$ : 地震地域係数（地震活動が高い地域で1）、 $R_t$ : 振動特性係数（一般的な木造建築物で1）、 $A_i$ :  $i$ 階における地震層せん断力係数の建物高さ方向の分布を表す係数（1階で1）である。したがって、 $C_i = 0.2$ の地震による水平力 $Qd_0$ で、建物の1階において層間変形角1/120を生じる建築基準法の規定最低限の水平耐力を $Qr_0$ とおく。

$$Qr_0 = Qd_0 = C_i M g = Z R_t A_i C_o M g \quad (1)$$

ここで、 $M$ : 上部構造の質量、 $g$ : 重力加速度である。一般的な地震力 $Qd$ を考えると、変形角1/60までの弾性を仮定すれば、比 $Qr_0/Qd$ が1/2を下回ると変形角が1/60を上回り一部損壊が発生するとみなせる。

一方、壁量などにより規定最低限の耐力に対し $Rw$ 倍の耐力をもつ建物の変形角1/120の1階の水平耐力 $Qr$ は、

$$Qr = Rw Qr_0 \quad (2)$$

とおける。精密診断法における水平抵抗力の評点(D×E):  $I_{DE}$ は建築基準法施行令で要求している最低限度の水平耐力に対する倍率を表している。また、実際の建物には、直交壁や非耐力壁等により、 $I_{DE}$ に含まれる垂壁・腰壁等のラーメン効果以上に剛性の増大があり、さらに壁倍率には3/4の低減係数が係っている<sup>31)</sup>ことから、これらの効果による剛性割増係数を $\alpha_{DE}$ とすると、 $Rw = \alpha_{DE} I_{DE}$ とみなしうる。

また、応答加速度 $Sa$ で、偏心などの形状特性により形状係数 $Fes$ の割増があったときの地震力 $Qd$ は、式(1)より、

$$Qd = Sa Fes M = Sa Fes Qd_0 / (C_i g) \quad (3)$$

となる。精密診断法の偏心の評点(B×C):  $I_{BC}$  (1)は $1/Fes$ に相当する。

精密診断法の基礎・地盤の評点(A)は、基礎形式・ひび割れの状況に基づく被害の発生しやすさと、軟弱地盤による地震動の増幅と地盤変状に起因する被害の発生しやすさが組み合わされ、表1の評点

表1 精密診断法の地盤・基礎の評点(A)

基礎形式	地盤の分類		
	良い・普通	やや悪い	非常に悪い
鉄筋コンクリート造布基礎	1.0	0.8	0.7
無筋コンクリート造布基礎	1.0	0.7	0.5
ひび割れのあるコンクリート造布基礎	0.7	診断適用外	
その他の基礎(玉石、石積、ブロック積)	0.6		

表2 密集診断法の地盤が軟弱な場合の地震力の割増係数  $R_g$

割増係数 $R_g$	地盤の分類		
	良い・普通	やや悪い	非常に悪い
	1.0	1.2	1.5

表3 密集診断法の基礎形式係数  $R_b$

基礎形式	地盤の分類		
	良い・普通	やや悪い	非常に悪い
鉄筋コンクリート造布基礎	1.00	1.00	1.00
無筋コンクリート造布基礎	1.00	0.85	0.75
足固めを使用した玉石基礎	1.00	0.85	0.75
ひび割れのあるコンクリート造布基礎	0.70	0.60	0.50
上記以外の基礎	0.60	0.50	0.50

選択肢が構成されている。一方、密集診断法では、地盤が軟弱な場合の地震力の割増係数 $R_g$ と基礎形式係数 $R_b$ を、それぞれ表2、表3のように別々に与えている<sup>注2)</sup>。軟弱地盤による地震動の増幅は $Sa$ に反映されていることから、精密診断法の基礎・地盤の評点(A)の代わりに密集診断法の $R_b$ を与えたものを $I_A$ とする。被害が発生する層間変形角が、基礎形式の影響で $R_b$  (1)倍、老朽化の影響で $R_d$  (1)倍に、それぞれ独立に低下すると仮定すると、一部損壊が発生する条件式は、

$$R_b R_d Qr / Qd < 1/2 \quad (4)$$

となる。精密診断法の老朽度の評点(F):  $I_F$ は $R_d$ に相当する。式(4)に式(1)、(2)、(3)を代入し、耐震診断評点 $I_A$ 、 $I_{BC}$ 、 $I_{DE}$ 、 $I_F$ で表示すると、一部損壊が発生する条件式は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{R_b R_d Qr}{Qd} &= \frac{R_b R_d R_w Qr_0}{Sa Fes Qd_0 / (C_i g)} = (R_b) \cdot \left( \frac{1}{Fes} \right) \cdot (R_w) \cdot (R_d) \cdot \frac{C_i g}{Sa} \\ &= I_A I_{BC} \alpha_{DE} I_{DE} I_F C_i g / Sa < 1/2 \\ \Leftrightarrow I_A I_{BC} I_{DE} I_F &< Sa / (2 \alpha_{DE} C_i g) \end{aligned} \quad (5)$$

次に、加速度応答 $Sa$ について考える。 $Sa$ は建物の固有周期と減衰に依存する。建築基準法の規定最低限の水平剛性を $St'$ とすると、平均的な階高  $h_1 = 290$  cmを仮定した平屋建物の場合、 $St' = Qr_0 / (h_1/120)$  となり、剛性比 $\alpha_{DE} I_{DE}$ は変形角1/120の耐力比に対応することから、固有周期  $T$  (s)は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} T &= 2\pi \sqrt{\frac{M}{\alpha_{DE} I_{DE} St'}} = 2\pi \sqrt{\frac{M \cdot h_1 / 120}{\alpha_{DE} I_{DE} Qr_0}} = 2\pi \sqrt{\frac{M \cdot h_1 / 120}{\alpha_{DE} I_{DE} C_i M g}} \\ &= \frac{2\pi}{\sqrt{120}} \sqrt{\frac{h_1}{\alpha_{DE} I_{DE} C_i g}} = \frac{0.698}{\sqrt{\alpha_{DE} I_{DE}}} \end{aligned} \quad (6)$$

平均的な2階建ての場合、2層モデルにおける上層、下層の質量比を3:4、2層の階高がともに290 cmで1次固有振動形が直線となることを仮定すると、式(6)の分子は0.834となる<sup>注3)</sup>。

ある地域の建物群の耐震診断評点から求まる $I_{DE}$ と $I_{ABCF} = I_A \cdot I_{BC} \cdot I_F$ の確率密度関数 $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$ が与えられたとする。加速度応答スペクトル $Sa$ が作用したときの一部損壊の発生確率 $P_{fp}$ は、式(5)、(6)より次のような被害関数として表すことができる。

表4 各地区の地表面最大速度

対象地区の市区	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
観測点整理番号 <sup>32)</sup>	108	101	210	212	103
最大速度 (cm/s)	28	127	78	50	82

- 1) 対象地域の木造建物についてランダムサンプリングにより耐震診断データを収集。
- 2) 上記データについて、式(5)に基づき1棟ごと被害の有無を判定。
- 3) 被害有無の棟数比によって被害率を算出。

この方法は、対象地域の診断評点の $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$ に基づきモンテカルロ法を行った場合に、その試行サンプルが上記のランダムサンプリングにより収集した耐震診断データと等価とみなせることによる。

なお、一般に耐震診断は希望者に対して行われる<sup>24)</sup>ため、必ずしもランダムサンプリングデータが入手できるとは限らない。その際には、住宅統計などを利用し、サンプル数の調整や重み係数の導入により、建築年や延べ床面積などの構成比を一致させることで近似できると考えられる。

### 3. 1995年兵庫県南部地震による精度の検証

#### 3.1 対象地域と用いた強震記録

本論で提案する被害関数の有効性を検討するため、1995年兵庫県南部地震についてケーススタディを行った。対象地域は、加古川市、神戸市須磨区、東灘区、尼崎市、宝塚市内の地震観測点<sup>32), 33)</sup>近傍の5つの地区とし、地震記録は鉄道総合技術研究所と関西地震観測研究協議会のもの（東灘区・尼崎市は振切れ補正波形<sup>34)</sup>を使用)を用いた。表4に各地区の最大速度を示す。なお、神戸市市街地の強震記録が得られた神戸海洋気象台、大阪ガス葛合供給部の近傍については、実被害率の算定に十分な木造家屋が存在しなかったため、対象から除外した。

#### 3.2 実被害率の集計計算

被害推定結果と比較する実際の被害統計としては、自治体の固定資産税減免のための被害調査による町丁目単位の集計結果（以下、自治体データ）、ならびに震災復興都市づくり特別委員会<sup>35)</sup>の調査結果を建築研究所<sup>30)</sup>がデータ化した街区単位と町丁目単位の集計結果（以下、建研データ）を用いた。自治体データは、木造で、特定できるものは戸建てに限定して集計した。建研データはほとんどが木造と考えられる低層戸建て建物を集計した。被害判定基準に関しては、自治体データは一部損壊以上、建研データはランクA（軽微な損傷）以上の被害が生じた建物棟数比率と被害関数から推定される損壊率とを比較した。

地震観測点から離れるとその観測記録とは異なる地震動が生じていたことも考えられるため、集計範囲はなるべく小さいことが望まれる。建物棟数の集計に関し、小檜山<sup>37)</sup>は兵庫県南部地震の被害データを用い、神戸市における低層建物の集計単位の下限として約10,000m<sup>2</sup>を示している。さらに、地盤条件が異なると、地震動の増幅特性も異なると考えられる。以上より、データの集計は、まず地震観測点から半径約100mの範囲を選択し、次に、土地分類基本調査

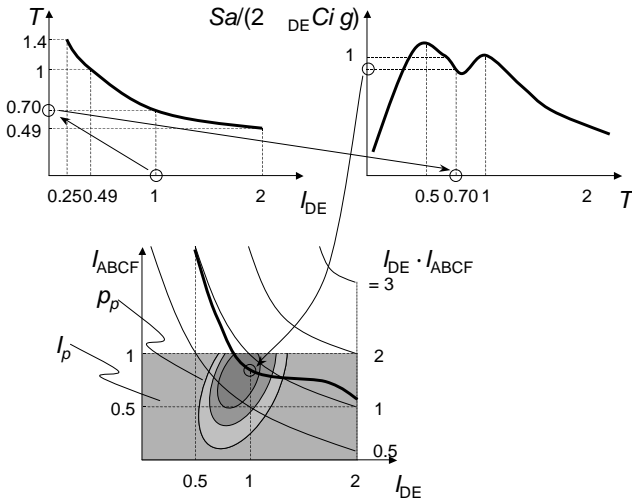


図1 損壊率の算定手順（固有周期の値は平屋建物の例）

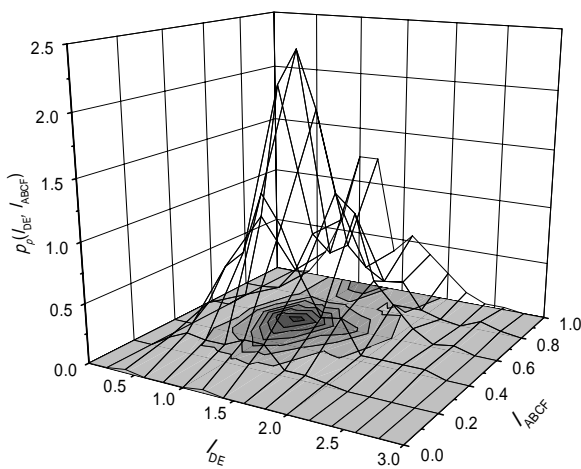


図2 兵庫県の2階建て建物の耐震診断データから求めた確率密度関数 $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$

$$P_{\hat{p}} = \int_{I_p} p_p(I_{DE}, I_{ABCF}) dI \quad (7)$$

$$\text{ここで、 } I_p = \{(I_{DE}, I_{ABCF}) \mid I_{DE} \cdot I_{ABCF} < Sa'(I_{DE}) / (2\alpha_{DE} Ci g)\} \quad (8)$$

ただし、 $Sa'(I_{DE})$ は $Sa$ を $I_{DE}$ の関数として再定義した加速度応答スペクトルで $Sa'(I_{DE}) = Sa(T(I_{DE}), h)$ 、減衰定数 $h = 10\%$ である。

図1に平屋建物の損壊率の算出手順を示す。簡単のため、 $\alpha_{DE} = 1$ の例を示す。まず、加速度応答スペクトルの固有周期 $T$ を式(6)により $I_{DE}$ に変換し、評点空間 $(I_{DE}, I_{ABCF})$ に投影する。応答スペクトルは図中の太線で示される。次に、この太線より下側の領域について、式(7)、(8)に示す評点分布の確率密度関数 $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$ の積分を数値的に実行し、被害率を算定する。

#### 2.4 確率密度関数の評価と損壊率の算定

確率密度関数 $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$ は、多くの建物の耐震診断結果から度数分布を求め、推定することが可能である。図2に兵庫県における2階建て建物の耐震診断データ（3.3節参照）992棟から $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$ を評価した例を示す。

損壊率の算定に当たっては、診断評点の確率密度関数 $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$ の評価を直接行わない以下の方法が提案できる。

表5 被害統計の集計結果

建研データ(街区単位のデータの集計結果)					
対象地区の市区	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
全壊又は大破	-	32	23	0	2
中程度の損傷	-	11	10	1	1
軽微な損傷	-	16	27	22	8
外観上の被害なし	-	4	18	18	15
全棟数*	-	63	78	41	26
損壊率	0%	93.7%	76.9%	56.1%	42.3%
建研データ(町丁目単位のデータの集計結果)					
対象地区の市区	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
全壊又は大破	-	15	34	0	19
中程度の損傷	-	8	11	6	20
軽微な損傷	-	12	47	59	30
外観上の被害なし	-	2	33	90	140
全棟数*	-	37	125	155	209
損壊率	0%	94.6%	73.6%	41.9%	33.0%
自治体データ(町丁目単位のデータの集計結果)					
対象地区の市区	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
全壊	市で0	26	14	11	93
半壊	市で13	8	4	84	128
一部損壊	-	13	28	69	50
無被害	-	1	20	104	9
全棟数	-	48	66	268	280
損壊率	0%	97.9%	69.7%	61.2%	96.8%

\*:被害未調査,火災被害を除く

の地形分類図・表層地質図<sup>38), 39)</sup>を参照して,観測点と同一地盤条件の街区を特定した上で行った。なお,ここで用いた地形分類図では段丘,扇状地がその成立年代により細分類されているが,地震観測点と同一の細分類に含まれる範囲のみで集計すると,建物棟数が極めて少なくなってしまう。そこで,隣接する細分類間では地震動増幅特性の差異は小さいものと考えられることから,それらを同一地形分類とみなした。被害統計の集計結果を表5に示す。加古川市については建研データの対象地域外であるが,自治体調査結果では市全体で全壊0棟,半壊13棟であり,損壊率は0%に近いと考えられる。

### 3.3 用いた耐震診断データ

対象地区の耐震診断データの入手は困難であるため,日本木造住宅耐震補強事業者協同組合(木耐協)が2000年7月から2002年1月までの期間に診断した,兵庫県に立地する建築年が平成6年以前の建物の診断データ<sup>7), 注5)</sup>を用いた。平成5年住宅統計調査<sup>40)</sup>によれば,加古川市,神戸市須磨区,東灘区,尼崎市,宝塚市の一戸建て木造建物のうち平屋が占める割合はそれぞれ10.7%, 8.4%, 11.7%, 11.4%, 9.5%であったため,簡単のため2階建て建物の耐震診断データ902棟のみを用いた。

各市区のランダムサンプリングデータを模擬するため,文献<sup>40)</sup>の木造・防火木造建物の年代別構成比(図3)をもとに耐震診断データの建築年代別の重み係数を表6のとおり設定した<sup>注6)</sup>。

### 3.4 被害率の推定と既往の被害関数との比較

固有周期の計算に関して,まず階高については,平成8年に行われた住宅金融公庫の公庫融資を利用した一戸建て住宅の建築的事項に関する調査<sup>41)</sup>から,兵庫県103棟の平均が2.9mという結果が得られているため,前節の定式化で用いた係数をそのまま評価に使用した。

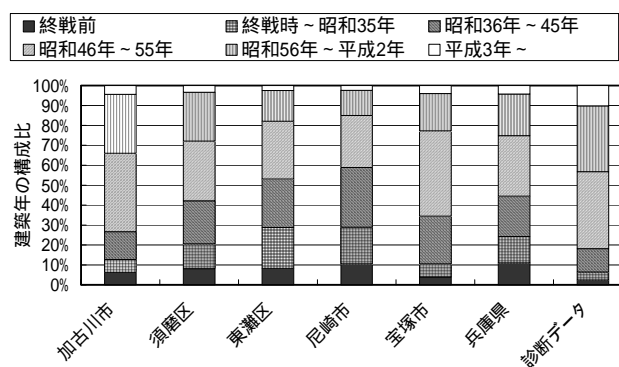


図3 各地区と診断データにおける建築年の年代別構成比

表6 診断データに対する各地区の建築年代別の重み係数

診断データの建築年	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
終戦前	2.57	3.33	3.39	4.31	1.63
終戦時~昭和35年	1.61	3.12	5.14	4.61	1.65
昭和36年~45年	1.19	1.84	2.07	2.55	2.03
昭和46年~55年	1.02	0.78	0.75	0.68	1.11
昭和56年~平成2年	0.89	0.74	0.47	0.38	0.57
平成3年~平成6年	0.44	0.33	0.24	0.24	0.39

(重み係数1は建物1棟のデータを1棟分とみなすことに相当)

表7 各地区の損壊率の推定結果と既往研究との比較

被害関数	対象地区の市区				
	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
本研究	8.5%	92.2%	66.7%	66.8%	96.6%
神戸市~尼崎市低層 <sup>1)</sup>	13.4%	83.1%	61.6%	37.8%	63.9%
東灘区低層(-1974) <sup>2)</sup>	14.2%	76.3%	55.6%	35.1%	57.7%
東灘区低層(1985-) <sup>2)</sup>	2.8%	30.7%	16.9%	8.5%	18.0%
阪神地域 <sup>3)</sup>	0.2%	92.0%	51.9%	11.6%	56.7%
灘区木造(-1950) <sup>4)</sup>	18.0%	94.5%	78.6%	52.1%	80.6%
灘区木造(1982-94) <sup>4)</sup>	0.7%	69.8%	33.0%	9.4%	36.2%

\*1: 林ら(1996)<sup>1)</sup>, \*2: 長谷川ら(1998)<sup>2)</sup>, \*3: 山口・山崎(1999)<sup>3)</sup>, \*4: 村尾・山崎(2002)<sup>6)</sup>

また剛性割増係数 $\alpha_{DE}$ については,木造住宅の実大実験の結果から,層間変形角1/120の水平抵抗力が雑壁等の寄与により,建築基準法に基づき壁量から計算される耐力(1/3の非耐力壁負担と壁倍率の安全率3/4を考慮)に対し200%の余力を有しているとの報告<sup>42)</sup>がある。ここでは,壁倍率の安全率とさらに1.5倍の割増を考慮し, $\alpha_{DE} = 4/3 \times 1.5 = 2$ を用いた。この値は,小山田ら<sup>43)</sup>が実在建物を参考に作成したモデルの動的解析結果から得た倍率に整合する。

耐震診断データと各市区の加速度応答スペクトルによる損壊率の評価をそれぞれ図4に示す。グラフ上にプロットされた丸印が耐震診断データの一棟一棟を表している。精密診断法では偏心と水平抵抗力の評点(B×C), (D×E)は弱軸方向の値が与えられるが,その方位については今回用いた診断データからは特定しえなかった。そこで,図中の太線で示される,東西・南北方向の応答スペクトルの平均を損壊率の算定に用いた。加古川市における評価を例にとると,耐震診断データ902棟のうち太線の下側に存在する61棟が一部損壊と判定され,重み係数を乗じて集計すると損壊率8.5%が得られる。

本研究の被害関数と,建研データを用い構築された文献1), 2), 3), 6)の被害関数の損壊率の推定結果を表7に示す。表中にはその被害関数の構築に用いたデータの地域を示している。

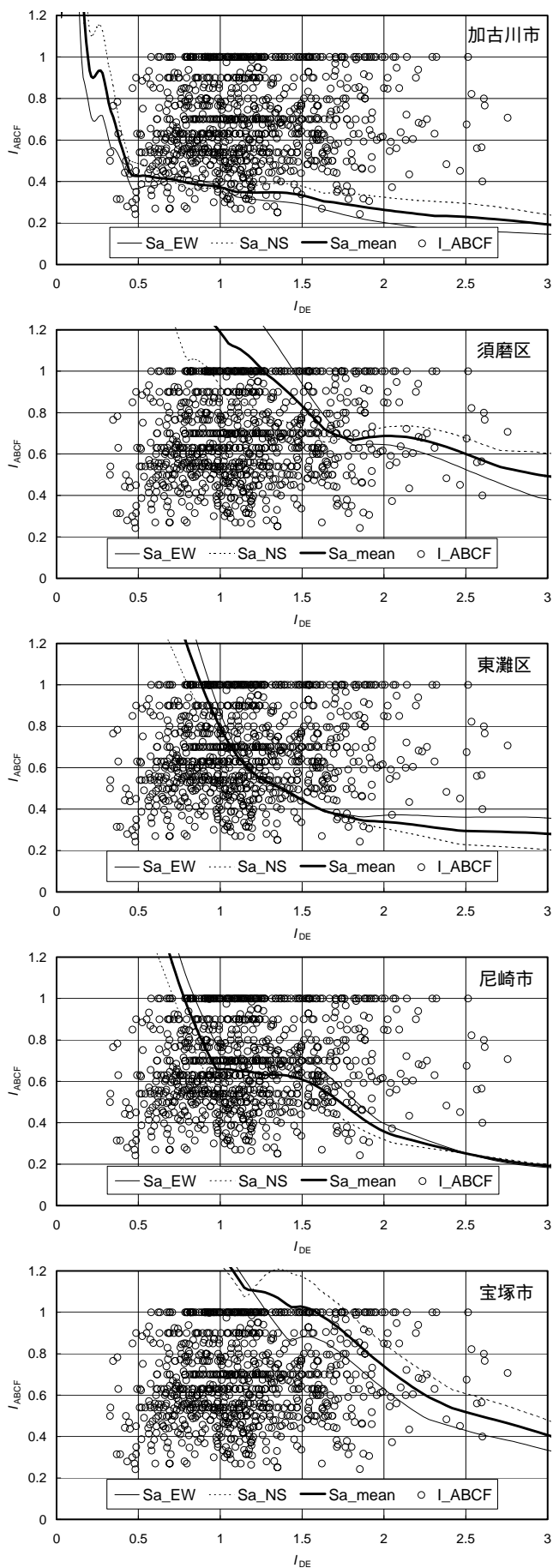


図4 損壊率の評価

表8 5地区の被害推定結果の2乗平均平方根誤差

被害関数	被害統計		
	建研データ (街区単位)	建研データ (町丁目単位)	自治体データ (町丁目単位)
本研究	25.4%	30.9%	5.4%
神戸市～尼崎市低層 <sup>1)</sup>	16.3%	16.9%	20.5%
東灘区低層(-1974) <sup>2)</sup>	18.1%	17.4%	24.8%
東灘区低層(1985-) <sup>2)</sup>	45.7%	41.6%	57.1%
阪神地域 <sup>3)</sup>	23.7%	19.8%	29.7%
灘区木造(-1950) <sup>6)</sup>	19.0%	23.3%	12.3%
灘区木造(1982-94) <sup>6)</sup>	30.7%	25.8%	41.2%

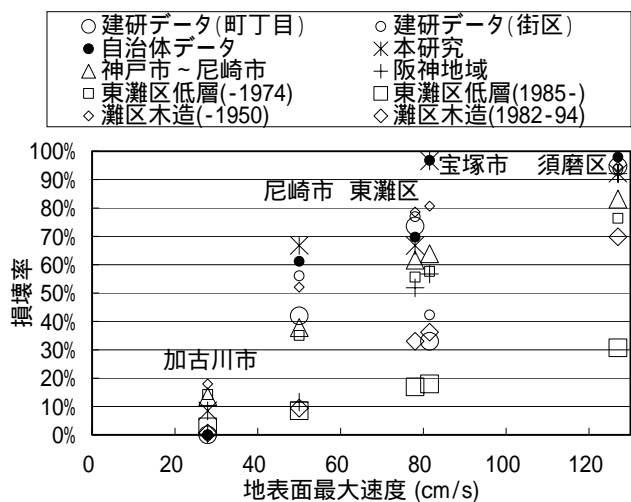


図5 損壊率の推定結果

5つの地区の被害推定結果について、実被害との2乗平均平方根誤差を求めたものを表8に示す。また、地表面最大速度を横軸にとり損壊率を表したグラフを図5に示す。本研究による被害推定結果と実被害との一致の度合いをみると、とくに自治体データとのよい対応が確認できる(2乗平均平方根誤差5.4%)。

比較に用いた経験的被害関数では、対数正規分布関数等、地表面最大速度にしたがい連続的に変化する曲線を用いており、被害率の推定値は単調増加の関数の形に拘束される。なお、既往研究2), 6)の推定結果については、対象地区に存在した建物の建築年分布が不明なため、建築年区分の最も古い被害関数の値と最も新しいものの値の範囲内に推定値が存在するものとみなせる。本研究の被害関数では建物の周期特性を反映しているため、前述の単調増加の関係に拘束されず実被害により近い値を推定しているものと考えられる。

以上の考察を踏まえ、本研究で提案する被害関数は、全く被害統計データを用いていないにも関わらず、自治体の調査結果の実被害と比較的良好な対応を持った結果が得られているといえよう。なお、加古川市については、やや過大な推定結果となっていると思われるが、図4からこれは非常に評点の低い診断データに影響されたためと考えられる。伝統的な構法では壁量が少なくともラーメン構造により剛性が高くなる場合もあるため、密集診断法など実際の剛性を適切に評価できる診断法の結果を用いることで、推定精度をさらに高めることができると考えられる。

#### 4. おわりに

本論では、耐震診断データを活用し精度向上を目指した、新しい形の建物被害関数を提案し、1995年兵庫県南部地震を事例にその有効性について検証を行った。被害関数における地震動入力への扱いについては、加速度応答スペクトルを用いており、地震動入力と建物振動の周期的な関係を考慮することが可能である。

しかし、現段階では一部損壊以上の被害発生率の推定法の提案にとどまっており、今後、全壊率等、より大きな被害に対しても適応可能な手法に展開していく必要がある。また、本論で検証を行った事例はまだ少数であり、兵庫県内における各市区の建築年代構成比の地域性については考慮したものの、関東や山陰、山陽といった他の地域に対する有効性を示すには、さらにほかの被害地震についても同様の解析を行い検証する必要がある。

また、今後、直交壁や非耐力壁等による剛性割増係数 $\alpha_{DE}$ をはじめ、上下階の質量比や1次モード形等をより現実的な値に近づけるべく、継続して検討を行っていく予定である。

最後に、本研究の被害関数を用いるには、対象地域の耐震診断データが必須となる。提案した被害関数を防災情報システム等で汎用的に使用できるようにするため、1棟ごとの耐震診断データをモンテカルロ法的に用いる手法だけでなく、耐震診断データの確率密度関数を適切に離散化表示する方法についても構築する必要があると認識している。今後、関東・中部・関西といった地域区分での耐震診断評点の確率密度関数のデータベースを構築したいと考えている。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)、課題番号14380189）の助成による成果である。検証解析では、各自治体調査による建物被害データ、ならびに震災復興都市づくり特別委員会が調査し、建築研究所がデジタル化した建物被害データを用いた。耐震診断データは日本木造住宅耐震補強事業者協同組合より提供を受けた。また、地形分類の評価に関して、東京大学生産技術研究所の若松加寿江博士より助言をいただいた。記して謝意を表す。

#### 注

注1) 精密診断法では、地盤・基礎(A)、偏心(B×C)、水平抵抗力(D×E)、老朽度(F)の4つ評点の積により総合評点を求め、表9により耐震性を判定する。評点(A)は、地盤・基礎の種類から、被害の発生しやすさと建築基準法施行令（第46条および88条）における軟弱地盤での壁量割増の要求等より設定された表1のとおり与えられる。評点(B×C)は、屋根・2階の重量ならびに壁の倍率とその配置に基づき求めた偏心率から、建設省告示（第1792号、昭和55年）における偏心率に応じた必要保有水平耐力の割増係数 $F_e$ 等を参考に設定された曲線を用いて与えられる。評点(D×E)は、耐力壁、無開口壁の面材から壁倍率を考慮し計算される壁長と、屋根・2階の重量に応じた所要有効壁長の比から、垂壁・腰壁等によるラーメン的な効果を考慮した式で与えられる。評点(D×E)は建物の水平抵抗力を、建築基準法施行令で要求している最低限度の水平耐力に対する倍率で表したものに相当する。評点(F)は、構造耐力上主要な部分の経年的劣化や蟻害の度合いから、1, 0.9, 0.8の三段階で老朽度を評価する。なお、総合評点の算出では、平面の直交2方向で別々に(B×C)×(D×E)を求め、小さいほうの値を採用する。

注2) 密集診断法では、地盤が軟弱な場合の割増係数 $R_g$ （表2）と基礎形式係数 $R_b$ （表3）を文献9), 10), 12)を参考に設定しており、精密診断法の

表9 精密診断法の耐震判定

総合評点	判定
1.5以上～	安全である
1.0以上～1.5未満	一応安全である
0.7以上～1.0未満	やや危険である
0.7未満	倒壊または大破壊の危険がある

表10 密集診断法における地盤・基礎の評点相当値 $R_b/R_g$

基礎形式	地盤の分類		
	良い・普通	やや悪い	非常に悪い
鉄筋コンクリート造布基礎	1.00	0.83	0.67
無筋コンクリート造布基礎	1.00	0.71	0.50
足固めを使用した玉石基礎	1.00	0.71	0.50
ひび割れのあるコンクリート造布基礎	0.70	0.50	0.33
上記以外の基礎	0.60	0.42	0.33

地盤・基礎の評点(A)に相当する $R_b/R_g$ は表10に示すとおりとなる。

注3) この仮定の2層モデルの1次、2次固有周期をそれぞれ $T_1, T_2$ とすると、

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{10}{7}}\sqrt{\frac{M}{k_1}}, T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{2}{7}}\sqrt{\frac{M}{k_1}} \therefore T_2 = \frac{T_1}{\sqrt{5}}$$

ここで、 $k_1$ は第1層の剛性、 $M$ は上部構造の質量。これより、固有周期を表す式(6)の分子は、2層モデルに対しては $0.698\dots \times \sqrt{10/7} = 0.834\dots$ となる。

続いて、2層モデルとしたときの第1層（最下層）の応答について考察する。まず、このモデルにおける2次モードの影響を考える。最大応答の近似値を2乗和平方で求めると、

$$\sqrt{\beta_1 u_1^1 S_d(T_1)^2 + \beta_2 u_2^1 S_d(T_2)^2}$$

$$\sqrt{\beta_1 u_1^1 S_d(T_1)/\omega_1^2 + \beta_2 u_2^1 S_d(T_2)/\omega_2^2}$$

ここで、 $\beta_i, u_i^1, S_d, \omega_i$ は、それぞれ $i$ 次の刺激関数の第1層の成分、変位応答スペクトル、加速度応答スペクトル、 $i$ 次の円固有振動数である。加速度応答スペクトルの2乗に係る係数の比を求めると、

$$\frac{(\beta_2 u_2^1 / \omega_2^2)^2}{(\beta_1 u_1^1 / \omega_1^2)^2} = \left(\frac{3M}{28k_1}\right)^2 \left/\left(\frac{25M}{28k_1}\right)^2 = \frac{9}{625} = 0.0144\right.$$

となる。よって、2次モードの影響は比較的小さいといえる。そこで、2次の加速度応答スペクトルの項を無視すると、第1層の層せん断力係数は、

$$k_1 \sqrt{\beta_1 u_1^1 S_d(T_1)^2 + \beta_2 u_2^1 S_d(T_2)^2} / Mg$$

$$\frac{k_1}{Mg} \sqrt{\beta_1 u_1^1 S_d(T_1)/\omega_1^2} = \frac{k_1}{Mg} \beta_1 u_1^1 S_d(T_1)/\omega_1^2$$

$$= \frac{k_1}{Mg} \frac{25M}{28k_1} S_d(T_1) = \frac{25}{28} \frac{S_d(T_1)}{g}$$

となる。以上から、このモデルの場合、第2層の剛性の影響は、式(5)、式(8)の右辺に係数 $25/28 = 0.8928\dots$ を乗じることで概ね近似できる。

注4) 住民が耐震診断を受けるかどうかは、耐震性に不安を感じているか、改修に前向きかといった、認識するリスク、許容できるリスクに基づくものと考えられる。著者らの研究グループが東京都世田谷区・墨田区の住民にアンケート調査を行った結果<sup>4)</sup>では、世田谷区では大地震時の被害予想（認識リスク）と簡易診断法の結果（客観リスク）とで正の相関が見られたのに対し、墨田区では危険な建物に住んでいる人ほど安全と認識する逆の傾向があった。また、老朽住宅に住む高齢者などで、耐震性が低い建物に危険を受け入れて居住している例も存在し、必ずしも耐震性が低い建物の居住者が診断を受けるとはいえない。

注5) 著者らが木耐協の診断データを分析した結果<sup>7)</sup>では、東北・関東・関西等の地区で集計し、平成10年住宅・土地統計データと比較したところ、老朽化や改正前基準法の影響から耐震性の低さが懸念される1944年以

前, 1945 ~ 1970 年の建物が若干少ない傾向があった(構成比差は大きいもので 9.2%)。また, 延べ面積については, 30 m<sup>2</sup>未満, 30 ~ 50 m<sup>2</sup>未満, 50 ~ 70 m<sup>2</sup>未満で少なかった(構成比差は大きいもので 12.6%)。関東地区について耐震性との関連を調べると, 建築年 1980 年以前, 延べ面積 50 m<sup>2</sup>未満の建物の耐震性が著しく低い傾向が認められた。また, 木耐協の診断データと, 姫路市の耐震診断助成制度で行われた簡易診断法の結果を比較し, 分布が概ね一致することを確認している(姫路市の助成対象は建築年 1981 年 5 月 31 日以前であり, 姫路市における伝統構法は戦後廃れていったことから, 建築年 1945 年 ~ 1980 年のデータで比較)。

注6) ランダムサンプリングデータを模擬するための重み係数として, 延べ床面積と建築年について検討を行った。902 棟の耐震診断データにおいて, 建築年は  $I_{ABCF}$  ならびに  $I_{DE}$  とのごくわずかな相関が見られた(決定係数  $r^2$  はそれぞれ 0.046, 0.070)。一方, 延べ床面積はこれに比べて相関が低く( $r^2$  はそれぞれ 0.011, 0.002), 今回の検証解析では建築年の構成比に拠った。

#### 参考文献

- 1) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 渡辺宏一: 兵庫県南部地震の建物被害に基づく地震動強さの評価, 第 1 回都市直下地震災害総合シンポジウム講演集, pp. 89-92, 1996.11
- 2) 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, 第 502 号, pp.53-59, 1998.3
- 3) 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
- 4) 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集, 第 527 号, pp.189-196, 2000.1
- 5) 山口直也, 山崎文雄: 西宮市の被災度調査結果に基づく建物被害関数の構築, 地域安全学会論文集, No.2, pp.129-138, 2000.11
- 6) 村尾修, 山崎文雄: 震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した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集, 第 555 号, pp.185-192, 2002.5
- 7) 小嶋山雅之, 山崎文雄: 全国の耐震診断結果に基づく木造建物耐震性能指標の地域性分析, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp. 2097-2102, 2002.11
- 8) 梅村幸一郎, 山崎文雄: 横浜市の耐震診断結果に基づく木造住宅被害関数の構築, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp. 109-116, 2002.6
- 9) 建設省住宅局監修, (財)日本建築防災協会・(社)日本建築士会連合会編集: わが家の耐震診断と補強方法, 1985.11
- 10) 建設省住宅局監修, (財)日本建築防災協会・(社)日本建築士会連合会編集: 木造住宅の耐震精密診断と補強方法, 1985.11
- 11) 坂本功: 木造住宅の耐震診断基準, 建築防災, No. 208, pp. 8-18, 1995.5
- 12) 石川県木造住宅耐震診断・改修指針マニュアル検討委員会: 木造住宅の耐震診断・改修指針とその解説(石川県内の伝統構法による在来木造住宅を中心に), (財)石川県建築住宅総合センター, 1997.1
- 13) 静岡県耐震診断補強相談実務マニュアル作成委員会: 静岡県耐震診断補強相談マニュアル(相談士編), 静岡県都市住宅部建築住宅総室, 2001.10
- 14) (社)静岡県建築士事務所協会: 伝統構法住宅の耐震診断, (社)静岡県建築士事務所協会, 2002.
- 15) 建設省住宅局市街地住宅整備室監修: 密集市街地における防災街区の整備の促進に関する法律における既存木造建築物の耐震診断基準の解説, (財)日本建築防災協会, 1998.1
- 16) 岡田恒: 密集市街地整備法に関わる既存木造建築物の耐震診断基準, 建築防災, No. 243, pp. 25-30, 1998.4
- 17) 国土交通省住宅局, 密集住宅地における耐震改修の推進に向けて - 丈夫な家は街を救う -, 2001.8
- 18) 表俊一郎, 橋本秀衛: 在来工法木造家屋の耐震性能に関する実態調査とこれに基づく被害予測研究, 第 17 回自然災害科学総合シンポジウム, pp. 665-668, 1980.10
- 19) 柴田明徳: 都市地域における建築群の震害確率の予測に関する考察, 第 6 回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 521-528, 1982.12

- 20) 柴田明徳, 赤松正教: 都市における木造建築物群の震害度予測, 東北大学建築学報, 第 27 号, pp. 91-101, 1988.3
- 21) 北原昭男, 藤原梯三: 都市における建築物の地震被害推定に関する基礎的研究(1) - 木造構造物の地震応答推定 -, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号 B-1, pp.1-22, 1988.4
- 22) 損害保険料率算定会: 木造住宅の損壊被害率に関する研究 その 1, 地震保険調査研究 13, 1985.1
- 23) 損害保険料率算定会: 木造住宅の損壊被害率に関する研究 その 2, 地震保険調査研究 22, 1988.1
- 24) 槌本敬大, 安藤直人, 有馬孝禮, 中島史郎, 岡崎泰男, 中村昇: 木造住宅の倒壊モードの解明と耐震性能評価法の確立, 住宅総合研究財団研究年報, No. 25, pp. 259-270, 1998.
- 25) 内閣府: 災害に係る住家の被害認定基準運用指針, 2001.6
- 26) 被災建築物応急危険度判定研究会: 被災建築物応急危険度判定マニュアル, (財)日本建築防災協会, 1998.1
- 27) 大橋好光: 3 被害調査結果 3.1.2 東灘区森南町, 平成 7 年阪神・淡路大震災木造住宅棟震災調査報告書, 木造住宅棟震災調査委員会, (財)日本住宅・木材技術センター発行, pp. 19-34, 1995.10
- 28) 後藤正美, 鈴木有, 浦憲親: 一方向水平加力実験による実在木造建物の耐震性能の検討, 日本建築学会構造系論文集, No. 506, pp. 147-154, 1998.4
- 29) 坂本功, 大橋好光: 木造住宅の地震応答解析 - 標準的な在来構法住宅のモデルに関して -, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造系, pp. 2651-2652, 1984.10
- 30) 鈴木祥之, 清水秀丸, 須田達, 北原昭男: 実大振動実験による軸組構法 2 階建木造住宅の動特性と耐震性能 - 筋かい付及び土壁付木造軸組の振動台実験 -, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp. 1377-1382, 2002.11
- 31) 有馬孝禮: ボード類を釘打ちした耐力壁の倍率の認定と最近の在来木造住宅の構造特性, 木材工業, Vol. 37, No. 5, pp. 213-220, 1982.5
- 32) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会特定研究課題 1-SWG1・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, 1996.1
- 33) 中村豊, 上半文昭, 井上英司: 1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II), JR 地震情報 No. 23d, 1996.1
- 34) Kagawa, T., Irikura, K. and Yokoi, I.: Restoring clipped records of near-field strong ground motion during the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 18, No. 1, pp. 43-57, 1996.
- 35) 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, 1995.3
- 36) 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, 1996.3
- 37) 小嶋山雅之, 水越薫, 石田寛, 鳥澤一晃: 1995 年兵庫県南部地震の建物被害データに基づく被害率集計単位に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 522 号, pp. 137-142, 1999.8
- 38) 兵庫県: 土地分類基本調査 須磨・明石・洲本 5 万分の 1, 地形分類図・表層地質図, 1983.3
- 39) 兵庫県: 土地分類基本調査 大阪西北部 5 万分の 1, 地形分類図・表層地質図, 1998.3
- 40) (財)統計情報研究開発センター: 平成 5 年住宅統計調査(都道府県編)統計データファイル, 28 兵庫県, CD-ROM, 1996.
- 41) 住宅金融公庫: 公庫融資を利用した一戸建住宅の建築的事項に関する調査(過去分), <http://www.jyukou.go.jp/chisiki/chosa/maindata.html>, 2002.4
- 42) 綿引誠, 大橋好光, 高増幹弥, 中野一郎, 石山央樹, 佐藤栄児: 実大実験に基づく木造軸組構法住宅の耐震性に関する研究<その 3 各部の応答挙動と筋かいの負担力>, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), Vol. C-1, pp. 173-174, 2000.9
- 43) 小山田剛, 山田明, 鈴木三四郎, 浅野幸一郎: 軸組木造住宅の地震応答解析 その 3 実在する 2 階建て住宅の壁率による水平剛性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), Vol. C-1, pp. 209-210, 2001.9
- 44) 加藤孝明, 小宮充豊, 亀野弘昭, 佐伯琢磨, 村尾修, 山崎文雄, 小嶋山雅之: 墨田地区と世田谷地区を対象とした居住者の地震リスク認識の地域特性の理解, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集 pp. 2423-2428, 2002.11

(2003 年 1 月 9 日原稿受理, 2003 年 5 月 27 日採用決定)