

# 耐震診断データと加速度応答スペクトルに基づく 木造建物の被害関数

Vulnerability Function of Wooden Houses Based on Seismic Performance Indices and Acceleration Response Spectrum

小檜山 雅之\*・山崎 文雄\*

Masayuki KOHIYAMA and Fumio YAMAZAKI

## 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>5)</sup></sup>の多くは、被害統計に基づき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付けられる経験的被害関数を構築している。しかし、著者らの研究グループ<sup>6),<sup>7)</sup></sup>は、木造建物の耐震性能分布は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おり、経験的被害関数を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、何らかの工夫を要するといえる。

一方、耐震診断や耐震改修への助成制度は全国の多く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>3)</sup>の被害関数を、耐震診断の総合評点分布を用い横浜市へ応用する手法を提案している。しかし、横浜市と東灘区の総合評点分布を同一と仮定しており、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

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耐震診断法が挙げられる。この耐震診断法は昭和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>」、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、この診断法を精密法と略す)が出版され、現在広く実施されている<sup>11)</sup>。精密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。

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>12),<sup>13)</sup></sup>で既に行われている。提案される手法は、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、変形角について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。

著者らの研究<sup>7)</sup>では、とくに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。よって、本研究では全ての評点を考慮し被害関

\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

数を構築する。また、前記のような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。そこで被害レベルについては、一部損壊以上の被害率を評価する目的で、被害が発生しはじめる層間変形角 1/120 のみに着目する。大きな層間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、層間変形角 1/120 までの領域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。減衰については議論の余地があるが、層間変形角 1/120 前後の値として仮に 10% を設定し、ケーススタディを行う。

建物の耐力と地震力によって生じる水平力の比  $Qr/Qd$  が 1 を下回るとき、相関変形角が 1/120 を上回り、弾性限界を超え一部損壊以上の被害が発生するものと考えられる。

$$\frac{Qr}{Qd} = (Rb) \cdot \left(\frac{1}{Fes}\right) \cdot \left\{\frac{2}{3}\left(\frac{C}{C'}\right)\right\} \cdot (Rd) \cdot \frac{Co \cdot g}{Z \cdot Rt \cdot Ai \cdot Co \cdot g} \\ = I_A \cdot I_{BC} \cdot I_{DE} \cdot I_F \cdot (Co \cdot g) / Sa \quad (1)$$

ここで、 $Qr$ ：建物の耐力、 $Qd$ ：地震力によって生じる水平力、 $Rb$ ：基礎形式係数、 $Fes$ ：形状係数、 $C$ ：層せん断力係数で表示した建物耐力、 $C'$ ：層せん断力係数で表示した、基準法で規定される所要壁量分の水平抵抗力、 $Rd$ ：劣化度係数、 $Co$ ：標準せん断力係数 (0.2)、 $Z$ ：地震地域係数、 $Rt$ ：振動特性係数、 $Ai$ ： $i$ 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、 $I_A$ ：基礎・地盤の評点 (A)、 $I_{BC}$ ：偏心の評点 (B × C)、 $I_{DE}$ ：水平抵抗力の評点 (D × E)、 $I_F$ ：老朽度の評点 (F)、 $Sa$ ：加速度応答スペクトル。

加速度応答は建物の固有周期に依存する。平均的な階高  $h = 290$  (cm) を仮定した平屋建物の場合、固有周期  $T$  (s) は

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{I_{DE} S_t'}} = 2\pi \sqrt{\frac{h / 120 \cdot M}{I_{DE} Qd}} \\ = 2\pi \sqrt{\frac{h / 120 \cdot M}{I_{DE} Z \cdot Rt \cdot Ai \cdot Co \cdot M \cdot g}} = \frac{0.698}{\sqrt{I_{DE}}} \quad (2)$$

となる。ここで、 $M$ ：上部構造の質量、 $S_t'$ ：基準法で規定される水平剛性。なお、2階建ての場合、平均的な上下層の質量比 3:4、1次固有振動形が直線となることを仮定すると、式 (2) の分子は 0.834 となる。

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以上の発生確率は次のような被害関数として表すことができる。

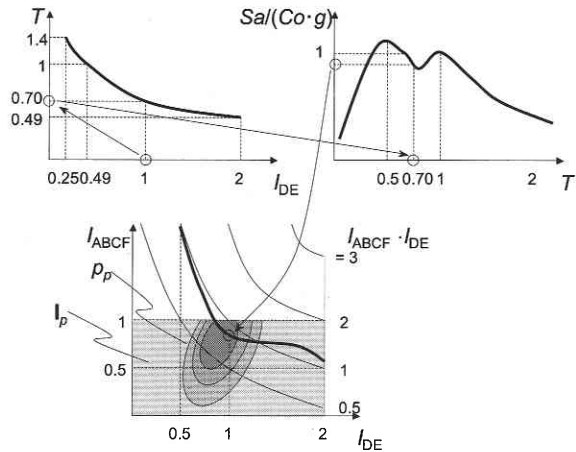


図1 一部損壊以上率の算出手順

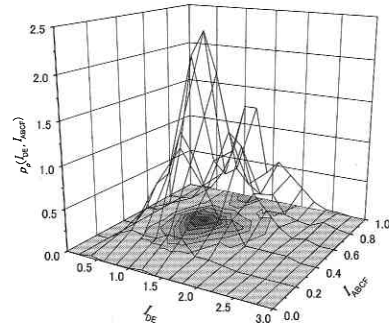


図2 兵庫県 の確率密度関数  $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$  (2階建て建物)

$$P_{fp} = \int_{I_p} p_p(I_{DE}, I_{ABCF}) d\mathbf{I} \quad (3)$$

ここで、 $I_p = \{(I_{DE}, I_{ABCF}) \mid I_{ABCF} \cdot I_{DE} < Sa'(I_{DE}) / (Co \cdot g)\}$ 、 $Sa'(I_{DE})$ ： $I_{DE}$  の関数として再定義した  $Sa$

図1に平屋建物の一部損壊以上率の算出手順を示す。まず、加速度応答スペクトルの固有周期  $T$  を式 (2) 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 (3) 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。

確率密度関数  $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$  は、多くの建物の耐震診断の結果から度数分布を求め、推定することが可能である。ケーススタディで用いた兵庫県の集計データから  $p_p(I_{DE}, I_{ABCF})$  を評価した例を図2に示す。

研 究 速 報

3. 1995年兵庫県南部地震によるケーススタディ

提案する被害関数の妥当性を検討するため、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、近傍あるいは地区内で鉄道総合技術研究所または関西地震観測研究協議会により地震が観測<sup>14)</sup>された、加古川市、神戸市長田区、東灘区、尼崎市、宝塚市内の5地区である。

地震発生時の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が2000年7月から2002年1月までの期間に診断した結果を用い、対象地区の近隣市区を集計したデータと兵庫県全体で集計したデータの2ケースで検討を行った。簡単のため2階建て建物のデータのみを用いた。

ここで、診断評点の確率密度関数の評価は直接は行わず、診断データ1棟ごとに被害の有無を判定し、被害有無の棟数比により被害率を算出した。すなわち、各地区の確率密度関数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耐震診断データを集計したものと同値であると仮定することに相当する。例として、東灘区の対象地区の評価を図3に示す。加速度応答スペクトルの減衰定数は10%とし、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一部損壊以上率の算定に用いた。近隣市区の耐震診断データ94棟のうち太線の下側に存在する64棟が一部損壊以上と判定され、一部損壊以上率68.1%が得られる。

実際の被害統計として震災復興都市づくり特別委員会調査結果を建築研究所<sup>15)</sup>がデータ化したものを用いた。地震観測点から半径約100mの範囲で、土地分類基本調査図で観測点と同一地盤条件の町丁目について、低層戸建て住宅に関するデータを集計した。加古川市については被害統計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半壊13棟であり、一部損壊以上率は0%に近いと考えられる。

表1に各地区の最大速度(東灘区・尼崎市は振切れ補正波形<sup>16)</sup>を使用)、被害統計の集計結果、表2に近隣市区の耐震診断データの集計棟数と、本研究の被害関数と文献1)、2)、5)の一部損壊以上率の推定結果を示す。また、一部損壊以上率をグラフ上に示したものを図4に示す。

被害推定結果を考察すると、耐震診断データを近隣市区と兵庫県で集計した場合の一部損壊以上率の違いは尼崎の17.3%以外は6%以下と差が小さい。尼崎市は診断データ棟数が少ないことが推定結果に影響している可能性が考えられる。

実被害との誤差を比較すると、宝塚市はとくに乖離が激

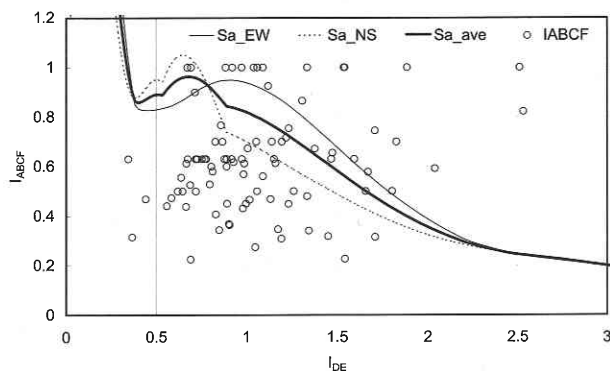


図3 東灘区地区における一部損壊率の被害判定

表1 各地区の最大速度と被害統計の集計結果

対象地区の市区	加古川市	長田区	東灘区	尼崎市	宝塚市
地震観測点整理番号 <sup>14)</sup>	108	101	210	212	103
最大速度 (cm/s)	28	127	78	50	82
全棟数*	-	218	210	403	225
全壊又は大破	-	134	39	7	21
中程度の損傷	-	62	22	45	23
軽微な損傷	-	9	66	130	38
外観上の被害なし	-	13	83	221	143
一部損壊以上率	0.0%	94.0%	60.5%	45.2%	36.4%

\*: 被害未調査, 火災被害除く

表2 各地区の耐震診断データ集計棟数と被害推定結果

対象地区の市区	加古川市	長田区	東灘区	尼崎市	宝塚市
耐震診断データ集計市区	加古川市 明石市	兵庫県 長田区 須磨区	芦屋市 東灘区 灘区	尼崎市	宝塚市 伊丹市
耐震診断データ棟数	76	87	94	61	95
本研究市区集計データ	3.9%	81.6%	68.1%	68.9%	68.4%
本研究兵庫県集計データ	3.0%	78.0%	62.4%	51.5%	71.2%
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%
灘区木造(-1950) <sup>*3</sup>	18.0%	94.5%	78.6%	52.1%	80.6%
灘区木造(1982-94) <sup>*3</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: 村尾・山崎(2002)<sup>5)</sup>

しく30%以上の誤差がある。しかし、既往の被害関数でも過大に評価する傾向があり、これは地震観測点を含む町丁目の東西幅が600mあり、観測点から離れた領域を含むため、集計した被害率と地震動との対応がよくないためと考えられる。実被害との誤差を平均すると市区集計、県集計データのそれぞれで11.0%と6.0%となっている。

また、既往研究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、被害関数の建築年区

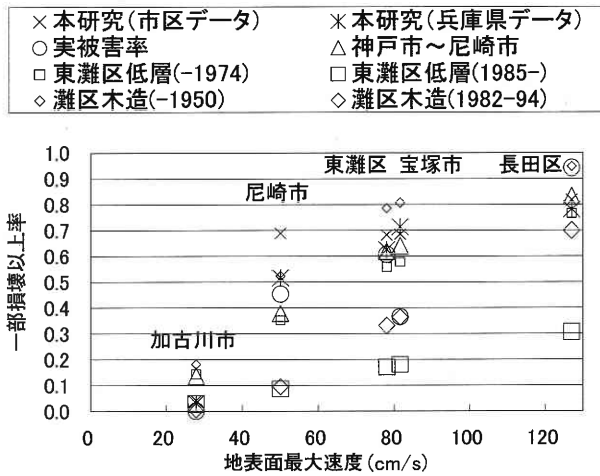


図 4 一部損壊以上率の推定結果

分の最も古いものと最も新しいものの範囲内に推定値が存在するものとみなせる。とくに地表面最大速度の小さい加古川市で、本研究の被害関数のほうが実被害に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、地震発生時の耐震診断データを用いていないにも関わらず、比較的良好な推定結果が得られているといえよう。

#### 4. お わ り に

本報では、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た。被害関数における地震動入力への扱いについては、一部損壊以上率の評価に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率の推定法の提案にとどまっており、今後、全壊率等、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。現在、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、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の構築を行っている。

#### 謝 辞

本研究で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。記して謝意を表す。

(2002年9月2日受理)

#### 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被害予測—その2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と被害予測例—, 日本建築学会構造系論文集, 第502号, pp. 53-59, 1998. 3.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 石原祐紀, 小檜山雅之, 山崎文雄: 耐震診断結果に基づく木造建物耐震性能の地域性分析, 第1回日本地震工学研究発表・討論会梗概集, p. 87, 2001. 12.
- 7) 小檜山雅之, 山崎文雄: 耐震診断結果に基づく木造住宅耐震評点の地域性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), Vol. B-2, pp. 31-32, 2002. 8.
- 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, No. 556, 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, pp. 8-18, 1995. 5.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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-SWG 1・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.
- 15) 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.
- 16) 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.