

横浜市における木造住宅の耐震診断結果に基づく被害関数

Fragility Curves for Wood-Frame Buildings Based on Seismic Capacity Evaluation in Yokohama City

山崎文雄*・梅村幸一郎**

Fumio YAMAZAKI and Koichiro UMEMURA

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では多数の木造住宅が倒壊し、それによって約5千人の人名が失われた。木造住宅は、軸組構法（在来構法）、ツーバイフォー構法、プレファブ構法に大別できるが、兵庫県南部地震で倒壊などの大被害を受けた木造建物は軸組構法にほぼ限定される。したがって、木造建物の地震被害軽減のためには、とくに建築年の古い軸組構法建物について耐震診断¹⁾を行い、耐震性が低いと判断されれば、改築するか耐震補強を行うことが必要である。兵庫県南部地震以降、地方自治体でも木造住宅の耐震診断制度が作られたところが多くあり、中でも横浜市では平成7年度以降、1980年以前に建築された在来構法木造住宅に対する耐震診断士派遣制度を設け、これまでに7千棟を越える耐震診断が実施されている。

本研究では林ら²⁾がRC造建物について行ったものと同様の手法を用いて、横浜市が実施した木造軸組構法住宅に対する耐震診断結果と、神戸市灘区の建物に対する経験的被害関数³⁾とを結びつけて、個々の木造住宅の耐震性能を考慮した被害関数を構築する。この被害関数により、建築年と構造が同じ木造住宅であっても耐震性能の違いを表すことができ、個別の建物特性を考慮した地域の被害想定やリスク評価に利用できるものと期待される。

2. 木造建物の耐震診断と耐震性能指標

木造建物の耐震診断方法としては、1979年に建築防災協会が「我が家の耐震診断と補強方法」を作成しており、これに併せて、一般向けの「地震にそなえてマイホームの耐震知識」と、建築技術者用の「木造住宅の耐震精密診断」が作られた。これらは、1981年の新耐震設計法の施行や1983年の日本海中部地震のあと、1985年に現行の

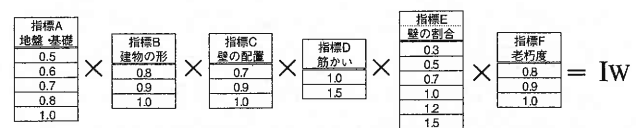


図1 各指標の評点と木造耐震性能指標 (I_w 値) の算出方法

ものに改定された。本研究において用いた木造耐震性能指標 (I_w 値) は、上記の「我が家の耐震診断と補強方法」⁴⁾に掲載されている方法で算出する。このなかで最終的に算出されるのは、木造住宅の耐震性能に関する「総合評点」であるが、適当な名称が付けられていないため、本研究では木造耐震性能指標 (I_w 値) と名付けた。この耐震診断の対象は、木造在来軸組構法の建物であり、ツーバイフォー構法やプレファブ構法の建物は対象とされていない。

I_w 値は、指標 A (地盤・基礎)、指標 B (建物の形)、指標 C (壁の配置)、指標 D (筋かい)、指標 E (壁の割合)、指標 F (老朽度) の6項目ごとに付けられる評点の掛け算により求められ、 I_w 値は最低点 0.0672 から最高点 2.25 までの評点が付けられる。図1に I_w 値の各指標の評点と算出方法を示す。算定された I_w 値が 1.5 以上なら「安全」、1.0 以上 1.5 未満なら「一応安全」、0.7 以上 1.0 未満なら「やや危険」、0.7 未満なら「倒壊または大破の危険がある」と耐震性能が判定される。

3. 横浜市の耐震診断結果

横浜市は総住宅数 137 万戸、一戸建は全住宅の 38.4%、木造住宅 (防火木造 + 木造) は全住宅の 52.1%、昭和 55 年以前に建築された住宅は一戸建住宅の 53.0% を占めている。同市は地震に強い都市づくりの一環として、木造住宅の耐震診断と耐震補強を促進するために、「耐震診断士派遣制度」「耐震改修補助」「耐震改良融資」を行っている⁵⁾。

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

**国土交通省

研究速報

「耐震診断士派遣制度」は平成7年度より行われており、「我が家の耐震診断と補強方法」による耐震診断方法を用いて、建築してから一定の期間を過ぎた木造住宅の耐震診断を市が無料で行うものである。対象は、1980年以前に建築された、2階建以下、延べ面積200m²以下の在来軸組構法の個人住宅である。

以上の制度により、横浜市は2001年3月現在およそ7300棟の木造住宅の耐震診断結果を保有しており、このデータを、耐震診断を横浜市より委託されている横浜市建築事務所協会に赴き、データベースに入力した。今回は、全7366棟のデータ中、鶴見区、西区、中区、港南区、青葉区の5区において平成7年度から平成11年度に診断された2046棟のデータを入力し、これらのデータに基づいて解析を行っている。入力したのは、建物所在地(郵便番号7桁)、建築確認年月日、宅地造成年月日、階層、用途、1階床面積、2階床面積、地階床面積、延床面積、建築面積、増改築の回数、指標A(評点)、指標B(評点)、指標C(評点)、指標D(評点)、指標E(評点)、指標F(評点)、総合評点(Iw値)の18項目である。

4. 耐震性能を考慮した建物被害関数の構築手法

木造耐震性能指標ごとの建物被害関数の構築手順を図2に示す。まず、既知のものとして、Iw値の相対頻度分布と、最大地動速度(PGV)と被害率の関係を表す建物被害関数P_fが存在し、未知のものとしてIw値別の建物被害関数P_{iw}がある。そして建物被害関数P_fは、Iw値別の建物被害関数P_{iw}とIw値の頻度分布の積を加算したものであると考えられる。そこで、Iw値別の建物被害関数P_{iw}とIw値の頻度分布より合成した建物被害関数P_fが既知のP_fに一致するように、未知であるP_{iw}を仮定し求めるというのが、今回用いた手法の流れである。

まず、既知の建物被害関数P_fとしては、村尾・山崎³⁾

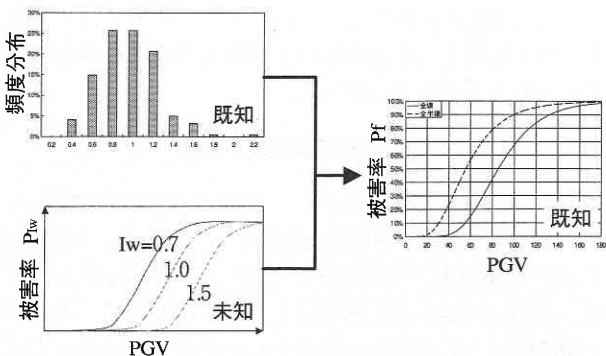


図2 木造建物の耐震性能指標ごとの被害関数の構築手順

が兵庫県南部地震での神戸市灘区を対象に、山口・山崎⁶⁾の推定地震動分布と神戸市による被災判定結果から求めたP_fを用いている。このP_fは灘区において町丁目単位で推定された最大地動速度と木造建物の被害率を表す関数であり、式(1)のように表される。

$$P_f(V) = \Phi((\ln V - \lambda_f) / \xi_f) \dots\dots\dots (1)$$

ここでP_fは被害率、Φ(・)は標準正規累積確率分布、Vは最大地動速度、λ_fはln Vの平均値、ξ_fはln Vの標準偏差である。

本研究では、横浜市から得られたIw値が1980年以前に建てられた建物のものであり、十分なデータ数があるのは1962以降1971年以前と1972年以降1981年以前の2区分であるため、灘区の建物被害関数の該当する年代の、木造の全壊・全半壊を表したものをを用いた。

次に、木造建物の個々の耐震性能を表す尺度として、横浜市が耐震診断を行った結果算出された木造耐震性能指標(Iw値)を用いる。図3には横浜市のIw値の累積分布を示すが、建物被害関数構築の際には各Iw値の頻度分布を用いる。この横浜市のIw値データを使う際には、兵庫県南部地震が発生した当時の神戸市灘区におけるIw値の分布と横浜市において耐震診断を受けた建物のIw値分布が等しいという仮定を設けた。この仮定は、横浜市で耐震診断を受けた建物が兵庫県南部地震の時点での灘区の建物に比べ、同じ年代区分において耐震性能が異なる場合に問題が生じる。しかし、兵庫県南部地震当時の阪神地域の木造住宅のIw値に関するデータがなく、また阪神地域においてその後同様の手法で耐震診断を多数行った事例が見あたらなかったため、この仮定を採用した。

このIw値の相対頻度分布をr(Iw)と表し、Iw値別の建物被害関数P_{iw}が式(2)で表されるとする。

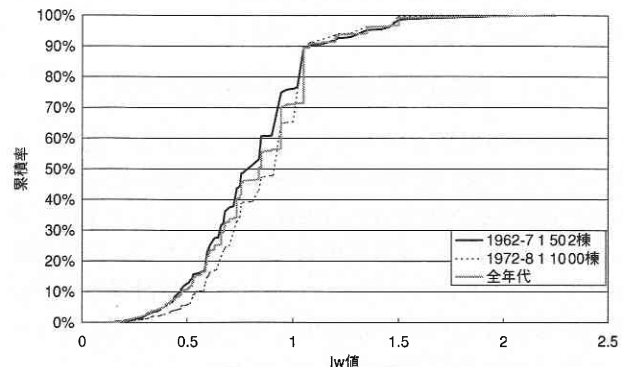


図3 横浜市による耐震診断結果のIw値累積分布

$$P_{Iw}(V) = \Phi((\ln V - \lambda_{Iw}) / \xi_{Iw}) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 P_{Iw} は各 Iw 値における建物被害関数であり、 λ_{Iw} 、 ξ_{Iw} はそれぞれ各 Iw 値における $\ln V$ の平均値と標準偏差である。 ξ_{Iw} は Iw 値によらず一定とし、 λ_{Iw} は、 P_{Iw} がある被害程度（例えば全壊）において 50% となる最大地動速度は Iw 値に比例するとして、以下のように表した²⁾。

$$\lambda_{Iw} = \ln(V_0 \cdot (Iw / Iw_0)) \dots\dots\dots (3)$$

$$\xi_{Iw} = \xi_{Iw0} \dots\dots\dots (4)$$

この基準となる Iw_0 は Iw 値の平均値を用いることとした。よってパラメータは、基準となる最大地動速度 V_0 と ξ_{Iw0} の 2 つとなる。また全体の建物被害関数 P_f は、 Iw 値ごとの被害関数を存在比率を重みとして加重平均することにより式 (5) のように表される。

$$P_f(V) = \sum_{Iw} r(Iw) \cdot P_{Iw}(V) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $r(Iw)$ は Iw 値の相対頻度、 P_{Iw} は式 (2) で表される Iw 値別の建物被害関数である。

以上の流れを整理すると、2 つのパラメータ V_0 と ξ_{Iw0} を与えることで、式 (3)、(4) より各 Iw 値における λ_{Iw} と ξ_{Iw} が決まり、式 (2) から各 Iw 値に対応した P_{Iw} が求まる。この P_{Iw} と Iw 値の相対頻度 $r(Iw)$ を式 (5) に代入すると P_f が求まる。この合成した P_f が目的とする式 (1) の P_f に最も近似するように V_0 と ξ_{Iw0} を決定する。この過程は、繰り返し計算になるが、図 4 に示すように、最初に仮定した V_0 と ξ_{Iw0} に対して、合成した P_f を破線のように求め、被害率 50% の点をコントロールポイントとしてこの点が目的関数と一致するように V_0 を修正する。ここで V_0 と ξ_{Iw0} の初期値は、式 (1) で表される目的とする被害関数 P_f のパラ

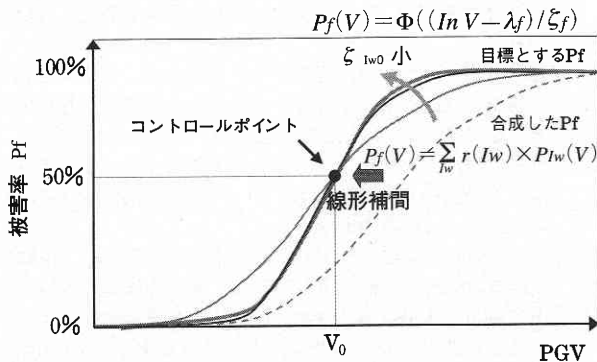


図 4 本手法における目標とする P_f へのフィッティング

メータより、それぞれ $\exp(\lambda_f)$ および ξ_f と置いた。次に目的関数と、合成した P_f の線がコントロールポイント周辺でほぼ同じ勾配となるように ξ_{Iw0} を更新する。このような流れによって、2 つのパラメータは決定できる。

5. 木造耐震性能指標ごとの被害関数

前述の手法を用いることで、 Iw 値ごとの木造建物の被害関数を構築することができる。ここで指標 A は基礎・地盤に関するものであるから、 Iw 値は地盤の影響を含んだものとなっている。ここで地盤の影響の意味付けとしては、1) 地盤も基礎も建物の一部であり、悪い地盤上の建物は強度が低いと考えるもの、2) 地盤が悪いと地震動が増幅するので、この影響を建物強度を下げることで考慮したもの、の 2 つの立場が考えられる。後者の立場に立つ場合には、被害想定のように地震動を別途推定するとすれば、地盤の影響を取り除くことが望ましい。しかし指標 A は、表 1 に示すように、基礎と地盤から 1 つの値を求めるものであるため、基礎と地盤の評点を別々に評価することは困難である。そのため今回は、地盤による影響を含んだ Iw 値、つまりもとのままの Iw 値を用いた場合について、木造建物の被害関数を構築した。地盤の影響を取り除いた場合については別途報告する。

灘区の建築年代 1962-1971 の木造建物に対する被害関数を目的関数として、合成した被害関数との比較を図 5 に示す。これより合成した被害関数が、目標とする被害関数をよく再現できていることがわかる。ただ、合成した Pf は対数正規分布の足し合わせであるため対数正規分布にはな

表 1 指標 A (基礎・地盤) の評点の求め方

基礎	地盤	良い	普通	やや悪い	非常に悪い
鉄筋コンクリー葎布基礎		1.0	0.8	0.7	0.5
無筋コンクリー葎布基礎		1.0	0.7		
ひびわれのあるコンクリー葎布基礎		0.7			
その他の基礎 (瓦、石積、ブロック積)		0.6			
				診断適用外	

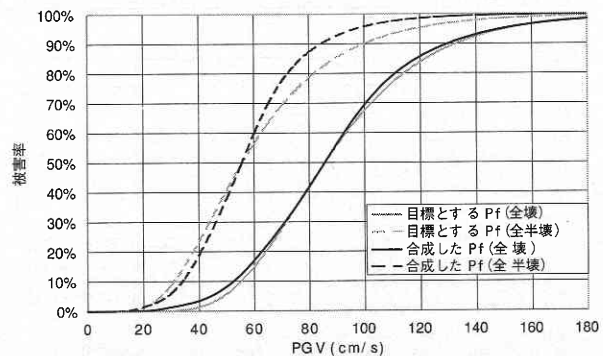


図 5 目標とする建物被害関数 P_f と Iw 値の分布より合成した建物被害関数 P_f の比較 (建築年 1962-1971)

研究速報

らず、目標とする P_f に完全には一致しない。これらの設定したパラメータを表2に示す。

表2に示すパラメータより構築した I_w 値別の建物被害関数 P_{I_w} を、 $I_w = 0.5, 1.0$ に対するものを例として、全壊率について図6に示す。この図から、 I_w 値が異なることにより同じ建築年代の木造建物でも、耐震性が異なることが反映されている様子が分かる。しかし、建築年 1962-1971 年のデータから求めた被害関数 P_{I_w} と建築年 1972-1981 年のデータから求めた被害関数 P_{I_w} は、 I_w 値が耐震性能を代表する指標とすれば本来等しくなるはずだが、ここでは古い年代の建物のデータより求めた P_{I_w} の被害率の方が大きくなっている。原因はいくつか考えられ、まず本研究においては I_w 値が木造住宅の耐力を表しているとしたが、 I_w 値が十分に耐力を反映したものではないということが考えられる。たとえば、 I_w 値は経年劣化を指標 F によって表しているが、この経年劣化を正しく評価できていないということが考えられる。これは図3に示す横浜市の耐震診断結果において、年代ごとの I_w 値の分布がそれほど大きくは変わらないことから推察できることである。一方、今回使用した目標とする P_f は兵庫県南部地震における被害に基づいて構築されており、この地震において灘区では、建築年の古いものほど被害が大きかった。この2つの事実の矛盾が、建物被害関数 P_{I_w} が異なるという結果として現れたものと考えられる。

ここで求めた I_w 値別の被害関数は、基礎・地盤の評定の与え方から考えて、その住宅がどのような地盤上に位置するにせよ、「良い・普通の地盤」に相当する推定地動最大速度を用いて被害を予測する場合に使用すべきものである。

表2 目標とする建物被害関数 P_f に適合するパラメータ

	全壊			全半壊		
	V_0	ζ_{Iw0}	$Iw0$	V_0	ζ_{Iw0}	$Iw0$
1962-71	88.3	0.12	0.823	57.2	0.12	0.823
1972-81	115.0	0.25	0.876	71.3	0.25	0.876

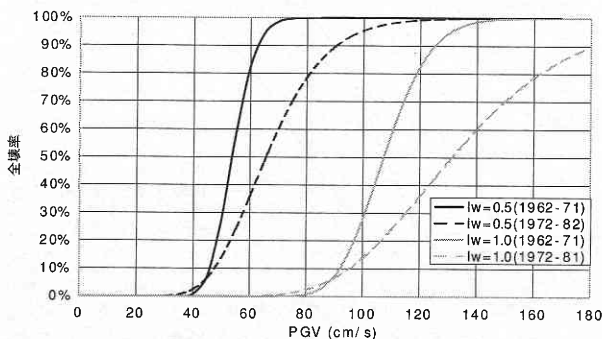


図6 構築した I_w 値別の全壊率に対する建物被害関数 P_{I_w}

る。すなわち、地盤の違いによる地震動の違いの影響を既に含んだ被害関数であるため、地震被害想定のように、地震動分布を別途推定する場合には、地盤の影響を二重に評価する恐れがあり注意を要する。

5. ま と め

本研究では、横浜市の実施した耐震診断による木造耐震性能指標 (I_w 値) を用いて、個々の木造建物の耐震性能を考慮した建物被害関数を構築した。この手法は、 I_w 値別の被害関数 P_{I_w} と I_w 値の頻度分布より合成した被害関数 P_f が既存の被害関数 P_f に一致するように、未知である P_{I_w} を仮定し求めるという方法である。 I_w 値の頻度分布は横浜市による耐震診断結果を用い、既存の建物被害関数 P_f には兵庫県南部地震での神戸市灘区における実被害より構築した関数を用いた。

以上の手法により、木造耐震性能指標別の被害関数を構築した。これによって、従来の経験的な被害関数では表すことのできなかった建築年と構造種別が同じ木造建物における耐震性能の差を表現することが可能となった。これを用いることで、耐震診断に基づく個々の木造住宅の耐震性能の違いや耐震補強による強度増加を考慮した、より詳細な建物被害予測が可能となる。

今後の課題としては、日本各地の木造建物耐震性能の地域特性評価、木造耐震性能指標そのものの吟味、地盤の影響の評価手法の再検討、建物地震被害の定義に応じた個別建物の被害関数の構築などが上げられよう。

謝 辞

横浜市の耐震診断結果は横浜市民間住宅課と横浜市建築事務所協会より提供いただいた。記して謝意を表する。

(2001年8月29日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本建築防災協会, 日本建築士連合会: 木造住宅の耐震精密診断と補強方法 (増補版3刷), 建設省住宅局監修, 1997.
- 2) 林康 裕, 鈴木祥之, 宮腰淳一, 渡辺基史: 耐震診断結果を利用した既存RC造建築物の地震リスク表示, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 235-242, 2000. 11.
- 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) 日本建築防災協会: 我が家の耐震診断と補強方法, 1985.
- 5) 横浜市防災会議: 横浜市防災計画 震災対策編, 1999.
- 6) 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.