

## 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

DEVELOPMENT OF FRAGILITY CURVES FOR WOOD-FRAME HOUSES BASED ON  
THE RESULT OF SEISMIC CAPACITY EVALUATION IN YOKOHAMA CITY

梅村 幸一郎\*, 山崎 文雄\*\*

Koichiro UMEMURA and Fumio YAMAZAKI

This paper presents the method to construct fragility curves for wood-frame houses considering the results of seismic capacity evaluation conducted in Yokohama City. Assuming the equality of the distribution of seismic performance index in Nada Ward and Yokohama City, the empirical fragility curves for Nada Ward based on data due to the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake were employed to develop fragility curves corresponding to the seismic performance index for wood-frame houses. The fragility curves thus obtained are the function of the seismic performance index of an individual house, and hence they may be useful for seismic damage assessment in a district level.

**Keywords:** seismic capacity evaluation, wood-frame house, seismic performance index, fragility curve, Yokohama City, Nada Ward

耐震診断, 木造軸組構法住宅, 耐震性能指標, 被害関数, 横浜市, 灘区

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では非常に多くの木造住宅が倒壊し, それによって約5千人の人命が失われた。木造住宅は, 軸組構法(在来構法), ツーバイフォー構法(枠組壁構法), プレファブ構法(木質パネル構法)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, ツーバイフォー構法やプレファブ構法は十分な耐震性を示した<sup>1)3)</sup>。また, 在来軸組構法においても, 甚大な被害を受けた建物は, 葺土を有する瓦屋根のものが大半で, 老朽化や腐食の進行, 筋かい・壁量の不足と不適切な配置, 接合部の強度不足などの要因が加わった場合が多く, 適切な設計・施工・メンテナンスを行っていたものの被害は極めて少なかったといわれる<sup>1)4)</sup>。また, 木造建物についてもRC造やS造の場合と同様に, 建築年が古い建物ほど被害率が大幅に大きくなっている<sup>5)7)</sup>。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ものについて耐震診断<sup>8)</sup>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。このような観点から, 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<sup>9)</sup>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。

木造建物についても, 耐震診断の結果は, RC造建物における耐震性能を表す構造耐震指標( $I_s$ 値)<sup>10)</sup>と同様の指標を用いて表現され

るが, 実際にはあまり広くは活用されていないのが現状である。これは, 耐震診断を行っただけでは被害軽減に直接はつながらないために, 診断そのものが余り普及していないことも理由として大きく, 個人住宅の耐震補強に対する補助制度を伴うことが今後の課題といえよう。

また, 適切な地震防災対策を立案するための資料として, 国や地方自治体において, 地震被害想定調査が盛んに行われているが, その想定結果は使用する建物被害関数に大きく依存する。RC構造物について中埜・岡田<sup>11)</sup>は, 既存および補強建物の $I_s$ 値の分析を行うとともに, 想定した入力地動加速度レベルに対する建物被害率を実データによる検証も含めて確率・統計論的に検討している。兵庫県南部地震以降は, 多くの建物被害関数<sup>6)7)12)13)</sup>が提案されているが, これらは地震動分布の設定法や使用した建物被害データに違いはあるものの, 建物構造区分や建築年代などをパラメータとする経験式である点では共通である。これらの提案された被害関数によって求められる被害率というのは, 個々の建物の損傷確率を表しているのではなく, 特定の属性区分の建物群において, ある地震動強度のもとで何割の建物に被害が及ぶかという確率的期待値を示している。したがって, 個々の建物の耐震性能がパラメータとして考慮されている訳ではないが, 実際は建築年と構造が同じ建物であっても, 耐震性能が異なれば, 被害程度が違ってくることは容易に想像できる。そこで, 林ら<sup>14)</sup>は, 兵庫県南部地震におけるRC造建物群の被害率と最大地動速度の関係を表す被害関数に基づき, 個々の建物の耐震

\* 国土交通省 修士(工学)  
(元東京大学大学院 大学院生)  
\*\* アジア工科大学院 教授・工博  
(東京大学より派遣)

Ministry of Land, Infrastructure and Transport, M. Eng.

Prof., Asian Institute of Technology, Dr. Eng.  
(on leave from University of Tokyo)

性能を考慮して、 $I_s$  値別の RC 造建物の損傷確率を与える被害関数を導出している。このような建物ごとの耐震性能を考慮した被害関数は、耐震診断結果と被害の発生しやすさを定量的に結びつけるもので、耐震補強の効果も取り入れた個別建物の被害想定などに用いることができる。

本研究ではこの林らが 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<sup>9)</sup>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。本研究の目的は、貴重な木造耐震診断結果を被害関数へ取り込むという応用面での提案にあり、誘導手法そのものは林らの方法に従っている。

## 2. 木造耐震性能指標 ( $I_w$ 値) について

### 2.1 木造建物の耐震診断方法の策定過程

木造建物の耐震診断方法としては、1979年に日本建築防災協会が「わ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、建設省住宅局の監修を受けて、(財)日本建築防災協会と(社)日本建築士会連合会との共同で発行された。これらの診断法は、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改訂が行われ、1985年に「わが家の耐震診断と補強方法」<sup>15)</sup>「地震にそなえて—わが家の耐震知識—」<sup>16)</sup>「木造住宅の耐震精密診断と補強方法」<sup>9)</sup>の3部作として発行され、これが現行版である。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「わが家の耐震診断と補強方法」に掲載されている方法で算出する。この「わが家の耐震診断と補強方法」において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おらず、「総合評点」という名称では何を意味するの分りがたいため、本研究では木造耐震性能指標 ( $I_w$  値) と名付けた。またこの耐震診断<sup>15)</sup>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。

### 2.2 木造耐震性能指標 ( $I_w$ 値) の算出方法

$I_w$  値は次の指標 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

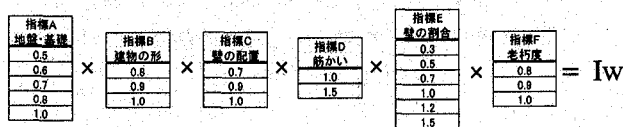


図 1 各指標の評点と木造耐震性能指標 ( $I_w$  値) の算出方法

表 1 木造建物の耐震診断結果の耐震性能判定表

$I_w$	判定	今後の対策
1.5以上	安全です	
1.0以上1.5未満	一応安全です	専門家の精密診断を受ければ、なお安心です
0.7以上1.0未満	やや危険です	専門家の精密診断を受けてください
0.7未満	倒壊または大破壊の危険があります	ぜひ専門家と補強について相談してください

の各指標の評点と算出方法を、表 1 に算出された  $I_w$  値による耐震判定結果を示す。

次に、坂本<sup>17)</sup>の論文に基づいて各指標について述べる。

#### 指標 A) 地盤・基礎

地盤は、「非常に悪い地盤」、「やや悪い地盤」、「良い・普通の地盤」の3区分となっており、沖積層や洪積層といった地盤造成時期と、埋立地や盛土地などの造成工事履歴により判断される。基礎については、「鉄筋コンクリート造布基礎」、「無筋コンクリート造布基礎」、「ひびわれのあるコンクリート造布基礎」、「その他の基礎 (玉石、石積、ブロック積)」の4区分となっている。これらの地盤と基礎の組み合わせで指標 A の評点が決まる。評点は、「普通」以上の地盤に建つ「鉄筋コンクリート造布基礎」を持つ木造住宅を基準として、評点 1.0 点が付けられている。同じ基礎でも「非常に悪い」地盤に建つ場合には評点を 0.7 点としている。これは、建築基準法施行令 (第 46 条および第 88 条) において、「地盤が著しく軟弱な区域では壁量を 1.5 倍にすること」となっているのを利用して、その逆数である 1/1.5 を 0.7 とまとめたものである。「無筋コンクリート造布基礎」においても、地盤が「普通」以上であればとくに問題がないとして、評点を 1.0 点としている。1983 年日本海中部地震において被害を受けたものの大部分に相当する、基礎が「無筋コンクリート」かつ地盤が「非常に悪い」建物については、最も低い評点 0.5 点を与えられている。「鉄筋」「無筋」の場合とも、「やや悪い」地盤の評点は、「良い・普通」と「非常に悪い」の中間の値をとっている。「ひびわれのあるコンクリート造布基礎」の場合は、地盤の判定に誤りがある可能性があるため、評点を「無筋」で「やや悪い」地盤と同じ 0.7 点としている。これは地盤が「普通」以上であれば、基礎にひびわれは生じないはずと考えてのことである。「その他の基礎」という分類は、基礎そのものの分類というよりはむしろ、現行法規に合致しない古い構造の住宅を指しており、評点は 0.6 点がつけられている。

#### 指標 B) 建物の形

指標 B の建物の形は、平面的・立面的な建物のバランスを評価するものである。「平面的に不整形」を問題にしているのは、凹凸の多い平面形を持つ建物は、概して構造的な一体性に乏しく、部分的な破壊やくびれた部分の入隅部分に損傷を生じやすいためである。「立面的に不整形」は、2 階の載る位置が偏っていると、建物の平面的な重心が剛心から大きく離れる危険性があることをチェックするためのものである。評点は「整形」1.0 点、「平面的に不整形」0.9 点、「立面的に不整形」0.8 点となっている。

#### 指標 C) 壁の配置

壁の配置に関しては、各立面 (外壁面) ごとの (無開口) 壁の長さを調べることにしており、「つりあいの良い配置」、「外壁の一面に壁が 1/5 未満」、「外壁の一面に壁がない (全開口)」の3つに分けられている。「外壁の一面が全開口」というのは、1982 年浦河沖地震を始めとして、地震被害の多い店舗付住宅を念頭に置いている。「外壁の一面に壁が 1/5 未満」を決めるにあたっては、壁の単位長さ (モジュール) が半間 (約 90cm) であるとして、一外壁面を 4.4 間~5.5 間とした場合、無開口壁の長さがどの程度であればよいかを議論し、1/5 を境としている。評点は「つりあいの良い配置」1.0 点、「外壁の一面に壁が 1/5 未満」0.9 点、「外壁の一面に壁がない (全開口)」

0.7点となっている。

指標D) 筋かい

現在の木造住宅は耐力壁（壁を設けまたは筋かいを入れた軸組）によって、地震時水平力に抵抗する考え方を採っている。この耐力壁の規定は、1948年福井地震における被害度と壁量の相関に由来している。そこで筋かいの評点は「筋かいあり」1.5点、「筋かいなし」1.0点となっている。

指標E) 壁の割合

壁の割合は、建物のはり間方向、けた行方向別に壁の長さを合計し、それを建坪で割って求めた単位面積あたりの壁の長さを、階建てと屋根種別から定められた必要壁長さで割ることににより求められる。評点は壁の割合に応じて、0.3点、0.5点、0.7点、1.0点、1.2点、1.5点が付けられている。そして先の指標D（筋かい）とこの指標E（壁の割合）の積は、地震時の水平力に対する抵抗力の大きさを表している。

指標F) 老朽度

老朽度は建物の経年劣化を評価するものであり、「健全」、「老朽化

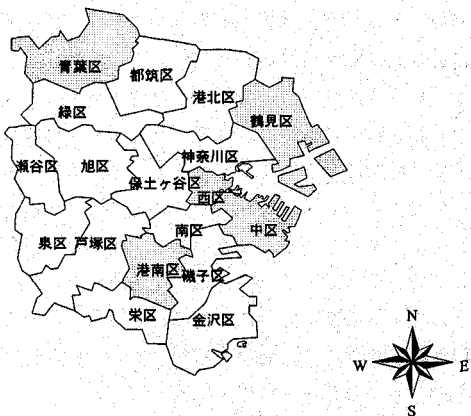


図2 本研究において対象とした横浜市の5区

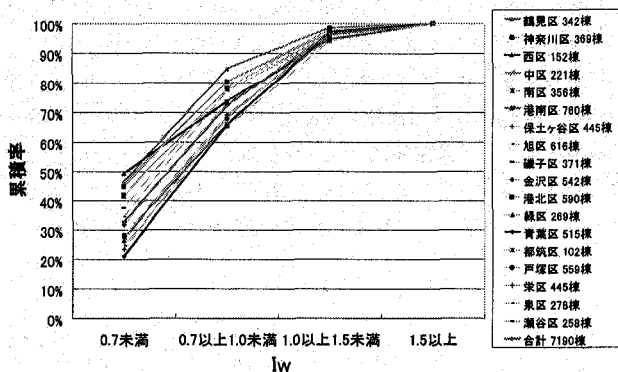


図3 横浜市の耐震診断による区別のIw値の累積分布

表2 横浜市5区における耐震診断の年度別実施棟数

区	H7	H8	H9	H10	H11	合計棟数
鶴見区	54	111	78	54	56	353
西区	27	83	13	21	18	162
中区	49	126	40	25	32	272
港南区	135	223	227	106	82	773
青葉区	131	107	166	68	59	531
計	396	650	524	274	247	2091

している」、「腐ったり、白蟻に喰われている」の3区分で、それぞれ評点は1.0点、0.9点、0.8点と付けられている。

### 2.3 横浜市の耐震診断結果

横浜市は人口342万人、137万世帯、総住宅数137万戸の都市である<sup>18)</sup>。住宅の建て方別では、一戸建は全住宅の内の38.4%、木造住宅（防火木造+木造）は全住宅の内の52.1%、昭和55年以前に建築された住宅は一戸建住宅の内の53.0%を占めている<sup>19)</sup>。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、「木造住宅耐震診断士派遣制度」「木造戸建住宅の耐震改修補助」「木造住宅の耐震改良融資」を行っている<sup>9)</sup>。「木造住宅耐震診断士派遣制度」は平成7年度より行われており、地震に強い安全な街づくりを目指すために、建設省監修の「わ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個人住宅の「耐震診断」を横浜市が無料で行うものである。耐震診断を希望する市民に、市長が認定した「木造住宅耐震診断士」を派遣し調査を行い、市民の耐震対策を支援している。対象は、1980年以前に建築された、2階建以下、延べ面積200㎡以下の在来軸組構法による木造個人住宅である。「木造戸建住宅の耐震改修補助」は耐震診断の結果、総合評点(Iw値)が0.7未満(倒壊の危険があります)と判定された建物を対象に、上限を200万とし、工事費の3分の1を補助するものである。「木造住宅の耐震改良融資」はIw値が1.0未満の建物を対象に、耐震改良工事費用を、400万円を上限とし、無利子で融資するものである。

横浜市は以上の制度により、2001年3月現在およそ7300棟の木造住宅の耐震診断結果を紙ベースで保有しており、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(図2)において平成7年度から平成11年度に診断された軸組工法と特定できる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、階数、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、B、C、D、E、Fの各評点、および総合評点(Iw値)の18項目である。

図3は横浜市における区別のIw値の累積確率分布であるが、横浜市がデジタルデータとして所有しているのは表1に示す判定結果の4区分の区別集計のみであるためこのような分布となっている。本研究において用いた5区は、図3を参考としてIw値の分布が偏らないように選んだ。また表2は区別の耐震診断実施棟数を表している。

### 3. 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の流れを図4に示す。まず、既知のものとして、Iw値の相対頻度分布(百分率)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、今回構築する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。以下この手法を詳しく述べる。

まず、既知の建物被害関数  $P_f$  としては、村尾・山崎<sup>9)</sup>が兵庫県南部地震での神戸市灘区を対象に、山口・山崎<sup>10)</sup>の推定地震動分布と神戸市による被災度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。

$$P_f(V) = \Phi((\ln V - \lambda_f) / \zeta_f) \quad (1)$$

ここで  $P_f$  は被害率、 $\Phi(\cdot)$  は標準正規累積確率分布、 $V$  は最大地動速度、 $\lambda_f$  は  $\ln V$  の平均値、 $\zeta_f$  は  $\ln V$  の標準偏差である。

この建物被害関数は、ある最大地動速度のときにある被害程度以上の被害が発生する確率  $P_f$  は、標準正規累積分布  $\Phi$  を用いて、対数正規分布で表せると仮定している。建物被害関数の構築過程<sup>21)</sup>は、まず強震観測記録と建築研究所<sup>20)</sup>による兵庫県南部地震建物被害データベースの中から、強震観測記録が得られた地点周辺の低層独立住宅被害データ<sup>20)</sup>を用いて低層独立住宅の被害関数(I)を求め、その関数を同データの調査地域に適用して、阪神地域の地震動分布を推定する。次にこの地震動分布の推定結果と神戸市から提供された課税台帳を基本とする固定資産税減免のための灘区の約3万棟の建物被害調査データを用いて、木造建築年代別の建物被害関数(II)を構築する<sup>21)</sup>。これらの関数を再度灘区に適用することにより地震動分布を再推定し<sup>21)</sup>、地震動推定の精度を高める。さらに再推定された灘区の地震動と、神戸市の調査に基づく灘区の建物被害データを用いて、構造・建築年代別の建物被害関数(III)を構築している<sup>9)</sup>。この建物被害関数は、大きな地震動が観測され、建物数が多く被害率の高い灘区のデータを使用していることが特徴である。

本研究では、横浜市から得られた  $I_w$  値が1980年以前に建てられ

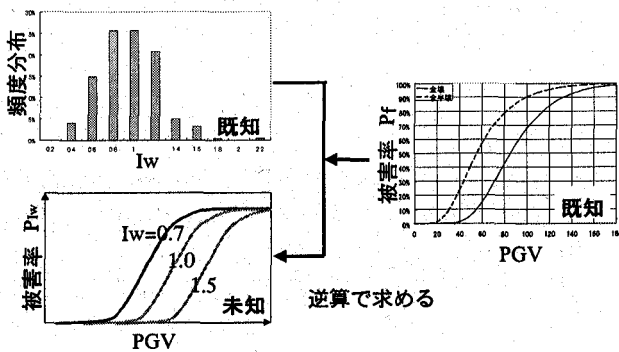


図4 木造建物の耐震性能指標ごとの被害関数構築の流れ

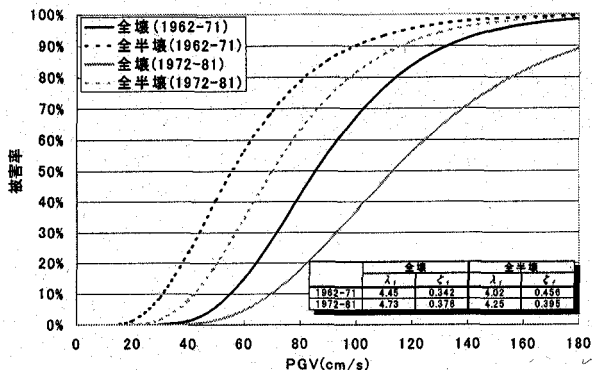


図5 兵庫県南部地震における神戸市灘区の建物被害関数<sup>9)</sup>

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、建物被害関数(III)の該当する年代の、木造の全壊・全半壊を表した建物被害関数を用いた。この建物被害関数とその帰帰係数を図5に示す。

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 ( $I_w$  値) を用いる。図6には横浜市の  $I_w$  値の累積分布を示すが(棟数は指標値が欠落したものを除く)、建物被害関数構築の際には各  $I_w$  値の相対頻度分布を用いる。この横浜市の  $I_w$  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  $I_w$  値の分布と横浜市において耐震診断を受けた建物の  $I_w$  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  $I_w$  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を見つけることができなかったため、ここではこの仮定を採用することにした。

木造建物の地域特性に関しては、これまでに幾つかの研究が報告されている。李<sup>22)</sup>は、地域ごとの木造住宅の特性が地域の気温や積雪等の自然条件と深くかかわっているものと考え、冬季の平均気温により都市を5つの区分に分け、断熱効果と壁量、落雪・積雪・気温等と屋根材料、地盤の凍結深度と基礎形状等の観点から、在来木造住宅の地域特性を把握し、耐震性能との関係を比較・検討している。この結果基礎の根入れ深さが深い地域ほど、鉄板屋根使用率が高く、また平均壁率が高くなることを示すとともに、瓦屋根を多く使用している地域は、基礎の根入れ深さが浅く、鉄板屋根使用率が低く、また平均壁率が低いことを示している。これより地域によって耐震性能が異なることがわかるが、この5つの区分においては、横浜市と神戸市は同じカテゴリーに属している。

また、損害保険料率算定会<sup>23)</sup>による木造住宅の損壊被害率に関する研究では、千葉のある都市(以下X市)を対象に、木造住宅の属性を調査し、その調査から本研究において用いたものと同様の木造耐震診断を行い、木造の耐震性能を表す総合指標を求めている。そして総合指標と延床面積の相関関係を使い、シミュレーションによりX市の総合指標の累積分布を再現できることを確認し、同様のシミュレーションを延床面積のデータがある、西宮市、浦和市、富士山市に適用し、それぞれの市での総合指標の累積分布を求めている。この結果から、西宮市と千葉県X市は総合指標の平均値と分散がほ

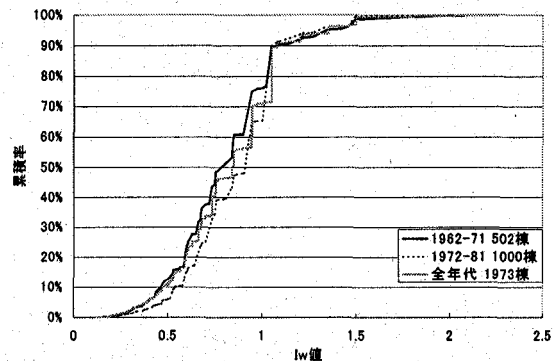


図6 横浜市による耐震診断結果の  $I_w$  値累積分布(建築年別)

ば等しくなることを示している。これからも、地域特性を考慮する上で、地理的に X 市に近い横浜市の  $I_w$  値の分布が、西宮市に近い神戸市灘区の  $I_w$  値の分布と等しいとおいた本研究での仮定の妥当性が支持されているといえよう。

一方、耐震性能に大きくかわる壁率に関して、阪神地域における 1,2 階の壁率<sup>24)</sup>と首都圏における 1 階の壁率<sup>9)</sup>の調査データを比べると、首都圏に比べ阪神地域の 1 階壁率が小さいことが報告されている。しかしこの阪神地区における壁率は、兵庫県南部地震において小破から大破の被害を受けた木造建物 10 棟の調査から得られたものであり、無被害建物を含まず、また棟数的にも充分とはいえない。このように数少ないデータにおいて首都圏と阪神地域の木造耐震性能に差があるとの報告は散見されるが、それを両地域全域について適用するほどの信頼性があるとはいえないであろう。したがってここでは、前述の仮定を採用することとした。しかし今後、阪神地域についても木造建物の耐震診断データを収集するなど、更なる検討が必要と思われる。

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

$$P_{I_w}(V) = \Phi((\ln V - \lambda_{I_w}) / \zeta_{I_w}) \quad (2)$$

ここで、 $P_{I_w}$  は各  $I_w$  値における建物被害関数で、 $\lambda_{I_w}$ 、 $\zeta_{I_w}$  はそれぞれ各  $I_w$  値における  $\ln V$  の平均値と標準偏差である。ここで  $\lambda_{I_w}$  は、 $P_{I_w}$  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、 $I_w$  値を強度と考えるとこれに比例するとして、式(3)のように表すこととした<sup>14)</sup>。また  $\zeta_{I_w}$  は  $I_w$  値の異なる被害関数が交差しないようにするために、 $I_w$  値によらず一定とした。

$$\lambda_{I_w} = \ln(V_0 \cdot (I_w / I_{w0})) \quad (3)$$

$$\zeta_{I_w} = \zeta_{I_{w0}} \quad (4)$$

この基準となる  $I_{w0}$  は  $I_w$  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  $\zeta_{I_{w0}}$  の 2 つとなる。

また全体の建物被害関数  $P_f$  は、 $I_w$  値ごとの被害関数を相対頻度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。

$$P_f(V) = \sum_{I_w} r(I_w) \cdot P_{I_w}(V) \quad (5)$$

ここで、 $r(I_w)$  は  $I_w$  値の相対頻度、 $P_{I_w}$  は式(2)で表される  $I_w$  値別の

表 3 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
ひびわれのあるコンクリート造布基礎		0.7		
その他の基礎(玉石、石積、ブロック積)		0.6		
				診断適用外

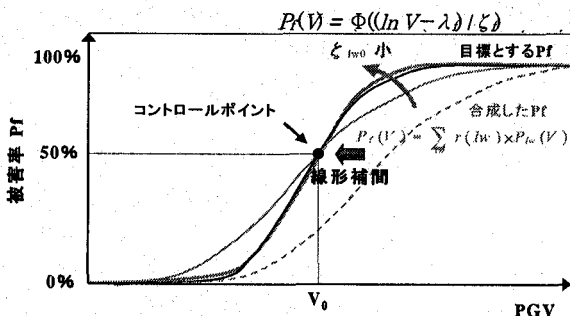


図 7 本手法における目標とする  $P_f$  へのフィッティング

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  $\zeta_{I_{w0}}$  を与えることで、式(3)、(4)より各  $I_w$  値における  $\lambda_{I_w}$  と  $\zeta_{I_w}$  が決まり、式(2)から各  $I_w$  値に対応した  $P_{I_w}$  が求まる。この  $P_{I_w}$  と  $I_w$  値の相対頻度  $r(I_w)$  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  $\zeta_{I_{w0}}$  を決定する。この過程は、繰り返し計算になるが、図 7 に示すように、最初に仮定した  $V_0$  と  $\zeta_{I_{w0}}$  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  $\zeta_{I_{w0}}$  の初期値は、式(1)で表される目的とする被害関数  $P_f$  のパラメータより、それぞれ  $\exp(\lambda)$  および  $\zeta$  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  $\zeta_{I_{w0}}$  を更新する。このような流れによって、2 つのパラメータは数回の繰り返しで簡単に決定できる。

今回の手法では、式(5)において、離散値である各  $I_w$  値における対数正規累積確率分布を、各  $I_w$  値の相対度数を重みとして足し合わせているため、合成した建物被害関数  $P_f$  は対数正規分布ではない。しかし本研究では、個別建物の被害予測に用いる、対数正規分布の  $P_{I_w}$  を定めることを目的としているため、ここで合成された  $P_f$  自体を用いるわけではなく、被害関数を使用する上での支障はない。

#### 4. 木造耐震性能指標ごとの被害関数

前章の手法を用いることで、 $I_w$  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  $I_w$  値は指標 A から F の積によって求められ、指標 A は基礎・地盤に関するものであるから、 $I_w$  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 3 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。仮に、指標 A を「基礎による評点」と「地盤による評点」の積で表せるとした場合には、それらの評点を定める必要がある。そのため今回は、地盤による影響を含んだ  $I_w$  値、つまりもとのままの  $I_w$  値を用いた場合と、地盤の影響を取り除いた  $I_w$  値 (以下  $I_w'$  値とする) を用いた場合の 2 ケースについて、軸組構法木造建物の被害関数を構築した。地盤の影響を取り除くにあたっての仮定については後述する。

##### 4.1 地盤による影響を含んだ場合

ここではまず、地盤による影響を含んだ場合の建物被害関数を構築する。灘区の建築年代 1962-1971 の木造建物に対する被害関数<sup>9)</sup>を目的関数として、合成した被害関数との比較を図 8 に示す。また、灘区の建築年代 1972-1981 の木造建物に対する同様のものを図 9 に、またこれらの設定したパラメータを表 4 に示す。図 8、図 9 より本手法に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、前述したように合成した  $P_f$  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らず、目標とする  $P_f$  に完全には一致し

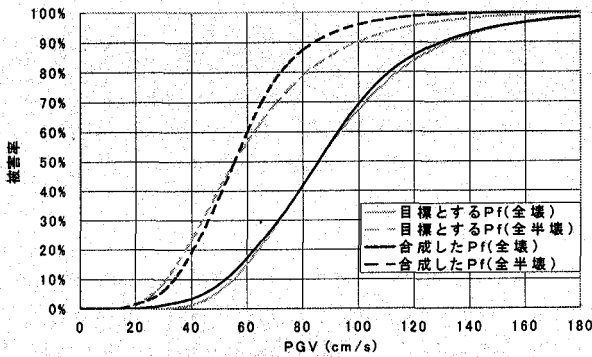


図8 目標とする建物被害関数  $P_f$  と  $I_w$  値の分布より合成した建物被害関数  $P_f$  の比較 (建築年 1962-1971)

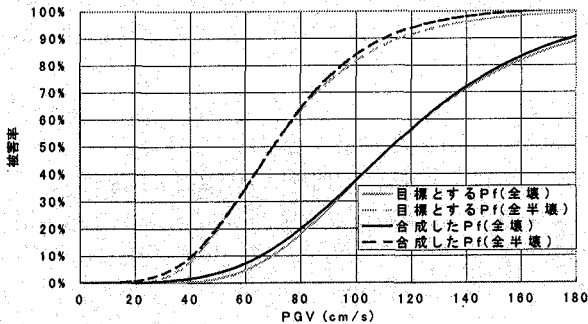


図9 目標とする建物被害関数  $P_f$  と  $I_w$  値の分布より合成した建物被害関数  $P_f$  の比較 (建築年 1972-1981)

表4 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		
	$V_0$	$\zeta_{Iw0}$	$Iw0$	$V_0$	$\zeta_{Iw0}$	$Iw0$
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

ない。また全壊に比べ、全半壊を表す被害関数において、合成した  $P_f$  と目標とする  $P_f$  とのずれが大きいが、これは本研究で全壊と全半壊の被害関数が交差しないように、両者の  $\zeta_{Iw0}$  を同じ値としていることによる。目標とする被害関数においては、全壊と全半壊の  $\zeta_f$  が多少異なるが<sup>9)</sup>、今回は全壊において合成した  $P_f$  と目標とする  $P_f$  が一致するようにパラメータを決定している。これは、全壊と全半壊における  $\zeta_f$  の値が近い建築年 1971-1982 年の被害関数の場合(図9)には、合成した関数の再現性が高いことからわかる。

また本検討においては、被害率が50%となる点をコントロールポイントとし、その周辺で目的関数と合成した被害関数を最も近似するように操作しているが、耐震性能指標ごとの被害関数の使用目的によっては、注目する地震動強さの範囲において、合成した  $P_f$  が最も目標とする  $P_f$  に一致するようにすることも可能である。

表4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  $P_{Iw}$  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10に、全半壊率について図11に示す。これらの図から、 $I_w$  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  $P_{Iw}$  と建築年 1972-1981 年のデータから求めた被害関数  $P_{Iw}$  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、ここでは大

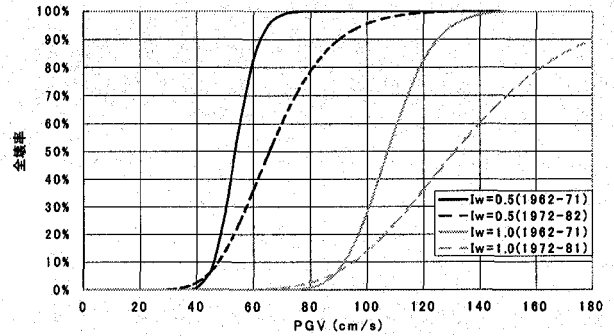


図10 構築した  $I_w$  値別の建物被害関数  $P_{Iw}$  (全壊率)

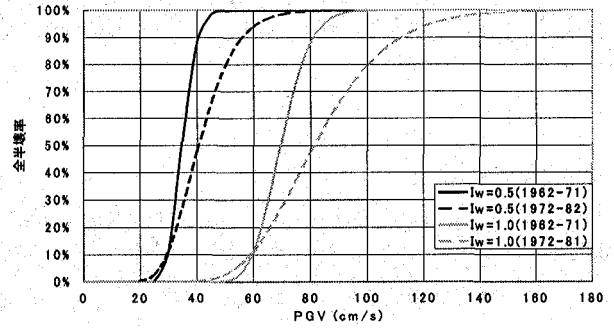


図11 構築した  $I_w$  値別の建物被害関数  $P_{Iw}$  (全半壊率)

表5 基礎と地盤に分離した新指標 A の評点の求め方

		地盤			
		良い・普通	やや悪い	非常に悪い	
基礎	鉄筋コンクリート造布基礎	1.15	1.0	0.7	0.5
	無筋コンクリート造布基礎	1.15	0.805	0.5635	
	ひびわれのあるコンクリート造布基礎	0.7	1.0	0.7	0.5
その他の基礎(玉石、石積、ブロック積)		0.6	0.6	診断適用外	

注) 網掛け部は新指標によって値が変わった箇所

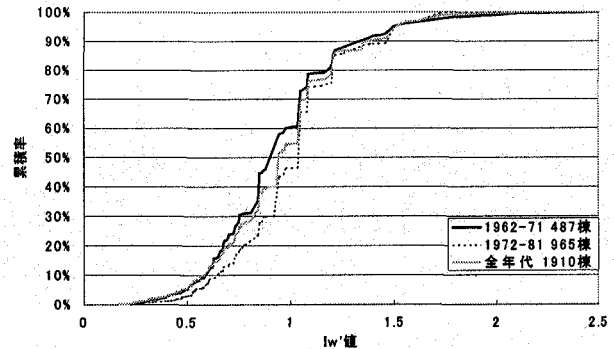


図12 横浜市の耐震診断結果の建築年代別  $I_w'$  値累積分布

きく異なっている。同じ  $I_w$  値においても古い年代の建物のデータより求めた  $P_{Iw}$  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、それが必ずしも充分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3区分の値では経年劣化を正確に評価できていない恐れがある。これは図6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。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灘区の実被害に基づいて構築されており、ここでは建築年の古い建物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  $P_{Iw}$  が異なること



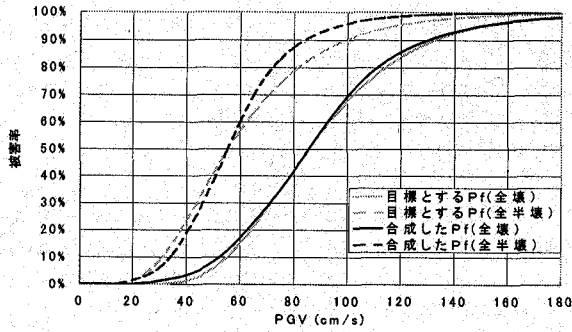


図13 目標とする建物被害関数  $P_f$  と  $I_w'$  値の分布より合成した建物被害関数  $P_f$  の比較 (建築年 1962-1971)

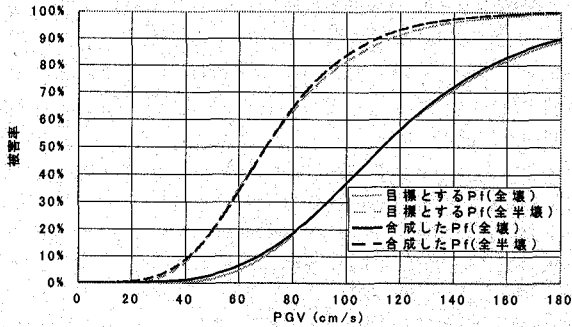


図14 目標とする建物被害関数  $P_f$  と  $I_w'$  値の分布より合成した建物被害関数  $P_f$  の比較 (建築年 1972-1981)

表6 目標とする被害関数  $P_f$  に適合するパラメータ ( $I_w'$  値)

	全壊			全半壊		
	$V_0$	$\zeta_{Iw0}$	$Iw0$	$V_0$	$\zeta_{Iw0}$	$Iw0$
1962-71	88.6	0.12	0.953	57.5	0.12	0.953
1972-81	116	0.25	1.02	71.8	0.25	1.02

いう結果として現れたものと考えられる。データの制約上仕方ないが、今後の検討課題といえよう。

ここで求めた  $I_w'$  値別の被害関数は、基礎・地盤の評点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。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。

#### 4.2 地盤の影響を取り除いた場合

$I_w'$  値を求める際に用いる基礎・地盤より求まる指標 A は表 3 に示すように、基礎と地盤が一体化した評点となっている。そのため指標 A から地盤の影響を取り除くために、指標 A は「地盤による評点」と「基礎による評点」の積で表されるという仮定を設定した。この仮定における地盤と基礎の各評点と、それによって求まる新指標 A の評点を表 5 に示す。地盤と基礎に別個に評点を与えたことにより、鉄筋コンクリート造布基礎の場合の評点が若干変化している (表 5 の網掛け部)。このような仮定を設け、新指標 A を用いた新  $I_w'$  値を求め、その新  $I_w'$  値を地盤による評点で割ったものを地盤による影響を取り除いた  $I_w'$  値と定義した。ここでは  $I_w'$  値を用い、前節と同様の手法により、地盤の影響を取り除いた場合における  $I_w'$  値別の建

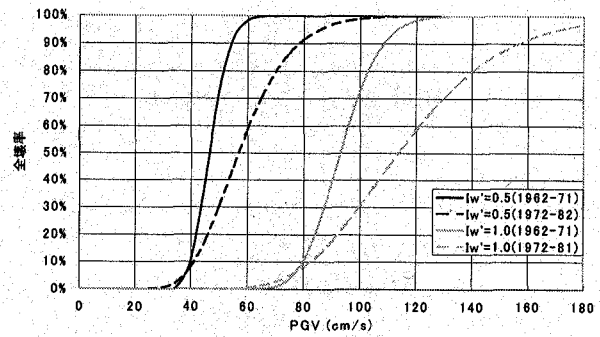


図15 構築した  $I_w'$  値別の建物被害関数  $P_{Iw}$  (全壊率)

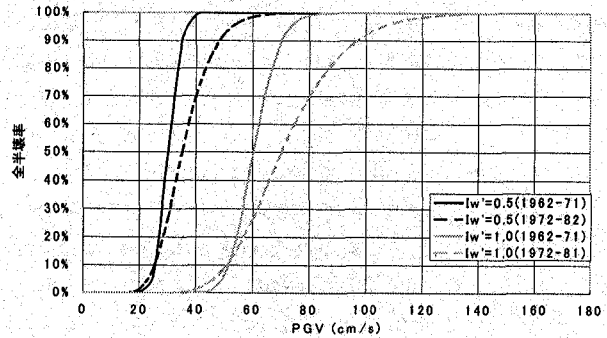


図16 構築した  $I_w'$  値別の建物被害関数  $P_{Iw}$  (全半壊率)

物被害関数を構築する。

なお、横浜市の耐震診断結果の指標 A の評点入力する際に、表 3 のどのセルに対応するかを入力しておいたため、このように地盤の評点と基礎の評点の分離が可能となった。また、液状化などの地盤変状の伴う建物の被災パターン<sup>25)</sup>は、表 3 の「非常に悪い地盤」として多少は考慮されているが、これを地盤と基礎の評点に分離することは難しい。木造住宅の耐震性能評価における液状化の適切な考慮は、今後の課題といえよう。

横浜市耐震診断結果について、 $I_w'$  値の累積分布を図 12 に示す。

$I_w'$  値を用い、前節と同様の手法で合成した建物被害関数  $P_f$  と、目標とした被害関数  $P_f$  を比較したものを図 13、図 14 に、設定したパラメータを表 6 に示す。これらの図においても、前節のケースと同様に、合成した被害関数が目標とする被害関数とよく近似していることが読みとることができる。

また合成した  $P_f$  から再構築した、 $I_w'$  値別の被害関数  $P_{Iw}$  を図 15、図 16 に示す。これらの図から、 $I_w'$  値についても、その値が異なることによって被害関数が変化している様子が表現されている。しかし、地盤の影響を含んだ場合と同様の理由で、本来、建築年代に依らず一義的に求まることが期待される  $I_w'$  値ごとの被害関数が、建築年代によって差が生じている。

この地盤の影響を取り除いた場合の耐震性能指標別の木造建物被害関数は、地震被害想定など、地震動分布の推定を別途に行う場合の個別建物の被害予測に使用するものである。このような個別建物の耐震性能を被害予測に取り入れることによって、耐震補強の効果などを適切に評価することができ、住民にとっても防災意識の向上や耐震補強の推進に役立つものと期待される。

なお今回は、兵庫県南部地震による難区の罹災証明の被害区分に

基づく経験的被害関数を目標として耐震性能指標別の被害関数を構築したが、別の被害判定基準<sup>29)</sup>に基づく被害関数を目標として同様の耐震性能指標別の被害関数を作ることも可能である。

## 5. まとめ

木造建物の個別の耐震性を評価する方法として耐震診断があり、自治体の補助もあって最近かなりの数が実施されている。しかし、地震被害想定などに用いられる被害関数には、この耐震診断結果が取り入れられてこなかった。

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の構築を試みた。この手法は、 $I_w$  値別の被害関数  $P_{iw}$  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  $P_{iw}$  を仮定し求めるという方法で、林らが RC 建物に対して行ったものと同様のものがある。今回、 $I_w$  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  $P_f$  には村尾・山崎による兵庫県南部地震での神戸市灘区における被害より構築した建物被害関数を用いた。この際、神戸市灘区における  $I_w$  値の分布が横浜市において耐震診断を受けた建物による  $I_w$  値の分布と等しいという仮定を置いた。また  $I_w$  値は地盤の影響を含んだものであるが、これが軟弱地盤における震動の増幅と見なす立場に立てば、入力地震動を別途算定する場合には、地盤の影響を除く必要がある。そのため  $I_w$  値の算定において基礎と地盤を評価する指標 A を、「基礎による評点」と「地盤による評点」の積で表されると仮定し、地盤による影響を取り除いた場合についても耐震性能指標別の被害関数  $P_{iw}$  を求めた。

以上の手法により、地盤の影響を含む場合とそれを取り除いた場合の 2 ケースについて、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、従来提案されている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。これを用いることにより、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と考えられる。

なお、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。また、横浜市耐震診断データについても、今後詳細な分析を行う予定である。

## 謝辞

本研究においては、横浜市の耐震診断結果を横浜市民間住宅課と横浜市建築事務所協会より提供していただいた。東京大学坂本功教授には、木造建物の耐震診断について貴重なご意見をいただいた。記して謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 坂本功：地震に強い木造住宅，工業調査会，pp. 8-12, 39-46, 1997.
- 2) 坂本功監修：阪神大震災に見る木造住宅と地震，鹿島出版会，pp. 11-14, 160-166, 1997.

- 3) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 木造建築物/建築基礎構造，日本建築学会，丸善，pp. 15-110, 125-180, 1998.
- 4) 杉山英男：地震と木造住宅，丸善，pp. 298-343, 1996.
- 5) 村上雅英，田原賢，藤田宜紀，三澤文子：阪神・淡路大震災にみる在来木造都市型住宅の問題点，日本建築学会構造系論文集，第 481 号，pp. 71-80, 1996.3
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 日本建築防災協会，日本建築士会連合会：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.
- 9) 横浜市防災会議：横浜市防災計画 震災対策編，pp. 56-60, 1999.
- 10) 日本建築防災協会：改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，1990.
- 11) 中埜良昭，岡田恒男：信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究，日本建築学会構造系論文集報告書，第 406 号，pp. 191-197, 1989.12.
- 12) Miyakoshi, J., Hayashi, Y., Tamura, K., and Fukuwa, N.: Damage Ratio Functions of Building using Damage Data of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Proceedings of the 7th International Conference on the Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), pp. 349-354, 1998.
- 13) 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築物群の震害予測 - その 2 建築年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 505 号，pp. 53-59, 1998.3
- 14) 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
- 15) 日本建築防災協会：わが家の耐震診断と補強方法，1985.
- 16) 日本建築防災協会：地震にそなえて - わが家の耐震知識 -，1985.
- 17) 坂本功：木造住宅の耐震診断 - 建築防災協会による診断法の改訂版について -，建築防災，pp. 11-20, 1986.6
- 18) 横浜市企画局政策部統計解析課：統計横浜，No. 465, pp. 2-13, 1999.2
- 19) 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
- 20) 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 付属 CD-ROM，1996.
- 21) 村尾修，山崎文雄：構造・建築年を考慮した建物被害データに基づく灘区の地震動分布の再推定，日本建築学会構造系論文集，第 523 号，pp. 141-148, 1999.9
- 22) 李康碩，中埜良昭，岡田恒男，越川高志，服部貴一郎，磯部共伸，大網浩一，村上雅也：建築物の耐震性能の地域特性分析に関する研究，文部省科学研究費補助金 No. 08248109 報告書：地震被災危険度のマイクロゾーンネーション（研究代表者 村上直直），pp. IV1-IV42, 2000.3.
- 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, pp. 61-148, 1988.1.
- 24) 鈴木有：木造大被害の原因，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. 175-189, 1995.9.
- 25) 小椋山雅之，堀江啓，牧紀男，田中聡，林春男：災害対応としての建物被害認定過程に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 531 号，pp. 189-196, 2000.5.
- 26) 村尾修，山崎文雄：兵庫県南部地震における建物被害の自治体による調査法の比較検討，日本建築学会大会計画系論文集，No. 515, pp. 187-194, 1999.1.

(2001年4月24日原稿受理，2002年3月8日採用決定)