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 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例—

SEISMIC RISK MAPPING OF WOODEN HOUSE IN LARGE AREA
USING THE GRID-SQUARE STATISTICSPart 2 Vulnerability functions of wooden houses with different construction age
and example of seismic risk mapping

長谷川 浩一*, 翠川 三郎**, 松岡 昌志***

Kouichi HASEGAWA, Saburoh MIDORIKAWA and Masashi MATSUOKA

For seismic microzoning on damage of wooden houses, the vulnerability functions of wooden houses should be defined. In this study, the vulnerability functions for different construction age are proposed using the damage survey data in Higashinada, Kobe area during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan earthquake. The proposed vulnerability functions are applied at five strong-motion stations in Kobe where the main shock records are available. The estimated damage rates agree well with the observations, suggesting the validity of the proposed functions. By using the proposed functions together with populations of wooden houses estimated from the Grid-Square Statistics data and peak ground velocities computed for a hypothetical earthquake, a procedure for seismic risk mapping of wooden houses is shown. The procedure is applied to the northern part of Kanagawa-prefecture.

Keywords : Seismic microzoning, Vulnerability function, Wooden house, GIS
サイスミックマイクロゾーニング, 被害関数, 木造建築物, 地理情報システム

1. はじめに

首都圏などの大都市域で地震防災対策を策定する上で、行政区域を越えた広域の都市群を対象として統一的に地震被害想定を行うことは重要である。地震被害には各種のものがあるが、建築物のうちで多数を占める木造建築物の被害は重要なものの一つと考えられる。木造建築物群の震害予測を行うためには、地震動などの地震ハザードの予測、木造建築物群の分布の推定に加えて、地震ハザードと木造建築物の被害を結びつけるVulnerability Function(以下、被害関数)が必要である。

兵庫県南部地震の被害調査から建築年代が古い木造建築物ほど被害を受けやすいことが指摘されている¹⁾。このことより、著者らは既存のデータベースを利用した広域での木造建築物群の震害予測のための第一段階として、建築年代別の木造建築物の棟数分布を地域メッシュ統計から推定する方法を提案した²⁾。また、著者らは、国土数値情報を用いた基準地域メッシュ単位での地震動の評価方法も既に提案している³⁾。これらを利用して広域での震害予測を行うためには、木造建築物の建築年代別の被害関数を作成する必要がある。

被害関数は、物部⁴⁾が家屋倒壊率と合震度との関係に被害関数として定式化したのが始まりであり、着目している被災対象群が平均的な耐震強さ V_0 の周りに標準偏差 σ で正規分布しているという仮定のもとに標準正規分布関数でよく記述される⁵⁾。米国カリフォルニ

ア州では、専門家の意見を整理して各種構造物についての被害関数の資料集(ATC-13)⁶⁾が出版されている。日本でも、岡田・鏡味⁷⁾が東京都防災会議の震度階解説表⁷⁾の記載内容の定量化により各種構造物の被害関数を作成しているが、実際の被害データを直接利用していないため、その精度について十分な確認は得られていない。最近では、林ら⁸⁾が兵庫県南部地震の被害地域全域での推定最大地動速度と建築物の被害率の比較から被害関数を作成しているが、建築年代についての考慮はなされていない。

本論文では、兵庫県南部地震での建築年代別の被害調査結果を用いて木造建築物の建築年代別被害関数を作成し、この被害関数と推定地震動強さ、推定木造建築物棟数を用いて想定地震に対する木造建築物の震害予測を行う手順を示す。

2. 木造独立住宅の建築年代別被害関数の作成

2.1 東灘区西部地区での被害率の換算

兵庫県南部地震の被害調査は様々な機関によって行われている。その中で建設省建築研究所がまとめた被害調査結果⁹⁾(以下、調査結果I)は、広域にわたって統一された評価を用いて街区および町丁目単位で被害を受けた建築物の棟数および建築面積が調査されている。この調査結果はCD-ROMによって公表されており、地理情報システムに容易に取り込むことが可能である。調査結果Iで用いられ

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 大学院生・修士(工学)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 教授・工博

*** 伽利モート・センシング技術センター 博士(工学)
(現在、地震防災フロンティア研究センター)

Graduate Student, Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Remote Sensing Technology Center of Japan, Dr. Eng.

ている被害分類は、(A)全壊または大破、(B)中程度の損傷、(C)軽微な損傷、(D)外観上の被害なし、(E)火災による損傷、(F)未調査・不明の6項目である。各分類の被災度判定の基準は居住・再使用の可能性に基づいており、(A)は再使用不可能、住める見込みが非常に少ない場合、(B)は大幅な修理で再使用可能な場合、(C)は少しの修繕で住める可能性がある場合、(D)は外見上の被害がみられない場合である。本論文では(A)から(D)の被害を受けた各棟数を棟総数から(E)と(F)を引いた棟数で除した値を各被害率として利用することとする。

建築年代別の被害関数を作成するためには建築年代別の被害調査結果が必要であるが、調査結果Ⅰでは建築年代別には行われていない。これを補うために村上らの行った建築年代別の建築物の被害調査結果¹⁰⁾(以下、調査結果Ⅱ)を併せて用いることとする。調査結果Ⅱでは東灘区西部地区での震災の帯に対応する地域で被害調査を行っている。図1に木造独立住宅について建築年代別の調査結果を示す。被害分類は(a)倒壊、(b)大破・中破、(c)中破・小破、(d)小破以下である。各分類の被災度判定の基準は調査結果Ⅰで用いられているものとは異なり構造的な被害の程度に基づいており、(a)は各階の層崩壊がある場合、(b)は一部崩壊、柱の折損や傾斜大、外壁の大部分剥離、基礎や小屋組の崩壊などがある場合、(c)は瓦のずれや脱落、外壁や基礎のひび割れなどがある場合、(d)外壁開口部の軽微なひび割れなどがある場合および外観上被害が無い場合である。図より建築年代が被害に影響を及ぼしていることが読みとれる。そこで、この結果を利用して木造独立住宅の建築年代別の被害関数を作成する。

東灘区西部地区での調査結果Ⅰのうち低層独立住宅の各被害の割合と調査結果Ⅱのうち同地区での1・2階建ての建築年代全体での各被害の割合を比較した結果を図2に示す。調査結果Ⅰの低層独立住宅はほとんどが木造であると考えられることから、両者の被害率の差は被災度判定の基準の違いによるものと考えられる。この図から、例えば調査結果Ⅰの(A)全壊・大破は調査結果Ⅱの(a)倒壊と(b)大破・中破の一部に対応するものと考えられる。他の被害分類についても同様の比較を行い、調査結果Ⅱの評価を調査結果Ⅰの評価に変換する換算式を(1)式のように定めた。

$$\begin{cases} A = a + \alpha_1 b \\ B = \alpha_2 b \\ C = (1 - \alpha_1 - \alpha_2) b + \alpha_3 c \end{cases} \quad \dots (1)$$

ここで、Aは調査結果Ⅰの全壊または大破率を、Bは中程度の被害率を、Cは軽微な被害率を示し、aは調査結果Ⅱの倒壊率を、bは大破・中破率を、cは中破・小破率を示す。 α_1 、 α_2 、 α_3 は係数である。図2の値を(1)式に代入することにより、 $\alpha_1 = 0.3$ 、 $\alpha_2 = 0.5$ 、 $\alpha_3 = 0.4$ を得た。

簡単のため、この係数を建築年代によらず一定として、建築年代別に各被害率の換算を行った。この際、建築年代の区分は、地域メッシュ統計から建築年代別の木造建築物棟数を推定する方法を示した前論文²⁾での年代区分の制約を受けることより、昭和49年以前、49～60年、60年以降の3区分にまとめた。この換算によって得られた各被害率を表1に示す。表1の換算後の被害率は、被害関数の作成の際に利用しやすいように、その被害程度以上の被害率の総和で

図1 木造(在来軸組工法)独立住宅の建築年代別被害調査結果(村上らによる)

図2 各被害調査の地域全体での被害分類の比較

表1 東灘西部地区の換算後の被害評価

	全壊・大破	中程度の損傷以上	軽微な損傷以上
昭和49年以前	0.62	0.76	0.86
昭和50～60年	0.43	0.62	0.77
昭和61年以降	0.15	0.26	0.43
全体	0.55	0.70	0.82

示している。

2.2 震災の帯での最大地動速度の推定

木造建築物の被害を評価するための地震動の尺度として最大地動速度を用いる。この理由として、木造建物の被害は最大地動速度やスペクトルインテンシティとの相関が高い^{11), 12)}ことが挙げられる。東灘区西部地区では本震記録が得られていないので、既往の研究から最大地動速度の推定を行った。川瀬ら¹³⁾や時松ら¹⁴⁾は一次元非線形解析から東灘西部地区の震災の帯の中では120～135cm/s程度の最大地動速度を生じることを推定している。

入倉¹⁵⁾や源栄・永野¹⁶⁾、川瀬¹⁷⁾は二次元解析により、盆地構造で基盤が急激に深くなる地域では盆地端部で生じる表面波と実体波の干渉によって地震動振幅が大きく増幅されることを示している。実際の余震観測記録でも震災の帯の南での最大地動速度に比べて震災の帯の中での値は1.5倍程度大きい¹⁵⁾。本論文では一次元解析の結果にこの二次元的な効果を掛け合わせたものから地震動強さを推定

表2 既往の被害関数

岡田・鏡味の式		logV0	σ	logV0/ σ	V0	
木造	全壊・大破	旧	1.78	0.18	9.92	59.70
		新	2.30	0.28	8.10	199.07
	中程度の 損傷以上	旧	1.40	0.26	5.42	25.29
		新	2.02	0.30	6.76	104.71
	軽微な損傷 以上	旧	1.06	0.19	5.46	11.48
		新	1.45	0.32	4.55	28.05
林らの式		logV0	σ	logV0/ σ	V0	
低層	全壊・大破	2.20	0.24	9.08	157.76	
	中程度の損傷以上	2.05	0.24	8.53	111.17	
	軽微な損傷以上	1.80	0.32	5.60	62.81	

した。すなわち、東灘区西部地区での最大地動速度は一次元解析では120から135cm/sであるが、この値を約1.5倍して、東灘区西部地区での平均的な地震動強さを180cm/sと仮定した。

2.3 低層独立住宅の建築年代別被害関数

標準正規分布による被害関数を式で表すと(2)式のようにになる。

$$V_r(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^V e^{-\frac{(\log V' - \log V_0)^2}{2\sigma^2}} d(\log V') \quad \dots (2)$$

ここで、 $V_r(V)$ はある最大地動速度 V での被害率、 σ は標準偏差、 $\log V_0$ は被害率が50%になるときの最大地動速度の対数値である。 σ の値については、岡田・鏡味の被害関数⁵⁾と林らの被害関数⁹⁾で使われている値を参考にする。 $\log V_0$ と σ を算出の際、岡田・鏡味の式は震度に対する関数であるので震度から最大地動速度への換算式¹⁸⁾によって変換した。それぞれの被害関数の $\log V_0$ と σ を表2に示す。

なお、被害関数での被害の程度はそれ以上の被害率をすべて含めた値(表1の値)と定義する。例えば、軽微な損傷以上には軽微な損傷の他に中程度の被害および全壊・大破の被害が含まれる。このため、軽微な損傷での σ の値は、全壊・大破や中程度の被害より大きくなる傾向となり、また $\log V_0$ の値は小さくなる。そこで、 $\log V_0/\sigma$ の値は被害程度によって異なった値になると予想される。表2には $\log V_0/\sigma$ の値も示している。岡田・鏡味の関数の新旧の平均値と林らの関数の値を見ると、中程度の被害でやや差があるもののその他の被害ではほぼ同じ値をとることがわかる。そこで、岡田・鏡味の関数や林らの関数での値を参考にして各被害程度毎に $\log V_0/\sigma$ の値として、全壊・大破では9、中程度の被害以上では7、軽微な損傷以上では5とした。

東灘区西部地区での推定最大地動速度、表1の建築年代別独立住宅の被害率およびここで決めた $\log V_0/\sigma$ の値を用いて、木造独立住宅の各被害程度に対応する建築年代別の被害関数を作成した。その結果求められた被害関数のグラフを図3に、パラメータを表3に示す。図中には林らの被害関数も示している。林らの関数は本研究で提案した関数のうち1974年以前のものに近くなる傾向が見られる。平成5年住宅統計調査¹⁹⁾によると神戸市では約8割の住宅が1975年以前に建築されていることから、両者の結果は調和的と考えられる。

3. 低層集合住宅の建築年代別被害関数の作成

木造住宅の殆どは低層住宅に属するが、低層住宅は主に独立住宅と共同住宅から成り立つ。2章では独立住宅の被害関数を作成したので、この被害関数を参考にして集合住宅の被害関数の作成を試みた。調査結果Iでは低層独立住宅の被害率と低層集合住宅の被害率が得られている。そこで、独立住宅と集合住宅の被害にどの程度の差があるかを調べるため、町丁目単位で両者の比較を行った。対象

図3 低層独立住宅の被害関数
(A)全壊・大破、(B)中程度の損傷以上、(C)軽微な損傷以上

表3 独立住宅の被害関数のパラメータ

被害の程度	建築年代	logV0	σ
全壊・大破	-1974	2.18	0.242
	1975-84	2.30	0.256
	1985-	2.55	0.283
中程度の損傷以上	-1974	2.05	0.293
	1975-84	2.16	0.309
	1985-	2.48	0.355
軽微な損傷以上	-1974	1.84	0.368
	1975-84	1.95	0.391
	1985-	2.34	0.468

表4 集合住宅の被害関数のパラメータ

被害の程度	建築年代	logV0	σ
全壊・大破	-1974	2.08	0.231
	1975-84	2.20	0.245
	1985-	2.45	0.273
中程度の損傷以上	-1974	1.95	0.217
	1975-84	2.06	0.229
	1985-	2.38	0.265
軽微な損傷以上	-1974	1.74	0.194
	1975-84	1.85	0.206
	1985-	2.24	0.249

図4 低層独立住宅と低層集合住宅の被害率の比較(町丁目単位)
(A)全壊・大破, (B)中程度の損傷以上, (C)軽微な損傷以上

となる町丁目は、神戸市内での低層独立住宅が40棟以上かつ低層集合住宅が20棟以上となる町丁目である。比較した結果を図4に示す。各被害程度ともに全体的にばらつきはあるが、集合住宅の被害率の方が独立住宅の被害率よりやや高くなる傾向が見られる。このことを考慮するために、独立住宅と集合住宅で被害関数のパラメータを変える必要がある。

図4で比較している独立住宅と集合住宅の被害率は建築年代によらないものである。そこで、表1の建築年代によらない全体での被害率と2.3で決めた $\log V_0/\sigma$ の値を利用して建築年代によらない独立住宅の被害関数を作成した。この独立住宅の被害関数を基準として $\log V_0/\sigma$ の値を保ったまま V_0 を集合住宅での値 V_0' に変えて集合住宅の被害関数を作成した。図4に V_0'/V_0 の値を0.6, 0.8, 1.0とした場合に計算される集合住宅の被害率と独立住宅の被害率の関係を曲線で示す。この図より V_0'/V_0 の値が0.8の場合に実際の被害の分布により近くなることから、 V_0'/V_0 の値を0.8として、建築年代別の低層独立住宅の被害関数から低層集合住宅の被害関数を作成した。図5に得られた集合住宅の建築年代別の被害関数を、表4にそれらの被害関数のパラメータを示す。

4. 強震観測点周辺地域での被害率と推定値との比較

前章で得られた被害関数の妥当性を確認するため、神戸市内の強震観測点のうち地表面ないしそれに準ずる地点での強震記録が得られている本山第一小学校²⁰⁾、葺合²¹⁾、鷹取²¹⁾、NTT神戸²²⁾および六甲アイランド²³⁾の5地点周辺での被害率と推定値との比較を行った。これらの観測点の位置は図6に示すように、震度7の地域ないしその周辺に分布している。被害率の算出に用いた地域は、強震観測点から海岸線に平行な方向に約300mずつ、その直交方向に約100mずつの範囲とした。これは、震災の帯に代表されるように被害の程度がほぼ等しい地域が海岸線に平行な方向に現れる傾向があるためである。なお、本山第一小学校付近では、小学校の南に位置する県道より海側と山側では被害の程度が大きく異なるので、小学校の位置する山側のデータのみを利用した。各観測点周辺での被害率は、低層独立住宅と低層集合住宅の合計値を利用した。

独立住宅と集合住宅の比率は、被害率を求める際に利用した各地域での棟総数の比率を用いた。各観測点での最大地動速度および被害率を表5に示す。強震観測点周辺での建築年代別棟数比は、六甲アイランド以外の観測点周辺では精度の良いデータが得られなかつ

図5 低層集合住宅の被害関数
(A)全壊・大破, (B)中程度の損傷以上, (C)軽微な損傷以上

図6 利用した強震観測点および兵庫県南部地震での震度7の地域

たので、平成5年住宅統計調査報告¹⁹⁾による区単位での木造住宅の建築年代別住宅数の比の値を用いた。この比の値を表6に示す。

以上より、各強震観測地点での最大地動速度と独立および集合住宅の被害関数から各被害率を算出し、それらを独立住宅と集合住宅の棟数比で重み付けして得られた被害率と実際の被害率との比較を行った。その結果を図7に示す。各被害程度において、多少のばらつきはあるものの両者はおおむね良い一致を示し、提案した被害関数の妥当性を示している。

5. 木造建築物群の震害予測

5.1 国土数値情報を利用した地盤の増幅度の推定

著者らは、国土数値情報²⁴⁾の地形分類データを利用して最大速度振幅に対する地盤の増幅度を推定する方法を示している³⁾。この方法により、国土数値情報の基準地域メッシュ(3次メッシュ)単位で地盤の増幅度が得られる。一方、木造建築物の推定棟数データは人口集中地域では2分の1地域メッシュ単位で得られる²⁾。そこで、国土数値情報の地形分類データを緯度経度方向に2分の1に細分割できれば両データのメッシュサイズを合わせることができる。

地形分類はその成因、形態、形成時代などに基づくものである。地形分類を行う際の一つの基準として標高があり²⁵⁾、ある点が近傍の点と同一の地形分類に属するかどうかは標高の違いである程度判断できる可能性が高い。この推測から著者らは標高メッシュデータ(DEM)を利用した地形分類データの細分割手法を既に提案している²⁶⁾ので、本論文においてもその手法を利用した。その結果、2分の1地域メッシュ単位の地形分類図を作成し、これより最大地動速度に対する地盤の増幅度分布を求めた。

5.2 木造建築物群の震害予測例

以上の結果を用いて想定地震に対する木造建築物群の震害予測を行った。想定地震として、横浜港の直下で震源深さ20km、マグニチュード7の点震源を仮定した。5.1で得られた2分の1地域メッシュ単位での増幅度データと岩盤での最大速度振幅を乗じて地表面での最大地動速度を計算した。岩盤での最大速度の計算にはJoyner-Booreの距離減衰式²⁷⁾を利用した。この距離減衰式で基準としている岩盤の平均S波速度は平均で1200m/s程度と考えられ、5.1で基準とした地盤の平均S波速度である600m/sと異なるので、約1.6倍をかけて距離減衰式を補正した³⁾。この想定地震における神奈川県北

表5 強震観測点での最大地動速度とその周辺での低層住宅の被害率

観測点名	区名	最大地動速度(cm/s)	被害率		
			全壊・大破	中程度以上	軽微以上
本山第一小学校	東灘区	79	0.073	0.251	0.641
葺合	中央区	130	0.255	0.386	0.601
NTT神戸	中央区	90	0.137	0.257	0.726
鷹取	長田区	155	0.621	0.860	0.951
六甲アイランド	東灘区	74	0.000	0.000	0.000

表6 建築年代別住宅数の割合

区名 (地域名)	建築年代別の割合		
	1975年以前	1976～85年	1986年以降
東灘区	0.71	0.20	0.09
中央区	0.81	0.14	0.05
長田区	0.77	0.15	0.08
六甲アイランド	0.00	0.00	1.00

図7 強震観測点付近での実際の被害率と推定値の比較
(A)全壊・大破、(B)中程度の損傷以上、
(C)軽微な損傷以上

図8 神奈川県北部における想定地震での最大地動速度分布

図9 神奈川県北部での想定地震により被害を受ける木造建築物棟数分布(軽微な損傷以上)

部地域での最大地動速度の分布を図8に示す。最大で75cm/sである。

この最大地動速度分布と各建築年代での独立・集合住宅別被害関数および前報²⁾で得られた各建築年代での独立・集合住宅別木造建築物棟数を用いて、2分の1地域メッシュ単位での建築年代別木造建築物の震害予測を行った。本論文で作成した被害関数には阪神地区での木造建物の地域的な特性が含まれているものとは考えられるが、東京周辺や大阪周辺などの大都市圏においては近代的様式の木造住宅の普及率が高く住宅様式に大きな差がみられないとの報告²⁸⁾があることより、神奈川県においてこの被害関数を適用しても大きな誤りはないものと判断した。

前報での棟数推定での建築年代区分と被害関数の建築年代区分には3年の年代差を生じているが、この年代差の影響は簡単のため無視することとした。すなわち、建築年代が1971年以前の建築物については1974年以前での被害関数を、1972～1981年の建築物については1975～1984年での被害関数を、1982年以降の建築物については1985～1995年での被害関数を用いた。

前報では、1971年以前の木造建築物の棟数は独立住宅と集合住宅に分けて推定していなかった。そこで、地域メッシュ単位での1981年以前での独立・集合住宅の棟数の比を利用して、1971年以前および1972～1981年での独立・集合住宅の各棟数を求めた。以上の結果から建築年代別に被害を受ける木造建築物棟数を独立住宅と集合住宅別に求め、それらの合計値を被害棟数とした。神奈川県北部地域での軽微な損傷以上を受ける木造建築物棟数の分布を図9に示す。地震動が強くかつ古い木造建築物が多いメッシュで被害が大きくなっている。この地域で軽微な損傷の被害を受ける棟総数は、約5万棟であった。また、全壊・大破および中程度の被害を受ける棟総数は、それぞれ約2百棟および約7百棟であった。

6. 結論

本論文では、兵庫県南部地震での木造建築物の建築年代別被害調査結果とその地域での推定最大地動速度から木造建築物の建築年代別の被害関数を作成し、木造建築物の震害予測を行う手順を示した。以下にその結果をまとめて示す。

- (1) 兵庫県南部地震で東灘西部地区での木造建築物の建築年代別被害調査結果とその地域での推定最大地動速度から木造独立住宅の建築年代別の被害関数を作成し、年代の古い建物ほど被害を受けやすい傾向を定量化した。
- (2) 神戸市内の低層独立住宅と低層集合住宅の被害率を町丁目単位で比較し、その結果に基づいて独立住宅の被害関数の平均的耐震強さを0.8倍に修正することによって低層集合住宅の被害関数を作成した。
- (3) 強震観測点5地点での最大地動速度と本論文で提案した被害関数を用いて被害率を算出した。これらの値と強震観測点付近の実際の被害率を比較したところ、おおむね良い一致を示した。
- (4) 前報での地域メッシュ統計から建築年代別の木造建築物棟数を推定する手法、著者らが提案した国土数値情報から最大地動速度を推定する手法および本論文で作成した低層住宅の建築年代別被害関数を利用して、簡便に木造建築物群の震害を予測する手順を示した。この手法を神奈川県北部地域に適用して木造建築物群の震害予測例を示した。

謝辞

本研究では、近畿大学村上教授らによる建築物の被害調査結果および、建築学会近畿支部都市計画部会、日本都市計画学会関西支部および兵庫県都市住宅部計画課が建築物の被災度を調査しそれを建設省建築研究所がまとめた結果を利用させていただきました。また、本研究で用いた強震記録は、関西地震観測研究協議会、大阪ガス、鉄道総合技術研究所、N T T、積水ハウスにより観測されたものです。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 大橋好光：兵庫県南部地震被害調査からわかったこと、木造住宅の耐震性、日本建築学会木質構造運営委員会、pp. 3-21, 1996.
- 2) 長谷川浩一、翠川三郎：地域メッシュ統計を利用した木造建築物群の震害予測ーその1ー建築年代別の木造建築物群の推定ー、日本建築学会構造系論文報告集、No. 497, pp. 75-80, 1997.
- 3) 松岡昌志、翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測、日本建築学会構造系論文集、No. 447, pp. 51-56, 1993.
- 4) 物部長徳：土木工事震害調査報告、震災予防調査会報告、第100号(丁)、pp. 1-65, 1926.
- 5) 岡田成幸、鏡味洋史：震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成、地震、Vol. 2, No. 44, pp. 93-108, 1991.
- 6) Applied Technology Council, Earthquake Damage Evaluation Data for California (ATC-13), Redwood City, CA, pp. 1-348, 1985.
- 7) 東京都防災会議：地震の震度解説表、1980.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 村上雅英、藤田宣紀、三澤文子、田原賢：東灘西部を中心とした被害調査とその考察、1995年兵庫県南部地震ー木造建物の被害ー、pp. 49-67, 1995.
- 11) 童華南、山崎文雄、佐々木裕明、松本省吾：被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係、第9回日本地震工学シンポジウム、Vol. 2, pp. 2299-2304, 1994.
- 12) 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(その1)ー木造構造物の地震応答推定ー、京都大学防災研年報、第31号B-1, pp. 105-126, 1988.
- 13) 川瀬博、佐藤智美、松島信一、入倉孝次郎：余震観測記録に基づく兵庫県南部地震時の神戸市東灘区における本震地動の推定、日本建築学会構造系論文報告集、No. 476, pp. 103-112, 1995.
- 14) 時松孝次、新井洋、浅香美治：微動観測から推定した神戸市住吉地区の深部S波速度構造と地震動特性、日本建築学会構造系論文報告集、No. 491, pp. 37-45, 1997.
- 15) 入倉孝次郎：震源メカニズムと地震動、建築雑誌、Vol. 110, No. 1377, pp. 15-18, 1995.
- 16) 源栄正人、永野正行：深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の増幅特性解析、日本建築学会構造系論文報告集、No. 488, pp. 39-48, 1996.
- 17) 川瀬博：堆積盆地が強震動に与えた影響ーメキシコシティの場合と神戸市の場合ー、第23回地盤震動シンポジウム講演集、pp. 83-91, 1995.
- 18) 童華南、山崎文雄、清水善久、佐々木裕明：計測震度と従来の地震動強さ指標の対応関係、土木学会第51回年次学術講演会、pp. 458-459, 1996.
- 19) 総務庁統計局：平成5年住宅統計調査報告都道府県編、財団法人日本統計協会、1995.
- 20) T. Kagawa, K. Irikura and I. Yokoi: 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.
- 21) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集、日本建築学会、1996.
- 22) 奥田賢持、赤木久真、土肥博、二宮利文、翠川三郎、松岡昌志：兵庫県南部地震におけるN T T建物の地震記録について(その3)ー常時微動による神戸駅前ビルの震動特性及び地表面波の推定ー、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp. 547-548, 1996.
- 23) 積水ハウス株式会社六甲開発事業部：六甲アイランドCITY 1995年兵庫県南部地震の地震動観測記録と分析、積水ハウス株式会社、1996.
- 24) 国土庁計画調整局・国土地理院：国土数値情報、国土情報シリーズ2、大蔵省印刷局、1987.
- 25) 大矢雅彦編：地形分類の手法と展開、古今書院、pp. 4-9, 1987.
- 26) 長谷川浩一、翠川三郎：DEMを利用した地形分類メッシュデータの細分割法について、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp. 25-26, 1997.
- 27) Joyner, W. B. and Boore, D. M.: Prediction of Earthquake Response Spectra, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept., 82-977, 16pp, 1982.
- 28) 大垣直明：戸建新築住宅における住宅様式の地域性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 F, pp. 801-802, 1994.

(1997年6月10日原稿受理、1997年10月1日採用決定)