

建物損傷度関数と棟死亡率関数の地震防災への利用法

一人命損失に着目した木造低層建物の被害率関数の作成と震害予測例—

ESTIMATION MODEL FOR CASUALTIES IN
WOODEN HOUSES DAMAGED BY EARTHQUAKE

Vulnerability function of wooden houses paying attention to life loss

田畑直樹*, 岡田成幸**, 高井伸雄***

Naoki TABATA, Shigeyuki OKADA and Nobuo TAKAI

We know the fact that almost all the people are killed by collapsed wooden houses in earthquake, but a precise estimation method for casualties hasn't existed in the field of earthquake engineering. In this paper we reconstruct the vulnerability function and damage index function for wooden building in order to estimate damaged building under the state that many people are killed. Combination of this function and Death Risk Function gives us the preventive information for individual and the precisely estimated casualties in wide areas for municipal prevention project.

Keywords: 1995Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Damage Index, Vulnerability Function, Death Rate Function,
Lower Wooden houses, Macro Seismic Risk Mapping

1995年兵庫県南部地震, 損傷度, 被害率関数, 棟死亡率関数, 木造低層建物, 広域地震被害評価

1. はじめに

地震時の被害推定に被害率関数がよく用いられる。特に木造低層建物については1995年兵庫県南部地震後、以下のような多くの研究が報告されている。

長谷川・他¹⁾は、建築研究所データと東灘区西部地区の木造低層建物について村上・他²⁾が行った建築年代別被害調査結果を用いて、建築年代別の被害率関数を作成している。林・他³⁾は、地盤モデルのFEM解析によって再現した推定地震動と建築研究所⁴⁾がまとめた建物被害調査データを用いて最大地動速度を推定し、木造低層建物他の被害率関数を作成している。村尾・山崎⁵⁾は自治体調査の建物被害を用いて構造別に建物被害関数を構築している。筆者らは関連の関数として、上記被害率関数の他に、建物棟あたりの損傷度を評価する損傷度関数⁷⁾および一棟あたりの居住者死亡率を評価する棟死亡率関数⁸⁾を提案している。

先の研究⁸⁾において、建物倒壊に伴う死者の発生は、全壊のうち層崩壊を伴うDamage Level (D5およびD6) において急増することが判明した。Damage Levelについては、図1および文献9を参照されたい。地震時の死者推定にとり住家被害を全壊で一括りにするのはなく、D5・D6の被害区分を行うことが決定的に重要である。本稿では上記関数群をこの観点より見直し、死者推定精度向上を図る。そして再構成された関数群^{7,8)}を組み合わせることによる被害軽減への利用法について述べる。

2. 人命損失に着目した被害率関数の作成

既述のとおり、木造建築物の被害率関数は多数考案されているものの、死者発生に影響する建物被害程度を細分化し、被害率関数として提案されているものは少ない。多くは、無被害・一部破損・半壊・全壊の4区分であり、死者が発生する閾値としてのDamage Level D5以上の被害率関数は岡田・高井⁹⁾によるもののみである。しかしこれも、死者発生が急増するD6 LEVELについては言及せずD5とD6を一括りで扱っている。死者発生の観点で地域被害評価をする場合に必要となるD6 LEVELの被害率関数をまず構築する。

2.1 使用した関連データ

地震による木造建物倒壊で多くの死者が発生した1995年兵庫県南部地震のデータを主に、地域への地震動入力と建物被害率の関係を求める。地震動入力として、林・他³⁾が木造低層建物被害率から町丁目毎に推定した最大地動速度分布を用いる。建物被害については、震災復興まちづくり特別委員会（以下、震特委員会と呼ぶ）がまとめた⁹⁾ものが良く知られているが、人的被害との関係性を考えた場合、建物損傷程度の分解能（全壊または大破、半壊、一部破損、無し）が低いため本研究には使えないことが懸念される。棟死亡率を求めた先の研究と同様に、破壊パターン⁹⁾（図1）を被害指標として筆者等が航空写真を立体視して読み取った兵庫県南部地震の木造低層建物被害データベースを用いる。読み取り地区の詳細情報については先の報告⁸⁾を参照されたい。表1に地域ごとに集計した木造低層建物の被害数を住宅形式別に示す。木造低層建物は、最も甚大な被

* 北海道大学大学院工学研究科 修士(工学)
(現 東京海上日動リスクコンサルティング株)

** 名古屋工業大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

Graduate Student, Grad. School of Engineering, Hokkaido University, M. Eng.
(Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd.)

Prof., Grad. School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Grad. School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

害が発生した東灘区を始めとし計6区からサンプリングした。調査項目は、①被害区分(D0~D6LEVEL)、②階層、③判定の信頼度(3段階)である。図1に示したDamage Levelと自治体被災度との対応関係から、Damage Levelを用いて全壊・半壊・一部損壊を別途判別した。尚、この調査は建物倒壊に伴う死者を対象としているため火災による建物被害は除いてある。

2.2 木造低層建物の被害率関数

被害率関数の関数型は、本論と建物被害尺度を同じくする岡田・高井⁹⁾に倣い、正規分布の累積確率分布関数を用いて式(1),(2)で表せると仮定し、上記に作成した町丁目ごとの被害率データに対して、最小2乗法で回帰を行なった(図2)。

$$V(s) = \int_{-\infty}^s \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(2\log(s)-s_0)^2}{2\sigma^2}} ds \quad (1)$$

$$V(s) = \int_{-\infty}^s \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(s-s_0)^2}{2\sigma^2}} ds \quad (2)$$

ここに、V(s)はある損傷度(D-LEVEL)以上の被害率(定義域[0,1.0])、sは地震動強さ(式(1)では最大地動速度[cm/sec]、式(2)では震度)、s₀は各D-LEVEL以上の被害を発生する地震動の平均強さ、σは標準偏差である。なお、最大地動速度と震度との関係は、以下のMuramatu¹⁰⁾の式を用いている。

$$\log V_{max} = I/2 - 1.4 \quad (3)$$

ここに、V_{max}は最大地動速度、Iは震度である。但し、この式は震度IとI-1の境を与えるものであるため、現行の震度Iの定義幅[I-0.5, I+0.5]に対応するように変換して用いた。最終結果は、一部破損(D1・D2LEVEL)については、航空写真の被害読み取り精度から判断し岡田・高井による被害率関数のパラメータをそのまま用いた。また半壊(D3LEVEL)については、回帰により求められた関数が全壊(D4・D5・D6LEVEL)についての関数と交差するのを避けるため、平均強さは岡田・高井の既存値とし、標準偏差について今回得られた値と既存値との平均とするなど、被害率関数群としての矛盾を避けるための若干の操作を行っている。最終的に求められた被害率関数のパラメータを図3、表2に示す。これにより、今まで全壊として一括りに扱っていたものが、D4・D5・D6LEVELと細分化す

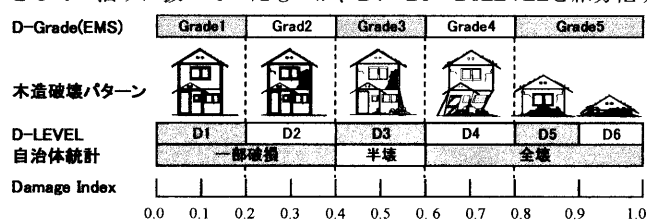


図1 各種の被害尺度の関係

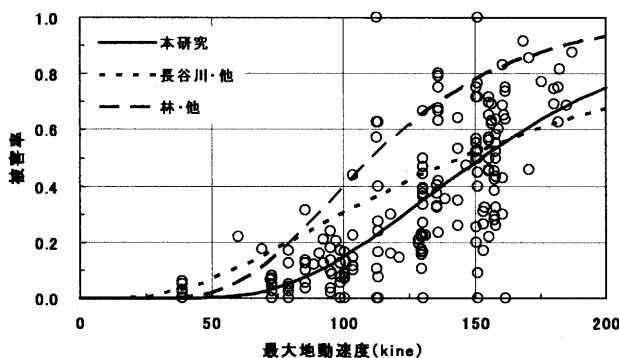
表1 木造低層建物被害の集計

住宅形式	D-LEVEL	DIndex	東灘	灘	中央	兵庫	長田	須磨	計
木造独立	D6	0.9-1.0	139	22	31	60	65	51	368
	D5	0.8-0.9	308	14	96	195	79	78	770
	D4	0.6-0.8	255	65	101	236	132	110	899
	D3	0.4-0.6	104	25	90	143	61	161	584
	D2	0.2-0.4	167	87	535	238	126	470	1623
	D1	0.0-0.2	150	333	686	416	286	920	2771
	D0	0.0	106	335	875	277	282	643	2518
計			1229	881	2414	1565	1011	2433	9533
木造集合 (長屋・共同建)	D6	0.9-1.0	34	17	14	36	23	2	126
	D5	0.8-0.9	121	34	48	120	52	9	384
	D4	0.6-0.8	43	105	71	113	60	16	408
	D3	0.4-0.6	12	49	67	76	59	22	285
	D2	0.2-0.4	11	79	317	80	125	43	655
	D1	0.0-0.2	13	185	317	142	169	64	890
	D0	0.0	20	127	405	60	175	61	848
計			254	596	1239	627	663	217	3596

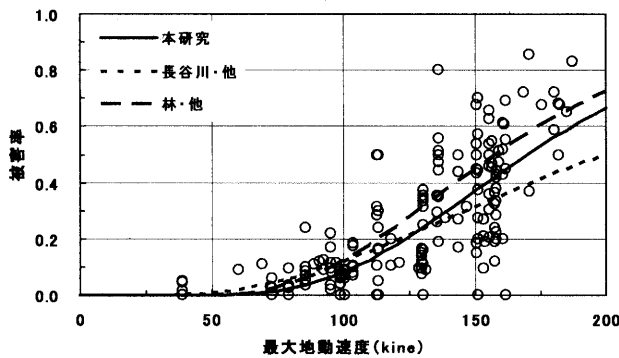
ることができた。

2.3 木造低層建物の損傷度関数の作成

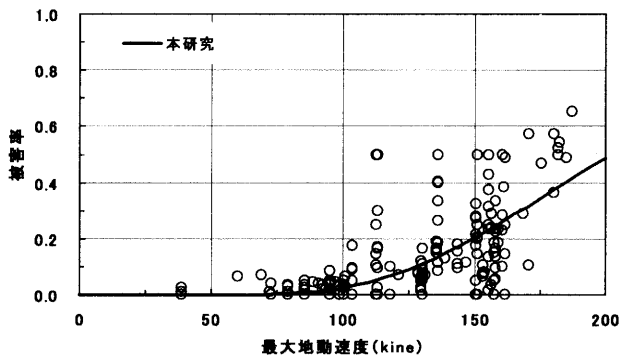
前節の被害率関数を用いることで建物を地域単位で被害評価することが可能になる。一方、近年、住民レベルの防災の必要性和意識の高まりから、個別の建物損傷評価に関する研究が行われつつある。この流れを受け、筆者等は、木造低層建物に関して棟別の被害評価関数(損傷度関数)⁷⁾および住宅形式別(一戸建・集合住宅)に個



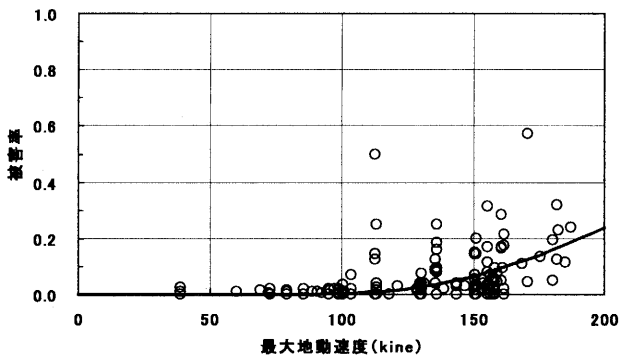
(1) 被害率関数(D3LEVEL)



(2) 被害率関数(D4LEVEL)



(3) 被害率関数(D5LEVEL)



(4) 被害率関数(D6LEVEL)

図2 各損傷度(D-LEVEL)の実被害と作成した被害率関数

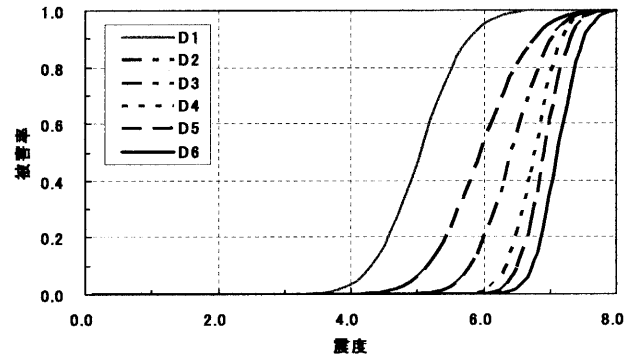
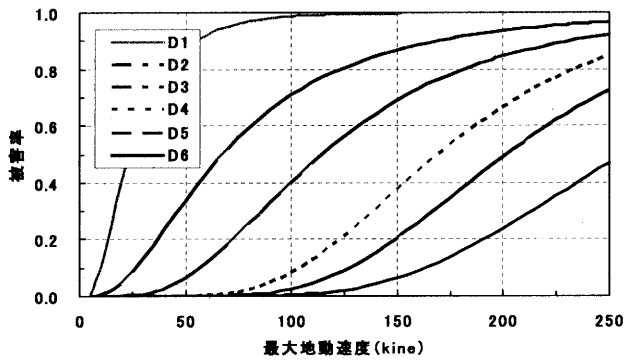


図3 作成した木造低層建物被害率関数

別の建物損傷度と人命損失の関係⁹⁾を議論してきた。木造建物の損傷度関数は以下のようなものである。

岡田・高井⁷⁾は、木造低層建物に関して、保有耐力（ここでは耐震精密診断値¹¹⁾）が小さいものから確定的に損傷するという確定的観点により、地震動入力と耐震精密診断値、損傷度 (D.Index) の関係をワイブル分布で提案し、地域の建物群の被害を表す被害率関数と区別するために、損傷度関数と称している (式(4))。

$$F(s) = 1 - e^{-\left(\frac{s}{m}\right)^\eta} \quad (4)$$

ここに、 $F(s)$ は建物損傷度 (D.Index[0,1])、 s は地震動入力 (震度又は最大地動速度(kine))、 m, η はそれぞれ、当該建物の耐震精密診断値に対応する形状母数と尺度母数である。

しかしながら、関数作成の基とした被害率関数には、人命にとって最も危険な建物損傷であるD6 LEVELが考慮されていない。損

傷度関数の評価精度向上を図り、前節で作成した被害率関数を用いて損傷度関数を新たに作成し直した。耐震診断値に関しては、文献7と同様、日本木造住宅耐震補強事業者共同組合が纏めたデータの内大阪圏のそれを用いている。診断値には基礎・地盤の評点も含まれる。図4,5に概形を、表3に求められたパラメータを示す。なお、損傷度関数を作成するための詳細な手順については、文献7を参照され

表2 被害率関数パラメータ

入力指標: s	PGV s = log ₁₀ (PGV)		震度 s = 震度	
	S ₀	σ	S ₀	σ
D LEVEL				
D6以上	4.82	0.307	7.12	0.307
D5以上	4.61	0.310	6.91	0.310
D4以上	4.46	0.329	6.76	0.329
D3以上	4.12	0.475	6.42	0.475
D2以上	3.66	0.621	5.96	0.621
D1以上	2.74	0.574	5.04	0.574

表3 作成した損傷度関数のパラメータ

入力指標: S	PGV s = log ₁₀ (PGV)		震度 s = 震度	
	Is_wd	m, η	m, η	
0.1	1.41	44.84	7.66	5.5
0.2	1.64	71.79	9.86	6.0
0.3	1.81	94.73	11.45	6.2
0.4	1.95	115.45	12.75	6.4
0.5	2.06	134.70	13.87	6.5
0.6	2.16	152.88	14.86	6.7
0.7	2.26	170.23	15.77	6.8
0.8	2.34	186.91	16.60	6.8
0.9	2.42	203.04	17.37	6.9
1	2.49	218.71	18.09	7.0
1.1	2.56	233.98	18.76	7.0
1.2	2.62	248.91	19.40	7.1
1.3	2.68	263.53	20.01	7.1
1.4	2.74	277.88	20.58	7.2
1.5	2.79	291.99	21.13	7.2
2	3.01	359.69	23.51	7.4
2.5	3.19	423.95	25.42	7.6
3	3.32	485.91	26.96	7.7

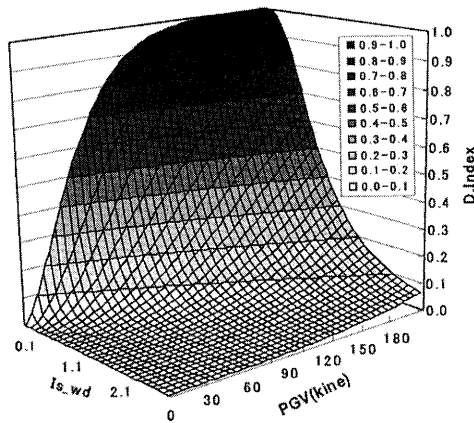
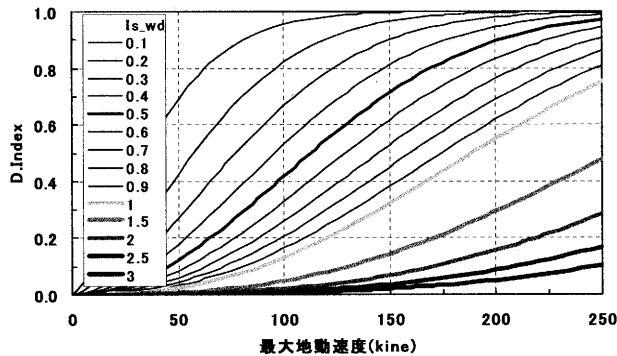
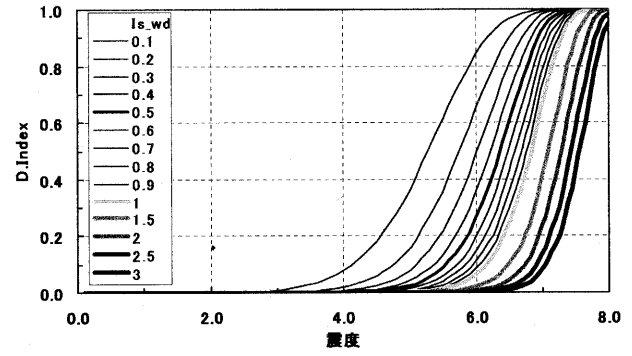


図4 木造低層建物損傷度関数3次元表示



(1) 地震動入力を最大地動速度にといった場合



(2) 地震動入力を震度にといった場合

図5 木造低層建物損傷度関数2次元表示

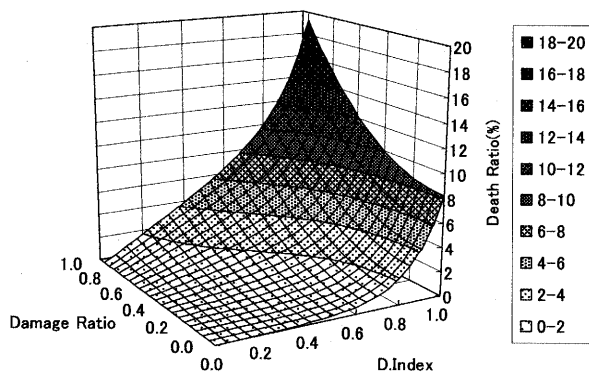


図6 木造低層建物棟死亡率関数3次元表示(木造独立)

表4 木造低層建物棟死亡率関数パラメータ

住宅形式	木造独立	木造集合(長屋・共同建)
a	0.0104	0.000580
b	6.68	9.32
c	11.0	6.69

たい。

3. 損傷度関数・棟死亡率関数を用いた各種被害予測

作成した損傷度関数と以下の棟死亡率関数⁸⁾を用いることで、個人への防災情報としての個別建物の損傷度評価・死亡リスク評価・耐震補強策効果評価などのミクロ的防災への応用、および行政への防災情報として広域の建物被害率や損傷分布評価・死亡リスク評価・耐震補強策効果評価などのマクロ的防災への応用が可能になる。

個別の木造低層建物損傷度に対する住民の死亡危険度(棟死亡率 $Dr(\%)$) は以下に定義される。

$$Dr = \frac{Dn}{Pn} \times 100 \quad (5)$$

ここに Dn は建物一棟あたりの死者数、 Pn は地震発生時のその建

物内における在宅者数である。また棟死亡率を推定する関数(棟死亡率関数)は、住宅形式(木造独立・集合(長屋建・共同建))別に $D.Index$ と周辺全壊率を用いて以下の式(6)で表される(図6)⁸⁾。

$$Dr(x, y) = ae^{bx} + cxy^2 \quad (6)$$

ここに、 $Dr(x, y)$ は棟死亡率 (%) を表す。 x は建物損傷度 ($D.Index$)、 y は周辺全壊 (1km四方における $D.LEVEL:D4$ 以上、 $D.Index$ 0.6-1.0) 率 ([0,1])、 a, b, c は住宅形式別の係数である(表4)。以下に、活用事例を示す。

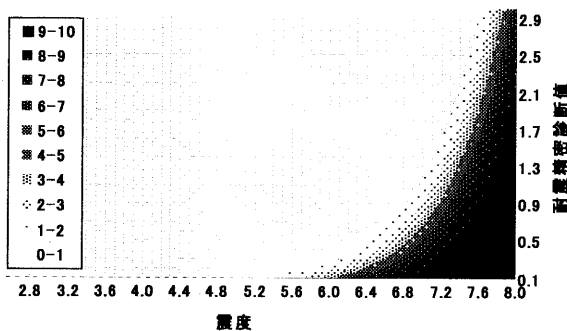
3.1 個別建物における人的被害評価への利用法

損傷度関数(地震動・耐震診断値・損傷度)の3次の関係と棟死亡率関数(損傷度・周辺全壊率・棟死亡率) (式(6))の3次の関係を、使用者の目的に応じて図式化することで、個別建物における人的リスク評価が容易になる。ここではそのためのノモグラムを例示して、その使用方法を示す。

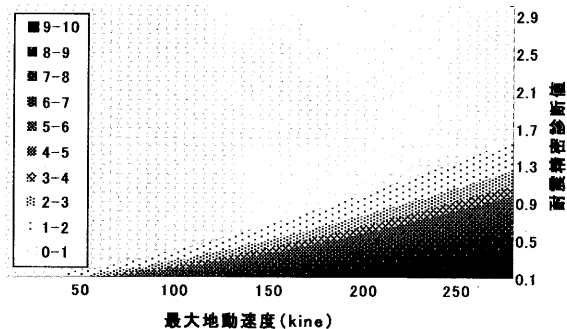
(1) 建物の必要保有強度推計への利用

わが家に必要な耐震強度はどの程度なのだろうか。従来、個人が住宅に求める性能として耐震強度はそれほど明示されることはなかった。しかし、2000年施行の住宅品質確保促進法(品確法)以来、住宅の必要性能や保有性能が強く意識されるようになってきている。人的被害軽減の観点より必要性能を明らかにしてみよう。ここに提案の損傷度関数および棟死亡率関数を利用することにより、既知情報として自治体等が公開した地震ハザード等が与えられたとき、人命損失を軽減するために、住宅の耐震精密診断値をどの程度上げる必要があるかを世帯主に情報提供することが可能である。図7 (1)

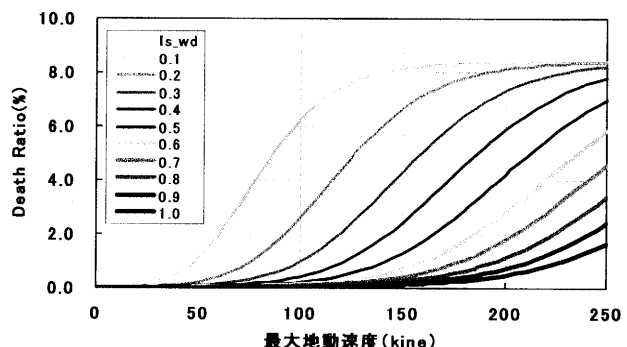
(2) は、損傷度関数(式(4))と棟死亡率関数(式(6))において、周辺の全壊率を0.3 (30%) と仮定し、地震動入力と耐震精密診断値



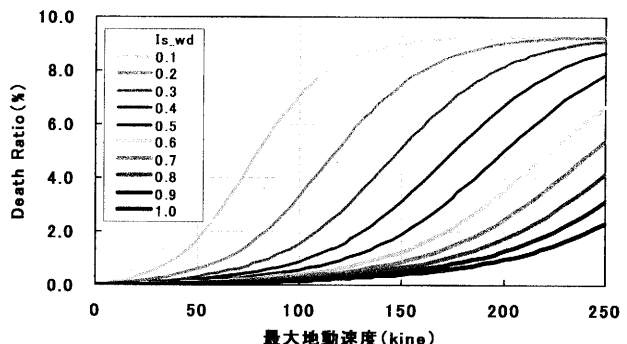
(1) 震度、耐震診断値と棟死亡率(%) (全壊率30%の場合)



(2) 最大地動速度、耐震診断値と棟死亡率(%) (全壊率30%の場合)



(3) 最大地動速度(kine)、棟死亡率(%)と耐震診断値(全壊率10%の場合)



(4) 最大地動速度(kine)、棟死亡率(%)と耐震診断値(全壊率30%の場合)

図7 地震動入力(最大地動速度・震度)・耐震精密診断値・棟死亡率(%)の関係

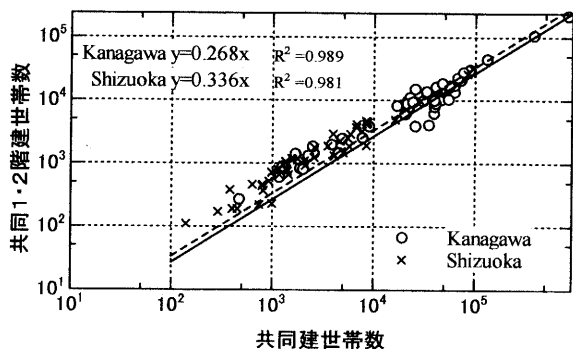


図8 共同建世帯数と1.2階建世帯数の関係(静岡県・神奈川県)

に対する木造独立住宅における棟死亡率をパラメータとしてノモグラム化したものである。同図を用いることで現状の死亡リスクは勿論のこと、耐震補強による人命損失の軽減効果が推定できる。例えば、耐震精密診断値0.1の木造独立建物が、震度7(下限6.5)と推定される地域にあり、周辺建物が30%全壊した際の、住人の死亡率は少なくとも8%である。仮に1%以下に軽減するためには最低限、凡そ耐震診断値0.7まで耐震補強が必要であると判断できる。耐震補強における費用対効果に関する資料¹²⁾を加えると、これに要するリフォーム費用は、床面積80m²の住宅で約78万円と見積もることができる。

(2) 地域防災への利用

地方自治体等の防災対策の意思決定者が、地域の耐震診断値分布を把握した上で、どの強度を持った建物に対して優先的に耐震補強の補助を行なうべきかを検討するための基本情報となる。図7(3)(4)は、木造独立住宅について、損傷度をパラメータとして横軸に最大地動速度(kine)、縦軸に棟死亡率(%)をとったノモグラムである。100kineを想定した際、死亡率を1%以下に抑えるためには、周辺全壊率10%では、診断値0.1~0.2、30%では0.1~0.3の建物を補強する必要があることがわかる。

3.2 地域メッシュ統計を用いた広域震害評価への利用法

3.2.1 地域メッシュ統計について

本提案の棟別評価関数を地域に適用し、その評価結果を地域で総和することにより、精度の高い広域震害評価が可能となる。その際に必要となるのが関連地域データであるが、たとえば総務省統計局¹³⁾が地域メッシュ統計として提供している国勢調査及び事業所統計調査の結果が利用できる。地域メッシュ統計とは、全国を緯度・経度に基づき約1km四方あるいは約500m四方に区切ったそれぞれの区域(メッシュ)に関して統計データとして編成したものである。

本論では、平成7年の国勢調査をまとめた地域メッシュ統計(1km

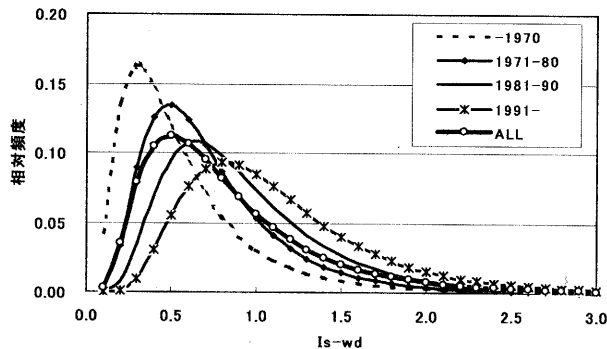


図9 首都圏の年代別耐震診断値の確率密度分布

表5 住宅金融公庫の支店区分と木耐協データ

支店名	棟数	都道府県
北海道	90	北海道
東北	1535	青森県・岩手県・宮城県・秋田県・山形県・福島県
北関東	653	栃木県・群馬県・新潟県・長野県
北陸	182	富山県・石川県・福井県
首都圏	13787	東京都・神奈川県・茨城県・埼玉県・千葉県・山梨県・静岡県
名古屋	8397	岐阜県・愛知県・三重県
大阪圏	4139	滋賀県・京都府・大阪府・兵庫県・奈良県・和歌山県
中国	524	鳥取県・島根県・岡山県・広島県・山口県
四国	714	徳島県・香川県・愛媛県・高知県
福岡	84	福岡県・佐賀県・長崎県
南九州	271	熊本県・大分県・宮崎県・鹿児島県

表6 全国木造低層建物の耐震精密診断値パラメータ

北海道・東北・北関東・北陸			首都圏		
年代	μ	σ	年代	μ	σ
-1970	-0.990	0.808	-1970	-0.775	0.663
1971-80	-0.514	0.613	1971-80	-0.441	0.531
1981-90	-0.209	0.552	1981-90	-0.187	0.506
1991-	-0.044	0.497	1991-	0.015	0.471
全年代	-0.382	0.683	全年代	-0.342	0.598
名古屋圏			大阪圏		
年代	μ	σ	年代	μ	σ
-1970	-0.911	0.725	-1970	-0.845	0.737
1971-80	-0.544	0.517	1971-80	-0.520	0.550
1981-90	-0.347	0.494	1981-90	-0.366	0.529
1991-	-0.163	0.501	1991-	-0.177	0.526
全年代	-0.503	0.621	全年代	-0.480	0.625
中国・四国・福岡・南九州			全国		
年代	μ	σ	年代	μ	σ
-1970	-0.831	0.658	-1970	-0.846	0.708
1971-80	-0.476	0.555	1971-80	-0.485	0.540
1981-90	-0.328	0.576	1981-90	-0.264	0.520
1991-	-0.114	0.456	1991-	-0.072	0.496
全年代	-0.416	0.607	全年代	-0.412	0.620

×1km)を利用して木造低層建物・人的震害予測方法を以下に示す。

3.2.2 地震ハザードを既知情報とした広域震害評価例

防災科学技術研究所では、平成17年5月より、地震調査研究推進本部地震調査委員会(以下、推本と呼ぶ)が作成した「全国を概観した地震動予測地図」を「確率論的地震動予測地図」と「震源断層を固定した地震動予測地図」の2種類に関してWeb上で公開している¹⁴⁾。本論では、後者の中から、一例として東海・東南海・南海地震連動を想定した予測地震動分布を用いて神奈川県・静岡県をフィールドに広域震害予測を行なう。地震動予測地図は地域メッシュ統計と同様に1km四方を単位に計算結果が作成されており、GISソフトウェアを利用して両者を対応付けることが容易である。

(1) 木造低層建物の棟数の推定

被害予測を行うには、木造低層建物数をメッシュ単位で把握する必要があるが、地域メッシュ統計には木造棟数は明記されていない。我々が建物数を推定するために利用できそうなのは、世帯情報に限られる。長谷川・翠川¹⁵⁾は、首都圏を対象として、市町村毎の住宅土地統計調査¹⁶⁾と地域メッシュ統計を対応付けることで、地域メッ

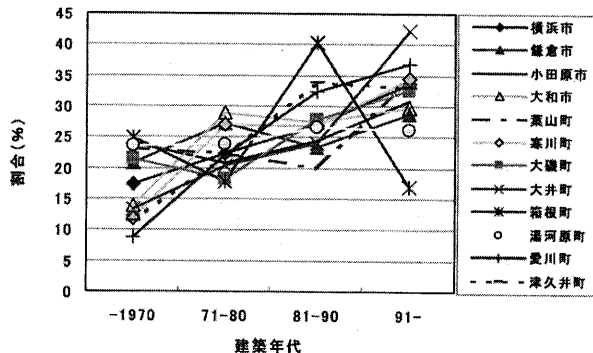


図10 神奈川県の木造建物建築年代

メッシュ単位での各種世帯数と木造低層建物数との関係を式(7)に得ている。本論はこれを用いることにする。

$$Ih_i = 0.99A_i \quad Nh_i = 0.47B_i \quad Kh_i = 0.23rC_i \quad (7)$$

ここに、 Ih_i は一戸建て木造建物数、 Nh_i は長屋建木造建物数、 Kh_i は共同建木造建物数、 A_i, B_i はそれぞれ一戸建、長屋建世帯数である。 r は共同建世帯数の内、1・2階世帯数の割合である。 C_i は共同建世帯数である。尚、 r はメッシュ統計情報から得ることが困難なので、都道府県別に国勢調査の市町村値を平均したもので代用することにする。図8に静岡県の市区町村における共同世帯数に占める1・2階世帯数の割合を示す。線形関係が非常に強いので図8の傾き（一定）とする。

(2)木造低層建物耐震診断値の推定

損傷度関数を用いる際に、地域の耐震診断値を把握する必要があるが、耐震診断値の分布をメッシュ単位で推定することは困難である。そこで、耐震診断値は地域と建築年代で大凡の推定が可能であることに着目し¹⁷⁾、日本木造住宅耐震補強事業者共同組合（以下、木耐協と呼ぶ）がまとめた木造の耐震精密診断値¹¹⁾（旧診断）データを用いて当該地域の耐震診断値の分布を推定することを試みる。表5は、簡単のために住宅金融公庫¹⁸⁾の支店区分に沿って木耐協データを集計したものである。さらに木造住宅の地域的構造特性より全国を5地域に分けて、建築年代（4期間）毎の耐震診断値の密度分布を求め、対数正規確率密度分布（式(8)）で表すことができると仮定して最小2乗法的に回帰を行なった（表6）。

$$P(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma w} e^{-\frac{(\ln(w/\mu))^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

ここに、 $P(w)$ は相対頻度、 w は耐震精密診断値、 μ は分布の平均値、 σ はその標準偏差である。建築年代を4期間としたのは、1970年以前、1971～1980年、1981～1990年、1991以降とする区切りが耐震基準の改訂を考慮することができる他、統計上最も利用しやすいことによる。求められた地域別耐震診断値頻度分布（表6）のうち首都圏について図9に示す。表6より、地域性として認められる耐震力の差はあるものの、傾向としていずれの地域も建築年代が新しくなるにつれ着実に平均的診断値 μ が高くなってきていること、そして標準偏差 σ が小さくなってきており、住宅の構造性能としての品質が安定してきていると理解でき、建築技術の向上が浸透しつつある。あるメッシュ内における木造低層建物の建築年代が与えられたとしたときの耐震診断値は、地域内で一定であると仮定して、表6の値を用

いることとする。

(3)木造低層建物建築年代

メッシュ内の建物の耐震診断値を得るに必要な次なる情報は、メッシュごとの住家の建築年代である。我々が一般に入手できる木造の建築年代に関する資料に、総務省住宅土地統計¹⁶⁾がある。住宅土地統計は、住宅及び住宅以外で人が居住する建物に関する実態並びに現住所以外の住宅及び土地の保有状況その他の住宅等に居住している世帯に関する実態を調査し、住宅・土地関連諸施策の基礎資料を得ることを目的として5年ごとに実施されているものである。図10は、平成15年統計の神奈川県の木造住宅に関して、市部と町村部の一部について建築年代を前述の4期間で示したものである。同じ県内でも大きく異なることが見て取れる。本論では、簡単のために、建築年代は行政界内で均一であると仮定し、統計表に記載のある市区町村には、この建築年代別建物数割合を用いる。無い場合は、県平均値を代用することでメッシュ毎の建築年代別の木造低層建物数を推定することとする。

3.2.3 木造低層建物破壊に伴う人的被害の推定

建物の損傷に伴う死者を考える上で、建物内の人口を精確に推定する必要がある。本論では以下の方法で推定する。

(1)各住宅形式別の棟人口の推定

あるメッシュ内の世帯人口は、世帯人口が住宅形式や建物構造に依らず一定と見なせば、メッシュの総人口を各住宅形式の総世帯数で除すことで近似できる。そこで、以下の式で表すこととする。

$$Ip_i = P_i / (A_i + B_i + C_i) \quad (9)$$

ここに、 Ip_i はメッシュ内の平均世帯人口（＝一戸建棟人口）、 P_i は総人口、 A_i は一戸建世帯数、 B_i は長屋建世帯数、 C_i は共同建世帯数である。長屋建や共同建の棟人口は、 Ip_i に棟内の世帯数を乗じることで得られる。従って、各住宅形式別の棟人口は以下に近似される。

$$Ip_i' = Ip_i \quad Np_i' = \alpha Ip_i \quad Kp_i' = \beta Ip_i \quad (10)$$

ここに、 Ip_i' は一戸建棟人口、 Np_i' は長屋建棟人口、 Kp_i' は共同建て棟人口である。 α, β は住宅土地統計（全国編）の木造住宅に関する1棟内住宅数の値を用いる。（平成15年統計： $\alpha=2.87, \beta=5.63$ ）

(2)在宅率による建物内人員の補正

建物内人口は、時刻・曜日によって大きく変動する。故に人的被害の推定をする際には、地震が発生する曜日・時間を想定して、その時どれだけの住民が建物内に滞留しているかを考慮に入れる必要

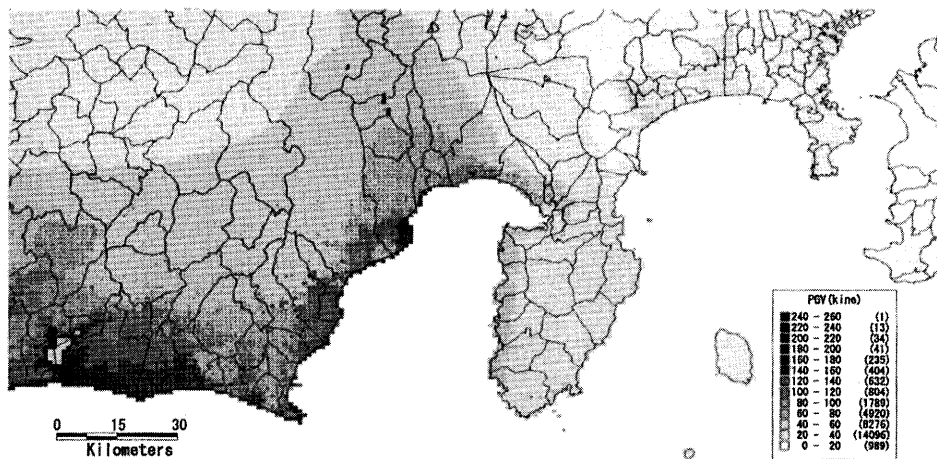


図11 東海・東南海・南海地震運動を想定した際の、推定最大地動速度分布（推本）

がある。NHK放送文化研究所¹⁹⁾では、より良い放送をする目的で都道府県別、都市規模別等の区分で住民の一日の行動を調査している。都道府県内で時刻別在宅率は一定であると仮定し、建物内人口に、都道府県別の想定時刻における在宅率を乗じることで地震発生想定時の精確な建物内人口を把握することができる。

3.2.4 地震ハザードを既知情報とした広域震害予測結果

以上の準備作業の後、東海・東南海・南海地震が連動で平日24:00に発生したと想定して、推定結果を以下に示す。

図11は推本が発表した同地震の推定最大地動速度分布であり、本研究の地震動入力はこれに則っている。静岡県の南海岸部で特に大きな速度が推定されている。図12に木造低層建物での推定死者数分布を示す。静岡県南部の人口集中地域で甚大な人的被害が発生しており、死者最多発地域で1km²当り120名程度と推定された。静岡県・神奈川県全体では、凡そ13,500名（静岡県13,394名、神奈川県68名）の死者数が推定された。

ところで、棟死亡率関数（図6）によれば、周辺全壊率を無視して、建物の損傷を概ねD.Index<0.8（層破壊しない）に抑えることができれば、死亡危険性はそれほど高くはない。つまり、D.Indexが0.8を超過する建物を優先的に耐震補強することにより、効果的に死者数を軽減することが可能となる。図13は、D.Index>=0.8（層破壊する）の建物数を推定したものである。すなわち、早急に耐震補強を

行うべき建物の分布とみなすことができる。

本論では個々の建物の強度（耐震診断値）を被害推定要因の一つに設定しているため、時間経過に起因する建物建替えに伴う建物強度の変化を推定に活かすことが可能である。図14に首都圏の木耐協データ1960~2000年まで10年毎にその時点での診断値頻度分布に対数正規分布を当てはめ、その平均値と標準偏差の推移を図15に示す。平均値の上昇に対して、標準偏差は1980年以降ほぼ横ばいである。標準偏差を1980~2000年の平均とし、平均値については線形回帰をして、今後同様の推移をすると仮定し2000年以降の耐震診断値の分布を求め、静岡県における各時点での死者数を耐震化率（[診断値1.0:一応安全]以上）を横軸として図16に示す。自然な建替えによる耐震化率の上昇に伴い、死者数が軽減していくことが見て取れる。1960年と比べると、2000年時点では人的被害が5分の1程度に軽減されている。想定地震の今後30年以内発生確率が40%と極めて高いことに斟酌するなら同地域の耐震化速度は未だ十分とは言えないまでも耐震化の着実な歩みも一方で感じることができる。他地域においても同様に、被害軽減の目標値（特に人的被害の軽減目標値）と達成年度を設定して建物耐震化を行うべき進度を決定することが可能である。

4. おわりに

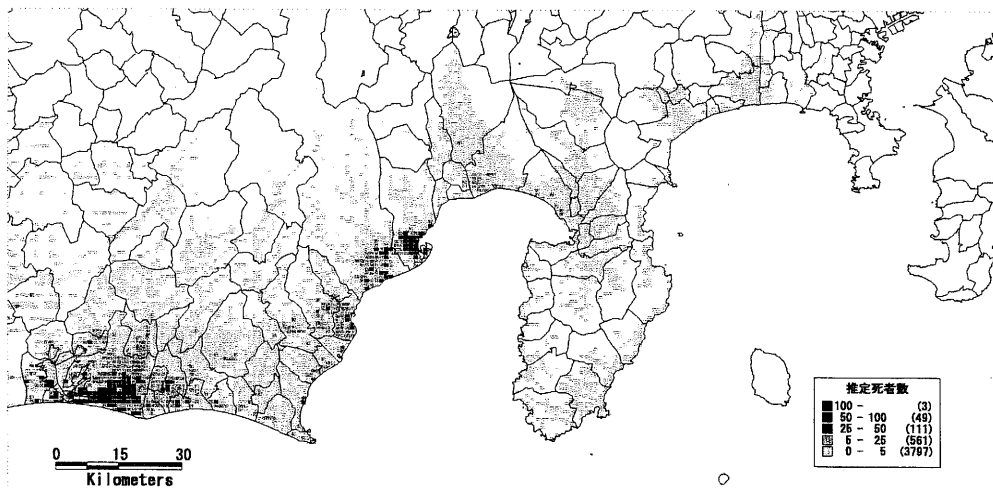


図12 東海・東南海・南海地震連動を想定した際の、木造低層建物における推定死者数(平日24:00発生の場合)

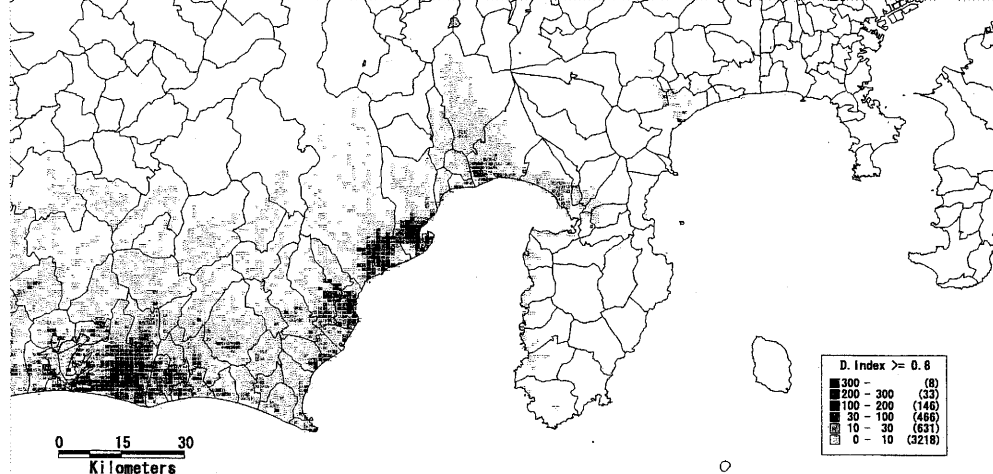


図13 東海・東南海・南海地震連動を想定した際の、耐震補強を要する(D.Index>=0.8)木造低層建物の分布

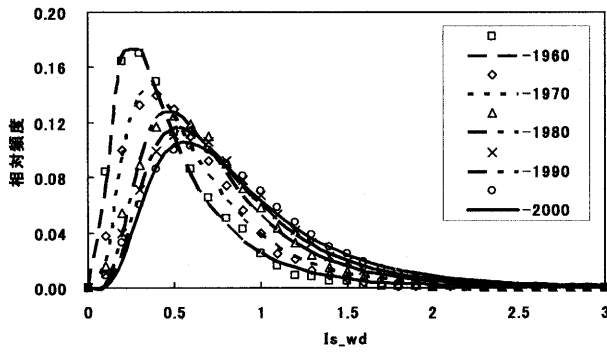


図14 各年度での首都圏の耐震精密診断値の割合

本論では、兵庫県南部地震被害データを用いて、木造低層建物被害に伴う人的被害推定のための被害関数（被害率関数・損傷度関数）の更新を行うとともに棟死亡率関数との関数統合化を試み、地震動入力と建物耐震診断値と死亡危険度との関係をノモグラムで表現することで個別建物防災への応用と、加えて防災行政向けの広域における人的被害を中心とする高精度な震害予測の方法を示した。以下に、まとめを示す。

- (1) 精緻な人的被害推定を行うために、人命にとって非常に危険なD6LEVELの被害にまで対応する木造低層建物被害率関数を作成した。
- (2) 損傷度関数・棟死亡率関数を併用することで、個別建物における地震動入力・耐震診断値・損傷度・死亡危険度の4次の関係を明らかにできた。これは住民・地方自治体の耐震補強に対する意思決定に益すると期待できる。
- (3) 防災科学技術研究所が公開した、東海・東南海・南海地震運動を想定した際の推定地震動分布図を利用して、自治体等の防災対策向けに、地震動入力を既知とした際の、人的被害推定・耐震改修を要する木造建物群の推定を行った。
- (4) 静岡県を例に、経年に伴う自然な建替えを考慮して、耐震化率と各年度での建物被害数・死者数の関係を明らかにした。現状の建替え進捗を踏まえて、自治体の耐震改修促進のペースメイクを行うことができる。

既存不適格建築物を評点1.5以上の所謂「安全な建物」にまで全て補強することは、理想とはいえ大きな費用負担と時間を要する。理想の対策が完了する前に地震発生が危惧され、結果的に大きな犠牲を伴うことは悲劇である。本論では耐震化の一つの目標値として死者を発生させないことにおき、そのための評価関数 {地震動入力ー耐震精密診断値ー建物損傷度ー死亡危険性} を提案した。これによれば、死者発生を防ぐ建物耐震化は住宅の自然改修によりある程度進行しており、ここから漏れる既存不適格建築物を重点的に耐震化プロセスに載せる行政的対策が、現実的かつ被害軽減に有効な方策となろう。

謝辞

本研究は多くの機関・大学の方々の協力により遂行することができた。建物GISデジタル記録は独立行政法人建築研究所のデータを利用して頂き、人的被害に関しては、横浜国立大学の西村明儒氏、京都大学の林康裕氏には、兵庫県南部地震の推定最大地動速度を提供して頂いた。また被害予測には、地震動予測地図データ（防災科学技術研究所）を使用したことを付記し、ここに謝意を表します。

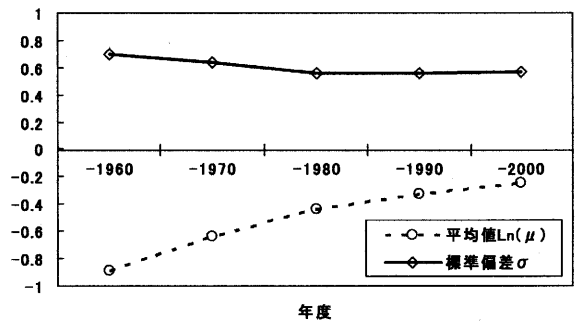


図15 耐震精密診断値の平均値・標準偏差の年代推移

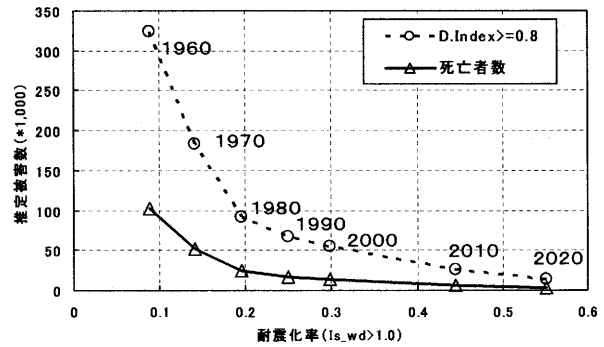


図16 建替えに伴う耐震化率の変化と被害数の関係

参考文献

- 1) 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ーその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ー,日本建築学会構造系論文集,505,53-59,1998.3
- 2) 村上雅英・田原賢・藤田宜紀・三澤文子：阪神大震災に見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,481,71-80,1996.3
- 3) 林康裕・宮腰淳一・田村和夫・川瀬博：1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定,日本建築学会構造系論文集,494,59-66,1997.4
- 4) 林康裕・宮腰淳一・田村和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察,日本建築学会構造系論文集,502,61-68,1997.12
- 5) 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,第I編 中間報告書以降の調査分析結果,1-303,1996.
- 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,527,189-196,2000.1
- 7) 岡田成幸・高井伸雄：木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用ー地震動入力を確定的に扱う場合ー,日本建築学会構造系論文集,582,31-38,2004.8
- 8) 田畑直樹・岡田成幸：地震時の建築物倒壊に伴う死者数推定に向けた棟死亡率関数の提案,日本建築学会構造系論文集,605,71-78,2006.7
- 9) 岡田成幸・高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン,日本建築学会構造系論文集,524,65-72,1999.10
- 10) Muramatu I.: Expectation of maximum of earthquake motion within 50 years throughout Japan, Sci. Rep. Gifu Univ., 3, 470-481, 1966.
- 11) 建設省住宅局監修：増強版 木造住宅の耐震精密診断と補強方法, (財)日本建築防災協会,1-94,1995.
- 12) 荒木雅也・井戸田秀樹：在来軸組工法住宅を対象とした耐震補強における費用対効果,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造III,139-140,2004.
- 13) 総務省統計局ホームページ： <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/>
- 14) 防災科学技術研究所ホームページ： <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 15) 長谷川浩一・翠川三郎：地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物の震害予測ーその1 建築年代別の木造建築物棟数の推定ー,日本建築学会構造系論文集,497,75-80,1997.7
- 16) 総務省統計局ホームページ： <http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/>
- 17) 高井伸雄・岡田成幸：木造損傷度関数作成のための精密耐震診断値の地域特性及び年代特性の把握,日本建築学会北海道支部研究報告集,76,37-40,2003.
- 18) 住宅金融公庫ホームページ： http://www.jyukou.go.jp/area_index.html
- 19) NHK放送文化研究所：2000年度国民生活時間調査,県別

(2006年4月10日原稿受理,2006年9月27日採用決定)