

木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用

—地震動入力を確定的に扱う場合—

DAMAGE INDEX FUNCTION OF WOODEN BUILDINGS
FOR SEISMIC RISK MANAGEMENT

—Proposal of the methodology based on deterministic approach—

岡田成幸*, 高井伸雄**

Shigeyuki OKADA and Nobuo TAKAI

This paper discussed Damage Index Function by which damage state of individual building can be estimated, and proposed the method for deducing the functions with structural parameter of the load-carrying capacity for buildings. We can apply the 3D nomograms of the obtained functions with three different types of parameters to utilize for various kinds of seismic risk management; for example, damage evaluation of individual building for an assumed earthquake, estimation of the standardized strength of buildings in regions not for generating damages, and stochastic estimation of return period on regional input motions that give rise to devastating damages to buildings.

Keywords : Vulnerability function. Fragility curve. Damage index. Wooden building. Seismic risk evaluation. Performance design

被害関数, フラジリティ曲線, 損傷度, 木造建築物, 地震被害評価, 性能設計

1. はじめに

自治体が主導する地震防災対策は、地域に想定される被害がその立案の根拠資料となっており、被害の算定に必要な被害評価関数は、被害率関数(バルナラビリティ関数 Vulnerability function またはフラジリティ曲線 Fragility curve と呼称されているもの)という形で多くの研究・提案がなされている。このように自治体による地域防犯的マクロ対策において被害率関数は重要な役割を果たすが、近年の動向として、個別建物の被害評価のような個別ミクロ対策も模索され始めており、この要求に応え得る新たな被害評価関数の導出が求められてきている。この動きは、近年の不動産投資信託の普及に伴い、デューデリジェンス Due diligence と呼ばれる建物の地震リスク評価等に代表される個々の不動産価値評価の必要性が高まっていることと軌を一にしている。本研究はこれに応えるべく、建物棟別の被害程度を評価する関数を損傷度関数と定義し、想定される地震動入力に対する被害程度を、耐震診断値等で代表される個々の建物が保有する耐震性強度(以降本稿において、保有強度と称す)から推定するための関数として具体的に導出し、損傷度関数の意義と利用法について共通認識を得ようとするものである。本編は木造建築物に関する損傷度関数を求めるものであり、RC造建築物については別途報告する。また、5章の利用法でも触れるが、本提案は住宅の性能設計の一指標にも利用できよう。

2. 被害関数の呼称について

筆者ら²⁾は従前より、建物の被害を表記する関数として2種類の被害関数を明確に定義してきた。一つは、地域の被害率を与える被害

率関数(Vulnerability Function in Damage Rate)であり、他の一つは建物一棟に対する被害の程度を与える関数であり被害尺度関数(Vulnerability Function in Damage Index)と称してきた³⁾。被害尺度関数は本稿の損傷度関数と同義のものであり、損傷度の方が建物一棟の被害を直感的に想起しやすいと思われるので、以後、損傷度関数 Damage Index Function と呼ぶこととする。併せて、地域被害率を与える被害関数を被害率関数 Damage Rate Function と称し、損傷度関数と被害率関数をまとめて一般的に被害を評価する関数を指す場合、その関数を被害関数 Vulnerability Function と呼ぶこととする。

ここで扱う損傷度関数の活用法については5章で詳述するが、被害率関数同様、被害を建物部材の応答量を基に判断するのではなく、以下に示すように損傷度 Damage Index を用いて建物全体の被害程度を指標化し、危険度診断の他、耐震補強の必要性有無の判断などの防災行政への利用を目的として構成するものである。損傷度は、建物一棟の被害程度を尺度上に表現したものであり、筆者ら^{4,5)}に

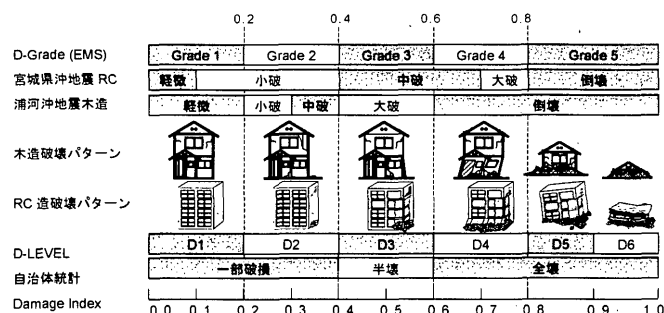


図1 破壊パターンと被害尺度との対応関係

* 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 助教授・工博
** 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 助手・修士(工学)

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Research Assoc., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., M. Eng.

より Damage Index として木造および RC 造建物について定義され（損傷度は[0,1]の定義域で与えられる）数値的扱いが可能となっている。さらに建物被害の外観を図示した破壊パターンおよび種々の被害ランクとの関係が考察されている（図1参照）。

3. 被害関数に関する既往の研究

被害関数に関する研究はその重要性から極めて多いが、関数の定義及び呼称が統一されていないため、損傷度と被害率との混乱も多い。表1に代表的な研究について、ここでいう損傷度関数と被害率関数に区別し、整理を試みた。被害率関数についてはその定義が比較的明快なこともあり、古くは関東地震(1923)における資料を用いた物部⁹⁾の研究に始まり、最近では兵庫県南部地震(1995)の被害データに基づき種々提案されている。一方、損傷度関数については、損傷度に関する明確な共通認識が得られていなかったこともあり、定義は様々である。一般に欧米では構造物の変形率とエネルギー吸収率の和で指標化した Park・他⁷⁾の定義 (Damage Index) が用いられることが多いが、使い易い指標とは言えない。わが国では筆者ら²⁾が損傷度の概念を早い段階で打ち出してはいたものの、共通認識には至っていなかった。最近、林・他¹⁰⁾が RC 造建物の耐震診断値 (Is 値) から地域の被害率を予測する式を提案する際に同種の関数（但し、損傷度に関しては被害ランク（大破・倒壊等）で表現し、間隔尺度での扱いはしていない）を導入し、脆弱性曲線と呼んでいる。また、石田¹⁷⁾は 1970 年以前の RC 造建物について最大入力加速度に対する損傷度関数を米国で用いられている ATC-13 の損傷度を用いて求めている。

4. 間接的推定法による損傷度関数の求め方

4.1 確定的アプローチと確率的アプローチ

地震を想定したときにある建物が破壊するかどうかの判定は、極めて簡単に記述すると、その建物の持つ強さ（保有強度）とそこに作用する地震力（荷重）の大小関係で決まるが、強度・荷重共に不確定要素があるため、確率分布を仮定し判断する。防災実務のアプ

ローチとして、簡便な扱いを優先させ、保有強度あるいは荷重のどちらかを確定的に与える方法と、保有強度・荷重の両方を確率的に扱う方法がある。中埜・岡田¹⁰⁾の表現にならい前者を確定的アプローチ、後者を確率的アプローチとここでは称することとする。この関係を模式的に描いたのが図2及び図3である。図2が確定的アプローチである。図2(1)が保有強度を確率的に与え荷重を確定的に与えた場合に相当する。確定的な荷重よりも保有強度が小さい場合（ハッチ部分）、この建物は破壊することとなり、確率分布の全面積に対するハッチ部分の面積比が破壊確率を表している。図2(2)が荷重を確率的に与えた場合に相当し、確定的な建物保有強度よりも荷重が大きい場合（ハッチ部分）、この建物は破壊することとなる。この場合の破壊確率は、確率分布の全面積に対するハッチ部分の面積比で与えられる。一方、図3は保有強度・荷重共に確率的に与えられた場合を示したものであり、結果として破壊する密度分布（ハッチ部分）も図示したように確率的に分布することとなる。本稿はまず、確定的アプローチでの損傷度関数を導出し、確率的アプローチについては次報とする。

防災行政においては、通常、当該地域のハザードマップ（地域地震動予測図ー予測震

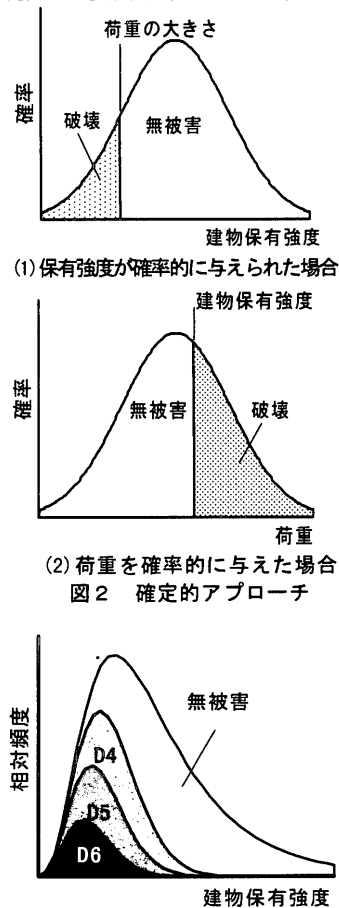


図3 確率的アプローチ

表1 被害率関数・損傷度関数に関する代表的な研究

関数	著者	関数呼称	対象	横軸	縦軸	縦軸の定義	文献番号
被害率関数	物部(1933)	-	木造	震度	被害率	地域の被害区分毎の被害率	6
	岡田・他(1991,1999)	パルナラビリティ関数(被害率関数)	木造、RC、他	震度、PGV	被害率	地域の被害区分毎の被害率	2,3,4,5
	長谷川・翠川(1999)	被害関数	木造	PGV	被害率	地域の被害区分毎の被害率	13
	林・他(2000)	被害率曲線	RC	PGV	被害率	建物の被害率と最大地動速度の平均的な関係	14
	林・他(2000)	被害率曲線	RC	PGV	被害率	地域の被害区分毎の被害率	15
	村尾・他(2000)	被害関数	木造	PGV	被害率	地域の被害区分毎の被害率	16
	石田(2001)	被害率関数	RC	PGA	被害率	ある属性を持つ建物群に対する被害割合	17
	梅村・山崎(2002)	被害関数	木造	PGV	被害率	地域の被害区分毎の被害率	18
損傷度関数	Park et al.(1985)	Damage Function	RC	Characteristic Intensity	Damage Index	架構の最大変形と履歴吸収エネルギーの線形和。D.I. ≥ 1.0の時、total damage	7
	Ghobarah et.al.(1985)	Damage Function	RC	PGA	Damage Index	Parkと同様	8
	岡田・他(1991,1999)	パルナラビリティ関数(被害尺度関数)	木造、RC、他	震度、PGV	被害の程度	無被害から全壊までを[0,1]で定義	2,3,4,5
	Barbat et al.(1996)	Vulnerability Function	建物一般	Vulnerability Index	Damage Index	各階について要素別に重み付き被害割合を出し、全階で平均をとったもの	9
	Singhal et.al.(1996)	Fragility Curves	建物一般	Spectral Acceleration	Damage Probability	Damage state(Minor, Moderate, Severe, Collapse)以上の被害発生確率	11
	中村・他(1999)	Seismic Fragility Curves	RC	PGA	損傷確率	被災度毎(軽微以上、小破以上、部分大破以上)の発生確率	12
	林・他(2000)	建物脆弱性曲線	RC	PGV	損傷確率	最大速度に対する個別建物の損傷確率	15
	Dumova(2000)	Fragility Curve	RC	MMI	Damage Index	Parkと同様	10
	石田(2001)	損傷度関数	RC	PGA	損傷度	ATC13による損傷度[0,1]を非超過確率をパラメータとして求めたもの	17

度分布図や予測最大地動速度分布図等一)を対策の基本においており、ハザードマップが用意されているのなら、建物への入力及びそれから算定される荷重は想定条件下において一意に与えることができる。すなわち、荷重については確定的に与えることができる場合が多く、この利用に供することができる損傷度関数を準備しておくことは防災実務を考える上で現実的である。よって、地震動入力(震度や最大地動速度)若しくは荷重を確定的に与え、建物の強さ(保有強度)については確率的扱いとする。

4.2 荷重・強度・破壊の代表指標について

次に、荷重及び建物保有強度をどのような指標で代表させるかという問題について考える。本研究では、防災行政的立場からデータとして入手し易くかつ簡便なものを優先させた。すなわち、木造建物の強度については旧建設省住宅局監修²⁰⁾の耐震精密診断値(簡便法として同文献の参考とされているわが家の耐震診断でも可)を、荷重についてはそれに替わるものとしてここでは地震動入力とし、自治体のハザードマップで用いられる震度あるいは最大地動速度(Peak Ground Velocity [kine]: PGV)を採用する²¹⁾。また、破壊の判断は筆者らが提案している建物破壊パターンを[0,1]の間隔尺度で定義した損傷度 Damage Index を用いることとする。

ここで採用する代表指標について、その信頼性について若干議論しておく。ある建物の保有強度(耐震診断値)を確率的に扱う理由は、現状の診断方法では建物の耐震性は壁率によりほぼ決定され、構造耐力上の不確定要素が考慮されず診断結果と真の耐力とが完全に1:1対応していない可能性が残されていたり、診断に対する人為的判定精度に個人差が大きく入り込む余地があるからである。この不確実性については本来、確率的アプローチで議論されねばならない問題であり、次報で扱うこととする。本稿では、診断結果としての耐震診断値を保有強度の代表値として信頼する立場をとる。すなわち建物個別の保有強度に関しては耐震診断値で正しく評価されるとし、地域内で発生するばらつき、たとえば建築年代が異なりその結果保有強度が様々な建築物が多数存在することに斟酌し、その地域内保有強度のばらつきを確率分布で推定するという立場をとる。前項4.1節で建物保有強度について確率的扱いをすと述べたのはこのことである。また、荷重(本稿では地震動入力)に確率的任意性が入る理由として、震度やPGVが木造建築物の破壊力と1:1の関係にあるかどうかが大きな問題として残されている。部材ではなく架構(骨組み)の破壊に関与する地震動入力特性を1指標で表現するのは、それ自体が大きな研究テーマであるが、本研究では被害と相関の高い指標として震度とPGVを用い、地震動入力指標と破壊状態とは1:1対応すると考える。さらに荷重と建物保有強度の関係から導かれる結果、つまり破壊の判断にも曖昧さが入る余地が残されていることから生じる信頼性の問題もある。すなわち、破壊(被害)の定義に曖昧さがあり、その結果として被害判定精度の人為的ばらつきが大きくなっている。同じ建物の被害でも、診断主体により全壊であったり半壊であったりと判断が異なることは阪神淡路大震災時において多くの研究者に指摘されているところである。しかし被害定義については、筆者ら⁹⁾による破壊パターン(損傷度)を用いることにより、定義の曖昧さをかなり払拭することができる。

4.3 被害率関数と損傷度関数及び耐震診断値との関係

損傷度関数を直接求めるためには、資料として、建物一棟ごとの

耐震診断値・損傷度・入力地震動指標がデータセットとして相当数予め入手しておく必要があるが、そのような資料は存在しない。入手できるのは地域単位で整理されている被害率及び耐震診断値に関連するデータである。よって、地域の被害率を示す被害率関数および建物の地震に対する保有強度を示す耐震診断値との関係を整理し、それらの関係から損傷度関数を間接的に推定することとする。

(1)被害率関数

住家を対象とした被害率関数は、地域の被害発生危険度表記や自治体の被害評価に良く用いられており、建物群としての集団的耐震性能を示す指標である。集団特性として、ある平均的耐震性強さの周りに正規分布するという仮定より、以下の累積正規確率分布で表現される。

$$V(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^s e^{-\frac{(s'-s_0)^2}{2\sigma^2}} ds' \quad \dots (1)$$

ここに、 $V(s)$ は地域の被害率を示す。 s は地域への地震動入力指標であり、最大地動速度の対数や震度をとる²²⁾。被害率関数はたとえば、「半壊以上の被害率」のように建物の損傷度別に与えられる(図4(1))。被害程度の名称は被害尺度定義により大きく異なるので^{4,5)}、図4(1)のパラメータである損傷度は筆者らが統一尺度として提案した Damage Index を用いると便利なることは既述のとおりである。

(2)損傷度関数

損傷度関数は地震動入力指標と建物一棟の損傷度をつなぐ関数である。建物を部材や接合部などの要素集合として捉えれば、一番脆弱な要素が建物全体の耐震性を規定すると考えることができ、その場合、材料強度を表す最弱リンクモデルで用いられるワイブル分布を密度関数とする以下の累積確率分布で表現することができる²³⁾。

$$F(s) = 1 - e^{-\frac{s^m}{s_0^m}} = 1 - e^{-\left(\frac{s}{\eta}\right)^m} \quad \dots (2)$$

ここに $F(s)$ は損傷度を表し、パラメータは形状母数 m と尺度母数 η である。形状母数 m の意味は、地震動入力指標 s のあるインターバルにおいて集中的に破壊する確率の大きさを与えるものであるから、 $m > 1$ の時、 m が大きい建物ほど脆性的で構造体として単純なものであるとみなせる。また、尺度母数 η は建物の平均的な耐震性を表すパラメータで、以下で定義される。

$$\eta = s_0^{\frac{1}{m}} \quad \dots (3)$$

すなわち、損傷度 $F(s) = 0.63$ を与える入力指標 s の値に一致する。また、この関数の50%期待値 μ は以下のガンマ関数で与えられる。

$$\mu = E(s) = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad \dots (4)$$

損傷度関数にワイブル分布を仮定したもう一つの理由は以下による。建物は一般に地震動入力 s に対してある平均的な値(耐震性強さ)が存在し、従って損傷度関数はそこで極値を持たねばならない。また被害率関数と異なり、その極値周りで対称性は保証されないため正規分布関数は使えない。これを満足する確率密度関数で扱いが容易なものとしてワイブル分布を採用した。またワイブル分布は一般に使用頻度の高い関数であり、パラメータが与えられれば表計算ソフトウェアで容易に算出できるという利点もある。

損傷度関数の概形を図4(2)に示すが、建物の保有強度(木造建築物の耐震診断値、 I_{WF} 値と略称)により形状は変化し、4.2節で導

入した確定的アプローチ (図 2(1)) の仮定により地域被害率をその地域における建物群のある保有強度に対する非超過確率とみなすことができ、それを媒介として損傷度関数と被害率関数を関係づけることができる (図 4 参照)。

(3)耐震診断値

建物の保有強度を示す指標として耐震診断値がある。木造建物の場合、一般に利用できるのは旧建設省住宅局監修による耐震精密診断値である。数値的な定義は、[0~0.7)を危険な建物、[0.7~1.0)をやや危険な建物、[1.0~1.5)を一応安全な建物、[1.5~)を安全な建物としている。ある地域における耐震診断値の頻度分布は対数正規分布で表せる¹⁰⁾。

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma \cdot y} \cdot e^{-\frac{(\ln(y)-y_0)^2}{2\sigma^2}} \quad \dots (5)$$

ここに、 $P(y)$ は相対頻度、 y は耐震精密診断値、 y_0 は分布の平均値、 σ はその標準偏差である。

関数の概形を図 4(3)に示す。いま、ある地域に地震動入力 s が働き、損傷度 $F(s)$ 以上の被害が $P(y)\%$ 発生したとする。このとき、確定的アプローチ (図 2(1)) に則り、耐震診断値 $I_{s,WF}$ 以下の建物は全て損傷度 $F(s)$ 以上の被害を被ると仮定すれば、この地域の耐震診断値分布(5)式より $P(y)\%$ の超過確率を与える $y = I_{s,WF}$ を求めることができる。すなわち、非超過確率と地域被害率を確定的に 1:1 対応させることにより、損傷度関数と耐震診断値との関係が決定できる。

4.4 使用データ

前節の方法に従って損傷度関数を推定するために必要な基本資料は、木造建築物に関する被害率関数と耐震診断値分布である。

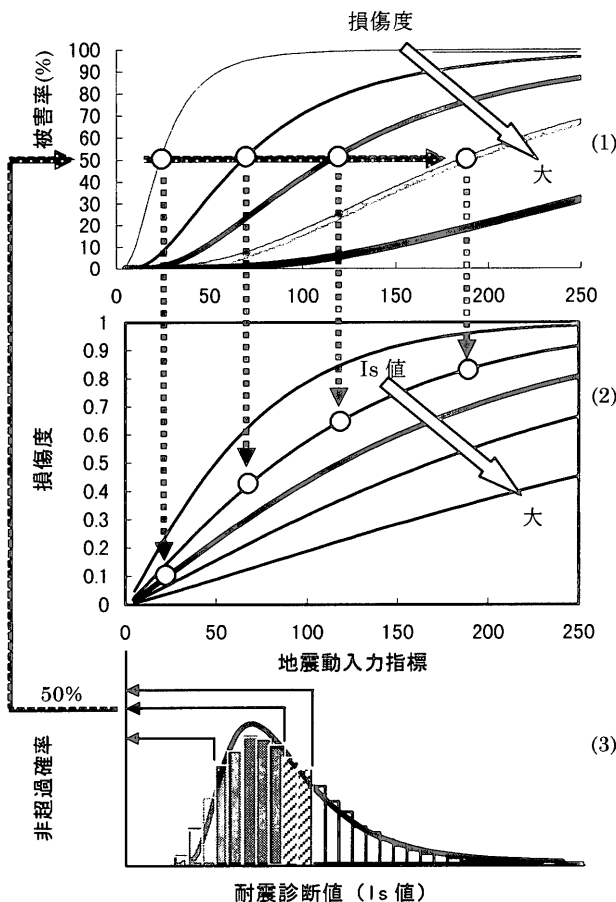


図 4 (1)被害率関数と(2)損傷度関数及び(3)耐震診断値分布の関係

(1)被害率関数

木造建築物に関する被害率関数は数多く提案されているが、多くは建物被害を3分類(一部破損、半壊、全壊)したものである。精度の高い損傷度関数を求めるには被害分類は詳細なほどよい。また独立変数としての地震動入力指標は震度および最大地動速度を想定しているの、各々について求められているのがよい。両者を満足するものとして、被害分類については5分類(D1~D5)し¹¹⁾、震度と最大地動速度について関数化されている筆者ら⁴⁾による木造建物被害率関数をここでは用いる。また、筆者らによる関数は全国平均の木造建物について求めたものであり、兵庫県南部地震以後に提案された他者の関数のように、兵庫県のみデータに依っていない。すなわち次節で述べる全国の耐震診断値分布と組み合わせて使うことが出来る唯一のものである。関数(1)式に相当する係数一覧を表 2 及び関数を図 5 に示す。

表 2 木造建物の被害率関数(1)式のパラメータ

入力指標 S		定数	D1以上	D2以上	D3以上	D4以上	D5
震度	s=気象庁震度	S ₀	5.040	5.960	6.420	6.850	7.370
		σ	0.574	0.621	0.600	0.565	0.582
PGV	s=log ₁₀ (PGV)	S ₀	2.740	3.660	4.120	4.550	5.070
		σ	0.574	0.621	0.600	0.565	0.582

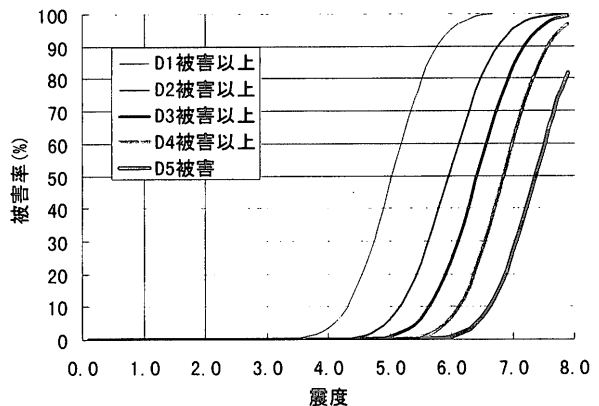


図 5 木造建物の被害率関数

(2)耐震診断値

木造住家に関する耐震診断値のデータとして現時点で使い得る唯一のものは、日本木造住宅耐震補強事業者協同組合(木耐協と略称)が1998年12月より全国の木造住家に対して旧建設省住宅局監修の耐震精密診断法に従って診断した結果であろう。本研究で用いた資料は2001年11月までに実施した77,545棟の中から、木耐協がデータベース化を完了したもの30,376棟についてのものである。木耐協データのサンプリングの一般性を、総務省統計局が主管部局となって実施している住宅・土地統計調査(1998)の約4,070万棟の報告と比較し検証した。住宅・土地統計調査はわが国の建物及び土地の保有実態を調査するものであり、木造以外の建物も調査対象となつてはいるが、全棟数に占める木造の割合は約93%(1998)であり、以下に示す相対頻度は木造住家に関するものとみなして差し支えなからう。

建物の古さに関するサンプリングの一般性を図 6 で検討した。同図は建築年に関して、10年ごとに年代区分しその相対頻度を比較したものである。70~80年代に建築のピークを迎え、その後徐々に新築が減っている傾向が合致しており、建物の古さに関して、木耐協

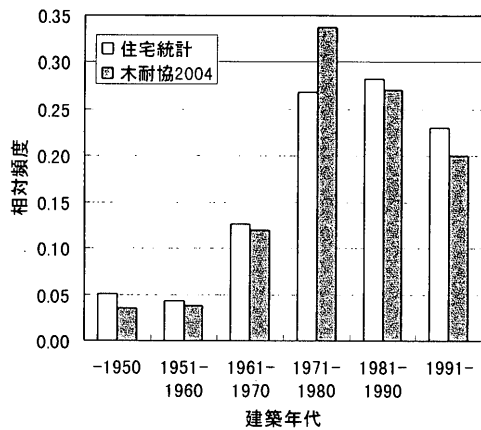


図6 木耐協データと住宅・土地統計調査との建築年代の比較

の診断データはわが国の傾向をそのまま反映したものとみなせる。試みに図6の分布を正規分布とみなし、住宅統計及び木耐協の分布が同一集団とみなせるかの仮説検定を行った。両者の(平均値, 標準偏差)はそれぞれ(1978.76, 13.49)と(1978.69, 13.87)であり、住宅統計を母集団とした場合の標本の大きさ 30,376 に対する平均値の両側 5% 仮説棄却域外は(1978.61~1978.91)となり、木耐協の平均値 1978.69 はこの中に含まれるので、同一集団とみなして差し支えなからう。

地域分布について検証する。住宅金融公庫支店区分(北海道、東北、北関東、東京、南関東、名古屋、北陸、大阪、中国、四国、福岡、南九州)にならい 12 区分とし、集計した。結果を図7に示す。住宅・土地統計調査によれば東京・南関東・大阪の3地区の建設数が多く、その傾向は木耐協のデータでも確認できる。被害率関数及び損傷度関数は地域性の影響を大きく受けるので、両者を組み合わせて使う場合、同一地域で得られていることが必要条件となる。兵庫県南部地震で得られた被害率関数は兵庫県の住家特性が強く反映しすぎている可能性があるため、同地震以前の兵庫県における耐震診断値の分布が明らかでない以上、本解析には使えない。よって、耐震診断値の全国分布と全国平均建物について求められた筆者らによる被害率関数が唯一使用できる組み合わせとなる。木耐協の全データの耐震診断値分布を図8に示す。標本平均値は I_{s-WF} 値($=exp(y_0)$) = 0.66 であり、「危険な建物」に属する。この頻度分布に(5)式で与えられる対数正規分布を当てはめる。全国で得られた木耐協の頻度分布に対して求められた関数及びその係数 (σ, y_0) の値を図8中に示す。以後の解析には当てはめられた関数を用いる。

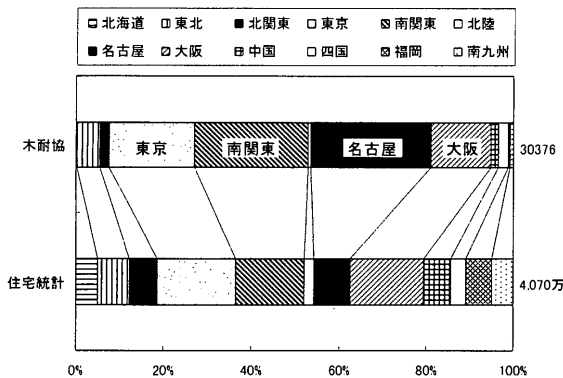


図7 木耐協と住宅・土地統計調査との地域別建築数の比較

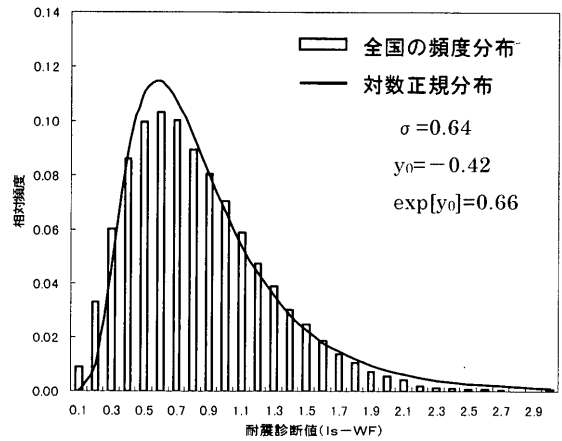


図8 全国における耐震診断値の頻度分布

4.5 損傷度関数の推定

得られた耐震診断値分布と被害率関数を用いて損傷度関数を作成するための基本データを作る。まず被害率関数から、ある被害率に対応する損傷度 D1~D5 を与える強震動指標(震度及び最大地動速度)を、(1)式の逆関数を計算して得る(図4における(1)から(2)への作業の流れに相当)。表2及び図5に示す被害率関数から計算した損傷度とそれに対応する強震動指標の値を表3に示す。震度及び最大地動速度について各々5組のデータセットが得られる。そのデータセットに損傷度関数型として仮定する累積ワイブル分布(2)式をフィッティングさせる。図9に表3のデータ及びフィッティングさせた累積ワイブル分布を、最大地動速度の場合について示す。各曲線の決定係数は 0.99 以上を確保しており、累積ワイブル分布で適切に表現されていることが確認できる。これが損傷度関数となるが、次に建物の保有強度(耐震診断値)と対応させる必要がある(図4における(3)から(1)への作業に相当)。決定論的アプローチに従い、ある診断値より低い建物が全て被災し、その診断値を越えない建物の、全建物数に対する頻度割合(非超過確率)が地域被害率を与えるという仮定の下に、耐震診断値の累積対数正規分布((5)式の累積分布)の逆関数を計算し、地域被害率(対数正規分布の非超過確率)よりそれを与える耐震診断値を求めることができる。これより建物の保有強度(耐震診断値)をパラメータとした損傷度関数群が構成される。求められた関数群の係数(ワイブル分布の係数)を地震動入力として震度と最大地動速度の両方について表4に一覧で示す。

なお、以下において強震動指標 s の数値的扱いは、震度は気象庁震度の値(小数点以下も有効)をそのまま代入し、最大地動速度(kine)はその常用対数を取り $s = \log_{10}(PGV)$ として与える。

表3 損傷度と強震動指標と被害率の対応データ

被害率	PGV(kine)					震度				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1%	5	13	23	41	72	3.7	4.5	5.0	5.5	6.0
10%	10	27	47	82	145	4.3	5.2	5.7	6.1	6.6
20%	13	37	64	109	195	4.6	5.4	5.9	6.4	6.9
30%	17	46	80	134	241	4.7	5.6	6.1	6.6	7.1
40%	20	56	96	160	289	4.9	5.8	6.3	6.7	7.2
50%	23	68	115	188	343	5.0	6.0	6.4	6.9	7.4
60%	28	81	137	222	406	5.2	6.1	6.6	7.0	7.5
70%	33	98	165	265	487	5.3	6.3	6.7	7.1	7.7
80%	41	123	205	326	602	5.5	6.5	6.9	7.3	7.9
90%	55	169	278	434	809	5.8	6.8	7.2	7.6	8.1
99%	109	357	573	855	1629	6.4	7.4	7.8	8.2	8.7

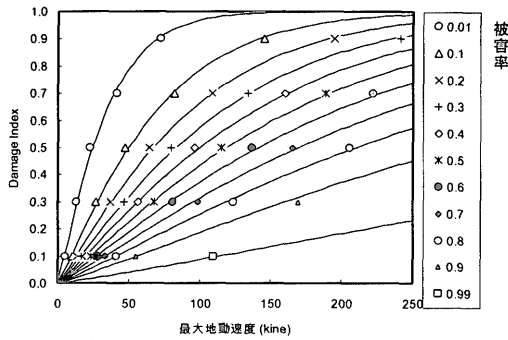


図9 損傷度データにワイブル分布(2)式を適合させた例

表4 求められた損傷度関数(2)式のパラメータ

入力指標: S	PGV s=log ₁₀ (PGV)		震度 s=気象庁震度	
	m	η	m	η
0.1	1.13	15	5.32	4.6
0.2	1.14	35	6.31	5.3
0.3	1.15	57	6.88	5.8
0.4	1.15	80	7.29	6.1
0.5	1.15	105	7.61	6.3
0.6	1.16	130	7.87	6.5
0.7	1.16	157	8.08	6.7
0.8	1.16	184	8.27	6.8
0.9	1.16	212	8.44	6.9
1.0	1.16	241	8.58	7.0
1.1	1.16	270	8.72	7.1
1.2	1.16	300	8.84	7.2
1.3	1.16	330	8.95	7.3
1.4	1.16	361	9.05	7.4
1.5	1.16	392	9.15	7.5
2.0	1.16	555	9.55	7.8
2.5	1.16	726	9.85	8.0
3.0	1.16	904	10.10	8.2

5. 関数のグラフ表示とその利用法

得られた損傷度関数は、建物の保有強度（耐震診断値）と地震動入力（震度または最大地動速度）そして損傷度の関係を与えるものであり、それぞれを変数とする3次元空間上に表現される。図10に地震動入力震度の場合を示す。図より、建物の耐震診断値が低くなるにつれて、低震度でも損傷度が大きくなることを読みとれる。図表グラフ（ノモグラム）として実際の利用に供するには、このままでは数値が読みとりにくいので、各軸ごとに断面投影し2次元表記する。それぞれ以下のような利用に供することができる。

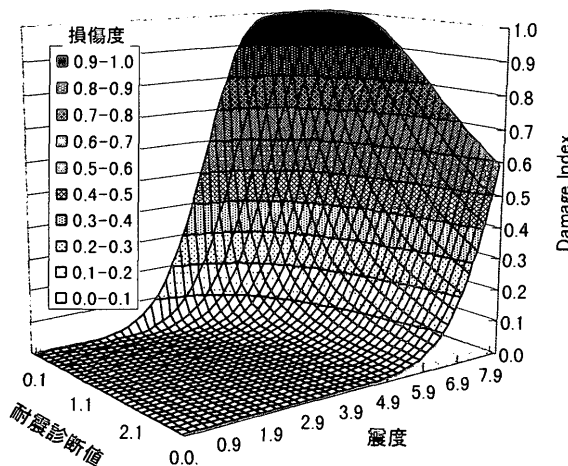


図10 損傷度関数の3次元表示

(1) 損傷度評価への利用

既知データとして、対象としている建物の耐震診断値及び地震動入力を与えられたとき、その建物の損傷度を評価する場合に相当する。この解析は、個別建物の地震被害評価であり、また、建物の価値評価（デューデリジェンス）に相当する。求値が損傷度であるから、表4で与えられる係数を(2)式に代入することで算定できる。図11は既知変数としてx-yの両軸に強震動指標と耐震診断値を与え、求値の損傷度を両軸で囲まれる平面上にパラメータ曲線として作成したものである。同図(1)が入力を震度に、(2)が最大地動速度にそれぞれ対応している。耐震診断値で危険とされる建物は I_{s-WF} 値=0.7が閾値であるが、それ以下の強度の建物では震度6強 (I=6.25) で損傷度0.43（半壊）を越える被害となってしまうなど、同図を用いることで、想定地震動に対する建物被害の状況が保有強度別に極めてよく理解される。また、地域の木造住家の棟別損傷度マップ（リスクマップ）を作成することも可能であり、自治体が被害想定で利用する地域被害率分布図（リスクゾーニングマップ）よりも、建物個別の被害状況を示したより詳細なものとする事ができる。

損傷度の数値を直接計算するには、表4の係数を用いて、(2)式のワイブル分布の計算をすればよいが、表計算ソフトウェアでは組込関数を利用することができ、たとえばMS-EXCELでは以下のように数値代入することにより、損傷度を簡単に計算することができる。

$$\text{損傷度} = \text{WEIBULL}(s, m, \eta, \text{TRUE})$$

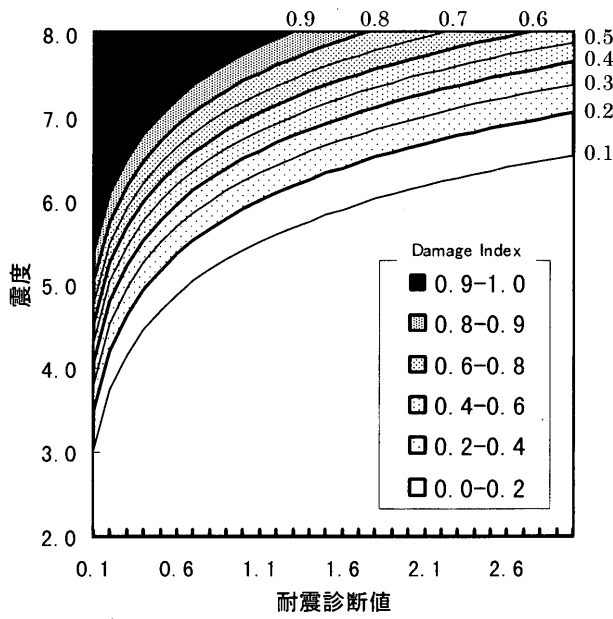
ここに、sは想定する地震動入力であり、震度または最大地動速度の値 (s = log₁₀(PGV)) である。mとηはワイブル分布の形状パラメータおよび尺度パラメータで、表4で与えられている。第4パラメータには TRUE と入れることにより、累積ワイブル分布(2)式が計算される。

(2) 必要保有強度推計への利用

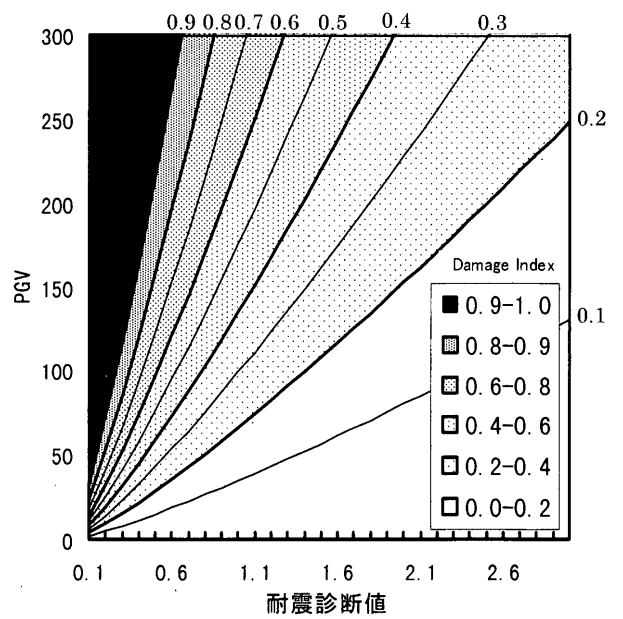
既知データとして、地震動入力及び損傷度を与えられたとき、建物の保有強度を求める場合に相当する。たとえば、地域の想定地震動入力を与えられたとき、建物に必要な保有強度を知る要求が出てくる。このとき、許容値としての種々の損傷度を設定すれば、この要求に応える様々な選択肢をユーザに提供することができる。許容値としてはたとえば以下のような値が設定できよう。

- 生命の危険回避を最低条件とした場合：損傷度0.8以上の被害 (D6レベル被害：層崩壊) 回避に必要な保有強度
- 居住不能回避を最低条件とした場合：損傷度0.6以上の被害 (D4レベル被害：層変形出現被害) 回避に必要な保有強度
- 雨漏り回避を最低条件とした場合：損傷度0.4以上の被害 (D3レベル被害：構造被害表出) 回避に必要な保有強度
- 生活支障なしを最低条件とした場合：損傷度0.2以上の被害 (D2レベル被害：壁に大亀裂発生) 回避に必要な保有強度

このような条件設定を満足する保有強度（耐震診断値）が求値となるから、この解析は建物の必要保有強度推計等への利用ということになる。図12は既知数を強震動指標と損傷度にとりx-y軸で表記し、求値の耐震診断値を平面上にパラメトリックに表現したものである。たとえば、地域の地震動が震度6.0と想定されたとき、上記回避条件を満足する必要保有強度の閾値は、それぞれ I_{s-WF} 値=0.28、0.40、0.65、1.20と読みとることができる。同図を用いた解析は、耐震補強をする場合の目標値の設定としても使える。なお、太田・

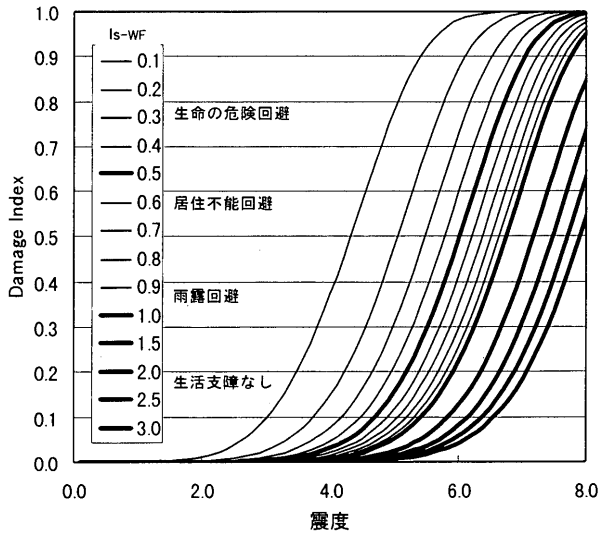


(1) 地震動入力を震度にとった場合

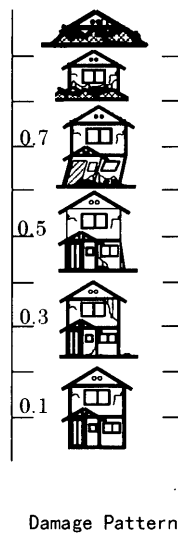


(2) 地震動入力を最大地動速度(kine)にとった場合

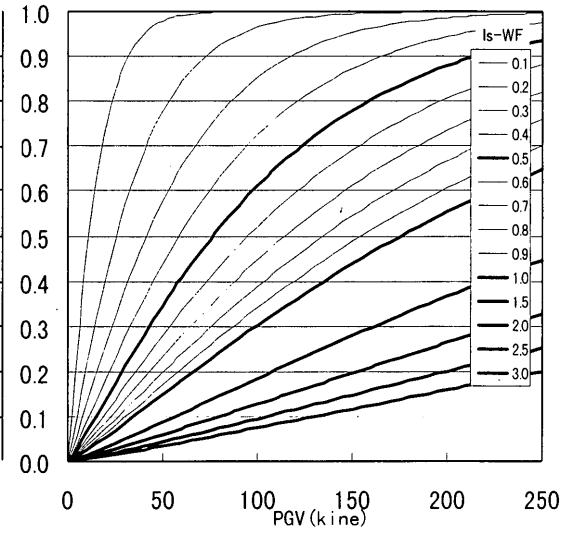
図 11 損傷度評価のためのノモグラム



(1) 地震動入力を震度にとった場合

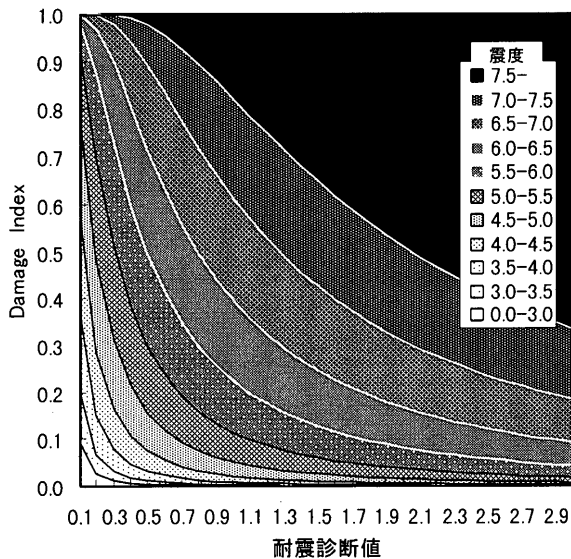


Damage Pattern

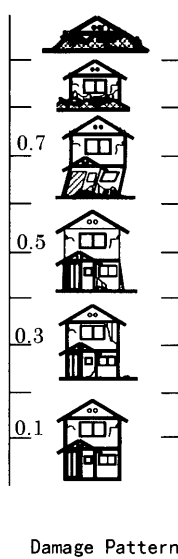


(2) 地震動入力を最大地動速度(kine)にとった場合

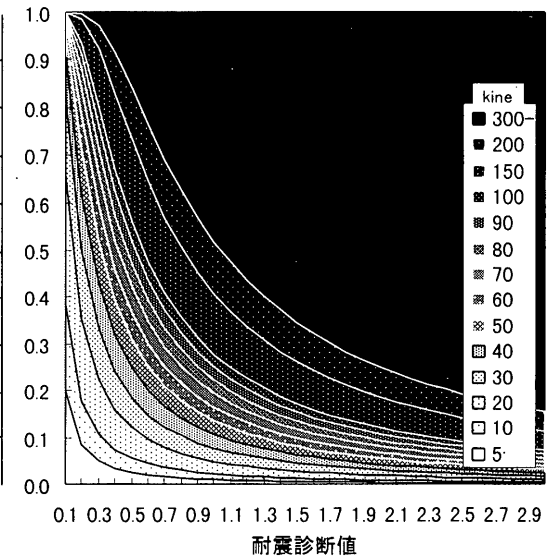
図 12 耐震診断値評価のためのノモグラム



(1) 地震動入力を震度にとった場合



Damage Pattern



(2) 地震動入力を最大地動速度(kine)にとった場合

図 13 地震動入力評価のためのノモグラム

小山²⁰⁾は筆者らによる暫定結果^{27,28)}を用いて、瑞浪市における目標耐震診断値分布を求めている。

(3)ハザード評価への利用

既知データとして、耐震診断値と損傷度が与えられたとき、地震動入力（ハザード）の評価である。図13はこのためのノモグラムであり、既知変数の耐震診断値と損傷度がx-y軸で与えられ、求値の強震動指標が平面上にパラメトリックに表示されている。このグラフの使い方として、地震後の建物被害調査より揺れの大きさを推定するのみならず、たとえば、1960年代に建設された住家の耐震診断値の平均値は0.6であるので²⁹⁾、その年代の建物が集中している地域において、層崩壊（損傷度0.8以上）を発生させる揺れは震度7以上であることが読みとれ、建物耐用年数と地域の震度再来年数との関係から建物危険度確率を算定することも可能である。

なお、グラフを用いずに直接数値を算定するには(2)式を以下のよう線形化し、ワイブル分布の逆関数を求めておけばよい。

$$R(s) = 1 - F(s) \quad \dots (6)$$

$$\ln \ln(1/R(s)) = m \cdot \ln s - \ln s_0 \quad \dots (7)$$

$$\therefore s = e^{\frac{\ln \ln(1/R(s)) - \ln s_0}{m}} \quad \dots (8)$$

ここに、既知データとして損傷度 $F(s)$ と耐震診断値 $I_{s,WF}$ （表4より形状パラメータ m と尺度パラメータ η を読み取り(3)式より s_0 を求めておく）を上式(8)に代入し、求値の強震動指標 s を得る。

2000年4月より住宅の品質確保の促進等に関する法律が施行され、住宅購入者に分かり易い性能表示・性能重視の設計が求められている。本提案の関数は、木造住家に関する耐震性を入力地震動との関係で極めて分かり易く表示できるものであり、住宅購入者と供給側とのコミュニケーションの円滑化にも益しよう。

6. おわりに

建物個別の被害程度（損傷度）を、地震動入力（震度、最大地動速度）と建物保有強度（耐震診断値）から推定するための関数を木造建物について具体的に提案した。さらにこの関数は、地震動入力・損傷度・保有強度のうちどれか2変数を仮定することで、残りの1変数を推定するノモグラムとして整理され、様々な利用への便を図った。本研究では確定的アプローチによる方法に従ったため、4.1及び4.2節で述べたごとく事象間の対応を1:1で関係づける仮定を導入しているが、防災行政を遂行するための各種基礎資料導出には許容できるものであり、その使い易さから意義は十分に認識されるであろうと思っている。ここで仮定した1:1対応を確率で表現する確率的アプローチは次報に譲る。

なお、建物の保有強度の代表値として採用した耐震診断値は、一般にはデータとして未だ入手し難いかもしれない。その場合は、建物の建築年を知ることにより耐震診断値を仮定することが可能である²⁹⁾、わが家の耐震診断²⁰⁾という簡便な診断法も提案されている。また、微動計測による新しい診断の試み³⁰⁾も研究途上にあり、今後の普及が大いに期待され、本提案の関数もさらに使い易いものになると考えられる。

謝辞

本研究で使用した木造住宅の耐震診断値は、日本木造住宅耐震補強事業者協同組合のご厚意により提供して頂いたものである。ここに記し、謝意としたい。

註

- 1) 震度やPGVで代表される地震動入力は正確な意味で荷重ではないが、相互変換が可能であり一般にその代替として用いられることが多く、また情報としての扱い易さや被害との関連の高さに斟酌し、採用する。なお震度は、従来からの気象庁震度を有効桁数2桁で扱うことを基本とする。計測震度でも代用可とするが、従来震度との違いを理解した上で使用することを希望する。計測震度と従来震度との関係については文献²¹⁾を参照されたい。
- 2) 最大地動速度を説明変数とした被害率関数の場合、その自然対数を s として(1)式を組み立てているものが多い^{10,11,16)}。しかし、震度・最大速度・最大加速度を比較した場合、被害率と最も相関が高いのは震度であるとの研究²²⁾もあり、震度-被害率の関係の基本として種々の関係式を展開するのが妥当であろうと筆者らは考える。この立場に立つならば、震度と最大地動速度の関係は常用対数で表記されるものがほとんどである^{23,24,25)}ので、結果として、最大地動速度-被害率の関係は、(1)式において最大地動速度の自然対数を s とするのではなく、常用対数を s とするのが使用の便が高いと考える。
- 3) 文献¹⁷⁾では図1に示したD5とD6の区別はせず、共にD5として扱っている。関数決定の解析においてはこの分類を用い、Damage Indexとの対応は、D1=0.1、D2=0.3、D3=0.5、D4=0.7、D5=0.9として計算した。

参考文献

- 1) 水越薫：建設会社における地震リスクマネジメントの試み、建築雑誌、116、42-45、2001。
- 2) 岡田成幸・鏡洋史：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2、44、93-108、1991。
- 3) 岡田成幸・高井伸雄：被害関数による建物被害の集団特性記載と単体特性記載～被害率関数の詳細化と被害尺度関数の提案～、日本建築学会大会梗概集、B-2、37-38、1999。
- 4) 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。
- 5) 高井伸雄・岡田成幸：地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン分類、日本建築学会構造系論文集、549、67-74、2001。
- 6) 物部長徳：土木耐震学、常磐書房、309pp、1933。
- 7) Park Y.J., A. H.-S. Ang, and Y. K. Wen : Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, J. Struct. Eng., 111, 740-757, 1985。
- 8) Ghojarah A., N. M. Aly, and M. EL-Attar : Seismic Reliability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings, J. of Earthq. Eng., 2, 569-592, 1998。
- 9) Barbat, A.H., F. Y. Moya, and J. A. Canas : Damage Scenarios Simulation for Seismic Risk Assessment in Urban Zones, Earthq. Spectra, 12, 371-394, 1996。
- 10) Dumova-Jovanoska, E. : Fragility Curves for Reinforced Concrete Structures in Skopje (Macedonia) Region, Soil Dynamics and Earthq. Eng., 19, 455-466, 2000。
- 11) Singhal, A. and A. S. Kiremidjian : Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage, J. of Struct. Eng., 122, 1459-1467, 1996。
- 12) 中村孝明・飯塚素文・藤井俊二・高山正春：兵庫県南部地震の被災データに基づく建物被害関数の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、33-34、1999。
- 13) 長谷川浩一・翠川三郎：地域メッシュを利用した広域での非木造建築物群の震害予測、日本建築学会構造系論文集、521、41-47、1999。
- 14) 林康裕・宮腰淳一、田才 晃、大野義照：1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、528、135-142、2000。
- 15) 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、2、235-242、2000。
- 16) 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。
- 17) 石田寛：被害率関数と損傷度関数の関係について、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、111-112、2001。
- 18) 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、556、109-116、2002。
- 19) 中野良昭・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報告集、406、37-43、1989。
- 20) 建設省住宅局監修：増補版 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、pp.94、1995。
- 21) 岡田成幸：防災学に必要な地震動入力尺度について考える～震度のフィルター特性の検証を通して～、第26回地震工学研究発表会、土木学会、13-20、2001。
- 22) 増田有周・川瀬博：RC造建物の応答解析結果に基づいた都市直下地震における被害関数構築、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、139-140、2001。
- 23) Muramatu I. : Expectation of maximum of earthquake motion within 50 years throughout Japan, Sci. Rep. Gifu Univ., 3, 470-481, 1966。
- 24) 董華南・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、458-459、1986。
- 25) たとえば、市川昌弘：機械工学選書 信頼性工学、裳華房、pp.223、1990。
- 26) 太田裕・小山真紀：「市民防災」促進のための震度情報の解説(1)～耐震診断得点値との融合～、惑星科学合同学会、2003。
- 27) 岡田成幸：デュレリジェンスのための建物耐震診断結果を利用した損傷度評価関数(1)木造建物とRC造建物(手法編)、日本建築学会大会梗概集、B-2、25-26、2002。
- 28) 高井伸雄・岡田成幸：デュレリジェンスのための建物耐震診断結果を利用した損傷度評価関数(2)木造建物とRC造建物(解析編)、日本建築学会大会梗概集、B-2、25-26、2002。
- 29) 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。
- 30) 岡田成幸・高井伸雄・太田洋芳：木造住宅の簡易な耐震精密診断法の提案～微動のカオスの解釈による～、第11回日本地震工学シンポジウム講演論文集、2087-2090、2002。

(2003年7月24日原稿受理、2004年4月23日採用決定)