

兵庫県南部地震の被災データベースを用いた 建築物の地震リスク評価に関する研究

諏訪 仁 野畑 有秀
関 松太郎

Seismic Risk Assessment of Building Based on Damaged Database of 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake

Hitoshi Suwa Arihide Nobata
Matsutaro Seki

Abstract

The objective of this paper is to evaluate a vulnerability function and a repair cost in terms of each structural damage level based on the damaged database of the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake. The seismic risk of a building in Kobe is calculated through the analytical results. As a result, the following are verified :

1. The expectation of vulnerability function, in which peak ground acceleration is taken for seismic intensity, is about 550 cm/s^2 for minor damage, about 700 cm/s^2 for moderate damage, and about 950 cm/s^2 for major damage respectively. However, the coefficient of variation (C.O.V.) is about 0.5 for all damage levels.

2. The expectation of repair cost per square meter is about 29000 yen for minor damage, about 60000 yen for moderate damage, and about 64000 yen for major damage respectively. However, the variation is very large, for example, the C.O.V. for repair cost varies from 1.2 to 1.6.

3. The seismic risk of a building in Kobe, that is normalized by new construction cost, is about three percent on condition that the design lifetime is assumed to be 50 years.

概 要

本研究は、兵庫県南部地震に対する建築物被災度データベースを用いて被災度レベルに対応した被害関数と補修費用を作成し、神戸に建つ平均的な建築物の地震リスクを試算した。この結果、以下の知見が得られた。

(1)地震動強さの指標として地表面最大加速度を用いると、被害関数の平均値は、軽微以上、中程度以上、全壊または大破に対して約 550 cm/s^2 、約 700 cm/s^2 、約 950 cm/s^2 であり、変動係数は全ての被災度レベルに対して約0.5程度である。

(2)単位平米当たりの補修費用の平均値は、小破、中破、大破に対して約29,000円、約60,000円、約64,000円である。しかし、平均値まわりのバラツキは大きく、変動係数は1.2~1.6程度である。

(3)神戸に建つ平均的な建築物を対象に、被害発生確率に被害発生時の補修費用をかけることにより得られる地震期待ロス関数と地震ハザード曲線を用いて地震リスクを試算すると、供用期間が50年のとき新築費に対して約3%の補修費用が必要になる。

1. はじめに

近年、目標性能を設定しこれを満足するように設計を行う性能評価型設計法が注目され、建築物の耐震性能評価法に関する研究が精力的に行われている。このとき、建築物の性能として安全性はもちろん重要な項目であるが、一方では建築物のライフサイクルコストを考慮した経済性の観点からも性能評価をしておく必要があると考えられる。つまり、建設サイトにおける地震動強さの大きさとその発生頻度ならびに建築物の被災度レベルの両者を用いて被害発生確率を算定し、これに被害発生時の補修費用をかけて地震リスクを評価して、建築物の耐震性能を向上させることにより得られる地震リスクの低減

効果(費用対効果)を提示することになると思われる。

このような背景を踏まえ、本研究は、兵庫県南部地震における建築物被災度データベースを用いてある地震動強さに対する建築物群としての被害率を関係付ける被害関数を作成し、建築物階数による耐震性能の差異について検討した。さらに、被害関数の平均値を入力とした地震応答解析から降伏ベースシア係数を推定し、この値と耐震診断から得られた構造耐震指標との比較検討を行った。一方、兵庫県南部地震で被災した建築物を対象に被災度レベルに応じた補修費用を調査し、単位面積当たりの補修費用について統計分析をした。最後に、神戸における地震ハザードを算定し、兵庫県南部地震に対する被害関数と補修費用に基づき地震リスクを評価した。

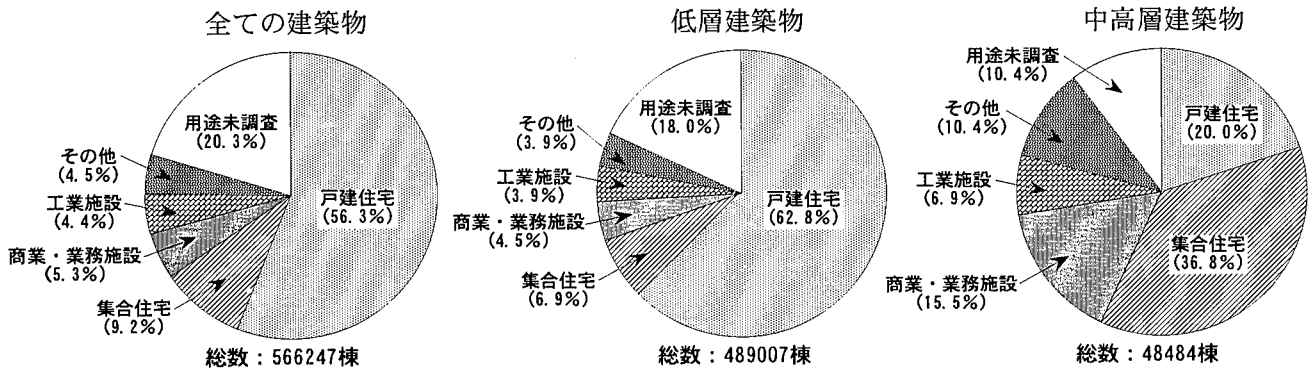


Fig. 1 建築物被災度データベースの内訳
Classification on Damaged Database of Buildings

2. 地震動強さと被害率の関係の評価

2.1 建築物被災度データベース

建築物被災度データベースとして、建設省建築研究所の阪神・淡路大震災復興計画策定支援システムによる建築物被災度集計結果データ¹⁾を用いた。これは、震災復興都市づくり特別研究委員会（日本都市計画学会関西支部＋日本建築学会近畿支部都市計画部会）および兵庫県都市住宅部計画課が行った建築物被災度調査結果ならびに建築研究所が行った火災調査の結果を地理情報化し、町丁目単位で集計した結果を収録したものである。

このデータベースには、

- ①被災度別
- ②建築物用途別
- ③建築物階数（堅牢・非堅牢）別

に、町丁目ごとの建築物の棟数および建築面積の合計が集計されている。

被災度は、調査結果をもとに、

- ・外観上の被害なし
- ・軽微な損傷
- ・中程度の損傷
- ・全壊または大破
- ・火災による損傷

に区分されている。さらに、その他のデータとして、

- ・未調査、不明

のものがある。未調査、不明は、被災度調査等の段階で被災度が未調査のものを示す。

建築物用途は、兵庫県の行った都市計画基礎調査の図面に基づき、建築研究所が独自に用途を判断して数値化したもので、

- ・戸建住宅（併用を含む）
- ・集合住宅（いわゆる下駄履き住宅を含む）
- ・商業、業務施設
- ・工業施設
- ・その他
- ・色分けなし（元図に色が塗られていないもの）

に分類されている。

建築物階数は、デジタルマッピングデータあるいは1/2500国土基本図における、

- ・堅牢建物（3階以上：以下、中高層建築物）
- ・非堅牢建物（2階以下：以下、低層建築物）
- ・無壁舎（建築物間の渡り廊下や自転車置場など）と同義である。

このとき、被害調査された町丁目の総地点数Nは、3,658地点である。ここで、全ての建築物および建築物階数別に分類された低層建築物と中高層建築物の被災度データベースについて、建築物用途別の構成比をFig.1に示す。これより、全ての建築物においては戸建住宅の占める割合が最も多く約56%であり、同様に低層建築物においても戸建住宅の占める割合が最も多く約63%であることがわかる。一方、中高層建築物においては集合住宅の占める割合が最も多く約37%である。

2.2 被害率の定義

建築物被災度データベースを用いて、ある町丁目の範囲内に存在する全ての建築物の棟数およびそれぞれの被災度レベルに対応した建築物の棟数が与えられるため、町丁目ごとの被害率を次式から求めた。

$$\text{軽微以上の被害率} : d_1 = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{k - (F + U)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{中程度以上の被害率} : d_2 = \frac{S_2 + S_3}{k - (F + U)} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{大破または全壊の被害率} : d_3 = \frac{S_3}{k - (F + U)} \dots\dots\dots (3)$$

- ここに、k : 町丁目内に存在する建築物の棟数
- F : 火災による損傷の棟数
- U : 未調査・不明の棟数
- S₁ : 軽微な損傷の棟数
- S₂ : 中程度の損傷の棟数
- S₃ : 全壊または大破の棟数

2.3 被害関数の評価手法

被害関数（損傷度関数とも呼ばれる）は、ある地震動強さ（その指標として、加速度、速度、震度、SI値などが用いられる）に対する建築物の被害率を関係付ける関数であり、その評価法により大別すると二つに分けられる。一つは、ある地震に対して面的な広がりを有する建築物の被災データと地震動の観測記録（観測記録が存在

しない場合には、震源を設定し距離減衰式などを用いて推定された地震動強さ) の関係から統計的に求める方法と、もう一つは入力地震動や建物モデルのパラツキを仮定して地震応答解析を行い、応答値が限界値を超過する割合を確率的に求める方法である。従って、前者の手法からは建築物群としての耐震性能が得られ、一方、後者の手法からはある特定の建築物の耐震性能が評価できることになる。

ここでは、兵庫県南部地震に対する建築物の被災度データを用いて被害関数を評価するので、前者の手法に該当する。以下、前者の手法により被害関数を作成し、さらに統計的に得られた被害関数の分布形を累積分布関数で回帰する手法について述べる。

2.3.1 被害関数の作成法 全ての町丁目地点についてその代表地点における地震動強さ a_i ($i=1\sim N$) を後述する2.5節の手法に基づいて推定し、2.3節から得られた建築物の被害率 d_i ($i=1\sim N$) と関係付ける。ただし、地震動強さ a_i ($i=1\sim N$) の大きさが、 $a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_N$ の順番となるように町丁目ごとの建築物の被害率 d_i ($i=1\sim N$) を並び替える。

このとき問題となるのは、町丁目に存在する建築物の棟数 k あるいは被災度建築物の棟数 D が極端に少ないため、(1)~(3)式から算定された被害率が1あるいは0となる町丁目地点がかなり見られることである。従って、生データのままで地震動強さと被害率の関係を結びつけると、被害関数まわりのパラツキ(すなわち、誤差)がかなり大きくなり、結果的に被害関数の精度が悪くなる懸念される。このように、面的に分布する被災度データを取り扱うときには適切な集計単位を設定する必要があることは既に指摘されており、算定される被害率の信頼性の観点から、神戸市東灘区程度の密集度の市街地における低層建物の集計単位の面積は約10,000 m^2 以上必要であることが明らかにされている²⁾。一方、どのような集計単位を設定しても建築物の棟数のパラツキが大きくなることは避けられないため、ベイズ確率の考え方に基づく期待母数被害率の評価法が提案され、調査被害率と比較すると孤立した大きな被害率の街区が少なくなり、より連続的な分布となること³⁾が報告されている。

このため、町丁目の総地点数 N を n 階層(ただし、 $n \ll N$ とする)に新たに分割し直すと、一つの階層に含まれる建築物および被災度建築物の棟数が極端に少なくなることを避けられるため、先ほどのように町丁目ごとに算定された被害率 d と比べて比較的精度のよい被害率が得られることになる。ここで、全ての町丁目に存在する建築物の棟数 K は、

$$K = \sum_{i=1}^N k_i \dots\dots\dots (4)$$

となるので、 K を n 階層に分割すると一つの階層に含まれる建築物の棟数 m は、

$$m = \text{int}\left(\frac{K}{n}\right) + 1 \dots\dots\dots (5)$$

Table 1 地震動強さと被害率の関係
Relationship between Seismic Intensity and Damage Ratio

	地震動強さ b	被害率 r
1	$\frac{\sum_{i=1}^m A_i}{m}$	$\frac{\sum_{i=1}^m D_i}{m}$
2	$\frac{\sum_{i=m+1}^{2m} A_i}{m}$	$\frac{\sum_{i=m+1}^{2m} D_i}{m}$
⋮	⋮	⋮
n	$\frac{\sum_{i=\{m(n-1)+1\}}^K A_i}{K - m(n-1)}$	$\frac{\sum_{i=\{m(n-1)+1\}}^K D_i}{K - m(n-1)}$

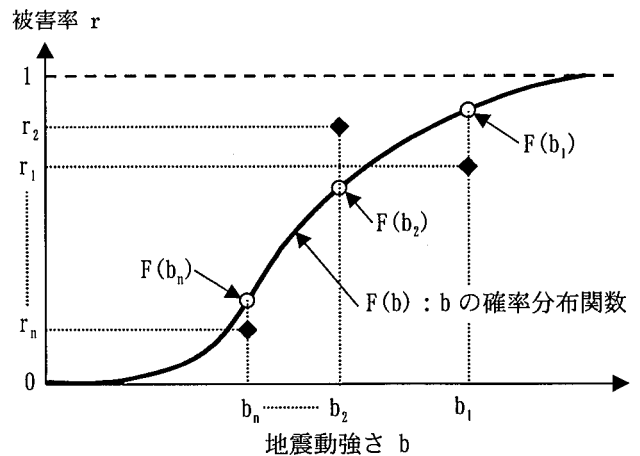


Fig. 2 累積分布関数を用いた被害関数の回帰
Regression Analysis of Vulnerability Function for Cumulative Distribution Function

となる。つぎに、それぞれの町丁目に存在する建築物の棟数 k が異なるので、 k の大小に起因する被害率 d の質の差異を反映させるため、被害率 d を k で重み付けする。このとき、全ての町丁目に存在する建築物の棟数 K に対応した地震動強さ A_i および被害率 D_i ($i=1\sim K$) は、町丁目ごとの地震動強さ a_i および被害率 d_i ($i=1\sim N$) を用いてそれぞれ次のように定義する。

$$A(1 \rightarrow k_1) = a_1 \quad ; \quad D(1 \rightarrow k_1) = d_1$$

$$A(k_1 + 1 \rightarrow k_1 + k_2) = a_2 \quad ; \quad D(k_1 + 1 \rightarrow k_1 + k_2) = d_2$$

$$\vdots$$

$$A\left(\sum_{i=1}^{N-1} k_i + 1 \rightarrow K\right) = a_N \quad ; \quad D\left(\sum_{i=1}^{N-1} k_i + 1 \rightarrow K\right) = d_N$$

従って、 n 階層に対応した地震動強さ b_i と建築物の被害率 r_i ($i=1\sim n$) が Table 1 を用いて算定できる。

2.3.2 被害関数の回帰法 建築物被災度データに基づいた被害関数が評価できたので、被害関数を地震動強さ b を確率変数とした場合の累積分布関数 $F(b)$ を用いて回帰することについて考える。

ここで、Fig. 2に示すように、ある地震動強さ b の被害

率 r (図中の◆に対応する) に着目すると、棟数 m のなかで被害を受けた棟数は $r \times m$ 、逆に被害を受けなかった棟数は $(1-r) \times m$ となる。一方、この場合において累積分布関数から得られる被害の発生確率は $F(b)$ (図中の○に対応する) 、逆に無被害の発生確率は $1-F(b)$ となる。ここで、個々の建築物の被害発生的事象が互いに独立であると仮定すると、 m 回のベルヌーイ試行 (1 回の試行で可能な結果が 2 種類、すなわち、ある事象が発生するかないかのいずれかである試行のこと) において、丁度 $r \times m$ 回事象が発生する確率 $P(X = r \times m)$ は、次式に示す二項分布の確率関数により得られる。

$$P(X = r \times m) = \binom{m}{r \times m} \times F(b)^{r \times m} \times \{1 - F(b)\}^{(1-r)m} \quad (6)$$

ここに、 $\binom{m}{r \times m}$ は二項係数であり次式で定義される。

$$\binom{m}{r \times m} = \frac{m!}{(r \times m)! \times \{m - (r \times m)\}!} \quad \dots\dots\dots (7)$$

同様に、 n 階層のデータ ($i=1 \sim n$) に対して (6) 式が成り立つ。

このとき、一連 ($i=1 \sim n$) の地震動強さと被害率の関係 (b_i, r_i) が最も実現しやすい累積分布関数 $F(b)$ の母数を推定することは、それぞれの地震動強さに対する被害の発生確率 $P(X = r \times m)$ を $1 \sim n$ まで掛け合わせた値を最大化することと等価であるといえる。このような母数の推定法は、最尤法と呼ばれている。(6) 式二項分布に対する尤度関数 L は、(7) 式二項係数を省略 (二項係数は $F(b)$ の項を含んでいないので、母数の推定に影響を及ぼさないため) して表現すると次式が得られる。

$$L = \left[\left\{ F(b_1) \right\}^{r_1 \times m} \times \left\{ 1 - F(b_1) \right\}^{(1-r_1)m} \right] \times \left[\left\{ F(b_2) \right\}^{r_2 \times m} \times \left\{ 1 - F(b_2) \right\}^{(1-r_2)m} \right] \times \dots \times \left\{ F(b_n) \right\}^{r_n \times \{K - m(n-1)\}} \times \left\{ 1 - F(b_n) \right\}^{(1-r_n) \times \{K - m(n-1)\}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、(8) 式自然対数をとると、対数尤度関数 $\ln L$ が得られる。

$$\begin{aligned} \ln L = & \left[(r_1 \times m) \times \ln \{ F(b_1) \} + \{ (1-r_1)m \} \times \ln \{ 1 - F(b_1) \} \right] \\ & + \left[(r_2 \times m) \times \ln \{ F(b_2) \} + \{ (1-r_2)m \} \times \ln \{ 1 - F(b_2) \} \right] \\ & + \dots\dots\dots \\ & + r_n \times \{ K - m(n-1) \} \times \ln \{ F(b_n) \} \\ & + (1-r_n) \times \{ K - m(n-1) \} \times \ln \{ 1 - F(b_n) \} \\ = & \sum_{i=1}^n \left[(r_i \times m) \times \ln F(b_i) + \{ (1-r_i)m \} \times \ln \{ 1 - F(b_i) \} \right] \\ & + r_n \times \{ K - m(n-1) \} \times \ln \{ F(b_n) \} \\ & + (1-r_n) \times \{ K - m(n-1) \} \times \ln \{ 1 - F(b_n) \} \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ところで、(9) 式において被害関数を回帰するときの累積分布関数 $F(b)$ の分布形であるが、既往の文献を参照

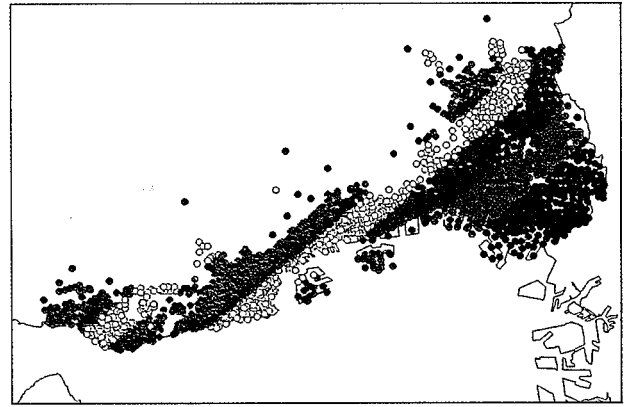


Fig. 3 地表面最大加速度の推定
Estimation of Peak Ground Acceleration due to 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake

すると、静岡県内に存在する 1,615 棟の RC 造公共建築物を対象に耐震診断を行った結果、個々の建築物の構造耐震指標 I_s を頻度分布で表現すると対数正規分布が最もよく近似できたこと⁴⁾ や、兵庫県南部地震に対して既に算定された被害関数の分布形^{5), 6)} なども対数正規分布が用いられることが多いので、ここでも $F(b)$ の分布形を対数正規分布に仮定した。このとき、それぞれの地震動強さ b_i ($i=1 \sim n$) に対応した被害発生確率 $F(b_i)$ は次式から求められる。

$$F(b_i) = \Phi \left(\frac{\ln b_i - \lambda}{\xi} \right) \quad (i=1 \sim n) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 λ と ξ は対数平均値と対数標準偏差であり、平均値 μ と変動係数 V に対して以下の関係がある。また、 $\Phi(\cdot)$ は平均: 0、標準偏差: 1 の標準正規累積分布関数である。

$$\mu = \exp \left(\lambda + \frac{1}{2} \xi^2 \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$V = \sqrt{\exp(\xi^2) - 1} \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上の条件のもとで、(10) 式を (9) 式に代入することにより対数尤度関数 $\ln L$ が計算できることになり、 $\ln L$ を最大化する累積分布関数 $F(b)$ の母数 λ と ξ を、最適化の一手法であるシンプレックス法⁷⁾ により求めた。

2.4 地震動強さ分布の推定

既往の研究報告では、地表面最大速度を地震動強さの指標として被害関数を推定している⁸⁾。これは、地動最大速度が構造物の被害と相関が良い事に基づいている。一方、最大加速度は、構造物への設計震度と直接的に関係付けられており、意味は明快であるものの、地盤種別との相関性が少ない等、地震動強さの周期特性を反映し難い点に問題点もある。本報告では、後述する降伏ベースシア係数スペクトルの検討、また I_s 値等との整合性を鑑み最大加速度を地震動強さの指標として用いる事とした。用いた距離減衰式は兵庫県南部地震においてその整合性が確認されている福島・田中式⁹⁾ である。断層

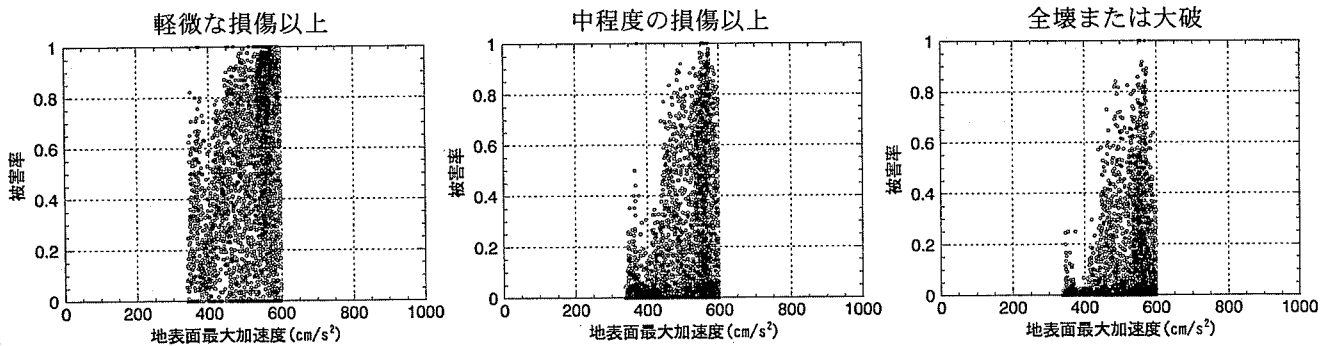


Fig. 4 町丁目単位の被害関数 (被災度データ: 全ての建築物, 建築物用途: 全用途)
Vulnerability Function Obtained from the Original Damaged Database

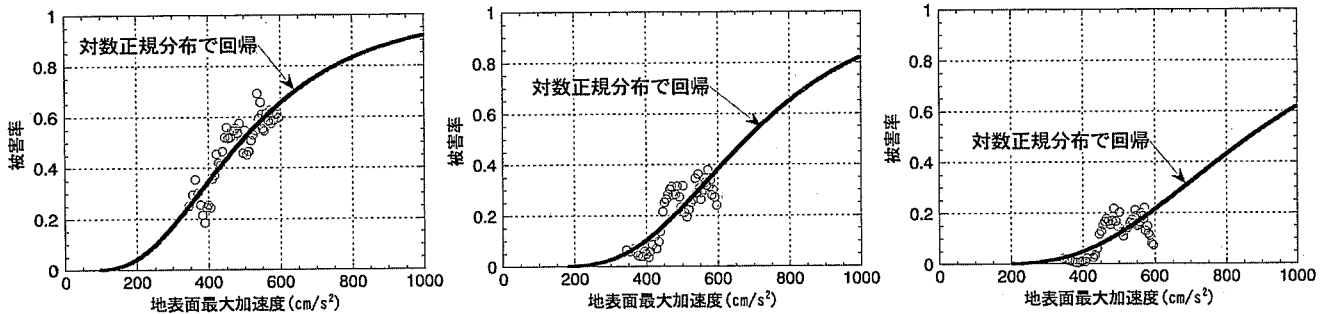


Fig. 5 階層単位の被害関数 (被災度データ: 全ての建築物, 建築物用途: 全用途)
Vulnerability Function Obtained from the Modified Damaged Database

最短距離を計算する際に用いた断面はWaldのモデル¹⁰⁾とした。

このとき、それぞれの町丁目の代表地点において推定された地表最大加速度の大きさをFig. 3に示す。図中、赤丸が550cm/s²以上、青丸が400cm/s²以下であり、残りは50cm/s²ピッチで色を変えている。

2.5 解析結果

2.5.1 被害関数の評価例 地震動強さの指標として地表最大加速度を採用し、全ての建築物の棟数から火災による損傷と未調査・不明の棟数を除いた444,457棟を対象に、(1)~(3)式に従いそれぞれの被災度レベル(軽微な損傷以上、中程度の損傷以上、全壊または大破の3種類)に対応した被害関数を算定した。ここで、建築物被災度データベースを用いて3,658地点を対象に計算された町丁目単位の被害関数をFig. 4に、2.3節の評価手法に従い町丁目単位の被災度データを50階層に分割して計算された階層単位の被害関数をFig. 5に示す。

町丁目単位の被害関数を見ると、全般的に地表最大加速度が大きくなるにつれて被害率が大きくなる傾向があるといえる。しかし、ある地表最大加速度に対する被害率のバラツキは大きく、町丁目単位のデータを用いて被害関数を推定すると回帰式まわりのバラツキが大きくなる懸念される。

一方、階層単位の被害関数に着目すると、先ほどのような被害率のバラツキは激減し、多少のバラツキがあるものの地表最大加速度が大きくなるに従い被害率が大きくなる傾向があることがわかる。ここで、被害関数を対数正規分布関数で回帰した場合の結果を、Fig. 5の図中に実線で示す。このとき、50階層のデータから求めた

被害率と対数正規分布関数を用いて推定した被害率の間の相関係数は、軽微以上、中程度以上、全壊または大破についてそれぞれ0.902, 0.856, 0.699であり、地表最大加速度に対する被害率の関係は対数正規分布関数を用いてほぼ回帰できるといえる。

2.5.2 被害関数のパラメータ評価 全ての建築物および低層建築物と中高層建築物を対象に、建築物用途別(戸建住宅、集合住宅、商業・業務施設、工業施設、全用途)の被害関数を被災度レベル別に作成し、その分布形を対数正規分布関数で回帰して対数平均値と対数標準偏差を算定し、(11)式と(12)式を用いて被害関数の平均値と変動係数を求めた。ただし、低層建築物と中高層建築物とは、全ての建築物のデータを建築物階数別(低層建築物は2階以下、中高層建築物は3階以上)に分類したデータであり、また建築物用途における全用途とは、戸建住宅、集合住宅、商業・業務施設、工業施設にその他の施設と用途未調査の施設を加えたものである。一方、それぞれのデータにおける建築物用途別の構成比はFig. 1に示したとおりである。このとき、建築物用途別の被害関数の平均値をFig. 6に、被害関数の変動係数をFig. 7に示す。これらの図から、以下のことがわかる。

1) 全ての建築物を対象にした被害関数を見ると、地表最大加速度の平均値は建築物用途の違いによる差はほとんどなく、軽微以上、中程度以上、全壊または大破に対してそれぞれ約550cm/s²、約700cm/s²、約950cm/s²であることがわかる。また、変動係数は建築物用途および被災度レベルの違いによる差が多少見られるものの、約0.5程度であるといえる。

2) 低層建築物を対象にした被害関数を見ると、地表最大加速度の平均値が全ての建築物を対象にした場合と比

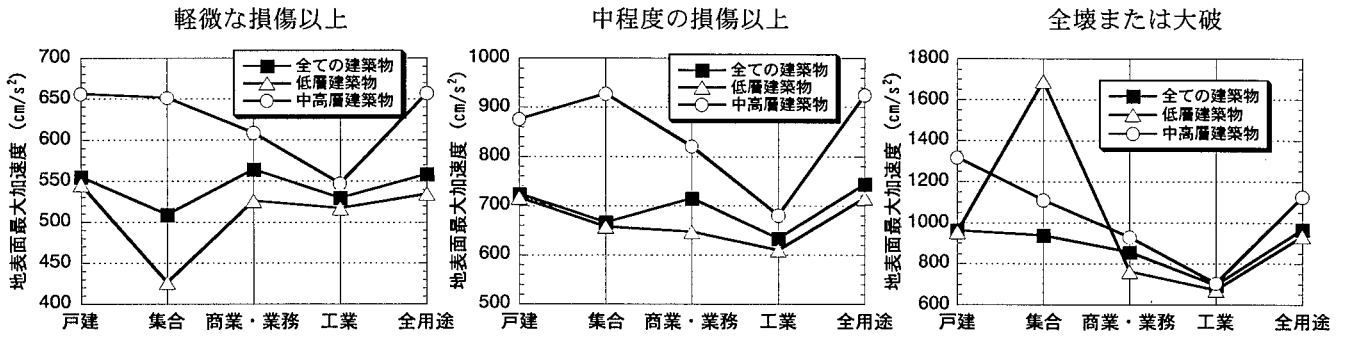


Fig. 6 被害関数の平均値
Expectation of Vulnerability Function

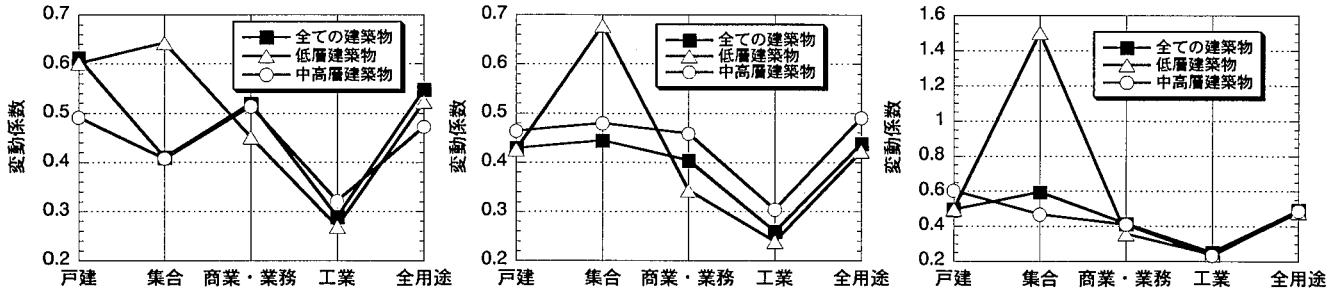


Fig. 7 被害関数の変動係数
Coefficient of Variation (C. O. V.) of Vulnerability Function

較して、被災度レベルに関係なく約0.9倍程度になっていることがわかる。しかし、全体的な傾向としては平均値と変動係数とも、全ての建築物の場合とほぼ同じである。

3) 中高層建築物を対象にした被害関数を見ると、地表面最大加速度の平均値が全ての建築物を対象にした場合と比較して、軽微以上で約1.2倍、中程度以上で約1.3倍、全壊または大破で約1.1倍程度になっており、建築物の高さによる耐震性能の差異が明らかにあるといえる。しかし、全体的な傾向は平均値と変動係数とも全ての建築物の場合とほぼ同じである。

4) 低層建築物の集合住宅を対象とした被害関数に着目すると、全壊または大破の平均値と変動係数が他の用途の値と比較して極端に大きくなっていることがわかる。この原因として、この場合は地表面最大加速度の大小に関係なく被災度データから求めた被害率が一定になる傾向が強い（すなわち、地表面最大加速度と被害率の間の相関が弱い）ため、被害関数を対数正規分布関数で回帰したとき変動係数が極端に大きくなり、結果的に平均値が大きくなったと考えられる。従って、このような被災度データから被害関数を作成するときには、十分な注意を要すると思われる。

3. 降伏ベースシアー係数の推定

建築物被災度データベースを用いて町丁目単位で求められた被害率は、ある面的な広がりを持った地域を対象にしているため、さまざまな表層地盤の特性やさまざまな周期および降伏耐力を有する建築物が含まれていると考えられる。従って、建築物群としての被害率とある特

定の建築物を対象にした構造的被害発生確率との関係を明確しておく必要があるといえる¹¹⁾。このような観点からの研究も既に行われ、例えば表層地盤別加速度応答スペクトルとRC造建築物群の降伏ベースシアー係数の分布を用いて1978年の宮城県沖地震に対する仙台市の震害予測を行い、被害率の予測値と調査値との対比から地震動強さを推定した結果、強震観測値とよい対応がみられたこと¹²⁾や、また兵庫県南部地震の建物被害データベースに基づく被害関数と地震応答解析に基づく被害関数を比較検討し、3階建てRC造建築物の降伏ベースシアー係数の平均値は1.6~1.8、変動係数は0.6程度である¹³⁾という結果も得られている。

このような背景を踏まえ、2章で得られた被害率はさまざまな表層地盤および建築物の特性を含んでいるため、これらの要因はある意味において町丁目内で平均化されると仮定し、被害率の大きさは建築物の周期の違いには依存せず、地表面最大加速度の大きさのみに依存するという大胆な前提条件を設け、地震応答解析により降伏ベースシアー係数の平均値の推定を中高層建築物を対象に行い、既往の耐震診断結果^{4), 15)}との比較検討を行った。

3.1 降伏ベースシアー係数の平均値の推定

解析モデルは、基礎固定1質点系せん断型モデルとし、復元力特性は、Fig. 1の中高層建築物の内訳を見ると、集合住宅と商業・業務施設を合計した棟数の全体に占める割合が約52.3%のため、この被災度データに含まれる建築物の構造種別はRC造あるいはSRC造が多いと判断し、Takedaモデルを設定した。ここで、Fig. 8に示すように、ひび割れ耐力 Q_c は降伏耐力 Q_y の1/3、降伏時剛性 K_y

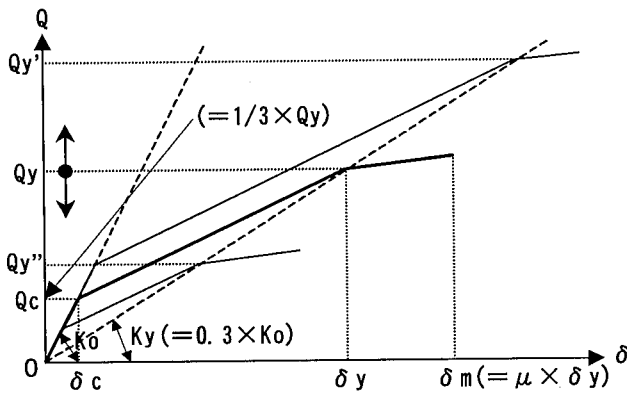


Fig. 8 解析モデル Analytical Model

Table 2 解析パラメーター Analytical Parameters

	被災度レベル	地表面最大加速度の平均値 (cm/s ²)	許容塑性率の平均値
CASE1	軽微な損傷以上	657.3	0.75
CASE2	中程度の損傷以上	924.8	1.5
CASE3	全壊または大破	1125.4	2.5

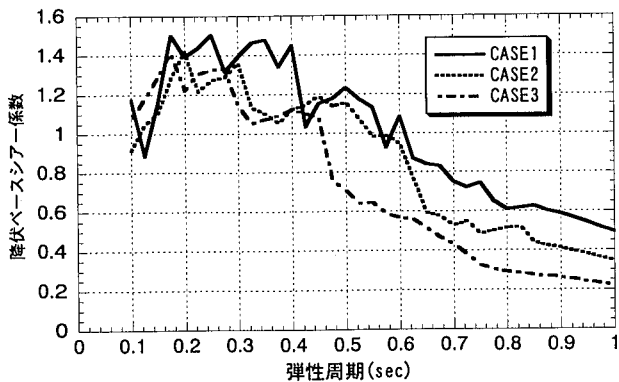


Fig. 9 降伏ベースシア係数の平均値の推定 Expectation of Yield Base Shear Coefficient

は弾性剛性 K_o の0.3とし、除荷時剛性低下率は0.4、降伏後の剛性は弾性剛性の0.001とした。また、減衰定数は3%とし、減衰の与え方は瞬間剛性比例型とした。このとき、ある許容塑性率を満足させる降伏耐力 Q_y を地震応答解析の繰り返し計算により算定した。

ところで、建築物の被災度レベルを構造的な許容塑性率に関係付ける場合、現地調査の段階で建築物をある被災度区分に分類するとき生じた不確定性¹⁴⁾や被災度レベルにはある幅が存在するため同じ被災度レベルでも塑性率はあるバラツキを有すると考えられる。これらの変動要因を被害関数のバラツキを用いて簡略的に考慮するため、被害関数の地表面最大加速度の平均値に対応した許容塑性率の平均値を過去の地震被害状況から推定し、それぞれの被災度レベルに応じてTable 2のように設定した。

以上の条件のもとで、神戸海洋気象台波のNS成分を入力とした地震応答解析を行い、許容塑性率の平均値を満足する降伏ベースシア係数の平均値を弾性周期ごとに

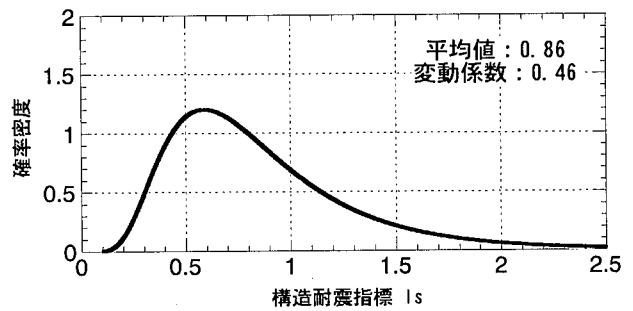


Fig. 10 構造耐震指標の分布(公共建築物)⁴⁾ Distribution on Seismic Index of Structure for Public Buildings

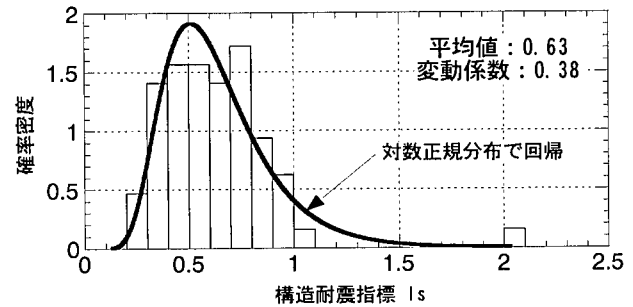


Fig. 11 構造耐震指標の分布(商業建築物)¹⁵⁾ Distribution on Seismic Index of Structure for Commercial Buildings

求めた。解析結果を、CASE1~CASE3についてFig. 9に示す。この結果から、加速度応答スペクトルがほぼ一定となる弾性周期が約0.5sec以下の領域に着目すると、降伏ベースシア係数の推定結果は多少のバラツキがあるもののCASE1~CASE3の違いによる差異は小さいといえる。従って、Table 2で設定した被災度レベルと許容塑性率の関係がほぼ妥当であることが示された。

3.2 耐震診断結果との比較検討

静岡県内に存在する1,615棟のRC造公共建築物(以下、公共建築物と呼ぶ)を対象に耐震診断(第2次診断)を行った場合の1階の構造耐震指標の分布⁴⁾をFig. 10に、また兵庫県南部地震で被害を受けた激震地域に存在する64棟の鉄筋コンクリート系建築物(以下、商業建築物と呼ぶ)を対象に耐震診断(第2次あるいは第3次診断)を行った場合の被害が最も大きい階の構造耐震指標の分布¹⁵⁾をFig. 11に示す。ここで、公共建築物の大半は旧基準で設計された2~4階建ての学校建築物であり、また商業建築物の内訳は事務所と共同住宅が全体の84%を占め、階数は3~13階で平均階数は7.5階であり、旧基準建築物が42棟で新基準建築物が22棟である。

被害関数から推定された降伏ベースシア係数と耐震診断結果とを比較するため、構造耐震指標の式中で形状指標 S_0 と経年指標 T はともに1と仮定し、さらに公共建築物は旧基準の建築物が大半であるため鉛直部材としてせん断柱やせん断壁が多いと判断してじん性指標 F は1.0とし、また商業建築物は建築物の高さが比較的大きいため曲げ柱や曲げ壁が多いと判断してじん性指標 F は1.27に仮定した¹⁶⁾。このとき、公共建築物の強度指標 C の平均

値は0.86, 商業建築物の強度指標Cの平均値は0.50となり, これらの値を耐震診断結果による降伏ベースシアー係数とみなした。

ここで, 公共建築物の周期を約0.2secと仮定すると, Fig.9から降伏ベースシアー係数の平均値は1.2~1.4程度と推定される。この値を耐震診断結果と比較すると, 耐震診断による値の方が約40%程度小さいことがわかる。この原因として, 公共建築物の構造耐震指標は主に旧基準の未補強建築物を対象に得られたデータであるため, 一般的な建築物と比較してももとの耐力が小さいことが考えられる。同様に, 商業建築物の周期を約0.5secと仮定すると, Fig.9から降伏ベースシアー係数の平均値は約0.65~1.2と推定される。この値を耐震診断結果と比較すると, 耐震診断結果による値は推定結果にバラツキがあるものかなり小さいことがわかる。しかし, せん断壁などと比較して曲げ降伏の破壊形式ではじん性指標Fを多少優遇していること¹⁶⁾や構造耐震指標を算定するときの耐力評価式の精度¹⁷⁾などを考慮すると, 現実の建築物被害から得られた降伏ベースシアー係数の推定値がこの程度大きくなることは十分に考えられると思われる。

4. 補修費用の評価

兵庫県南部地震において被害を受け, 当社が補修を行った107棟の建築物を対象に被災度レベルと補修費用の関係について調査した。このとき, 構造種別に対応した棟数はRC造またはSRC造が75棟, S造が32棟であり, また被災度レベルに応じた棟数は, 小破が77棟, 中破が22棟, 大破が8棟である。

被災度レベルに対応した単位平米当たりの補修費用をFig.12に示す。ここで, 補修費用には躯体費用と設備費用が含まれている。これらの図より, 大破の補修費用が中破の補修費用と比較してかなり安いことがわかる。この原因として, 大破の棟数が小破や中破の棟数と比較して少ないためデータのバラツキが大きいことや, 大破の場合には補修をしないで解体し新築する場合が約20%程度あること²⁰⁾などが考えられる。

5. 地震リスクの評価例

前章までに得られた被害関数と補修費用を用い, 神戸に建つ平均的な建築物を対象に地震リスクを試算した。

5.1 解析条件

5.1.1 地震ハザードの評価 神戸における地震ハザードを, 建築物荷重指針⁸⁾に従い評価する。このとき, 地表面最大加速度の100年再現期待値 A_{100} は, 標準地盤における基本最大加速度が $A_0 = 160cm/s^2$, 第2種地盤を想定すると地盤種別補正係数が $G_A = 1.2$, 再現期間換算係数(100年再現期待値に対する比率)が $R_A = 1.0$ となるので次式から算定できる。

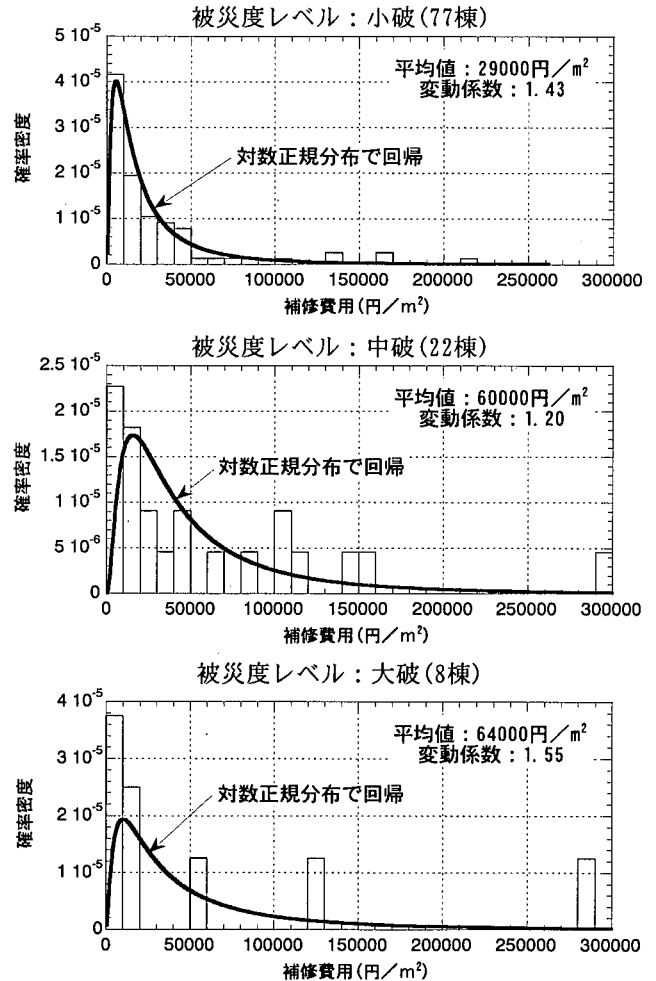


Fig.12 被災度レベルに応じた補修費用
Repair Cost for Each Damage Level

$$A_{100} = G_A \times R_A \times A_0 = 1.2 \times 1.0 \times 160 = 192cm/s^2 \quad (13)$$

ここで, 地表面最大加速度の極値分布をFrechet分布に仮定すると, T年最大値の確率密度関数 $f(a; T=t)$ と累積分布関数 $F(a; T=t)$ が次式からそれぞれ求められる。

$$f(a; T=t) = T \times \left(\frac{V}{a}\right)^{k+1} \times \left(\frac{k}{V}\right) \times \exp\left[-T \times \left(\frac{V}{a}\right)^k\right] \quad (14)$$

$$F(a; T=t) = \exp\left[-T \times \left(\frac{V}{a}\right)^k\right] \dots\dots\dots (15)$$

上式において, 特性最大値Vと形状パラメータk(分布の逆尺度に相当)は, $V=20.6cm/s^2$, $k=2.05$ となる。このとき, 地表面最大加速度aと年超過確率 $1-F(a; T=1)$ の関係をFig.13に示す。

5.1.2 被害関数と補修費用の設定 被害関数の平均値と変動係数は, Fig.6とFig.7において中高層建築物の全用途の値を用いることにし, 被災度レベルの軽微, 中程度, 全壊または大破をそれぞれ小破, 中破, 大破とみなすことにした。一方, 小破と中破に対する補修費用はFig.12における平均値とし, 大破の場合は解体して新築することを想定し, 平均的な建築物の新築費を設定した。以上の条件をまとめると, Table 3となる。

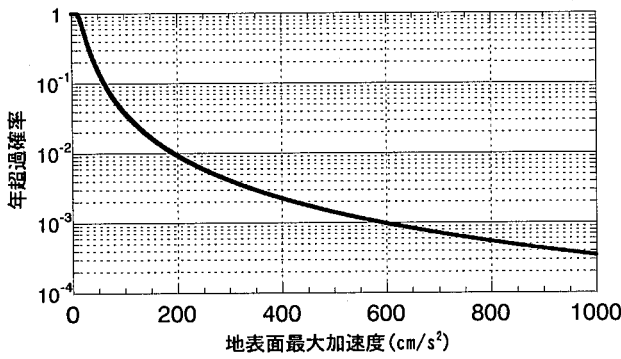


Fig. 13 地震ハザード曲線 (神戸)
Seismic Hazard Curve in Kobe

Table 3 被害関数と補修費用の設定
Expectation and C. O. V. of Vulnerability
Function and Repair Cost for Analysis

	小破	中破	大破
被害関数の平均値 (cm/s ²)	657.3	924.8	1125.4
被害関数の変動係数	0.472	0.490	0.488
補修費用 (円/m ²)	29000	60000	250000

5.2 地震リスクの評価法¹⁹⁾

ある地表面最大加速度 a に対する地震期待ロス関数 $L(a)$ は、Table 3 に示した被害関数と補修費用を用いて次式から算定できる。

$$L(a) = \{P_1(a) - P_2(a)\}C_1 + \{P_2(a) - P_3(a)\}C_2 + P_3(a)C_3 \quad (16)$$

- ここに、 $P_1(a)$: a のときの小破以上の発生確率
- $P_2(a)$: a のときの中破以上の発生確率
- $P_3(a)$: a のときの大破の発生確率
- C_1 : 小破の補修費用
- C_2 : 中破の補修費用
- C_3 : 大破の補修費用

一方、地震期待ロス関数 $L(a)$ をある大きさの地表面最大加速度の発生確率で重み付けし、地表面最大加速度 a で積分することにより得られる年間地震リスク $R(T=1)$ は、(14)式と(16)式を用いて算定できる。

$$R(T=1) = \int \{L(a) \times f(a; T=1)\} da \quad (17)$$

同様に、供用期間が t 年の地震リスク $R(T=t)$ は、(14)式において $T=t$ とおくことにより(17)式から得られる。

5.3 解析結果

地震期待ロス関数をFig. 14に、年間地震リスク密度をFig. 15に、供用期間を1~50年までパラメトリックに変化させたときの地震リスクをFig. 16に示す。ここで、補修費用を新築費で基準化している。

地震期待ロス関数を見ると、地表面最大加速度が比較的小さいときは小破の補修費用が占める割合が大きいが、地表面最大加速度が大きくなるにつれて大破の補修費用が占める割合が次第に大きくなる傾向がある。

地震ハザードを考慮した年間地震リスク密度を見ると、地表面最大加速度が約500cm/s²付近にピーク値があ

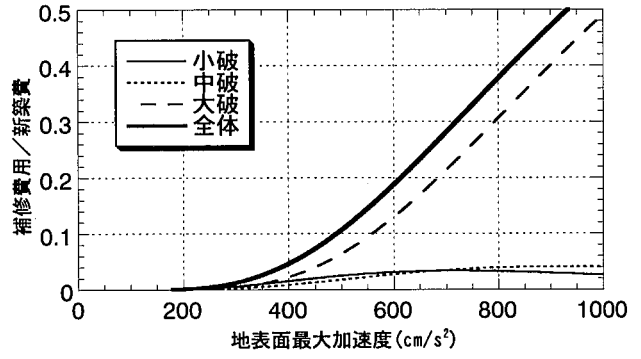


Fig. 14 地震期待ロス関数
Seismic Loss Function

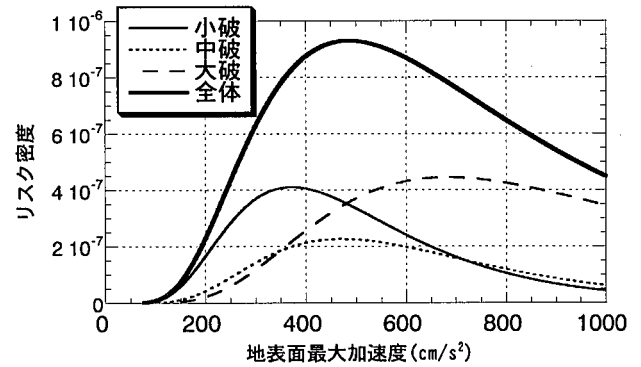


Fig. 15 年間地震リスク密度
Annual Density of Seismic Risk

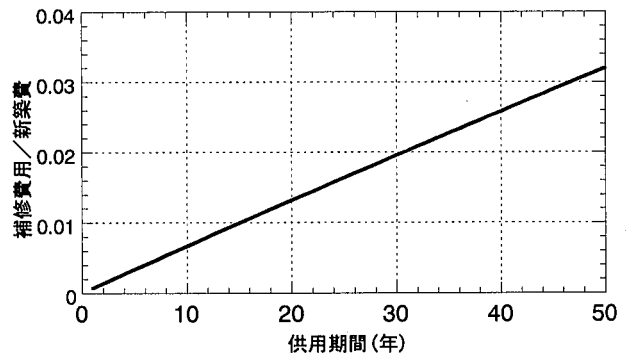


Fig. 16 供用期間中における地震リスク
Seismic Risk in terms of Design Lifetime

り、この周辺の地震リスク密度が年間の地震リスクに対して寄与する割合が大きいといえる。

供用期間中における地震リスクに着目すると、地震の発生を定常ポアソン過程で仮定しているため、供用期間が長くなるにつれて補修費用が高くなり、例えば供用期間が50年のとき新築費の約3%の補修費用が必要になると推定される。ただし、ここでは補修費用に建築費と設備費しか含んでおらず、実際には室内の什器や事業休止に伴う営業損失、さらには人的被害などを考慮すると地震リスクはさらに大きくなると考えられる^{20), 21)}など。

6. まとめ

兵庫県南部地震に対する建築物被災度データベースを用いて被災度レベルに対応した被害関数と補修費用を作

成し、神戸に建つ平均的な建築物を対象に地震リスクを試算した。この結果、以下の知見が得られた。

1) 地震動強さの指標として地表面最大加速度を用いると、被害関数の平均値は、軽微以上、中程度以上、全壊または大破に対してそれぞれ約 550cm/s^2 、約 700cm/s^2 、約 950cm/s^2 である。一方、変動係数は全てのケースに対して約0.5程度である。

2) 単位平米の補修費用の平均値は、小破、中破、大破に対してそれぞれ約29,000円、約60,000円、約64,000円である。しかし、補修費用のバラツキは大きく、変動係数は1.2~1.6程度もある。

3) 神戸に建つ平均的な建築物を対象に地震リスクを試算すると、供用期間が50年のとき新築費の約3%程度の補修費用が必要になる。

このような確率論的アプローチは、不動産評価に関するデューデリジェンスや安全性と経済性のバランスを考慮した最適設計荷重評価²²⁾、²³⁾などにも応用できると考えられる。

謝 辞

被害関数の作成法について、Modern Engineering & Design (MED) 主宰の水谷 守氏の貴重なご指導を戴きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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、(1996)
「この地図は、建設省建築研究所が建設省国土地理院長の承認を得て、同院発行の数値地図10000(総合)を複製したCD-ROMデータに基づいて作成したものである。(承認番号 平成8総複、第26号)」
- 2) 小檜山 雅之、水越 薫、石田 寛、鳥澤 一晃：1995年兵庫県南部地震の建物被害データに基づく被害率集計単位に関する考察、日本建築学会構造系論文報告集、No. 522, pp. 137~142, (1999)
- 3) 石田 寛、水越 薫：ベイズ確率に基づく建物被害率評価手法の検討、大会梗概集(中国)、pp. 41~42, (1999)
- 4) 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報告集、No. 406, pp. 37~43, (1989)
- 5) 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報告集、No. 502, pp. 61~68, (1997)
- 6) 宮腰 淳一、林 康裕、渡辺 宏一、田村 和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価、構造工学論文報告集、Vol. 43B, pp. 269

- ~276, (1997)
- 7) 渡部 力ほか：Fortran77による数値計算ソフトウェア、丸善、pp. 240~243, (1993)
- 8) 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報告集、No. 494, pp. 59~66, (1997)
- 9) 福島 美光、入倉 孝次郎：1995年1月17日兵庫県南部地震における最大振幅の距離減衰、大会梗概集(北海道)、pp. 149~150, (1995)
- 10) Wald D. J. : Slip History of the 1995 Kobe, Japan, Earthquake Determined from Strong Motion, Teleseismic, and Geodetic Data, J. Phys. Earth, J. Phys. Earth, 1996(submitted)
- 11) 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-、大会梗概集(中国)、pp. 37~38, (1999)
- 12) 志賀 敏男、山影 修司：都市におけるRC造建物群の震害予測、第9回日本地震工学シンポジウム、pp. 2305~2310, (1994)
- 13) 宮腰 淳一、林 康裕、田村 和夫：被災データと地震応答解析に基づく建物群の耐震性能に関する考察、第10回日本地震工学シンポジウム、pp. 327~332, (1998)
- 14) 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報告集、No. 524, pp. 65~72, (1999)
- 15) 関 松太郎、称原 良一、長嶋 俊雄：兵庫県南部地震における鉄筋コンクリート系被害建物と構造耐震指標、大会梗概集(九州)、pp. 99~100, (1998)
- 16) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、(1995)
- 17) 中埜 良昭：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、東京大学学位論文、(1989)
- 18) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、丸善、pp. 399~474, (1993)
- 19) (株)篠塚研究所、東京海上火災保険(株)：Seismic Risk Management 方法論および適用例、(1995)
- 20) 神田 順(代表)：損失費用モデルを用いた最適信頼性に基づく設計用地震荷重、東京大学建築学専攻神田研究室、(1998)
- 21) 塚田 康夫、木村 雄一、河村 壮一：SRM手法による免震建物のライフサイクルコスト評価、第10回日本地震工学シンポジウム、pp. 241~246, (1998)
- 22) 佐藤 一郎、平川 倫生、神田 順：活断層を考慮した地震危険度解析と最適信頼性への応用、第10回日本地震工学シンポジウム、pp. 145~150, (1998)
- 23) 神田 順、平川 倫生：限界状態設計における設計荷重のための最適目標信頼性指標、日本建築学会構造系論文報告集、No. 523, pp. 39~46, (1999)