

## ユーザーの要望を反映した耐震性能レベルの確率的設定手法の提案

PROPOSED PROBABILISTIC METHOD FOR DETERMINING TARGET LEVEL  
OF EARTHQUAKE-RESISTANCE REFLECTING USER'S NEEDS

平田 京子\*, 石川 孝重\*\*

Kyoko HIRATA and Takashige ISHIKAWA

Many methods have been developed for evaluating the earthquake-resistant performance of buildings. However, we have no adequate method for directly communicating with users on target earthquake-resistant level using simple words. With the development of performance-based design, designers need to communicate more with users regarding target levels of building performance. They also need to have a precise understanding of structural safety and to be able to explain it to users to determine a target level of building design. Therefore, the target earthquake-resistant level required by Japanese society must be clarified quantitatively. This paper describes a new method for deriving user's needs on target earthquake-resistant level as a design index, and tries to evaluate a desirable target level probabilistically from user questionnaires based on structural reliability theory. Many users do not have any methods to express their requirements on target earthquake-resistant level, but our proposed method could evaluate users' requirement as a reliability index without using technical terms.

**Keywords:** Performance-based design, Structural safety, Earthquake-resistant level, Users, Performance, Reliability index

性能設計, 構造安全, 耐震レベル, ユーザー, 要求性能, 信頼性指標

## 1. はじめに

建築物の性能設計が進展しつつある。そのきっかけは1998年の建築基準法改正であり、1999年成立の「住宅の品質確保の促進等に関する法律」(品確法)は性能設計に対して、より直接的に影響を与えたと考えられる。

従来は、設計者が構造性能の詳細について直接ユーザーに説明することはほとんどなかった。このことを考えれば、性能設計とその表示は情報公開型社会へと急激に変わりつつある現代の要請に応えるものである。さらに、性能設計は設計情報を事前に建築主に対して開示できるため、建築主の自己責任を明確にできるという長所をもつ。ここで重要なのは、建築物に対して最終的に責任を負担する主体は建築主であるユーザーであり、たとえ専門知識を有していないユーザーであろうとも、設計者はユーザーに対して説明責任を負っている点である。これからの設計のあり方として「設計者がユーザーとの合意に基づき設計を行うこと」<sup>1)</sup>が指摘されていることか

らも、各性能を明示する性能設計では、表示システムの構築と並んで、この説明と合意のプロセスが重要である。

これまでのアンケート調査<sup>2)</sup>によって、社会から性能表示を強く要望されている構造性能として、耐震性能とそのレベルがあり、できるだけ分かりやすく定量的に明示してほしい、そして自分の意思でそのレベルを決めたいという要望のあることが明らかになった。耐震性能について、ユーザー自身が理解・選択を考え始めている。

そこで本研究は、これらを受けて2つのことを解き明かしたい。1つめはユーザーに直接要望レベルを聞き出す手法の考案であり、これは、設計時に建物の耐震安全性レベルの目標性能設定についてユーザーと会話できるようにすることをねらいとしている。2つめは、この手法を用いて社会的に要望されている耐震安全性レベルの現状を定量的に評価することである。

設計者は構造設計を進める際に、2つのことに注意する必要がある。1つは目標性能の設定であり、ユーザーの合意を取り付けた

\* 日本女子大学住居学科 専任講師・家政学修士

Lecturer, Dept. of Housing and Architecture, Japan Women's Univ., M.H.E.

\*\* 日本女子大学住居学科 教授・工学博士

Prof., Dept. of Housing and Architecture, Japan Women's Univ., Dr. Eng.

めにも、ユーザーの要望を正確に聞き出す必要がある。これが1つめの目的である耐震安全性レベルの設定手法の提案に該当する。

また、設計者はその時点での標準的なレベルを認識した上で、標準レベルに対してどのくらいのレベルにするのかを予算と考え合わせて設定する必要がある。社会全体としては現在の耐震安全性レベルを許容しているのか、本当はどのくらいのレベルを期待するのか、定量的に明らかにしておくことも重要である。これはユーザーへの説明責任を果たし、合意に基づく設計を進めるためにも必要であり、本研究の2つめの目的に該当する。

安全性レベルの評価は、信頼性解析などを使って設計目標レベルの定量的評価がなされようとしているが、社会的に要望されるレベルを決定主体である社会に問うという試みは遅れており、ほとんど解明されたことがない。

既往の研究でユーザーの要望から構造安全性にアプローチしたものには久木・石川<sup>9)</sup>が、専門家側へアプローチしたものには日本建築学会設計荷重理論小委員会の調査<sup>4)</sup>がある。定性的な安全意識は建設省総プロで調査が行われた<sup>9)</sup>。しかし、構造安全性レベルの要望を設計指標として用いることができる精度で調査したものはみられない。

本研究は、このように社会からの要求が高い耐震安全性のレベルについて、専門知識をもたないユーザーに直接レベルの要求を問い、それを個別建物の信頼性指標 $\beta$ として算定する手法を提案することで、定量的評価を可能にしたものである。また、外力は不確定事象であることから、ユーザーが望んでいる目標安全性レベルを確率的に評価することにした。

この手法を用いて現代社会が要望する安全性レベルを信頼性指標 $\beta$ で一元化し、定量的に表現する。これらにより、実際の設計およびこれからの性能設計への活用を図るのがねらいである。

## 2. 調査方法

社会と、その大多数を占めるユーザーの要望を把握するため、全国の女性ユーザー585名に対する意識調査を行った。男女を対象にした同様の調査<sup>9)</sup>でもコストと性能の関係イメージについては類似の結果が出ており、性別による結果の差異はあまりないと判断し、逆に構造安全性をあまり身近にとらえることのない女性層に質問することにした。

このアンケート調査は、ユーザーに住宅を想定してもらい、専門知識を必要としない平易な形で回答できるようにしたものである。基礎調査30回の結果<sup>7,8)</sup>を基に、信頼度の高い回答が得られるように配慮した問題構成とした。住宅を対象にしたのは、オフィスビルなどと比して、耐震安全性レベルの要望について設計者が最も把握しづらいことによる。

2回実施したアンケート調査の概要を表1にまとめた。調査対象者の年齢構成と居住地は図1のとおりで、30歳以上と29歳以下がほぼ半々の構成である。居住地はおおよそ全国であり、関東近県の居住者が多い。アンケート結果の詳細は文献<sup>2,9)</sup>を参照されたい。

調査対象ユーザーの特徴には、性能表示全般に対して関心の高いことがあげられる。年齢によって回答はそれほど変化せず、今回は大枠として、若年層と一般とで意識の違いはないと判断できる<sup>9)</sup>。

重視する住宅の性能項目の質問では、通風・換気性に次いで基礎

表1 アンケート調査の概要

調査名	調査①	調査②
調査時期	1999.6~7	1999.8
対象者	女子大学生	一般女性
年代	10~20代	10~70代
居住地域	東京近県	全国
回収数	208	377
問題構成	性能表示および耐震安全性レベルに関する意識、属性問題から構成。調査②は調査①に問題を付加している。	
属性の区分方法	調査①と②の中から、29歳以下を「若年層」、30歳以上を「一般」と区分する	

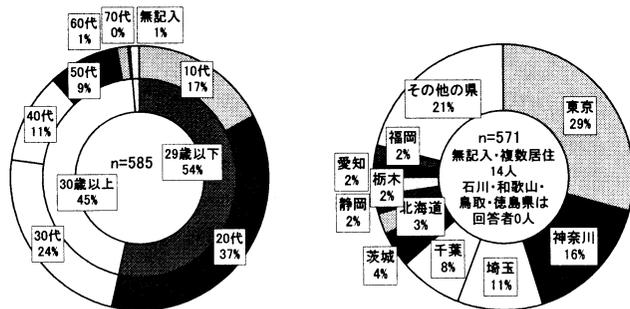


図1 回答者の年齢構成と居住地

・地盤の安全性、構造安全性（建物）についてを重視する回答が2・3位を占めている。また構造・安全性能の重視度合いを調べると、基礎・地盤の安全性が最重要視され、次いで耐久性と耐震性が重視されていることが分かった（図2）。

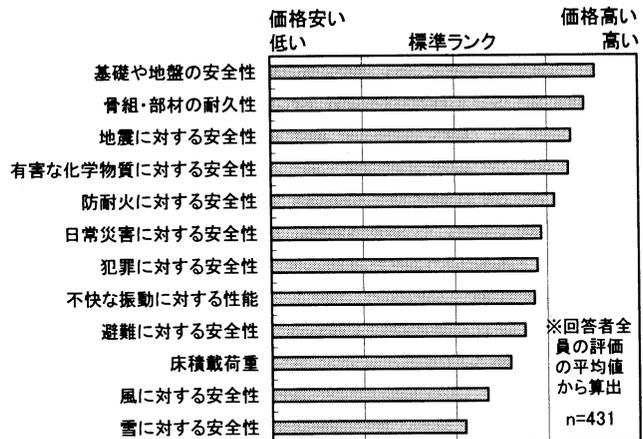


図2 自分の住宅で選択する構造・安全性能レベル

## 3. 耐震安全性レベルの要望を抽出するための指標

### 3.1 レベルに対する要望を表すための設計指標

ユーザーから耐震安全性レベルを聞くためには、設計指標の中からユーザーに分かりやすく、かつ理解されている耐震指標を選ぶ必要がある。その指標に基づき、正確に数値が評価できる精度で質問することが求められる。これまでの調査から、ユーザーに最も分かりやすい指標は「震度階」であることが明らかになった<sup>10)</sup>。数値の精度向上については基礎調査を繰り返し行い、自己矛盾のある場合

は検出できるように問題を洗練した。また、耐震安全性レベルを質問する時の注意事項としては、コストを意識しないと非現実的な回答が多くなることがあげられる<sup>9)</sup>。

### 3.2 震度階を用いた要望レベルの分析

そこで各自にコストと安全性レベルの関係を意識させる形で、耐震安全性レベルのイメージと震度で表す場合の要望レベルを調査した。住宅価格と安全性レベルの関係に対するユーザーの現状イメージは、図3のようにまとめられる。図中のA点は住宅の平均的な価格であり、その10%割増した点がB点である。結果からは、ユーザーの多くは価格と安全性には線形関係があるとイメージしており、安全性にはある程度上限があるという認識をもっていることが分かる。

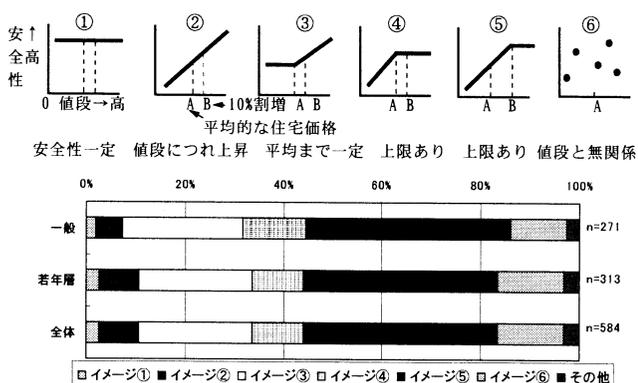


図3 住宅価格と耐震安全性レベルの関係イメージ

同時にA点の時に住宅が耐えられる震度と、B点の価格を支払った時に住宅が耐えられる震度を質問した。ユーザーへの浸透度を考えて旧震度階を用いた。⑤のイメージはB点を上限と考え、その時の震度と上限となる価格をそれぞれ回答してもらった。

各自の考える現在の耐震安全性レベルとしては、平均的な価格の住宅は震度5に耐えられるという回答が最も多い(図4)。建築基準法では、耐用年限中に一度遭遇するかもしれない程度の大地震に対する人命保護を目標としており、これを震度6強～7程度と想定しているが<sup>10)</sup>、これよりも現状が低いレベルであると回答者は想定している。このことから、基準法のレベルに対する正しい知識が一般には浸透しておらず、専門家の考える標準とはギャップのあることが浮き彫りになった。

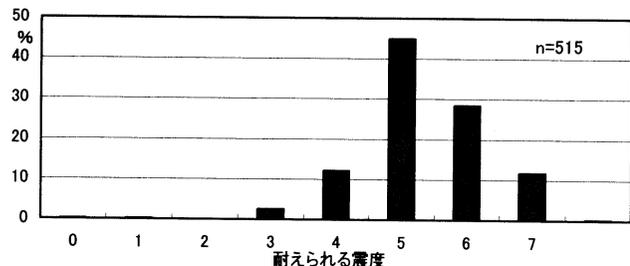


図4 平均的な価格の住宅が耐えられる震度

要望する安全性レベルは、各回答者の選んだイメージ図①～⑥について、自分が支出する住宅の価格割合を図に書き入れてもらった。矛盾のない回答だけを取り出し、各自の答えたA、B点の震度から

安全性の上昇度合いであるA、B2点間の傾きを計算し、希望する住宅価格(%)に対応する「耐えられる震度」の要望を算出した。各震度は加速度の幅(たとえば震度5は80-250gal)をもつため、各々の震度の幅の部分分割して小数点以下を計算し、各自が希望する住宅価格に応じた震度を図5のように求めた。

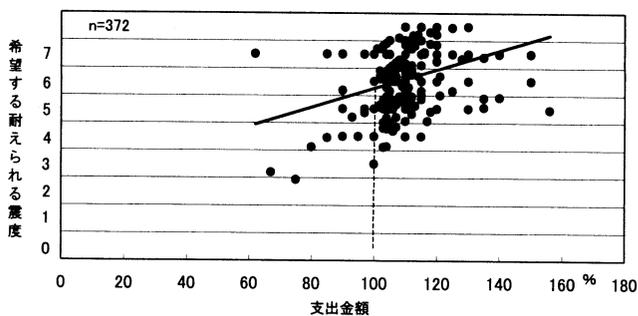


図5 回答者が支払う住宅コストと希望する震度

回答全体の回帰直線を求めると、破線で示した住宅の平均価格(100%)では震度6程度を希望していることが読みとれる。平均よりも高い金額を出して、低いレベルを希望するといった誤った回答が複数みられるが、全体としては、現在よりも高い金額を支出して、より高いレベルを希望していることが分かる。その上昇度合いは緩やかで、全体の回帰直線から読みとると30%の価格上昇で耐えられる震度が1上がる程度である。住宅とビルとは条件が異なるが、実際の建物の安全性レベルの上昇度合い(建設費が10%上がると標準せん断力係数 $C_0$ が2倍になるという試算結果がある)<sup>12)</sup>よりもユーザーイメージの方が小さい勾配であると考えられる。

また、この平均的に耐えられる震度回答と、希望する震度との差を回答者ごとにとってみたのが図6である。回答者は平均的な価格の住宅が耐えられる震度を3～7の範囲とみており(図4)、希望する住宅では震度7を希望する回答者が多かった。このため大幅なレベル上昇を望んでいるように見える。しかし希望する震度と平均と考える震度との震度の差を各回答者ごとに見た図6からは、希望震度が平均震度に影響を受けており、実際には平均と同じか1つ上のレベルを要望している人の多いことが分かる。さらに安全性レベルに対する各自の現状認識が低ければ、希望するレベルはそれに影響されることも判明した。

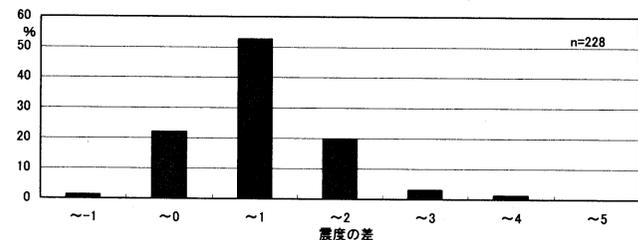


図6 希望する震度と各自の考える平均的震度との差

### 3.3 震度を指標とした算出方法の適合性

多くのユーザーがもつ安全性レベルのイメージは上限のある線形関係であり、標準が震度5程度にあり、希望するレベルは震度6程度をイメージしていることが分かった。レベルの上昇率はイメージの中では現実よりも緩やかであることが推測される。

上限震度のイメージについては、震度7かそれ以上であると考え  
る人がイメージ④⑤の回答者の過半数を占める。上限を震度3～5  
と考える人も13%おり、住宅の安全性がかなり低いと考えている。

図6において自宅の安全性レベルを現在よりも上げたい人の希望  
建設地をみると、東京や北海道の割合が高くなっており、逆に栃木  
や茨城は上げたいという人が少ない結果になった(表2)。地  
域的な特徴もあるが、全体的にはレベルを高めたい人が比較的同じ  
割合で分布している。

表2 安全性レベルを高めたい人と希望建設地の関係

希 望 建設地	居住地域人数/ 回答者数 (母数 571人)	安全性レベルを高めたい 県別人数/同回答 者合計 (母数275人)	高めたい人数/ その県の回答者数
東京	29.1	38.2	63.3
神奈川	16.3	13.5	39.8
埼玉	10.5	6.5	30.0
千葉	7.9	7.6	46.7
茨城	4.2	1.8	20.8
北海道	2.6	3.3	60.0
静岡	2.3	1.8	38.5
栃木	2.1	0.7	16.7
福岡	2.1	1.8	41.7
愛知	1.9	1.8	45.5
その他	21.0	22.9	52.5

したがって、震度階は分かりやすい指標ではあるが、図5にみら  
れるように、誤解も含まれた結果であることが分かる。

#### 4. ユーザーの要望する個別建物の安全性レベルの評価手法

##### 4.1 信頼性解析を用いた耐震安全性レベルの設定手法

住宅の耐えられる震度についてのユーザーの認識には誤ったもの  
も多く、平均的震度も低く考えられているため、回答の震度を直接  
安全性レベルの要望とみなすことはやや早急であると判断される。  
そこでイメージ図の横軸に該当する、各ユーザーが住宅を建てるた  
めに支出する金額で得られる実際の建物耐力を算出し、建設地で想  
定される地震外力に対する目標耐震安全性レベルを信頼性解析によ  
って求める手法を提案する。

##### 4.2 信頼性指標と全壊確率の算出

2次モーメント法を用いて、アンケートから各ユーザーが要望す  
る耐震安全性レベルを算出する。図7にそのフローを示す。ユーザ  
ーが自分の希望する土地に住宅(一戸建または集合住宅)を建設す  
ると想定する。この場合、耐震安全性レベルは確率的指標であり、設  
計指標に直結する信頼性指標( $\beta$ )で算出する。

建物耐力の確率変数を  $R$ 、地震による荷重効果の確率変数を  $S$  と  
する。荷重効果はユーザーの希望建設地における基準期間中の地震  
による最大加速度応答とする。 $R$  と  $S$  はそれぞれ独立の対数正規分  
布と考え、住宅の全壊は  $S$  が  $R$  を少なくとも1回上回る時、つまり  
応答が建物耐力を超える時に起こると仮定する。ここで、性能関数  
 $Z = R/S$  とおくと、この時の住宅の全壊確率  $P_f$  は次式で表される。

$$P_f = Prob [Z < 1] \quad \dots(1)$$

ここで  $R$ 、 $S$  は対数正規分布であり、次式が成り立つ。

$$\ln Z = \ln R - \ln S \quad \dots(2)$$

$R$ 、 $S$  の自然対数の平均値を  $\lambda_r$ 、 $\lambda_s$ 、標準偏差を  $\zeta_r$ 、 $\zeta_s$  と  
すれば  $\ln Z$  は正規分布になる。 $\ln Z$  の平均値  $\lambda_z$  と標準偏差  $\zeta_z$  は、  
 $\lambda_z = \lambda_r - \lambda_s$  ...(3)

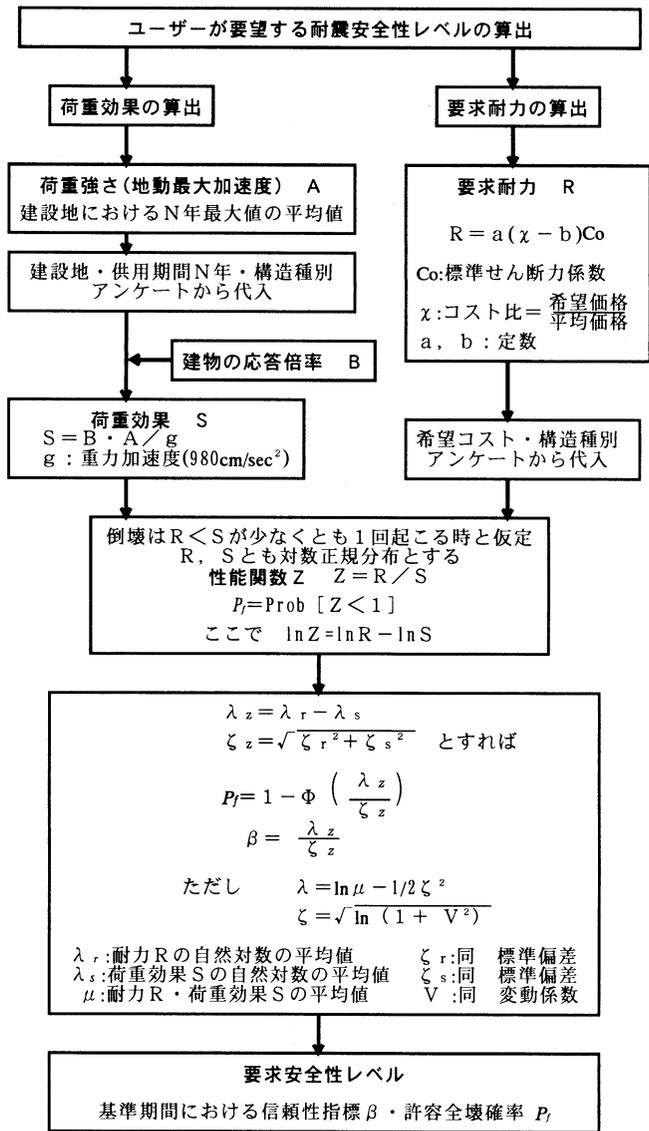


図7 耐震安全性レベルの算出フロー

$$\zeta_z = \sqrt{\zeta_r^2 + \zeta_s^2} \quad \dots(4)$$

と与えられる。ここで、

$$\lambda = \ln \mu - 1/2 \zeta^2 \quad \mu : \text{平均値} \quad \dots(5)$$

$$\zeta = \sqrt{\ln(1 + V^2)} \quad V : \text{変動係数} \quad \dots(6)$$

したがって、

$$P_f = 1 - \Phi \left( \frac{\lambda_z}{\zeta_z} \right) \quad \Phi(\cdot) : \text{標準正規確率分布} \quad \dots(7)$$

$$\beta = \frac{\lambda_z}{\zeta_z} \quad \dots(8)$$

となり、許容全壊確率  $P_f$  および信頼性指標  $\beta$  が求められる。

##### 4.3 要求耐力の算出

信頼性指標  $\beta$  の評価に必要な住宅耐力の算出方法は、ユーザーの  
イメージに基づく要望を抽出するため、各自の抱く「耐えられる震  
度と価格の関係」イメージ図(図3)を用いて、ユーザーのイメ  
ージと自分が支払う住宅コストを質問しておき、そのコストで得られ  
る実際の建物耐力を設計者が算出する。耐力は標準せん断力係数  $C_0$   
の関数とする。

各耐力を、図3における各イメージに対応する関係式を用いて算出した。たとえばユーザーがレベルとコストに線形性があると認識している場合、希望コストで得られる耐力は平均価格に対するコスト比と標準せん断力係数 $C_0$ の線形式から求められる。その傾きは、「建設費と標準せん断力係数 $C_0$ はほぼ線形関係にあり、 $C_0$ が2倍になると建設費は約10%アップする」という試算結果が報告<sup>13)</sup>されていることから、この値を用いる。したがって標準せん断力係数 $C_0$ で表される要求耐力 $R$ とコスト比との関係は、下式ようになる。

$$R = 10.4 (\chi - b) C_0 \quad \dots (9)$$

$$\chi : \text{コスト比} = \frac{\text{希望価格}}{\text{平均価格}}$$

$b$ : 木造一戸建	0.923
非木造一戸建	0.843
非木造集合住宅	0.842

コスト比とは図3の横軸、すなわち各自の希望する住宅コストと平均価格(100%)の比である。ただし(9)式の線形関係は、2次設計の標準せん断力係数が0.5~2.5の範囲で成立する(木造を除く全構造種別)とされるが、全構造種別でそれを超える範囲でも同じ関係が成り立つと仮定した。

次に、構造種別を考慮した住宅耐力を算出するため、住宅に多い木造一戸建、非木造一戸建、非木造集合住宅の3モデルを設定する。具体的には木造一戸建とは軸組工法住宅、非木造とはRC造を想定しており、集合住宅は設計用加速度応答スペクトルが最大となる領域(平坦部分)に該当する建物高さ(4~9階建程度)とする<sup>13)</sup>。

次に(9)式におけるコスト比1の場合の $R$ 、つまり平均価格で得られる各モデルの建物耐力は、現行基準に基づく標準的建物をもつ終局限界状態の標準せん断力係数 $C_0$ とする。つまり各モデルの復元力特性において終局限界時の最大層間変形角を1/30(木造)、1/50(非木造)とおき、エネルギー一定則を用いて初期剛性の傾きをもつ完全弾性体の標準せん断力係数に置換する。この時木造はバイリニアモデル、非木造一戸建・集合住宅はトリリニアモデルを想定し、RCの初期剛性はひび割れ以前の剛性とした(図8)。どのモデルも最も層間変形角の大きい階で評価し、 $A_i$ 分布を用いて、標準せん断力係数の値に換算した。

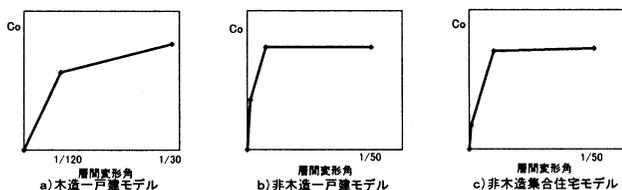


図8 各建物モデルの復元力特性

建物モデル諸元を表3に示す。木造一戸建モデルは建築基準法相当の壁量をもつ木造住宅の実大振動実験に基づく動的復元力から算出した終局耐力としての $C_0$ である<sup>14)</sup>。一方、非木造一戸建は文献<sup>15,16)</sup>、非木造集合住宅は文献<sup>17)</sup>によった。非木造一戸建・非木造集合住宅は、実施設計では復元力特性をあまり求めないためにデータ数が少なく、各モデルの特徴を表すような類似用途の標準的建物の復元力特性を用いた。非木造は一戸建・集合住宅とも静的増分解析による復元力からの算出であるが、静的復元力と動的復元力がそれほど変

表3 建物モデル諸元

モデル	想定建物	標準的な建物の $C_0$	耐力の変動係数	加速度応答倍率
木造一戸建	軸組2階建	0.80	0.4	1.5
非木造一戸建	RC3階建	1.63	0.5	2.1
非木造集合住宅	RC4~9階建	1.64	0.5	2.5

注：加速度応答倍率は標準地盤での値

わらないことから<sup>18,19)</sup>、この値を用いた。この結果、終局状態を考慮した標準的建物の耐力は、木造一戸建で $C_0$ にして0.80、非木造一戸建1.63、非木造集合住宅1.64となった。

これを用いて、標準せん断力係数とコスト比の線形関係式により求められる各ユーザーの要望耐力 $R$ を、図7の耐力の確率分布の平均値 $\mu_r$ とする。また、耐力の変動係数 $V_r$ は実在建物の変動係数に関する調査結果<sup>20,21)</sup>から、構造種別ごとに値を設定した(表3)。なお、これらの値は大枠的に表した耐力レベルであり、精度としては粗いが、ユーザーの曖昧な要望の精度には適合しているものと考えている。

#### 4.4 荷重効果の算出

荷重効果 $S$ は、ユーザーが希望する建設地の地震活動度を考慮して、住宅の供用期間( $N$ 年)中に推定される地震動強さ(地動最大加速度)を都道府県単位で評価し、これに住宅の応答倍率を乗じた最大加速度応答として算出する<sup>22,23)</sup>。次に重力加速度で除して、応答せん断力係数とする。供用期間は各自の希望を反映するため、アンケート回答を用いた。

地動最大加速度 $A$ の $N$ 年最大値の平均値 $\mu_s$ ・変動係数 $V_s$ は、松村により算出された全国の基盤速度の50年最大値のマップを利用して、都道府県ごとの $N$ 年最大値の平均値と変動係数に換算した。この全国の基盤速度の50年最大値マップは、統計期間400年データを用いた極値III型分布(Weibull分布)での推定結果である<sup>24)</sup>。

50年最大値から $N$ 年最大値の平均値・変動係数への換算は、限界状態設計指針(案)<sup>25)</sup>の方法にならった。すなわち、50年最大値分布における平均値・変動係数が対数正規分布に従うと仮定して、 $N$ 年最大値分布の99%点と50%点を推定し、その平均値を $\mu_s$ と考えた。

また、基盤速度を地動最大加速度へ変換するため、荷重指針<sup>13)</sup>と同様に、基盤速度 $V_0$ と標準地盤における地動最大加速度 $A_0$ の関係を次のように考える。

$$A_0 = 30 V_0 \quad \dots (10)$$

建設地は第II種地盤と考え、地盤種別補正係数 $G_A = 1.2$ を乗じた。

$$A = 1.2 A_0 \quad \dots (11)$$

次に $N$ 年最大値の平均値 $A$ に構造種別ごとの加速度応答倍率 $B$ (表3)を乗じて、重力加速度 $g$ で除し、荷重効果 $S$ を算出した。ここで、建物の加速度応答倍率 $B$ と地動最大加速度 $A$ は独立とし、応答倍率は一定値とする。変動係数も加速度と同様に全国マップから求めた。

$$S = B \cdot A / g \quad (g = 980 \text{ cm/sec}^2) \quad \dots (12)$$

このようにして算出した耐力と荷重効果の平均値・標準偏差をそれぞれ(8)式に代入すれば、 $\beta$ を求めることができる。

#### 4.5 算出された信頼性指標 $\beta$ と他研究例との比較

ユーザーの要望から $\beta$ を算出することは、全国の建設地に適用で

きるが、ここでは、希望建設地で最も多い東京に条件を統一して、 $\beta$ の算出値の傾向を他の研究例と比較する。

建設地が東京で供用期間50年、標準的な支出金額(100%)とした場合の建物タイプごとの $\beta$ を算出し、これを1年あたりの全壊確率 $P_f$ に換算したものを、図9にプロットした。他の研究例をこれにプロットしてみると、木造について $P_f$ を求めた研究は得られていないが、建築基準法や鋼構造限界状態設計指針などの規準値と本研究の標準建物の年全壊確率は、同程度のレベルにあることが分かる。参考値として、後述する社会に要望される $\beta$ の平均値(全国)を $P_f$ に換算した値についても図中に示した。

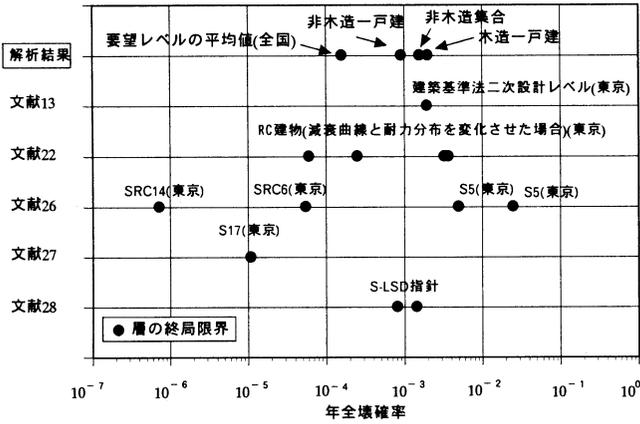


図9 年全壊確率 $P_f$ に関する他の研究との比較

既往研究例では、松村は本論文と同様の手法で実在RC建物の耐力分布を用いて、東京等4都市の $P_f$ を求めた<sup>22)</sup>。荷重指針では、建築基準法2次設計で要求される地震力に対する建物の供用期間における破壊確率と信頼性指標が算出されている<sup>13)</sup>。

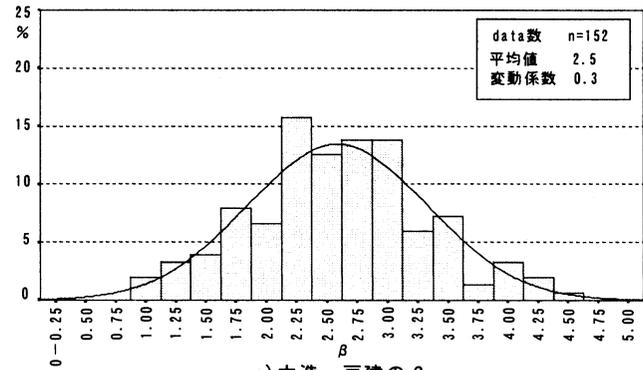
これらRC等の建物に関する既往研究の年全壊確率<sup>26-28)</sup>は、すべて既存建物の安全性評価である。それぞれ手法やデータ設定が異なるため、単純な値の比較はできない。しかしながら、この手法を用いれば、ユーザーの要望レベルを直接支出金額から評価することが可能になり、さらにこの図からは、東京においては標準的な建物(供用期間50年の場合)の信頼性指標 $\beta$ が他の研究結果とおおよそ同じ範囲に位置することが分かる。

$\beta$ の値そのものにはまだ議論の余地があるが、ユーザーが表現できる指標を用いて、提案手法により個別建物の目標耐震安全性レベルを定量的に評価することが可能になる。

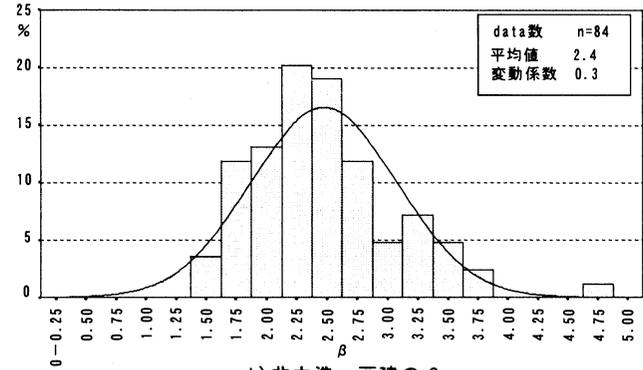
## 5. 社会的に要望される目標信頼性指標と許容全壊確率

### 5.1 目標信頼性指標 $\beta$ の算出結果

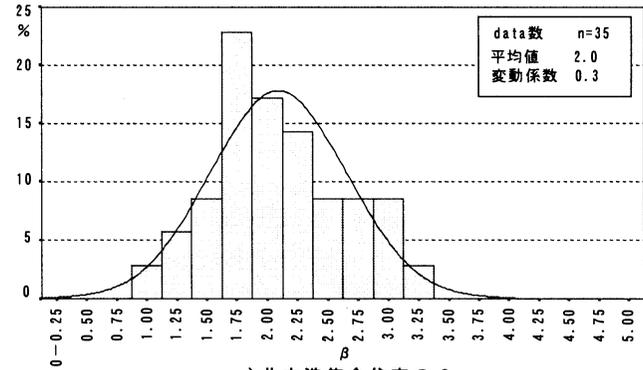
この手法を用いて、今回の調査結果から算出される社会的要望レベルを評価する(図10)。この図は、各回答者の希望建設地・構造種別・供用期間・コストの要望をそのまま用いて図7に沿って算出した $\beta$ を建物モデルごとにまとめたものである。各回答者の希望する供用期間を基準期間として、基準期間を統一せずに算出した。これを全構造種別で平均すると2.4になる。基準期間を50年で統一して算出した場合もこの結果と同じになり、分布の形状は多少異なるが、構造種別ごとの平均値も同じになる。すなわち基準期間を50年



a) 木造一戸建の $\beta$



b) 非木造一戸建の $\beta$



c) 非木造集合住宅の $\beta$

図10 希望供用期間を反映した構造種別ごとの要求安全性レベル

とした場合、木造一戸建の目標信頼性指標 $\beta$ は平均で2.5、非木造一戸建の場合の $\beta$ は2.4、RC集合住宅では $\beta$ 2.0となる。図のように、社会の要望はかなり裾野の広い分布である。木造の要求安全性レベルが若干他のモデルよりも高く、集合住宅が低くなっているが、集合住宅に対しては、算出可能人数が少ないことの影響が考えられ、構造種別を問わず要望レベルは大体同程度と解釈できる。

基準期間50年の場合の $\beta$ について回答全体を集計したものが図11である。社会的に要望される耐震安全性レベルは、全構造種別の合計で2.4が平均値である。許容全壊確率では、 $8 \times 10^{-3}$ に相当する。

### 5.2 希望建設地による信頼性指標 $\beta$ の違い

図9にまとめたように、建設地を東京都にした標準的な建物の年全壊確率は、木造・非木造を問わず、おおよそ $10^{-3}$ 近傍に集まる。これに対して全国ユーザー調査からみた社会的要求レベルは、年全壊確率としては $10^{-4}$ に近い値であり、東京の標準的な建物の $\beta$ よりも大きい。したがって、社会的に要求されるレベルは現実の建物よりも高い安全性レベルであると解釈できる。

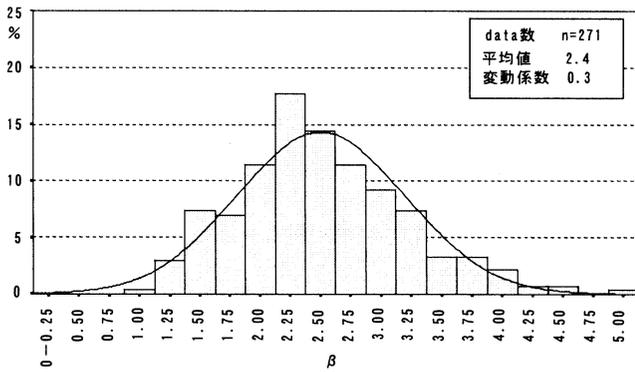


図11 基準期間50年とした場合の全回答の要求安全性レベル

このような結果をもたらした要因については、まず建設地の影響が考えられる。希望建設地が全国に渡っているために、基準期間内における地動加速度の小さい地域で支出金額の多い回答が増えると、必然的に $\beta$ は大きくなってしまふ。このため、今回調査でも $\beta$ が大きくなった回答は、地動加速度の小さな県を建設希望地に選び、高い支出金額を希望した人が多かった。

次に、希望建設地として回答者数の最も多かった東京都の場合について、 $\beta$ の傾向をみたものを図12にまとめた。平均値に及ばず基準期間の影響は少ないため、ここでは各自の希望供用期間を用いて $\beta$ を算出し、基準期間を統一していない。東京の地動最大加速度の50年最大値の平均値は $225\text{cm}/\text{sec}^2$ を、変動係数は0.7を見込んだ。その結果 $\beta$ の平均値が2.2であり、全体の平均値2.4よりも小さい $\beta$ を要望していることが分かった。やはり標準的建物よりも金額を支出して高い安全性を求めているが、多くの回答が $\beta$  2.0~2.25の範囲に集まり、それほど大きな $\beta$ は望まれていないことが分かった。表2でみたように、県単位で比較した場合レベルを上げたいという希望が多かった東京であるが、 $\beta$ の平均値は全国的な平均値を多少下回っている。希望する構造種別は木造一戸建(38%)および非木造一戸建(39%)が多い。また建物タイプにより $\beta$ は異なるが、およそ5%から10%増し、つまりCoが2倍になる程度までの支出金額を多くの回答者(71%)が要望していることが分かった。

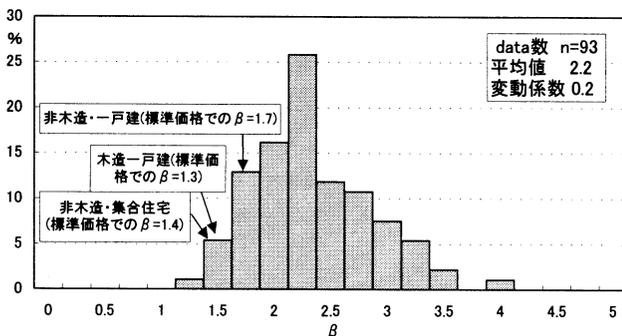


図12 建設地東京の回答者が希望する信頼性指標 $\beta$

### 5.3 支出金額による信頼性指標 $\beta$ の違い

回答者の希望する支出金額は全体として図13のようにまとめられる。a)が全回答者の希望支出金額であり、b)が自己矛盾回答を除いたレベル算出が可能な回答者の希望支出金額である。東京にお

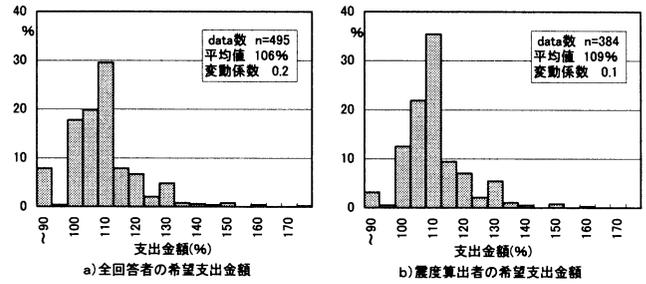


図13 回答者の希望する支出金額

ける支出金額を例に取ってみると、最高支出額は150%であった。この回答者はレベルの上限となる震度が震度7と考えており、それにかかる支出金額が150%であるイメージしているため、最高額である150%を支出して最も高い安全性を得ようとしている。同様に $\beta$ の高い回答者は、支出金額130~150%程度を支出すると回答しているが、そのイメージしている震度をみると、標準レベルが震度4~5で、上限となる震度を震度7程度と考えており、それを得るために支出金額が多く必要と考えていることが分かった。この点については、金額と性能レベルの関係が明確になることと、実際にレベルを上げるのにいくらの支出が必要なのかがユーザーに知らされれば、 $\beta$ の値はより低くなり、現実的な値に落ち着くと思われる。

### 5.4 希望供用期間による信頼性指標 $\beta$ の違い

回答者の希望供用期間は図14のようであった。建設地・支出金額が同じ場合、供用期間によって $\beta$ は図15のように変化する。各自の希望供用期間で $\beta$ を算出し、供用期間ごとにまとめると図16のようになる。どの供用期間を想定しても、結果として同じような範囲に $\beta$ が分布していることが明らかになった。今回の調査においては供

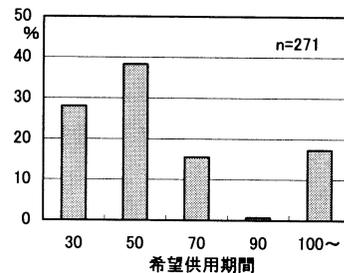


図14 回答者の希望する供用期間

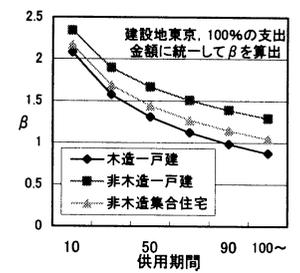
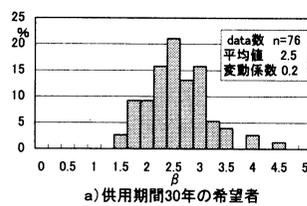
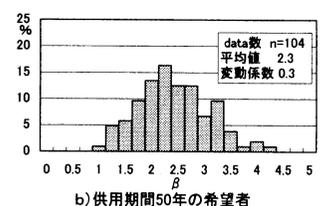


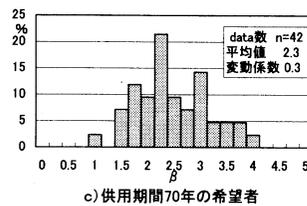
図15 供用期間と $\beta$ の関係



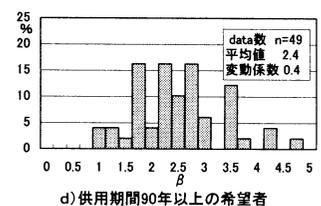
a) 供用期間30年の希望者



b) 供用期間50年の希望者



c) 供用期間70年の希望者



d) 供用期間90年以上の希望者

図16 供用期間ごとにみた希望する信頼性指標 $\beta$

用期間が結果に及ぼす影響はそれほどないと考えられる。

また供用期間が50年の場合の $\beta$ 分布には正規性のある回答が得られている。このことによって、30年という木造の平均的な耐用年数よりも、本調査の回答者には50年がイメージとしての平均な供用期間と考えられていることが推測される。供用期間90年以上の場合にはコストを負担してでも高い $\beta$ を望む回答も見られるが、一方ではコストを標準としながら長期の供用期間を希望する回答も含まれるため、コストとレベルの関係が理解されていない回答者も含まれる。今回の調査結果では供用期間に応じた $\beta$ の分布は50年の場合を除いては、適切な分布形にならなかった。この理由としては、各供用期間ごとの算出には十分な標本数が集まっていないことと、回答者が90年以上の供用期間を希望レベルのパラメータとして適切に評価できていないことなどが考えられる。

### 5.5 耐震安全性レベルに影響を与えるパラメータ

$\beta$ に影響を与えるパラメータを考えてみると、ユーザーの意識に最も明確に現れているパラメータは支出金額である。「いくらでそのレベルを買うのか」ということに対して、回答はある程度現実的な範囲の中に集約された。分析に用いたデータは自己矛盾のない回答であり、非現実的な回答は取り除かれているため、専門知識のない回答者であっても正規性のある回答分布が得られている。

図13b)をみても分かるように、支出金額の範囲は160%程度までにとどまっている。そのなかで支出金額の高い人のデータを検証すると、震度7程度の安全性レベルを実現するためにその程度の金額が必要であると思っている人が多い。これらの誤解を考慮すれば、重要な性能の1つと考えられている耐震安全性であっても、性能レベルを標準よりも上げるために費やすコストは多くが100~110%程度であり、その上限は140%程度と判断される。

したがって、こうしたユーザーのもつイメージを正確に理解し、特に110%程度までの範囲において、耐震安全性レベルと支出金額の実際的な関係を把握しておく必要がある。そして、 $\beta$ の結果からみても、支出金額に基づき算出すれば、現実的な安全性レベルの算出が可能になる。

## 6. まとめ

本論文では、社会に受け入れられる性能設計を構築するため、ユーザーのもつコストと性能レベルのイメージや支出金額を利用し、各ユーザーの要望する個別建物の設計レベルを確率的に評価する手法を提案した。 $\beta$ はユーザーに直接理解できる指標とはいいいくいが、建物全体の危険性を一元的に表現できる指標であり、許容全壊確率などで分かりやすくユーザーにフィードバックすることも可能である。また、この手法に基づいて社会的に要望される耐震安全性レベルの現状を定量的に評価した。

本研究において明らかにしてきた点を以下にまとめる。

1) レベル算出の基礎となる耐震安全性レベルとコストの関係について、多くのユーザーは、安全性とコストに線形関係があることと、その上限があることをイメージしている。標準的住宅で震度5に耐えようとするユーザーが多く、ユーザーと専門家との安全性レベルに対する意識のギャップが明らかになった。ユーザーは現在の平均であると各自がイメージしている震度を基準として、その基準と同じレベルか1つ上のレベルを望んでいる。ユーザーの認

識が誤っていれば、希望する震度もそれに影響を受ける。

- 2) 信頼性解析により、要望される安全性レベルを簡便に算出する手法をまとめた。耐力の要望にはアンケート回答を用い、住宅への支出金額で得られる建物耐力を $C_0$ で評価した。荷重効果としては、建設地で想定される最大加速度を推定し応答で評価すれば、 $\beta$ を算出することができる。アンケート回答に基づく解析結果と標準建物について年全壊確率の形で比較し、結果の位置づけを確認した。
- 3) アンケート結果から算出した社会的に要望される耐震レベルは、基準期間を50年とすれば、全体平均として2.4程度の $\beta$ で要望されていることが分かった。許容全壊確率でいえば $8 \times 10^{-3}$ 程度になり、許容年全壊確率にすれば $1.6 \times 10^{-4}$ に該当する。
- 4) 建設地、供用期間および支出金額などのパラメータごとに $\beta$ の傾向を分析した。パラメータとしては支出金額が明確であり、社会的には、震度とコストの関係が現実よりも緩やかな上昇度合いでイメージされていることが分かった。レベル上昇に費やすコストは10%増程度が1つのピークである。耐震安全性の確保のためには、その程度の範囲のなかで、性能とコストの関係式を明確にしていける必要があると考えられる。

社会的には住宅の耐震安全性レベルの現状は不十分であるとイメージされていることを、専門家は認識する必要がある。しかしこれらは主に、現行法に基づく耐震設計の目標安全性レベルと社会の認識するレベルとにギャップのあることが原因になっていると思われる。したがって、本研究の主題のほかに、次のような点が今後の社会と建築界に求められる。

- 1) 現状の耐震安全性レベルに関する情報公開
  - 2) 各レベルとそれに対応するコストとの関係の把握
  - 3) 消費者教育・啓発活動による基礎知識の向上
- 建築を社会に正しく位置づけるためには、これらの活動を並行して行うことが欠かせない。

## 謝 辞

本研究に際して関係各位にご助言・ご協力を賜りましたことを深謝します。貴重なご助言・討論を戴いた東京大学 神田 順教授、同 高田 毅士助教授、名古屋大学 河野 守助教授、同 森 保宏助教授、新潟大学 中村 昇助教授、類設計室 沼田 竜一氏に感謝します。また、全国の地震基盤速度の50年最大値と、変動係数データをご提供戴いた鹿児島大学 松村 和雄教授、関連資料を提供して下さった建設省建築研究所 齊藤 大樹氏、三菱地所 平川 倫生氏に御礼申し上げます。最後になりましたが、アンケート回答者、研究室卒論生に謝意を表します。

## 引用文献

- 1) 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」平成7年度・8年度報告書、建設省建築研究所・日本建築センター・国土開発技術研究センター、平成8年3月・平成9年3月。
- 2) 石川孝重、平田京子、沼田竜一：ユーザーの要望をふまえた性能設計の構築に関する研究—その1 ユーザーの求める性能と自己責任意識；その2 ユーザーのイメージする構造安全性能と要求レベル—、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）（構造I）、pp. 59~62、2000年9月。
- 3) 久木章江、石川孝重：住宅の構造安全に居住者が求める性能およびその

- 水準に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第513号, pp. 51~58, 1998年11月.
- 4) 神田順ほか16名: 荷重・構造安全性についてのアンケート調査, 日本建築学会構造系論文報告集, 第433号, pp. 73~81, 1992年3月.
  - 5) 青木義次, 他14名: 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」要求性能調査SWG報告書 アンケートによる意識調査, 建設省建築研究所・建築研究振興協会, 平成10年3月.
  - 6) 平田京子, 石川孝重: ユーザーの要望する耐震安全性レベル-社会的ニーズから要求安全性レベルを探る-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)(構造I), pp. 19~20, 1999年9月.
  - 7) 平田京子: 一般居住者が要望する構造安全性レベルに関する信頼性理論に基づくアンケート, 日本女子大学大学院紀要 家政学研究科・人間生活学研究科, 第4号, pp. 69~76, 1998年.
  - 8) 石川孝重, 平田京子, 松本晴子: 一般居住者の意識に基づく構造安全意識の抽出手法; 一般居住者の意識に基づく耐力・外力と信頼性指標の試算-目標構造安全水準の確立に関する研究(その1;2)-, 日本建築学会関東支部研究報告集(構造), pp. 113~120, 1994年度. …等々
  - 9) 平田京子, 石川孝重: ユーザーの要望をふまえた性能表示と構造安全性能のあり方に関する調査-その1 住宅の性能表示に対するユーザーの要望-; -その2 耐震安全性レベルに対するユーザーの要望-, 日本建築学会関東支部研究報告集(構造), pp. 57~64, 1999年度.
  - 10) 平田京子, 石川孝重: 耐震安全性レベルの表現方法に関するアンケート調査-ユーザーとコミュニケーションする性能設計法の実現を目指して-, 日本建築学会関東支部研究報告集(構造), pp. 53~56, 1998年度.
  - 11) 日本建築センター編: 建築物の構造規定 -建築基準法施行令第3章の解説と運用-1997年版, 日本建築センター, 第3版, 平成10年5月1日.
  - 12) 神田順ほか: 最適信頼性に及ぼす経済要因の影響評価, 日本建築センター平成5年度研究助成報告書, 1994年5月.
  - 13) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 第3版, 1993年6月20日.
  - 14) 木造住宅実大振動実験報告書, 日本住宅・木材技術センター, 平成8年10月.
  - 15) 中村友紀子, 引田智樹, 梅村恒, 坂上実, 工藤一嘉, 壁谷澤寿海, 南忠夫: 1997年鹿児島県北西部地震による被害建物の地震応答解析, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム, pp. 227~230, 1997年.
  - 16) 梅村魁: 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法, 技報堂出版, 1版, 1980年6月30日.
  - 17) 神田順: 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, 1998年6月(東京大学および企業との共同研究成果報告書).
  - 18) 志賀敏男: 大学講座 建築学構造編 第2巻 構造物の振動, 共立出版, 初版, 昭和51年6月25日.
  - 19) 最相元雄, 赤星靖: 鉄筋コンクリート部材の動的復元力に関する実験的研究 その1. 曲げ降伏型部材の動的載荷実験, 日本建築学会九州支部研究報告, 第29号, pp. 245~248, 昭和61年3月.
  - 20) シンポジウム「設計荷重の考え方」資料, 日本建築学会設計荷重理論小委員会, pp. 44~48, 1989年4月.
  - 21) 小野瀬順一: 鉄筋コンクリート造建物の耐力分布と被害分布, 第6回日本地震工学シンポジウム(1982)講演集, pp. 2081~2088, 1982年12月.
  - 22) 松村和雄, 牧野稔: 地震動の再現期間値と鉄筋コンクリート造建物の破壊確率の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 構造I, pp. 171~172, 1990年10月.
  - 23) 日本建築学会: 地震荷重-その現状と将来の展望, 日本建築学会, p. 41, 第1版, 昭和62年11月20日.
  - 24) 松村和雄, 清家規: 極値分布の当てはめによる地震危険度解析, 九州大学工学集報, 第67巻, 第1号, pp. 41~47, 平成6年1月.
  - 25) 日本建築学会: 建築物の限界状態設計指針(案)第1版, 日本建築学会限界状態設計法小委員会, 1999年4月.
  - 26) 神田順, 岩崎良二, 小林創, 森下日出喜, 中村紀吉: 確率論的耐震余裕指標の既存建物への応用, 第8回日本地震工学シンポジウム(1990)論文集, 日本学術会議地震工学研究連絡委員会, pp. 1575~1580, 1990年.
  - 27) 加藤正治ほか10名, 高層建物の地震リスク評価 その1~5, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 構造I, pp. 543~552, 昭和60年10月. 加藤正治ほか9名, 高層建物の地震リスク評価 その6~9, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造I, pp. 29~36, 昭和61年8月.
  - 28) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 日本建築学会, 第1版, 1998年10月1日.