

社会的に要求される耐震安全性レベルの確率論的評価

—ユーザーの要望をふまえた性能設計の構築に向けて—

PROBABILISTIC EVALUATION OF TARGET EARTHQUAKE-RESISTANT LEVEL
DERIVED FROM REQUIREMENTS OF USERS

—For better indication of performance reflecting user's needs—

平田京子*, 石川孝重**

Kyoko HIRATA and Takashige ISHIKAWA

Many methods have been developed to evaluate the earthquake-resistant performance of buildings, however, we have no adequate method to communicate with users directly on target earthquake-resistant level in layman's language. In future designers will need to communicate more with users regarding target levels of building performance. This is because structural safety performance is particularly important, and many users will require a performance indication and guarantee of their own house. Therefore, the target earthquake-resistant level must be clarified quantitatively as soon as possible, based on user's needs. However, professional designers have never had a clear grasp of users' requirement as an indication of safety level. This paper tries to evaluate probabilistically a desirable target earthquake-resistant level from user questionnaires using a structural reliability theory. Many users do not have an exact understanding of current earthquake-resistant levels in Japan when the safety index is expressed by seismic intensity. They do not clearly understand their responsibility for the result of their choice of safety levels. Nevertheless, we should have a grasp of users' requirement quantitatively for future. The results of this study show how users' requirement levels can be indicated as a reliability index.

Keywords: Performance-based design, Structural safety, Earthquake-resistant level, Reliability analysis, Reliability index, First Order Second Moment

性能設計, 構造安全, 耐震レベル, 信頼性解析, 信頼性指標, 二次モーメント法

1. はじめに

1998年6月の建築基準法改正を契機に性能設計が導入され, 1999年6月には「住宅の品質確保の促進等に関する法律」が成立した。これらにより建築物の性能が表示され, 評価される時代となる。こうした変化は1995年の阪神・淡路大震災での「安全神話の崩壊」に象徴される社会の安全観とのギャップをうめる1つの回答といえる。

しかしながらこの新しい制度の導入は設計情報の開示という効果にとどまらず, 従来の「構造設計については専門知識を有した専門家に一任する」という社会規範を, 「インフォームド・コンセントに基づく性能の設定」という新しいパラダイム(思考的枠組)へと転換させた。インフォームド・コンセントとは, 説明を受けた上で同意のことであり, 現代医療の基本理念である。建築物は所有者

(オーナー)や使用者(ユーザー)の財産であり, 生命をかけてオーナー・ユーザーが自己責任を負うものであるがために医療と同様の考え方ができるが, インフォームド・コンセントに基づく構造設計はこれまでほとんど行われてこなかった。しかし, 今後は事前の説明が重要さを増し, ユーザーの合意を得るために, 設計者は分かりやすい十分な説明をしなければならないことが予想される。

テクノロジーが工業から情報へと急激にシフトする現代社会において, 性能設計とその表示は情報開示であり, 時代の要請にかなっている。しかし同時に専門家とユーザー間のコミュニケーション手段の確立が社会から期待されているにもかかわらず, 建物の最も重要な性能である構造安全性能に対するユーザーの要望を把握する研究はあまり進んでいない。耐震安全性レベルに関する意識調査はさ

* 日本女子大学住居学科 専任講師・家修
** 日本女子大学住居学科 教授・工博

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

らに少なく、専門家はユーザーニーズを把握する機会がない。

関連する既往研究として、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¹⁾が、設計者などの専門家を調査したものに本会設計荷重理論小委員会の調査²⁾がある。定性的な安全意識は建設省総プロでアンケート調査が行われた³⁾。しかし、構造安全性レベルについての社会的要望を解明したものはみられない。

従来安全性指標とそのレベルは、専門用語を用いて専門家間で議論されてきたが、本来は社会がそのレベルを決めるべきものである。歴史的経緯をふまえながら、人命の損失状況や、建物損失がもたらす経済的影響、それらを基にした社会の要請を指標としてレベルが定まっていく。これらの要因をふまえた構造安全性レベルの既往の設定手法は、キャリブレーションに基づくもの、バックグラウンドリスクに基づくもの、社会的要求に基づくもの、効用理論に基づく最適レベルを算出するものの4種類に大別される⁴⁾。

本研究は社会的要求に位置づけられ、社会と安全性レベルについて直接対話するための新しい手法を提案し、設計者がユーザーと指標を共有しながら設計建物の耐震安全性レベルを大枠的に決定できるようにすることをねらいとしている。本論文では、まず個別建物においてどのくらいの構造安全性レベルをユーザーが要求しているかを定量的に把握するための手法を考究する。さらにこの手法を用いて、社会で望まれている目標耐震安全性レベルを確率的に評価することを試みる。

2. 信頼性解析を用いた個別建物の安全性レベルの評価手法

2.1 ユーザーの要望を表すための設計指標の模索

設計時に、設計者は曖昧な言葉で表されるユーザーの要望を理解し、それを目標安全性レベルとして設計に反映することが必要になる。また経済的な条件に偏りがちなユーザーに対して、設計結果について分かりやすく説明することも求められる。しかし現状では、ユーザーに直接分かるような建物の耐震安全性レベルを表す設計指標は模索段階であり、専門家とユーザーとで共有できる指標は明確でない。これまでに行った調査結果では、ユーザーは現在のところ、指標を震度階で表現するのが最も分かりやすいと考えていることが分かった⁵⁾。ただし、ユーザーは震度階は理解していても、震度いくつの時に被害程度がどうなるかという関係については、よく理解していない場合がみられる⁶⁾。

一方、社会は普段から安全性レベルに大きな関心を寄せているわけではないために、ユーザーはコストを具体的に意識しないと現実的な安全性レベルをとらえられない傾向にある⁹⁾。したがって定量評価に当たって現実的な要望を取り出すには、レベル上昇にともなうコストが必要になることを認識してもらうことが重要である。

これらの点を考慮しつつ、ユーザーのもつ金額と安全性レベルの関係イメージを取り出すことができれば、ユーザーの要望する目標構造安全性レベルを「住宅建設に支出する金額」から指標化できると考えた。したがって、ユーザーの希望する支出金額で得られる実際の建物耐力を設計指標にして、建設地で基準期間中に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。支出金額は実際に住宅を建てる際には具体的指標になるため、ユーザーが設計時点で金額を標準価格に対してどのくらい多く出すかを要望することによって、設計者に目標安全性レ

ベルの要望が分かることになる。

2.2 信頼性指標と全壊確率の算出

そこで2次モーメント法を用いて、各ユーザーの要望する建物の耐震安全性レベルを算出する手法を考える。図1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）を建設する場合を想定する。ここで、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(β)で算出する。

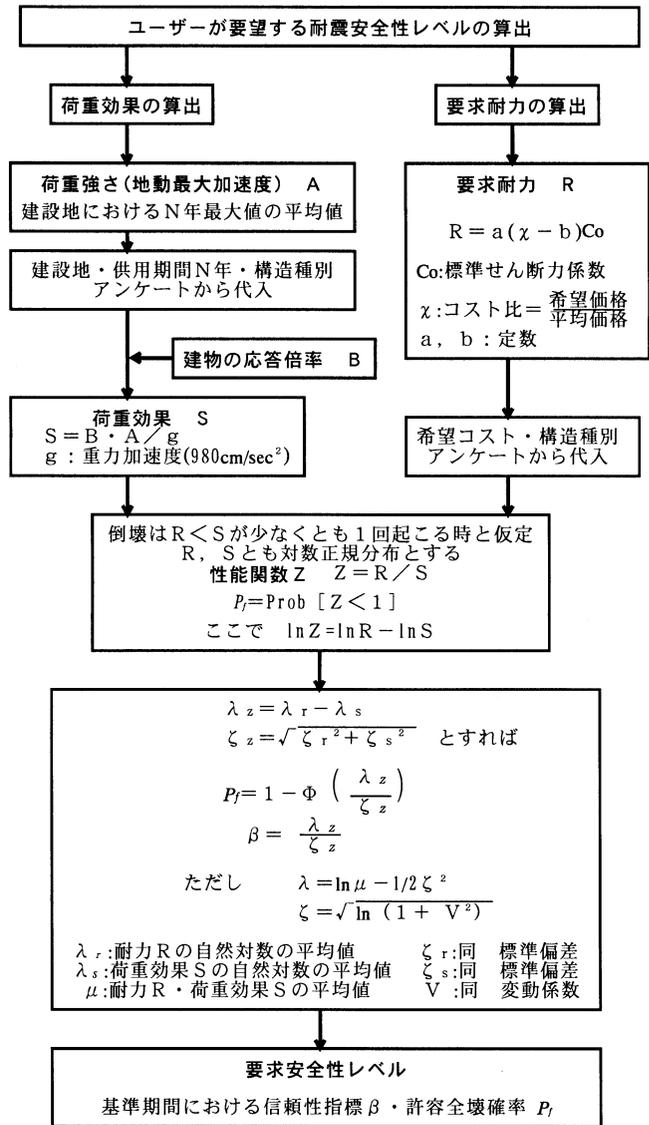


図1 耐震安全性レベルの算出フロー

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1階での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。

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

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 λ_r, λ_s , 標準偏差を ζ_r, ζ_s とすれば $\ln Z$ は正規分布になる。 $\ln Z$ の平均値 λ_z と標準偏差 ζ_z は、

$$\lambda_z = \lambda_r - \lambda_s \quad \dots (3)$$

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

で与えられる。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 β が求められる。

3. ユーザーの要望に基づく建物の安全性レベルの試算

3.1 試算に用いるデータの概要

上記の評価手法を用いて、安全性レベルの具体的な算出を試みる。試算には市民対象のアンケート結果(表1)を用いる。この調査は全国の女性585名に対するもので、男女を対象にした同様の調査⁷⁾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したものである。

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年6~7月	1999年8月
対象者	女子大学生	一般女性
世代	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と要望、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。	

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。基礎調査30回の結果⁸⁻⁹⁾を基に、信頼度の高い回答が得られるよう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2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。回答率は、直接配布・回収したため100%である。居住地は全国であり、関東近県の居住者が多い。アンケート結果の詳細は文献¹⁰⁾を参照されたい。

3.2 ユーザーのもつ安全性レベルと支出金額のイメージ

今回の調査データより、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のような結果になることが分かった。このイメージは、これまでの調査で男女を対象にした場合も傾向は類似する⁹⁾。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、回答者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

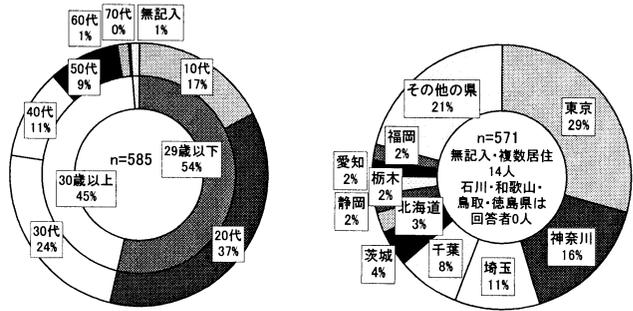


図2 回答者の年齢構成と居住地

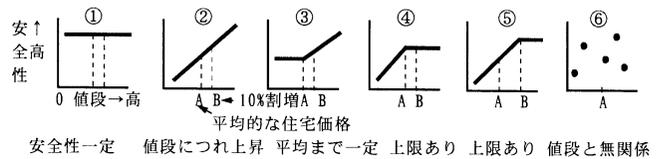


図3 住宅価格と耐震安全性レベルの関係イメージ

上限があるという認識をもっていることが分かる。

同時に平均価格(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。「耐えられる震度」のイメージを統一するため、これは「被害は出ても倒壊しない状態」と説明した。ユーザーへの浸透度を考えて旧震度階を用いた。震度階では震度7を超えるものはありえないが、専門知識をもたないユーザーのイメージそのものを取り出すために、質問で「震度7より大きい」という範囲も設定した。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。

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¹¹⁾、耐えられる震度という場合はもっと低い震度を回答者が想定していることが分かる。

ユーザーが要望する耐震安全性レベルを、震度階でみると震度5~7が多くなる。これはユーザーの要望する耐震安全性レベルの直接的表現であるが、図4の結果が全体的に低めの想定であり、専門家の考える被害程度の想定とギャップのある可能性がある。そのた

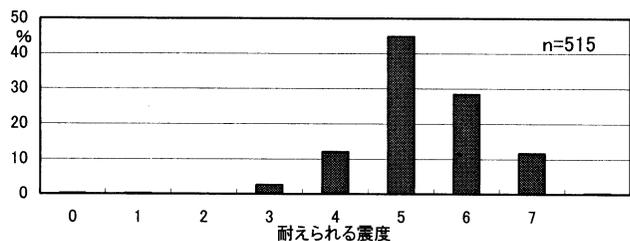


図4 平均的な価格の住宅が耐えられる震度

めレベル上昇率に着目し、平均的に耐えられる震度と希望する震度との差をみた場合、図5になる。この図からは、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った。このようなユーザーのイメージを震度から支出金額に置き換え、レベルを表す。

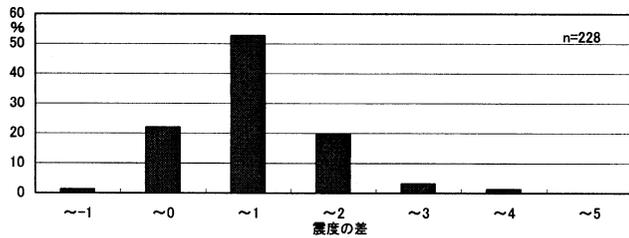


図5 各自の希望する震度と考える平均的震度との差

3.3 要求耐力の算出

信頼性指標 β の評価に必要な住宅耐力の算出方法は、具体的には以下ようになる。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¹⁷⁾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¹⁹⁾。

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6)。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。

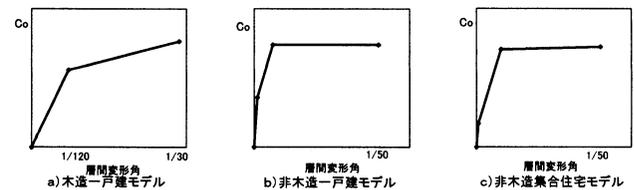


図6 各建物モデルの復元力特性

建物モデル諸元を表2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¹⁴⁾。一方、非木造一戸建は文献^{15,16)}、非木造集合住宅は文献¹⁷⁾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わらないことから^{18,19)}、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。

表2 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

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1の耐力の確率分布の平均値 μ_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^{20,21)}から、構造種別ごとに値を設定した(表2)。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。

3.4 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確率分布の当てはめにより考慮して、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^{22,23)}。次に重力加速度で除して、応答せん断力係数とする。供用期間は各自の要望を反映できるようにした。

地動最大加速度 A の N 年最大値の平均値 μ_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²⁴⁾。

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)²⁵⁾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 μ_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¹³⁾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 の関係は次のように考える。

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

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2)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、 β を求めることができる。

4. 社会的に要望される目標信頼性指標 β

今回の調査データを一例として、この手法に基づき社会的に要望される目標安全性レベルを評価することを試みる。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1に沿って算出した β を建物モデルごとにまとめたのが図7である。これは、各自の希望する供用期間に対するものである。この図では、全構造種別における β の平均値は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年とした場合、木造一戸建の目標信頼性指標 β は、平均で2.5、非木造一戸建の場合の β は2.4、RC集合住宅では2.0となる。図のように、要望はかなり裾野の広い分布となっている。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。

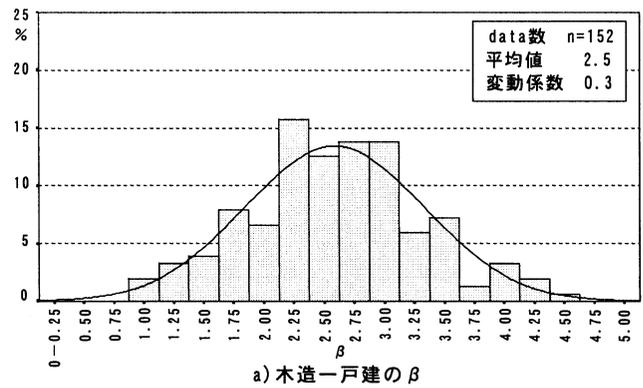
基準期間50年の場合の β について回答全体を集計したものが図8である。社会的に要望される耐震安全性レベルは、全構造種別の合計で2.4が平均値である。許容全壊確率では、 8×10^{-3} に相当する。

5. 信頼性指標 β に対するパラメータの影響

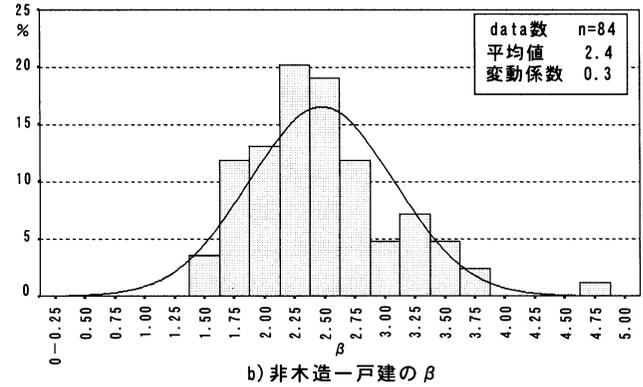
5.1 希望建設地による違い

信頼性指標に影響を与える要因については、まず建設地の影響が考えられる。調査データでは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 β は大きくなる。このため、 β が大きかった回答は、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であった。

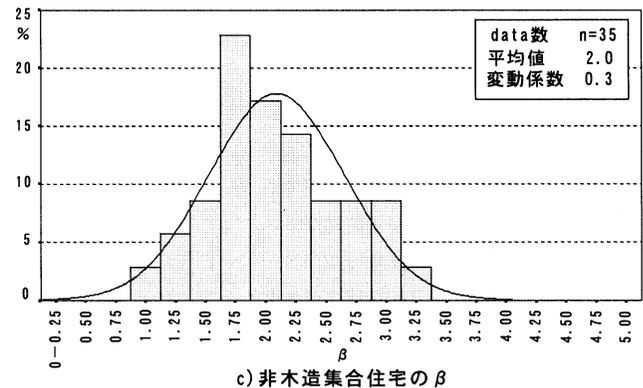
次に、希望建設地として回答者数の最も多かった東京都の場合について、 β の傾向をみたものを図9にまとめた。平均値に及ぼす基準期間の影響は少ないため、ここでは各自の希望供用期間を用いて



a) 木造一戸建の β



b) 非木造一戸建の β



c) 非木造集合住宅の β

図7 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

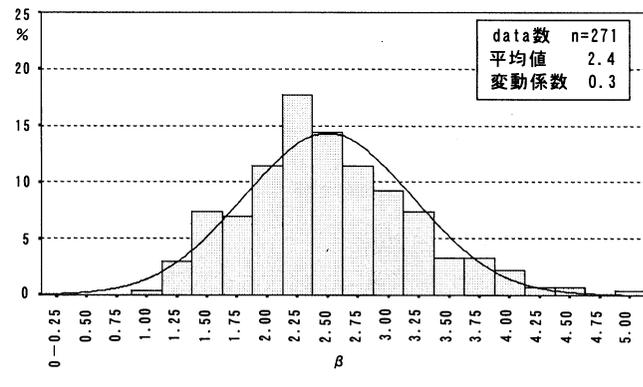


図8 基準期間50年とした場合の全回答の要求安全性レベル

β を算出している。東京の地動最大加速度の50年最大値の平均値は 225 cm/sec^2 を、変動係数は0.7を見込んだ。

その結果 β の平均値が2.2であり、全体の平均値2.4よりも小さい β 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

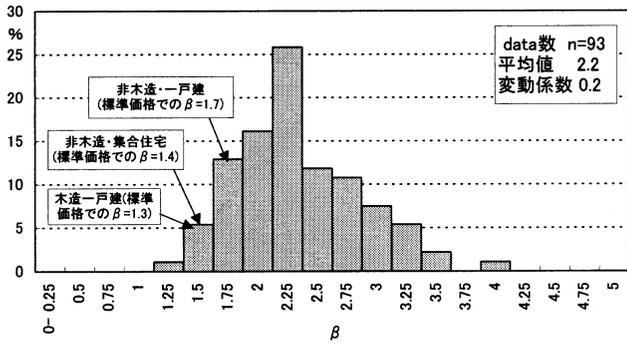


図9 建設地東京の回答者が希望する信頼性指標 β

支出して高い安全性を求めているが、多くの回答が β 2.0~2.25の範囲に集まり、それほど大きな β は望まれていないことが分かった。県単位で比較した場合、レベルを上げたいという希望が他県よりも多かった東京であるが、 β の平均値は全国的な平均値を多少下回っている。また建物タイプにより β は異なるが、およそ5%から10%増し、つまり C_0 が2倍になる程度までの支出金額を多くの回答者（東京建設希望者の71%）が要望していることが分かった。

5.2 支出金額による違い

回答者の希望する支出金額は全体として図10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。 β 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ユーザーに知らされれば、 β の値はより低くなり、現実的な値に落ち着くと思われる。

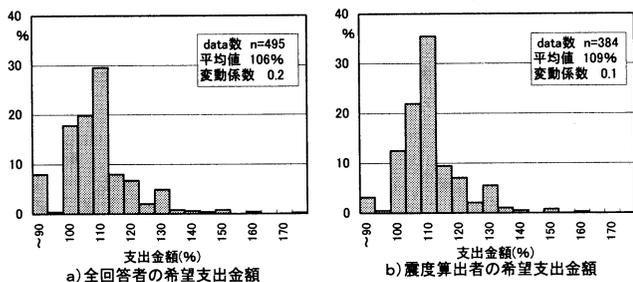


図10 回答者の希望する支出金額

5.3 希望供用期間による違い

回答者の希望供用期間は図11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 β は図12のように変化する。各自の希望供用期間で β を算出し、供用期間ごとにまとめると図13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 β が分布していることが明らかになった。本来長い供用期間を希望すれば、支出金額を高くしなければ β が小さくなるが、どの供用期間の希望者でも β の平均があまり変わらないという結果になった。

また供用期間が50年の場合の β 分布には正規性のある回答が得られている。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 β を望む回答もみられるが、一方ではコストを標準としながら長期

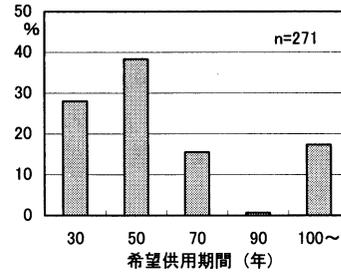


図11 回答者の希望する供用期間

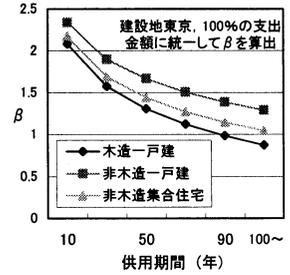


図12 供用期間と β の関係

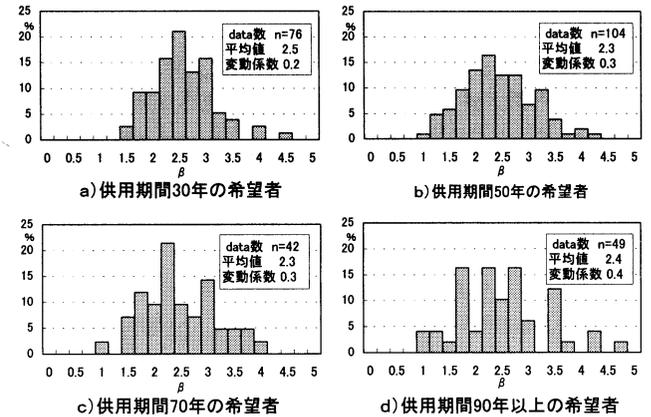


図13 供用期間ごとにみた希望する信頼性指標 β

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が含まれる。

5.4 耐震安全性レベルに影響を与えるパラメータ

β に影響を与えるパラメータを分析結果からみてきたが、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。分析に用いたデータは自己矛盾のない回答であり、専門知識のない回答者であっても正規性のある β の回答分布が得られている。

図10b)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。これも合わせると、重要な性能の1つであ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%程度であると推定される。

したがって、こうしたユーザーのもつイメージを正確に専門家が理解することが望まれるとともに、特に110%程度までの範囲においては、耐震安全性レベルと支出金額の関係がどのようなものかについて把握しておく必要がある。

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。 β はユーザーに直接理解できる指標とはいえないが、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することを試みた。

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、多くの回答者は、安全性とコストとの関係には、上限のある線形性をイメージしている。このイメージを耐力評価に活かすために支出金額を指標化し、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。
- 2) 評価手法として、耐力評価にはユーザーの要望を反映した。住宅への支出金額で得られる実際の建物耐力を C_0 で評価し、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、 β を算出することができる。
- 3) アンケート結果を用いて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 β が要望されていることが分かった。許容全壊確率でいえば 8×10^{-3} 程度になり、許容年全壊確率にすれば 1.6×10^{-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 β 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るが、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。実際に構造設計においても、こ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く必要があると考えられる。

本研究の提案手法は、ユーザーの要望をふまえた個別建物のレベル設定が可能である。実用可能な指標を用いて、耐震安全性レベルの要望を定量的に把握する性能設定手法として位置づけることができる。今後はこのような手法を用い、ユーザーの要求に応えること、さらにいえば社会的に求められる水準を把握しておくことが設計者の素養になるであろう。

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。特に貴重なご助言・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 竜一氏に深謝致します。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いました建設省建築研究所 齊藤 大樹氏、三菱地所 平川 倫生氏に厚く御礼申し上げます。最後になりますが、アンケート回答者、研究室卒論生に感謝します。

引用文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 平田京子, 石川孝重: 社会が求める構造安全性レベルの定量的評価に向けて-信頼性設計手法に基づく居住者アンケートの論理構築-, 日本建築学会関東支部研究報告集(構造), pp. 5~8, 1997年度.
- 9) 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 家政学研究所・人間生活学研究科, 第4号, pp. 69~76, 1998年.
- 10) 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.
- 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.

(2000年7月10日原稿受理, 2001年1月12日採用決定)