

在来軸組木造住宅における一般耐震診断の評点と損傷度の関係

耐震改修促進のための意思決定支援ツールに関する研究 (その1)

RELATIONSHIP BETWEEN SEISMIC CAPACITY GRADE AND DAMAGE FOR POST AND BEAM WOODEN STRUCTURES

A study on decision-making tools for promoting aseismic reinforcement of old wooden houses (Part 1)

井戸田 秀樹*, 嶺岡 慎悟**, 梅村 恒***, 森 保宏****

Hideki IDOTA, Shingo MINEOKA, Hisashi UMEMURA
and Yasuhiro MORI

Despite the large possibility of numerous mortalities due to the collapse of old wooden houses in the event of a strong earthquake in Japan, efforts for seismic upgrading are not well in progress. The promotion of the upgrading of old wooden houses is one of the most important measures by which the owners of such houses can recognize the cost-effectiveness of seismic upgrading. The purpose of this study, therefore, is to develop decision-making tools that could be used by owners. This paper discusses the relationships between the seismic capacity grade and the extent of damage to an old post and beam wooden house due to a ground motion with each seismic intensity scale. Results obtained in this paper are presented as follows:

1) The relationships between the seismic capacity grade and damage to a wooden house were developed using a dynamic response analysis with ninety-five non-scaled seismic records. 2) The relationships between seismic capacity grade and damage were found to exhibit considerable variation, especially in the range of large seismic intensity scale. 3) The relationship between the seismic capacity grade and damage calculated by the dynamic response analysis concurs closely with the findings from survey results after actual earthquake disasters. 4) The paper presents a probabilistic performance matrix that considers the large variation observed in the damage to post and beam wooden houses.

Keywords : wooden house, seismic capacity grade, damage, seismic upgrading, cost-effectiveness

木造住宅, 耐震診断評点, 損傷, 耐震改修, 費用対効果

1. はじめに

阪神淡路大震災では、その被害調査報告³⁾などから明らかにされているように、死者の80%以上は家屋の倒壊による圧死、窒息死であった。構造種別に被害を見ると、在来軸組工法による木造住宅、特に建築年代の古い既存不適格の木造住宅において被害が甚大であった⁴⁾。こうした事実から見れば、人命の観点で地震防災を考えるときの最優先課題は既存不適格木造住宅の耐震性向上である。

既存不適格木造住宅の所有者の大多数は一般市民である。したがって、それらの耐震化はその住宅所有者の判断に委ねられている。住宅所有者による耐震改修工事促進のため、無料の耐震診断制度や耐震改修費用の補助制度などが各自治体により実施されているが、既存不適格木造住宅の耐震化率は依然きわめて低いのが現状である。

こうした地震防災上の現状を鑑み、既存不適格木造住宅の耐震化を促進するために必要とされている技術を再点検し、その問題点を解決できる技術的な支援ツールについて検討を行うことが本研究の目的である。本報その1では、耐震改修促進に向けた技術的な支援

ツールの具体化に不可欠な情報として、一般耐震診断の評点と地震時損傷度の関係を明らかにする。

2. 木造住宅の耐震改修促進における技術的課題

既存不適格木造住宅の所有者が耐震改修に踏み出せない原因については、一般市民を対象としたインターネットアンケート調査⁵⁾や、構造技術者、地震災害被災者、建築士、保険関係者等を対象としたオーラルインタビューに基づく研究成果⁶⁾⁷⁾等が報告されている。これらの報告の中では、地震災害に対する一般市民の意識として、以下のような結果がまとめられている。

- 1) 大地震発生のリスクは半数が認識している。
- 2) 大地震時の住宅への被害リスクは約7割が認識している。
- 3) 耐震改修の効果は約7割が認識している。
- 4) 耐震診断・改修に対しては約7割が消極的である。

耐震改修が進まない理由の一つとして、住宅所有者の地震防災意識の低さが指摘されることが多い。1)の地震発生のリスク認識が

本論文の一部は、文献1), 2)で発表している。

* 名古屋工業大学大学院社会学専攻 助教授・工博

** 大成建設設計本部 工修

*** 名古屋工業大学大学院社会学専攻 助教授・博士(工学)

**** 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻
教授・Ph. D.

Assoc. Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Taisei Corporation, M. Eng.

Assoc. Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Nagoya University, Ph. D.

半数という結果がそのことを説明していると考えられる。一方、2)のように地震が発生した場合には7割が住宅に何らかの被害があると認識している。また、耐震改修による効果もアンケート結果3)にあるように約7割が認識している。すなわち、地震の発生自体の実感が高まれば、耐震診断あるいは耐震改修の必要性を認識する段階には抵抗なく進んでいくものと考えられる。

ところが、いざ耐震診断あるいは耐震改修を実施するかどうかの意思決定の段階になると、4)のように7割が消極的である。この理由として挙げられている回答を回答率の高い順に示すと、以下のようになる。

- 1) 費用がかかるから。
- 2) 大地震による被害は避けられないから。
- 3) 耐震改修の効果が良くわからないから。
- 4) 適正な業者がわからないから

このうち、構造技術的な側面から対応していく必要があるのは1)と3)の2項目と考えられる。次章では、これら二つの項目について、具体的な技術的対応策を検討する。

3. 費用および効果に関する技術的対応策の検討

3.1 耐震改修の費用について

耐震改修工事を実施する以上、費用は必然的に発生する。この費用が耐震補強工事実施の妨げになっているのは、所有者が費用に見合った効果を実感できていない点にある。費用対効果の問題については後述することとし、ここでは低価格の補強工事の可能性について検討する。

低価格の耐震改修工事を実現するには、次の2つの可能性がある。

- 1) 低価格の補強工法を開発すること。
- 2) 補強の程度を軽微にすること。

低価格の補強工法を実現することはもともと大きな技術的課題の一つと考えられる。一定の補強効果を確保するために必要となる工費を減らせば、耐震改修に対する抵抗感の最大理由である費用の問題を克服できることになる。ただし、現在一般的に行われている耐震補強工法でも、筋かい、合板、接合金物等の純粋な耐震補強工事関連の費用はきわめて低価格であり、改修費用の大部分は構造躯体を施工するために必要な仕上げ材の撤去・復元のために発生している。こうした理由を考えると、低価格の工法開発といっても単なる構造技術だけの問題ではなく、仕上材も含めた工法全体について検討することが重要である。

低価格の耐震改修工事を実現するためのもう一つの対策は、補強程度が軽微な改修も推奨することである。現在、自治体等による耐震改修費用の補助は改修後の評点が1.0を超えるものが対象となっている場合が多い。したがって、評点が0.3、0.4といった極めて耐震性能の低い住宅を1.0まで補強しようとする改修費用が高額になり、結局改修工事の実施を断念して何の改修もされないという結果につながる。耐震性能の極めて低い住宅こそ耐震改修の優先順位が高いにもかかわらず、現実にはそれらが取り残されている。たとえば、評点0.3の住宅の耐震性能を評点0.5まで上昇させたときの効果を住宅所有者が納得し、改修費用がそれに見合うものだと判断すればその改修工事は実施されるべきである。ところが、表1に示すように、現在の耐震診断評価⁸⁾⁹⁾の中では、評点0.3と0.5の差を明確に説明

表1 耐震診断評点の判定

(a) 耐震判定表 (我が家の耐震診断と補強方法)⁸⁾

総合評点	判定	今後の対策
1.5以上～	安全です	-
1.0以上～1.5未満	一応安全です	専門家の精密診断を受ければ、なお安心です
0.7以上～1.0未満	やや危険です	専門家の精密診断をうけて下さい
0.7未満	倒壊または大破壊の危険があります	ぜひ専門家と補強について相談して下さい

(b) 総合評価 (一般診断法および精密診断法1)⁹⁾

上部構造評点	判定
1.5以上	倒壊しない
1.0以上～1.5未満	一応倒壊しない
0.7以上～1.0未満	倒壊する可能性がある
0.7未満	倒壊する可能性が高い

できず、住宅所有者はこの0.2の補強効果を実感することができない。こういった問題点を解決するには、耐震改修の程度に様々なグレードを設け、1.0を超えるかどうかにかかわらず上昇した評点の大きさに応じた効果を具体的に説明するための技術が求められているといえる。

3.2 耐震改修の効果について

住宅設備や仕上げ、意匠、計画などに関連する改修はその効果が施工後すぐに実感でき、費用対効果も理解しやすい。ところが、耐震性能は希に発生する大地震に対してのものであるから、日常生活の中で効果を実感することはできない。したがって、住宅所有者に対し耐震改修の効果を実感を伴った形で説明するためには、木造住宅が地震によって損傷を受けるメカニズムをわかりやすく理解させ、その論理の中で耐震性能向上の効果を実感できるような工夫が必要である。

建築物の耐震性能は、外力である地震力の大きさや特性と、それに抵抗する構造躯体の耐力の特性の関係から定義され、その関係の中で地震時の損傷が決まる。したがって、木造住宅が地震によって損傷を受けるメカニズムから耐震改修効果を実感させるためには、以下の3つの項目について説明することが必要である。

- 1) 対策すべき地震の大きさ
- 2) 目標とする耐力特性
- 3) 予想される損傷程度

対策すべき地震の大きさを説明する最も身近な方法は、ある特定の地震に対して公開されている予想震度を利用する方法である。東海地方を例にとれば、近い将来の発生が確実視されている東海地震、あるいは東南海地震がその対象であり、そのときの住宅所在地の予想震度を対策すべき地震の大きさとするような説明は住宅所有者に対して説得力は高い。ただし、特定地震に対する予想震度を上回る地震が発生する可能性があることは同時に説明すべき項目である。また、住宅所有者が確率的な考え方を意思決定に反映させるだけの知識がある場合には、海溝型地震と内陸活断層の影響も考慮した確率論的地震動予測地図¹⁰⁾を用いる方法がある。ある震度以上が発生する確率や、生起確率に応じた最大震度がマップに表現されており、確率的な情報に基づいた意思決定を選択する住宅所有者には有力な説明ツールである。

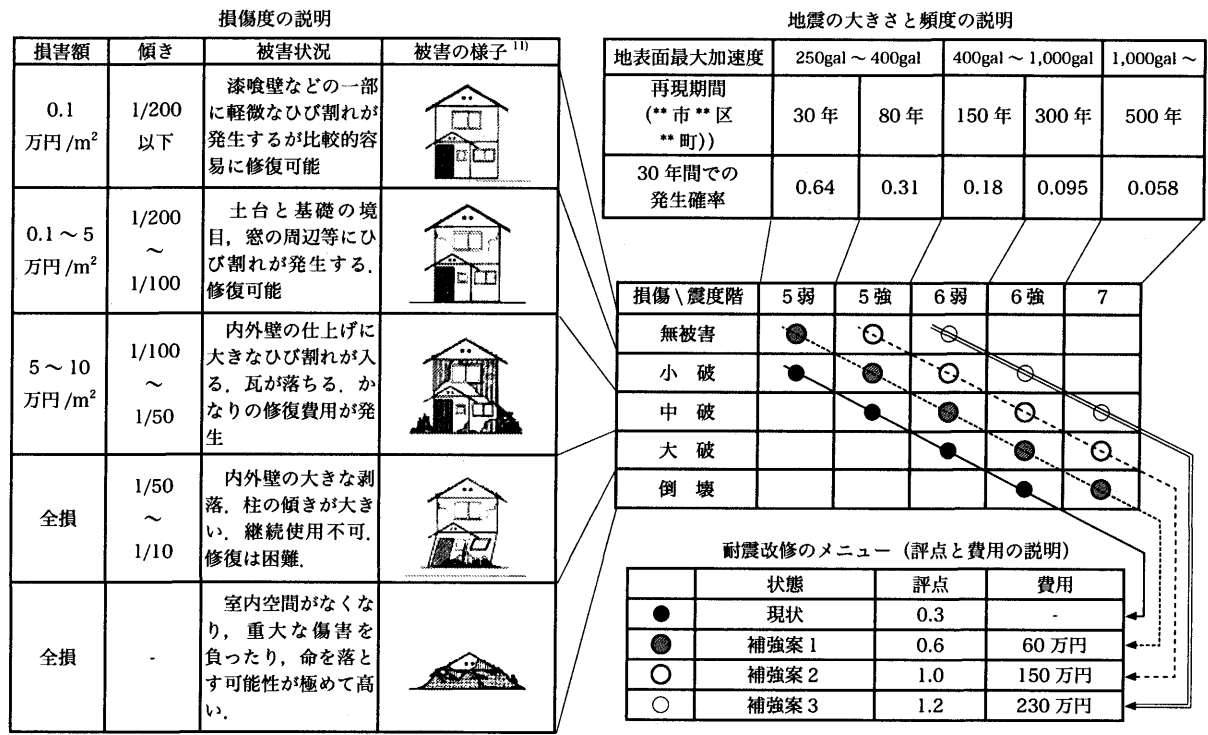


図1 耐震改修意思決定支援ツールのための性能マトリクスのイメージ (表中の数値、記述等は単なる例示であり未検討である)

対策すべき地震の大きさが設定されれば、その地震に対して住宅に与えたい耐力特性を説明しなければならない。一般の住宅所有者に対して説明性を持つ木造住宅の耐力特性の尺度は、木造住宅の耐震診断法の評点が唯一である。したがって、耐震改修によって目標とする耐力特性を決めるには、評点に対して予想される住宅の損傷および耐震改修の費用との関連を明確にした説明が不可欠である。

予想される損傷の程度は、改修後の耐力特性と想定する地震の大きさから決定される。損傷の程度を表現する物理量は、最大応答変位、残留変位、被害調査等で用いるダメージインデックス¹¹⁾、あるいは損害額¹²⁾などが考えられ、住宅所有者の理解に応じた説明手段が必要である。

一般の住宅所有者が耐震改修工事に対して持っている費用対効果に対する疑問を解決し、安心を実感する改修計画を実現するには、対策すべき地震、目標とする耐力特性、予想される損傷の3つを有機的に関連させ、改修実施のための意思決定を可能にする技術的な説明ツールが必要である。

4. 提案する意思決定支援ツールの概要

前章で述べたような技術的対応策の検討結果に基づき、本研究では一般住宅所有者が木造住宅の耐震改修工事を実施するための意思決定支援ツールを提案する。

4.1 全体概要

改修後の耐震性能は、外力としての地震の大きさと、その結果発生するであろう被害との関係の中で説明するのがわかりやすい。この関係は、性能設計の概念で一般的に用いられている性能マトリクスと同様のものである。提案する意思決定支援ツールでも、改修後の耐震性能の説明には地震の大きさとそのときの被害程度の関係を用いる。説明対象が一般住宅所有者であることを考えると、地震の

大きさの尺度には原則として「震度階」を用い、必要に応じて最大加速度、再現期間などを説明に加える。また、被害程度に関しては、イメージのしやすさを考慮して一般的な地震被害の尺度として用いられている「倒壊、大破、中破、小破」などの用語を用いる。ただし、最大応答変位や仕上材の損傷などと関連させた定義をしておくことが必要である。

以上のような性能マトリクスを、改修後の耐力特性と費用に合わせて提示することが必要となる。耐力特性は、現在用いられている一般耐震診断の評点を尺度として用いる。これらを表現するイメージを図1に示す。図中に示す数値や記述は単なる例示であり、明確な根拠の下に示されたものではないが、住宅所有者が意思決定を行うためのツールとして具体的に考える上での重要な参考資料になりうると考えて定量的に提示した。また、図中の被害の様子は被害調査に用いるダメージインデクスのパターンチャート¹¹⁾より引用した。性能マトリクス上には改修前の評点に対応した性能レベル、および改修後の性能に対応した性能レベルが明示され、各性能レベルにはそのレベルまで耐震改修するための費用が明示される。説明性を高めるため、改修費用は特定の住宅に対する総額を絶対値で示すのが効果的である。また、縦軸の損傷欄には、評価尺度である「倒壊、大破、中破、小破」などの言語に対応した被害状況、損害額、層間変形角などが示される。横軸の地震の大きさは「震度階」で表現され、各震度階に対応した発生確率、再現期間、最大加速度などが補足的に示される。

なお、耐震診断の評点や震度階は当然力学特性を100%反映したものではないため、性能マトリクスはある範囲を持った提示、あるいは確率的な表現になることも考えられる。これについては、本報7章で触れる。

4.2 各評価尺度の関係

意思決定支援ツールの構築に当たっては、前節で示した各評価尺度間の定量的な関係を明示しておく必要がある。

まず、「評点」と「損傷度」の関係については、既往の研究成果の中では明確にされていないのが現状である。したがって、現在用いられている耐震診断手法に基づく評点と、地震時の損傷度の関係を具体的に提示することは現在技術的に必要とされている最も重要な課題といえる。壁の性能に限定すれば、耐震診断の評点と力学的特性は壁量と偏心を用いて定量的に関係づけることができる。したがって、この力学特性を用いて各震度階と損傷度の関係を明らかにしていくことが求められているといえよう。

「評点」と「耐震改修費用」の関係は、現在までに報告されているいくつかの情報によって、大まかな目安を求めることはできる。耐震改修によって上昇した壁の評点と改修費用の関係を示したもの¹³⁾や、耐震補強の具体的かつ詳細な実例と改修費用を明示した資料もいくつか公表されており^{14)~17)} これらを総合的に判断すれば評点と耐震改修費用の関係を説明するための必要最低限の情報はすでに用意されていると考えてよい。

5. 損傷度把握のための数値解析

前章までの考察より、耐震改修促進のためには耐震診断の評点と地震時損傷度の関係を所有者に説明していく必要がある。評点と損傷度の関係は、ある評点に対応した解析モデルに対する地震応答解析や、実地震の被害調査結果などから知ることができる。本研究では、既往の耐震診断手法に基づいて診断された木造住宅の時刻歴地震応答解析を行い、耐震診断時の評点と損傷度の関係を各震度階に対して明示することを試みる。本章ではまず、評点と損傷度の関係を把握するために用いた数値解析の方法について述べる。

5.1 平面プランの設定

住宅所有者への説明性の高さを考え、本研究では数値解析モデルを実在する住宅の平面プランを用いて設定した。対象とした基本プランは、表2に示す6タイプの在来軸組工法木造住宅である。いずれも新耐震基準法の施行前に建てられた木造住宅である。壁量と偏心から決まる上部構造の評点を0.38から1.05の範囲で大きく異なるプランを選んでいる。

5.2 解析対象モデルの生成と評点の計算方法

5.1で示した平面プランに対し、耐力壁内の筋かいの有無、仕上げの仕様等を変更することにより、耐震診断評点の異なる複数の住宅モデルを作成した。また、必要に応じて耐力壁の増設・撤去、柱接合部の種類の変更、屋根の葺き替えなどを行い、評点が0.3から2.0までの範囲に分布するようにした。各モデルに対する耐震診断の評点は、一般耐震診断法⁹⁾によって算出する。なお、本研究では壁の評点と損傷度の関係を中心に検討を行うため、基礎は健全なコンクリート基礎とし、劣化度による低減係数は1.0とした。地域係数についてもすべて1.0とし、積雪荷重は考慮しないものとする。耐力要素の配置などによる低減は、床仕様「火打ち+荒板」として偏心率を用いる方法により算出する。また、評点は1階部分で決定されるものとした。上部構造評点 G_s の算出には次式を用いた。

$$G_s = P_d / Q_c \quad (1)$$

ここに、 P_d : 保有する耐力 $= (P_w + P_c) \cdot E \cdot D$, P_w : 壁の耐力

$= \sum (C \cdot l \cdot f)$, C : 壁強さ倍率, l : 壁長, f : 柱接合部による低減係数, P_c : その他の耐震要素の耐力 $(=0.25Q_c)$, E : 耐力要素の配置等による低減係数, D : 劣化度による低減係数, Q_c : 必要耐力である。なお、必要耐力 Q_c は、床面積に応じた必要耐力算出方法(以下、略算法⁹⁾)と、各階の床面積を考慮した必要耐力算出方法の2通りの算出方法があるが、本研究では実際に耐震診断で用いられる可能性が高い略算法を用いて評価した。

5.3 耐力モデルの設定方法

前節のような方法を用い、耐震診断の評点が0.3から2.0までの住宅モデルを作成した。各モデルの耐力特性は、各耐力壁の仕様に応じた荷重変形関係を用いて算出する。主な仕様に対応する耐力壁1枚あたりの荷重変形関係を図2に示す⁹⁾。各構面の荷重変形関係は、図2に示した同一構面内の各壁の耐力を変形量を適合させながら足し合わせることで求める。次に、求めた各構面の荷重変形関係をねじれ補正係数考慮して補正する⁹⁾。最終的に各構面の荷重変形をX,Y各方向に対して累加する。こうして得られた荷重変形関係を、その評点に対する耐力壁部分の耐力特性とした。ただし、これに雑壁等

表2 解析モデル作成の基礎データとした実在住宅の概要

物件名	床面積[m ²]		上部構造評点	主要耐震要素	建築年
	1階	2階			
A	127	73	0.38	土壁	1889年
B	119	35	0.59	三ッ割筋かい	1971年
C	86	37	0.74	三ッ割筋かい	1974年
D	91	29	0.59	三ッ割筋かい	1974年
E	102	24	0.46	三ッ割筋かい	1975年
F	70	53	1.05	三ッ割筋かい	1980年

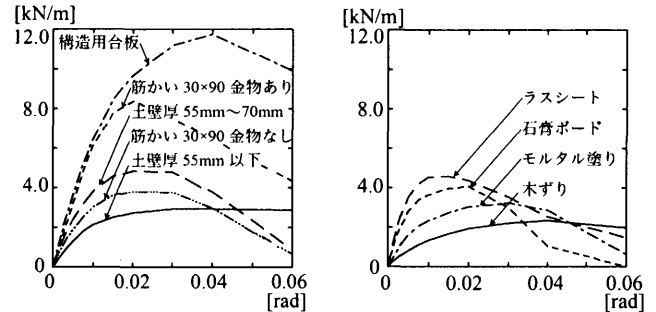


図2 耐力壁荷重変形の一例⁹⁾

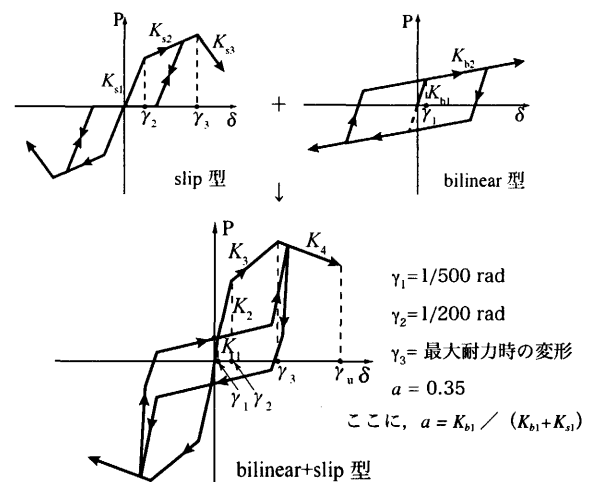


図3 復元力モデルの設定方法

を考慮する必要があるため、評点に対する必要耐力の25%が雑壁等の耐力という考えに基づき⁹⁾、(2)式のように各変形角における耐力壁部分の荷重 P_x に α を乗ずることにより耐力 P を設定した。

$$P = \alpha \cdot P_x \quad (2)$$

ここに、 $\alpha = G_s \cdot Q_s / P_w$ である。なお、雑壁の影響を考慮するにあたっては、最大耐力時変形量の変化や、耐力壁および雑壁の仕様の影響など、(2)式だけでは表現できない点も少なくないため、こういった点は解析精度を上げるための今後の重要な課題である。

5.4 復元力モデルの設定と時刻歴応答解析方法

以上のような方法で得られた荷重変形関係に基づき、応答解析用の復元力モデルの作成を行う。復元力モデルは、図3に示すバイリニア+スリップ復元力モデルが木造住宅の特性であるスリップ、剛性低下、ピンチングを精度良く表現可能であることが報告されており^{例えば18)}、本研究ではこのバイリニア+スリップ復元力モデルを用いる。モデルのパラメータである第1剛性 K_1 、第2剛性 K_2 および第3剛性 K_3 は5.3節で求めた荷重変形関係において、1/500 rad, 1/200 rad, および最大耐力時の変形と耐力から算出する。また、スリップ型、およびバイリニア型の復元力のパラメータ K_{s1} , K_{s2} , K_{b1} , K_{b2} は $\alpha = K_{b1} / (K_{b1} + K_{s1})$ および以下の関係式を用いて算出した¹⁸⁾。

$$K_1 = K_{b1} + K_{s1} \quad (3)$$

$$K_2 = K_{b2} + K_{s1} \quad (4)$$

$$K_3 = K_{b2} + K_{s2} \quad (5)$$

$$K_4 = K_{b2} + K_{s3} \quad (6)$$

ここに、 K_{b1} , K_{b2} : バイリニア要素の第1, 第2剛性, K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} : スリップ要素の第1, 第2, 第3剛性である。なお、 α の値は0.35とし、 K_4 は0.06 rad時の耐力と最大耐力点を結ぶ直線の傾きで定義した。

解析モデルはせん断2質点系モデルとし、質量は精算重量算出法⁹⁾に従い算出する。図4に解析モデル図、表3に各物件の質量および階高を示す。応答解析はNewmark β 法の増分法($\beta = 1/6$)を用い、初期剛性比例型、減衰定数5%とする。剛性が急変する際の解析の誤差は、それを解除するために質点に作用させるべき外力を求め、次のステップで与えている。なお、 $P-\Delta$ 効果については考慮しない。

5.5 入力地震動

地震波は、K-NET、港湾地域強震観測システム、(財)気象業務支援センターより取得した90の地震波、およびEl Centro-1940, Taft-1952, Hachinohe-1968, Tohoku-1978, JMA-Kobeの計95波(EW, NS成分含め計190波)の原波のみを用いる。地震波の詳細を表4に示す。また、解析に用いた地震波のEW, NS, UDの3成分を用い計測震度を算出し震度階に分類した。

5.6 数値解析結果

5.4で求めた復元力モデルに対し、5.5で述べた各地震波のもとで時刻歴応答解析を行う。図5に解析結果の一例として物件Cにおける評点1.0の解析結果を示す。用いている地震波はJMA-KobeのEW成分である。在来軸組木造住宅の特性である、スリップ、ピンチング、剛性低下など、復元力モデルで設定した特性が動的荷重下で適切に表現されていることがわかる。

6. 耐震診断の評点と損傷度の関係

前章で示した数値解析結果に基づき、本章では、評点、計測震度、損傷度の関係について述べる。

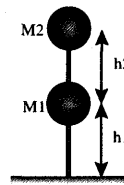


図4 解析モデル

表3 質量及び階高

物件	質量[kg]		階高[cm]	
	M_1	M_2	h_1	h_2
A	42,800	4,300	290	290
B	26,300	6,400	300	300
C	19,000	6,800	290	290
D	19,700	5,300	300	300
E	22,600	4,400	300	300
F	15,500	9,600	300	300

表4 時刻歴応答解析に用いた実地震波の概要

震度	地震波数	平均計測震度	代表的な地震
4	7	4.0	2004年紀伊半島沖など
5弱	44	4.7	2004年中越地震余震など
5強	22	5.1	2005年福岡県西方沖地震など
6弱	15	5.7	2001年芸予地震など
6強	5	6.2	2003年十勝沖地震など
7	2	6.5	1995年兵庫県南部地震

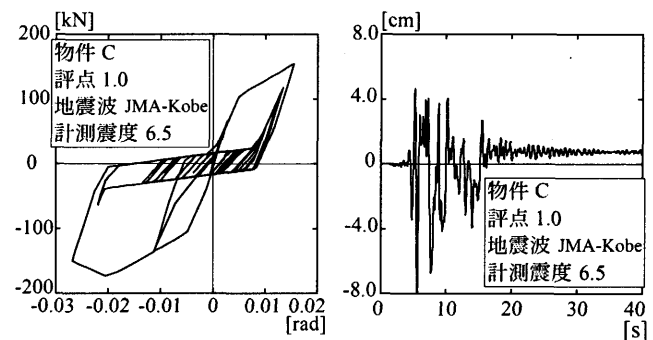


図5 時刻歴応答解析結果

6.1 震度階別に見た上部構造の評点と最大応答変形角の関係

上部構造の耐震診断評点と最大応答変形角の関係を震度階ごとに図6に示す。ここでは、各地震波のNS, EW成分それぞれの1層の最大応答変形角のうち、大きい方をその地震波の最大応答変形角とする。本研究では1/20 radを倒壊相当と定義し、1/20 rad以上の応答変位が計算された場合には1/20 radの位置にプロットした。最近の実大実験では、倒壊限界は1/10radあるいはそれ以上の報告もあるが、意思決定支援ツールとしては安全側の位置づけを行う必要があること、また、倒壊という現象をより厳密に評価するためには大変形挙動を考慮した数値解析手法と対応させて議論する必要があることなどを考慮し、本論文では1/20radを倒壊限界とした。したがって、倒壊限界に対してはやや厳しめの評価になっていることに留意されたい。図中実線は評点ごとの最大応答変形角の中央値、点線は正規分布において標準偏差分平均値から離れた位置における非超過確率に対応した応答変位、すなわち上側16%限界値、および下側16%限界値を示している。また、損傷度は応答変位との関係で図7に示すように定義する。

震度が大きくなるにつれて損傷度が大きく、評点が高くなるにつれて損傷度が小さく押さえられていることがわかる。また、震度5強を超えると、同じ評点でも損傷度の変動性が極めて大きい。評点による平均値の変化を見ると、震度7では評点が1.0を超えた範囲で急激な低下が見られたが、それ以外の震度では評点の増加に伴っ

て損傷度は低下するものの、それほど急激な変化は見られなかった。

一方、上側16%と下側16%に対応した損傷度の変化を見てみると、上側の損傷度については平均値よりも明らかに評点の影響を受けていることがわかる。すなわち、評点の低い建物ほど損傷度の変動が大きく、大きな被害を受ける建物の含まれる可能性が高くなると解釈できる。また、下側の損傷度は震度7以外では評点による影響こそ少ないが、震度が大きくなるにつれて全体的に高くなる傾向が見られた。

評点と震度の関係の中で整理した損傷度に大きな変動性が存在するのは、耐震診断方法や震度の計算法が建物の損傷という挙動を100%反映した尺度ではないことによる。したがって、耐震診断手法をさらに精緻にしたり、あるいは震度階に代わる地震規模の尺度を用いたりすれば、図6で見られた変動性は小さくなると考えられる。しかし、限られた時間と労力で耐震診断を行うためにはできるだけ簡便な耐震診断手法が求められているという現実や、現在用いられている震度階が一般の住宅所有者に対しては実感を伴った大きな説明性を持っていることを考えると、簡便な診断法を尊重し、この変動性を認めた上で評点と損傷度の関係を説明していく必要があると考えられる。

6.2 実被害および被害関数との対応

説明性を高めるためには、計算で得られた損傷度と実被害との対応を確認しておくことも重要である。岡田・高井は、耐震診断値の全国分布と全国平均建物について求めた被害率関数を示している¹⁹⁾。図6の網掛け部はその被害関数から求めた評点と損傷度の関係を表す。ただし、被害関数は損傷度を最大変形角で定義していないため、対応する損傷度と評点との関係を簡略化して表している。また、被害関数の評点は旧診断法による評点であり、旧精密診断と一般診断(略算法)の評点は一般診断の方が0.2程度高いことが報告されている²⁰⁾ため被害関数の評点に0.2を加えて比較を行った。

全体的に見ると、被害関数と地震応答解析による損傷度は比較的良好な対応を示した。ただし、評点の小さな範囲では被害関数の方が損傷が大きくなる傾向が見られた。これは、評点の小さな建物では仕口でのほぞ抜けや極端に弱い水平構面の存在など、解析の力学モデルで表現されていない挙動が大きな損傷に結びついているものと考えられる。

一方、田端・大橋は、兵庫県南部地震により被災した住宅111棟の被害調査データより一般診断法の評点と被災度の関係を報告している²⁰⁾。図8に本研究での解析結果との対応を示す。被災地区は震度6強、ないしは震度7と想定されている²⁰⁾ため、この2つの震度

について比較した。実線は各損傷度における評点の平均値、点線は平均値から標準偏差離れた値を表している。ただし、被害調査データと対応させるため、解析結果の標準偏差は評点に対して算出している。評点に伴う被災度の変化の傾向にはやや差が見られるが、震度6強を想定したときの被害調査データは本研究の解析結果と比較的良好な対応を示した。一方、震度7を想定したときの解析結果は被害調査データよりもかなり大きい結果となった。

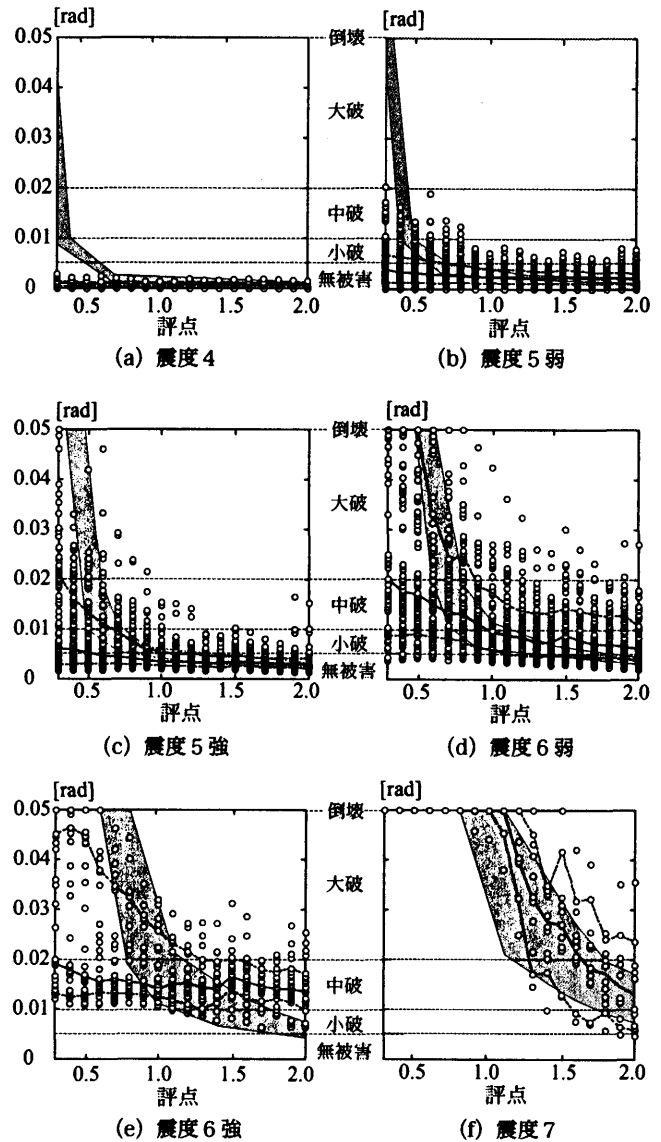


図6 上部構造評点と最大応答変形角、および損傷度との関係

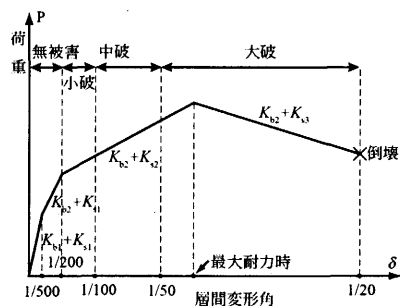


図7 損傷度の定義

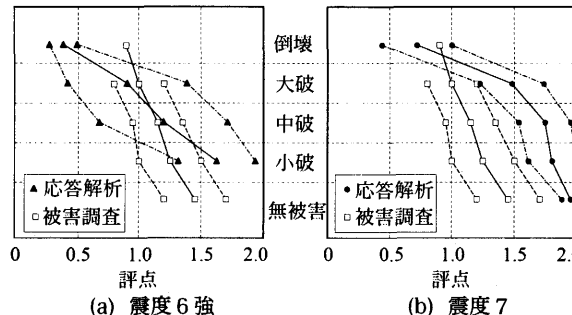


図8 実被害との対応

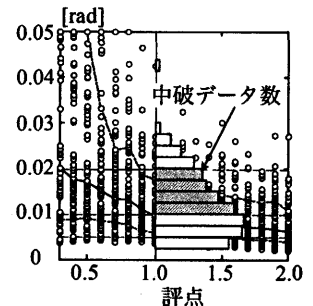


図9 損傷確率の算出方法

表5 確率表示された性能マトリクス (%)

(a) 評点 0.4							(b) 評点 0.7							(c) 評点 1.0						
	4	5弱	5強	6弱	6強	7		4	5弱	5強	6弱	6強	7		4	5弱	5強	6弱	6強	7
無被害	100	76	44	7	0	0	無被害	100	84	58	4	0	0	無被害	100	91	83	11	0	0
小破	0	19	27	14	0	0	小破	0	14	27	26	0	0	小破	0	9	14	43	0	0
中破	0	6	19	32	60	0	中破	0	1	12	41	67	0	中破	0	0	4	32	77	0
大破	0	0	10	26	33	0	大破	0	0	2	26	33	0	大破	0	0	0	13	23	8
倒壊	0	0	0	21	7	100	倒壊	0	0	0	3	0	100	倒壊	0	0	0	0	0	92

(d) 評点 1.3							(e) 評点 1.6							(f) 評点 1.9						
	4	5弱	5強	6弱	6強	7		4	5弱	5強	6弱	6強	7		4	5弱	5強	6弱	6強	7
無被害	100	97	89	22	0	0	無被害	100	96	92	18	0	0	無被害	100	96	90	28	0	8
小破	0	3	11	46	17	0	小破	0	4	8	47	7	17	小破	0	4	8	47	13	17
中破	0	0	0	30	73	17	中破	0	0	0	32	83	25	中破	0	0	2	23	73	42
大破	0	0	0	2	10	75	大破	0	0	0	3	10	58	大破	0	0	0	2	13	33
倒壊	0	0	0	0	0	8	倒壊	0	0	0	0	0	0	倒壊	0	0	0	0	0	0

7. 性能マトリクスにおける確率量の提示

前章の結果で見られた大きな変動性を認めた上で耐震改修効果を説明するには、ある程度確率的な表現を用いることも避けられない。そこで、本章では前章までの計算結果に基づき、耐震改修意思決定支援ツールのための性能マトリクスに用いる評点と損傷度の関係を確率量で表現する。

7.1 損傷確率算出方法

図9に示すように、各震度階のある評点における全体のデータ数に対する当該損傷度のデータ数の割合を求め、それを損傷確率とする。図9は、震度6弱、評点1.0の中破データを例として示している。評点ごとの損傷確率は次式で計算する。

$$p_{\omega}(X) = \frac{\text{各震度階の損傷度ごとのデータ総数}}{\text{各震度階のデータ総数}} \quad (7)$$

7.2 確率表示による性能マトリクス

評点0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6, 1.9の木造住宅の性能マトリクスを表5に示す。改修前の現状を示す評点0.4の場合に震度6弱の地震で倒壊する確率が21%に対し、評点0.7まで補強を行った場合には3%、1.0まで補強を行った場合には0%と倒壊確率が低下していることがわかる。こうした性能の変化は評点と損傷度のどの組み合わせにおいても知ることができ、耐震改修の効果を定量的に実感し、補強後の目標性能が提示できているといえる。また、性能マトリクスに地震発生確率を併せて示すことで、住宅所有者がどの程度の震度に対する改修が必要かという基準にすることができ、被害の程度を写真や図などを用いることで、より身近に感じさせ耐震改修の効果を実感できる尺度になるといえる。さらに、費用と評点の関係を性能マトリクスに加えることで、費用と耐震改修の効果の関係を定量的に示すことができ、既存不適格木造住宅の所有者が耐震改修をするうえで非常に有益な情報になる。

なお、一般の住宅所有者に対して表5の様な確率表現がどの程度実感を伴うものかについては今後十分な議論が必要な点であり、確定的な表現と上手に組み合わせることも重要である。また、今回行った(7)式の評価は有限個のサンプルに対する結果であるため、0%あるいは100%という数値が表5に含まれている。確率表現をしたときの0%はその事象が絶対に起こらないことを保証するものであり、各種不確定要因の存在を考えると今後表現方法を検討する余地があるものと考えられる。

8. 結

木造住宅の耐震改修促進に向けた意思決定支援ツールの提案を目的とし、その中での情報として不可欠な耐震診断評点と被害の関係について検討を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

1. 耐震改修実施の意思決定において住宅所有者が必要としているのは改修工事の費用対効果であり、それを説明するためには耐震診断評点と損傷度の関係に関わる情報が不足している。
2. 耐震改修のための意思決定支援ツールとして、震度、損傷度、耐震改修費用、耐震改修評点などの関係が一目でわかるツールの事例(図1)を性能マトリクスを用いて提案した。
3. 7つの実在プランに基づいてモデル化した木造住宅に対して計190波の実地震波下での時刻歴応答解析を行い、耐震診断評点と地震時損傷度の関係を計測震度階ごとに提示した。評点と損傷度の関係には極めて大きな変動性があるが、全体の傾向について言えば実被害に基づく結果と比較的良好な対応を示した。
4. 耐震診断評点と損傷度の関係における変動性を適切に表現するため、確率を用いた性能マトリクスを各耐震診断評点ごとに示した。

今後、意思決定支援ツールとしての実用性をさらに高めていくためには、損傷度や地震発生の頻度などの説明に視覚化された情報を関連させて提示し、より実感が高まるような説明性の高いツールにしていく必要がある。また、より詳細な数値解析手法に基づいて震度と損傷度の関係を一層精確にしていくことも今後の重要な課題である。

謝辞

本研究の一部は、(財)トステム建材産業振興財団の研究助成事業(平成16年度研究助成事業、「既存不適格木造建築物の耐震補強推進のための意思決定支援ツールの開発」、申請者 井戸田秀樹)によった。また、研究を進めるに当たり、名古屋工業大学岡田成幸教授に貴重なご意見を賜った。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 井戸田秀樹, 森 保宏, 嶺岡慎悟: 既存不適格木造住宅の耐震改修促進のための意思決定支援ツールの開発, その1 支援ツールの目的と概要, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第44号, pp.265-268, 2006.2
- 2) 嶺岡慎悟, 井戸田秀樹, 梅村 恒: 既存不適格木造住宅の耐震改修促進の

- ための意思決定支援ツールの開発, その2 評点と被災度の関係, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第44号, pp.269-272, 2006.2
- 3) 厚生省大臣官房統計情報部人口動態統計課:『国民衛生の動向』, 厚生統計協会、1996
 - 4) 村上雅英ほか: 阪神・淡路大震災にみる在来木造都市型住宅の問題点, 日本建築学会構造系論文集, 第481号, 71-80, 1996.3
 - 5) 村山明夫, 木場裕司, 舟木貴久, 城山英明, 畑中綾子, 阿部雅人, 堀井秀之: 既存不適格住宅の耐震性向上に係る社会技術の研究, 社会技術研究論文集, Vol.1, pp.338-351, 2003.10
 - 6) 鳥澤一晃, 水越 薫, 宮村正光, 石田 寛, 日下彰宏, 若村眞佐代, 石川孝重, 伊村則子: リスク評価に基づく地震防災投資に関する研究, 鹿島技術研究所年報, 第51号, pp.197-204, 2003.9
 - 7) 水越 薫, 小堀鐸二, 石川孝重, 他: リスク評価に基づく地震防災投資に関する研究 その1~その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.59-66, 2002.8
 - 8) 日本建築防災協会: 木造住宅の耐震精密診断と補強方法 (増補版), 建設省住宅局監修, 1995.8
 - 9) 日本建築防災協会: 木造住宅の耐震診断と補強方法, 国土交通省住宅局建築指導課監修, 2004.7
 - 10) 地震調査研究推進本部, <http://www.j-map.bosai.go.jp/>
 - 11) 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, 第524号, pp.65-72, 1999.10
 - 12) 花井 勉, 福和伸夫, 森 保宏, 皆川隆之: 費用対効果を考えた木造住宅の耐震補強設計について, その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.157-160, 2003
 - 13) 荒木雅也, 井戸田秀樹, 在来軸組工法住宅を対象とした耐震補強における費用対効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.139-140, 2004.8
 - 14) 静岡県都市住宅部: プロジェクト「TOUKAI (東海・倒壊) - 0」, 木造住宅の耐震リフォーム事例集, 2004.5
 - 15) 愛知県建設部住宅企画課: リフォームするなら強い家, 木造住宅耐震改修ガイド, 2003.12
 - 16) 愛知県建築指導課: 愛知県木造住宅耐震改修マニュアル, 2003.10
 - 17) 阿部正行: リフォーム工事の見積り, (財) 経済調査会, 2004.9
 - 18) 荒木康弘, 腰原幹雄, 大橋好光, 坂本 功, : 木造住宅の地震応答解析のための復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, pp.79-85, 2004.5
 - 19) 岡田成幸, 高井伸雄: 木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用 - 地震動入力を確定的に扱う場合 -, 日本建築学会構造系論文集, 第582号, pp.31-38, 2004.8
 - 20) 田端千夏子, 大橋好光: 木造建築物の耐震診断法に関する研究 - 新旧耐震診断の比較および評点と被災度の関係 -, 日本建築学会構造系論文集, 第599号, pp.119-125, 2006.1

(2006年3月10日原稿受理, 2006年11月1日採用決定)