

木造住宅の実効ある耐震化戦略と耐震化促進のためのリスク情報

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2)

EFFECTIVE STRATEGY FOR UPGRADING WOODEN HOUSES
AND RISK INFORMATION FOR ADVANCEMENT OF UPGRADINGA study on decision-making tools for promoting aseismic reinforcement
of old wooden houses (Part 2)

山口剛史*, 森 保宏**, 井戸田秀樹***

Takeshi YAMAGUCHI, Yasuhiro MORI and Hideki IDOTA

There are about 10 million existing non-conforming wooden houses today in Japan, and upgrading the seismic performance of such houses is essential for disaster mitigation. However, most of them remain untouched because of large expenditure for upgrading for both the owners and society. The owners have to spend about 1.1 million yens on average to satisfy the current design requirement. In Aichi prefecture alone, it would cost about one trillion yens, which is more than 1/3 of the annual budget, to upgrade all of them. In order to implement the upgrading of existing non-conforming wooden houses more efficiently, this paper investigates the alternative strategies for upgrading. The seismic risks of wooden houses as a whole in Aichi prefecture is estimated and then the effective target level for upgrading is discussed from the viewpoint of both economic loss and the number of fatalities.

Keywords: *Upgrading strategy, Wooden housings, Risk information, Cost effectiveness, Seismic hazard*

耐震化戦略, 木造住宅, リスク情報, 費用対効果, 地震ハザード

1 はじめに

平成17年, 中央防災会議において, 近い将来に起こるであろうとされている東海, 東南海・南海地震に対して, 今後10年間で死者数および経済被害額を半減するという減災目標が定められた。具体的な減災対策として, 木造住宅の耐震化率(現行基準が求める耐震性を有する住宅の割合)を現状の75%から90%に向上させるといった目標が挙げられているが, 耐震化の進捗状況は芳しくない。その理由として, 所有者にとっての経費負担が大きいこと, 地震のリスク情報が的確に伝わっていないことなどが挙げられる¹⁾。

経済的負担に対しては, 多くの自治体で補助金制度が設けられている。しかし, ほとんどの場合, 改修後の耐震診断評点(以下, 単に評点という)が現行基準程度の水準である1.0を満足しなければ補助の対象とならず, 本来, 真っ先に改修されるべき非常に評点の低い建物を評点1.0まで上げるためには多大な費用がかかり, 結果的に改修されずに取り残されてしまう可能性が高く, その妥当性には検討の余地がある。また, 投資できる資金には限りがある中で, すべての木造住宅の目標評点を1.0とすることは実行可能であるのか, さらに, 経済性あるいは生命を守るという観点からどのような戦略が費用対効果の高いのかといった検討をする必要がある。このような効果的な耐震化戦略を検討したものとして, 吉村・目

黒²⁾ や中嶋³⁾の研究があるが, いずれも確定的な想定地震動に対して耐震化戦略を検討しており, 想定外の地震を含めそれらの発生の可能性も考慮しながら効率的な戦略を検討する必要がある。

また, 建物所有者の立場からは, 所有者がどの程度の地震リスクにさらされているのかという具体的な資料を提供し, 耐震改修をするか否か, するならばどの程度までといった判断の助けとなる情報が必要である。所有者に対するリスク情報としては, 近年, ハザードマップや性能マトリクス⁴⁾などの情報が提供されている。しかし, どこでどの程度の評点を持つ建物に住んでいると, 地震により死亡する可能性がどの程度あるのかといった, より具体的な表現方法も有用であろう。

本研究ではまず行政の視点から, 木造住宅群として地震リスク低減に向けた実効ある耐震化戦略を検討し, また, 解析モデルが耐震化戦略の選択にどの程度影響を及ぼすかを感度解析により検討する。次に個々の建物所有者の視点から, 現在曝されている地震リスクの大きさを定量的に評価し, 耐震改修の際の意思決定に役立つ具体的なリスク情報について検討する。

2 リスク評価

2.1 解析モデル

本研究では, 地震ハザードは地動最大速度で表すこととし, 地震

* 元名古屋大学大学院 大学院生・修士(工学)
(現名古屋市)

** 名古屋大学大学院環境学研究所 教授・Ph. D.

*** 名古屋工業大学大学院社会工学専攻 准教授・工博

Former, Grad. Student, Nagoya Univ., M. Eng.
(Nagoya City Hall)

Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Ph. D.

Assoc. Prof., Societal Engineering, Nagoya Inst. Tech., Dr. Eng.

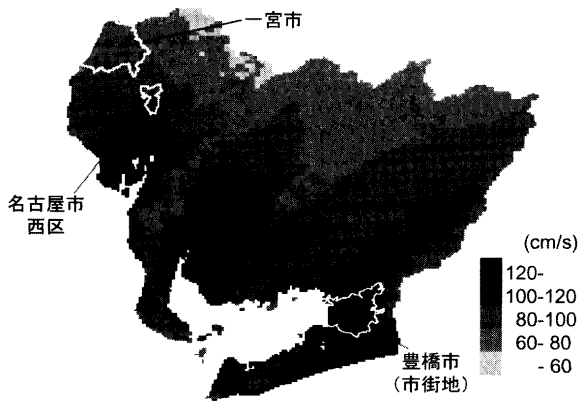


図1 30年超過確率3%に対応する地動速度

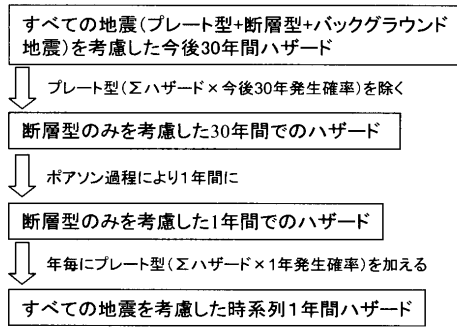


図2 年最大値地震ハザード算定フロー

調査研究推進本部(以下推本という)が公開している、すべての地震(プレート境界型地震、断層型地震、バックグラウンド地震)を考慮した愛知県内、1kmメッシュごとの、2006年から30年超過確率3%および6%の値⁵⁾を基に、地動速度の30年最大値の確率分布関数が、対数正規分布に従う⁶⁾と仮定して評価する。図1に愛知県内の30年超過確率3%の最大地動速度を示す。

リスクの表現方法としてしばしば用いられる、年毎の地震リスク評価に用いる年毎の地震ハザードは、図2のフローに従って評価した。直下型地震の発生はポアソン過程に従うものとする。東海地方で発生が懸念されているプレート境界型地震については、安政の東海地震から約150年、昭和の東南海、南海地震からは約60年経過しており、今後、発生確率は増加していくものと予想されている。このため、年毎の地震ハザードを算定する際には、プレート境界型地震の発生の周期性を踏まえ、発生確率を表1に示すパラメータを持つBPT分布に従うものとして評価した。

南海、東南海、東海地震のプレート境界型地震は、連動して発生する可能性があり、ここでは文献5)に倣い、図3に示す13のパターンを考える。同図中の各パターンの発生確率は、今後30年間に複数のプレート境界型地震が発生した場合、隣り合うプレート境界型地震の連動の可能性は1/2として評価している。南海、東南海、東海が単独で発生した場合、および連動して発生した場合の地動最大速度は、推本の震源断層を特定した地震動予測地図より得られる1kmメッシュごとの値を平均値とし、距離減衰式のばらつきを考慮して変動係数を一律0.36の対数正規分布でモデル化している⁶⁾。プレート境界型地震のみを考慮した地動速度の年最大値の確率分布

表1 プレート型地震の発生確率モデル

対象プレート型地震	最終発生年	平均値(年)	ばらつき
南海	1946	90.1	0.2
東南海	1944	86.4	0.2
東海	1854	118.8	0.2

Case.	南海地震	東南海地震	東海地震	30年発生確率
1	×	×	×	0.025
2	↔	×	×	0.026
3	×	↔	×	0.042
4	×	×	↔	0.162
5	↔	↔	×	0.021
6	↔	↔	×	0.021
7	↔	×	↔	0.165
8	×	↔	↔	0.133
9	×	↔	↔	0.133
10	↔	↔	↔	0.068
11	↔	↔	↔	0.068
12	↔	↔	↔	0.068
13	↔	↔	↔	0.068
合計				1

図3 連動を考慮し分類した13パターン

は、パターン別年発生確率と各パターンの条件付年最大地動速度の確率分布を用いて、全確率の定理により評価している。

建物の耐震性能を示す指標には、精密診断法による評点 I_g を用いる。評点の分布は建築年代により異なるであろうから、建築基準法が改正された年を基準に、3つの年代に分け、それぞれの年代に建てられた木造住宅の評点は、日本木造住宅耐震補強事業者協同組合(木耐協)による耐震診断調査結果⁷⁾より表2に示す統計量を持つ対数正規分布に従うと仮定する。なお、現行基準へ改正後(1982年以降)については、耐震診断が行われた住宅は、特に耐震性能が劣ると判断されたものに限られ木耐協のデータは同年代の木造住宅の分布を代表してはいないであろうという判断から、ここでは、変動係数0.24程度かつ評点が1.0を下回る確率が15%程度の対数正規分布に従うと仮定した。また愛知県内の木造住宅の平均床面積は125m²⁸⁾とする。

木造住宅が地震動により損傷を受けた場合の損傷度の指標には、文献9)に示されている損傷度指標を用いる。この指標と一般に用いられている被害尺度との関係を図4に示す。評点 x の木造住宅が大きさ v (cm/s)の地震動を受けた場合の損傷度 w は、文献9)に基づき次式のワイブル分布で評価されるものとする。

$$w = g_1(x; v) \equiv 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{\eta(x)} \right)^{m(x)} \right] \quad (1)$$

式中の $\eta(x)$ および $m(x)$ は、文献9)では x の値0.1毎ごとに与えられているが、数値解析を簡便に行うために、ここでは回帰分析により得られた次式で近似評価している。

$$\eta(x) = 241 \cdot x^{1.2} \quad (2)$$

$$m(x) = 1.16 \quad (3)$$

被害を受けた場合の損傷度 w と単位床面積(m²)当たりの損失額 z (万円)との関係は、文献10)に示されている損失額モデル(表

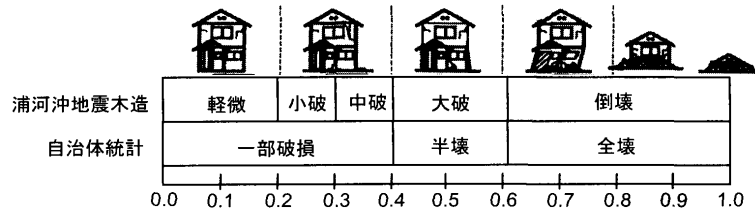


図4 損傷度指標と、被害パターンの対応関係⁹⁾

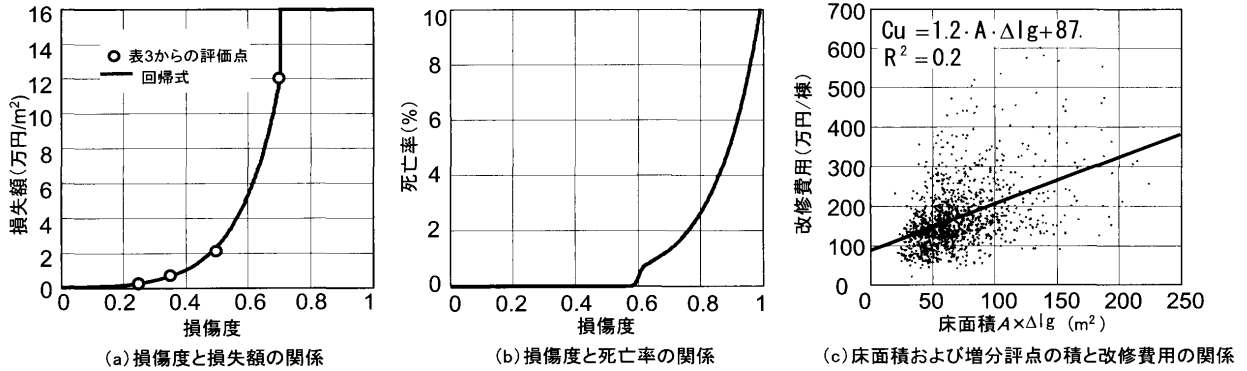


図5 リスク評価モデル

表2 木造住宅の建築年代別評点分布の確率モデル

建築年代	平均値	変動係数
I期(～1971)	0.583	0.36
II期(1972～1981)	0.706	0.45
III期(1982～)	1.31	0.24

表3 建物の損傷レベル及び損失額 (万円/m²)

損傷レベル	小破	中破	大破	倒壊
最大層間変形角	-1/200	1/100-1/50	1/50-1/20	1/20-
損失額	0.2	0.75	2.3	12.0

3参照)を基に、木造住宅の坪単価を40万円と仮定して、次式で評価する。(図5(a)参照)

$$z = g_2(w) \equiv \begin{cases} \exp\left(\frac{w - 0.384}{0.127}\right) - 0.058 & : \text{if } w < 0.7 \\ 16 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

なお、表3の損傷レベルと損傷度との対応関係は、小破=0.25, 中破=0.35, 大破=0.5, 倒壊=0.7とした。また、地震時に全壊(損傷度0.7以上)した建物については、(4)式で評価される損失額の外に、建物一棟あたり150万円の撤去費用がかかり、また、撤去された建物の5割の居住者が350万円の仮設住宅を必要とするとした。

損傷度wに至った建物内にいる人員の死亡割合(死亡率)は文献11)を基に次式で評価する。(図5(b)参照)

$$d = g_3(w) \equiv 0.0001 \cdot \exp(6.98 \cdot w) \cdot F(w; 0.6, 0.01) \quad (5)$$

なお、文献11)では、損傷度0.6以下の場合の死亡率を不連続的に0%としているが、ここでは、連続的に死亡率を評価するため、平均が0.6, 標準偏差が0.01の正規確率分布関数F(w; 0.6, 0.01)を乗じて評価している。

耐震改修費用については、愛知県内でH15年からH17年に耐震改修が行われた2階建ての建物(改修と同時にリフォームを行ったものを除く)1263棟のデータから評価した。改修費用は、床面積と増分評点ΔI_g(改修後のX, Y方向いずれか小さい方の評点と改修前のX, Y方向いずれか小さい方の評点との差)をパラメータとする建物強度の向上に関わる費用と、改修の際には絶対的に必要となる人件費等の固定費に分けられると考えられる。図5(c)は、横軸に床面積Aと増分評点ΔI_gの積、縦軸に改修費用をプロットしたものであり、図中の直線は、最小二乗法により求めた次式で表される回帰直線である。

$$C_u = 1.2 \cdot A \cdot \Delta I_g + 87 \quad (\text{万円}) \quad (6)$$

回帰直線の適合度は0.2程度と小さいが、木造住宅群としてリスク評価を行う場合、多数の木造住宅を扱っており、全体として、ばらつきが小さくなるため、平均的な改修費用としてこの回帰式を用いる。なお、個々の建物の耐震改修の費用対効果を論じる場合には、改修費用の詳細な見積もりが必要となる。

2.2 地震リスクの評価方法

j期(表2参照)に建てられた建物が、大きさV = v(cm/s)の地震動に襲われた時の損傷度Wの確率分布関数F_{W|V}(w|v; j)は、(1)式で定義されるg₁(x; v)の逆関数を用いて、次式で評価される。

$$F_{W|V}(w|v; j) = F_X\{g_1^{-1}(w; v); j\} \quad (7)$$

ここに、F_X(x; j)は、j期に建設された木造住宅の評点の確率分布関数である。

j期に建てられた建物が、大きさV = vの地震動に襲われた時の単位床面積あたりの損失額Zの確率分布関数F_{Z|V}(z|v; j)は、(4)式で定義されるg₂(w)を用いて、次式で評価される。

$$F_{Z|V}(z|v; j) = F_{W|V}(g_2(w)|v; j) \quad (8)$$

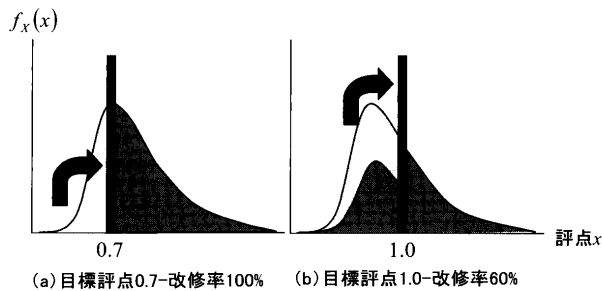


図6 改修率のイメージ

表4 3地域の建築年代の比率と地震ハザード

	I期+II期の比率	30年地動速度最大値 (市区内のメッシュの平均値)	
		平均値 (cm/s)	変動係数
豊橋市	0.55	89.3	0.36
西区	0.77	48.0	0.49
一宮市	0.64	36.5	0.49

j 期に建てられた建物が、大きさ $V = v$ の地震動に襲われた時の死亡率 D の確率分布関数 $F_{D|V}(d|v; j)$ は、(5)式で定義される $g_3(w)$ の逆関数を用いて、次式で評価される。

$$F_{D|V}(d|v; j) = F_{W|V}\{g_3^{-1}(d)|v; j\} \quad (9)$$

最後に、1kmメッシュごとの被害額の補確率分布関数（いわゆる被害額リスクカーブ） $R_Z(z)$ 、および、死亡者数の補確率分布関数（いわゆる死亡リスクカーブ） $R_D(m)$ は、次式により評価される。

$$R_Z(z) = 1 - \sum_{j=1}^3 \int_0^{\infty} F_{Z|V}(z/A_j|v; j) \cdot f_V(v) dv \quad (10)$$

$$R_D(m) = 1 - \sum_{j=1}^3 \int_0^{\infty} F_{D|V}(d/(M_j \cdot m_p)|v; j) \cdot f_V(v) dv \quad (11)$$

ここに、 $f_V(v)$ は、あるメッシュにおける地動最大速度 V (cm/s)の確率密度関数、 A_j 、 M_j は、同メッシュにおいて j 期に建設された木造住宅の床面積および居住人口である。床面積は年代別木造建物棟数に平均床面積 125m^2 を乗じたもの、居住人口はメッシュ内の全人口に j 期木造比率（ j 期の木造建物棟数を全建物棟数で除したもの）を乗じたものである。 m_p は室内人口率であり、ここでは $m_p = 0.5$ としている。

リスク評価指標には、しばしば期待値（リスクカーブと x 、 y 軸とに囲まれた部分の面積に対応）とPMLが用いられる。PML (Probable Maximum Loss) の定義には様々にあるが、ここでは、再現期間475年相当の地震動（30年超過確率6.1%）が発生した場合の損失額（損失額PML）、および、死亡者数（死亡者数PML）とする。

損失額PMLは(1)式および(4)式を用いて次式で評価される。

$$L_{PML} = \sum_{j=1}^3 A_j \int_0^{\infty} g_2(g_1(x; v_P)) \cdot f_X(x; j) dx \quad (12)$$

ここに、 v_P は30年超過確率6.1%に対応する地動速度、 $f_X(x; j)$ は j 期に建設された木造住宅の評点の確率密度関数である。

死亡者数PMLは(1)式および(5)式を用いて次式で評価される。

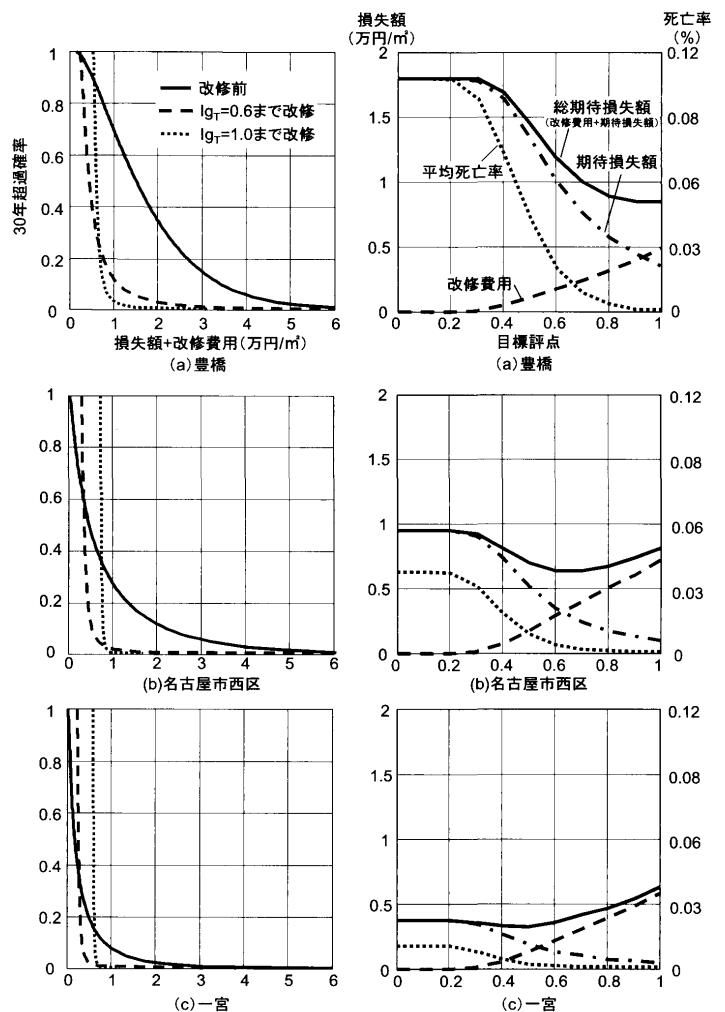


図7 地域別の損失額リスクカーブ 図8 地域別の目標評点と損失額および死亡率の低減効果

$$D_{PML} = \sum_{j=1}^3 M_j \int_0^{\infty} g_3(g_1(x; v_P)) \cdot f_X(x; j) dx \cdot m_p \quad (13)$$

3 地震ハザードおよび建築年代の地域特性を考慮した耐震化戦略

地域ごとの耐震化戦略を愛知県内の3つの市区を対象として比較検討する。ここでは、まず目標評点 Ig_T を設定し、対象とする市区内に存在する Ig_T 以下のすべての建物を、 Ig_T となるまで耐震改修する耐震化戦略(図6(a)参照)を想定し、今後30年間ににおける損失額、および、死亡率の低減効果について検討する。

3市区は地震ハザードの違いを考慮して、地震ハザードの大きい順に、豊橋市(市街地)、名古屋市西区、および、一宮市を対象とした。(図1参照) 3市区のI期とII期に建てられた木造住宅の比率と、地震ハザードを表4に示す。なおリスク評価の際には、対象とする市区内に存在する1kmメッシュごとの地震ハザードは完全相関であるとした。また、今後10年間分の改修が一度に行われたとして、建物の新築率を10年間で17%¹⁰⁾とした。その際、取り壊され新築される建物はI期およびII期の建物から無作為に抽出し、新築された建物の評点はIII期の建物と同じ分布に従うものとした。ここでは新築費用は、この戦略の改修費用には含まれていない。

リスクカーブによってリスクを表現することにより、その地域の詳細なリスク構造を把握することができる。各戦略ごとの損失額の



図9 費用対効果が最大となる目標評点

リスクカーブを図7に示す。ここでは、地域ごとのリスクの大きさを把握するために、損失額および改修費用を、市区内に存在する木造住宅床面積および居住人口で除すことにより基準化を行った。リスクカーブは、一般に、左下の方向にあるほど小さなリスクであること表している。なお、損失額のリスクカーブには、各目標評点まで改修する際に必要な改修費用が加えられており、損失額のみを考慮したリスクカーブを改修費用分だけ右方向に平行移動したものとなっている。

地震ハザードの大きい豊橋市(図7(a))では30年超過確率90%以下の領域で、評点1.0まで改修した場合のリスクカーブが、改修前のリスクカーブを下回っている。これは30年超過確率90%という非常に頻度の高い事象に対しての損失額が改修費用を上回っているといえる。一方、地震ハザードの小さい一宮市(図7(c))では、30年間で18%程度の事象に対しての損失額が改修費用を上回っている。

耐震化戦略は、具体的な評価指標に基づいて決定されるが、ここではまず、一般的によく用いられている指標であるリスクの期待値を用いる。図8は、目標評点を横軸にとり、今後30年間の地震による期待損失額、改修費用、それらの和である総期待損失額、および、平均死亡率を表したものである。ハザードの大きい豊橋市ではハザードの小さい一宮市と比べ、改修前において期待損失額は4倍程度、平均死亡率では10倍程度となっている。期待損失額の低減効果については、豊橋市では目標評点が0.8程度、一宮市では0.6程度から減り方が鈍る。総期待損失額という観点から見れば、豊橋市では、現行の目標評点である評点0.9~1.0程度とした場合、費用対効果が高い(総期待損失額が小さくなる)といえるが、一宮市では、期待損失額の低減に比べ、改修費用が大きいかさみ、期待値ベースでは目標評点を1.0にするという戦略は過剰投資であると言えよう。死亡率については、豊橋市では、目標評点0.8程度まで改修することにより大きく低減できる一方、一宮市では、目標評点0.6程度でも大きく低減される。

このような解析を愛知県内のメッシュ毎に行って得られた、費用対効果が最大となる目標評点を図9に示す。地震ハザードが大きな地域では現行の制度である目標評点1.0としても費用対効果は高いが、地震ハザードの小さな地域では、目標評点1.0とすると、改修費用が期待損失額に見合わない可能性がある。費用対効果という観点からは目標評点を一律1.0とするのではなく、地域によっては、

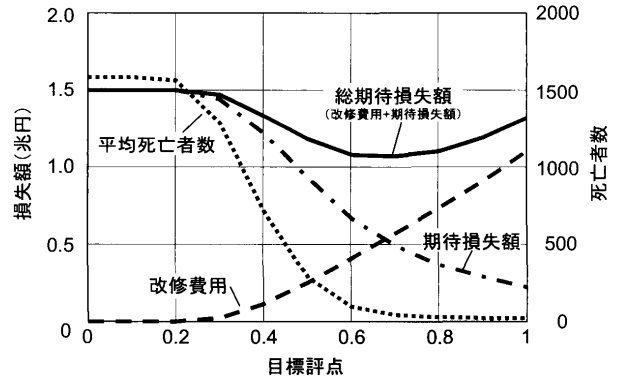


図10 愛知県全体における目標評点と損失の関係(期待値)

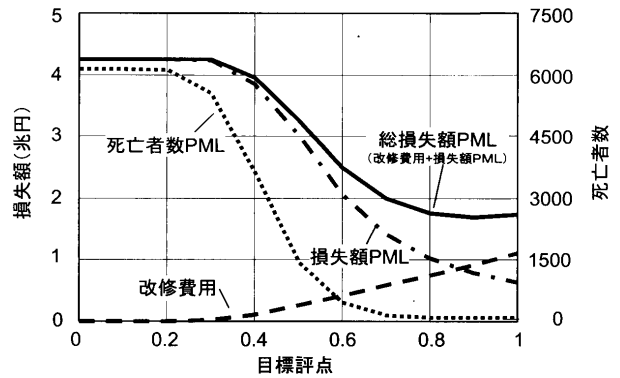


図11 愛知県全体における目標評点と損失の関係(PML)

目標評点を下げるといった対策も検討する余地がある。

4 愛知県全体の視点からの耐震化戦略

前章では、地域の特性にあった耐震化戦略について検討した。しかし、耐震改修補助制度や補助金の予算などを考慮すると、実際にはより大きな単位で、どのような耐震改修を行うかといった検討も必要であろう。本章では、愛知県全体というマクロ的視点から、実効ある耐震化戦略について検討を行う。

4.1 期待値を評価指標とする場合

図10は、目標とする評点を横軸にとり、その目標に満たない愛知県内のすべての建物を目標評点まで引きあげる戦略を考えたとき、今後30年間の地震による期待損失額、それぞれの戦略に伴う改修費用、それらの和である総期待損失額、および、平均死者数の関係を表したものである。

総改修費用は、地域毎に検討した場合と同様、目標評点が高くなるに従い、やや加速度的に大きくなる一方、期待損失額や平均死者数の減り方は鈍る。総期待損失額という観点から見れば、県全体では1.0ではなく、0.7程度が費用対効果が高い目標評点といえる。また、死亡率の観点からも、県全体で目標評点0.6~0.7程度とすることで、大きく低減することができるといえる。

4.2 PMLを評価指標とする場合

これまで、期待値を指標としてリスク評価を行ってきたが、耐震化戦略の判断基準は期待値の低減だけでなく、発生確率の小さな事

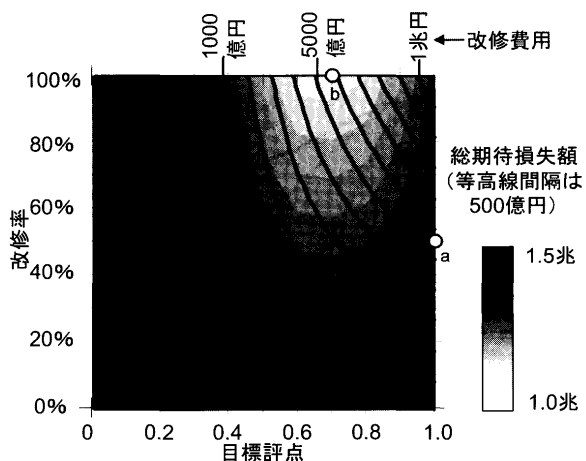


図12 目標評点および改修率と総期待損失額の関係

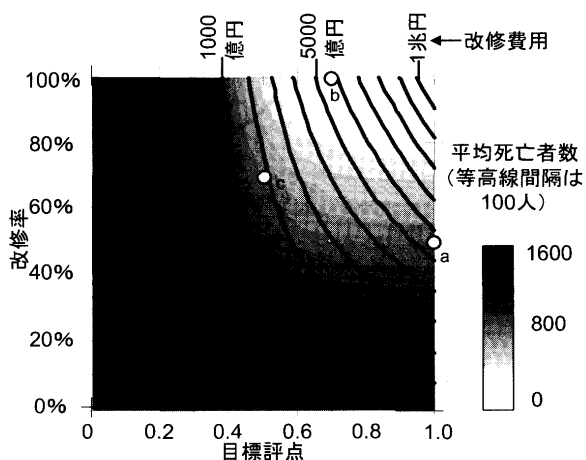


図13 目標評点および改修率と平均死者数の関係

象(例えば直下型地震)に対して被害を最小限に抑えるといった検討も重要である。ここでは、PML(再現期間475年相当の地震動が発生した場合の損失)を評価指標として検討を行う。

なお、本来は、地震動の空間的相関を考慮すべきではあるが¹³⁾、ここでは、各メッシュ間の地震ハザードが完全相関であるとして、愛知県全体のPMLの評価を行った。この場合、すべてのメッシュで同時にPMLとなることはないであろうから、本来のPMLよりも過大評価となるが、この点は、今後の検討課題である。

図11は、目標評点と改修費用、損失額PML、それらの和である総損失額PML、および、死者数PMLを表したものである。どの目標評点においても、期待値と比べ、損失額PMLおよび死者数PMLは2~3倍程度となっている。これは、PMLは万が一の巨大な地震動が発生した場合の損失を示す指標であるためである。総損失額PMLの観点からは、期待値を評価指標とした場合と比べ、相対的に損失額PMLに対して改修費用の割合が小さくなるため、目標評点を0.8から1.0程度とした方が費用対効果が高いといえる。一方、死者数については目標評点と低減率との関係は、PML、期待値とも大差なく、死者数PMLは期待値を評価指標とした場合と同様に、目標評点0.6~0.7程度とすることで、大きく低減することができるといえる。

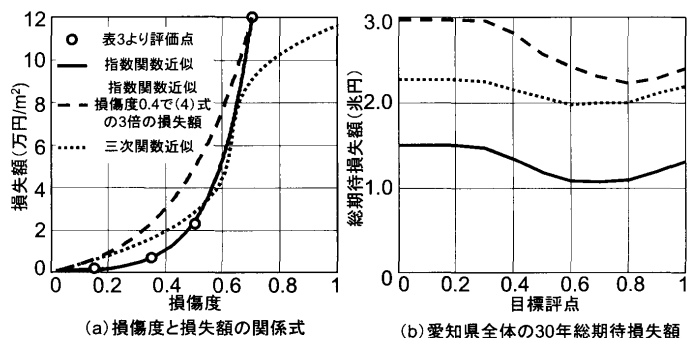


図14 損失額曲線の感度解析

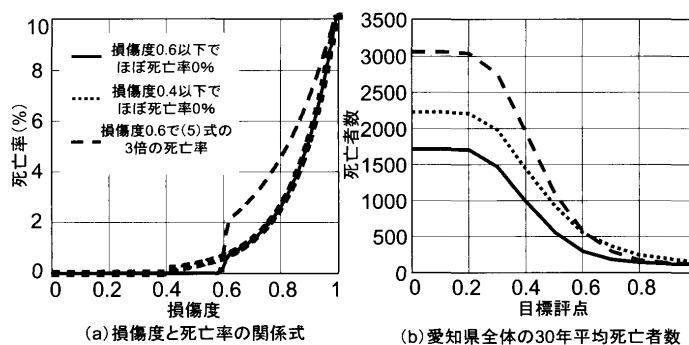


図15 死亡率曲線の感度解析

4.3 改修率を考慮した耐震化戦略

4.1, 4.2節では、目標に満たない「すべての」建物を、目標評点まで引き上げることを想定しているが、実現は難しいと考えられる。また、社会全体の観点から、同じ改修費用ならば、出来るだけ効果的な戦略を実施するというのも、資金の有効活用といった観点から重要である。図12, 図13は、それぞれ目標評点と改修率の関数として、愛知県全体における総期待損失額の等高線と、平均死者数の等高線を描いたものである。ここでは、目標評点以下の建物のみを、ちょうど目標評点まで引き上げる改修を行うとしており、改修率とは、目標評点まで引き上げた建物棟数を、目標評点以下の全建物棟数で除したものとする(図6(b)参照)。同図には、改修費用の等高線も併せて示してある。なお、改修率100%の断面は図10に対応する。

図12より、中央防災会議で定められた耐震化率を70%から90%にする目標(すなわち、新築率を10年で17%を考慮すると既存不適格建物の50%を評点1.0まで改修(同図中a))を進めた場合、愛知県全体で改修費用が約5500億円必要となる。この場合、総期待損失額が1.4兆円程度であるのに対して、目標評点を0.7とした場合は、おおよそ同じ改修費用で100%まで改修でき(同図中b)、その場合の総期待損失額は1兆円程度である。すなわち、0.7まで100%改修した場合の方が経済的損失に対して費用対効果が高いといえる。

図13より1.0まで50%改修する場合(同図中a)は、平均死者数が800人程度に減少するのに対して、0.7まで100%改修した場合(同図中b)は100人程度にまで低減できており、死者数の観点からも0.7まで100%改修した場合の方が、低減効果が高いことを示している。また、1.0まで50%改修する場合と0.5まで70%改修した場

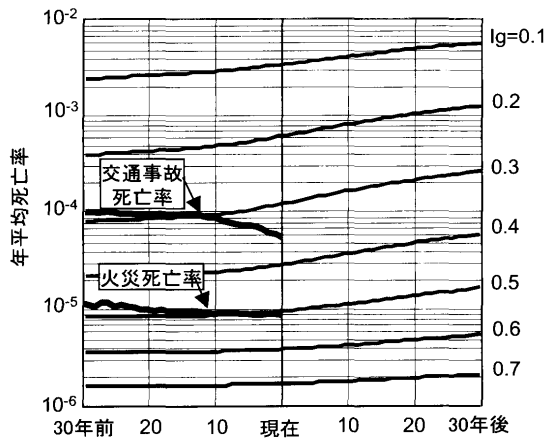


図16 名古屋市西区における評点別死亡率の変化

合(同図中c)は平均死者数が800人程度と同じ低減効果が得られるが、後者の方が、改修費用は2000億円程度と約1/3額で実行できることがわかる。

また、図13では、死者数の期待値の等高線が、目標評点が0.4以下では目標評点の軸に対してほぼ直交しており、また0.7以上ではほぼ平行である。このことから、評点0.4以下の耐震性の低い建物の多い地区では、少しでも多くの建物を評点0.4以上程度にあげるべきであり、評点の高い建物が多い地区では、評点を上げることよりも、低い評点の建物を少しでも減らすことが、効果的な耐震化戦略につながるということを示している。

4.4 感度解析

本節では、確定的な関係として取り扱った損傷度と損失額の関係、および、損傷度と死亡率の関係について感度解析を行い、解析モデルの違いが耐震化戦略の選択にどの程度の影響を及ぼすか検討を行う。なお、地震ハザードについてはその評価誤差が不確実性として既にモデルに組み込まれていること、また、推本によるハザードが既に多くの研究や行政の政策に用いられていることから感度解析の対象としない。

損傷度と損失額の関係について、図14(a)に示すような3つの関数を用いて感度解析を行った。3つの関数は、(4)式を基準に、損傷度0.4で(4)式の3倍の損失額となるようにした指数関数、および、損傷度0で損失額0、損傷度1で全損とし、その間を三次関数で近似したものである。また、それぞれの関数を用いて算定した、愛知県全体の目標評点と総期待損失額の関係と同図(b)に示す。損傷度-損失額モデルを変化させることにより、総期待損失額は大きく変化するものの、いずれの場合も目標評点を1.0とすることは費用対効果が高い戦略であるとはいえない。

損傷度と死亡率の関係については、図15(a)に示すような3つの関数を用いて感度解析を行った。3つの関数は、(5)式を基準に、損傷度0.4で死亡率がほぼ0となる関数、および、損傷度0.6で(5)式の3倍の死亡率となる関数とした。また、それぞれの関数を用いて算定した、愛知県全体の目標評点と平均死者数の関係と同図(b)に示す。損失額の場合と同様、死者数は大きく変化するものの、目標評点を0.6から0.7程度にすることによりいずれの場合も死者数が大きく低減できるといえる。

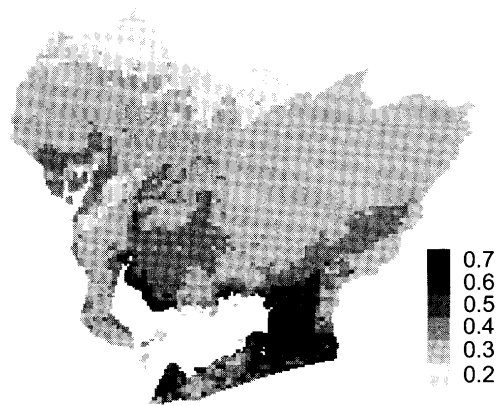


図17 交通事故死亡率と同程度である評点



図18 建物火災死亡率と同程度である評点

5 個人の視点に立った耐震化促進のためのリスク情報

耐震化を進めるためには、行政が的確に現状の地震リスクを把握し、効果的な耐震化戦略を実行することが重要である。しかし、実際に耐震改修費用の大部分を負担するのは建物所有者自身であり、改修をするか否か、するならばどの程度まで改修するかといった判断を適切にするためには、建物所有者側が現在の地震リスクがどの程度であるかを把握することが重要である。ここでは、個人の視点に立った耐震化促進のためのリスク情報の一つとして、地域別・評点別の平均死亡率を算定し、建物所有者がどの程度のリスクに曝されているのかを示す。また、耐震改修の際の費用対効果や死亡率低減効果が把握できるような意思決定支援ツールを検討する。

評点別期待損失額 $M(x)$ は、(1)式、(4)式で定義される $g_1(x; v)$ 、 $g_2(w)$ を用いて次式により評価することができる。

$$M(x) = \int_0^{\infty} g_2(g_1(x; v)) \cdot f_V(v) dv \quad (14)$$

評点別平均死亡率 $D_p(x)$ は、(1)式、(5)式で定義される $g_1(x; v)$ 、 $g_3(w)$ を用いて次式により評価することができる。

$$D_p(x) = \int_0^{\infty} g_3(g_1(x; v)) \cdot f_V(v) dv \cdot m_p \quad (15)$$

図16に30年前から30年後までの名古屋市西区(区役所が存在するメッシュ)における評点別の年当たりの死亡率を示す。リスクの大きさを的確に伝えることは難しいが、身近なリスクである交通事故死亡率や火災死亡率を比較対象とすると理解しやすいであろう。同図には、30年前から現在までの交通事故による死亡率および建

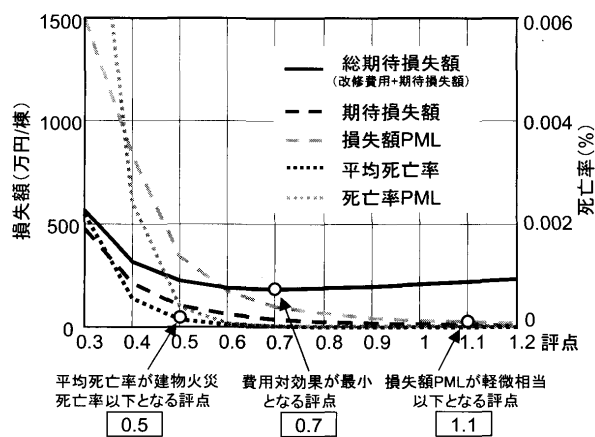


図19 西区における評点0.3の建物の意思決定支援ツール

物火災による死亡率をあわせて示してある。地震による死亡率は、評点0.1, 0.3, 0.5と大きくなるに従ってそれぞれ10分の1程度となり、耐震改修の効果を読み取ることができる。ただし、南海、東南海、東海地震の発生確率が今後大きくなっていくため、死亡率は次第に増加していき、評点0.4では現在の地震による死亡率は、交通事故死亡率よりも大きく下回っているものの、30年後では交通事故死亡率と同程度となっている。

図17に2008年において、地震で命を失う可能性が交通事故で命を失う可能性と同程度である木造住宅の評点マップ、図18に火災により命を失う可能性と同程度である評点マップを示す。地震ハザードの大きい豊橋市では評点0.5以下の建物の倒壊による死亡率は交通事故死亡率より大きく、また評点0.7以下の建物は、建物の倒壊による死亡率は火災死亡率よりも大きいことがわかる。

図19に、名古屋市西区(区役所が存在するメッシュ)において、診断値0.3の建物(延べ床面積125m²)について、改修後の評点と、今後30年間での期待損失額、改修費用と期待損失額の和である総期待損失額、損失額PML、平均死亡率、および、死亡率PMLを示す。同図中には、安全性の目安を満足するための評点を併せて示す。総期待損失額最小を判断基準とする場合には、目標評点を0.7程度に、損失額PMLを2000円/m²(軽微に相当)以下にとどめたいと考えるなら、目標評点を1.1程度とするとよいことがわかる。また、生命を守ることを考える場合は平均死亡率が火災死亡率以下となる目標評点0.5、あるいは平均値ではなく、極めて稀な事象を対象とした死亡率PMLが判断基準となろう。このようなリスク情報は、個人の価値観にあわせた耐震改修をするための判断材料の一つとなる。

6 まとめ

本稿ではまず、行政の視点から既存不適格木造住宅の耐震改修を効率的に推進することを目的として、地域別の耐震化戦略について検討した。その結果、現在の制度のような、目標評点を一律1.0とするのではなく、地域によっては、目標評点を下げるといった対策も検討する余地があることを示した。また、愛知県全体の視点からは、目標評点を0.7程度としても、死亡率は大きく低減し、費用対効果も高いことを示した。すなわち、実効ある耐震改修を効率的に推進していくためには、現行の耐震基準にとらわれず、たとえ評

点が0.7程度であっても、少しでも多くの建物の改修をすることが重要であり、この水準への改修にも経済的支援を行う制度が実現されれば、さらなる後押しとなる。本稿の解析結果は、このような制度実現の理論的裏づけとなるものである。このような制度が実現されれば、個々の建物の改修費用も低く抑えることができることから、耐震改修への敷居が従来よりも低くなり、多くの建物が耐震改修されることが期待される。なお、目標評点を0.7として改修を行う場合には、生命を守ることが第一の目的であり、大地震の際には倒壊しないまでも大きな被害を受けることを建築主に説明する必要があることは言うまでもない。さらに、ハザードが高い地域では、より高い目標評点が望まれていることに注意しなければならない。

建物所有者の視点から、どの程度の地震リスクに曝されているのかを示し、評点別平均死亡率という具体的な情報を示した。このような情報は、耐震改修の際にどの程度まで改修をするのかといった、意思決定支援ツールとして役立つことができよう。

参考文献

- 1) 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
- 2) 吉村美保, 目黒公郎: 公的費用の低減効果に着目した木造住宅耐震補強助成制度の評価, 地域安全学会論文集, No.7, pp.247-254, 2002.11
- 3) 中嶋唯貴: 死者軽減を主目標とした在来軸組木造建築の耐震補強レベルの導入—基本関係式と愛知県における試算—, 地域安全学会論文集, No.4, pp.9-14, 2002.11
- 4) 井戸田秀樹, 嶺岡慎悟, 梅村恒, 森保宏: 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), 日本建築学会構造系論文集, 第612号, pp.125-132, 2007.2
- 5) 地震調査研究推進本部. "全国を概観した地震動予測地図". (オンライン), 入手先(<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>), (参照2006-04-01).
- 6) 森保宏, 橋本善和, 渡邊豊和: 地震の活動履歴とモデルの不確定性を考慮した地震危険度の解析的評価, 日本建築学会構造系論文集, 第569号, pp.15-22, 2003.7
- 7) 日本木造住宅耐震補強事業者共同組合. "木造住宅耐震診断調査データ". (オンライン), 入手先(<http://www.mokutaikeyo.com/date/index>), (参照2005-10-01).
- 8) 愛知県 県民生活部 統計課. "愛知県の住宅・土地住宅・土地統計調査結果2003". (オンライン), 入手先(<http://www.pref.aichi.jp/toukei/>), (参照2005-10-01).
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 田畑直樹, 岡田成幸: 地震時の建物破壊に伴う死者数推定に関する研究, その1 簡易手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造B-2分冊, pp.617-618, 2005.9
- 12) 愛知県 建設部 建築指導課. "H18年度建築住宅着工統計". (オンライン), 入手先(http://www.pref.aichi.jp/kenchiku_shido/6/kenchiku3.htm), (参照2006-04-01).
- 13) 高田毅士, 下村哲人: 台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性, 日本建築学会構造系論文集, 第565号, pp.41-48, 2003.3

(2008年1月10日原稿受理, 2008年7月15日採用決定)