耐久性や劣化状況を考慮した木造住宅の地震リスク評価

SEISMIC RISK EVALUATION OF WOODEN HOUSE CONSIDERING DURABILITY AND DETERIORATION

更谷 安紀子*, 長谷部 裕**, 水谷 友紀***, 林 康裕****

*Akiko SARATANI, Yu HASEBE, Yuki MIZUTANI
and Yasuhiro HAYASHI*

It is indispensable to consider durability and deterioration of a wooden house to inspect of the effectiveness of anti-earthquake measures for a big earthquake to occur dozens of years later, to investigate necessity of maintenance to make an building of high performance for long life, to draft of the earthquake disaster prevention measures that considered the outbreak time of an earthquake. Therefore this paper describes the seismic risk evaluation technique based on results of seismic, durability and deterioration diagnoses so that can consider aging deterioration of wooden house. Also, The technique will motivate residents to implement an effective earthquake countermeasure for their houses.

Keywords: *Wooden house, Seismic risk evaluation, Cost effectiveness, Aging deterioration, Durability diagnosis, Deterioration diagnosis*

木造住宅, 地震リスク評価, 費用対効果, 経年劣化, 耐久性診断, 劣化診断

1. 序論

日本の大都市を直撃した1995年兵庫県南部地震では、木造住宅の倒壊によって多くの人命が失われた。以降、2004年新潟県中越地震などM7級の直下型地震が各地で頻発しており、近年では、南海・東南海・東海地震や宮城県沖地震といった巨大海溝型地震の発生が確実視されている。こうした大地震により再び甚大な被害の発生が想定される木造住宅への耐震対策の実施は、人命の安全性確保に不可欠である。しかし、想定被災地域においても地震防災対策は十分に進んでいるとは言えず¹⁾、住宅所有者が、想定地震において被る自家の損失や耐震対策の費用対効果を十分に認識できないことも大きな要因であるとされている²⁾。我々、建築技術者は、これらの情報を建物戸別の現状に応じて定量的に示し、住宅所有者へ提供していくことが必要であると考える。

筆者らはこれまでに、1995年兵庫県南部地震と2000年鳥取県西部地震での建築年代別被害率に基づき、経年劣化が木造住宅の耐震性能へ及ぼす影響を考慮可能な地震損傷度予測手法を提案した³⁾。例えば、兵庫県南部地震発生以降に建設された木造住宅であっても、現在築15年程度が経過している。適切に維持管理されていなければ、蟻害や腐朽などにより耐震性能が大幅に低下し、地震被害が増大する可能性もある。既報においても、木造住宅の地震被害予測において、建設年代ではなく築年数に応じた現状(耐久性、劣化状況)を反映することは非常に重要であると指摘している。しかし、現在、これら戸別の現状を考慮した地震損傷度予測手法、地震

リスク評価手法は存在しない。

既往の研究においても、耐震診断評点に基づく地震リスク評価により、地域や地盤条件に応じた適正な補強費用を試算する手法⁴⁾⁵⁾などが提案されているが、建物の耐震性以外を考慮した地震損失や費用対効果の検討事例は少ない。また、公的資金導入など制度立案につながる耐震補強推進策に関する研究や⁶⁾、既存木造住宅の建設年代と地震発生確率を考慮した耐震補強の費用対効果検討方法⁷⁾なども提案されているが、これらは、建物一棟一棟の耐久性や劣化状況を考慮した手法ではない。

こうした背景を踏まえ、本研究では、住宅所有者へ戸別の現状に応じた適切な耐震対策の実施を促すための方法論構築を目的とし、耐震性のみならず一棟一棟の耐久性や劣化状況を反映可能な地震リスク評価手法を提案する。本論文では、まず第2章において、限界耐力計算に基づく耐震診断と耐久性診断、劣化診断の結果を踏まえた個別木造住宅の地震損傷度評価手法を提案する。そして、第3章では、木造住宅の経年劣化と地域の地震環境や地震発生時期の経年変化を考慮した地震リスク評価手法を構築し、地震対策を検討可能な総支出に関する費用対効果指標を提案する。最後に、第4章では、地震危険度の比較的高い地域(高知市)に着目し、建物の耐震性や耐久性、劣化状況、さらに、被災後の修復方法の意思決定が地震リスク評価結果に及ぼす影響について感度解析を行う。そして、耐震補強や維持管理の費用対効果を検討し、対象地域に求められる適切な地震防災対策について言及する。

* 大和ハウス工業(株)総合技術研究所 工修

** (株)大林組 工修

(元 京都大学 大学院生)

*** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

**** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Central Research Laboratory, Daiwa House Industry Co., Ltd., M. Eng.
Obayashi Corporation, M. Eng.

(Former Grad. Student of Kyoto University)

Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Engrg., Kyoto University

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engrg., Kyoto University, Dr. Eng.

2. 耐震性, 耐久性, 劣化状況を考慮した地震損傷度評価手法

本章では、木造住宅の耐久性診断や劣化診断、耐震診断の結果に基づき、戸別の耐用年数や劣化度を反映可能な地震損傷度評価手法を提案する。図1には、次章で述べる地震リスク評価手法を含めた評価フローを示す。

2.1 耐久性診断結果に基づく評価

木造住宅は経年劣化により耐力および、変形性能の低下などが想定されるが、ここでは簡単のために、既報³⁾と同じく、変形性能のみ低下すると仮定して評価を行っている。

まず、築年数 τ による経年劣化を考慮した木造住宅の損傷確率曲線は、最大応答変形角 R を用いて[1]式で表される。

$$P_{fR}(R, \tau) = \Phi[\{\ln(R) - \ln(R_m(\tau))\} / \zeta_R] \quad [1]$$

Φ は標準正規分布関数、 $R_m(\tau)$ は中央値($\ln(R_m) = \lambda_R : \lambda_R$ は $\ln(R)$ の平均値)、 ζ_R は $\ln(R)$ の標準偏差である。 $R_m(\tau)$ は木造住宅の変形性能を表していると言える。新築時の中央値 R_m を $R_{m0}(=R_m(0))$ 、 R_{m0} の低減係数を $d(\tau)$ とすると、築年数 τ により低下した変形性能 $R_m(\tau)$ は次式で表される。

$$R_m(\tau) = R_{m0} \cdot d(\tau) \quad [2]$$

図1 建物診断と地震損傷度評価、地震リスク評価のフロー

[2]式の築年数 τ と変形性能 R_m の関係を「経年劣化曲線」と呼ぶ。

次に、変形性能 R_m の低減係数 $d(\tau)$ は、木造住宅の耐久性診断により推定される耐用年数 $\beta\tau_0$ を用い、次式で表される。

$$d(\tau) = \max\{\exp\{\ln(0.5) \cdot (\tau / \beta\tau_0)^2\}, 0.5\} \quad [3]$$

図2に示すように、耐用年数 $\beta\tau_0$ は、新築時から変形性能の下限値に達するまでの期間と言い換えることができる。

ここで、耐用年数 $\beta\tau_0$ の算定には、木造住宅の耐久設計指針⁸⁾を参考にした。まず、建物平面を水回りと水回り以外の2つに区分し、表1に示す計算式を用い、耐久性能値 P 、構法級別係数 B 、施工検査級別係数 C 、劣化外力係数 D 、維持保全係数 M を算定する。そして、[4]式と、水回りの有無による床面積の重み付き平均により、維持保全を考慮しない耐用年数 τ_0 が求められる。

$$\tau_0 = 30 \cdot (P \cdot B \cdot C \cdot D) \quad [4]$$

さらに、維持保全による割り増し係数 β は、[5]式より求められ、維持管理効果を含めた耐用年数 $\beta\tau_0$ が推定できる。

$$\beta = (P \cdot B \cdot C \cdot D + M) / (P \cdot B \cdot C \cdot D) \quad [5]$$

ここで、神戸市と鳥取県日野町の既存木造住宅を想定した耐用年数は、それぞれ $\beta\tau_0 = 33$ 年、 $\beta\tau_0 = 108$ 年となる³⁾。また、 $\zeta_R = 0.4$ 、新築時の変形性能を $R_{m0(全壊)} = 0.1$ 、 $R_{m0(半壊)} = R_{m0(全壊)} / 2$ とすると、木造住宅の経年劣化曲線 $R_m(\tau)$ は、1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震における建築年代別被害率より逆算した変形性能の経年劣化と概ね整合する。そこで、以降の検討においてもこの条件を用いることとする。

2.2 劣化診断結果を踏まえた地震損傷度の再評価

[4]式および、[5]式より算定される耐用年数 $\beta\tau_0$ は、新築時の木造住宅の耐久性能と維持管理状況により算定される推定値である。つまり、耐用年数 $\beta\tau_0$ に基づく経年劣化曲線 $R_m(\tau)$ により推定される変形性能 R_m の低下度合いは、築年数 τ が経過したときの実際の劣化状況とは異なる場合もあると言える。

そこで、劣化診断により現時点での劣化度を判定し、前節の地震損傷度評価に考慮する手順を以下に示す。

- 1) 現在、築 τ_1 年の木造住宅に劣化診断(劣化度の分割数 n)を実施する。
- 2) 劣化度 l を判定する。ただし、 $0 \leq l \leq n$ を満たし、 $l=0$ のとき

表1 耐用年数推定に用いる係数と計算式⁸⁾

名称	係数	計算式	要因	係数	最小値	最大値
耐久性能値	P	$P = P_1 + P_2 + P_3$	使用構造部材の樹種	P_1	0.50	1.40
			部材断面の大きさ	P_2	0.00	0.60
			保存薬剤処理	P_3	0.00	1.50
構法級別係数	B	$B = (B_{11} + B_{12}) / 2$ または $B = (B_{11} + B_{12} + B_{13}) / 3$	木材への水分・湿分作用	B_{11}	0.60	1.30
			水分・湿分の屋外排出	B_{12}	0.60	2.00
			防水下地による効果	B_{13}	0.80	1.20
施工検査級別係数	C		検査項目・検査対象		0.60	1.20
劣化外力係数	D	$D = \{(D_{11} + D_{12}) / 2\} \times D_2$	シロアリの分布・地域区分	D_{11}	0.80	1.00
			腐朽菌の生育温度	D_{12}	0.80	1.20
			劣化因子への水分供給状態	D_2	0.40	2.00
維持保全係数	M	$M_1 = \{(P.S.P. - 1) - 0.3\} \times M_{11}$ $M_2 = P_3 \times M_{21} \times M_{22}$ $M = M_1 + M_2$	点検箇所数・点検周期	M_{11}	-0.50	0.30
			薬剤の再処理	M_{21}	0.00	1.00
			維持難易の度合い	M_{22}	0.70	1.00

劣化していない新築時と同等の状態を表し、 $l = n$ のとき劣化が下限値まで達している状態を表す。

- 3) 1), 2)より、劣化診断実施時点(現時点)での変形性能 R_m の低減係数 d_0 は、[6]式で表される。

$$d_0 = 0.5 + 0.5 \cdot (n - l) / n \quad [6]$$

なお、本論文では、劣化診断方法と劣化度の耐震性能への反映方法については言及せず、劣化度の分割数を $n=2$ (劣化度を3段階に設定)と仮定して以降の検討を行う。

- 4) d_0 を[3]式の左辺に代入することにより、以下の式を満たす τ_d を「建物劣化年齢」とする。

$$\tau_d = \beta\tau_0 \cdot \sqrt{\ln(d_0)/\ln(0.5)} \quad [7]$$

ここで、建物劣化年齢 τ_d は耐用年数 $\beta\tau_0$ に関する指標であるため、築年数 τ によらず、 $\beta\tau_0$ を超えない。

- 5) 以上より、劣化診断結果を踏まえた築年数 τ と変形性能 R_m の関係は、図3に示すように[8]式で再評価される。

なお、新築時は $\tau_1 = \tau_d = 0$ である。

$$R_m(\tau) = R_{m0} \cdot d(\tau - \tau_1 + \tau_d) \quad \text{ただし、}\tau > \tau_1 \quad [8]$$

劣化度の評価方法については、外観調査や柱・床傾斜の測定などからなる具体的な劣化診断方法(例えば9)や、修繕・改修の動機や目的に応じた調査の方法(例えば10)が既往の研究成果により提案されている。これら劣化診断方法を発展させ、劣化度を定量的に耐震性能へ反映する枠組みを構築していくことが今後の課題となる。

2.3 耐震診断結果の反映方法

最後に、耐震診断より算定される耐力に基づいて損傷確率を評価するため、応答スペクトル法を用いて導出された最大地動速度 v に対する損傷確率曲線を示す¹¹⁾。

$$P_{fv}(v, \tau) = \Phi[\{\ln(v) - \ln(v_0(\tau))\} / \zeta_v(\tau)] \quad [9]$$

$$\text{中央値} \quad v_0(\tau) = [\{2500 \text{ g } H_e C_y / \mu (F_h(R_m(\tau)))^2 \cdot R_m(\tau)\}]^{1/2}$$

$$\text{標準偏差} \quad \zeta_v(\tau) = \zeta_R / 2 + \ln\{F_h(R_m(\tau)) / e^{\zeta_R} / F_h(R_m(\tau))\}$$

ここで、 $H_e, C_y, \mu, F_h(R)$ は、木造住宅の等価高さ、降伏せん断力係数(耐力)、有効質量比、加速度応答スペクトル低減率であり、建物の耐震診断結果¹²⁾から得られる値を用いる。

なお、経年劣化曲線 $R_m(\tau)$ は、[9]式中の最大地動速度の中央値 $v_0(\tau)$ に反映されており、耐久性診断、劣化診断、耐震診断の結果

を踏まえた地震損傷度評価が構築された。

3. 地震リスク評価手法

本章では、前章で述べた地震損傷度評価手法を踏まえ、木造住宅の耐震性能(変形性能)と地震発生確率の経年変化を考慮可能な地震リスク評価手法を提案する。

3.1 平均地震損失率

はじめに、前章で示した木造住宅の時間に関する変数と地震活動の時間に関する変数について、表2に示す。

まず、[9]式で表される損傷確率曲線 $P_{fv}(v, \tau)$ と、各損傷レベルに対する損失 L を用い、築 τ 年に地震が発生した場合の、初期建設費 A_0 に対する地震損失率 $L_{fv}(v, \tau)$ を推定する。ここでは、損傷レベルを全壊、半壊の二段階としたため、 $L_{fv}(v, \tau)$ は[10]式で表される。

$$L_{fv}(v, \tau) = \{P_{fv(\text{全壊})}(v, \tau) \cdot L_{(\text{全壊})} + (P_{fv(\text{半壊})}(v, \tau) - P_{fv(\text{全壊})}(v, \tau)) \cdot L_{(\text{半壊})}\} / A_0 \quad [10]$$

各損傷レベルに対する損失 L は、全壊の場合、建物の再建築費用(もしくは補修費用)を考え、半壊時は、建物の補修費用とした。それぞれ初期建設費用の $x_{(\text{全壊})}$ 倍、 $x_{(\text{半壊})}$ 倍と設定すると、損失 $L_{(\text{全壊})}$ 、 $L_{(\text{半壊})}$ は以下のように表すことができる。

$$L_{(\text{全壊})} = x_{(\text{全壊})} \cdot A_0 \quad [11]$$

$$L_{(\text{半壊})} = x_{(\text{半壊})} \cdot A_0$$

なお、以降の検討では、全壊の場合は建替え、半壊の場合は補修して住み続けることを想定し、 $x_{(\text{全壊})}=1$ 、 $x_{(\text{半壊})}=1/3$ とする。

次に、現在、築 τ_1 年である木造住宅について、現時点からの使用期間 t_0 中の平均地震損失率 $L_f(v, t_0)$ を、以下のように設定する。

表2 時間に関する変数

分類	係数	説明
木造住宅	τ	新築時からの築年数
	τ_1	現時点での築年数
	τ_d	建物劣化年齢
	τ_0	維持保全を考慮しない耐用年数
	$\beta\tau_0$	耐用年数
	t_0	現時点からの使用期間
地震活動	T_0	地震発生確率の評価期間

図2 耐用年数と経年劣化曲線

図3 劣化診断結果を踏まえた経年劣化曲線

図4 使用期間中の平均地震損失率

$$L_f(v, t_0) = \left(\int_{\tau_1}^{\tau_1+t_0} L_{f\tau}(v, \tau) d\tau \right) / t_0 \quad [12]$$

[12]式は、図4に示すように、使用期間 t_0 中の各年における地震損失率 $L_{f\tau}(v, \tau)$ を使用期間 t_0 で平均した値となっている。

ここで、2階建てを想定した等価高さ $H_e=4.5\text{m}$ で1次固有モードが直線の等価1質点系でモデル化される木造住宅を新築すると仮定し、耐力(降伏せん断力係数 C_y)や耐用年数 $\beta\tau_0$ による使用期間 t_0 中の平均地震損失率 $L_f(v, t_0)$ を比較する。図5より、耐力によって、使用期間に関わらず平均地震損失率は大きく異なることが分かる。一方、図6より、耐用年数による平均地震損失率の変化は、耐力によらず比較的小さいことが分かる。また、図7より、耐震性能の経年劣化の影響により、使用期間の長い方が平均地震損失率は大きくなる。ことが分かる。

3.2 地震ハザード評価

本論文での地震ハザード評価は、地震調査研究推進本部の評価手法(2006年度版)を踏襲する¹³⁾。

地域の地震危険度を表す地震ハザード曲線 $P(V>v; T_0)$ は、建物立地地点の周辺で発生する地震(あるいは地震群)により T_0 年間に少なくとも1回、地震動(最大地動速度を表す) V が v を超える確率を表し、工学的基盤上での評価結果に地表までの増幅度を考慮して求める。そして、全国各地に存在する地震発生源 k による地震動の超過確率 $P_k(V>v; T_0)$ を用いて、以下の式で求められる。

$$P(V>v; T_0) = 1 - \prod_k \{1 - P_k(V>v; T_0)\} \quad [13]$$

ここで、震源 k による地震動の超過確率 $P_k(V>v; T_0)$ は、地震の発

生が定常ポアソン過程でモデル化される場合は、

$$P_k(V>v; T_0) = 1 - \exp(-N_k(V>v) \cdot T_0) \quad [14]$$

となる。 $N_k(V>v)$ は、 k 番目の地震によって地震動 V が v を超える年あたりの頻度で、以下の式で表される。

$$N_k(V>v) = N(E_k) \cdot P(V>v|E_k) \quad [15]$$

なお、 $N(E_k)$ は地震 k の年あたりの発生頻度である。 $P(V>v|E_k)$ は地震 k が1度発生した条件下で地震動 V が v を超える条件付確率であり、工学的基盤上の距離減衰式¹⁴⁾より算定される最大速度を中央値とし、ばらつきをを考慮して表される対数正規分布関数より設定される。

一方、非定常な地震活動モデルに基づき地震発生確率がBPT分布¹⁵⁾でモデル化される場合、震源 k による地震動の超過確率 $P_k(V>v; T_0)$ は、期間 T_0 の間に1回地震が発生する確率 $P(E_k; T_0)$ と $P(V>v|E_k)$ を用いて、

$$P_k(V>v; T_0) = P(E_k; T_0) \cdot P(V>v|E_k) \quad [16]$$

で表される。なお、ここでは、期間 T_0 中に複数回の地震が発生する確率は考慮していない。

そして、地震ハザード曲線 $P(V>v; T_0)$ を最大地動速度 v で微分することにより、 v の確率密度関数 $f_v(v, T_0)$ が求まる。

$$f_v(v, T_0) = -dP(V>v; T_0) / dv \quad [17]$$

3.3 地震損失期待値と地震対策の費用対効果指標

最後に、3.1節、3.2節を踏まえ、木造住宅の使用期間中の地震損失期待値と、地震対策を評価可能な費用対効果指標(総支出低減)

(a) 新築時($t_0=0$)

(b) 使用期間 50 年($t_0=50$)

図7 使用期間 t_0 による平均地震損失率の違い

(a) $C_y=0.1$

(b) $C_y=0.3$

図6 耐用年数 $\beta\tau_0$ による平均地震損失率の違い

図8 地震ハザード曲線(高知市)

を提案する。

まず、最大地動速度 v の確率密度関数 $f_v(v, T_0)$ に、平均地震損失率 $L_f(v, t_0)$ を乗じることにより、以下の式で表される使用期間 t_0 における地震リスク密度関数 $r(v, t_0)$ を求める。ここで、 $T_0 = t_0$ となる。

$$r(v, t_0) = L_f(v, t_0) \cdot f_v(v, t_0) \quad [18]$$

そして、地震被害額の期待値関数である地震損失期待値 $LE(t_0)$ は、[18] 式を最大地動速度 v で積分することにより [19] 式のように求められる。

$$LE(t_0) = \int_0^\infty (L_f(v, t_0) \cdot f_v(v, t_0)) dv \quad [19]$$

また、使用期間 t_0 中の損失低減 $LDE(t_0)$ は、地震対策実施前後の地震損失期待値 $LE_b(t_0)$, $LE_a(t_0)$ を用いて以下の式で表される。

$$LDE(t_0) = LE_b(t_0) - LE_a(t_0) \quad [20]$$

さらに、総支出低減 $RPC(t_0)$ は、耐震補強や維持管理などの平常時支出(地震対策費用)と、地震時支出(地震損失期待値)からなる建物の総支出 $TC(t_0)$ について、地震対策前後($TC_b(t_0)$, $TC_a(t_0)$)の差を表したものである。現時点から j 年目の初期建設費 A_0 に対する対策費用の割合 c_j を用いれば、総支出低減 $RPC(t_0)$ は [21] 式で表される。

$$\begin{aligned} RPC(t_0) &= TC_b(t_0) - TC_a(t_0) \\ &= LDE(t_0) - \sum_{j=1}^{t_0} c_j \end{aligned} \quad [21]$$

例えば、現在($j=1$ 年目)、初期建設費用の 5% を投じて地震対策を行った場合、 $c_{j=1}=0.05$, $c_{j \neq 1}=0$ となる。また、 $RPC(t_0)$ が増加するにつれて、対策により総支出が減少することを意味するので、地震対策の実施は費用対効果が良いと言える。

4. 地震損失期待値や費用対効果に関する感度解析

前章で提案した地震リスク評価手法を用い、木造住宅の耐震診断や耐久性診断、劣化診断結果に基づく地震損失期待値と、耐震補強や維持管理など地震対策の費用対効果の感度解析を行う。さらに、地震リスク評価結果に大きく影響を及ぼすと考えられる被災後の修復方法の意思決定による地震損失期待値の違いを比較する。本章においても前章と同様に、2 階建てを想定した等価高さ $H_e = 4.5\text{m}$ で 1 次固有モードが直線の等価 1 質点系でモデル化される木造住宅を、高知市に建設すると設定する。高知市における現時点(2009 年

)での地震ハザード評価結果を図 8 に示す。高知市は、南海地震の想定被災地域であり、比較的地震危険度の高い地域であると言える。

4.1 耐震診断結果に基づく地震損失期待値

まず、耐震診断により算定される耐力(降伏せん断力係数 C_y)別の地震損失期待値 LE を比較する。耐用年数 25 年($\beta\tau_0=25$)の木造住宅が、現在新築($\tau_1=0$)されると仮定した場合の使用期間 t_0 に対する地震損失期待値の違いを図 9 に示す。地震損失期待値は耐力の違いによる差異が大きく表れ、降伏せん断力係数 C_y が 0.1 から 0.5 へと変化すると、使用期間が 50 年程度を超えた場合には、初期建設費用の約 50% の差異が生じていることが分かる。

4.2 耐震補強の費用対効果

次に、地震対策(耐震補強)の実施による費用対効果について検討する。まず、耐用年数 25 年($\beta\tau_0=25$)、現在、築 25 年($\tau_1=25$)の既存木造住宅を考え、保有耐力に対する総支出低減 RPC を使用期間 t_0 別に比較する。なお、図 10, 11 の横軸は、耐震補強前の保有耐力(降伏せん断力係数 C_y)を表している。対策は現在実施し、降伏せん断力係数 C_y を 0.1 上昇させることとする。また、対策費用は初期建設費用の 5% と仮定した。

図 10 より、使用期間により、総支出低減量には大きく違いが見られる。高知市のように地震危険度が比較的高い地域では、耐力の低い建物は、使用期間が短い場合($t_0=25$)であっても耐震補強の費用対効果は良いと言える。ただし、図 11 に示すように、同じ補強量であっても対策費用によって、総支出が増大する可能性があるため、対策内容と効果、対策費用を考慮して適切な地震対策を選定するべきであると言える。

4.3 耐久性診断結果に基づく地震損失期待値

ここでは、耐久性診断の実施により推定される耐用年数 $\beta\tau_0$ 別の地震損失期待値 LE を比較する。降伏せん断力係数 $C_y=0.1, 0.3$ の木造住宅が、現在新築($\tau_1=0$)されると仮定した場合の使用期間 t_0 に対する地震損失期待値の違いを図 12 に示す。耐用年数による地震損失期待値の差異は耐力の高い建物ほど大きくなり、降伏せん断力係数 C_y が 0.3 の場合、使用期間が 50 年程度を超えると初期建設費用に対して約 15% の違いとなる。耐力の高い建物の耐久性を向上させることが、地震損失の低減に有効であると言える。

図 9 耐力による地震損失期待値の比較 (高知市)

図 10 耐震補強の費用対効果 (高知市)

図 11 対策費用による総支出低減の変化 (高知市)

4.4 維持管理の費用対効果

次に、定期的な維持管理実施の費用対効果について検討する。まず、維持保全を考慮しない耐用年数 τ_0 が 25, 100 年の新築 ($\tau_1=0$) 木造住宅について、毎年初期建設費用の 0.1% を投じることで適切な維持管理を施すこととする。ここで、第 2 章で示した耐用年数推定方法を用いると、[5] 式で表される維持保全による耐用年数の割り増し係数 β は、表 1 の計算式より概ね 0.5 ~ 1.5 程度の値となる。そこで、維持管理の実施により、耐用年数 $\beta\tau_0$ は τ_0 が 25 年の場合、12.5 年 ($\beta=0.5$) から 37.5 年 ($\beta=1.5$) となり、 τ_0 が 100 年の場合、50 年 ($\beta=0.5$) から 150 年 ($\beta=1.5$) となったと仮定する。

使用期間をそれぞれ $t_0=25$ 年、100 年とした場合の保有耐力に対する総支出低減 RPC を比較すると、図 13 より、保有耐力が低い場合には、維持管理による総支出低減効果が大きくないことが分かる。特に、使用期間が長い場合 ($t_0=100$) には、毎年の維持管理に投じる費用により総支出が増大する可能性がある。

4.5 劣化診断結果に基づく地震損失期待値

ここでは、劣化診断の実施により判定される劣化度別の地震損失期待値 LE を比較する。現在、築 100 年 ($\tau_1=100$) の既存木造住宅を考え、降伏せん断力係数 C_y は 0.1, 0.3, 0.5、耐用年数 $\beta\tau_0$ は 100 年とする。現在、劣化診断を実施した場合の、使用期間 t_0 に対する地震損失期待値の違いを図 14 に示す。なお、劣化度の分割数は $n=2$ とし、劣化度は $l=0$ のとき劣化していない新築時と同等の状態を表し、 $l=2$ のとき劣化が下限値まで達している状態を表す。

耐力が比較的高い場合には、劣化度による地震損失期待値の差異

が大きいことが分かる。4.3 節の検討結果も併せて考えると、耐震性の高い木造住宅への適切な維持管理による、耐久性向上と劣化防止に努めることが地震損失低減には効果的であると言える。

4.6 修復方法の意思決定による地震損失期待値

最後に、地震リスク評価結果に比較的大きく影響を及ぼすと考えられる条件のひとつ、被災後の修復方法について感度解析を行い、地震損失期待値を比較する。

第 3 章で提案した地震リスク評価手法では、損傷レベルは全壊、半壊を設定しており、全壊の場合はすべて建替え、半壊の場合はすべて補修して住み続けると仮定した。そこで、ここでは、全壊被害となった場合でも補修して住み続けるという選択肢を想定し、[11] 式において、 $x_{(全壊)}=1/2$, $x_{(半壊)}=1/3$ となるケースを設定した。降伏せん断力係数 C_y は 0.1, 耐用年数 $\beta\tau_0$ は 25 年の新築 ($\tau_1=0$) 木造住宅を考え、修復方法別の地震損失期待値 LE を図 15 に示す。

高知市は地震危険度が比較的高く、耐力の低い建物は大きな被害を受けると予測されることから、全壊の際に選択する修復方法によって地震損失期待値は大きく異なることが分かる。このような地域では、地震により全壊と判定された場合であっても建て替えでなく、可能な限り補修して住み続けるという意思決定をすることで大幅な損失低減が期待できると考えられる。

5. 結論

本論文では、大地震発生時の木造住宅の安全性に大きく関わると想定される、耐久性や劣化状況を反映可能な木造住宅の地震リスク

図 12 耐用年数による地震損失期待値の比較 (高知市)

図 13 維持管理の費用対効果 (高知市)

図 15 修復方法の意思決定による地震損失期待値の比較 (高知市)

図 14 劣化度による地震損失期待値の比較 (高知市)

評価手法を構築した。具体的には、戸別を実施する耐震診断、耐久性診断、劣化診断の結果と地域の地震危険度解析結果に基づく地震損失期待値や、地震対策(耐震補強や維持管理など)を検討するための総支出に関する費用対効果指標を提案した。

提案手法を用いて地震危険度の比較的高い地域(高知市)を対象とした感度解析を行い、想定被災地域の地震防災対策に関して得られた結果を以下に箇条書きにして示す。

- 1) 耐震補強の実施による総支出の低減効果は、木造住宅の耐力が低いほど、使用期間が長いほど増加する。
- 2) 木造住宅の耐力が高くなければ、耐久性向上による耐用年数の長期化や定期的な維持管理による劣化防止を行っても損失低減効果は大きくない。
- 3) 地震によって全壊と判定されても、建て替えてなく補修を選択することで大幅な損失低減が期待できる。

なお、本論文では、木造住宅の劣化度を耐震性能へ反映可能であると仮定して議論を進めた。しかし、提案手法を用いた地震損失期待値や地震対策の費用対効果の検討結果によって、既存木造住宅を活かした良好な住宅ストック形成を行う上では、劣化診断結果を耐震性能評価へ定量的に反映させる枠組みを構築することの重要性が再認識された。

参考文献

- 1) 梅本通孝, 糸井川栄一, 熊谷良雄, 岡崎健二: 住宅耐震化に対する居住者の実施意図に関する研究 - 静岡市・千葉市・水戸市の一般市民を対象として -, 日本建築学会計画系論文集, No.645, pp.2451-2458, 2009.11.
- 2) 小檜山雅之, 吉村美保, 目黒公郎: 耐震補強の誘因と阻害要因; 地震防災

推進対策におけるリスクコミュニケーションの重要性, 日本建築学会環境系論文集, No.606, pp.89-96, 2006.8.

- 3) 林 康裕, 更谷安紀子, 森井雄史: 木造住宅の経年劣化と地域地震環境を考慮した地震時損傷度予測手法, 日本建築学会構造系論文集, No.615, pp.77-84, 2007.5.
- 4) 佐藤基志, 五十田博, 佐藤友彦, 三宅辰哉: 木造住宅用耐震補強技術の費用対効果に関する試算, 日本建築学会構造系論文集, No.637, pp.519-526, 2009.3.
- 5) 皆川隆之, 花井 勉, 福和伸夫, 森 保宏: 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2. ライフサイクルコストからみた補強設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.159-160, 2003. 9.
- 6) 目黒公郎, 高橋 健: 既存不適格建物の耐震補強推進策に関する基礎研究, 地域安全学会論文集, No.3, pp.81-86, 2001.11.
- 7) 吉村美保, 目黒公郎: 既存建物の耐震補強に対する費用対効果評価に関する地震予知情報の利用法, 生産研究, 53 巻 11・12 号, pp.548-552, 2001.11.
- 8) 国土開発技術研究センター: 木造建築物の耐久性向上技術, 1986.10.
- 9) 日本建築学会: 建築物の調査・診断指針(案)・同解説, 2008.3.
- 10) 日本住宅・木材技術センター: 木造住宅の耐久設計と維持管理・劣化診断 - 【漏水】【腐朽】【蟻害・虫害】対策のために -, 2002.7.
- 11) 更谷安紀子, 森井雄史, 林康裕: 木造住宅の経年劣化を考慮した最大地震動速度に対する損傷確率曲線, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.150-153, 2006.11.
- 12) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会: 伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル - 限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法 -, 2004.3.
- 13) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 平成18年改定版 確率論的地震動予測地図の説明(分冊1), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/06_yosokuchizu/bunsatsu1.pdf, 2010.3.8. 参照
- 14) 司 宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.63-70, 1999.9.
- 15) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 長期的な地震発生確率の評価手法について, <http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/01b/chouki020326.pdf>, 2010.3.8. 参照

(2010年3月8日原稿受理, 2010年6月11日採用決定)