木造住宅用耐震補強技術の費用対効果に関する試算

TEST CALCULATION ON COST-EFFECTIVENESS OF SEISMIC RETROFIT MEASUREMENT FOR VULNERABLE WOOD HOUSES

佐藤基志*, 五十田 博**, 佐藤友彦***, 三宅辰哉****

*Motoshi SATO, Hiroshi ISODA, Tomohiko SATO
and Tatsuya MIYAKE*

This paper describes a case study of cost-effectiveness of seismic retrofit measurement for vulnerable wood houses. To examine the cost-effectiveness of seismic retrofit measurement, the life cycle costs for five houses having different seismic performance and being located on five different areas are compared. These seismic performances are defined from the results of full-scale shaking table tests including collapse tests and static loading test on the site, and time history analyses were conducted to compute damage cost. The field survey also was conducted to evaluate the relationship between damage and rehabilitation. As the result of analyses, there are quite big differences in seismic zone. For example in Shizuoka where is high probability of severe earthquake seismic performance assessment score of 1.5 is the most cost-effectiveness, but then in Tokyo seismic performance assessment score of 0.3 which means no reinforcement of vulnerable wood house is the most cost effectiveness in next 20 year. When calculating the effective cost in next 20 year all area, it is estimated half of the current amount.

Keywords: Existing wood house, Seismic diagnosis, Seismic retrofit, Full-scale shaking table test, cost-effectiveness

既存木造住宅、耐震診断、耐震補強、実大振動台実験、費用対効果

1. はじめに

1981年の耐震規定、いわゆる新耐震設計基準以前に建てられた木造住宅には、耐震性能が不十分と推定されるものが数多く存在し、大地震を受けた際に重大な被害を受ける可能性が指摘されている。このような現行法の耐震基準に適合しない既存不適格木造住宅は1000万棟に達するとも言われている。2004年新潟県中越地震や2007年能登半島地震を経験し、東海、東南海をはじめとする大地震の発生が危惧されている昨今、個々の住宅レベルにおいては耐震補強を推進し、都市計画レベルにおいては被害状況の予測をするなど、総合的な地震防災対策を構築することが社会的急務である。しかし、現状は地震災害に関する理解が浸透しておらず、耐震化が思うように進んでいない。その理由として、一般住民が抱く耐震診断・補強に対する信用度の低さや、目では確認することの出来ない補強効果、費用対効果に対する不安、そしてなによりも個人の災害意識の低さがあげられる。

本論文では木造住宅の耐震補強の費用対効果について論じる。費用対効果は、経済原理に則りその長期的な有効性を明らかにするものである。本来、木造住宅の耐震補強は人命にかかわる事象であり、金額に置き換えることができない事象について、いたずらに経済原理を持ち出し、有効性を論じることは慎むべきである。しかし、本論文では、進まない耐震補強の一助となる工学的な観点からの基礎資料を得ることや、耐震補強にあつては経済的な観点からも有益な結果が得られるような技術開発の促進に寄与することを目指し、費用

対効果の試算をおこなった。

本論文で参考にした既往の研究は、建物の供用期間を通しての地震被害と復旧に関する出費(以下、地震リスクに対する損失額)をリスクととらえ、複数の設計案の中から、地震リスクに対する損失額が最小となる設計案の提案が可能となるリスク・マネジメント手法である^{1,2)}。本研究では3章で詳述する図1に示すような手順に沿って費用対効果を計算した。まず、評点別の建物モデルの作成をおこなう。既往の研究では、構造設計の元となる壁の荷重変形関係などを参考に建物モデルを定義し、過去の地震被害との関係によってモデルの妥当性を確認するか^{3,4)}、入力地震動の応答加速度、あるいは応答速度と建物の被害との関係から被害関数曲線など定義する手法^{5,6)}など、が用いられることが多いが、ここではこれまで実施した実大実験の結果に基づいて、評点に応じた振動モデルの作成を試みた。ついで、入力地震動を定義する。特定の地域の地震動を論じる場合、周辺の断層を考慮し理論的地震動評価として統計的グリーン関数により時刻歴地震動を得る方法^{7,8)}などが現段階では適切と考えられるが、本論文では多地点での地震動を容易に得るため、経験的地震動評価として回帰分析に基づく応答スペクトルから得られる模擬地震動に対して、日本建築学会「建築物荷重指針・同解説 2004 (以下、荷重指針)」⁹⁾に示されているハザードマップを適用し、加速度と再現期間の関係を定義した。そして、損傷費用と耐震補強コストを算出する。損傷費用については既往の研究²⁾で用いられている損傷費用曲線を参考とするとともに、損傷程度と建て替え割合に関する基

* (株)竹中工務店 修士(工学)

(元信州大学 大学院生)

** 信州大学工学部 准教授

建築研究所 客員研究員・博士(工学)

*** 信州大学大学院 博士課程

YKK AP (株) 修士(工学)

**** (株)日本システム設計 代表取締役・博士(工学)

Takenaka Corp., M. Eng.

Assoc. Prof., Shinshu University

Visiting Researcher, BRI, Dr. Eng.

Graduate Student, Shinshu University

YKK AP, M. Eng.

President, Nihon System Sekkei Architect & Engineers Co., Ltd., Dr. Eng.

礎資料が不足していたので、2004 年新潟県中越地震の復旧状況の調査によってそれを明らかにした。耐震補強費用はこれまで提案されている式¹⁰⁾と 50 の事例¹¹⁾に対して重回帰分析を実施した 2 つの式で比較検討している。最後に地震リスクに対する損失額を求め、現在の耐震補強費用での今後の供用期間と目標評点との関係を示した。さらに、評点 1.0 や 1.5 を目標として費用対効果が得られる耐震補強コストについて一考した。

2. リスク・マネジメント手法

まず、本論文で用いるリスク・マネジメント手法について簡単に述べる。建物の地震リスク・マネジメントにおいて、地震の発生を更新過程の一つであるポアソン過程とした場合、ある設計案の期待地震リスクに対する損失額は、式(1)のように定式化される²⁾。

$$E[C_L] = C_I + t_{life} \times \sum_{all\ sources} \sum_{j=1}^k v(m_j) \cdot E[C_D(m_j)] \quad (1)$$

ここで $E[\cdot]$ は確率変数・の期待値、 C_I は地震リスクに対する損失額、 C_I は初期費用、 $C_D(m_j)$ は最大加速度 m_j の地震に対する損傷費用、 t_{life} は建物の供用期間、 $all\ sources$ は考慮される全ての震源域、添え字 j は考慮される加速度を指す。ここで、 $v(m_j)$ はポアソンモデルを仮定した際の、最大加速度 m_j の地震の単位時間当たりの発生率である。

3. 耐震補強の費用対効果の評価方法

図 1 に本研究で用いる費用対効果の評価方法の流れを示す。

まず、モデル化の作成において、

- ① 過去に実施した実大振動台実験の結果に基づき、耐震診断評点 0.3、0.5、0.7、1.0、1.5 の建物モデルを作成する。
- ② 対象となる住宅の価格の初期費用の算出をおこなう。同じく対象住宅を耐震補強した際の費用を算出する。

次いで、入力地震波において、

- ③ 解放的工学基盤に対して 10 波の模擬波を作成し、5 つの地盤を考慮して合計 50 波の模擬地震動を作成する。基盤の最大加速度をパラメータとし、ハザードマップより最大加速度ごとの年発生率を定める。

そして、損傷費用の算出において、

- ④ 各評点のモデルに模擬地震動を入力する。目標の加速度を持つ地震動 50 波に対する最大応答変形を得る。別途作成した最大応答変形と損傷費用の関係より、各評点の入力最大加速度に対する損傷費用の算出をする。

最後に、地震リスクに対する損失額の算出において

- ⑤ それぞれのパラメータを地震リスクに対する損失額の定式(1)に代入することで診断評点ごとの地震リスクに対する損失額を求める。
 - ⑥ 耐震診断評点ごとの地震リスクに対する損失額の比較をおこない、耐震補強の費用対効果を検証する。
- それぞれの項目の詳細は 4 章以降で述べる。

4. モデルの作成

4.1 荷重変形関係の基準化 前述したように対象の建物は、耐震診断¹²⁾の評点で 0.3、0.5、0.7、1.0、1.5 である。それぞれの意味は、評

図 1 費用対効果の評価方法

骨格曲線は下式による

$$F = \begin{cases} \text{sgn}(\delta) \cdot (F_0 + R_1 \cdot S_0 |\delta| \cdot \{1 - \exp(-S_0 |\delta| / F_0)\}) & |\delta| \leq |DU| \\ \text{sgn}(\delta) \cdot F_U + R_2 \cdot S_0 \cdot \{\delta - \text{sgn}(\delta) \cdot DU\} & |DU| < |\delta| \leq |DF| \\ 0 & |\delta| > |DF| \end{cases}$$

DF: 負勾配が X 軸と交わる点

図 2 復元力特性モデル

点 0.7、1.0、1.5 が耐震診断において、「倒壊する可能性がある」、「一応倒壊しない」、「倒壊しない」の境界であり、0.3、0.5 は耐震補強する対象の建物と考えた。振動モデルは各階に質点を持つせん断モデルとして、その復元力をこれまで実施した実大実験の結果に基づき定める。復元力特性は図 2 に示す、CUREE-Caltech Wood frame Project¹³⁾において、Bryan¹⁴⁾により提案されたモデルとした。

表 1 に扱った振動台実験と実大静的加力実験の概要を、図 3 に実大実験の結果及び、実験結果から基準化したモデル(以下「基準化モデル」)の荷重変形関係を示す。実験結果の縦軸は層せん断力を全重量と評点で除して基準化し、横軸は層間変形角として示した結果である。なお、ここでの評点は精密診断の保有水平耐力計算による方法により求めた値で、その際の層の荷重変形関係は、壁単体の荷重変形関係の実験結果がある場合にはその値を用い、ない場合には文献 11)の参考資料に示された曲線を用いた。

結果は大きくばらついているが、大局的に二つに分類可能である。

表 1 荷重変形関係の定義に用いた実験の概要

	仕上げ	耐震要素	面積(m ²)*1	重量(kN)	評点	入力地震動 (入力回数)	入力方向	最大変形角	文献
既存 A	モルタル	筋かい	47.80	185.2	0.78	JMA 神戸波 (3)	XZ	倒壊	(15)
既存 B	モルタル	筋かい	42.78	210.5	0.50	JR 鷹取波	XYZ	倒壊	(16)
既存 C	下見板*2	筋かい	48.86	239.7	0.52	引き倒し実験	X	倒壊	(17)
既存+補強	モルタル	筋かい、構造用合板	42.78	210.5	1.84	JR 鷹取波 (2)	XYZ	倒壊	(17)
新築 A	サイディング	筋かい、構造用合板	76.60	267.7	2.06	JMA 神戸 JR 鷹取(3)	XYZ	倒壊	(18)
新築 B	なし	筋かい、構造用合板	52.99	173.4	1.48	JMA 神戸	XYZ	1/5rad	(19)
新築 C	なし	筋かい、構造用合板	52.99	173.4	1.84	JMA 神戸	XYZ	1/17rad	(19)

*1 面積は 1 階の床面積を示す。

*2 下見板は耐震診断¹¹⁾に示された曲線を用いて荷重変形関係を求めた。

ひとつは新築建物を対象にした実験結果や補強建物の実験結果で、変形性能は異なるものの縦軸の荷重は比較的安定している。もうひとつは、既存建物を対象にした実験結果で、新築建物や補強建物より全体的に耐力が大きい。新築建物は、接合部や配置の低減などなく、壁の実験の重ねあわせで精度よく荷重変形が求められる。一方、既存建物の診断は接合などの不確定な要素が多く、安全側に評価されているといえる。この安全側の評価は、既存壁の荷重変形関係のデータベースが希少であること、さらに、柱-横架材接合部や劣化の低減方法の問題、さらにモルタル外壁のような仕上げ材に対して単純な重ね合わせが成り立つか、などに起因すると考えられる。今後、耐震診断技術の高度化、精緻化が図られ、前述のような問題点が解決された場合には、既存建物も新築建物と同様に評価値と荷重変形関係の対応の精度が高まると考えられるので、基準化モデルの復元力特性の骨格曲線は、新築建物の平均的な値として定めた。繰り返しのパラメータは壁実験の結果²⁰⁾などを参考に表 2 に示すとおりに定めた。図 4 には定めた骨格曲線の一例として、既存建物と補強建物の荷重変形関係とモデルのそれを比較して示した。既存建物では差が大きいものの、補強建物では良好な一致となっている。

4.2 評点モデルの作成 まず、「基準化モデル」に基づいて、2 階建て建物の 2 質点系せん断モデルのうち、1 階の荷重変形を定義した。つまり、1 階の各評点モデルの荷重変形関係は、図 3 の縦軸の値に評点と重量を掛け合わせることで荷重を、変形角に階高を乗じることで変形とした。2 階の荷重変形関係は「評点 0.3 モデル」、「評点 0.5 モデル」、「評点 0.7 モデル」においては 1 階に対して 1.5 倍とし、「評点 1.0 モデル」の 2 階評点は「評点 0.7 モデル」と合わせ評点 1.05 に、そして「評点 1.5 モデル」は 1、2 階とも同じ評点とした。これは調査事例¹¹⁾より一般的な住宅の場合、1 階に比べ 2 階の評点が高い例が多く、その倍率がおおよそ 1.5 倍程度と判断したこと、耐震補強の際は 1、2 階とも同程度に補強すると考えられること、による。なお、2 質点系せん断モデルの重量及び階高は、実大実験の試験体「既存+補強」に合わせ、それぞれ 1 層 210kN、2,850mm、2 層 91.4kN、2,700mm として、せん断バネを求めた。

4.3 建物費用の設定 対象地域は東京、大阪、名古屋、長野、静岡の 5 地域とした。建築物価調査会の建築着工データファイル平成 18 年度計²¹⁾よりそれぞれの地域での木造建物の調査対象棟数、延床面積の平均、工事費単価を求め、面積と建築費単価を乗じて対象建物モデルの地域ごとの価格を定めた。表 3 に地域ごとの建築費単価、延床面積、モデル価格を示す。家財の価格は文献²⁾と同様に 1 人当たり 300 万円として計算し、本解析では 4 人家族、1200 万円とした。

図 3 荷重変形関係比較

表 2 繰り返しパラメータ

F_0	骨格曲線による	R_2	骨格曲線による
F_1	$F(DU) \times 0.114$	R_3	1.00
DU	骨格曲線による	R_4	0.19
S_0	骨格曲線による	α	0.55
R_1	骨格曲線による	β	1.26

図 4 モデルと実験結果の比較

表 3 地域ごとの建物モデル価格

単位	棟数	面積平均 m ²	工事費/m ² 万円	モデル価格 (万円)
東京	35735	111.5	17.6	1961.2
大阪	24889	111.7	16.1	1796.8
名古屋	5641	127.2	16.3	2070.3
長野	10232	128.8	16.2	2089.9
静岡	16449	128.9	16.3	2097.0

注 面積平均：延床面積の平均、工事費：工事費単価

4.4 耐震補強費用 耐震補強費用は、耐震補強の事例 50 例¹¹⁾の重回帰分析から定める方法（以後「重回帰算定式」）と、狩谷らにより報告¹⁰⁾されている補強費用の算定式（以後「既往式」）の 2 つについて検討した。狩谷により報告されている式は日本木造住宅耐震補強事

業者協同組合に加盟している企業から提供された 145 件の耐震補強工事データに基づくものである。なお、ここでの耐震診断は改定される以前のもの²²⁾を用いている。改定後の診断法では柱横架材接合部の低減などがかかるため、診断評点は一般に小さな値となると考えられるが、ここでは別調査による参考値として評点をそのままに式を引用した。

まず、重回帰算定式による耐震補強費用は、説明変数として「評点上昇度」、「補強前評点」を決めた。両変数は相関があると考えられるが、これまでの研究において「評点上昇度」はもとより、「補強前評点」によっても補強費用に明確な違いが見られたという理由により変数とした。次いで「延べ床面積」を取り上げ、「評点上昇度」、「補強前評点」との相関が 0.10 と低いことを確認した上で、「延べ床面積」を変数に加えた。以上、3 つの説明変数に対して「耐震補強費用」の重回帰式(2)を求めた。

$$C_1 = 1.22x + 77.9y + 458z - 149 \quad (2)$$

ここで

C_1 : 耐震補強費用 (万円) x : 延べ床面積 (m^2)

y : 補強前評点 z : 評点上昇値

既往式では、耐震補強費用は「評点上昇度」、「補強前評点」によって式(3)(4)(5)で表される。

$$E_i = E_a - E_b \quad (3)$$

$$E_i = 0.85 \cdot \ln(C_2) - 11.69 \quad (E_b < 0.7 \text{ 相関係数 } 0.984) \quad (4)$$

$$E_i = 1.45 \cdot \ln(C_2) - 19.48 \quad (0.7 \leq E_b < 1.0 \text{ 相関係数 } 0.762) \quad (5)$$

ここで

E_i : 評点上昇度 E_a : 補強後評点

E_b : 補強前評点 C_2 : 耐震補強費用(円)

図 5 に推定値と実事例による補強費用の分布を示す。事例と重回帰算定式の相関は 0.487、事例と既往式の相関は 0.387 となった。また、重回帰算定式における標準偏差は 91 万円であった。

以上、耐震補強費用について事例と既往式によって定義したが、補強費用はケースバイケースでバラツキが大きい結果となった。本研究では耐震補強の平均的な額の例として二つの手法を用いて以後の論を進める。

5. 入力地震波

5.1 基盤地震動の作成²³⁾ 解放的工学基盤面の模擬地震動の加速度時刻歴 $a_B(t)$ は、(6)に示す正弦波の重ね合せによって作成する。 T_i の最小値を 0.04sec、最大値を 10sec とし、その間を 300 個に等比分割とした。位相角 ϕ_i は $0 \sim 2\pi$ 間の一様乱数とした。加速度 $a(t)$ の時刻歴波形の包絡線は図 6 のように設定した。本包絡線は文献²³⁾に示される包絡関数をもとに、継続時間を 30 秒として独自に設定したものである。

$$a_B(t) = a(t) \cdot \sum A_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} \cdot t + \phi_i\right) \quad (6)$$

$a(t)$: 非定常性を与える包絡関数

A_i : i 成分の振幅

T_i : i 成分の周期

ϕ_i : i 成分の位相角

A_i は目標とする加速度応答スペクトルに適合することを条件と

図 5 補強費用の分布 (単位: 万円)

図 6 加速度時刻歴の包絡線

として、収束計算により設定する。収束計算 j ステップにおける A_i を $A_{i,j}$ とする。 $A_{i,j}$ は $j-1$ ステップにおける A_i をもとに次のように算定する。

$$A_i = A_{i,j-1} \cdot \frac{S_{aT}(T_i)}{S_{a,j-1}(T_i)} \quad (7)$$

$S_{aT}(T_i)$: 目標加速度応答スペクトル

$S_{a,j-1}(T_i)$: $j-1$ ステップにおける $a_B(t)$ による加速度応答スペクトル

収束の判定条件は次の3項目とする。

最小スペクトル比 $\varepsilon_{\min} = \min(\varepsilon_i) \geq 0.85$

目標に対する標準偏差 $\sigma \leq 0.05$

目標に対する誤差の平均 $|1 - \bar{\varepsilon}| \leq 0.02$

$$\text{ここで、} \varepsilon_i = \frac{S_{a,j}(T_i)}{S_{aT}(T_i)} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_i - 1)^2}{N}} \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\sum \varepsilon_i}{N}$$

N : T_i の数

この方法では ϕ_i を一様乱数とするため、いくつでも $a_B(t)$ を作成できるが、ここでは 20 波作成し、目標のスペクトルに対してバラツキが少ない順に 10 波を選択した。

5.2 目標応答スペクトルと再現期間 荷重指針に準拠して基盤地震動の目標加速度応答スペクトルに対する再現期間を求める。

$A_{\max}$ は荷重指針では次のように与えられる。

$$A_{\max} = k_{rE} \cdot a_0 \quad (8)$$

ここで、再現期間換算係数 k_{rE} は、再現期間 r 年に応じて次のように定められる。

$$k_{rE} = \left(\frac{r}{100}\right)^{1/k} \quad k = \frac{\ln 500 - \ln 100}{\ln a_{500} - \ln a_0} \quad r = 100 \cdot \left(\frac{A_{\max}}{a_0}\right)^k \quad (9)$$

a_0, a_{500} : 再現期間 100, 500 年に対する最大加速度

表 4 に地震ハザードマップから読み取った、各地域の a_0 、 a_{500} 、の値を示す。年発生率は再現期間 r の逆数より求めた。

5.3 表層地盤による地震動の増幅 表層地盤を振動モデルに置換し、基盤地震動を入力として逐次積分法による応答解析を行って地表面地震動を求めた。表層地盤の非線形性を表す復元力モデルは今津・福武による R-O モデル²⁴⁾、²⁵⁾とした。表層地盤の地層構成は $k\text{-net}$ ²⁶⁾などの公開データから 2 種地盤、3 種地盤に相当するもの 5 つを選定した。式(9)による各表層地盤の略算固有周期を表 5 に示す。

$$T_g = \frac{4(\sum D_i)^2}{\sum V_{si} \cdot D_i} \quad (10)$$

D_i : 表層地盤各地層の厚さ

V_{si} : 表層地盤各地層のせん断波速度

入力とする基盤地震動の最大加速度を 200、300、400、600、800、1000gal の 6 段階に設定して応答解析を行い、それぞれの地盤に対する地表面地震動を求めた。図 7 に各種地盤での最大加速度 800gal での加速度応答スペクトルを示す。

6. 損傷費用

6.1 層間変形と損傷費用 作成した模擬地震動を建物モデルに入力し、得られた最大層間変形より損傷費用を求める。本解析では住宅の補修費用、あるいは建て替え費用と家財の損傷費用の合計を割合で求め、最終的には建物の初期費用にそれを乗じることにより $C_D(mj)$ を求めた。なお、損傷費用の元となる被災建物の費用や建て替え費用は、4.3 で述べた建物費用と同じと考えた。ここでは被災建物が経年によって価値が減少していることや補修の際に価値の異なるものが用いられることは考慮していない。

表 6 に建物の層間変形角と損傷状況、ならびに損傷の割合を示した。まず、区切りとなる層間変形角は、軽微(層間変形角 1/300)、小破(同 1/150)、半壊(同 1/60)、全壊(同 1/30)とし²⁾、倒壊限界は過去の実験結果¹⁶⁾、¹⁸⁾により復元力がほぼ 0 となる 1/6rad とした。補修費用も既往の研究²⁾に準じて定め、層間変形角が大きくなるに従って大きな割合となり、大破より大きな被害では 100%つまり初期費用と同じ額である。建て替えた場合も同様に 100%である。被害と建て替えか補修かの復旧状況を判断するための基礎的な資料がないため、2004 年新潟県中越地震の悉皆調査²⁷⁾を実施した建物を対象に現在の復旧状況を調べ、被害と建て替え、補修の割合を決めた。調査対象地域は長岡市、川口町及び旧堀之内町で合計 348 棟に対して実施した。写真 1 に調査対象建物の例を示す。結果は表 6 中下段に示したとおりであり、外観上無被害と判断された建物であっても少なからず建て替えているものがあつた。最終的には、補修、建て替えにかかる費用の割合を調査で得たそれぞれの割合に乗じて、被害ランクごとの初期費用に対する損傷費用割合(表 6 中では最下段)を求めた。応答変形とこの損傷費用を関係付ける際は、層間変形角とこの費用に対しての近似曲線式を求めて、層間変形角を近似式に代入することで損傷費用の割合を算出した。なお、悉皆調査における被害の判定には岡田による方法²⁸⁾が用いられている。悉皆調査時の被災度とここで定義した損傷状況と層間変形角の関係については、被災度区分判定基準²⁹⁾に例示されている各部の被災状況と被災度の関係、

さらに各部の被災状況と最大層間変形角 γ の関係から最も近いと考えられる項目を選択し定めた。家財の損傷費用は、倒壊以前については建物の損傷費用割合の半分を家財の価格に乗じて求め、建物が倒壊した場合には 100%の損傷費用がかかるものとして計算した。図 8 に建物及び家財の層間変形角と損傷費用の関係を示す。

表 4 再現期間換算係数を決定する特性値

	東京	大阪	名古屋	長野	静岡
a_0	190	190	210	240	380
a_{500}	340	400	390	450	790
1/k	0.361	0.462	0.384	0.390	0.455

表 5 表層地盤の略算固有周期

地盤種別	2 種-1	2 種-2	3 種-1	3 種-2	3 種-3
Tg(sec)	0.345	0.696	0.812	0.923	1.197

図 7 各地盤の加速度応答スペクトル 800gal

表 6 層間変形と損傷費用

		無被害					
		無被害	軽微	小破	中破	大破	倒壊
	rad	~1/300	1/300~	150~	1/30~	1/15~	1/6~
費用	補修	0	2	10	50	100	100
割合%	建替	100	100	100	100	100	100
復旧	補修	96.0	96.0	78.4	38.7	25.9	25.9
状況%	建替	4.0	4.0	21.6	61.3	74.1	74.1
費用	%	4.0	5.9	29.5	80.6	100.0	100.0

写真 1 調査対象建物

図 8 層間変形と fragility 曲線

6.2 評点ごとの損傷費用算出 作成した建物モデルに対し 200、300、400、600、800、1000gal の模擬地震動を各加速度 50 波入力し、損傷費用を算出した。建物と家財の評点、入力加速度ごとの損傷確率変数を図 9 に示す。

いたものを例としている。図中には現在からの供用期間を 10 年および 20 年としたときの耐震補強の最適案及び期待地震リスクに対する損失額を合わせて示した。また、図 12、13 は最適案がわかりやすいように供用年数が 5、10、15、20 年ときの地震リスクに対する

7. 耐震補強の費用対効果の評価

7.1 地震リスクに対する損失額の算出 図 10、11 に補強前の評点が 0.3 及び 0.5 の建物に対し耐震補強を行なった際の補強後評点別、地震リスクに対する損失額と供用期間の関係地域別に示した。地震リスクに対する損失額は初期のモデル費用を引いた値となっており、耐震補強を施さない場合の初期の地震リスクに対する損失額($t_{life}=0$)が 0 となるように示してある。なお、地震の発生をポアソン過程とし、耐震補強費用は額が低く算出される狩谷らによる既往式¹³⁾を用

図 9 評点毎の加速度の違いによる損傷確率変数

図 10 地域別地震リスクに対する損失額 (補強前評点 0.3)

図 11 地域別地震リスクに対する損失額 (補強前評点 0.5)

図 12 地域別地震リスクに対する損失額 (補強前評点 0.3)

図 13 供用年数別地震リスクに対する損失額 (補強前評点 0.5)

損失額を補強後評点ごとに示した。

補強対象建物が評点 0.3、0.5 のいずれの場合も、地震発生率が高い静岡を除いて、耐震補強による地震リスクに対する損失額の軽減は期待できない。つまり、耐震補強しないという選択肢が最適解となった。一方、静岡は今後の供用期間が 5 年では評点 0.7 までの補強が最適であるが、供用期間 10 年を超えると評点 1.5 まで補強したほうが高い費用対効果が得られる。例えば、10 年で 294 万円、20 年で 972 万円の地震リスクに対する損失額の軽減が期待される。

7.2 目標評点最適補強費用 7.1 で検討したように地震発生率の高い静岡を除いて費用対効果が得られないという結果であった。それでは現在の耐震補強費用がどの程度まで下がれば、効果が現れるかについて検討する。計算方法は、次のとおりである。

例えば、評点 0.3 モデルと評点 1.5 モデルについて、それぞれ初期費用を 0 として地震リスクに対する損失額を算出し、ある供用期間のときの地震リスクに対する損失額の差額 x を求める。ここで、評点 0.3 の建物を耐震補強し評点 1.5 まで上げるための費用がその差額 x 以下であれば、耐震補強を施したことにより地震リスクに対する損失額が軽減されたことになるため、その耐震補強は費用対効果が得られる。このようにして供用期間と目標評点ごとの「費用対効果の得られる耐震補強費用 x 」(以下「目標評点最適補強費用」)を算出した。

図 14、15 に評点 0.3、及び 0.5 の建物を評点 1.0、及び評点 1.5 まで補強した場合の目標評点最適補強費用を供用年数ごとに示した。現状の耐震補強費用の目安として、既往式及び重回帰算定式より算出した現状の耐震補強費用もあわせて示した。評点が 0.3 の建物を評点 1.0 まで耐震補強すると考えた場合、現状では 200～350 万円の耐震補強費用がかかる。それに対し目標評点最適補強費用を見ると、静岡では供用年数 7～8 年頃以降から現状の耐震補強費用が目標評点最適補強費用を大きく上回っているため、十分な費用対効果が得られる結果となった。東京や大阪で供用年数 10 年程度において、費用対効果を得るためには補強費用は 100 万円程度、20 年では 200 万円以下という結果になった。同様に評点 0.5 を評点 1.0 にすることを考えた場合にはそれぞれ 50 万程度と 100 万程度となった。

ここで、耐震費用については 4.4 で考察したとおりばらつきが大きいので、前述した耐震補強の事例 50 例¹⁾を元に個別事例に基づいて一考する。耐震補強費用の累積度数分布を図 16 に示した。横軸は補強費用から既往式の 1/2 の額を引いてゼロが概ね費用の最適値となるようにしてある。この図からわかるように、費用対効果を満足している、つまり費用が見かけ上マイナスになっているものは費用の安い度数分布の下側の 2 件 (4%) のみであった。次いで、費用対効果が得られやすい補強について分析をするため、補強種類について調べたところ、費用の安い下側 6 件には基礎補強が含まれていなかった。ここで、診断評点と補強後評点の関係を図 17 に示し、補強費用の安い下側 5 件について塗りつぶして表記した。費用対効果の得やすさと診断評点には傾向が見られなかった。

このように地域や補強前の評点を問わず 1.0 の耐震補強を促進するためには、補強が現在の半額程度の費用で済むようになること、さらに現在の補強方法では費用対効果を満足しているものが 4%程度

図 14 目標評点最適補強費用 (補強前評点 0.3)

図 15 目標評点最適補強費用 (補強前評点 0.5)

図 16 耐震補強費用の累積度数分布

図 17 診断評点と補強後評点

で、それらには基礎補強が含まれないこと、さらに費用対効果と診断評点には相関関係が見られないこと、などが明らかとなった。

8. まとめ

以上、地震危険度の高い木造住宅の費用対効果を論じることを目的に建物のモデル化手法を整理し、損傷費用や建て替え率などを明らかにした。

耐震補強により軽減される地震リスクに対する損失額の期待値は地域によって大きく差が見られ、地震発生率が低い地域では、軽減される地震リスクに対する損失額の期待値が耐震補強費用を下回ってしまい、現在の耐震補強費用では費用対効果が得られないという結果となった。一方、地震発生率が高い地域として選択した静岡では、現状の耐震補強費用で、5 年使用するのであれば評点 0.7 の補強、10 年以上使用するのであれば評点 1.5 までの補強が最適であるとの結論を得た。

また、東京、大阪を含む地域において、費用対効果を得る耐震補強費用を算出した結果、現在の耐震補強費用の半額程度という結論が得られた。加えて、費用対効果が得られやすい構法を調べたところ、その中には基礎の補強が含まれてはいなかった。さらに、診断評点や補強後評点によって費用対効果の得られやすさの傾向は見られなかった。なお、以上の算出の前提として、現在入手可能な最新の知見、補強構法、費用、ハザードマップなどに基づき、さらに既

存建物の面積や資産価値を新築建物と同じとしているなど、いくつかの仮定下のものであることを断りおくとともに、評点と補強構法、補強費用の関係や地震発生確率をポアソンモデルとしたことなどは今後十分な分析が必要と考えている。

はじめにでも述べたとおり、人命はお金に換算できない。つまり、大地震時に倒壊し人命を損なうことのないよう備えが必要なことは論を待たない。しかし、経済的な効果がないものに対して投資がなされにくいことも事実である。今後、安価な耐震補強技術の開発が促進され、経済的な効果も期待できるような環境が整うことを期待する。

謝辞 本研究は大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ・振動台活用による耐震性向上研究のうち、木造建物実験（分担：東京大学）、Ⅳ・地震防災統合化研究のうち事前対策、耐震診断・補強方法の検討及び開発（分担：独立行政法人建築研究所）の継続研究の一環として実施し、研究プロジェクトチーム（座長 坂本功慶応大学教授、幹事 腰原幹雄東京大学生産技術研究所准教授）の方々に貴重な助言をいただいた。また、耐震補強に関するデータは財団法人日本建築防災協会からご提供いただいた。議論に参加いただいた各位、ご協力いただいた各位にこの場を借りて感謝します。

参考文献

- 1) Takahashi, Y., Der Kiureghian, A. and Ang, A.H-S. (2002).“Decision methodology in seismic risk management of a single building based on minimum expected life-cycle cost”, UCB/SEMM Report-2002/02, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California,Berkeley, CA.
- 2) 高橋雄司, 正木信男, 穴原一範, 五十田博：地震危険度の高い地域の建物を対象とした地震リスク・マネジメント, 日本建築学会構造系論文集, No.591, pp.25-33, 2005.5
- 3) 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, No.612, pp.125-132, 2007.2
- 4) 飯塚裕暁, 境有紀：実際の建物被害と対応する地震動強さ指標を用いた既存不適格木造建物の耐震補強における費用対効果の検討, 第12回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, 2006.11
- 5) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 川瀬博：1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文集, No.494, pp.59-66, 1997.4
- 6) 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, No.582, pp.31-38, 2004.8
- 7) 武村雅之, 池浦友則(1987)：震源の不均等すべりを考慮した半経験的地震動評価, 地震, 第2輯, 第40巻, 第1号, pp.77-78
- 8) Irikura, K., Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 151-156, 1986
- 9) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説 2004, 2004.9
- 10) 狩谷のぞみ, 村尾修, 熊谷良雄, 糸井川栄一：実データに基づく耐震補強費用の実態と耐震性能向上効果, 地域安全学会論文集, 地域安全学会, No. 7, 263-272, 2005.11
- 11) 財団法人 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断の事例, 2007.3
- 12) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法, 2004.7
- 13) the CUREe Caltech Woodframe Project News letter No.1 1998 Nov.
- 14) Bryan Folz, Andre Filiatrault, A COMPUTER PROGRAM FOR CYCLIC ANALYSIS OF WOOD SHEAR WALLS University of California 2000.10
- 15) 津田千尋, 服部大介, 佐藤友彦, 五十田博, 宮澤健二：実在木造住宅移築加振実験, 日本建築学会技術報告集, No.23, pp.149, 2006.6
- 16) 佐藤友彦, 五十田博, 槌本敬大, 河合直人, 清水秀丸：既存木造住宅と補強した住宅の動的耐震診断とその精度検証, 日本建築学会構造系論文集, No.618, pp.159-166, 2007.8
- 17) 篠澤朋宏, 五十田博, 槌本敬大, 中川学, 和田幸子, 篠原昌寿：積雪地域に建つ2階建て木造住宅の静的引き倒し実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.101-102, 2008.9
- 18) 五十田博, 平野茂, 三宅辰哉, 古屋治, 箕輪親宏：建築基準法の最低壁量を満足する新築木造住宅の倒壊実験, 日本建築学会構造系論文集, No.618, pp.167-173, 2007.8
- 19) 野田実, 五十田博, 橋本敏男, 川上修, 高橋仁, 上山耕平：実大木造住宅の振動台実験手法に関する研究 その15 等級2標準試験体の実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.413-414, 2006.9
- 20) 河合直人, 岡部実, 渡辺一正, 在来軸組構法耐力壁の耐震性能 その2 仮動的試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.135-136, 1998.9
- 21) 財団法人 建設物価調査会：建築着工統計データファイル平成18年度版
- 22) 財団法人 日本建築防災協会、社団法人 日本建築士連合会：木造住宅の耐震精密診断と補強方法, 1985
- 23) 建設省建築研究所、日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針(案)、平成4年3月
- 24) 今津雅紀, 福武毅芳：砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会, pp.509-512, 1986
- 25) 福武毅芳：土の多方向繰り返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液化解析に関する研究, 名古屋工業大学博士論文, 1997
- 26) 独立行政法人防災科学技術研究所 強震観測網 K-NET 入手先 (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>)
- 27) 日本建築学会：2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告, 2006.8
- 28) 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報告集, No.524, pp.65-72, 1999.10
- 29) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2001.9

(2008年3月10日原稿受理, 2008年11月21日採用決定)