

# 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

Investigation on Cost-Effectiveness in Retrofitting of Existing Pre Code-Revision Wooden Houses  
by Seismic Intensity Index Corresponding to Actual Structural Damage

飯塚裕暁<sup>1</sup>, 境有紀<sup>2</sup>

Hiroaki IIZUKA<sup>1</sup>, Yuki SAKAI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>筑波大学大学院システム情報工学研究科大学院生

Graduate Student, Graduate School of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba

<sup>2</sup>筑波大学大学院システム情報工学研究科 助教授 工学博士

Assoc. Prof., Graduate School of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr. Eng

**SUMMARY:** We investigated cost-effectiveness in retrofitting of existing pre code-revision wooden houses by using probabilistic seismic hazard maps of Japan and seismic intensity based on response spectra in the period range of 1-2s which correspond to heavy damage to wooden houses. We compared retrofitting cost with a damage expectation expense by an earthquake in the case that structures were retrofitted or not. As a result, we found that retrofitting was advantageous in the area where outbreak probability of an earthquake is high, and that aged deterioration has a great influence on cost-effectiveness in retrofitting.

### 1 はじめに

地震によって倒壊する建物の大部分が現在の耐震規定を満たしていないいわゆる既存不適格建物である。地震の被害を軽減するには、耐震性の低いこれらの既存不適格建物に耐震補強を実施し耐震性を向上させることが重要だが、現状では耐震補強は一向に進んでいない。

本研究は、耐震補強促進の一助となる定量的データの提供を目的とし、木造建物を対象に建物の被害と相関の高い地震動強さ指標と地震の発生確率を利用し、耐震補強の有無による建物の被害額の違いを評価し耐震補強費用と比較することで耐震補強の費用対効果の検討を行った。耐震補強をした方が耐震補強をしなかった場合に比べてトータルコストが少なくなる耐震診断評点を損益分岐点とし、建物が建つ地点の地震発生確率と損益分岐点の関係を調べた。

### 2 耐震補強の費用対効果の評価方法

耐震補強の費用対効果を以下の手順で評価する (Fig. 1)。

- ①耐震補強を行う前と行った後の耐震診断評点(以下、評点)を設定し、ここから耐震補強費用を計算する。
- ②評点からその建物が全壊する震度を計算する。
- ③全壊する震度の地震発生確率を求める。
- ④地震発生確率に全壊被害額を乗じ期待損失額を求める。
- ⑤補強前後の期待損失額の差をとり耐震補強による損失軽減額を計算する。
- ⑥耐震補強費用と損失軽減額を比較する。

損失軽減額が耐震補強費用よりも大きければ、耐震補強は費用に見合った効果が期待できるので「得」となり、損失軽減額が耐震補強費用よりも小さければ、耐震補強は費用に見合った効果が期待できないので「損」となる。以下の章で各項目の解説を行う。

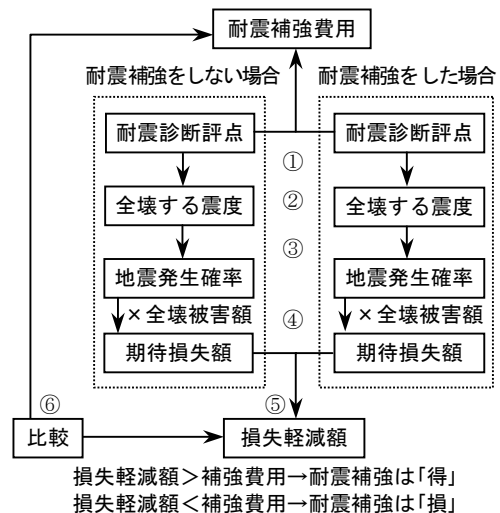


Fig. 1 Flowchart to estimate cost-effectiveness of retrofitting

Table 1 Relationship between evaluation and performance

評点	0.7 以下	0.7~1.0	1.0~1.5	1.5 以上
耐震性能	倒壊・大破の危険性あり	やや危険	一応安全	安全

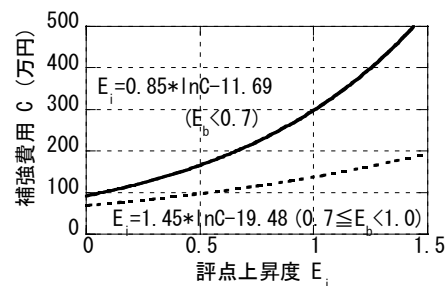


Fig. 2 Relationship between retrofit cost and ascent of evaluation

### 3 耐震診断評点と補強費用

耐震補強費用を耐震補強前後の耐震性能の違いから計算する方法は、狩谷らによる評点の上昇度と補強費用の関係式<sup>[1]</sup>を用いた。耐震精密診断<sup>[2]</sup>は財団法人日本建築防災協会において作成され、2004年に改定されたが、狩谷らによる補強費用の計算式が改定以前の耐震精密診断を対象としていたため、本研究では旧耐震精密診断を用いた。耐震精密診断では住宅の耐震性を評点という数値で評価している。評点と耐震性能の関係を Table 1 に示す。

耐震補強の効果は式(1)より評点の上昇度で表現する。補強費用と評点上昇度の関係は補強前の評点によって式(2)、(3)で表される<sup>[1]</sup>。

$$E_i = E_a - E_b \quad (1)$$

$$E_i = 0.85 \cdot \ln(C) - 11.69 \quad (E_b < 0.7) \quad (2)$$

$$E_i = 1.45 \cdot \ln(C) - 19.48 \quad (0.7 \leq E_b < 1.0) \quad (3)$$

ここで、 $E_i$  は評点上昇度、 $E_a$  は補強後の評点、 $E_b$  は補強前の評点、 $C$  は耐震補強費用(万円)である (Fig. 2)。

### 4 建物が全壊する震度の計算

次に、評点から建物が全壊する震度を計算する手順を説明する。全壊する震度には建物の被害と相関のある1-2秒の周期帯の弾性加速度応答を基にした震度<sup>[3]</sup>(以下、1-2秒震度)を用いる。

まず、評点に対応するベースシア係数を、評点の確率分布と被害関数によるベースシア係数の確率分布を比較して求めた。ある地震動強さに対して、あるベースシア係数以下の建物がすべて全壊すると仮定すると、耐力分布においてそのベースシア係数以下の部分が被害率に相当し、被害関数から耐力分布が求まる。被害関数は、過去に日本で発生した地震の強震記録と観測点周辺の建物被害データを基に求められた1-2秒平均弾性加速度応答(以下、1-2秒応答)によるもの<sup>[3]</sup>(式(4))を用いた。

$$D = \Phi(-11.94 + 3.60 \cdot \log(A_{1-2})) \quad (4)$$

ここで、 $D$  は建物全壊率、 $A_{1-2}$  は1-2秒応答( $\text{cm/s}^2$ 、減衰定数5%、水平2成分ベクトル和)、 $\Phi(x)$  は標準正規分布の累積確率である。ベースシア係数と1-2秒応答の関係は、Newmark変位一定則により式(5)で表される。

$$C_y = \frac{A_{1-2}}{\mu_h \cdot g} \quad (5)$$

ここで、 $C_y$  はベースシア係数、 $\mu_h$  は全壊するときの塑性率である。塑性率の値は、強震記録と周辺の木造家屋の被害を基に、全壊するときの等価周期より求めた文献<sup>[4]</sup>より6とした。被害関数から求めたベースシア係数の確率分布と、評点1.0に対応するベースシア係数を変化させた評点の確率分布を比較したものを Fig. 3 に示す。耐震診断は日本木造住宅耐震補強事業者協会によるもの<sup>[1]</sup>である(評点1.0以上の診断結果がひとまとめにされていたため、評点1.0に対応するベースシア係数で途切れている)。Fig. 3より、評点1.0がベースシア係数0.5に相当する場合の評点の確率分布が被害関数から求めたベースシア係数の確率分布とほぼ一致することがわかる。よって評点1.0はベ-

ースシア係数0.5に相当するとした。また、旧耐震精密診断では、地盤がやや悪い場合には評点を0.8倍に、地盤が非常に悪い場合には評点を0.7倍にしている。ここでは1/3の建物がやや悪い地盤に建ち、その更に1/3の建物が非常に悪い地盤に建っていると仮定し、評点1.0がベースシア係数 $(6 \cdot 0.5 + 2 \cdot 0.5 / 0.8 + 0.5 / 0.7) / 9 = 0.55$ に対応するとした。このようにして定まった耐力分布を Fig. 4 に示す。図中の平均、標準偏差は対数正規分布を正規分布に直したときの値である。

建物が全壊するときの1-2秒応答はベースシア係数(=評点 $\cdot 0.55$ )を式(5)に代入することで計算できる。建物が全壊する1-2秒震度を、1-2秒応答より式(6)<sup>[3]</sup>を用いて計算する。

$$I_{1-2} = 2.03 \cdot \log(A_{1-2}) + 0.05 \quad (6)$$

ここで、 $I_{1-2}$  は1-2秒震度である。ベースシア係数、評点と建物が全壊する1-2秒震度、1-2秒応答の関係を Fig. 5 に示す。

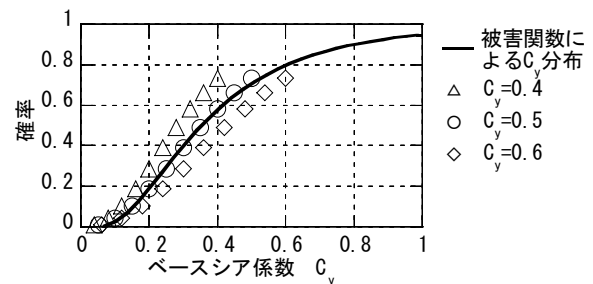


Fig. 3 Comparison between the result of seismic diagnosis changing base share coefficient correspond to evaluation 1.0 and the probability of base share coefficient based on vulnerability function

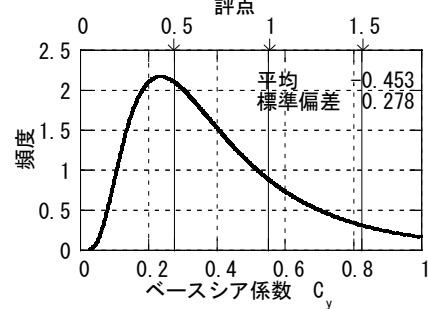


Fig. 4 Distribution of strength

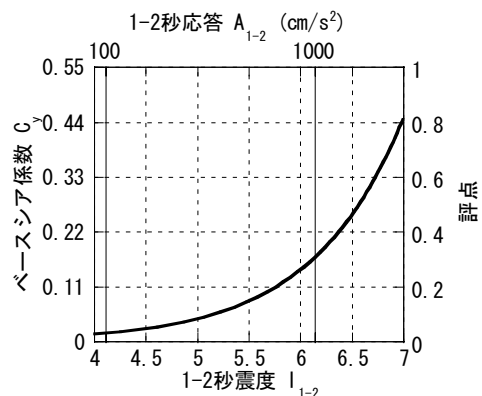


Fig. 5 Relationship between base share coefficient, evaluation and  $I_{1-2}$ ,  $A_{1-2}$

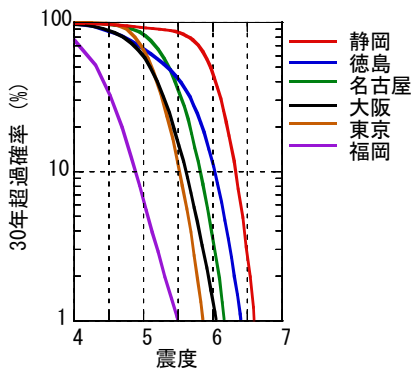


Fig. 6 Hazard curve

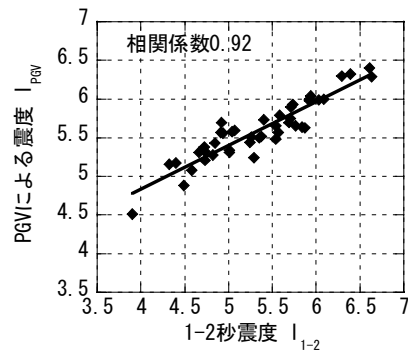


Fig. 7 Relationship between  $I_{1-2}$  and  $I_{PGV}$

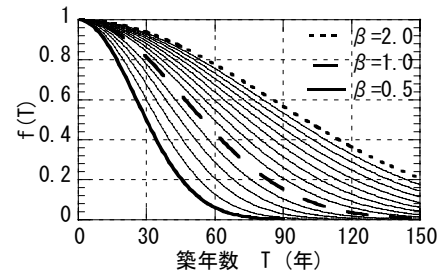


Fig. 8 Aged deterioration curve

## 5 地震の発生確率

地震の発生確率は、地震調査研究推進本部により今後発生が予想されるすべての地震を対象に、日本各地点の震度とその超過確率が与えられている「全国を概観した地震動予測地図」<sup>[5]</sup> (以下、予測地図) を利用した。超過確率は 2005 年 1 月 1 日を起点とした 30 年間で発生する震度の超過確率である。震度と 30 年間超過確率の関係は Fig. 6 のようなハザードカーブで表されている。

ここで、予測地図で使われている震度は地動最大速度 (以下、PGV) の水平 2 方向成分のうち大きい方の値から計算されたものであるため、1-2 秒震度の発生確率を求めるには、1-2 秒震度を PGV から計算された震度に変換する必要がある。そこで、1-2 秒震度と PGV から計算された震度の関係を 1995 年兵庫県南部地震などの過去に起きた地震の強震記録<sup>[6]</sup> から調べた (Fig. 7)。2 つの震度の相関係数は 0.92 と非常に高く、この関係から次の近似式が求められる。

$$I_{PGV} = 2.58 + 0.56 \cdot I_{1-2} \quad (7)$$

ここで、 $I_{PGV}$  は PGV から計算された震度である。式(7)を利用して建物が全壊する 1-2 秒震度を PGV から計算された震度に変換し、ハザードカーブを用いて地震発生確率を求める。

## 6 経年劣化の影響

建物の耐震性能は経年劣化するため、耐震補強の費用対効果を長期的に評価するにはこの影響を考慮する必要がある。そこで、式(8)で表される経年劣化曲線<sup>[7]</sup>に従って評点が年々減少していくものとする。

$$f(T) = \exp\{-\alpha \cdot (T/(\beta T_0))^2\} \quad (8)$$

ここで、 $f(T)$  は経年劣化曲線の低減係数、 $T$  は築年数、 $\beta$  は維持保全による割り増し係数、 $T_0$  は推定耐用年数、また  $T = \beta T_0$  のとき  $f(T) = \exp\{-\alpha\}$  である。 $\beta$  の値によって劣化する速さが変わる。築 50 年で耐力が半になるときを耐用年数とし、 $\alpha = 0.7$ 、 $T_0 = 50$  とした。経年劣化曲線を Fig. 8 に示す。

経年劣化による評点の変化に伴い、全壊する震度が年度ごとに変化するため、年度ごとの地震発生確率を求める必要がある。ここでは、地震発生がポアソン過程に従うと仮定し、予測地図による 30 年超過確率をもとに年度ごとの地震発生確率を推定した。

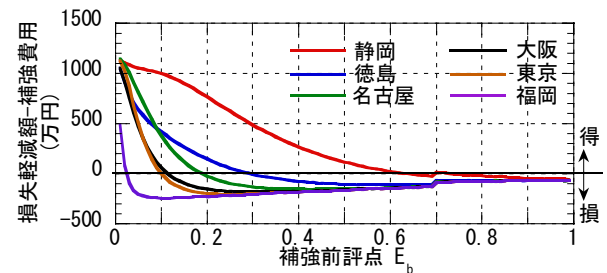


Fig. 9 Relationship between evaluation before retrofitting and the result of cost-effectiveness estimation

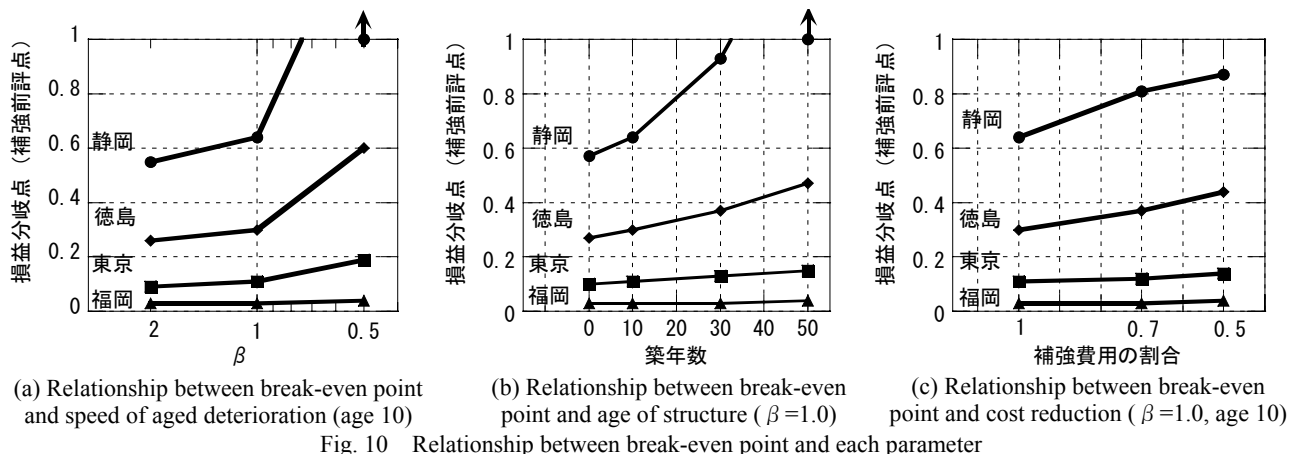
## 7 耐震補強の費用対効果の評価

建物の建つ地点 (地震発生確率)、劣化の速さ、築年数、補強費用のコストダウンをパラメータとして感度解析を行った。地点については地震危険度の違いから静岡、徳島、名古屋、大阪、東京、福岡の 6 地点を対象とした。これらの地点は都府県庁舎が建つ地盤が良好な場所であり、同じ都府県内でも地盤によって地震発生確率に大きな違いがあることに注意が必要である。劣化の速さについては劣化なし、 $\beta = 0.5$ 、1.0、2.0、築年数については築 0 年、10 年、30 年、50 年とした。補強費用については式(2)または式(3)より計算される費用のほか、今後の耐震補強技術の発展等によって費用が 70% 及び 50% に削減された場合を設定し、補強後の評点を 1.0、全壊被害額を 1500 万円とした。

各地点について各パラメータを変化させたときの補強前評点と費用対効果の関係を調べた。例として、 $\beta = 1.0$ 、築 10 年とした場合の結果を Fig. 9 に示す。縦軸は損失軽減額と補強費用の差であり、この値が正のとき耐震補強は得、負のとき耐震補強は損であることを表す。Fig. 9 より、静岡のように地震危険度の高い地域では耐震補強が得となる場合が多く、地震危険度の低い地域では耐震補強が得となる場合は少ないことがわかる。

耐震補強の損得が分かれる補強前評点を損益分岐点とし、各パラメータが損益分岐に与える影響を調べた。簡単のために地点は静岡、徳島、東京、福岡の 4 地点とした。それぞれのパラメータと損益分岐点の関係を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より経年劣化が速いほど、築年数が大きいほど、補強費用が少ないほど耐震補強が得となる場合が多くなることがわかる。劣化の速さと築年数の影響は地震危険度が大きい地域ほど大きくなるが、補強費用についてはあまり大きな変化はなかった。経年劣化による損益分岐点への影響が大きいので、劣化の傾向を正しく把握することが耐震補強の費用対効果を評価する上で重要である。

最後に、予測地図と耐震補強の損益分岐点の対応関係に



について考察した。築 30 年、耐震補強後の評点は 1.0 とした。経年劣化については、式(8)が単なるモデル関数であるため、その  $\beta$  を 1.0 から 0.5 まで変化させた。ハザードカーブが公開されている全国 60 地点についての損益分岐点と震度 6 弱の 30 年超過確率の関係を Fig. 11 に示す。また、予測地図の、震度 6 弱の 30 年超過確率分布図を Fig. 12 に示す。Fig. 11, 12 を見比べることで、日本の各地について耐震補強が得になる補強前診断評点がわかる。例えば、震度 6 弱の 30 年超過確率が 26%以上の地域 (Fig. 12 の赤) で損益が分岐する評点は、 $\beta=1.0$  とした場合 0.2 程度であるのに対して、 $\beta=0.6$  とした場合は 0.5 程度となり、多くの建物が耐震補強した方が「得」となることがわかる。

## 8 まとめ

建物の被害と相関の高い 1-2 秒応答と「全国を概観した地震動予測地図」を利用して、既存不適格建物の耐震補強における費用対効果の検討を行った。その結果、地震危険度が高い地域では、費用に見合った効果が期待できることがわかった。経年劣化による影響が大きいため、経年劣化の傾向を正確に把握することが重要である。

## 謝辞

ハザードカーブデータは防災科学技術研究所地震ハザードステーションより引用させて頂きました。

## 参考文献

- [1] 狩谷のぞみ, 村尾修: 木造住宅の耐震精密診断と補強方法, 筑波大学大学院修士論文, 2005.
- [2] 財団法人日本建築防災協会: 木造住宅の耐震精密診断と補強方法, 1985.
- [3] 境有紀, 神野達夫, 額綱一起: 建物被害と人体感覚を考慮した震度算定法の提案. 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, 2002.
- [4] 境有紀, 額綱一起, 神野達夫: 建物被害の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, No. 555, 85-91, 2002.
- [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」報告書, [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar\\_yosokuchizu/shubun.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_yosokuchizu/shubun.pdf)
- [6] 境有紀: 応答解析から見た地震動の破壊力, 最近の地震被害に学ぶ - 地震道徳性と地震荷重 -, 2005 年度日

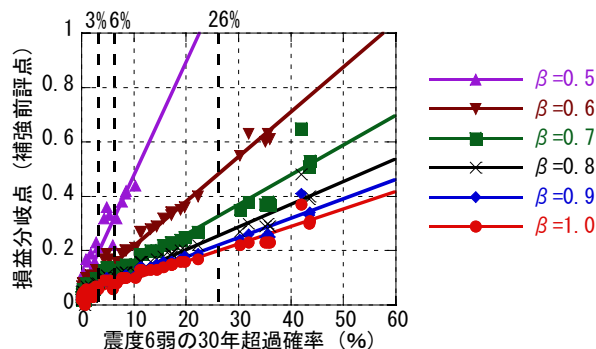


Fig. 11 Relationship between break-even point and probability that earthquakes more than seismic intensity 6 occur

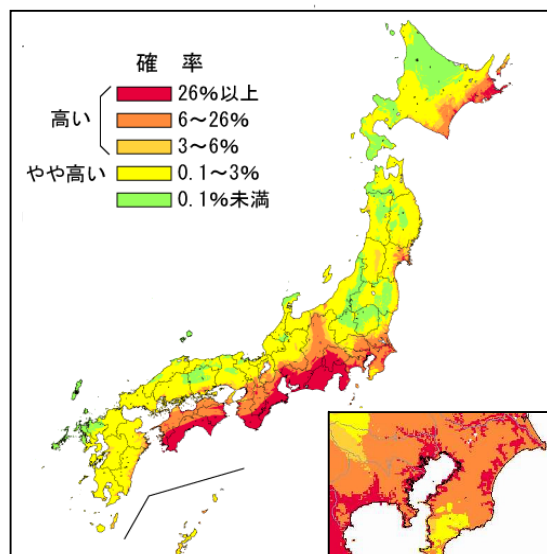


Fig. 12 Distribution of probability that earthquakes more than seismic intensity 6 occur in 30 years<sup>[5]</sup>

本建築学会大会 (近畿) 構造部門 (振動), パネルディスカッション資料, 15-18, 2005.

- [7] 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, 技報堂出版, 1986.

# 実際の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

飯塚裕暁\* (筑波大), 境有紀 (筑波大)

## Investigation on Cost-Effectiveness in Retrofitting of Existing Pre Code-Revision Wooden Houses by Seismic Intensity Index Corresponding to Actual Structural Damage

Hiroaki IIZUKA\* (Univ. of Tsukuba), Yuki SAKAI (Univ. of Tsukuba)

地震によって倒壊する建物の多くは現在の耐震規定を満たしていない既存不適格建物であり、これらの建物を耐震補強することが地震の人的被害の低減に繋がる。そこで、耐震補強促進の一助となる定量的データの提供を目的とし、木造家屋を対象に耐震補強の費用対効果を検討した。

検討の手順を Fig. 1 に示す。必要な情報として、耐震補強の費用、建物が全壊する震度と耐震診断評点の関係、地震発生確率、経年劣化による耐久性の低下がある。補強費用は、狩谷らによる補強前後の評点と費用の関係式を利用した。建物が全壊する震度として、建物被害と相関の高い1-2秒の周期帯における平均弾性加速度応答を基にした震度を利用し、ベースシア係数との関係を導いた。ベースシア係数と評点の関係は、被害関数から求めたベースシア係数の確率分布と耐震診断結果を比較し、評点 1.0 がベースシア係数 0.55 に相当するという結果を得た。地震発生確率は、地震調査研究推進本部による「全国を概観した地震動予測地図」を使用した。経年劣化には木造家屋の耐震性向上技術の関数形を用いた。

建物の建つ場所、経年劣化の速さ、築年数、補強費用のコストダウンをパラメータとして、費用対効果を評価した。結果の一例を Fig. 2 に示す。地震危険度の高い地点では、耐震補強が費用に見合った効果を期待できることがわかった。ただし、経年劣化の影響が大きいため、この傾向を正確に把握することが重要である。

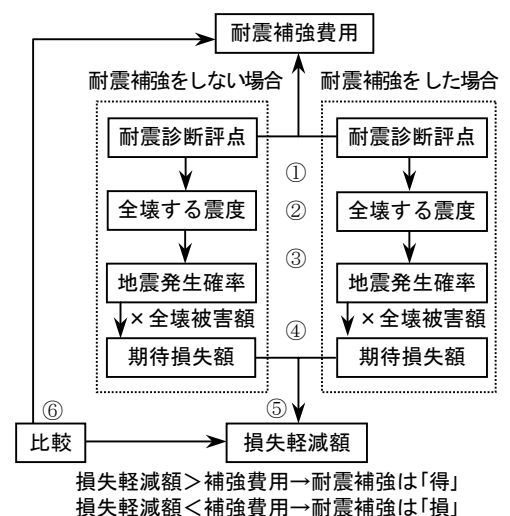


Fig. 1 Flowchart to estimate cost-effectiveness of retrofitting

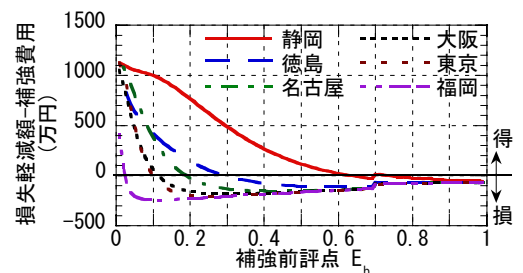


Fig. 2 Relationship between evaluation before retrofitting and the result of cost-effectiveness estimation