既存木造住宅の耐震補強事例を用いた耐震補強の費用対効果に関する試算 TENTATIVE CALCULATION OF COST-EFFECTIVENESS BASED ON SEISMIC RETROFITTING OF EXISTING WOODEN HOUSES

佐久間 順三*, 入江 康隆**

Junzo SAKUMA and Yasutaka IRIE

This paper describes the effectiveness of pre-repairing on total repairing cost prepared against earthquakes based on the seismic diagnosis and the seismic retrofit of thirteen existing wooden houses. We investigate the damage level by means of the relative displacement between upper and lower floors obtained by time-domain response analysis. The main results obtained from the investigations are as follows.

We show the regression equation between the pre-repairing cost and the disparity evaluated by seismic diagnosis of before and after seismic retrofit. After suffering the seismic damage, the necessary repairing cost of un-repaired house is about two to six times than that of pre-repaired house. This shows the effectiveness of pre-repairing on total repairing cost against earthquakes. Houses which evaluated low mark by seismic diagnosis have more effectiveness on total repairing cost.

Keywords : existing wooden house, seismic diagnosis, seismic retrofit, time-domain response analysis, damage level, cost-effectiveness

既存木造住宅, 耐震診断, 耐震改修, 時刻歴応答解析, 被害レベル, 費用対効果

1. はじめに

1995年「阪神淡路大震災」、2004年「中越地震」などによって多数の人命が奪われるなどの未曾有の被害を受け、2005年、中央防災会議は「建築物の耐震化緊急対策方針」を策定し、住宅の耐震化率を今後10年間で90%までに引き上げることを、全国的レベルの目標とした。その後、2007年「能登半島地震」、2007年「中越沖地震」、2008年「岩手宮城内陸地震」などの地震災害に見舞われ、多くの木造住宅が倒壊などの被害を受け、既存木造住宅の耐震補強化が喫緊の課題として、各分野で検討されている。

しかし、多くの研究者が発表している^{5), 7~9), 11), 12)}ように、耐震補強化は期待通りには進んでいない。遅延の原因がいくつか指摘されている。狩谷らは、①心理的側面の問題（意識の低さ）、②補強費用と補強効果の不透明性、③補強工事による日常生活への支障や手間、④支援制度上の問題、等が主な原因であることを指摘している²⁾。筆者らの実務経験からは、そのほかにも、設計施工実務者の知識不足から発生する意識の低さが、重大な要因となっているのではないかと考える。

表1 建物概要一覧

No	建物概要一覧															補強前				補強後				
	築年	面積(m ²)				屋根	外壁	既存耐震壁	金物	床	基礎	劣化	補強壁枚数	工期(日)	補強費用(千円)	補強費用/ΣA	2階		1階		2階		1階	
		1階	2階	合計	2/1階												桁行方向		梁間方向		桁行方向		梁間方向	
																	2lws(評点)	1lws(評点)	2lws(評点)	1lws(評点)	2lws(評点)	1lws(評点)	2lws(評点)	1lws(評点)
1	1979	58.76	53.83	112.59	0.92	桟瓦葺	モルタル	筋かい30×90	無	合板	無筋コンクリート	有	5	7	530	4,707	0.94	0.94	1.06	0.75	1.02	1.02	1.15	1.02
2	1979	65.67	61.05	126.72	0.93	石綿スレート	モルタル	筋かい45×90	無	合板	無筋コンクリート	無	3	7	257	2,028	1.18	1.38	1.11	0.89	1.18	1.38	1.11	1.08
3	1936	97.92	56.86	154.78	0.58	土葺瓦	土塗壁	土塗壁	無	火打ち+荒板	玉石基礎	有	46	30	3,052	19,718	0.50	0.46	0.35	0.40	1.18	1.36	1.02	1.08
4	1975	49.70	37.26	86.96	0.75	石綿スレート	モルタル	筋かい30×90	無	火打ち+荒板	無筋コンクリート	有	5	10	517	5,945	1.16	0.83	1.08	0.64	1.27	1.19	1.20	1.11
5	1975	78.05	62.11	140.16	0.80	桟瓦葺	モルタル	筋かい30×90	無	火打ち+荒板	無筋コンクリート	有	11	14	1,210	8,633	0.83	0.78	0.57	0.48	1.10	1.02	1.13	1.17
6	1978	53.41	38.92	92.33	0.73	桟瓦葺	モルタル	筋かい30×90	無	火打ち+荒板	無筋コンクリート	有	15	15	2,170	23,503	0.71	0.63	0.65	0.39	1.14	1.16	1.04	1.15
7	1926	68.73	53.00	121.73	0.77	土葺瓦	土塗壁	土塗壁	無	火打ちなし	無筋コンクリート	有	20	90	5,688	46,726	0.32	0.45	0.36	0.35	1.37	1.19	1.70	1.14
8	1974	114.28	37.26	151.54	0.33	桟瓦葺	土塗壁	土塗壁	無	火打ち+荒板	無筋コンクリート	無	9	17	860	5,675	1.10	1.05	0.38	0.44	1.10	1.05	1.11	1.12
9	1976	75.36	53.83	129.19	0.71	石綿スレート	モルタル	筋かい30×90	無	火打ち+荒板	無筋コンクリート	有	9	13	1,142	8,840	1.15	1.40	0.75	0.56	1.27	1.53	1.10	1.06
10	1975	59.62	41.41	101.03	0.69	石綿スレート	モルタル	筋かい30×90	無	火打ち+荒板	無筋コンクリート	有	9	20	1,340	13,263	1.25	1.03	0.98	0.95	1.25	1.03	1.42	1.49
11	1975	62.11	43.06	105.17	0.69	石綿スレート	モルタル	筋かい30×90	無	火打ち+荒板	無筋コンクリート	有	20	25	1,493	14,196	1.32	0.94	1.12	0.91	1.47	1.04	1.67	1.32
12	1980	68.73	29.81	98.54	0.43	桟瓦葺	金属	筋かい30×90	無	火打ち+荒板	無筋コンクリート	無	12	15	1,071	10,869	1.21	0.62	0.65	0.61	1.21	1.01	1.21	1.09
13	1981	72.04	45.55	117.59	0.63	桟瓦葺	モルタル	筋かい45×90	無	合板	無筋コンクリート	無	12	16	2,061	17,527	0.98	1.14	0.83	0.65	1.16	1.14	1.15	1.04
平均												13.54	21.46	1,645	13,972	0.97	0.90	0.76	0.62	1.21	1.16	1.23	1.14	

* (有)設計工房佐久間

** 宇都宮大学大学院工学研究科 准教授・工博

Sekkeikobo Sakuma, Ltd.

Assoc. Prof., Graduate School, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

本論文では、耐震化遅延の要因の一つと言われている「補強費用と補強効果の不透明さ」に着目し、耐震補強工事の費用対効果について、筆者らが実際に行った耐震診断、耐震補強設計、補強工事 13 事例（表 1 に示す）を用いて、分析を行い、その有用性を報告する。

なお、本研究では、50kine 程度の地震動が起こったことを前提としており、地震動の生起に関する不確実性や、また、耐震補強後に何年使用するかといった点は考慮に入れていない。

この論文の中で用いている耐震診断は、木造住宅の耐震診断と補強方法—木造住宅の耐震精密診断と補強方法（改訂版）「発行 財団法人日本建築防災協会」【以下、「基準」という】の中の一般診断法に基づいて行われている。以下、本論文内の診断に関する用語は「基準」に用いられているものである。

分析手順の概要を図 1 に示す。まず、Ⅰ．①事例 13 棟の耐震補強前後の評点と、②補強工事費を算定する。Ⅱ．③建物の骨格曲線を求め、④それを復元力特性に変換し、⑤時刻歴応答解析により、最大応答層間変形角を求める。Ⅲ．⑥⑦応答層間変形角に応じた被害レベルを決定し、⑧被害レベルに応じた必要改修工事費を算定する。Ⅳ．⑨地震被害前に補強工事を行った場合と行わなかった場合について、地震被害後の必要改修工事費を比較し、事前補強の有効性、すなわち費用対効果を分析する。

2. 耐震診断・耐震補強事例概要（13 棟）

2-1 建物概要

筆者らが 2005 年から 2009 年にかけて耐震診断・耐震補強設計・補強工事を行ってきた 13 棟の概要を表 1 に示す。No.3, 7(表 1 で影を付す)を除いたその他の建物の建築年は 1974 年から 1981 年までとなっており、所謂、「新耐震」以前の昭和時代の建物である。No.3, 7 は大正時代に建築されたものである。

No.3, 7 の屋根は土葺瓦屋根、内外壁は土塗壁となっており、「非常に重い建物」となっている。その他は、桟瓦葺屋根「軽い建物」が 6 棟、スレート屋根「軽い建物」が 5 棟となっている。No.3 は関西地域山間部に建築されている。その他は、関東地域に建築されているものである。No.3 は所謂伝統的工法住宅であり、東石の上に直接柱が設置されている石場建て工法で、主な耐震要素は土塗り壁・貫である。No.7 は大正時代後期の木造住宅ではあるが、石場建て工法ではなく、無筋コンクリート造布基礎の上に土台が配置され、土台は基礎にアンカーボルトで緊結されている。内外壁とも土塗壁ではあるが、一部、筋かいが設置されており、現在の在来軸組工法に近似した工法となっている。No.8(表 1 で影を付す)は比較的新しい建物（1974 年）ではあるが、内外壁とも土塗壁となっており、筋かいは設置されていない。無筋コンクリート造布基礎の上の土台は基礎にアンカーボルトで緊結されている。その他の建物は所謂在来軸組工法と言われるもので、主な耐震要素は筋かいとなっている。鉄筋探查機を用いて調査した結果、基礎は無筋コンクリート造布基礎であり、アンカーボルトが設置されていることを確認している。

2-2 補強前の建物の診断結果

一般診断法の必要耐力は「基準」の表 3.3「床面積当たりの必要耐力（kN/m²）」を用いている。屋根仕様に基づいて「軽い建物」「重い建物」「非常に重い建物」に分類している。すべての建物は、狭小間口、軟弱地盤、多雪地域、混構造に該当しないので、それらによ

図 1 費用対効果の分析手順

る必要耐力の割増は行っていない。床下・天井裏・小屋裏などの詳細な調査を行った結果、すべての建物の耐力要素は概ね判明したので、所謂「不明な壁」は存在しない。各耐力要素の強さは「基準」の表 3.5「工法と壁強さ倍率（k N/m）」に基づいて決定している。筋かい端部・柱・梁接合部は、釘またはかすがいで接合されている。接合部による低減係数、耐力要素の配置等による低減係数、劣化度による低減係数などは、「基準」に基づき算定している。

補強工事前の各建物の診断結果を表 1 に示す。1 階の評点は、X 方向 0.35～1.06、平均値 0.67、Y 方向 0.35～1.12、平均値 0.71、となっている。評点が低い No.3, 7, 8 は、耐震要素が土塗壁のみで、強度が大幅に不足しているものである。評点の高い No.10, 11 は、大規模開発団地内に建築されていて、筋かいが多く配置されている強度の高い建物である。

2 - 3 補強後の建物の診断結果

2-3-1 補強方法

耐震補強工法は、筋かい+構造用合板+金物補強、などの一般的に普及している工法を用いている。代表的な補強方法を図 2～4 に示す。これらの方法は、以下の①～⑤の利点がある。①材料費・施工費が安価である。②一般的に普及している工法で、誰でも知っていて、作業が容易である。③誤った作業を行う危険性が少ない。④耐震性能が明解である。⑤材料が入手しやすい。

特に強度、剛性の低い No.3, 7 の補強について説明する。No.3 は所謂伝統的工法であり剛性・強度共に低い建物であり、大地震時に大きな水平変位が生じ、多大な被害を受ける恐れがあることから、図 4 に示す構造用合板による耐力壁（強度・剛性・靱性にすぐれている）を用いて水平変位を小さくさせることとしている。1 階脚部が、玉石の上部を滑ったり浮き上がったりしないように、柱脚部を、増設した鉄筋コンクリート造底盤に金物で緊結している。No.7 は基礎が建物周囲地盤よりも低くなり土に埋もれた土台や柱が蟻害を受けていたことから、図 4 に示すような建物外周部に鉄筋コンクリート造布基礎を増設し、建物全体を耐震補強している。既存部分の劣化した箇所は撤去し新しい材料に取り換え、劣化していない既存部分には、薬剤散布などを行い、劣化の進行防止を行っている。

2-3-2 補強後の建物の診断結果

基本的には、補強工事後の建物の目標評点を 1.0～1.2 程度として設計している。これは、①大地震時の倒壊防止を主な目標として補強を行うこととし、多少の被害の出る小破・中破程度は許容する、②一般診断法による余裕度（精密診断法 1 より、評点が低くなっている。安全側である。）を考慮する、③施主への経済的負担を軽減する、などを考慮して決定されている。

補強工事後の建物の診断結果を表 1 右端に示す。1 階の評点は、X 方向 1.02～1.70、平均値 1.21、Y 方向 1.02～1.67、平均値 1.17、となっている。図 5 に補強前後の評点を示す。No.10, 11 は元々評点の高い建物ではあるが、施主の要望で評点 1.5 程度(倒壊しないレベル)まで補強を行っている。No.3 は劣化が進行し、かつ強度の低い建物であったことから、補強量を多くしている。

2-3-3 補強工事費

補強工事とは、地震被災前にあらかじめ行う工事のことで、表 1 に示す補強工事費は各施工会社の補強工事に要した実費である。リフォーム工事と合わせて行われたものが多い。全体工事費からリフ

図 2 筋かい+構造用合板

図 3 構造用合板

図 4 増設基礎+筋かい+構造用合板

図 5 補強前後の評点

ォーム工事費を差し引いた金額を補強工事費としている。リフォーム工事費と耐震補強工事費が明確に分離されていないものもあるが、工事項目を確認しながら、概ね、仕分けることが出来た。

表 1 で示した補強費用と床面積当たりの補強費とを、それぞれ図 6,7 に示す。図 6,7 によれば No.3, 7 の補強工事費が他と比べると、やや高額となっている。No.3, 7 は大正時代に建築された古い建物であり、補強前の建物評点が低く、耐震補強量が多くなったためである。表 1 から、補強工事費は 25.7 万円～568.83 万円（平均値 164.5

万円)となっている。表 1 から、床面積当たりの補強工事費は、2,028 円/㎡～46,726 円/㎡ (平均値 13,972 円/㎡) となっている。いずれも、大きなばらつきがある。これは、評点の上昇幅(補強後の建物評点から補強前の建物評点を差し引いた値)の違いなどによるものである。そこで、方向別の評点上昇幅、階数毎の評点上昇幅などを考慮した評点上昇幅(以下の式)と工事費との関係を検討する。

$$Iwi = \frac{\{Iw_{02} \times 2 - Iw_{2X} - Iw_{2Y}\} \times A_2 + \{Iw_{01} \times 2 - Iw_{1X} - Iw_{1Y}\} \times A_1}{(A_1 + A_2)}$$

Iwi : 評点上昇幅

Iw₀₂ , Iw₀₁ : 各階の補強後の建物の目標評点

Iw_{2X} , Iw_{2Y} : 2 階 X,Y 方向の補強前の建物評点

Iw_{1X} , Iw_{1Y} : 1 階 X,Y 方向の補強前の建物評点

A₁ , A₂ : 各階床面積 (㎡)

図 6 補強工事費(千円/㎡)

図 7 床面積あたり補強工事費
(千円/㎡)

図 8 評点上昇幅と補強工事費

図 9 耐力要素の骨格曲線

図 8 に、評点上昇幅(Iwi)と事前の耐震補強工事費との関係を示す。回帰直線を求めると、単位面積当たり補強工事費 $Cr = 17685Iwi$ となっていて、比較的良好な相関が得られる(相関係数 $r = 0.82$)。この式を用いると、目標評点、補強前の建物評点および床面積が決まれば、補強工事費が概算でき、補強計画を行う時、補強工事費の目安をたてることに役立つ。但し、このデータは軽い建物 5 棟、重い建物 6 棟、非常に重い建物 2 棟を用いて作成しているものであり、それぞれの必要補強工事費が異なる可能性があるため、補強計画にあたっては、注意が必要である。この工事費には共通仮設工事費、会社経費などの少額な固定費も含まれている。

補強後、大地震に遭遇した時、どの程度の被害を受け、改修費用がいくら必要になるか、また、補強していない時に、大地震に遭遇すると、どの程度の被害を受け、改修費用がいくら必要になるかについて、以下の手順で計算し、どちらがどの程度費用が安くなるかを確認する。

3. 時刻歴応答解析による最大応答層間変形角

3-1 骨格曲線の累加

各耐力要素の骨格曲線は「基準」資料編 4.2「一般的耐力要素の評価」に基づいて作成する。事例 13 棟に用いられた耐力要素(土塗壁 5.5 cm 未満、筋かい 30×90、45×90、モルタル塗り、石膏ボード、構造用合板)の骨格曲線を図 9 に示す。筋かいやモルタル、石膏ボードは最大耐力発生後急激に耐力が低下するが、構造用合板は急激な耐力低下はない。もともと強度の低い土塗壁は初期剛性も低く、塑性変形も大きい。既存木造住宅の主な耐力要素である筋かい(30×90 金物無し)と、筋かい(45×90 金物有り)+構造用合板の組み合わせによる耐震補強壁とを比較すると図 10 となり、強度・靱性とも大幅に向上することが分かる。(耐力壁の骨格曲線は、各要素の耐力の累加とする。)

建物全体の骨格曲線は、既往の論文(たとえば参考文献 8 など)に倣って図 9 に示した各耐力要素の骨格曲線に壁の長さを掛け、それぞれを累加することで求める。このようにして求めた建物 No.1 の骨格曲線を図 11 に示す。筋かい 30×90 金物無し、石膏ボード、モルタル壁の累加により建物全体の骨格曲線が作成されている。

No.3 のみ、土塗壁による小壁(腰壁・たれ壁)の骨格曲線を考慮しているが、その他の建物には小壁の骨格曲線を考慮していない。その理由は、No.3 の柱径が 12 cm 程度であり、「基準」資料編表 4.3「垂れ壁付独立柱の荷重変形関係計算結果」を使用することができないためである。また、小径柱は大地震時に折損し、耐力が期待できないと言われているためでもある。

なお、一般診断法方法 1(その他の耐力: $0.25Q_r$)を考慮して、耐力を向上させて骨格曲線を作成している既往論文もある⁸⁾など。

強度や靱性が異なる各耐力要素を単純に累加してもよいという論拠は、必ずしも明らかにされていないが、現状ではほとんどの既往の論文において単純累加が採用されていることから、本論文においてもそれらに準じて単純累加している。

3-2 時刻歴応答解析用復元力特性(骨格曲線)の作成

3-1 で作成した骨格曲線を、時刻歴応答解析用復元力特性に変換する。五十田・河合により、図 12 に示すような簡便で明解なモデルが提案されている¹³⁾。これは、全体の骨格曲線を Slip 骨格曲線と Bi-linear 骨格曲線に分解して Bi-linear+Slip モデルを作成したもので、木造住宅の振動の特性などを精度よく表現できるとしている。また、仮動的応答実験との整合性を確認している。その他の論文^{7,8)}でも同様のモデルが使用されている。五十田・河合モデルは、まず、降伏点荷重 P_y を壁倍率×1.96kN とし、その他の各折り曲げ点(強度・変位)を、実験から得られた復元力特性の形に基づき設定し、最終的に Bi-linear 骨格曲線と Slip 骨格曲線とを作成しているものである。本論文では、五十田・河合モデルの骨格曲線の作成手法を参考にして、時刻歴応答解析用復元力特性を作成する。3-1 で作成した骨格曲線の層間変形角 1/120 時の強度を降伏点とする。また、層間変形角 1/30 の時の強度を最大強度とする。図 11 に示すように、実際の建物骨格曲線では層間変形角 1/50 の時、最大強度となっているが、1/50 時と 1/30 時の強度がほぼ同程度であることから、五十田・河合モデルに合わせて、層間変形角 1/30 時の強度を最大耐力として、破線で示すような骨格曲線に修正している。その他

図 10 耐力要素の骨格曲線

図 11 建物No.1 全体の骨格曲線

図 12 五十田・河合モデル

図 13 建物No.1 の復元力特性

は五十田・河合モデルと同様のルールで、Bi-linear 骨格曲線と Slip 骨格曲線とを作成する。図 11 の骨格曲線を用いて、五十田・河合モデル (Bi-linear+Slip モデル) に適合させながら、時刻歴応答解析用復元力特性を作成し、図 13 に示す。

3-3 時刻歴応答解析による最大応答層間変形角

解析モデルは 2 質点系せん断モデルとする。質量は「基準」3.3.1 必要耐力【解説】に記載されている「固定荷重・積載荷重」に基づいて算定し、表 1 建物No.に合わせて、表 2 に質量の一覧表を示す。

応答解析は、市販の応答解析ソフト (Dynamic Pro, ユニオンシステム株式会社) を用いて行った。解析方法は Newmark の β 法 (衝

表 2 質量と階高

階	質量(t)													階高(m)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
2	8.36	12.54	21.52	8.57	14.28	8.97	21.21	11.22	12.34	9.48	9.89	6.22	10.40	2.80
1	9.18	14.38	26.41	10.40	16.93	11.83	21.82	33.96	16.72	13.26	12.85	12.03	16.21	2.90

図 14 BCJ-LEVEL2 と JMA 神戸との応答層間変位の比較

図 15 補強前の建物と補強後の建物の 1 階応答層間変位

撃加速度法) を用い、応答解析条件として、内部減衰定数は瞬間剛性比例型とし、1 次固有周期に対する減衰定数を 5% としている。

大変形時には P- δ 効果が影響することになるが、文献 8, 13, 15 においては、P- δ 効果を考慮せず応答解析されていることなどを参考にして、本論文においても、P- δ 効果については考慮しないこととする。P- δ 効果の影響については今後の検討課題とする。入力地震波は BCJ-LEVEL2, JMA 神戸 NS 成分を用い、最大速度を 50 cm/s としている。

時刻歴応答解析により求めた 1, 2 階最大応答層間変形角の値を、表 3 に示す。図 14 に示すように、JMA 神戸 NS 入力時の最大応答層間変形角が BCJ-LEVEL2 と比較してやや大きくなっているが、BCJ-LEVEL2, JMA 神戸 NS 入力時の計算結果は概ね、同等となっていることから、以下、BCJ-LEVEL2 入力時の計算結果を図化した図 15~20 に基づいて検討する。

補強前後の 1 階最大応答層間変位の比較を図 15 に示す。補強前建物の変位に比べて補強後建物の変位が小さくなっており、補強の効果が確認できる。例えば、No.5 では、X 方向の 1 階の応答層間変位は補強前建物 29.0 cm に対し、補強後建物 4.6 cm となっている。

1 階における評点と最大応答層間変形角との関係を図 16 (補強前建物)、図 17 (補強後建物) に示す。図 16, 17 では、ばらつきが大きいのが評点が高いほど 1 階最大応答層間変形角が大きくなる傾向にあることがわかる。ばらつきが大きい主な原因は、基準の評点が必要耐力と保有耐力とによって決定されることに対して、時刻歴応答解析では剛性・変形性能の影響を受け、たとえ強度が高くても復元力特性の性状によっては水平変位が大きくなったりするためである。図 16 において、応答層間変形角が 1/10 の建物の評点は、0.38 から 0.89 とばらついており、相関があまり高くない。

図 18 に、補強前建物と補強後建物の 1 階最大応答層間変形角の関係を示す。すべて、補強後建物の 1 階最大応答層間変形角が補強前建物のものよりも小さくなっている。値が同じものが 3 例あるが、これは耐震補強を行っていない方向である。図 19 に、補強前建物に対する補強後建物の評点比と最大応答層間変形角比との関係を示

表3 時刻歴応答解析による1,2階最大応答層間変形角と被害レベル

No.				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
補強前	BCJ-EVEL2	2階	X	1/169	1/345	1/9	1/233	1/271	1/184	1/12	1/102	1/185	1/167	1/142	1/188	1/165
			Y	1/269	1/133	1/138	1/123	1/196	1/163	1/16	1/137	1/213	1/87	1/148	1/103	1/199
		1階	X	1/71	1/10	1/17	1/13	1/10	1/12	1/17	1/10	1/37	1/31	1/36	1/30	1/36
				小破	大破	中破	大破	大破	大破	中破	大破	小破	小破	小破	中破	小破
			Y	1/6	1/36	1/8	1/76	1/11	1/38	1/12	1/12	1/9	1/45	1/47	1/38	1/10
	JMA神戸	2階		倒壊	小破	大破	小破	大破	小破	大破	大破	大破	小破	小破	小破	大破
			X	1/148	1/318	1/18	1/226	1/265	1/186	1/20	1/116	1/199	1/184	1/174	1/214	1/190
		1階	Y	1/292	1/153	1/152	1/123	1/219	1/183	1/41	1/134	1/213	1/81	1/140	1/90	1/212
			X	1/38	1/23	1/39	1/18	1/19	1/15	1/32	1/14	1/12	1/15	1/17	1/19	1/14
			Y	1/10	1/19	1/16	1/45	1/15	1/28	1/22	1/14	1/23	1/29	1/32	1/25	1/16
		大破	中破	中破	小破	大破	中破	中破	大破	中破	中破	小破	中破	中破		
補強後	BCJ-EVEL2	2階	X	1/169	1/163	1/16	1/158	1/123	1/49	1/18	1/10	1/147	1/101	1/106	1/133	1/82
			Y	1/151	1/133	1/28	1/123	1/128	1/138	1/16	1/25	1/100	1/64	1/144	1/113	1/101
		1階	X	1/71	1/40	1/74	1/54	1/63	1/115	1/137	1/36	1/52	1/126	1/157	1/121	1/81
				小破	小破	小破	小破	小破	小破	小破	小破	小破	小破	軽微	小破	小破
			Y	1/53	1/36	1/75	1/76	1/53	1/107	1/81	1/39	1/40	1/381	1/221	1/119	1/53
	JMA神戸	2階		小破	小破	小破	小破	小破	小破	小破	小破	小破	無被害	軽微	小破	小破
			X	1/148	1/163	1/13	1/151	1/110	1/32	1/15	1/10	1/126	1/50	1/47	1/45	1/86
		1階	Y	1/146	1/153	1/16	1/123	1/107	1/122	1/14	1/67	1/35	1/81	1/119	1/90	1/73
			X	1/38	1/21	1/40	1/32	1/47	1/86	1/103	1/26	1/39	1/86	1/117	1/77	1/51
			Y	1/32	1/19	1/29	1/45	1/32	1/60	1/57	1/18	1/19	1/234	1/149	1/25	1/40
		小破	中破	中破	小破	小破	小破	小破	中破	中破	軽微	小破	中破	小破

図16 1階における評点と応答層間変形角（補強前の建物）

図17 1階における評点と応答層間変形角（補強後の建物）

図18 補強前後の1階応答層間変形角の比較

図19 補強前と補強後の1階における評点比と応答層間変形角

す。補強後建物の補強前建物に対する評点比が上昇するほど最大応答層間変形角比は減少，すなわち補強後の層間変形角は小さくなっている。層間変形角比は，ほぼ0から0.5の範囲になっている。

4. 最大応答層間変形角に応じた地震被害レベルの推定

地震被害の推定方法について，いくつかの論文が出されている。岡田・高井は，東京都防災会議の震度階解説表の被害記録を，震度

表4 損傷度と層間変形角，被害レベル

損傷度	1	2	3	4	5	6
層間変形角	1/300	1/150	1/30	1/15	1/6	
被害レベル	無被害	軽微	小破	中破	大破	倒壊

図20 補強の有無による評点と損傷度

と被害率に関する防災エキスパートの知識とみなし、震度と被害率の関係として被害関数を提案している²⁾。つづいて個別建物の耐震診断値を保有強度の代表値として用い、個々の建物の被害程度を評価する損傷度関数を提案している⁶⁾。花井・皆川は、時刻歴応答解析による最大応答層間変形角に応じた損傷モードを作成している⁷⁾。田端・大橋は、1995年兵庫県南部地震の被害状況から被災度の判定を行い、評点と被災度の関係を示している⁴⁾。井戸田・梅村らは、時刻歴応答解析による最大応答層間変形角に応じた損傷度を定義し、岡田・高井論文による被害率関数との整合性を検証し、損傷度と被害率関数とが比較的良好な対応を示していると報告している⁸⁾。中村・前田らは、限界耐力計算手法を用い、被災度別被害関数（被災度と地震動強さの関係）を提案している⁹⁾。林らは、限界耐力計算手法を用い、経年劣化を考慮可能にした地震時損傷度予測手法を提案している¹⁰⁾。境・飯塚は、地震発生確率に全壊被害額を乗じたものを期待損失額として費用対効果を算定している¹¹⁾。五十田らは、模擬地震動を建物モデルに入力し、得られた最大層間変位より損傷費用を求めている。層間変形角に応じた被害レベルを定め、かつ、2004年新潟県中越地震の悉皆調査（日本建築学会報告）に基づき、建替え・補修の比率も考慮して損傷費用を定めている。家財の損傷費用も加算されている。¹²⁾

本論文では、五十田らの論文^{12)・14)}をそのまま引用して、時刻歴応答解析による1階最大応答層間変形角に応じた地震被害レベルを表4のように規定する。五十田らは実大実験により、相関変形角に応じた地震被害レベルを確認している。¹²⁾ここで図16、17で示した関係を、評点と層間変形角に応じた損傷度との関係として再整理して、図20に示す。損傷度ごとに平均値を黒塗りマークで示し、標準偏差をエラーバーで示す。いずれも評点が上がる程損傷度が低くなる傾向が認められる。これは、大橋らの結果と調和的である⁴⁾。

建物の被害レベルと費用割合、及び補修・建替え割合は、五十田ら¹²⁾と同じく、表5に示す値とする。費用割合とは新築時に必要な費用に対する補修費用の割合のことである。被害レベルが大きくなるほど、費用割合が大きくなっており、軽微の場合は、費用割合が少なく2%としているが、大破は初期費用と同額として100%としている。また、軽微な被害であっても、地震後わずかではあるが建替えを行っている実情もあることから、別に復旧状況割合を定め

表5 層間変形と損傷費用

被害レベル	基準	無被害		一部損傷		半壊	
	本論	無被害	軽微	小破	中破	大破	倒壊
層間変形角	rad	1/300		1/150	1/30	1/15	1/6
費用	補修	0.0	2.0	10.0	50.0	100.0	100.0
割合(%)	建替	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
復旧	補修	96.0	96.0	78.4	37.8	0.0	0.0
状況(%)	建替	4.0	4.0	21.6	61.3	100.0	100.0
費用	%	4.0	5.9	29.5	80.6	100.0	100.0
建物損傷費(円/㎡)		6,040	8,909	44,545	121,706	151,000	151,000
家財損傷費(円/㎡)		1,600	2,360	11,800	32,240	40,000	80,000
建物初期費用 151,000円/㎡、家財初期費用 80,000円/㎡

図21 応答層間変形角と損傷費用

ている。例えば、軽微の場合は、96%の建物が補修しており、4%の建物が建替えされているものとしており、大破の場合は、補修されるものが0%で、100%が建替えされているものとしている。これらの数値は、2004年新潟県中越地震の悉皆調査（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）から、五十田らが計算した数値である。補修費用割合と復旧状況割合を考慮して、被害レベルに応じた損傷費用割合（初期費用に対する必要改修費用の比）を計算している。即ち、軽微の場合、96.0（復旧割合）×0.02（費用割合）+4.0（復旧割合）×1.00（費用割合）=5.92%となる。大破、倒壊の場合は、100%建替えとなり、損傷費用割合は100%となる。損傷費用割合を表5の「費用(%)」欄に記入している。

5. 地震被害レベルと必要改修工事費との関係

地震被害レベルと損傷費との関係を表5の建物損傷費・家財損傷費欄に記入し、その数値を図21にグラフ化している。

表6 補強工事費と必要改修工事費

No.					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
必要改修工事費	補強工事費				円/㎡	4,707	2,028	19,720	5,945	8,633	23,503	46,726	5,675	8,846	13,263	14,202	10,874	17,531
	事前補強有	BCJ LEVEL-2	建物改修費	円/㎡	25,214	37,121	18,059	24,747	25,214	12,489	16,498	37,121	33,409	10,606	2,613	11,230	25,214	
			家財改修費	円/㎡	6,679	9,833	4,784	6,556	6,679	3,308	4,370	9,833	8,850	2,810	692	2,975	6,679	
			合計	円/㎡	36,600	48,982	42,563	37,248	40,526	39,301	67,595	52,629	51,105	26,678	17,507	25,079	49,424	
			合計金額	千円	4,121	6,207	6,588	3,239	5,680	3,629	8,228	7,975	6,602	2,695	1,841	2,471	5,812	
		JMA神戸 NS	建物改修費	円/㎡	41,761	89,217	47,206	41,761	22,273	23,445	89,217	95,986	15,539	11,422	59,977	33,409		
			家財改修費	円/㎡	11,063	23,634	12,505	11,063	11,063	5,900	6,211	23,634	25,427	4,116	3,026	15,888	8,850	
			合計	円/㎡	57,530	114,879	79,431	58,768	61,456	51,676	76,381	118,526	130,258	32,918	28,649	86,739	59,790	
			合計金額	千円	6,477	14,557	12,294	5,111	8,614	4,771	9,298	17,961	16,828	3,326	3,013	8,547	7,031	
	事前補強無	BCJ LEVEL-2	建物改修費	円/㎡	151,000	131,471	138,794	124,711	131,471	126,588	126,588	131,471	134,726	43,108	37,121	44,545	131,471	
			家財改修費	円/㎡	80,000	34,827	36,767	33,036	34,827	33,533	33,533	34,827	35,689	11,419	9,833	11,800	34,827	
			合計	円/㎡	231,000	166,297	175,561	157,746	166,297	160,122	160,122	166,297	170,414	54,527	46,954	56,345	166,297	
			金額(千円)	千円	26,008	21,073	27,173	13,718	23,308	14,784	19,492	25,201	22,016	5,509	4,938	5,552	19,555	
		前/後	比	6.31	3.40	4.12	4.24	4.10	4.07	2.37	3.16	3.33	2.04	2.68	2.55	3.36		
		JMA神戸 NS	建物改修費	円/㎡	131,471	112,061	112,061	95,986	121,706	121,706	72,604	123,101	126,588	121,706	103,550	89,217	123,101	
			家財改修費	円/㎡	34,827	29,685	29,685	25,427	32,240	32,240	19,233	32,610	33,533	32,240	27,431	23,634	32,610	
			合計	円/㎡	166,297	141,746	141,746	121,412	153,946	153,946	91,836	155,710	160,122	153,946	130,981	112,851	155,710	
	金額(千円)		千円	18,723	17,962	21,939	10,558	21,577	14,214	11,179	23,596	20,686	15,553	13,775	11,120	18,310		
前/後	比	2.89	1.23	1.78	2.07	2.50	2.98	1.20	1.31	1.23	4.68	4.57	1.30	2.60				

建物の地震被害による改修の必要性は、主に、1 階の損傷程度によって決定されることが多いと考え、本論文では、1 階の地震被害レベルを用いて、必要改修工事費全体を算定することとしている。1 階 X 方向と Y 方向の必要改修工事費が異なる場合は、大きい方の費用を採用することとしている。

損傷費用とは地震後の必要改修費用のことで、これを本論文では、必要改修工事費という。また、一般的な木造住宅の建築初期費用を 151,000 円/㎡と仮定する。家財初期費用は五十田ら¹²⁾と同様にし、一人当たり 300 万円とし、4 人家族 1200 万円とする。床面積当たりでは 1200 万円/150 ㎡=8 万円/㎡となる。それぞれの単価に費用 (%) を掛けて、各点 (小破, 中破, 大破) の建物損傷費・家財損傷費を算出する。表 5 の中の建物損傷費を算定してみると、例えば、小破の最大値は費用 (%) 29.5% に建築初期費用 151,000 円/㎡を乗じて 44,545 円/㎡となり、中破の最大値は費用 (%) 80.6% に建築初期費用 151,000 円/㎡を乗じて 121,706 円/㎡となる。それぞれの中間の値は直線補間とする。小破から大破までの家財の費用 (%) は、建築の費用 (%) の 1/2 とし、倒壊では 1/1 とする。文献 16 において、家財の損傷割合は、一部損・半壊で 15%, 全損で 30% となっており、本論文と近似している。即ち、小破の最大値は、費用 (%) 29.5% の 1/2 に家財初期費用 80,000 円/㎡を乗じて 11,800 円/㎡となり、中破の最大値は費用 (%) 80.6% の 1/2 に家財初期費用 80,000 円/㎡を乗じて 32,240 円/㎡となる。

6. 各建物ごとの補強工事費と必要改修工事費

各建物ごとの補強工事費と必要改修工事費を表 6 に示す。事前補強有の建物の総工事費 (補強工事費+必要改修工事費) が事前補強無建物の必要改修工事費よりも小さければ、即ち、必要改修工事費/総工事費 ≥ 1.0 であれば補強効果があるということになる。

表 6 において、建物No.5 を例にとり、該当欄に影を付けて数値を示す。事前補強有の場合、補強工事費は 8,633 円/㎡、建物改修費は 25,214 円/㎡、家財改修費は 6,679 円/㎡、それらの合計として総工事費は 40,526 円/㎡となる。一方、事前補強無とした場合、建物改修費は 131,471 円/㎡、家財改修費は 34,827 円/㎡、それらの合計として必要改修工事費は 166,297 円/㎡となる。この結果を用いると、必要改修工事費/総工事費=166,297/40,526=4.10 となり、事前補強の効果が確認される。このようにして得られた 13 棟について必要改修工事費と総工事費との関係を図 22 に示す。

さらに、総工事費に対する必要改修工事費の割合である工事費比率を求め、これと補強前の評点との関係を図 23 に示す。表 6、図 23 から、工事費比率は 2.04~6.31、平均値は 3.26 となっている。補強無の場合の評点が低いほど (弱い建物ほど)、耐震補強効果が高いと予測していたが、この図では明確な関係が見出せない。補強無の場合の評点が高い 2 棟 (建物No.10,11) は工事費比率が低い、すなわち、補強効果が低いという結果になっている。工事費比率が 6.31 と高い建物No.1 は耐震補強費が非常に低価格であったことから、必要改修工事費/総工事費が高くなっている。

7. 耐震補強有建物の費用対効果

以上のまとめとして、図 24 に、耐震補強有建物の費用対効果を示す。傾向をわかりやすく把握するために、横軸を 2・3・3 で定義し

図 22 事前補強有の場合の総工事費に対する事前補強無の場合の改修工事費

図 23 補強前評点と工事費比率

図 24 補強無建物の必要改修工事費と補強有建物の総工事費

た評点上昇幅、縦軸を補強無建物の必要改修工事費 (円/㎡) および補強有建物の総工事費 (円/㎡) とする。耐震補強を行っていない建物 (補強無建物) を△, 耐震補強を行った建物 (補強有建物) を●と表示している。△よりも●が低ければ、費用対効果が有効であることを表す。

補強無建物の必要改修工事費平均値は 144,460 円/㎡、補強有建物

の総工事費平均値は 41,172 円/㎡となっている。工事費の平均値の割合は $144,460/41,172=3.51$ となっている。すべての建物において、補強有建物の総工事費が補強無建物の必要改修工事費を下回っており、事前に補強工事を行うことによって、費用対効果が、有効であるということが確認できる。

補強無建物の評点が高い建物は費用対効果が低く（必要改修工事費/総工事費=2.02, 2.68）になっている。これは、もともと評点の高い建物は、補強後の損傷度に差が少ないためである（補強の有無によらず小破となっている）。

外壁が鉄板波板の軽い建物も費用対効果が低く、必要改修工事費/総工事費=2.25 となっている。

本論文で報告した建物は、補強後、大地震に遭遇した時、試算結果では全て小破となり、倒壊しないとなっている。しかし、倒壊しない場合であっても被害建物の改修工事費用は必要となる。そのことを、住民に事前に説明しておく必要がある。

8. まとめ

以上、耐震補強を行った建物と耐震補強を行わなかった建物の地震災害における費用対効果について、事例 13 棟を用いて試算した結果を明らかにした。

- ・耐震診断、補強設計、補強工事資料より、評点上昇幅（Iwi）と耐震補強工事費との相関関係を求め、単位面積当り補強工事費 Cr（千円/㎡）=17685Iwi（相関係数 $r=0.82$ ）となっていることを示した（図 8）。

- ・各建物の復元力特性を耐力要素の重ね合わせにより作成し、時刻歴応答解析を行い、1,2 階最大応答層間変形角を求め、層間変形角に応じた損傷度を計算して、必要改修工事費を算定した（図 13,表 3, 図 21,表 6）。

- ・耐震補強を行っていない建物の必要改修工事費が、耐震補強を行っている建物の総工事費（事前に行った耐震補強工事費と必要改修工事費を合計したもの）を上回っており、その比率は 2.04~6.31 となっていて、すべての建物の費用対効果が認められた（図 23）。

- ・評点上昇幅（Iwi）が大きくなると総工事費（円/㎡）は少し増加する。総工事費 Ct（円/㎡）=11139Iwi+32114（円/㎡）（相関係数 $r=0.42$ ）となっている（図 24）。

- ・必要改修工事費の平均値は 144,460（円/㎡）、総工事費の平均値は 41,172（円/㎡）であり、その比率は $144,460/41,172=3.51$ となっている（図 24）。

- ・補強前評点が高い建物や外壁が軽量の建物は比較的費用対効果が低くなっている（図 24）。逆を言えば相対的に耐震性能の低い建物の費用対効果は高いこととなっている。

本論文では、建設地、地震発生予測率、経年劣化、地震レベルなどの要素が考慮されていないので、あくまでも、事前補強すべきかどうかの比較検討用資料として報告したものである。資料が少ないが、概ねの傾向は確認できた。

今後資料を増やし、建設地など、他の要素を加味しながら、さらに費用対効果について研究を進めなければならないと考えている。

謝辞

本論文を作成するにあたり、河合直人建築研究所構造研究グループ上席研究員、五十田博信州大学准教授に貴重な助言を頂きました。耐震診断・補強に関して、財団法人日本建築防災協会から貴重な助言を頂きました。費用対効果などに関する資料収集にあたって神田亮日本大学教授のご協力を頂きました。資料整理を行うに当たり、板橋清子 Ai 設計所長のご協力を頂きました。助言、ご協力頂きました各位に感謝の意を表します。最後に、本論文の整理に協力して頂いた、深谷将太郎君（宇都宮大学修士課程）、北村謙太郎君（宇都宮大学学部 4 年）に感謝します。

参考文献

- 1)財団法人日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法-木造住宅の耐震精密診断と補強方法（改訂版）
- 2)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
- 3)五十田博：平成 16 年新潟県中越地震における木造住宅の被害，日本建築学会北陸支部研究報告集，第 48 号，pp.33-36，2005.7
- 4)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
- 5)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,pp.263-272，2005.11
- 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，第 582 号，pp.31-38，2004.8
- 7)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
- 8)井戸田秀樹，嶺岡信悟，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
- 9)中村匠，前田匡樹，三辻和弥：宮城県の耐震診断結果に基づく木造住宅被害関数の構築，日本建築学会東北支部研究報告会，pp.115-118，2007.6
- 10)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，第 615 号，pp.77-84，2007.5
- 11)境有紀，飯塚裕暁：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，その 1,その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造Ⅲ，pp.375-378，2006.9
- 12)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，第 637 号，pp.519-526，2009.3
- 13)五十田博，河合直人：木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデル-木造建物の地震動時挙動に関する研究-，日本建築学会構造系論文集，第 616 号，pp.157-163，2007.6
- 14)高橋雄司，正木信男，穴原範，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，第 591 号，pp.25-33，2005.5
- 15)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
- 16)金子美香，吉村昌宏，今井卓二：家財の地震被害予測手法の検討（その 3）世帯の家財被害額の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），構造Ⅲ，pp.317-318，2009.8

（2010年7月9日原稿受理，2010年11月29日採用決定）