

倒壊シミュレーション解析による木造住宅の耐震補強効果の評価

西川隼人¹・高谷富也²

要旨：本研究では、強震時での ACM ブレース工法による木造住宅の耐震補強効果を調べるために、倒壊シミュレーション解析を行い、木造住宅の挙動や倒壊過程を評価した。まず、既往研究や実験結果に基づき、木造住宅を構成する部材のパラメータを設定した。続いて、振動実験とシミュレーションによって木造住宅の振動特性を評価したところ、共振振動数が概ね対応していることが分かった。さらに、震度 6 強の入力地震動により補強前後の木造住宅の倒壊シミュレーションを行った結果、補強後の木造住宅の被害が小さいという結果が得られた。

キーワード：木造住宅、耐震補強、倒壊シミュレーション

1. はじめに

木造住宅の耐震性を評価する方法として起振機を用いた振動実験が広く用いられている。著者ら¹⁾はこれまで、著者の一人²⁾が開発した ACM ブレース工法によって耐震補強を実施した木造住宅を対象に補強前後で起振機による振動実験を行っている。実験で得られた振動波形から木造住宅の共振振動数を評価したところ、補強後の方が共振振動数が高くなっており、ACM ブレース工法による耐震補強効果を確認することができた¹⁾。起振機による振動実験は震度 1 程度の弱い揺れで簡単に構造物の耐震性を評価できる優れた手法であるが、構造物に大きな被害をもたらすと考えられる強震時での耐震補強の有効性までは評価できない。

本研究では起振機による振動実験では調べることのできない強震時での耐震補強効果を評価するために木造住宅の倒壊シミュレーション解析を行い、構造物の挙動を調べることにする。まず、今回、用いる倒壊シミュレーションの概要や解析モデルについて説明する。続いて、振動実験と倒壊シミュレーションによって木造住宅の振動特性を評価、比較する。最後に震度 6 強の入力地震動を与えた場合の木造住宅の倒壊シミュレーション結果を示す。なお、本研究の内容の一部は国際会議³⁾で発表している。

2. 倒壊シミュレーション

2.1 倒壊シミュレーションの概要

木造住宅の挙動、および倒壊過程は木造住宅倒壊

解析ソフトウェア Wallstat^{4), 5)}によって評価する。このソフトは個別要素法を基礎理論とした解析手法によるものであり、部材の折損・飛散といった極端な非線形性を考慮することが可能なため、木造住宅の倒壊過程を精度良く再現することができる。

2.2 倒壊解析モデル

倒壊解析ソフトウェアでは木造住宅の重量と構成部材の力学特性を設定し、解析モデルを構築する。木造住宅の重量は Fig.1 のように木造住宅を 3 つの質点に置き換え、それぞれに重量を割り振る。

木造住宅を構成する部材は軸組、柱と梁の接合部、鉛直構面および筋交構面から成っており、弾塑バネや回転バネによってモデル化する。

木造住宅は、Fig.2 に示すような塑性回転バネ（塑性ヒンジ）と弾性梁要素でモデル化される。塑性回転バネは、Fig.2 に示すように M- θ 関係で定義された骨格曲線で定義されるもので、最大曲げモーメントを越えるとモーメントが低下し、0 になった時点でピン結合へと変化し、部材が折損したものと判断される。

柱と梁の接合部のモデル化を Fig.3 に示す。Fig.3 (a)より、接合部は回転バネと弾塑性バネでモデル化される。Fig.3(b)に示す圧縮引張の弾塑性バネの履歴特性は、片側弾性と片側スリップ型で設定され、Fig.3(c)に示す回転バネの履歴特性はスリップ型となっており、回転バネは強軸と弱軸の各方向に独立に作用するように設定されている。柱と梁の接合部は引張バネまたは回転バネのいずれかが、最大耐力あるいは最大曲げモーメントを越えて 0 になった場合に破断したと判断される。

Fig.4 は鉛直構面、Fig.5 は筋交構面をモデル化した

1 舞鶴工業高等専門学校 教育研究支援センター主任技術職員
2 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科教授

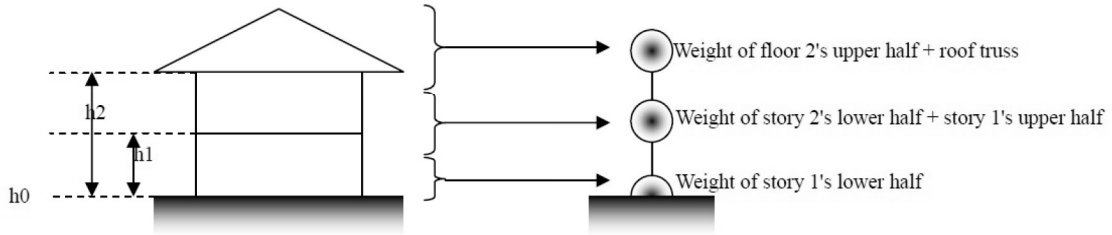


Fig. 1 Weight of floor in the analytical model of wooden house⁵⁾

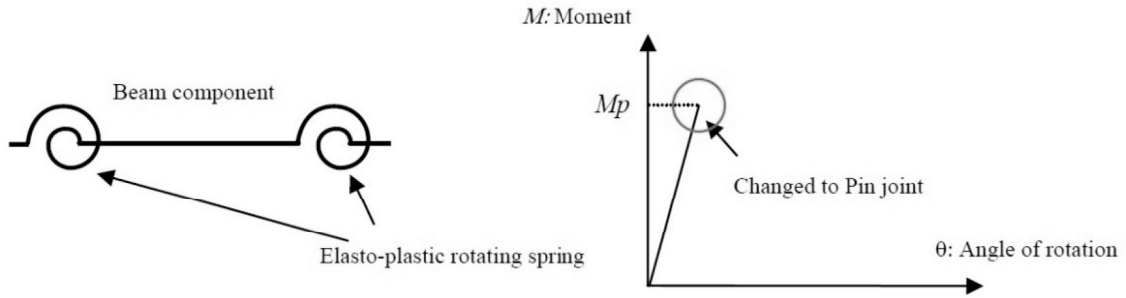
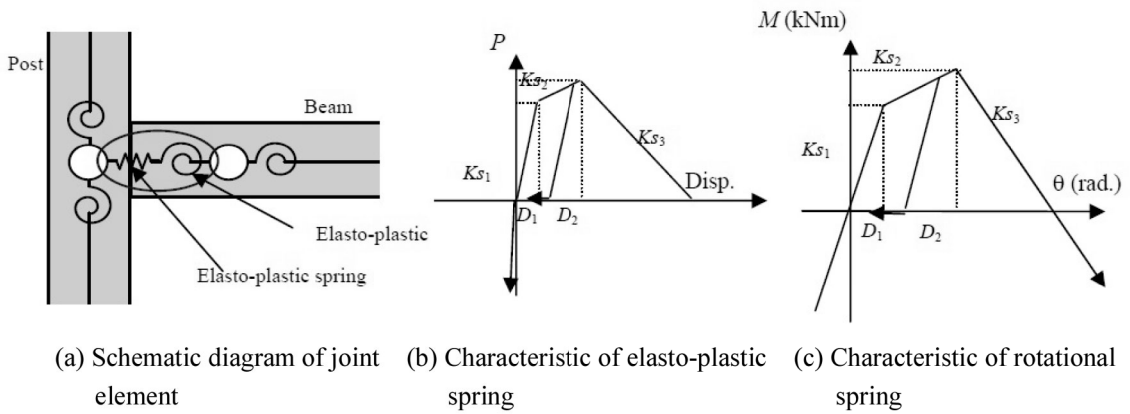


Fig. 2 Schematic diagram and skeleton curve of frame spring⁵⁾



(a) Schematic diagram of joint element (b) Characteristic of elasto-plastic spring (c) Characteristic of rotational spring

Fig. 3 Outline of joint modeling⁵⁾

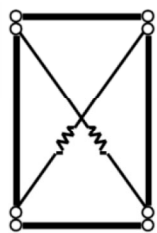


Fig. 4 Shear wall spring⁵⁾

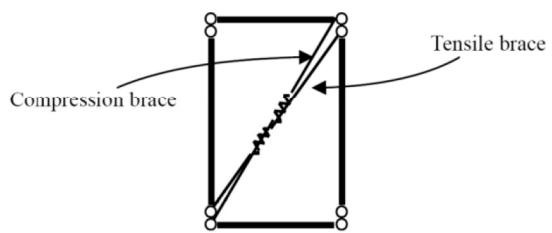


Fig. 5 Outline of bracing shear wall⁵⁾

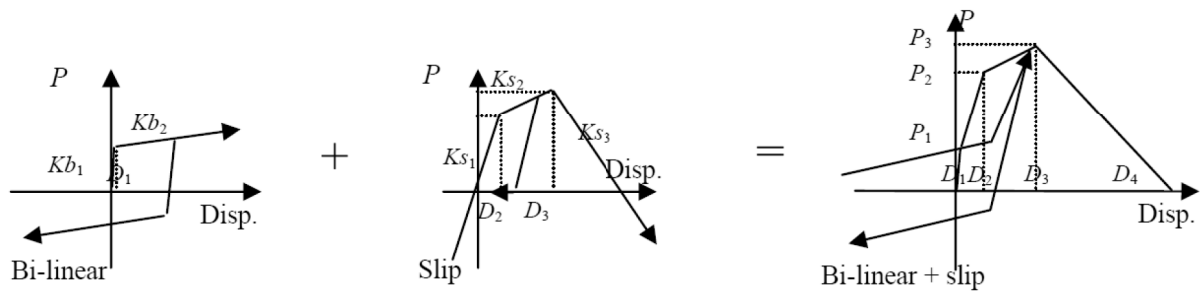


Fig. 6 Hysteretic characteristics of shear wall and bracing⁵⁾

Table 1 Parameters for hysteretic characteristics of vertical shear wall⁵⁾

| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | h |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | (kN) | | | | (m) | | | | (%) |
| Clay Wall | 0.5 | 1.75 | 2.0 | 0.0 | 0.010 | 0.05 | 0.10 | 0.5 | 2 |
| Lath Mortar Wall | 1.0 | 3.50 | 4.3 | 0.0 | 0.002 | 0.01 | 0.05 | 0.2 | 2 |
| Structural Plywood | 3.0 | 9.50 | 10.5 | 0.0 | 0.010 | 0.06 | 0.12 | 0.3 | 2 |

h : viscous damping factor

Table 2 Parameters for hysteretic characteristics of elasto-plastic spring^{5), 6)}

| | Ks_1 | Ks_2 | Ks_3 | D_1 | D_2 |
|----------------|--------|---------|---------|--------|-------|
| | (kN/m) | | | (m) | |
| Stub Tenon | 900 | -18.919 | -33.333 | 0.0015 | 0.02 |
| Corner Bracing | 5,128 | 651 | -154 | 0.0027 | 0.015 |

Table 3 Parameters for hysteretic characteristics of bracing spring⁵⁾

| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | h |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | (kN) | | | | (m) | | | | (%) |
| Timber Brace | 0.500 | 2.500 | 2.800 | 0.000 | 0.001 | 0.015 | 0.050 | 0.250 | 2 |
| ACM Brace (e-plate) | 3.193 | 6.387 | 9.580 | 0.000 | 0.010 | 0.021 | 0.031 | 0.043 | 2 |

ものである。鉛直構面はトラスバネをブレース置換することで、筋交構面は1本の筋交に対して圧縮と引張の2本のトラス要素に配置することでモデル化される。鉛直構面と筋交構面の履歴特性は、Fig.6のバイリニア型とスリップ型の履歴則で表現される。

2.3 解析パラメータと対象木造住宅

Table 1 に解析の際に設定した鉛直構面(土壁、ラスモルタル壁、構造合板)のパラメータ、Table 2 に接合部(ほぞ、火打ち金物)のパラメータ、Table 3 に筋交、ACM ブレースのパラメータを示す。土壁、ラスモルタル壁、構造合板、ほぞ、筋交のパラメータは中川⁵⁾、火打ち金物は田島ら⁶⁾、ACM ブレースは著者の一人が実施した実験結果に基づき設定した。

対象とした木造住宅は昨年、ACM ブレース工法による耐震補強や振動測定を実施した兵庫県内のW邸である。Fig.7 に耐震補強前後の解析対象住宅の平面図と振動測定の際に設置した起振機と加速度計の配置を示す。起振機と加速度計はいずれも2階に設置した。耐震補強工事は1階外壁のACM ブレースや火打ち金物、構造合板による。

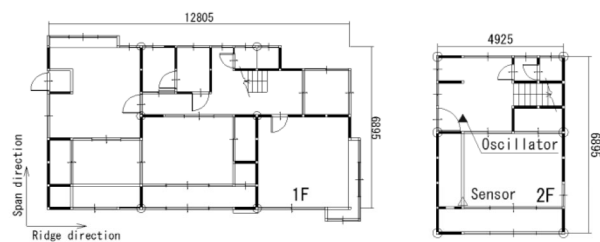
3. 木造住宅の振動特性評価

3.1 振動実験による伝達関数

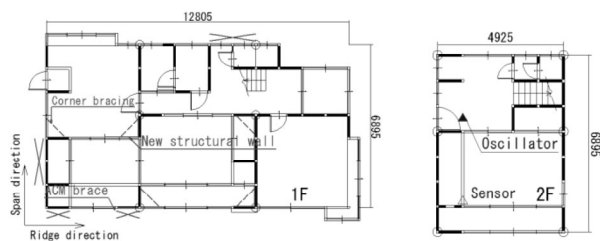
本研究で用いた伝達関数 $H(f)$ を式(1)に示す。

$$H(f) = \frac{F_1(f)}{F_2(f)} \quad (1)$$

ここで、 $H(f)$ は伝達関数、 $F_1(f)$ は加速度計の波形、



(a) Before seismic retrofit



(b) After seismic retrofit

Fig.7 Location of sensors (open triangle) and an oscillator (solid triangle) at W-house

$F_2(f)$ は起振機の波形から求めたフーリエスペクトルである。

W邸の振動特性を表す伝達関数 $H(f)$ は、式(1)に示すように、振動実験の際に起振機と加速度計で得られた振動波形を用いて評価した。

Fig.8 に桁行方向、梁間方向の伝達関数を示す。伝達関数を見ると、桁行方向、梁間方向いずれも1次と2次のピークが明瞭に見られる。また、耐震補強前後で伝達関数を比較すると、補強後の方が共振振動数が高くなっており、補強の効果がうかがえる。

3.2 Wallstatによる伝達関数

Wallstat の倒壊解析に用いた木造住宅モデルが実際の木造住宅の振動特性と対応しているかを確認するために、振動計測で得られた伝達関数と Wallstat によるものを比較する。

Wallstat より得られた耐震補強前後の桁行と梁間方向の伝達関数を Fig.9 に示す。Wallstat による伝達関数は、振幅が小さい正弦波を入力とした場合の1階と2階のフーリエスペクトルの比から求めた。

Wallstat の解析結果から得られた伝達関数は起振機による伝達関数に比べてピークが明瞭でないが、1次共振振動数は概ね対応していることが分かる。また、補強前後で伝達関数を比較すると補強後の共振振動数が高振動数側に移動しており、Wallstat による倒壊解析からも ACM ブレース工法による耐震性の向上がうかがえる。

4 Wallstatによる強震時の木造住宅挙動の評価

4.1 入力地震動特性

前節では微弱な揺れを用いた倒壊解析によって ACM ブレース工法の耐震補強効果を確認した。次に、大きな入力を与えた際の木造住宅モデルの挙動を調べることにし、強震時における耐震補強の効果調べることにする。

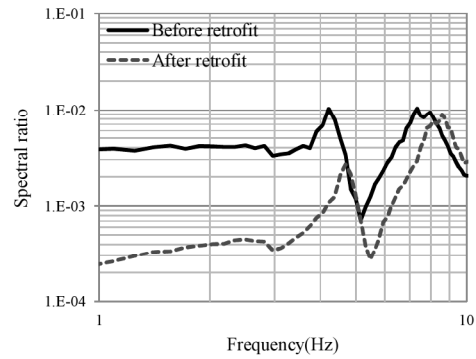
Table 4 に入力地震動として用いた地震観測記録の諸元を示す。倒壊解析に用いた観測記録はいずれも震度6強であるが、入力地震動の振動数特性の違いによる木造住宅の損傷度の差異を調べるために、様々な卓越振動数を持つ記録を選定した。

Fig.10 に入力地震動として用いた地震観測記録の変位波形、Fig.11 に加速度フーリエスペクトルを示す。Fig.11の(c)JR 鷹取波の加速度フーリエスペクトルは木造住宅の全壊率と相関が高いとされる振動数帯(0.5~1Hz)⁷⁾の振幅が大きいことが分かる。

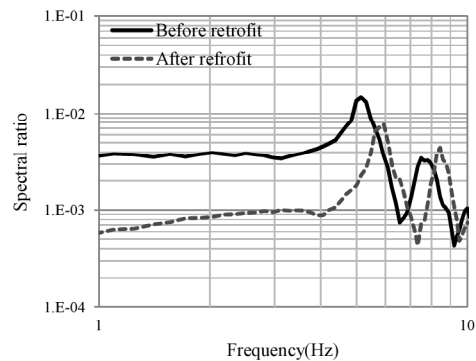
4.2 木造住宅の挙動と応答波形

Fig.12~19に Table 4 に示す観測記録を入力地震動とした場合の木造住宅モデルの挙動アニメーションと1階と2階の応答変位波形を示す。住宅モデルは損傷度が大きくなる程、外壁の色が濃い灰色に変化する。

まず、Fig.12, 13に KiK-net 東成瀬(計測震度=6.4)を入力地震動とした場合の木造住宅の挙動を見ると、補強有り・無しともに入力してから15秒後には木造住宅モデルの外壁に軽微な損傷が生じている。補強無しの場合、最終的には1階手前側の屋根が崩落しており、壁も一部、崩れている。しかし、補強有りの場合は屋根が若干傾いているものの、屋根の落下や外壁の大きな損傷は見られない。変位波形を見ると、補強無しの場合、1階では16秒付近で変位が急

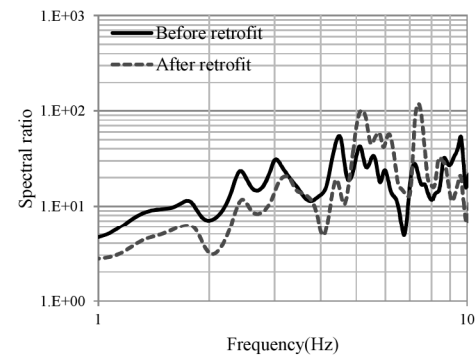


(a) Ridge direction

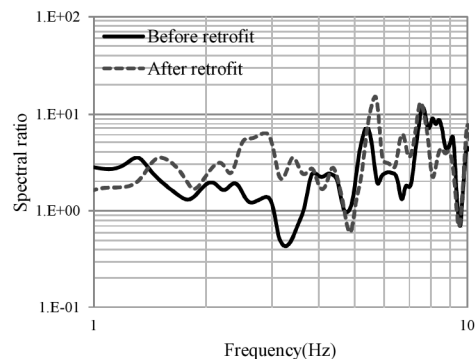


(b) Span direction

Fig.8 Transfer functions obtained from an oscillator-measurement system



(a) Ridge direction



(b) Span direction

Fig.9 Transfer functions obtained by Wallstat

激に大きくなり、残留変位が生じているが、補強有りでは1階、2階ともにほとんど残留変位を生じていない。

Table 4 Earthquake ground motion records

| Record Name | I_{JMA} | Peak Ground Acceleration (cm/s ²) | Peak Ground Velocity (cm/s) | f_p (Hz) | Duration (s) |
|------------------------|-----------|---|-----------------------------|------------|--------------|
| KiK-net Higashi Naruse | 6.4 | 2,449 | 76 | 3.06 | 50 |
| JMA Kobe | 6.4 | 818 | 91 | 1.43 | 15 |
| JR Takatori | 6.4 | 657 | 126 | 0.81 | 30 |
| K-NET Kashiwazaki | 6.3 | 638 | 113 | 0.45 | 15 |

I_{JMA} : JMA seismic intensity

f_p : peak frequency of root mean square value of Fourier spectrum

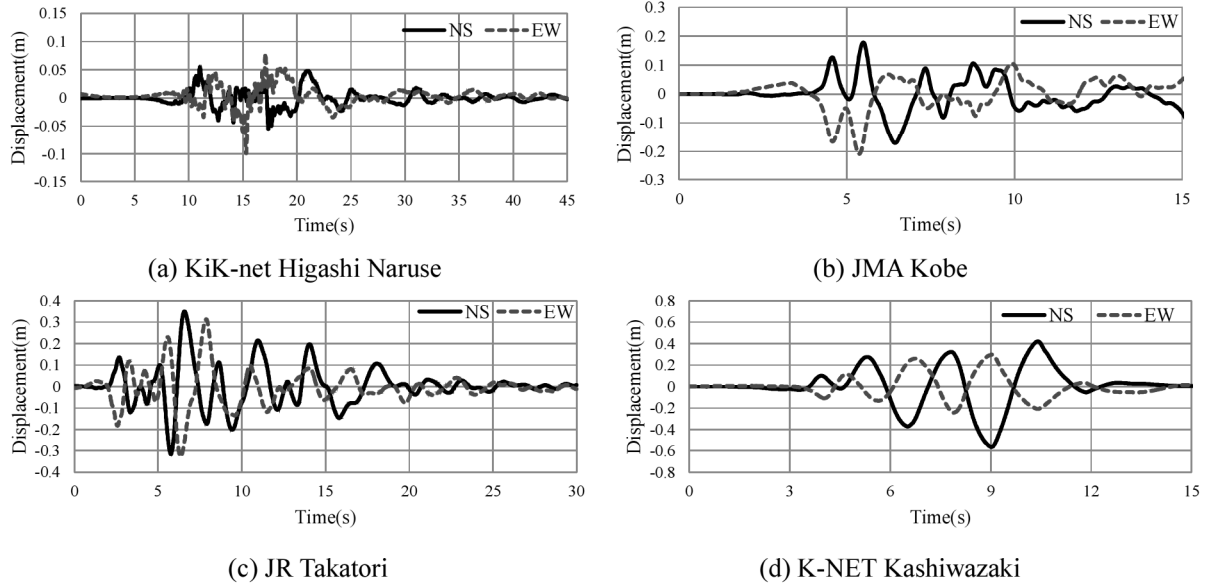


Fig. 10 Displacement waves in listed Table 1

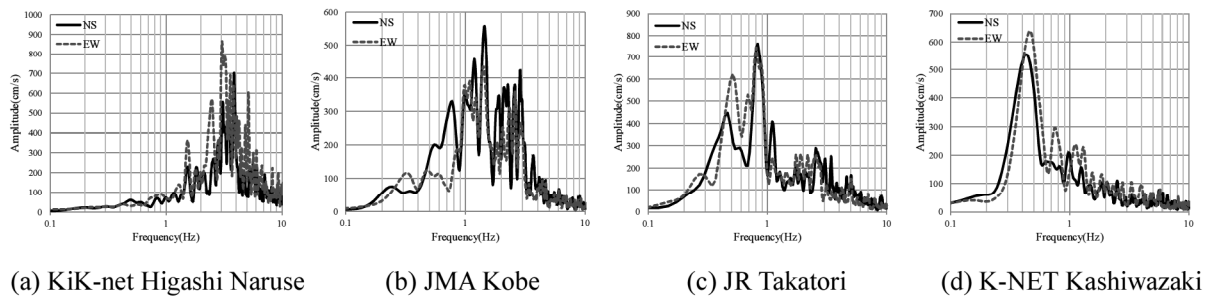


Fig. 11 Acceleration Fourier spectra

JMA 神戸を入力地震動とした場合の倒壊解析結果を示した Fig.14, 15 において、補強無しでは入力から 6 秒後には外壁に大きな損傷が生じるとともに、手前の屋根の一部が崩落しており、最終的には 1 階の屋根は全て落下している。応答変位波形を見ると 6 秒付近で急に振幅が大きくなっており、住宅モデルの挙動と対応していることが分かる。一方、補強有りの場合は、外壁の一部に軽度の損傷が見られるものの、屋根や外壁に大きな被害は見られない。

続いて、Fig.16, 17 に示す JR 鷹取波を入力とした場合の倒壊挙動を見ると、入力から 6 秒後には外壁に大きな被害が生じ、手前の屋根がほとんど落下し

ている。8 秒後には住宅が大きく傾き、9 秒後には倒壊している。応答変位を見ると、1, 2 階ともに大きな残留変位が生じている。一方、補強有りの場合は壁や屋根の損傷が見られるものの、大きな損傷は生じておらず、応答変位波形においても残留変位はほとんど生じていない。

最後に、Fig.18, 19 に示す K-NET 柏崎を入力とした場合を見ると、今回、用いた入力地震動では最も住宅モデルの損傷度が小さく、補強無しの場合でも一部の屋根が落下しているだけであり、補強有りの場合はほとんど損傷が見られない。

以上から明らかのように、ACM ブレース工法に

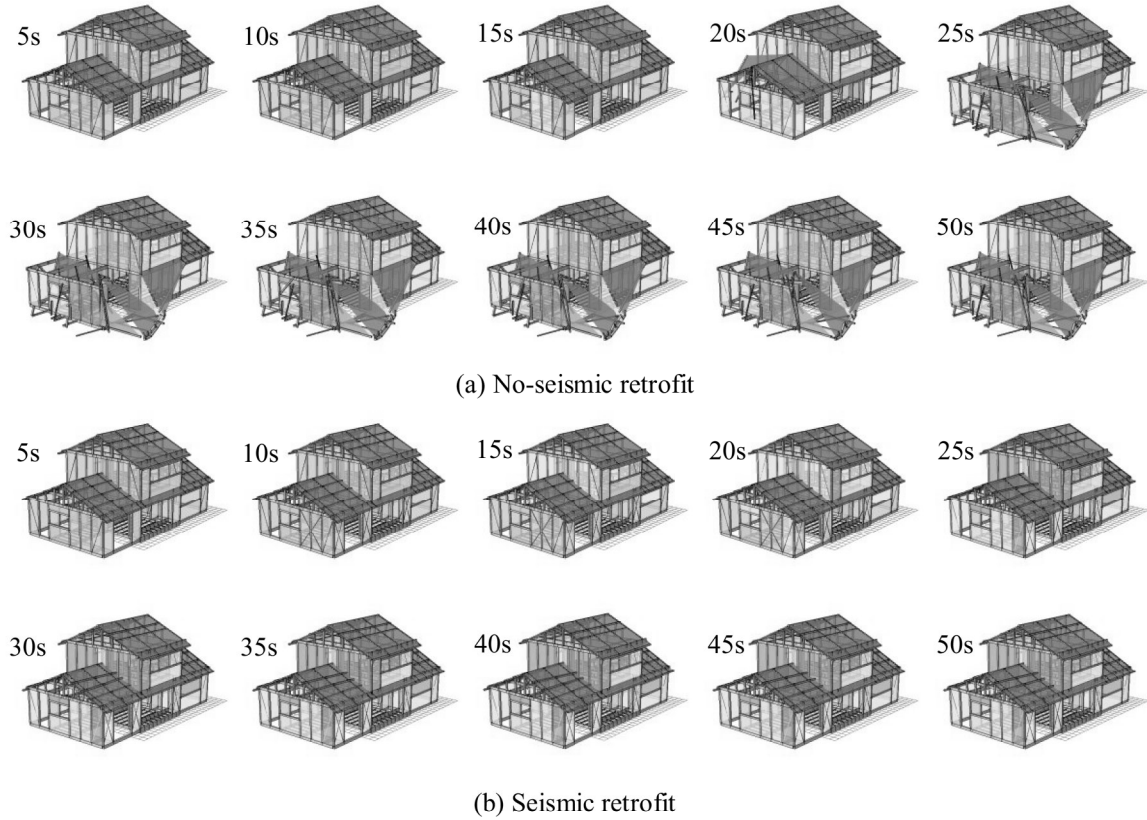


Fig. 12 Collapsing process behavior of wooden house under KiK-net Higashi Naruse used as input earthquake ground motion

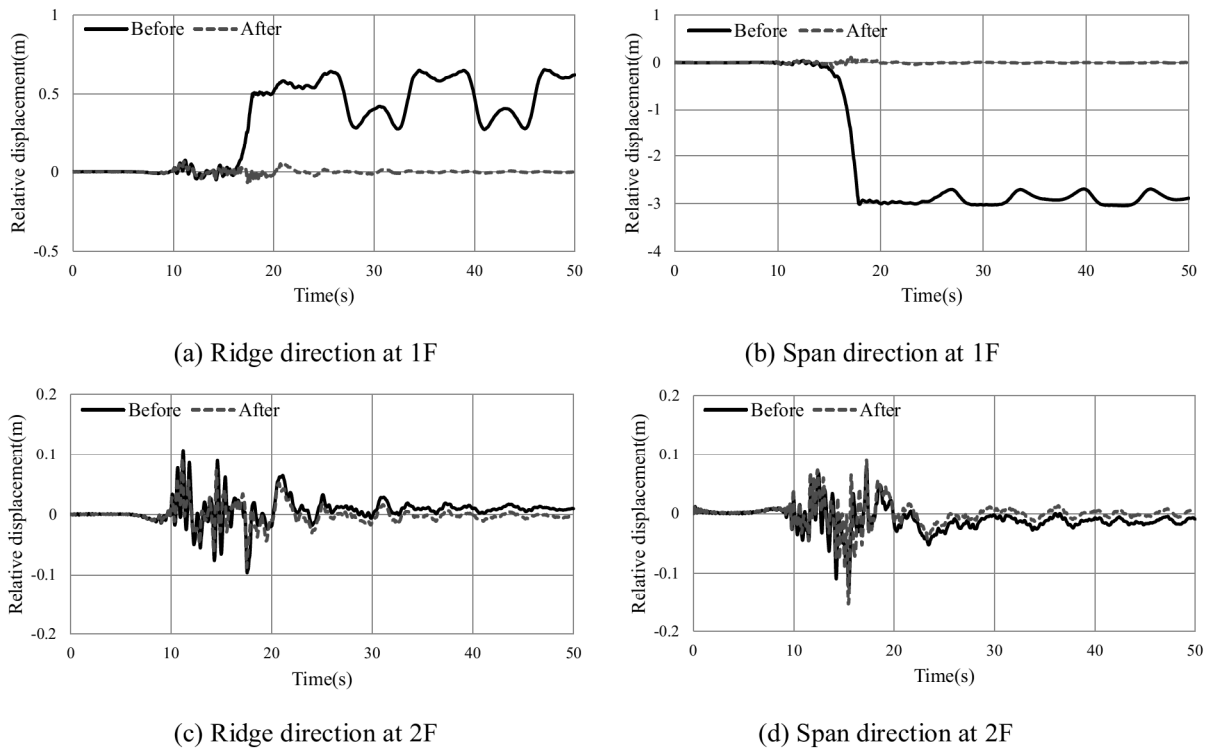


Fig. 13 Displacement response of wooden house before and after seismic retrofit under KiK-net Higashi Naruse used as input earthquake ground motion

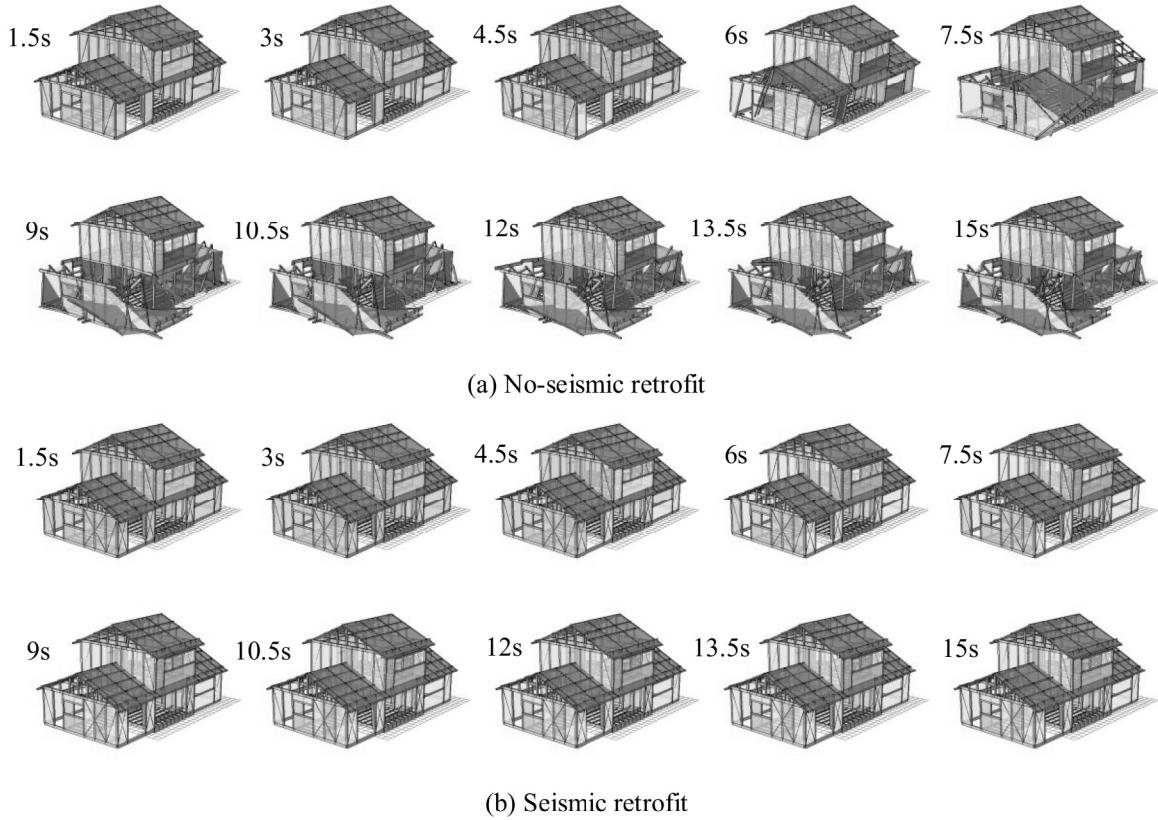


Fig. 14 Collapsing process behavior of wooden house under JMA Kobe used as input earthquake ground motion

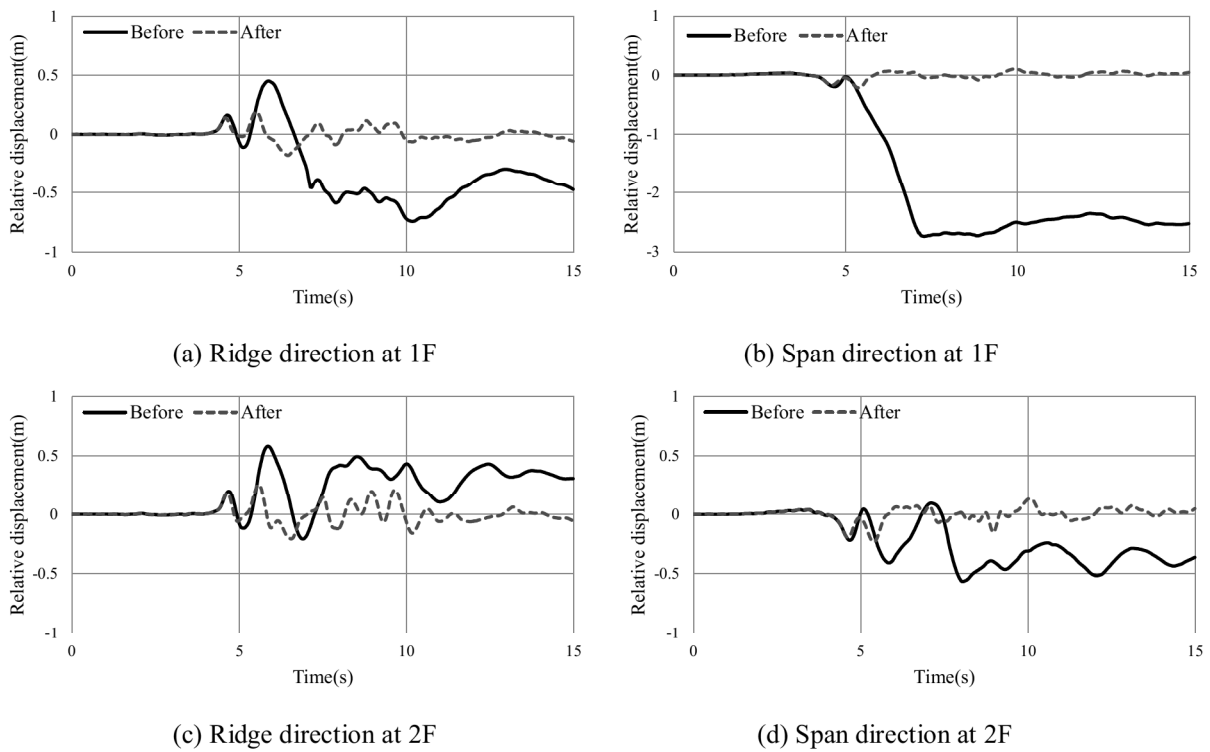
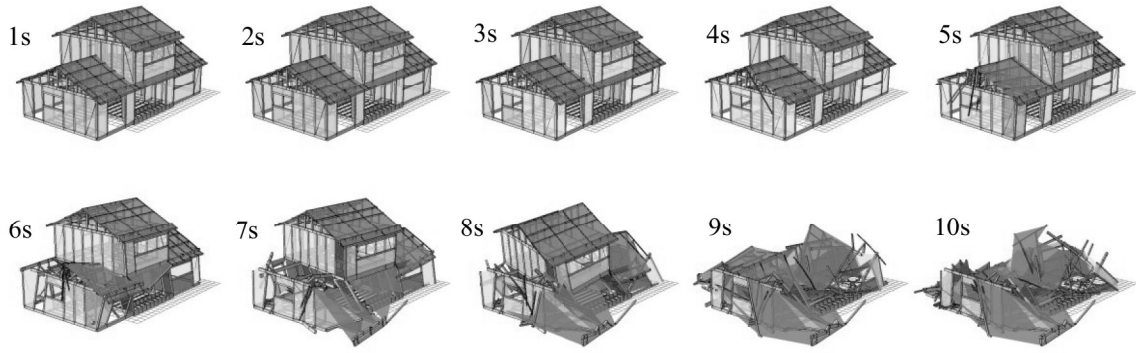
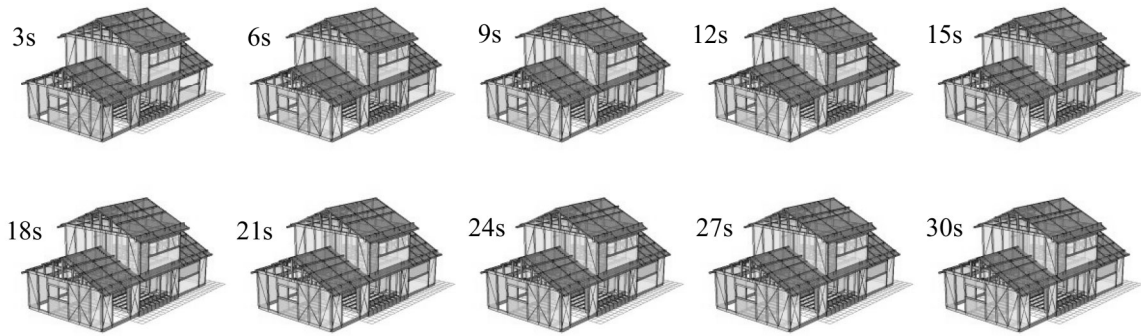


Fig. 15 Displacement response of wooden house before and after seismic retrofit under JMA Kobe used as input earthquake ground motion

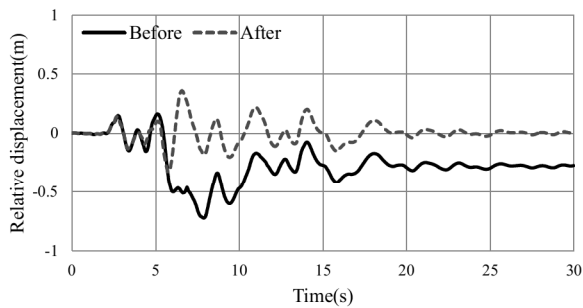


(a) No-seismic retrofit

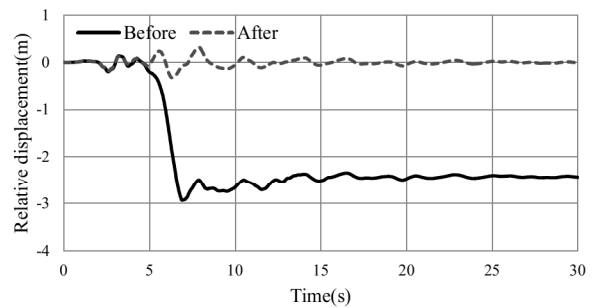


(b) Seismic retrofit

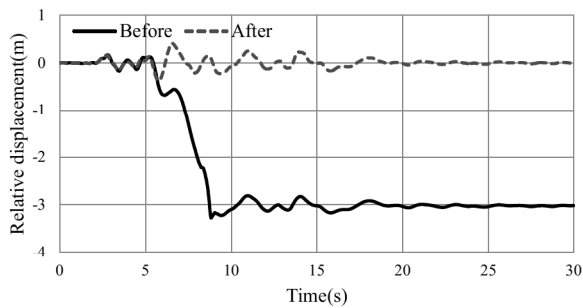
Fig. 16 Collapsing process behavior of wooden house under JR Takatori used as input earthquake ground motion



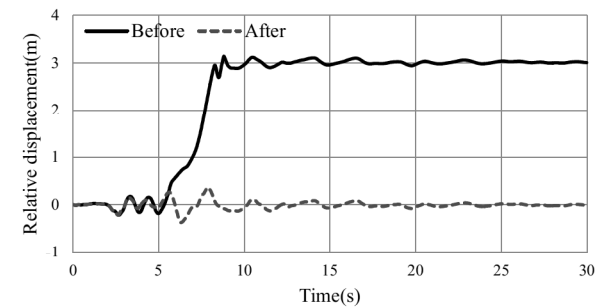
(a) Ridge direction at 1F



(b) Span direction at 1F



(c) Ridge direction at 2F



(d) Span direction at 2F

Fig. 17 Displacement response of wooden house before and after seismic retrofit under JR Takatori used as input earthquake ground motion

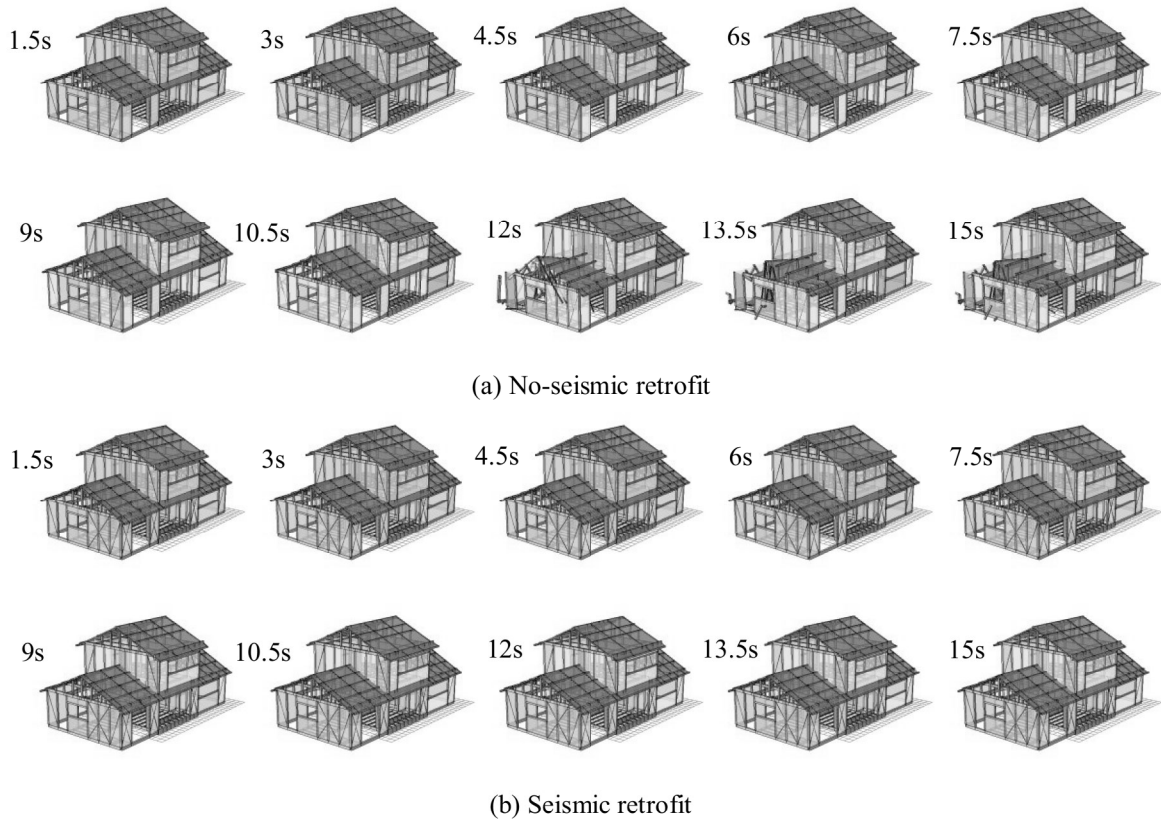


Fig. 18 Collapsing process behavior of wooden house under K-NET Kashiwazaki used as input earthquake ground motion

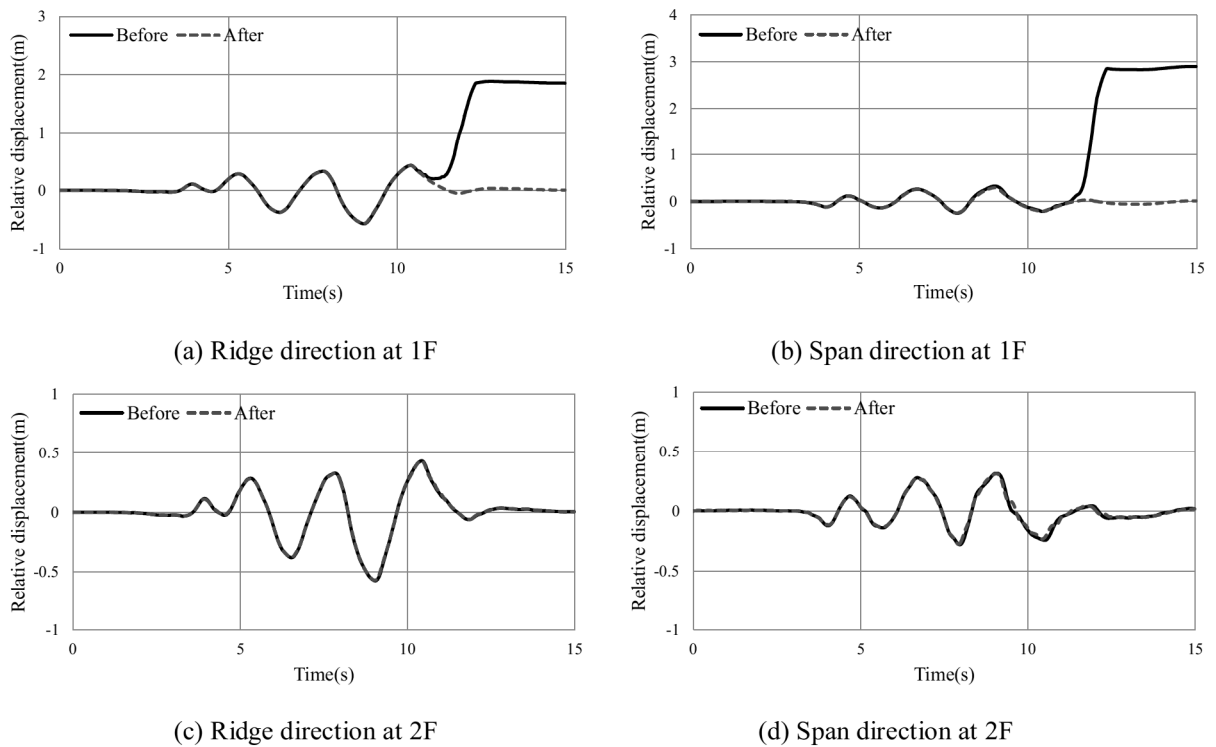


Fig. 19 Displacement response of wooden house before and after seismic retrofit under K-NET Kashiwazaki used as input earthquake ground motion

よって耐震補強した木造住宅モデルは補強前に比べて、明らかに被害が小さくなっており、強震時においても ACM ブレース工法による耐震補強が有効であると考えられる。

また、補強無しの場合について考察すると、入力地震動の卓越振動数が木造住宅の全壊率と相関が高いとされる振動数帯(0.5~1Hz)と一致する場合、住宅モデルの損傷度が最も大きくなっており、今回の倒壊シミュレーション結果は既往研究の指摘と対応する結果となっている。

5. まとめ

本研究では ACM ブレース工法によって耐震補強した木造住宅の強震時での挙動、および補強効果を評価するために、耐震補強した木造住宅をモデル化し、3次元動的解析を行った。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 起振機による振動実験で得られた伝達関数と3次元動的解析から求めた伝達関数を比較した。動的解析による伝達関数は振動実験によるものに比べて明瞭なピークは見られないものの、共振振動数や全体的な傾向は概ね一致した。
- (2) 様々な振動数特性を持つ震度6強の地震観測記録を入力とし、補強前後で木造住宅モデルの挙動を比較した。その結果、いずれの入力地震動の場合も補強後の方が住宅モデルの損傷が小さくなっており、ACM ブレース工法による補強効果が見られることが明らかになった。
- (3) 補強無しの場合について、入力地震動による木造住宅モデルの挙動の違いを見ると、入力地震動の卓越振動数が木造住宅の全壊率と相関が高いとされる振動数帯(0.5~1Hz)と一致する場合、住宅モデルの損傷度が最も大きくなっており、既往研究の指摘と調和的な解析結果となった。

謝辞：実験対象の木造住宅の方々には調査に快くご協力頂きました。株式会社 川嶋建設の方々には調査において様々な便宜を図って頂きました。また、本校の西村良平技術職員には振動測定の際にご助力頂きました。ここに、紙面を借りて謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 西川隼人, 高谷富也：振動測定による木造住宅の耐震補強効果の評価, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第47号, pp.19-25, 2012.
- 2) 小野紘一, 高谷富也, 久部修弘：ACM ブレース工法によるRC建屋の耐震補強, 日本地震工学会大会概要集, pp.168-169, 2008.
- 3) Takatani, T. and Nishikawa, H. : Collapsing Simulation of Wooden House Retrofitted by ACM Braces During Seismic Ground Motion, The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12), pp.2048-2060, 2012.
- 4) 中川貴文：大地震時における木造軸組構法住宅の倒壊解析手法の開発, 建築研究資料, No.128, 2010.
- 5) 独立行政法人 建築研究所：木造住宅 倒壊解析ソフトウェア *wallstat* (ver. 1.12.4) ユーザーズマニュアル, 2011.
- 6) 田島幹夫, 村上雅英, 後藤正実, 稲山正弘, 福田幹夫：在来軸組工法木造住宅の構造設計手法の開発：その35 火打ち梁水平構面の面内せん断試験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.25-26, 2000.
- 7) 境 有紀, 神野達夫, 額綱一起：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.585, pp.71-76, 2004.

(2012. 12. 7 受付)

**EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE EFFECT OF
RETROFITTED WOODEN HOUSE BY COLLAPSING SIMULATION****Hayato NISHIKAWA and Tomiya TAKATANI**

ABSTRACT : In this paper, both the seismic response and the collapsing process behavior of wooden house were numerically evaluated by 3-D collapsing simulation analysis in order to investigate the effect of seismic retrofit of wooden house using ACM bracing method during strong ground motion. Parameters of timber elements such as beam and column were defined based on many past research and experimental results. Vibration characteristics of wooden house were evaluated by both vibration experiment and collapsing simulation. As a result, it was found that the predominant frequencies obtained from a transfer function in the experiment using an oscillation system are almost the same as the resonance frequencies evaluated by this collapsing simulation. Finally, collapsing simulations of both retrofitted and no-retrofitted wooden houses were carried out under some earthquake motions with JMA seismic intensity of 6 upper level used as an input motion. Consequently, seismic retrofitted house does not suffer severe damage against any earthquake ground motions.

Key Words : *Wooden house, Seismic retrofit, Collapsing simulation*