

## 1 研究の背景と目的

世界有数の地震国である我が国では、これまで幾多の地震による災害を経験している。1995年の兵庫県南部地震では、現行の耐震基準以前に建築された耐震性能に劣る既存木造住宅を中心に甚大な被害が生じ、多くの人命・財産が失われており、既存木造住宅の耐震改修は地震防災対策として重要な課題となっている。

兵庫県南部地震を教訓として「耐震改修促進法」が施行され、既存建築物の耐震改修が行われているが、経済的課題や耐震診断・改修事業への不信感など様々な理由から改修の進捗率は極めて低いのが現状である。

そのような現状を打破するため、既往の研究でポリエステル繊維の補強材を用いた耐震補強工法が開発された。この補強工法はポリエステル繊維の補強材を部材に直接接着することで耐力壁を構成し耐震性能の向上を図るもので、木造架構を用いた静的加力実験の結果、在来の補強工法に匹敵する十分な補強効果が確認された。

そこで本研究では、ポリエステル補強材を用いた補強工法の性能が実地震時に発揮されるか検証することを目的に振動実験を行う。

## 2 補強材料の特性

本補強工法で使用する材料は、高強度のポリエステル繊維を編みこんだベルト・シート補強材と、それらを木造軸組みに貼り付ける接着剤である。ベルト・シート補強材は破断時までほぼ弾性であり、大変形にも追従して耐力を発揮するという特徴がある。

表1に性能規格値<sup>1)</sup>を、写真1にベルト補強材を示す。

接着剤は弾力性に富んだ1液性・無溶剤タイプの接着剤で、木材に対する平均接着強度は約1N/mm<sup>2</sup>である。

表1 補強材料性能規格値

材料名	ベルト1(B1)	ベルト2(B2)	シート
材料	ポリエステル		
	ベルト材		シート材
厚さ(mm)	2.5	4.0	0.5
幅(mm)	10.0	10.0	100.0
断面積(mm <sup>2</sup> )	250.0	400.0	-
ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	4500	4500	500
破断歪(%)	10.0	10.0	10.0



写真1  
ベルト補強材(B1)

## 3 補強工法の概要

地震被害を受けた木造住宅の要因としては、筋交いや合板などの耐力壁の不足、柱・梁・土台や筋交いの接合部の緊結不足などが挙げられる。これらを改善するため、本補強工法ではポリエステルベルト補強材を既存の軸組みに接着して耐力壁を構成することにより、耐力・変形性能を向上させる補強工法である。

本研究の基本的な補強工法は、在来型の補強工法である筋交い工法や合板工法と同じように、壁仕上げ材を撤去し、ポリエステルベルトを襷がけ状に木造軸組みへ直接接着して耐力壁を構成する「直接接着工法」である(図1(a))。ポリエステルベルトを筋交い状に襷がけに貼り付

ける際、補強効果が最も発揮されるようにベルトの傾斜角を概ね45°となるよう高さ方向に3層に配置し、反力確保のため水平部材(中棧)を追加する。

次に補強費用の削減、工期の短縮、廃棄物の削減を考慮し、外壁仕上げ材を残したままシート補強材を貼り付ける「外壁残存工法」についても検討を行った(図1(b))。モルタル外壁の表面にシート補強材を貼り付け、桁梁から基礎までを一体化させ、軸組みとモルタル外壁のずれを防止し、モルタル外壁を耐震要素として機能させるとともに、外壁の剥落などの損傷も防止される。

現行基準では接合金物を用いて接合部の緊結を行うが、旧基準の建物では強度が不十分であることが多い。また、金物の使用により木材に接合用の穴を開けて弱点になる、大変形時の塑性化により残留変形が生じるなどの問題もある。そこで変形性能に富むポリエステル補強材を柱と梁・土台の接合部、筋交いの仕口部に貼り付け接合部を補強する「接合部補強工法」(図1(c))について検討した。

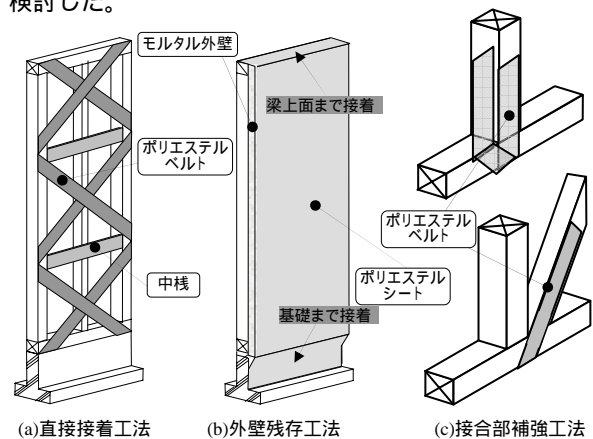


図1 補強工法の概要

## 4 振動実験(その1)

振動実験(その1)では、基本的なベルト補強による耐震補強効果を検討するため、直接接着工法と接合部補強工法を対象として振動実験を行った。

### 4.1 試験体概要

本加振実験に用いる試験体は、1981年以前の補強で、現行の耐震基準を充たしていない古い木造家屋を想定した[筋交・金物なし]、接合部を金物で補強し、現行の耐震基準による補強を想定した[筋交・金物あり]、柱・筋交いの各接合部を金物の代わりにポリエステルベルトで補強した[筋交・ベルト接合]の以上木造筋交いを用いた3体と、直接接着工法として[ベルト筋交い]、加えて倒壊防止を目的としてポリエステルベルトの端部を巻付け定着した[応急補強]の計5体である。

試験体の軸組みは加振方向1.5間(2730mm)、高さ2730mmである。

表2に試験体の諸元を、図2に試験体概要を示す。

表2 試験体諸元

試験体名称	耐力要素	耐力要素接合部	柱頭・柱脚接合部
筋交・金物なし	両筋交い (90mm×45mm)	N90釘斜め打ち	N90釘斜め打ち
筋交・金物あり		筋交いプレート	HD金物
筋交・ベルト接合		N90釘斜め打ち+ B2ベルト	N90釘斜め打ち+ B2ベルト
ベルト筋交い	B2ベルト×4	接着	HD金物
応急補強	B1ベルト×2	接着+端部巻付	接着+端部巻付

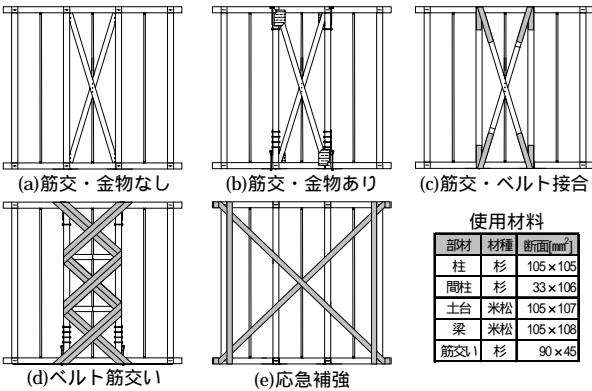


図2 試験体概要

### 4.2 実験方法

実験は各種耐震要素を組み込んだ軸組を、直交方向への倒壊を防止するために構造用合板を用いて作成したパネルで接合した。上部には重り(1.66t)を負荷させた。

入力地震波は、試験体ごとの周期の違いによる影響がないよう、建築基準法の限界耐力計算を参考に、第2種地盤に対する目標加速度スペクトルに近似するような応答スペクトルをもつ模擬地震動(以後告示波)を作成<sup>2)</sup>し使用した。地震波の加速度時刻歴と減衰5%の加速度応答スペクトルを図3に示す。

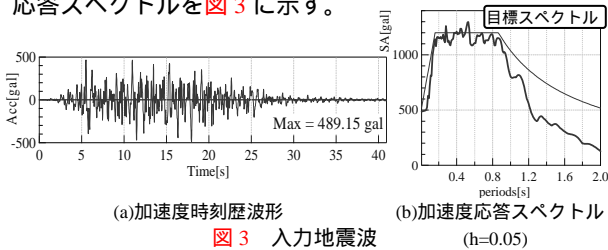


図3 入力地震波

### 4.3 実験結果

図4に各試験体の履歴ループの例を、図5に試験体の最大慣性力-最大層間変形関係を示す。

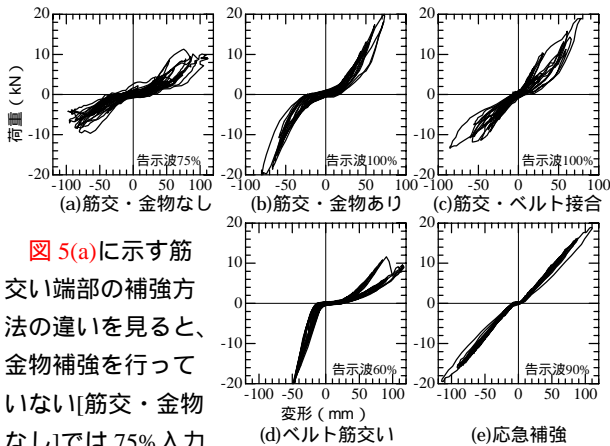
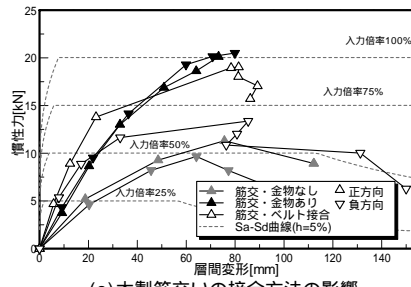


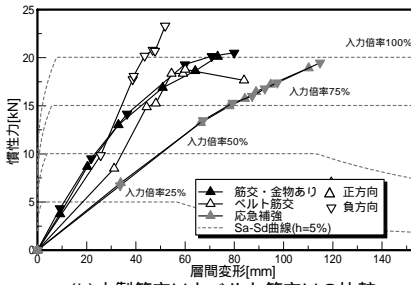
図4 履歴ループ

図5(a)に示す筋交い端部の補強方法の違いを見ると、金物補強を行っていない[筋交・金物なし]では75%入力

で筋交い交差部分の間柱が折損し、耐力が低下したのに対し、HD金物、筋



(a) 木製筋交いの接合方法の影響



(b) 木製筋交いとベルト筋交いの比較

図5 慣性力-層間変形

交いプレートで接合部を補強した[筋交・金物あり]では、100%の繰り返し入力に対しても損傷はほぼ見られなかった。

[筋交・金物あり]とポリエステルベルトで接合部を補強した[筋交・ベルト接合]を比較すると、75%入力まではほぼ同程度の剛性を示しているが、それ以降片側において著しく剛性が低下し、75%入力で筋交いが折損した。図5(b)には、ポリエステルベルトで筋交いを構成する[ベルト筋交い]、[応急補強]の結果を[筋交・金物あり]との比較で示す。

まず、[ベルト筋交い]では初期剛性が低いため[筋交・金物あり]と比べて1回目の加振で大きな変形をしているが、以後の加振における剛性はそれ以上となっており、最大耐力も[筋交・金物あり]を上回った。初期剛性が低い原因は施工時にベルトにたわみが生じていることが考えられる。また、ベルトを重ねて接着した部分が剥れやすく、それが片側に集中していたため、70%入力でもベルトが剥れ、片側において耐力の低下が見られた。

[応急補強]については、ベルトの断面積が少ないため剛性が低く、変形も大きいものの、90%入力までベルトの剥れや巻き付け部分に損傷は見られず、余震に対する倒壊防止としては有効だと考えられる。

図6に層間変形ごとの等価減衰係数を示す。

[筋交・金物あり]が概ね5%程度の減衰を有しているのに対し、[筋交・ベルト接合]では若干小さめの減衰であった。これはポリエステルベルトが弾性的な挙動を示すことが原因であると思われる。

[ベルト筋交い]ではベルトの剥れが生じる80mmの変形までは2%程度で木製筋交いの1/2-1/3程度の減衰に留まっている。ベルトが剥れた後減衰が増加しているが、これはベルトそのものではなく、軸組みフレームが変形してエネルギーを吸収したと考えられる。[応急補強]については、さらにベルトの本数が減っているため、[ベ

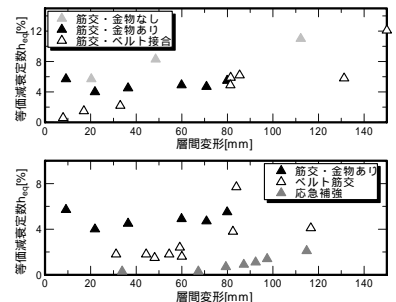


図6 等価減衰係数

ルト筋交い]以上に減衰が小さく 1%ほどの値であった。以上のことから、ポリエステルベルト単体では減衰の効果期待できないことが分かる。

## 5 振動実験 (その2)

振動実験(その2)では(その1)で行った接合部補強工法について更なる接合方法の検討と、仕口ダンパーを併用することによる減衰効果の検討、また、シート補強として外壁残存工法を対象に振動実験を行った。

### 5.1 試験体概要

本加振実験に用いる試験体は、現行の耐震基準による補強を想定した[筋交・金物あり]、柱の各接合部を金物の代わりにポリエステルベルトで補強した[筋交・ベルト接合]、さらに筋交い全長にベルトを通し、接合部を補強するとともに筋交いの補強も兼ねた[筋交・ベルト接合2]、さらに減衰を付与するために、柱と梁・土台仕口部に仕口ダンパーを用いた[筋交・ベルト接合2+仕口ダンパー]以上木造筋交いをを用いた4体と、外壁残存工法として、一般的なモルタル仕上げによる[外壁]、モルタル外壁の表面に、ポリエステルシート補強材を接着した[外壁+シート]2体の計6体である。木造筋交いの4体については、振動台の容量を考え、片筋交いとした。表3に試験体の諸元を、図7に試験体概要を示す。

表3 試験体諸元

試験体名称	耐力要素	耐力要素接合部	柱頭・柱脚接合部
筋交・金物あり	片筋交い (90mm×45mm)	筋交いプレート	T形金物
筋交・ベルト接合		N90釘斜め打ち+ B2ベルト	N90釘斜め打ち+ B2ベルト
筋交・ベルト接合2 筋交・ベルト接合2+ 仕口ダンパー			
外壁	モルタル壁		長ほぞ差し
外壁+シート	モルタル壁+ポリ エステルシート		長ほぞ差し

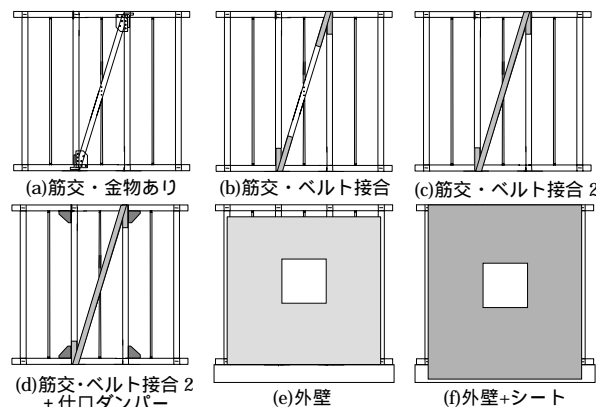


図7 試験体概要

### 5.2 実験方法

加振方法、入力地震波は(その1)と同じものを用いた。入力地震波倍率は20%から10%刻みで行った。

### 5.3 実験結果

図8に各試験体の履歴ループの例を、図9に試験体の最大慣性力-最大層間変形関係を示す。

図9(a)に示す筋交い端部および柱接合部の補強方法の違いを見ると、接合部を金物で補強した[筋交・金物あり]試験体に対し、接合部をポリエステルベルトで補

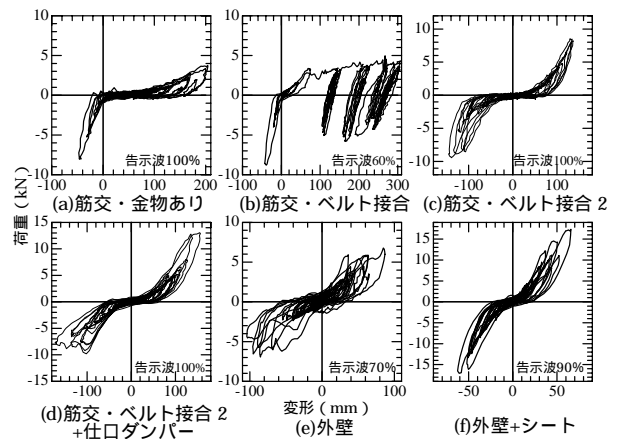
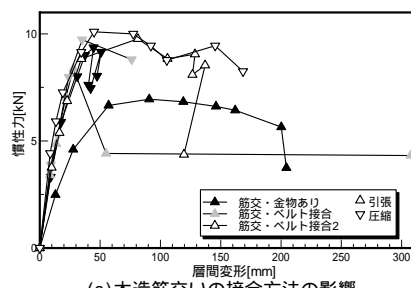


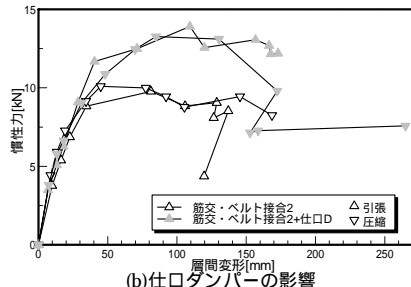
図8 履歴ループ

強した [筋交・ベルト接合] 試験体は、初期剛性は [筋交・金物あり] よりも大きく、変形も小さかったが、50%入力で筋交い端部のポリエステルベルトが剥れ、耐力が急激に低下し、60%入力で筋交いが外れ変形が300mm(1/9)を越えてしまった。

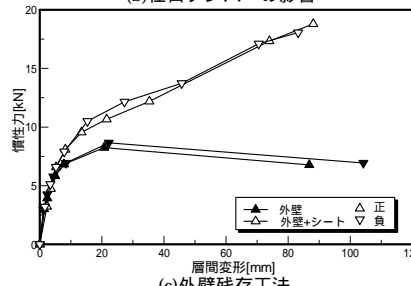
これに対し、筋交い端部だけでなく、筋交い全長にわたってポリエステルベルトで補強した[筋交・ベルト接合2]試験体は、剛性・耐力ともに [筋交・金物あり] を上回り、大変形時も筋交いが外れることはなかった。100%入力まで大きな耐力低下は見られず、120%入力で損傷が進み耐力が低下したが、[筋交・金物あり] より優れた変形性能を示した。これにより、筋交い全長にわたってポリエステルベルトで補強することによって、接合部を金物で補強するよりも大きな補強効果を得られることが確認できた。



(a) 木造筋交いの接合方法の影響



(b) 仕口ダンパーの影響



(c) 外壁残存工法

図9 慣性力-層間変形

ことが確認できた。

図9(b)には [筋交・ベルト接合2] 試験体とこれの柱、梁・土台接合部を仕口ダンパーで補強した [筋交・ベルト接合2+仕口ダンパー] 試験体を示す。[筋交・ベルト接合2+仕口ダンパー] は50%入力時までは [筋交・ベルト接合2] とほぼ同じ挙動を示したが、[筋交・ベルト接合2] が60%入力で耐力が頭打ちになったのに対し、[筋交・

口ダンパー]は80%入力まで耐力が上昇した。ポリエステルベルトと仕口ダンパーを併用することによって、より大きな補強効果を得られることが分かった。

図9(c)にモルタル外壁の[外壁]試験体と、これをポリエステルシートで補強した[外壁+シート]試験体を示す。[外壁]試験体が60%入力でモルタル壁が損傷して剛性が低下し、70%入力でモルタル壁全体が落下し耐力が低下したのに対し、[外壁+シート]試験体は、70%入力から剛性が低下し始めたが、モルタル壁が落下することは無く、100%入力まで耐力が上昇し続け、[外壁]試験体の2倍以上の最大耐力を示した。これによって、モルタル外壁をポリエステルシートで補強することによって、大きな補強効果を得られることが分かった。

図10に層間変形ごとの等価減衰係数を示す。

[筋交・金物あり]が概ね8%程度なのに対し、[筋交・ベルト接合]や[筋交・ベルト接合2]は小変形時の減衰が若干小さかった。[筋交・ベルト接合2]と[筋交・ベルト接合2+仕口ダンパー]を比較す

ると大きな違いは無く、期待した仕口ダンパーによる減衰効果はそれほど見られなかった。これは、柱のたわみによる変形が支配的で、仕口部の変形が小さかったためと考えられる。

外壁残存工法ではモルタル壁が損傷しない分、[外壁+シート]の減衰がやや小さい値となった。次に最大慣性力-最大層間変形を用いて要素基準耐力や壁倍率を求め耐震診断基準の規定値との比較検討を行った<sup>3),4)</sup>。

図11には診断基準に示されている基準耐力及び剛性と、基準耐力の4指標のうち最小値を

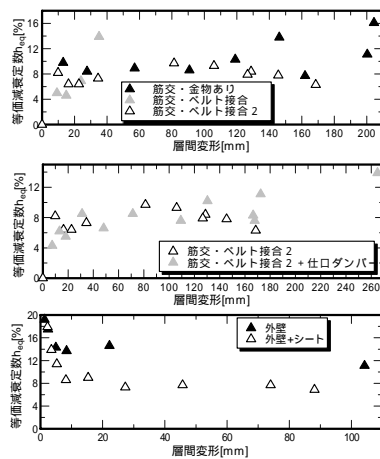


図10 等価減衰係数

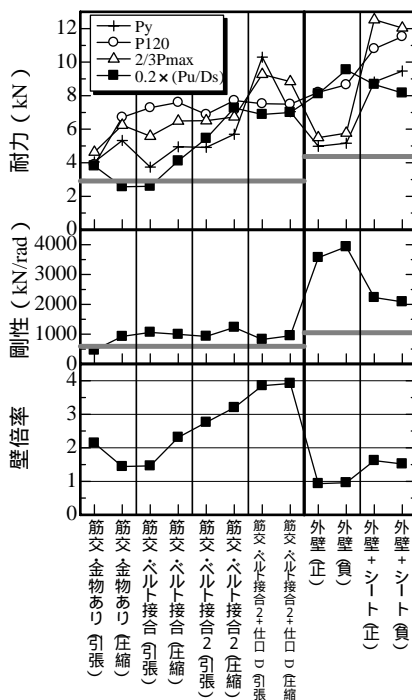


図11 基準耐力・剛性・壁倍率

基準荷重と壁長で規準化した壁倍率を示す。なお、耐震診断基準の規定値を灰色実線で示す。[筋交・金物あり]と[筋交・ベルト接合]で $0.2(P_u/D_s)$ が規定値を下回っているが、[筋交・ベルト接合2]と[筋交・ベルト接合2+仕口ダンパー]はそれを大きく上回り、特に[筋交・ベルト接合2+仕口ダンパー]は壁倍率で[筋交・金物あり]の2倍以上となっており、接合部だけでなく筋交い全長にベルトを通して補強することが有効であることを示している。

外壁残存工法では[外壁+シート]の剛性が[外壁]の1/2程度となっているが、これは[外壁]の降伏耐力が極めて小さいのが原因で、そのため壁倍率では[外壁+シート]が[外壁]の約1.5倍の値となっている。また、[外壁+シート]は振動台の容量により、耐力低下までの挙動を把握できず、最終加振の変形を終局変形として壁倍率を算出しており、実際はより大きな値になることが予想される。

## 6 結論

### 振動実験 (その1)

- 直接接着工法では、在来の筋交い工法と比較すると初期剛性が低いものの、ベルトが効き始めると筋交い工法以上の剛性を示し、また、高い耐力が期待できることが分かった。
- ベルト端部を巻き付けることで定着を図った[応急補強]は余震に対する倒壊防止という点では十分に有効な耐震補強工法となりうると考えられる。
- ポリエステルベルト単体では減衰効果は期待できないことが分かった。

### 振動実験 (その2)

- 接合部補強工法では、接合部のみをベルトで補強した場合、ベルトの接着が剥れると筋交いが外れ、急激に変形が進んでしまうが、筋交い全長を通してベルトを接着すると、大変形でも筋交いが外れることなく優れた変形性能を持ち、在来筋交い工法の補強として有効であると考えられる。
- 柱と梁・土台仕口部に仕口ダンパーを用いることで、期待した減衰効果は見られなかったが、仕口部の剛性による耐力の上昇という効果が確認できた。
- モルタル外壁をシートで補強する外壁残存工法は、無補強のものに比べ、剛性・耐力が大幅に上昇し、また、大変形時にもシートが剥れることは無く、優れた補強効果があることが分かった。また、外壁の撤去を行うことなく耐震補強ができ、居ながら施工や、改修費用などの点からも、今後の耐震補強工事の有効な手法になり得ると考えられる。

### 参考文献

- 1) 構造品質保証研究所株式会社：建築物のSRF工法設計施工指針と解説
- 2) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会
- 3) 建築基準法施工令46条：構造耐力上必要な軸組み等
- 4) 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(改訂版)
- 5) 佐藤晃章：ポリエステル繊維織物を用いた木造住宅の新しい耐震補強工法の開発、平成17年度東北大学修士論文