

# ガラス繊維強化プラスチックを用いた木材接合部の 強度性能と木造耐震壁への補強効果

岩井 哲\*

(平成30年11月1日受付)

## Load-carrying capacity of timber joints using Glass-Fiber Reinforced Plastics and evaluation to strengthen timber earthquake-resisting walls

Satoshi IWAI

(Received Nov. 1, 2018)

### Abstract

This study aims to investigate load-deformation capacity of wooden frame walls including with three sets of crossed diagonal timber members under earthquake, in order to use earthquake-resistant improvement of the existing wooden houses. The diagonal members like braces bear only axially compressive force and are expected to perform ductility. For reinforcement of tensile force, Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) is used to resist in the structural frame. Two sets of experiments were conducted to investigate the strength of a glass fiber anchor for fixing a glass fiber sheet. One is column-to-beam connection test and the other is wooden frame wall test. For connection, 12 specimens were tested parametrically to check strength and variations due to construction work. For wall test, the stable load-carrying capacity is confirmed with wall magnification factor (wall proof strength) exceeding 4.0.

**Key Words:** Glass-Fiber Reinforced Plastics, timber frame, static loading test, failure property, earthquake resistant improvement

### 1. 研究目的

本研究は、短い木造軸組材を斜材に用いて三段組みの筋かい構造とし、既存建物の耐震改修用に使用することを目指したものである。斜材は、架構に接合せず引張力を負担させないで、圧縮めり込みのみを負担させるものとし、粘りを期待する。文献1), 2) で、2シリーズの木造軸組壁実験の結果を報告している。ここでは、壁倍率(壁耐力)が4.0を超えて安定した耐震性能を確保できる構法を目指している。本研究は、引張補強に対して、ガラス繊維シートをエポキシ樹脂系接着剤で塗り固めたガラス繊維強化プラスチック(Glass Fiber Reinforced Plastics; 以下、GFRPと称する)を用いて抵抗させるものである。特に、繊維シ-

トを固定するためのファイバーアンカーについて強度を確認する実験をパラメトリックに行い、施工におけるばらつきを確認した。更に壁体に用いて、耐震補強性能の向上を図った結果を報告する。

### 2. 実験 [1] 計画—GFRP の強度性能評価

#### 2.1 ファイバーアンカー

ガラス繊維シートはガラスを融解し、繊維状にしたものを糸のように紡いで作られる。ガラス繊維強化プラスチックはガラス繊維シートをエポキシ樹脂で固めた複合材である。写真1に示すファイバーアンカーとガラス繊維シートは同素材で作られている。GFRPを木材やコンクリートに固定する際は、母材に径10mm深さ50mmの孔をあけ、

\* 広島工業大学工学部建築工学科



写真1 ファイバーアンカー（左）とガラス繊維シート（右）

表1 ガラス繊維シートおよびGFRPの材料性能比較

		部材の概要							
		ガラス繊維シート*	GFRP 実験値	鋼材 (SS400)	普通コンクリート Fc=18 (N/mm <sup>2</sup> )	スギ	ヒノキ	ガラス	エポキシ樹脂
引張強度	(N/mm <sup>2</sup> )	3240	575	450	1.8	44	57	55	74
圧縮強度	(N/mm <sup>2</sup> )	-	-	450	18	36	40	900	
弾性係数	(kN/mm <sup>2</sup> )	72.4	26.1	205	18	70	80	65	3.18
終局伸び		4.5 (%)	2.2 (%)	21 (%)	0.22 (圧縮) (%)	-	-	-	5.0 (%)
密度	(g/cm <sup>3</sup> )	2.55	-	7.9	2.3	0.4	0.5	2.5	

\*備考 繊維厚さ0.36mm

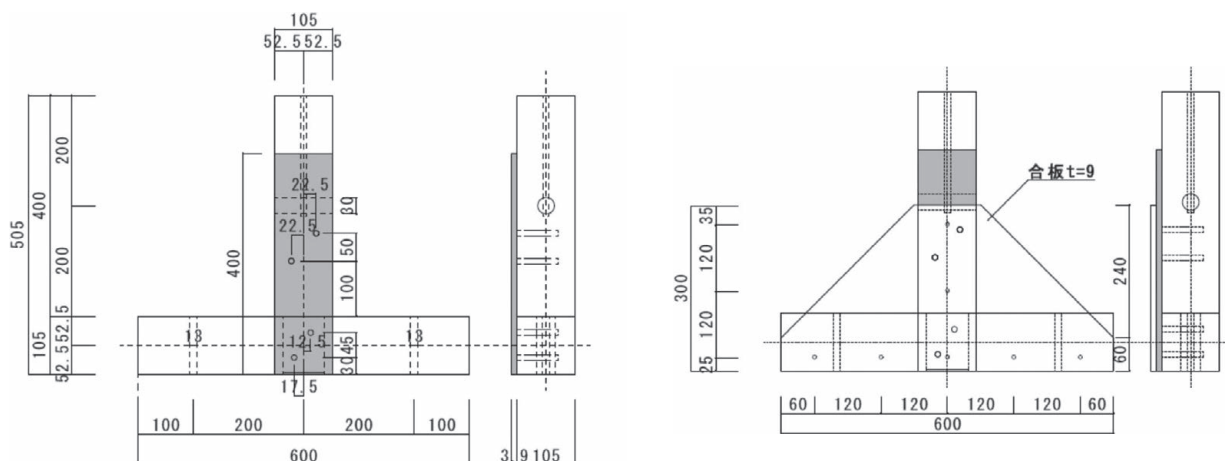


図1 試験体 左：DD（土台がスギ材）、ED（土台がヒノキ材）、右：構造用合板付FD（土台がスギ材・ヒノキ材）

ファイバーアンカーを繊維シートの編み目の間に絡めて、東部をエポキシ樹脂で埋め込んで固める。表1に文献資料3)から得られるガラス繊維シートおよびGFRPの材料性能を、鋼材、普通コンクリート、木材と比較して示す。

## 2.2 試験体

実験[1]では、ファイバーアンカー並びにGFRP自体の強度と変形性能を調べることを目的とした。試験体は、全12体である。図1に示すように土台に垂直に柱材を立て、長さ400mmにわたって片面のみをGFRPで接合して繋げた。柱と土台は105mm角材である。柱はE70（ヤング係数規格）のスギ材、土台は同じくE70のスギ材とヒノキ材の2種を用いた。試験体は、図1の左のDD（土台がスギ材）、ED（土台がヒノキ材）、右の9mm厚の構造用合板付

FD（土台がスギ材・ヒノキ材）の4種、各2体で、DD・EDにはファイバーアンカーを1本と2本の2種を比較実験した。FDはファイバーアンカーを2本のみとした。すべて長ほぞを用いており、ファイバーアンカー東部の埋込みは、断面の深さ途中までであるが、込栓のような形態となる。

## 2.3 載荷・計測方法

1000kNの万能試験機を用い、図2に示すように径12mmの鋼棒を介して試験体を引張加力した。柱軸方向に単調引張載荷し、引張強度、剛性、伸び性能を確認した。荷重は50kN用ロードセルで、伸びは50mm計測用の変位計2本で計測した。柱上部はDボルト（径30mm）を用いて、土台部は22mm厚の平鋼にM12のアンカーボルトで角座金を介して固定した。

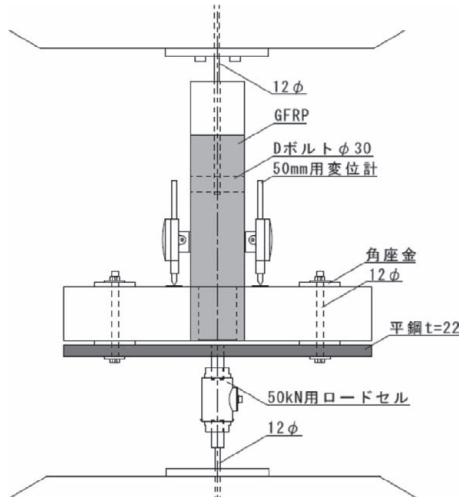


図2 荷重計測方法

表2 実験結果一覧

試験体名	土台材種	ファイバーアンカー数	合板補強	最大耐力 (kN)	初期剛性 (kN/mm)
DD1	スギ	1	なし	21.8	36.6
DD2				30.4	48.7
DD3				25.4	73.3
DD4				23.2	57.7
ED1	スギ	2	なし	30.8	66.9
ED2				24.6	81.7
ED3				32.6	61.4
ED4				30.5	107.8
FD1	スギ	2	あり	28.6	107.3
FD2				28.7	74.4
FD3				33.4	87.8
FD4				37.7	85.1

### 3. 実験 [1] 結果と考察

#### 3.1 荷重-変位関係

実験から得られた荷重-変位関係を図3に示す。GFRPの厚みは12体の平均が4.21mmで、最小が3.63mm、最大は5.62mmであった。施工の差と考えられるGFRP厚みの差は約2mmである。図3の左の図はスギ土台のものである。ファイバーアンカーを、DD1とDD2は1本で固定したもので、ED1とED2は2本で固定したものである。それぞれ2体ずつ実験したが、試験体差が大きく、ファイバーアンカーの1本と2本の差は明確ではない。中の図はヒノキ土台のものである。ファイバーアンカーを、DD3とDD4は1本で固定したもので、ED3とED4は2本で固定したものである。ヒノキ土台の場合は、ファイバーアンカーの1本と2本の差が見られ、2本の方が初期の強度も高い。土台が堅いとファイバーアンカーの差は明瞭になっていると見ることができる。右の図は構造用合板付きのヒノキ土台のもので、ファイバーアンカーはいずれも2本とした。土台のスギ材(FD1, 2)とヒノキ材(FD3, 4)の差は、ここではあまり明確ではない。全試験体について、実験結果一覧を表2に、図4に最大引張耐力を、図5に初期剛性を比較して示す。

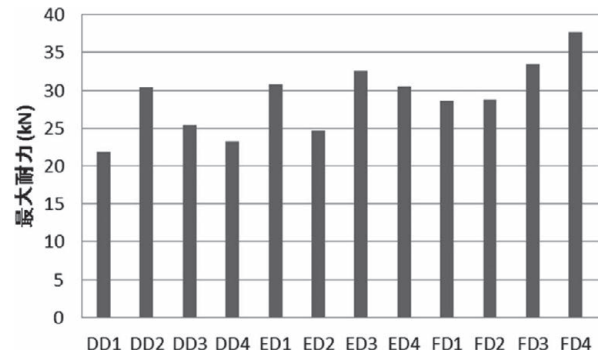


図4 最大引張耐力の比較

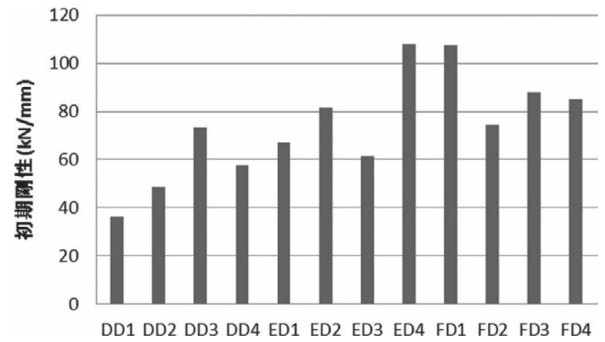


図5 初期剛性の比較

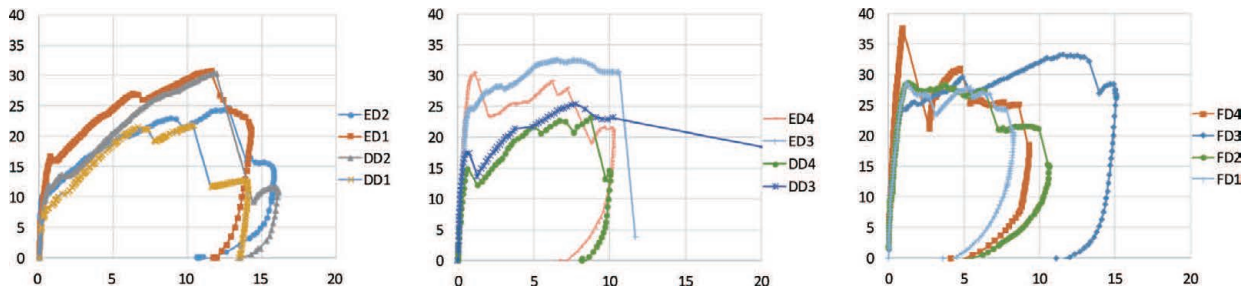


図3 荷重-変位関係

左: スギ土台, DD1, 2 (アンカー1本), ED1, 2 (アンカー2本),  
 中: ヒノキ土台 DD3, 4 (アンカー1本), ED3, 4 (アンカー2本),  
 右: FD 構造用合板付 (ファイバーアンカー2本, 土台はFD1, 2がスギ材, FD3, 4がヒノキ材)



写真2 破壊性状 ほぼぞ部抜け (左), 樹脂部剥落初期 (右)

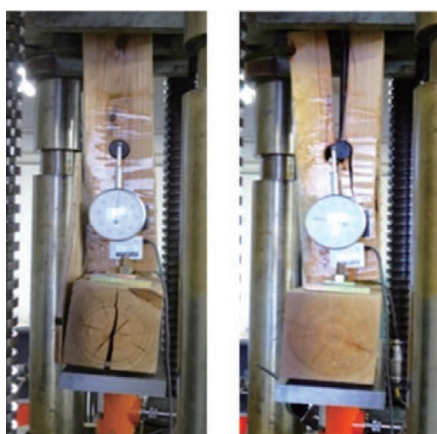


写真3 水平材のひび割れ (左) と鉛直材の割裂 (右)

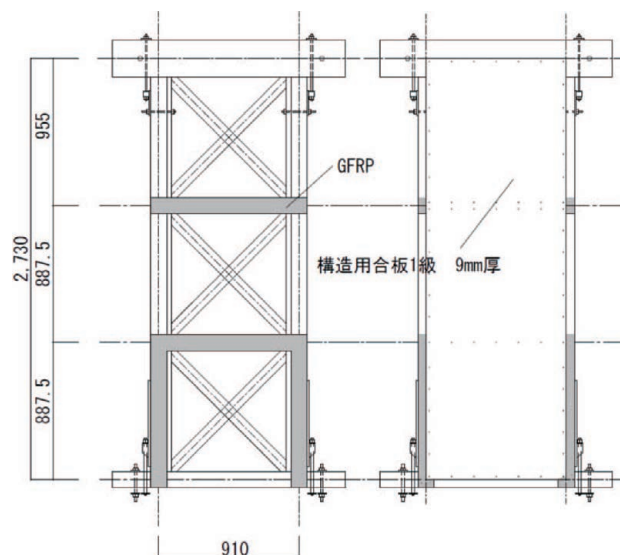


図6 壁試験体

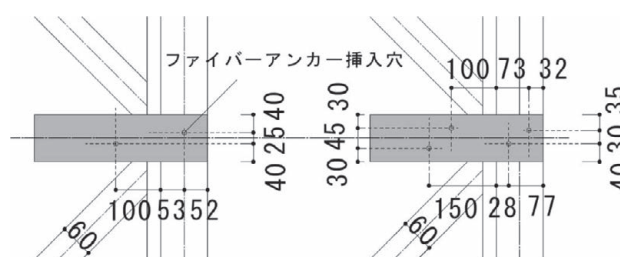


図7 水平材 (中棧) のファイバーアンカーの留め方

### 3.2 破壊性状

試験体の破壊は、多くの場合、長ほぼぞ部が抜け出す形となった。荷重-変位関係の初期の立ち上がりから、変位1mmあたりで、破壊音が発生するとともに、瞬時、耐力が低下する。この時、柱と土台の境あたりでGFRPの樹脂部が白く浮いて剥離する様子が見られる (写真2)。その後、試験体DDとEDでは、変位10mm程度まで荷重は徐々に上昇し、土台部のGFRPの樹脂部がほぼ全面で白くなり、剥離したような状態で、長ほぼぞ部が抜け出し、荷重の急激な下降を生じ破壊した。最大耐力の2割以上減の段階で、実験を停止した。試験体FDでは、構造用合板により、最大耐力も初期剛性も高くなるが、逆に変位の伸びは期待できなくなる。

## 4. 実験 [2] 計画—木造耐震壁の補強性能評価

### 4.1 試験体

木造耐震壁の試験体は、既報1, 2) の壁体実験にならない、図6に示すような幅910mm、高さ2,730mmとし、断面が60×105mmの斜材を3段組とする合計3体を計画した。柱と土台の断面を105×105mmとし、載荷用の上部梁は断面を105×240mmとした。3段の斜材は、挿入するだけで留め付けず、端部を5.5mm厚の三角形の合板で落下を防

いだ。3体とも裏面に9mm厚の構造用合板を釘打ちした。斜材の交差部には相欠きを設けて組んでいる。接合金具は、上部梁と柱には羽子板金物を、段組間の水平材 (中棧) と柱にはGFRPとかど金物を、土台と柱にはGFRPとホルダダウン金物を用いた。部材は、柱と斜材にはE70のスギ材を使用した。土台は通常の仕様に従ってヒノキ材を使用した。試験体3体の違いは、引張を受ける水平材のファイバーアンカーの数を変えた点にある。試験体B60-P00はGFRPを全く使用していない。他の試験体には、図7に示すようにアンカー1本 (試験体B60-PG1)、アンカー2本 (試験体B60-PG2) を埋め込んだ。B60-PG1と-PG2で、柱脚と土台を留めるファイバーアンカーはどちらも2本を用いた。

### 4.2 載荷・計測方法

載荷は「柱脚固定式の鉛直構面の面内せん断試験」<sup>4)</sup>の方法に従って、試験体上部の梁に油圧ジャッキで繰り返し加力を与えた。載荷装置ならびに試験体の設置状況を図8に示す。

柱頭部と柱脚部での水平変位の差による見かけの層間変形角で±1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/15 radにおいて、同一変形振幅で正負繰り返しを各3回

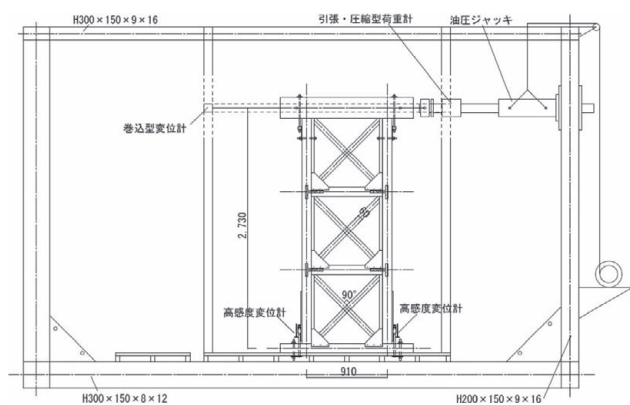


図8 荷重計測方法

行った。荷重の最終は最大荷重に達した後、最大荷重の80%まで低下するか、層間変形角が1/10 radを超えて、油圧ジャッキのストロークの限度に達するまでとした。

## 5. 実験 [2] 結果と考察

### 5.1 水平荷重－層間変形角履歴特性と壁倍率評価

各試験体の水平荷重－層間変形角の履歴曲線を図9に、最終破壊させた引き側の荷重－変形角曲線より作成した完全弾塑性近似を図10に示す。壁倍率に関わる評価値の一覧を表3に示す。壁倍率は変動係数20%として、B60-P00は4.63、B60-PG1は7.74、B60-PG2は6.41となった。いずれ

も高い耐力に相当する値が得られた。また短期基準せん断耐力  $P_0$  はいずれも終局耐力  $P_u \cdot (0.2/D_s)$  で決定される形となった。木造住宅では壁倍率5.0以上は使用できないとしても今後の耐震壁補強の利活用に向く可能性はある。

### 5.2 破壊性状

試験体の最終破壊状況を写真4に、破壊状況の詳細を写真5に示す。壁試験体の破壊は3体とも、基本的に引張荷重時の柱脚のホールダウン金物のビス部の引き抜きずれ破壊による。GFRPは、構造用合板とともに壁の耐力上昇に

表3 耐力と壁倍率 (太字は耐力の最小値を示す)

試験体名	B60-P00	B60-PG1	B60-PG2
降伏耐力 $P_y$ kN	12.53	20.88	13.96
初期剛性 $K$ kN/rad	1110	1841	2315
終局耐力 $P_u$ kN	21.58	26.56	22.04
最大荷重 $P_{max}$ kN	23.49	29.04	25.50
構造特性係数 $D_s$	0.47	0.35	0.35
終局耐力 $P_u \cdot (0.2/D_s)$ kN	9.11	<b>15.25</b>	<b>12.63</b>
$P_{max} \cdot 2/3$ kN	15.66	19.36	17.00
特定変形 (1/120 rad) 時の耐力	10.72	17.68	17.84
短期基準せん断耐力 $P_0$ kN	9.11	15.25	12.63
短期許容せん断耐力 $P_a$ kN	8.26	13.81	11.44
壁倍率 (変動係数20%)	4.63	7.74	6.41

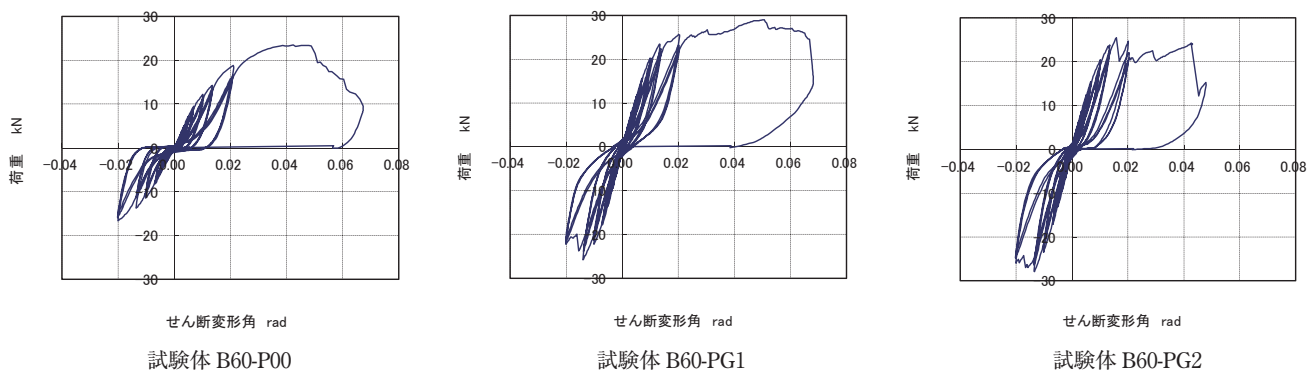


図9 水平荷重－層間変形角曲線

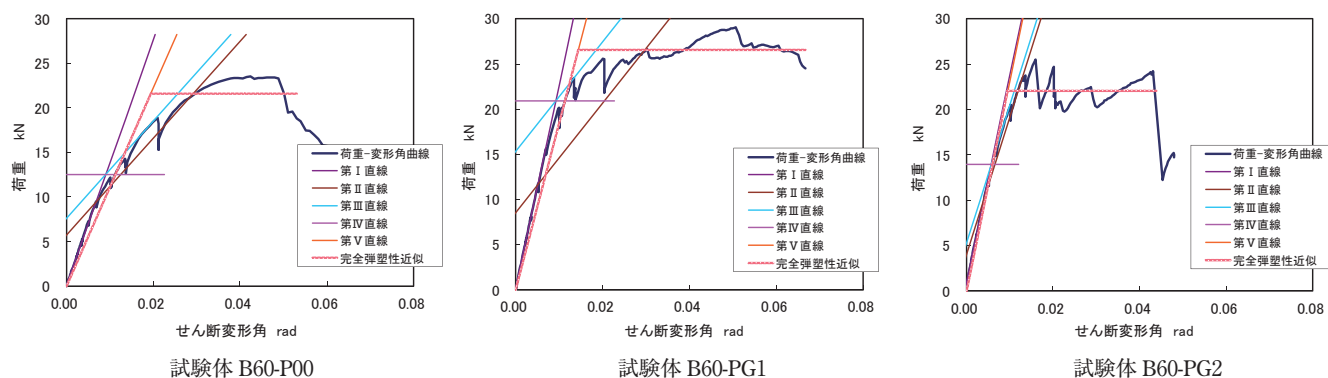


図10 完全弾塑性近似と降伏耐力及び終局耐力



(a) B60-P00



(b) B60-PG1



(c) B60-PG2

写真4 試験体の最終破壊状況



(a) B60-P00

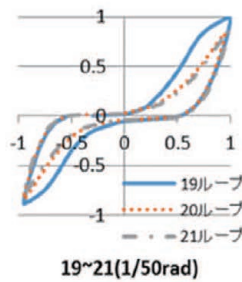
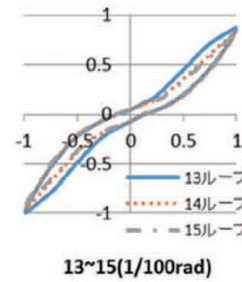
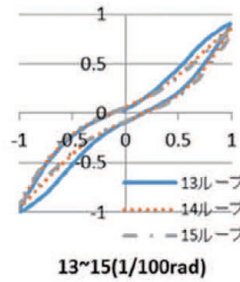
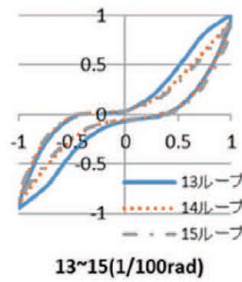
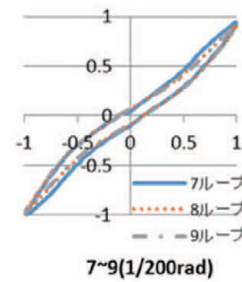
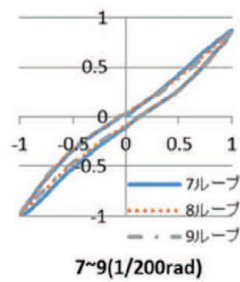
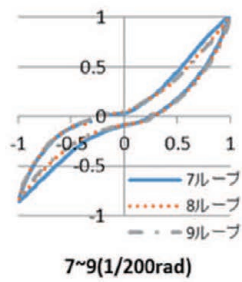


(b) B60-PG1

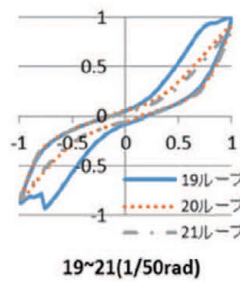


(c) B60-PG2

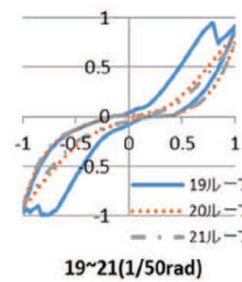
写真5 試験体の破壊状況の詳細



(a) B60-P00



(b) B60-PG1



(c) B60-PG2

図11 荷重-層間変形角の履歴ループ曲線

貢献したが、最終の破壊は柱脚部において生じた。GFRP補強のないB60-P00に比べて、GFRPと構造用合板を併用したB60-PG1とB60-PG2は初期剛性、耐力ともに増大している。ファイバーアンカーの数の効果は、明確には現れていない。中棧のGFRP補強が、壁の最終破壊にあまり関わらなかったためである。試験体B60-PG2は、初期剛性が試験体B60-PG1よりも高く現れたが、最大耐力後の荷重の低下は急で早かった。

### 5.3 履歴曲線のループ形状と履歴吸収エネルギー

各試験体について、荷重-層間変形角曲線の1/200 rad, 1/100 rad, 1/50 radの時の履歴ループを、それぞれの層間変形角折り返し点での荷重と変位で無次元化表示したものを図11に比較して示す。GFRP補強のない試験体B60-P00は明確な逆S字の形状になっている。これは大変形時に部

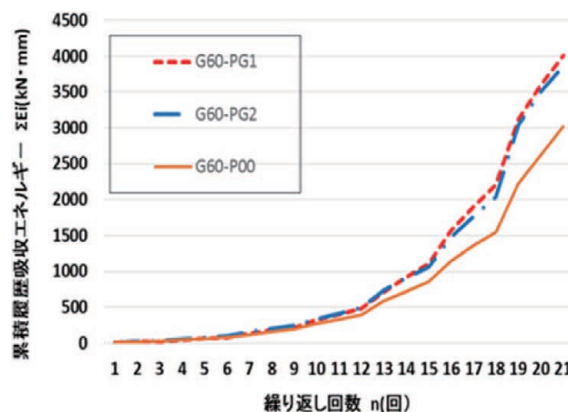


図13 累積吸収エネルギーの比較

材間に隙間ができ、筋かいの抵抗がなくなる荷重の低い過程では滑りが生じているためである。荷重-層間変形角曲線で囲まれるループ面積から算定した履歴吸収エネルギーを図12に示す。図の横軸は繰返し回数を、縦軸はエネルギー吸収量を示す。縦棒グラフは1サイクル毎のエネルギー吸収量を、折れ線グラフはその累積エネルギー吸収量を表す。3つの試験体の累積エネルギー吸収の推移を比較して図13に示す。GFRP補強のない試験体B60-P00はエネルギー吸収量が大変形域で小さい。一方で、試験体B60-PG1, B60-PG2のエネルギー吸収量はほとんど変わらない推移となった。

## 6. 結論

- 1) ファイバーアンカーで固定するGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）は初期弾性範囲で10 kN程度、終局時には20 kN程度の強度を支持できる。ファイバーアンカー数の1本と2本の差は明確ではないが、スギ土台と、ヒノキ土台でGFRPの耐力差は若干生じた。固定する材が堅いとファイバーアンカーの数の差が現れる傾向がある。
- 2) 初期剛性と耐力を確保する方法として、引張を受ける接合部位においてGFRPと構造用合板を併用することは効果に明瞭に現れている。
- 3) 短い木造軸組材を斜材に用いた三段組み構造を、GFRPと構造用合板を併用した2体の木造壁の壁倍率は7.74と6.41となった。また構造用合板のみでGFRP補強を施さない木造壁も壁倍率は4.63となった。本研究の軸組壁を耐震改修用として利用するのに、壁倍率で4.0を超える比較的高い耐力値が得られた。短期基準せん断耐力 $P_0$ はいずれも、塑性域までの粘りを期待できる終局耐力 $P_u$  ( $0.2/D_s$ )で決定される形となった。

## 謝辞

本研究は広島工業大学・学生であった浅原風月・原田亘

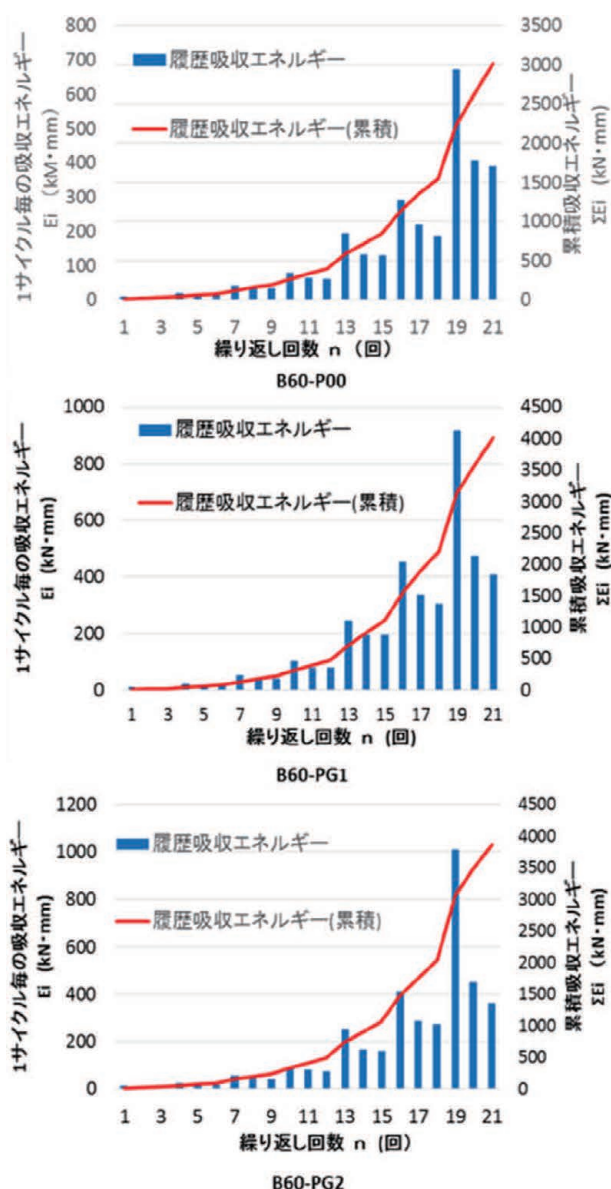


図12 履歴吸収エネルギー

基・草田樹・術勢将秀・濱田将磨の諸君に、平成29年度卒業研究の課題として取り組んで戴いた。また広島県立総合技術研究所林業技術センター 林業研究部の藤田和彦氏には、実験の実施に関して多大な支援と協力を戴いた。ダイナテック株式会社のアブドゥーラ・バセム氏には GFRP 資材の提供を戴いた。ここに記し深甚の謝意を表します。

## 文 献

- 1) 岩井 哲：短い軸組斜材を組み込んだ木造耐震改修用壁体の水平力載荷実験，広島工業大学紀要研究編，第51巻，pp. 1-8 (2017)。
  - 2) 岩井 哲：木造段組筋かい壁の耐力と変形性能評価，日本建築学会中国支部研究報告集，第38巻，No. 250，pp. 281-284 (2015)。
  - 3) an AEGION@company：「FYFE®」。
  - 4) (財)日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2008)。
- 1) 岩井 哲：短い軸組斜材を組み込んだ木造耐震改修用