

## 〈論 文〉

## 繊維材料と金物とを併用した住宅耐震補強技術の開発 (第1報)

柳川靖夫・林 知行<sup>\*1</sup>

## Development of earthquake-proof reinforcement technique for wooden houses with fiber material and metal connector (I)

Yasuo YANAGAWA and Tomoyuki HAYASHI<sup>\*1</sup>

地震時に大きな引き抜き力が発生すると考えられる、高倍率の壁が取り付く在来軸組工法の隅柱を想定し、土台と柱との接合部に引き寄せ金物 (HD金物) を使用するのみならず、ポリビニルアルコール (PVA) 繊維から作製した繊維強化プラスチック (FRP) を接着して補強する技術の開発を試みた。FRPは、2液型のエポキシ樹脂接着剤もしくは1液型ポリウレタン接着剤を使用することにより、木ネジの打ち込みやクランプによる手締めといった簡易な手法で接合部に接着することが可能であり、しかも高い接着耐久性を備えていることが分かった。接合部の引張試験の結果、HD金物とFRPとを適切に併用することにより、HD金物を1個使用した試験体では最大耐力および初期剛性の向上が、2個使用した試験体では初期剛性の向上が認められた。また、FRP補強によりいずれの条件でも柱と土台間の変位は減少し、最大荷重時の同変位は無補強の7~24%の値を示した。さらに、補強によりHD金物の負担が減少したことから、FRPの併用は、地震時における柱の引き抜け対策および接合部の信頼性向上対策として、有効な補強方法であることが示唆された。また、接合部の引張試験において、HD金物およびFRPそれぞれが負担する荷重を調べたところ、FRPが負担する割合は荷重値によらず全荷重の20~30%の値を示し、HD金物とFRPとが一体となって引張荷重を負担していることが示唆された。

In order to reinforce corner column of conventional Japanese wooden houses, which are connected to high-strength shear wall, we investigated reinforcing technique of column-sill joint using metal connector and fiber reinforced plastic (FRP) manufactured from poly vinyl alcohol (PVA) fiber. FRP could be bonded on column-sill joint with separate type epoxy resin adhesive or one-part type poly-urethane resin adhesive by simple pressing method, such as pressing using wood screws or clamps, and it provided durable bonding of wood-FRP. Results of tensile test of column-sill joint showed that by combining FRP and metal connector properly, in the case of using one metal connector, increase of maximum load and initial stiffness were observed, and in the case of using two metal connectors, increase of initial stiffness was observed. Deflections between column and sill decreased remarkably regardless of number of metal connector, and those were 7~24% of non-reinforced specimens. In addition, as FRP reinforcement decreased carrying load at the metal connector, it was suggested that FRP reinforcement was effective measures to protect pulling out of column from sill or to enhance reliability of column-sill joint. We also investigated carrying loads at both FRP and metal connectors under tensile loading, and the carrying load at FRP showed 20~30% values those of total tension load regardless of tension load. This suggested that FRP and metal connector were incorporated together and carried tension load.

---

<sup>\*1</sup> : (独) 森林総合研究所 構造利用研究領域

## 1. はじめに

在来軸組工法の継手および仕口（以下接合部とする）の仕様は、平成12年度建設省告示第1460号で規定されており、これを受けて、例えば高耐力が必要な柱と土台との接合部には、主として引き寄せ金物（以下HD金物とする）が使用されている。しかし、近年重視されている住宅の長期使用を考慮した場合、HD金物による接合であっても、木材の割れや寸法変化による木ネジやボルトといった接合具の緩み、あるいは部材端部へ多数の接合具を打ち込んだ場合材が損傷するおそれがある、といった問題は、改善すべき点であると考えられる。この対策として、他の補強方法を併用する手法が考えられる。その1つとして、高強度繊維による補強が挙げられる。RC造建築物等では、既に多くの実施例が存在し施工方法も示されている<sup>1)</sup>。繊維材料による在来軸組工法の接合部補強は、実施例はRCと比較して少ないものの、近年検討あるいは実施されている<sup>2,4)</sup>。この工法の特長は、接合部の強度および初期剛性が向上すること、木材の割れや寸法変化による接合部の強度低下の危険性が低いこと、材の端部を損傷しないこと、等であり、加えて繊維材料と木材との接着耐久性が高い場合、長期使用においても補強効果の低下は少ないと考えられる。問題点は、施工性が金物よりも劣ることである。

そこで、本研究では、HD金物を使用した来軸組工法の柱と土台との接合部を繊維材料で補強し、高い強度を備え、かつ長期使用においても強度低下の少ない接合部の開発を試みた。繊維材料として、各種樹脂との親和性が比較的良好なポリビニルアルコール繊維（以下PVA繊維とする）を使用し、施工性を改善するために繊維強化プラスチック（以下FRPとする）に加工した。これを建築現場で施工（接着）するための、簡易な接着方法の開発を試みた。次いで、FRPの使用量や接着形態、あるいは土台の固定方法が、柱と土台との接合部（以下柱-土台接合部とする）の強度に及ぼす影響について一方向単調加力試験により調べ、適切な補強方法について検討を加えた。この結果を基に、FRPとHD金物とを適宜組み合わせさせた試験体を作製し、一方向繰返し加力試験を行い、FRPとHD金物とを併用した接合部における、引張試験時のそれぞれの荷重負担について検討した。

## 2. 材料および方法

### 2.1 FRPの接着方法と接着耐久性試験

表1に試験体作製条件を、図1(a)~(d)に試験体の

表1 接着耐久性試験の試験体作製条件

Table 1 Manufacturing conditions of specimens for bonding durability test

接着剤 <sup>a)</sup>	EP		PU
Adhesive resin <sup>a)</sup>	EP		PU
塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	400		500
Applying rate	400		500
強化材の種類 <sup>b)</sup>	FRP-S1	PVA-S1	FRP-S1
Reinforcement <sup>b)</sup>	FRP-S1	PVA-S1	FRP-S1
圧縮方法 <sup>c)</sup>	S50, S100, CL	CL	S50, S100, CL
Pressing method <sup>c)</sup>	S50, S100, CL	CL	S50, S100, CL

(注) <sup>a)</sup> : EP : 2液型エポキシ樹脂接着剤。PU : 1液型ポリウレタン接着剤。 <sup>b)</sup> : FRP-S1 : 平織りPVA繊維シートを使用したFRP。PVA-S : 平織りPVA繊維シート。 <sup>c)</sup> : S50 : 木ネジ50mm間隔打ち込み圧縮。S100 : 木ねじ100mm。CL : クランプ手締め圧縮。

(Note) <sup>a)</sup> : EP : 2 parts type epoxy resin adhesive. PU : 1 part type poly urethane resin adhesive. <sup>b)</sup> : FRP-S1 : PVA-fiber reinforced plastic. PVA-S1 : PVA-fiber sheet. <sup>c)</sup> : S50 : Pressed by wood screws with 50mm distance. S100:100mm distance. CL:Pressed manually by clamps.

形状および試験片の採取方法を示す。

PVA繊維には(株)クラレのT-5516を使用した。原糸の密度は1.30g/cm<sup>3</sup>、引張強度は1.55GPa、引張ヤング係数は33.8GPaである。この原糸を使用した、編み方が異なる2種類のシート状製品を試作した。幅はいずれも100mmで、一つは平織り（以下PVA-S1とする）、もう一つは綾織り（以下PVA-S2とする）で、縦糸密度は綾織りの方が平織りよりも高い。これらを、メーカーで1プライのFRPに加工した（それぞれFRP1-S1、FRP1-S2とする）。なお、FRPのマトリックス樹脂には、木材への接着を考慮して汎用の2液型エポキシ樹脂を使用した。

試験体は柱-土台接合部を想定し、柱は120×120mm断面で長さ500mmのヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) 気乾材を、土台は同一断面で長さ300mmのヒノキ気乾材を使用した。接着剤には2液型エポキシ樹脂接着剤((株)オーシカ製TE-9、以下EP接着剤とする)、および1液型ポリウレタン樹脂接着剤((株)コニシ製パネルボンドKU、以下PU接着剤とする)を使用した。FRPにはFRP1-S1を使用し、長さ460mmに裁断し、接着直前に木材表面とFRP表面とを#120サンダーで研削した。FRPに、EP接着剤は400g/m<sup>2</sup>、PU接着剤は500g/m<sup>2</sup>塗布した後、図1(a)、(b)に示すとおり試験体両面に堆積し、厚さ20mmのポリエチレン板を上当て、以下の方法で圧縮した。

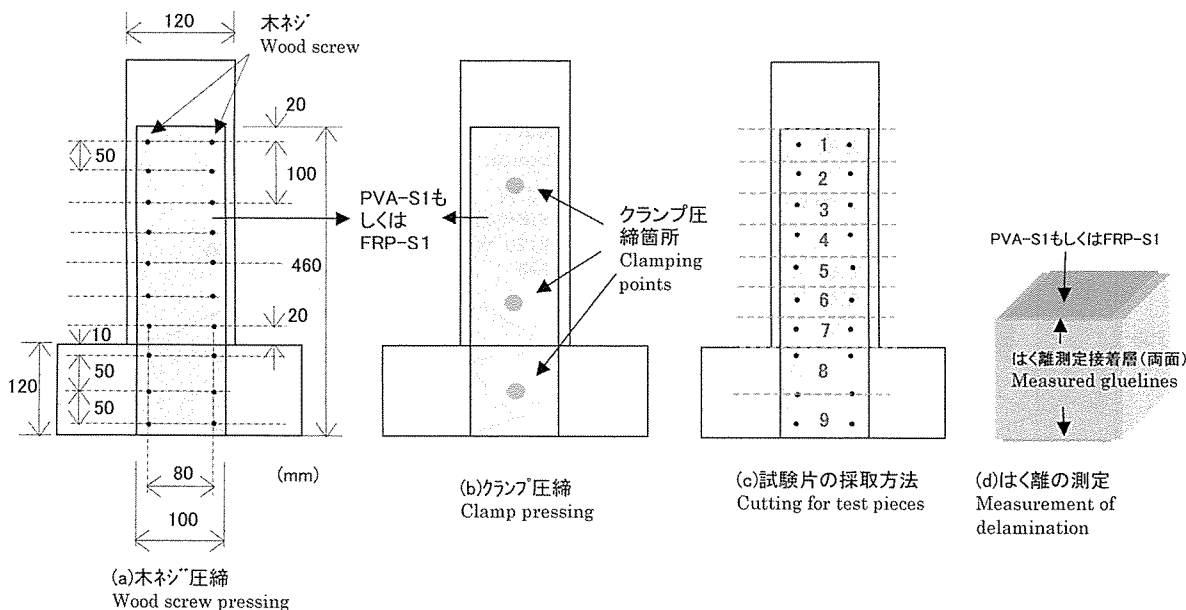


図1 接着耐久性試験の試験体と試験片 Fig.1 Specimens and test pieces for bonding durability test

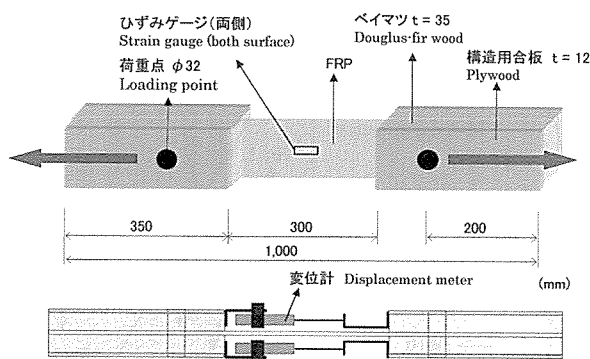


図2 FRPの引張試験体 Fig.2 Specimens for tensile test of FRP

①長さ60mmの木ネジを一定間隔で打ち込み圧縮（長さ方向の間隔は50mmもしくは100mm、幅方向の間隔は80mm。図1（a）を参照）

②クランプを手締めして圧縮（長さ方向の3箇所ですべて圧縮。図1（b）を参照）

圧縮時間はいずれも24時間以上とし、接着時の雰囲気温度は20℃以上であった。また、参考に幅100mm、長さ460mmのPVA-S1を、EP接着剤を600g/m<sup>2</sup>塗布し、クランプ圧縮により接着した試験体を作製した。いずれの試験体も解圧後1週間以上養生し、図1（c）、（d）に示すとおりの試験体採取して、繰り返しの減圧加圧繰り返しかく離試験に供した。試験は集成材の日本農林規格に準拠して行い、1サイクルの処理内容は以下のとおりとした。

Step 1 試験片を室温水中に浸せきし、0.085MPaの減圧を5分。

Step 2 0.51MPaの加圧を1時間。

Step 3 70℃の乾燥機中で24時間以上乾燥。

処理サイクル数は5回とし、各サイクル終了後図1（d）に示すとおりの試験片鋸断面におけるFRPとヒノキ材との接着層でのかく離を測定し、かく離率および1接着層当たりでの最大のかく離率（以下最大かく離率とする）を求めた。

## 2.2 FRPの引張試験

2.1と同じマトリックスを使用し、PVA-S1およびPVA-S2を使用した、幅100mm、長さ1,000mmの2プライのFRPをそれぞれメーカーで作製した（それぞれFRP2-S1およびFRP2-S2とする）。図2に示すとおりのFRP両端の両表面に幅100mm、厚さ35mm、長さ350mmのベイマツ気乾材をEP接着剤で接着した。さらに加力点補強のため、ベイマツ材の表面に厚さ12mmの構造用合板を接着した。加力点として、端部から200mmの位置に径32mmの孔を開けた。FRPの長さ方向かつ幅方向の中央、両表面に1箇所ずつ、ひずみゲージ（東京測器（株）製、L-30）をシアノアクリレート樹脂接着剤で接着し、引張試験時のFRPの縦ひずみを測定した。また、試験体両面に変位計（東京測器（株）、CDP-50）をそれぞれ設置し、伸びを測定した。引張試験には島津試験機製作所製の300kN引張試験機を使用し、加力速度を5kN/min以下として荷重を加えた。なお、試験体数はそれぞれ3体ずつとした。

## 2.3 土台-柱接合部の引張試験

### 2.3.1 A試験（HD金物1個を使用した単調加力試験）

試験体の形状を図3に、試験体の作製条件および試験条件を表2に示す。

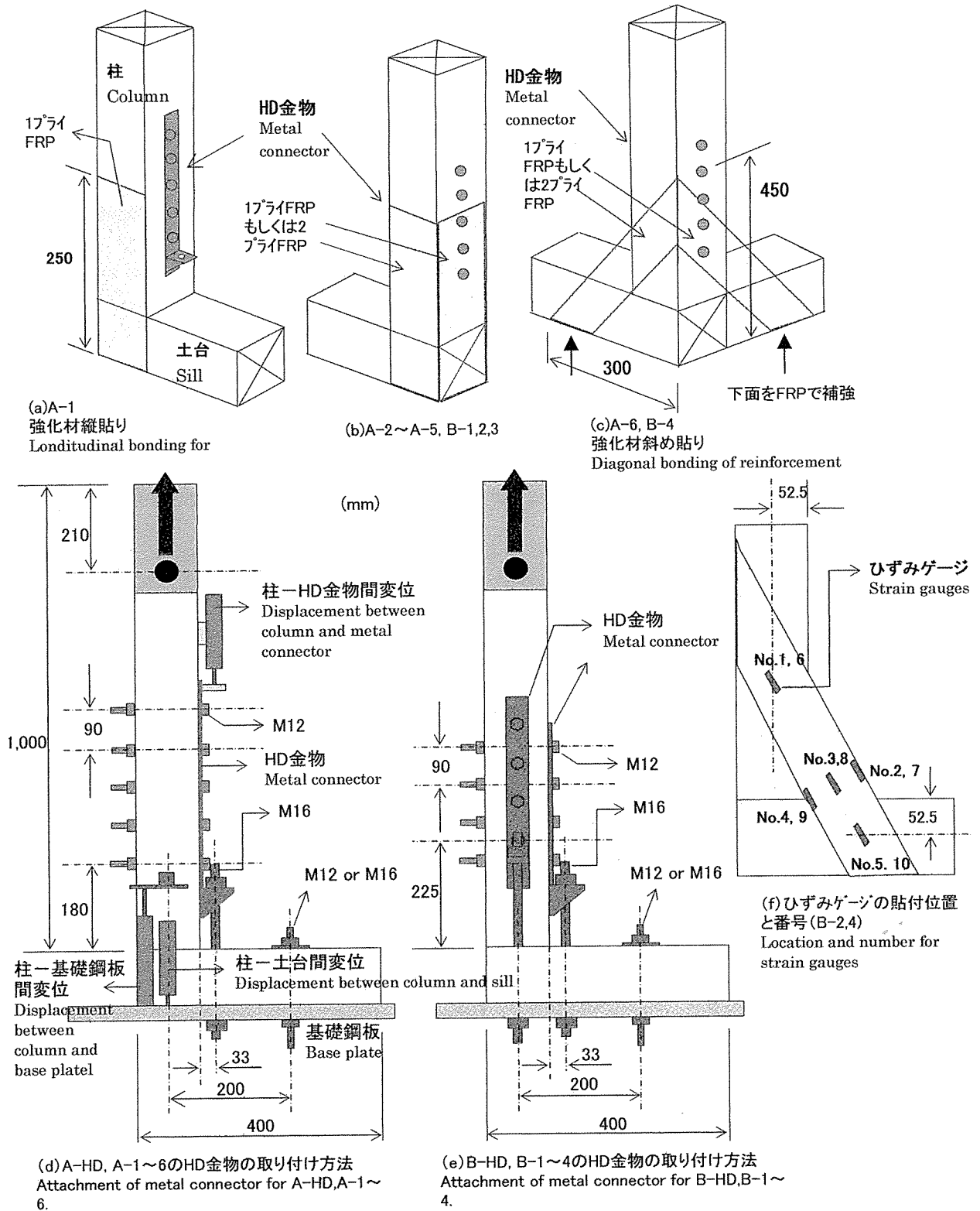


図3 柱-土台接合部の補強方法およびひずみゲージの貼付位置

Fig.3 Method of reinforcement for column-sill joint and the location of strain gauges

(注) HD金物：引き寄せ金物

表2 柱-土台接合部A試験の試験体内容

Table 2 Specimens for A test of column-sill joint

試験体 Specimens	A-HD	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
引き寄せ金物 Metal connector	S-HD25				S-HD25		
強化材 <sup>a)</sup> Reinforcement material <sup>a)</sup>	-				FRP1-S2		
強化材接着方法 <sup>b)</sup> Bonding Pattern for reinforcement <sup>b)</sup>	-				縦貼り		斜め貼り
強化材使用枚数 Volume of reinforcement	-	1	2	3	3	3	2
引き寄せ金物固定ボルト径 (mm) Diameter of affix bolt for sill	12			12		16	12
土台固定座金 Square-metal washer for fixing bolt of sill	W4.5 × 40 角座金		W4.5 × 40 角座金		50 × 100 × 10mm (幅 × 長さ × 厚さ) 鋼板	W4.5 × 40 角座金	

(注) <sup>a)</sup> : 綾織り100mm幅PVA繊維シート1枚を使用したFRP。 <sup>b)</sup> : 図3を参照。

Note <sup>a)</sup> : 1ply FRP with 100mm width PVA fiber sheet. <sup>b)</sup> : Refer to Fig.3.

1個のHD金物を使用し、以下の7種類の条件で各1体ずつ試験体を作製した。

- ① HD金物のみを使用した試験体 (図3 (d)、以下A-HDとする)。
- ② FRP1-S2を1枚、図3 (a)に示すとおり、柱と土台とに、柱の長軸方向に沿って接着 (以下「縦貼り」とする) した試験体 (以下A-1とする)。
- ③ FRP-S2を、図3 (b)に示すように隣接する2面に1枚ずつ縦貼りした試験体 (以下A-2とする)。
- ④ FRPの接着方法は図3 (b)に示すとおりで、2側面のうち1側面にはFRP1-S2を、もう1側面にはFRP1-S2を2枚重ねて縦貼りした試験体 (以下A-3とする)。
- ⑤ A-3と同一の構成で、土台を試験機に固定するボルトの座金を変更 (W4.5 × 40角座金を、厚さ10mm、幅50mm、長さ100mmの鋼板に変更、以下A-4とする)。
- ⑥ A-3と同一の構成とし、土台を試験機に固定するボルト径を変更 (12mmを16mm変更、以下A-5とする)。
- ⑦ 図3 (c)に示すように、2つの土台をL字型に組合せ、隣接する2面にFRP1-S2を1枚ずつ、柱と土台とに斜めに接着 (以下斜め貼りとする) した試験体 (以下A-6とする)。なお、FRPが接着される付近の土台の下面には、100 × 100mmのFRP1-S1をPU接着剤で接着。

いずれも隅柱を想定しており、①はHD金物のみ、他はFRPとHD金物とを使用した。②~④および⑦では、FRPの使用量もしくは接着形態が接合部強度に及ぼす影響を調べた。また、柱と土台とにFRPを接着した場合、引張試験では土台にも荷重が加わるため、⑤および⑥で、土台の固定方法が接合部の強度に及ぼす影響を調べた。

⑤は座金の面積を拡大し、座金における土台の圧縮破壊を抑制する試みであり、⑥は土台を固定するボルトの剛性を高め、同ボルトの変形を減少させる試みである。

すべての試験体は、柱には断面が105 × 105mm、長さ1,000mmのスギ (*Cryptomeria Japonica* D. Don) 気乾材を使用し、土台には断面が105 × 105mm、長さ400mm (A-6のみ400mmおよび250mm) のヒノキ気乾材を使用した。柱と土台とは長さ30mmのほぞ接合とした。また、A-6の土台どうしも長さ30mmのほぞ接合とした。HD金物にはS-HD25 (Zマーク表示金物) を使用し、FRPには幅100mmのFRP1-S2を使用した。FRPの長さは、A-1~5では250mmとし、A-6では試験体に合わせて調整した。接着直前にFRPおよび木材表面を#120のサンダーで研削し、EP接着剤をFRP表面に400g/m<sup>2</sup>以上塗布した。圧縮は、「20mm厚ポリエチレン圧縮板 + 60mm木ネジ100mm間隔打ち込み」により行った。圧縮作業終了後20℃以上の雰囲気中に24時間以上静置してから木ネジを除去し、1週間以上20℃以上の雰囲気中に静置した後、引張試験に供した。なお、加力点として柱端部から210mmの位置に径42mmの孔を開け、厚さ12mmの構造用合板を孔周辺の補強のため相対する2面に接着した。

HD金物の取り付けおよび試験は、「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」に準拠して行った。図3 (d)には、HD金物の取り付け方法および試験体の試験機への固定方法を示す。HD金物の柱への取り付けにはM12ボルトを5本使用し、HD金物は引張試験機の鋼板 (以下基礎鋼板とする) にM16ボルトを使用して緊結した。また、試験体の土台はボルトを使用して基礎鋼板に固定し、その径はA-5のみ16mmとし、他はいずれも12mmとした。

試験は一方方向単調加力とし、サポートを使用して偏心

加力とならないよう配慮した。加力中、柱-基礎鋼板間の変位、柱-土台間の変位、および柱-HD金物間の変位を連続して測定した。変位の測定にはCDP50を使用し、柱-基礎鋼板間、および柱-土台間の変位については相対した2面で測定して平均値を求めた。柱-基礎鋼板間変位を基に、完全弾塑性モデルを適用して性能を評価した。なお、解析には、(独)森林総合研究所・軽部氏が作製したソフト(Pick Point3.24)を使用した。

### 2.3.2 B試験(HD金物2個を使用した単調加力試験)

HD金物を2個使用した柱-土台接合部について、以下の条件で1体ずつ試験を行った。

- ① 2個のHD金物のみを使用した試験体(図3(e)、以下B-HDとする)。
- ② FRP1-S2を1枚ずつ、図3(b)に示すとおり隣接する2面に接着した試験体(以下B-1とする)。
- ③ FRP2-S2を1枚ずつ、図3(b)に示すとおり隣接する2面に接着した試験体(以下B-2とする)。
- ④ B-2と同一の構成で、土台を試験機に固定するボルト径を変更(12mmを16mm変更、以下B-3とする)。
- ⑤ 図3(c)に示すように2つの土台をL字型に組合せ、隣接する2面にFRP2-S2を1枚ずつ斜め貼りした試験体(以下B-4とする)。なお、FRPが接着される付近の土台下面には100×100mmのFRP1-S2をPU接着剤で接着。

FRPは幅100mm、長さはB-4を除き250mmとした。B-4は試験体に合わせて調整した。HD金物には、S-HD20(Zマーク表示金物)を使用した。FRPの接着方法は2.3.1と同様とし、柱へのHD金物の取り付け方法およびHD金物と基礎鋼板との緊結方法も2.3.1と同様とした。なお、土台の基礎鋼板への取り付けにはB-3を除きM12ボルトを使用した。試験終了後、2.3.1と同様に完全弾塑性モデルを適用した。

### 2.3.3 C試験(一方向繰り返し加力試験)

2.3.1および2.3.2の試験の結果を基に、A-HD、A-2、A-6、B-HD、B-1、およびB-4について、試験体をそれぞれ3体ずつ作製し一方向繰り返し加力試験を行った。試験は「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」に準拠して実施し、2.3.1と同様にして完全弾塑性モデルを適用して性能を評価した。また、B-3およびB-4については、図3(f)に示すとおりひずみゲージ(東京測器(株)製L-20)を2枚のFRP上のそれぞれ5箇所、計10箇所にシアノアクリレート系接着剤を使用して接着し、試験中のひずみを連続して測定した。試験終了後に試片を採取して含水率を測定した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 接着性能試験の結果

表3に、接着性能試験の結果を示す。

PVA繊維シートと木材との接着は、EP接着剤を使用することにより高い耐久性を示すことが報告されている<sup>5)</sup>。本研究に使用したFRPは、マトリックスにエポキシ樹脂を使用していることから、PVA繊維シートおよびEP接着剤に対し良好な親和性を示すことが予想される。試験結果は予想の通りであり、いずれの接着条件においてもFRPと木材との接着は高い耐久性を示し、5サイクルの減圧加圧処理後においても、はく離率および最大はく離率ともいずれも5%以下の値であった。また既報<sup>5)</sup>の結果では、PVA繊維シートと木材との接着層せん断強度は木材どうしの接着層せん断強度とほぼ同等の値を示し、繰り返しの減圧加圧処理後においても、顕著な接着強度の低下や木部破断率の低下は観察されていない。したがって、FRPと木材との接着層せん断強度も、木材と木材との接着層せん断強度とほぼ同等であると推測される。

以上の結果より、住宅建築現場で、もしくは既に供用されている住宅に対し、FRPもしくはPVA繊維シートを、木ネジと圧縮板あるいはクランプと圧縮板とを使用した簡易な圧縮方法で、土台と柱との接合部等に接着することが可能であること、またそのような接着方法であっても、地震時等にFRPの補強効果が発揮されること

表3 接着耐久性試験の結果

Table 3 Results of bonding durability test

接着剤 <sup>a)</sup>	EP		PU			
Adhesive resin <sup>a)</sup>	EP		PU			
塗布量(g/m <sup>2</sup> )	400		500			
Applying rate	400		500			
強化材の種類 <sup>b)</sup>	FRP1-S1	PVA-S1	FRP1-S1			
Reinforcement <sup>b)</sup>	FRP1-S1	PVA-S1	FRP1-S1			
圧縮方法 <sup>c)</sup>	S50, S100, CL	CL	S50, S100, CL			
Pressing method <sup>c)</sup>	S50, S100, CL	CL	S50, S100, CL			
はく離率 <sup>d)</sup> (%)	0	1	0	0	1	0
Delamination ratio	0	1	0	0	1	0
最大はく離率 <sup>d)</sup> (%)	0	1	0	0	1	0
Max. delamination ratio	0	1	0	0	1	0

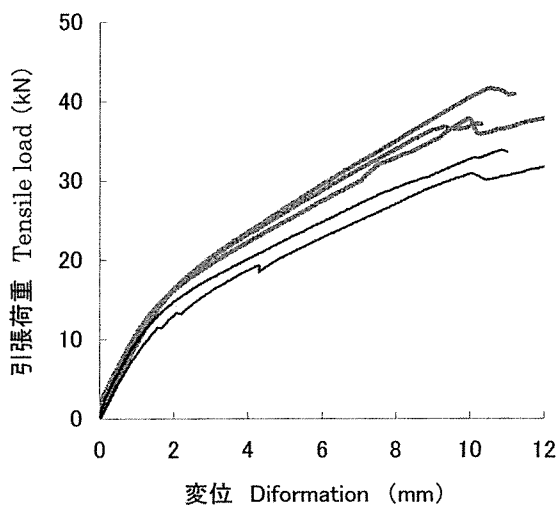
(注) n=9。 <sup>a)-c)</sup>: 表1を参照。 <sup>d)</sup>: 平均値。

Note: n=9. <sup>a)-c)</sup>: Refer to Table 1. <sup>d)</sup>: Average values.

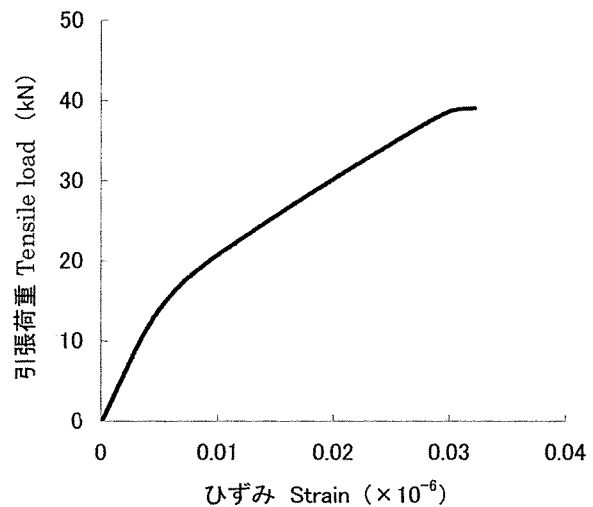
表4 FRPの引張試験の結果 Table 4 Results of tensile test of FRP

試験体 Specimen	FRP2-S1-1	FRP2-S1-2	FRP2-S2-1	FRP2-S2-2	FRP2-S2-3
最大荷重 (kN) Max. load	31.70	33.81	41.60	37.14	39.30
引張強度 (MPa) Tensile strength	117.3	136.0	135.6	119.5	124.3
破壊伸び (mm) Elongation at rupture	12.8	11.0	11.2	10.3	15.6
破壊伸度 (%) Elongation ratio at rupture	4.3	3.7	3.7	3.4	5.2
破壊位置 <sup>a)</sup> Location of rupture <sup>a)</sup>	荷重点近辺 Loding point	FRP端部 End of FRP	FRP端部 End of FRP	FRP端部 End of FRP	荷重点近辺 Loding point

(注) <sup>a)</sup> : すべての試験体は引張破壊した。(Note) <sup>a)</sup> : Failure of each specimen was tension rupture.



(a)引張荷重-変位曲線 Tensile load - diformation curve  
注(Note) : — :FRP2-S1、..... :FRP2-S2。



(b)引張荷重-ひずみ曲線 Tensile load - strain curve  
試験体 (Specimen) :FRP2-S2-1

図4 FRP試験体の引張試験の結果 Fig. 4 Results for tensile test of FRP specimen

が期待できると考えられる。

### 3.2 FRPの引張試験の結果

FRPの引張試験の結果を表4に、図4 (a)には引張荷重-変位曲線を示す。

FRP2-S2はFRP2-S1より縦糸密度が高いため、各試験体ともFRP2-S1より高い最大荷重を示し、荷重-変位曲線はより大きい傾きを示した。5体中4体の試験体は補強のために接着したベイマツ材の部分内でFRPが破断し、そのうち2体 (FRP2-S1-1およびFRP2-S2-3) は加力点の孔付近で破断した。他の2体 (FRP2-S1-2およびFRP2-S2-2) は、ベイマツ材をFRPに接着する際に打ち込んだ木ネジ付近で破断した。したがって、これら試験体での破壊荷重は真のFRP強度とは見せせない。FRP2-S2-1のみ端部ではあるもののFRPのみの部分で

破断し、表4に示すとおり破壊荷重は41.6kNであった。PVA-S2およびマトリックス樹脂の強度はそれぞれ均一とであると考えられることから、幅100mmで1プライのFRP1-S2は、約21kNの引張荷重に耐え得ると推測される。

また、図4 (a)に示すとおり引張荷重が15kNの手前付近で荷重-伸び曲線の傾きが変化した。これは他の試験体でも同様であり、以下の理由によるものと推測される。すなわち、荷重開始後しばらくは、PVA繊維シートとマトリックス樹脂とは一体となって挙動する。しかし、その後荷重が増加するにしたがいPVA繊維シートとマトリックス樹脂との界面で破壊が発生するため、もはや繊維とマトリックス樹脂とが一体となって挙動しなくなる。そのため、FRPの引張ヤング係数が減少し、傾きも変化するものと推測される。

表5 柱-土台接合部A試験の結果 (完全弾塑性モデル)

Table 5 Results of A test for column-sill joint (Bi-linear model)

試験体 <sup>a)</sup> Specimen <sup>a)</sup>	A-HD	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
最大荷重 (Pmax.) Max. load (kN)	45.3	45.3	67	70.8	75.9	71.1	76.9
最大荷重時柱-基礎鋼板間変位 (mm)	34.2	34.2	18.8	27.2	24.4	25.4	27.7
Column-foundation displacement at max. load							
降伏変位 Displacement at yield (mm)	8.3	8.3	4.7	5.8	6.5	6.4	10.3
終局変位 (0.8Pmax) (mm)	34.9	34.9	40.5	28.7	24.4	25.4	28.2
Ultimate displacement (0.8Pmax)							
初期剛性 Initial stiffness (kN/mm)	2.9	2.90	8.11	6.53	5.69	5.37	3.9
塑性率 Ductility factor	2.52	2.52	5.77	3.11	2.09	2.23	1.57
構造特性係数 Structural characteristic factor	0.50	0.50	0.31	0.44	0.56	0.53	0.68
最大荷重時柱-土台間変位 <sup>b)</sup> (mm)	34.2	25.2	7.5	2.3	3.5	4.0	7.1
Column-sill displacement at max. load <sup>b)</sup>							
最大荷重時柱-HD金物間変位 (mm)	-	5.2	5.7	8.8	6.1	9.6	-
Column-metal connector displacement at max. load							

注：完全弾塑性解析には、柱-基礎鋼板間の平均変位を使用した。<sup>a)</sup>：表3を参照。<sup>b)</sup>：2変位計の平均値。

Note : Average displacement between column and foundation were used for bi-linear model. <sup>a)</sup> : Refer to Table 3. <sup>b)</sup> : Average value of two displacement meters.

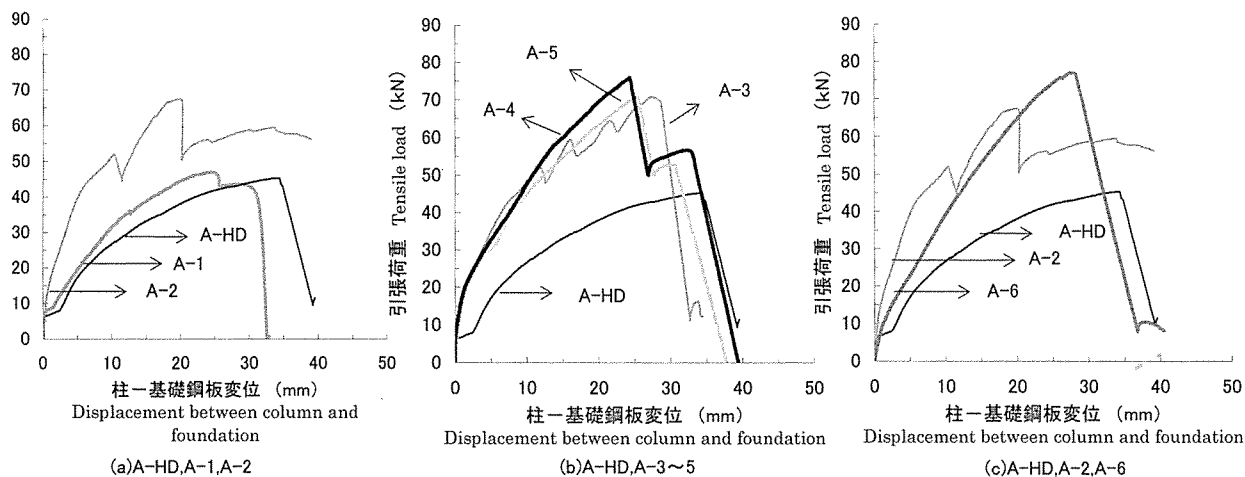


図5 柱-土台接合部A試験の結果 Fig. 5 Results for A test for column-sill joint

引張荷重-ひずみ曲線は、FRP2-S1およびFRP2-S2の各試験体とも、それぞれほぼ同じ形状を示した。図4(b)にはFRP2-S2-1試験体の結果を示す。曲線の傾きが変化するのはひずみが $0.005 \times 10^{-6}$ 付近であり、近似式をあてはめた結果以下の4次式の適合性が高く、同式を接合部引張試験時にFRPが負担する荷重の算出に使用した。

$$Y = -1E+08X^4 + 8E+06x^3 - 221849x^2 + 3649.8x - 0.1941$$

$$R^2 = 0.9997$$

### 3.3 柱-土台接合部A試験の結果

A試験の結果を、表5および図5(a)~(c)に示す。

HD金物と1枚のFRP1-S2とを併用するのみでは、図5(a)のA-1の結果が示すとおり、A-HDと同程度の荷重で破壊が発生した。初期剛性もA-HDと変わらなかったものの、表5に示すとおり、最大荷重時における柱-土台間の変位は減少したことから、FRPの補強効果は認められた。しかし、土台に接着したFRPにより土台側面に柱長軸方向への引張力が加わり、土台下部に割裂破壊が発生したため、最大荷重が増加しなかったものと推測される。試験体の調整に際し、土台下部に割れが位置するように配慮したことも、このような結果の一因であると考えられる。



一方、土台木口面にもFRPを接着したA-2では、A-HDより大きい初期剛性および最大荷重を示した。50kNに達した後、一旦荷重が低下したのは、土台の一部における割裂破壊もしくはHD金物の柱へのめりこみ等が原因と推測される。68kN付近で生じた顕著な荷重の低下は、1枚のFRPが土台と柱との間で破断したためであり、破壊は土台側面に接着したFRPで発生した。しかし、土台木口面に接着した残りの1枚のFRPは破壊せず荷重を負担し続け、そのため、荷重が漸増した後に減少し、最終破壊はHD金物の破断により生じた。

FRP1-S2を計3枚使用(1枚+2枚)したA-3では、初期剛性は2枚使用したA-2より低い値を示し、最大荷重はわずかに増加した。FRPの使用枚数が増加したにもかかわらず、初期剛性が増加しなかったのは、以下の理由によるものと推測される。すなわち、土台と柱とが緊結されることにより、土台固定ボルトとHD金物の固定ボルトの2箇所で引張荷重を基礎鋼板に伝達するため、柱-基礎鋼板間の変位は減少し初期剛性は向上する。一方、補強試験体における引張荷重の増大に伴う変位の増加は、土台を固定する座金での土台の圧縮破壊、HD金物の変形、アンカーボルトの変形、あるいは土台と基礎鋼板との接触面における土台の圧縮変形等に起因するものと推測される。これらの変形は、いずれもFRPの使用量に大きく依存するものではないと考えられる。そのため、FRPの使用枚数が増加しても柱-基礎鋼板間の変位は減少せず、初期剛性が増大しなかったものと考えられる。

A-2とA-3との間で最大荷重に顕著な差が認められなかったのは、A-3では1側面においてFRPの破壊が徐々に進行したため、3枚のFRPは最終破壊まで1体となって荷重を負担しなかったためである。

一方、土台の固定方法が初期剛性および最大荷重に及ぼす影響は明白ではなかった。すなわち、図5(b)に示すようにA-4では土台固定のため幅50mm、長さ100mmの鋼板を使用したにもかかわらず、初期剛性はA-3よりも低い値であった。また土台固定ボルトを16mmに変更したA-5も、初期剛性および最大荷重ともA-3より低い値を示した。これは、初期剛性を決定した試験体の柱-基礎鋼板間の変位中で、座金における土台の圧縮変形が寄与する割合が小さかったためであり、また、同じくアンカーボルトの変形が占める割合も小さかったためであると推測される。つまり、引張試験の初期段階においては、座金での土台の圧縮変形およびアンカーボルトの変形は、それぞれ小さいものと考えられる。

土台を2個使用し、それぞれにFRPを斜め貼りして柱

と土台とを緊結したA-6は、表5および図5(c)に示すとおり、縦貼りしたA-2と比較して初期剛性は低いもののより高い最大荷重を示した。破壊は、側面FRPの破断、木口面FRPの土台での接着層せん断破壊、およびHD金物の破壊がほぼ同時に発生した。

以上の結果より、S-HD25を1本使用した隅柱の補強では、FRPは2枚以上使用する必要があること、十分な補強効果を得るには土台の割裂破壊を防止する措置が必要であり、対策として木口面にFRPを接着することは有効な手法であること、および土台の固定方法は接合部の強度および初期剛性に影響を及ぼさないことが判明した。

### 3.4 FRPとHD金物との組合せB試験の結果

B試験の結果を、表6および図6(柱-基礎鋼板間変位)に示す。

B-HDではHD金物で破壊が発生し、B-1およびB-2では、側面に接着したFRPの土台でのせん断破壊後、HD金物の破壊が徐々に進行した。B-3では、側面に接着したFRPの土台でのせん断破壊後まもなくHD金物が破壊した。B-4は、加力点付近の柱が引張破壊したため、接合部の真の耐荷重は不明である。

表6に示すとおり、S-HD20を2個使用すると(B-HD)、初期剛性はS-HD25が1個の場合(A-HD)よりも顕著に向上した。しかし、FRPを接着したことによる初期剛性の向上はほとんど認められず、また、最大耐力も向上しなかった。さらに、図6に示すとおりB-HDおよびB-1~4の柱-基礎鋼板間変位は、それぞれ類似した経緯を示した。この結果から判断すると、HD金物を2個使用した場合はFRPの補強効果は認められないように見受けられる。

一方、B-HDにおける最大荷重時の柱-基礎鋼板間変位と、FRPで補強した各試験体の最大荷重時柱-土台間変位とを比較すると、表6のとおり後者は前者より低い数値を示し、FRPの補強効果が認められた。また、B-HD試験体ではHD金物が全荷重を負担することから、HD金物自体の破壊やHD金物の柱へのめり込み、HD取り付けボルトのめり込みによる柱の損傷、および取り付けボルトの変形等が加力とともに進行し、金物および柱が著しく損傷する。しかし、FRPで補強することによりHD金物への負担が減少し、これらの損傷が減少する。減少した分の荷重はFRPを通して土台に伝わるものの、土台の木口面や下部を補強する等の措置を施すことにより、土台の大きな損傷を防ぐことができ、また最終破壊もFRPの破断もしくは接着層でのせん断破壊であるため、最終破壊時に土台や柱を大きく損傷することはない。これらのことから、最大荷重は増加しないもののFRPに

表6 柱-土台接合部B試験の結果 (完全弾塑性モデル)

Table 6 Results of B test for column-sill joint (Bi-linear model)

試験体 <sup>a)</sup> Specimens <sup>a)</sup>	B-HD	B-1	B-2	B-3	B-4
最大荷重 (Pmax.) Max. load (kN)	102.9	104.8	99.4	109.5	117.0
最大荷重時柱-基礎後鋼板間変位 (mm)	25.0	22.6	19.1	24.5	25.3
Column-foundation displacement at max. load					
降伏変位 Displacement at yield (mm)	6.5	5.6	7.1	6.4	8.8
終局変位 (0.8Pmax) (mm)	29.3	23.4	25.2	27.9	25.3
Ultimate displacement (0.8Pmax)					
初期剛性 Initial stiffness (kN/mm)	8.57	9.43	8.21	8.62	7.20
塑性率 Ductility factor	2.73	2.3	2.22	2.47	1.81
構造特性係数 Structural characteristic factor	0.47	0.53	0.54	0.50	0.62
最大荷重時柱-土台間変位 <sup>b)</sup> (mm)	25.0	3.6	3.4	7.2	3.6
Column-sill displacement at max. load <sup>b)</sup>					
最大荷重時柱-HD金物間変位 <sup>c)</sup> (mm)	7.8	8.3	7.7	9.6	3.8
Column-metal connector displacement at max. load <sup>c)</sup>					

(注) 表5を参照。<sup>c)</sup>: 2つの引き寄せ金物での平均値。Note: Refer to Table 5. <sup>c)</sup>: Average value at two metal connectors.

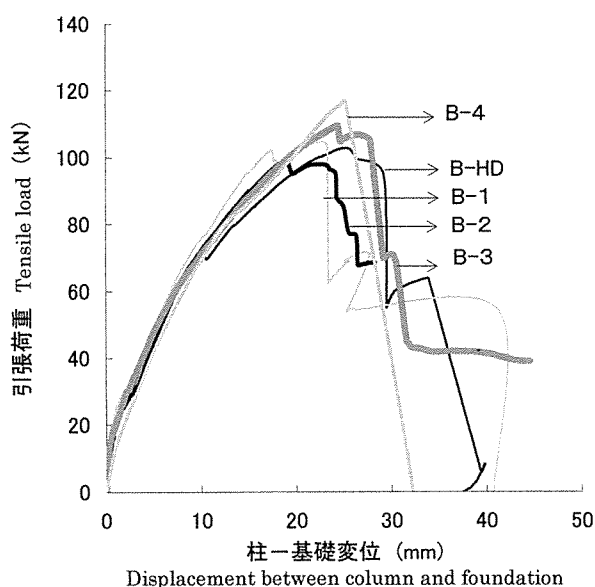


図6 柱-土台接合部B試験の結果

Fig. 6 Results for B test for column-sill joint

よる補強は、高耐力が必要な隅柱の土台-柱接合部の安全性を向上させる効果が示唆される。

### 3.5 C試験 (一方向繰り返し加力試験) の結果

#### 3.5.1 S-HD25を1個使用した試験体の結果

試験結果を表7に示す。

FRPで補強した試験体はいずれも無補強のA-HDより高い接合強度を示し、その順はA-6>A-2>A-HDであった。図7に示すとおり、A試験の結果と同様A-2では段階的に破壊が進行した。一方、初期剛性はA-2>A-6>

A-HDの順であり、塑性率はA-2>A-HD>A-6であり、A-6はA-HDより低い塑性率を示した。この理由は、A-6の1体で最大荷重を示した後に最終破壊が発生し、完全弾塑性モデルを適用した場合、降伏点変位が大きく算出されたため同試験体の塑性率が低くなった影響である。

試験における吸収エネルギー、すなわち変位曲線、横軸および0.8Pmaxでの変位とで囲まれる面積を比較するとA-2>A-6>A-HDの順であり、A-2が最も高い値を示した。また、最大荷重時において柱-土台間変位は、A-HDが31.0mm、A-2が2.0mm、A-6が6.5mmを示し、FRPを接着することにより著しく柱-土台間変形が減少した。最大荷重時におけるA-2およびA-6の、柱-基礎鋼板間変形は、それぞれ22.5mmおよび23.7mmであったことから、柱-土台間変位との差は、A-2では20.5mm、A-6では17.2mmとなり、この変位差は土台の変形もしくは柱と土台間での変形等に起因するものと推測される。

終局変位 (0.8Pmax) はA-HDが最も大きい値を示したものの、そのばらつきもA-2およびA-6より大きく、図7に示すとおり、最終的に荷重が大きく低下した時点の変位 (以下最終破壊直前変位とする) を比較しても、A-HDはA-2およびA-6よりもばらついていた。これらの結果は、以下の理由によるものと推測される。すなわち、引張荷重が増加するにしたがいA-HDではHD金物の変形に伴う柱へのめり込み、HD金物の取り付けボルトの柱へのめり込みが進行し、図8に示すとおり最終的にHD金物で破壊が発生する。そのため、柱と基礎鋼板間との変形は、柱 (スギ材) の材質に左右されるものと

表7 柱-土台接合部C試験の結果(1) Table 7 Results of C test for column-sill joint (1) (Bi-linear model)

試験体 <sup>a)</sup> Specimen <sup>a)</sup>		A-HD	A-2	A-6	B-HD	B-1	B-4
柱の動的ヤング係数 (GPa)	Column's dynamic modulus of elasticity <sup>b)</sup>	8.3	8.0	8.4	8.0	8.1	8.2
柱の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Column's density <sup>b)</sup>	0.43	0.42	0.40	0.43	0.41	0.39
最大荷重 (Pmax) (kN)	Max. load	56.2	68.2	74.6	109.9	100.5	123.1
最大荷重時柱-基礎鋼板間変位 (mm)	Column-foundation displacement at max. load	31.0	22.5	23.7	34.3	22.1	23.4
降伏変位 (mm)	Displacement at yield	8.8	6.4	13.2	9.8	5.5	8.3
終局変位 (0.8Pmax) (mm)	Ultimate displacement (0.8Pmax)	33.5	31.1	29.1	35.3	24.5	27.1
初期剛性 (kN/mm)	Initial stiffness	3.31	6.52	3.97	6.53	9.41	6.92
塑性率	Ductility factor	2.17	3.29	1.62	2.36	2.54	1.87
構造特性係数	Structural characteristic factor	0.56	0.43	0.70	0.54	0.49	0.60
最大荷重時柱-土台間変位 <sup>c)</sup> (mm)	Column-sill displacement at max. load <sup>c)</sup>	31.0	2.0	6.5	34.3	3.6	8.1
最大荷重時柱-HD金物間変位 <sup>d)</sup> (mm)	Column-metal connector displacement at max. load <sup>d)</sup>	9.8	8.1	9.0	13.9	7.4	9.0

(注) <sup>b)</sup>: 平均値。他は表6を参照。n = 3 (B-4のみ n = 2)。 (Note) <sup>b)</sup>: AVERAGE value. Others refer to Table 6. n=3 (Only B-4 n=2) .

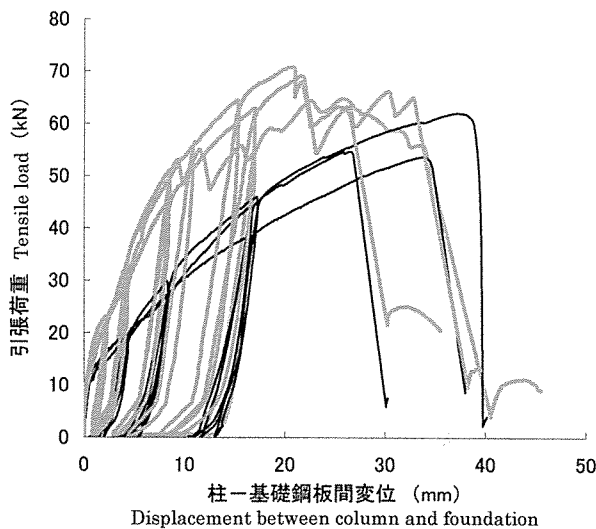


図7 柱-土台接合部C試験の結果(1)

Fig. 7 Results for C test for column-sill joint (1)

(注) Note — A-HD、- - - : A-6, n=3。

推測され、最終破壊直前変位での変位がばらついたものと考えられる。

一方、FRPで補強した試験体では、まず1枚のFRPが破壊した後HD金物が破壊する形態が多かった。そのため、図9に示すとおり、少なくとも1枚のFRPは柱と土台とを緊結して最終破壊まで荷重を負担しており、HD金物の変形はA-HDより小さい。残りの1枚のFRPが破壊した際、HD金物にはA-HDでの最大荷重以上の荷重

が急激に加わる。しかし、取り付けボルトの柱へのめり込み等は迅速に進行せず、また、HD金物の破壊が引き続いて発生することから、スギ材の材質によらず最大変位が増加しなかったものと推測される。したがって、FRPで強化した試験体では破壊は主として荷重に依存すると考えられるため、最終破壊直前変位のばらつきが小さかったものと推測される。

以上の結果は、表7および図10よりも確認できる。すなわち、図10に示すとおりA-2におけるHD金物と柱間の変位は、同一荷重で比較するとA-2,A-6<A-HDであり、FRPの接着によりHD金物の負担が減少している。

隅柱の補強におけるFRPの接着方法と補強効果については、縦貼り、斜め貼りで効果が異なる面が見られ、斜め貼りはより高い破壊荷重を示したものの初期剛性は低かった。縦貼りでは1つの土台に2枚のFRPを接着するため、1つの土台に負担が集中するのに対し、斜め貼りで荷重が2つの土台に分散するため、土台1つ当たりの荷重負担は減少する。しかし、斜め貼りでは、FRPを接着する土台の下面での割裂破壊を防止する措置を別途行うことが望ましい。一方、縦貼りでは土台木口面にFRPを接着することから、土台の割裂破壊防止策を別途行う必要はない。これらの点を考慮すると、土台下面の割裂破壊防止対策が行える場合は斜め貼りを、これを行わない場合は縦貼りを採用する等、適宜使い分けられたいと考えられる。

表8 一方向繰り返し引張試験での各荷重段階におけるFRPの負担荷重

Table 8 Carrying load of FRPs at each loading cycle of one-direction cyclic tensile test

荷重サイクル Loading cycle	1回目 1st.	2回目 2nd.	3回目 3rd.	4回目 4th.	1回目 1st.	2回目 2nd.	3回目 3rd.	4回目 4th.
試験体 <sup>a)</sup> Specimen <sup>a)</sup>								
引張荷重 (kN) Tension load	23.1	45.1	71.0	80.2	21.7	38.8	68.9	79.5
HD金物負担値 (kN) Carrying load of metal connectors	16.9	37.0	53.5	59.0	16.3	30.0	50.6	-
FRP負担値 (kN) Carrying load of FRPs	6.2	8.2	17.5	21.2	5.4	8.8	18.3	12.0b)
FRP負担率 (%) Rate of carrying load for FRP	27	18	25	26	25	23	27	15.0b)
試験体 <sup>a)</sup> Specimen <sup>a)</sup>	B-4-1				B-4-2			
引張荷重 (kN) Tension load	27.0	48.6	91.4	120.5	41.8	65.1	109.3	129.7
HD金物負担値 (kN) Carrying load of metal connectors	16.4	36.4	73.4	96.0	31.9	52.5	86.6	100.3
FRP負担値 (kN) Carrying load of FRPs	10.6	12.1	18.0	24.5	9.9	12.6	22.7	29.4
FRP負担率 (%) Rate of carrying load for FRP	39	25	20	20	24	19	21	23

(注) <sup>a)</sup> : 表3を参照。 <sup>b)</sup> : 1枚のFRPみの負担荷重。 (Note) <sup>a)</sup> : Refer to Table 3. <sup>b)</sup> : Carrying load only of one FRP.

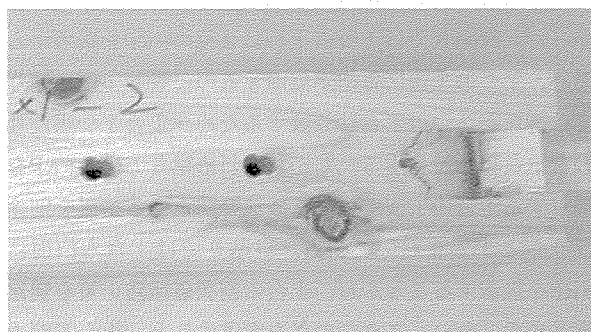
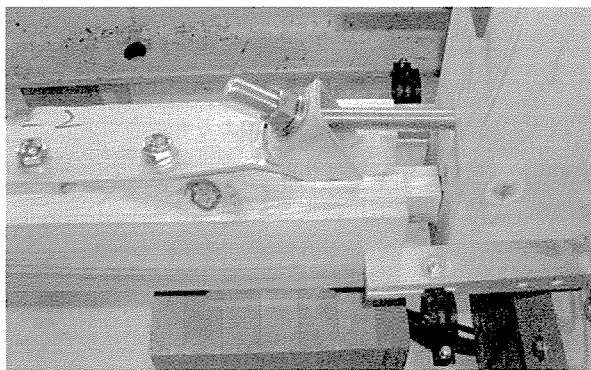


図8 A-HD試験体の破壊

Fig. 8 Failure of A-HD specimen

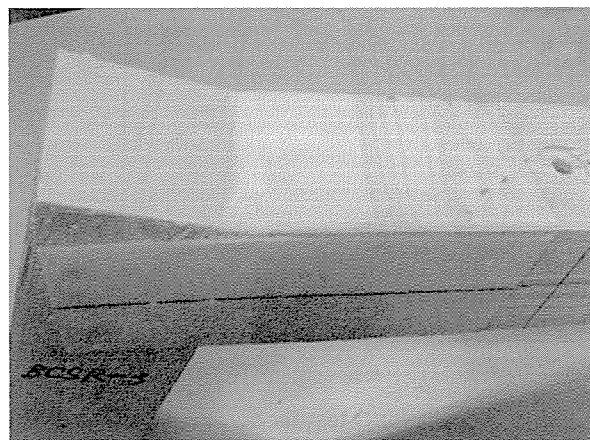


図9 A-2試験体の破壊

Fig. 8 Failure of A-2 specimen

なお、含水率は11~17%であった。

### 3.5.2 S-HD20を2個使用した試験体の結果

表7に示すとおり、B-HDはA-HDより大きな初期剛性を示し、また最大荷重も大幅に向上した。一方、FRP1-S2を計2枚使用したB-1はB-HDよりも高い初期剛性を示したものの、最大荷重、最大平均変位、および吸収エネルギーはB-HDよりも小さかった。これは、FRP

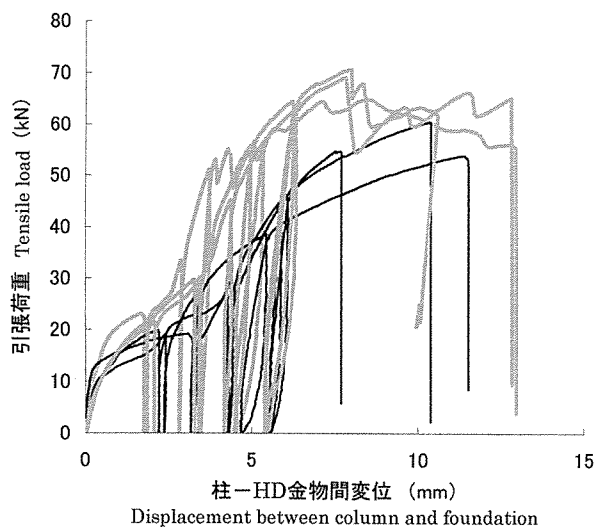


図10 柱-土台接合部C試験の結果 (2)

柱-引き寄せ金物 (HD金物) 間の変位

Fig. 10 Results for C test for column-sill joint (2)

Displacement between column and metal connector

(注) Note — : A-HD, - - : A-6. n=3

の使用量が不足していたのが原因と推測される。

FRP2-S2を2枚使用したB-4では、1体が加力点付近で引張破壊したため、表7中の塑性率および吸収エネルギーは残る2体の平均値である。残りの2体では、まず側面のFRPが土台接着層でせん断破壊が発生した後段階的に破壊が進行し、最終的にはHD金物とFRPとがほぼ同時に破壊した。

B-4はB-HDより高い最大荷重を示したものの、初期剛性はほぼ同等であった。吸収エネルギーはB-HDより低い値を示しており、これは、B-HDの1体が大きな値を示したためである。この理由は3.5.1で記したとおり、柱の材質に起因するものと推測される。一方、柱と土台、および柱とHD金物間のそれぞれの最大荷重時変位は3.5.1と同じ結果が得られ、FRP補強によりいずれも減少した。例えばB-1での最大荷重時柱-土台変位は3.6mmであり、B-HDの34.3mmに対して著しく低い値を示した。

以上の結果より、耐力が高い隅柱の場合はFRPの使用量を増加させることが望ましく、加えて、FRPの土台でのせん断破壊を防止する必要もあるものと考えられる。すなわち、FRPの使用量が少ない場合であっても、柱-土台間変位の減少といった補強効果は得られるものの、FRPが破断すると急激にHD金物に荷重が加わるため、HD金物が損傷する恐れが大きい。これを防ぐには、まずFRPの使用量を増やしFRPの破断を抑止する必要がある。また、B-4の破壊の主たる原因となった土台接着層でのせん断破壊を防止すると、さらに接合部の耐力が向

上することも考えられる。これらの対策として、FRPの幅を広くして使用量を増加させるとともに土台接着層の面積を大きくし、せん断破壊を抑止する、あるいはFRPの積層数を増やし、土台のFRPには木ネジを打ち込んで補強する、等の方法が考えられる。

なお、含水率は11~17%であった。

### 3.6 C試験におけるFRPの引張荷重

#### 3.6.1 FRPが負担する荷重

FRPとHD金物とを併用した場合、加重時に両者は異なる挙動を示すことが予想され、荷重が加わった状態での、それぞれの負担を明らかにする必要がある。そこで、3.2で得られたFRP2-S2の引張荷重-ひずみ曲線の近似式を使用して、FRPが負担する荷重値の算出を試みた。まず、ひずみゲージの値を3.2の近似式に代入して、各時点での引張荷重を算出した。次に、FRPの中央付近に位置するひずみゲージ、「No.2、3、4」および「No.7、8、9」の2組について、算出した引張荷重を基に以下の手法によりFRPが負担している引張荷重を算出した。すなわち、両組のひずみゲージについて、縦軸を引張荷重、横軸をFRP幅方向でのひずみゲージ位置とした図を作成し、これに近似式を当てはめ、同式をFRPの全幅(0~100mm)について積分して近似式下の面積を求め、これを100で除した値をFRPが負担する引張荷重とした。ただし、FRP負担荷重の計算は、繰り返し荷重の各サイクルにおける最大荷重でのみ行い、1プライのFRP1-S2を使用したA-4では、算出した荷重の2分の1を負担する荷重とした。その結果を表8に示す。

表8のA-6-2では、最終の荷重サイクル(4回目)で、2枚のFRPの中片側のFRPに貼付したNo.7、No.8ひずみゲージが測定不可能であったため、残りの1枚のFRPの計算値のみを示した。A-6-1およびA-6-2の3回目までの結果を比較すると、A-6-2の4回目における2枚のFRPが負担する引張荷重は、A-6-1と同程度であったものと推測される。

表8より、A-6およびB-4とも、1回目よりHD金物およびFRPともに荷重を負担しており、FRPの荷重負担割合はB-4-1が39%であったのを除き、他は30%以下であった。したがって、低荷重域から高荷重域まで双方が負担する荷重から考慮すると、HD金物が主でありFRPは従であると言える。

表8に示すとおり、引張荷重の増加にしたがいFRPが負担する荷重も増加する。全荷重に対するFRPの負担する荷重の割合は、B-4-1の1回目およびB-4-2の4回目を除き、A-6およびB-4ともいずれも19~27%の間で推移しており、試験体の間で大きな相異は認められなかった。

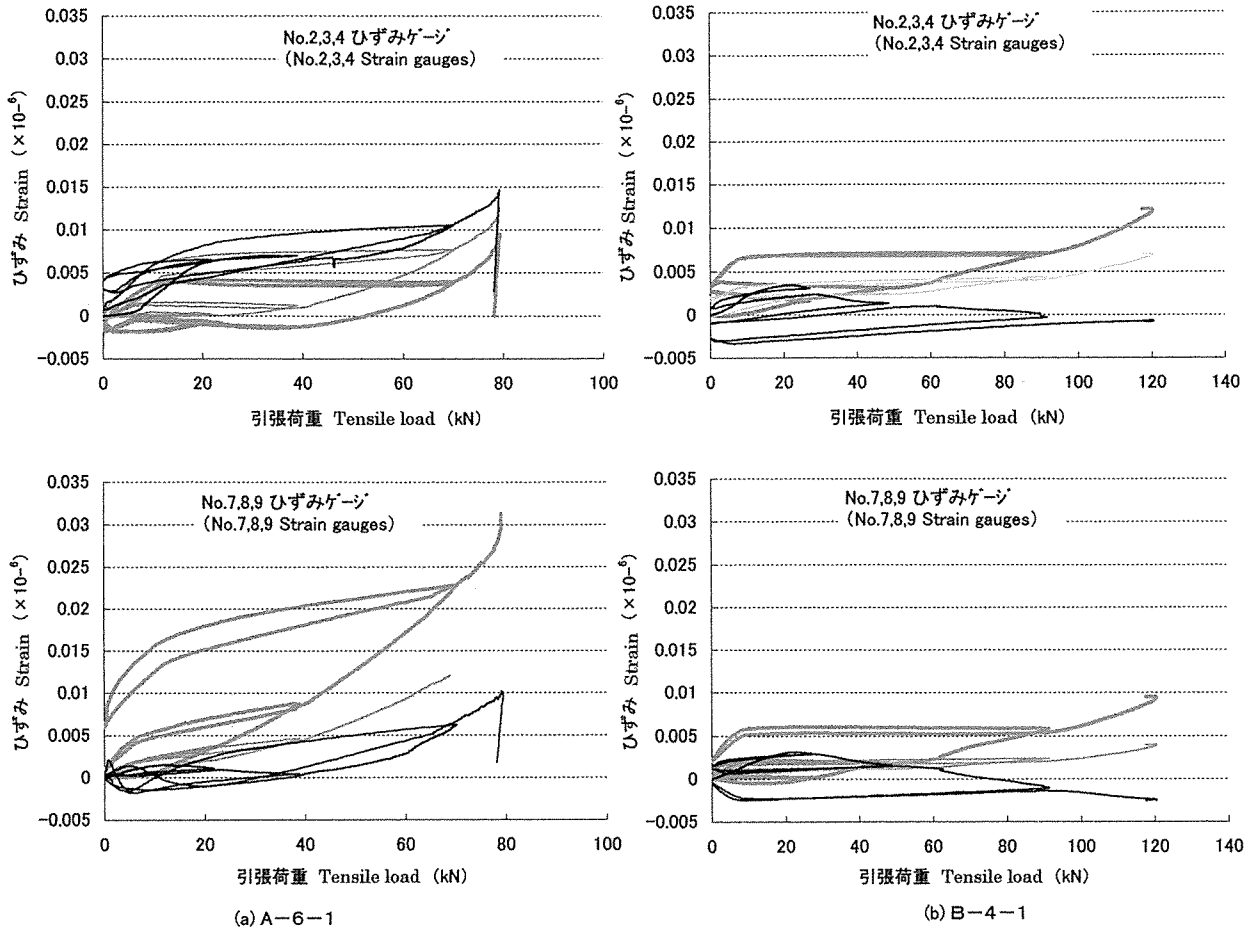


図11 柱-土台接合部C試験の結果 (3) 補強材 (FRP) における引張荷重-ひずみ曲線  
 Fig. 11 Results for C test for column - sill joint (3) Tensile load - strain curve at reinforcement (FRP)  
 (注) — : No.2またはNo.7ひずみゲージ。 — : 同No.3,8, — : 同No.4,9。  
 (Note) — No.2 or No.7 strain gauge. — : No.3 or 8. — : No.4 or 9.

この理由として、以下のことが考えられる。すなわち、加力時にはFRPとHD金物とが一体となって挙動しており、そのため両者の間の力の配分が一種の平衡状態に達するものと推測される。したがって、荷重が一定の割合で配分されているものと思われる。

3.6.2 一方向加力試験におけるFRPのひずみの挙動

図11に示すとおり、A-6-1およびB-4-2とも、各点におけるひずみは緩やかに増加した後、増加する割合が漸増した。この結果は、図4 (b) に示したFRP2-S2のみの引張試験における引張荷重-ひずみ曲線と同様の挙動であるものの、同試験で認められたほど明確な傾きの変化は見られなかった。図11に示すとおり、No.2、No.3、No.4 (もしくはNo.7、No.8、No.9) の各ひずみゲージにおけるひずみは、同一の引張荷重で異なる値を示したことから、FRPの幅方向での応力分布は均一では無く、連続して変化していた。したがって、3.2で示した単純な引張試験の結果とは異なり、接合部補強試験体では、引

張荷重-ひずみ曲線において明確な傾きの変化が観察されなかったものと推測される。そのため、図7に示すとおりA-6の引張荷重-基礎鋼板間変位曲線において、FRPのひずみ(伸び)の挙動の変化に起因する曲線の変化は、明確には観察されなかった。

A-6-1では、No.7でのひずみが他より顕著に大きかった。これは、A-6-1では1プライのFRP1-S2を使用したため、FRPに生じた応力はB-4-2より大きかったためであり、破壊荷重付近でのNo.7のひずみは、図4 (b) におけるFRP-S2の破壊ひずみに近い値を示し、また最大荷重の直前では急激に増加したことから、破断する直前であったものと推測される。しかし、A-6-1における他点でのひずみは、いずれもFRP2-S2の破壊ひずみ以下であったことから、FRPの破断には至らず、3.5.1で記したとおり土台接着層でのせん断破壊が発生したものと推測される。そのため、土台での接着層せん断破壊を防止する措置、すなわちFRPの幅を広くする、あるいは土台の

FRPに木ネジを打ち込む等により、A-6の接合部強度はさらに高まることも考えられる。しかし、No.7では破壊ひずみ付近の値を示したため、さらに負担する荷重が増加するとFRPが破断するとも予想される。したがって、A-6の最大荷重をさらに高める措置を施すことは、施工費用や手間の増加を考慮した場合必要性は低いと考えられる。

一方、B-4-2ではすべてのひずみゲージにおいて、最大荷重におけるひずみはいずれも破壊ひずみ以下であった。最も高い値を示したNo.2およびNo.7であっても、いずれも図4(b)に示すFRP2-S2の破壊ひずみの1/2~1/3以下であった。また、3.5.2で記したとおり加力点付近で破壊した1体を除き、他は土台接着層でのせん断破壊であるため、これを防止する措置を施すことによりさらに接合部の引張強度は高まるものと考えられる。この場合、施工費用は増加するものの大きな増加ではなく、また、高い引き抜き力が発生する接合部でもあり、住宅の長期使用を考慮するならば望ましい措置と考えられる。

#### 4. 結論

ポリビニルアルコール繊維を使用したFRPと、引き寄せ金物とを併用し、在来軸組工法の柱-土台接合部を補強する技術の開発を試みた。2液型エポキシ樹脂接着剤や1液型ポリウレタン樹脂接着剤を使用すると、簡易な圧縮方法であっても、FRPと木材との接着は高い耐久性を示したことから、現場施工が可能と推測された。また、FRPを接着して土台の割裂破壊を防止する措置を施すこ

とにより、引張試験において最大耐力や初期剛性の増加、あるいは柱と土台との間の変位の大幅な減少が認められた。したがって、FRP補強は地震時における柱の土台からの引き抜け防止対策として、きわめて有効であると考えられた。これに加えて、FRP補強は接合部の強度を低下させない効果が期待できる。すなわち、住宅の供用中に発生する木材割れ等は、ボルトや木ネジ等、引き寄せ金物の接合具の効果を低減させ、荷重が加わった場合に早期に破壊が発生する恐れを伴う。しかし、FRPと引き寄せ金物とを併用すると、柱に作用する引き抜き力に対して両者は一体となって荷重を負担することから、引き寄せ金物の負担する荷重が減少し、同金物に起因する接合部の早期破壊が抑止され、接合部の信頼性向上が期待できる。

#### 引用文献

- 1) 小島克郎：連続繊維による耐震補強。東京，理工図書株式会社，2000。
- 2) 瀧野眞二郎，小松幸平，森 拓郎，中谷 誠：日本木材学会大会研究発表要旨集，52，238 (2002)。
- 3) 今村岳大，村上 幸，角 徹三，中治弘行，松野一成：日本建築学会学術講演梗概集C-1，119-120 (2005)。
- 4) 手塚純一，野口 徹，平林 靖，山下 純：日本建築学会学術講演梗概集C-1，385-386 (2004)。
- 5) 柳川靖夫，川井秀一，林 知行：日本接着学会誌，44，288-298 (2008)

(2009年1月13日受理)

