

CFRP プレートをビス・接着剤で固定した木質構造接合部の補強方法の提案

上田 麟太郎¹・澤田 圭²・佐々木 貴信³・坂本 明男⁴

¹ 非会員 北海道大学大学院 農学研究院 (〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目)
E-mail: hokkai_arsenal@eis.hokudai.ac.jp

² 正会員 北海道大学大学院講師 農学研究院 (〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目)
E-mail: ksawata@for.agr.hokudai.ac.jp

³ 正会員 北海道大学大学院教授 農学研究院 (〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目)
E-mail: tak-sas@for.agr.hokudai.ac.jp

⁴ 非会員 デザインアンドイノベーション株式会社 (〒145-0064 東京都大田区上池台5丁目24番15号)
E-mail: akio.sakamoto@dandi-co.com

ビスと接着剤を併用して炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を用いて補強した柱-土台接合部に対して引張加力試験を行った。補強接合部は、CFRPプレートの接着が剥離した後、CFRPプレートへのビスのめりこみが進展し、ビスのパンチングアウトや引き抜きにより荷重が低下して降伏するという変形過程をとった。引張加力によるCFRPプレートの破断は発生せず、変形部はビスのめりこみが生じた位置に限られ、ビスの移動線上から拡大しなかった。CFRPプレートによる補強では、加力時に接合具が変形せず、部材に損傷を生じない場合があり、CFRPプレートの交換により原状復帰が可能であると考えられた。これらの特徴から、CFRPプレートによる補強には従来の補強方法に対し優位性があると示唆された。

Key Words: carbon fibers, polymers, reinforced plastic, column-base joint, reinforcement, adhesive

1. 研究の背景

劣化への対処や耐震性能向上を目的とする木質構造物の接合部の補強には、ビスや釘など接合具により取り付ける金属製補強具(金物)が利用されてきた。しかしこれら金物では、その厚さや重量が施工上の制約となることや、木材との熱伝導率の違いから結露を生じて腐朽害を誘発する可能性が指摘されてきた。こうした課題への対処として筆者らは、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を用いた木質構造の接合部の補強方法に着目した。CFRPは厚みを抑えた設計で高強度・高剛性を達成でき、結露を生じにくい。また、軽量で、寸法安定性に優れ、耐久性も高い特徴をもつ。これらの特徴は木質材料との複合化や木質構造への適用に好都合であり、様々な用途への応用が期待できる。

CFRPの木質材料への応用として、集成材とCFRPを複合化した高機能繊維補強木材(AFRW)が実用化されており、橋梁への適用の検討^{1,2)}など、多くの研究がなされている³⁾。これに対して木質構造分野では、木造建築物へのCFRPの応用に関する研究事例は少なく、また検討内容も文化財の補強・改修事例や検証実験⁴⁻⁶⁾など伝統

工法建築物を対象としたものが中心であり、一般的な木質構造物を対象とした研究例は少ない。こうした背景から、筆者らは、既存木造住宅の大多数を含む在来工法の建築物を対象とした検討を行うこととした。CFRPを用いた補強に関しては、鉄筋コンクリート床版の補強や橋脚の耐震補強での採用事例が一般的であるが、木造住宅を始めとした木質構造物への応用が期待される。既存木造住宅に対する設計・施工指針の確立のためには、在来工法建築物を対象とした研究例の蓄積が必要である。また従来、CFRPの補強対象物への固定方法は専ら接着剤による接着一体化のみであり、その他の手段は検討されてこなかった。そのため、固定にビスなどの接合具を用いた場合に関しては検討例が不足しており、接合具を接着と併用した場合のCFRP補強の効果は未知である。

本研究では、CFRPを用いた木質構造物の接合部補強を念頭におき、木造住宅構造を対象とした柱-土台接合部の補強効果について検討を行う。本報告では、CFRPプレートをビスと接着により固定した柱-土台接合部の補強効果に関して、複数種類のCFRPプレートと接着剤を用いて検討を行った結果を述べる。

2. 方法と材料

(1) 柱-土台接合部試験体

柱-土台接合部試験体はスギ(*Cryptomeria japonica*, 秋田県産)105角材(平均密度 373 kg/m³)から作製した。柱-土台接合部試験体の仕様を図-1に示す。試験体寸法は日本住宅・木材技術センター『木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2017年版)』に規定の柱-土台接合部試験方法⁸⁾に準拠し、柱材を断面 105×105 mm, 長さ 645 mm(うち柄 45 mm), 土台材を断面 105×105 mm, 長さ 1000 mm とした。柄と柄穴の間で摩擦を発生させないため、柱材の柄の断面 30×75 mm, 長さ 45 mm に対して土台材の柄穴は断面 33×78 mm, 深さ 50 mm として柄と柄穴の接触を避けた。

(2) 接着剤

接着剤は常温硬化性の弾性接着剤 2 種類と塑性接着剤 1 種類を選び、試験に供した。接着剤 3 種類はいずれもセメダイン株式会社製である。弾性接着剤 2 種類は商品名「PM-165R」(以降 PM), 「スーパーX ゴールド」(以降 XG)であり、ともに 1 液性変成シリコン接着剤である。塑性接着剤 1 種類は商品名「ハイクイック」(以降 EP)であり、2 液性エポキシ樹脂接着剤である。速乾性の XG, EP は接着後 24 時間以上、硬化時間の長い PM は接着後 72 時間以上を置いてから試験体を試験に供した。

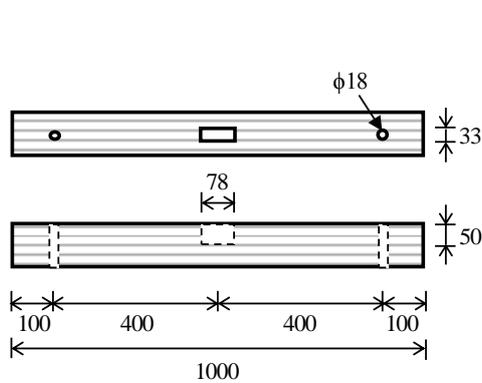


図-1 柱-土台接合部試験体の寸法仕様

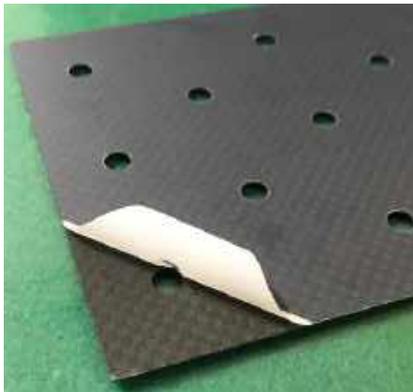


図-3 ピールプライ仕様 CFRP プレートの接着面

(3) CFRP プレート

CFRP プレートはデザインアンドイノベーション株式会社製の 3 種類のプレートを試験に供した。CFRP プレートの形状を図-2に示す。3 種類とも CFRP プレートの大きさは 105×210 mm であり、千鳥状に 20 個のビス穴(φ=6.0 mm)を空けている。プレート仕様の一覧を表 1 に示す。3 種類のプレートはいずれも、T300-3K 炭素繊維(東レ株式会社製, 引張強度 3530MPa)を縦横直角に平織したクロスプリプレグ F6343B-05P(厚さ 0.24mm, 炭素繊維密度 200 g/mm²)を積層した構造である。プリプレグ 2 枚を積層した 2 層構造の仕様を 0.5 mm t, 3 枚を積層した 3 層構造の仕様を 0.75 mm t と呼称する。また、接着性に対するプレート表面(接着面)状態の影響を調べるため、接着面の表面仕上げに応じて研磨仕様(以降, S 仕様)とピールプライ仕様(以降, P 仕様)の 2 種類を用意した。通常、製作された CFRP プレート表面には成型時離型剤が残留しており、接着性の低下が懸念される。S 仕様はプレート表面をペーパー研磨して成型時離型剤の除去を図っている。P 仕様はプレート最外層を剥離可能なピールプライとし、これを接着直前に剥離して除去することで、成型時離型剤と未接触の新鮮な表面を接着面としている。また、S 仕様の接着面は平滑であるのに対し、ピールプライを除去した P 仕様の接着面には炭素繊維の織り目が表れており、平滑ではない点に違いがある(図-3)。

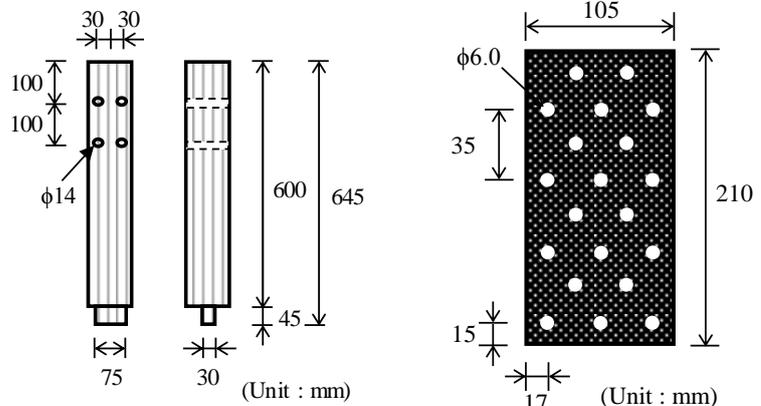


図-2 CFRP プレートの寸法仕様

表-1 CFRP プレート仕様の一覧(厚さ, 質量は実測値)

プレート名称	積層数	厚さ(mm)	質量(g)	接着面の仕様
0.75 mm t P	3	0.75	22.8	P(ピールプライ)
0.5 mm t P	2	0.50	14.9	P
0.5 mm t S	2	0.50	15.8	S(研磨)

(4) 試験体

試験体は柱-土台接合部試験体に CFRP プレートを接着した後、ビス 20 本を留め付けて製作した。使用したビスはシネジック株式会社製、New コンフィット CW41-RF(ねじ径 4.0mm, 全長 41 mm, うちねじ長さ 31 mm)である。製作した試験体の概要図を図-5 に示す。CFRP プレートは柱と土台にまたがり、両側で接着面積が等しく(105×105 mm²)なるよう配置した。CFRP プレートは上下端でビス穴の個数が違うが、すべての試験体で図-5 に示した通り、ビス穴が 3 個ある端を下側として接着した。CFRP プレートの接着時には、接着剤を柱-土台接合部試験体の接着部位と CFRP プレート接着面の両側に塗り、重石を載せて圧縮し養生した。柱材と接する土台材の面にはマスキングテープを貼り、柱材と土台材の隙間にはみ出した接着剤が二者を接着することを防いだ。

試験体の仕様は接着剤 3 種類×CFRP プレート 3 種類の全 9 仕様であり、各 3 体ずつ、計 27 試験体を製作して共試した。試験体仕様の一覧を表 2 に示す。以降、各試験体仕様の呼称は表-2 に従って表記する。

(5) 加力試験

製作した試験体は油圧試験機により、『木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2017 年版)』に規定の柱-土台接合部試験方法⁸⁾に準拠した一方向繰り返し加力による引張試験を行った。荷重は試験機本体に取り付けたロードセルで計測し、変位は柱の外周 4 面に固定した変位計 4 つの測定値の平均として求めた。一方向繰り返し加力は変位制御とし、繰り返し変位の 0.5,1,2,4,6,8,12 倍まで引張と変位 0 mm までの戻しを繰り返す方式とした。繰り返し終了後は、試験体が破壊するか、荷重が最大荷重の 50% に低下するまで単調引張を行った。繰り返し変位には、予備試験として PM0.75P, XG0.75P, EP0.75P の 3 仕様の試験体に対して行った単調引張試験の結果から、最大荷重の 10,40,90% 点を用いた降伏点の評価方法⁸⁾により求めた降伏変位を利用した。求めた降伏変位は PM0.75P が 1.6 mm, XG0.75P が 1.5 mm, EP0.75P が 0.8 mm であり、これを各接着剤仕様での繰り返し変位とした。

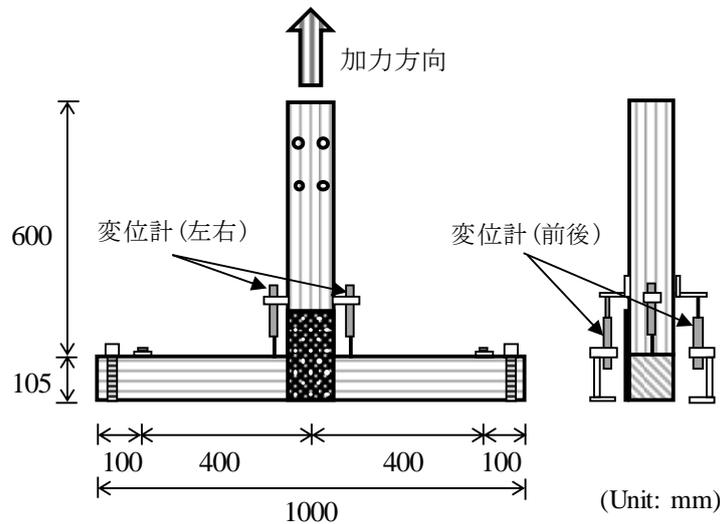


図-5 試験体の概要図

表-2 試験体仕様の一覧

試験体仕様名	接着剤		CFRP プレート		
	種類	商品名	プレート名称	厚さ(mm)	接着面の仕様
PM0.75P	変成シリコン	PM165R	0.75 mm t P	0.75	P(ピールプライ)
PM0.5P			0.5 mm t P	0.5	P
PM0.5S			0.5 mm t S	0.5	S(研磨)
XG0.75P		スーパーX ゴールド	0.75 mm t P	0.75	P
XG0.5P			0.5 mm t P	0.5	P
XG0.5S			0.5 mm t S	0.5	S
EP0.75P	エポキシ樹脂	ハイクイック	0.75 mm t P	0.75	P
EP0.5P			0.5 mm t P	0.5	P
EP0.5S			0.5 mm t S	0.5	S

3. 結果と考察

(1) 補強接合部の変形過程

試験において観察された、CFRP プレート補強接合部の変形過程を図-6 に示す。接合部は加力に従ってまず接着層の剥離が進展し、接着層が片面または両面剥離すると、接着層が剥離した部位でCFRP プレートへのビスのめり込み(炭素繊維の破断)が進展し、その後は次第にビスがCFRP プレート表面からのパンチングアウト、または端部からの引き抜きを生じることで荷重が低下して降伏に至るといった流れをとった。パンチングアウトおよび端部からの引き抜きの様子を図-7 に示す。

荷重変位曲線の包路線を図-8 に示す。接着層の剥離は包路線上では変位 5mm 付近のピークとして観察された。これに続く荷重の急落は、CFRP プレートへのビスのめり込みが進展する過程への移行を表している。この過程ではその後、ビスのパンチングアウトやプレート端部での引き抜きに伴って徐々に荷重が低下する様子が包路線上に確認できる。部材の破壊を伴わない場合、この過程では急激な荷重低下は生じなかった。

接着層が強固であり、瞬間的に剥離が生じた XG および EP 仕様では、接着層の剥離によるピーク荷重が高い値をとり、以降の荷重はピーク未満で推移した。このことから、XG,EP 仕様では接着強度がCFRP プレートへのビスのめり込み強度を大きく上回っていたと言える。い

っぽう PM 仕様では接着層が弱くすべての試験体で緩慢に剥離が進み、高いピークは確認できなかった。PM0.75P ではピークを確認できず、初期の荷重が明らかに後期に劣り、接着層剥離後のほうが高い荷重を示していた。PM0.5P,S では初期にピークを確認できたが、その荷重は後期の荷重と大差なかった。このことから、PM 仕様では接着強度が 0.5 mm t CFRP プレートへのビスのめり込み強度と同等であったと考えられる。なお、弾性接着剤を用いた PM,XG 仕様では接着層の伸びによる剥離の遅延が期待されたが、塑性接着剤を用いた EP 仕様より早期に剥離が生じており、効果はみられなかった。

(2) 最大荷重の 5% 下限値

各仕様で求めた、試験体の最大荷重の 5% 下限値を表-3 に示す。XG,EP 仕様では接着面の剥離直前の荷重が最大荷重となった。また EP 仕様では 0.75 mm t 仕様の最大荷重が 0.5 mm t 仕様を上回ったが、XG 仕様では逆であったことから、この 2 仕様では最大荷重はプレートの厚さ(剛性)よりむしろ CFRP プレートへの接着性能を反映したものと考えられた。PM 仕様では最大荷重はプレートへのビスのめり込み時に表れ、0.75 mm t 仕様の最大荷重が 0.5 mm t 仕様を上回ったことから、最大荷重はプレート性能を表していたと考えられた。なお全ての接着剤仕様で S 仕様の最大荷重が P 仕様を下回っており、接着には P 仕様がより好適であると示された。

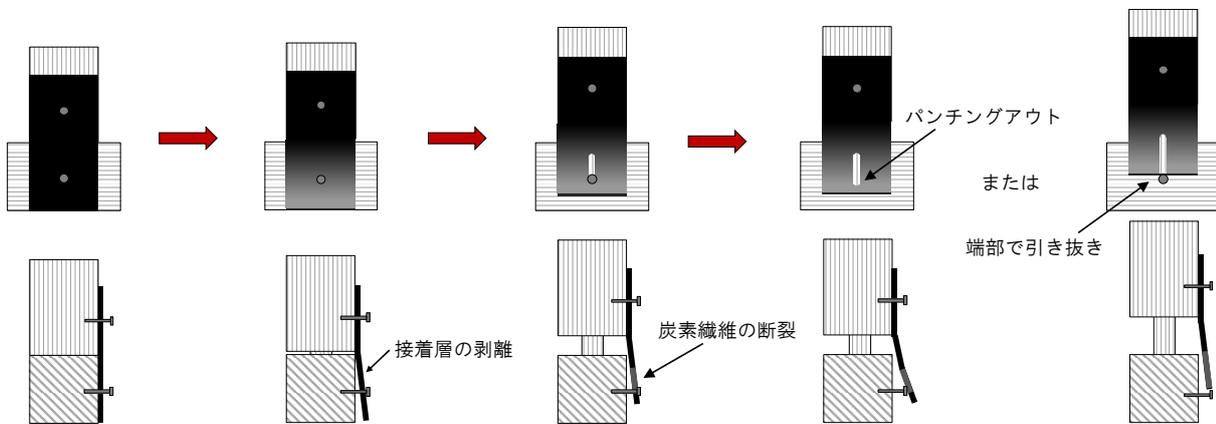


図-6 補強接合部の変形過程



図-7 ビスのパンチングアウトと CFRP プレート端部からの引き抜き、土台の破壊を伴った試験体(XG0.75P-2)

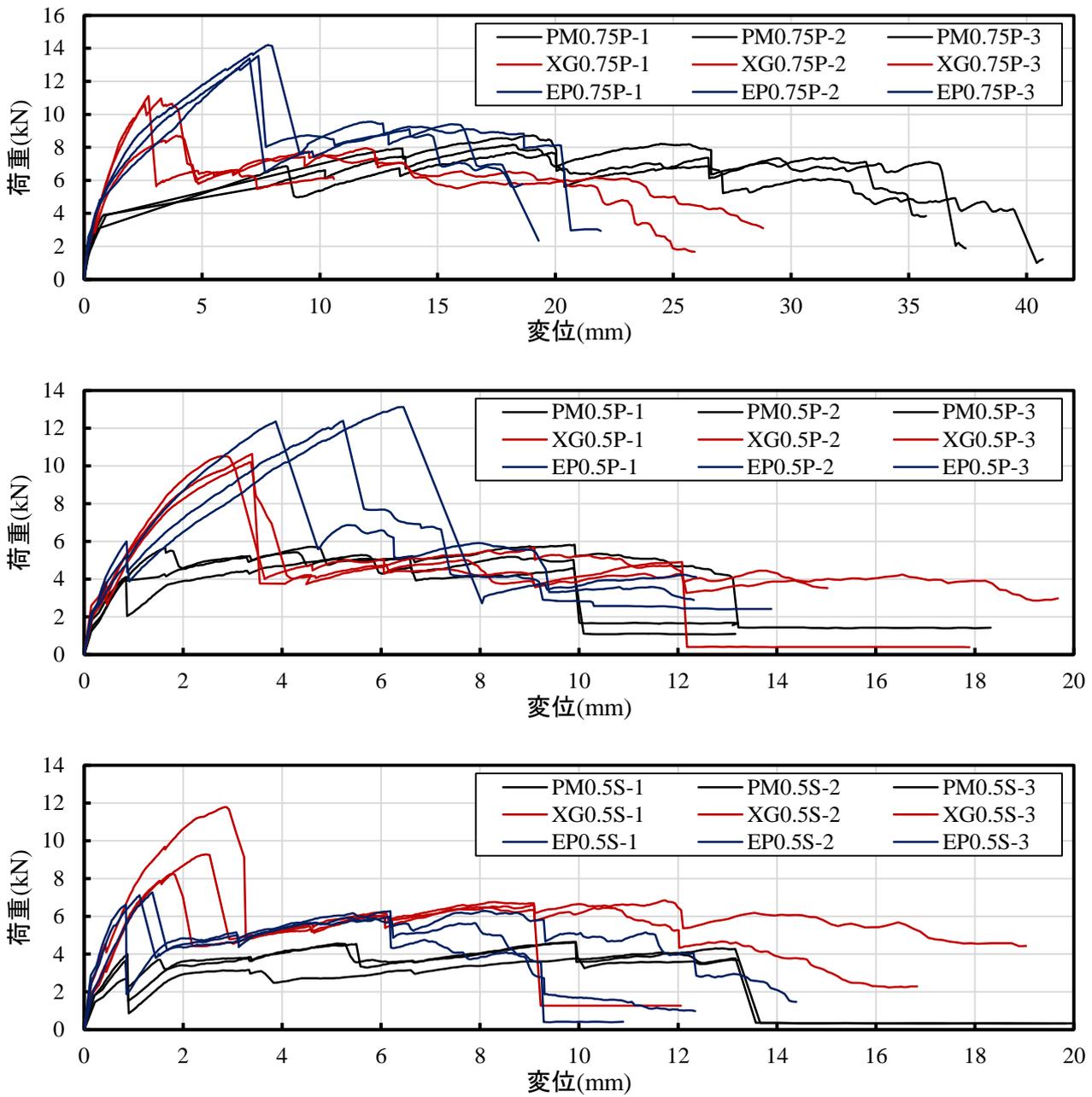


図-8 荷重変位曲線の包絡線

表-3 各仕様における最大荷重の5%下限値

仕様	最大荷重の5%下限値(kN)
PM0.75P	7.87
PM0.5P	5.06
PM0.5S	3.47
XG0.75P	8.11
XG0.5P	10.1
XG0.5S	6.87
EP0.75P	13.0
EP0.5P	11.9
EP0.5S	7.07

(3) 接着の剥離位置と木破率

試験終了時の接着面の剥離位置(柱側/土台側), ならびに試験終了後, 剥離した CFRP プレートの接着面を観察して目視から判定した木破率を表-4 に示す. 接着の剥離は, CFRP プレートと接着層の界面, 接着層内, 木材内の 3 種類の面のうち最も低強度の面で破壊が生じて発生することから, 木材内での破壊(木破)の発生割合(木破率)を CFRP プレートへの接着性能の指標とすることが出来る. 本試験の方式では, 柱側は木材の繊維方向(強軸方向)加力となるのに対し, 土台側では繊維直交方向(弱軸方向)加力となる. 本試験では CFRP プレートを柱側と土台側にまたがってそれぞれ接着面積が等しくなるよう接着したため, CFRP プレートの接着が十分であれば, 接着面の剥離は土台側で生じ, 木破を伴うこととなる.

XG,EP を用いた P 仕様ではこの傾向通りであり, 剥離

はほぼ土台側でのみ生じ(XG 仕様の 1 体のみ, 柱側でも剥離), 木破を伴っていた. このことから, P 仕様の CFRP プレートは XG,EP で十分な強度で接着されていたということが出来る. いっぽう, S 仕様では剥離は柱側でもみられ, 木破率は P 仕様より低かった. 特に EP 仕様では木破率は 5%以下であり, いずれもプレートと接着層の界面で剥離が生じていた. このことから, S 仕様は接着剤との相性が不良であり, そのため接着した材面に関係なく柱・土台側ランダムに剥離が生じたと考えられた. PM 仕様では全ての試験体で CFRP プレートの全面が剥離し, 木破率も 0%でありすべて接着層内で剥離していた. PM は明らかに接着層の強度が不足しており, 十分な接着性能を発揮しなかったと考えられ, P,S 仕様間の違いは見出されなかった.

表-4 接着面の剥離位置と木破率(目視判定)の一覧

試験体		CFRP プレート					土台
仕様	番号	座屈による破壊	接着の剥離		木破率		割裂破壊
			上側	下側	上側(%)	下側(%)	
PM0.75P	1		○	○	0	0	○
	2		○	○	0	0	
	3		○	○	0	0	
PM0.5P	1	○	○	○	0	0	
	2	○	○	○	0	0	
	3	○	○	○	0	0	
PM0.5S	1	○	○	○	0	0	
	2	○	○	○	0	0	
	3	○	○	○	0	0	
XG0.75P	1			○		20	○
	2			○		30	
	3			○		20	
XG0.5P	1			○		50	
	2	○	○	○	5	40	
	3			○		85	
XG0.5S	1			○		30	
	2		○		5		
	3	○	○		20		
EP0.75P	1			○		80	○
	2			○		85	
	3			○		80	
EP0.5P	1			○		65	○
	2			○		60	
	3			○		95	
EP0.5S	1	○		○		0	
	2		○		0		
	3			○		5	

(4) 試験体の破壊性状

27 試験体のうち, 18 体が破壊した. 内訳は土台の割裂による破壊 10 体, CFRP プレートの座屈による折損 8 体であり, 重複例はなかった.

土台の割裂による破壊は 0.75 mm t 仕様に頻発(9 体中

8 体)し, 0.5 mm t 仕様では 2 体のみであった(XG0.5P, EP0.5P の各 1 体). 0.75 mm t 仕様での発生は接着力の弱かった PM 仕様でも見られたことから, 土台の割裂破壊の発生は接着力よりむしろ CFRP プレートの剛性により決定されたと考えられた. 割裂破壊の殆どは CFRP プレ

ート固定部の上端の破壊(図-9)であったが、土台の中央から破壊が生じたものも見られた(図-10)。CFRP プレート固定部の上端の破壊では、端距離の短いビス固定部が弱点となって破壊が生じたと考えられ、より長く端距離をとったビス配置とすることで強度性能が向上する可能性が示唆された。

座屈による CFRP プレートの折損は引張後の戻し加力時に見られ、いずれもビスが変形したビス穴に詰まり、初期位置への復帰が妨げられることで CFRP プレートが座屈し、折損に至る過程を辿っていた(図-11)。発生は 0.5 mm t 仕様に限られ、PM 仕様では顕著であり、0.5 mm t

仕様の 6 体すべてが座屈により破壊した。残る 2 体は XG 仕様の P,S 仕様各 1 体であり、EP 仕様では CFRP プレートの座屈は生じなかった。PM 仕様では剥離した接着層が複雑な起伏に富んでおり、剥離面間の摩擦が他の接着剤に比べ大きいことが伺われた。このことから、PM 仕様では特に剥離面間の摩擦が CFRP プレートの初期位置への復帰を妨げ、座屈と折損を助長したものと考えられた。座屈の発生が観察されなかった 0.75 mm t 仕様では、プレートの剛性の高さがプレートの初期位置への復帰を促進したと考えられ、同様の破壊を防ぐには、十分なプレート厚が必要であることが示唆された。



図-9 CFRP プレート固定部上端の破壊(XG0.75P-3)



図-10 土台中央部の割裂破壊(EP0.5P-1)

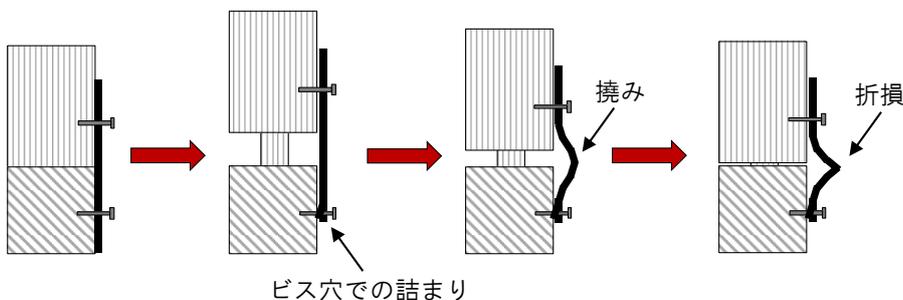


図-11 CFRP プレートの座屈による破壊と、その発生過程

なお、引張加力に起因する CFRP プレート破断や、全体にわたる割裂は確認されなかった。引張加力によるプレートの変形はビスのめりこみが生じた位置上に限られ、ビスの移動線上から周囲には拡大しなかった(図-12)。本試験で用いた CFRP プレートは加力方向と加力直交方向に繊維が走向する二方向繊維強化材料であり、そのため加力直交方向への変形の進展が抑えられ、割裂の発生が阻まれたものと考えられる。この変形の特徴から、ビスのパンチングアウトや引き抜きを対策した場合には、同じ構造の CFRP プレートの使用により長期的に安定して耐荷可能な接合部が設計可能であると示唆された。

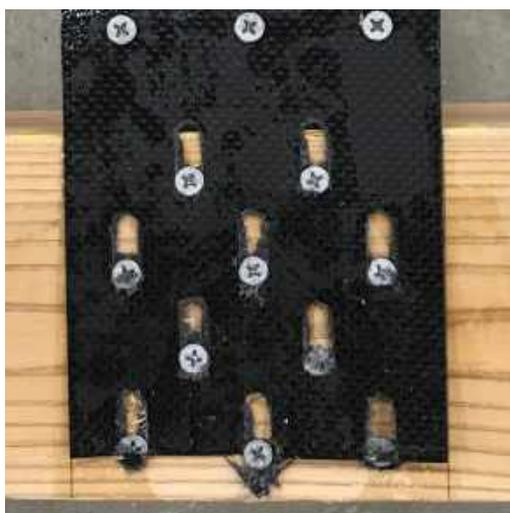


図-12 ビスのめり込みによる CFRP プレートの変形(XG0.5P-1)

(5) CFRP プレートを補強に用いるメリット

木材に鋼板など金物を接合して加力した場合、接合具が材中で回転または曲げ変形し、これにより接合具周囲の木材が損傷を受け、部材全体の変形や破壊につながる場合もある。接合具周囲の木材が損傷した場合、加力前への原状復帰は一般に困難であり、また加力後に補強具、接合具を交換したとしても、同等の性能を発揮する保証はない。これに対して、本研究において土台が破壊しなかった 17 例ではビスの曲げ変形および土台からの引き抜き、および木材の損傷は確認されず、CFRP プレートのみが損傷していた。したがってこれらの例では CFRP プレートの交換によって同等の性能での原状復帰が可能であると考えられた。

金物を補強に用いる場合にみられる接合具の変形やこれによる木材の損傷は、接合具の補強具へのめりこみ強度が木材の支圧強度に勝ることで生じると考えられる。本研究において土台が破壊した 10 例は、うち 8 例が剛性の高い 0.75 mm t プレート仕様であり、CFRP プレートへのビスのめり込み強度がスギ材の支圧強度を上回ったため、金物の場合と同様の破壊を生じたと考えられた。これに対して上述の 17 例では、うち 15 例が 0.5 mm t プ

レート仕様であり、CFRP プレートへのビスのめり込み強度がスギ材の支圧強度未満となったために変形が CFRP プレートのみが発生したと考えられる。この結果から、CFRP プレートへの接合具のめり込み強度は木材の支圧強度未満となる場合があり、このとき、接合具の変形や接合具による木材の損傷の発生が抑止されることが示唆された。

この点は従来の金物による補強と比較して、CFRP プレートを補強具として利用する上で大きな利点となると考えられる。CFRP プレートは厚さや構成繊維の種類、密度などの構造を細かく設計することが可能である。この特徴から、今後、被補強部材の支圧強度と CFRP プレートへの接合具のめり込み強度に注目して設計を行うことで、補強部の変形時に部材に損傷を生じない補強具を製作できる可能性を指摘できる。また、その強度設計には適用する部材の樹種や密度のほか、経年の程度といった補強部の細かな特徴を反映できる余地があると考えられ、応用の幅に広さを期待できる。変形時に部材に損傷を与えないこと、およびその場合に CFRP プレートの交換のみにより元と同等の性能の発揮を期待できる点は、部材の交換の困難な木造建築物一般への適用に特に好適であり、金物による補強に対して大きな優位性がある。

4. 結論

本研究では、ビスと接着剤により CFRP プレートを固定した柱-土台接合部に対して加力試験を行い、変形過程の特徴や補強効果を検討した。本検討から得られた知見は、以下の通りに集約される。

- (1) 補強接合部では加力にしたがって、まず CFRP プレートの接着が剥離し、続いて剥離した面内でビスのプレートへのめりこみが進展し、次第にビスのパンチングアウトやプレート端部からの引き抜きが進んで降伏に至るといった変形過程をとった。接着の剥離後の過程では、材部に破壊を生じない場合、急激な荷重の低下は観察されなかった。接着の強固だった XG,EP仕様では最大荷重は接着の剥離直前に表れ、接着性能が補強接合部の最大荷重を決定していたと考えられたが、接着層の弱かった PM仕様では最大荷重はビスのプレートへのめりこみ時に表れており、プレート性能が最大荷重を決定したと考えられた。
- (2) プレート表面を研磨した S仕様は全ての接着剤仕様でピールプライ仕様の P仕様で最大荷重および木破率で劣り、十分な接着強度を得られておらず、補強効果は低かったと考えられた。S仕様は接着剤との相性が不良であり、P仕様のほうが好適であると考えられた。
- (3) XG,EP で P仕様の CFRP プレートを接着した場合、剥離はほぼ土台側のみで生じ、木破を伴っていた。このことから、P仕様のプレートは XG,EPにより十分な強度

で接着されていたと考えられた。PM仕様では全試験体で接着面が全面剥離し、木破を伴わなかったことから、接着強度が明らかに不足していたと考えられた。

(4) CFRP プレート厚 0.75 mm の仕様では土台の割裂破壊が頻発した。接着力の弱い PM 仕様でも土台の割裂破壊が観察されたことから、土台の破壊の発生は接着力ではなくプレート剛性によって決定されたと考えられた。

(5) CFRP プレート厚 0.5 mm の仕様では接着の剥離後、戻し操作時にビスが変形したビス穴に詰まって復帰が妨げられ、座屈して破壊する例が半数近くみられた。プレート厚 0.75 mm の仕様では同様の例は観察されなかったことから、十分なプレート厚があれば座屈の発生は抑止されると考えられた。

(6) 引張加力による CFRP プレートの破断は確認されず、変形はビスのめりこみが生じた移動線上から拡大しなかった。これは、本試験で使用した CFRP プレートが加力方向・加力直交方向への二方向繊維強化材料であったことによると考えられる。この変形の特徴から、同じ構造の CFRP プレートの使用により長期的に安定して耐荷可能な接合部の設計が可能になることが示唆された。

(7) 27 試験体中 17 体では接合具の変形と木材の損傷は確認されず、CFRP プレートの交換を行えば同等の性能での原状復帰が可能であると考えられた。これらの例では CFRP プレートへのビスのめりこみ強度が木材の支圧強度を下回っていたことによると考えられる。この結果から、ビスのめりこみ強度が木材の支圧強度未満となるよう CFRP プレートを設計することで、接合具によって生じる木材の損傷を抑止できると考えられた。

謝辞：本研究の遂行に際し、CFRP プレートほか研究資材はデザインアンドイノベーション株式会社より提供を

受けました。ここに深く謝意を表します。また、試験体作製には、北海道大学農学部木材工学研究室の学生諸氏に協力頂きました。

参考文献

- 1) 平沢秀之, 及川昭夫, 小林朗, 入江康孝: 炭素繊維プレートによる集成材の性能向上と橋梁への適用について, pp.155-160, 第3回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, 2004.
- 2) 平沢秀之, 三河友人, 及川昭夫, 小林朗: 炭素繊維で補強したカラマツ集成材の耐荷力試験, pp.83-86, 第5回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, 2006.
- 3) Khelifa M., Lahouar M. A., and Celzard A.: Flexural strengthening of finger-jointed Spruce timber beams with CFRP, pp.2104-2116, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol.29, 2015.
- 4) 瀧野敦夫, 八神紗良, 村上雅英: 根継ぎ部に炭素繊維補強を施した柱の曲げ実験, pp.141-148, 日本建築学会技術報告集, Vol.24, No.56, 2018.
- 5) 趙賢貞: 木造文化財建造物の修理における炭素繊維の使い方-部材修復の事例を中心として-, pp.1175-1180, 日本建築学会技術報告集, Vol.16, No.34, 2010.
- 6) 武田浩二, 三井宜之, 坂井広道, 青柳久志: 炭素繊維シートによって補強した木造はりの曲げ特性, pp.37-40, 日本建築学会研究報告九州支部, 構造系(34), 1994.
- 7) 日本建築防災協会: 2010年改訂版 連続炭素繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針, 2011.
- 8) 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(2017年版), pp.300-311, 2017.

(Received October 16, 2020)

(Accepted January 31, 2021)

DEVELOPMENT OF A CFRP REINFORCING METHOD FOR COLUMN-BASE JOINT

Rintaro UEDA, Takanobu SASAKI, Kei SAWATA and Akio SAKAMOTO

In this study, we conducted tensile loading test to column-base joint reinforced with carbon fiber reinforced plastic, CFRP with screws and adhesive. The CFRP-reinforced column-base joints were under tensile loading, followed 3 deformation steps to fail; Initially the adhesion was peeled off, subsequently the screws were pulled to be embedded in the plate, and then the load declines to fail as the heads of the screws were punched out from the plate surface or pulled out from the edge of the plate. Breakage of CFRP plates due to tensile loading was not observed and deformation of CFRP plate was limited to the area where the screws were pulled to be embedded in the plate and never developed to the outside of the lines the screws were pulled on. In CFRP-reinforced column-base joints under tensile loading, deformation in the fasteners and damage to the wood members caused by it may not occurred and in such cases, the joints are considered to be able to be recovered by just replacing damaged CFRP plates. These characteristics observed in this study implied that reinforcing methods using CFRP plates have an advantage over ordinary methods.