根継ぎ部に炭素繊維補強を施した柱の曲げ実験

BENDING EXPERIMENTS OF TIMBER JOINTS REINFORCED WITH CARBON FIBER

龍野敦夫 ——— *1 八神紗良 ——— *2
村上雅英 ——— *3

Atsuo TAKINO ——— *1 Sara YAGAMI ——— *2
Masahide MURAKAMI — *3

キーワード：
炭素繊維, 金輪継ぎ, 根継ぎ, 曲げせん断, 耐震補強

Keywords:
Carbon fiber, *Kanawa-tsugi* joint, Column joint, Bending shear, Seismic strengthening

This paper presents the results of bending experiments of traditional timber column joints reinforced by carbon fiber. The traditional timber column joint, which is called *Kanawa-tsugi* joint, is used for the test specimens. The unreinforced specimens broke at the joint and the maximum strength of the unreinforced specimen was much lower than the standard strength calculated on the assumption that the specimen is the uniform member without the joint. On the other hand, the maximum strength of the reinforced specimen was much higher than that of the unreinforced specimens. As the results, the reinforcing effect was verified.

1. はじめに

伝統木造建築では、柱が礎石建ち構法であることが多いため、地面に近い柱脚部の劣化が特に激しくなる。その補修には根継ぎと呼ばれる柱脚部のみを新材と取り替える方法がよく用いられる。また、伝統木造建築の中でも文化財指定を受ける建築物では、耐震補強の際に補強材を意匠上の制約の少ない床下に配置することも多い。この際、床下補強を施した柱脚部で根継ぎを併用すると、継手部から柱が折損する可能性が高い。柱全てを新材に取り替える方法が最良ではあるが、文化財建造物保存の方針として極力古材を残すことが求められるため、根継ぎを補強することが求められる。

そこで、補強用材料として炭素繊維に着目した。炭素繊維は既存鉄筋コンクリート造建物の補強や既往文献²⁾で示されるように木造文化財の補強等にも用いられた実績があり、軽量で強度や剛性の

高い材料として、補強用材料に適しているものと考えられる。鉄筋コンクリート造建築物に対しては、設計・施工指針³⁾が既にまとめられているが、木造建築物に対しては具体的な設計・施工指針はなく、建物改修時の補強事例やそれに伴う検証実験^{2), 4) ~ 8)}が中心で、まだ事例に乏しいのが実状である。

本報では、奈良県橿原市今井町に所在する称念寺の重要文化財である本堂（既往文献⁹⁾に示した床下での長押補強による耐震補強を実施）において、柱の根継ぎ部の補強として炭素繊維補強を施し、その構造性能について検証実験を実施したので、その結果について報告する。なお、今回対象とした称念寺本堂では解体修理工事を実施するため、本報の補強方法についても解体修理工事を前提に考えている。また、現時点では既往研究も含めて定量的な評価ができるほど研究事例が十分ではないため、本報告も事例蓄積の一環である

表1 試験体概要

種別	名称	試験体長さ	金輪継ぎ	貫穴	補強材	層数	CFクロスの貼付方法		L ₁ (材軸方向の補強材の長さ) mm	加力方法	加力方向	Er (縦振動法)
		m					材軸方向	直交方向				
金輪継ぎ 無補強	K4-1	4.2	○	-	-	-	-	-	-	A	弱軸	-
	K6-2	6.0	○	-	-	-	-	-	-	B	強軸	11.70
金輪継ぎ CFRP帯版	K4-1-L	4.2	○	-	CFRP帯版	-	-	-	500	A	弱軸	-
	K4-1-LW	4.2	○	-	CFRP帯版+板	-	-	-	500	A	弱軸	-
金輪継ぎ CFクロス	K6-1-C-F-O-3	6.0	○	-	CFクロス	3	中央	直交	1040	B	弱軸	11.01
	K6-2-C-F-O-3	6.0	○	-	CFクロス	3	中央	直交	1040	B	強軸	9.83
	K6-1-C-F-O-5	6.0	○	-	CFクロス	5	中央	直交	1240	B	弱軸	11.22
	K6-2-C-F-O-5	6.0	○	-	CFクロス	5	中央	直交	1240	B	強軸	10.56
	K6-1-C-S-O-5	6.0	○	-	CFクロス	5	角	直交	1290	C	弱軸	10.45
貫・無補強	N6	6.0	-	○	-	-	-	-	-	C	-	-
金輪継ぎ+貫 CFクロス	KN6-1-C-F-O-5	6.0	○	○	CFクロス	5	中央	直交	1290	C	弱軸	10.74
	KN6-1-C-S-O-5	6.0	○	○	CFクロス	5	角	直交	1290	C	弱軸	11.06
	KN6-1-C-S-ON-5	6.0	○	○	CFクロス	5	角	直交	1290	C	弱軸	9.98
	KN6-1-C-S-R-5	6.0	○	○	CFクロス	5	角	らせん	1290	C	弱軸	9.95

本稿は既往文献¹⁾に加筆・修正したものである。

^{*1} 奈良女子大学 講師・博士(工学)
(〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町)

^{*2} (株)KAP 修士(学術)

^{*3} 近畿大学 教授・工博

^{*1} Lecturer, Nara Women's Univ., Dr. Eng.

^{*2} KAP Inc., M. Phil.

^{*3} Prof., Kindai Univ., Dr. Eng.

と位置づけている。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は180mm角のヒノキを用い、継手方法には金輪継ぎを採用した。また、一部の試験体には実状に合わせて貫穴(182×50mmおよび165×50mm)を併用している(図1・図2)。補強材は2種類とし、既往文献²⁾および⁸⁾を参考に幅50mm×厚さ2mmの炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRP帯版)および炭素繊維重量200g/m²の一方向CFクロス(以下、CFクロス)を用いた。試験体の加力方向は、金輪継ぎの弱軸方向と強軸方向のいずれかとした。なお、図3に示す方向の加力を弱軸方向加力と呼ぶ。各種パラメータを組み合わせ、表1に示す合計14体の試験体を作成した。各パラメータの詳細を以下に述べる。

CFRP帯版を用いた試験体の形状を図3～図5に示す。試験体の全長は4,200mmとし、金輪継ぎの継手長さは570mmとした(図3)。図4に示すように幅が50mmで長さが500mmのCFRP帯版を2枚ずつ各面の継手の境界に貼付した。試験体は2体あり、CFRP帯版のみで補強したもの(K4-1-L・図4)と、補強範囲に化粧板をとりつけたもの(K4-1-LW・図5)がある。この化粧板とは床上に位置する補強部を隠すための仕上げ材のことで、化粧板の有無によって構造性能の違いを確認するために用いた。

CFクロスを用いた試験体の形状を図6～図8に示す。試験体の

図1 金輪継ぎ・貫穴詳細図

図2 金輪継ぎ・貫穴パース

図3 全長4.2mの試験体形状と加力方法(A)

図4 CFRP帯版補強詳細図(K4-1-L)

図5 CFRP帯版+化粧板補強詳細図(K4-1-LW)

全長は6,000mmとし、金輪継ぎの継手長さは540mmとした(図6)。CFクロスは繊維方向に沿うように幅100mmに切断したものを材軸方向に貼付した後、直交方向にも巻き付けて樹脂を含浸させた。積層数は、3層巻きの場合は材軸方向、直交方向ともに3層ずつとし、5層巻きの場合は材軸方向、直交方向ともに5層ずつとした(図13)。なお、材軸方向におけるCFクロスの長さは3層

図6 全長6.0mの試験体形状と加力方法(B・C)
(B: a=2800・b=400 / C: a=2700・b=600)

図7 CFクロス補強詳細図(中央貼り)

図8 CFクロス補強詳細図(角貼り・K6-1-S-O-5)

図9 CFクロス補強詳細図(中央貼り・KN6-1-F-O-5)

図10 CFクロス補強詳細図(角貼り・KN6-1-S-O-5)

図11 CFクロス補強詳細図(KN6-1-S-ON-5)

図12 CFクロス補強詳細図(KN6-1-S-R-5)

の場合に 1,040mm、5 層の場合に 1,240mm とし、いずれも金輪継手の中心に対して対称となるように貼付した。ただし、K6-I-C-S-O-5 だけは後述する金輪継ぎと貫穴が併用された試験体の補強に合わせて、CF クロスの長さを 1290mm とした。直交方向の CF クロスは幅 330mm のまま用い、材軸方向の CF クロスを覆うように巻き付けて樹脂を含浸させた。

一方、貫穴を併用した試験体では CF クロスの積層数は 5 層とし、貫穴周辺まで補強した (図 9～図 12)。この際、材軸方向における CF クロスの長さは貫穴側に 50mm だけ延長し、1,290mm とした。また、CF クロスを材の中央に貼付すると貫穴部分で炭素繊維が切断されることから、材軸方向の CF クロスを貫穴を避けて柱の角に貼付した試験体も用意した (図 10)。直交方向の CF クロスは金輪継ぎのみの試験体と同様に材軸方向の CF クロスを覆うように貼付した。その後、接着剤が硬化した後に貫穴に重なる部分をくり抜いた。また、一体は先に貫穴の内側にも通すように CF クロスを巻き付け (図 11)、別の一体は CF クロスを螺旋状に巻きつけたものを用意した (図 12)。

補強試験体との比較のために、無補強試験体を 3 体用意し、2 体には金輪継手のみを、1 体には貫穴のみを設けた。

試験体名称は、継手の名称 (K: 金輪継ぎ、N: 貫、KN: 金輪継手 + 貫)、試験体長さ (4: 4.2m、6: 6m)、加力方向 (1: 弱軸、2: 強軸)、補強材の種類 (L: CFRP 帯版、LW: CFRP 帯版 + 化粧板、C: CF クロス)、材軸方向の CF クロスの貼付位置 (F: 柱の中央、S: 柱の角)、直交方向の CF クロスの巻き付け方 (O: 直交方向に巻き付けたもの、ON: 貫穴の内側にも巻き付けたもの、R: 螺旋状)、CF クロスの積層数 (3: 3 層、5: 5 層) とした。

2.2 施工方法

CFRP 帯版は、木面を清掃した後、パテ状のエポキシ樹脂接着剤を用いて貼付した。化粧板は酢酸ビニル樹脂エマルジョン接着剤によって貼付した。

CF クロスを貼付するための前段階として、柱の角で CF クロスを傷めないように補強範囲の角に半径 30mm の丸みを加工した。また、材の表面を滑らかにするためにプレーナー掛けを施した後、プライマーによる下地処理を行った。さらに、表面の割れ、穴等があればパテ (不陸修正材) で埋めて処理をした。処理終了後、材表面にエポキシ系含浸接着剤を塗り、材軸方向の CF クロスを貼付し、さらにその上からエポキシ系含浸接着剤を重ね塗りした。1 層貼付するごとに約半日間の乾燥期間をおいて、前の CF クロスが動かない程度まで乾燥させた。乾燥後、CF クロスの毛羽が立つため、ヤスリで研いだ後に次の層のエポキシ系含浸接着剤を塗り、これらを層数分繰り返した。ここで、材軸方向に 5 層貼付する試験体では、5 層重ねた CF クロスの厚みで木面と CF クロスとの間に段差が生じるため、パテを用いて段差を解消した。

材軸方向の CF クロスを貼付した後、材軸方向と同様の方法で直交方向に空隙が生じないように CF クロスを巻きつけてエポキシ系含浸接着剤を含浸させた。CF クロスの重ね代は 20mm とし、巻き付ける際には、重ね代が上下の層で集中しないように貼付する位置と CF クロスの幅を調整した (図 13 参照)。なお、貫穴内部に CF クロスを貼付する際は、施工上の問題から重ね代は設けなかった (KN6-I-S-ON-5・図 11)。また、CF クロスの巻き始めと巻き

終わりの重ね代は 150mm とし、1 層目の重ね代から 90 度ずつずらして 2 層目以降を施工した (図 13 および図 14 参照)。さらに、隣同士も同様に 90 度ずつずらして施工し、隣接する重ね代が同じ箇所に集中しないようにした。

図 13 補強部断面図

図 14 CF クロス 2 層目以降の巻き方
(上: 1 層目・下: 2 層目)

2.3 実験方法

加力方法は、利用可能な実験設備の都合により次に示す 3 つの方法のいずれかを用いた。加力方法 A は図 3 に示すように、単純支持でスパンを 4 m とする 3 点荷重法とした。加力は正負交番荷重とし、荷重点のたわみが予想最大変位 47mm の 1/3 と 2/3 の点である 16mm と 32mm で折り返した後に、最大耐力を確認した。加力方法 B および加力方法 C は図 6 に示すように、単純支持でスパンを 5.6m とする 4 点荷重法とした。なお、B と C では中央の加力点間距離が異なるため、せん断スパン比が若干異なっているが、片側の支点から継手までの距離はいずれも等しいため、継手に作用する曲げモーメントとせん断力についてはほぼ同じ条件となっている。加力は試験体が破壊に至るまで単純加力とした。計測項目は、荷重と加力点、支点および補強部周辺の鉛直たわみとした。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊性状・変形状

各試験体の破壊時の様子の一例を写真 1 に示す。なお、各試験体の詳細な破壊性状や変形状については、3.1.1 から 3.1.4 にかけてパラメータごとに詳述する。

3.1.1 無補強試験体

無補強試験体について、梁中央部と継手位置の荷重-鉛直たわみの関係を図 15 に示す。なお、図中の E11 の線は、継手のない 1 本の無垢材と仮定し、ヤング係数を 11.0kN/mm^2 として計算した梁の弾性たわみであり、試験体のスパンの違いによりそれぞれ長さ L を 4.0m と 6.2m の 2 種類で計算した。金輪継ぎを有する試験体 (K4-I・K6-2) では、いずれも加力後すぐに剛性が低下し、継手部から破壊した (写真 2)。また、貫穴のみの試験体 (N6) では、最大荷重に達する直前までほぼ線形を維持しているが、最大荷重を迎えた後に徐々に荷重が低下し、写真 3 に示すように貫穴近傍に圧壊した亀裂が生じ、引張側の節から引張破断が生じた。特定荷重時における鉛直たわみの分布を図 16～図 18 に示す。なお、図

【金輪継ぎのみ・無補強 (K4-1)】

【貫穴のみ・無補強 (N6)】

【金輪継ぎのみ・CFRP 帯版補強 (K4-1-L)】

【金輪継ぎのみ・CF クロス補強 (K6-1-C-F-O-5)】

【金輪継ぎ + 貫穴・CF クロス補強 (KN6-1-C-F-O-5)】

【金輪継ぎ + 貫穴・CF クロス補強 (KN6-1-C-S-R-5)】

写真1 破壊時の様子

中の横軸は変位計の位置を表し、図3、図6の数字と対応している。また、図中には後述する他の試験結果も併記している。金輪継ぎのみの試験体 (K4-1・K6-2) では、継手部の鉛直たわみが荷重点と同程度以上の値を示しており、継手位置での変形が進行していることがわかる。一方、貫穴のみの試験体 (N6) では、加力初期においては貫穴の影響はそれほど見られず、滑らかに曲げ変形が生じていることがわかる。

3.1.2 CFRP 帯版を用いた試験体

CFRP 帯版で補強した試験体について、梁中央部と継手位置の荷重-鉛直たわみの関係を図19に、特定荷重時における鉛直たわみの分布を図16に示す。化粧板の有無に関わらず、13kN付近で接着層の剥離が生じ (写真4)、急激に荷重が低下した。ただし、初期剛性は無垢材と仮定した弾性たわみ直線 (E11) とほぼ同程度

写真2 金輪継ぎ破壊の様子 (K4-1) 写真3 貫穴破壊の様子 (N6)

図16 CFRP 帯版で補強した試験体 (金輪継ぎのみ) の P=5kN 時の変位量

図17 CF クロスで補強した試験体 (金輪継ぎのみ) の P=10kN 時の変位量

図18 CF クロスで補強した試験体 (金輪継ぎ + 貫穴) の P=10kN 時の変位量

の結果を示しており、終局時まで接着層が破壊しなければ、十分な補強性能を有する可能性が考えられる。今回の実験では、特にせん断力を伝達させるための補強材が不足していたことや、接着長さが不足していた可能性も考えられる。CFRP 帯版を補強材として使用するための改善点は今後の課題である。

3.1.3 CF クロスを用いた試験体 (金輪継ぎのみ)

金輪継ぎのみの材を CF クロスで補強した試験体について、梁中央部と継手位置の荷重-鉛直たわみの関係を図20に、特定荷重時における鉛直たわみの分布を図17に示す。なお、K6-2-C-F-O-3、K6-1-C-F-O-5、K6-2-C-F-O-5 は実験中に梁中央の変位が計測不能となったため変位が147mm以降の結果は示していない。また、K6-1-C-S-O-5 は加力方法 C による結果であるため支点から梁中央部までの距離が加力方法 B の条件と異なるが、スパンの違いは僅かであることから今回の検討では同じグラフ内にて比較検討することとした。破壊に至るまで継手部の局所的な変形は見られず、継手のない無垢材とほとんど遜色のない変形性状を示した。その後、梁中央の木部で曲げ破壊が生じ、急激に荷重が低下した。また、荷重-変形関係においても、最大荷重に至るまで剛性低下もほとんど見られず、初期剛性も無垢材と仮定した弾性たわみ直線 (E11) と同程度の結果が得られた。なお、K6-1-C-F-O-5 のみ、試験体が曲げ破壊した時の衝

図15 荷重 - 変形関係 (無補強)

(左: 継手 (図3の③) / 図6の③)・右: 梁中央 (図3の④ / 図6の⑤))

図19 荷重 - 変形関係 (CFRP 帯版補強)

(左: 継手 (図3の③)・右: 梁中央 (図3の④))

写真4 CFRP 帯版の剥離

写真5 CF クロスが裂けた様子 (K6-1-C-F-O-5)

図20 荷重-変形関係（金輪継ぎのみ・CF クロス補強）
（左：継手（図5の③）・右：梁中央（図5の⑤））

撃で巻き付けたCFクロスが梁の下端から縦に裂けた様子（写真5）を確認できたが、それ以外でCFクロスに目立った損傷は見られなかった。また、断面の角の部分にCFクロスを貼り付けたK6-1-C-S-O-5についても、他の試験体との大きな差は見られなかった。今回の試験体においては、CFクロスの長さや重ねた層数、加力方向の違いによる結果の差異は一切見られず、十分な補強効果であったといえる。

3.1.4 CF クロスをういた試験体（金輪継ぎ＋貫穴）

金輪継ぎに貫穴加工を併用した材をCFクロスで補強した試験体について、梁中央部と継手位置の荷重-鉛直たわみの関係を図21に、特定荷重時における鉛直たわみの分布を図18に示す。いずれの試験体においても破壊直前まで継手部や貫穴周辺での局所的な

図21 荷重-変形関係（金輪継ぎと貫穴併用・CF クロス補強）
（左：継手（図5の③）・右：梁中央（図5の⑤））

変形は見られず、継手のない無垢材とほとんど遜色のない変形状を示した。しかし、終局時の破壊性状は各試験体で異なる結果となり、貫穴を補強したKN6-1-C-S-ON-5とCFクロスを螺旋状に巻いたKN6-C-S-R-5は梁の中央部での曲げ破壊が生じたが、他の試験体（KN6-1-C-F-O-5・KN6-1-C-S-O-5）は継手部で折れ曲がるように破壊し、貫穴内部に写真6に示すような継手部のずれせん断破壊の跡が確認された。これは貫穴加工を施したことで材が不連続となり、金輪継ぎの頸の部分から伝わるせん断力に材が耐えきれなかったために起きた破壊と考えられる。螺旋状に巻いた試験体では螺旋方向のCFクロスが材軸方向にも寄与するため、金輪継ぎ内部のずれ変形を全体的に抑制する効果が可能性として挙げられる。一方、貫穴内部を補強した試験体（KN6-1-C-S-ON-5）は、写真7に示すように加力点直下にある大きな節から曲げ破壊が生じ、他の試験体と比べて明らかに最大荷重が低かったため、継手部での破壊が生じなかった可能性が高いと考えられる。

3.2 曲げ応力度

全試験体の最大荷重、破壊位置、曲げ応力度をまとめたものを表2に示す。ここで、表中に示した曲げ応力度は、最大荷重から計算した継手部と中央部の曲げモーメントを、180mm角の無垢材と仮定して求めた断面係数（ $Z=972\text{cm}^3$ ）で除して求めた。

金輪継ぎのみの無補強試験体（K4-1・K6-2）は、弱軸加力に対して強軸加力の方が曲げ応力度が大幅に上昇しているが、木質構造設計規準・同解説¹⁰⁾に記載されている普通構造材のヒノキの曲げ基準材料強度（ 26.7N/mm^2 ）と比べるといずれも大きく下回る結果となっている。また、貫穴のみの無補強試験体（N6）でも、貫穴部の曲げ応力度が 19.52N/mm^2 と曲げ基準材料強度を下回る結果となった。

CFRP帯版で補強した試験体の曲げ応力度は、金輪継ぎのみの無補強試験体と大きく変わらず、曲げ基準材料強度を大きく下回り、今回の実験の範囲内においては補強方法としては相応しくない結果となった。

写真6 貫穴内のずれ (KN6-1-C-S-O-5)

写真7 加力点直下の曲げ破壊 (KN6-1-C-S-ON-5)

表2 実験結果一覧

種別	名称	最大荷重 kN	破壊位置	最大荷重時の曲げ応力度 σ_b	
				継手部	中央部
金輪継ぎ 無補強	K4-1	8.47	継手	4.9	6.1
	K6-2	11.03	継手	7.9	14.8
金輪継ぎ CFRP帯版	K4-1-L	13.34	継手	7.7	10.3
	K4-1-LW	14.15	継手	8.2	10.9
金輪継ぎ CFクロス	K6-1-C-F-O-3	36.12	中央	26.0	48.3
	K6-2-C-F-O-3	28.15	中央	20.3	37.7
	K6-1-C-F-O-5	36.87	中央	26.6	49.3
	K6-2-C-F-O-5	42.08	中央	30.3	56.3
	K6-1-C-S-O-5	35.42	中央	25.5	45.6
貫・無補強	N6	27.11	貫穴	19.5	34.9
金輪継ぎ+貫 CFクロス	KN6-1-C-F-O-5	36.32	継手	26.2	46.7
	KN6-1-C-S-O-5	33.25	継手	23.9	42.8
	KN6-1-C-S-ON-5	20.56	中央	14.8	26.4
	KN6-1-C-S-R-5	34.02	中央	24.5	43.8

金輪継ぎのみの材を CF クロスで補強した試験体は全て梁中央で破壊しており、その時の中央部の曲げ応力度は基準材料強度を十分上回る値を得た。継手部の曲げ応力度は、破壊位置が継手部ではないため必ずしも最大値とは言えないが、全て 20N/mm^2 を上回る結果を得ており、概ね十分な補強効果を得たと言える。また、加力方向（弱軸・強軸）による違いが無補強試験体の時のようには確認することができないことから、補強材が十分に耐力に寄与したことがわかる。

金輪継ぎに貫穴加工を併用した材を CF クロスで補強した試験体の内、貫穴内部を補強した KN6-1-C-S-ON-5 以外では、継手部の曲げ応力度が 20N/mm^2 を上回り、貫穴のみの無補強試験体の結果と比べても、十分な補強効果を得ることができたと考えられる。一方、KN6-1-C-S-ON-5 は 3.1.4 で述べたように加力点直下にある大きな節から曲げ破壊が生じたため、今回の実験では補強効果を確認することはできなかった。また、継手部で破壊した試験体と中央で破壊した試験体の継手部の曲げ応力度を比較するとほとんど差がないため、今回の試験結果からは螺旋状に巻いた CF クロスが 3.1.4 で述べた金輪継ぎ内部の破壊を抑制する効果についての検証はできず、今後の課題である。

4. 施工時の様子

実験結果においては貫穴加工を併用した試験体で補強方法の違いによる耐力の差異がほとんど見られなかったため、実際の耐震補強工事では施工性も考慮して材軸方向の CF クロスを角に貼り付けて最後に貫穴部分をくり抜いた仕様 (KN6-1-C-S-O-5) を採用した。なお、CF クロスの積層数は材軸方向、直交方向のいずれも 5 層とした。現場での施工状況を写真 8 に示す。継手部が床面よりも上部に位置するため、最終的には補強部分を化粧板で覆い隠すようにしている。

【CF クロス施工前の柱の加工状態】 【CF クロス施工後】
写真 8 現場での施工の様子

5. まとめ

本実験では、金輪継ぎにより根継ぎを施した柱材を炭素繊維により補強する方法について、曲げ試験によってその補強効果の検証を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 金輪継ぎのみの材を CF クロスで補強した試験体は無垢材とほぼ同等の変形性能を示し、破壊も梁中央の木部での曲げ破壊が生じたことから、CF クロスによる補強効果は十分であったといえる。また、CF クロスの積層数の違い（3 層・5 層）による結果の差はほとんど見られなかった。

(2) 金輪継ぎに貫穴を併用した材を CF クロスで補強した試験体は、破壊直前までは無垢材とほぼ同等の変形性能を示した。しかし、一部の試験体では継手部で折れ曲がるように破壊が生じ、金輪継ぎ内部のずれ変形を貫穴から確認することができた。しかし、最大荷重から求めた継手部の曲げ応力度は、貫穴のみを施した無補強試験体の結果を上回っており、補強効果は十分であったといえる。

(3) 金輪継ぎのみの無補強試験体は、継手部で折れ曲がるように破壊し、無垢材から求めた曲げ基準材料強度を大きく下回る結果となった。また、貫穴のみの無補強試験体では無垢材と同程度の剛性を得たが、最大荷重直前に貫周縁から破壊が生じた。

(4) CFRP 帯版を用いた試験体は、初期剛性については無垢材と同程度の結果を得たが、接着層の剥離により無垢材と比較して非常に低い荷重で破壊に至り、今回の試験の範囲内では補強効果を得ることはできなかった。

今回の実験ではいくつかのパラメータを設けたものの、補強効果を得るために必要な最小限の接着長さや CF クロスの積層数などを求めるには至らなかった。設計指針を作成するためには接着性など基礎的なデータの収集を行う必要があり、今後の課題である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、宗教法人称念寺にご理解とご協力をいただきました。また、実験の実施においては、奈良県文化財保存事務所称念寺出張所、東レ ACE 株式会社の北條広行氏、株式会社尾田組、兵庫県森林技術センターの山田範彦氏、奈良県森林技術センターの中田欣作氏、近畿大学村上研究室にご協力いただきました。また、本研究は JSPS 科研費 15H05537（若手研究（A）／研究課題名：伝統技術に基づく木造社寺建築物の耐震性能評価法と耐震補強法の確立／研究代表者：瀧野敦夫）の助成を受けたものです。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 八神紗良、瀧野敦夫：根継ぎ部に炭素繊維補強を施した柱の曲げ実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.25-26、2016.8
- 2) 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-、日本建築学会技術報告集、Vol.16、No.34、pp.1175-1180、2010.10
- 3) 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、(財)日本建築防災協会、2011.4
- 4) 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、日本建築学会研究報告九州支部、構造系 (34)、pp.37-40、1994.3
- 5) 谷口貴昭他 5 名：CFRP 板による木造梁の曲げ補強実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.237-238、2005.7
- 6) 向井洋一、稲田有美：曲げを受ける断面欠損木材の炭素繊維シート補修効果の検証、構造工学論文集、Vol.54B、pp.177-182、2008.3
- 7) 綾木大輔他 5 名：五重塔心柱の炭素繊維による補強効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.531-532、2010.7
- 8) 石大樹、宮原作太、古川洋：炭素繊維を用いた柱仕口の断面性能改善に関する実験的研究その 1-2、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.163-166、2015.9
- 9) 瀧野敦夫他 8 名：二方向に有効な高耐力長押補強の実験的検証と耐震補強設計、日本建築学会構造系論文集、Vol.81、No.724、pp.949-957、2016.6
- 10) 一般社団法人日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、2006.12

[2017 年 6 月 6 日原稿受理 2017 年 8 月 17 日採用決定]