

称念寺本堂における柱根継部の炭素繊維補強の性能試験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、
要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]、
補強性能試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]

●基本情報

文化財名称：称念寺本堂

文化財種別 (指定年月日)：重要文化財 (平成 14 年 5 月 23 日)

所在地：奈良県橿原市今井町三丁目

所有者 (管理団体)：宗教法人称念寺

構造形式：桁行 19.9m、梁間 21.4m、一重、入母屋造、正面向拝一間、本瓦葺

建築年：江戸初期

事業名称：重要文化財称念寺本堂保存修理事業

事業期間：平成 22 年 4 月 1 日～平成 34 年 3 月 31 日

工事種別：解体修理

事業者：宗教法人称念寺

設計監理：奈良県教育委員会

実験計画者：奈良女子大学 瀧野敦夫

実験機関：－

実験年月日：－

引用・参考文献：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」『日本建築学会技術報告集 第 24 巻 第 56 号』(2018 年)

●実験に至る経緯と目的

伝統木造建築の柱の根元が腐朽した時には、金輪継ぎなどによる根継補修がよく用いられる。また、文化財建造物では、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を併用すると、継手部から柱が折損する可能性が高く、極力古材を残すためには根継を補強することが求められる。

本実験では、柱の根継部の補強として、軽量で強度や剛性の高い炭素繊維による補強を施し、その構造性能について実験的に検証することを目的とする。

● 姿図・寸法

【使用材料】 軸組 180×180×4200 および 180×180×6000 ヒノキ
炭素繊維強化プラスチック(CFRP 帯版) 幅 50×厚 2
一方向炭素繊維 (CF) クロス 炭素繊維重量 200g/m²

【試験体寸法】

金輪継ぎ無補強試験体 (図 1、図 2)

- ・ K4-1 : 金輪継ぎ、長 4.2m、弱軸方向加力
- ・ K6-2 : 金輪継ぎ、長 6m、強軸方向加力

金輪継ぎ CFRP 帯版補強試験体

- ・ K4-1-L(図 4) : 金輪継ぎ、長 4.2m、弱軸方向加力、CFRP 帯版
- ・ K4-1-LW(図 5) : 金輪継ぎ、長 4.2m、弱軸方向加力、CFRP 帯版+化粧板

金輪継ぎ CF クロス補強試験体

- ・ K6-1-C-F-O-3(図 7) : 金輪継ぎ、長 6m、弱軸方向加力、CF クロスを柱中央で貼付した上に直交方向に 3 層巻き付け
- ・ K6-2-C-F-O-3(図 7) : 金輪継ぎ、長 6m、強軸方向加力、CF クロスを柱中央で貼付した上に直交方向に 3 層巻き付け
- ・ K6-1-C-F-O-5(図 7) : 金輪継ぎ、長 6m、弱軸方向加力、CF クロスを柱中央で貼付した上に直交方向に 5 層巻き付け
- ・ K6-2-C-F-O-5(図 7) : 金輪継ぎ、長 6m、強軸方向加力、CF クロスを柱中央で貼付した上に直交方向に 5 層巻き付け
- ・ K6-1-C-S-O-5(図 8) : 金輪継ぎ、長 6m、弱軸方向加力、CF クロスを柱角で貼付した上に直交方向に 5 層巻き付け

貫穴のみ無補強試験体

- ・ N6 : 貫穴のみ、長 6m

金輪継ぎ貫穴併用 CF クロス補強試験体

- ・ KN6-1-C-F-O-5(図 9) : 金輪継ぎ+貫穴、長 6m、弱軸方向加力、CF クロスを柱中央で貼付した上に直交方向に 5 層巻き付け
- ・ KN6-1-C-S-O-5(図 10) : 金輪継ぎ+貫穴、長 6m、弱軸方向加力、CF クロスを柱角で貼付した上に直交方向に 5 層巻き付け
- ・ KN6-1-C-S-ON-5(図 11) : 金輪継ぎ+貫穴、長 6m、弱軸方向加力、CF クロスを柱角で貼付した上に貫穴の中まで直交方向に 5 層巻き付け
- ・ KN6-1-C-S-R-5(図 12) : 金輪継ぎ+貫穴、長 6m、弱軸方向加力、CF クロスを柱角で貼付した上に螺旋状に 5 層巻き付け

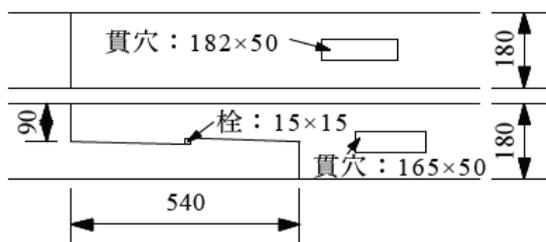


図1 金輪継ぎ・貫穴詳細図

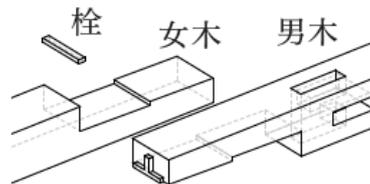


図2 金輪継ぎ・貫穴パース

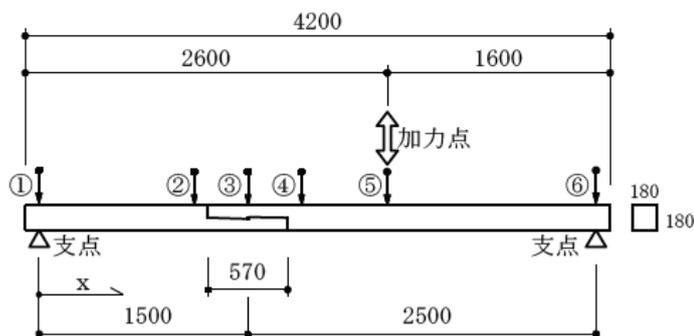


図3 全長 4.2 mの試験体形状と加力方法 (A)

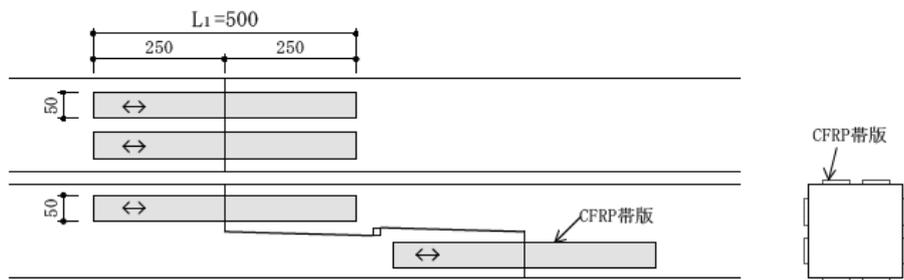


図4 CFRP 帯版補強詳細図 (K4-1-L)

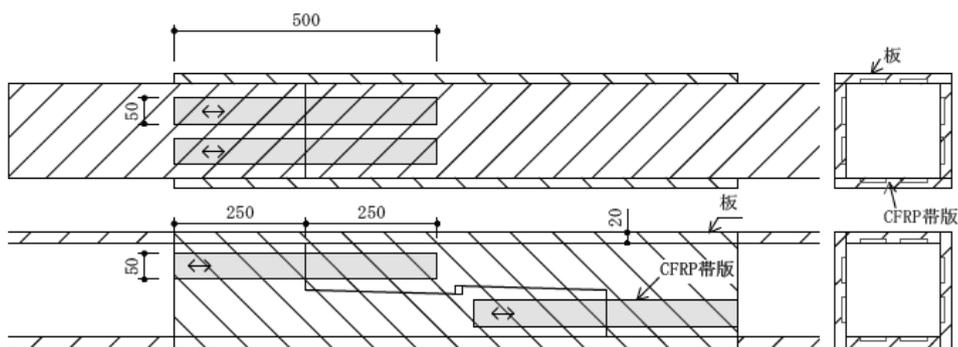


図5 CFRP 帯版 + 化粧板補強詳細図 (K4-1-LW)

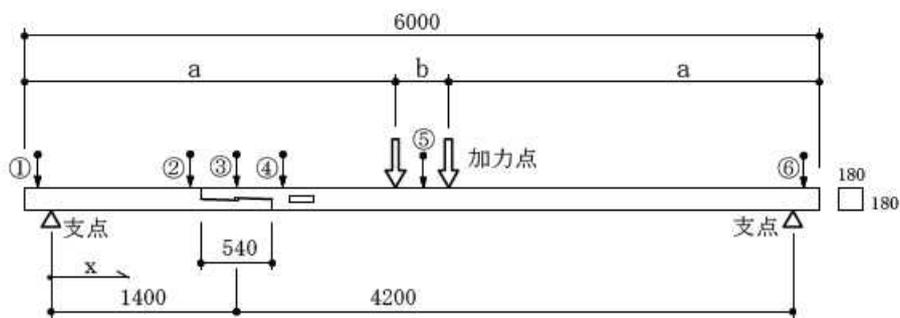


図6 全長6.0mの試験体形状と加力方法 (B・C)
(B : $a=2800 \cdot b=400$ / C : $a=2700 \cdot b=600$)

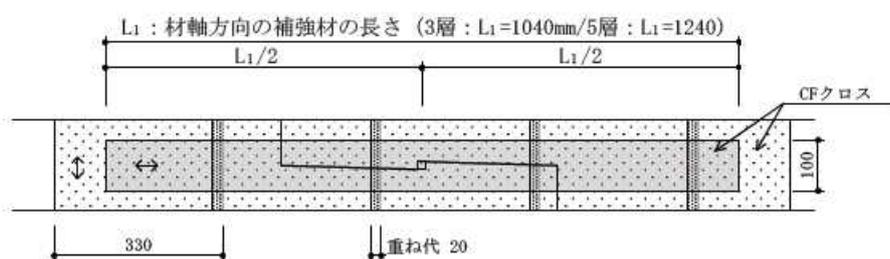


図7 CFクロス補強詳細図 (中央貼り)

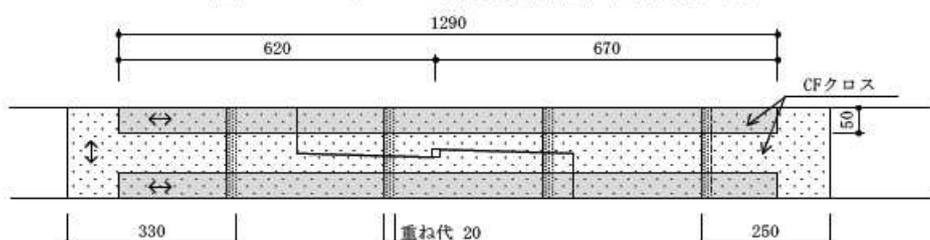


図8 CFクロス補強詳細図 (角貼り・K6-1-S-O-5)

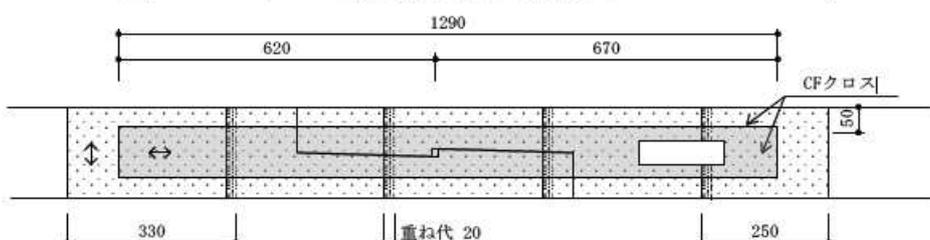


図9 CFクロス補強詳細図 (中央貼り・KN6-1-F-O-5)

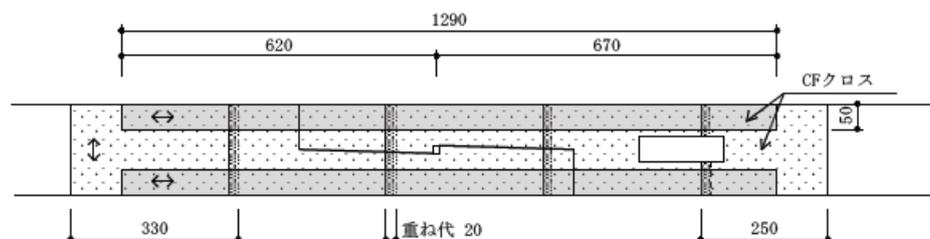


図10 CFクロス補強詳細図 (角貼り・KN6-1-S-O-5)

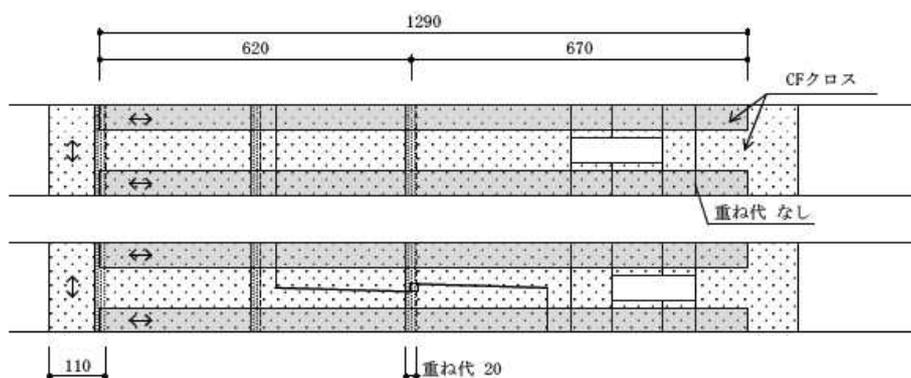


図 11 CF クロス補強詳細図 (KN6-1-S-ON-5)

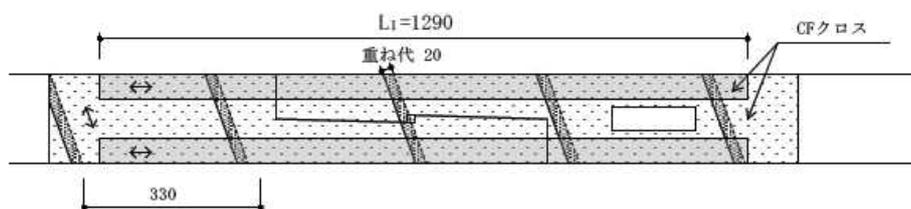


図 12 CF クロス補強詳細図 (KN6-1-S-R-5)

●概要

金輪継ぎが施された 180 mm 正角ヒノキ柱の試験体 2 体に、CFRP 帯版を継手境界に貼付した試験体を 2 体、CF クロスを貼付した試験体を 5 体用意した。これに加え、貫穴のみが施された 180 mm 正角ヒノキ柱 1 体、および金輪継ぎに貫穴を併用した同材の柱に CF クロスを貼付した試験体を 4 体用意した。これら計 14 体の試験体に対して曲げ実験を行った。

●実験方法

以下の 3 つの方法で実験を行った。

- ・加力方法 A : 全長 4.2m の試験体に対して行った。単純支持でスパン 4m の 3 点荷重法 (図 3)。正負交番載荷で加力し、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 : 全長 6.0m の試験体のうち、CF クロスを柱中央で貼付した試験体に対して行った。単純支持でスパン 5.6m の 4 点荷重法 (図 6)。中央の加力点間距離は 400 mm である。試験体が破壊に至るまで単純加力を行い、荷重と加力点、支点および補強部周辺の鉛直たわみを計測した。
- ・加力方法 C : 全長 6.0m の試験体のうち、CF クロスを柱角で貼付した試験体および貫穴を施した全ての試験体に対して行った。単純支持でスパン 5.6m の 4 点荷重法 (図 6)。中央の加力点間距離は 600 mm である。試験体が破壊に至るまで単純加力を行い、荷重と加力点、支点および補強部周辺の鉛直たわみを計測した。

●特性値

表に示す通り。

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

●荷重変形

無補強試験体

荷重—鉛直たわみの関係は図13の通り。左は継手(図3の③/図6の③)、右は梁中央(図3の④/図6の⑤)におけるものである。なお、E11は継手のない1本の無垢材と仮定し、ヤング係数を11.0kN/mm²として計算した梁の弾性たわみである。

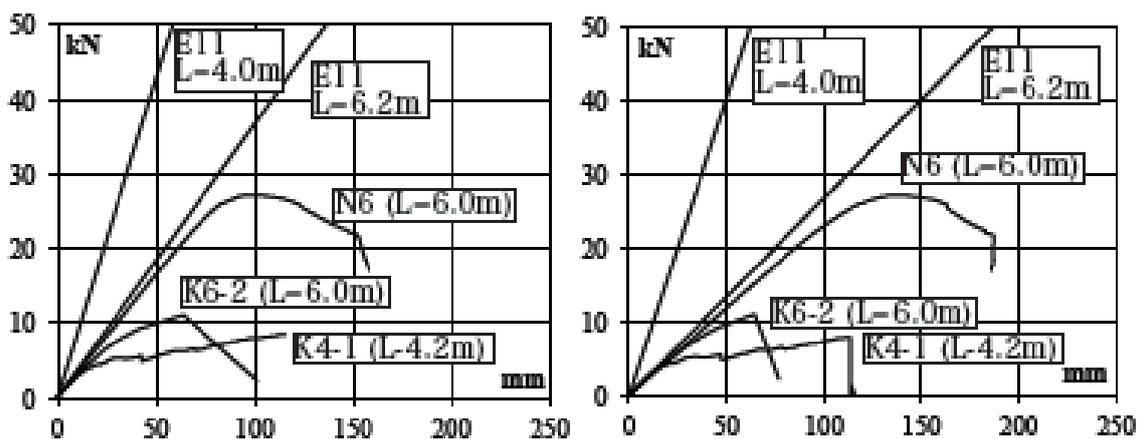


図13

CFRP 帯板を用いた試験体

図 14 左に継手位置(図 3 の③)での、図 14 右に梁中央部(図 3 の④)での荷重-鉛直たわみ
関係を示す。また図 15 に、特定荷重時(P=5kN)における鉛直たわみの分布を示す。

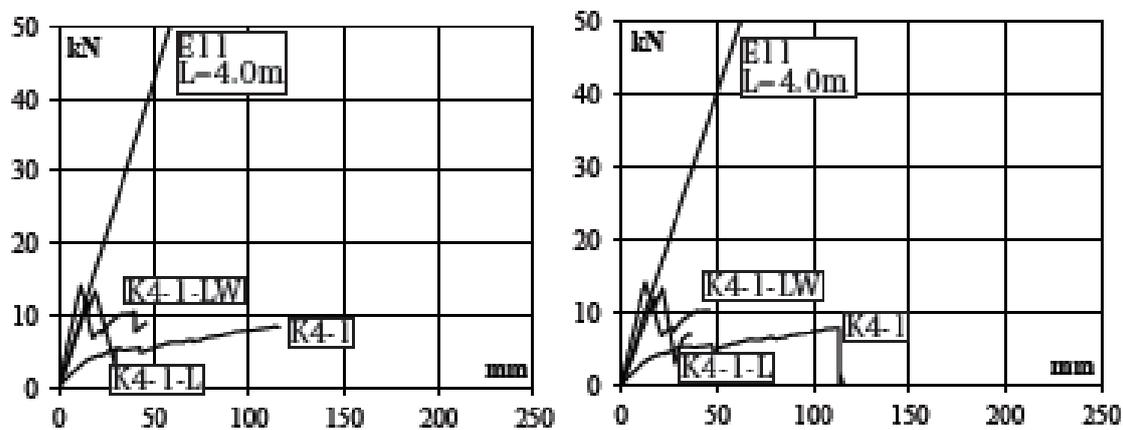


図 14

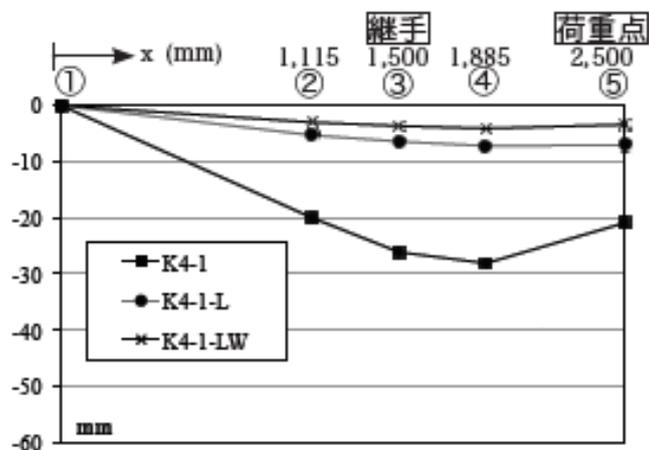


図 15

CF クロスを用いた試験体(金輪継ぎのみ)

図 16 左に継手位置(図 5 の③)での、図 14 右に梁中央部(図 5 の⑤)での荷重-鉛直たわみ関係を示す。また図 17 に、特定荷重時(P=10kN)における鉛直たわみの分布を示す。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。

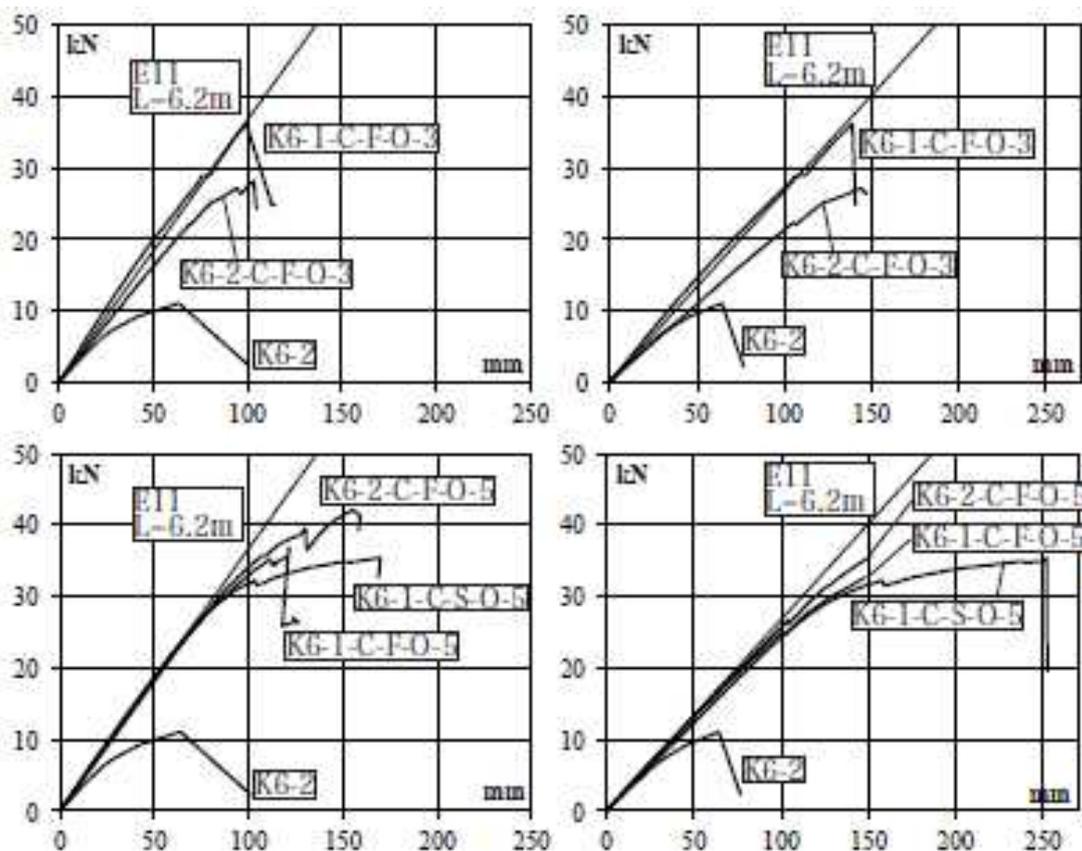


図 16

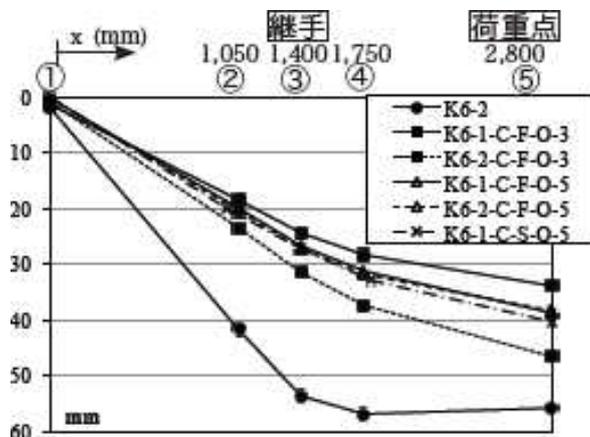


図 17

CF クロスを用いた試験体(金輪継ぎ+貫穴)

図 18 左に、継手位置(図 5 の③)での、図 14 右に梁中央部(図 5 の⑤)での荷重-鉛直たわみ関係を示す。また図 19 に、特定荷重時(P=10kN)における鉛直たわみの分布を示す。

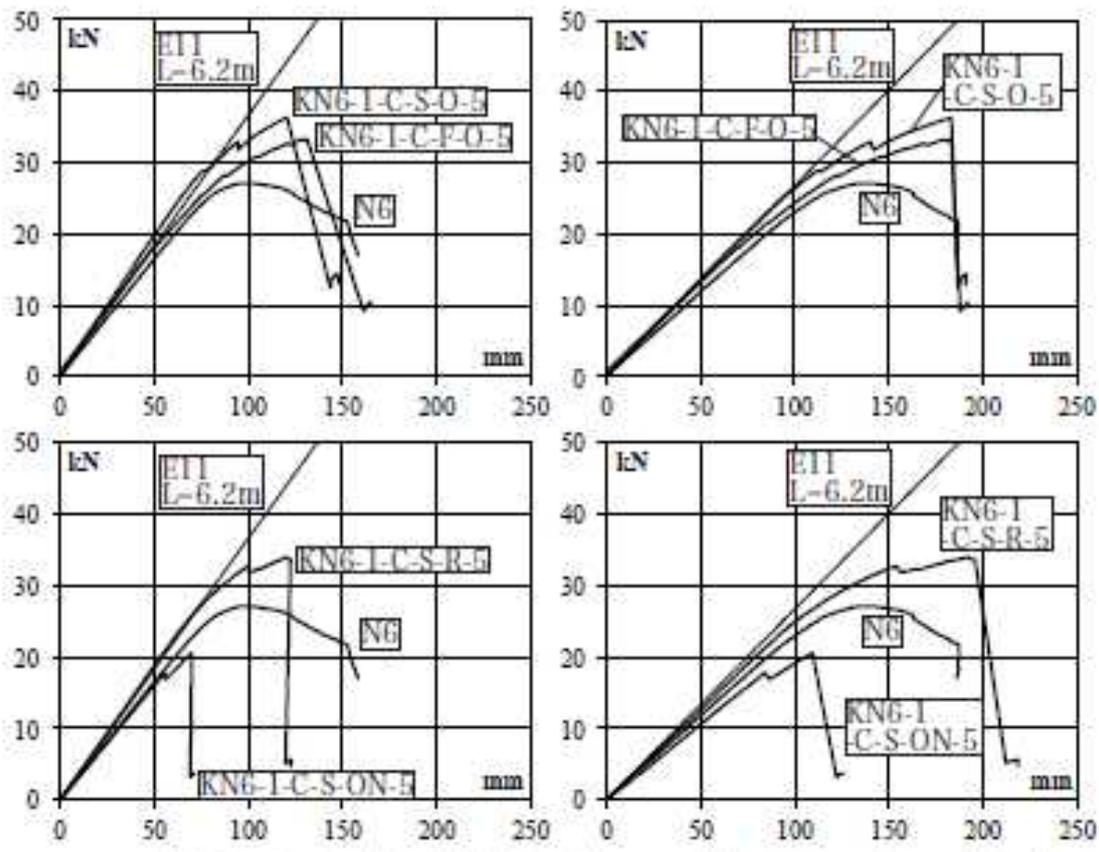


図 18

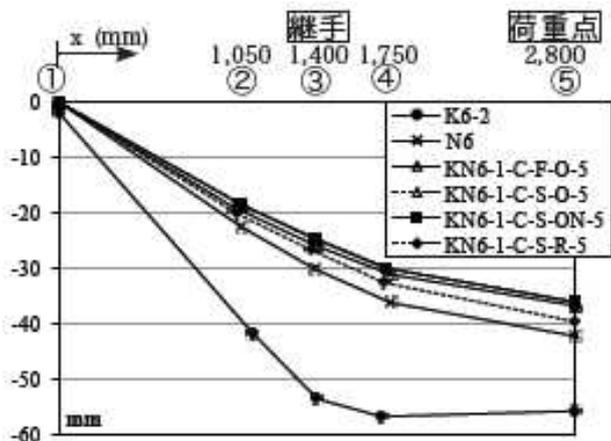


図 19

●破壊形状

無補強試験体

金輪継ぎを有する試験体 (K4-1・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。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、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。

CFRP 帯板を用いた試験体

化粧板の有無に関わらず、13kN 付近で接着層の剥離が生じ、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。

CF クロスを用いた試験体(金輪継ぎのみ)

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。なお、K6-1-C-F-O-5 のみ、試験体が曲げ破壊した時の衝撃で巻き付けた CF クロスが梁の下端から縦に裂けた様子を確認できたが、それ以外で CF クロスが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。

CF クロスを用いた試験体(金輪継ぎ+貫穴)

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。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、貫穴内部に継手部のずれやせん断破壊の跡が確認された。一方、貫穴内部を補強した試験体 (KN6-1-C-S-ON-5) は、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。



【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



写真2 金輪継破壊の様子 (K4-1)



写真3 貫穴破壊の様子 (N6)

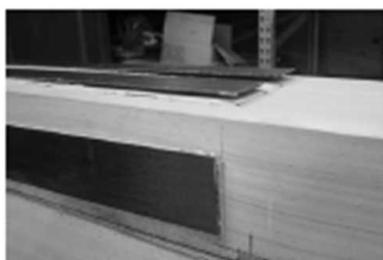


写真4 CFRP 帯版の剥離

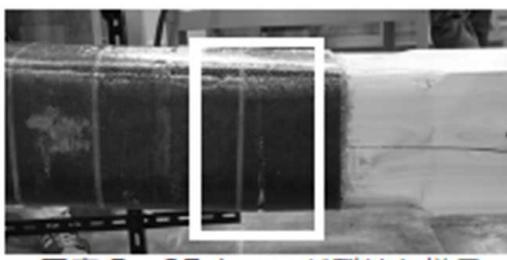


写真5 CF クロスが裂けた様子 (K6-1-C-F-O-5)



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)

●理論式

—

●モデル化

—

●考察

- 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辺から破壊が生じた。
- ④CFRP 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。