

大断面広葉樹（ケヤキ）製材による寺院建築仕様軸組の防耐火性能

— はり及び柱 - はり接合部の荷加熱実験 —

FIRE PROTECTION PERFORMANCE OF WOODEN FRAME OF HEAVY HARDWOOD(ZELKOVA) FOR TEMPLES

— Fire resistance tests on loaded beam and post-beam joints —

保川みずほ — * 1 安井 昇 — * 2
鈴木あさ美 — * 3 長谷見雄二 — * 4
亀山直央 — * 5 豊田康二 — * 6
門岡直也 — * 7 腰原幹雄 — * 8
小野徹郎 — * 9 遊佐秀逸 — * 10

Mizuho YASUKAWA — * 1 Noboru YASUI — * 2
Asami SUZUKI — * 3 Yuji HASEMI — * 4
Naohisa KAMEYAMA — * 5 Koji TOYODA — * 6
Naoya KADOOKA — * 7 Mikio KOSHIHARA — * 8
Tetsuro ONO — * 9 Shuitsu YUSA — * 10

キーワード：
広葉樹, 非損傷性, 準耐火構造, はり, 接合部

Keywords:
Hardwoods, Structural resistance, Quasi-fireproof construction, Beam, Joints

Fire resistance tests were conducted on loaded beam and post-beam joints of heavy hardwood (ZELKOVA) designed for traditional temple buildings.

The tests revealed the followings:

- (1) predictability of the structural fire resistance of ZELKOVA beam with safety margin by the assessment of the bending buckling.
- (2) applicability of the traditional beam and post-beam joint designs to the Quasi-fireproof construction.

1. はじめに

伝統的意匠の寺院の軸組には大断面広葉樹製材が使われる場合があるが、広葉樹製材は日本農林規格化されていないこと等を背景に法令上、一般的な寺院建築の計画条件に相応しい防耐火的位置づけを得られていない。そのため、筆者らは、その防耐火性能の工学的予測可能性を検討し、柱については、寺院の丸柱として一般的な断面により、大規模木造に適用されている1時間準耐火構造及び燃えしる設計に適した性能を達成し得ることを報告した^{1,2)}。一方、軸組の防耐火性能に関する法令運用で評価法が示されているのは部材本体のみで、接合部の扱いは明示されておらず、火災時の架構の自立の確保については、指針化された仕様準拠するか、設計仕様を実験的に検証する等の方策によっている。伝統的意匠の寺院建築では軸組接合部に複雑な組物が使われており、同様の検討が必要であろう。

本報告では、ケヤキ製材による寺院建築仕様のはり及び柱・はり接合部について荷加熱実験を行った結果を報告し、はりについては、非損傷性の予測可能性とともに1時間準耐火構造の達成と燃えしる設計の適用の可能性を検討した。また、法令上明確な防耐火規定のない柱・はり接合部については、建築確認の実情を踏まえ、伝

統的な寺院建築の実設計例の仕様・荷重条件に関して、組物が軸組の非損傷性に支障を生ずる可能性があるかどうかを検討した。

2. 実大はりの荷加熱実験

試験体は、耐火炉の条件から、長さ5500mm(荷重支持スパン5100

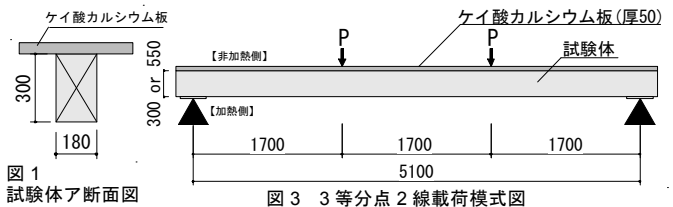


図1 試験体ア断面図

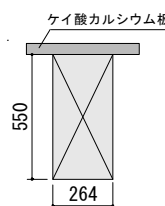


図2 試験体イ断面図

表1 試験体仕様一覧

試験体名	樹種	スパン mm	断面寸法 mm	含水率 ^{*1}	絶対 ^{*1}	ヤング係数
				(絶対法) %	比重	
ア	ケヤキ	5100	180×300	30.8	0.63	114 tf/cm ² (11.2 kN/mm ²)
イ	ケヤキ	5100	264×550	46.8	0.56	46.3 tf/cm ² (4.5 kN/mm ²)

*1: 含水率及び絶対比重はそれぞれ5cm角の立方体のサンプル6個ずつで測定した値の平均値を示す。

本稿の実験については、文献10)で口頭発表を行った。

¹⁾ 早稲田大学大学院 (現・東京都都市整備局)
²⁾ 早稲田大学理工学研究所 客員上級研究員・博士 (工学)
³⁾ 榊大林組 (実験当時早稲田大学大学院) 工修
⁴⁾ 早稲田大学理工学術院 教授・工博
(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
⁵⁾ 亀山建設(株) 代表取締役社長・工修
⁶⁾ 財団法人建築総合試験所 研究員・博士 (工学)
⁷⁾ 財団法人建築総合試験所 研究員
⁸⁾ 東京大学生産技術研究所 教授・博士 (工学)
⁹⁾ 相山女学園大学 教授・工博
¹⁰⁾ 財団法人ベターリビング 参与・工博

¹⁾ Graduate School of Waseda Univ. (Currently Tokyo Metropolitan Government)
²⁾ Senior Visiting Researcher, RISE, Waseda Univ., Ph.D.
³⁾ Obayashi Corporation (formerly Waseda Univ.), M. Eng.
⁴⁾ Prof., Dept. of Architecture, Waseda Univ., Dr. Eng.
⁵⁾ President, Kameyama Construction, M. Eng.
⁶⁾ Researcher, General Building Research Corporation of Japan, Ph.D.
⁷⁾ Researcher, General Building Research Corporation of Japan
⁸⁾ Prof., Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Ph.D.
⁹⁾ Prof., Sugiyama Jogakuen Univ., Dr. Eng.
¹⁰⁾ The Centre for Better Living, Dr. Eng.

mm)とし、寺院建築としては小断面のはり(幅 180 mm×せい 300 mm(試験体ア、図 1))と大断面のはり(幅 264 mm×せい 550 mm (試験体イ、図 2))の 2 体について荷重加熱実験を行った。含水率(絶乾法で測定)とヤング係数(打撃音法で測定)を表 1 に示す。2 試験体とも含水率が高いが、大断面のケヤキ材は乾燥が困難で、通常この程度の含水率で出荷されているため、今回はこの条件で試験を行った。試験は水平炉を使用し、3 等分点 2 線荷重(図 3)を行いながら、ISO834 で規定する標準加熱温度曲線による加熱を試験体が曲げ破壊するまで続けた。加熱終了後は速やかに炉蓋を開け、注水消火を行った。

2-1. 荷重の検討方法

準耐火構造はりの火災加熱時の非損傷性は鉛直方向の変形量により評価されるが³⁾、はりの崩壊自体は曲げ破壊に支配されるので、既報⁴⁾では、その予測法として、はりの加熱後の残存断面と内部温度上昇からはり(床がはりの上に載った床-はりの複合構造体)の加熱後断面に生じる応力度を計算し、材の曲げ強度と比較する手法を考案して、変形の予測に基づく非損傷性予測⁵⁾より限界に近い非傷性予測が可能であることを示した。但し、材の曲げ強度は、個々の部材について非破壊では把握できないため、本手法の検証のために行ったはりの荷重加熱実験⁴⁾では、45 分加熱後の断面に生じる応力度が部材の基準強度と一致するように荷重した。実験は、床板上面の温度上昇により、加熱 53 分後に加熱終了したが、曲げ破壊には至らなかったため、45 分時には基準強度より十分高い応力度に耐えられたと推察される。即ち、基準強度は部材強度の 5%下限値をもとに規定されている⁶⁾ため、荷重加熱試験の荷重を上記のように設定すると、殆どの場合、破壊までの時間は予測を上回るはずである。それでは、安全側の設計を導く方法は得られたとしても、実験結果を精度よく説明できる工学的予測法としての妥当性は厳密には検証できない。一方、木材の高温特性としては、ヤング係数が低下すること^{1,2,7)}だけでなく、曲げ強度も低下する傾向があること⁸⁾が報告されている。曲げ強度が高温で低下するなら、常温での実験に基づいている基準強度によって非損傷性を予測したのでは所定の性能を達成できない可能性がある。

そこで、本実験では既報⁴⁾の予測法を用いながらも、1 時間加熱後断面に基準強度に適切な係数を乗じた応力度が発生するように荷重を設定した。また、現在の準耐火構造の性能評価試験では加熱前断面に長期許容応力度 $1.1F_b/3$ が発生する荷重を載荷すること、さらに、国土交通省告示の燃えしろ設計⁹⁾では、燃えしろを除いた断面に短期許容応力度 $2F_b/3$ が発生する荷重を超えない荷重を部材が支持してよいことを考慮して、各試験体について以下の 3 通りの荷重を算出した。なお、 F_b は告示⁹⁾に規定される曲げに対する基準強度(N/mm²)を表すが、本報告では無等級材のケヤキの 29.4N/mm²を用いて算出した。

(1) 加熱前断面に対する長期許容荷重

荷重支持部材(はり)の加熱前断面に長期許容応力度が発生する荷重(以後、長期許容荷重と呼ぶ)。準耐火構造の性能評価における荷重加熱試験ではこの荷重を載荷し、その非損傷性を確認する³⁾。実設計において部材が支持する荷重はこの長期許容荷重を超えない。

(2) 加熱後断面に対する短期許容荷重

加熱前断面から燃えしろ 60 mmを差し引いた残存断面に短期許容応力度が発生する荷重。燃えしろ設計に沿って部材が支持する荷重

を決定すれば、1 時間の非損傷性を有するとされる。

(3) 1 時間加熱後の予測曲げ応力度に対応する曲げ破壊荷重

加熱後断面の予測曲げ応力度が供試材の曲げ強度に一致するように設定した荷重。但し曲げ強度は予測困難なため、本報告では基準強度に適切な係数を乗じた値を使用する。

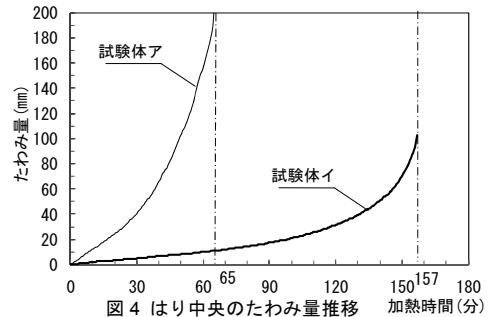


図 4 はり中央のたわみ量推移

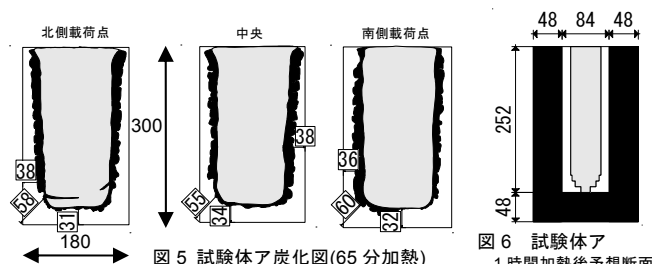


図 5 試験体ア炭化図(65 分加熱)

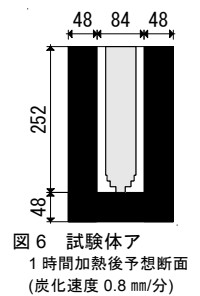


図 6 試験体ア 1 時間加熱後予想断面 (炭化速度 0.8 mm/分)

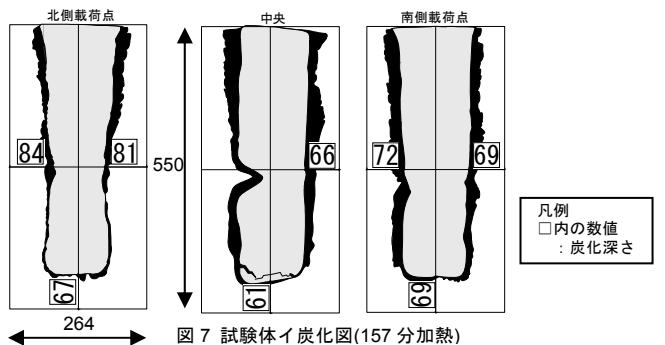


図 7 試験体イ炭化図(157 分加熱)

凡例
□内の数値 : 炭化深さ

表 2 荷重検討及び実験結果一覧

試験体名	ア	イ	
樹種	ケヤキ		
スパンL(mm)	5100		
断面寸法(mm)	幅180×せい300	幅264×せい550	
ヤング係数	114 tf/cm ² (11.2 kN/mm ²)	46.3 tf/cm ² (4.5 kN/mm ²)	
検討荷重*2 (kN)	(1)長期許容荷重	16.6	83.0
	(2)燃えしろ設計による最大荷重	6.5	65.8
	(3)1時間加熱の予想曲げ破壊荷重	15.3 炭化速度0.8mm/分としたとき1時間加熱後予想断面に基準強度の2倍の応力度が生じる荷重	121.9 炭化速度0.6mm/分としたとき1時間加熱後予想断面に基準強度の1.1倍の応力度が生じる荷重
載荷荷重*2(kN)	15.3	83.0	
予想座屈時間	60分	95分	
実験終了時間(注水開始時間)	65分(67分)	157分(162.5分)	

*2: 荷重は3等分点2線荷重の1線あたりを示す。

2-2. 試験体ア(幅 180×せい 300 mm)

2-2-1. 荷重の決定

試験体アについて 2-1 の 3 通りの荷重を算出すると、(1)16.6kN、(2)6.5kN、(3)15.3kN となった(表 2)。(3)については、炭化速度を大断面ケヤキ柱の実験結果¹⁾から 0.8 mm/分として 1 時間加熱後断面を想定し、当該試験体の実際の曲げ強度を基準強度の 2 倍と仮定して、荷重を算出した。上記の通り、この結果は(1)に近いことも考慮し、試験体アの載荷荷重は、(3) 1 時間加熱後の予測曲げ破壊荷重 (15.3kN)とし、1 時間加熱に対する非損傷性の予測可能性を検証することとした。

2-2-2. 実験結果及び考察

試験体アは実験開始 65 分後に最大たわみ速度の規定値 9.6 mm/分²⁾を超えたため、実験終了とし、67 分後に注水消火を開始した。従って、非損傷性に関する結果自体は予想に近いが、炭化深さは最大で 38 mm で(図 5、はり側面)、炭化速度は約 0.59 mm/分(38 mm/65 分)と、荷重設定時の仮定より小さかった。このため、加熱後断面は予想の前提より大きいから(図 5 と図 6 を比較)、実際の加熱後断面に発生していた応力度は、実験計画で設定した基準強度の 2 倍より小さいと考えられる。そこで試験後の残存断面から、試験体アの実験終了時(65 分)に実際に生じていた応力度を算出すると、基準強度の 1.1 倍となったため、試験体イの(3) 1 時間加熱後の予想曲げ破壊荷重は、この結果に基づいて算定した。

2-3. 試験体イ(幅 264×せい 550 mm)

2-3-1. 荷重の決定

試験体イについて 3 通りの荷重を算出すると、(1)83.0kN、(2)65.8kN、(3)121.9kN となった(表 2)。(3)については試験体アの結果をもとに、炭化速度を 0.6 mm/分とし 1 時間加熱後断面に基準強度の 1.1 倍の応力度が発生する荷重とした。実設計において部材に(1)の長期許容荷重より大きい荷重が生じることはないため、試験体イの載荷荷重は(1)長期許容荷重(83kN)とした。

2-3-2. 予想曲げ破壊時間の算出

試験体イに 83kN を載荷した場合に、1 時間加熱後の断面に基準強度の 1.1 倍の応力度が発生する時の炭化深さを予測したところ 57 mm となった。炭化速度を 0.6 mm/分とすると、この荷重に対しては、試験体イは 95 分の非損傷性が保たれるとの予想結果となった。

2-3-3. 実験結果及び考察

試験体イは実験開始 157 分後に最大たわみ速度が法令上の規定値 5.3 mm/分³⁾を超えたため実験終了とし、162 分後に注水消火した。実験終了時間は曲げ破壊の予想時間を 60 分以上、上回ったが、炭化深さは図 7 に示すように、下面は 70 mm 以下、側面も北側を除き 70 mm 前後以下と、曲げ強度を基準強度の 1.1 倍と仮定して曲げ破壊時間を算定した時の想定 1~2 割増に留まり、平均炭化速度は 0.4 mm/分程度と試験体アに比べ更に低下している。従って、試験体イにおいて曲げ破壊時間が予測を大きく上回ったことについては、平均炭化速度が小さかったことが大きく影響したと考えられる。なお、図 7 中試験体中央の側面の燃え込みが顕著であるが、これは加熱中に試験体中央に亀裂が生じ、燃え込みが進んだためだと考えられる。

2.4 まとめ

ケヤキのはりの火災加熱時の非損傷性は、試験体ア、イとも、炭化速度を 0.6 mm/分として算定した加熱後断面について基準強度に一致する曲げ応力度で破壊するかを判定すれば、余裕をもって評価で

きるとの結果となった。また、荷重条件と曲げ破壊時間から見て、試験体仕様で 1 時間準耐火構造や燃えしろ設計に適合する見通しが得られた^{注 1)}。しかし平均炭化速度は 2 回の実験で異なり、柱実験¹⁾とも異なる結果となった。広葉樹については、加熱後の部材断面予測に必要な炭化性状を更に研究する必要がある。

3. 柱・はり接合部等の加熱実験

伝統的意匠の寺院建築に典型的な 3 種類の接合部について、ケヤキ製材の実物大試験体を用いた載荷加熱実験を行い、その非損傷性の検討を行った^{注 2)}。なお、接合部仕様と設定荷重条件は実際の寺院の設計例をもとに設定した。

3-1. 実験概要

(1) 試験体及び載荷条件

試験体は伝統的寺院建築に典型的な次の 3 種類の接合部を選定し、実物大の試験体を製作した。供試材の含水率及び比重を表 4 に示す。含水率は高周波含水率測定による値、比重は丸太の状態で測定した質量と体積から算出した値を示す。供試材の含水率が高いが、2.のはり加熱実験と同様の理由により、今回はこの条件で試験を行った。試験体には、組み立てに必要な仕口の隙間や部材表面の割れ等、本実験の検証目的から外れる弱点が生じ得るが、ここではその影響を排除するため、該当部分にはそれぞれの隙間に合わせ、ケヤキ材による木栓を打ち込み、埋木を行った。

載荷荷重は、寺院の設計事例(平面約 24m×22m、最高高さ約 15m(図 8、図 9))をもとに当該接合部にかかる鉛直荷重を設定した。なお、この寺院の固定荷重と積載荷重を合わせた鉛直荷重は、約 2200kN を想定している。

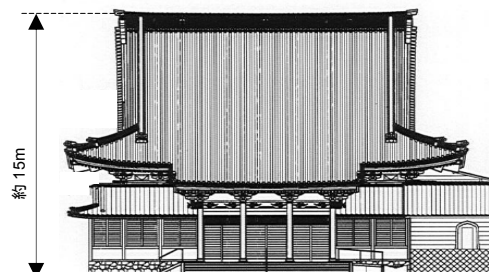


図 8 寺院の設計事例(立面図)

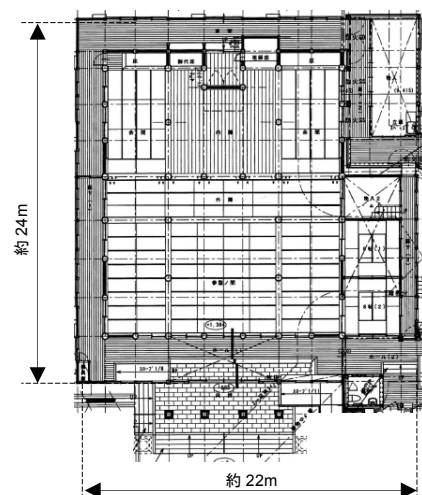


図 9 寺院の設計事例(平面図)

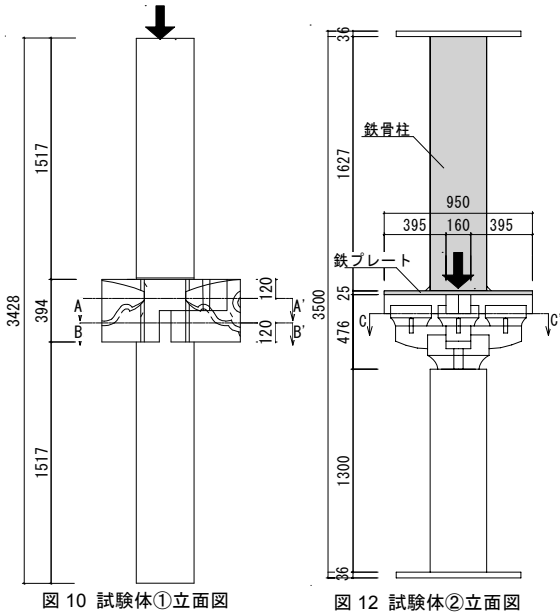


図 10 試験体①立面図

図 12 試験体②立面図

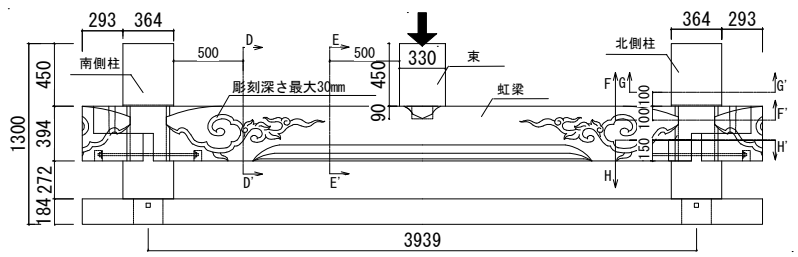


図 15 試験体③立面図

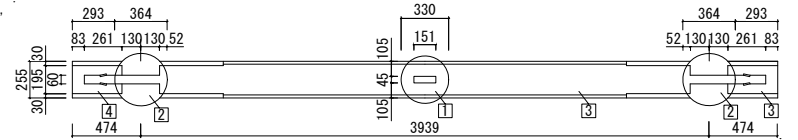


図 16 試験体③水平断面図
(□内の数値：供試材名)

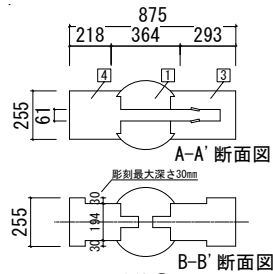


図 11 試験体①断面図
(□内の数値：供試材名)

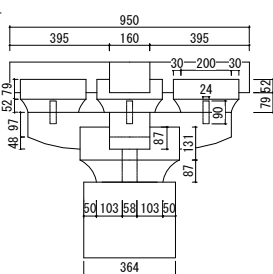


図 13 試験体②断面図

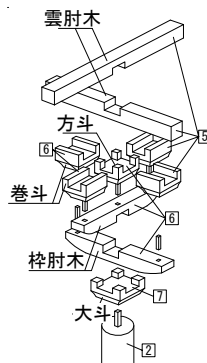


図 14 試験体②分解図
(□内の数値：供試材名)

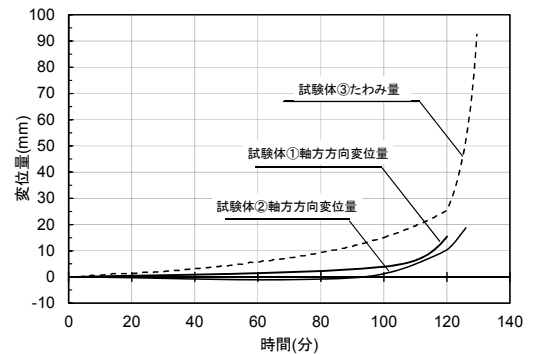


図 17 実験時の変位量推移

表 3 試験体仕様及び実験結果一覧

試験体名	特徴	載荷荷重 (kN)	実験終了時間	実験終了理由
①	はり2方差しの柱	320	120分	柱の変形15.4mm
②	組み物が上部に乗った柱	50	126分	組物の変形18.9mm
③	両端に柱を設け中央に束を乗せたはり	20 (東部分に載荷)	129分	はりの曲げ破壊

表 4 供試材の含水率及び比重一覧

供試材名	含水率 (%)	比重	使用した試験体
1	23.3	0.66	①③
2	22.6	0.56	②③
3	54.9	0.74	①③
4	49.4	0.89	①③
5	36	0.8	②
6	48.4	0.76	②
7	18.1	0.84	②



写真 1 試験体①加熱前

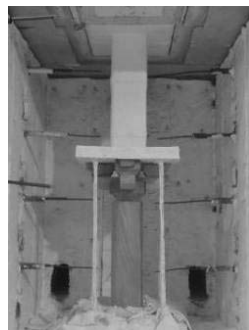


写真 2 試験体②加熱前

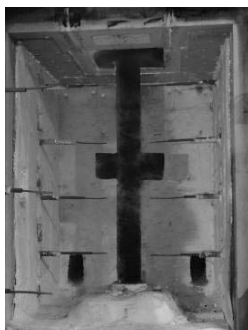


写真 3 試験体①加熱後



写真 4 試験体②加熱後

試験体①：はり（虹梁）二方差しの柱

直径 364 mm、長さ 3428 mm の柱の中央付近に、幅 255 mm×せい 394 mm の虹梁を両方向から二方差しとした（図 10,11、写真 1）。

一般的に寺院建築は各部材寸法や部材間距離等に規則性があるが、試験体①の虹梁の断面寸法は、スパンが 2 間(約 3640 mm)の虹梁に用いられる標準的な断面寸法とした。柱-虹梁の仕口は長柄差し車知引きとし、また 1 時間加熱後に燃え込みが 48 mm(=0.8 mm/分×60 分)生じても、残存断面が厚さ 100 mm 程度確保できるように、虹梁に施す彫刻の最大深さは 30 mm とした(図 11)。

載荷荷重は、建物の実態荷重から算出した 320kN とした。なお、この荷重は長期許容応力度が発生する荷重の約 5 割に相当し、既報①のケヤキの実大柱載荷加熱実験でも採用した条件である。

試験体②：柱頭を三ツ斗組とした側柱

直径 364 mm、長さ 1300 mm の柱頭に三ツ斗組の組物に乗せた（図 12,13,14、写真 2）。この形状の柱は実設計では側柱（建物外周柱のうち、出入隅の柱でないもの）の位置に用いられることが多い。組物の寸法は柱に対する木割によって概ね決定されるが、本実験で用いる組物は、燃えしろ 48 mm(=0.8 mm/分×60 分)を考慮して和様に用いられるような大きい木割を採用した。載荷荷重は実設計に基づいて側柱にかかる荷重を算出し、50kN とした。

試験体③：はり（虹梁）に載荷した柱

両端を直径 364 mm、長さ 1117 mmの柱に差した幅 255 mm×せい 394 mmの虹梁の中央部に直径 330 mmの束を立て、この束に載荷した（図 15,16）仕口及び彫刻の仕様は試験体①と同様とした。また本実験では実設計時の仕様として、柱を介した虹梁を相互に緊結させるための鋼製ボルトを設置し、座掘り部分は組み立て後埋木した。載荷荷重は、実設計建物の屋根荷重に基づいて 20kN とした。

(2) 載荷方法及び加熱方法

試験体①及び②は柱炉を使用して鉛直荷重をかけながら加熱を行い、試験体③は水平炉を使用し、はり中央の太瓶束に荷重をかけながら加熱を行った。加熱は ISO834 で規定する標準加熱温度曲線に従い、安全管理上、支障のない範囲で、大規模な変形を生じるまで実験を続けた。加熱終了後は速やかに炉蓋を開け、注水消火を行った。

3-2. 実験結果及び考察

(1) 実験結果概要

実験結果を表 3 に示す。試験体①は加熱時間 120 分が経過した時点で軸方向変位が急速に進んだため、実験を終了した。試験体②及び試験体③は加熱時間 120 分以降、載荷荷重を増加させたところ(30 秒間で 1kN 増加)、試験体②は加熱時間 126 分、試験体③は 129 分

で変形が急速に進み、実験装置の性能上載荷が困難となったため、実験を終了した。（図 17）各試験体ともに大きな損傷や部材接合部の顕著な燃え込みは見られなかった。

(2) 部材の炭化状況

各試験体の加熱後断面を図 18～28 に示す。図中黒く塗った部分は加熱後に残存した炭化層だが、図 21 に関しては断面切断時に炭化層がはがれ落ちたため、残存炭化層が無い図となっている。なお 3 試験体とも、試験中に顕著な炭化層の脱落は見られなかった。断面位置は試験体図(図 10,12,15)に示す。彫物部や接合部近傍以外の一般部の炭化速度は約 0.5 mm/分以下であり(図 18,19)、文献 1,2 及び本報告のケヤキに関する実験では、はり実験の試験体イに準じる小さい値となった。一般的に、木材の炭化速度は含水率が大きいほど低下することが知られているが、文献 1,2 及び本報告のケヤキの平均炭化速度は、柱、はりを含め、加熱時間が長い場合に低下する傾向が認められるところから、加熱時間の経過とともに炭化速度が低下する可能性も考えられる。

また、軸組の炭化性状は、はり・柱の長さ方向の表面については多数の測定例があるが、木口については把握例が少ない。そこで、試験体①や③は納まり上、はり木口が加熱されるため、その炭化状況（図 25,26,28）をみると、長さ方向とほぼ変わらない結果となった。

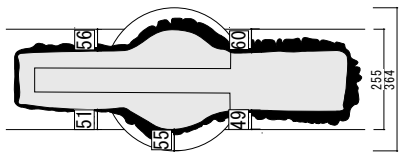


図 18 試験体①A-A'断面炭化図(120分加熱)

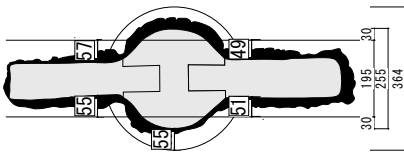


図 19 試験体①B-B'断面炭化図(120分加熱)

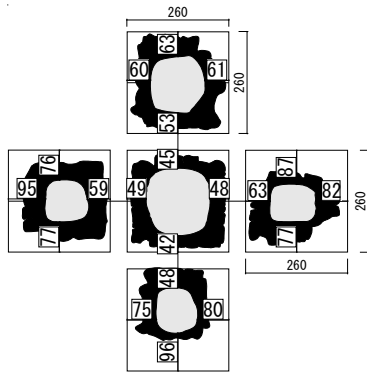


図 20 試験体②C-C'断面炭化図(126分加熱)

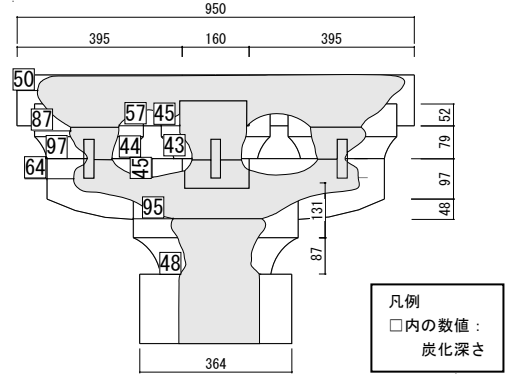


図 21 試験体②縦断面炭化図(126分加熱)

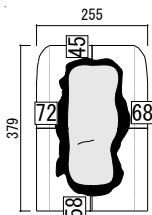
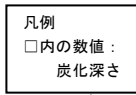


図 22 試験体③D-D'断面炭化図(129分加熱)

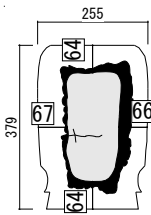


図 23 試験体③E-E'断面炭化図(129分加熱)

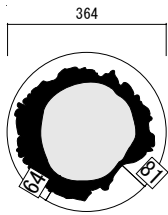


図 24 試験体③G-G'断面炭化図(129分加熱)

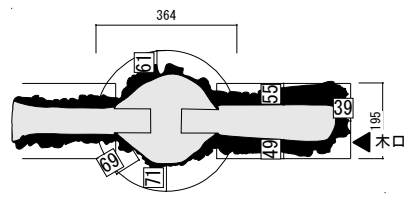


図 25 試験体③H-H'断面炭化図(129分加熱)

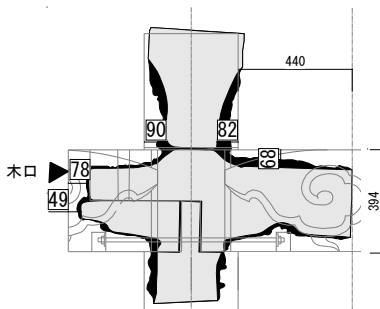


図 26 試験体③南側柱縦断面炭化図(129分加熱)

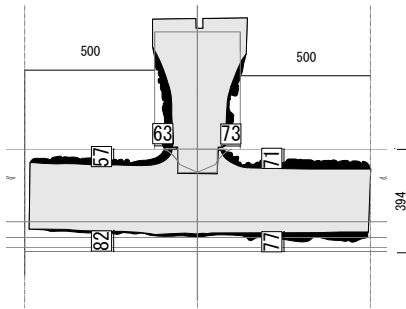


図 27 試験体③東縦断面炭化図(129分加熱)

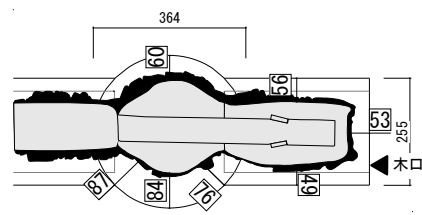


図 28 試験体③F-F'断面炭化図(129分加熱)

試験体②の巻斗部分の炭化状況(図20)を見ると、約120分の加熱で、小断面の部材同士が向かい合う面はそれ以外の面より炭化深さが25~45mm程度小さくなっている。加熱がある程度続いた段階では部材表面は炭化し、炉内温度の方が高温になるため、これは部材表面への入熱が主として対向する部材表面からの放射に支配され、炉壁や火炎からの加熱を受け難いことに起因すると考えられる。

3-3. まとめ

伝統的意匠の寺院に典型的な柱・はり接合部3仕様について、伝統的意匠の寺院に使用される場合を想定した荷重を載荷して加熱実験を実施した結果、この荷重条件のもとで2時間以上の非損傷性を有することがわかった。この荷重の範囲の設計仕様のもとでは、1時間の非損傷性を有する柱・はりで構成する架構に使用して、接合部が原因で崩壊に至ることはないと考えられる。炭化速度は、各試験体のほとんどの部分において、2時間余の加熱に対して0.5mm/分以下と、はり試験体イに準じる結果となり、炭化速度は、部材が向かいあう部分では更に低下した。

4. 結論

寺院の伝統的意匠に基づいて製作したケヤキ製材のはり及びはり・柱接合部の載荷加熱試験により、以下のことが明らかとなった。

- (1) ケヤキのはりの火災加熱時の非損傷性は、炭化速度を0.6mm/分として加熱後断面を予測し、その断面について基準強度に一致する曲げ応力度で曲げ破壊するかを判定すれば、余裕をもって評価でき、伝統的な寺院の一般的な仕様により1時間準耐火構造及び燃えしろ設計に適する見通しが得られた^{注1)}。
- (2) 伝統的意匠の寺院の軸組に特徴的な接合部3種類について、一般的な寺院の設計に基づいて設定した荷重条件で2時間以上の非損傷性を確認でき、この荷重の範囲で、1時間準耐火構造に活用できる見通しが得られた。

しかし、本実験の結果は、火災加熱下の木材の断面性能を支配する炭化速度及び曲げ強度が大断面広葉樹製材では予測困難なことも浮き彫りにしており、その軸組の非損傷性をよりの確に予測できるようにするには、次の課題を解決していく必要があると考えられる。

第一に、加熱中の平均炭化速度は、実験毎にまちまちの値となった。その原因として、部材表面の入熱に対する装置・試験体条件の影響等を検討すると、接合部の実験より、木質部材表面間の放射は、炭化速度を低下させることが明らかである。一方、柱の1時間非載荷加熱実験²⁾では、はり実験と同じ炉を使用して試験体4体を同時に加熱し、木質部材表面間の相互放射が生じ得る条件であったが、平均炭化速度は他のいずれの実験より大きい。これより、はり実験の平均炭化速度が柱実験のそれより小さかったことについては、炉や試験体の設置条件に起因するとは考え難い。柱、はり、接合部とも、概ね、加熱時間が延びるにつれ、炭化速度が低下する傾向が認められるので、加熱時間の経過とともに炭化速度が低下すると考えられるが、今後は、その理由を更に明らかにして、加熱時間、断面条件等をパラメータとして炭化速度を的確に予想できるようにすることが望ましい。

第二に、はり載荷加熱実験結果からみて2試験体の加熱終了時の曲げ強度は基準強度の1.1倍程度と推定されるが、基準強度の設定根拠から予想されるほど余裕があるとは言い難い。前述のように、

基準強度は常温での評価に基づいており、木材の曲げ強度は非破壊での評価法も確立していないから、曲げ強度に関する非破壊評価法の開発と温度依存性の把握を進めることが重要である。

謝辞

本実験は、木構造振興株式会社による「平成21年度地域材利用加速化緊急対策支援事業」の一環として行われた。本研究にあたり、(独)建築研究所・萩原一郎氏、(独)森林総合研究所・宮武敦氏、長尾博文氏、上川大輔氏、(財)ベターリビング・水上点晴氏、(財)日本住宅・木材技術センター・山田誠氏及び(株)東亜理科の皆様には多大なるご協力とご支援を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

注

- 注1)文献1及び本報告の実験後、ケヤキ製材の柱、はりについて、1時間準耐火構造の性能評価を受け、国土交通大臣認定を取得した。
- 注2)柱、はり等の耐力部材の準耐火構造認定のための性能評価では、部材が使われる設計条件を特定できないため、設計荷重の上限として火災前の断面に長期許容応力度を乗じた荷重を載荷する。しかし、寺院建築に特有な組物は、使われる場面が限定されること、寺院建築の軸組断面は一般に意匠的要請によって定まり、力学的には余裕があることを考慮して、本実験では、組物が伝統的仕様のまま、規定の準耐火時間、火災時に軸組の自立を維持できるかを確認するために、寺院建築の設計例をもとに積載荷重を決定した。

参考文献

- 1) 保川みずほ、安井昇、鈴木あさ美、長谷見雄二、亀山直央、豊田康二、門岡直也、上川大輔、腰原幹雄、遊佐秀逸、小野徹郎：大型寺社建築のための大断面広葉樹製材による準耐火構造の柱・はりの開発(その1)広葉樹の燃焼性状及び高温時の機械的特性の把握と柱の載荷加熱実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp.165-168, 2011
- 2) 保川みずほ、安井昇、鈴木あさ美、長谷見雄二、亀山直央、豊田康二、門岡直也、上川大輔、腰原幹雄、小野徹郎：大断面広葉樹(ケヤキ)製材による軸組柱の防耐火性能予測に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第685号、2013年3月
- 3) 例えば、(財)日本建築総合試験所：防耐火性能試験・評価業務方法書、平成22年6月1日版
- 4) 安井昇、長谷見雄二、平井宏幸、渡邊圭太、腰原幹雄ら：横架材の加熱後曲げ応力度予測に基づく伝統木造床の防耐火設計と梁長さ・間隔の拡張可能性、日本建築学会構造系論文集、No.642, 2009年8月
- 5) 平井宏幸、長谷見雄二、安井昇、木村忠紀、山本幸一：伝統軸組構法に基づく木造床の防耐火性能、日本建築学会構造系論文集、第625号、2008年3月
- 6) 平成12年建設省告示第1452号
- 7) 上杉三郎：スギ材の180℃以下加熱における曲げ性能、木材学会誌、vol.38, No.11, pp.985-994, 1992
- 8) 加來千紘、長谷見雄二、安井昇、保川みずほ、鈴木あさ美、上川大輔、亀山直央、小野徹郎、腰原幹雄、長尾博文、萩原一郎、遊佐秀逸：火災後の部材の継続的使用を前提とした大規模木造建築の防耐火計画法~柱の火害診断方法及び改修方法の提案~、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp.323-326, 2012.9
- 9) 昭和62年建設省告示第1902号
- 10) 亀山直央、保川みずほ、長谷見雄二、安井昇、鈴木あさ美、豊田康二、門岡直也、腰原幹雄、遊佐秀逸、小野徹郎：大型寺社建築のための大断面広葉樹製材による準耐火構造の柱・はりの開発(その2) はりの載荷加熱実験と柱・はり接合部の防耐火性能の把握、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp.165-168, 2011

[2013年1月30日原稿受理 2013年4月17日採用決定]