

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

広葉樹 ケヤキ 非損傷性
準耐火構造 はり

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

1.はじめに

前報(その1)では、広葉樹の燃焼性状と高温時の機械的特性の把握を行い、1時間準耐火構造の要求性能を満足する広葉樹柱の仕様を明確にした。

本報(その2)では、広葉樹のはりについて、1時間準耐火構造の要求性能を満足する部材断面と荷重の関係を明らかにするために、加熱後断面の力学的性能を予測し、載荷加熱実験からその予測手法の妥当性と部材の非損傷性を検証した。また、広葉樹の柱・はりで大型寺社建築物を建築する場合、柱とはりの接合部や柱上に組み物が存在するが、それらに関する加熱実験はほとんど実施されておらず、火災時に弱点になる可能性も考えられる。そこで大型寺社建築物の典型的な柱・はりの接合部について、実建物で想定される荷重を受けた際の非損傷性についても検討した。

2.ケヤキの実大はり載荷加熱実験

広葉樹製材による1時間準耐火構造のはりの開発に向け、ケヤキのはりの非損傷性を把握するために、大型寺社建築物において、比較的小断面と大断面の2体のはりの載荷加熱実験を行った。試験体は長さ5500mm(荷重支持スパン5100mm)とし、断面寸法をパラメーターとして、幅180mm×せい300mm(試験体ア(図2-1))、幅264mm×せい550mm(試験体イ(図2-2))の2体とした。含水率とヤング係数(打撃音法で測定)を表2-1に示す。

試験は水平炉を利用し、3等分点2線載荷(図2-3)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

既往の研究¹⁾では、加熱後の残存断面と内部温度上昇からはり(床がはりの上に乗った、床-はりの複合構造体)の非損傷性を予測する手法を提案し、その手法により45分の非損傷性が保たれるであろう荷重を予測し、その予測法の妥当性を載荷加熱実験で検証した。その際、加熱後断面に生じる応力度が部材の基準強度と等しくなる荷重を載荷荷重とした。その結果、53分の非損傷性を達成し、さらにはりが曲げ破壊していないことを考慮すると、45分時にはより高い応力度に耐

えられる可能性がある。そこで、本実験では既往研究¹⁾の予測法を用い、1時間加熱後断面に基準強度の2倍の応力度が発生する荷重を載荷して実験することとした。また、現在の性能評価試験が加熱前断面に長期許容応力度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が、燃えしろを除いた断面に短期許容応力度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。

(1) 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試験ではこの荷重を載荷し、その非損傷性を確認する²⁾。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) 燃えしろ設計による許容荷重

加熱前断面から規定の燃えしろ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。告示の燃えしろ設計に従って部材が支持する荷重を決定すれば、1時間の非損傷性が達成できる。

(3) 1時間加熱後の予想座屈荷重

既往の研究¹⁾で提案した、加熱後の残存断面と内部温度上昇からはりの非損傷性を予測する手法を用いて算出する、1時間の非損傷性が保たれるであろう荷重。

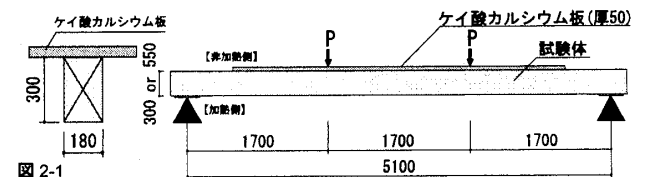


図2-1 試験体ア断面図

図2-3 3等分点2線載荷模式図

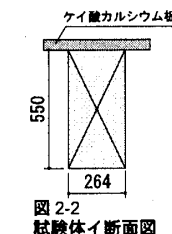


図2-2 試験体イ断面図

表2-1 試験体仕様一覧

試験体名	樹種	スパンL (mm)	断面寸法 (mm)	含水率 (%)	ヤング係数 (tf/cm ²)
ア	ケヤキ	5100	180×300	30.8	114
イ			264×550	46.8	46.3

2-2. 試験体ア(幅 180×せい 300mm)

2-2-1. 荷重の決定

試験体アについて 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 2-2)。(3)について、炭化速度は前報(その 1)の実験結果を考慮して 0.8mm/分とし 1 時間加熱後断面に基準強度の 2 倍の応力度が発生する荷重とした。試験体アの載荷荷重は、(3) 1 時間加熱後の予想座屈荷重(15.3 kN)とし、1 時間の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 分後において最大たわみ速度の規定値(9.6mm/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。炭化深さは最大で 38mm となり(図 2-5)、炭化速度は約 0.59mm/分(38mm/65 分)であった。1 時間加熱後の予想座屈荷重(15.3 kN)算出時に炭化速度を 0.8mm/分とし加熱後断面を実際より小さく予測していたため(図 2-5 と図 2-6 を比較)、実際の加熱後断面に発生していた応力度は基準強度の 2 倍より小さいと考えられる。そこで試験後の炭化深さから、試験体アの実験終了時(65 分)に実際に生じていたと考えられる応力度を算出すると、基準強度の 1.1 倍であった。この結果に基づいて試験体イの(3) 1 時間加熱後の予想座屈荷重を算定することとする。

2-3. 試験体イ(幅 264×せい 550mm)

2-3-1. 荷重の決定

試験体イについて前述の 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 2-2)。(3)については試験体アの結果をもとに、炭化速度は 0.6mm/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。(3)予想座屈荷重が最大となったが、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 83.0kN(3)予想座屈荷重の約 2/3)を載荷した場合に、加熱後断面に基準強度の 1.1 倍の応力度が発生するときの炭化深さを予測したところ 57mm となった。炭化速度を 0.6mm/分とすると、試験体イは 95 分の非損傷性が保たれるという予測結果となった。

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規定値(5.2mm/分)²⁾を超えたため実験終了とし、162 分後に注水消火した。実験終了時間が予想曲げ破壊時間を 60 分以上上回ったが、これは基準強度が信頼水準 75% の 5% 下側許容限界値から決定されているためと考えられる。すなわち、部材の基準強度に基づいて、非損傷性を予測する際には、安全側の評価はできるものの、より精度の高い予測をするためには、部材固有の強度を特定することが必要と考えられる。

2-4. まとめ

本実験より、ケヤキのはりについて炭化速度を 0.6mm/分として加熱後断面を予測し、その断面に生じる応力度と基準強度を比較することにより、非損傷性を安全側に評価できる可能性があることがわかった。今後、サンプル数を増やし信頼性をより向上する必要があるだろう。

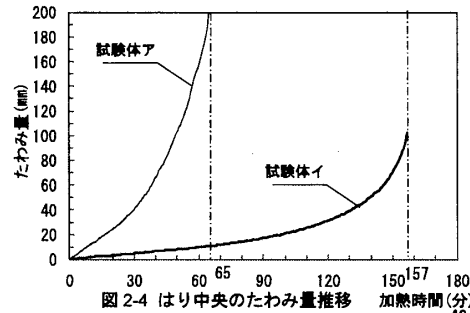


図 2-4 はり中央のたわみ量推移

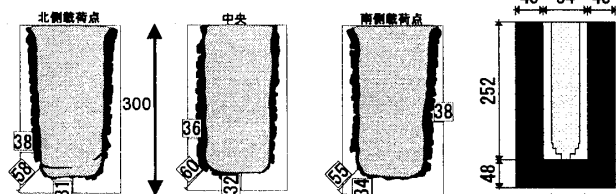


図 2-5 試験体ア炭化図(65分加熱)

図 2-6 試験体ア
1 時間加熱後予想断面
(炭化速度 0.8mm/分)

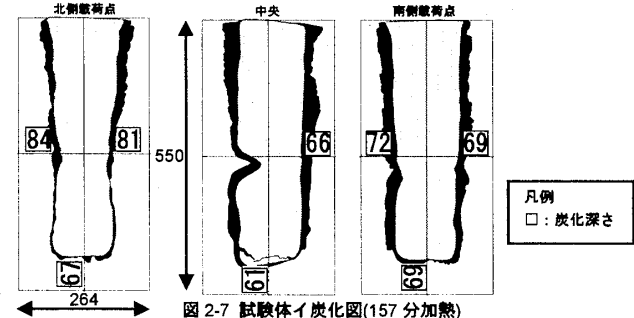


図 2-7 試験体イ炭化図(157分加熱)

凡例
□: 炭化深さ

表 2-2 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(tf/cm ²)		114	46.3
検討荷重 [*] (kN)	(1)長期許容荷重	16.6	83.0
	(2)燃える設計による最大荷重	6.5	65.8
	(3)1時間加熱の予想座屈荷重	15.3	121.9
載荷荷重 [*] (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)

* 荷重は3等分点2線載荷の1線あたりを示す。

3. 柱・はり接合部等の加熱実験

ここまで柱やはりといった部材単体の防耐火性能について検討を行ったが、実建物では柱とはりの接合部や柱上部に組物が存在し、それらが火災時に弱点となる可能性も考えられる。そこで、寺社建築に用いられる典型的な接合部について、柱やはりが実設計で想定される荷重を受けた際の非損傷性について検討を行った。

3-1. 実験概要

(1) 試験体概要

試験体はすべてケヤキ製材を用い、実設計において、典型的な3種類の接合部を選定し実物大の試験体を製作した。含水率19%、ヤング係数は69-85tf/cm²であった。

試験体①：はり（虹梁）二方差しの柱

直径364mm、長さ3428mmの柱の中央部付近に、幅255mm×せい394mmの虹梁を両方向から二方差しとした（図3-1,3-2）。虹梁の断面寸法は実設計において2間の長さの虹梁の標準的な寸法とし、柱・虹梁の仕口は長柄差し車知引きとした。また、虹梁に施す彫刻は、断面欠損及び燃え込みを考慮して最大深さを30mmとした。

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、前報（その1）のケヤキの実大柱載荷加熱実験においても採用した。

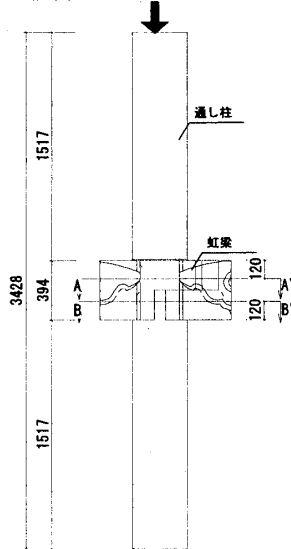


図 3-1 試験体①立面図

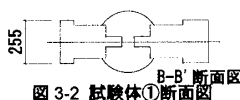
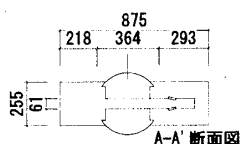


図 3-2 試験体①断面図

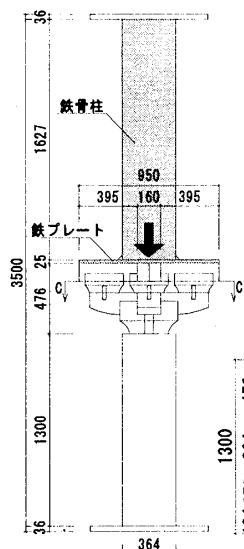


図 3-3 試験体②立面図

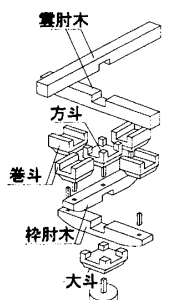


図 3-4 試験体②分解図

試験体②：柱頭を三ツ斗組とした柱

直径364mm、長さ1300mm柱頭に三ツ斗組の組物を乗せた（図3-3、3-4）。この形状の柱は実設計においては側柱（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、燃えしる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。荷重は実設計に基づいて側柱にかかる荷重を算出し、実態荷重として50kNを載荷した。

試験体③：はり（虹梁）に載荷した柱

両端を直径364mm、長さ1117mm柱に差した幅255mm×せい394mmの虹梁の中央部にφ330mmの大瓶束を立て、この束に載荷した（図3-5）。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。載荷荷重は建物の屋根荷重を考慮した実態荷重として20kNを載荷した。

なお、すべての試験体について、加熱時に材料同士の間隙からの燃え込みを防ぐため、組み立てに必要な仕口の隙間や柱表面の割れにはケヤキで埋木を行った。

(2) 載荷方法および加熱方法

試験体①及び②は柱炉を使用し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。なお加熱はISO834で規定する標準加熱温度曲線による加熱とし加熱終了後は速やかに炉蓋を開け、注水消火を行った。

表 3-1 試験体一覧

試験体名	銜種	特徴	載荷荷重(kN)
①	ケヤキ	はり2方差しの柱	320
②		組み物が上部に乗った柱	50
③		両端に柱を設け中央に束を乗せたはり (束部分に載荷)	20

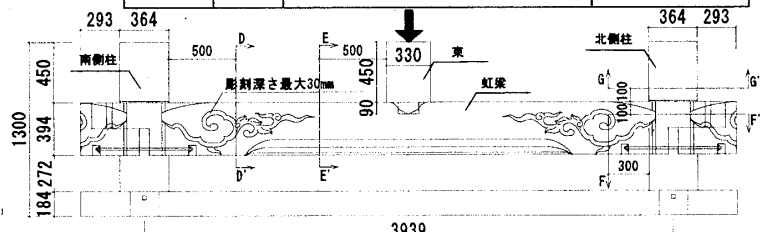


図 3-5 試験体③立面図

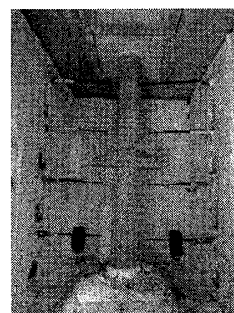


写真 3-1 試験体①画像

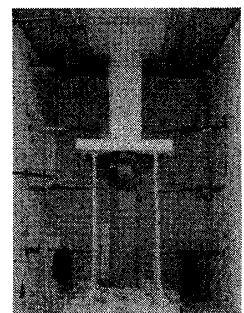


写真 3-2 試験体②画像

3-2. 実験結果及び考察

(1) 実験結果概要

実験結果を表 3-2 に示す。試験体①は 120 分、試験体②は 126 分、試験体③は 129 分で、表 3-2 の理由より実験終了とした。これより、実火災時に大型寺社建築物の柱-はり接合部は 2 時間以上の非損傷性が確保されると考えられる。また、各試験体ともに部材同士の接合部に顕著な燃え込みは見られなかった。

(2) 部材の炭化状況

各試験体の炭化図を図 3-6~3-15 に示す。(断面位置は前述の試験体図(図 3-1~3-5)に示す。)彫物部や接合部近傍以外の一般部の炭化速度は 0.42~0.5mm/分(50~60mm/120 分)であり(図 3-6、3-7)、前報やはり実験で確認した炭化速度より小さい値となった。これは、ケヤキの炭化層が 120 分を超える加熱中にも脱落することなく均一に形成されるため、この炭化層により部材内部への熱の侵入が抑制され炭化速度が低下すると考えられる。

また、炭化性状の把握ははりや柱の長さ方向の表面について多数行われているが、木口方向についてはあまり把握されていない。試験体①や③は納まり上、やはり木口が加熱されるが、その炭化性状は長さ方向とほぼ同じであった(図 3-12)。

試験体②の巻斗部分の炭化図(図 3-8)を見ると、小断面の部材同士が向かい合う面(周辺からの加熱が抑制される面)はそれ以外の面より、約 120 分の加熱で、炭化深さが 25~45mm 程度小さくなった。

3-3. まとめ

寺社建築の典型的な柱-はり接合部について、実態荷重による載荷加熱実験を実施した結果、2 時間を超える非損傷性を有することを確認した。

表 3-2 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	柱の寛形15.4mm
②	組み物が上部に乗った柱	50	126分	組物の寛形18.8mm
③	両端に柱を掛け中央に梁を乗せたはり	20 (東部分に載荷)	129分	はりの曲げ破壊

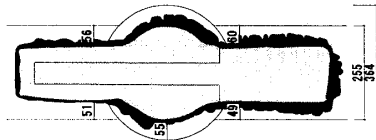


図 3-6 試験体①A-A'断面炭化図

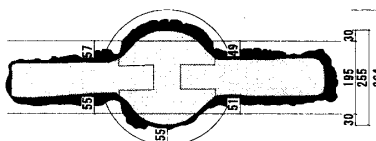


図 3-7 試験体①B-B'断面炭化図

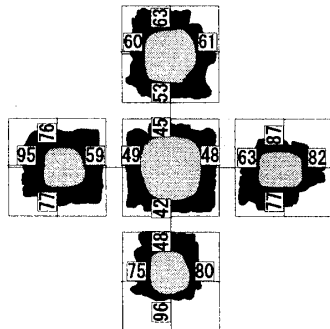


図 3-8 試験体②C-C'断面炭化図

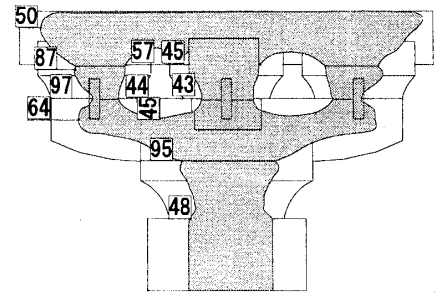


図 3-9 試験体②縦断面炭化図

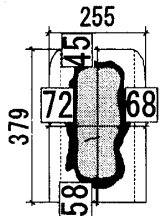


図 3-10 試験体③D-D'断面炭化図

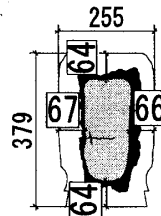


図 3-11 試験体③E-E'断面炭化図

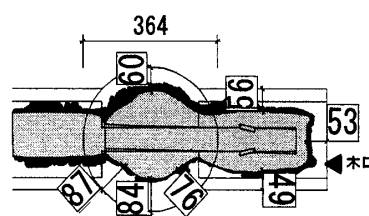


図 3-12 試験体③F-F'断面炭化図

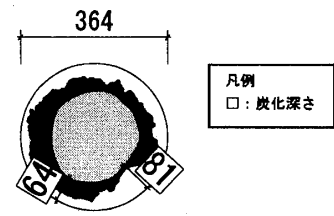


図 3-13 試験体③G-G'断面炭化図

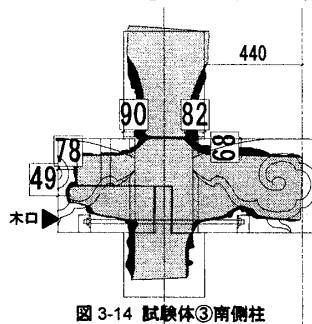


図 3-14 試験体③南側柱縦断面炭化図

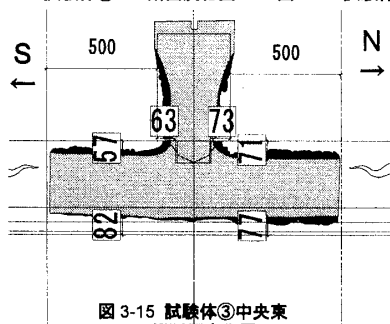


図 3-15 試験体③中央東縦断面炭化図

【参考文献】

- 1) 安井昇・長谷見雄二・平井宏幸・渡邊圭太・藤原幹雄ら、構架材の加工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
- 2) 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

【謝辞】

本研究は、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」の一環で行われた。本実験を行うにあたり、(社)日本建築学会伝統木造準耐火構造WG、(財)日本建築総合試験所及び(株)東亜理科の皆様には多大なるご協力とご支援をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

- *1 亀山建設(株)
- *2 早稲田大学大学院
- *3 早稲田大学理工学術院教授・工博
- *4 早稲田大学理工学研究所招聘研究員・博士(工学)
- *5 (財)日本建築総合試験所・博士(工学)
- *6 (財)日本建築総合試験所
- *7 東京大学生産技術研究所准教授・博士(工学)
- *8 (財)ベターリビング・工博
- *9 相山女学園大学教授・工博

- *1 Kameyama Construction
- *2 Graduate School of Waseda Univ.
- *3 Prof., Department of Architecture, Waseda Univ., Dr. Eng.
- *4 Visiting Researcher, RISE Waseda Univ., Ph.D.
- *5 General Building Research Corporation of Japan, Ph.D.
- *6 General Building Research Corporation of Japan
- *7 Associate Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr. Eng
- *8 The Centre for Better Living, Dr. Eng.
- *9 Prof., Sugiyama Jogakuen Univ., Dr. Eng