

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

EXPERIMENTS FOR THE VERIFICATION OF THE PREDICTABILITY OF STRUCTURAL FIRE RESISTANCE OF HEAVY HARDWOOD (ZELKOVA) COLUMNS

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}, 上川 大輔^{*8}
 腰原 幹雄^{*9}, 小野 徹郎^{*10}

*Mizuho YASUKAWA, Noboru YASUI, Asami SUZUKI,
 Yuji HASEMI, Naohisa KAMEYAMA, Koji TOYODA,
 Naoya KADOOKA, Daisuke KAMIKAWA, Mikio KOSHIHARA
 and Tetsuro ONO*

A series of experiments are conducted for the establishment of the predictive method of the structural fire resistance of heavy hardwood (Zelkova), column normally used for traditional temple buildings. The experiments consist of

- (1) Measurement of the Young's modulus of Zelkova at elevated temperatures
- (2) Measurement of charring velocity and internal temperature of large size Zelkova column exposed to ISO834 Standard Time temperature curve.
- (3) Full scale tests for the validation of the predictive method of collapse time.

The experiments reveal only minor difference of the mechanical and fire-resistive performance between Zelkova and conventional softwood. The validation test has resulted in the predictability of the structural fire resistance of Zelkova column at roughly 10% over-estimate.

Keywords : *Hardwoods, Zelkova, Mechanical fire resistance, Quasi-fireproof construction, Young's modulus, Charring rate*

広葉樹, ケヤキ, 非損傷性, 準耐火構造, ヤング係数, 炭化速度

1. はじめに

広葉樹は、日本では古代から建築部材として利用されており、特にケヤキは近世以降、西本願寺の大建築の架構に使われる等、寺院建築の構造部材として最も重要な樹種の1つとされてきた¹⁾。広葉樹材は、今後も寺院建築や文化財保存修理の用材等としての活用が望まれようが、針葉樹材に比べて、材料・部材としての防耐火性能や力学的性能に関するデータ整備の取り組みが少なく、火災加熱時の炭化速度・部材内部温度、製材にありがちな割れ等がそれらに及ぼす影響など、構造部材としての防耐火性能を支配する要素が不明確なため、防耐火上、大規模木造建築に使われている燃えしろ設計、準耐火構造の適用には基本的な困難がある²⁾。そのため、本研究では、広葉樹材の大規模建築の軸組、特に柱への活用を想定し、その防耐火性能評価上、基本的な性能として、力学的特性の温度依存性、標準耐火加熱下での炭化速度・部材内部温度分布を、実大断面をもつ小型試験体による非荷加熱試験で把握して針葉樹材と比較のう

え、火災加熱時の断面減少・部材内部温度上昇を踏まえた非損傷性予測の可能性を、1階分の高さの柱試験体を使った荷加熱試験により検討した。この一連の検討を通じて、大断面広葉樹材による大規模建築の防耐火性能を工学的に予測評価する見通しを明らかにしたい。

2. ケヤキのヤング係数の温度依存性

木材が火災加熱されると炭化により断面減少する他、内部温度の上昇によりヤング係数が低下し、構造部材としての性能に影響を及ぼす³⁾。木材の高温でのヤング係数は、針葉樹材については系統的に測定されているが⁴⁾、広葉樹材については不明な点が多いため、ケヤキの高温時のヤング係数を測定した。

2.1 実験方法

温度調整炉付き圧縮試験機(写真1)で、JIS Z2101 木材の曲げ試験方法に準拠する280mm スパンの3点曲げ方法で試験体を加力し、ヤング係数を測定した。試験体は、含水率が平衡状態にあることが望

本論文の実験の骨子は文献7)で口頭発表した。

*1 早稲田大学大学院 修士課程

*2 早稲田大学理工学研究所 客員上級研究員・博士(工学)

*3 ㈱大林組 工修

(当時 早稲田大学大学院)

*4 早稲田大学理工学術院 教授・工博

*5 亀山建設㈱ 代表取締役社長・工修

*6 一般財団法人日本建築総合試験所 博士(工学)

*7 一般財団法人日本建築総合試験所

*8 独立行政法人森林総合研究所 博士(工学)

*9 東京大学生産技術研究所 教授・博士(工学)

*10 福山大学工学部 教授・工博

Graduate School of Waseda University

Senior Visiting Researcher, RISE, Waseda University, Ph. D.

Obayashi Corporation, M. Eng.

(Formerly Graduate School, Waseda Univ.)

Prof., Department of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.

President, Kameyama Construction, M. Eng.

General Building Research Corporation of Japan, Ph. D.

General Building Research Corporation of Japan

Forestry and Forest Products Research Institute, Ph. D.

Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph. D.

Prof., Sugiyama Jogakuen University, Dr. Eng.

ましいが、ケヤキの新材では含水率の調整が困難なため、含水率が平衡状態にある築 80 年の建物の解体材から寸法 20mm×20mm×320mm、2 方征、無欠点の試験体を約 120 本用意した(図 1)。加熱による含水率低下の影響を排除するため、乾燥器を用い含水率を 2%程度まで下げてから試験を行った。実験は、まず常温で試験体の強度が低下しない範囲で加力する曲げ試験を全試験体について行い、常温時ヤング係数を測定した。常温時ヤング係数は 70～134tf/cm²の範囲にあったが、平均値は 103tf/cm²でケヤキのヤング係数の慣用値⁴⁾105tf/cm²に近い。

次に、試験体が破断に至るまで加力する曲げ試験(以下、「破壊曲げ試験」という)を常温、50℃、100℃、150℃、180℃の 5 段階の温度で行い、ヤング係数を測定した(以下、「高温時ヤング係数」という)。常温以外の温度設定は、既報⁵⁾の標準耐火加熱時の木材の内部温度の範囲をもとに決定した。破壊曲げ試験の試験体数はそれぞれの温度で約 20 体ずつ計 100 体程度とし、残りの約 20 体の試験体の中から、木口面から 20mm 程度熱電対を挿入した温度測定用の試験体を制作した(図 1)。温度測定用の試験体は常温以外の温度ごとに 1 体ずつ用意し、破壊曲げ試験を行う試験体と同条件で加熱を行い、目標温度に到達するまでの加熱時間を測定し、破壊曲げ試験を行う試験体の加熱時間の目安とした。目標温度に到達するまでの加熱時間は 30 分程度であった。なお常温時ヤング係数、高温時ヤング係数ともに試験体の荷重位置はスパン中央部、荷重速度は 10mm/分として測定した。

2.2 実験結果及び考察

本実験におけるケヤキの常温時ヤング係数と高温時ヤング係数の関係を図 2 に示す。温度が高くなるほど、常温時ヤング係数に対する高温時ヤング係数の比(以下、「ヤング係数残存率」という)が低くなるのが分かる。ヤング係数残存率と温度の関係を図 3 に示すが、ヤング係数残存率の平均値及び標準偏差は、180℃で 0.73 及び 0.024、150℃で 0.84 及び 0.011、100℃で 0.92 及び 0.013、50℃で 0.97 及び 0.021 となった。ヤング係数残存率の温度依存性を把握するため、50～150℃、100～180℃の範囲で線形回帰すると(図 3)、温度が上昇するほど、ヤング係数の低下が急速に進むことがわかる。また、針葉樹(スギ)に比べると、本実験結果では高温時のヤング係数低下が緩やかであるため、針葉樹材の非損傷性予測²⁾で想定するヤング係数残存率を用いれば、ケヤキの非損傷性を余裕をもって予測できると考えられる。一方、既往研究⁶⁾によればスギの常温時ヤング係数のばらつきは 60～90tf/cm²の範囲であり、本報のケヤキの常温時ヤング係数が 70～134tf/cm²とより広い範囲にばらつくことから、ケヤキはスギと比較して常温時のヤング係数のばらつきが大きい可能性がある。

3 標準耐火加熱を受ける柱の炭化・内部温度性状

樹種を問わず、木材の耐力部材としての防耐火性能を評価するには、火災加熱時の炭化速度、断面温度形成と力学的性状を把握する必要がある。そこでケヤキ製材による、断面が実大の小型試験体を用いて非荷重の加熱実験を行い、炭化速度及び加熱時の部材内部温度分布を測定した。また、木造部材に関するこれらの性状の把握は、従来、集成材以外はスギの小断面製材に集中していることを考慮し、ヒノキ、スギ、クリの大断面製材についても同様の実験を行い、材種の比較を行った。

3.1 試験体・実験方法

木造部材の炭化・内部温度形成に影響し得る要因として、樹種他に断面形状・寸法、表面割れの有無、含水率があげられる。これらをパラメータとして、高さ 1.0m の柱試験体を計 12 体製作した(表 1、写真 2)。広葉樹材が寺院等に使われる場合の柱断面は一般に意

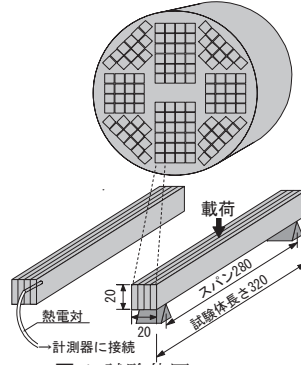


図 1 試験体図
(左図は温度測定用試験体)

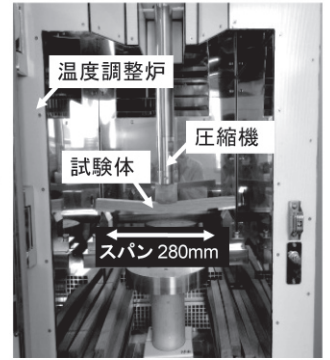


写真 1 温度調整炉付き圧縮試験機

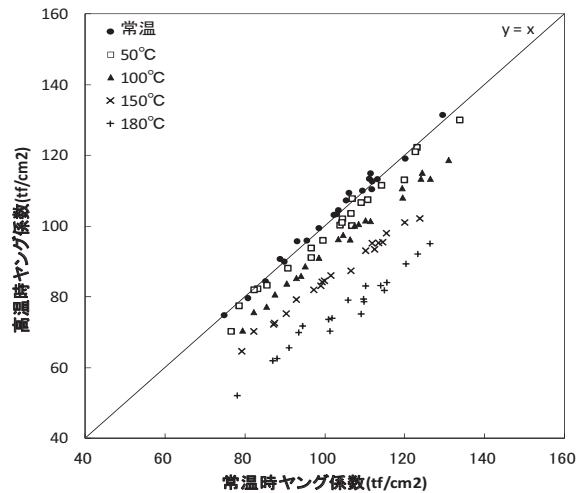


図 2 常温時と高温時のヤング係数の関係

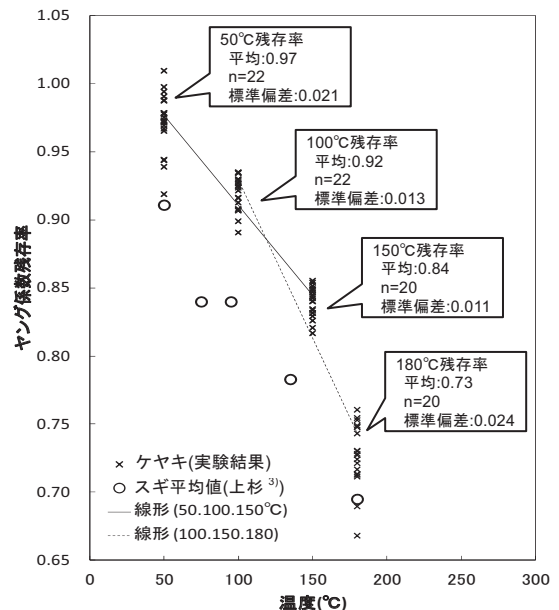


図 3 加熱温度とヤング係数残存率の関係

匠によって決められるため、試験体のうち丸柱は、大規模な寺院を想定した断面寸法とし、角柱は燃えしろ設計とした時の実用上、最小となる150mm角とした。割れは、製材特有の乾燥割れを想定し、試験体制作時に試験体 No.6, No.7 に人工的な割れ(幅1, 2, 3mm, 深さ30mm, 50mm)を設けたが、乾燥収縮により試験当日の人工的な割れの割れ幅は試験体作成時より大きくなっていった(表1)。乾燥収縮により、人工的な割れ以外の乾燥割れが生じている試験体もあったため、乾燥割れが特に大きかった試験体 No.2, 4, 5, 7 には埋木で割れをふさぐ処理を施してから試験を行った。また、加熱後の部材内部温度分布を把握するため、各試験体の上部木口面からK熱電対(φ0.65mm)を差し込み、試験体上部から265mm、端部から一定間隔の位置の温度を測定した(図4-1~4-4)。加熱実験は水平炉(平面2m×7m)に試験体4体を並べて(写真3)、計3回12体の実験を行った。

加熱時間は、想定する大規模建築が現行法令上、1時間の準耐火構造・燃えしろ設計に該当することを考慮して60分間とし、非荷重でISO834標準加熱曲線に沿って加熱した。加熱後は4試験体同時に脱炉・消火を行い、全試験体とも試験開始後63分程度で消火した。

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 炭化の一般性状

加熱試験後の各試験体の残存断面を図5-1~図5-12に、また、試験後の残存断面より算出した炭化速度(炭化深さ(mm)/60(分))を表1に示す。図中、黒く塗ったのは残存した炭化層である。試験体 No.1~5 は最大炭化部及び最小炭化部について、試験体 No.6, 7 は割れを入れた部分について、試験体 No.8~12 は角部分と辺部分それぞれの最大炭化部及び最小炭化部について炭化速度を算出した。以下に各要素が炭化性状に与える影響についての検証結果を示す。

(1) 樹種の影響

加熱中の炭化層の脱落は木材の防耐火性能に大きな影響を与えるが、スギは加熱中に炭化層の脱落が顕著に進んだ一方で、他の3樹

種はほぼ脱落していなかった。試験中に脱落せず加熱後に残存した炭化層(以下、「残存炭化層」という)の形状を比較したところ、ヒノキの残存炭化層は、加熱前断面より膨張している部分があり、炭化層間の亀裂が大きくあいていたが、ケヤキとクリの残存炭化層は収縮し、亀裂が細かく、炭化していない部分に堅く密着している様子だった。

また、ケヤキ、ヒノキ、スギの最大炭化速度を比較すると、大断面丸柱(試験体 No.1~3)は0.7~0.8mm/分となり、150mm角柱(試験体 No.9, 11, 12)の辺部分は、角柱のみ実施したクリを含め、0.6mm/分となった。角柱の中では、材料調達の関係で含水率が37.9%と高かったクリの残存断面がやや大きいですが、これらの樹種の炭化速度は同程度に評価して良いと考えられる。

(2) 炭化に対する断面形状・寸法の影響

丸柱は、割れがない限り、炭化は表面からほぼ一様に進むが、角柱では頂点付近で体積に対する表面積比が大きくなるため、炭化速度が局部的に大きくなり、150mm角では加熱後60分で残存断面がほぼ円形になっている。

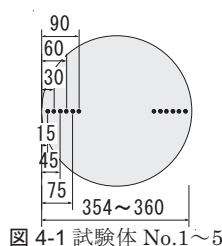


図4-1 試験体 No.1~5

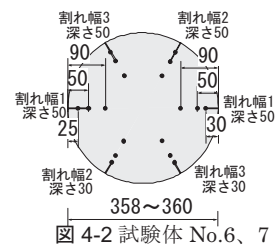


図4-2 試験体 No.6, 7
(割れ寸法は試験体作成時の寸法を示す)

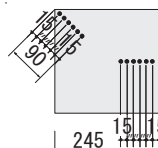


図4-3 試験体 No.8

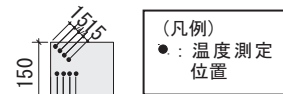


図4-4 試験体 No.9~12

表1 小型試験体の炭化速度一覧

試験体名	樹種	断面寸法	試験当日含水率(%)	試験当日の*		炭化深さ(mm)		炭化速度(mm/分)	
				割れ幅及び深さ、角または辺	最小炭化部	最大炭化部	最小炭化部	最大炭化部	
1	ケヤキ	φ354mm	13.7		40	46	0.7	0.8	
2	ヒノキ	φ360mm	14.4		32	47	0.5	0.8	
3	スギ	φ360mm	18.3		29	45	0.5	0.7	
4	ケヤキ	φ356mm	27.5		33	39	0.6	0.7	
5	ヒノキ	φ357mm	19.8		32	42	0.5	0.7	
6	ケヤキ	φ358mm	13.1	割れA 幅2.5、深さ50	44		0.7		
				割れB 幅2.5、深さ30	53		0.9		
				割れC 幅4.0、深さ50	54		0.9		
				割れD 幅4.0、深さ30	52		0.9		
				割れE 幅4.5、深さ50	59		1.0		
				割れF 幅4.0、深さ30	58		1.0		
7	ヒノキ	φ360mm	14.9	割れG 幅1.5、深さ50	47		0.8		
				割れH 幅2.0、深さ30	47		0.8		
				割れI 幅4.0、深さ50	53		0.9		
				割れJ 幅3.0、深さ30	47		0.8		
				割れK 幅4.5、深さ50	53		0.9		
				割れL 幅4.0、深さ30	52		0.9		
8	ケヤキ	245mm角	12.6	角	67	69	1.1	1.1	
				辺	35	46	0.6	0.8	
9	ケヤキ	150mm角	13.3	角	61	65	1.0	1.1	
				辺	32	38	0.5	0.6	
10	クリ	150mm角	37.9	角	53	58	0.9	1.0	
				辺	27	35	0.4	0.6	
11	ヒノキ	150mm角	14.1	角	67	73	1.1	1.2	
				辺	36	39	0.6	0.6	
12	スギ	150mm角	15.5	角	65	69	1.1	1.2	
				辺	34	39	0.6	0.6	

*a 割れ幅及び深さは試験当日に測定した数値を示す。

*b 最大炭化部は、大きな乾燥割れ部を除いた部分における最大炭化部を示す。

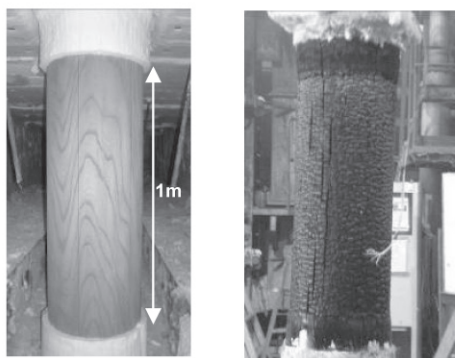


写真2 試験体 No.4(ケヤキ、φ356) 加熱前、加熱後の様子



写真3 水平炉内の様子

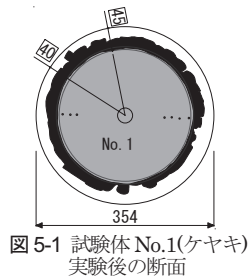


図 5-1 試験体 No.1(ケヤキ) 実験後の断面

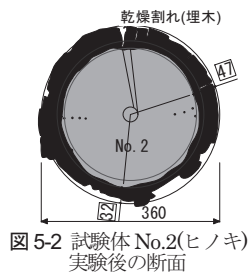


図 5-2 試験体 No.2(ヒノキ) 実験後の断面

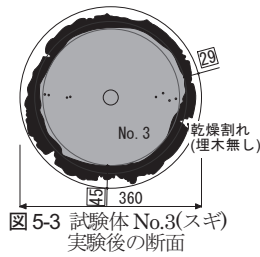


図 5-3 試験体 No.3(スギ) 実験後の断面

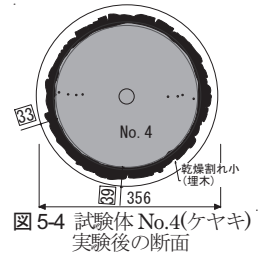


図 5-4 試験体 No.4(ケヤキ) 実験後の断面

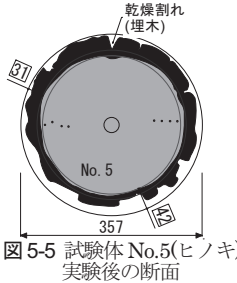


図 5-5 試験体 No.5(ヒノキ) 実験後の断面

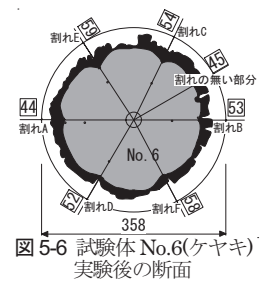


図 5-6 試験体 No.6(ケヤキ) 実験後の断面

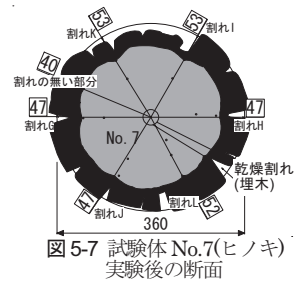


図 5-7 試験体 No.7(ヒノキ) 実験後の断面

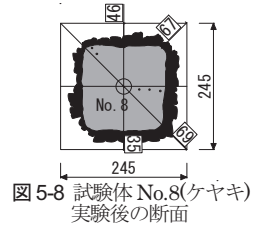


図 5-8 試験体 No.8(ケヤキ) 実験後の断面

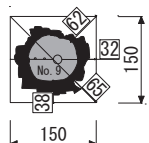


図 5-9 試験体 No.9(ケヤキ) 実験後の断面

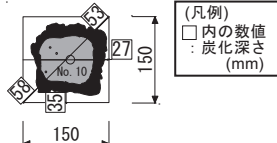


図 5-10 試験体 No.10(クリ) 実験後の断面

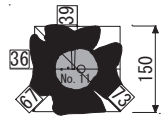


図 5-11 試験体 No.11(ヒノキ) 実験後の断面

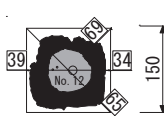


図 5-12 試験体 No.12(スギ) 実験後の断面

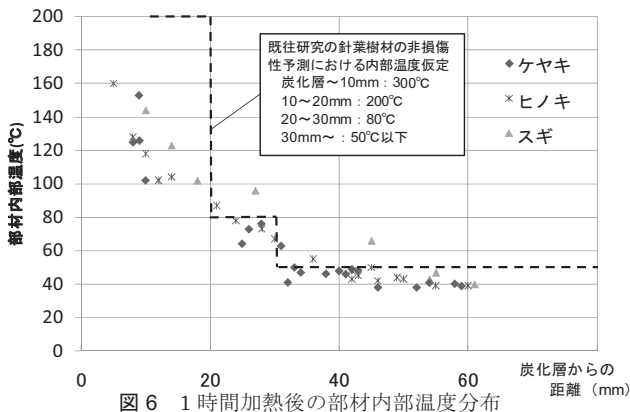


図 6 1 時間加熱後の部材内部温度分布

(3)炭化に対する割れの影響

試験体 No.6、No.7 の疑似割れ(幅 1.5~4.5mm、深さ 50mm 及び 30mm)による炭化速度の違いを比較すると、割れ幅が大きいくほど、炭化速度が大きく割れ幅 4.0mm 以上では最大 1.0 mm/分に達したが、割れ深さの影響はほとんど見られない。

割れ無し丸柱と割れ有り丸柱の実験後の断面を比較すると、割れを入れた試験体であっても、割れ部分以外の炭化深さは割れの無い試験体と同様 40mm 程度であることがわかる。大断面部材の場合、割れが部材全体の炭化性状に与える影響は少ないと考えられる(図 5-6、5-7)。

3.2.2 部材内部温度分布

丸柱(試験体 No.1~7)の残存断面内の熱電対について、炭化層からの距離と 1 時間加熱後の部材内部の温度の関係(以下、「内部温度分布」という)を図 6 に示す。

ケヤキとヒノキの内部温度分布には特記するような差は認められないが、スギは炭化層からの距離によっては、他 2 樹種に比べ 10°C 程度高温となる部分もあった。図 6 中、破線は針葉樹材の非損傷性予測²⁾で仮定されている内部温度分布である。本実験で得たケヤキの内部温度分布は、破線より下方もしくはその近傍に位置している。

4. ケヤキの実大柱載荷加熱実験と非損傷性予測可能性

ケヤキ材について、2.で把握したヤング係数の高温特性と 3.で把握した標準耐火加熱時の炭化・内部温度性状にもとづいて、任意の断面のケヤキ材柱の非損傷性を実用的に予測できるかを検討するために、3.の実験と同程度の断面をもつ長さ 3500mm のケヤキ丸柱を試験体として載荷加熱試験を行い、予測結果と比較した。なお、比較のためスギ集成材(同一等級構成構造用集成材 E65-F255)を用いた実験も行った。

前述のように、伝統的な寺院建築では柱断面は意匠的要請で決まるため、本実験では寺院の丸柱として一般的な断面寸法により建築基準法上の準耐火構造及び燃えしる設計の規定を満足し得るかどうかを確認できるように条件を設定のうえ、座屈時間を工学的に予測できるかどうかを検証する。

4.1 実験概要

載荷荷重及びヤング係数をパラメータとし、ケヤキ製材を用いた直径

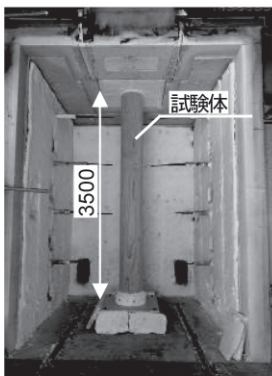


写真 4 加熱前試験体ウの様子

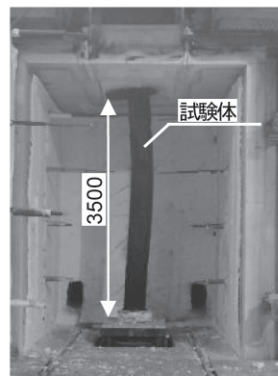


写真 5 加熱後試験体ウの様子

343mm、長さ 3500mm の試験体を計 3 体、またスギ集成材を用いた直径 330mm の試験体を 1 体製作した(表 2)。ケヤキの試験体の含水率は 23 ~30%と平衡含水率より高いが、ケヤキ大断面材は平衡含水率まで乾燥させるのが困難であり、実際に含水率が高いまま建築に使用されることが頻繁にあるため、今回はこの条件で実験を行った。なお、本実験の試験体イと 3.の小型試験体 No.4 は同一材から製作した(共材)。試験は柱炉を使用し、载荷して試験体が座屈するまで加熱を続けた(写真 4、5)。

4.2 载荷荷重の設定と座屈時間の予測

载荷加熱される木柱の非損傷性を既報の方法論⁵⁾で予測して、载荷荷重の設定と座屈時間の予測を行いたい。既報の方法では、炭化速度、木材内部の温度分布、ヤング係数残存率が、針葉樹材の実験データに基づいて設定されている。3.の実験では、炭化速度は、ケヤキでは擬似割れ部分や角部分を除けば、含水率や形状に違いがあっても 0.8mm/分を超えることはなかったため(表 1)、炭化速度は 0.8mm/分と仮定する。また、加熱時の部材内部温度分布及び高温時ヤング係数残存率は針葉樹材よりもやや安全側であるため、針葉樹材の非損傷性予測と同じ値を使用して非損傷性予測を行うこととした。集成材の試験体エについても同じ条件を適用した。

4.2.1 载荷荷重の設定

载荷荷重の検討を行うにあたり、まず本実験の試験体における 60 分加熱後の予想座屈荷重を算出した(表 2)。4 試験体とも算出した予想座屈荷重が、加熱前断面に対する長期許容荷重及び加熱後残存断面の短期許容荷重を上回ったため、性能評価の概念上、1 時間準耐火構造及び 1 時間加熱に対する燃えしろ設計時に必要な非損傷性が得られると予測できた^{注 3)}。なお実際の建築物の柱は構造設計上、加熱前断面に対する長期許容荷重を超える荷重を負担することはないため、試験体ア、イ、エには運用上想定される最大の荷重である、加熱前断面に対する長期許容荷重を载荷した。また、大型寺院建築では、一般に柱にかかる荷重が長期許容荷重の 1/2 を超えないことが多いため、その荷重条件での非損傷性を把握する目的で、試験体ウの载荷荷重は長期許容荷重の 5 割の荷重とした。

4.2.2 座屈時間の予測

载荷荷重を 60 分加熱後の予想座屈荷重より小さく設定したため、座屈時間は 60 分を超えると予想される。そこで、設定した载荷荷重に対して図 7 中の予想座屈荷重式を逆算し、試験体の座屈時の仮

定断面を算出して、各試験体の予想座屈時間を算出した。

内部温度は加熱時間が長いほど上昇するはずであるが、加熱が 1 時間を超えた場合の部材内部温度のデータが得られていない。しかし、この予測で使用した温度分布(図 6 中破線)は 1 時間加熱に対しては十分、危険側であり、残存断面で温度が上昇した深さも試験体の断面半径に対して十分小さく、加熱が 1 時間ある程度超えても十分な熱容量を維持できると判断して、ここでは、それをそのまま使用した。座屈時間は、試験体アは 74 分、試験体イは 79 分、試験体ウは 94 分、試験体エは 70 分と予測された(表 2)。

4.3 実験結果及び考察(表 2)

試験体アは加熱時間 82 分において、軸方向最大収縮速度が非損傷性の判定基準を超えたため実験を終了した。また試験体イは加熱時間 94.5 分、試験体ウは 111 分、試験体エは 78.5 分が経過した時点で軸方向の収縮が急激に進み、圧縮耐力が低下して、载荷が継続不可能となったため実験を終了した(表 2)。

平均炭化速度を小型試験体実験と比べると、スギ集成材は 0.8mm/分となり小型試験体実験のスギ、ヒノキとほぼ一致したが、ケヤキでは 0.5mm/分と小さくなった。この差を生じた原因は明らかではないが、考えられる原因の 1 つとして本実験のケヤキ試験体の

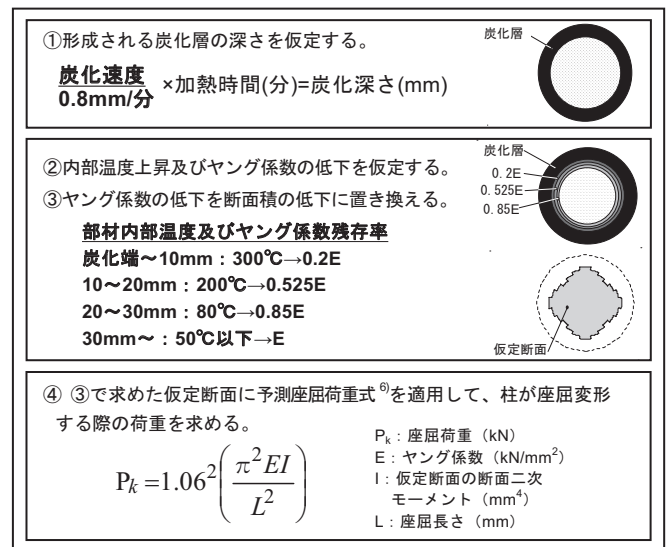


図 7 広葉樹柱材の非損傷性予測の手順

表 2 载荷加熱試験試験体・結果一覧

試験体名	試験体仕様		载荷荷重検討				予想座屈時間	実験終了時間	消火時間【A】	実験結果							
	樹種	断面寸法	含水率	*c ヤング係数 (t/cm ²)	*d 60分加熱後断面の短期許容荷重(kN)	*d 長期許容荷重(kN)				60分加熱後の予想座屈荷重(kN)	载荷荷重(kN)	軸方向最大収縮量(mm)		軸方向最大収縮速度(mm/分)		最大炭化深さ【B】	炭化速度(mm/分)【B÷A】
												実験値	*e 判定基準	実験値	*e 判定基準		
ア	ケヤキ	φ343 mm	30.4%	95	374	640	< 957	長期許容荷重 640	74分	<82分	87分	15.6	< 35	10.7 (82分)	> 10.5	47mm	0.5
1年8カ月			29.1%									20.3	< 35	8.6	< 10.5		
5年(小型試験体 No.4 と共材)			23%									18.9	< 35	5.2	< 10.5		
イ	スギ集成材	φ330 mm	23%	91	301	560	< 719	長期許容荷重 560	70分	<78.5分	80.5分	13.5	< 35	2.8	< 10.5	64mm	0.8
5年			13.7%									13.5	< 35	2.8	< 10.5		

*c: 試験体ア及びイは曲げ試験より算出する曲げヤング係数の値を記す。試験体ウは材料調達時の材長が短く、JIS Z2101 木材の曲げ試験方法に規定される材断面とスパンの条件を満たさなかったため、グレーディングヤング係数を記す。
 *d: 60 分加熱後断面(加熱前断面から 60mm の燃えしろを引いた断面)の短期許容荷重と長期許容荷重算出の際には、平成 12 年建設省告示第 1452 号第六に規定されたケヤキ無等級材の圧縮基準強度 21N/mm² 及び平成 20 年国土交通省告示第 117 号に規定された同一等級構成構造用集成材 E65-F255 の圧縮基準強度 20.6N/mm² を用いた。
 *e: 日本建築総合試験所 耐火性能試験・評価業務方法書に従い、非損傷性の判定基準を以下の通りとする。
 軸方向最大収縮量 ≤ h/100 または、軸方向最大収縮速度 ≤ 3h/1000

含水率が高いことが挙げられる。また、材材で含水率もほぼ等しい本実験の試験体イ(94.5分加熱)と小型試験体 No.4(60分加熱)の炭化深さの差がわずか8mmであったことから見て、ケヤキは加熱1時間以降、炭化が緩慢になり、それが原因で加熱時間が長い本実験の平均炭化速度が小さくなった可能性も考えられる。

ケヤキの試験体3体、スギ集成材の試験体1体とも実験終了時間は予想座屈時間を10~20%上回る結果となり、この程度の断面のケヤキ材については4.2で述べた予測手法を用いれば、非損傷性をやや余裕をもって設計できることがわかった。

また、本実験ではいずれも柱の座屈時間が1時間を超えたが、建築基準法の防耐火規定との関係でみると、試験体ア、イ、エは加熱前の断面に対する長期許容荷重を載荷したので、ケヤキ製材及びスギ集成材の大断面柱は、本実験における試験体の寸法で1時間準耐火構造の性能を有すること^{注3)}、また、試験体ア、イ、エの載荷荷重は、60分加熱後の断面に対する短期許容荷重も超えているため、1時間加熱に対する燃えしろ設計も適用できる見通しがあることがわかった^{注3)}。

5. 結論

大断面広葉樹(ケヤキ)材による大規模建築の防耐火性能を工学的に予測評価する見通しをつける目的で行った一連の実験により、以下の知見を得た。

- ①常温から180℃までの範囲では、ケヤキ材のヤング係数は高温で低下するが、その低下率は針葉樹材より小さい。
- ②大断面のケヤキ柱の炭化速度はスギ、ヒノキと同程度で、部材の大きな割れ部分(約3mm幅)を除き0.8mm/分とすれば、標準耐火加熱時の断面減少を危険側で予測できる。
- ③大断面のケヤキ丸柱の標準耐火加熱1時間後の部材内部温度分布は、針葉樹材とほぼ同様である。
- ④針葉樹材を対象に開発された非損傷性予測手法は、炭化速度を0.8mm/分と設定すれば、広葉樹材の炉内崩壊時間を10~20%、短め側で予測できる。
- ⑤寺院の丸柱として一般的な断面寸法の大断面広葉樹製材により、柱に関して、1時間準耐火構造の開発及び1時間の燃えしろ設計の適用の見通しが得られた^{注4)}。

なお、2.でケヤキの常温時ヤング係数のばらつきが大きい可能性に言及した。今後、ヤング係数等の基本的物性の影響因子の把握が望まれるが、ケヤキ大断面材の活用は、伝統的意匠の大規模建築物の軸組にほぼ限られるため、その構造性能・防耐火性能の信頼性を確立するには、必ずしも材料性能の均一化を志向する必要はなく、材個々にヤング係数を測定・表示し、設計で構造性能・防耐火性能を検証する等の方法も考えられる。

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、(財)ベターリビング・遊佐秀逸氏、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。

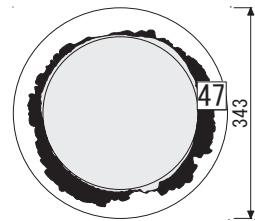


図8-1 試験体ア実験後の断面
下部から2450mm(ケヤキ 82分加熱)

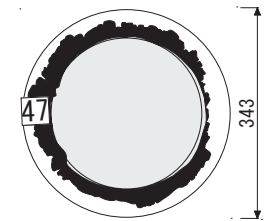


図8-2 試験体イ実験後の断面
下部から1750mm(ケヤキ 94.5分加熱)

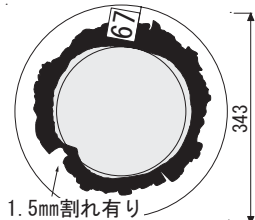


図8-3 試験体ウ実験後の断面
下部から2450mm(ケヤキ 111分加熱)

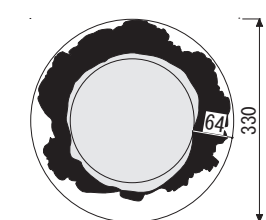


図8-4 試験体エ実験後の断面
下部から1750mm(スギ集成材 78.5分加熱)

注

注1)大規模木造建築物の柱及び梁の設計には、30分の燃えしろ設計を行う方法と1時間準耐火構造とする方法がある(建築基準法施行令第129条の2の3の1項)が、柱梁を1時間準耐火構造とする方法としては、1時間の燃えしろ設計か、1時間準耐火構造の大臣認定を取得した仕様を用いる方法が考えられる。つまり、燃えしろ設計ができれば躯体を木材処理とした大規模木造建築が可能となる。

燃えしろ設計は、告示(平成12年建設省告示1358号)で定められた柱梁の準耐火構造の設計方法で、当初は使用可能な木材はJAS(日本農林規格)の集成材に限られていたが、告示の改正(平成16年国土交通省告示333号)により、製材も利用可能になった。しかし、対象となったのは国土交通省告示で基準強度が定められているJASの針葉樹構造用製材のみであり、JAS構造用製材に位置付けられていない広葉樹材は、燃えしろ設計に利用することができないため、大規模木造建築への利用が困難な状況である。

注2)内部温度上昇によるヤング係数の低下を断面積の低減に置き換え、加熱後の断面性能及び予想座屈荷重を算出する手法。(図7参照)

注3)準耐火構造・燃えしろ設計の性能評価の考え方は次の通りである。

- ・準耐火構造:加熱前断面に対する長期許容荷重を載荷したとき、所定の時間加熱を受けても耐える構造。
- ・燃えしろ設計:加熱後断面(加熱前断面から燃えしろ寸法を引いた断面)に対する短期許容荷重を載荷したとき、所定の時間加熱を受けても耐える構造。

注4)本実験後、実際にケヤキ等の丸柱について1時間準耐火構造の認定(認定番号 QF060CN-0001)が取得されている。

参考文献

- 1) 村田健一: 伝統木造建築を読み解く, 学芸出版社, 2006.9
- 2) 中戸莞二: 新編木材工学, pp.140-144, 養賢堂, 1985
- 3) 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
- 4) 森林総合研究所監修: 木材工業ハンドブック改訂4版, 丸善, 2004.1
- 5) 安井昇・清水真理子・長谷見雄二・木村忠紀・田村佳英: 柱圧縮試験による木造土壁の火災加熱時の非損傷性予測と木造土壁の防火設計, 日本建築学会環境系論文集 第574号, pp.1-6, 2003.12
- 6) 澤野直直・長谷見雄二・安井昇・小川敦史・平井宏幸・木村忠紀・山本幸一: 伝統土壁構法間仕切壁の両面加熱時の防耐火性能, 日本建築学会環境系論文集 第635号, pp.1-7, 2009.1
- 7) 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

(2012年11月10日原稿受理, 2012年12月17日採用決定)