断面構成が異なる耐火集成材柱の燃焼特性

BURNING BEHAVIOUR ON FIRE- PREVENTIVE GLUED LAMINATED TIMBER OF SEVERAL COLUMNS

抱 憲誓 ——— * 1 西村光太 ——— * 2
宮本圭一 ——— * 3 服部順昭 ——— * 4
安藤恵介 ——— * 5 原田寿郎 ——— * 6
上川大輔 ——— * 7 宮林正幸 ——— * 8

Norichika KAKAE ——— * 1 Kouta NISHIMURA ——— * 2
Keiichi MIYAMOTO ——— * 3 Nobuaki HATTORI ——— * 4
Keisuke ANDOU ——— * 5 Toshiro HARADA ——— * 6
Daisuke KAMIKAWA ——— * 7 Masayuki MIYABAYASHI — * 8

キーワード：

耐火集成材, 柱, スギ, カラマツ, インサイジング処理, 燃焼性状, 耐火試験

Keywords:

Fire-preventive glued laminated timber, Column, Cedar, Larch, Incising treatment, Burning behaviour, Fire resistance test

The Japanese government is promoting use of wood in recent years, because of the environmental provision of carbon dioxide fixation. The authors developed “FR wood”. “FR wood” is the only technique with simply use one tree species in Japan. “FR wood” is built by three layers. The central member supports load, the second layer prevents a fire and the third layer is surface. A lot of experimental cases were conducted, and many temperature data or carbonization thickness data were accumulated. The measured maximum temperature depended on the thickness and the tree species of load supporting member.

1. はじめに

国内では、森林資源の有効活用や炭素固定化による CO₂ 削減などを目的として木材利用が促進されている。建築分野でも、内装材や構造体への木材利用が進んでいる。しかし、防火地域や準防火地域では、建物規模が大きくなると耐火構造が求められるため、可燃物である木材で耐火性能を実現する、様々な研究が行われている。木材周辺を石膏ボードなどの不燃材で覆ったり、熱容量が高い材料を配したりして温度上昇を抑制する対策が採られている^{1)~3)}。

筆者らは、1 時間耐火構造を目指して国産スギ材のみを利用した耐火集成材を開発し、大断面と小断面の2種類の部材で国土交通大臣認定を取得した⁴⁾⁵⁾。断面構成は図1に示すように、無処理の木材で構成した荷重支持部、火災からの火熱の侵入を防ぐ燃え止まり層、および化粧材からなる三層としている。これらにより、燃え止まり層に必要な仕様を把握できたことから、燃え止まり層の厚さを規定して、大断面部材から小断面部材の範囲のなかで荷重支持部を自由に設定することが可能となった。

断面を構成する三層のうち、荷重支持部である無処理のスギ集成材を加熱から守るため、第二層に燃え止まり層を配置する。燃え止まり層のスギのラミナには難燃薬剤を含浸させ、熱の侵入を遮り酸素を断つことで燃え止まりを実現する。難燃薬剤には、木材の難燃化処理剤として実績のある窒素リン酸系の薬剤を使用した。また、難燃薬剤をラミナ内に均一に含浸させるため、集成材を構成するラ

ミナには穴あけ処理（以降、インサイジング処理）を施した。最外層には、難燃薬剤流出を抑える目的と共に化粧材としての役割をするスギの無処理層を配置した。

本研究では、国土交通大臣認定を取得した断面を基本として、荷重支持部の大きさや燃え止まり層の厚さ、荷重支持部の樹種を因子とした耐火試験を実施し、保護すべき荷重支持部と燃え止まり層境界における温度性状や燃え止まり層の炭化性状の確認を行ったので報告する。

大断面 小断面 単位[mm]
図1 耐火集成材の概念図

¹⁾ 鹿島建設機技術研究所 主任研究員・博士（工学）
（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1）

²⁾ 鹿島建設機技術研究所 研究員

³⁾ 鹿島建設機技術研究所 上席研究員・博士（工学）

⁴⁾ 東京農工大学 名誉教授・博士（農学）

⁵⁾ 東京農工大学農学部 講師・博士（農学）

⁶⁾ 研森林総合研究所 四国支所長・博士（農学）

⁷⁾ 研森林総合研究所 主任研究員・博士（工学）

⁸⁾ (有)ティー・イー・コンサルティング 所長

¹⁾ Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

²⁾ Research Engineer, Kajima Technical Research Institute

³⁾ Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

⁴⁾ Emeritus Prof., Tokyo Univ. of Agriculture and Technology, Dr. Agr.

⁵⁾ Lecturer, Tokyo Univ. of Agriculture and Technology, Dr. Agr.

⁶⁾ President, Shikoku Research Center of Forestry & Forest Products Research Institute, Dr. Agr.

⁷⁾ Senior Researcher, Forestry & Forest Products Research Institute, Dr. Eng.

⁸⁾ President, T.E. Consulting Inc.

表 1 試験体の断面構成および試験条件

	試験体Ⅰ	試験体Ⅱ	試験体Ⅲ	試験体Ⅳ	試験体Ⅴ	試験体Ⅵ
断面寸法[mm]	350×700	300×600	260×290	220×220	240×240	240×240
荷重支持部寸法[mm]	210×530	180×480	120×120	120×120	120×120	120×120
荷重支持部樹種	スギ	スギ	スギ	カラマツ	スギ	カラマツ
燃え止まり層厚[mm]	60(巾)*, 75(積)*	50	60(巾)*, 75(積)*	40	50	50
化粧材厚[mm]	10	10	10	10	10	10
平均薬剤注入量[kg/m ³]	158	156	165	142	138	138
加熱範囲長[mm]	3000	3000	3000	1500	2000	2000
載荷軸力[kN]	635	434	40.9	0	0	0
試験場所	(一財) 建材試験センター			鹿島技術研究所		

*表中の(巾)は巾はぎ方向, (積)は積層方向を示す

2. 耐火試験

2.1 試験体

本研究では、6体の異なる試験体を製作し、耐火試験を実施した。各試験体の断面構成を表1に示す。試験体Ⅰおよび試験体Ⅲは国土交通大臣認定を取得した基本断面であり、荷重支持部（スギ、密度320～330kg/m³、含水率：9.3～12%）の寸法のみが異なる。また燃え止まり層厚（密度：480～510kg/m³、含水率：11.2～14.2%）は、図1に示したように厚い方向（積層方向）と薄い方向（巾はぎ方向）の2種類ある。これに対して試験体Ⅱと試験体Ⅴは、同じ荷重支持部樹種（スギ）で、荷重支持部寸法および燃え止まり層厚を基本断面から変更した。また、試験体Ⅳおよび試験体Ⅵはさらに荷重支持部樹種（カラマツ）および燃え止まり層厚を変更した。燃え止まり層には、窒素リン酸系の難燃薬剤を平均的に含浸するため、インサイジング処理を施したラミナを使用した。インサイジング処理では、各ラミナに孔径1.5mmの穴を貫通させた。各ラミナの接着には、レゾルシノール系樹脂接着剤を用いた。各燃え止まり層に含浸させた難燃処理薬剤の平均含浸量は、138～165kg/m³である。また温度計測用に、荷重支持部と燃え止まり層境界の隅角部および辺中央部（一般部）にK型熱電対（φ0.64）を設置した。図2に一例として試験体Ⅴの熱電対設置位置を示す。

図2 断面構成と熱電対設置位置（試験体Ⅴ，中断面）

2.2 試験条件

試験は、(一財) 建材試験センターの柱炉および鹿島技術研究所の兼用炉で実施した。ISO834 標準加熱曲線⁶⁾に従って1時間加熱し、加熱終了後炉内に11時間放置した。試験終了時に火気残存がないことを目視で確認した後、放水冷却した。後日、脱炉後に炭化層を除去し、切断した断面の炭化状況を確認した。試験体設置状況を図3および写真1に示す。鹿島技術研究所で実施した柱試験体は隔離800mmで設置したが、過去の試験において試験体間の相互放射の影響で燃

図3 試験体設置状況（(一財) 建材試験センター）

写真1 試験体設置状況（鹿島技術研究所）

焼が激しくなり正対面で温度上昇が大きくなることはなかった。また試験範囲外からの熱侵入・燃え込みを防ぐため、(一財) 建材試験センター試験体（試験体Ⅰ～試験体Ⅲ）では上下端の鋼板をセラミックファイバープランケットで、鹿島技術研究所試験体（試験体Ⅳ～試験体Ⅵ）では上下端を石こうボードとセラミックファイバープランケットで被覆した。

3. 試験結果

3.1 加熱温度履歴

炉内の温度履歴を図4に示す。試験体Ⅰと試験体Ⅲは同条件で2度の試験を行った。図より、ISO834 曲線に従って1時間の加熱が的確に行えているが、加熱後の冷却曲線は、試験炉によって異なっていることが分かる。すなわち、鹿島技術研究所の兼用炉（試験体Ⅳ～試験体Ⅵ）の方が建材試験センターの柱炉（試験体Ⅰ～試験体Ⅲ）

より冷却が早い。これは、炉内の容積に起因するものと考えられる。炉の容積が大きい場合、試験体と炉壁との距離が大きくなり、再放射の影響が小さくなるため温度が低くなると推測される。また同じ炉で実施した結果を比較すると、試験体Ⅰおよび試験体Ⅱに比べて試験体Ⅲの温度低下が遅いことが確認される。試験体Ⅲは、試験体Ⅰおよび試験体Ⅱに比べて荷重支持部の断面積が小さく、熱容量が小さいために全体的に温度低下が遅くなったと推測される。この現象は、各試験体の温度履歴と比較して後述する。

図4 炉内の温度履歴

3.2 試験体温度履歴

各試験体における温度履歴に関する結果を、図5～図10に示す。各図中の実線は荷重支持部と燃え止まり層境界における隅角部の温度、破線は一般部（辺中央部の境界測定点）の温度を示している。各図より、2方向からの加熱の影響を受ける隅角部の温度が、一般部に比べて高温となっている。また全ての試験体において、木材の炭化温度とされる260℃⁷⁾に到達することはなかった。

燃え止まり層厚が等しい試験体Ⅰ（図5）と試験体Ⅲ（図7）を比較すると、荷重支持部の断面積が大きい試験体Ⅰにおいて最高温度が低くなっている。試験体Ⅲでは隅角部において150℃に達しているのに対し、試験体Ⅰでは熱容量の関係で135℃となっている。断面寸法が等しい試験体Ⅴ（図9）と試験体Ⅵ（図10）では、若干試験体Ⅵの方が最高温度および全体的な温度が低くなっている。試験体Ⅵは荷重支持部の樹種がカラマツであり、荷重支持部がスギの試験体Ⅴに比べて熱容量の関係で有利となった。

一方、最小断面である試験体Ⅳ（図8）では、隅角部における最高温度が250℃に迫り、本耐火集成材の限界断面寸法であると推測される。荷重支持部がカラマツで、燃え止まり層厚が10mm厚い試験体Ⅵと比較すると、温度抑制効果が約100℃生じている。

図5 温度履歴（試験体Ⅰ）

図6 温度履歴（試験体Ⅱ）

図7 温度履歴（試験体Ⅲ）

図8 温度履歴（試験体Ⅳ）

図 9 温度履歴（試験体 V）

図 10 温度履歴（試験体 VI）

写真 2 脱炉前試験体（試験体 III）

写真 3 試験後断面（試験体 II）

3.3 炭化深さ

化粧材および難燃処理薬剤を含浸させた燃え止まり層は温度上昇に伴い炭化する。写真 2 に示すように、試験体表面には炭化層が形成され、写真 3 に示すように炭化層を削り取り、積層方向に対しては中央で、巾はぎ方向では各ラミナ毎に炭化深さを計測すると図 11 の結果が得られた。図より、燃え止まり層の厚さが薄いほど最大炭化深さが深くなっていることが確認される。また燃え止まり層厚が同じ条件で、熱容量が大きい場合（荷重支持部の断面が大きい、もしくは荷重支持部の樹種がカラマツ）には平均炭化深さが浅くなる傾向となった。この傾向は、図 5～図 10 に示した温度履歴と同様であり、温度に対応して燃え止まり層が炭化していることが確認された。また、長方形断面における短辺と長辺に明確な差異はなかった。

図 11 燃え止まり層の炭化深さ

4. 考察

試験結果より、燃え止まり層が厚くなると荷重支持部および燃え止まり層境界部の温度が低くなるとともに、炭化深さも浅くなった。燃え止まり層厚と温度性状の相互関係を確認するために、各試験で得られた最高温度と、燃え止まり層厚との関係を考察する。各距離を図 12 に示すように定義する。図 5～図 10 に示したように、加熱の影響で隅角部の温度は一般部より高温となっている。そこで、隅角部の代表長さとして、燃え止まり層の隅角から荷重支持部隅角までの距離を D_1 、一般部の代表長さとして、短辺および長辺の燃え止まり層厚を D_2 、 D_3 とする。ただし、化粧層厚は 10mm に限られる。

図 12 各変数の定義

4.1 隅角部

図 13 に隅角部における距離 D_1 と各試験における最高温度の関係を示す。全体的な傾向は、 $D_1=60$ mm 付近を境として大きく変化した。

D_1 が60mmより大きい場合には最高温度が約150℃以下であるのに対し、60mmより小さい場合には急激に最高温度が高くなり250℃程度となった。

$D_1=95\text{mm}$ の試験体Ⅰと試験体Ⅲを比較すると、燃え止まり層および荷重支持部の樹種が同じで、荷重支持部の断面積が大きく熱容量が大きい試験体Ⅰの方が最高温度は低くなった。 $D_1=70\text{mm}$ の試験体Ⅴ（荷重支持部スギ）と試験体Ⅵ（荷重支持部カラマツ）を比較すると、断面寸法が同じであるがカラマツは熱容量が大きいため、試験体Ⅵの方が最高温度は低くなった。また、燃え止まり層厚および荷重支持部の樹種が同じで荷重支持部の断面積が大きい試験体Ⅱは、試験体Ⅴに比べて最高温度は低くなっている。

4.2 一般部

一般部における距離 D_2 、 D_3 と最高温度の関係を図14に示す。図13と図14を比較すると、加熱の影響が主に一方になる一般部の最高温度の方が、隅角部に比べて全体的に低くなった。また、長方形断面の場合には、燃え止まり層が厚い（ D_3 ）ほど最高温度が低くなっている。また、 D_1 に比べて D_2 、 D_3 に対する最高温度の距離依存性は緩やかである。正方形断面の試験体Ⅳ～試験体Ⅵでは、燃え止まり層厚が等しいため、20℃弱のバラツキ幅の中に各試験結果が収まっている。荷重支持部の樹種が異なる試験体Ⅴと試験体Ⅵを比較すると、試験体Ⅵの方が最高温度は低くなった。隅角部と同様に、熱容量の大きいカラマツが荷重支持部の試験体は、炭化深さが浅く安全側の結果を示すことが確認された。

4.3 炭化深さ

図15および図16に、巾はぎ方向ではラミナ毎で、積層方向では面中央で計測した炭化深さの分布を示す。図より、局所的に炭化しやすいもしくは炭化しにくいラミナはあるものの、全体的には平均値付近にまとまっている。これは、ラミナ内部における難燃処理薬剤の含浸分布に依存していると推測される。天然素材でもともとバラツキの大きい木材に対して、インサイジング処理を施して難燃処理薬剤を含浸させる手法を用いることでバラツキ幅を制御することができたと考えられる。また断面が大きい試験体Ⅰ（図15）と小さい試験体Ⅲ（図16）を比較すると、全体的な傾向に差はないものの、熱容量に起因して小断面の方が炭化深さは深い。以上より、以降では炭化深さの平均値を代表値として試験体の炭化深さの傾向を考察する。

図13 D_1 と最高温度の関係（隅角部）

図14 D_2 、 D_3 と最高温度の関係（一般部）

図15 炭化深さの分布（試験体Ⅰ）

図16 炭化深さの分布（試験体Ⅲ）

荷重支持部と燃え止まり層境界部における計測点全体の平均温度と平均炭化深さの関係を図17に示す。全体的な傾向としては、平均温度の増加に伴い平均炭化深さも増大していることが確認される。燃え止まり層厚毎にデータを見ると、燃え止まり層が40mm（化粧材含めて50mm）では燃え止まり層の炭化深さが30mmを超えて平均温度が約200℃まで上昇している。この関係からも、燃え止まり層40mmは荷重支持部が炭化しない最低に近い厚さであると考えられる。木材自身が有する密度等のバラツキや難燃処理薬剤の注入ムラを考慮すると、本耐火集成材では荷重支持部の外側に燃え止まり層が40mm（化粧材含めて50mm）に安全率を見た被覆層が必要であると考えられる。

燃え止まり層 50mm では、平均温度が約 130℃で燃え止まり層の平均炭化深さも約 20mm となり、燃え止まり層 40mm に比べて約 10mm 炭化深さが浅くなった。一方、試験体Ⅰおよび試験体Ⅲでは、燃え止まり層が 60mm および 75mm と厚いにもかかわらず、炭化深さが 25mm ～30mm と燃え止まり層 50mm に比べて深くなった。この原因は、加熱停止後の炉内の温度低下が関係していると推測される。図 5 に示したように、試験体Ⅲの加熱停止後の炉内温度は、他の試験体に比べて温度低下が緩やかとなった。このため、試験体Ⅲでは熱分解が継続し、炭化深さが深くなったと推測される。また、図 6～図 11 に示したように、最高温度に到達した後、荷重支持部と燃え止まり層の境界部温度は、試験体Ⅲで温度低下が緩やかになっていることから加熱停止後の炉内の温度低下が影響を与えていることが裏付けられる。

断面の仕様もさることながら、加熱停止後の炉内温度の低下勾配も、燃え止まり性状に影響を及ぼす可能性が確認された。

図 17 平均温度と平均炭化深さの関係

5. まとめ

1 時間耐火構造を目指した様々な断面構成の耐火集成材柱で耐火試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 燃え止まり層厚が同じで荷重支持部寸法が異なる断面（試験体Ⅰと試験体Ⅲ）、および断面寸法が同じで荷重支持部の樹種が異なる断面（試験体Ⅴと試験体Ⅵ）の結果から、荷重支持部と燃え止まり層境界部における温度は熱容量が大きいほど低くなった。
- (2) 化粧層厚が 10mm である場合、最も熱的に厳しい隅角部では、隅角部からの距離 60mm を下回ると急激に温度が上昇した。また隅角部からの距離を変数とすることで、温度上昇の傾向を確認することができた。一般部においては、燃え止まり層厚 40mm でも最高温度が 150℃程度にとどまった。
- (3) 炭化深さは、平均値の周辺でピークを有する左右対称な分布形状となる。ラミナ内部における難燃処理薬剤の含浸分布に依存していると推測されるが、天然素材でもともとバラツキの大きい木材に対して、インサイジング処理を施して難燃処理薬剤を含浸させる手法を用いることでバラツキ幅を制御することができ、本手法の有効性が確認できた。
- (4) 荷重支持部と燃え止まり層境界部における計測点全体の平均温度と平均炭化深さの関係を確認した。開発した耐火集成材では、燃え止まり層 40mm は荷重支持部が炭化しない最低に近い厚さとなった。
- (5) 燃え止まり性状には、寸法や樹種といった断面仕様の他に、加熱停止後の炉内温度の低下曲線も影響した。

参考文献

- 1) 大橋宏和、長岡 勉、永盛洋樹、高橋 弘、山本正人、杉田敬太郎、遊佐秀逸、大宮喜文、山田 誠、齋藤 潔：耐火木造部材の荷重支持部の木材密度が耐火性能に与える影響、日本建築学会技術報告集、第 21 巻、第 47 号、pp. 151～156、2015. 2
- 2) 浅野天仁、松岡祐一、染谷朝幸、永山浩三：ホウ素系薬剤処理 LVL を用いた木質系 2 時間耐火部材の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp. 129～130、2013
- 3) 景山悠太郎、長谷見雄二、夫馬康仁、原田浩司、飯島泰男、板垣直行、常世田昌寿：スギ間伐材を主材料とする木現し耐火構造部材の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp. 107～108、2010
- 4) 抱 憲誓、宮本圭一、西村光太、服部順昭、安藤恵介、石垣弘之、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、大内富夫：耐火集成材の開発（その 6）ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材柱の載荷加熱実験、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp. 321～322、2009
- 5) 抱 憲誓、宮本圭一、西村光太、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸：耐火集成材の開発（その 16）小断面スギ耐火集成材柱の載荷加熱実験および大断面部材との比較、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp. 359～360、2012
- 6) ISO834, Fire-resistance-tests, Elements of building construction, 1999
- 7) 日本建築学会：建築物の火災荷重および設計火災性状指針（案）、pp. 158、2013

[2016 年 2 月 1 日原稿受理 2016 年 4 月 4 日採用決定]