

東京理科大学「火災安全科学研究拠点」 研究成果概要報告書

研究課題		木造建築の高層化に向けた木質耐火構造 部材の高度化と断面制御の両立	実施年度 2022年度
研究代表者	所属	早稲田大学 理工学術院・専任講師	
	氏名	伯耆原智世	
	問合せ先メールアドレス	hokibara@waseda.jp	
共同研究者	氏名・所属・職	<small>あかまゆうと</small> 赤間悠斗・早稲田大学・修士課程 <small>きむらひろかつ</small> 木村熙克・早稲田大学・修士課程 <small>なかしまゆうすけ</small> 中島勇佑・早稲田大学・修士課程 <small>すずきそうま</small> 鈴木聡馬・早稲田大学・修士課程 <small>せきねかつと</small> 關根勝人・早稲田大学・修士課程 <small>やまもとめい</small> 山本芽依・早稲田大学・修士課程 <small>みかみしょうや</small> 三上翔也・早稲田大学・修士課程	
受入担当責任者	氏名	松山 賢 教授	

1. 研究の背景および目的

本研究は、高層建築全体を木造で成立させるのに必要な耐火性能の高度化と、それに伴って肥大化する部材断面寸法の制御を両立させて、部材断面の構成や材料を、建築計画やコストに合わせて自在に選択可能にすることを目的とした基礎研究である。木質耐火部材は、高層化に伴い高い耐火性能が必要になるが、その設計手法は、力学的に必要な荷重支持部材の周りに、高い耐火性能ほど厚い被覆層を設けて部材断面を肥大させ、性能を確保するものである。一方で、部材断面が肥大化すると、部材自重が大きくなることで構造寸法も肥大化する構造的悪循環、可燃物が多くなることによる耐火上不利、更に、階によって要求される耐火時間が異なることから部材の断面寸法が階によって大きく異なるという建築計画上の制約が課題となる。

そこで本研究では、部材内の適材適所で樹種や材料等を変化させることで、部材断面の過大化や、階によって断面が大きく異なるなどの制約が生じないようにし、鉄骨造等で培われてきた計画手法が生かせるような木造設計手法を提示したい。従前では1, 2時間耐火性能を達成する設計法の延長線上で長時間耐火性能化が考えられているが、本研究では2時間耐火構造部材程度の被覆層厚さで、3時間耐火性能を確保する被覆層の部材構成を明らかにすることを目指す。

2. 利用施設及び利用日

- ・ 多目的水平載荷加熱試験装置 (2022年11月21日～23日)

3. 実験方法・研究成果、および考察 (申請時の計画に対する達成度合いも含む)

※継続課題の場合は、前年度との関係性、進展度合いについても記載すること。

本実験では、3時間耐火性能に必要な部材構成を把握するために、燃え止まり層の難燃処理スギの薬剤固定量をパラメータとして木質梁の実大試験体を2体設計し、非載荷耐火加熱実験を行った。

3. 1 実験概要

実験は、東京理科大学研究推進機構総合研究院・火災科学研究所の多目的水平載荷加熱試験装置を用いた。実験条件はISO834標準加熱曲線に準拠して、3時間加熱を行った後、炉内で21時間自然放冷した。図1に耐火炉の概略図を示す。両仕様とも非載荷とし、耐火試験のみを行った。また、梁の木口側からの燃え込みを防ぐため、試験体端部を無機系材料で被覆した。

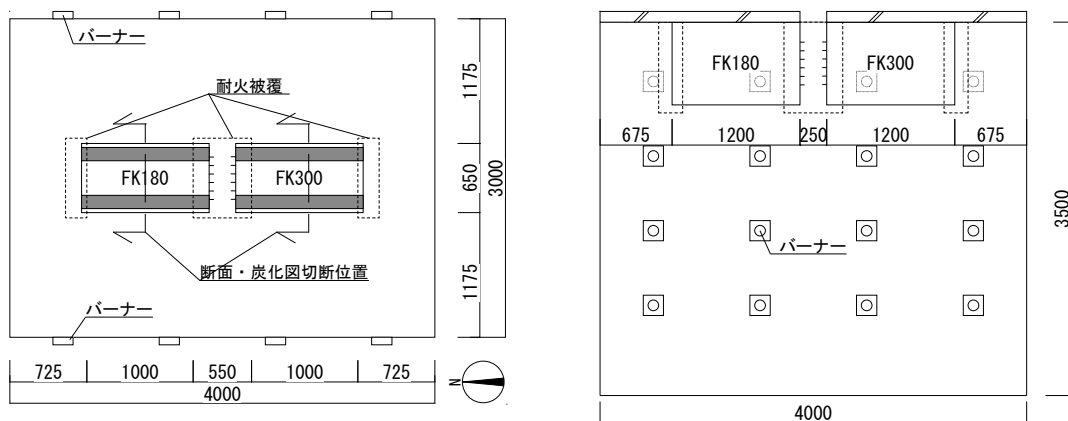


図1 実大耐火炉概略図[mm] (左:平面図,右:断面図)

3. 2 試験体設計

表1、図2に試験体仕様を示す。両仕様とも長さ1200mm、梁断面650mm×783mm(荷重支持部:340×600[mm])の木質耐火構造梁である。既報¹⁾²⁾と同様、加熱面から燃えしろ層、燃え止まり層、荷重支持部の3層で構成し、レゾルシノール樹脂系接着剤で積層接着した。燃えしろ層は小型試験体より性能を再確認し、要求耐火時間以下の火災加熱時にも性能が担保されるスギ25mm厚とした。燃え止まり層は既報²⁾で3時間耐火性能の確保の見通しが立った目標薬剤量180,300kg/m³の薬剤注入スギ2種類とし、薬剤量に依る耐火性能への影響を把握した。また、実大部材での3時間耐火性能の確保を目的とし、確実に燃え止まりに至るよう、実大実験による入熱量の増加を想定し、側部の燃え止まり層厚さを130mmとした。また、隅角部では2方向から加熱を受けるため、燃え進みが激しいと想定し、燃え止まり層底部のラミナを1層分(28mm)増やし、158mmとした。荷重支持部は対称異等級構

成構造用集成材で強度等級 E105-F300 のカラマツ材を使用し、部材断面は 340×600[mm] とした。3 時間耐火性能が要求される 15 階建て以上の事務所ビルを想定し、長期荷重を積載荷重 2900N/m²、梁スパン 9m、負担幅 4m として許容応力計算した。試験体名は、実大スケール(F) 荷重支持部樹種(K: カラマツ)- 目標薬剤注入量[kg/m³]で表記する。試験体より切出した基材から絶乾法で含水率を、溶脱法³⁾で難燃処理木材のラミナごとの薬剤固定量を測定した。

3. 3 測定項目

図 2 に内部温度測定位置を示す。炉内温度を K 型シーブ熱電対(φ2.5mm)、試験体内部温度を原則加熱表面から深さ 28mm 間隔で、梁長さ方向の中央部にて K 型ガラス被覆熱電対(φ0.32mm)により計測した。また、脱炉時に目視にて赤熱燃焼継続の有無を確認し、炭化状況の記録、深さ 71~99mm ラミナの炭化層の秤量を行った。

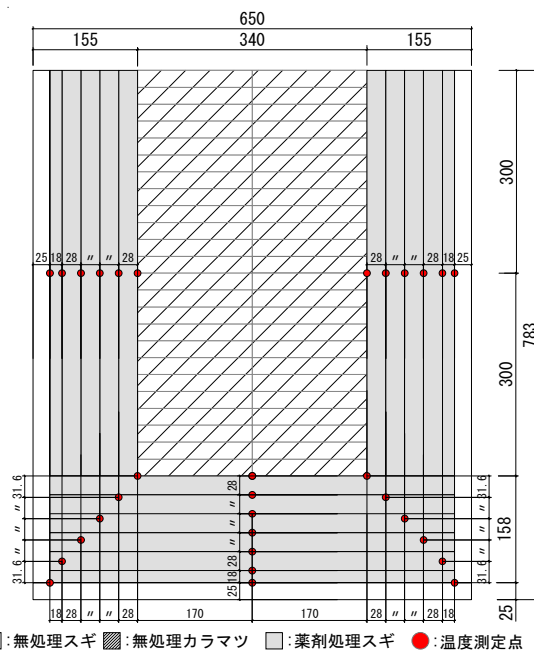


図 2 試験体断面構成と内部温度測定点

表 1 試験体断面構成と内部温度測定点

仕様名		FK300	FK180
燃えしり層	樹種	スギ集成材 25mm	
	含水率[%] ^{*1}	11.1	11.1
燃え止まり層	樹種	スギ集成材	
	厚さ 側部/底部	130mm/158mm	
	目標薬剤固定量	300kg/m ³	180kg/m ³
荷重支持部	含水率[%] ^{*1}	10.4	12.6
	構成	カラマツ対象異等級構成構造用集成材 E105-300 (ラミナ厚25mm)	
含水率[%] ^{*1}		13.0	13.3
	断面構成と薬剤固定量 ^{*2} [kg/m ³]		
【部位平均】			

*1 絶乾法により、ラミナ単位で計測した値の平均値 *2 溶脱法により、ラミナ単位で計算した値の平均値

3. 4 実験結果

表 2 に脱炉時の炭化状況と燃え止まりの結果、表 3 に燃え止まり層内の加熱時間毎による炭化深さと炭化速度を示す。両仕様ともに脱炉時に燃焼継続は確認されず、荷重支持部まで炭化進行がなかったため、燃え止まったと判定した。隅角部の炭化深さは、水平及び垂直方向からの炭化深さで表す。また、図 3,4 に各試験体の炉内温度と内部温度推移を示す。なお、試験開始 5~7 時間と 13 時間半以降は、熱電対付近の被覆脱落によるデータ欠落のため、試験体内部温度は、試験開始 13 時間までの推移を示した。

(1) 3 時間耐火性能を確保する燃え止まり層構成

表 2 より、燃えしろ層を無処理スギ 25mm 厚とし、燃え止まり層を薬剤固定量 112.0~328.7 kg/m³ の薬剤処理スギ 100mm 厚以上とすれば、3 時間耐火性能を確保できる見通しを得た。特に、二方向加熱を受ける隅角部において、FK300 で試験体底面から最大 134mm、FK180 で最大 156mm と最も炭化が進んだことから、既報¹⁾同様、側面の必要燃え止まり層厚に対し、底面をラミナ 1 層分厚くする設計は、有効であると考えられる。

(2) 薬剤固定量が加熱中の炭化深さに与える影響

表 3 より、側面と底面の加熱中の炭化速度は両仕様とも 0.43~0.49mm/min 程度で薬剤量による差は小さかった。隅角部では、両仕様で、側面からは 0.41~0.46mm/min、底面からは 0.47~0.52mm/min となった。薬剤固定量によらず、底面の方が側面より炭化速度が大きくなったことから、隅角部においても薬剤量による差は小さいといえる。また、両仕様間で平均薬剤固定量の差が 134.6kg/m³ と最も大きい底面では、炭化速度の差が 0.02~0.03mm/min と小さい。以上から、燃え止まり層の薬剤固定量が 112.0~328.7kg/m³ の範囲で、薬剤固定量の加熱中における炭化深さへの影響は小さいと考えられる。これより、加熱中に炭化する範囲において、FK180 の平均薬剤固定量 153.2kg/m³ 以下で難燃処理スギの加熱中における炭

化抑制効果が最大となる最適値が存在する可能性がある。

一方で、隅角部において、底面方向は側面方向よりも炭化速度が約 0.06 mm/min 大きく、炭化深さにおいても 20mm 程度大きく炭化が進行している。よって、実火災加熱中において、隅角部

表 2 実験結果一覧

試験体	FK300	FK180
目標薬剤注入量	300kg/m ³	180kg/m ³
平均薬剤固定量※1	270.3kg/m ³	153.2kg/m ³
炭化状況 (脱炉時)		
燃え止まり判定※2	○	○

では側面よりも底面の方が加熱を強く受けやすいことが分かる。これは、隅角部において、底面の加熱表面付近に形成され被覆の役割をしていた炭化層が、加熱中に剥落したことで、炭化が促進された可能性がある。また、一方向加熱を受ける木質梁全体の底面と比べて、隅角部は二方向で加熱を受けるため、隅角部付近の底面の方が、炭化層が剥離しやすいと考えられる。

(3) 薬剤固定量が放冷時の炭化深さに与える影響

表 3 より、放冷時の炭化深さは、FK300 は西側面,東側面,底面でそれぞれ 20.6, 5.4, 14.3mm、FK180 は西側面,東側面,底面で 20.6, 10.0, 18.6mm であり、薬剤量の多い FK300 の方が、放冷時の炭化進行を抑制する傾向にあった。図 3,4 より、両仕様の側面と底面において、最も炭化進行が大きかった西側面の内部温度について、放冷中に炭化した深さ 99mm では、最高温度が FK180 より FK300 の方が 50℃以上高いのに対し、放冷中の炭化深さが同程度であったことから、薬剤固定量の多さが、温度低下を促進したと考えられる。このことから、難燃処理スギを用いた木質耐火梁において、放冷時に炭化すると想定される燃え止まり層内の深さ約 71~99mm 以深は、薬剤固定量が炭化進行に影響を与えるため、難燃性能を高くすることが効果的と考えられる。一方、表 3 より、隅角部における放冷時の炭化深さは、FK300 は側面方向,底面方向でそれぞれ最大 24.2mm,17.8mm で、FK180 は側面方向,底面方向でそれぞれ最大 37.6mm,40.5mm となり、薬剤固定量 100kg/m³程度の増加で炭化が 18mm 程度抑制された。また、図 1,2 より、隅角部の内部温度は他の部位と比べて、加熱中は温度上昇が大きく、放冷時は温度低下が小さかった。これは既報¹⁾と同様に、隅角部は二方向で加熱を受けているため、他の部位より入熱量が大きく、かつ放冷中に隅角部の炭化層が、矩形から円形に近づくにつれて炭化層の外表面積が小さくなり、温度低下し難いと考えられる。そのため、隅角部では、薬剤量を増加させることが耐火性能の向上に効果的であるといえる。FK300 では、放冷時の炭化は側面および、底面と同程度であるため、平均薬剤固定量を 270.3kg/m³ 確保することで、側面と底面を同構成で 3 時間耐火性能を確保できる見通しが得られた。

表 3 炭化深さ及び炭化速度一覧

試験体名	部位	平均薬剤 固定量※1 [kg/m ³]	炭化深さ [mm]※3				炭化速度 [mm/min]		放冷中の 炭化深さ [mm]	
			1時間	2時間	3時間	脱炉時	1-2時間	2-3時間		
FK300	西側面	272.4	42.6	68.5	95.4	116	0.43	0.45	20.6	
	東側面	262.3	42.3	68.7	95.6	101	0.44	0.45	5.4	
	底面	279.8	40.9	68.2	95.7	110	0.45	0.46	14.3	
	西隅角部	側面から	267.4	42.1	68.7	95.4	112	0.44	0.45	16.6
		底面から		55.1	85.6	115.7	127	0.51	0.50	11.3
	東隅角部	側面から	250.5	41.9	68.6	95.8	120	0.44	0.45	24.2
		底面から		54.7	85.5	116.2	134	0.51	0.51	17.8
FK180	西側面	161.7	41.7	69.2	97.4	118	0.46	0.47	20.6	
	東側面	155.0	42.4	69.6	96.0	106	0.45	0.44	10.0	
	底面	145.2	39.7	68.2	97.4	116	0.47	0.49	18.6	
	西隅角部	側面から	145.3	42.8	67.6	93.4	131	0.41	0.43	37.6
		底面から		56.3	84.4	113.5	154	0.47	0.48	40.5
	東隅角部	側面から	143.3	41.3	67.3	95.2	129	0.43	0.46	33.8
		底面から		53.6	84.0	115.5	156	0.51	0.52	40.5

※1溶脱法²⁾により、ラミナ単位で計測した値の平均値。

※2○：試験終了後、赤熱燃焼が停止、×：試験終了後、赤熱燃焼が継続。

※3炭化深さは、内部温度の線形補間により算出。炭化温度は、無処理材は260℃、難燃材は195℃³⁾とした。

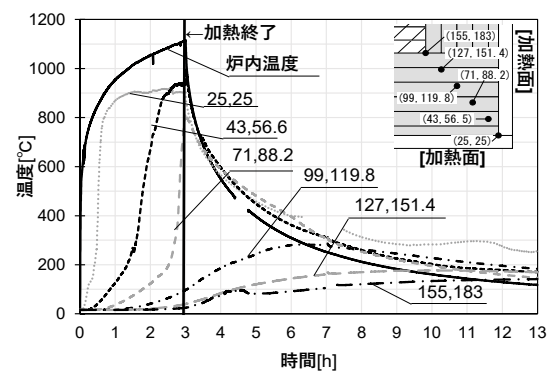
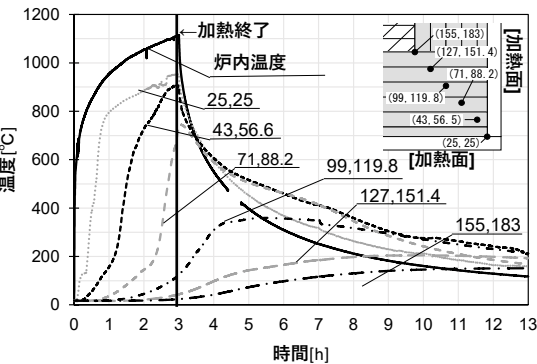
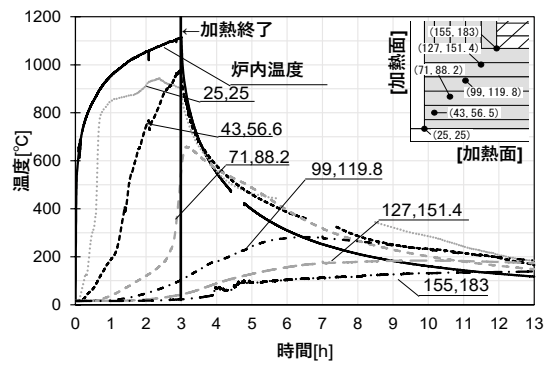
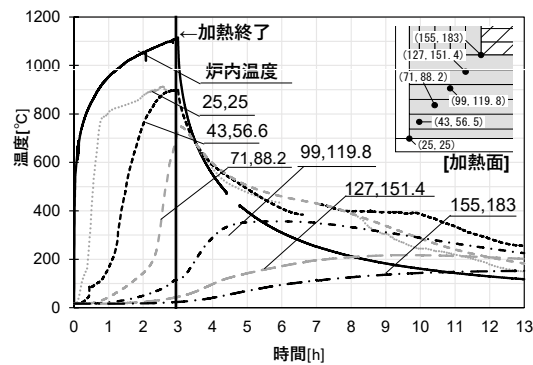
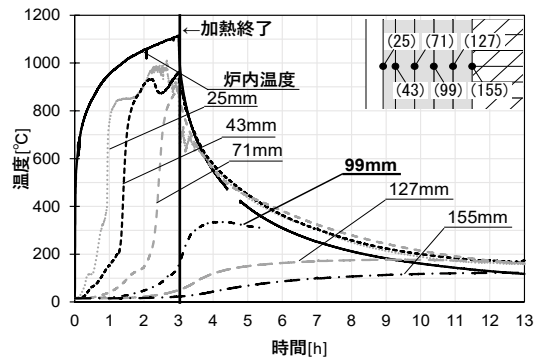
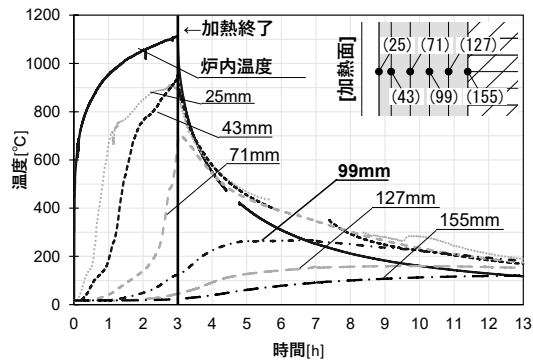


図3 FK180の内部温度推移
(左:西側面,中:西隅角部,右:東隅角部)

図4 FK300の内部温度推移
(左:西側面,中:西隅角部,右:東隅角部)

【参考文献】

- 1) 伯耆原智世他, 「木造高層化に向けた耐火性能の高度化と断面制御の両立における基礎研究(その1)3時間耐火性能を担保する燃え止まり型木質耐火構造部材の断面構成の検討」 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp177-178, 2022.7
- 2) 赤間悠斗他, 「木造高層化に向けた耐火性能の高度化と断面制御の両立における基礎研究(その2)3時間耐火性能を確保した燃え止まり層断面構成の効率化」 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.179-180, 2022.7
- 3) 上川大輔, 「難燃薬剤処理木材の溶脱法による薬剤固形成分量の計測手法に関する研究」 木材保存 39-2, 2013.9

4. 今後の展望（今後の発展性、見込み等についても記述）

以上の実験結果から、難燃処理スギを用いた燃え止まり型木質耐火構造梁を模した 3 時間実大梁耐火加熱実験を行い、燃えしろ層無処理スギ 25mm 厚とし、燃え止まり層を薬剤固定量 112.0~328.7 kg/m³ の薬剤処理スギ 100mm 厚以上とすれば、3 時間耐火性能を確保できる見通しを得た。また、実験結果から燃え止まり層浅部を薬剤量低減すれば、放冷中に燃え止まり層深部における赤熱燃焼の進行を抑制できる可能性があり、被覆層の軽量化に寄与する手法の一つとなり得る。今後、被覆層構成の効率化に向け、加熱中の炭化抑制と放冷中の赤熱燃焼の抑制を両立する燃え止まり層の薬剤量構成の把握が期待される。

5. 成果の公表状況（学会への発表、学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

[1] 赤間悠斗, 渡辺康輝, 三上翔也, 伯耆原智世, 松山賢, 高瀬 椋, 上川大輔: 木造高層化に向けた燃え止まり型木質耐火構造部材の耐火性能の高度化と断面制御の両立(その 3) 3 時間耐火性能を担保する実大木造梁の断面構成の検討 -実験計画・方法-, 日本建築学会学術講演発表会, 2023. 9(発表予定)

[2] 三上翔也, 赤間悠斗, 渡辺康輝, 伯耆原智世, 松山賢, 高瀬 椋, 上川大輔: 木造高層化に向けた燃え止まり型木質耐火構造部材の耐火性能の高度化と断面制御の両立(その 4) 3 時間耐火性能を担保する実大木造梁の断面構成の検討 -実験結果・考察-, 日本建築学会学術講演発表会, 2023. 9(発表予定)

6. 経費の使用状況

消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事 項	金額(円)	事 項	金額(円)	事 項	金額(円)
3 時間耐火構造梁試験体製作・実験補助	1,430,000	旅費・宿泊費	28,424		
ラッピングワイヤ	41,120				
小計	1,471,120	小計	28,424	小計	
東京理科大学 負担分 総計			1,499,544 円		

上記以外 早稲田大学 負担分 総計 2,379,036 円

以上

※ページは適宜増やしてください。

※上記 5 に記載された成果公表については、別刷 1 部をご提出願います。PDF ファイル等の電子データでも構いません。

- ※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告として Web 等で公開されることをお含み置き下さい。
- ※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。(フォーマットは問いません。)
- ※後日開催予定の成果発表会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。