伝統軸組構法に基づく木造床の防耐火性能

FIRE RESISTANCE OF WOODEN FLOOR-BEAM ASSEMBLIES OF
JAPANESE TRADITIONAL POST AND BEAM CONSTRUCTION

平井 宏幸*, 長谷見 雄二**, 安井 昇***, 木村 忠紀****, 山本 幸一*****

Hiroyuki HIRAI, Yuji HASEMI, Noboru YASUI,

Tadanori KIMURA and Koichi YAMAMOTO

Fire resistance tests have been conducted to develop wooden floor-beam assemblies of 45 minutes fire resistance for design loading conditions based on Japanese traditional post and beam construction. The tests were initiated with a 2m x 3m floor specimen consisting of six 1m x 1m small specimens of different specifications including four designs with beams exposed to the lower floor and two designs with ceiling panel beneath the beam to verify the integrity and thermal penetration through the floor panels. Beams to bear with the standard loading for domestic use and assemblies for 45 minutes standard fire exposure were then designed with the vertical deflection as the temporary index for compliance with the fire resistance standard. Large scale loaded fire tests were conducted on two designs, one with bare beam and another with ceiling panel, resulting in the achievement of 45 minutes prevention of flame and thermal penetration or buckling.

Keywords: bare timber post and beam construction, floor, fire resistance, loaded fire test

木現し構造, 床, 耐火性, 載荷加熱試験

1. はじめに

木造真壁等の伝統木造の防火性能については、長い間、研究開発が進められなかったが、近年、市街地における住宅等の小規模建築物の主な規制対象である外壁・軒裏については、防耐火構造規定の性能規定化を背景に研究が進められ、法令適合仕様の告示¹⁾化の施策に結実している。しかし、小規模建築物の防火規制は、ほぼ、近隣火災による建物内部への類焼防止だけを視野に入れたものであり、建物内の火災拡大の抑制、近隣建物への延焼危険の緩和等、枠組壁工法や大壁型在来軸組木造等では既に実現しているより広範囲の防火性能については、伝統木造では、まだ達成の見通しが明らかでない。今後、高齢者等の利用する福祉施設、不特定多数が利用するいわゆる特殊建築物、近隣への延焼危険が大きくなりがちな大規模建築物への伝統木造の活用を実現するためには、より高度な防火性能を実現する必要がある。

一般的な低層建物において、建物内の火災拡大の抑制や、近隣への延焼危険の原因となる建物の炎上崩壊を緩和する最も一般的な考え方は、壁・柱・床等の主要構造部の防耐火性能を向上させるというもので、木造では、準耐火構造、省令準耐火建築物等として制度化されてきた。筆者らが研究対象としてきた京町家様式については、主要構造部のうち、軒裏についてはすでに準耐火構造が実現しており²⁾、壁についても、住宅等の荷重に対しては、45分を超える遮熱性、遮炎

性、非損傷性を達成できることが示されている。そこで、本研究では、建物全体の火災拡大抑制・炎上防止上、壁に次いで重要と考えられる床について、伝統町家等の一般的な意匠と調和し得る範囲の仕様により、標準耐火加熱45分の遮熱性、非損傷性の達成を目安として、防耐火性能の改良・設計方法を実験に基づいて検討する。

さて、伝統的な軸組木造では、床は、軸組である梁に載る設計となることが多いが、この場合、下階火災時に上階への延焼経路となる床の変形や燃え抜けは、床板下面や床を直接支持する根太の燃焼だけでなく、梁の燃焼に伴う変形の影響も受ける可能性がある。伝統木造の床の防火性能については研究例が少ないが、このため、伝統木造の床の防耐火性能の検討に当たっては、床組自体の性能だけでなく、梁の変形に床組が追従して発生する床組の変形、床組内部への火炎侵入等の可能性についても対策と評価を考慮する必要があると考える。

建築基準法が耐火・準耐火構造に要求する要素的な防耐火性能は、遮熱性と非損傷性であるが、設計条件によってどの程度の防耐火性能が達成可能かを実験的に把握する方法を、木造真壁の場合から考察すると、遮熱性については、試験体において、床の断面を再現でき、加熱面の加熱の均一性が保証されれば寸法は重要ではないため、小型炉による模型実験が可能である。これに対して、非損傷性は、支点間の長さ、即ち、梁の場合にはスパンの影響が大きく現れると考えられる

* 早稲田大学大学院理工学研究科 修士課程

** 早稲田大学理工学術院 教授・工博

*** 早稲田大学理工学研究所 客員研究員・博士(工学)

**** 京都府建築工業組合 副理事長

***** 財団法人建築総合試験所耐火防火試験室

Graduate Student, Waseda University

Prof., Faculty of Science & Engineering, Waseda Univ., Dr. Eng.

Visiting Researcher, RISE, Waseda Univ., Ph. D.

Vice President, Kyoto Pref. Building Industry Association

Fire Safety Division, General Building Research Corporation

ため、その影響を把握するには、実大規模の試験体による実験が必要である。床組と梁とでは、このように、防耐火性能の実験的把握の方法の制約が大きく異なること、床組の仕様には様々な可能性があること、また水平炉はほぼ床の荷重加熱試験のみに使われるため、加熱面が2m×3m以上のものが一般的であることを考慮して、本研究では、まず、床組のみの小型試験体(1m×1m)を6仕様製作して組み合わせ、全体で2m×3mの床とし、梁に載せた状態で非荷重の耐火加熱実験を行って、床組の遮熱性を把握するとともに、厚板等については非損傷性を支配する基本的な要因である断面の減少性状を把握した。そのうえで、防耐火性能の可能性と意匠性をもとに、住宅等の荷重に対して標準耐火加熱45分の遮熱性・非損傷性の達成を目安に床組と梁の組み合わせを設計し、大規模試験体を用いて検証を行った。

2. 木造床の遮熱性と炭化性状

伝統構法の床については防耐火性能の把握自体があまり行われていないため、まず、どのような構成の床が防火上有効か確認したい。伝統木造では根太の上に床板を張る仕様が見られるが、この場合、床板のみで遮熱性を確保しなければならず、高度の防耐火性能を達成するのは難しい。そこで、木材の炭化速度を考慮し、45分の耐火加熱に耐えることが期待でき、施工上、大きな問題がないと思われる仕様を6種類考案して、その遮熱性と木材の炭化性状を把握した。

2.1 試験体の設計

木質部材の炭化速度の慣用値(0.6mm/分)²⁾によると、45分間の加熱で27mm炭化すると想定される。このため、安全側をとり30mmを燃え代としたうえで荷重を支持できるように床板の厚みが全体で60mmとなる仕様を5種類設計した。これに国交省告示準耐火構造床仕様を加えた6仕様を2m×3mの床組試験体枠の1m×1mのグリッド上に配置した試験体を製作した(表1,図1)。木材はスギ集成パネルの仕様C以外は全て国産のスギ一般製材(含水率15%前後)とし、床板および天井板は全て本実加工とした。根太及び床板は一般的な施工法に倣い、ビスで固定した。京町家の界床には、下階がザシキの場合に一般的な天井仕上げのあるものと、ミセ、ガイドコ等に多い梁現しのものがあるが、仕様A~Dは梁現しとした。なお、本実験は床の遮熱性を把握することが目的なので、グリッドを構成する梁の加熱中の変形・崩壊を防ぐために、梁及び外枠はケイ酸カルシウム板で被覆した。実験を行った仕様の設計方針は以下の通りである。

①仕様A

根太を2枚の木板で挟む構造として、床板下張りを燃え代とし、上部の根太と床板上張りで荷重を担保できるように設計した。

②仕様B

設計板厚60mmを30mm厚の2枚の木板に均等に振り分け、下張りが炭化・脱落しても根太・上張りで荷重を支えられるようにした。

③仕様C

厚さ60mmの床板1枚で構成する。仕様Dとの比較により、同じ厚さを1枚で造る場合と2枚張りの場合の差を検討する。この厚さの一般製材板が市場に流通していないため集成材パネルを用いた。

④仕様D

床板材の構成は仕様Bと同様であるが、根太の有無により、どのような違いが生じるか検証するため、根太を配置していない。

⑤仕様E

平成12年建設省告示第1358号準耐火構造に基づき、強化せつこうボード15mmを天井とし、梁を挟んで床板30mmを張っている。天井が木現しとならないが、耐火加熱時の各仕様の反応を告示仕様と比較する目的で使用した。

⑥仕様F

天井に15mm厚の天井板を野縁にビス留めし、梁を挟んで床板30mmを下張りし、床板15mm厚を上張りした。

2.2 実験方法

加熱はISO834標準加熱温度曲線に従い、加熱時間は、準耐火構造を目安として45分とした。なお、本実験では加熱中の各部温度変化と加熱終了時の床板等の炭化状況を把握することが目的であり、荷重は試験体の構成上、一仕様ごとの規模が小さく、荷重による部材の変形を把握できない可能性が高いため行わなかった。

図1 床遮熱性検証実験試験体外形図

表1 試験体仕様一覧及び、実験結果一覧

仕様名	各部材仕様			炭化深さ (mm)	裏面最高 温度 *1	火炎貫通 の有無	加熱 時間
	部材	材種	寸法				
仕様A	床	上張り	スギ	15mm厚(実加工)	0	61℃	無し
		根太	スギ	45×45@303	0		
		下張り	スギ	45mm厚(実加工)	38		
仕様B	床	上張り	スギ	30mm厚(実加工)	9	54℃	無し
		根太	スギ	21×45@303	対角:12 正面:3		
		下張り	スギ	30mm厚(実加工)	焼失		
仕様C	床	-	スギ集成材	60mm厚	36	57℃	無し
仕様D	床	上張り	スギ	30mm厚(実加工)	15	57℃	無し
		下張り	スギ	30mm厚(実加工)	焼失		
仕様E	床	-	スギ	30mm厚(実加工)	7	61℃	無し
	天井	-	強化せっこう ボード	15mm厚			
仕様F	床	上張り	スギ	15mm厚(実加工)	0	54℃	無し
		下張り	スギ	30mm厚(実加工)	24		
	天井	-	スギ	15mm厚(実加工)	焼失		

*1 全ての仕様で45分時に最高温度を示した。

2.3 測定項目

K 熱電対($\phi 0.68\text{mm}$)を各仕様の板材等の表裏面に取り付け、温度を30秒間隔で測定した。試験終了後、仕様ごとに床板中央部を切断し、床板および根太の炭化深さを測定した。その他、目視観察、VTR撮影、試験体裏面の熱映像撮影を行った。

2.4 実験結果と考察

実験結果を表1、炉内温度を図2、加熱終了後の炭化状況を図3に示す。図2で炉内温度が初期にやや高めているのは、試験体表面の燃焼が熱電対指示値に及ぼす影響を制御するのが困難なためである。なお、加熱終了後も床面には、火災貫通や延焼経路となるような隙間は生じなかった。

(1)遮熱性について

表1のように、全仕様中の床上面最高温度は仕様A,Eで観測された 61°C (加熱45分時点)であり、準耐火構造に関する一般的な性能評価機関の業務方法書³⁾に照らして、全ての仕様で遮熱性の達成に困難はないと考えられる。告示仕様である仕様Eは、加熱面が強化せっこうボードであり、図3のように、床板自体には加熱終了まで引火しなかったが、床上面温度から見て、遮熱性については、木材のみで構成した仕様A~D,Fの方が僅かながら優れているとの結果になった。

(2)炭化速度について

平均炭化速度は、加熱終了後の炭化深さを加熱時間で除して求めることが多いが、本実験では、床板上張り等への着火は概して遅く、加熱終了後も試験体脱却作業中は再燃が生じたため、床板の燃焼時間の推定が困難で、炭化深さから炭化速度を求めるのは難しい。そこで、実験中に床板下張りや天井板の脱落が確認された仕様B,D,Fについて、脱落した部材の厚さを、非加熱面側に燃焼が及んだと考えられるまでの時間で除して、炭化速度を求めることとした。まず、非加熱面側への燃焼の進行を、図4において非加熱面温度が木材の着火温度と

図2 炉内平均温度変化

図3 床遮熱性検証実験 炭化状況

される 260°C に達した時間で判断すると、仕様Bは床板下張り30mm厚が36分で 260°C に達したため、平均炭化速度は 0.83mm/分 、仕様Dは床板下張30mm厚が37分で 260°C のため、平均炭化速度は 0.81mm/分 、仕様Fは天井板15mm厚が18分で 260°C に達したため、平均炭化速度は 0.83mm/分 となる。また、図4を見ると、仕様B,Fでは、床下張りの非加熱面温度が 300°C を超えてから温度上昇が急激になっており、それが非加熱面側への燃焼の到達を表す可能性もある。この時間は、仕様Bで41.5分、仕様Fで25分であるので、それぞれの板厚をこの時間で除して平均炭化速度を推定すると、仕様Bで 0.72mm/分 、仕様Fで 0.60mm/分 となり、炭化速度の慣用値に近くなる。

なお、仕様Cの炭化深さ36mmを加熱時間で除すと 0.8mm/分 となるが、加熱終了後も燃焼・炭化が続いたことを考慮すると、この仕様の平均炭化速度はこの値をやや下回ると考えられる。

(3)床板の層数が炭化性状に及ぼす影響について

総厚60mmを1枚で造った仕様Cの炭化厚さは36mm、2枚で達成した仕様Dの炭化厚さは合計で45mmであった。仕様Dの方が炭化が深いのは、仕様Dでは床下張が加熱中に脱落し(非加熱面温度は37分で 260°C)、上張り板が直接加熱に曝露されたのに対して、仕様Cは加熱終了まで安定した炭化層を維持し、未燃部分が守られたことの差を表すと考えられる。このことから、床板を複数の層で構成する場合も、下張りに十分な厚さを持たせ、火災加熱中に脱落しないようにすれば、床板全体の炭化の加速を抑制することができると考えられる。

(4)根太について

仕様Aについては床板下張りが燃え抜けていないことや、根太や床板上張りに急激な温度上昇が見られないことから、このように構成すれば、根太と床板上張りについては、炭化や温度上昇を考慮せずに、载荷荷重に耐えられるようにすることだけを目標に、床の設計ができることがわかる。また、図5によると、下張りが仕様Aより薄い仕

図4 炭化速度を算定する各仕様の温度変化

図5 根太の有無と温度変化の違い

仕様 B については、床板下張りが 36 分で 260℃に達し、41.5 分で下張り上面・上張り下面の温度の急上昇が始まっている。図 3 のように、仕様 B の床板上張りには、下面から最大 9mm の厚さの炭化層が形成されているが、根太と床板上張りは、下張りが燃え抜ける前に予熱された後、3.5 分から 9 分間、火災から直接、加熱を受けて炭化したと考えられる。この仕様で非損傷性を確保するためには根太及び、床板上張りの炭化や温度上昇を考慮した設計を行う必要がある。

図 3 によると、仕様 B,D の上張り板の炭化はそれぞれ 9mm と 15mm であり、また、図 5 によれば、上張り下面温度が 260℃を超える温度は仕様 B では 41.5 分、仕様 D では 37.5 分と、根太を入れた仕様 B の方が防火上やや有利になっている。これは根太によってできる上張り・下張り間の隙間が、熱抵抗として機能したためと考えられる。

なお、熱映像によると、仕様 A の試験体裏面温度は加熱 45 分で、根太直上が隙間のある部分より約 20℃低くなっており、根太部分の熱抵抗が大きいことがわかった。

(5) 天井板の延焼遅延効果について

仕様 F のように天井板を設けると、天井板が燃え抜けるまでは床板の直接加熱を緩和する効果を期待できる。仕様 A,B,D の下張り、上張りの総炭化量を見るとそれぞれ 38mm～45mm となっている。しかし、天井板のある仕様 F では、下張りと上張りの総炭化量が 24mm に留まっている。この値に加熱中に脱落した天井板の厚み 15mm を加えると仕様 A,B,D の炭化量とほぼ等しくなることから、天井板を設けることによって、それより上部の部材の炭化を抑制する効果があると考えられる。また図 6 から、その他の加熱開始から床板が直接加熱される仕様 A,B,D が 0.5 分で 260℃を超えているのに対し、仕様 F の床板下張下面温度が 25 分まで 260℃を超えていない。このことから天井板にはそれより上部の部材への延焼を遅延させる効果があることが分かった。

2.5 木造床組の遮熱設計について

本実験では、スギ床板の炭化速度は慣用値(0.6mm/分)より大きい可能性があり、設計では約 0.8mm/分とすれば良いことが分かった。また、総厚が 60mm あれば 45 分の遮熱性を確保でき、床板上張り・下張り間に根太がある仕様でも防火性能を確保できることが分かった。

3 耐火加熱 45 分の遮熱性・非損傷性をもつ木造床試験体の設計

床組自体については 45 分の遮熱性を達成する見通しが明らかになったので、梁と組み合わせ、45 分の遮熱性・非損傷性を達成する仕様を、大規模試験体の载荷加熱試験により明らかにしたい。梁等の木

質構造部材は、火災加熱されると、温度上昇によるヤング係数の低下や炭化による断面の欠損を起こし、断面の力学的性能は加熱前に比べて低下する。そこで、床の耐火火性能を確保するには、梁についても、燃え代等により、火災加熱中、所定の荷重に対して崩壊しないように設計する必要がある。その予測法の有効性は、真壁の壁柱については検証されているが⁹⁾、梁については、炭化の様態、荷重と変形の関係等が柱とは大きく異なる。

梁の曲げ破壊は応力度によって決まると考えられるが、载荷加熱実験では事実上実測不可能であるため、ここでは、所定の火災加熱時間後でも崩壊を免れられる梁断面を設計する手がかりとして、たわみ量を用いた。即ち、たわみ量は载荷加熱実験で容易に測定でき、その報告例もある⁹⁾。たわみ量は、非損傷性予測の普遍的な指標にはならないかもしれないが、所定の火災加熱時間後のたわみ量は、材料のヤング係数と加熱後の断面 2 次モーメントから予測できるので、本実験に近い梁の断面・スパン条件で、耐火加熱 45 分近くで曲げ破壊が確認された場合を参照し、それよりやや安全側のたわみ量となるように断面を設計することとした。

3.1 梁の断面性能

断面性能の検証のフローを図 7 に示す。

①設計する床の基本構成

床組及び梁の非損傷性に重大な影響を与える要因として、床荷重の他に梁間隔及び梁スパンがあげられる。本研究の究極的な目標である準耐火構造は、適用できる規模・用途が防火構造以下に比べて多様なため、大きな梁スパンを視野に入れる必要はあるが、まず、最も基本的な条件として、京町家で一般的な幅の狭い敷地に建つ場合を想定すると、スパンは一般には 4m を超えない。また、一般的な京町家では、桁方向に半間(3 尺 1 寸 5 分=約 954mm)ごとにササラ梁が配置されるが、室面積、柱寸法により多少の差が生じること等を考慮して、本実験では、1.0m の梁間隔を想定する(図 8)。床積載荷重については、建築基準法施行令第 85 条に基づき住宅・宿泊室・病室等(以後、住宅等と呼ぶ)の 1800N/m²、集会場・店舗・事務室等(以後、集会場等と呼ぶ)の 2900N/m²の 2 通りを想定する。

床断面の構成としては、前述のように天井を張る場合と張らない場合があるが、2 章の実験結果を踏まえ、いずれも板厚合計 60mm となるようにし、天井を設ける場合は天井板を 15mm 厚とする。

②梁断面の設計

①で検討した 2 仕様の床組を支える梁の耐火加熱 45 分後の力学的性能については、炭化速度を、慣用値(0.6mm/分)ではなく、遮熱性検証実験から求めた 0.8mm/分と仮定し、炭化深さを、梁現し仕様では 36mm、また、天井有り仕様では、天井板による遮蔽のため、梁の加

図 6 天井板の延焼遅延効果

図 7 断面性能の検証フロー

図 8 荷重負担幅の検討

熱は30分に留まると仮定し、梁は24mm炭化するものとした。更に、木材のヤング係数は高温では低下するため、大断面集成材を用いた既往の加熱実験²⁾で得られた集成材表面からの深さと温度の関係に基づき、加熱45分後の梁の内部温度等温線を炭化面から図9のように10mm間隔で設定し、各等温線でのヤング係数の低下を材幅の低下に置き換えて、ヤング係数が常温のままとした場合の力学的に等価な断面を決定した。ヤング係数の残存率は、文献5に基づき、300℃の時20%、200℃の時52.5%、80℃の時85%、50℃以下の時は低下なしと仮定した。こうして算出した断面の断面2次モーメントを求め、耐火加熱45分後の梁の力学的性能を表すものとした。なお、既往の加熱実験²⁾から仮定した内部温度分布はJIS A 1304「建築構造部分の耐火試験方法」に準じた加熱30分のものであるが、加熱45分の内部温度分布は加熱30分と比較して低くなっており、この条件を柱の非損傷性予測に適用した既往の報告⁴⁾で良い予測が得られていることや、安全側を見越すという意味で内部等温線の設定は文献2に準拠した。

梁の断面性能・載荷荷重と等分布荷重のたわみ量の関係は

$$\delta = 5WL^4 / 384EI \quad (1)$$

で表されるので、まず、たわみ量が目標値の範囲に留まるように45分加熱後の断面を決定する。本実験にスパン等が近い条件での梁曲げ実験としては、構造用集成材に関する実験報告があり、スパン5100mmの梁で66mm変形した時点で中央部近傍に接着層の剥離による曲げ破壊が発生している⁵⁾。そこで、この程度のスパンの木造梁では、加熱後のたわみ量をスパンの1/100程度に制御できれば良いと仮定する。これに、上記のスパン、荷重条件を代入して得られる断面2次モーメントに対応する梁断面の下面及び両側面に約36mmづつの燃え代を加えて、設計梁断面とした。

以上の手順により、意匠的には「梁現し」と「天井有り」の2条件、積載荷重については住宅等と集会場等の2条件に対して設計した梁断面と、45分火災加熱後に予想される梁のたわみ量を表2に示す。

また、床組については加熱中に下張り板が脱落、もしくは炭化し、根太が上張り板を支持することになるため、床組の非損傷性は根太端部の支持が重要と考えられる。炭化速度を0.8mm/分とすると、梁現し仕様の根太は6mm炭化することになる。天井有り仕様では、天井板と床板下張で総厚が45mmとなるため、根太は直接加熱を受けないと仮定する。以上の条件で載荷荷重を梁同様に設定、梁間隔を1.0mとした場合の45分加熱後の根太のたわみ量を表3に示す。

3.2 床組・梁の設計仕様

以上の結果から、「梁現し仕様」では、スパン4m、梁間隔1m、梁幅150mm、梁せい240mm以上とすれば、住宅等の用途に適用できる可能性があるものとして、図9に示す大型試験体(WF-1)を設計した。床組は、2章の仕様B及び実際の施工法に基づき、30mm厚板2枚の間に45mm×45mmの根太を500mm間隔で配置する構成とし、根太は梁に直交させた。一方、「天井有り仕様」では、スパン4m、梁間隔1m、断面寸法120mm×240mm以上であれば、住宅や集会場等に適用できる可能性があるものとして、図11に示す大型試験体(WF-2)を設計した。天井は2章の結果及び実際の施工法から15mm厚のスギ板としたが、床板は上張り15mm、下張り30mmの間に45mm×45mmの根太を333mm間隔で配置した。2章の仕様Fの結果から根太までは着火しないと予想できるので、小梁等は設けず、根太は梁に直交させている。

2つの試験体仕様を整理して、表4に示す。なお、試験体の外寸は使用する耐火炉の寸法に合わせ2,240mm×4,105mmとし、各試験体の梁は、木材の強度管理と把握を目的として、構造用集成材とした。

4. 実大載荷加熱実験

4.1 実験方法

3章で設計したWF-1(梁現し仕様)、WF-2(天井有り仕様)の二種類の試験体を、水平炉によりISO834標準耐火加熱曲線に従って45分間、加熱した。載荷荷重は、梁現し仕様については、住宅等の載荷荷重である1800N/m²とし、天井有り仕様については、集会場等の荷重である2900N/m²として、それぞれ板錘により載荷した。

4.2 測定項目

測定は、K(CA)熱電対を試験体の各測定位置に計52点〜63点取り付け、試験体非加熱面にディスク付きK熱電対を設置し、温度変化を30秒間隔で測定した。また、炉内温度はシース型熱電対で測定した。たわみ量を梁の両端と中央部、床板の両端と中央部で30秒間隔で測定し非損傷性を評価した。また、表・裏面の目視観察、VTR撮影、熱映像撮影を行い、脱炉後に各部材の炭化量を測定した。

図9 加熱後の梁の力学的性能からの仮定断面算出

表2 梁スパン4mのたわみ量検討結果

仕様	梁断面	荷重条件	積載荷重 (N/m ²)	スパン (cm)	等分布荷重 (tf/cm)	断面2次モーメント (cm ⁴)	たわみ量 (mm)
梁現し	150×240	住居等	1800	400	0.0018	3028	31.1
		集会所等	2900	400	0.0030	3028	50.1
	150×270	住居等	1800	400	0.0018	4652	20.2
		集会所等	2900	400	0.0030	4652	32.6
天井有り	120×240	住居等	1800	400	0.0018	3206	29.4
		集会所等	2900	400	0.0030	3206	47.3
	120×270	住居等	1800	400	0.0018	4808	19.6
		集会所等	2900	400	0.0030	4808	31.6

表3 根太のたわみ量検討結果

仕様	根太断面	積載荷重 (N/m ²)	スパン (cm)	間隔 (cm)	等分布荷重 (tf/cm)	断面2次モーメント (cm ⁴)	たわみ量 (mm)
梁現し	45×45	1800	100	500	0.0009	6.3	29.2
		2900	100	500	0.0015	6.3	47.0
		1800	100	500	0.0009	12.0	15.4
	45×60	2900	100	500	0.0015	12.0	24.8
		1800	100	333	0.0006	34.2	3.6
		2900	100	333	0.0010	34.2	5.8
天井有り	45×45	1800	100	333	0.0006	81.0	1.5
		2900	100	333	0.0010	81.0	2.4
	45×60	1800	100	333	0.0006	81.0	2.4

図 10 梁現し仕様試験体外形図 WF-1

図 11 天井有り仕様試験体外形図 WF-2

表 4 試験体仕様一覧

試験体名	仕様	梁				天井板(本実加工)		床板(本実加工)				根太	
		寸法(mm)	材種	集成材強度	含水率	厚さ	働き幅	材種	厚さ	働き幅	材種	寸法(mm)	材種
WF-1	梁現し	150×270	同一等級構成構造用集成材(スギ)	E65-F255	11.6%	—	—	—	上張り 厚30mm 下張り 厚30mm	180mm 180mm	スギ スギ	45×45@500	スギ
WF-2	天井有り	120×270	同一等級構成構造用集成材(スギ)	E65-F255	11.1%	15mm	150mm	スギ	上張り 厚15mm 下張り 厚30mm	150mm 180mm	スギ スギ	45×45@333	スギ

表 5 各仕様の実験結果一覧

試験体名	裏面初期温度(℃)	遮熱性		非損傷性 最大たわみ量(mm)	遮炎性	載荷荷重	加熱時間
		裏面平均温度(℃)	裏面最高温度(℃)				
WF-1	19	62.3	86	4.5	火炎貫通なし	1800N/m ² 全重量14400N	45分
WF-2	18	51.5	53	13.6	火炎貫通なし	2900N/m ² 全重量23200N	45分

※上限値裏面平均温度:裏面初期温度+140℃ 上限値裏面最高温度:裏面初期温度+180℃
上限値最大たわみ量:140.5mm

図 12 各仕様の炉内温度

4.3 実験結果

実験結果一覧を表 5、炉内温度を図 12 に示す。

遮熱性については、床上張り上面(非加熱面)の温度が、梁現し仕様(WF-1)では 86℃に、また、天井有り仕様(WF-2)でも 53℃に留まり、45 分火災加熱では、上階床上で着火に至るおそれはないことがわかった。また、非損傷性については、両仕様で、最大たわみ量が準耐火構造床に関する性能評価における上限値を超えることはなく、崩壊・脱落に至る兆候は認められなかった。

なお、両試験体とも、加熱終了まで非加熱面側には火炎の貫通はなく、床には貫通穴等も認められなかったため、耐火加熱 45 分以上の遮炎性を有することもわかった。また、両仕様とも、45 分の加熱終了後の脱炉作業時間も燃え続けたことを考慮すると、非損傷性・遮熱性の両方に、若干の余裕があると考えられる。

4.4 考察

(1)床下面の天井板の延焼遅延効果について

2 章の遮熱性検証実験では、載荷を行わず荷重によるたわみ等が天井板に影響を与えない状況下では天井板 15mm 厚について 18 分程度

の延焼遅延効果が期待できることが分かった。本考察では載荷した状態での天井板の延焼遅延効果を検証する。図 13 を見ると、WF-2 の天井板非加熱面平均温度が 260℃を超えるのは 14 分であり、2 章で示した遮熱性検証実験の天井有り仕様である仕様 F より木材の着火温度に達する時間が早かったことが分かる。これは載荷によって天井板及び野縁に変形が生じたことが主な原因と考えられる。

(2)床上面の構成について

図 14 から WF-1 の根太下端平均温度が、260℃を超えるのは 36.5 分であることが分かる。一方、遮熱性検証実験で床板下張りが 30mm 厚である仕様 B においても 260℃を超えた時間は 36 分で、ほぼ同じ耐火時間を得る結果となった。これは、WF-2 の天井板と比較して、WF-1 の床板下張りは厚みがあるため、それに伴い本実加工部分も厚くなることで床板間の結合が強固になり、載荷による変形が小さかったと考えられる。

また、根太及び床板上張りは、直接、加熱を受けるが、45 分の加熱終了時点で非損傷性に問題はなく、根太は上張りを支持できていた。よって、床板の総厚を 60mm とし、床板の下張りを防火被覆として

その上部の根太と床板上張りで床を構成することで 45 分間の遮熱性・遮炎性・非損傷性を確保できることが分かった。

(3)予測した断面性能の妥当性について

表 6 に予測によるたわみ量と載荷加熱実験による実験値を示す。加熱終了後に測定した炭化量を脱炭後の消炭時間で除した値は WF-1 が約 0.52mm/分で WF-2 が約 0.56 mm/分と、耐火加熱試験における炭化速度の慣用値や 2 章の実験で推測した炭化速度よりやや小さめとなった。たわみ量最大値の実測値は炭化速度を 0.6mm/分とした場合の計算値に近いことから、たわみ量の予測に用いた加熱後の断面 2 次モーメントの仮定が水平部材においても有効であり、この手法を用いることに妥当性があることが分かった。より一般的な条件で精度のよい値を導き出すためには床板の剛性等を考慮する必要があると考えられるが、炭化速度を正しく把握することで部材の断面性能を、性能評価上、安全側で把握することは可能であろう。

図 13 天井板上面の温度変化 (WF-2 は 9 点の平均)

図 14 根太下端温度変化 (WF-1 は 2 点の平均)

表 6 断面性能の検証によるたわみ量と実験値の比較

試験体名	加熱時間 (分)	たわみ量 (mm)		加熱実験の実測値 ※2
		断面性能からの予測値 ※1		
		0.6mm/分	0.8mm/分	
WF-1	45	9.5	16.4	4.5
WF-2	45	13.8	23.9	13.6

※1 非損傷性予測の値は実測値と比較するため、加熱後のたわみ量から加熱前のたわみ量を差し引いた。

※2 実験値から算定した炭化速度は WF-1 : 0.52mm/分 WF-2 : 0.56mm/分

5. まとめと今後の展望

非損傷性予測に基づいて設計した床について、床のみの非載荷耐火加熱実験及び床・梁を組み合わせた実大試験体の載荷加熱実験を行い、以下の知見を得た。

(1)床の遮熱性・遮炎性

床板を、下階の天井板を含め、スギ総厚 60mm で設計すれば、45 分の遮熱性・遮炎性を達成のうえ、加熱後に 15mm 以上の残り床板厚さを確保できる。

(2)床梁の防火性能について

「梁現し仕様」については、支持スパン 4000mm、断面 150・270mm (梁負担幅 1000mm)の梁の上に、床板(下張り)30mm 厚、根太 45・45mm、床板(上張り)30mm 厚を設けた仕様により、載荷荷重 1800N/m²(住居等)のもとで 45 分の遮熱性・遮炎性・非損傷性を確認した。また、「天井有り仕様」については、支持スパン 4000mm、断面 120・270mm(梁負担幅 1000mm)の梁の上に、床板(下張り)30mm 厚、根太 45・45mm、床板(上張り)30mm 厚を設けた仕様により、載荷荷重 2900N/m²(集会所等)のもとで 45 分の遮熱性・遮炎性・非損傷性を確認した。

(3)加熱後の断面性能の予測について

等分布荷重を受ける梁スパン 4m 床について、加熱開始 45 分時の梁のたわみ量を比較的精度よく、実験値よりも危険側で予測することができた。これは加熱後の断面性能を安全側で評価できていたということになる。また炭化速度を正確に把握することが加熱後の断面性能を予測する上で重要であることが分かった。

本論文では、現在、伝統木造の床の防耐火性能に関する知見が乏しいことから、梁スパンについては、京町家の従来用途に近い範囲で、過去に木造梁の実験が行われたのに近い条件として 4m を選び、梁間隔を 1m とした。しかし、準耐火建築物で計画されている大規模建築物や特殊建築物では、スパンや梁間隔がこの条件を超える場合がある。今後、これら、より一般的な条件での床の防耐火性能を系統的に把握できるようにしていくことが必要である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金「木造軸組土壁構法に基づく準耐火建築物の開発研究」(研究代表者：長谷見雄二)の一環として行った。本実験を行うにあたり、京都府建築工業協同組合、(財)日本建築総合試験所、(株)東亜理科の皆様、当時早稲田大学大学院生の橋本信(現:鹿島建設(株))、小川敦史(現:株竹中工務店)、坂田高洋(現:株大林組)、ならびに早稲田大学大学院の澤野恵直、渡辺圭太の各氏には多大なるご協力を頂き、考察にあたっては、東京大学生産技術研究所准教授 腰原幹雄博士より貴重な助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 国土交通省告示第 787 号、第 788 号、第 789 号、第 790 号、2004。
- 中村賢一・宮林正幸：大断面木材の耐火性(I) 木材工業 Vol.40、1985。
- 例えば、日本建築総合試験所：防耐火性能試験・評価業務方法書、2005.10.17
- 清水真理子、長谷見雄二、村上雅英、安井昇、木造真壁の耐火性能予測、日本建築学会構造系論文集、第 611 号、2007.1
- 西田 一郎 他：API 接着剤を用いた構造用集成材の耐火性能に関する研究 (その 2)：日本建築学会大会学術梗概集・A-2 2005

(2007年 9 月10日原稿受理、2007年12月 5 日採用決定)