

# 集成梁の載荷加熱試験（1）

燃焼に及ぼす防火塗料の効果

布 村 昭 夫\* 伊 東 英 武  
葛 西 章 駒 沢 克 巳  
山 岸 宏 一

## 1. まえがき

一般に木材は燃え易い性質をもっているが、すべての場合に木質材料がこの欠点を示すわけではなく、とくに断面の大きな木質構造材の燃焼時の断面減少速度がかなり遅く、このため建物の倒壊までに要する時間も相当長びき、火災時の避難の安全性からみて見直さなければならないものと思われる。事実アメリカ合衆国においては重木構造は火災危険性が組積構造のものより少いと見積もられ、火災危険度の小さい方に

格付けされている。

我が国における火災時の構造耐力を算定するものとしてはJIS A1304が規定としてあるが、これは壁、床、柱、梁などの構造部分の火災時における倒壊、落下、消火注水における耐火被覆の剥落の有無を含めた耐火性状を判定するものである。この判定は載荷加熱試験により行われ、加熱中の耐力低下の性状が不明な材料や工法を用いたものに対し、一律の判定が困難な場合に行われる。加熱時間は30分、1時間、2時間、

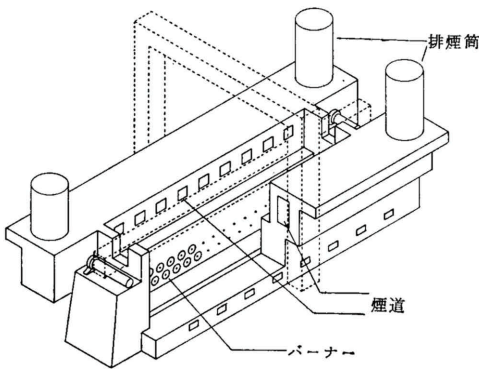
3時間, 4時間の5段階の加熱等級に分類されている。また基材の受ける応力は長期許容応力度の1.2倍, たわみ量は床の場合, 支点間距離の2乗の1万分の1を超えてはならないとされている。

今回の実験では構造部材として一般家屋に使用される程度の比較的小断面の集成梁を用い, 30分加熱等級に合格しうるか否かの検討をすることに主たる目標をおいた。さらに集成梁の材表面に防火塗料を塗布し, その効果についても検討を行った。

## 2. 試験方法

### 2.1 荷重加熱試験炉

実験に用いた試験炉は第1図に示すとおりである。炉は下部の2列に配備された左右のガスバーナーで加



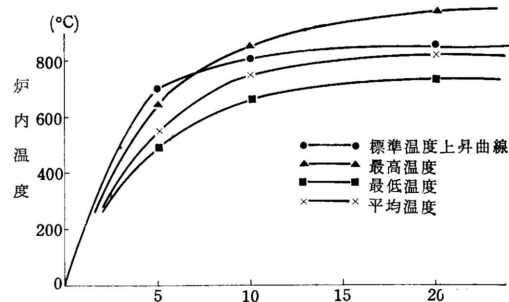
第1図 荷重加熱試験炉

熱され試験体の全面にほぼ一様に炎が達し得るようになっている。炉内温度は中心部分から50cmの部位4箇所測定される。炉の上部はシボレックス板で覆い火炎をしゃ断する。また加熱中に規定の荷重がかけられる荷重装置が付属されている。

### 2.2 供試材料

実験に用いた集成梁は幅10cm, 厚さ20cm, 長さ3.65mのエゾマツ集成梁であり, ラミナは厚さ2cm, 積層数は10層である。梁の下面より2, 5, 8層目のラミナにはフィンガージョイントを入れフィンガージョイントの影響の検討も試みた。また1, 2, 3, 4, 5層にはアルメルクロメルの熱電対を入れ, 加熱時における材内温度の変化を測定した。接着剤は尿素・

メラミン共縮合樹脂を用いた。防火塗料は発泡性防火塗料(武田薬品, 商品名ピロモルス)で, その塗布量はそれぞれ200, 300, 400g/m<sup>2</sup>とした。試験中の集成梁のたわみ量の変化は常に一定の荷重をかけながら中央部分から40cmの部位のたわみをダイヤルゲージで測定した。加熱時間は30分加熱であり, JISで規定された標準温度上昇路線(第2図)にそって炉内温度を上昇させた。加熱試験終了後の残留耐力を測定したのうち, 一端から70cm, 160cmの部位を切断し, この部



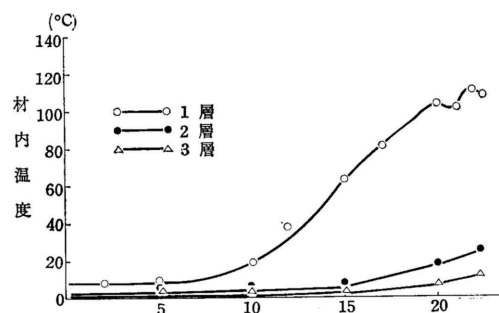
第2図 標準温度上昇曲線と炉内温度と時間(分)

位における表面からの焼け込み量(炭化厚, 炭化速度)の測定を行った。また以上の実験との比較のために型鋼の荷重加熱試験も行い加熱時の木材とのたわみ量を比較した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 材内温度

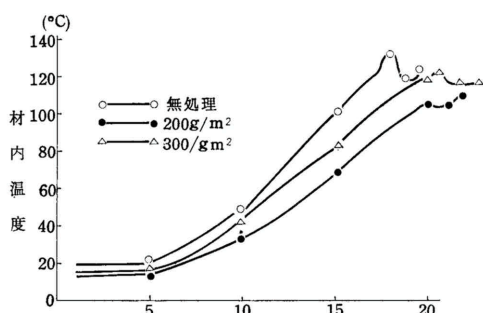
第3図は無処理集成梁の加熱中における材内温度を示したものである。1層目における材内温度は時間と共に上昇し最高で120~130 まで達した。しかしな



第3図 無処理集成梁の材内温度と時間(分)

がそれ以上には上らず、一時的に130 に上昇してもすぐに10~20 低下し、再び上昇する現象が観察された。このことは基材中に含まれている水分が熱により気化するため、その潜熱により材内温度が低下するものと考えられる。一方、2層目、3層目における材内温度はあまり上昇せず、最高でも40~50 であった。4・5層目における材内温度はほとんど上昇せず材面から4cm以上の内部では加熱による熱の影響はほとんど無いと言える。

第4図は防火塗料を塗布した集成梁の加熱中の材内温度の変化を示したものである。無処理と200, 300 g/m<sup>2</sup>塗布した集成梁の材内温度を比較すると防火塗



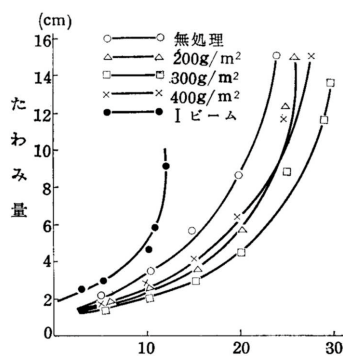
第4図 1層目における材内温度と時間(分)

料の塗布により材内温度はかなり低下させ得ることが観察された。防火塗料の塗布は特に1層目材内温度を低下させ、最高でも100 前後であった。加熱時間15分における材内温度を比較すると無処理材は100 であるのに対し200g/m<sup>2</sup>塗布したものは約60 を示した。しかしながら図でも明らかな様に、塗布量が200g/m<sup>2</sup>のものと300g/m<sup>2</sup>のものとは逆転がみられ、塗布量による差は確認出来なかった。

### 3.2 たわみ量

#### 3.2.1 木材と 型鋼のたわみの比較

第5図は集成梁と 型鋼のたわみ量を比較したものである。 型鋼は加熱開始後約7~8分でたわみ量を急激に増加させ、10分を過ぎると完全に曲げ強度を失った。この時点での炉内温度は約750~800 であり、 型鋼は800 以上の高温では永くその形状を保つことが出来ず、軟化してしまい荷重には耐えられないことが明らかとなった。一方集成梁は10×20の断面

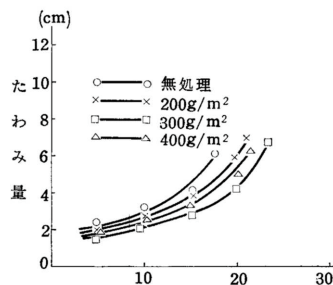


第5図 防火塗料の塗布量とたわみ量と時間(分) (フィンガージョイント無)

でも25分以上は加熱に耐えられ、その形状を保ち得ることから考えると、加熱時においては木材の方が遙かに耐力を有することは明らかである。建築物の火災においてこのことは重要なことであり、火災時の倒壊を防止し、避難の安全性を確保するためには木質材料は可燃性であるにもかかわらずこのような特徴をもっており、この点からの正しい耐火性能評価が必要であろうと思われる。

#### 3.2.2 たわみ量と防火塗料

第6図はたわみ量に対する防火塗料の効果を示したものである。図からも明らかな様に防火塗料の効果は大きく、たわみ量が急激に増加するまでの時間を比較



第6図 防火塗料の塗布量とたわみ量と時間(分) (フィンガージョイント有)

すると、無処理が14~16分であるのに対し、塗布したものは20~24分と全体的に1.2~1.4倍延長させることが明らかとなった。とくに300g/m<sup>2</sup>塗布したものは約30分近くまで延長し得た。しかしながら400g/m<sup>2</sup>塗布したものは200g/m<sup>2</sup>塗布したものと同程度のたわみ量変化を示し、塗布量増加による効果はみられなかつ

た。このことは200g/m<sup>2</sup>以上の塗布による断熱効果の増加度が小さく、塗料の塗布状態のバラツキ及び実験上の誤差が大きく作用し、塗布量を多くしても十分にその効果が現われなかったのではないかと考えられる。とくに、今回使用した塗料の加熱時に生成する発泡炭化層と基材との密着性が悪く、基材から発生する熱分解ガスや燃焼ガスの熱気流により一部飛散するため塗布量との相関が必ずしも得られなかったとも考えられるが今回の試験では明らかに出来なかった。

第6図はフィンガージョイントを入れた集成梁のたわみ量の変化を比較したものである。フィンガージョイントの入った集成梁はフィンガージョイントの入らないものとは若干異った挙動を示し、たわみ量が小さい段階で折損した。入らないものが約12cmであったのに対し約7cmとほぼ40%低い段階でたわみを急激

に増加し破壊した。また、たわみ量を急激に増加させるまでの時間も約20分でありフィンガージョイントの入らないものよりも4~5分短かった。このことは最外層が焼け込んで強度を消失し、フィンガージョイントされた第2層が強度的に重要な位置を占めるようになるためフィンガージョイント有無の影響が強く現われたのではないかと考えられる。したがって、第1層の焼込みが終わらない20分前後までのたわみ量の変化を比較するとフィンガージョイントの有無にかかわらず同じようなたわみ曲線を示し大きな差異はなかった。

### 3.3 焼け込み量

第1表は各々の集成梁の焼け込み量(炭化厚,炭化速度)を示したものである。幅方向と丈方向の比較では幅方向の方が炭化厚が大きく加熱終了時の炭化が進

第1表 焼け込み量(炭化厚と炭化速度)

No.	フィンガー ジョイント の有無	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	加熱時間 (min see)	70cmにおける 炭化厚と炭化速度 (cm) (mm/min)				160cmにおける 炭化厚と炭化速度 (cm) (mm/min)			
				幅方向		丈方向		幅方向		丈方向	
				炭化厚	速度	炭化厚	速度	炭化厚	速度	炭化厚	速度
12	有	0	18.30	1.05	0.57	0.90	0.49	1.40	0.75	1.00	0.54
2		200	21.41	0.95	0.44	0.85	0.39	1.30	0.60	1.10	0.50
4		300	24.11	0.70	0.29	0.40	0.17	1.10	0.45	0.60	0.25
10		400	21.23	0.80	0.37	0.50	0.23	1.00	0.47	0.50	0.23
14	無	0	22.09	1.60	0.72	1.25	0.55	1.65	0.74	1.75	0.79
6		200	27.16	1.30	0.48	1.15	0.42	1.45	0.53	1.25	0.46
8		300	29.50	1.30	0.43	1.05	0.35	1.65	0.55	※	※
13		400	26.08	0.95	0.36	0.90	0.34	1.25	0.49	※	※

※残留耐力測定時に破壊のため炭化厚の測定不能

行していた。炭化速度は夫々0.7~0.3mm/minであり幅方向の炭化速度が大きかった。また70cmと160cmの部位との比較では、炉中央部である160cmの部位の方が20~30%炭化が進んでいることが示されている。防火塗料の塗布量による比較では無処理集成梁は0.6~0.7mm/min, 処理集成梁では0.3~0.5mm/minとなり防火塗料の塗布により30~50%の炭化速度の低下が認められ、防火塗料が加熱時の集成梁の断面減少を抑制する効果大きいことが明らかとなった。

また、300g/m<sup>2</sup>以上の塗布の断面減少に及ぼす効果はあまり大きくないことを認めた。一方、耐久時間と

断面減少率との相関はあまりはっきり見出すことは出来なかった。なお、炭化速度における文献値<sup>1)</sup>では無処理集成梁0.55~0.72mm/minに対し、防火薬剤注入処理集成梁0.33~0.55mm/minであり、今回の結果とほぼ一致している。

### 4. 安全燃焼時間の算定について

安全燃焼時間とは火災時において集成梁がその材面を一定の平均炭化速度で燃焼し、その健全部が次第に減少し、ついにその残存最大曲げモーメントがこの集成梁に定められている長期応力に対する許容曲げ

モーメントに相等しくなるまでの燃焼時間である。この安全燃焼時間の算定は川越ら<sup>2)</sup>によって行われている。それによると、まず前提条件として

- (1) 木材の燃焼前後の強度をFおよびfで表わすと、  
 $f = \alpha \cdot F$ となり  $\alpha$ で材質の低下を示す。
- (2) 燃焼により木材の応力 - 歪曲線型は変化しないものとする。
- (3) 長期許容曲げモーメントは最大曲げモーメントの1/3であるとする。
- (4) 燃焼した集成梁は許容曲げモーメントがその梁の最大曲げモーメントと同じになった時に破壊するものとする。
- (5) 炭化速度は燃焼時間に関係なく梁のどの面も同じ速度であるとする。

また、

- M<sub>1</sub>: 燃焼前の集成梁の長期応力に対する許容曲げモーメント
- B: 燃焼前の梁幅
- D: 燃焼前の梁丈
- Fc: 圧縮強さ
- C: 応力 - 歪曲線型・梁の断面形による定数とする。
- Z<sub>1</sub>: 梁の断面係数
- f<sub>b</sub>: 長期応力に対する曲げ許容応力度

とすると

$$M_1 = f_b \cdot Z_1 \cdot C \text{ となる}$$

$$f_b = (\text{標準曲げ破壊係数}) \times (\text{比例限度係数}) \times (\text{欠点低減係数}) \times (\text{長期継続荷重による低減係数})$$

$$= F_b \times \frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{6} F_b$$

なお針葉樹材では近似的につぎの関係が成り立つものとみなされる。

$$F_b = \frac{3r-1}{r+1} \cdot F_c \quad r = F_t/F_c = 3$$

よって

$$F_b = 2 \cdot F_c \text{ よって } f_b = \frac{1}{3} F_c \text{ となる。}$$

$$\text{また、 } Z = \frac{BD^2}{6} \text{ であるから}$$

$$M_1 = \frac{1}{3} \cdot F_c \cdot \frac{BD^2}{6} \cdot C \text{ となる。}$$

つぎに燃焼後の曲げモーメントについては、

f<sub>c</sub>: 燃焼後の健全材部(見かけ上のことで材質変化をもつ残存材部)の圧縮強さ

$$b = B - 2t \text{ : 燃焼後の梁幅}$$

$$d = D - 2t \text{ : 燃焼後の梁丈}$$

: 平均炭化速度

とすると

$$M = f_c \cdot Z_2 \cdot C \text{ となり}$$

$$Z_2 = \frac{bd^2}{6} \text{ であるので}$$

$$M_2 = f_c \cdot \frac{bd^2}{6} \cdot C \text{ となる。}$$

この式では燃焼後における集成梁の非炭化材部の外皮応力が圧縮強さf<sub>c</sub>までは、すべて比例域(直線的)で降伏の発生しない応力条件と見なされ得るから、変形(撓み)の流動現象も起らないと考えられている。

上記の前提条件から沢田によって誘導された安全燃焼時間(t)の算出式は、

$$M_2 = M_1 \text{ から}$$

$$M_2 = f_c \cdot \frac{bd^2}{6} \cdot C, \quad M_1 = F_c \cdot \frac{BD^2}{6} \cdot C$$

$$f_c = \alpha \cdot F_c \quad \text{なので}$$

$$\alpha \cdot F_c \cdot \frac{1}{6} b \cdot d^2 \cdot C = \frac{1}{3} F_c \cdot \frac{BD^2}{6} \cdot C \text{ となり}$$

$$\alpha \cdot F_c \cdot \frac{1}{6} (B - 2\beta t)(D - 2\beta t)^2 = \frac{1}{3} F_c \cdot \frac{BD^2}{6} \cdot C$$

$$B/D = k \quad x = 2\beta t - \frac{2+k}{3} \cdot D \text{ とおくと}$$

$$x^3 - \frac{(1-k)^2}{3} D^2 x + \left\{ \frac{2(1-k)^3}{27} \times \frac{k}{3\alpha} \right\} D^3 = 0$$

となる。

これを解くと、

$$t = \frac{D}{2\beta} \phi(\alpha \cdot k)$$

$$\phi = (2+k)/3 - (r_1+r_2)^{\frac{1}{3}} - (r_1-r_2)^{\frac{1}{3}}$$

$$r_1 = \frac{1}{54\alpha} [2\alpha(1-k)^3 + 9k]$$

$$r_2 = \frac{1}{18\alpha} \sqrt[3]{k [4\alpha(1-k)^3 + 9k]} \text{ となる。}$$

$\phi$  の値を  $\alpha$  と  $k$  の変化に対して計算すると第

2表に示したごとくなる。また、 $k = \frac{1}{2}$ 、 $\beta = 0.06\text{cm/min}$  とすると、 $\alpha$ 、 $D$  による  $t$  の値が求められ、その値は第3表に示された様に表わされる。この表から  $\alpha$  の値をもとに安全燃焼時間が算出される。今回の実験による平均炭化速度を無処理  $0.058\text{cm/min}$ 、防火塗料処理  $0.04\text{cm/min}$  とし、また、集成梁の  $\alpha$  の値を  $0.5 \sim 0.7$  とすると、安全燃焼時間はそれぞれ次のようになる。

	処 理	無処理
$\alpha = 0.5$	$t = 23.5$	16.2
$\alpha = 0.6$	$t = 32.9$	22.6
$\alpha = 0.7$	$t = 40.3$	27.8

しかしながら  $\alpha$  の値がいかなる値をとるか、 $\beta$  の値が一定値をとるかかどうか、 $\alpha$  の時間的経過による変動、 $k = B/D$  値の横座屈倒壊限界などが今後の検討事項としてあげられる。

### 5. まとめ

以上の結果から今回の試験においては、処理、無処理いずれの集成梁も30分加熱に耐えられるものはなかったが、発泡防火塗料  $300\text{g/m}^2$  塗布したものは29分50秒の値を示し、発泡性防火塗料の塗布により急激にたわみを増加するまでの時間をかなり延長させ、炭化速度を50%近くまで低下させ、断面減少率をへらすなどの大きな効果を上げ得ることが明らかとなった。しかしながら今回使用した発泡性防火塗料は発泡炭化層が軟弱であり防火効果が十分でなかったことなどを考えると  $10 \times 20\text{cm}$  の集成梁を30分加熱に耐えさせるた

第2表  $\alpha$  と  $k$  の変化に対する  $\phi$  値

$\alpha$		$\alpha (t_c/F_c)$ 値					
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$k$ (B/D) 値	1/7	0.0396	0.0541	0.0650	0.0735	0.0803	0.0859
	1/6	0.0449	0.0615	0.0741	0.0839	0.0918	0.0983
	1/5	0.0517	0.0712	0.0860	0.0976	0.1071	0.1149
	1/4	0.0610	0.0844	0.1023	0.1166	0.1282	0.1379
	1/3	0.0736	0.1031	0.1257	0.1439	0.1588	0.1715
	2/5	0.0830	0.1158	0.1416	0.1544	0.1798	0.1945
	1/2	0.0941	0.1316	0.1615	0.1858	0.2062	0.2235
	6/10	0.1029	0.1443	0.1773	0.2047	0.2279	0.2473
	8/10	0.1221	0.1699	0.2080	0.2396	0.2662	0.2892
	10/10	0.1264	0.1779	0.2191	0.2531	0.2819	0.3066

第3表  $\alpha$  と  $D$  の変化における安全燃焼時間 (分)

$\alpha$		$\alpha (t_c/F_c)$ 値					
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$D$ 値 (集成梁寸) cm	20	15.7	21.9	26.9	31.0	34.4	37.3
	25	19.6	27.4	33.6	38.7	43.0	46.6
	30	23.5	32.9	40.4	46.4	51.5	55.9
	35	27.4	38.4	47.1	54.2	60.1	65.2
	40	31.4	43.9	53.8	61.9	68.7	74.5
	45	35.3	49.4	60.6	69.7	77.3	83.8
	50	39.2	54.8	67.3	77.4	85.9	93.1

めには、この面での新しい発泡性防火塗料を検討するか、又はこれに代り得る断熱被覆を考慮しなければならぬと思われた。おわりに安全燃焼時間の算定について種々指導下さった北大農学部林産学科沢田稔教授に感謝いたします。

### 文 献

- 1) H. Kolb: Holz Roh-Werkstoff Heft 8. (1968)
- 2) 川越邦男, 今泉勝吉, 斎藤 光: 建築材料 10.1 (1968)

— \* 林産化学部長 —

— 林産化学部 木材保存科 —

(原稿受理 50. 3. 23)