耐火塗料の耐火性能に及ぼす鉄骨部材の熱容量の効果

EFFECT OF HEAT CAPACITY OF STEEL MEMBERS ON THE FIRE RESISTANCE OF INTUMESCENT COATING

作本好文^{*1}, 山口種美^{*2}, 岡田忠義^{*3}, 吉田正友^{*4}, 田坂茂樹^{*5}
Yoshifumi, SAKUMOTO, Tanemi YAMAGUCHI, Tadayoshi OKADA, Masatomo YOSHIDA
and Shigeki TASAKA

As intumescent coating has lower level of insulation than ordinary protective materials, we have already reported that a period of fire resistance not less than one hour was obtained by using Fire Resistant steel which has a higher strength at high temperatures.

As the actual steel sections used for multi-story buildings are usually heavier than that of the sections used in standard fire tests, the steel temperature is relatively low because of their heat capacities.

This paper presents experimental results of the heat test of steel members coated by an intumescent coating with various heat capacities. By simulating the measured steel temperatures, design diagrams for determining the coating thickness were obtained.

Keywords: fire resistance, coating, steel, high temperature, heat capacity
耐火, 塗料, 鋼材, 高温, 熱容量

1. まえがき

耐火塗料は、高温時（火災時）に主成分であるポリリン酸アンモニウムなどが発泡して断熱性能を発揮する耐火被覆（以下、被覆）である。発泡前は一般の塗料であることから断熱性能はなく、発泡後もロックウールなどと比較して断熱性能が低い被覆であることから、欧州各国で主として要求耐火時間 30 分・60 分用に使用されている。

本研究で使用した耐火塗料はドイツ製（屋内用）で、DIN 4102 に規定する耐火試験により F 30（耐火時間 30 分）の認定を取得した材料である。

筆者らは、この塗料を、一般建築用鋼材（以下、一般鋼）と比較して高温強度が高く鋼材温度 600°C における降伏点が常温時降伏点の規格値の 2/3 以上を有する建築構造用耐火鋼材¹⁾ (Fire Resistant Steel: 以下、FR 鋼) で製作した柱・梁に塗布し、載荷加熱試験（以下、既報の載荷加熱試験）により 1 時間耐火相当の性能が得られることを実験的に明らかにしている^{2), 3)}。この研究は、耐火塗料の断熱性能を FR 鋼で補うことで、長時間の耐火性能を得ることを目的としたものである。

既報の載荷加熱試験の試験条件（試験体の形状、塗膜厚および塗布量）および試験結果を表—1 に、また、試験時間と鋼材温度の関係を図—1（柱）、図—2（梁）に点線で示した（参考）。ここで、耐火時間は、柱・梁が長期荷重を支持できなくなった時点（図中の丸印）における試験時間（加熱時間）としている。なお、加熱はその時点で中止している。

図—1, 2 から明らかなように、耐火塗料は鋼材温度 300°C 近辺で発泡を完了し断熱性能を発揮する。したがって、鋼材に一般鋼を使用すると、JIS A 1304 に規定する許容鋼材温度（平均 350°C）を短時間で上回り、実用的な耐火時間（例えば 1 時間）が得られない。鋼材に FR 鋼を使用すると 1 時間耐火相当の性能が得られるが、塗膜厚は 1.8 mm 以上必要となった。本来、耐火塗料は、一般の被覆材料と比べて美観に優れていることが利点であるから、塗膜は薄膜であることが望ましい。

一方、一般に中高層ビルの鉄骨は、JIS A 1304 に規定する標準試験体（後述、既報の載荷加熱試験でも使用）と比べて断面が大きく、熱容量の効果で同じ加熱条件でも鋼材温度の上昇が少なく、塗膜厚を軽減する、あるい

^{*1} 新日本製鐵株式会社・工博

^{*2} 新日本製鐵株式会社・工修

^{*3} 新日本製鐵株式会社・工博

^{*4} 日本建築総合試験所・工修

^{*5} 日本建築総合試験所

Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.

Japan Building Research Corporation, M. Eng.

Japan Building Research Corporation

表一 載荷加熱試験，認定試験（DIN 4102）の試験条件・試験結果

試験種別		試験体			耐火塗料仕様				試験結果				
		試験番号	断面形状	Hp/A (m ⁻¹)	塗膜厚 (mm)	塗布量 (g/m ² ×層数)			耐火時間 (分)	鋼材温度 (℃)			
						錆止層	発泡層	保護層		下フランジ	ウェブ	上フランジ	平均
載荷加熱試験	柱	PI48	H-295×301×9.9×14.9	153	2.58	150	1600×3	200	76	—	—	—	675
		PI36	H-299×299×9.9×14.9	153	2.33	150	1200×3	200	79	—	—	—	683
	梁	PI36A	H-399×201×7.9×12.0	177	1.80	150	1100+1300+1200	200	61	675	666	671	671
		PI30A	H-399×201×7.9×12.0	177	1.85	150	1000×3	200	60	702	688	654	681
		PI48A	H-400×201×7.9×12.5	173	2.92	150	1600×3	200	70	683	676	608	656
		PI42B	H-400×200×7.9×11.8	179	2.42	150	1400×3	200	65	745	728	711	728
		PI36B	H-400×200×8.6×13.2	168	2.35	150	1300×3	200	74	624	636	606	622
DIN 4102	柱	—	≤160	0.70	200	950	200	30	—				
	梁	—	≤200	0.90	200	650×2	200	30	—

図一 試験時間と鋼材温度の関係（柱載荷加熱試験，試験および解析）

図二 試験時間と鋼材温度の関係（梁載荷加熱試験，試験および解析）

は同じ塗膜厚で耐火時間を伸ばすことができる。

本研究は，耐火塗料の耐火性能に及ぼす鉄骨部材の熱容量の効果を加熱試験（以下，熱容量試験）により実験的に明らかにしたものである⁴⁾。また，熱容量試験および既報の載荷加熱試験における鋼材温度の測定値を一次元差分熱伝導解析⁵⁾によりシミュレートすることで，熱

容量をパラメーターとした設計用の鋼材温度算定図を作成した。

なお，このような研究は，欧州では，すでに BS 476 などで耐火材料の指定の条件として採用されているが，我が国では，ロックウールなどの一般的な被覆材料に関する研究例⁶⁾はあるものの，耐火塗料に関するものはない。

2. 熱容量試験

2.1 試験体

JIS A 1304 では耐火試験における試験体の大きさを，

柱：断面積 120 cm^2 以下，1 辺約 30 cm

梁：断面積 100 cm^2 以下，せい約 40 cm

と規定しており，標準試験体として，

柱：H-300×300×10×15 ($\text{Hp}/\text{A}=146.0 \text{ m}^{-1}$)

梁：H-400×200×8×13 ($\text{Hp}/\text{A}=161.2 \text{ m}^{-1}$)

が使用されている。ここで，

Hp/A ：断面係数 (m^{-1})，

Hp ：断面周長 (m)， A ：断面積 (m^2)

である。断面係数は，加熱面積（断面周長）と断面積との比率で熱容量の指標となる。なお，梁は 3 面加熱（上フランジ側に床があり加熱されない）を想定しており，断面周長にはフランジ上面を含んでいない。

試験体の形状および寸法を表一2，図一3～5 に示す。試験体は，中高層ビルの鉄骨を想定した，箱形断面，H 形断面および中実丸棒の 3 種類である。熱容量は，箱形断面および H 形断面では板厚を，中実丸棒では直径を変化させることで設定した。

箱形断面は柱を想定したもので，板厚は最小 9 mm から最大 90 mm までの 4 種類とした。箱形断面は閉鎖断面（内部が中空）であることから，断面積と比べて周長が小さく熱容量が大きい。

H 形断面は梁を想定したもので，試験体は，標準試験

表—2 熱容量試験 (試験条件および試験結果)

部 位	試 験 体			試 験 結 果							
	H _p /A (m ⁻¹)	断 面 形 状	試験体名称	塗膜厚 (mm)	試験時間(分) vs 鋼材温度(℃)				到達時間(分)		
					30	60	120	180	350℃	600℃	
箱 形 断 面	114.5	□-300×300×9	CB115-O	—	797	894	1,008	1,050	9	16	
			CB115-P(a)	1.8	344	569	898	1,072	31	65	
			CB115-P(b)	2.5	327	543	846	1,079	34	66	
	53.6	□-300×300×20	CB54-O	—	730	917	1,008	1,045	13	23	
			CB54-P(a)	1.8	333	461	722	925	38	89	
			CB54-P(b)	2.5	301	398	662	878	50	104	
	30.1	□-300×300×38	CB30-O	—	588	859	1,012	1,042	18	31	
			CB30-P(a)	1.8	295	371	571	739	54	130	
			CB30-P(b)	2.5	221	306	485	654	78	160	
	15.9	□-300×300×90	CB16-O	—	418	714	981	1,044	25	47	
			CB16-P(a)	1.8	215	308	427	549	85	—	
			—	—	—	—	—	—	—	—	
H 形 断 面	168.9	H-400×200×8×13	BH169-O	—	816	910	1,008	1,046	6	12	
			BH169-P(a)	1.8	424	714	1,014	1,070	21	47	
			BH169-P(b)	2.5	414	664	1,030	1,064	20	51	
	96.9	H-400×200×12×15	BH97-O	—	792	906	1,007	1,050	8	15	
			BH97-P(a)	1.8	380	587	903	1,053	24	63	
			BH97-P(b)	2.5	356	533	846	1,060	28	69	
	69.0	H-400×200×20×32.5	BH69-O	—	759	899	1,003	1,048	10	18	
			BH69-P(a)	1.8	349	487	754	998	31	84	
			BH69-P(b)	2.5	344	469	737	943	31	85	
	中 実 丸 棒	33.3	φ-120	CC33-O	—	595	863	1,000	1,050	18	31
				CC33-P(a)	1.8	287	421	671	845	46	100
		26.7	φ-150	CC27-O	—	538	809	1,002	1,050	20	35
CC27-P(a)				1.8	271	368	587	746	56	125	
20.0		φ-200	CC20-O	—	406	740	995	1,040	27	44	
			CC20-P(a)	1.8	234	323	511	660	70	155	
棒	16.0	φ-250	CC16-O	—	378	702	981	1,036	28	48	
			CC16-P(a)	1.8	205	316	447	584	81	—	

体からロールH形鋼のほぼ最大板厚に相当するサイズまでの3種類とした。

中実丸棒はブレースや柱を想定したもので、最大径は丸棒のほぼロール可能なサイズまでとした。

2.2 耐火塗料

本研究で使用した耐火塗料は、錆止層・発泡層・保護層から構成されている。塗膜厚および塗布量は、既報の載荷加熱試験(表—1)を参考に設定した。すなわち、標準試験体では1時間耐火相当の性能が得られる塗膜厚1.8mm(発泡層塗布量:1200g/m²×3層)を規準とし、さらに長時間の耐火性能を得る目的で塗膜厚2.5mm(発泡層塗布量:1700g/m²×3層)の試験体を追加した。塗膜が厚くなると発泡厚も大きくなり加熱中に脱落するおそれがあることから、2.5mmはほぼ限界の厚さと考えられる。なお、熱容量の大きな試験体では塗膜厚2.5mmは省略した。

錆止層・保護層の塗布量は、各塗膜厚とも既報の載荷加熱試験の試験体と同じとした(表—1)。

なお、ここで設定した塗膜厚は、DIN 4102の認定試験における塗膜厚(表—1, 1.0mm以下)と比べてかなり厚くなっている。これは、DIN 4102の認定条件が、耐火時間30分(F30)であることが主たる要因であるが、鋼種(一般鋼)や耐火時間の判定規準の違い(一般鋼でも載荷加熱試験が実施され、加熱試験で評価する場合も

図—3 熱容量試験の試験体の形状および寸法(箱形断面)

図—4 熱容量試験の試験体の形状および寸法(H形断面)

図—5 熱容量試験の試験体の形状および寸法(中実丸棒)

許容鋼材温度は500°C)から、本研究で設定した塗膜厚と単純に比較することは困難である。

2.3 試験条件

試験条件を表—2に示す。試験体数は、断面形状、熱容量、耐火塗料の有無および塗膜厚をパラメーターとした28体である。

2.4 試験方法

試験は、JIS A 1304に規定する標準加熱曲線に準拠した3時間加熱とした。鋼材温度はK熱電対を用いて測定した。測定位置を図—3～5に示す。

写真—1～3に、箱形断面(CB115-P(a))、H形断面(BH169-P(a))および中実丸棒(CC20-P(a))用試験体の外観を示す。試験体には上下面にセラミックボード(400×400, 厚さ50mm)を耐火接着材により接着して、上下面からの入熱を防止した。また、H形断面試験体は梁を想定したことから、3面加熱とするためフランジの片側にもセラミックボードを装着した。

2.5 試験結果

写真—4～6に、箱形断面(CB115-P(a))、H形断面

写真一 熱容量試験の試験体 (CB 115-P(a) : 試験前)

写真四 熱容量試験の試験体 (CB 115-P(a) : 試験後)

写真二 熱容量試験の試験体 (BH 169-P(a) : 試験前)

写真五 熱容量試験の試験体 (BH 169-P(a) : 試験後)

写真三 熱容量試験の試験体 (CC 20-P(a) : 試験前)

写真六 熱容量試験の試験体 (CC 20-P(a) : 試験後)

(BH 169-P(a)) および中実丸棒 (CC 20-P(a)) 用試験体の試験後の外観を示す。

また、表—2 および図—6～8 に、各試験体の鋼材温度 (平均値) の測定結果を示す。また、表—2 では、試験時間 30 分、60 分、120 分、180 分における鋼材温度と、鋼材温度が 600°C に達した試験時間 (FR 鋼を想定) を示した。なお、一般鋼の許容鋼材温度である 350°C に達した試験時間も参考に示した。

無被覆の試験体では鋼材温度の上昇が著しく、熱容量の最も大きな試験体 CB 16-O, CC 16-O でも、試験時間 60 分における鋼材温度は 714°C, 702°C などといずれも 600°C を大きく上回った。以上の結果から、標準加熱曲線に準拠した加熱を受けると、熱容量の効果が加

わっても無被覆では 1 時間耐火相当の性能は得られなかった。熱容量の効果は耐火塗料の試験体ほど顕著ではないが、熱容量の大きな試験体 (箱形断面、中実丸棒) では鋼材温度に明らかな差が得られた。

耐火塗料の試験体では、既報の載荷加熱試験と同様、耐火塗料が鋼材温度 300°C 近辺で発泡を完了し断熱性能を発揮しており、無被覆の試験体と比べて鋼材温度の上昇速度が遅くなっている。熱容量の効果は無被覆の試験体と比べて明らかで、塗膜厚 1.8 mm および 2.5 mm の試験体とも熱容量ごとに鋼材温度の上昇速度に大きな差が得られた。

塗膜厚 1.8 mm の試験体では、BH 169-P(a) を除いて試験時間 60 分における鋼材温度は 600°C 以下となっ

た。また、熱容量の大きい試験体 CB 30-P(a), CB 16-P(a), CC 27-P(a), CC 20-P(a), CC 16-P(a) では、試験時間 120 分でも鋼材温度は 600°C 以下となった。

また、塗膜厚 2.5 mm の試験体ではさらに鋼材温度の上昇速度は遅くなり、塗膜厚 1.8 mm の試験体と比べて、例えば、箱形断面では試験時間 60 分における鋼材温度が 26~65°C、試験時間 120 分では 52~86°C 低くなった。

以上の結果から、

① 耐火塗料の試験体では熱容量の効果は明らかで、熱

図—6 試験時間と鋼材温度の関係 (箱形断面)

図—7 試験時間と鋼材温度の関係 (H形断面)

図—8 試験時間と鋼材温度の関係 (中実丸棒)

容量ごとに鋼材温度の上昇速度に大きな差が得られた。
② 熱容量が大きい試験体では、鋼材温度が 600°C に達する試験時間が 2 時間を超え、既報の載荷加熱試験で得られた標準試験体における耐火時間を大幅に伸ばすことができた。

3. 熱伝導解析

熱容量試験で得られた試験時間と鋼材温度との関係を一次元差分熱伝導解析によりシミュレートした。この手法は、一次元要素でモデル化された熱伝導方程式を時間軸方向に step by step で解析するもので、時刻歴で変化する雰囲気温度からモデルの始端および終端に設定した熱伝導境界面を通して流入・流出する熱量に対して、各要素の温度を時刻歴で求めることができる。また、その特徴は、

- ① 熱伝導率・比熱の温度依存性
- ② 被覆材内の水分の蒸発潜熱
- ③ モデルの軸方向の断面積変化

が考慮できることである。モデルの軸方向の断面積の変化が考慮できることから、本来二次元で取り扱うべき鉄骨被覆部材のモデルを、図—9 に示すように近似的に一次元に置換することができる。

解析手法は文献⁵⁾と同じで、非定常熱伝導方程式は式 (1) で与えている。

$$[M]\{d\phi/dt\}=[K]\{\phi\}+[F] \cdots \cdots (1)$$

ここで、

$\{\phi\}$: 節点温度ベクトル (°C)

$[M]$: 熱容量マトリックス

$[K]$: 熱伝導マトリックス

$[F]$: 熱流束ベクトル

解析で採用した各熱定数を以下に示す。

- ① 密度: 1800 kg/m³

図—9 鉄骨被覆部材の熱伝導解析のモデル化

図一10 比熱・熱伝導率の温度依存性の仮定（解析用）

図一11 鋼材測定値と解析値の比較（箱形断面：塗膜厚1.8 mm）

図一12 鋼材測定値と解析値の比較（H形断面：塗膜厚1.8 mm）

図一13 鋼材測定値と解析値の比較（中実丸棒：塗膜厚1.8 mm）

図一14 鋼材測定値と解析値の比較（箱形断面：塗膜厚2.5 mm）

図一15 鋼材測定値と解析値の比較（H形断面：塗膜厚2.5 mm）

- ② 熱伝導率：図一10
- ③ 比 熱：図一10
- ④ 含 水 率：0.0

耐火塗料は、一般の被覆材料と異なり発泡によって熱伝導率および比熱が不連続となる。本研究は熱定数そのものの測定を目的としていないことから、熱伝導率および比熱の温度依存性（図一10）は、解析により測定値を

近似できるように仮定したものである。

熱伝導率は、発泡前は一般の塗料程度、発泡後はロックウールなどより多少小さい値とし、また、比熱は耐火塗料の発泡温度近辺で大きな値を設定した。耐火塗料は発泡時に炭酸ガス、アンモニア、水蒸気などのガスを発生することから、本来、蒸発潜熱の影響を考慮する必要があるが、ガスの発生温度や吸熱量の測定は困難であり

本解析では考慮していない。したがって、比熱は、この発生ガスの蒸発潜熱の影響も含めた仮定となっている。なお、塗膜厚は発泡後も発泡前と同じとした。

図一11～15に、鋼材温度の測定値と解析値との比較を示す。解析は試験時間180分までとし、冷却域は対象外とした。解析値は、発泡による鋼材温度上昇の変化も含めて測定値を極めて良く近似している。また、各断面形状、塗膜厚の試験体とも熱容量による鋼材温度の差を良く近似している。

また、既報の载荷加熱試験における鋼材温度の測定値についても、同様に解析値との比較を行った。解析結果を図一1、2に実線で示す。熱容量試験では、塗膜厚を一定(1.8 mm, 2.5 mm)とし試験体の熱容量を変化させたが、载荷加熱試験では、試験体は標準試験体で熱容量がほぼ等しいが塗膜厚が異なっている。

柱の試験体は2体とも塗膜厚がほぼ同じであることから、測定値と解析値とも試験体による差は少ない。解析値は測定値を良く近似している。

梁の試験体は塗膜厚が異なることから、鋼材温度は測定値および解析値とも試験体によって差が生じている。解析値はおおむね測定値と一致しているが、試験体PI 42 Bでは解析値が測定値より低くなっている。これは、加熱中に発泡層の一部が脱落し鋼材温度が高くなったことによると考えられる。

以上、熱容量試験と既報の载荷加熱試験における試験時間と鋼材温度の関係を一次元差分熱伝導解析によりシミュレートすることで、発泡による鋼材温度上昇の変化も含めて、熱容量ごとの鋼材温度の測定値を精度良く近似できることが明らかとなった。また、解析手法や熱定数の温度依存性の仮定がおおむね妥当であることが検証できた。

図一16 設計用鋼材温度算定図 (塗膜厚 1.5 mm)

図一17 設計用鋼材温度算定図 (塗膜厚 2.0 mm)

図一18 設計用鋼材温度算定図 (塗膜厚 2.5 mm)

4. 設計用鋼材温度算定図

以上の結果から、代表的な塗膜厚について熱容量(H_p/A)をパラメーターとした設計用の鋼材温度算定図を、一次元差分熱伝導解析により作成した(図一16～18)。これらの図を使用することで、鉄骨の設計断面から熱容量を考慮した最適な塗膜厚を設定することができる。

5. まとめ

以上、本研究では、耐火塗料の耐火性能に及ぼす鉄骨部材の熱容量の効果を加熱試験により実験的に明らかにした。また、本試験および既報の载荷加熱試験における試験時間と鋼材温度の関係を一次元差分熱伝導解析によ

りシミュレートすることで、設計用の鋼材温度算定図を作成した。

以上の試験および解析により、以下の点が明らかとなった。

- ① 耐火塗料の試験体では熱容量の効果は明らかで、熱容量ごとに鋼材温度の上昇速度に大きな差が得られた。
- ② 熱容量が大きい試験体では、鋼材温度が 600°C に達する試験時間が 2 時間を超え、既報の載荷加熱試験で得られた標準試験体における耐火時間を大幅に伸ばすことができた。
- ③ 熱伝導率、比熱の温度依存性を仮定し、一次元差分熱伝導解析を行うことで、発泡による鋼材温度上昇の変化も含めて、熱容量ごとに、鋼材温度の測定値を精度良く近似できる。

以上の実験および解析の結果から、代表的な塗膜厚について、熱容量をパラメーターとした設計用の鋼材温度の算定図を作成した。これを使用することで、鉄骨の設計断面から熱容量を考慮した最適な塗膜厚が設定できる。

謝 辞

本研究の遂行にご協力いただいた建材試験センターの斎藤勇造氏、西田一郎氏、新日鐵化学の原 基氏に謝意

を表します。

参考文献

- 1) 作本好文, 大橋 守, 計良光一郎, 斎藤 光: 建築構造用耐火鋼材の高温強度特性, 日本建築学会論文報告集, 第 427 号, pp. 107~115, 1991. 9
- 2) 作本好文, 山口種美, 岡田忠義, 吉田正友, 田坂茂樹, 斎藤 光: 建築構造用耐火鋼柱の耐火性能に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 434 号, pp. 149~158, 1992. 4
- 3) 作本好文, 山口種美, 岡田忠義, 斎藤勇造, 西田一郎, 斎藤 光: 建築構造用耐火鋼梁の耐火性能に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 442 号, pp. 147~156, 1992. 12
- 4) 作本好文, 山口種美, 岡田忠義, 吉田正友, 田坂茂樹: 耐火塗料で被覆した耐火鋼柱の耐火性能, GBRC, pp. 21~26, Vol. 17, No. 4, 1992.
- 5) 建築物の総合防火設計法, (財) 国土開発センター, (財) 日本建築センター
- 6) 茂木 武: 耐火試験結果に基づく耐火性能予測法, その 1 回帰伝熱量モデル, その 2 耐火被覆材料 R.W への回帰伝熱量モデルの適用, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 261~268, 1989

(1992 年 12 月 7 日原稿受理, 1993 年 8 月 17 日採用決定)