

# 省力化を目指した鉄骨梁耐火被覆工法の開発

## ～巻付け耐火被覆材の薄肉化～

清水建設株式会社 技術研究所 森 田 武  
高 橋 圭 一  
清 水 和 昭  
近 藤 史 朗  
設計本部

本稿は、清水建設研究報告書第97号（2019年）に掲載されました鉄骨梁耐火被覆工法に関する報告書を抜粋したものです。弊社の巻付け耐火被覆材「マキベエ<sup>®</sup>」高密度仕様品をご使用いただき、清水建設株式会社殿において開発を進められました。なお、解析的検討や実験・施工試験のデータなどは、本稿では割愛しております。

出典元：清水建設研究報告書第97号，2019年12月，p85

[https://www.shimztechnonews.com/tw/sit/report/vol97/pdf/97\\_009.pdf](https://www.shimztechnonews.com/tw/sit/report/vol97/pdf/97_009.pdf)

本開発では、巻付け耐火被覆材を用いた鉄骨梁の耐火被覆工事の省力化を目的として、材料と工法の両面から従来技術の改良を試みた。具体的には、鉄骨梁の熱容量の有効活用、火災時に温度上昇しやすい下フランジの被覆のみの厚肉化、および耐熱ロックウールの高密度化などに関して検討を行った。その結果、耐火性能および省力化の観点から、耐熱ロックウールの高密度化による薄肉化が最も簡易で効果的であることが確認された。本開発により、従来よりも被覆厚さを薄くした2時間耐火および3時間耐火の認定を取得した。

## 1. はじめに

### 1.1 背景と目的

近年、大型事務所ビルなどの鋼構造建築物の建設工事において耐火被覆工事がひっ迫し、工期に影響するようなケースも生じている。その一つの原因として、建設労働者数が減少の一途を辿る中、耐火被覆工事に従事する耐火被覆工も減少を続けていることがあげられる。耐火被覆工事の環境は過酷であることから、一度離職した耐火被覆工の復職を期待することも難しいのが現状である。こ

のような状況を改善するためには、耐火被覆工事の省力化および施工環境の改善に直接寄与する技術開発が必要であると言える。

一般的な大型事務所ビルを想定した場合、耐火被覆工事における柱と梁の比率は15:85程度、大梁と小梁の比率は半々と言われている。そのため、梁の耐火被覆を対象として省力化工法を開発するメリットは大きいと言える。

一方、現行の耐火構造の認定に関わる耐火試験において、鉄骨梁の試験体に用いる鋼材は、H-400×200×8×13mmが標準とされている<sup>1)</sup>。当該断面で要求性能を満足することが確認されて認定を取得すると、当該断面以上の鉄骨梁に対しても同じ被覆厚さを適用することになる。しかし、この標準の断面よりも断面積の大きい鋼材であれば、耐火被覆の厚さを薄くできる可能性が高い。

本開発では、中高層鋼構造建築物を想定した場合に汎用性の高い2時間耐火を主なターゲットとし、耐火被覆材としては、乾式で粉じんの飛散が少なく施工環境がクリーンで、施工が容易な耐熱ロックウール製の巻付け耐火被覆材を対象とすることとした。そして、従来よりも省力化が可能な耐火被覆工法を開発することを目的として、材料と

施工の両面から従来技術の改良を試みた。本報では、目標耐火性能を得るために試行錯誤を繰り返して行った検討とその結果について報告する。

## 1.2 開発の概要

### 1.2.1 2時間耐火鉄骨梁

通常使用されている厚さ40mmの巻付け耐火被覆材(以下、被覆材という)の施工を省力化するため、材料面からは被覆材の薄肉化を検討した。工法面からは、鋼材断面寸法、および加熱時に温度が上昇しやすい下フランジの被覆を2層(以下、下フランジ2層被覆という)とする仕様について検討を行うこととした。具体的には、まず、厚さ20mm・かさ比重0.08の被覆材で被覆した鉄骨梁の既往の耐火試験の情報をもとに、2時間耐火の可能性を解析的に検討した。解析的検討を受けて、厚さ20mmの被覆材に関する実験的検討を行った。その結果、厚さ20mmでは材料的な性能に限界があることが確認されたため、厚さ25mm・かさ比重0.10の被覆材での実験的検討を進め、2時間耐火性能を達成した。

### 1.2.2 3時間耐火鉄骨梁

2時間耐火向けに開発した厚さ25mmの被覆材の適用範囲を拡げること、および通常使用されている厚さ65mmの被覆材よりも被覆厚さを薄くすることを狙って検討を行った。具体的には、2時間耐火の開発を踏まえて、下フランジに25mmの被覆材を1枚張り付けて、その上から厚さ40mm・かさ比重0.10の被覆材を巻き付ける下フランジ2層被覆、および厚さ25mmの被覆材を2層に巻き付ける仕様(以下、2層巻付け被覆という)に関して実験的検討を行った。その結果、下フランジ2層被覆は性能に余裕がなかったが、厚さ25mmの被覆材を用いた2層巻付け被覆により3時間耐火性能を達成した。

## 2. 本開発における耐火性能の評価基準と判断基準

現行の耐火性能試験・評価は文献<sup>1)</sup>に則って行われている。部材に対する加熱温度-時間関係は式(1)で定義されている。本開発における解析

および実験においても式(1)で定義される加熱温度-時間関係を採用している。

$$T = 345\log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

ここに、 $T$ は加熱温度(°C)、 $t$ は経過時間(分)である。

鉄骨梁の耐火性能の評価は非損傷性によって行われており、常温時における長期許容応力度に相当する応力度が断面に生じるように载荷しながら試験した場合に、梁の最大たわみ量および最大たわみ速度が、次の値以下であることとされている<sup>1)</sup>。

$$\text{最大たわみ量 (mm)} : L^2/400d \quad (2)$$

$$\text{最大たわみ速度 (mm/分)} : L^2/9000d \quad (3)$$

ここに、 $L$ は試験体の支点間距離(mm)、 $d$ は試験体の構造断面の圧縮縁から引張り縁までの距離(mm)である。最大たわみ速度は、たわみ量が $L/30$ を超えるまで適用しないことになっている。

一方、本開発では、载荷加熱実験および载荷を行わない加熱実験の双方によって検討を行っており、鉄骨梁下フランジの鋼材最高温度が550°Cになるか否かも耐火性能の判断基準とした。550°Cを判断基準とした理由は、490N/mm<sup>2</sup>級(SM490, SN490)の鋼材は550°Cに達すると、高温降伏強度が長期許容応力度を超え<sup>2)</sup>、鉄骨梁のたわみが塑性変形によって急増する可能性が高まるからである。そのため、非損傷性を満足した仕様であっても、下フランジの鋼材最高温度が550°Cを超えるような場合には、非損傷性と鋼材最高温度の双方から耐火性能の余裕度を判断した。

## 3. 耐火性に関する検討

初回の実験では、H-400×250×12×22mmを鉄骨梁試験体の断面として選定することとした。

### 3.1 2時間耐火・3時間耐火に関する実験的検討

#### 3.1.1 使用した被覆材と試験体断面

被覆材は、耐熱ロックウール製の巻付け耐火被覆

材である。被覆材は、鉄製の留付けピンを被覆材に差し込み、ピン先端を鉄骨梁に溶接して留め付けた。

図1に試験体の断面模式図を示す。2時間耐火試験体の被覆断面形状は、1層巻付け被覆と下フランジ2層被覆の2種類であり、3時間耐火試験体は2層巻付け被覆の1種類である。1層巻付け被覆と2層巻付け被覆は、一般的な箱張り形式の被覆断面形状である。下フランジ2層被覆は、下フランジ下面に1層分の被覆材(以下、下張りという)を留め付けた後、1層巻付け被覆を上張りとして施したものである。下張りは、下フランジの小口を巻き込むように留め付けることによって、下フランジ下面と小口面からの熱侵入を抑制する形とした。

験のいずれかで行った。載荷加熱実験は、2章で述べたとおり、断面に長期許容応力度に相当する応力度が生じるように載荷しながら加熱するものである。具体的には、加熱前に、鉄骨梁試験体の支点間(5400mm)を3等分した2箇所(2箇所)に鉛直荷重を載荷してスパン中央の断面に長期許容曲げモーメントを作用させ、加熱中および加熱後3時間以上の間、当該鉛直荷重を一定に保持した。ただし、試験体が荷重支持能力を失うなどの変状をきたした場合には、その時点で加熱を中止した。

### 3.1.2 実験方法

実験は、載荷加熱実験または載荷しない加熱実

### 3.1.3 試験体の種類

表1に試験体の一覧を示す。実験は表の試験体番号順に進めた。

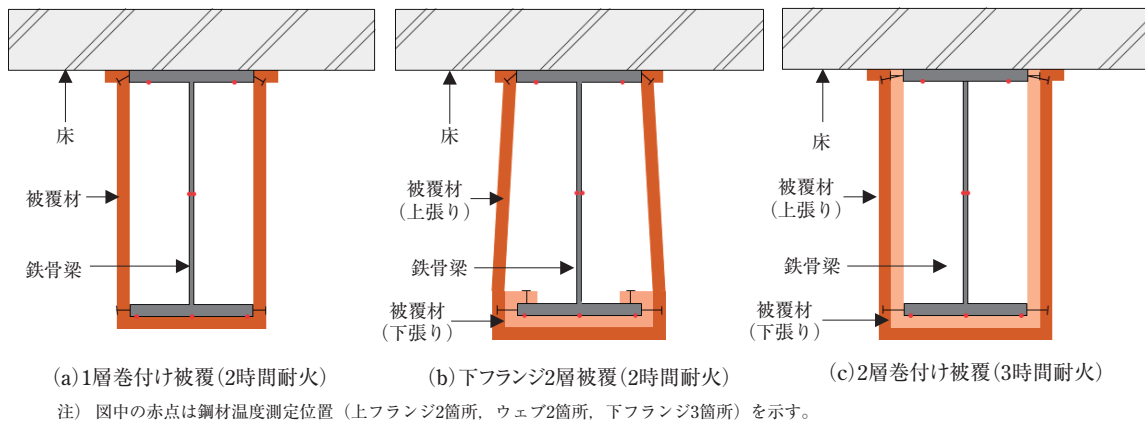


図1 試験体断面模式図

表1 試験体種類 (No.1～No.4: 2時間耐火, No.5: 3時間耐火)

No.	鋼材断面 <sup>*1</sup>	Hp/A (m <sup>-1</sup> )	被覆材			留付け方法		床版 <sup>*4</sup>
			厚さ (mm)	かさ 比重	被覆 断面形状	留付け位置/ピン本数 <sup>*2</sup> (本) /ピン長 (mm)	折返し <sup>*3</sup> (mm)	
1	H-400 × 250 × 12 × 22	68.8	20	0.09	1層巻付け	上/4/15, 下/0	20	ALC
2	H-400 × 250 × 12 × 22	68.8	20	0.10	1層巻付け	上/5/15, 下/3/15	20	ALC
3	H-400 × 200 × 12 × 22	76.5	20	0.10	下フランジ 2層	下張り: 下上/2/15 上張り: 上/5/15, 下/3/32	20	RC
4	H-400 × 200 × 12 × 22	76.5	25	0.10	1層巻付け	上/4/15, 下/0	25	ALC
5	H-400 × 200 × 12 × 19	83.7	25 × 2	0.10	2層巻付け	下張り: 上/3/15 上張り: 上/4/32, 下/3/32	下張り: 0 上張り: 20	RC

※1 鋼種: No.1～No.4 (SM490A), No.5 (SN490B)

※2 [留付け位置] 上: 上フランジ小口, 下: 下フランジ小口, 下上: 下フランジ上面

[留付け方法] ピン2本を用いて、働き幅915mmに対して両端目地から50 ± 5mmの位置で被覆材を留付け、残りのピンを用いて、両端留付け位置の内側をほぼ等間隔になるように被覆材を留付けた。

※3 上フランジ小口と床版の入隅部での被覆材の折返し長さ

※4 ALC: 軽量気泡コンクリート (厚さ100mm, 気乾状態), RC: 鉄筋コンクリート (厚さ100mm, 気乾状態)



### 3.1.4 実験結果および考察

各試験体の実験結果と考察を実験検討の流れに沿って以下に記す。なお、本項に示した鋼材温度、たわみ量およびたわみ速度に関する実験結果は、試験体のスパン中央位置で測定されたものである。

#### 1) 試験体No.1

簡易な1層巻付け被覆での性能確認を行うため、載荷加熱実験を実施した。

たわみが大きくなったため、加熱開始後84分に鉛直荷重を除荷して加熱を継続したが、94分に被覆材が脱落して鋼材温度が急激に上昇したため、加熱を中止した。被覆材の脱落は、加熱にともなって被覆材が脆弱化し、自重を支持できなくなったためと考えられた。

#### 2) 試験体No.2

No.1で被覆材が脱落したことから、耐熱性を上げるために被覆材のかさ比重を0.10とし、かつ留付けピンの本数を増やして、加熱実験を行った。

120分間の加熱中および加熱後の冷却期間中に被覆材の脱落は生じなかった。しかし、鋼材最高温度は、下フランジで645℃、断面平均が629℃となり、耐火性能の判断基準である550℃を大きく超える結果となった。

この結果から、1層巻付け被覆では2時間耐火性能の実現が困難だと判断した。

#### 3) 試験体No.3

No.2の実験結果および解析結果(本稿、割愛)から、下フランジを2層被覆として下フランジの温度上昇を抑制するとともに、梁上の床版をALC版よりも熱容量の大きい鉄筋コンクリート版にして上フランジの温度上昇を抑制することを狙った。鋼材断面をH-400×200×12×22mmとして試験体を製作し、加熱実験を行った。

120分間の加熱中および加熱後の冷却期間中に被覆材の脱落は生じなかった。また、鋼材最高温度は、下フランジで573℃、上フランジで426℃、断面平均が539℃となり、温度上昇抑制対策の効果が認められた。しかし、ウェブの最高温度が614℃となり、下フランジとともに550℃を超えた。一方、最大たわみ量は-80.6mm、最大たわみ速度は-3.4mm/分であり、非損傷性は満足した。このよ

うに非損傷性は満たしたものの、下フランジ2層被覆としても下フランジとウェブの鋼材温度が550℃を超えたことから、厚さ20mm・かさ比重0.10の被覆材では、余裕のある2時間耐火性能を実現することが難しいと判断した。

#### 4) 試験体No.4

No.1～No.3の実験結果を受けて、厚さ25mm・かさ比重0.10の被覆材を用いた1層巻付け被覆によって2時間耐火を狙うことにした。鋼材断面は試験体No.3と同じH-400×200×12×22mmとして試験体を製作し、載荷加熱実験を行った。

120分間の加熱中および加熱後の冷却期間中に被覆材の脱落は生じなかった。鋼材最高温度は、下フランジで534℃、断面平均が502℃であり、判断基準の550℃以下を満足した。また、最大たわみ量は-69.9mm、最大たわみ速度は-2.4mm/分であり、非損傷性も満足した。

#### 5) 試験体No.5

No.4の実験において、厚さ25mm・かさ比重0.10の被覆材が耐熱性能と断熱性能の双方で良好な結果が得られたことから、当該被覆材の汎用性を拡げるために、被覆仕様を2層巻付け被覆として、3時間耐火への適用を検討することにした。試験体の鋼材断面は、認定取得後の汎用性を考慮して、H-400×200×12×22mmよりも断面積の小さいH-400×200×12×19mmとした。No.5の耐火性能は載荷加熱実験によって確認した。

図2に鋼材温度の測定結果を、図3にスパン中央のたわみ量とたわみ速度の測定結果を示し、図4に実験前後の試験体の状況を示す。180分間の加熱中および加熱後の冷却期間中に被覆材の脱落は生じなかった。鋼材最高温度は、下フランジで504℃、ウェブで451℃、断面平均が435℃であり、判断基準の550℃以下を満足した。また、最大たわみ量は-45.1mm、最大たわみ速度は-1.5mm/分であり、非損傷性も満足した。

## 3.2 耐火性に関するまとめ

被覆材の厚さと被覆断面形状に関して検討を行った結果、厚さ25mm・かさ比重0.10の被覆材を使用した1層巻付け被覆で2時間耐火性能が達成す

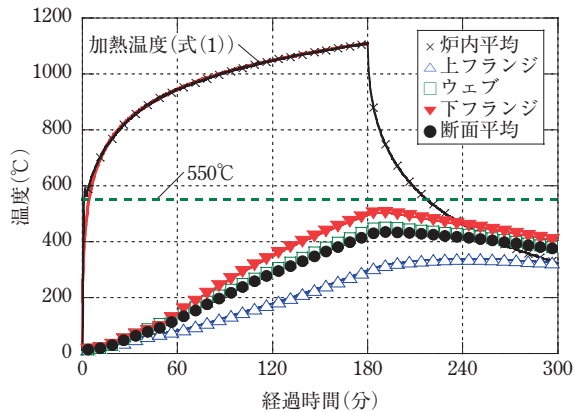


図2 試験体No.5：鋼材温度測定結果

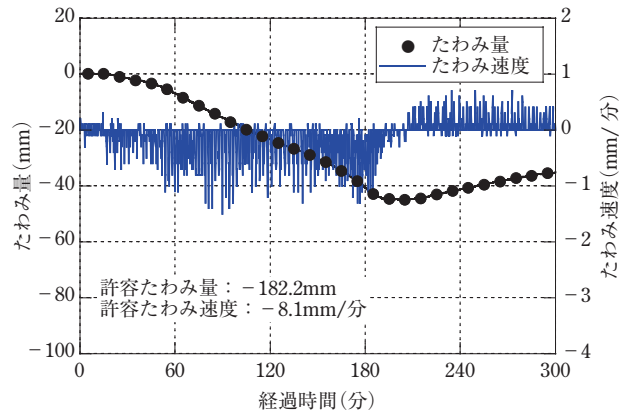


図3 試験体No.5：たわみ量・たわみ速度測定結果

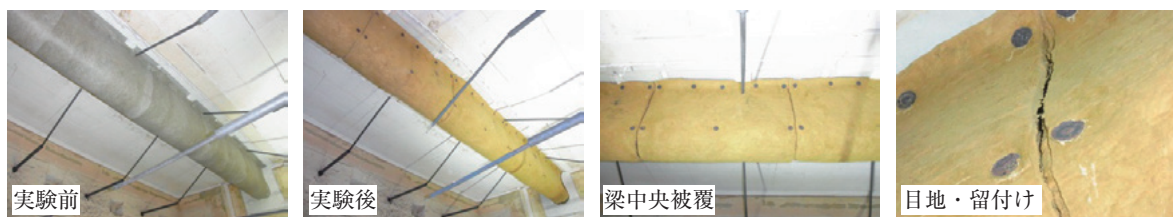


図4 試験体No.5：実験前後の状況

ることができた。また、厚さ25mm・かさ比重0.10の被覆材を使用した2層巻付け被覆で3時間耐火性能を達成することができた。

## 4. 施工性の検討

### 4.1 施工試験による作業効率の検討

#### 4.1.1 試験概要

開発した厚さ25mm・かさ比重0.10の被覆材の施工性を確認するため、施工中の鋼構造建築物において施工試験を行った。本試験では、比較のために、厚さ40mm・かさ比重0.90の被覆材についても施工試験を行った。

#### 4.1.2 試験方法

施工試験に供した鉄骨梁（大梁）の鋼材断面はWH-900×400×12×25mmである。被覆材1種類あたりの施工範囲は長さ約5250mmであり、小梁との接合部が1箇所含まれている。この施工範囲に幅925mmの被覆材5枚を箱張り形状の1層巻付け被覆で施工することとした。本試験では、作業に要する時間を計測し、施工性に関する分析を行った。

### 4.1.3 試験結果および考察

試験結果を表2に示す。

本施工試験の結果から、厚さ40mmの被覆材に対する厚さ25mmの被覆材の施工時間は、一般部で5%程度、接合部で10%程度短縮できることが把握された。また、作業台車の移動・昇降および被覆材の積込みに要する時間には両者の間に差はないと判断される。

### 4.2 運搬効率に関する検討

被覆材は製作工場でロール状に梱包され被覆材面積に換算すると、厚さ25mmでは7.3m<sup>2</sup>となり、40mmでは5.5m<sup>2</sup>となる。運搬車両1台当りに積み込めるロール数は厚さ25mmと40mmで同数であることから、厚さ25mmの運搬効率は40mmに比べて1.3倍程度向上する。

### 4.3 施工性に関するまとめ

今回の施工試験では、5枚分の被覆材の巻付け作業を行って施工時間を計測したが、実際の施工では、施工数量が本施工試験よりも圧倒的に多くなる。そのため、施工時間や運搬効率の面から、

表2 施工試験結果

被覆材寸法 厚さ/幅 (mm)	かさ 比重	留付け位置/ ピン本数 <sup>※1</sup> (本) / ピン長 (mm)	施工時間 <sup>※2</sup> 上段：計測値 (秒), 下段：施工時間比率 (%)				被覆材1枚当たりの 施工時間 (秒)	
			一般部	接合部	その他	合計	一般部	接合部
25/925	0.10	上/4/15, 下/3/15	370	405	280	1055	93	405
			35	38	27	100		
40/925	0.09	上/4/32, 下/3/32	390	450	270	1110	98	450
			35	41	24	100		

※1 [留付け位置] 上：上フランジ小口, 下：下フランジ小口

[留付け方法] ピン2本を用いて、働き幅915mmに対して両端目地から50±5mmの位置で被覆材を留付け、残りの本数ピンを用いて、両端留付け位置の内側をほぼ等間隔になるように被覆材を留付けた。

※2 一般部：付帯物のない梁部分, 接合部：小梁接合部, その他：作業台車の移動・昇降および被覆材の積込み

耐火被覆工事の省力化における、厚さ25mmの被覆材のメリットがさらに大きくなることが期待される。

## 5. おわりに

鉄骨梁の耐火被覆工事の省力化を目的として、解析および実験による検討を行い、材料と工法の両面から従来技術の改良を試みた。その結果、厚さ25mm・かさ比重0.10の耐熱ロックウール製巻付け耐火被覆材を用いて、2時間耐火では1層巻付け被覆、3時間耐火では2層巻付け被覆を行うことにより、従来よりも薄い被覆厚さで所要の耐火性能を満足することができた。そして、これらの成果をもとに、2時間および3時間の耐火構造認定を取得した。

また、耐火被覆工事の省力化については、3時間耐火の2層巻付け被覆に関する検討は今後の課

題であるが、2時間耐火の1層巻付け被覆に関しては従来よりも作業が省力化され、かつ運搬効率も上がることが確認できた。

耐火被覆の薄肉化は、耐火被覆工の負担を減らすだけでなく、梁貫通孔の有効径の拡大や、天井高さの確保あるいは天井内の有効スペースの確保にも有効であり、本開発成果が耐火被覆工事において広く適用されることを期待したい。

## 謝 辞

本開発は、ニチアス株式会社と共同で実施した。ご協力いただいた関係各位に対して、ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば 一般財団法人日本建築総合試験所：防耐火性能試験・評価業務方法書 (8A-103-01 (Rev.2.3)), 2016
- 2) 一般社団法人日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック, 2017