

ハイブリッド耐火被覆工法の開発

Development of Hybrid Method of Fire-resistant Coating

抱 憲 誓 宮 本 圭 一 金 崎 俊 造¹⁾

要 約

建設現場での労務不足は深刻で、特に首都圏では、鉄骨造の超高層建築物の増加に伴い、廉価な耐火被覆として多く使用されている半湿式ロックウール（以下 RW）吹付工事が増加している。このような背景のもと、生産性向上を目指した新たな施工方法の開発が求められており、一部を機械で施工できるハイブリッド耐火被覆工法を開発した。ハイブリッド耐火被覆工法では、機械施工が困難な鉄骨梁下フランジを RW フェルト巻きで、容易なウェブおよび上フランジを半湿式吹付 RW で機械施工する。

ハイブリッド耐火被覆工法の開発では、当社技術研究所において仕様検討のための予備試験を実施した後、第三者機関において性能評価試験を受験し全て合格した。本報では、二つのシリーズの試験結果についてまとめ、1, 2, 3 時間耐火性能を有する吹付 RW 厚および RW フェルト厚の各仕様について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 予備試験（技術研究所）
- III. 性能評価試験（建材試験センター）
- IV. おわりに

Table 1 従来工法の作業分析結果

(Analysis Results of Conventional Works)

作業内容	段取り	待ち	吹付	鍍押え	作業車移動	片付清掃
比率 (人・時間)	13%	1%	34%	34%	9%	9%

I. はじめに

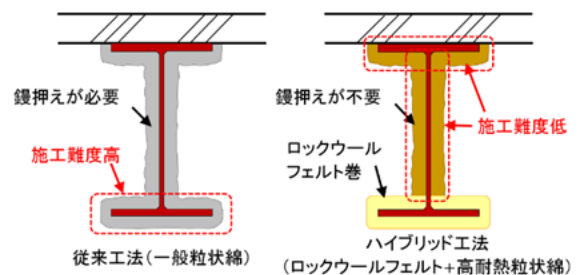
超高層建築では、仕様規定の場合、3 時間耐火を要求される範囲が大部分となり、耐火被覆量が多くなる。廉価な耐火被覆として一般粒状綿を用いた半湿式 RW 吹付工法（従来工法）が多く使われている¹⁾が、労務不足が深刻で、生産性を向上させた新たな施工方法の開発が望まれている。そこで、鉄骨造の梁を対象としたハイブリッド耐火被覆工法を開発し、国土交通大臣認定を取得するため、性能評価試験を受験したので報告する。

1. 耐火被覆工事の作業分析

ヒアリングに基づき従来工法の耐火被覆工事の作業分析を行った結果を Table 1 に示す。吹付と鍍押え作業に約 7 割の労力を費やしていることがわかった。このためハイブリッド工法では、機械を用いることで吹付作業を省力化するとともに、鍍押え作業を不要とすることで、生産性向上を図ることとした。ハイブリッド工法では従事人工が 2/3 となる。

2. ハイブリッド工法の概要

従来工法とハイブリッド工法の概念図を Fig. 1 に示す。従来工法では上下フランジとウェブに RW を吹付けた後かさ比重を確保するため鍍押えが必要であったが、ハイブリッド工法では下フランジを RW フェルトで巻き付けた後、ウェブと上フランジを高耐熱粒状綿吹付とする複合工法とした。

Fig.1 従来工法とハイブリッド工法の概念図
(Conceptual Diagram of Conventional and Hybrid Method)

1) 建築管理本部 Building Construction Management Division

キーワード: 鉄骨造, 梁, 火災, 耐火被覆, ハイブリッド工法

Keywords: steel frame, beam, fire, fireproof covering, hybrid construction method

高耐熱粒状綿は、通常の半湿式吹付 RW 耐火被覆に使用される粒状綿 (JIS A 9504) と比較して、熱収縮率が小さく、繊維径が細く、繊維長が短いため、材料自体の密度が高い。このため、吹付とスラリー掛けのみで高いかさ比重が確保され、耐火被覆厚を小さくできるとともに、従来工法では必要であった鏝押えの工程を省略できる特徴がある。粒状綿の外観の比較を Photo 1 に示す。高耐熱粒状綿は RW 粒状綿に比べて酸化鉄の含有率が高いため、黄土色である。



RW 粒状綿 (従来品) 高耐熱粒状綿 (ハイブリッド用)

Photo 1 粒状綿の比較

(Comparison of Conventional and High Resistant Wools)

II. 予備試験 (技術研究所)

ハイブリッド耐火被覆工法の開発に際し、性能評価試験の仕様決定に向けて技術研究所の耐火炉 (Photo 2) において事前の耐火試験を実施した。耐火試験では、载荷を行わずに ISO834 曲線に従い 1 時間、2 時間、3 時間の加熱を行った。鉄骨部材に設置した温度センサー (熱電対) の指示値が、加熱終了後も鉄骨部材が健全な状態であると判断される一つの指標である 550°C に達しないことをクライテリアとして試験を実施した。鉄骨部材 (H400×200×8×13 の断面で長さ 5000 mm の H 型鋼) の下フランジに 3 点、ウェブに 1 点、上フランジに 2 点、1 断面に計 8 点の熱電対を設置した。

1. 1 時間耐火性能評価

1 時間耐火仕様の耐火被覆は、下フランジを覆う RW フェルトを 20 mm 厚、ウェブおよび上フランジを覆う高耐熱粒状綿吹付を 20 mm 厚とした。RW フェルトと高耐熱粒状綿の境界の仕様の違いによる耐火性能の違いを確認するために、下フランジの RW フェルトの巻き方で 4 種類を試した (Fig. 2)。

(A) はウェブの下端に隙間を設けて RW フェルトを巻き付けつける仕様、(B) は下フランジの端部で RW フェルトを立ち上げて高耐熱粒状綿を吹き付ける仕様、(C) はウェブまで RW フェルトを立ち上げる仕様、(D) はウェブの下端に隙間を設けず RW フェルトを巻き付ける仕様とした。

試験結果の一例 (仕様 (D)) を Fig. 3 に示す。部材温度は、加熱終了後に若干上昇するものの、最高温度 526°C に達した後緩やかに低下した。この傾向は仕様 (A) ~ 仕様 (D) で同様であり、いずれのケースでも下フランジの部材温度が 550°C に達することはなく、上フランジの部材温度に関しても同様の結果となった。このことから、高耐熱粒状綿と RW フェルトの境界において、試験中に隙間が生じて熱が侵入す

る可能性は小さいことがわかった。そこで、1, 2, 3 時間耐火仕様とも (D) を選定した。また、RW フェルトと高耐熱粒状綿は、厚さ 20 mm で 1 時間耐火性能を有すると推測された。



Photo 2 耐火試験炉 (技術研究所)
(Fire Resistant Furnace)

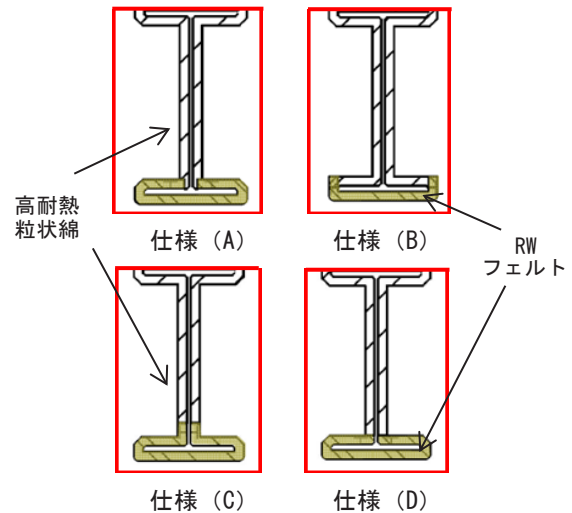


Fig. 2 試験体断面
(Section of Specimens)

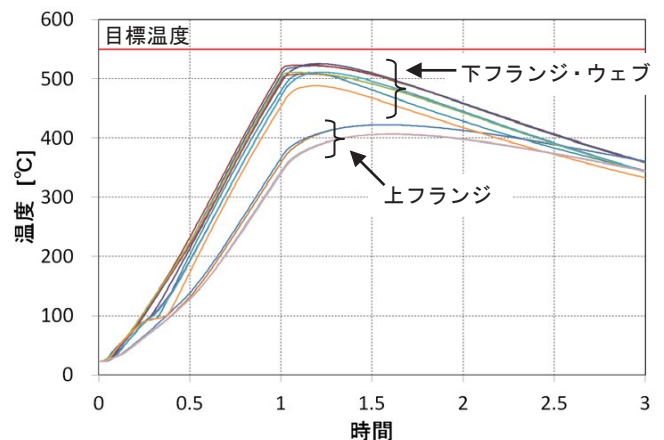


Fig. 3 部材温度の経時変化 (1 時間耐火, 仕様 (D))
(Time Histories of Specimen Temperature,
One Hour Fireproof, Specification D)

2. 2時間耐火性能評価

2時間耐火仕様の耐火被覆は、下フランジを覆うRWフェルトを40mm厚、ウェブおよび上フランジを覆う高耐熱粒状綿吹付を35mm厚とした。試験結果をFig.4に示す。下フランジの鋼材温度は約1.5時間でクライテリアの550℃を超え、2時間加熱終了直後に700℃に達した。この原因は、Photo 3に示すように、RWフェルトの熱収縮に起因していると考えられる。RWフェルトは長時間の加熱により熱収縮し、ジョイント部分に隙間が空き、炉内の高温の熱気流が下フランジを直に温め、高温になったと考えられる。

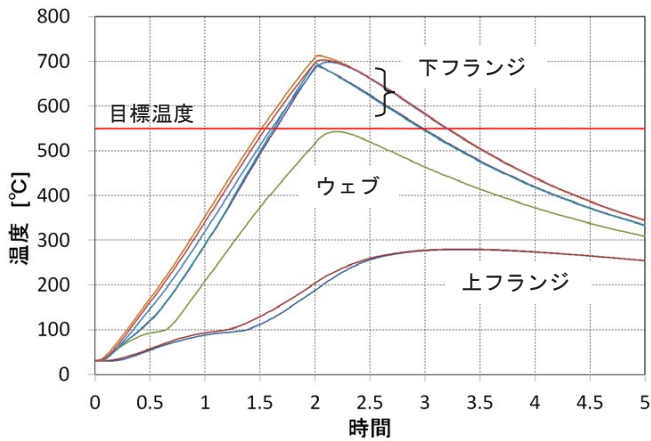


Fig.4 部材温度の経時変化 (2時間耐火仕様)
(Time Histories of Specimen Temperature, Two Hour Fireproof)



Photo 3 試験後のRWフェルトの開き
(Rock Wool Felt After Test)

3. 3時間耐火性能評価

3時間耐火仕様の耐火被覆は、下フランジを覆うRWフェルトを65mm厚、ウェブおよび上フランジを覆う高耐熱粒状綿吹付を55mm厚とした。試験結果をFig.5に示す。2時間耐火の試験結果と同様に、RWフェルトは熱収縮した。この結果、3時間加熱終了直後に、下フランジの温度は750℃を超え、ウェブの温度も600℃を超えた。2時間耐火の試験結果と同様にRWフェルトの熱収縮によるジョイント部の開きが大きくなった (Photo 4) ためである。

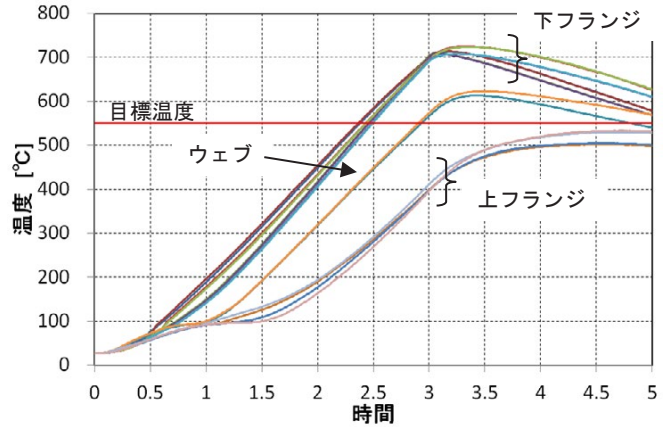


Fig.5 部材温度の経時変化 (3時間耐火仕様)
(Time Histories of Specimen Temperature, Three Hour Fireproof)



Photo 4 試験後のRWフェルトの開き
(Rock Wool Felt After Test)

4. ジョイントの改良

仕様検討を目的とした予備試験の結果より、RWフェルトのジョイント部において熱収縮への対応が重要なことがわかった。そこで、熱収縮が生じてジョイント部の鋼材が露出しないように、Photo 5に示すように召し合わせ型のジョイントを構築した。また、RWフェルトを拘束するために止付けピンの数を増やし、RWフェルトを65mm厚、高耐熱粒状綿吹付を60mm厚の仕様で3時間耐火仕様の再試験を行った。



Photo 5 改良型のRWフェルト
(Improved Rock Wool Felt)

試験結果を Fig.6 に示す。下フランジの鋼材温度は最高で 475°Cにおさまった。これは Photo 6 に示すように、下フランジの RW フェルトの熱収縮をジョイントで最外層のみに抑え込め、鋼材が露出しなかったためと考えられる。

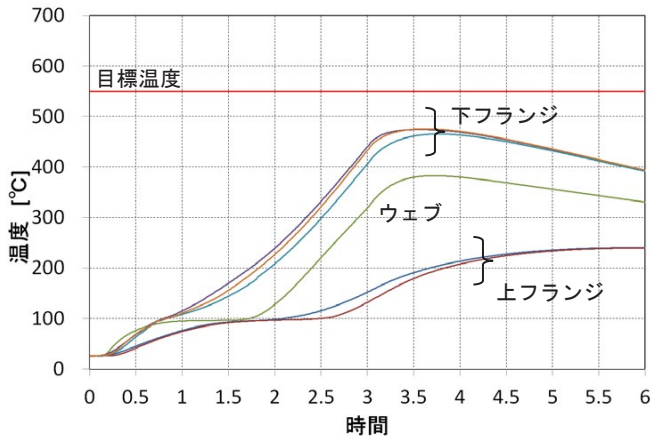


Fig.6 部材温度の経時変化 (3時間耐火仕様)
(Time Histories of Specimen Temperature, Three Hour Fireproof)



Photo 6 試験後の RW フェルト
(Rock Wool Felt After Test)

Ⅲ. 性能評価試験 (建材試験センター)

技術研究所における予備試験結果に基づき、(一財) 建材試験センターにおいて性能評価試験を受験した。建材試験センターの試験では、文献²⁾に示されている荷重加熱試験を実施した。判定条件としては、試験体の最大たわみ量およびたわみ速度が規定値以下であることが求められる。

1. 1時間耐火性能評価

1時間耐火仕様の耐火被覆は、下フランジを覆う RW フェルトを 25 mm厚、ウェブおよび上フランジを覆う高耐熱粒状綿吹付を 20 mm厚とした。性能評価試験では、試験に用いた鋼材寸法以上の鋼材寸法が許容されるため、H148×100×6×9mm の鋼材を用いて試験に臨んだ。そのため、下フランジを覆う RW フェルトの厚みを 20mm から 25mm とした。試験体の断面図を Fig.7 に示す。

試験体に長期許容応力度に相当する荷重 (P=30.9kN) を支点間距離 L=5100mm で荷重しながら加熱した部材温度の経

時変化を Fig.8 に、たわみの経時変化を Fig.9 に示す。部材温度は下フランジで最高約 520°Cにとどまり、梁中央部のたわみも規定値 439mm に対して最大で約 80mm となり試験に合格した。下フランジの部材温度とたわみは、加熱停止から約 10 分程度で最大値に到達しており、その後は両者ともに戻っていることがわかる。

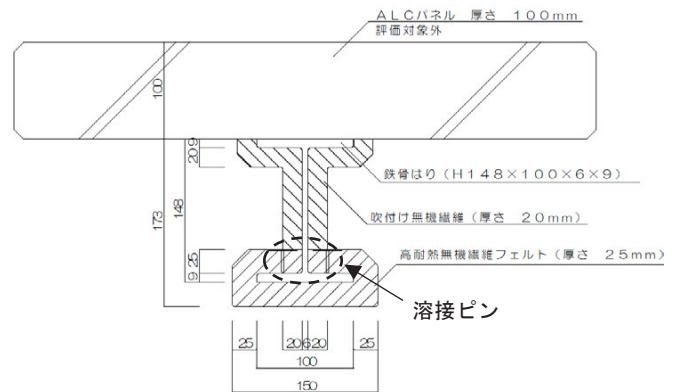


Fig.7 部材断面 (1時間耐火仕様)
(Section of Specimen, One Hour Fireproof)

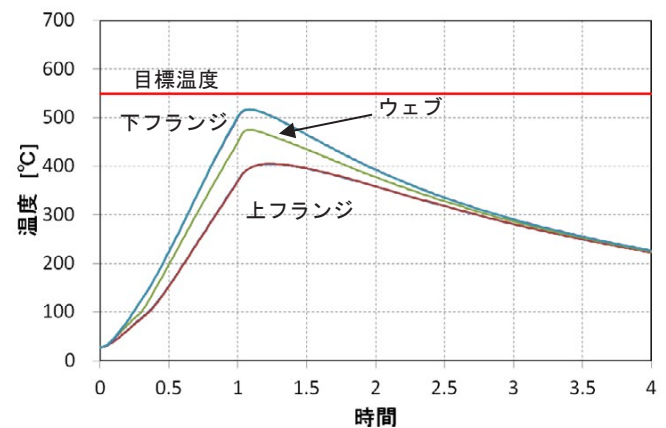


Fig.8 部材温度の経時変化 (1時間耐火仕様)
(Time Histories of Specimen Temperature, One Hour Fireproof)

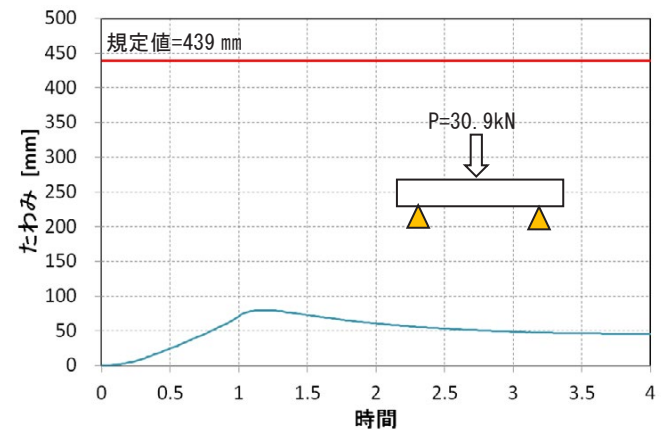


Fig.9 たわみの経時変化 (1時間耐火仕様)
(Time History of Deflection, One Hour Fireproof)

2. 2時間耐火性能

2時間耐火仕様の耐火被覆は、下フランジを覆うRWフェルトを50mm厚、ウェブおよび上フランジを覆う高耐熱粒状綿吹付を40mm厚とした。技術研究所で実施した予備試験では、ジョイント部分の影響で鋼材温度が700℃を超えたため、RWフェルトの昇温を抑えて熱収縮を小さくするためにRWフェルトおよび高耐熱粒状綿吹付厚を増し、ジョイントのピン数も増やした。性能評価試験では、鋼材の寸法を広く抑えるために、H396×196×9×12mmの鋼材で試験に臨んだ。

試験体に長期許容応力度に相当する荷重(P=272kN)を載荷しながら加熱した部材温度の経時変化をFig.10に、たわみの経時変化をFig.11に示す。部材温度は下フランジで最高約570℃となり目標温度を若干超過する結果となったが、梁中央部のたわみは規定値164mmに対して最大で約55mmと規定値を下回り、試験に合格した。

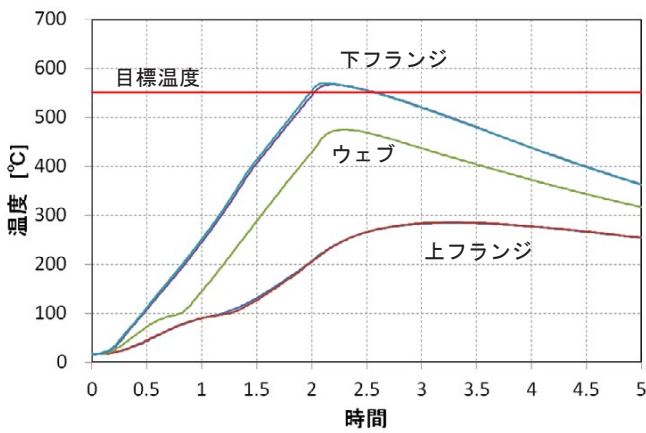


Fig.10 部材温度の経時変化 (2時間耐火仕様)
(Time Histories of Specimen Temperature, Two Hour Fireproof)

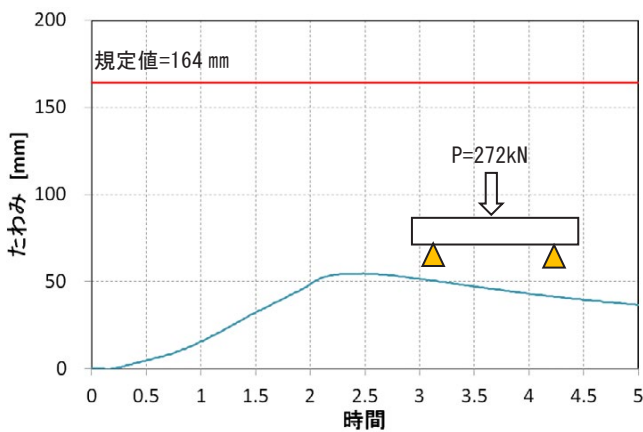


Fig.11 たわみの経時変化 (2時間耐火仕様)
(Time Histories of Deflection, Two Hour Fireproof)

3. 3時間耐火性能

3時間耐火仕様の耐火被覆は、下フランジを覆うRWフェルトを75mm厚、高耐熱粒状綿吹付を60mm厚とした。2時間耐火仕様と同様、H396×196×9×12mmの鋼材を用いた。

試験体に長期許容応力度に相当する荷重(P=272kN)を載荷しながら加熱した部材温度の経時変化をFig.12に、たわみの経時変化をFig.13に示す(温度センサー⑦は不具合だったため、削除した)。部材温度は下フランジで最高約620℃となり、2時間耐火仕様の結果よりもさらに高温となったものの、梁中央部のたわみは規定値164mmに対して最大で約75mmとなり試験に合格した。

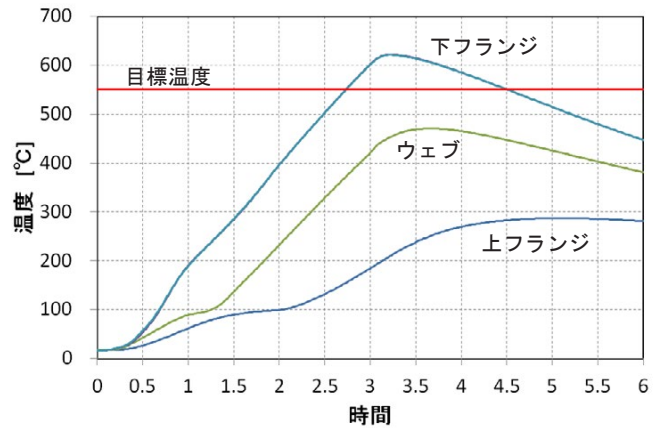


Fig.12 部材温度の経時変化 (3時間耐火仕様)
(Time Histories of Specimen Temperature, Three Hour Fireproof)

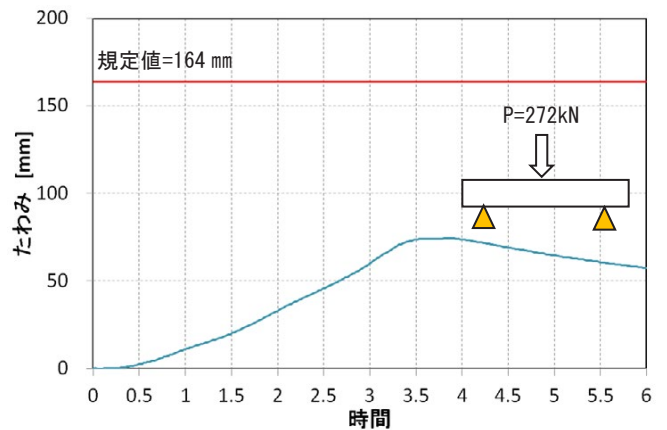


Fig.13 たわみの経時変化 (3時間耐火仕様)
(Time Histories of Deflection, Three Hour Fireproof)



Photo 7 試験後のロックウールフェルト
(Rock Wool Felt After Test)

最高温度は、下フランジで約 620℃まで昇温したが、ウェブで約 480℃、上フランジで 290℃に抑えられたことから、たわみ量が規定値内におさまったと考えられる。下フランジの温度が上がりすぎた要因は、下フランジのジョイント部の隙間と推測される。試験後の試験体は Photo 7 に示すように、ジョイント部をピン増して止めつけたものの、若干隙間が生じているため、高温の熱気流が下フランジに侵入したと考えられる。以上のことから、RW フェルトを使用する場合にはジョイントの対策と着実な施工が重要であると考えられる。性能評価試験は、1, 2, 3 時間耐火全てに合格した。

IV. おわりに

鉄骨造の梁を対象としたハイブリッド耐火被覆工法を開発した。ハイブリッド耐火被覆工法では、施工が困難な鉄骨梁の下フランジを RW フェルト巻きで施工し、ウェブおよび上フランジを半湿式吹付 RW で機械施工する。

国土交通大臣認定の取得を目指し、技研において予備試験を行って仕様を検討するとともに、その知見を基に性能評価試験に臨んだ。予備試験で得られた知見としては、

- ①それぞれの要求耐火時間に対して必要な RW フェルト厚、高耐熱粒状綿厚を確認した。
- ②RW フェルトは高温に曝されると熱収縮する。
- ③RW フェルトのジョイント部の対応が重要であり、ジョイント部で大きな隙間が生じる場合には下フランジが直に加熱を受けて高温となる。

予備試験の知見に基づき対策を講じた仕様で性能評価試験を受験し、1, 2, 3 時間耐火試験全てに合格した。各耐火

時間における仕様を Table 2 に示す。

以上より、生産性向上を目指した新たな施工方法として、一部を半自動で施工できるハイブリッド耐火被覆工法を開発した。年内には国土交通大臣認定を取得予定であり、実適用に向けて吹付機械の実用化を進めていく。

Table 2 ハイブリッド耐火被覆工法の仕様一覧
(Specification Lists of Hybrid Fire-resistant Coating Method)

	RW フェルト 厚み [mm]	高耐熱粒状綿 厚み [mm]
1 時間	25	20
2 時間	50	40
3 時間	75	60

謝 辞

本研究は、鹿島建設 (株)、鹿島フィット (株)、(株) 万象ホールディングスの共同研究として実施した。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会；構造材料の耐火性ガイドブック，丸善，2017.
- 2) 一般財団法人建材試験センター；設計施工・技術開発・品質管理に携わる技術者のための建築材料・部材の試験評価技術，彰国社，2014.

Development of Hybrid Method of Fire-resistant Coating

Norichika Kakae, Keiichi Miyamoto and Shunzou Kanasaki¹⁾

In metropolitan areas in recent years, increasing numbers of skyscrapers are being constructed. As buildings become taller, the required amount of fire-resistant coating increases. Furthermore, there is a serious shortage of labor at construction sites, especially for the work of semi-wet sprayed rock wool ("RW") which is often used as an inexpensive refractory coating. Therefore, a construction method with higher productivity is required, and so a hybrid fire-resistant coating method that can be mechanized was developed. In this method, the lower flange of a steel beam, which is difficult to install, is wound with RW felt, and semi-wet sprayed RW is applied on the web and the upper flange by a machine.

In developing the hybrid refractory coating method, the specifications were examined at Kajima Technical Research Institute, before performance evaluation tests were conducted at a public test institution; all the tests were passed. We summarize the results of the fire test and performance evaluation test of the specification review and report on the specifications having fire resistance for 1, 2, and 3 hours.