

薄型巻付け耐火被覆材と工法の開発

城島 裕介*¹・若山 恵英*¹・依田 篤士*¹

Keywords : refractory coating, dry, slim, no fire

耐火被覆, 乾式, 薄型, 無火気

1. はじめに

現在, 耐火被覆工事の7割は吹付耐火被覆で行われている。吹付耐火被覆は粉塵の舞う中で作業を行うため防護服やゴーグル, マスクの着用が必須であり, 作業エリアの養生や清掃も必要となる。このような作業環境のため, 作業員数・入職者数は減少傾向で, この状況は今後も続くことが推測できる。粉塵等の少ない巻付け耐火被覆も使用されているが施工面積は現在2割程度にとどまっている。

当開発では耐火被覆工事の作業環境・効率及び安全性の向上を目指し, 薄型の巻付け耐火被覆材と現場での火気作業が不要な施工方法を開発している。これまでに試作した被覆材や施工に用いる金物を用いた加熱実験では被覆材が割れる, 金物が外れるといった課題があり, 性能を満足する結果を得られなかった。本報では被覆材, 施工方法で上がった課題に対する対策を行い, 改良した被覆材及び施工方法で製作した試験体の載荷加熱実験を実施した。実験の結果から改良した被覆材および施工方法の有効性を検証する。

2. これまでの開発

本開発は吹付作業を無くすことで作業環境を向上させるという観点から同材料でのボード材の開発に始まった。吹付耐火被覆と同材料で作製したボード材は材料強度を高めるためセメントの配合が多くなり, 作業性と加工性が低い材料となった。加えて, 加熱による収縮が大きいいため, 吹付耐火被覆と同材料のボード材の開発を中止しマット状の乾式材の開発に切り替えた。

既存の耐火被覆材との差別化と作業効率の向上を目指すべく, 薄型の乾式耐火被覆材の開発を実施した。通常時は薄型だが, 火災時に膨張することで遮熱性を発現するロックウールマットを試作した。ロックウールが800℃付近で収縮することや材料の膨張による強度の低下などの課題を解決するため, 性能を満たす材料となるまで様々な組み合わせで要素実験を実施した。

施工方法についても1000℃近い加熱を受けても材料を固定可能であることを確認すべく試作と実験を実施した。2020年の開発当初から2022年のまでの開発の流れを表-1に示す。

表-1 開発の流れ

Table 1 Flow of development

	材料	施工方法	課題
2020年	吹付ロックウールボード	湿式	重量・加工性、収縮率が大きい
	ロックウールマット	湿式	耐熱ロックウールの入手が困難
	ロックウール不織布積層	湿式	材料の一体化が困難
2021年	ロックウール抄紙(手作り)	湿式	耐熱性が不足
	ロックウールマット(抄紙・膨張)	湿式	加熱による収縮
2022年	セラミックウールマット(抄紙・膨張) ³ 章の加熱実験に使用	湿式	加熱膨張による出隅部の割れ
	セラミックウールマット(抄紙・低膨張) ⁴ 章の載荷加熱実験①に使用	湿式・乾式	施工方法による脱落

* 1 技術センター 先進技術開発部 次世代建設技術開発室

3. 耐火被覆材の改良

開発した耐火被覆材の加熱実験結果をもとに課題とその改良方法を示す。

3.1 加熱実験の試験体構成と結果

遮熱性確認の実験結果をもとに性能が期待できる被覆材の材料構成を選定し、工場で実機試作を行った。被覆材の仕様は 1000mm 幅のロール材で厚さ 10mm のマット材、重量は 1.5kg/m² である。材料構成は主材にセラミックウール、膨張材として膨張黒鉛を配合している。

実大梁(H-390×300×10×16 SN490 材)に開発した被覆材を施工し 1 時間の加熱実験を実施した。加熱温度は標準加熱温度曲線(ISO834)に準拠した。

被覆材施工後に水平炉に設置した試験体を写真-1 に示す。写真-1 は試験体を下から見上げた状態である。試験体は図-1 のように H 鋼の床面を除く 3 面を覆うように被覆材を施工した。



写真-1 加熱前の試験体
Photo.1 Specimen before heating

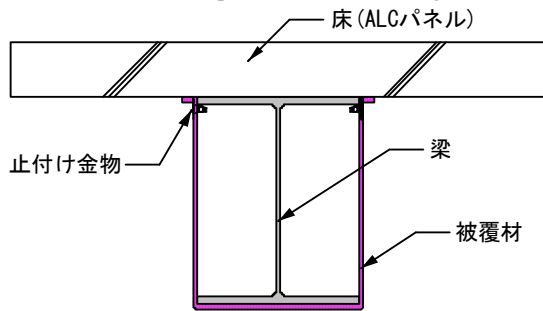


図-1 試験体断面図
Fig.1 Cross section of test specimen

加熱後の試験体を写真-2 に示す。被覆材は加熱により膨張し、加熱前の厚さ $t=10\text{mm}$ から加熱後は厚さ 20~25mm となった。被覆材の出隅部に亀裂が入り、写真-2 の様に試験体下面部分の被覆材が脱落した。また、施工に使用した金物も熱の影響を受け変形した。



写真-2 加熱後の試験体
Photo.2 specimen after heating

3.2 脱落原因の考察と改良

被覆材の脱落は加熱時の膨張による出隅部の割れと施工時の引っ張りによる施工時の割れが考えられる。そのため、被覆材の改善点と改善方法は次のようであると考察した。

改善点①：加熱時の膨張を低減する。

改善方法：膨張黒鉛の配合を小さくし加熱時の膨張を低減する

改善点②：施工時のひび割れ防止

改善方法：表面に不織布を設けて施工時にかかる引っ張り力を負担する

上記の改善を行い小型壁炉で被覆材を出隅部を模して施工した試験体で要素実験を実施した。実験の結果、試験体施工時もひび割れはなく加熱終了後の試験体の出隅部にも亀裂はできなかった。

4. 施工方法の改良

試験体を 3 章にて改良した被覆材と開発した施工方法で製作し、載荷加熱実験を実施した。実験結果をもとに施工方法の課題とその改良方法を示す。

4.1 載荷加熱実験①

3 章にて改良した被覆材を施工した試験体で載荷加熱実験を実施した。施工には線材をフォーミング加工したピン型の止付け金物を使用した。受金物には鉄筋を使用した。上フランジに異形鉄筋を受金物として溶接し、止付け金物を上フランジと受金物の隙間に差し込む。本施工方法で被覆材を施工した状況を写真-3 に示す。

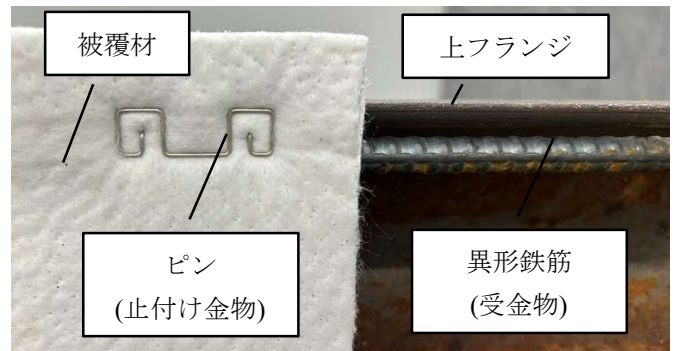


写真-3 施工方法
Photo.3 Construction method

3 章で実施した加熱実験の鋼材と同断面の鉄骨梁に写真-3 の施工方法で被覆材を施工した。被覆材を施工した試験体は写真-4 のようである。写真-4 の試験体で 1 時間の載荷加熱実験を行った。加熱については 3.1 同様に行った。加えて、今回の実験では試験体と同サイズの梁にかかる長期許容荷重で載荷し実験を行った。



写真-4 載荷加熱前の試験体
Photo.4 Specimen before load heating

載荷加熱実験の結果、試験体は実験開始から 24 分で被覆材が一枚脱落した。その後、36 分で被覆材が脱落した箇所の変位が大きくなり、載荷を中止した。36 分以降は加熱のみを行い 60 分で加熱を終了し、その後 180 分まで試験体を放置した。加熱を行っている 60 分間は被覆材の脱落は 1 枚であったが試験体を取り出す際には写真-5 の様に被覆材のほとんどが脱落した。



写真-5 載荷加熱後の試験体
Photo.5 Specimen after load heating

4.2 脱落原因の考察と改善点

写真-6 の青線で囲んだエリアの様子で試験体の被覆材が脱落した箇所の鉄筋は大きく歪んでおり、上フランジと鉄筋の隙間が大きくなったことによって止付け金物が脱落したことが考えられる。図-2 に鉄筋のゆがみによる止付け金物の脱落時の想定されるメカニズムを記載した。その他の被覆材は脱落することなく試験が終了した。



写真-6 被覆材が脱落した箇所
Photo.6 The part where the reflective coating fell off

実験結果より、被覆材の施工方法は加熱による変形に追従できる構造へと改良する必要があることが分かった。ピンを使用した施工方法についても事前実験では先端の返しの部分が引っ掛かることで鉄筋にゆがみが生じて脱落はしなかった。しかし、事前実験以上

の鉄筋のゆがみに追従できず脱落した。一方、脱落した箇所を除き被覆材の出隅の割れがなく、鋼材温度も最高温度が 566℃であったため被覆材の性能には期待できる結果となった。

改良した新たな施工方法は次のようである。フランジに受金物(異形鉄筋)を溶接する手法は変えず、受金物と被覆材を一体化させるため被覆材と鉄筋を止付け金物と固定金物で緊結させる構造とした。また、新たな施工方法は鉄筋の変形が大きくなることも想定し、鉄筋の変形による脱落がない形状とした。新たな施工方法の断面図を図-3 に示す。加えて、被覆材の張付け方について、端部を 50mm 重ねる方法以外にも検討することで施工方法が原因の脱落であったか、被覆材の張付け方が原因の脱落であったかを確認する。

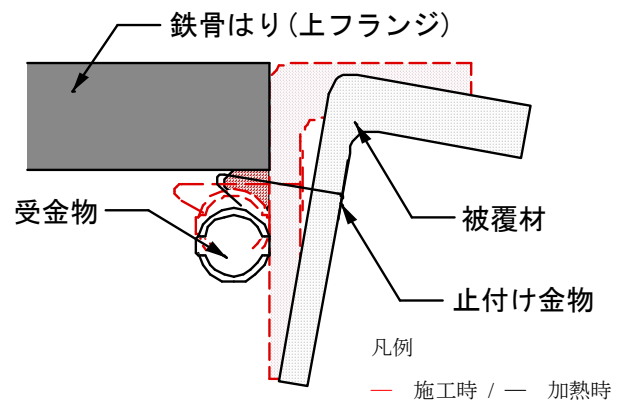


図-2 施工金物(載荷加熱実験①)
Fig.2 Construction hardware (load heating①)

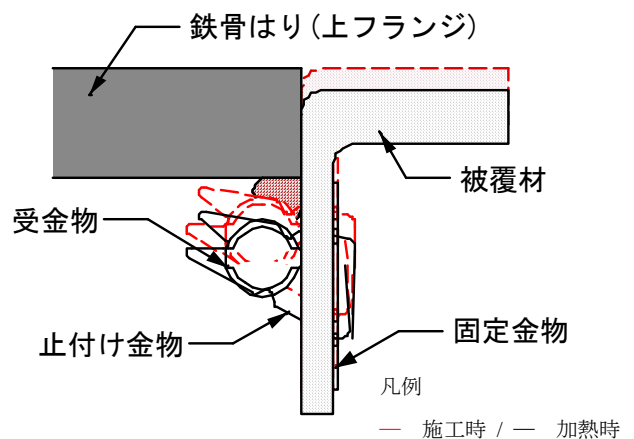


図-3 施工金物(載荷加熱実験②)
Fig.3 Construction hardware (load heating②)

5. 載荷加熱実験②

改良した被覆材と施工方法を用いて改良した被覆材と施工方法を用いて耐火性能の確認実験を行った。

5.1 試験方法

試験は防耐火性能試験・評価業務方法書に準拠し行った。試験体をセットし長期許容荷重をかけた状態で1時間の加熱を行う。加熱終了後も長期許容荷重をかけたまま3時間試験体を炉内に放置する。試験の間(合計4時間)、梁のたわみ量とたわみ速度を計測し、その値が規定値以下であれば合格となる。

5.2 試験体

試験体は被覆材の張付け方の異なる2体を製作した。被覆材及び施工方法は3章、4章で改良したものとした。被覆材の張付け方は2パターンの張付け方を実施した。図-4 試験体 No.1, No.2 の張付け方を示す。

試験体の寸法及び計測点は図-5 のようであり、試験体は鋼材寸法が：H-390x300x10x16、鋼材長さ：6000mm、支点間距離：5400mm、加熱区間：4000mm、載荷点は試験体の中心から900mm離れた2点、鉛直変位の計測箇所は載荷点と試験体中央の3か所の東西に1点ずつの計6点(イ〜へ)で計測を行った。鋼材温度は一般部(被覆材の幅方向の中央)を1断面と弱部(試験体のラップ部分)を2断面の3断面を計測した。1断面当たりの計測点数は5点である。

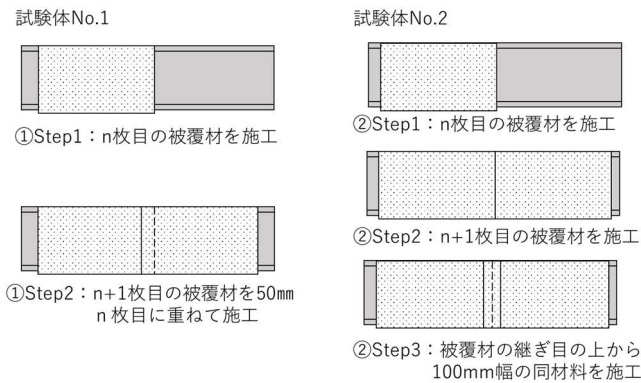


図-4 被覆材の張付けパターン
Fig.4 Application pattern of fireproof coating

6. 載荷加熱実験②の結果

試験体 No.1, No.2 の実験結果を示す。たわみ速度については今回の試験体のたわみ量が180mm以上となった場合にのみ適用されるため本報では割愛する。

6.1 計測結果

計測の結果は試験体 No.1, No.2 に大きな差はなかった。図-6 に試験体 No.1 のたわみ量のグラフ、図-7 に試験体 No.1 の鋼材温度のグラフを示す。

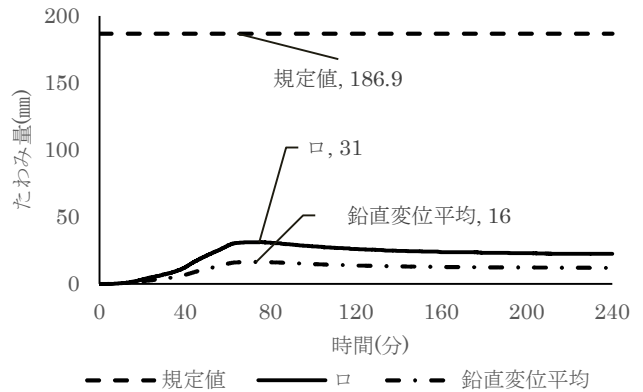


図-6 たわみ量(試験体 No.1)
Fig.6 Measured deflection(Specimen#1)

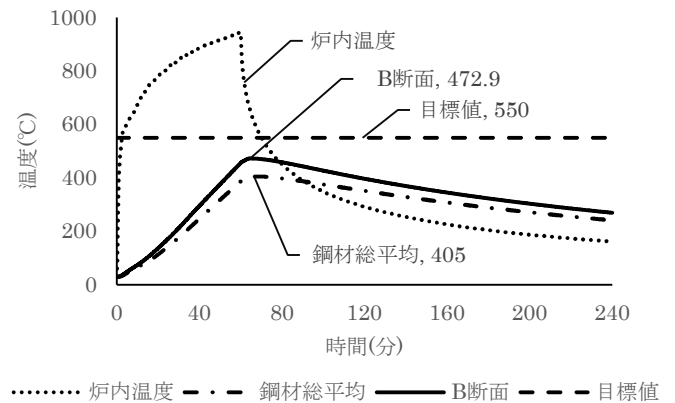


図-7 鋼材温度 (No.1 試験体)
Fig.7 Measured steel temperature at section A (Specimen #1)

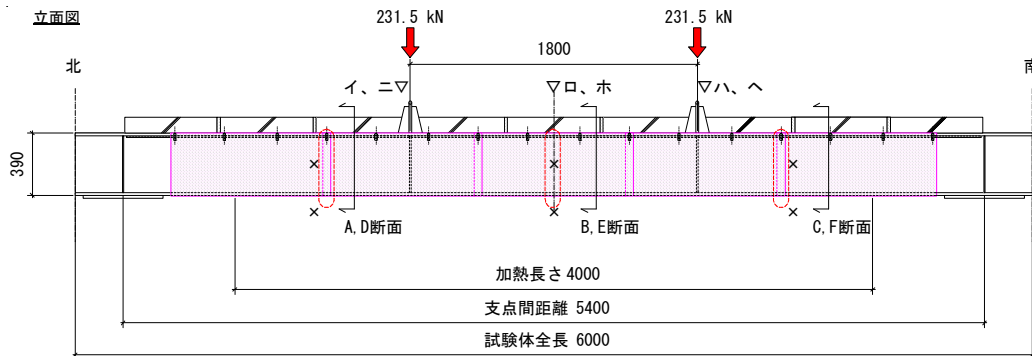


図-5 試験体寸法
Fig.5 Specimen size and measurement point

図-8 に試験体 No.2 のたわみ量のグラフ、図-9 に試験体 No.2 の鋼材温度のグラフを示す。

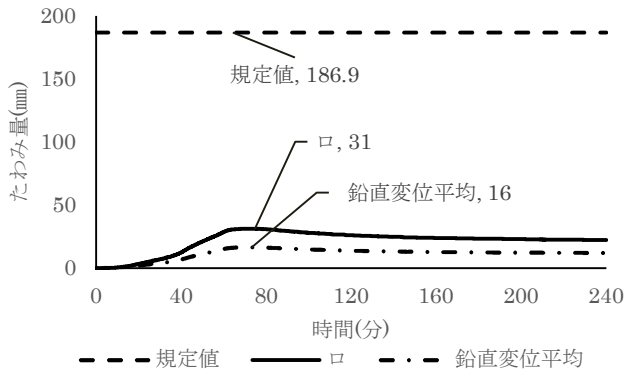


図-8 たわみ量(試験体 No.2)
Fig.8 Measured deflection(Specimen#2)

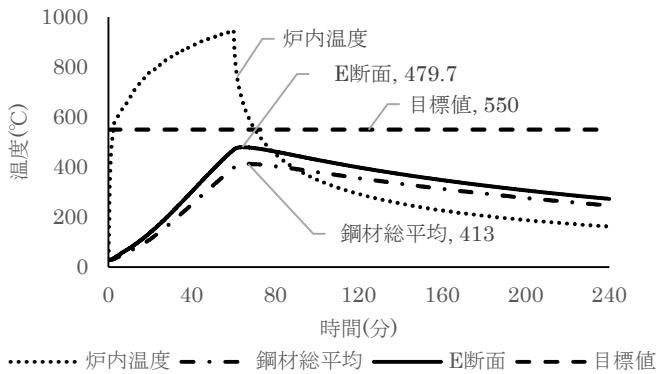


図-9 鋼材温度(試験体 No.2)

Fig.9 Measured steel temperature (Specimen #2)

試験体 No.1, 試験体 No.2 の最高温度をとった断面はいずれも試験体中央で B, E 断面である。試験体 No.1 が 472.9°C, 試験体 No.2 が 479.7°C であり、いずれの試験体も鋼材崩壊温度の目安である 550°C を下回った。試験体 No.1 と試験体 No.2 の鋼材温度の差は最高温度、平均温度ともに 8°C 以内であった。

また、評価試験の合格基準として用いられる鉛直変位については今回の試験体の最大たわみ量は式(1)より 189.6mm となる。

$$\delta = L^2/400 d \quad (1)$$

試験体 No.1, No.2 のいずれも最大たわみ量を計測したのは点口であった。いずれもたわみ量の最大値は 31mm であり、最大たわみ量である 189.6mm を大きく下回る結果となった。

载荷加熱試験前後の試験体 No.1, No.2 の写真を写真-7, 写真-8, 写真-9, 写真-10 に示す。試験前後で試験

体に大きな変化はなく、被覆材の脱落や試験体の大きなゆがみ等は見られなかった。試験体 No.1, No.2 ともに被覆材の重ね合わせのある個所で被覆材のゆがみによる隙間が見える点、試験体の出隅部に一部ひび割れが見える点が試験前後での変化であった。



写真-7 加熱前の試験体(試験体 No.1)
Photo.7 Specimen before heating(Specimen#1)



写真-8 加熱後の試験体(試験体 No.1)
Photo.8 Specimen after heating(Specimen#1)



写真-9 加熱前の試験体(試験体 No.2)
Photo.9 Specimen before heating(Specimen#2)



写真-10 加熱後の試験体(試験体 No.2)
Photo.10 Specimen after heating(Specimen#2)

7. 载荷加熱実験②の考察

本章ではこれまでの実験結果を踏まえ開発品の施工方法と被覆材の考察を示す。

7.1 改良した施工方法の有効性

試験体 No.1 と No.2 のたわみ量と鋼材温度を示す図-6 と図-8, 図-7 と図-9 の結果がほとんど同じであったことから試験体 No.1, No.2 の被覆材の張付け方の差が耐火性能に及ぼす影響は小さいことが確認できた。その

ため、22 年度の実験で試験体が脱落したのは被覆材の張付け方の問題ではなく、施工に使用した取付金物の性能の影響による脱落であると確認できた。

また、本試験における試験体の解体の際、被覆材を固定した金物の取り外しに力を要したことから施工方法の変更によって被覆材が鋼材と一体となって固定されていることが確認できた。写真-11 の様に被覆材を引っ張り、はがしたところ固定金物が残ったことから固定力は期待できることが分かる。



写真-11 試験体解体時の様子
Photo.11 Disassembling of the Specimen

7.2 改良した被覆材の有効性

試験の結果被覆材は脱落することもなく、部分的にひび割れが見える程度の損傷であった。ひび割れは生じたが鋼材まで到達しておらず、試験後の脱炉による揺れや、試験体観察時に触っても脱落はなかった。試験体出隅部の被覆材のひび割れを写真-12 に示す。



写真-12 出隅部のひび割れ
Photo.12 Cracks on outside corners

写真-12 の箇所を切り取りその断面を観察した。ひび割れのあった箇所の被覆材断面を写真-13 に示す。写真-13 の様に被覆材は加熱により 12mm となり、そのうち表層の 5mm がひび割れによりダメージを受けていた。

内側の 7mm 程度は加熱後も柔軟性を持っていたため、切り取った部材を持ち上げても被覆材が破れることはなかった。このことから膨張量を抑えることで加熱後も被覆材が自重を支持できる強度を持っていることが確認できた。



写真-13 出隅部の断面
Photo.13 Section of outside corners

8. まとめ

評価試験と同条件の载荷加熱実験を実施し、これまでに実施した実験で上がった課題に対し、被覆材及び施工方法の改良が有効であることを確認した。

被覆材の改良は膨張材の配合量を低減し、表層に不織布を設けることで被覆材出隅部の亀裂が原因となる脱落を防ぐことが可能であると確認できた。また、金物が外れる部分については金物形状を加熱による変形を許容し追従する形状へと変更することで载荷加熱を行っても外れることのない施工方法とすることができた。

また、実験結果より開発した被覆材及び工法は 1 時間耐火性能を満たすことを確認できた。

今後は改良した被覆材と施工方法で評価試験を受験し、鋼材はりの 1 時間耐火構造の大臣認定を取得し、当工法を普及させることで現場の作業環境・効率や安全性を向上を目指す。

参考文献

- 1) 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.5.0)
- 2) 重野誠治：鉄骨耐火被覆材の最新動向, 第 56 回建材情報交流会, 2019 年 2 月 15 日