

耐火被覆吹付けロボットの開発と現場適用

瀬川 紘史 池田 雄一 坂上 肇
井田 慎太郎 中村 允哉

Development of Fireproof Coating Spraying Robot and Application to Construction Site

Hirofumi Segawa Yuichi Ikeda Hajime Sakagami
Shintaro Ida Masaya Nakamura

Abstract

Owing to the labor shortage, the demand for labor reduction in construction has increased. In this study, the authors develop a fireproof coating spraying robot that automates the spraying of fireproof coating; subsequently, construction tests are conducted. By applying the robot to a construction site, the following findings are obtained: (1) A series of tasks such as the autonomous movement of robots, automatic positioning, and automatic spraying can be automated; (2) the robot sprayed fireproof coating on beams at the construction site, and the coating thickness and specific gravity satisfy the construction management standard value; and (3) by improving the spray nozzle and continuously performing an automatic construction for a significant amount of time, the construction process can be improved to the level equivalent to that of skilled workers.

概要

建設工事の中でも耐火被覆工事は、新規就業者が少ないため、労働者が不足しており、特に省人化のニーズが高い。そこで、耐火被覆吹付け作業を自動化する耐火被覆吹付けロボットを開発し、複数の施工試験を行った。また、開発したロボットを実際の建築現場に適用することで、以下の結果を得た。(1)ロボットの自律移動および自動位置合わせ、自動吹付けの一連の作業の自動施工が可能となった。(2)ロボットで現場の梁へ吹付けした結果、被覆厚さおよび比重とも、ロックウール工業会の施工管理基準値を満足した。(3)吹付けノズルを改良し、自動施工の時間を長くすることで、施工歩掛りは技能工と同等レベルまで向上できる目途が立った。

1. はじめに

近年、耐火被覆工事では、作業環境の悪さから建設技能者不足が顕著であり、省人化が可能な技術開発が求められている。筆者らは、耐火被覆の吹付け作業の自動化を目指し、ロボットアームを用いた半乾式吹付けロックウール耐火被覆（以下、耐火被覆）の基礎実験を行い、建設技能者と同等の施工品質が得られることを確認した¹⁾。省人化を実現するための次の段階として、建築現場で耐火被覆吹付け作業を行う耐火被覆吹付けロボット（以下、ロボット）を開発し、複数の施工試験を行った後、建築現場の実施工へ適用した。本稿では、その概要と結果を報告する。



Photo 1 技能工による吹付け状況
Spraying Situation by Worker of Fireproof Coating

2. 開発の背景およびねらい

2.1 耐火被覆工事の現状および工法の概要

日本国内での耐火被覆工事は、材料コストが安価であることから半乾式吹付けロックウール工法が主流であり、耐火被覆工事におけるシェアは7割を超えている。当該工法は、ロックウール（人工鉱物繊維）とセメントスラリーを混合して吹き付けて鉄骨部材表面に耐火被覆を形成する。技能工による耐火被覆の吹付け状況をPhoto 1に示

す。吹付け時に多量の粉塵が作業空間中を舞うため、吹付け作業者は一年中、全身ナイロン製のヤッケ、防塵マスク、ゴーグル等の保護具を装着する必要がある、建築工事の中でも特に過酷な環境下での作業のひとつである。そのため、当該工法に従事する技能工不足が顕著となっている。

半乾式吹付けロックウール工法の検査項目は、被覆厚さと比重である。建築構造物は建築基準法に基づき耐火時間が定められており、耐火時間仕様に応じた耐火被覆

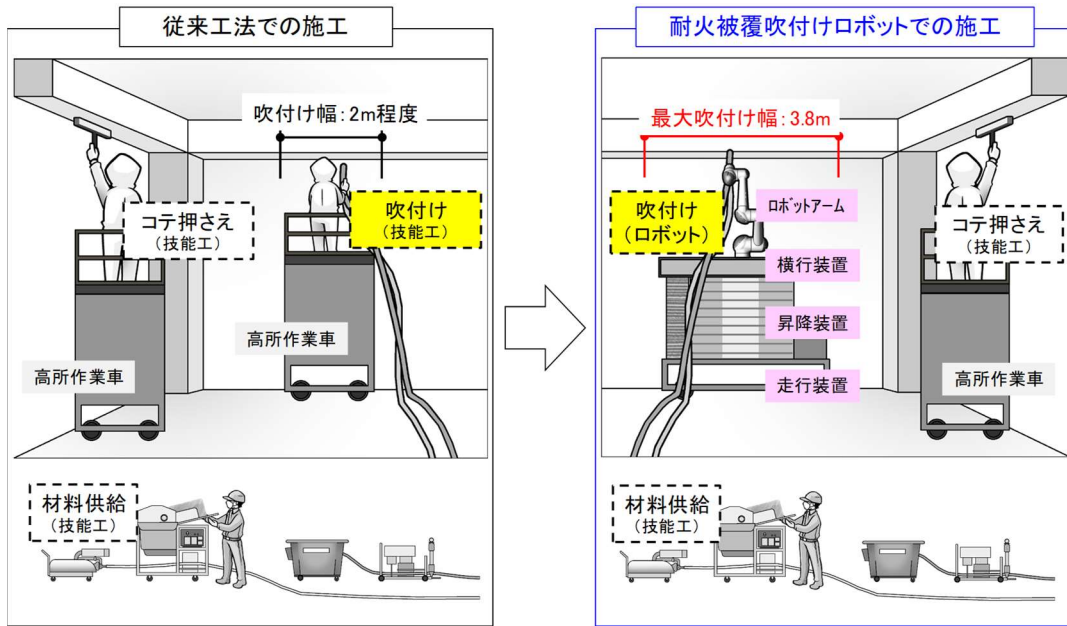


Fig. 1 在来工法とロボット施工の作業体制
Spraying by Workers and Robot

厚さの規定値がある。半乾式吹付けロックウール工法で施工対象を梁とした場合、1時間耐火仕様の規定厚さは25mm、2時間耐火仕様は同45mm、3時間耐火仕様は同60mmである。比重は、ロックウール工業会の施工管理基準値の0.28以上とする必要がある。

被覆厚さは、吹付け後において、測定ピン (Photo 2) を用いた測定および厚さ確認ピンの被覆への埋め込みにより確認する。比重は、予め厚さを測定した後に切取器 (Photo 3) で被覆を切り取り、乾燥器で重量変化がなくなるまで乾燥の上、重量を測定して算出する。

2.2 開発のねらい

耐火被覆工事における技能工不足を解決するため、耐火被覆の吹付け作業を自動化する耐火被覆吹付けロボットを開発した。開発のねらいを以下に示す。

- 1) 耐火被覆の吹付けをロボットにより自動で行うことで、吹付け作業の技能工1名を省人化する。
- 2) ロボットで吹き付けた耐火被覆の被覆厚さおよび比重がロックウール工業会の施工管理基準値を満足する。

なお、ロボットの移動・位置合わせについて、操作レベルに応じた作業内容の定義をTable 1に示す。

3. ロボットの開発

3.1 仕様の設定

耐火被覆の吹付け作業の技能工を1名省人化するため、Fig. 1に示すような作業体制を提案した。吹き付けた耐火被覆を整形するコテ押さえは、ロボット施工においても技能工が行う。技能工によるコテ押さえ状況をPhoto 4に示す。



Photo 2 測定ピン
Measuring Pin

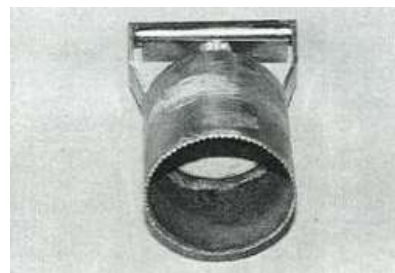


Photo 3 切取器
Cutting Instrument

Table 1 ロボットの移動・位置合わせの操作レベルの定義
Operation Level Definition of Movement and Positioning

操作レベル	作業内容
1	リモコンによる手動操作でロボットの走行、位置合わせを実施した後、耐火被覆の自動吹付けを行う施工
2	ロボットがスタート位置から吹付け場所まで自律移動し、自動位置合わせの後、耐火被覆の自動吹付けを行う一連の流れの施工 (自動施工)

開発したロボットをPhoto 5に、ロボットの仕様をTable 2に示す。当該ロボットでの施工ターゲットは、中高層ビルの基準階の梁とした。上階への盛替が可能となるよう、ロボットは工事用仮設エレベーター（2.5tfクラス）の搬器に搭載できるサイズおよび重量とした。梁の吹付け作業は高所での作業となるため、昇降装置が必要不可欠である。一つの作業場所での吹付け範囲を広くすることで、ロボットアームの昇降回数を減らすことができ、作業効率が高まると予想して、梁の材軸方向に可動する横行装置を組み込んだ。また、ロボットの位置合わせでは、全方向へ微少に移動することができるよう、ロボットの走行装置にはメカナムホイールを採用した。メカナムホイールは、車輪の円周上に小型のローラー（回転軸の傾きが車輪軸に対して45度）を複数配置した構造になっている。

3.2 制御方法

ロボットアーム先端に取付けたノズルの軌道（以下、吹付け経路）は、耐火時間仕様に応じた耐火被覆の厚さ規定値を満たすように設定する必要がある。吹付け経路は、梁の部位（下フランジ下端面・上端面・小端、ウェブ、上フランジ下端面・小端）ごとに、吹付け距離（ノズルと鉄骨面の離隔距離）、速度、間隔、角度などから導出する。導出した吹付け経路通りにロボットを制御する作業データを自動生成するプログラムを作成した。

3.3 安全対策

走行装置には、水平にレーザーを照射して障害物等を検知できる二次元LiDARを対角のコーナー2箇所へ設置した。防護領域と警報領域を設定し、防護領域では停止、警報領域では減速することとした。設定した領域への第三者の侵入状況やロボットの稼働状況に応じて、警告灯・メロディ・警報音などで明示し、ロボットが接近したことを周囲の作業者が把握できるようにした。また、接触を感知するバンパーセンサーを走行装置に取付け、万が一、柱や壁などに接触した場合、停止できるようにした。

3.4 粉じん飛散対策

耐火被覆の吹付けにおいては、ノズルから吐出したロックウール材料が大量に飛散、浮遊する。ロボットにとっては、飛散した材料が装置のジョイント部や精密部品などに侵入し、故障の原因となる危険性が高い。そこで、ロボット、作業者の両者に対して優しい環境を作り出すため、Photo 6に示す粉じん飛散防止ノズルを開発した。このノズルは吐出したロックウールを水ミストで包み込むことで粉じん飛散量を大幅に低減でき、ロボットの安定的な稼働に寄与する。後述する施工試験で粉じん飛散量を測定した結果、在来のノズルの1/3程度まで低減することを確認した。



Photo 4 技能工によるコテ押さえ状況
Pressing Situation by Worker of Fireproof Coating

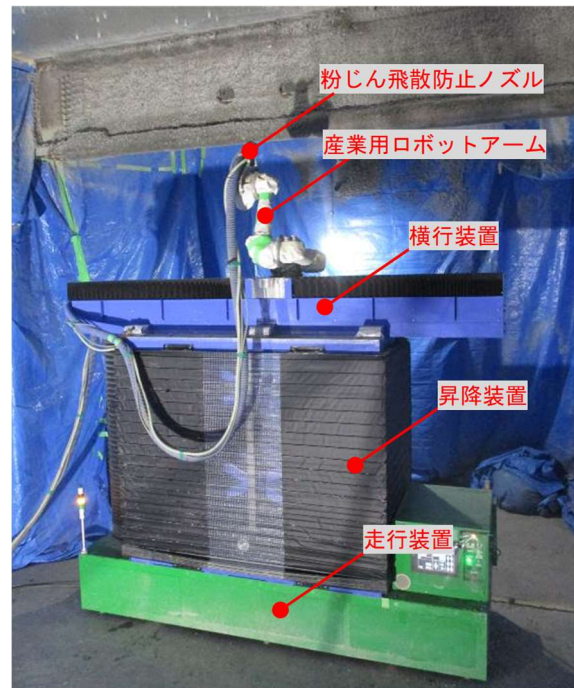


Photo 5 開発した耐火被覆吹付けロボット
Fireproof Coating Spraying Robot

Table 2 ロボットの仕様
Specifications of Spraying Robot

構成	走行装置、昇降装置、横行装置、6軸の産業用ロボットアーム
サイズ	3.3×1.15×1.5 m
重量	2350 kg
対応階高	5m以下
最大吹付け幅	3.8 m



Photo 6 粉じん飛散防止ノズル
Dust Scattering Prevention Nozzle

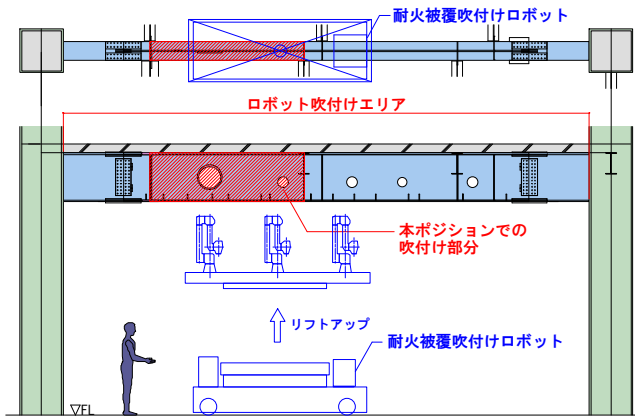


Fig. 2 大梁施工時のロボットの配置
Robot Placement During Spraying Girders

4. 施工試験

4.1 基礎試験

ロボットの開発後、吹付けの被覆出来形および比重の確認を目的とした施工試験を大林組の施設において複数回実施した。施工試験において、建築現場の梁を想定したH形鋼の各部位に高品質（極端な不陸のない被覆厚さ、吹付け後に脱落しない、規定値以上の比重を有する）の被覆を形成するためのロボット制御条件を確認した。

また、走行装置の移動および位置合わせ試験を併せて実施し、目標停止位置に対する誤差の閾値を設定した。

4.2 建築現場での施工試験

4.2.1 試験目的 実現現場環境下における吹付け精度の把握を目的として、梁を対象とした施工試験を行った。

吹付け対象は、階高5mの2時間耐火仕様の大梁（梁せい900mm）2本および小梁（梁せい396mm）2本とした。大梁施工時のロボットの配置をFig. 2に示す。吹付け対象梁の直下にロボットを配置し、梁の材軸方向に走行装置を走行させ、梁面に順次被覆を吹き付けた。ロボットでの吹付け状況をPhoto 7およびPhoto 8に示す。

4.2.2 試験方法 各梁に吹き付けた被覆厚さ（技能工によるコテ押さえの実施後）および吹き付けた被覆の比重を測定した。被覆厚さは、検査で用いる測定ピンで測定した。また、比重は技能工によるコテ押さえを行った後に、採取した試料を用いて算出した。

4.2.3 試験結果 測定ピンによる被覆厚さの測定結果をTable 3に示す。各梁の被覆厚さの平均値は49mm～57mmとなり、いずれも2時間耐火仕様の規定厚さ45mmを上回ったが、一部測定箇所では規定厚さを下回る厚さとなった。特にH形の梁の各部位のうち、上フランジ下端面と下フランジ小端は、規定厚さ未満となった箇所の割合がそれ以外の部位に比べて多く、課題が残る結果となった。ただし、この課題については、5.3節で後述するように、その後の改善により解決している。



Photo 7 耐火被覆の吹付け状況(下フランジ)
Fireproof Coating Spraying by Robot
(Lower Flange)



Photo 8 耐火被覆の吹付け状況(ウェブ)
Fireproof Coating Spraying by Robot (Web)

Table 3 測定ピンによる被覆厚さ測定結果
Result of Covering Thickness Measurement
Using Measuring Pin

梁	被覆厚さ平均値 [mm]	標準偏差 [mm]	変動係数 [%]
大梁①	53	17.1	32.1
大梁②	49	16.9	34.8
小梁①	51	24.4	48.0
小梁②	57	20.8	36.3

Table 4 吹付けロックウール比重の測定結果
Result of Measurement of Specific Gravity

梁	吹き付けた 部位	試料の厚さ (平均)[mm]	絶乾比重	
			個値	平均
大梁①	ウェブ	59	0.38～0.47	0.42
	下フランジ下端	56	0.43～0.50	0.47
小梁①	ウェブ	59	0.42～0.43	0.43
	下フランジ下端	50	0.35～0.37	0.36

吹付けロックウール比重の測定結果をTable 4に示す。比重は、ロックウール工業会の施工管理基準値の0.28以上を目標として吹付けを行ったが、大梁、小梁とも比重平均値は0.28を十分に上回る結果となった。

実現現場環境下において、予定していた4本の梁に対し、ロボットによる吹付けを実施した。3.4節で述べた粉じん飛散防止ノズルにより施工中の環境性が向上し、ロボットは施工期間中にトラブルなく吹付け作業を継続できた。なお、当該施工においては施工場所が狭かったため、走

行装置の自律移動は見送った。そこで、ロボットの走行および位置合わせはリモコンによる手動操作で実施したが、閾値以内に停止すれば吹付け精度は良好なことを確認した。また、昇降高さの上限付近となる階高5mの梁への吹付けであったが、吹付け時にロボット本体は大きく揺れることなく安定した状態で吹付けできた。

5. 建築現場への適用

5.1 適用目的および適用方法

大規模建築工事においてロボットを現場適用し、耐火被覆施工の複数班のうち一班をFig. 1に示した体制で施工した。この施工においては、ロボット施工の実績データを収集することを目的とした。ここで、実績データとは、施工品質および施工歩掛りのデータと、ロボットの移動、位置合わせ、自動吹付けなどの作業時間に関するデータである。また、ここで言う施工品質とは、被覆厚さおよび比重である。

施工対象梁の伏図をFig. 3に、大梁施工時のロボットの

配置をFig. 4に示す。吹付け対象は、階高3.64mの1時間耐火仕様の大梁（梁せい800mm）および小梁（梁せい446mm）の計29本とした。大梁、小梁とも、吹付け領域を材軸方向に3～5分割し、梁の裏表の両側の計6～10箇所にて吹き付けた。いずれの梁も、梁芯から平行にオフセットした線上にロボットを配置し、梁の材軸方向に走行装置を走行させ、梁面に順次被覆を吹き付けた。

施工の手順を次に示す。また、施工状況をPhoto 9およびPhoto 10に示す。

- 1) 施工エリアの地図を作成（事前に準備する）
- 2) 現場内の梁の配置を考慮して、ロボットの自律移動のルートを作成（事前に準備する）
- 3) ロボットが自律移動
- 4) 吹付け位置まで移動後、自動位置合わせ
- 5) 梁の片面側の吹付け
- 6) ロボットの自律移動、自動位置合わせ
- 7) 梁の反対側の吹付け
- 以降、3)～7)を繰り返し
- 8) 吹付けた被覆のコテ押さえ（技能工による）

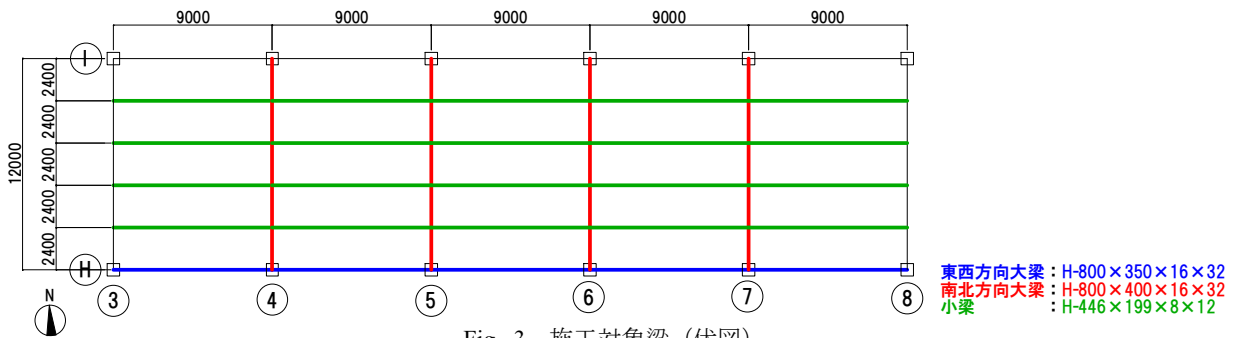


Fig. 3 施工対象梁 (伏図)
Beams Sprayed by Robot (Key Plan)

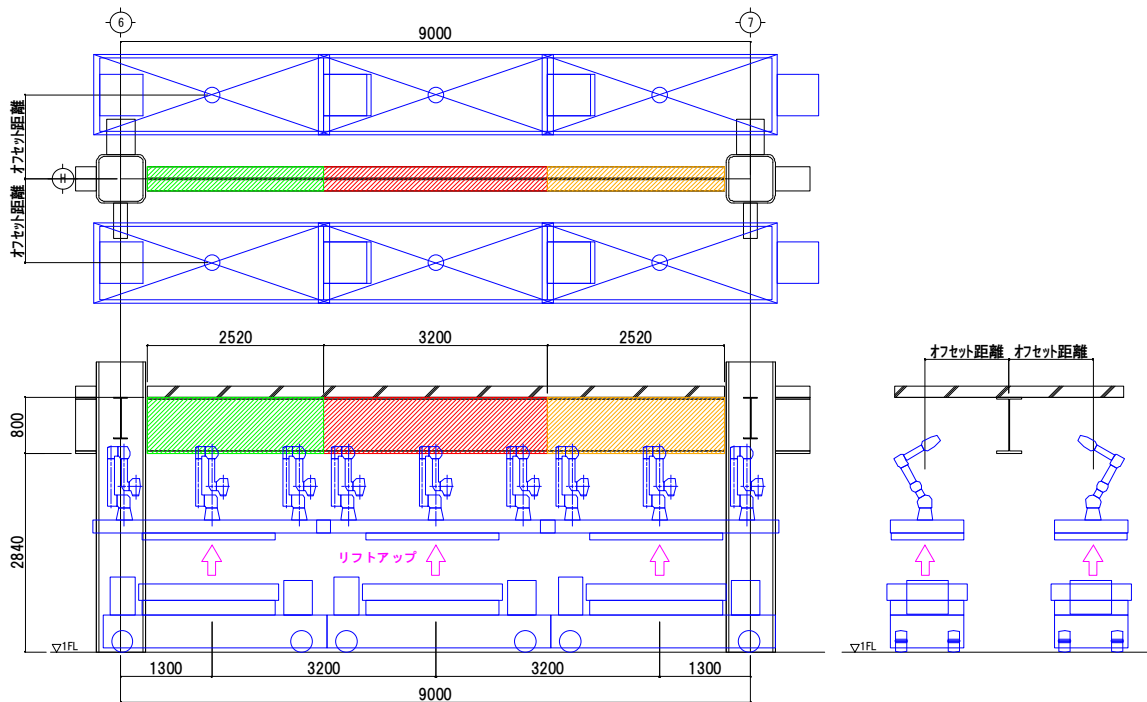


Fig. 4 大梁施工時のロボットの配置
Robot Placement During Spraying Large Beam



Photo 9 自律移動, 位置合わせ状況
Autonomous Movement and Alignment of Robot



Photo 10 耐火被覆の吹付け状況
Fireproof Coating Spraying by Robot

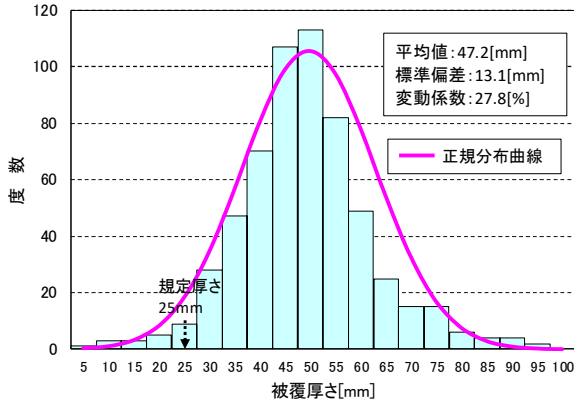


Fig. 5 測定ピンによる被覆厚さ測定結果
(東西方向大梁)

Result of Covering Thickness Measurement Using Measuring Pin (Large Beam in East-West direction)

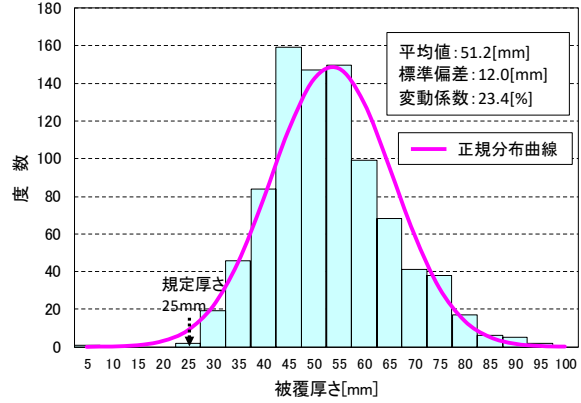


Fig. 6 測定ピンによる被覆厚さ測定結果
(南北方向大梁)

Result of Covering Thickness Measurement Using Measuring Pin (Large Beam in North-South direction)

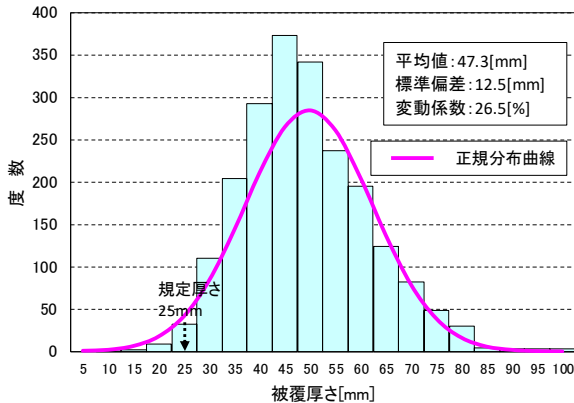


Fig. 7 測定ピンによる被覆厚さ測定結果 (小梁)
Result of Covering Thickness Measurement Using Measuring Pin (Small Beam)

5.2 測定内容

各梁に吹き付けた被覆厚さ(技能工によるコテ押さえの実施後)および吹き付けた被覆の比重を測定した。被覆厚さは、測定ピンとレーザースキャナーの2つの方法で測定した。また、比重は技能工によるコテ押さえを行った後に、採取した試料を用いて算出した。

また、走行装置の自律移動, 位置合わせ, 自動吹付けという一連の流れによる施工の有効性を確認するため、施工歩掛りを測定した。施工においては、まず、操作レベル1(リモコン操作でロボットを移動, 位置合わせ)で

の吹付けを行った。次に、操作レベル2(自律移動, 自動位置合わせ)での吹付けを行い、同様のデータを取得し、操作レベル1と操作レベル2それぞれの施工歩掛りを比較した。

5.3 施工結果

5.3.1 施工品質 測定ピンによる被覆厚さの測定結果をFig. 5~Fig. 7に示す。被覆厚さの平均値は、1時間耐火仕様の規定値25mmを十分に上回っており、大梁・小梁とも、被覆厚さを測定した97%以上の箇所で規定厚さを上回る結果となった。ロボット制御の設定を調整したことで、前述の4.2.3項での課題を解決できたことを確認した。

レーザースキャナーによる被覆厚さの測定結果(代表的に④~⑤通り間と⑥~⑦通り間)をFig. 8およびFig. 9に示す。測定結果の図は、南西から北東を見上げた視線でキャプチャした画像である。図中、1時間耐火仕様の規定値25mm未満は青色と最も濃い緑色で示しており、それ以外の色は25mm以上である。25mm未満となっているのは、貫通孔部(被覆厚さデータ: 0mm)および南北方向の大梁と小梁接合部のスチフナ周辺に散見されるが、それ以外の大部分は規定厚さの25mm以上となっている。被覆厚さの分布は、測定ピンによる被覆厚さ測定結果と類似の分布形状を示している。なお、一部25mm未満とな

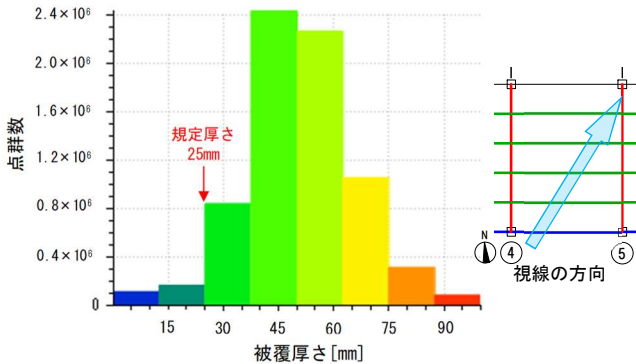
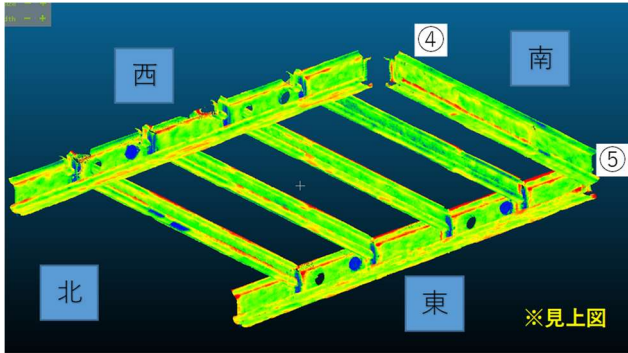


Fig. 8 レーザースキャナーによる被覆厚さ測定結果 (④～⑤通り間)
Result of Covering Thickness Measurement Using Laser Scanner (Between ④ and ⑤ Street)

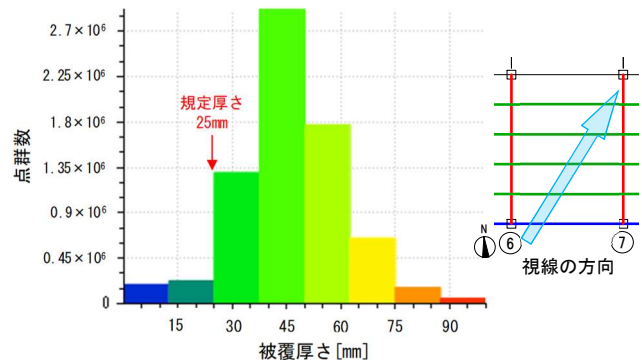
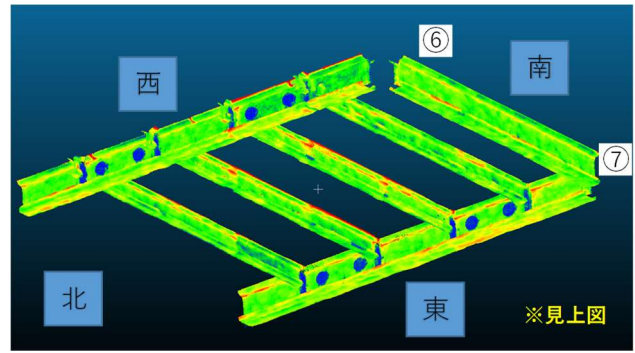


Fig. 9 レーザースキャナーによる被覆厚さ測定結果 (⑥～⑦通り間)
Result of Covering Thickness Measurement Using Laser Scanner (Between ⑥ and ⑦ Street)

った箇所については、ロボット施工後に技能工による補修吹きを行った。

吹付けロックウールの比重は、施工管理基準値の0.28以上を目標として吹付けを行った。測定結果は0.35～0.40程度となり、施工管理基準値を十分に上回った。

ロボットの移動・位置合わせの操作レベルの違いに起因する被覆厚さ、比重の差異は認められなかった。

5.3.2 施工歩掛り 1日あたりの歩掛り（耐火被覆を吹き付けた面積）をFig. 10に示す。同図では、技能工による在来施工の場合の歩掛りを1としたときに、操作レベル1で吹付けを行った場合と操作レベル2で吹付けを行った場合と比較した。操作レベル1での歩掛りは、在来の技能工のおよそ半分に留まった。一方、操作レベル2での歩掛りは、操作レベル1の1.7倍程度（技能工比0.8程度）に向上した。なお、耐火被覆の吹付けをロボットにより自動で行ったことで、吹付け作業の技能工1名を省人化できたことを確認した。

5.3.3 操作レベル1での作業時間 操作レベル1で施工した場合の1日あたりの作業時間をFig. 11に示す。本作業時間は、朝礼から作業終了までの時間（午前・午後の30分休憩および昼休憩も含む）を100%としたときの吹付け、移動・位置合わせ、清掃・吹付け準備、休憩等の占める割合を示した。操作レベル1では、ロボットの移動および位置合わせを手動操作で行うため時間がかかり、1日

のうち吹付けを行った時間（材料が吐出した正味の時間）は20%程度に留まった。

5.3.4 操作レベル2での作業時間 操作レベル2で施工した場合の1日あたりの作業時間をFig. 12に示す。施工時にノズル先端でのロックウール材料詰まりが発生しやすかったため、ノズルをこまめに清掃しなければならず、休憩時間中には吹付け作業が継続できなかった。操作レベル2では、1日あたりの吹付け時間が45%程度となり、操作レベル1に比べて吹付け時間を約25%増やせたことを確認した。一方、Fig. 10に示す通り、操作レベル2で施工した場合の歩掛りは在来の技能工の8割程度に留まった。今後は、ノズルの清掃に割く時間を削減する必要がある。

5.3.5 改善案の作業時間 歩掛りを向上させるための改善案として、ノズルの清掃回数の削減と、休憩時間中の施工継続を挙げる。ノズルの清掃回数を減らすため、ロックウール材料が詰まりにくい吹付けノズルが必要である。そのノズルを使用した操作レベル2での施工の改善案における1日あたりの作業時間をFig. 13に示す。改善案では、ノズルの清掃および次の吹付け準備にかかる時間の削減分と休憩時間が吹付け時間に置き換わるため、1日あたりの吹付け時間が改善前に比べて1.5倍程度まで増やせる。この場合の歩掛りは、通常の耐火被覆工による歩掛りと概ね同等となる検討結果を得た。

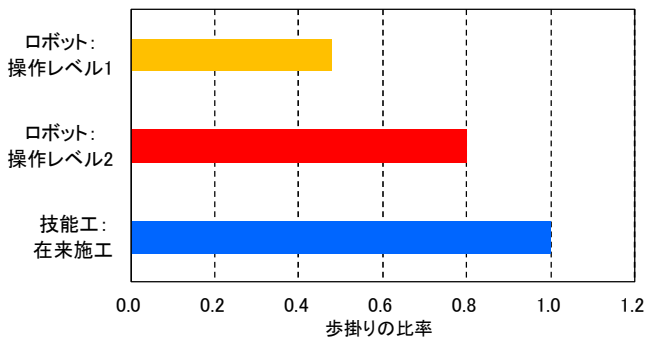


Fig. 10 歩掛りの比較
Comparison of Sprayed Area per Day

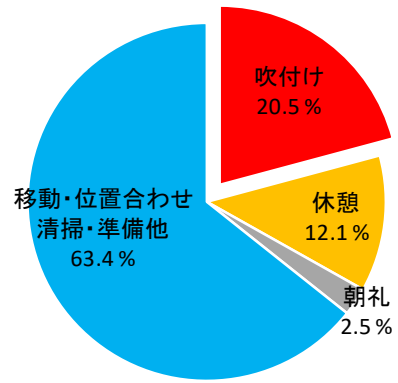


Fig. 11 1日あたりの作業時間
(操作レベル1)
Working Time Analysis per Day
(Non-Automatic Construction)

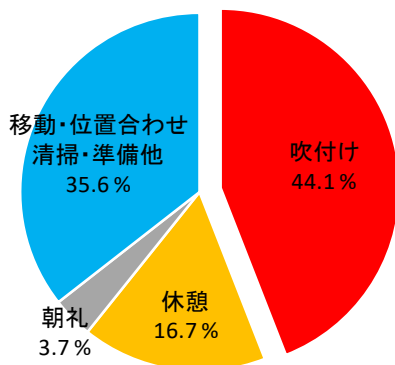


Fig. 12 1日あたりの作業時間
(操作レベル2)
Working Time Analysis per Day
(Automatic Construction)

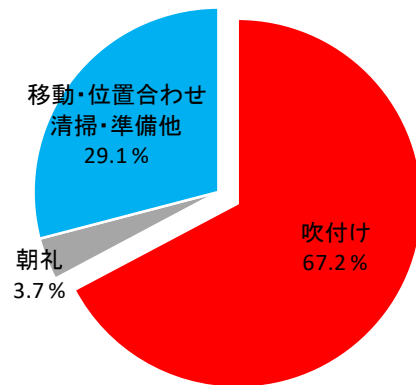


Fig. 13 1日あたりの作業時間
(操作レベル2, 改善案)
Working Time Analysis per Day
(Automatic Construction with Improvement Plan)

6. まとめ

耐火被覆工事の省人化を実現するため、建築現場で耐火被覆の吹付け作業を行う耐火被覆吹付けロボットを開発し、建築工事へ適用した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 耐火被覆の吹付け作業の技能工1名の省人化を達成するため、自律移動・自動位置合わせ、吹付け作業を自動化するロボットを開発した。
- 2) 実現場において、開発したロボットで梁へ耐火被覆吹付け施工を行ったところ、被覆厚さおよび比重ともロックウール工業会の施工管理基準値を満足した。
- 3) 現場適用時にロボット施工の歩掛りを測定したところ、操作レベル2での施工の歩掛りは操作レベル1での施工の1.7倍まで向上した。このことから、ロボットの自律移動および自動位置合わせの有効性が確認できた。

- 4) 吹付けノズルの清掃時間を確保する必要があったため、操作レベル2での施工の歩掛りは、通常の耐火被覆工の歩掛りの8割程度となった。
- 5) ロックウール材料詰まりの生じにくい吹付けノズルを開発すれば、自律移動、位置合わせ、自動吹付けの一連の流れの施工時間を長くすることができ、施工歩掛りを技能工と同等レベルまで向上できる目途が立った。

今後は、ロボット施工の歩掛りを向上させ、現場適用を進めていく方針である。

参考文献

- 1) 瀬川紘史, 他: 耐火被覆吹付け作業の自動化に関する基礎実験, 大林組技術研究所報, No. 83, 2019.12