

# 耐火被覆吹付けロボットの中高層事務所ビル工事への適用

瀬川 紘史 池田 雄一  
坂上 肇 大野 湧人

## Application of Fireproof Coat Spraying Robot in Mid-to-high Rise Office Building Construction

Hirofumi Segawa Yuichi Ikeda  
Hajime Sakagami Wakuto Ohno

### Abstract

There is a strong demand for a labor-saving solution in fireproof works owing to a significant labor shortage. The authors used a fireproof coating spraying robot in two building construction sites, and the following outcomes were obtained: (1) A collaborative system, in which skilled workers help robots work at the same work site, matches the appropriateness of robot construction. The amount of sprayed area per day was improved compared to the system, in which the robot and skilled workers worked at separate work sites. (2) Under the collaborative system, the average amount of sprayed area per day was approximately 80% of that of the skilled workers, and the highest value was 105%. In the next stage, we plan to apply this technology to the construction sites of skyscraper office buildings.

### 概要

建設工事の中でも耐火被覆工事は、作業環境の過酷さから技能工不足が顕著であり、耐火被覆工の省人化が可能な技術開発が求められている。筆者らは開発した耐火被覆吹付けロボットを2件の中高層事務所ビルの建築現場に適用し、以下の結果を得た。(1)ロボットの適性に合わせて技能工と作業分担する施工体制（協業体制）を構築することで歩掛りが向上した。(2)協業体制での施工では、歩掛りは平均で技能工の約80%、最高値は105%となった。今後は、超高層事務所ビルの建築現場への適用検討を進めて行く方針である。

## 1. はじめに

近年、耐火被覆工事では、粉塵や騒音といった作業環境の過酷さから建設技能者不足が顕著であり、作業の省人化が可能な技術開発が求められている。大林組では、半乾式吹付けロックウール耐火被覆(以下、耐火被覆)の吹付け作業の自動化を目指し、梁の吹付けを主な対象とした耐火被覆吹付けロボット(以下、ロボット)を開発し、現場適用を重ねてきた。現状の技術では、仕上げ等の比較的細かい作業までをロボットで代替することはできないため、技能工による作業を組み込んだ施工体制を取らざるを得ない。そこで、施工件数が多い中高層事務所ビル工事においてロボット施工を試行し、ロボットに適した施工体制を検証することとした。本報では、2件の適用工事において検討した、技能工との作業分担、歩掛り向上策等について概要と結果を報告する。

## 2. 施工体制の定義

ロボット施工における技能工との施工体制として、「分業体制」と「協業体制」の2つを次のように定義した。

分業体制とは、ロボットと技能工が同一エリアに同時に入らず、別エリアで施工する体制を指す。ロボットで吹き付けた被覆の仕上げ作業(技能工による補修吹付け

およびコテ押さえ)は、ロボットによる吹付け作業終了から半日程度経過した後に行う。

協業体制とは、ロボットと技能工が同一エリアに入り同時並行で施工を行う。技能工による仕上げ作業は、ロボットの吹付け作業終了後、時間を置かず実施する。

各々の体制における施工の流れをFig. 1に示す。

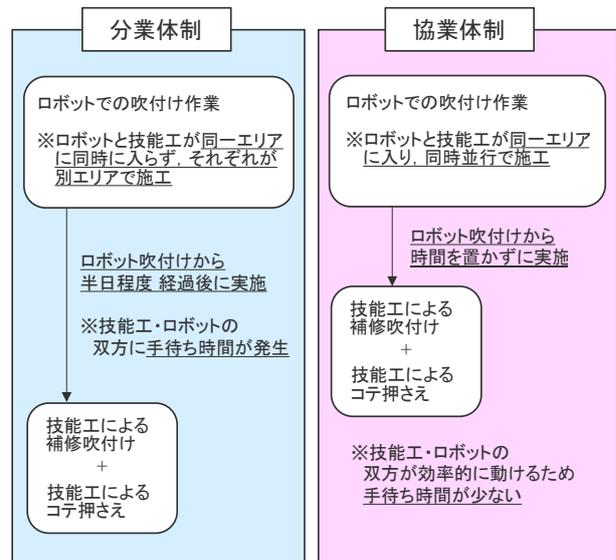


Fig. 1 施工体制の概要および施工の流れ  
Outline of Construction System and Flow of Construction

### 3. 適用例その1

#### 3.1 適用目的

適用の目的は、実現場(中高層事務所ビル新築工事)において、ロボット(Photo 1)を用いた施工の実績データを収集することである。

#### 3.2 施工体制

当該工事においては、技能工とロボットが同時に同一エリアに入らない分業体制にて施工した。

#### 3.3 施工の内容

適用工事の概要をTable 1に示す。対象は、地下2階、地上14階建ての事務所ビルの新築工事である。建物の基準階(階高4.3m)における大梁および小梁に対してロボット施工を行うこととし、施工階は2時間耐火仕様(被覆厚さの規定値45mm)の6フロア, 1時間耐火仕様(被覆厚さの規定値25mm)の1フロアの計7フロアとした。ロボット施工の対象エリア(代表して2時間耐火仕様のフロア)をFig. 2に示す。ロボットが一度に吹付け可能な範囲が4m程度であるため、大梁, 小梁とも、吹付け領域を材軸方向に2~3分割し、梁の裏表の両側の計4~6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、梁の材軸方向に横行装置を動かし、梁面に順次被覆を吹き付けた。

本適用例におけるロボットの施工手順を以下に示す。なお、施工手順5)は技能工が実施した。

- 1) ロボットオペレーターがリモコン操作で吹付け位置までロボットを移動



Photo 1 耐火被覆吹付けロボット  
Fireproof Coating Spraying Robot

Table 1 適用工事の概要  
Outline of Applied Construction

建物階数	地上14階, 地下2階
建物用途	事務所
基準階の規模	27.6m×31.2m (約860m <sup>2</sup> )
ロボット施工対象階	4~11階 (※6階除く)
ロボット施工対象階の耐火時間	1時間, 2時間

- 2) ロボットにより、梁の表側で吹付け
  - 3) 梁の裏側へリモコン操作でロボットを移動
  - 4) 梁の裏側で吹付け
- 以降、1)~4)を繰り返す
- 5) 技能工による吹き付けた耐火被覆の補修吹付けおよびコテ押さえ(ロボットによる吹付けから半日程度の時間が経過した後)に実施)

#### 3.4 適用結果

ロボット施工における作業内容の分類およびその定義をTable 2に示す。作業能率測定指針<sup>2)</sup>から、ロボットによる吹付けおよび吹付け対象梁の近傍までのロボットの移動は主体作業(清掃も含む)に分類される。ロボット施工の準備作業(ロボット起動・点検・材料吐出量の確認など)および後片付けなどは付帯作業、休憩時間は余裕、手待ち時間などは非作業、に分類される。本報では、余裕と非作業をその他として分類した。

施工各階における作業時間の割合(各作業が1日の合計時間に占める割合)および技能工に対する歩掛り比率(技能工を1としたときの1日あたりの吹付け面積の比率)の

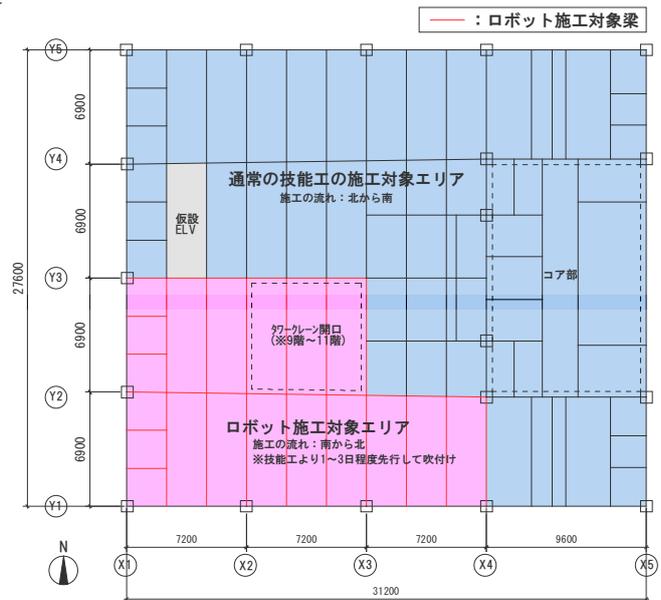


Fig. 2 ロボット施工の対象エリア  
Target Area for Robot Construction

Table 2 ロボット施工における作業分類  
Work Classification of Robot Construction

分類	作業内容	
主体作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吹付け</li> <li>・吹付け対象梁近傍までの移動</li> <li>・吹付けノズルやロボット周辺の清掃</li> </ul>	
付帯作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・施工準備作業(ロボット起動・点検・材料吐出量の確認など)</li> <li>・後片付け</li> </ul>	
その他	余裕	・休憩時間
	非作業	・手待ち時間

平均データをFig. 3に示す。ここで言うロボット施工での吹付け面積は、技能工による仕上げ作業（補修吹付けおよびコテ押さえ）込みでの出来形である。本適用では、7階および8階で歩掛り比率が高くなり、技能工の約60%程度となった。7階および8階は2時間耐火階であるが、ロボットは実験的に1時間耐火仕様（被覆厚さの規定値25mm）相当の吹付けを行った。当該階において歩掛り比率が高くなったのは、吹付け厚さが2時間耐火仕様と比べて薄かったことと、施工当初（4階～5階）に比べてロボットのオペレーションに習熟し、その他の時間（休憩・手待ち時間）が減ったためである。後半の3フロア（9階～11階）では施工エリア近傍にタワークレーン開口があった影響からロボットの稼働エリアと施工対象の梁に制約が生じたことにより、歩掛り比率は低くなった。

本適用においては、小トラブルが発生した際の対応や吹付け準備中の待機などの、非作業の時間（Fig. 3の棒グラフの橙色に該当）が日々発生した。

### 3.5 結果に対する考察と課題

本適用において、ロボット施工の歩掛り比率が低くなった要因を以下に示す。

- 1) 一部の施工階にタワークレーン開口があったため、ロボットの稼働エリアと施工対象の梁に制約が生じた。
- 2) 施工階のスペースに余裕がなく、前後工程の工事に仮置きされた資機材の移動等に手間と時間を要した。
- 3) 各種の手待ちをはじめとした非作業の時間が日々発生した。

本適用で顕著であったこれらの要因について、事前の計画や調整など対策を行い、ロボットの稼働率を上げら

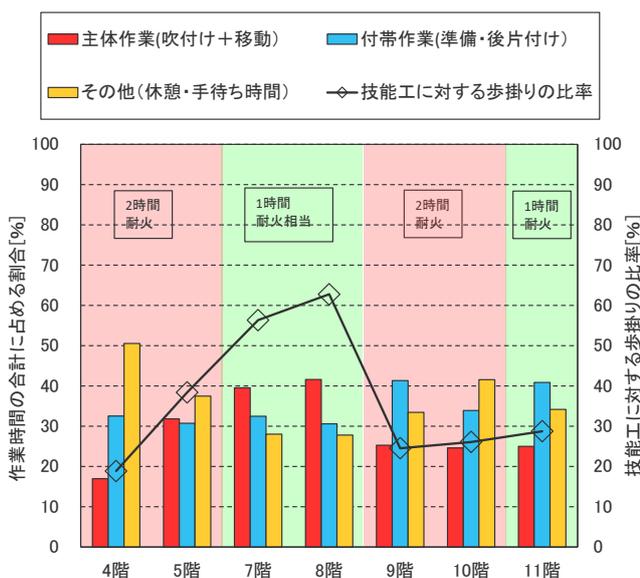


Fig. 3 作業時間の割合および技能工に対する歩掛り比率  
Percentage of Working Hours and Ratio of Sprayed Area per Day to Skilled Worker

れる状況を揃えた上でロボット施工を行うことで、非作業時間が短縮して吹付け時間が伸び、歩掛りが向上すると考えられる。

また、本適用例においては、技能工とロボットは同一エリアに同時に入らない分業体制で施工した。ロボットで吹き付けた被覆のコテ押さえを、技能工が適切なタイミングで実施できなかった。歩掛りが低くなった一因として、このような背景もあったことから、歩掛りを向上させるには、異なる作業分担方式の検討が必要であると考えた。

## 4. 適用例その2

### 4.1 適用目的

適用の目的は、前述した適用例その1の試験施工（中高層事務所ビルの新築工事）を踏まえて見直した施工体制による歩掛りの向上効果を検証することである。また、今後を見据えて、労務実績と被覆厚さのデータも収集することとした。

### 4.2 施工体制

ロボットと技能工の関与するタイミング等を見直し、施工体制を改善することとした。前述した3章では、技能工とロボットは同時に同じエリアに入って施工することはなかったが、当該工事においては、同一エリア内で技能工とロボットが同時並行で施工する協業体制とした。建物外周周り、コア部、事務所エリアのロボット施工対象以外の梁は技能工が分担した。協業体制下におけるロボットの施工体制をFig. 4に、施工状況をPhoto 2に示す。ロボットが吹付けできない梁接合部などの補修吹付けと、被覆のコテ押さえ（最終的な被覆厚さの管理含む）を技能

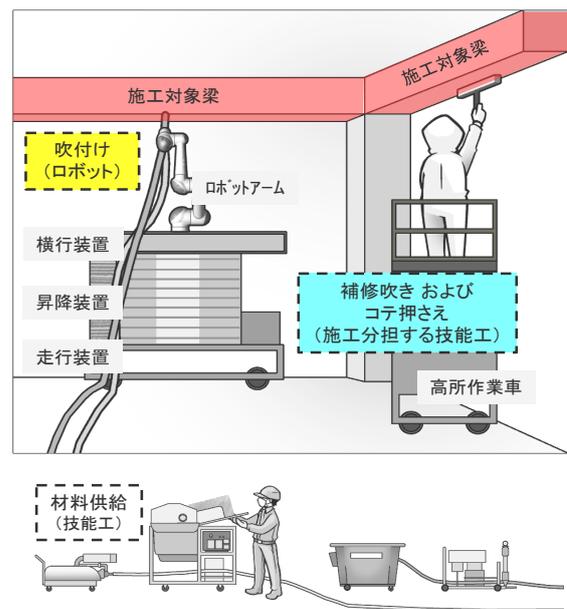


Fig. 4 協業下におけるロボットの施工体制  
Spraying by Robot under a Collaborative System

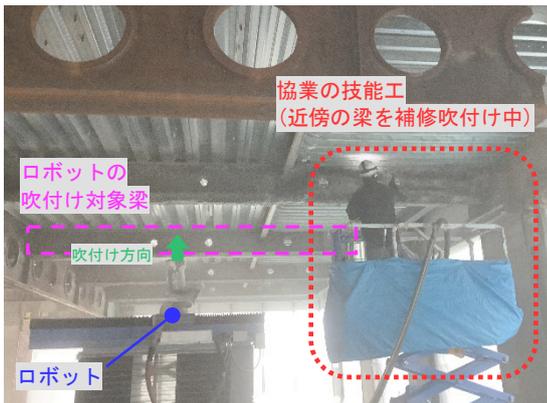


Photo 2 ロボットと技能工の施工状況  
Construction Status of Robot and Skilled Workers

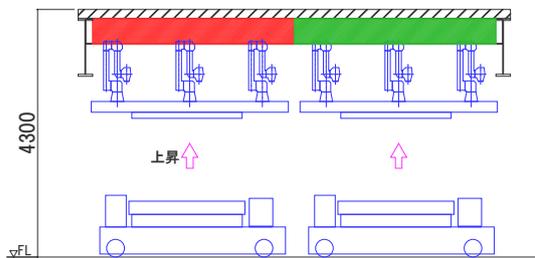
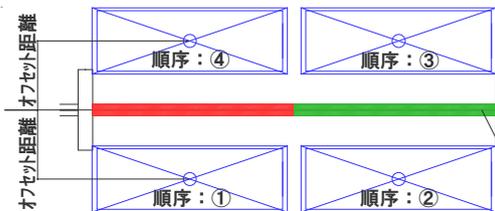


Fig. 6 吹付け施工時のロボットの配置  
Arrangement of Robot during Spraying Work

工が担当した。各階の施工は、仕上げ工程に合わせて行い、施工フロアの切り替え(上階へのロボットの移動)は協業会社の技能工と同じタイミングで実施した。なお、ロボットの動きが作業安全上、技能工との同時作業であっても問題ないかについて確認を行い、同時作業は可能であると判断した。

#### 4.3 施工の内容

適用工事の概要をTable 3に示す。対象は、地下1階、地上12階建ての事務所ビル新築工事である。基準階は3～12階であり、そのうち、施工対象階を3～7階の計5フロアとした。同階はすべて2時間耐火仕様(被覆厚さの規定値

Table 3 適用現場の概要  
Outline of Applied Construction

建物階数	地上12階，地下1階
建物用途	事務所
基準階の規模	23.5m×57m (約1,340㎡)
ロボット施工対象階	3～7階
ロボット施工対象階の耐火時間	2時間

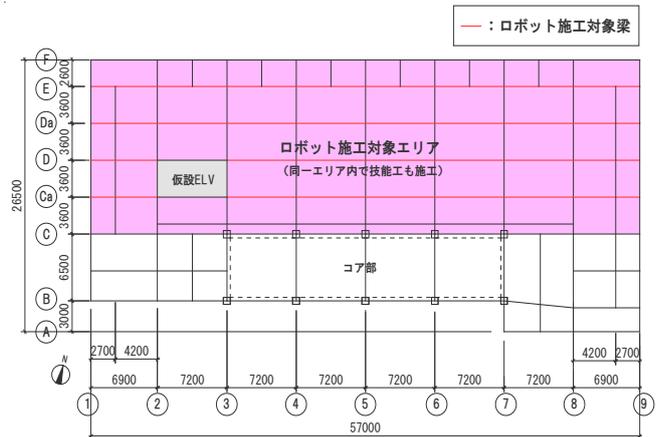
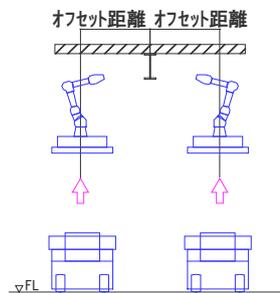


Fig. 5 ロボット施工の対象エリア  
Target Area for Robot Construction

青枠は、各々の吹付け位置にロボットを据えたときのロボットのアウトライン(見下げ)を示す  
赤色ハッチと緑色ハッチは、各々の吹付け位置におけるロボットの吹付け範囲を示す



45mm)であった。ロボット施工の対象エリア(各階共通)をFig. 5に示す。

施工対象は小梁(断面：H-446×199×8×12)とし、すべて同一サイズの小梁を施工する計画とした。各フロアの施工対象梁本数は約30本であった。ロボットの施工数量は、仕上げ工事のタクト工程の日数と技能工の施工数量とのバランスを見て決定した。

吹付け施工時のロボットの配置計画をFig. 6に示す。施工対象梁の吹付け領域を7.2mスパンの材軸方向に2分割し、梁の裏表の両面の計4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、梁の材軸方向に横行装置を移動させ、順次、

梁へ被覆を吹き付けた。本適用における施工手順のうち、技能工による仕上げ作業（ロボットで吹き付けた耐火被覆の補修吹付けおよびコテ押さえ）は、ロボットによる吹付けの直後に実施した。それ以外の施工手順については、前述した3章の工事と同じである。

#### 4.4 適用結果

**4.4.1 作業時間** 本適用において測定したロボット施工における各作業時間について、1日の作業時間全体に占める割合の推移をFig. 7に示す。施工前半（3階～4階）に比べ、施工中盤～後半（5階～7階）では、作業手順の見直しが進んだことで付帯作業の割合が減り、主体作業の割合が増えた。その他のうち、休憩時間は全期間を通して同程度であったが、非作業に分類される手待ち時間は施工中盤の5階が最も短かった。

主体作業の割合が最も高かった5階における施工1日あたりの作業時間の割合（平均値）を円グラフにしてFig. 8に示す。同図は朝礼から作業終了までの時間（午前の休憩および昼休憩も含む）を100%としたときの、主体作業、付帯作業、その他の占める割合をそれぞれ表す。5階の施工においては、作業時間全体に対する主体作業の割合が7割を超え、効率良く吹付けできたことがわかる。

**4.4.2 施工歩掛り** 各階の歩掛り比率（技能工を1としたときの1日あたりの吹付け面積の比率）の平均値の推移（折れ線）と、主体作業の割合の推移（棒グラフ）をFig. 9に、各階におけるロボット施工の日数と歩掛り比率（1日あたりの個値）の最高値をTable 4に示す。前述した3章同様、ロボット施工での吹付け面積は、技能工による仕上げ作業込みの出来形である。施工前半（3階～4階）の歩掛りは技能工の50～60%程度に留まったが、施工中盤～後半（5階～7階）の歩掛りは平均で技能工の約80%となった。施工中盤に施工手順を見直し、技能工と錯綜しないようにしたことがその理由である。この結果、主体作業のうち、吹付け時間が占める割合が増え、歩掛りが向上した。本適用例では5階において歩掛りの最高値105%を記録し、技能工を若干上回った。

技能工が補修吹付けとコテ押さえを担当し、ロボットは梁一般部の吹付けに専念する協業体制で施工したことで、ロボットの吹付け時間が大幅に増加して歩掛りが伸びた。以上から、ロボット施工における協業体制の有効性が確認できた。

**4.4.3 施工品質** 技能工による仕上げ作業（補修吹付けおよびコテ押さえ）の前後に被覆厚さおよび被覆の比重を測定した。被覆厚さは、地上型レーザースキャナー（以下、TLS : Terrestrial Laser Scanner）を用いて測定した。また、比重は採取した試料を用いて算出した。

技能工による仕上げ作業前の被覆厚さ測定結果（代表的に6階の小梁）をFig. 10に、仕上げ作業後の測定結果をFig. 11～12に示す。図中、2時間耐火仕様の規定厚さである45mm未満は黄色～赤色で示しており、それ以外の色は規定厚さを上回ったことを示す。仕上げ作業後の被覆

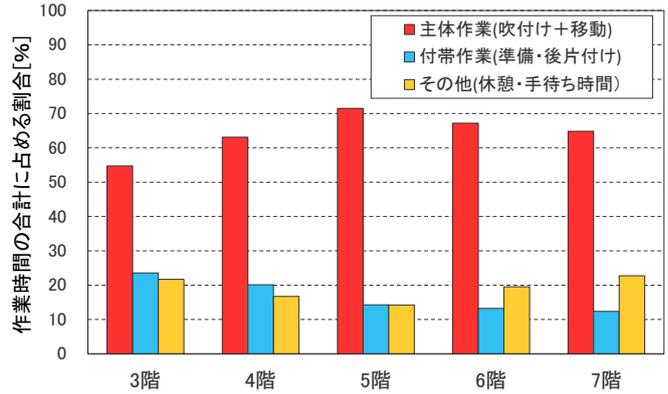


Fig. 7 各作業が合計時間に占める割合  
Percentage of Working Hours

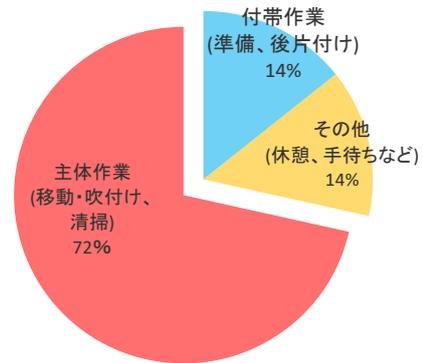


Fig. 8 施工1日あたりの作業時間の割合  
(5階施工での平均値)  
Percentage of Working Hours Per Day  
(Average Value on the 5th Floor)

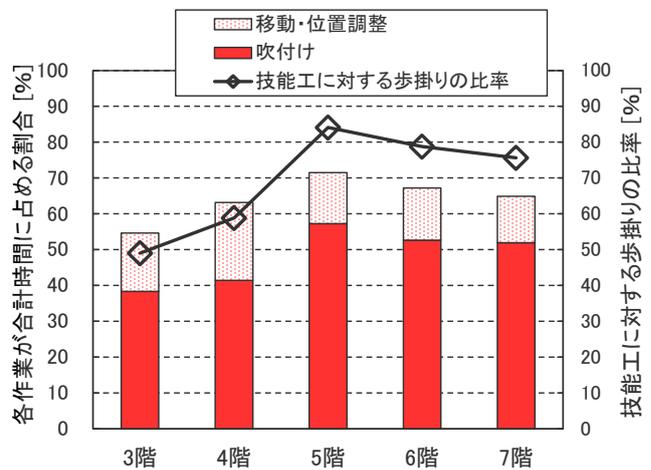


Fig. 9 歩掛りおよび各作業割合の推移  
Changes in Sprayed Area per Day and Work Ratio

Table 4 各階の施工日数と歩掛り比率の最高値  
Number of Construction Days and Highest Work Ratio

施工階	施工日数	歩掛り比率(1日あたりの個値)の最高値 [%]
3	7	52
4	6	66
5	5	105
6	5	84
7	5	74

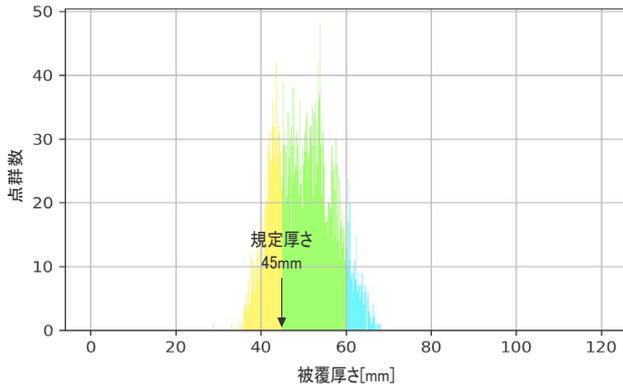


Fig. 10 被覆厚さ測定結果 補修吹き前  
(6階, 小梁-下フランジ下端)  
Result of Covering Thickness Measurement  
Before Repair Spraying  
(6th Floor, Small Beam- Underside of Lower Flange)

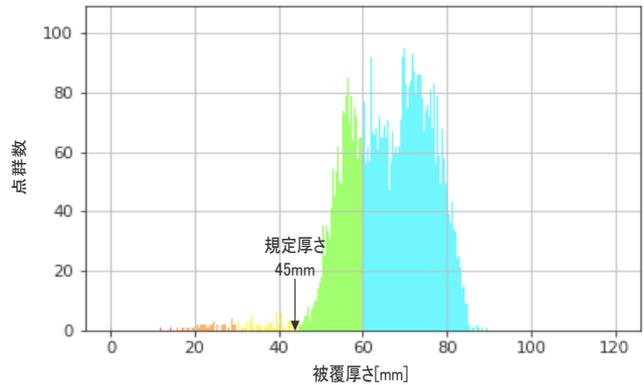


Fig. 11 被覆厚さ測定結果 補修吹き後  
(6階, 小梁-下フランジ下端)  
Result of Covering Thickness Measurement  
After Repair Spraying  
(6th Floor, Small Beam-Underside of Lower Flange)

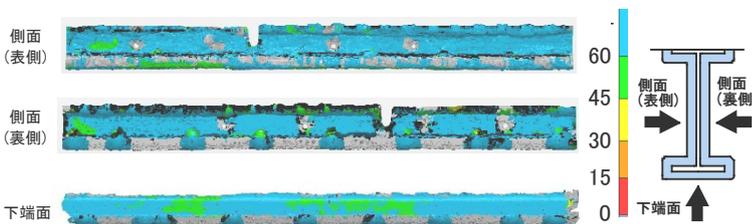


Fig. 12 被覆厚さ測定結果 補修吹き後(6階, 小梁)  
Result of Covering Thickness Measurement  
After Repair Spraying (6th Floor, Small Beam)

Table 5 補修吹き前後の被覆厚さの比較  
Comparison of Coating Thickness before and  
after Repair Blowing

計測対象	平均値 [mm]	中央値 [mm]	標準偏差 $\sigma_n$ [mm]	規定厚さ 45mm以上 [%]
補修 吹付け前	60.6	63.2	22.1	80.4
補修 吹付け後	74.5	72.2	21.6	94.6

厚さの平均値はウェブ・下フランジ下端のいずれも規定値を十分上回った。

被覆厚さの各種統計量をTable 5に示す。被覆厚さを分析するために、被覆厚さの平均値、中央値、標準偏差 $\sigma_n$ 、2時間耐火仕様の規定値45mmを満たす割合を算出した。各種統計量の平均値を確認すると、被覆厚さの平均値は、技能工による補修吹付け前が約61mm、補修吹付け後が約74mmとなり、規定厚さを満たす割合は、補修吹付け前が約80%、補修吹付け後が約95%であった。正規分布における標準偏差 $\sigma_n$ は、補修吹付け前が約22mm、補修吹付け後が約22mmとほぼ同じ値となった。

吹付けロックウールの比重は、ロックウール工業会の施工管理基準値である0.28以上を目標として施工した。測定結果はいずれも0.29~0.30となり、施工管理基準値を上回った。

## 5. まとめ

耐火被覆吹付けロボットを2件の中高層事務所ビル工事へ適用し、それぞれ異なる施工体制で試験施工を行い、品質および施工歩掛りの施工実績データを収集した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) 協力会社との施工体制をロボット施工の適性に合

わせた協業体制としたことにより、分業体制とした場合よりもロボットの施工歩掛りが向上した。

- 2) 協業体制での施工では、各作業が習熟した施工中盤~後半における歩掛りは平均で技能工の約80%、最高値は105%となった。最高値では技能工の歩掛りを若干上回った。

なお、今回ロボット施工した被覆厚さの測定結果において、技能工による仕上げ作業後にもかかわらず、規定厚さを下回る割合が5%程度生じた。これは、在来施工におけるこれまでの定点検査から、TLS使用による全数検査になったために生じた事象であると考えられる。全数検査で統計処理した際に規定値未満となる値・割合の扱い方(例えば、品質管理基準の見直し)が、今後ロボット施工を進める上での課題として挙げられる。

今後、協力会社との施工体制をさらに見直し、超高層事務所ビル工事への適用検討を進めていく方針である。

## 参考文献

- 1) 瀬川紘史, 他: 耐火被覆吹付けロボットの開発と現場適用, 大林組技術研究所報, No. 84, 2020.12
- 2) 日本建築学会: 作業能率測定指針, 丸善, 1990.2