

3Dプリンタを用いたコンクリート構造物の自動化施工の取組み

石 関 嘉 一 金 子 智 弥 坂 上 肇
中 村 允 哉 武 田 篤 史

Automated Construction of Concrete Structures Using 3D Printers

Yoshikazu Ishizeki Tomoya Kaneko Hajime Sakagami
Masaya Nakamura Atsushi Takeda

Abstract

Today's construction industry faces serious problems due to the declining working population and shortage of skilled workers. In addition to this demographic issue, concrete construction productivity has not changed in the last 30 years, and there is an urgent need to improve it. The automatic construction of concrete structures is key to improving this stagnant productivity. With the significant advances brought about by 3D printing technology, the construction industry has also attempted to introduce it. Productivity gain can be expected by combining this new technology with the ICT technology and sprayed concrete. This paper describes the current stage of Obayashi's pioneering automatic construction of sprayed concrete and 3D printing technology development, and how these technologies are applied to the general construction industry in Japan.

概 要

建設業は就労人口や熟練工の減少と現場の生産性向上などの難題に直面している。とくにコンクリート工事の生産性は30年間ほとんど変化しておらず、生産性の向上は急務の課題である。よって、コンクリート構造物の自動化施工の検討はコンクリート構造物の生産性向上と品質確保のために取り組むべき課題として必要不可欠である。現在、建設業界では、他の産業における発展と実用化が著しい3Dプリンティング技術の構造物構築への応用について検討を行っている。さらに、すでにトンネル工事等で適用している吹付けコンクリートやICT技術なども活用することによって、生産施工向上に期待できる。そこで、他の建設会社に先駆けて、大林組が現在取り組んでいる3Dプリンティング技術や吹付けコンクリートによる先駆的な自動化施工の現状を紹介するとともに国内外の状況について記載した。

1. はじめに

国土交通省では、建設生産システム全体の生産性向上や魅力ある現場の創出を目指してi-Construction¹⁾を施策に掲げ、新しい技術の現場への導入や従来技術のブラッシュアップを推進している。このような状況にあって、近年、他産業で実用化が著しい3Dプリンティング技術の構造物構築への適用が国内外で報告され始めている。海外では、欧米、中国、東南アジア、中東などで自動化施工の開発が急速に進められ、すべての工程を自動化する技術開発が進みつつある。また、ヨーロッパやアメリカの学会を中心にシンポジウムの開催や委員会活動も積極的に行われている。しかし、施工可能な材料物性の明確化や要求性能実現のための材料開発、耐久性、耐火性や構造安全性確保の方法など、本格的な実用化に向けて技術的な課題は数多く残されている。

国内における3Dプリンティング技術の適用やコンク

リート構造物の自動化施工の開発は耐震設計や施工精度の問題から、諸外国に比べ適用の制約が多い。そこで、これらの問題を整理する目的で、コンクリート工学会(JCI)において、2018年度から「3Dプリンティングのコンクリート構造物への適用に関する研究委員会」が設置された。また、土木学会や建築学会においても委員会が立ち上がり産官学において、コンクリート構造物の3Dプリンティングや自動化施工への検討が始まっている²⁾。

大林組では、3Dプリンティング技術を用いた構造物構築技術を検討し、他に先駆けて国内初の大型構造物を構築した。また、すでにトンネル工事等で適用している吹付けコンクリートやICT技術などを活用した、コンクリート構造物の先駆的な自動化施工の技術開発を進めている。

本稿では、国内外の3Dプリンティングや吹付によるコンクリート構造物構築に関する自動化の事例を紹介する。また、すでに大林組で開発が進み、大型構造物を構築した3Dプリンティング技術の現状と吹付コンクリートと

Table 1 コンクリート施工自動化事例
Concrete Construction Automation Example

国	施工規模	適用	プリント方式	プリント機材	プリント材料	出展
日本	高さ4.2m, 直径2.2m	建築支柱	材料押出	ロボットアーム	セメント系材料 (7日圧縮強度 120MPa)	https://ken-it.world/it/2021/02/3d-printed-for-real-building.html
日本	120mm/sec	PC橋	材料押出	ガントリー式	セメント系材料 (7日圧縮強度 60MPa)	https://ken-it.world/it/2020/02/taisei-3d-printed-bridge.html
アメリカ	床面積185m ² の2階建て住宅を8日間で施工可能	住宅	材料押出	ロボットアーム	セメント系材料 (7日圧縮強度 47MPa)	https://ken-it.world/it/2017/10/3d-concrete-printer-car.html
アメリカ	高さ3.7m, 直径15m	壁構造住宅	材料押出	ロボットアーム (自走式)	発泡系材料	https://iot-labo.jp/blog/3dprinter-buildings
アメリカ	60-80m ²	壁構造住宅	材料押出	ガントリー式	セメント混合材料	https://contech.jp/icon/
スペイン	12mの橋 (1.5m×8パーツで構成)	12mの橋	結合剤噴射	ガントリー式	粉末状の特殊材料 (軽焼マグネシウムを主成分) に結合剤を噴射	https://www.roomie.jp/2017/01/369440/
中国	6F 1,100m ²	6階建て住宅	材料押出	ガントリー式	セメント系材料 (建設廃棄物を原料)	https://i-maker.jp/blog/3d-printed-apartment-6730.html
ドイツ	高さ10m, 横15m, 縦45m	2階建て住宅	材料押出	ガントリー式	速乾性コンクリート	https://idarts.co.jp/3dp/3d-printing-concrete-structures-conprint3d/
イタリア	高さ12m	住宅	材料押出	ガントリー式	セメント系材料、粘土他	https://www.3dwasp.com/en/
スイス・フランス	高さ4m, 最大幅1.95m	支柱	材料押出	ガントリー式	セメント系材料	https://www.decn.co.jp/?p=77023
ロシア	高さ3.3m, 直径17m	住宅	材料押出	ロボットアーム	繊維コンクリート、ジオポリマー	https://bulan.co/swings/apis_cor_3dprint/
オランダ	168m ²	研究施設 (壁構造)	材料押出	ロボットアーム (自走式)	セメント系材料	https://ken-it.world/it/2018/01/cybe-construction-advanced.html
コロンビア	23.4m ²	住宅	材料押出	ガントリー式	セメントペースト	https://idarts.co.jp/3dp/construct-ora-conconcreto-3d-print-house/

ロボットを組み合わせたコンクリート打設の自動化技術について報告する。

2. 自動化の現状

2.1 国内自動化技術の動向

国内外のコンクリート施工自動化技術のインターネットで検索した事例をTable 1に示す。国内の自動化施工は、大手建設会社を中心に実施しているものの、海外と比較して事例が少ない。実際に施工した構造物は、付帯構造物や試験的に構築したものが多く、本格的な構造物の構築までには至っていない。使用材料はセメント系材料が

ほとんどであり、ポンプや吹付ノズルからセメント系材料の押し出しや吹き付ける工法が主流となっている。以下に各建設会社の開発事例の特徴を記載する。

建設会社Aは21年2月、デッキを支える4本の柱に3Dプリンタで製作した埋設型枠を使用した³⁾。3Dプリンタは、ノズルを変えることで押し出すモルタルの幅を2~8 cmまで調整できる。アームが届く直径約 1.2m, 高さ2.1mの範囲であれば、複雑な形状の型枠でも製作できる。

材料は通常のコルタルに使うセメントと砂に、長さ6mmの合成短繊維を加えて、粘性と硬化後の靱性を高めた。さらに、高性能減水剤で固まる時間を制御し、シリカフェームで強度を上げている。構造性能は、圧縮強度

110N/mm²、曲げ強度10N/mm²と一般的なコンクリートよりも高い強度を確保しており、プリント完了の翌日には施工できる強度になる。同社は今後、3Dプリンタ自体を移動させて、より大きな部材をつくることも検討している。

建設会社Bは、建設用3Dプリンタで製作した部材に、PC鋼材を挿入・緊張して接合したプレストレストコンクリート構造（以下、PC構造）を適用した国内初の“橋”を製作した³⁾。部材を製作する際にPC鋼材挿入用の孔を予め設け、各部材を接合後にPC鋼材の挿入・緊張によって一体化させPC構造体としている。

2.2 海外自動化技術の動向

海外では国内と比較して制約が少ないこともあり、実際の構造物への適用が多く報告されている。また、使用材料もセメント系材料以外に金属や有機系材料も使用されている。以下に開発事例を記載する。

ドイツの企業では2階建て住宅を8日で「印刷」できる3Dプリンタを開発した³⁾。開発したシステムは施工現場を「工場化」できる点が特徴である、ガントリー式を採用している。建物の外壁の位置などが記述されたBIMデータを読み込めば、ノズルが自在に動き回って建物の躯体をプリントする。ユニットは1～2日で組み立てられ、高さ10m、横15m、縦45mまで拡張できる。

オランダの建設用3Dプリンタベンチャー企業は、6軸の産業用ロボットにクローラー台車を装備し、工事現場内を移動しながらモノを作る自走式の3Dプリンタを開発した⁴⁾。ロボットアームの先に取り付けたノズルから、独自開発した材料を押し出しながら構造物を造形する。造形範囲は2,750mm、高さは4,500mmである。用途は打ち込み型枠やマンホールの現場施工等であり、橋台なども従来製法よりも低コストで建造可能としている。

一般的に海外で3Dプリンタを建設構造物に用いる場合、求められる強度と耐火性、耐久性を有する材料を使用する必要がある。そのため、従来から構造体に用いられているセメント系と金属系の材料が使用されている。海外ではすでに、住宅・オフィス・小規模な橋梁等を施工した事例があるが、セメント系材料を用いたものが大勢を占めている。

セメント系材料を用いる場合、あらかじめ練り混ぜた未硬化の材料をポンプで圧送し、ノズルを移動させて積層する方法が一般的である。材料の流動性が高く硬化時間が遅いと圧送し易いが、材料吐出後の形状保持性が乏しく積層が難しい。反対に流動性が低く硬化速度が速い場合には積層は容易だが、圧送途中で閉塞する可能性が高まる。そのため、材料の設計と管理が重要である。

3. 大林組の取組み

3.1 3Dプリンティング

3.1.1 3Dプリンティングの課題 3Dプリンタ本体

は、ロボットアーム式、門型クレーンに上下移動機構を加えたガントリー式、パラレルリンク機構を用いたデルタ式などがあるが、先端のノズルの移動速度を一定に保つ仕組みが必要である。

ノズルについては、ノズルの移動とポンプ圧送に連携したバルブ機構が必要である。バルブ機構が無い場合、一筆書きが可能で交差しない積層経路を設計する必要があり、製造できる形状が制限されてしまう。

セメント系材料に限らないが、3Dプリンタによる造形では積層した材料の層間の痕（以下、積層痕）が残る（樹脂系材料の場合は積層厚が0.1mm程度であるため目立たない）。セメント系材料の3Dプリンタを実用化するためには、積層痕を隠すための仕上げを施すか、意匠として耐えられる美観が求められる。

セメント系材料を用いた3Dプリンタの実用化に当たっての最大の課題は、引張力の負担である。一般にセメント系材料は、圧縮力に対する強度に比較して引張力に対する強度は著しく低い。そのため、3Dプリンタの実用化については、鉄筋などの鋼材との組み合わせや、繊維補強コンクリートを使用する方法が検討されている。

3.1.2 3Dプリンタの材料および制御 使用する材料には、ポンプによる圧送時に閉塞しない流動性、積層時の自立性、積層を重ねても変形しないための急硬性が求められる。特に、圧送時にポンプによる圧力を掛けると流動性があり、かつ積層時に圧力から解放された時に自立性がある性質（チキソ性）が重要である。そこで、ポルトランドセメント、細骨材、硬化促進剤、チキソ性調整剤、有機繊維をあらかじめ混合したプレミックスモルタル粉体を水で練り混ぜたものを用いた（以下、特殊モルタル）。これに凝結遅延剤を加え、硬化速度を調整して使用する。

3Dプリンタ本体にはロボットアーム式を採用し、市販の6軸型ロボットアームを導入した。

3Dプリンタの制御では、出来形寸法、特に積層幅を設計通りに制御することが求められる。これは、積層幅が

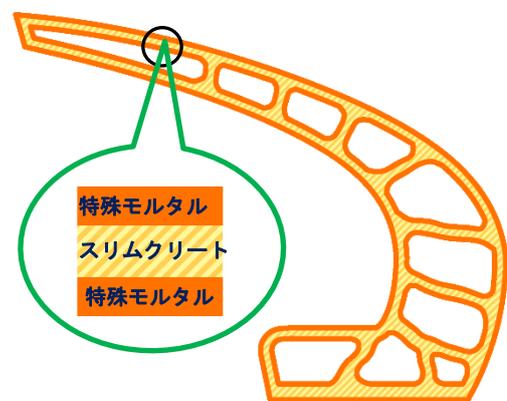


Fig. 1 スリムクリートの複合構造
Slim Cleat Composite Structure

造形物の肉厚に相当するため、積層幅が狭いと設計上の耐力を保証できなくなるからである。また、後述する複合構造の場合、積層幅が広いと充填する材料が減少し設計上の耐力を期待できない懸念が生じる。

ポンプによる特殊モルタルの圧送量と積層厚さを一定とすれば、理論上の積層幅はノズルの移動速度に反比例する。しかし、実際には、特殊モルタルの自重による変形なども考慮する必要があり、測定実験を行って確認した。

3.1.3 3Dプリンタによる複合構造の実証 実用的な建造物を製造するには、引張力の負担が課題であることは前述した。大林組は、単独で建造物の材料として使用できる超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート®」を保有している。そこで、特殊モルタルで建造物の外形を製造し、その内部にスリムクリートを充填して一体化する複合構造を開発した⁵⁾。形状をFig. 1に示す。

また、設計の自由度を向上するため、ノズルの移動とポンプ圧送に連携するバルブ機構を開発した。さらに、3D形状からノズルの移動経路を自動生成するプログラムも開発した。これらによって、製作物の形状変更に対しても、ロボットの制御データを迅速に変更できるようになり、柔軟な製造プロセスを実現した。

開発した複合構造の実証として、セメント系材料を用いた3Dプリンタでは国内最大規模となる「シェル型ベンチ」(幅7,000mm, 奥行き5,000mm, 高さ2,500mm)の製造に着手した。設計に際しては、型枠を使用せずに複雑な形状を製造できるという3Dプリンタの特長を活かし、曲面と中空で構成されている。また、内部の形状の検討では、トポロジー最適化を用いて構造的な合理性を追求した。長手方向に12ピースから成り、すべての形状が異なっている。ほとんどのピースが片持ちで、スリムクリートの引張強度が発揮される設計である。

シェル型ベンチの製造状況をPhoto 1に示す。ロボットアームは可搬重量が120kgの6軸単腕型を使用し、アーム先端には吐出ノズルを取付けた。3D積層モルタルは各層の積層厚を5mmとし、積層幅は30mmとなるように、吐出後の形状を適宜計測して吐出量を調整した。

3Dプリンタで積層造形したのち、スリムクリートを打込んだ。スリムクリートは容量0.3m³のコンクリートバケツを使用し、2箇所より打込んだ。なお、3Dプリンタによる積層では、各ピースに高さ200mm毎で打継ぎを設けているが、スリムクリートは打継ぐこと無く施工した。

シェル型ベンチの設置状況をPhoto 2に示す。設置の結果、試験体への亀裂等は見受けられず、製造を含め実働約3か月で施工を完了した。

3.2 吹付コンクリート

3.2.1 建造物の構築 一般的にコンクリート建造物は型枠を設置し、コンクリートを流し込むが、吹付コンクリートは、自動化が可能で型枠を省略でき、早期供用が可能な施工法として利用されている。これまで、建造物構築用の急結剤の検討⁶⁾を行っており、硬化時間を調

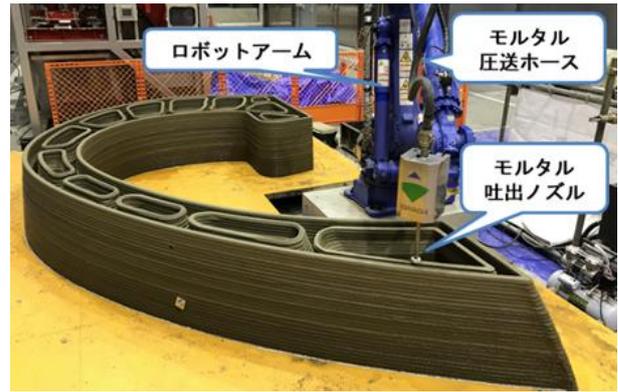


Photo 1 シェル型ベンチの製造状況
Manufacturing Status of Shell Type Bench



Photo 2 シェル型ベンチ
Shell Type Bench

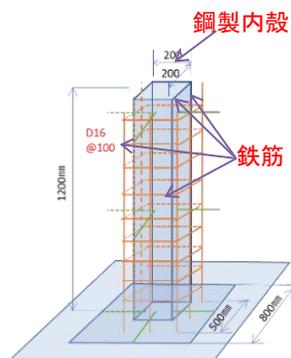


Fig. 2 鋼製内殻形状 (柱)
Steel Inner Shell (Column)



Photo 3 吹付状況 (柱)
Spraying (Column)



Photo 4 外殻製造状況
Outer Shell Manufacturing

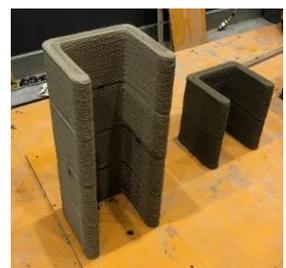


Photo 5 外殻形状 (梁)
3DP Outer Shell (Beam)

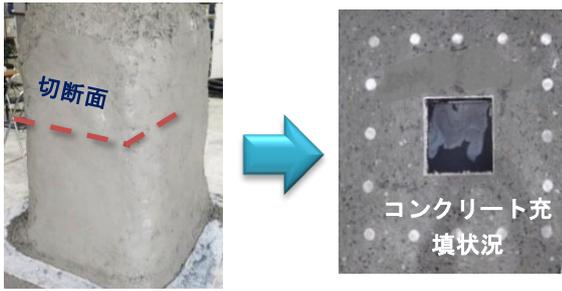


Photo 6 内殻構造及び充填状況 (柱)
Inner Shell Structural (Column)

整することにより数時間後に支保を受け持つ圧縮強度の発現性能、吹付コンクリート表面のコテ均しが行える急結剤性能、吐出量や粉塵跳返り等の施工性能の確認を行った。

吹付コンクリートで構造物を施工するにあたり、内殻構造 (柱) および外殻構造 (梁) の2種類の吹付ける対象物 (以下内殻, 外殻) を構築し, 工法検討を行った。内殻構造はFig. 2, Photo 3に示す中空鋼製の内殻 (以下鋼製内殻) の外周に鉄筋を配置し, コンクリートを吹付ける工法である。外殻構造はPhoto 4に示す産業用ロボットアーム型3Dプリンタ⁷⁾を用いてPhoto 5に示す外殻 (以下3Dプリンタ外殻) を製作し, その内側に鉄筋を配置し, コンクリートを吹付ける工法である。

3.2.2 鋼製内殻構造 (柱) の製造 吹付けは市中のプラントから購入したコンクリートを用いて, 空気搬送式吹付機を使用して施工した。なお, 急結剤はノズルの手前で配管に添加した。吹付時の跳ね返りおよび粉塵は一般的な吹付けコンクリートと比較して, 少なかった。また, 適切な量の急結剤を添加することで, Photo 6に示す通り, 平滑に均すことができ, 表面成型が可能となった。さらに, Photo 6のように, 鉄筋裏までコンクリートが充填していることを確認した。以上から, 吹付コンクリートにより鋼製内殻の柱部材の構築が可能であると考ええる。

3.2.3 3Dプリンタ外殻構造 (梁) の製造 断面340mm×320mm, 長さ2700mmの3Dプリンタ外殻の内側に鉄筋を設置し, Photo 7に示す通り梁の下面よりコンクリートを吹付けて梁部材を構築した。また, 急結剤量を調整することで表面成型は可能となり, 吹付コンクリートで外殻構造物の構築が可能であることを確認した。

3.2.4 荷重試験 3Dプリンタ外殻に吹付けた梁について荷重試験を実施した。実際の荷重方向を考慮して梁の吹付方向と天地反転した向きで設置し, 単調荷重とした。

試験結果を Fig. 3, 試験状況を Fig. 4 に示す。3Dプリンタ外殻を用いた吹付コンクリート部材は通常の構造物と同様な挙動を示すため, 静弾性係数や引張強度等入力条件の検討は多少あるが, 構造物として成立することが確認できた。



Photo 7 吹付による梁の構築
Construction of Beams by Spraying

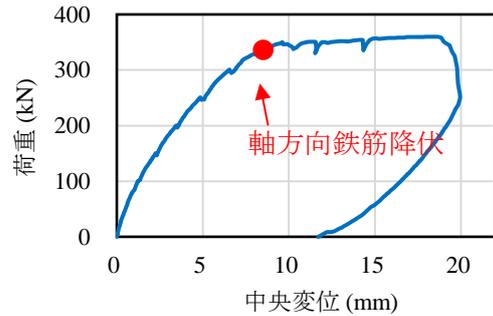


Fig. 3 荷重試験結果 (曲げ破壊型試験体)
Load Test Result (Bending Specimen)

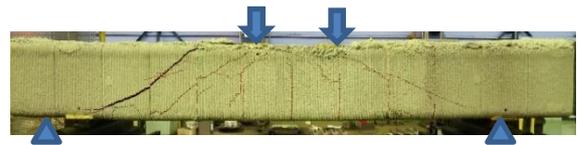


Fig. 4 荷重試験状況 (荷重終了時)
Load Test Status (End of Loading)



Photo 8 外殻と鉄筋配置
Outer Shell and Rebar

3.3 ロボットによる自動化施工

3.3.1 吹付施工 3Dプリンタで製造した外殻を用いて, 人力吹付と同様に吹付施工を実施した。モルタル材料には, ポルトランドセメント, 細骨材, 硬化促進剤, チキソ性調整剤, 有機繊維を混合したプレミックス材料を用いた。外殻に鉄筋を固定 (Photo 8) したのち, 部材軸が鉛直になるように配置して水平方向からロボットによるコンクリート吹付を行った。吹付方法は乾式とし, 生コンクリートプラントで空練りしたコンクリート



Photo 9 ロボットと吹付ノズル
Robot and Spray Nozzle



Photo 10 ロボットによる吹付状況
Spraying by Robot

を用いた。Photo 9 に示すように、ロボットアーム先端に吹付ノズルを装着して施工した。ロボット制御はティーチングにより行い、吹付範囲を事前に設定した。吹付状況を Photo 10 に示す。

3.3.2 載荷試験 吹付試験体の載荷実験結果の一例をFig.5に示す。実験結果と解析結果の比較から、曲げ破壊試験体は外殻を含めてファイバーモデルとすることでシミュレーションが可能であることが分かった。なお、解析条件は吹付コンクリートの引張強度を 2.0N/mm^2 とし、外殻を 0N/mm^2 とした。また、せん断破壊型試験体については、吹付コンクリートのみに対する計算値と同等のせん断耐力となった。

4. まとめ

今後は、構造形式や補強材等が自動施工に適した改良を施され、既成概念やルールの改善が進み、自動化技術の適用が増加すると考える。なお、本稿の内容について、以下のようにまとめられる。

- 1) 3Dプリンタの実用化において、セメント系材料の引張り負担の課題を繊維補強コンクリートの適用で解決した。また、3Dプリンタの材料は凝結遅延

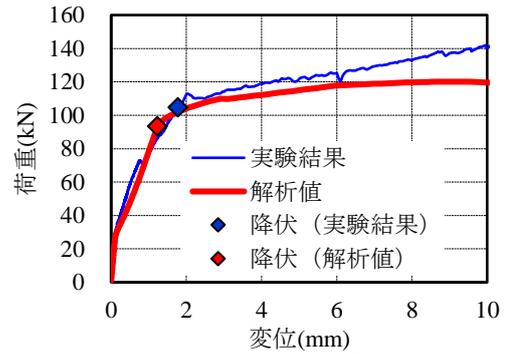


Fig. 5 荷重—変位関係
Load-Displacement Relationship

剤を加え、硬化速度を調整して使用した。

- 2) 特殊モルタルで構造物の外形を製造し、その内部にスリムクリートを充填して一体化する複合構造を開発し、シェル型ベンチを構築した。
- 3) 吹付コンクリートにより鋼製内殻の柱部材及び3Dプリンタ外殻構造物の構築が可能であることを確認できた。
- 4) ロボットによる吹付コンクリートの構造物構築が可能であることを確認できた。
- 5) 吹付コンクリートによる曲げ破壊試験体はファイバーモデルとすることでシミュレーションが可能であることが確認できた。

参考文献

- 1) 丸屋剛, 石田哲也: 3Dプリンティングの技術開発の現状と展望, コンクリート工学, Vol. 59, No. 2, 2020.2
- 2) 石田哲也, 石関嘉一他: 3Dプリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 17- pp. 26, 2021.7
- 3) 3Dプリントで由面柱を実現独自開発のモルタルで強度確保: 日経アーキテクチャ, pp. 22-47, 2021.4
- 4) マシンから材料、施工まで! 3Dプリンター施工の専門会社がオランダに登場: 建設 IT ブログ, <https://ken-it.world/it/2018/01/cybe-construction-advanced.html>, 2018.1
- 5) 坂上肇他: 積層工法による部材製造に関する研究 その1 ロボットアームを用いたモルタルブロックの製造, 日本建築学会大会, pp. 1293-1294, 2017.10
- 6) 石関嘉一, 武田篤史他: 吹付けコンクリートの急結作用の検討, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, V-384, 2019.9
- 7) 武田篤史, 石関嘉一他: 3Dプリンタによるモルタル造埋設型枠を用いた吹付コンクリート構造の基本性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 1261-1266, 2020.7