

# 3Dプリンターで変革はあるか

(一財) 建築コスト管理システム研究所・新技術調査検討会

## 1 はじめに

建築を学ぶ者にとって、自分の描く空間をどう表現するか、記述するかは最初の関門である。そして、振り返ると、描いた空間、建物を分かってもらえるか、設計図、スケッチ、パースなどを用いて持てる限りの力を尽くしてプレゼンテーションをしてきたことが思い出される。

模型は、その中でも具体的なもので、説明内容に応じたサイズで組み立て、適宜変更など関係者による協議もできるなど、使い勝手がよかったと記憶している。ただ、効果は大きいものの、模型製作の手間暇は多大でコストも大変であった。ある時、3Dプリンターが出現して、データ入力したとおりに3次元で模型を印刷するように作ることができる話題になった。

最近では、産業用・医療用への実用化が急ピッチで進んでいるとの報道が多く聞かれる一方、海外での建物への取組み事例が多く散見されるようになってきた。

今回、3Dプリンターの開発経過、海外での活用状況、日本企業の取組みなどを調査報告し、DX時代を迎えるこれからの実用化に期待したい。

## 2 3Dプリンターの登場

1980年代に初期のものが開発実用化され、1990年代半ばまでに様々な技術開発と商品化がされている。ただ、2000年代半ばまでは商品価格が高額で活用は企業に限られていたが、2009年に3Dプ

リンターの基本特許保護が切れたのに伴い、低価格化が進み、一般社会に普及していった。

2014年の3Dプリンター銃など問題のある使用もあったが、医療分野での手術前の検討モデル、宇宙・航空分野での機能部品・製作など各方面で日常的に目にする機会が増えている。

本稿では、建設分野の活用について報告する。

## 3 海外の取組み状況

海外の建設分野における3Dプリンター活用の取組み状況を、2月15日時点のインターネット情報から整理する。

- ① 建設分野のプリンター用途は、平屋住宅が多く、PC橋の部品製造がオランダで見られる。
- ② 住宅の壁を現地でプリンター積層し、屋根は別途組み立てる。階を重ねるにはPC床を載せ、またプリンターにより壁を積層していく。
- ③ プリンター材料にはセメント系が使われるが、イタリアでは土、藁など現地の自然材料を使っている。
- ④ セメント系材料に繊維入り補強モルタルを使う、また積層した中空柱に鉄筋を挿入してコンクリートを中詰めするなど構造体を形成している（中国・フィリピンなど）。
- ⑤ プリンターは、車載型で現地据付、また門型クレーン化など機動的、連続製造などに対応している。
- ⑥ いずれの事例も、プリント住宅は型枠なしで材料ロスがなく、プリンター可動時間も長いいため、建設コスト・工事期間が大幅に削減短縮さ

れたという。

- ⑦ ドバイでは3Dプリンター住宅建設が実証されており、更なる大規模建設が計画されている。

#### 4 日本の建設分野における取組み状況とその事例

日本においては、2014年頃から3Dモデルデータを用いた3Dプリンターによる3次元模型を活用して、複雑な建物を可視化して関係者との意思統一に活用し、効果を発揮する場面が見られるようになり、2016年頃にはBIMデータを使った3Dプリンター制作模型で検討を重ねることも一般的になってきた。しかし、実建物部材の作成に3Dプリンターを使った事例が見られなかったが、9月にスイスでの構造部材活用のニュースが流れると、建設各社/セメント業者などが建物部材製作等に本腰を入れ始めたようであった。

海外に見るような3Dプリント住宅の出現には至っていない日本においては、法規制の中で、セメント系材料を構造物に用いる際には、鉄筋コンクリート構造に代表されるように、引張力を負担する鉄筋などの鋼材と組み合わせた複合構造とする必要がある。セメント系材料を用いた3Dプリンターの実用化においても、この引張力の負担方法の開発が重要な課題となって、引張力が作用する構造部材には適用できず、これまで意匠部材やベンチなどのオブジェの製作に用途が限定されていた。

2018年、コンクリートに関わる官民の建築、土木、材料等各分野の研究者・技術者による「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」<sup>1)</sup>がスタートし、国内外の技術動向を踏まえた建設産業への応用展開、3Dプリンティング技術の適用や普及への課題等を検討している。

ここ数年の具体的な建築関係の3Dプリンター

記事を建設工業新聞から抽出した。

表 建築関係企業における取組み記事一覧

2019.8.30	大林組/3Dプリンターでの構造物構築にめど/繊維補強コンクリとの複合構造
2020.2.18	大成建設/3Dプリンター製作部材でPC構造体を構築/重量を4分の1程度に最適化
2020.10.6	清水建設/3Dプリンター用モルタル開発/5年後の現場プリンティングを目指す
2021.2.5	清水建設/3Dプリンティング型枠を実現場に初適用/自由曲面形状の柱部材を構築

(注)「建設工業新聞」より抽出し作成

以下に、前掲する新技術の活用現況等を各社資料により紹介する。

**3Dプリンター用特殊モルタルと超高強度繊維補強コンクリートとの複合構造を開発—セメント系材料を用いた3Dプリンターで国内最大規模となる構造物の製造に着手—**  
(株式会社大林組)

大林組はデンカ株式会社と共同で3Dプリンター用特殊モルタルを開発し、2017年にはこの材料をロボットアームで積層し(写真1)、小規模なアーチ橋を試作した(写真2)。



写真1 積層状況



写真2 アーチ橋

大型の構造物を製造するには、RC造における鉄筋に代わって引張力を負担できる材料が必要である。そこで、超高強度繊維補強コンクリートとの複合構造を開発した。引張補強が必要な部分が空洞になるように、3Dプリンター用特殊モルタルを積層して構造物の外形部を製造し（写真3）、空洞部に超高強度繊維補強コンクリートを充填する（写真4）構造である。

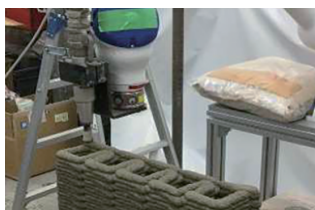


写真3 外形部の積層



写真4 超高強度繊維補強コンクリートの充填

超高強度繊維補強コンクリートには、大林組の保有技術である「スリムクリート®」を用いる。スリムクリートには写真5に示す鋼繊維を混練しており、硬化すると圧縮強度 $180\text{N}/\text{mm}^2$ 、引張強度 $8.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、曲げ強度 $32.6\text{N}/\text{mm}^2$ を示し、単独でも構造体としての使用が可能な材料である。スランプフローは600mm程度あり（写真6）、自己充填性を有するため締固め作業が不要で、鉄筋等を配筋する場合に比べ自動化・機械化も容易である。更に、常温で硬化するため特別な養生装置が不要な点も有利である。



写真5 鋼繊維



写真6 フロー試験

開発した複合構造の実証として、2019年に大型のシェル型ベンチ（幅7,000mm、奥行き5,000mm、高さ2,500mm）を製造した。設計に際しては、荷重条件に対して構造合理性を追求する「トポロジー最適化」を用いて内部に中空部分を設け、重

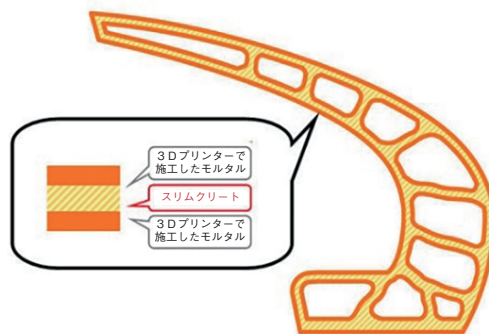


図1 シェル型ベンチの断面構造

量の軽減を図った。断面構造を図1に示す。

製造状況を写真7に示す。全体を12部材に分割して、3Dプリンター用特殊モルタルの積層、養生、超高強度繊維補強コンクリートの充填、養生の順で、1部材5日で製造した。完成状況を写真8に示す。12部材は構造的には独立しており、部材間の目地にはシーリング材を施工した。

開発した複合構造は型枠と鉄筋が不要なため、曲面や中空部を含む自由な形状の製造に有効である。一方、複合構造を構成する3Dプリンター用特殊モルタルと超高強度繊維補強コンクリートは、現在のところ建築基準法上の指定材料ではない。そのため、建築物に適用する場合は、案件毎に大臣認定を取得する必要がある。

なお、製造過程の動画が次のURLで公開されている。

[https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news/20200402\\_2.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news/20200402_2.html)

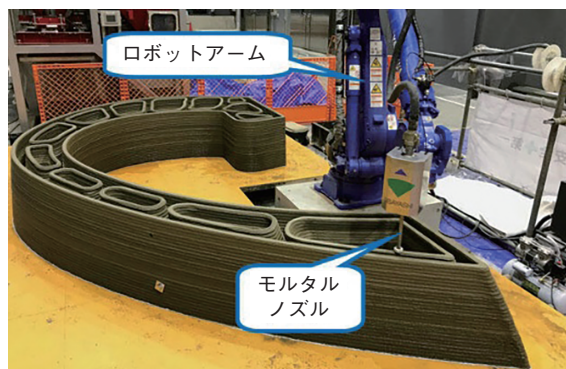


写真7 3Dプリンターによる製造状況



写真8 シェル型ベンチの完成状況

### 伝統建築物の装飾復原と 構造体適用に向けた技術開発

(大成建設株式会社)

#### (1) 伝統建築物の装飾復原

3Dプリンターで造形したものをそのまま建物装飾に使用した、2019年改修時の大倉集古館の事例を紹介する。

内部の柱と梁の接合部分「持ち送り」が、以前の内装改修時に4ヵ所ほど撤去されており、それを今回復原することとなった。以前の撤去時に、「持ち送り」の一部が欠損しており、欠損部分を石膏3Dプリンターで造形し復原した。復原は、以下のステップで行った。

- ①：現存する欠損のない「持ち送り」をハンディ3Dスキャナで3Dモデル化し、3Dプリンターで欠損部分を造形



写真9 3Dプリンターで造形された欠損部分

- ②：3Dプリンター製作物を作業所で加工（強度確保のため裏に漆喰充填。落下防止ワイヤー取

付）後、現場で職人による取付、塗装仕上。

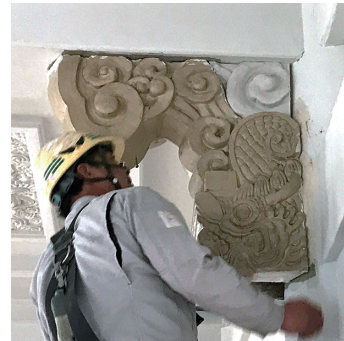


写真10 取付工事

- ③：完成。

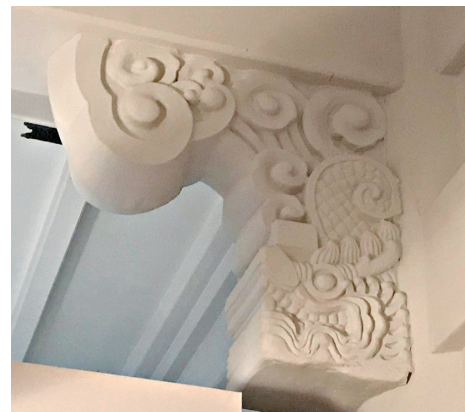


写真11 装飾復原完成

今回のケースを在来工法で行った場合、特殊技術が必要で時間とコストもかかったと予想される。そこに3Dプリンターを使うことで、技術職人不足への対処と工事費のコストダウンに効果があった。3Dプリンターは、「模型」としての利用は定常化してきたが、最近の3Dプリンターは様々な材料（金属、樹脂、木、陶器など）が使用可能になっており、「建材」そのままとしての展開の可能性が更に広がってきている。

#### (2) 構造体適用に向けた技術開発

一方、大型部材を迅速かつ高精度に製作する3Dプリンター技術の開発も進めてきた。独自開発した特殊なモルタルをノズルから押し出しながら積層する方法である。

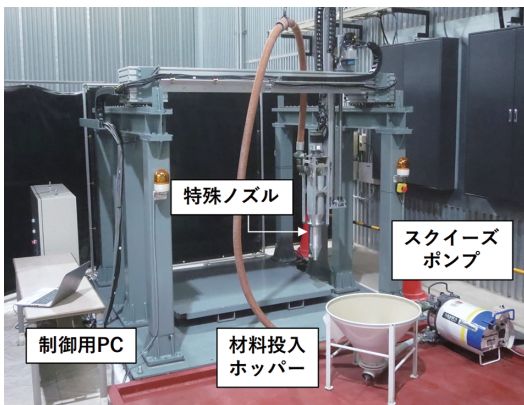


写真12 3Dプリンター装置

これまで、3Dプリンターによる部材製作では、積層中に鉄筋補強が困難なため、引張力が作用する構造部材に適用できないことが最大の課題であった。これに対し、3Dプリンターで製作した部材を接合しプレストレスを導入することで、鉄筋がなくても歩行者荷重に耐えられるデモ橋を設計・施工する実証プロジェクトに挑んだ。設計には、全体の剛性を保ちながら軽量化を図る「トポロジー最適化手法」を導入し、従来の型枠工法では実現困難であった複雑な形状を再現することで軽量化と高剛性を実現している。



図2 トポロジー最適化手法により決定した形状



写真13 3Dプリンティングで製作したPC構造体

デモ橋の大きさはW1.2m、H1.0m、L6.0m、計44個の多種多様な断面部材で構成されている。設計では5.0kN/m<sup>2</sup>の歩行者荷重を考慮しており、橋軸中央部に約1.0tを加力した曲げ実験では、中央下縁の鉛直変位は約0.1mmと微小かつ弾性的な挙動を示した。以上により、3Dプリンター製作部材について構造体適用の可能性を示すことができた。

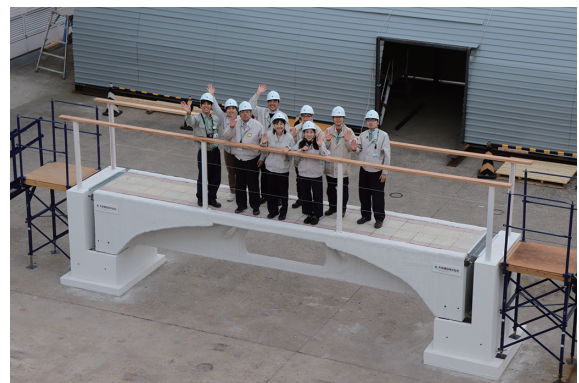


写真14 デモ橋完成

### 3Dプリンター用の繊維補強モルタル 「ラクツム」の開発と実現場への適用

(清水建設株式会社)

#### (1) 3Dプリンター用セメント系材料「ラクツム」

清水建設は、3Dプリンティングに適した高強度・高靱性材料「ラクツム (LACTM: Laminatable Cement-based Tough Material)」を独自開発している。ラクツムは、通常のもルタルに用いるセメントと砂に、合成短繊維、高性能減水剤、シリカフュームなどの混和材を付加した繊維補強モルタルで、型枠のような薄い部材を造形する場合でも、形状を保持したまま2m以上の高さまで積層できている(写真15)。また、ラクツムの造形物は積層面が目視で確認できないほど一体化し、劣化の原因となる水や空気の侵入を助長する気泡や空隙は内部にほとんど生じていない。

ラクツムで積層造形した埋設型枠にコンクリー



写真15 埋設型枠の3Dプリンティング状況

トを充填して構築した柱部材の耐力や靱性は、載荷実験による検証結果から、既往技術で構築したコンクリート柱と同等以上であることが実証されている。

## (2) 自由曲面形状の大規模コンクリート柱の構築

この「ラクツム」で積層造形した3Dプリンティング型枠は、2021年2月に実現場で初適用に至っている。適用先は、自社開発事業として建設中の「(仮称)豊洲六丁目4-2・3街区プロジェクト」である。敷地内に整備する交通広場を覆う大規模デッキのコンクリート柱4本の埋設型枠を3Dプリンティングした結果、従来工法では困難だった自由曲面形状を有する高さ4.2mの柱部材を短期間で構築することに成功している。

今回の3Dプリンティング型枠の現場適用では、ラクツムと技術研究所の専用実験施設「コンクリートDXラボ」に配備した材料押し方式の3Dプリンターが利用され、円状の基部から頂部に向かって捻れながら花びら状に形を変えていく特殊なデザインが採用された柱の型枠が製作された(図3、写真16)。製作完了後、型枠を現場に搬入し、所定の位置に組み立てた後、型枠内部にコンクリートを打ち込み、特殊形状の大型柱を完成させている(写真17)。

## 5 おわりに

我が国の建設分野における3Dプリンターの活用展開は、これから加速していくDX時代の新しいコンクリート構築技術と言えそうである。

現地材料でも型枠なしで構築できるメリットは発展途上国の住宅建設に留まらず、月面の基地建設にも夢が広がる。また、工期・コストの低減など可能性がある生産技術の今後に期待したい。

最後に、資料をいただいた大林組、大成建設、清水建設に謝意を表します。

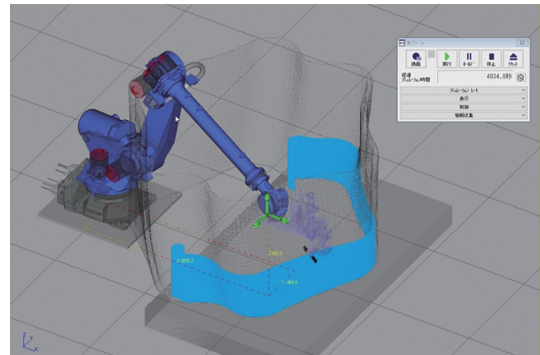


図3 プリント経路のシミュレーション

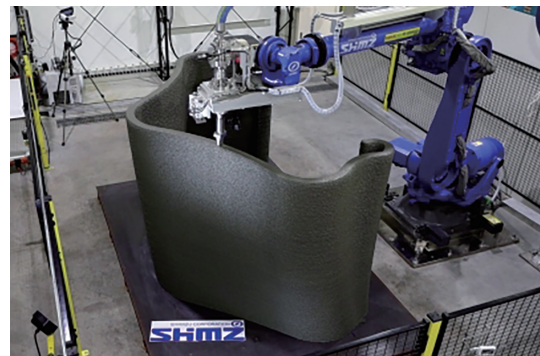


写真16 自由曲面形状の3Dプリンティング状況



写真17 3Dプリンティング型枠で構築した柱部材

(参考文献)

- 1) (公社)日本コンクリート工学会 「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 (JCI-TC192A)」