

建設用 3D プリンタの可能性

— 構造部材を印刷できるラックツムの開発と実用化 —

清水建設㈱技術研究所社会システム技術センター主任研究員 小倉大季

1. はじめに

近年、建設工事の生産性向上、環境負荷低減、ならびに設計自由度の向上などを目的として、セメント系材料を用いた建設 3D プリンタに関する研究開発が世界中で進められている。セメント系 3D プリンティング技術は、2010 年頃に欧米の大学で研究開発が活発化し¹⁾、その後、世界各国で本技術に関連する開発事例、プロジェクト数が急増した。海外ではすでに建設スケールの 3D プリンティング技術を用いて住宅や小規模な橋梁などの構造物を施工している事例が数多く報告されている。

国内においても、開発プレイヤーの数、および実プロジェクトへの適用件数は年々増加傾向にあり、適用対象の範囲が広がっている。適用対象としては、たとえば柱部材、梁部材、基礎部材、壁部材、重力式擁壁、ベンチ、集水桝、縁石、および附帯構造物などさまざまである²⁾。工場など（オフサイト）でプリントした積層体を施工現場に運搬して適用するケースだけでなく、施工現場の敷地内や近傍（ニアサイト）で部材をプリントして適用するケースや、構造物を構築する

施工現場（オンサイト）に 3D プリンタを設置して積層体を直接プリントするケースも増加している。

このように、ひとえにセメント系 3D プリンティング技術と言っても、適用対象、適用スケール、適用方法、プリント場所などはさまざまであり、それぞれの事例のメリットとデメリット、設計で考慮すべき項目などは異なることが考えられる。今後、国内で当該技術が広く適用されていくためには、実施事例を増やしながら、3D プリンティング適用によるメリットを分析するとともに、3D プリンティングの強みや可能性を発揮できる適用対象を整理することが必要といえる。

そこで本稿では、3D プリンティング技術を実プロジェクトに適用した 3 つの事例を取り上げながら、その適用における特徴や実用の観点でのメリット、デメリットを紹介する。ここで取り上げるのは、東京都江東区に建設した自社施設「温故創新の森 NOVARE」で実施した事例である。この事例では、3D プリンティング技術の可能性を拡げるために、表-1 に示すとおり 3 つの建築構造物に対して異なる方法で適用を行った。1 つは、駐車場の庇構造である。ここでは、建築基準

法第 37 条第二号の規定に適合するものとして、国内で初めて国土交通大臣の認定を取得した 3D プリンティング材料を用いて構造部材を直接プリントすることに挑戦した。2 つ目の対象は、幅 20 m、高さ 4.5 m の鉄骨鉄筋コンクリート造の壁状柱である。ここで模索したのは、オンサイトプリンティングと環境配慮型の 3D プリンティングの活用方法である。3 つ目の対象は、倉庫のシェル構造屋根である。曲面を造形する特性に長けた 3D プリンティングを活かしつつ、積層体の優れた力学特性と高い水密性を活かす目的で屋根板へ適用した。

2. 開発した 3D プリンティング技術

建設スケールの 3D プリンティングにはいくつかの方式があるが、主流となっているのは写真-1 のようにフレッシュ状態のセメント系材料をノズルから押し出して積層することで、立体形状を作製する技術（材料押出方式）である。著者らが開発した 3D プリンティング技術もこの材料押出方式に分類される。

材料押出方式の 3D プリンタでセメント系材料を積層造形する場合、材料に要

表-1 温故創新の森 NOVARE で適用した建設 3D プリンティングの概要

| 適用対象 | 駐車場庇構造 | 壁状柱 | シェル構造屋根 |
|-----------|---|--|---|
| 構造物サイズ | 8.7m×6.7m×高さ3.8m | 20.0m×4.5m×高さ5.1m | 28.8m×3.2m×高さ3.2m |
| 適用方法 | 構造部材（梁） 構造部材型の埋設型枠（柱） 非構造部材型の埋設型枠（梁、柱） | 非構造部材型の埋設型枠 | 非構造部材 |
| プリント場所 | オフサイト | オンサイト | ニアサイト |
| 使用プリンタ | ロボットアーム型 | ガントリー型 | ガントリー型 |
| 完成イメージパース |  |  |  |



写真-1 材料押出方式の3Dプリンティング

表-2 ラクツムの代表的な硬化物性の試験値

| 試験項目 | 試験値 | 試験方法 |
|--------|---------|------------|
| 圧縮強度 | 110 MPa | JIS A 1108 |
| 割裂引張強度 | 6 MPa | JIS A 1113 |
| 曲げ強度 | 12 MPa | JIS R 5201 |
| 静弾性係数 | 35 GPa | JIS A 1149 |
| ポアソン比 | 0.21 | ひずみゲージで測定 |



写真-2 ラクツムのたわみ硬化挙動

求められる性能は、従来のコンクリートに求められる性能とは異なる。まず、細径のホースやプリントヘッドのノズルを通過させて移送しやすい性能（押し出し性）が必要である。この性能が低い場合、ノズルなどで材料の閉塞が起きる可能性がある。また、プリントされた材料は、次にプリントする層（上層）の自重によって変形することを最小限に留める必要がある。自重に伴う変形は、積層体の崩壊を引き起こす可能性があるためである。この抵抗性を有する場合、積層性が高いといえる。そこで、押し出し性と積層性を両立させた配合を探索するために、数値解析と実験の両輪で検討を行い、「ラクツム」という繊維補強セメント複合材料を開発した。この複合材料は、セメント、細骨材、混和材（シリカフェームなど）のほかに、合成繊維、高性能減水剤などで構成される。フレッシュ状態では押し出し性と積層性を両立し、硬化後には優れた力学特性と物質移動抵抗性を発揮する。

表-2に、ラクツムの代表的な硬化物性の一覧を示す。この試験値は、型枠で

採取した供試体から得られた材齢28日時点の結果である。写真-2は、ラクツム薄板の曲げ載荷状況である。ラクツムは繊維による補強効果によりたわみ硬化挙動を呈する。

図-1は、ラクツム硬化体の耐久性を評価した結果である。実案件に適用した柱型枠³⁾と同一の条件で、2020年に製作した3Dプリント部材を屋外に3年暴露し、表面観察、表面吸水試験（SWAT法）、中性化深さの測定、ならびに力学試験を行った。試験の結果、表面にひび割れなどの変状は見られず、表面吸水速度は0.01ml/m²/s、中性化深さは0mmであり、一般的なコンクリート部材と同等以上の性能を有することが確認された⁴⁾。これまでの3Dプリンティング技術では、モルタルフィラメントの層間（積層界面）に脆弱層が形成されることが報告されているが⁵⁾、本検討では、積層界面でも高い物質移動抵抗性を有することが明らかになった。



現場適用部材と同一の製造方法/養生条件

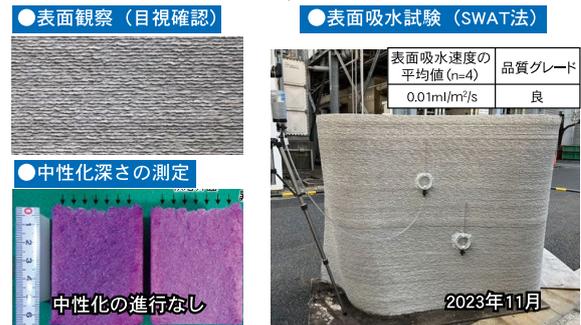


積層後:初期養生

材齢1日:封かん養生

材齢1か月:屋外暴露

3年後



●表面観察 (目視確認)

●表面吸水試験 (SWAT法)

●中性化深さの測定

中性化の進行なし

| | |
|--------------------------|--------|
| 表面吸水速度の 平均値 (n=4) | 品質グレード |
| 0.01ml/m ² /s | 良 |

2023年11月

図-1 屋外に3年暴露した積層体の耐久性評価

3. 適用事例

(1) 駐車場庇構造

国内の3Dプリンティング事例のほとんどは、プリントした積層体を非構造部材として適用しており、そのうちの多くは埋設型枠としての適用である²⁾。この適用方法は、型枠工の削減や自動化というメリットはあるものの、埋設型枠を設計上の有効断面として考慮することができないため、積層体の厚さ分だけ部材断面が大きくなるというデメリットがあった。構造部材として適用できない理由の1つは、建設3Dプリンティングに適用されるセメント系材料の多くがモルタルであり、建築基準法第37条で規定される指定建築材料ではないためである。そこで著者らは、先に述べたラクツムに粗骨材を添加するなどの改良を行った材料を新たに開発し、建築基準法上の指定建築材料として国土交通大臣の認定を取得した。これにより、プリントした積層体を構造部材として扱うことができるようになり、同法第20条の大臣認定を必要とせず通常の確認申請で建築することが可能になった。

この構造用ラクツムを用いて、構造部材そのものをプリントすることに挑戦した事例が、駐車場庇構造である。図-2に全体構成図を示す。庇構造体のデザイ

ンは、アーチ形状を取り入れた木の葉状の外形の梁を左右2本ずつ計4本の柱で支える左右対称形とした。アーチ形状の梁断面は、梁の中央部分で最小となり、柱との仕口部分で最大となる。長期荷重は2本の太柱で支え、細柱により安定性を付加する架構となっている。構造用ラクツムは、意匠上も構造上も部材を細くすることが求められた梁の中央部分と細柱に使用した。梁の中央部分は構造部材として、細柱は構造部材型の埋設型枠として適用された。鉄骨部材との接合部については、接合金具であるT字形の鋼板を積層体内部に配置し、その鋼板に鉄骨部材を取り付ける手法を用いた。

アーチ梁は、写真-3のように構造用ラクツムを積層しながら、フィラメントの層間に軸方向鉄筋と接合金具を配置していく方法でプリントした。使用した3Dプリンタは、6軸垂直多関節型ロボット（以下、ロボットアーム）に加え、材料移送用のポンプおよびホース、材料を吐出するノズル、圧力センサ、制御盤、タッチパネルならびにそれらを統合制御するソフトウェアで構成される。ロボットアームで、ノズルが所定のプリント経路上を動くように制御し、材料吐出量をきめ細かく設定することにより断面寸法を変動させた。

ここで配筋したのは軸方向鉄筋のみであり、せん断補強鉄筋は配置しなかった。そこで、曲げ載荷実験により梁の構造性能を確認した⁶⁾。図-3、写真-4は、せん断スパン比を7.1とした梁部材の曲げ載荷実験の結果である。プリント試験体は、型枠に打込む方法で作製した試験体と同等以上の耐荷性能、変形性能を示し、最大荷重はコンクリート標準寸方書【設計編】に提示されている設計式で算定される値以上であった。ひび割れ分散性についても良好であり、鉄筋と積層体との付着が十分であることが確認された。

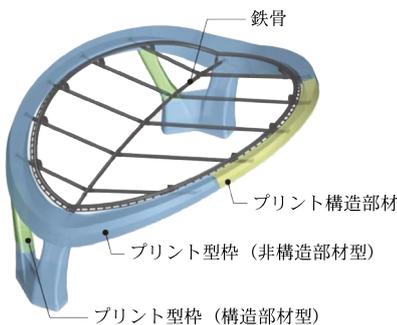


図-2 駐車場庇構造の全体構成図

また、積層体に埋め込んだ接合金物についても、その引抜き耐力とせん断耐力を試験から確認した。これらの実験で得られた試験値が、設計で使用した値よりも大きい強度が得られることを確認した。

3Dプリンティングで製造した梁部材や埋設型枠は、製造後に屋外で4週間の封緘養生を行った。その後、それぞれの部材を現場に運搬して、組み立てた。ラクツム型枠は、その高い引張特性によって、型枠内部へのコンクリート打込みに伴って生じる側圧に対して抵抗できる。本事例では、支保工なしで柱型枠にコンクリートを打ち込んだが、型枠にひび割れは発生しなかった。写真-5に、コンクリート打込み後の全景を示す。



写真-3 ロボット型プリンタによる梁部材の製造

(2) 壁状柱の埋設型枠

前節で述べた事例では、現場から離れた場所で製造した積層体を現場に運搬して、適用したものである。一方、現地で直接部材をプリントすることができれば、資材の輸送コストや排出されるCO₂の削減、施工時間の短縮、労務の削減などの効果が期待できる。そこで、2つ目の事例では、建設地において直接構造物をプリントすることができる大型3Dプリンタを用いて、オンサイトプリンティングを試みた。

壁状柱の曲面形状のデザインは、構造解析から得られたせん断耐力分布に基づき曲線形状を決定した(図-4)。この形状により、矩形の型枠で躯体を構築し

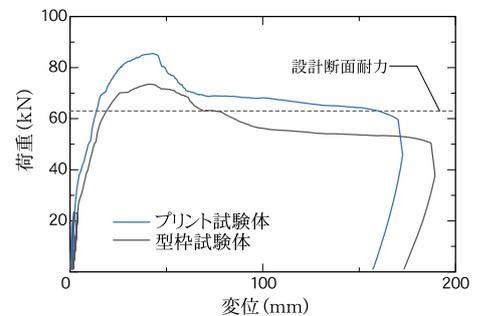


図-3 曲げ荷重-変位関係

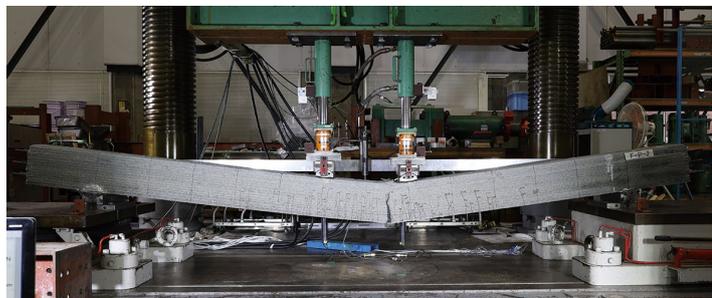


写真-4 曲げ載荷実験



写真-5 完成した駐車場庇構造の全景

た場合に比べて、躯体のボリュームを約1割削減することができた。また、プリントした型枠内部に打込むコンクリートには、CO₂排出量を削減するために高炉スラグ粉末を大量に添加したコンクリートを使用した。高炉スラグ粉末を添加したコンクリートは、一般的なコンクリートよりも中性化速度が速い傾向にあるため、通常は外気に面した部材では採用することが難しく、これまでは地下構造物への採用が主であった。本事例では、ラックムの高い物質移動抵抗性を活かして、地上構造物への適用を試みた。これにより、躯体形状によるボリューム削減に加えて、使用材料の面でもCO₂排出量の削減を実現し、環境配慮型構造物としての適用を図った。

写真-6に、オンサイトプリンティングの状況を示す。使用した3Dプリンタは、ガントリー型クレーンをベースとした装置である。地面に敷設したレール上を走行する幅7.2m、高さ7.5mの門型フレームのガーダー部分に上下左右に移動するスライドパイプが装備されており、スライドパイプの先端にはプリントノズルが接続されている。プリンタの造形範囲は20m×4.5m×高さ5.1mである。長手方向の20mについてはレールを延長することでさらに拡げることも可能である。写真-7のようにプリントノズルはクランク形状になっており、先行して施工した鉄筋や鉄骨と接触することなく、その外周にプリンティング材料を積層することが可能である。図-5にプリントパスのシミュレーション結果を示す。あらかじめシミュレーションを行い、ノズルが鉄筋や鉄骨との接触することがないことを確認した後に、プリンティングを実施した。本事例では、積層幅は80mm、積層厚は10mm、ノズルの移動速度は80mm/secに設定した。

オンサイトプリンティングは、構造物を構築するその場所に積層体を直接施工できるため、大型の構造物を分割することなくシームレスに構築できることがメリットとして挙げられる。一方で、工場でのプリンティングとは異なり、雨天時に施工できないことやプリント環境が一定ではないことなど、施工安定性を確保することが難しいことがデメリットである。

本事例では、夏期（7～8月）にプリンティングを実施した。構造物をプリントするヤードとラックムを練り混ぜる

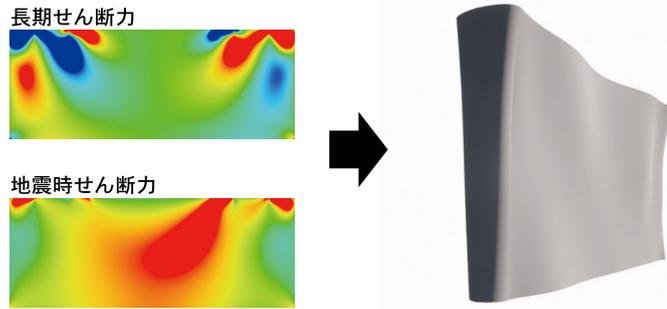


図-4 壁状柱の形状デザイン



写真-6 ガントリー型プリンタによるオンサイトプリンティング



写真-7 組み立てた鉄筋の外周へのプリンティング

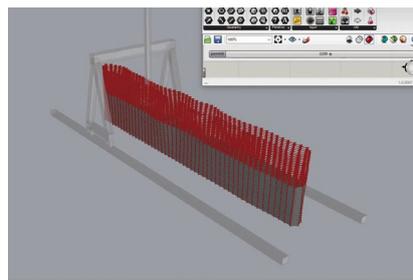


図-5 プリントシミュレーション

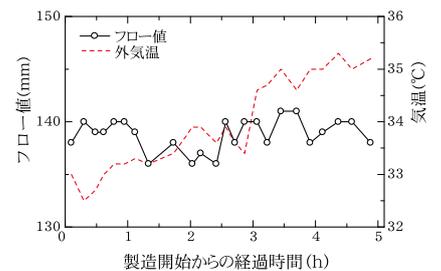


図-6 各バッチのフロー値の変化



写真-8 完成した壁状柱の全景

ヤードを仮設の足場で囲んだが、大空間であったため環境温度を一定に保つことは難しかった。気温変動に伴う材料のフレッシュ性状の変化や積層性への影響を把握するために、事前に環境可変室にて環境温度とラックムのフレッシュ性状の関係を試験した。その結果、35℃環境においても混和剤の添加量を変動させるだ

けで、ラックムのフレッシュ性状を20℃環境と同等に保つことができることを示すデータが得られた。プリント中はそのデータを基に、環境温度に応じて混和剤の添加量を微調整し、ラックムのフレッシュ性状が一定になるように管理した。プリント時の外気温と材料試験結果の一例を図-6に示す。外気温が35℃

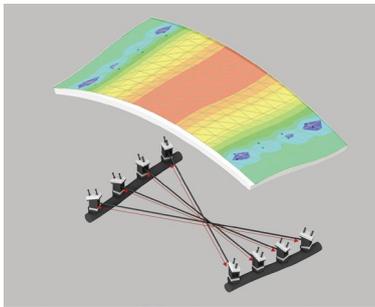


図-7 屋根板1ユニットの構成図

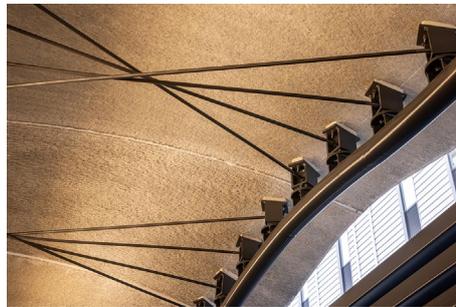


写真-9 ロッドによる積層体へのプレストレス導入



写真-10 完成したシェル構造屋根の全景

を超える時間帯においても、材料管理として行ったフロー試験から得られた値はプリント可能な範囲内で安定した結果だった。写真-8に完成状況を示す。

(3) シェル構造屋根

ラクツムの優れた材料特性の1つとして、圧縮強度110MPa、曲げ強度12MPaという高い力学特性があるが、もう1つとして水密性の高さが挙げられる。2章で述べたとおり、表面吸水試験の結果、ラクツムで製造した積層体は、3年間の屋外暴露後においても従来のコンクリートより表面吸水速度が小さいことが確認されている。これらの特性を活かす目的で、本事例ではシェル構造の屋根板への適用を試みた。本計画においては鉄筋を使用しないシェル構造の屋根とした。

図-7に、屋根板1ユニット(1.6m×3.2m)の構成図を示す。ねじれたアーチ形状の3Dプリンティング屋根板が建物長辺の波形状の曲面梁の上に架かるデザインとした。水平方向の伸びやかさを表現するために、屋根板のライズは最小限に抑え、屋根板の自重によって生じるスラスト力は、緊張力を導入したロッドでキャンセルする架構とした。

製造は、前節で述べたガントリー型の3Dプリンタを用いて、2枚の屋根板をつなぎ合わせた一筆書きの形状のモデルを用いてプリントした。両端がサインカーブでねじれたアーチ形状であるため、

部分的にオーバーハングが生じる形状となる。積層幅は80mm、積層厚は10mm、ノズルの移動速度は80mm/secに設定し、一度にプリントする高さは1.6mとした。プリントは、冬季(2~3月)に施工現場内の半屋外で行った。プリント環境は、外気の影響を受ける状況であり、低温環境下でのプリントとなったため、環境可変室で事前に行った試験結果をもとに混和剤の添加量を決定した。

屋根板のプリント後は、現場内で4週間以上の封緘養生を行った。その後、硬化した屋根板を切断し、サインカーブ状の鉄骨梁の上に架設した。架設時に屋根板には、写真-9のようにロッドを設置した。このロッドに所定の緊張力を導入した後、屋根板を梁に固定した。屋根板間のジョイントはシーリングによって止水処理を施した。写真-10に完成後の全景を示す。本事例では、屋根板だけでなく地覆部分についても3Dプリンタで製造した。

4. おわりに

セメント系材料を用いた建設3Dプリンティング技術の可能性を拡げるために、技術の開発を進めるとともに、実プロジェクトのなかで異なる方法での活用を試みてきた。建設3Dプリンティング技術は多様な可能性があり、建設産業が抱える複数の課題の解決や新たな価値を生み出すツールとしての発展が期待されて

いる。しかし、現在のところ、本格的な普及には至っていないのも事実である。技術面だけでなく、法規制やコスト面などの課題が依然として残されている。特に、建築構造物の構造耐力上主要な部分に適用する場合における材料に関する法規制の壁は厚い。当社は、本稿で紹介したように建築基準法第37条に適合する材料として国土交通大臣の認定を取得したが、認定はプラントでの材料製造を前提としたものであり、材料の運搬時間に制約があること、ならびに粗骨材を添加したことによるノズルなどでの材料の閉塞リスクが高まることは、実用において弊害になりうる。今後、3Dプリンティングをさらに普及させていくためには、現場練りコンクリートでの大臣認定取得を可能にすることや、モルタルでも強度などの性能が保証されている場合には認定を簡略化するなどの規制緩和が望ましいと考えられる⁷⁾。技術的な進化はもとより、行政含めた業界全体で規制を変えていくことも必要である。

今後も技術的な研究開発や実用化だけでなく、知見や事例の共有を通して、3Dプリンティングが誰でも使える技術へと発展することに向けた活動を継続していきたい。

【参考文献】

- 1) 小倉大季：建設スケールの3Dプリンティング技術に関する海外の研究動向、コンクリート工学, Vol. 56, No. 2, pp. 174~180, 2018. 10
- 2) 土木学会：3Dプリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会(364委員会)成果報告書, 2023. 10
- 3) 小倉大季：建設用3Dプリンティング技術の開発と実践, Structure, No. 161, pp. 38-41, 2022. 1
- 4) 阿部寛之, 小倉大季, 山本伸也, 菊地竜: 屋外暴露した3Dプリンティング積層体の力学特性および耐久性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, No. 1, pp. 2005-2010, 2024. 6
- 5) Jean De' M Malan, Algurnon Steve van Roooyen, Gideon P. A. G. vanZijl: Chloride Induced Corrosion and Carbonation in 3D Printed Concrete, Infrastructures, 2022. 12
- 6) 原紘一郎, 小倉大季, 山本伸也, 阿部寛之: 材料押出方式の3Dプリンティング技術で作製した軸方向鉄筋を有する梁部材の曲げ性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 1618~1623, 2023. 7
- 7) 内閣府：規制改革推進会議会議情報, 第7回スタートアップ・イノベーションワーキング・グループ議事次第, https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/meeting/wg/2210_01startup/230127/startup07_agenda.html (2023年6月1日アクセス)