

建設用 3D プリンタを用いた PC 構造体の設計施工デモ実証と今後の展望

生産性向上と新たな構造の実現を目指して

木ノ村 幸 士

筆者らは、生産性や安全性の向上、新たな構造の実現を目指して建設用 3D プリンティング技術の開発を進めてきた。一方で、本技術による部材製作では、積層中の鉄筋補強が困難であるため、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。この課題を克服すべく、3D プリンティングで製作した部材を接合しプレストレスを導入して PC 構造体として成立させるデモ実証プロジェクトを実施した。本プロジェクトは、積層構造に起因する硬化体物性の把握や、積層構造体の設計・施工ノウハウの蓄積、構造性能評価の基礎検討を目的としている。本稿ではこれらの概要を紹介するとともに、実用化に向けた課題や今後の展望について考察する。

キーワード：3D プリンタ、生産性向上、積層、トポロジー最適化、PC 構造体、プレストレス、構造性能

1. はじめに

技能労働者の高齢化や離職に伴い、建設業の労働力不足は深刻化している。また、長時間労働の削減や事業継続性の観点からも、生産性の向上は喫緊の課題となっている。

筆者らは、これまで省人化による生産性や安全性の向上、また従来型のコンクリート施工技術では困難であった新たな構造の実現を目指し、材料押出方式の 3D プリンティング技術の開発を進めてきた¹⁾。この技術は、柔らかい状態の材料を押出しながらノズル位置や移動速度をデジタル制御し、一層ずつ積層を繰り返しながら任意の 3 次元形状を造形、製作するデジタルファブリケーション技術である。

このような 3D プリンティングでは、型枠が不要となることから、製作可能な部材形状の自由度が高く、後述するトポロジー最適化手法による最適化設計と融合することで、軽量化や剛性の付加、また材料の削減等を期待できる利点がある²⁾。一方で、積層しながら鉄筋補強できないため、引張力が作用する構造部材に適用することができず、用途が意匠性を重視したオブジェ等の製作に限定されてしまうことが、これまで最大の課題であった。現状、3D プリンティングへの適用が考えられる補強方法としては、事前に鉄筋等の補強材を配置する方法、短繊維を混合してプリンティングする方法やケーブル補強材を製作中に埋め込む方法、製作後に補強材を挿入しプレストレスを導入する

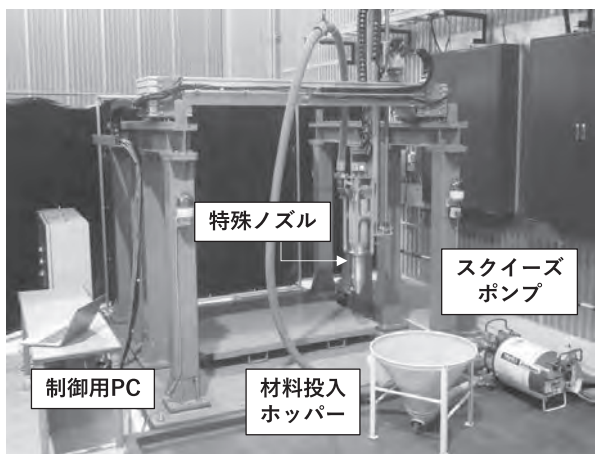
方法が挙げられているが³⁾、実規模スケールで構造設計・製作・性能評価を行った事例は、世界的に見ても数例しかない^{4), 5)}。

そこで、合理的な構造を形として再現できる 3D プリンティングの特長を最大限に生かしつつ、構造部材への適用可能性を探るため、最適化設計により 3 次元的に断面が変化するデモ歩道橋を設計し、構成する多種多様な断面部材を 3D プリンティングで製作・接合した後、プレストレスを導入して PC 構造体として成立させる実証プロジェクトを実施した^{6), 7)}。本プロジェクトは、層を積み重ねて作る積層構造に起因する硬化体物性の把握や、積層構造体の設計・施工ノウハウの蓄積、構造性能評価の基礎検討を目的としている。本稿ではこれらの概要を紹介するとともに、実用化に向けた課題や今後の展望について考察する。

2. 実証プロジェクトの概要

(1) プリンティング装置（建設用 3D プリンタ）

本プロジェクトでは、筆者らが開発したガントリー式の 3D プリンタを使用した（図—1）。製作可能な最大寸法は、幅 1.7 m × 長さ 2.0 m × 高さ 1.5 m である。独自に開発した特殊ノズルを装備し、建設工事で一般的な脈動を伴うポンプと組み合わせても、ノズル部で脈動影響を解消し定常量の材料を押出すことができる。また、材料を垂らすことなく不連続区間を自由に移動することも可能である。ノズル口径は 25 mm



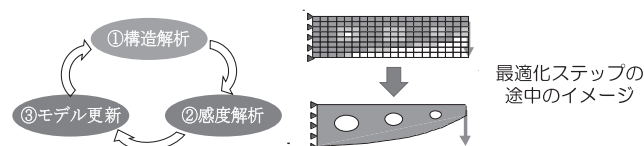
図一 開発・使用した建設用 3D プリンタ（ガントリー方式）

で、1層当たり1cmの厚さで積層を繰り返すことにより、ひと筆書きに限らず様々な形状部材を迅速かつ高精度に自動製作することができる¹⁾。

(2) トポロジー最適化手法

設計者の経験や固定観念に囚われない自由度の高い合理的な構造を数値解析的に求める手法としてトポロジー最適化が注目されている。本手法は、形状に加えて空洞の数の増減などの形態の変更を可能とする最も自由度の高い構造最適化の手法で、寸法最適化や形状最適化と比較して構造の性能をより改善できる可能性を有している⁸⁾。

トポロジー最適化とは、質量、変位などの制約条件の下、有限要素法による構造解析、その結果を受けての感度解析、モデルの変更を繰り返しながら、不要な材料（要素）を削り最適な形状を見出していく手法である（図一2）。本プロジェクトでは以下の形状設計において本手法を活用した。



図一2 トポロジー最適化の手順

(3) 使用材料および硬化体物性

使用材料は、筆者らが3Dプリンティング用に開発してきた高チキソトロピー性を有するセメント系材料である^{6), 7)}。これまでの試験によって得られた代表的な硬化体物性を表一1に示す。引張強度は荷重方向と積層方向が一致する向きを縦目、直交する方向を横目と定義している。積層構造に起因し、引張強度に明確な異方性があることが確認される。

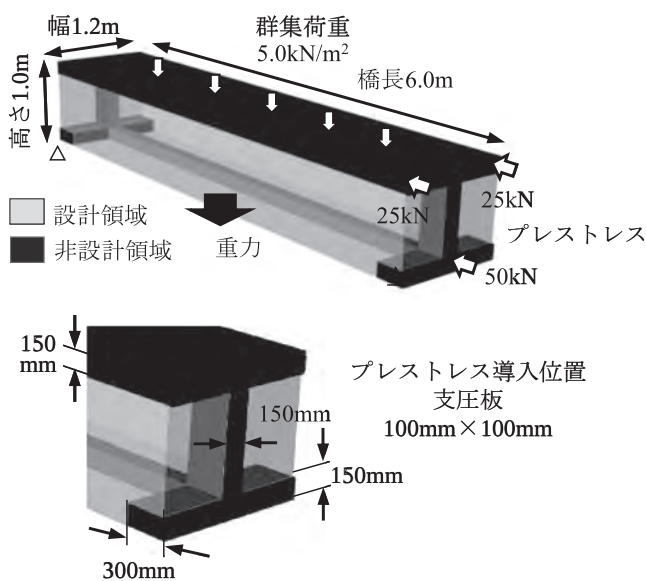
表一 1 代表的な硬化体物性

ヤング率	ポアソン比	単位重量
20 kN/mm ²	0.21	22 kN/m ³
圧縮強度	引張強度（左：縦目、右：横目）	
30 N/mm ²	2.2 N/mm ²	3.0 N/mm ²

(4) 最適化設計（形状設計）

最適化設計の対象とするPC構造体（橋桁）は、橋長6.0m×幅1.2m×高さ1.0m、上フランジ端部に2本と下フランジ中央に1本のPC鋼棒を配置する形状である。想定荷重として上面に5.0kN/m²の群集荷重、桁自重およびプレストレスを考慮し、想定荷重に対し最大の曲げ剛性となるように、設計領域を対象に構造最適化を図った（図一3）。なお、載荷面および支持面は非設計領域として最適化の対象外としており、形状は初期形状のままで変化させない。

最適化により決定した設計領域（図一4（a）の薄灰色部分）の質量は、最適化前の設計領域の質量（図一3の薄灰色部分）に対し1/4の質量となっている。最終的に製作した形状は、施工性や意匠性を考慮して



図一3 最適化の対象形状



(b) 3D プリンティングで製作した PC 構造体

図一4 決定した形状と製作した実物の比較

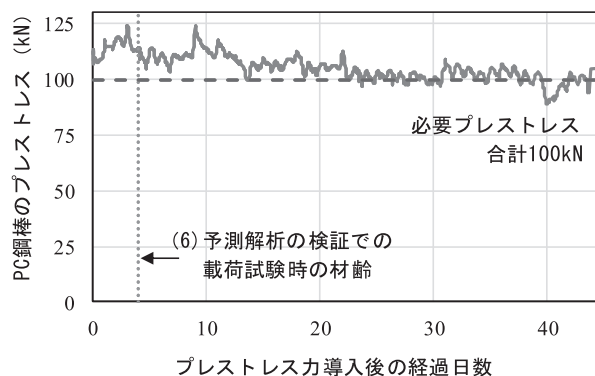
多少の変更を加えているが、3D プリンティング技術を用いることにより解析から決定した合理的な形状をほぼ忠実に再現できることが確認できる(図—4(b))。

(5) 製作方法

PC 構造体は計 44 部材で構成されている。各部材をプリント製作する際に PC 鋼棒挿入用の孔を 3 箇所あらかじめ設け、各部材を接合後に PC 鋼棒を挿入し緊張することで一体化している。なお、各部材の接合面は、プレキャストセグメント用エポキシ樹脂系接着剤で接着している。プレストレスとして、上フランジ端部の 2 箇所にそれぞれ 25 kN、下フランジ中央に 50 kN を導入することで、T 型の梁として群集荷重により発生する曲げに耐えられる構造としている(図—5)。

緊張時の導入プレストレスは、別途実施した積層硬化体のクリープおよび収縮試験結果ならびに PC 鋼棒のリラクセーションによるプレストレスの減少を考慮して、設計断面における必要プレストレス(合計 100 kN)に対し、1 割増の 110 kN を導入した。PC 鋼棒には $\Phi 17$ mm (C 種 1 号) を用い、固定側の定着部は端部にアンカープレートを設置してナットで固定した。プレストレスの導入は上下 3 本同時に片引きで行った。

以後、PC 鋼棒のひずみ計測を行い、導入プレストレスの経時変化を確認した。プレストレス導入後 44 日経過時点では 105 kN となっており、想定 of 100 kN に漸近している(図—6)。なお、図中に細かな振動が見られるが、これは外気温の変化に伴う影響である。



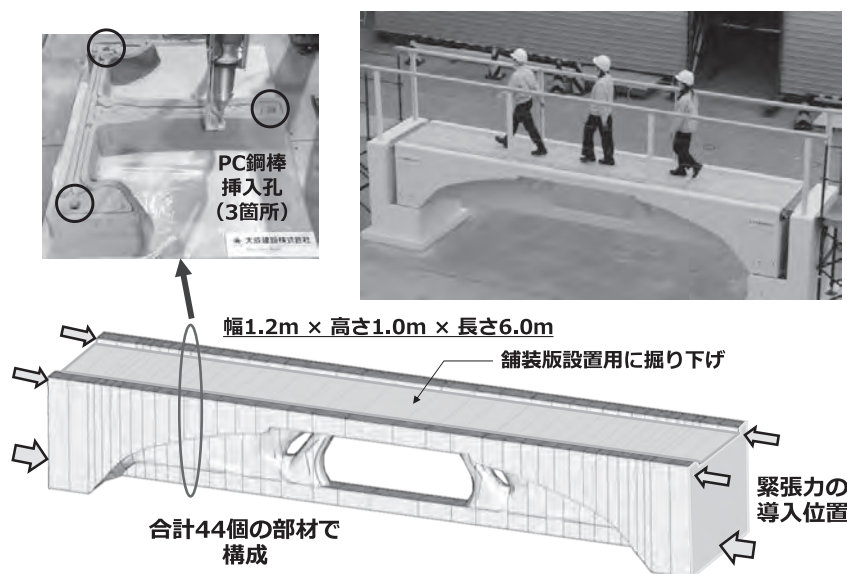
図—6 導入プレストレスの経時変化

(6) 予測解析の検証

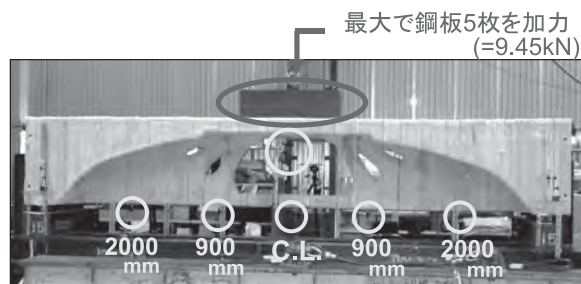
製作した PC 構造体に対して載荷試験を実施することで、実物の挙動評価と有限要素法 (FEM) による予測解析の検証を行った。なお、予測解析の構造モデルは、部材間の接合面を考慮しない線形弾性連続体モデルとした。材料物性には、表—1 に示すヤング率、ポアソン比、単位重量を用いた。また、PC 鋼棒はモデル化せず、端部にプレート形状をモデル化し、プレストレスに相当する大きさの圧力をプレートに導入することでプレストレスを考慮した。

予測解析では、橋長の中央付近に 12 人程度集まる状態を短期供用時の最大の状態と仮定し、1 枚約 1.9 kN の鋼板を 1 枚ずつ橋長中央部に載荷することで、最大 5 枚 (9.45 kN) まで集中荷重として段階的に加力した。このとき、上下フランジの中央部および中央から 900 mm、2000 mm 離れた下フランジの直下で鉛直変位を計測した(図—7)。

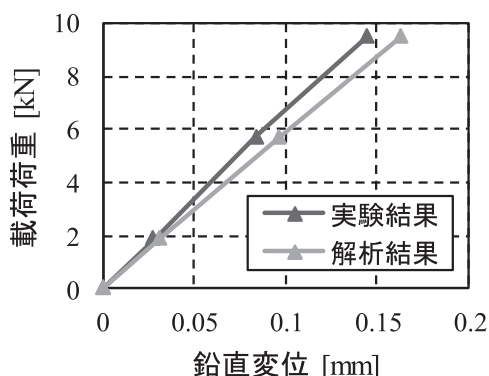
測定の結果、鋼板載荷毎の上フランジ直下の鉛直変位(図—8)および最大加力時の各計測点での鉛直変位



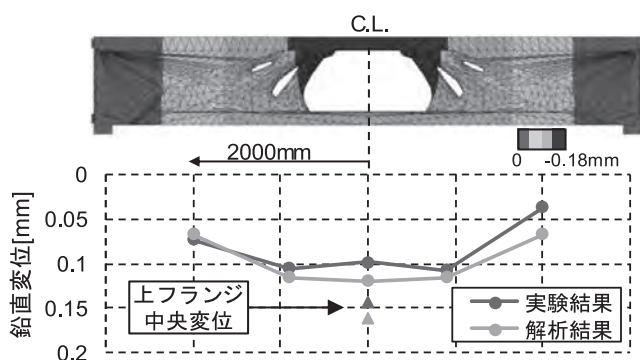
図—5 PC 構造体の全体構成と製作方法



図一七 加力方法と鉛直変位の計測点



図一八 上フランジ直下の鉛直変位の比較（鋼板载荷毎）



図一九 上下フランジ直下の鉛直変位の比較（最大加力時）

位（図一九）は、予測解析とほぼ同様の値を示すことが確認できた。実験値は荷重値に対してほぼ線形であり、上記加力範囲内では弾性体としての挙動を示した。また、最大加力時においても、ひび割れの発生や部材間接着部の目開き等の変状はなく、除荷後の残留変位も見られなかった。

3. 実用化に向けた課題

このように3Dプリンティングの特長を最大限に生かしつつ、プレストレスを導入することで、構造部材や構造体の製作に適用できる可能性が示された。しかしながら、実用化に向けては、これから検討・検証すべき課題も多い。

材料面では、3Dプリンティングを現場での製作や

施工に適用するためには、過酷な現場環境下においても材料性状のコントロールや耐久性の確保が求められる。型枠がなく乾燥を受けやすいため、強度発現やひび割れ発生への影響が懸念されること、また、層と層の境界面が物質移行経路となり中性化や塩化物の侵入が進みやすいことが指摘されている。

構造面では、3Dプリンティングに適した引張補強方法の開発や構造体としての挙動評価、強度異方性や接合部による影響を考慮した設計法の構築が今後の重要な課題である。本プロジェクトは、作用荷重レベルが小さな領域での挙動を確認した段階であり、終局に近い状態で積層構造体がどのような挙動を示すのか、また、どのような破壊形態を示すのか、今後実験により検討・検証を重ねていく必要がある。

施工面では、本プロジェクトでは固定型ガントリー方式の3Dプリンタを用いたが、最近ではタイヤ式やレール式、また昇降機能を備えた移動型の3Dプリンタも登場しており（写真一⁹⁾、¹⁰⁾）、コンクリート施工技術のDX（Digital Transformation）化は今後急速に発展する可能性がある。そのためには、正確な空間位置情報の把握や誤差の補正、形状モニタリング解析に基づく設計データの逐次更新や制御へのフィードバックなど、デジタル計測、即時解析、通信制御技術を駆使した高度な施工管理システムの構築が望まれる。さらには、連続的な材料供給手段の確保や、急な環境変化・装置故障を想定した多重防護策、緊急時対応など、様々な潜在リスクに対応できる冗長的な建設生産システムへと進化させていく必要があるだろう。

写真一 移動型3Dプリンタの事例（左：BAM Infra & Weber Beamix⁹⁾、右：CyBe Construction¹⁰⁾）

また、これらの技術的な課題に加え、3Dプリンティングに適した材料の品質確認試験方法や強度試験方法などの各種規準類の整備、積層構造体の設計評価手法の体系化、建築基準法等の関連法規制に関する見直しなどが、社会実装へ向けての課題や障壁になると考えられる。

4. 未来への期待と展望

本技術がもたらす未来の可能性は、生産性向上への寄与だけに留まらない。上述したトポロジー最適化形状の実現や、異なる材料（Multi-material）を複数同時に使い分けながら、多様な機能を兼ね備えた複合機能構造を実現するなど、3Dプリンティングのポテンシャルを生かすことで新たな価値が創出され、社会や生活を変える可能性も想像される。

海外ではRILEM¹¹⁾やACI¹²⁾などで、本技術に特化した研究委員会が活発に活動している。国内でもこの技術を発展させるため、2018年度に産官学共同でコンクリート工学会（JCI）にFS（Feasibility Study）委員会が発足し、その成果を受け19年度から研究委員会が活動を開始している¹³⁾。同研究委員会では、海外の最新動向の調査・情報収集を進めるとともに、各機関での共通試験の実施、3Dプリンティング技術の適用対象の明確化や技術開発ロードマップの策定、課題解決に必要な研究テーマの絞り込みなどの検討を進めている。

近年、海外では本技術を実際の大型構造物の建設に適用した事例も登場している。耐震基準が厳しい我が国では一筋縄にいかないかもしれないが、海外では確実に大きなムーブメントが起こりつつある。アラブ首長国連邦（UAE）のドバイでは、2030年までに建築物の25%を3Dプリンティング技術で建設することを政策として掲げている¹⁴⁾。また、オランダでは、プリント製作した自転車橋の供用開始¹⁵⁾に続き、公共事業で橋を架けるプロジェクトがスタートしている（図—10）¹⁶⁾。このように、3Dプリンティング技術は、従来の建設生産システムにおける既成概念に革新をもたらし、建設産業の構造、あり方、ビジネスモデルを大きく揺るがすゲームチェンジャーとなるかもしれない。

未知なる可能性を秘め、新たな価値の提供や直面する社会的な課題を解決に導く壮大な建設技術として、実用化に向けた研究開発を進めていきたいと考えている。



図—10 オランダ・ブリッジプロジェクト¹⁶⁾

5. おわりに・謝辞

最後になりますが本プロジェクトに使用した建設用3Dプリンタ「T-3DP[®]」は、(株)アクティオ、(独)国立高等専門学校機構有明工業高等専門学校、太平洋セメント(株)と共同開発したものです。また、太平洋セメント(株)には、本プロジェクト用に共同開発したセメント系材料をご提供いただきました。ここに誌面を借りて深謝いたします。

J C M A

《参考文献》

- 1) 木ノ村幸士、村田哲、小尾博俊、山本悠人、畑明仁：建設用3Dプリンティング技術の開発と今後の展望、土木学会建設技術研究委員会、土木建設技術発表会2019 概要集、pp.69-75。
- 2) 日経BP：特集「設計・施工を刷新する建設3Dプリンター」、日経コンストラクション2019年7月8日号、pp.28-47。
- 3) D.Asprone, C.Menna, F.P.Boss et al., Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete, Cement and Concrete Research, (2018) 112, 111-121.
- 4) M.Alawneh et al.: The world's first 3D-printed office building in Dubai, Proc. of 2018 PCI convention and National Bridge Conference, Denver, USA, 20-24 February, 2018.
- 5) B.Freek et al.: Large scale testing of digitally fabricated concrete (DFC) elements, Proc. of 1st Int. Conference on Concrete and Digital Fabrication -Digital Concrete 2018-, RILEM book series vol.19, pp.129-147, 2018.
- 6) 国内初 建設用3Dプリンタで製作した部材でPC構造物を構築、https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2020/200217_4882.html, 大成建設ニュースリリース、2020.2.17.
- 7) K.Kinomura et al.: Application of 3D printed segments designed by topology optimization analysis to a practical scale prestressed pedestrian bridge, Proc. of 2nd Int. Conference on Concrete and Digital Fabrication -Digital Concrete 2020-, RILEM book series vol.28, pp.658-668, 2020.
- 8) 山崎慎太郎：トポロジー最適化の概要と新展開、システム／制御／計測、Vol.61, No.1, pp.29-34, 2017.
- 9) BAM opens Europe's first concrete printing centre in the Netherlands, <https://www.bimplus.co.uk/news/bam-opens-europes-first-concrete-printing-centre-n/>
- 10) CyBe Construction Unveils New Mobile 3D Concrete Printer, the CyBe RC 3Dp, <https://3dprint.com/158972/cybe-mobile-3d-concrete-printer/>
- 11) RILEM, Technical Committee 276-DFC, Digital fabrication with cement-based materials, <https://www.rilem.net/groupe/276-dfc-digital-fabrication-with-cement-based-materials-351>
- 12) American Concrete Institute, ACI Committee 564, 3-D Printing with Cementitious Materials, https://www.concrete.org/committees/directoryofcommittees/acommitteehome.aspx?committee_code=C0056400
- 13) 丸屋剛：産官学によるオールジャパン体制を、セメント新聞社、月刊コンクリートテクノ、2019年8月号、Vol.38, No.8, pp.8-10.
- 14) Dubai 3D printing Strategy, <https://www.dubaifuture.gov.ae/our-initiatives/dubai-3d-printing-strategy/>
- 15) 世界初3Dプリント自転車橋が開通, <https://idarts.co.jp/3dp/3d-printed-bicycle-bridge-open-netherlands/>
- 16) <http://www.bridgeproject.nl/>

【筆者紹介】

木ノ村 幸士（きのむら こうじ）
大成建設(株)
技術センター 社会基盤技術研究部
主任研究員、博士（工学）、技術士（建設部門）

