

建設用 3Dプリンタによる生産性向上と今後の展開



技術・調達政策グループ
上席主任研究員

高橋 千明



技術・調達政策グループ
元主席研究員

浪岡 真則



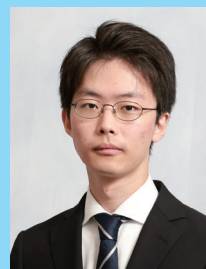
技術・調達政策グループ
主席研究員

片山 祐介



技術・調達政策グループ
研究員

堀越 千史



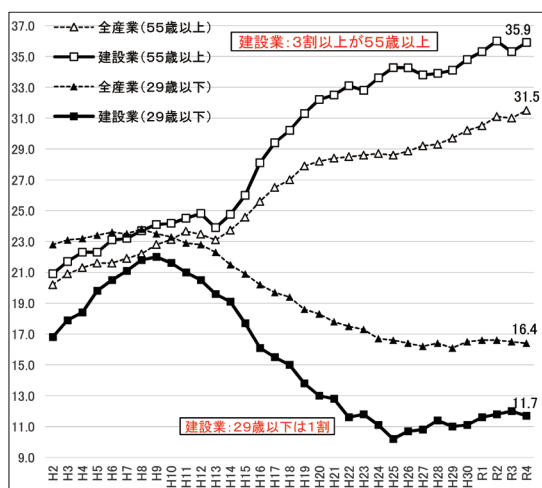
技術・調達政策グループ
研究員

野田 祥

1 はじめに

建設業に従事する技術者ならびに技能労働者不足が進む中、建設現場での省人化・省力化の推進が喫緊の課題となっている。

建設業就業者数はピーク時の 685 万人（1997 年：H9）より約 29% 減少し 483 万人になっている。業界の働き手不足とともに、55 歳以上が約 36%、29 歳以下が約 12% と働き手の高齢化が進行しており、今後の大量離職が想定され、次世代への技術継承の観点からも建設事業を継続する環境は厳しくなっている（図 1）。



出典：総務省「労働力調査」（暦年平均）を基に国土交通省で算出（※平成 23 年データは、東日本大震災の影響により推計値）

図 1 建設業就業者の高齢化の進行¹⁾

国土交通省では、建設生産プロセスのあらゆる段階において 3 次元データや ICT の活用等により建設現場の生産性を 2025 年度までに 2 割向上させることを目指して、2016 年度より「i-Construction」の取組を推進してきた。この取組を加速するため、新たな建設現場の生産性向上（省人化）の取組が

「i-Construction2.0」としてとりまとめられ、「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」が推進されているところである。建設用 3D プリンタは、これらの施策に資する新技術として着目されており、国土技術研究センター（以下、JICE）では、従来手法の代替として活用できるように、精度や適用条件等に関する事例の収集、分析を行っている。

建設用 3D プリンタによる造形は Additive Construction（以下、AC）と呼ばれ、海外においても、担い手不足、工期短縮、カーボンニュートラルといった課題に直接対処する可能性のある技術として着目され、近年は、特に大きな進歩を遂げている。3D プリンティングされた部材は、従来手法より耐久性が高く、持続可能で、環境に優しく、大量に安価で造形し、納期が早いことが証明される可能性があり、AC の品質保証の認証・認定に関する国際規格が制定され整備されつつある。

本稿は、国土交通省国土技術開発総合研究所社会資本システム研究室が発注し JICE が受注した「コンクリート工の生産性向上に向けた監督検査等に関する検討業務」における成果の一部（建設用 3D プリンタの我が国における適用事例と受け入れ検査の手法、ならびに関連する国際規格）をもとに、追加情報・JICE としての見解を補足して取りまとめたものである。

2 建設用 3D プリンタの適用事例と効果

2.1 直轄工事における適用事例数

インターネット検索および論文検索、ならびに各地方整備局へ問い合わせを行い、国内での建設用 3D プリンタの適用事例について調査した結果、直轄工事で 24 件の事例を収集した（令和 5 年度末時点）。

地方整備局別では、東北が最も多く 7 件、次いで中国 6 件、四国が 4 件であり、北海道、関東、北陸は各 1 件で少なかった。

また、九州、沖縄での実績はなかった。

技術開発者別ではスタートアップ企業が最も多く 22 件であり、その他は大手建設業と生コンクリート製造業が各 1 件であった（図 2）。

建設用 3D プリンタの適用は北海道から中国・四国まで全国的な広がりが見られ、また、スタートアップ企業が開発した技術を取り入れることにより、自社の開発技術を保有していない中小建設業での活用が増加している状況にある。

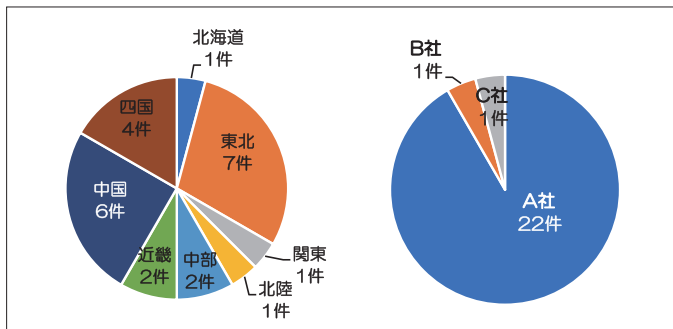


図2 直轄工事における適用事例数
(左：地方整備局別、右：技術開発者別)

2.2 構造物の種類

製作した構造物の種類では、集水桝の実績が 9 件と多く、次に重力式擁壁が 3 件、歩車道境界ブロックが 2 件であり、その他の構造物の実績は 1 件ずつであった（図 3）。

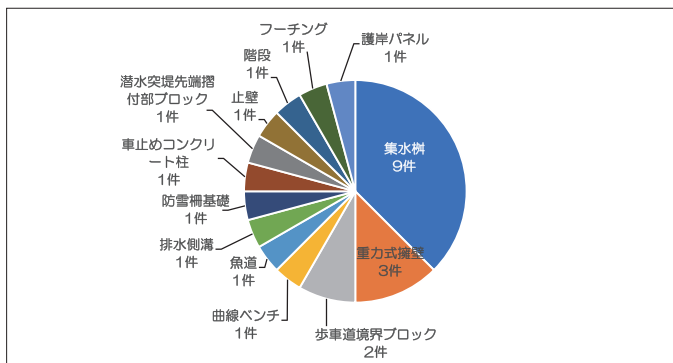


図3 製作した構造物の種類

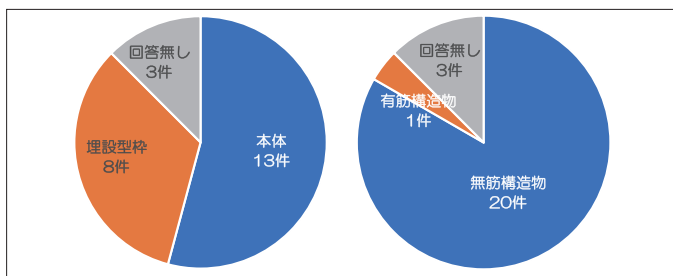


図4 製作した造形物の仕様
(左：適用部位、右：最終目的構造物の鉄筋の有無)

造形物の適用部位では、本体が 13 件、埋設型枠が 8 件であった。最終目的構造物の鉄筋の有無では、無筋が 20 件、有筋が 1 件、回答無しが 3 件であり（図 4）、有筋の事例は、橋梁下部工においてフーチングの埋設型枠を造形し、その内部に鉄筋

コンクリートを打設する工事であった。

積層造形の場合は、鉄筋周囲の造形が困難であるため、有筋構造物を 3D プリンティングした事例はほとんどないのが現状である。有筋構造物を 3D プリンティングするには鉄筋に材料を吹き付ける方式等、更なる技術開発が必要である。

2.3 適用によるメリット・デメリット

建設用 3D プリンタの適用によるメリット・デメリットについて施工会社の意見を聴取した結果、複雑な造形が容易との意見が最も多く 15 件であった。実際に、重力式擁壁や集水桝の事例では、構造端部の型枠制作が困難な特殊形状に対して、型枠不要にするとともに工期短縮を目指して 3D プリンタを適用している。また、型枠の熟練工が不足する中で、省人化、型枠不要、熟練工不要というメリットが挙げられた（図 5）。

適用のデメリットとしては、普及の進んでいない専用のモルタル材料を用いる等によって価格が高くなり経済性に劣ることが最も多く 16 件であった。また、技術指針・要領の未整備、積層模様の凹凸や寸法のバラツキ等が挙げられた（図 6）。

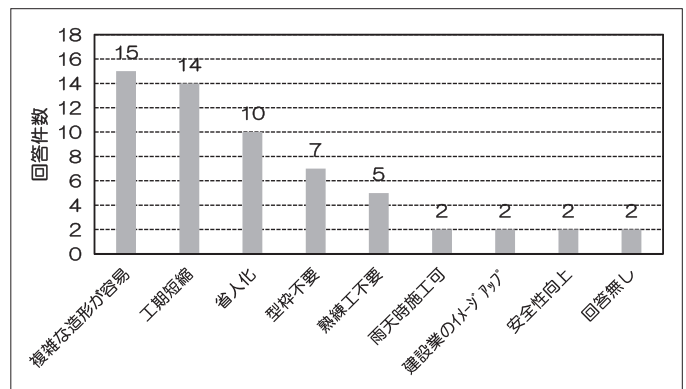


図5 3Dプリンタ適用によるメリット（施工者回答）

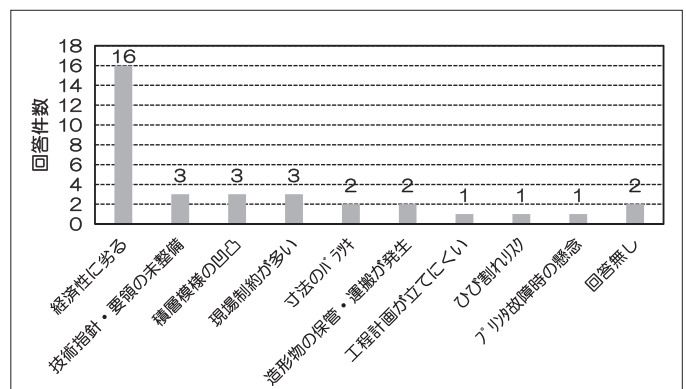


図6 3Dプリンタ適用によるデメリット（施工者回答）

3 建設用3Dプリンタの受け入れ検査の現状と課題

3.1 建設用3Dプリンタによる造形物の特徴

建設用 3D プリンタには、材料押出方式（MEX）、材料噴射方式（MJT）、バインダージェット方式（BJT）およびステレオイングラフィー（SLA）という 4 つの形式があるが、

ここでは、国内で適用実績のある材料押出方式を対象とする。

材料押出方式は、セメント系材料をノズルから押し出し、一筆描きで1層ずつ積み上げて造形する手法である。造形物は積層構造となることから以下の特徴を有する。

- 造形物の表面に凹凸ができる。
- 異方性を有し、積層方向に対する角度により力学的特性が異なる。
- 層間の接着性が必要となる。

建設用3Dプリンタによる造形物は、従来のコンクリート構造物もしくは埋設型枠の代替として適用されているが、受け入れ検査にあたっては、これらの特徴や従来のコンクリート構造物との相違点を踏まえる必要がある。



写真1 施工中の重力式擁壁（新庄砕石工業所）²⁾

3.2 出来形管理の現状

建設用3Dプリンタにより製作された造形物について出来形管理項目と出来形計測手法をどのように定めたか調査した結果、受発注者間の協議で決定したケースが最も多く11件、次いで従来通りの施工管理基準に従ったケースが7件、受注者の提案により決定したケースが4件であった。

建設用3Dプリンタによる造形物であっても、構造物として現行の出来形管理基準を満足する必要があることから従来通りの施工管理基準を適用したケースもあるが、現状では、小規模構造物への適用が多いこともあり、出来形管理基準を明確に決めて適用しているケースは少ない。

出来形管理基準と出来形計測手法に関する懸念事項の有無では、課題ありとの回答が10件、特に無しが9件であり、積層模様の計測ルールに起因した課題が挙げられた（図7）。

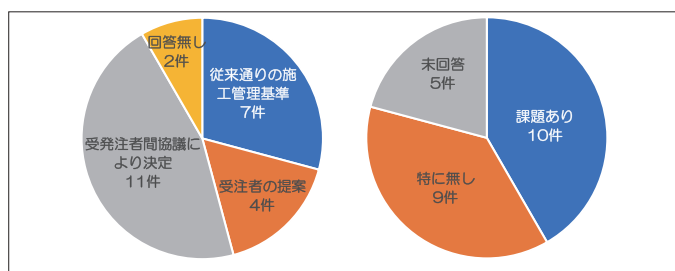


図7 出来形管理基準と出来形計測手法について

（左：出来形管理基準をどのように定めたか、右：出来形管理項目と出来形計測手法に関する懸念事項の有無）

3.3 品質管理の現状

3Dプリンタにより製作された造形物の品質管理項目および品質管理手法をどのように定めたか調査した結果、出来形管理と同様に受発注者間の協議で決めたケースが最も多く13件、従来通りの施工管理基準に従ったケースは3件であった。

品質管理項目と品質管理手法に関する懸念事項の有無では、課題ありが8件、特に無しが11件であった（図8）。現状では小規模な構造物への適用が多く、厳密な品質管理が求められていないことから課題が挙げられなかったケースが多い。今後、3Dプリンタの適用が大規模構造物や重要構造物まで広がると、品質管理基準の策定が必要になると考えられる。

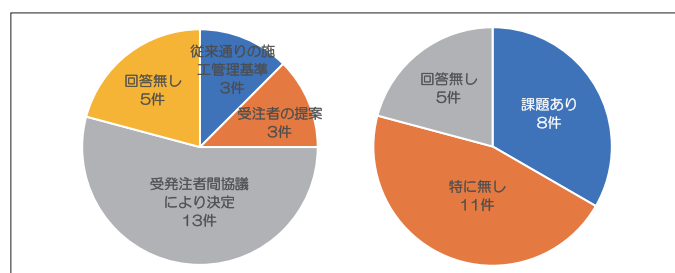


図8 品質管理基準と品質管理手法について

（左：品質管理基準をどのように定めたか、右：品質管理項目と品質管理手法に関する懸念事項の有無）

3.4 受け入れ検査の課題

(1) 出来形管理の課題

出来形管理については、主に3Dプリンタによる造形物の積層模様起因して、以下の課題が挙げられる。

- 表面が凹凸であるため、出来形不足にならないような測定位置を決める必要がある。
- 目的構造物によって、要求される出来形が異なるので、構造物毎に計測方法を決める必要がある。
- 造形時にコテ仕上げをすれば凹凸は残らないが、表面仕上げの必要性の有無は構造物によるため、ルールが必要である。
- 3次元スキャナ等での出来形計測についても考慮すべきである。

(2) 品質管理の現状と課題

品質管理について、建設現場における3Dプリンティングが新技術であることに起因して、以下の課題が挙げられる。

- 3Dプリンタについての管理基準がないため、品質管理項目を評価できない。
- 層間の付着が重要であることから、フレッシュ状態の管理が必要であり、流動性や粘性等に関する管理項目が必要と考えられる。
- 粗骨材を使用していないことによる耐摩耗性について検証が必要と考えられる。

4 海外における建設用3Dプリンタの展開

4.1 3Dプリンタに関する国際規格の動向

積層造形（Additive Manufacturing、以下AM）の品質保証に関する最初の規格として、2019年にドイツ工業規格（以下、DIN）よりDIN SPEC 17071が発行された。その後、DIN規格に基づき、2023年7月に国際標準機構（以下、ISO）と米国材料試験協会（ASTM International、以下、ASTM）F42委員会のジョイントグループより、産業用AM製造プロセスと製造現場に対する要求事項を定めたISO/ASTM 52920が発行された。これらの規格では、3Dプリンタの一般的な材料である金属や樹脂によるAMの品質保証の要件を規定している。

建設用3Dプリンタについては、2023年12月に発行されたISO/ASTM 52939において、建設現場におけるACの品質保証の要件を規定している。この規格はAM全般の基本的事項を規定したISO/ASTM 52920をもとに、建設用3Dプリンタ特有のセメント系材料等に対応する規定を追加したものである。

4.2 建設用3Dプリンタの国際的規格

ISO/ASTM 52939は、プロセスを重視した品質保証の考え方になっており、建設現場の全ての付加造形技術に適用される。ACプロセス全体は、付加造形の実行可能性評価と検証計画の2段階となっている。ここで、実行可能性評価は設計確認、環境確認、造形プロセス、追加プロセス、出来形検査の5段階のプロセスからなり、それぞれのプロセスは細分化された詳細なプロセスで構成されている（図9）。

一方で、本規格は、各プロセスが正常に機能しているかどうかを監査する規格であり、出来形や品質、耐久性等については、それらの要求性能を達成するためにどのような品質保証が必要か別途考えていく必要がある。

品質保証については、現在コンクリート構造物に適用されている既存のスキームを流用することが有効と考えられるが、建設用3Dプリンタでは1層ずつ材料を堆積させて構造物を構築するため、構造体の部分的な検査による保証ではなく、造形プロセスの記録で品質保証を行うことが有効と考えられる。今後、既存の基準・規格類の適用性を確認しながら、プロセス管理を踏まえた品質保証システムを確立していくことが望ましい。

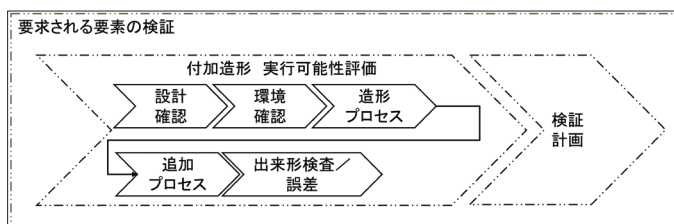


図9 ACプロセスの品質保証に関わる全体のステップ

5 今後の展開

5.1 構造部材への適用範囲拡大

建設用3Dプリンタに用いられている材料の多くは粗骨材を配合していないモルタルであるため、適用範囲は小規模な構造物や埋設型枠に留まっているのが現状である。一方で、組み立てた鉄筋に材料を噴射する方式やUAVで空中から積層する方式等の多様な3Dプリンティング方式が開発されており、有筋の構造部材の造形を可能とする技術開発が進められている。

また、環境配慮型の材料や粗骨材を配合した材料を使用する3Dプリンティング技術も開発されており、今後、更に適用範囲を拡大する可能性がある。

5.2 造形記録によるプロセス管理の実現

建設用3Dプリンタの利点を十分に活かしていくためには、工場での量産体制の構築を念頭においた品質保証の在り方について検討する必要がある。

建設用3Dプリンタによる造形物の品質保証として、造形記録によるプロセス管理と構造体の部分的な検査の2通りの方法が考えられるが、量産体制を構築するには金属分野のようにプロセス管理を導入することが望ましいと考える。

プロセス管理を基本とした品質保証を行う場合、ISO/ASTM52939等の国際規格における認証スキームと国内の関連する各種基準類を踏まえ、認証スキームと制度の策定について検討することが望まれる。

導入する新技術に対してどの機関がどの程度のリスクを負うかを明確化することによって認証制度の確立が促進されるため、自動車業界や医療機器等の製造現場で採用されているリスクマネジメント（ISO 14971）を取り入れていく必要がある。

6 おわりに

建設用3Dプリンタは、プロセス管理を導入し造形現場をオートメーション化することにより、工期短縮、コスト削減、省人化、安全性向上、廃棄物の削減、脱炭素化等の建設現場が直面している様々な課題に対応できる可能性を持っている。

ACプロセスの認証制度を確立するには、発注者、施工者、認証機関といったあらゆるステークホルダーの意見を聴取しながら、リスク分担を考慮した認証スキームを構築していく必要がある。JICEは今後もその検討の一旦を担い、建設用3Dプリンティングをはじめとする新技術の導入、普及・促進に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省：建設業を巡る現状と課題，
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001610913.pdf>
- 2) 日経クロステック：3Dプリンタの“印刷”で落石防護柵の工事，2024年3月