

建設用3Dプリンタを用いた コンクリート構造物の施工について

大京 真也¹

¹近畿地方整備局 京都国道事務所 京都第一維持出張所 (〒612-8208京都府京都市伏見区下鳥羽但馬町25)

建設産業では担い手不足の課題から、現場の環境改善や施工の効率化と合わせて人材確保に向けた新技術・新工法の活用が推し進められている。京都国道事務所の施工現場ではその一例として3Dプリンタによる施工を行った。

本稿ではその施工内容について紹介するとともに、施工性やコストの面から従来工法と比較を行った結果について示す。

キーワード 新技術, 新工法, 効率化

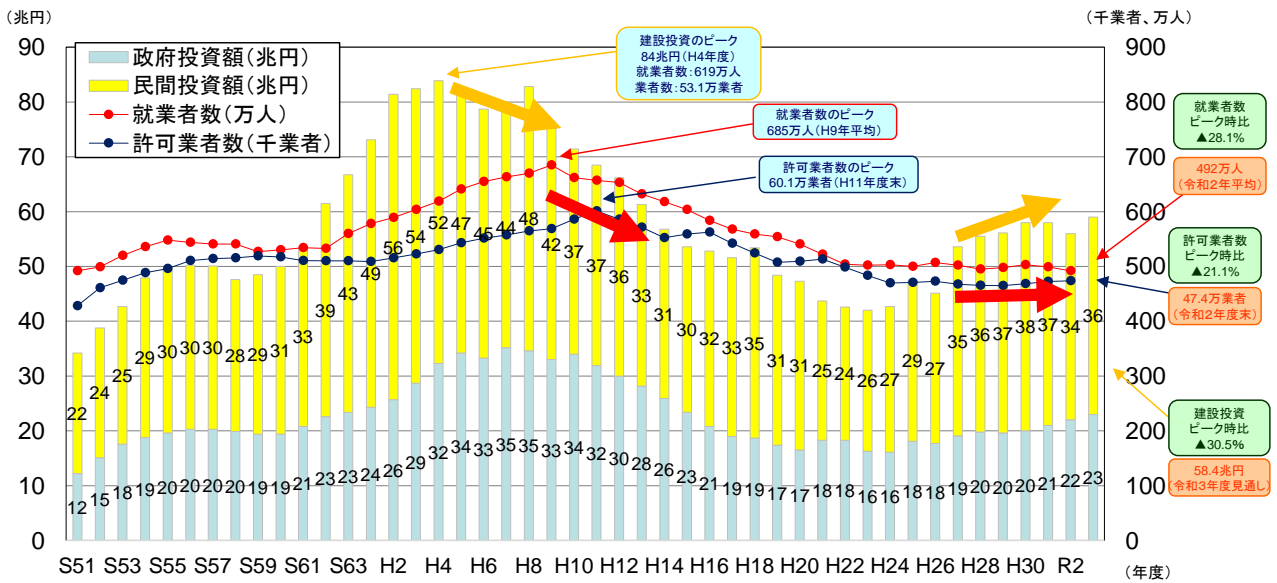
1. はじめに

建設産業では大量のインフラ施設の高齢化、建設投資額の減少、材料費の高騰など様々な課題に直面している。中でも技術者の高齢化、若手技術者離れを起因とした建設産業人口の減少・不足は大きな課題となっており、現場環境改善や施工の効率化、人材確保が急務とされている。

ここではその課題解決に向けた新技術活用の一例として、直轄工事現場における3Dプリンタを用いた道路構造物の施工を実証実験したので紹介する。

2. 建設産業における課題

建設産業におけるとりわけの課題として、建設産業人口の減少が挙げられる。建設業許可数は1999（平成11）年、建設業就業者数は1997（平成9）年をピークに減少傾向をたどっており、2020（令和2）年ではそれぞれ約21%、約28%減少している。また、建設業就業者数における年齢構成は55歳以上が3割以上、29歳以下が約1割となっており高齢化が進んでいる。（図-1, 2）さらに建設業は他業種に比べ離職率が高く、特に若手技術者の離職率が特に高い。



出典: 国土交通省「建設投資見通し」・「建設業許可業者数調査」、総務省「労働力調査」
 注1 投資額については平成30年度(2018年度)まで実績、令和元年度(2019年度)・令和2年度(2020年度)は見込み、令和3年度(2021年度)は見通し
 注2 許可業者数は各年度末(翌年3月末)の値
 注3 就業者数は年平均。平成23年(2011年)は、被災3県(岩手県・宮城県・福島県)を補完推計した値について平成22年国勢調査結果を基準とする推計人口を避及推計した値
 注4 平成27年(2015年)産業連関表の公表に伴い、平成27年以降建築物リフォーム・リニューアルが追加されたとともに、平成23年以降の投資額を避及改定している

図-1 建設許可業者数及び就業者数の推移

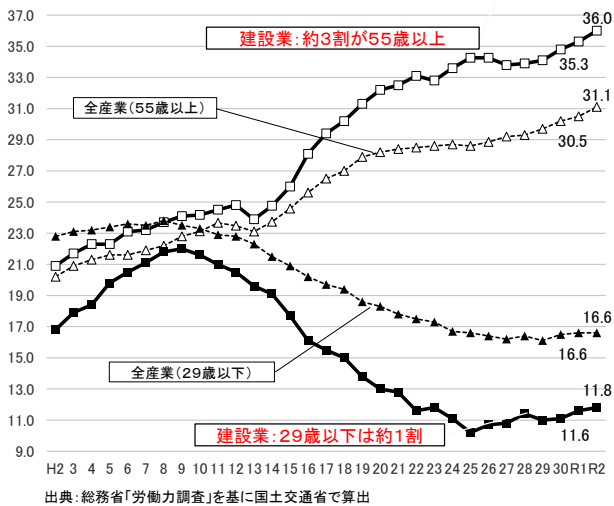


図2 建設業就業者の高齢化の進行

これに対し、建設産業では新担い手3法として品確法と建設業法・入契法の一体的改正を行い、働き方改革の推進や生産性向上に取り組んできたところである。今後も技能者の処遇改善や広報活動に合わせて、新技術の活用による施工の効率化についても建設産業の担い手確保のため取り組んでいく必要がある。

3. そもそも3Dプリンタとは

3Dプリンタは、3DCADモデルでの設計データを元に立体モデルを製作する技術である。自由度の高い設計ができることからものづくりの分野で注目されており、様々な分野に特化した3Dプリンタが開発され活用され始めている。最近では建築分野にも応用されており、セメントや金属を材料とする建設用3Dプリンタが開発され、海外では実証されている橋梁の例もある。

建設分野に3Dプリンタを導入する最大の利点としては、自由な形状の構造物が簡単に製作できるという点である。従来施工では製作したい形に応じた型枠を組み立てる必要があり、組立には熟練した技術力と時間が必要であった。しかし、3Dプリンタであれば特殊な技能を持たない者でも操作ができ、型枠も不要なため組立に要する時間が必要ない。また現場作業が削減されるため、工期短縮や事故リスクの低減、労働環境改善も期待される。

国内でも建設工事において3Dプリンタで製作された構造物を使用された事例がある。2021年には京都市内の民間発注工事において、法面ブロックの一部に排水パイプを設置する穴あきブロックを3Dプリンタで作成し現地へ据付、隙間部分のみをコンクリートで埋めることで施工が行われた。(図-3)

このように構造物を別場所で製作し、現地へ運搬して据え付ける事例は数例あるが、一方で現地に直接印刷施

工された事例はこれまでなかった。



図-3 3Dプリンタで施工された法面ブロックの例

4. 直轄工事現場での実証実験までの経緯

国道24号河原町十条地区電線共同溝工事(京都国道事務所発注)の受注者である吉村建設工業株式会社は、建設業界特化型の技術開発を行っている株式会社Polyuseと共同で3Dプリンタの技術開発を行っている。両社はこれまでも3Dプリンタによる集水桝の射出成形・埋設試験を行ってきたほか、3. で先述した法面の穴あきブロックの施工を行っている。

今回受注者より、直轄工事の現場で直接印刷施工する実証実験を行いたいと提案・協議があったことを受け、発注者が承諾したことにより本施工現場での実施をすることとなった。

本工事は電線共同溝の設置が主工事であるが、構造物復旧工として交差点部の歩車道境界ブロックの施工が含まれている。今回の実証実験ではコンクリート構造物の曲線部の施工性を部材別に比較するため、3箇所(図-4)の交差点部歩車道境界ブロックにおいて3Dプリンタを用いた施工を実施することとした。(図-4)本施工を実施するまでにあたっては、吉村建設工業株式会社および株式会社Polyuseで今回の現場条件に応じた施工についての検証を行い、施工する技術者向けに機器操作の導入研修が行われた。



図-4 工事場所と施工箇所位置

5. 施工内容

従来施工と比較を行うため、3箇所はそれぞれ異なる次の方法で施工を行った。(図-5)

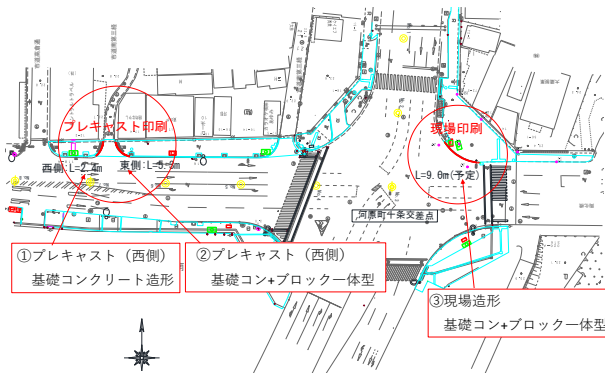


図-5 施工箇所と施工内容

- ① 資材置き場にて基礎コンクリートを3Dプリンタで事前に製作し、現場へ運搬し設置。その後プレキャストの歩車道境界ブロックを据付。
- ② 資材置き場にて基礎コンクリート一体型の歩車道境界ブロックを3Dプリンタで事前に製作し、現場へ運搬し据付。
- ③ 施工現場に3Dプリンタを設置し、基礎コンクリート一体型の歩車道境界ブロックを現地へ直接印刷製施工し据付。

施工前の事前準備として、①～③のいずれも3DCADでの設計が必要であるため、2D設計図面を3D設計図面へ編集・変換を行った。また③においては、現地で所定の位置に基礎コンクリートと一体型の歩車道境界ブロックを直接製作することが必要なことから、施工現場で位置情報を与えるための測量作業によりプリンタの位置合わせを予め行っておくこととした。

施工フローについては図-6に示す通りである。

①従来工法では現地に基礎部を含むプレキャスト製品を搬入し、手作業で目地部の処理を行う方法を想定した。①の施工においては基礎コンクリート、②の施工においては基礎コンクリート一体型の歩車道境界ブロックを予め3Dプリンタで印刷を行うため、資材置き場に3Dプリンタを設置し、構造物を製作する。③の施工

では現地に3Dプリンタを搬入・設置し、直接構造物を印刷・据え付ける。

3Dプリンタで製作される構造物は、プリンタノズル（射出口）から射出されるモルタルセメントが層を重ねる形で造形される。製作した構造物は強度発現をさせるため養生を行う。仕上げとして、天端部、斜部、目地、接合点を左官コテで処理する。

次に使用する3Dプリンタについて述べる。Polyuse社製の3Dプリンタは、架台寸法の制約により造形できる構造物の最大大きさが決まっている。（表-1）今回の施工で必要な構造物を造形するには寸法が不足するため、構造物を分割（架台を移動）しての施工となった。①の施工では2分割（1回の架台移動）、②の施工では4分割（3回の架台移動）、③の施工では5分割（4回の架台移動）にて施工した。3Dプリンタの仕様については表-1、また使用機材については表-2の通りである。

表-1 3Dプリンタの仕様

機材名	規格・型式	台数	備考
3Dプリンタ	表-2参照	1	Polyuse社製 架台、制御盤を含む
タブレット端末		1	3Dプリンタ操作用
ミキシングポンプ	4MULTI MIX3P	1	MAI製
発電機	三相200V	1	25kVA
水タンク	200L	1	
3tユニック車		1	

表-2 使用機材一覧

外寸	最大	W4400mm × L4400mm × H3000mm
	最小	W1000mm × L1000mm × H800mm
造形可能空間	最大	W3750mm × L3750mm × H2400mm
	最小	W400mm × L400mm × H200mm
必要機材	制御盤、ミキシングポンプ、水タンク、電力源 ※詳細は表-1参照	
連続稼働時間	最大	8時間
	推奨	6時間
必要人員	2～3人 ※複数台の場合は最小1名の専任と複数台の監視員で運用可能	
印刷速度	30～200mm/sec ※造形する構造物に依存	
1日あたり最大印刷量	～1.5m ³ (3.15t)	

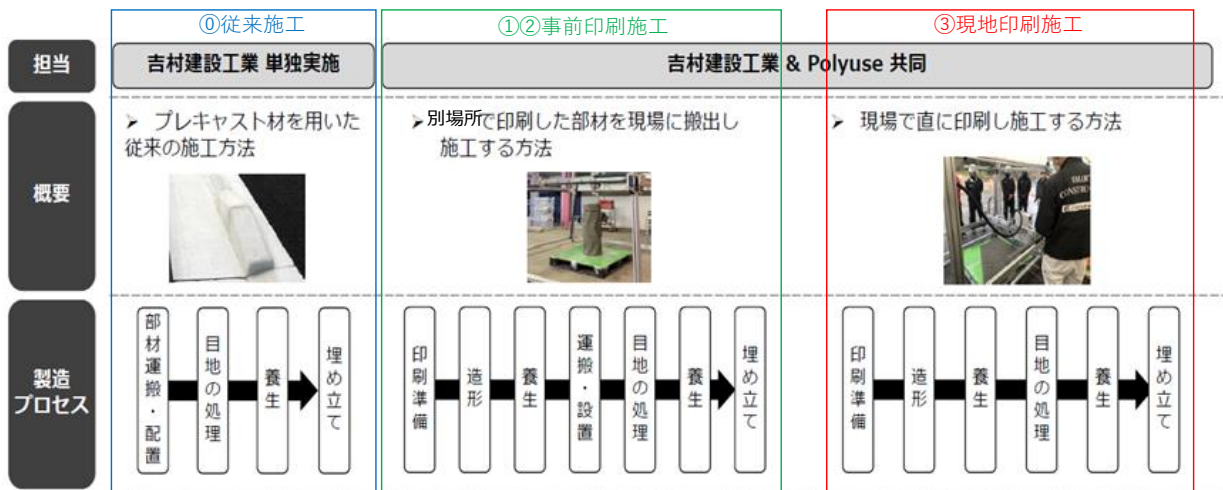


図-6 施工フロー

3Dプリンタで使用されるモルタルセメントは、通常仕様のものだと流動性が小さく射出ができなくなるため、ポリマーセメントモルタルに増粘性剤を配合したものを使用している。使用材料を表-3に示す。

表-3 使用材料一覧

材料品目	メーカー・製品名	荷姿	備考
プレミックスモルタル粉体	(株)Polyuse・POLYMO-HP	25 kg/袋	基本単体量 2100 kg/m ³
練り混ぜ水	上水道水		基本単体量 210 kg/m ³

今回施工における品質管理については、3Dプリンタで試験体を造形後、屋内で養生して28kN/m²（一般的な歩車道境界ブロックの製品強度）以上の強度が発現されることを確認した上で、現地施工に使用することとした。強度の確認方法としては積層試験体およびモールド供試体による圧縮強度試験を実施した。

出来形管理については、造形後及び左官コテ仕上げ後に1部材に1箇所以上と変化点で測定を行った。規格値については規定がないため、受発注者間で協議の結果、基礎工の土木施工管理基準に準じて設定した。



図-7 施工の様子

6. 施工における課題とその対応

施工にあたっては4. で述べた3Dプリンタを施工位置に設置する際に、プリンタのフレームやプリンタノズル（射出口）が施工物に干渉し、製作物を損なう懸念があった。これらについては一部のフレームを開口としたほか、ノズル部が製作物に接触しない程度の間隔を設けるよう架台を移動させたことで対応することができた。

また現地が傾斜しているため、架台移動による構造物の精度への影響に懸念はあったが、測量による念入りな位置合わせと、傾斜面とプリンタの角度を合わせることで対応した。

7. 施工結果

施工結果について、①従来施工と今回実施した①～③の施工方法を施工性とコスト性の面から取りまとめた。

(1) 施工性

現地（設置箇所）での作業日数や作業内容で比較を行った。①従来施工では基礎砕石及び基礎コンクリートの施工により1日、その養生期間に2日、歩車道境界ブロックの製品設置のため1日を要するため、現地作業日数としては4日必要であり、養生期間中は構造物を保護するための仮設が必要になるなど現場管理にも影響が生じていた。また曲線部では広がった目地の間詰めも必要である。

これに対し①及び②の施工方法では予め基礎コンクリートを製作しておくことができるため、現地での施工は設置と①の場合は歩車道境界ブロックの製品据付のみで完了する。また左官によるコーキングは必要だが従来工法ほどの間詰め作業は不要となる。そのため現地作業に要するのは1日となり、①従来工法と比べ3日の作業日数短縮となる。さらに養生が不要な事から仮歩道の設置等も不要となる。

また③の施工方法では、基礎コンクリートと歩車道境界ブロックの製品の設置という点では同様に作業日数は1日となるが、位置情報を与えるための測量作業が必要となるため加えて1日、合計で2日の現地作業が必要となる。しかし今後測量作業と設定が一般化・簡易化されれば設置と同日の1日で現地作業を終える事も可能であると考えられる。

(2) コスト性




トータルの作業コストとして①従来施工とそれぞれの工法での比較を行った。今回は①～③の施工毎に延長が異なるため一概の比較はできないが、①及び②の施工方法を従来工法と比較した場合と③の施工方法を従来工法と比較した場合で評価を行った。

今回の結果ではいずれの場合でも従来工法が一番安価であるという結果となった。これは人件費という点に着目してみると①～③の工法の方が従来工法の方と比較して作業人工が減らせるため安価となるが、3Dプリンタで造形するための材料費や製作費で高価となっている。しかしこの点については3Dプリンタによる造形技術の普及が進めば、材料費や製作費が一般化されていくため安価になり、今後は従来工法のコストを下回る可能性が十分にあると考えられる。また、国土交通省が検証を推進しているVfM(Value for Money)に基づいた手法により経済性を比較すれば活用される可能性は十分にあると考えられる。

(3) 総合評価

(1)(2)を踏まえ総合的に評価すると、施工面では3Dプリンタを用いた施工方法の方が優位となり、コスト面では従来工法の方が優位となるため、現時点では①従来工法と①の工法とで同程度と評価を行った。しかし、今後

表-4 施工結果比較総合評価

施工方法	①従来施工		事前印刷施工		現地印刷施工			
			①基礎ブロックのみ3Dプリンタで作成	②基礎ブロック、歩車道境界ブロックを3Dプリンタで作成	③基礎ブロック、歩車道境界ブロックを3Dプリンタで作成			
現地施工日数 <small>※各施工方法とも掘削、砕石設置を含む</small>	4日 ×	基礎コンクリート設置：1日 養生：2日 歩車道境界ブロック設置：1日	1日 ○	造形基礎設置、歩車道境界ブロック設置：1日	1日 ○	基礎一体歩車道境界ブロック設置：1日	2日 △	プリンタ搬え付けのための測量：1日 基礎一体歩車道境界ブロック造形：1日
施工性	基礎コンクリート設置後の養生・仮設が必要 ○		設置後の養生が不要 ◎		設置後の養生が不要だが、現地状況により事前測量が必要 ○		プリンタ運搬・据え付けと事前の詳細測量が必要 △	
コスト性	従来通りの費用 ○		人件費は安価だが、材料費と製作費が高価 △		人件費は安価だが、材料費と製作費が高価 △		材料費と製作費が高価、測量にかかる人件費が増加 ×	
総合評価	○		○		△		×	
考察	養生期間中の仮設が必要 曲線部では広がった目地の間詰が必要		型枠が不要なため、二次製品にない特殊形状の構造物も作成が可能 施工日数・人工の削減につながっており、製作コストの低減が可能であれば十分に実用が可能				測量作業の簡易化が可能になれば施工日数・人工の削減につながる	
完成写真								

の技術開発・普及により測量作業の短縮、3Dプリンタの施工コストの安価化ができればその有用性は大きなものとなると想定される。(表4)

そして使用材料の開発と施工範囲の拡大によるコスト削減への取り組み、測量データに基づき3Dプリンタが自動走行できるシステムの構築を進めることで、誰でも使える建設用3Dプリンタの更なる需要拡大と普及を目指している。またその先に建設産業の課題解決を見据えている。

8. 3Dプリンタへの関心と今後の展望

今回の実証実験では③の施工現場に直接3Dプリンタで造形・印刷を行うにあたって、吉村建設工業株式会社の主催で事務所職員・現場技術員およびマスコミを対象とした見学会を開催した。合わせて、新型コロナウイルス感染症拡大防止の目的から人数制約を設けたため、株式会社PolyuseのYouTubeチャンネルにて配信も行われた。(図-8) マスコミ取材としては4紙の新聞社と地元テレビ局1社から取材申込があり、記事等に取り上げて頂くなど、建設用3Dプリンタへの関心の高さがうかがえた。

建設用3Dプリンタの開発について、今回の現地での実証実験での結果を基に、吉村建設工業株式会社と株式会社Polyuseは引き続き共同開発に取り組む予定とのことである。また、本工事終了後も、中部地方整備局や中国地方整備局、高知県や山形県でもあらゆる実証実験を行っていく予定とのことである。合わせて材料についても、2023年4月時点では従来施工に耐える品質で材料コストを大きく抑えた配合の開発が進められている。

今後の展望としては、ソフトウェアおよびマシンのブラッシュアップによる更なる精度向上と施工性の向上、



図-8 現場見学会のようす

9. おわりに

今回の実証実験では、施工に当たっては拘束日数や人工の削減という点で、施工の効率化や職場環境改善に寄与できることが示された。また、建設用3Dプリンタと

いう建設業界では異分野の技術導入により、これまで建設業界と接点がなかった業界の新規参入がおきること、特殊な技能を持たなくても誰でも取り扱える技術となることから、担い手不足や若手技術者離れといった課題解決へのきっかけとなることが十分考えられる。

これまでの建設業でのノウハウに加え、異分野の新技術・新工法の導入がこれからの建設業界を支えていく一つの大きな柱となることを十分認識する必要があるとともに、発注者・受注者・関連業者が一丸となってそのような取り組みや技術導入を精力的に行っていかなければならない。

謝辞：今回建設用3Dプリンタを用いた実証実験を提案から施工、また各種資料提供して頂いた吉村建設工業株式会社および株式会社Polyuseのみなさま、そして本論文

作成にあたりご鞭撻頂いた近畿地方整備局京都国道事務所のみなさまに感謝申し上げます。

出典・参考文献

- 1) 近畿地方整備局：建設業を取り巻く最近の話題
- 2) 近畿地方整備局京都国道事務所：インフラ DX 通信 13 号 4 月号 (2023 年 4 月 27 日)
- 3) 近畿地方整備局京都国道事務所：国道 24 号河原町十条地区電線共同溝工事工事成果品
- 4) 吉村建設工業株式会社：3D プリンター施工の開発状況とこれからについて
- 5) 株式会社 Polyuse：2022 年 7 月 歩車道境界ブロック施工
- 6) 国土地理院：地理院地図
- 7) 財団法人 日本経済研究所：VFM の把握と評価の手引き (<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/policy/pfi/h15seminar/hikkeiken.pdf>)