

コンクリート構造物を「現場で直接プリント造形」 On-Site Shot Printer の開発

羽 生 賢 一・八木橋 宏 和・永 沢 薫

近年、推進されている建設分野の生産性向上に加え、全く新しい発想によるコンクリート構造物の製造技術の開発を目的とし、建設分野で既に技術として構築されている「乾式吹付け」と「湿式吹付け」両方のメリットを兼ね備えた「ハイブリッド吹付けシステム」と、降水や粉塵に強く実績豊富な建設機械の中で近年活躍している「ICT 建機」を組み合わせることで、現場で構造物を直接プリント造形する 3D プリンティングシステム「On-Site Shot Printer」を開発した。本稿ではその概要を報告する。

キーワード：i-Construction, 省力化, 3D プリンター, 吹付け技術, ハイブリッド

1. はじめに

人口減少に伴う労働力不足時代への突入を背景に、国土交通省は、平成 28 年度から、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設現場を目指すことを目的とした取り組み「i-Construction」を開始している。コンクリート分野においては、構造物の設計、発注、材料の調達、加工、組立等の一連の生産工程、維持管理を含めたプロセスの最適化や、部材の規格（サイズ等）の標準化を行い、プレキャスト製品やユニット鉄筋などの工場製作化を推進することによる生産性向上を目指している。その一方で、プレキャスト製品等を活用するにあたっては、足場の組立てや高所での作業が必要となることは従来と変わらず安全性の面で課題は残る。

建設業界における 3D プリンティング造形技術の世界での開発状況としては、欧州が先行しており、例えばオランダでは 3D プリンティングシステムで造形された、自転車専用道の橋梁が既に架設されている。我が国においては、地震大国であることから構造物として求められる要求性能が他国に比べ厳しいこともあり、開発に遅れをとっている状況であると言われている。

建設業界で開発が先行している一般的な 3D プリンティングの造形技術方式としては、あらかじめ練り混ぜられたセメント系材料をノズルから絞り出して、多軸ロボットにより下から上へ層状に積み上げて構造物を造形する「材料押出方式」が一般的である。この方式は、その造形方法から層間の一体性が課題と言われ、曲げやせん断力が作用した際の層間剥離に対する

脆弱性が指摘されている。さらに、セメント系材料の特性上、練り混ぜ後から硬化が始まるため材料の長距離搬送が難しいことや、多軸ロボットの機動性の制約から大型の構造物を現場で造形するには課題がある。

以上のことから、当研究開発グループ（岐阜大学の國枝教授を研究代表者とした OS₂P コンソーシアム：施工技術総合研究所、住友大阪セメント、清水建設、NIPPO、丸栄コンクリート工業、エフティーエス、関電工をメンバーとする研究開発グループ）は、生産性向上に加え、安全性向上や現場における大規模な構造物の造形を視野に入れた「全く新しい発想によるコンクリート構造物の造形技術」の開発を視野に、乾・湿吹付け技術を融合させたハイブリッド型材料吹付けシステムを開発した。さらに現場環境に適応できる建設機械のうち、3 次元設計データを搭載し、リアルタイムに自己位置を測定しながら設計面と現況面の差分に応じた操作制御を行うことが可能な ICT 建機を造形機械として取り入れることにより、「現場で直接プリント造形可能なシステム」所謂新しいセメント系 3D プリンティングシステムを構築した。

本稿は、新たに開発したハイブリッド型吹付けシステムと 3DMC を搭載した建設機械を組み合わせた 3D プリンティングシステムの概要を紹介するものである。

2. ハイブリッド式吹付け技術の開発

(1) 材料製造・造形システムの概要

当研究開発グループが着目した方法は、既存のコンクリート吹付け技術である。コンクリートの吹付け技

術は、圧縮空気で吐出するため、「材料押出方式」のように下向きの吐出だけに限らず、全周方向への吐出が可能となる。また、コンクリートの材料を搬送し、練り混ぜるまでの一連のコンクリートの製造作業が既に自動で、かつ実用化された技術であることや、材料の吐出圧力を調整することにより吹付けたコンクリート材料を確実に積層し一体化することができる工法である。

従来から吹付け工法は、トンネルの覆工や道路などの法面の剥落防止、また補修分野では既設構造物の断面修復等に幅広く用いられている。吹付け工法には、その使用環境や条件に応じて乾式と湿式の2種類の方式がある。これらを比較したものを表-1に示す。表より吹付け方式によりその特徴は大きく異なり、乾式は長距離搬送が可能なもの、吹付け圧力の調整が難しく、圧力が高いと積層時に前層を壊してしまう可能性がある一方、湿式は吹付け圧力の調整が可能で構造物を造形し易いが、材料搬送の面では不利となる。また、材料の練混ぜとしては、乾式吹付けは、ノズル先端で練り混ぜられるが、湿式吹付けは、生コンクリートを購入する、もしくは、モルタルミキサーなどを用いて事前に練混ぜが必要である。

これらの特徴から、吹付け材料の長距離搬送および練混ぜの自動化に対しては乾式吹付け工法を、構造物の均質性や積層間の一体性に対しては吹付け圧力を可変できる湿式吹付け工法を活用し、それぞれのメリットを兼ね備えたハイブリッド吹付けシステムの検討を行った。

(2) 吹付け材料の選定と配合検討

吹付け材料はポリマーセメントモルタル (PCM) を主として検討を行った。乾式吹付けでも一般的に用いられている材料であり、長距離圧送や練混ぜには基本的に問題がないことが実績としてある。また、ポリマー添加を標準とした材料は、吹付けモルタルの層間における付着強度が向上することも考えられることから、ポリマーセメントモルタルを吹付け材料として検討を行った。

ポリマーセメントモルタルの配合は、吹付けモルタルの圧送性や造形性に対して最適なコンシステンシーを確保することを目的に、吹付け実験により材料の液体/粉体比を検討した。検討結果は表-2に示すとおりで、施工性と造形性を両立できる液体/粉体比 (= 15%) と管理基準となるフロー値 (= 170 mm 程度) を事前に示すことができた。

図-1には、吹付け実験時に造形した試験体 (幅 200 mm × 長さ 1500 mm × 高さ 500 mm) を各方向・

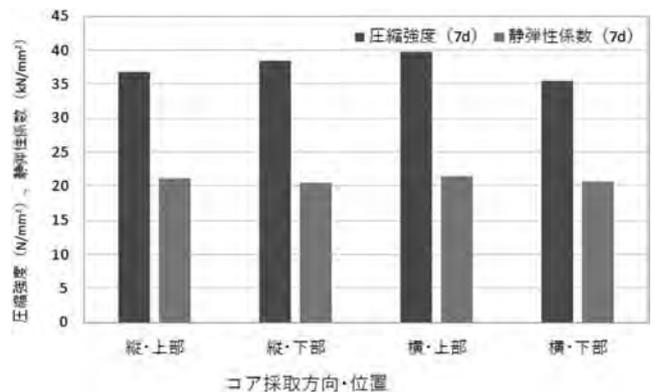


図-1 各方向・位置でコア抜きした試験体の力学的性能

表-1 吹付け工法の特徴 (乾式・湿式の比較)

項目	乾式	湿式
コンクリートの品質	変動し易い (ノズルマンの技量に依存)	安定 (製造したコンクリートの品質に依存)
圧送距離	最大 300 m 程度	100 m 以下
粉塵・リバウンド	多い	少ない
施工性	長時間に及ぶ施工も対応可能	距離が長いほど管理が困難になる
吹付け圧の調整	難しい	調整可能
その他		生コン購入以外は製造手間がかかる

表-2 最適配合に関する検討結果

	材料の液体/粉体比 (%)	モルタルフロー (mm)	備考
1	14.3	156 × 153	フローが小さく、材料をポンプに吸い込めず
2	15.0	169 × 167	積層状況は良好
3	16.0	175 × 176	
4	17.0	205 × 202	ややダレ気味

※設定圧送空気圧：0.2 MPa

位置でコア抜きし、圧縮強度および静弾性係数を測定した結果を示す。図より、吹付けモルタルは一般的なPCMと同等の性能で、かつ、垂直・水平方向および上層部・下層部の差異は小さく異方性がないことも明らかとなった。したがって、セメント系3Dプリンティングシステムの課題であった構造物の均質性や一体性を十分に確保できることが確認された。

(3) ハイブリッド吹付けシステムの仕組み

ハイブリッド吹付けシステムの概要を図-2に示す。同システムはプレミックス材料の使用を前提に乾式方式で長距離圧送した後、乾式吹付けノズルで所定の水/粉体比で混合し、減圧機からホッパーを経ることでモルタルの均質化を図っている。その後、湿式方式により極力短い距離の圧送から吹付けノズルで構造物を造形するものである。本システムにより、乾式方式の課題であった品質安定性、湿式方式の課題であった圧送距離の確保や使用するポリマーセメントモルタルの品質管理工程を大幅に改善できたと考えている。

(4) 急結剤添加方法の選定とハイブリッド吹付けシステムの検証

急結剤は吹付けモルタルを急速に硬化させるために使用するものであり、形成した層間モルタルの形状を維持するために使用した。一般的にも急結剤は使用されており、例えば、法面吹付け工事等に用いられている。一方、モルタルを急速に硬化させるものことから、ノズル詰まりに影響を及ぼすことが考えられ

る。事前検討で、従来の方式である、圧送空気を利用してノズル先端部で吹付けモルタルと混合する方法で製造したところ、比較的短時間でノズルの先端部が詰まってしまった(写真-1)。

急結剤の本添加方法についての検討を行った結果を表-3に示す。構造物の造形性向上、および副次的効果としての急結剤によるノズル内部の詰り防止を目的に、吹付けモルタル用ノズルの外周部に急結剤用ノズルを別途設置し(※圧送空気も別系統)、ノズルから吐出したモルタルに急結剤を噴霧するシステムを採



写真-1 配管の詰り状況

表-3 急結剤の添加方法に関する検討結果

検討項目	検討結果
1 添加方式	専用ノズルによりモルタル配管と完全分離
2 添加量	1.0% (材料重量比) ※メーカー推奨=2%
3 ノズルの仕様	高粘性対応型、ノズル角度も最適化

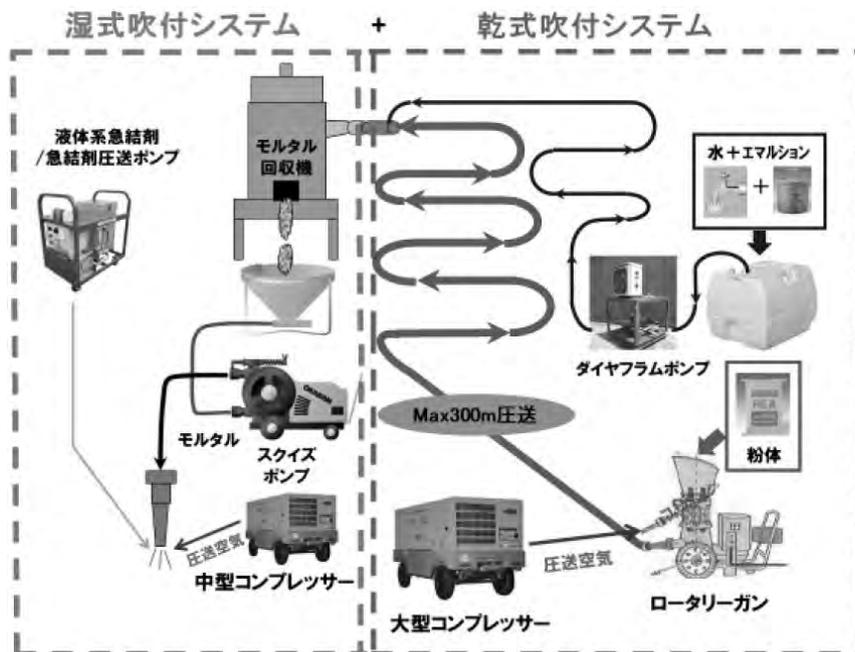
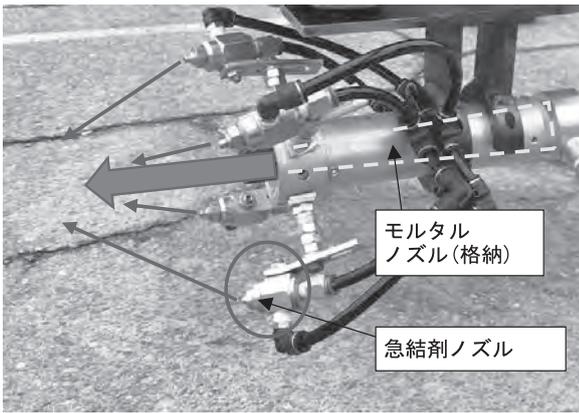


図-2 ハイブリッド吹付けシステムの概要



写真一 吹付けノズルシステム

用した。噴霧システムとして、高粘性である液体急結剤を安定的に噴霧できるノズルを選定し、吹付けモルタルと適切に混合できるように、ノズル本数と角度を最適化した(計4本を角度15°に設定、写真一)。また急結剤の添加量は、色むら防止と形状保持性能の両立を勘案して設定した。

本吹付けシステムの動作や吹付け後の材料性状の確認として、上記設定による急結剤ノズルを用いて、乾式システムによる材料搬送と練混ぜを組合せた、構造物の造形に至るまでの吹付けシステム全体としての把握を目的に、搬送距離160mで(※最大300mまで可能)、吐出量18kg/min、フロー管理値170mmを目標に吹付け実験を行った(写真三)。乾式システムで製造した吹付けモルタルは、練混ぜシステムの違

いにより液体/粉体比が若干ずれたもののミキサ練り時と同様に吹付けモルタル性状も安定的で積層状況も良好であった。また、システム全体としての長時間稼働(120分程度)にも概ね問題はなかった。

以上のことから、乾・湿吹付け技術の長所を融合させたハイブリッド吹付けシステムは十分に実用可能であることが実証できたと考えられる。

3. 施工システムの開発と構造物の造形

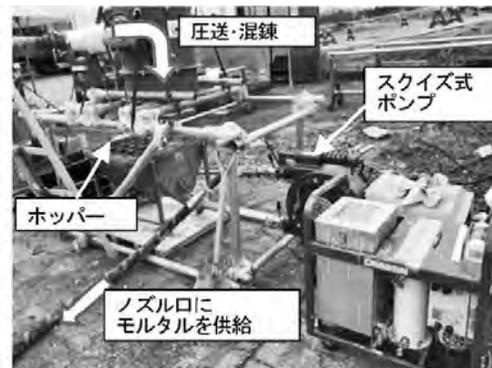
(1) 施工機械の選定と制御方法

当研究開発においては、実現場での施工条件を想定し、既に膨大な施工実績を有する建設機械を造形機械として選定した。さらに、3次元マシンコントロール(以下、3DMC)の機能を有したICT建機を用いることで、造形時の制御を行うこととした。

3DMCとは、建設機械に測位技術や制御技術などを搭載することで、作業装置の位置・標高をリアルタイムに取得し、コントロールボックスに取り込んだ3次元設計データとの差分に基づき作業装置を自動制御する技術である(図三、4)。また、ICT建設機械に搭載されているコントロールボックスにおいて、平面や一定勾配を持った面を作成し、それらのデータに応じた操作制御が可能である。さらに、それらの設計面の高さをオフセットできる機能があり、任意のオフセット高さを設定して制御することができる。



(材料の長距離圧送160m)

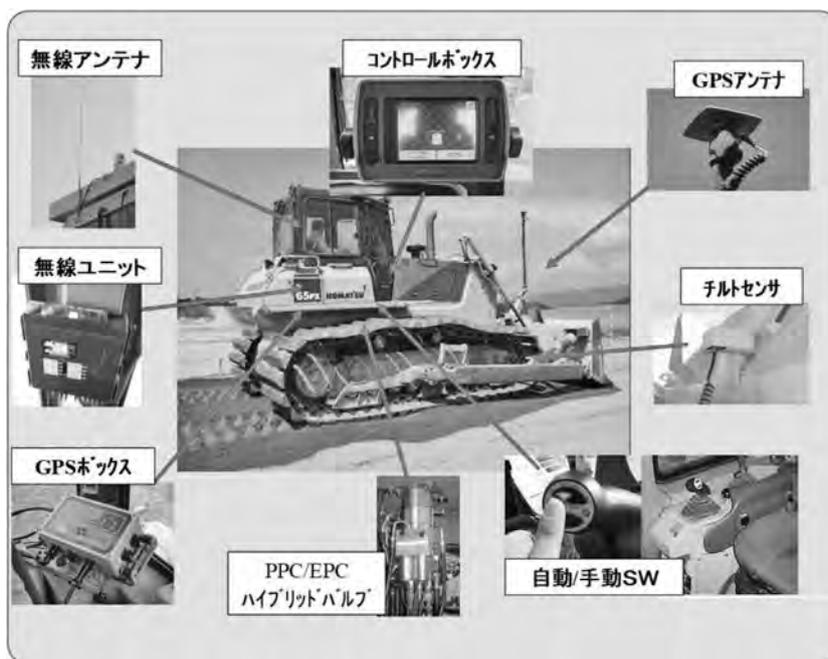


(圧送・混練後のモルタルをポンプで供給)

写真三 ハイブリッドシステムの実験検証



図三 3DMCによるシステム制御の流れ



図一４ マシンコントロール技術の機器構成例



写真一４ 水平吹き状況とICT建機コントロールボックスの画面

以上のような機能の活用と、前章のハイブリッド吹付けシステムのノズルを建設機械のバケットに水平方向と鉛直方向に装着することにより、「水平吹き」と「鉛直吹き」の造形方向を可能とした（写真一４）。

(2) コンクリート構造物の造形試作

「鉛直吹き」により壁部材を、また、「水平吹き」により埋設型枠と想定して造形試作を行った。壁部材（無筋）は、鉛直吹きで製作し、下から上への積層を繰り返した。その結果、高さ約1m、長さ約1.8mの壁を造形することができた（写真一５）。施工時間は概ね60分であった。次に、水平吹きを利用して、橋脚を模擬した埋設型枠の製作を行った。埋設型枠ではプレハブ鉄筋を配置させている。使用したプレハブ鉄筋を1m×1m、高さ2mに配筋した（主筋にD19、配筋筋にD13）。また、吹付けたモルタルが鉄筋と付着するように、5mm×5mmメッシュの金網を鉄筋背面

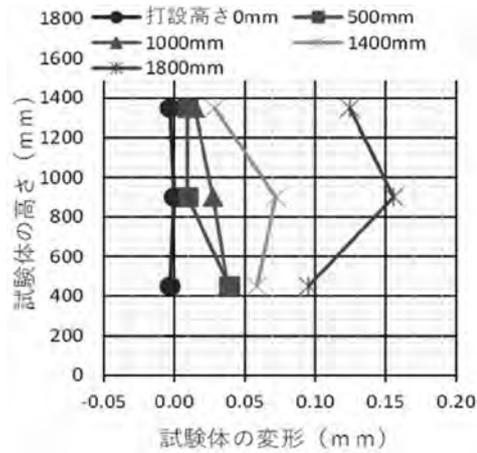


写真一５ 壁状部材（鉛直吹き）の造形状況

に設置している。配筋準備完了後、計4施工面に対して水平吹きによる積層を繰り返す、鉄筋周りにも確実に充填しながら、高さ約1.5mの埋設型枠を造形できることを確認した（写真一６）。1面の施工時間は



写真—6 埋設型枠（水平吹き）の造形状況



図—5 コンクリート打設高さと各面の平均変形量の関係

概ね 25 分で、吹付け材料の圧壊や剥落等も確認されなかった。

(3) 造形物（埋設型枠）の性能評価

(a) 中詰めコンクリート打設時の変形

埋設型枠は、中空部へのコンクリート打設に耐えるものではなくてはならない。そこで、製作した橋脚内部に 24.8-25N のコンクリートを打設して、コンクリートの漏れや埋設型枠の変形を確認した。測定位置は、各 4 面に、高さ 450 mm、900 mm および 1350 mm の位置に変位計を設置した。図—5 は、コンクリート打設高さ（0mm, 500mm, 1000mm, 1800mm）と各面の平均変形量（-0.05mm to 0.20mm）の関係を示している。この結果、最大 0.42 mm の膨らみが確認されたが、4 面の高さ 900 mm の平均では 0.16 mm 程度であった。コンクリート打設によるひび割れ等は確認されなかったが、若干の水染みが確認された。

(b) 埋設型枠との一体性

埋設型枠としての利用する上で問題となるのは、埋設型枠と中詰めコンクリートとの一体性である。そこで、中詰めコンクリートを打設した後の一体性を、コ

ア試験体を採取して直接引張試験により付着強度の確認を行った。なお、測定場所は、試験体の上部、中部、下部の 3ヶ所として、各高さで 2箇所としている。また、吹付けた状態の面とコテ仕上げを行った面の 2条件で測定を行った。付着試験に用いたコア削孔径は $\phi 100$ mm としている。付着強度の結果と破壊位置を示した結果を表—4 に示す。その結果、一体性の基準値である 1.5 N/mm^2 以上を有していることが確認された。また、コテ仕上げを行った面は仕上げていない面に対して若干付着強度が低下する結果となった。この理由としては、吹き付けたモルタルが硬化する前にコテ仕上げを行ったことに起因して、モルタルに緩みが生じた可能性が考えられる。破断位置は界面から中詰めコンクリート内となり、良好な一体性が確認された。

4. おわりに

当研究開発では、コンクリート分野における既存技術である乾式吹付け工法及び湿式吹付け工法のそれぞ

表—4 付着強度試験結果

試験体	採取部	質量 (g)	直径 (mm)		断面積 mm^2	荷重 (kN)	付着強度 N/mm^2	強度平均 N/mm^2	強度平均 N/mm^2	破断面の割合			
			平均	平均						コンクリート	界面	ドライショット	
A 面	上	中央	1708.6	99.6	99.9	7791	15.38	1.97	2.00	2.28	100		
		端	1707.6	99.5	99.9	7776	15.73	2.02			60	40	
	中	中央	1733.5	99.7	100.1	7814	17.67	2.26	2.28		65	35	
		端	1740.6	99.6	100.0	7794	17.93	2.30					100
	下	中央	1731.9	99.7	99.3	7805	19.56	2.51	2.56		20	80	
		端	1781.8	99.7	100.5	7806	20.39	2.61			15	85	
B 面 (上、中部コテ仕上げ)	上	中央	1706.2	99.6	99.6	7788	7.38	0.95	0.94	1.53		100	
		端	1691.8	99.8	99.7	7819	7.22	0.92					100
	中	中央	1711.6	99.5	100.3	7780	15.10	1.94	2.20		30	70	
		端	1711.2	99.6	99.8	7785	19.12	2.46			20	80	
	下	中央	1706.6	99.6	99.5	7787	13.76	1.77	1.45		30	70	
		端	1722.5	99.5	99.6	7783	8.76	1.13					100

れが持つメリットを兼ね備えたハイブリッド吹付けシステムの構築と、ICT 建機の 3DMC 機能による水平吹きと鉛直吹き制御により、「現場で直接」コンクリート構造物を造形できることを確認した。

乾式吹付け工法の長距離・高所への圧送という特徴を利用することで、これまでプレキャスト部材を現場で組み立てる際の足場が不要となり、安全性向上や省力化が期待できる。また、湿式吹付け工法の圧力可変により、既に造形した層の破壊の抑制や、将来的には造形物の出来高をリアルタイムに取得しながら、それに適した圧力調整を行うことにより、出来形（形状）管理が可能になることに加え、より意匠性の高い複雑な形状を有する構造部材への造形へと発展させていけるのではないかと期待している。

今後は、施工機械と制御方法について、吹付け角度の自由度を広げるため、3DMC 機能に加え、その他の制御技術との組み合わせも検討していきたいと考えている。

JCM A

《参考文献》

- 1) 萩原恒夫:3D プリンターとは, ナノファイバー学会誌, 5 (1), p2-15, 2014.12.
- 2) 渡邊晋也, 永沢 薫, 国枝 稔, 小倉大季, 小堺 規行:吹付けコンクリートと ICT 建設機械を組み合わせた 3D プリンティングシステムに関する検討, 令和 2 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会, 講演概要集, VI-611

【筆者紹介】

羽生 賢一 (はにゅう けんいち)
 (一社) 日本建設機械施工協会
 施工技術総合研究所 研究第二部
 主任研究員



八木橋 宏和 (やぎはし ひろかず)
 (一社) 日本建設機械施工協会
 施工技術総合研究所 研究第三部
 主任研究員



永沢 薫 (ながさわ かおる)
 (一社) 日本建設機械施工協会
 施工技術総合研究所 研究第三部
 研究員

