

建設用 3D プリンタを用いた合理的な施工法の開発と構造物への実適用

大成建設（株） 正会員 ○村田 哲 正会員 田中 俊成
正会員 木ノ村 幸士 正会員 内田 健一
高橋 淳 高橋 圭
古市 理 井坂 匠吾

1. はじめに

コンクリート工の生産性向上や多様な形状作製のニーズに対応するため、建設用 3D プリンタの適用事例が増加している。これまで著者らは、建設用 3D プリンタを用いた省人化施工法の開発や用途に応じたプリント材料の開発に取り組み、品質、構造性能等の検証を進めてきた。本工事では、建設用 3D プリンタで製造した無筋の埋設型枠（以下、「3DP 型枠」）を工場で製作して現地で組み立てる「オフサイトプリント」と、現場に 3D プリンタを設置して 3DP 型枠を基礎の上に直接構築した「オンサイトプリント」について、材料、設計、施工の各観点から 3D プリンタ固有の特徴を考慮して全体計画を立案し、多様なニーズへの対応とコンクリート工の生産性向上が期待できる合理的な施工法を適用した。本稿では、適用先構造物の概要、設計検討、施工合理化のための工夫、施工状況についての事例を報告する。

2. プロジェクトの概要

適用先は、ゼロカーボンビルの建設に取り組む大成建設グループ次世代技術研究所²⁾（図-1）の外構工事であり、製作する構造物は屋外の憩いスペース（図-2）に構築される 2 つの RC 構造の曲線壁である。2 つの曲線壁は、3DP 型枠を製造する場所、施工方法の違いに応じて、それぞれオフサイト 3DP 壁、オンサイト 3DP 壁と呼ぶ。オフサイト 3DP 壁およびオンサイト 3DP 壁の構造規模、特徴を表-1 に示す。

オフサイト 3DP 壁は、揚重用鋼材の一体化や接合端面の平滑化によって現場接合を効率化し、高い意匠性・機能性を有する壁構造を短期間で構築した事例である。



図-1 大成建設グループ次世代技術研究所



図-2 憩いスペースの外観（完成予想図）

表-1 オフサイト 3DP 壁およびオンサイト 3DP 壁の構造規模、特徴

名称	オフサイト 3DP 壁	オンサイト 3DP 壁
構造規模	RC 構造, 高さ 2.0 m, 延長 7.0 m	RC 構造, 高さ 2.2 m, 延長 8.5 m
目的	環境配慮建材のバリエーション拡充	オンサイト施工で運搬・架設を省略
アピールポイント	意匠性, 機能性, 環境性	省人化, 省力化
プリント材料	CO ₂ 排出収支マイナスの環境配慮型材料	普通セメント系配合
省人化の工夫	運搬および現地接合作業の合理化	3DP 装置の設置時間短縮と高精度化 外部支保工の省略による省人化・省力化

キーワード 3D プリンティング, オンサイトプリント, オフサイトプリント, 埋設型枠, 壁, 実適用

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設（株）技術センター TEL 045-814-7221

オンサイト 3DP 壁は、3DP 型枠を移動式 3D プリンティングシステム³⁾を用いて基礎上に直接プリント構築した事例である。オンサイトプリントに適した内部支保構造を開発・適用することで、中詰めコンクリート打込み時に通常必要となる外部支保工を省略し、省人化・省力化を実現した。

2 つの曲線壁の設計にはコンピューショナルデザインを活用しており、意匠性・機能性などの多様なニーズに対応する独特なテクスチャーの部材製作が可能である。図-2 右側のオフサイト 3DP 壁は、多孔質な凹凸を有するデザインを採用して光や風が通り抜ける機能を備えるとともに、シンボリックな三角形の大開口を採用して憩いの場に開放感をもたらす意匠性が特徴である。また、図-2 左側のオンサイト 3DP 壁は、オフサイト 3DP 壁と調和する凹凸デザインを採用するとともに、ノズルが XYZ の 3 方向に同時に動くことで、斜めの平面や曲面形状に沿ってプリントすることのできる非平面積層を実現し、隆起してできた地層のような動きのあるデザインとした。

3. オフサイトプリントの事例

(1) 設計検討

図-3 に、構造概要と型枠分割位置を示す。RC 構造とし、柱筋・壁筋が基礎から立ち上がる。図-3 右に示したように、意匠の観点から壁は内側に傾斜しており、それに合わせて柱筋も内側に傾斜している。型枠は水平方向に分割した（理由は後述する）。また、型枠 2 および型枠 3 は、多孔質部および三角形の大開口部の上部を繋いで門型形状の RC 構造とするために、図-3 右に示したような梁筋を設置する。梁筋は、型枠上部の形状に沿って 3 次元的に湾曲している。なお、構造設計において、3DP 型枠部分は構造断面として考慮していない。

プリントに使用した材料は、CO₂ 排出収支でマイナスを達成するカーボンリサイクル型の配合（以下、「CR-3DP 配合」）⁴⁾である。本配合は、オンサイト 3DP 壁に使用した普通セメント系配合（以下、「普通セメント系配合」）と比較し、-106%程度の CO₂ 排出量となる。φ 50 mm の鋼製型枠を用いて製作した試験体の強度物性を表-2 に示す。

3DP 型枠は、現場から離れた工場にて材料押出方式のロボットアーム型の 3D プリンタを用いて製作した。

現地施工全体の施工ステップは、図-4 に示すように①柱筋（場所により壁筋）の設置、②3DP 型枠の揚重・移動、③3DP 型枠の内部補強材の緊結という作業を繰り返し、最後に上部の梁筋を組んで、中詰めコンクリートを打ち込むというものである。型枠には外部支保工は設置せず、内部補強材のみでコンクリート打込みの側圧に抵抗できるように FEM を用いて設計した。

製作時の型枠分割の仕様（図-3 左）は、施工ステップ（図-4）も考慮しながら以下の要領で決定した。まず、運搬車両の床面積の制約から、図-3 左のように型枠は水平方向に 4 分割で製作する方針とした。詳細な分割の仕様は、柱筋に対しコの字に囲う分割位置ではなく、コの字に囲う型枠分割とした。前者の場合は型枠を現地設置する際、柱筋や壁筋を通すように型枠を鉛直に下して設置することになるが、柱筋が傾斜しているため設置作業の難

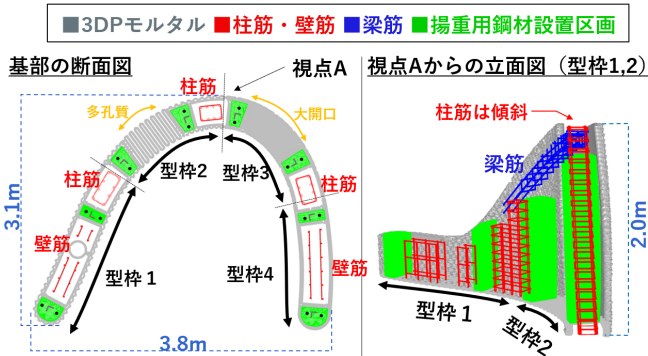


図-3 構造概要と型枠分割位置

表-2 CR-3DP 配合の強度物性		
項目	材齢 7 日	材齢 28 日
圧縮強度 [N/mm ²]	35.1	46.9
ヤング係数 [kN/mm ²]	22.1	26.8

※JSCE-F 506 に準拠して作製した円柱供試体を、表記の材齢まで環境温度 20℃で封緘養生し、試験を実施。

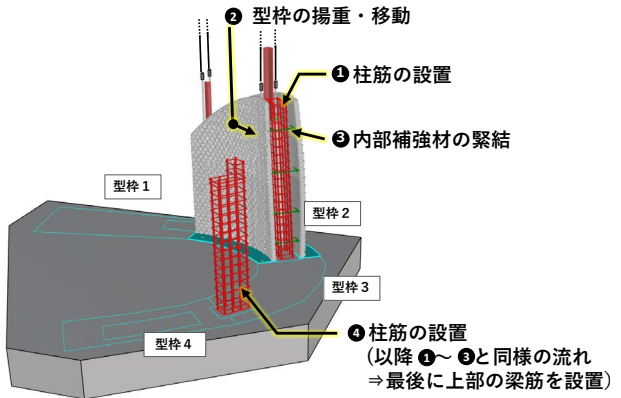


図-4 施工ステップの概要

航が懸念された。後者を採用することで、傾斜した柱筋に対して型枠を水平移動で設置でき、設置作業がスムーズになる（図-4 の②）。さらに、型枠設置後に、開口している一面側から内部補強材の緊結作業を容易に行うことができる（図-4 の③）。

(2) 運搬・施工合理化に資する製作時の工夫点

運搬の合理化のため、製作段階で以下のような工夫をした。オフサイトプリントでは、3DP 型枠運搬時に型枠を揚重する際に、自重による曲げ応力やせん断応力で型枠が破損しないようにしなければならない。本事例では、まず、支持プレート上の予め計画した位置に 3DP 型枠を製作した（図-5 左）。そして、揚重用鋼材を上から通し、支持プレートに溶接されたボルトと緊結した後、鋼材の周囲にグラウト（無収縮モルタル）を充填することにより支持プレートと揚重用鋼材と 3DP 型枠を一体化した（図-5 中央）。揚重用鋼材を吊り上げると、支持プレートにより底面を支持された状態で 3DP 型枠が持ち上がる機構となる。また、後述の通り、支持プレートは現場施工においても別の用途で活用する。

次に、現場施工の合理化のため、製作段階で以下のような工夫をした。通常の方法で 3DP 型枠を製作した場合、図-5 右のように造形物側面には凹凸が生じる。凹凸を有する状態で型枠と型枠を接続すると、接続端面では隙間が生じ、隙間からコンクリートが漏れる恐れがある。この対策として、過去には型枠の接続端面に間詰モルタルを打設した例や、接続端面をコンクリートカッターで切断して平滑化した例などがある⁹⁾が、いずれも 3D プリント後の工程が増えて煩雑となる。

そこで、本工事では接続端面の処理をより効率化するための工夫として、プリント製作時に、図-5 左のように 3DP 型枠同士が接続することになる端面に妻型枠を鉛直に立てておき、ノズルを傾斜させて妻型枠に材料を押付けるようにしてプリントすることで、型枠の接続端面を平滑化した。型枠接続部の漏れ防止対策は、ポリウレタン製の隙間テープを貼り付けるのみで完了とした。なお、上記の方法で型枠同士を接続し、接続部に高さ 2.0 m までコンクリートを打込んで、漏れが発生しないことは、工場内での事前実験を行い確認した。

(3) 現場施工における工夫

オフサイト施工においては、部材設置位置の精度は、RC 断面のかぶり確保において重要な管理項目である。本事例では、3DP 型枠が自由曲面かつ凹凸形状であり、設置時の目印になるような角が存在しない。そこで、事前に基礎コン上に支持プレートの位置を墨出しし、図-6 のようにプレートの位置合わせをすることで 3DP 型枠の設置位置精度を確保した。この工夫により、全ての柱筋・壁筋でかぶりが満足することを確認した。

また、3DP 型枠の現地設置後に支持プレートを基礎にアンカー定着することで、型枠の転倒防止とコンクリート打込み時の側圧による型枠の開き防止とした。

図-7 に、配筋完了後の状況を示す。この後、3DP 型枠に汚損防止のためビニールシートを巻き、外部からの支保工は設置せず、中詰めコンクリートを 1 リフトで打込んで現場施工を終了した。コンクリート打込み時、側圧による 3DP 型枠の破損や、型枠接続部からのコンクリートの漏れは発生しなかった。

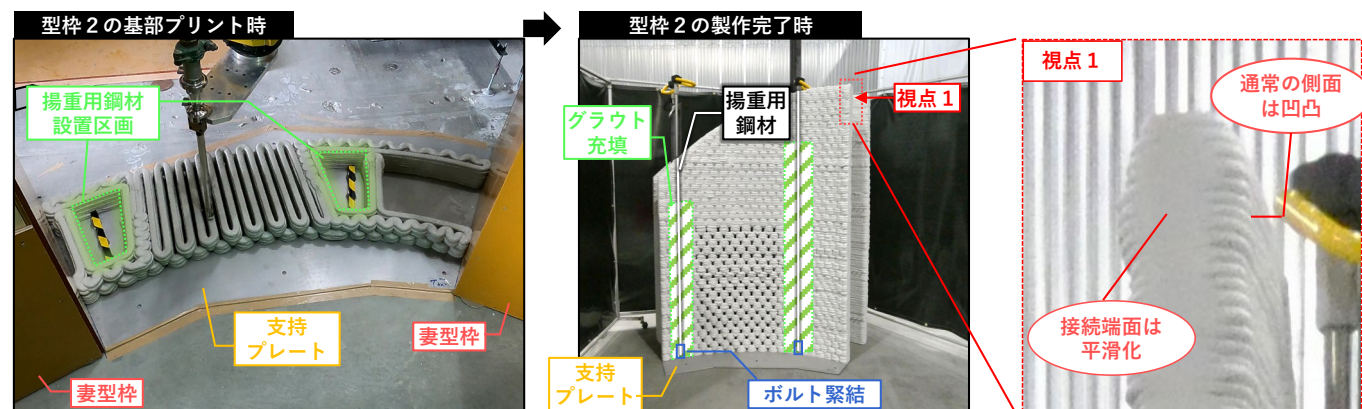


図-5 オフサイト 3DP 壁製作時の工夫（型枠 2 にて例示）



図-6 組立時の状況

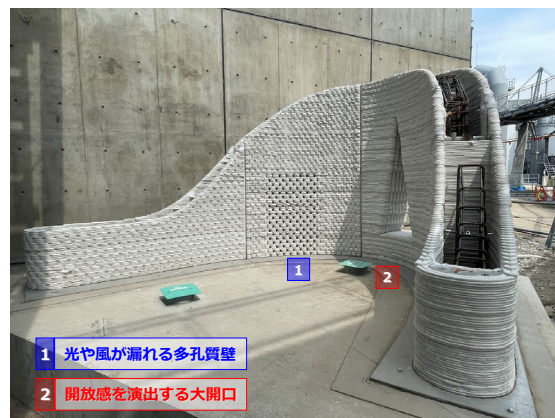


図-7 配筋後の状況

(4) 成果

オフサイト 3DP 壁に関わる主な作業日数を表-3 に示す。まず、表下部に整理したプリント製作のスピードに着目する。プリンタ稼働日当たりの製作効率は $0.26 \text{ m}^3/\text{日}$ 、時間当たりの製作効率は $0.078 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。時間当たりの製作効率は後述するオンサイト 3DP 壁よりも低い。これは、CR-3DP 配合は普通セメント系配合と比較してこわばりが弱く、一度に積層できる高さが低いためである。今後、材料の改良により、製作効率を向上させたい。

次に、型枠の現地設置の作業時間は、前述した製作・施工上の工夫により、2.5 時間に抑えることができた。なお、型枠設置には、3DP 型枠の現地での揚重、現場位置への設置、内部補強材の緊結、支持プレートのアンカー定着までを含んでいる。

一方、型枠の現地設置と比較して、鉄筋組立作業の時間が長くなった。これは、傾斜した柱筋や、3 次元に湾曲した梁筋の設置に時間を要したためである。3DP の強みを生かし、複雑な形状の型枠を製作すると、鉄筋組みが煩雑になるという側面がある。

オフサイト 3DP 壁のプロジェクトは、意匠性・機能性・環境性の実現を目的としたプロジェクトであったが、3DP を活用した省人化・工期短縮を達成しようとする場合には、鉄筋組みやコンクリート打込みへの影響を考慮して施工全体を合理化する必要があることを確認した。

4. オンサイトプリントの事例

(1) 設計検討

オンサイト 3DP 壁の構造概要を図-8 に示す。延長が長く、外部拘束による貫通ひび割れが懸念されたため、水平方向に 3 分割し、分割位置に目地を設けた。目地部分はオフサイト 3DP 壁と同様に妻型枠際プリントにより平滑度を確保した。かぶりは 40 mm とし、プリント時にノズルと壁筋の接触が懸念される部分については 80 mm とした。なお、構造設計において 3DP 型枠は構造断面として考慮していない。

表-3 オフサイト 3DP 壁の作業日数内訳

項目	数量	稼働日	作業時間
型枠プリント	4 体, 2.1 m^3	8 日※1	27 時間※2
型枠設置	4 体	2 日	2.5 時間
鉄筋工	柱筋 3 か所 壁筋 2 か所 梁筋 2 か所	4 日	16 時間
コンクリート工	1.5 m^3	1 日	1 時間

※1 プリンタ稼働日当たりの製作効率： $0.26 \text{ m}^3/\text{日}$

※2 プリンタ稼働時間当たりの製作効率： $0.078 \text{ m}^3/\text{h}$

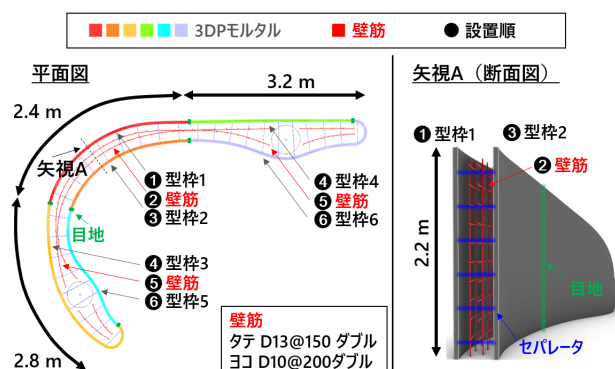


図-8 オンサイト 3DP 壁の概要図

オンサイト 3DP 壁の施工ステップを図-9 に示す。STEP1 では、基礎コンを施工する。基礎コンの鉄筋は、3DP 壁筋と接続させるため、重ね継手長を十分満足するように基礎上面から鉛直に突き出す。その後、3D プリントを現地に設置する。STEP2 では、3DP 型枠の片側（3D プリントから遠い側）をプリント製作する。このとき、所定の高さにプリントを止め、インサートを埋め込む。STEP3 では、壁筋を組み立てる。このとき、STEP2 で埋め込んだインサートにセパレータを接続・延長する。STEP4 では、3DP 型枠の反対側（3D プリントに近い側）をプリント製作する。所定の高さにプリントを止め、セパレータに接続したインサートを埋め込み、内部支保工とする。接続部分はヒンジ構造とし、倒すだけでインサートの埋め込みが完了する合理化手法を採用した（図-10）。STEP2～STEP4 を繰り返し、3DP 型枠をすべて製作する。STEP5 では、中詰めコンクリートを打込み、施工完了となる。

プリントに使用した普通セメント系配合は、当社の既往の配合⁹⁾を参考に、オンサイト用に配合を微修正したものである。水、普通ポルトランドセメント、膨張材、最大粒径 2.5 mm の細骨材を用い、長さ 12 mm、直径 40 μm の有機短繊維を添加し、高性能 AE 減水剤を使用した。水結合材比は質量比で 28%，繊維の体積添加率は 0.1 %である。 $\phi 50\text{ mm}$ の鋼製型枠を用いて製作した試験体の強度物性を表-4 に示す。

モルタルは、バッチごとに練混ぜ直後の品質管理試験を実施した。実施した品質管理試験は、地盤工学会基準 JGS 1411 に準拠した原位置ベーンせん断試験（ベーンせん断強さ）、および、JIS R 5201 に準拠したモルタルのフロー試験（0 打および 15 打フロー値）である。

(2) 基礎コン施工および 3D プリント設置における工夫

STEP1 において、鉄筋および 3D プリントの設置誤差が大きいと両者の接触や鉄筋のかぶり不足を生じることが懸念されたため、鉄筋の水平・鉛直精度の確保を目的として、基礎コンクリートの鉄筋組立時に写真-1 のような鉄筋架台を使用した。

3D プリントの運搬・搬入作業には 10 t 平車 1 台と 13 t クレーン車を用いた。まず、基礎コン上に走行レールを置き、走行レールを基礎コンにアンカー固定した。次に、ロボットアームを走行レールに固定した。3D プリントの動作範囲には、作業員とロボットの接触を防ぐために安全柵を設置した。また、小雨程度であればプリント作業できるよう、上部のデッキを活用して簡易的な雨養生を施した。

鉄筋と 3D プリントの接触や鉄筋かぶり不足を防ぐためには誤差数 mm 程度の高い設置精度が要求されるが、3D

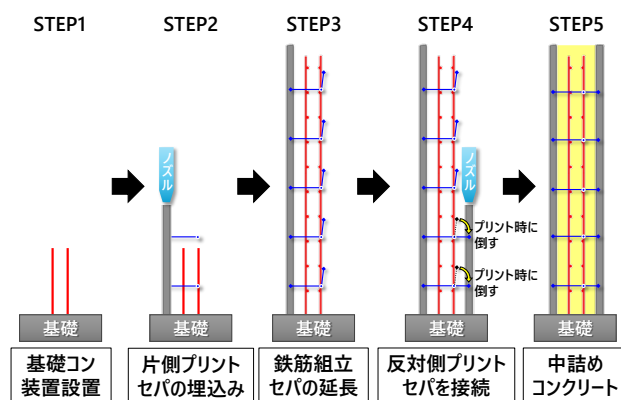


図-9 オンサイト 3DP の施工ステップ

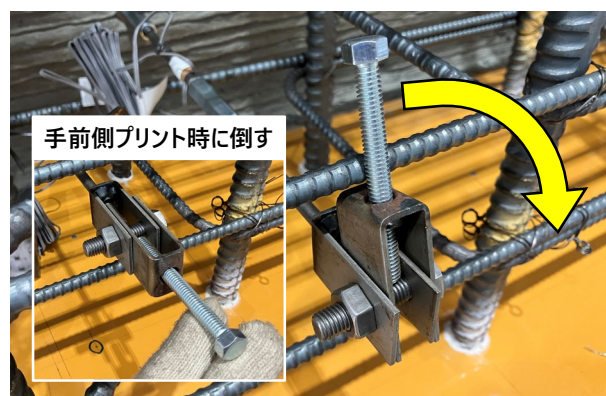


図-10 ヒンジ構造によるセバ設置合理化

表-4 普通セメント系配合の強度物性

項目	材齢 8 日	材齢 28 日
圧縮強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	88.1	96.8
ヤング係数 $[\text{kN}/\text{mm}^2]$	29.4	31.3

※JSCE-F 506 に準拠して作製した円柱供試体を、表記の材齢まで環境温度 20℃で封緘養生し、試験を実施。



写真-1 架台を用いた鉄筋位置精度の確保

プリンタの設置は他工種や前後の工程等の都合により、短時間で完了することが求められたため、設置位置・傾斜・角度がずれることを考慮する必要があった。そこで、プリント座標（すなわち、3D プリンタの設置位置・傾斜・角度）と現地座標とのずれを効率よく高精度に計測・補正する技術として、ロボット位置推定技術を用いた。計測状況を図-11 に示す。墨出し位置に設置したマーカを、3D プリンタのノズル付近に取り付けたカメラで撮影することで、短時間での位置推定が可能となる。また、複数箇所でマーカを撮影することで、プリント座標と現地座標とのずれを高精度に計測することができる。

本工事では、基礎コン上の墨出し位置に合わせて走行レールを設置し、その設置精度をロボット位置推定技術により確認することで、設置精度が数 mm であること、短時間で位置推定可能であることを実証した。

(3) 施工時の支保工合理化に資する工夫

STEP5 において、3DP 型枠は中詰めコンクリートの側圧を受ける。通常、3DP 型枠は外部から支保工で補強する対策や、3DP 型枠の厚みを増す対策が採られるが、前者は外部支保工および足場の設置・撤去が必要となり、後者は使用材料の増加、3DP 型枠重量の増加による運搬・荷役重機の大型化、コンクリート構造物への型枠自重による作用が懸念される。そこで、STEP4 の 3DP 型枠のプリント時に写真-2 に示すようにインサートを埋め込み、インサート同士を型枠内部で緊結して内部支保工とする施工法を開発した。本施工法を用いることで外部支保工を省略し、省人化・省力化を実現した。

3DP 型枠支保工の仮設設計は既往の文献⁶⁾に準拠し、インサートの引抜き強度および接続に用いたヒンジ部の引張強度について追加照査を実施した。インサートの引抜き試験は、既報⁷⁾にて実施した。w3/8 の六角ボルト、埋込長 40 mm のケースで、材齢 7 日の引抜き強度は 11.8 kN であった。結合部に用いたヒンジ部は、JIS Z 2241 に準拠して引張試験を実施し、20.5 kN の引張強度を有することを確認した。これらの結果から、セパレータ 1 本あたりの耐荷重の上限値は 11.8 kN とした。

本工事に先立ち、上記の仮設設計手法の確認のために直線形状の 3DP 壁試験体を製作した。モックアップ試験体はセパレータ配置間隔を縦 400 mm×横 500 mm に設定し、セパレータに生じる荷重、3DP 型枠の最大曲げ応力、最大せん断応力、および最大たわみが許容値に収まる設計とした。モックアップ試験体に高さ 2.2 m まで中詰めコンクリートを打込んだときの、セパレータ荷重は 6.6 kN、たわみは 0.3 mm であり、いずれも事前の仮設設計値と同等であった。

本工事では、3DP 型枠に接続部があること、曲線形状であることを考慮し、セパレータの配置間隔は縦 400 mm×横 200 mm として安全性を確保した。



図-11 カメラを用いた位置推定作業状況

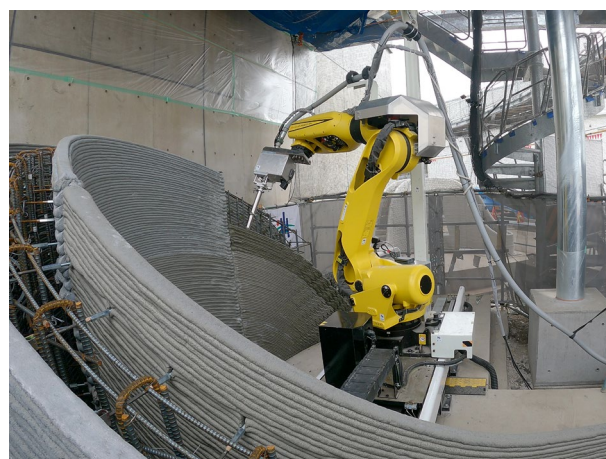


写真-2 オンサイトプリンティングの状況



写真-3 オンサイト 3DP 型枠完成時の状況

(4) 成果

3DP 型枠の完成状況を写真-3 に示す。プリント製作時の品質管理試験の結果、ベーンせん断強さの品質管理基準は、既往の研究⁸⁾で安定的に積層可能であることが示されている。0.4～1.0 kPa の範囲であり、品質管理基準を満足するものであった。モルタルフローは、0 打：110±10 mm、15 打：160±15 mm であり、極端な変動は見られなかった。外部からの支保工は設置せず、中詰めコンクリートを 1 リフトで打ち込み、現場施工を完了した。コンクリート打ち込み時、側圧による 3DP 型枠の破損や変形、型枠接続部からのコンクリートの漏れは発生しなかった。

オンサイト 3DP 壁に関わる主な作業日数を表-5 に示す。装置設置作業については、設置作業 1 日、配線作業 1 日、安全装置確認 1 日の計 3 日であった。今後、各作業を短縮し、作業日数を 1 日程度に短縮したい。

プリント製作については、3DP 型枠体積 2.2 m³ に対して、プリンタ作業日数は 9 日間、作業時間は 16.3 時であった。オフサイト 3DP 壁と比較すると、前述の通り作業時間当たりの製作効率が 0.078 から 0.13 m³/h に大きく向上した一方で、稼働日当たりの製作効率は 0.26 から 0.24 m³/日と、ほぼ同等であった。普通セメント系配合が CR-3DP 配合と比較してこわばりが強くプリントスピードが速いことから作業時間を短縮できた一方で、オンサイト施工では、①洗浄環境の制約から作業時間が短いこと、②悪天候（降雨、強風）による作業打ち切り、③隣接工事との時間調整、④鉄筋組立作業による待ち時間（図-9 参照）、などの要因でプリンタ稼働日を減らす効果に至らなかったと考察している。プリンタ稼働日を減らすためには、洗浄作業の自動化や機械化による効率化、全天候型の 3D プリンティング装置の開発、隣接工事との綿密な調整、鉄筋組立の効率化（ブロック分割数の低減）などが挙げられる。

5. まとめ

建設用 3D プリンタを用いてオフサイトおよびオンサイト施工により 3DP 型枠を製作し、RC 構造の曲線壁に適用した。本稿のまとめを以下に示す。

- (1) コンピュータシミュレーションを活用し、意匠性・機能性が調和した構造物を実現した。
- (2) オフサイト施工では、支持プレートと揚重用鋼材を 3DP 型枠と一体化することで 3DP 型枠の運搬および揚重時に破損しないように工夫した。
- (3) オフサイト・オンサイト施工において、仮設した妻型枠にノズルを傾斜させながらプリントすることで 3DP 型枠の接続端面を平滑化し、端面処理を省略した。
- (4) オンサイト施工では、マーカをプリンタに取り付けたカメラで撮影することでプリンタの位置推定を行った。複数個所でマーカを撮影することにより、プリンタの位置・傾斜・角度の現地座標とのずれを効率よく高精度に把握することができた。
- (5) オンサイト 3DP 壁のプリント時は、インサートを埋め込み、インサート同士を型枠内部で緊結して内部支保工とする施工法を開発適用することで外部支保工を省略し、省力化を実現した。一方、稼働日当たりの製作効率はオフサイト施工と同等であり、工期短縮には課題が残った。

今後は、本事例を通して明確となった、全体工程の最適化や効率化、装置改良などに取り組み、さらなる生産性向上を目指す。

6. 参考文献

- 1) 木ノ村幸士，田中俊成，張文博，井坂匠吾：建設 3D プリンティング技術の可能性と用途拡大に向けた研究開発，コンクリート工学，Vol.61，No.7，pp.600-607，2023。
- 2) 大成建設グループ次世代技術研究所に「ゼロカーボンビル」の建設を開始，大成建設ニュースリリース，http://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2023/231106_9810.html

表-5 オンサイト 3DP 壁の作業日数内訳

項目	数量	稼働日	作業時間
装置設置	1 台	3 日	-
型枠プリント	2.2 m ³	9 日※1	16.3 時間※2
鉄筋工	壁筋 2 か所	2 日	6.0 時間
コンクリート工	4.5 m ³	1 日	1.5 時間

※1 プリンタ稼働日当たりの製作効率：0.24 m³/日

※2 プリンタ稼働時間当たりの製作効率：0.13 m³/h

- 3) 移動式3Dプリンティング技術を開発，大成建設ニュースリリース，https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2023/230925_9656.html
- 4) 木ノ村幸士ら：環境配慮 3D プリンティング配合を用いた多孔質柱の製作と実適用，土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，V-462，2024.
- 5) 張文博，木ノ村幸士，田中俊成：3D プリントしたモルタル積層体の力学特性および耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.47，No.1，pp.918-923，2025.
- 6) 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，コンクリート技術シリーズ 133，pp.II-17 - II-30，2023.
- 7) 村田哲，田中俊成，張文博，木ノ村幸士：3D プリンティングモルタルに埋め込んだインサートの引抜き強度に関する基礎検討，土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会，V-424，2025.
- 8) 張文博，村田哲，木ノ村幸士：建設 3D プリンティング材料の品質評価指標に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1534-1539，2022.