

3D プリンティングで製作した機能性埋設型枠の実適用

大成建設(株) 正会員 ○田中 俊成
張 文博
木ノ村 幸士

1. はじめに

3D プリンティング (3DP) はパソコン上で設計したモデルを、デジタル制御された 3D プリンタにより造形する技術である。セメント系材料の 3DP によって、従来の型枠工法では製作困難な複雑形状の構造物を製作でき、国内でも使用例がいくつか登場してきている¹⁾。また、積層という形式に起因した部材の異方性をうまく活用すれば、部材の構造性能の向上を図ることもできる²⁾。筆者らの研究グループでも過去に、形状最適化設計をした複雑形状の橋桁を 3DP で造形するなど³⁾、大型構造物への 3DP 技術の適用に向けた検討を行ってきた。本稿では、建設用 3DP を使った、機能性を有する埋設型枠の構築と実構造物への適用の事例を 2 件報告する。

1 件目は、繊維入りセメント系材料で外周を埋設型枠として構築したデモ橋脚の例である(写真-1)。3D プリンタで繊維入り材料を吐出すると、繊維が吐出方向に配向しやすくなる。この効果によって、通常のコンクリートのみで構築した橋脚よりも水平荷重に対する変形性能が有意に向上することを確認した。

2 件目は、照明供用部、排水孔といった付属構造を有する機能的な支柱の埋設型枠を 3DP で構築した例である(写真-2)。3DP ではプリント経路を工夫し、付属構造の空間もデザインしておくことで、これらを型枠不要で一括施工でき工期の短縮につながる。写真-2 の支柱は当社施設内に設置し、歩行通路の屋根の支柱として供用している。本稿では設計上及び施工上のポイントについて報告する。

2. 3DP で構築したデモ橋脚の事例

(1) 構造物の特徴と試験目的

デモ橋脚の概要を図-1 に示す。形状は基部が外径 530 mm の円形、基部より高さ 600 mm から 1100 mm の位置にかけて橋軸直角方向の外径が 700 mm に広がる 3 次元形状とした。3DP の利点である形状自由度を活かし、景観に調和しやすい曲線的なデザインとしている。図-1 中に赤斜線で示した、柱の外周 50 mm の部分を 3DP で埋設型枠として構築し、地組みしたユニット鉄筋を一体で建て込み、内部に高流動コンクリートを打ち込んで施工した。3DP は新規性の高い技術であるため、現状では積層構築した箇所を設計上の構造断面に含められるかどうか、知見が不足している。本研究では、デモ橋脚に交番載荷試験を実施して、従来工法で製作した橋脚との比較により構造性能

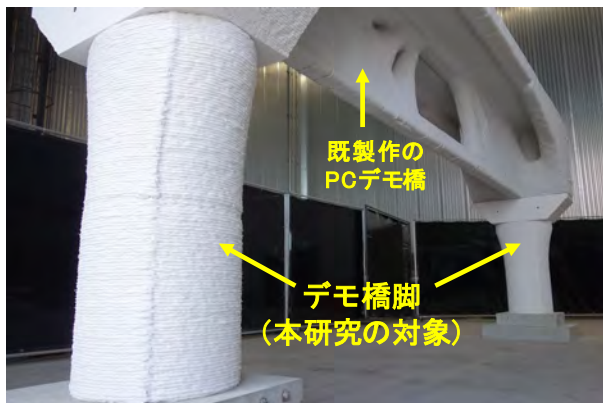


写真-1 3DP で構築したデモ橋脚

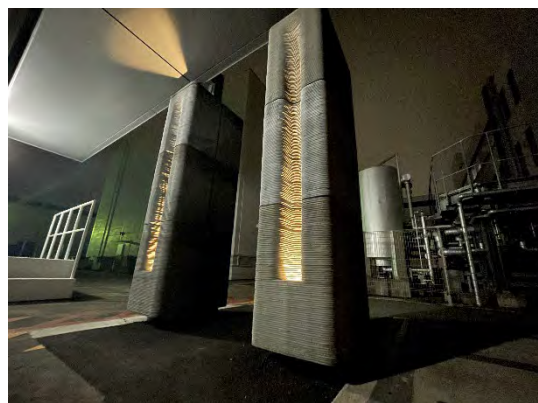


写真-2 3DP で構築した機能的支柱

キーワード 3D プリンティング, 機能性埋設型枠, 構造性能, 実適用

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 3 4 4 - 1 TEL 070-1078-5737

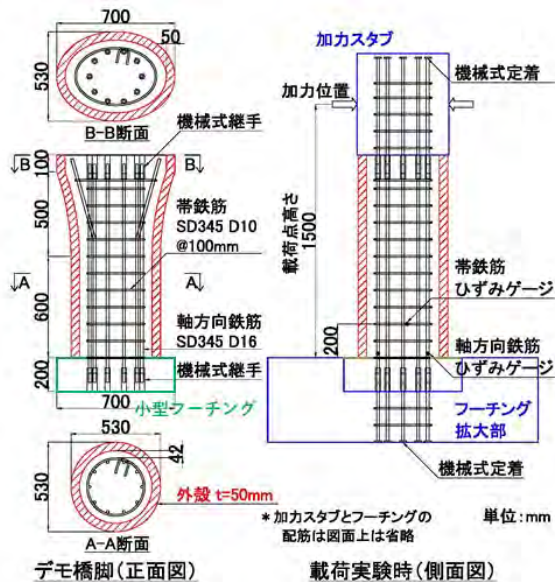


図-1 デモ橋脚の概要

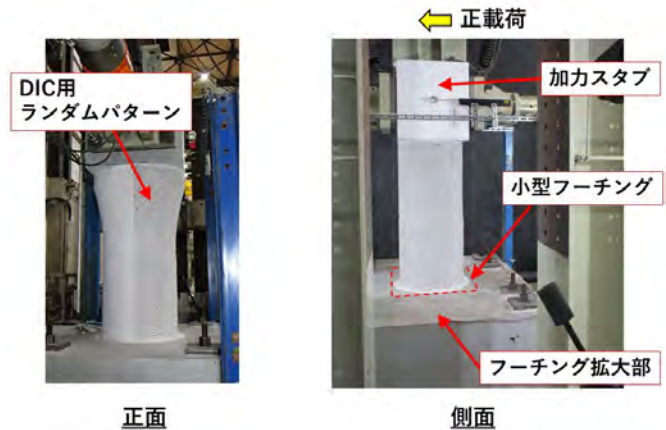


写真-3 デモ橋脚の正負交番載荷試験の様子

を確認した。デモ橋脚の断面寸法や配筋条件の詳細は既報⁴⁾を参照されたい。

(2) 施工手順

小型フーチング(図-1 緑線の部分)をユニット鉄筋挿入部として中央部を残して打設し、その上に柱の外殻 50 mm に相当する箇所を 3DP で積層構築した。積層材料には短繊維補強モルタルを使用した。配合は水粉体比 (W/P) が 0.31, 砂粉体比 (S/P) が 0.88, 分離低減剤と粉体の比率 (V/P) が 0.02, 短繊維混入率を 2.5vol.% とした。粉体には速硬性セメントを、砂には最大粒径 2 mm の砕砂と比表面積 8000 cm²/g 程度の微粉末を混ぜて使用した。混和材料には高性能減水剤, 消泡剤, 凝結遅延剤, 分離低減剤を用いた。JIS R 5201 に準拠して 15 秒間に 15 回の落下運動を与えて測定したフロー値 (15 打フロー) は平均 173 mm であった。積層は幅 25 mm×2 列で行い、1 層の高さは 1 cm, 積層速さは 50 mm/s とした。モルタル材料の流動保持時間および自立可能高さを考慮して基部から 600 mm の位置で打継ぎを行い、2 ロットで製作した。打継処理は行わず、下部 600 mm を積層して 2 時間後に上部を積層し外殻を構築した。外殻部の積層構築時間は下部ブロックが 62 分, 上部ブロックが 68 分であった。この外殻部が埋設型枠の役割を果たす。外殻部の硬化を待ってから、地組みしたユニット鉄筋を小型フーチング下部まで一体で建て込み、内部に高流動コンクリート (目標圧縮強度 30 N/mm², W/C60% の粉体系, G_{max}15 mm, スランプフロー 650±50 mm, 自己充填性ランク 1 相当) を打ち込んで施工した。その後、載荷試験を行うために、図-1 の側面図に青線で示すようにデモ橋脚のフーチングを拡大し、上部には加力スタブを構築した。なお、後述する交番載荷試験に用いる比較試験体は、本出来形計測によりデモ橋脚の基部周辺の最凸部寸法が 543 mm であったことから、基部から頂部まで外径 543 mm の円柱形として、従来の施工法である鉄筋・型枠・コンクリート工により製作した。デモ橋脚と比較用試験体に使用した鉄筋、コンクリートの材料試験結果は既報⁴⁾による。

(3) 試験概要

デモ橋脚と比較試験体の計 2 体に正負交番載荷試験を行った。PC 鋼棒でフーチングを反力床に固定して試験体を設置し、水平変位に追従できる鉛直方向載荷ジャッキにて、デモ橋の自重と群集荷重を想定した 50 kN の軸圧縮力を作用させた。その後、加力スタブの両面に設置した水平方向載荷ジャッキにて、押し引きを繰り返して水平力を作用させる正負交番載荷を行った (写真-3 右)。水平力の載荷は、後述の基準変位 δ_y を基に変位を漸増させて各 1 サイクルの載荷を行った。比較試験体の試験を先に実施し、引張側最外縁に配置した軸方向鉄筋の基部におけるひずみが、材料試験より得られた降伏ひずみに達した時点の載荷点水平変位を δ_y (= 5 mm) としている。 $\pm 14\delta_y$ までは δ_y の整数倍で変位を増加させ、2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編] の式で算出した骨格曲線の終局変位 (N 点) を超えた $\pm 14\delta_y$ 以降は $2\delta_y$ ずつ載荷変位を増加させた。デモ橋脚はさらに、 $\pm 20\delta_y$ から $\pm 32\delta_y$ まで

は $4\delta_y$ ずつ荷重変位を増加させ、最後に正側のみで可能な限り変位を増加させる荷重を行った。

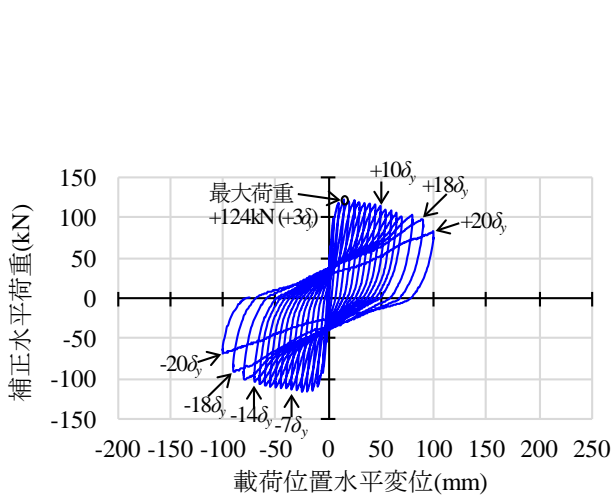
水平荷重、荷重点位置での水平変位、**図-1** に示した位置での軸方向鉄筋と帯鉄筋のひずみをそれぞれ計測した。また、一側面には**写真-3**左のように、予め白黒のランダムパターンを表面に生成した上で定点写真撮影を行い、デジタル画像相関法（以下、DIC）にて面内の変位分布を得た。

(4) 結果と考察

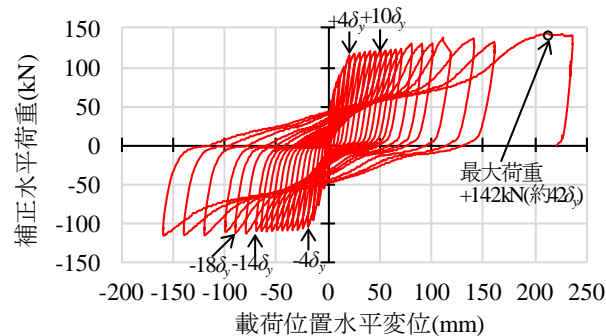
各試験体の水平荷重と荷重点水平変位 δ の関係を**図-2** に示す。DIC で得られた変位から作成した $-14\delta_y$ 時点における最大主ひずみ分布を**図-3** に示すが、最大主ひずみ分布でひずみ約 2%以上の領域は目視でひび割れが確認された位置と対応している。また、試験終了後の試験体基部付近で DIC 計測を行っていない側面の状況を**写真-4** に示す。

比較試験体は、軸方向鉄筋の降伏後、 $+3\delta_y$ で最大荷重 (+124 kN) となった。試験体には複数の曲げひび割れが発生し、側面では一部の曲げひび割れが進展して斜めひび割れが生じた。 $-7\delta_y$ から圧縮側の基部ではかぶりコンクリートの剥落が生じ始めた。最大荷重以降は緩やかに荷重低下が生じ、 $\pm 18\delta_y$ で軸方向鉄筋降伏時の荷重を初めて下回った。 $\pm 20\delta_y$ で基部から約 300 mm の範囲でかぶりコンクリートが大きく剥落して、水平荷重の低下が大きくなり、この時点で試験を終了した。

デモ橋脚は、与えた荷重履歴の中では荷重低下が生じず、水平変位の増加に伴って徐々に荷重が増加していった。最終荷重ステップの $\delta=212$ mm (約 $+42\delta_y$) で最大荷重 (+142 kN) となり、その後も大きな荷重低下は生じなかったが、 $+47\delta_y$ 時点で試験体のねじれが大きくなったため試験を終了した。最大荷重は比較試験体よりも 15%増加した。試験体には外殻の層の界面から複数の曲げひび割れが発生したが、側面では比較試験体で生じたような斜めひび割れが生じなかった。 $+10\delta_y$ 時点における基部から高さ 200 mm の位置での帯鉄筋ひずみは、比較試験体が 980μ 、



(a) 比較試験体



(b) デモ橋脚

図-2 荷重-変位関係

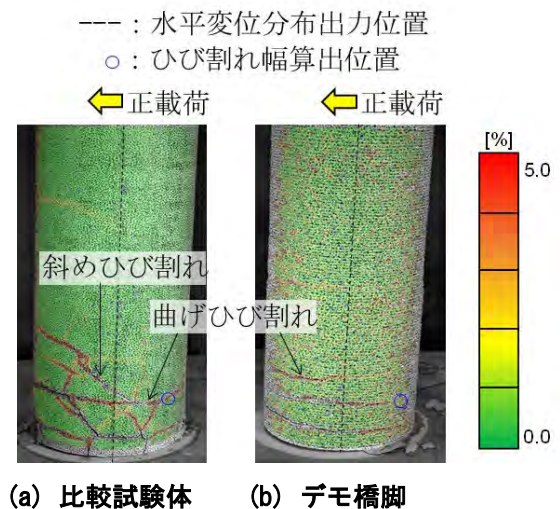
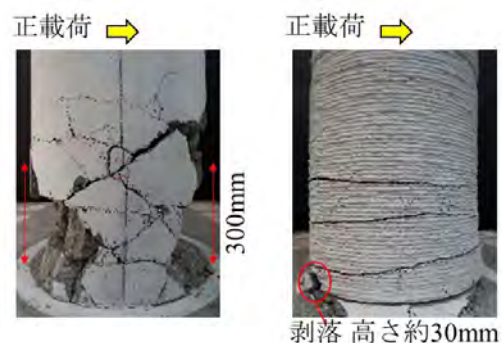


図-3 側面の最大主ひずみ分布 ($-14\delta_y$ 時点)



(a) 比較試験体

(b) デモ橋脚

写真-4 試験終了後の側面状況

デモ橋脚が 314 μ であり、帯鉄筋の引張り負担が小さくなったことから、外殻がせん断補強に寄与したものと考えられる。-186 ν で基部付近の外殻に圧縮力作用に伴う縦方向のひび割れの発生が確認された。最後の载荷ステップで外殻の剥落が生じたが、基部から約 30 mm の局所的な範囲に留まった。これらの結果より、比較試験体に対してかぶりコンクリートの外周付近が外殻に置換されたことで、軸方向鉄筋の座屈に伴うかぶりコンクリートの剥落が抑制されたものと考えられる。試験終了後にデモ橋脚の基部から高さ約 300 mm の範囲でかぶりコンクリートをはつって確認した断面を写真-5 に示す。外殻に含まれる短繊維の多くが周方向に配向されていることが確認できた。そのため、外殻は特に周方向の引張抵抗力が高く、せん断補強効果やかぶりコンクリートの拘束効果が発揮されたと考えられる。この効果により、デモ橋脚は非常に大きな変形性能を有するものとなった。また、はつり断面では外殻と内部コンクリートの界面にひび割れは見られず载荷時にも一体として挙動していたことを確認した。

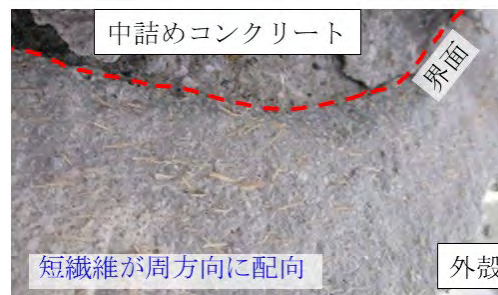


写真-5 外殻の断面状況 (高さ 300 mm 位置)

以上の結果より、3DP で構築した外殻は、地震力を想定した水平荷重が作用し大きな変形が生じた場合にも、内部コンクリートと一体的に挙動し、せん断補強効果やかぶりコンクリートの拘束効果を発揮することが期待できると考えられる。また、3DP で製作したプレキャスト埋設型枠としての使用や、既設橋脚外周に巻き立て補強を行う場合にも、同様の付加的な効果が期待でき、補強方法の一つとして活用できる可能性があると考えられる。

3. 3DP で構築した機能的支柱の事例

(1) 構造物の特徴

機能的支柱の概要を図-4 に示す。写真-2 では 2 体の支柱を示したが、これらは左右反転したデザインになっており、図-4 に示したのは写真-2 の右側の支柱のモデルである。この支柱には構造部材としての役割に加え、照明、排水といった付属機能を付加したことから、機能的支柱と呼んでいる。正面下部には円筒形の照明埋め込み部を備えており、ここに設置した照明が、3 次元的に湾曲した溝を照らし出すデザインとなっている (図-4 (a))。内部は、プリント型枠自身により、コンクリート打込み領域、排水用領域、施工部材設置領域に区画されている (図-4 (b))。3DP ではこのように、プリント経路の工夫により複数の機能空間を型枠無しで一括構築できる。なお、後述するように中詰めコンクリート領域は最終的には SRC 造となる。プリント型枠部は構造部材及びかぶりとは見なさず、中詰め部の断面を設計した。図-4 (c) には図-4 (a) の A-B 断面図を示した。鉛直方向には、3 ブロックに分割してプリント型枠を製作し、これらを現地で組み上げて構造物として一体化した。本事例では 2 本の機能的支柱を当社施設内の歩行通路の屋根支柱として実適用した。

(2) 機能的支柱の断面形状詳細

機能的支柱の高さごとの断面図を図-5 に示す。全断面に共通した方針として、必要な機能空間をプリント経路によって分けしつつ、全てのプリント経路が一筆書きでプリントできるようにデザインした。一筆書きにすることで、積層開始点を一か所とすることができる (図-5 中赤×印)。積層開始点は吐出開始・終了をする点であり、接合点として膨らみやすく周囲のパ

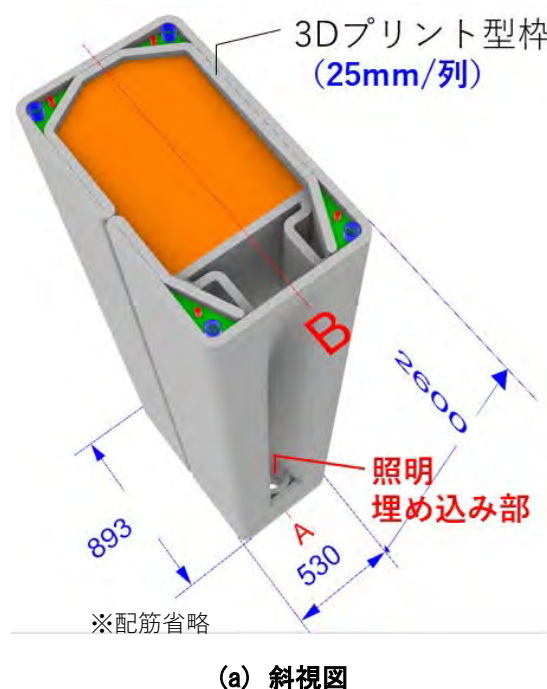


図-4 機能的支柱の概要

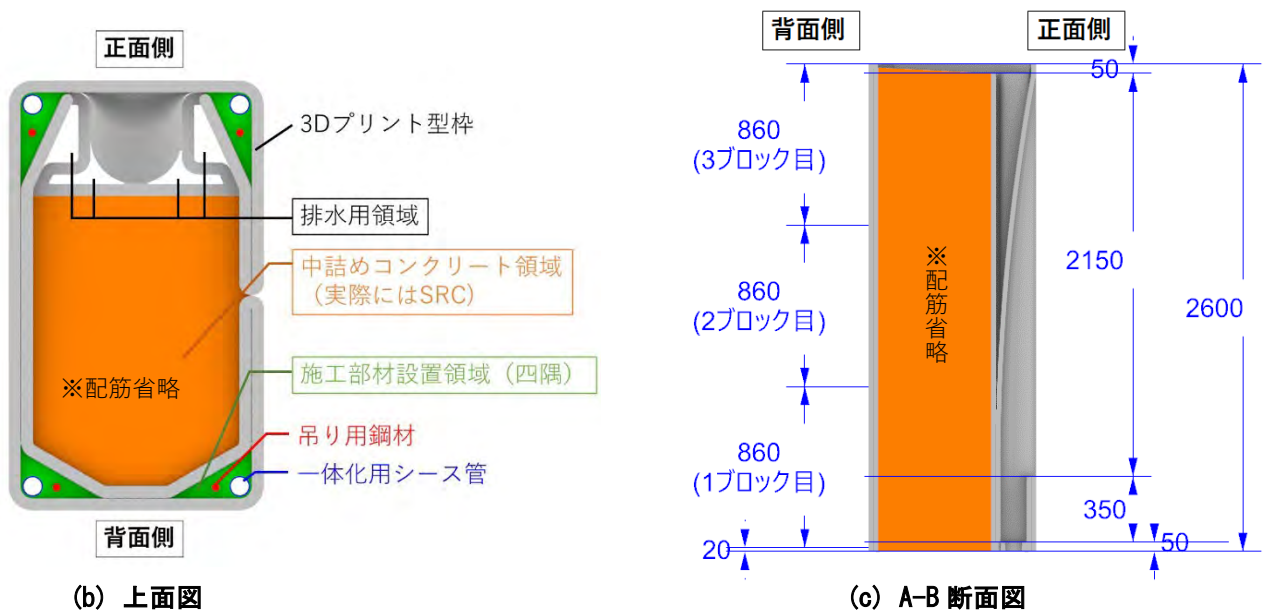


図-4 機能的支柱の概要 (続き)

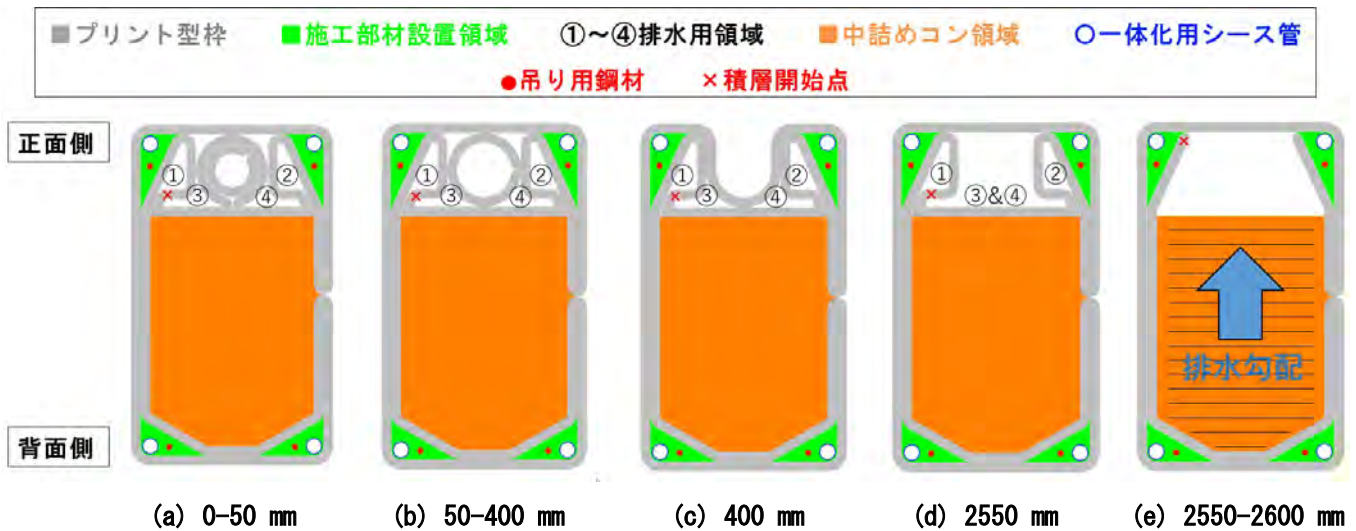


図-5 機能的支柱の各高さの断面図 (配筋省略)

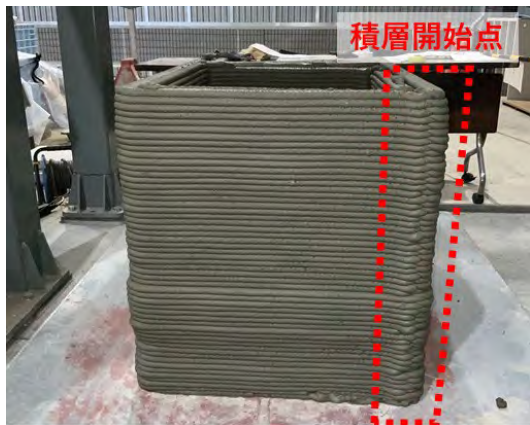


写真-6 積層開始点を外部に配置した場合の例

スと比べて乱れた印象を与えやすい。(写真-6)。積層開始点を内部の1か所とすることで、外観の仕上がりが向上することを期待した。以下、図-5で凡例分けした領域ごとに断面の解説をする。

施工部材設置領域は、四隅に全高にわたり同一の形状として区画されており、この領域内に、ブロッケー体化用のシース管とブロック吊り用の鋼材を設置してグラウトで固定した。

照明設置領域およびその上の溝は各断面図の正面側中央の部分である。この部分の断面変化は図-4(c)も適宜参照されたい。高さ0-50mm(図-5(a))では、円を二重にしており、内側の円が円筒形の照明の台座となっている。後述するように全てのプリント経路を一筆書きにするために中詰

めコンクリートの仕切り壁の型枠から引き込むように二重円を形成した。高さ 50-400 mm (図-5(b)) では、円が一重になり、この部分が円筒形の照明を収納する筒部分となる。一重の円のプリント経路は排水用領域②を形成する型枠から引き込むようにした。高さ 400 mm (図-5(c)) において、正面側中央部の型枠が U 字形状になり、ここから高さ 2550 mm (図-5(d)) までかけて U 字の溝が徐々に浅くなり。高さ 2550 mm 以降は正面側中央部が直線となり、外周は矩形になる。図-4(c)を見ると明らかであるが、高さ 400 mm から高さ 2550 mm までの溝部分はオーバーハングとなっている。オーバーハングは、未硬化の材料を積み重ねていく建設用の 3DP では実現が難しいデザインであり、本事例の挑戦的要素の一つであった。

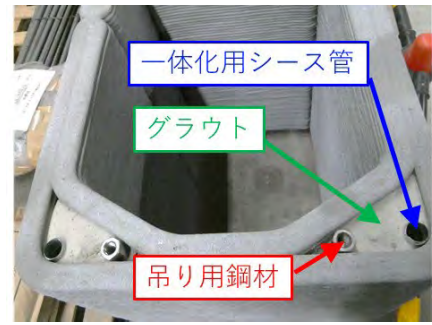


写真-7 施工部材設置領域の拡大写真

排水用領域①～④は供用後も穴として残す領域である。排水用領域①，②は高さ 2550 mm (図-5(d)) まで同一の形状として区画されており、正面側の左右の隅に溜まる雨水の排水を担う。排水用領域③，④は高さ 400 mm までは同じ形状で区画されており、それ以降は溝が正面側にせり出していくのに伴って一つの穴に合体する (図-5(d))。排水用領域③，④は中詰めコンクリート領域および背面側の左右の隅に溜まる雨水の排水を担う。

中詰めコンクリート領域は現地でプリント型枠を設置後に普通コンクリートを打ち込む領域である。高さ 2550 mm (図-5(d)) までは同一形状として区画されており、それ以降は、雨水が排水領域③，④に流れるように、正面側の仕切り壁を除いたデザインとしている。高さ 2550-2600 mm (図-5(e)) では、排水勾配をつけて中詰めコンクリートを打設している (図-4(c) 参照)。

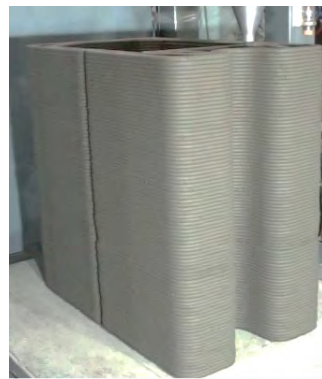
(3) 施工方法

a) プリント型枠の製作

まず、図-4(c)に示した 3 ブロック分割でプリント型枠を製作した。実施工時には、モデル下部から 20 mm (2 層分) を除いた 2580 mm 分をプリントした。これは、支柱の仕上がり高さが 2600 mm になるように調整するためであり、後述する、ブロック間のキャッピングと接着剤分の厚みが 10 mm (×2 箇所) になると見込んだものである。積層材料には繊維なしのモルタル系材料を使用した。W/P を 0.28, S/P を 0.75 とした配合である。粉体には普通ポルトランドセメント等を、砂には最大粒径 2.5 mm のものを用いた。練り混ぜには、容量 100 L のパン型強制練ミキサーを使用し、1 バッチ当たりの練混ぜ量は 75 L、練混ぜ時間は材料投入後から 10 分間とした。積層は幅 25 mm/列で行い、1 層の高さは 1 cm、積層速度は 75 mm/s とした。積層時間は、形状の違いによりブロックごとに若干異なるが、概ね 110 分程度であった。1 ブロック当たりの必要モルタル量が約 200 L であったことから、連続で 3 バッチ練り、プリントが途切れることがないように材料を供給した。練上がり直後の 15 打フローは 144~163 mm であった。プリント直後の 1~3 ブロック目の様子を写真-7 に示す。オーバーハング部分も崩壊することなく、積層する



(a) 1 ブロック目



(b) 2 ブロック目



(c) 3 ブロック目

写真-8 プリント直後の各ブロックの様子

ことができた。オーバーハング角度は曲線的に変化しているが、最大で8度であった。また、積層開始点を内部に配置したことで、外周が連続したパスとなり外観の乱れのない仕上がりとなった。プリント型枠硬化後の一体化用のシース管と吊り用鋼材の設置状況は**写真-8**の通りである。なお、この四隅の必要スペースおよび接合方法については、今後合理化する余地がある。

b) 現地での組み上げ

プリント型枠を組み上げ、機能的支柱として設置するまでの手順を**図-6**に示す。**図-6**は機能的支柱を背面から見た様子である。鉄筋の仕様等の詳細は割愛する。

STEP1：フーチングおよびプリント型枠より下部の基礎コンクリートを型枠工法により製作した。支柱下部の木製型枠はプリント型枠の支保として残置した。プリント型枠の下端は、排水と照明用ケーブルの取り回しのため、GLより15cm高い位置とした。既設の基礎上に、鉄筋かごを通すようにして1ブロック目のプリント型枠を設置した（**写真-9(a)**）。

STEP2：設置した1ブロック目のプリント型枠の中詰めコンクリート領域に、型枠上面から10cm低い位置まで普通コンクリート（呼び強度24 N/mm²）を打ち込んだ。

STEP3：1ブロック目のプリント型枠の上面に接着剤を塗布し、その上に2ブロック目のプリント型枠を設置した。2ブロック目のプリント型枠四隅のシース管から、1ブロック目と2ブロック目を貫通する鉄筋を挿入し、グラウトを流し込み、ブロック同士を固定した。その後、型枠上面から10cm低い位置まで普通コンクリートを打ち込んで、1ブロック目と2ブロック目を一体化した。

STEP4：3ブロック目のプリント型枠を設置し、STEP3と同様にして接着剤と貫通鉄筋により2ブロック目と3ブロック目を固定した後、型枠上部から50cm低い位置まで普通コンクリートを打ち込んだ。その後鉄骨とスタッド筋を挿入した。

STEP5：3ブロック目の上部まで普通コンクリートを打ち込んだ。打込み高さは、**図-4(c)**に示したように、排水勾配をつけるために、型枠背面側で外周型枠上面から2cm低い位置まで、型枠正面側で外周型枠上面から5cm低い位置（排水領域の上面）までとした。その後、鉄骨にアルミハニカムパネルの屋根を取り付け、下部の木製型枠を撤去し、照明埋め込み部に円筒形の照明を設置した（**写真-9(b)**）。機能的支柱の竣工後の供用状況は**写真-2**に示した通りである。

(4) まとめ

本プロジェクトでは、予め照明設置領域、排水用領域も含めて一括で造形したプリント型枠を現地で組み上げる

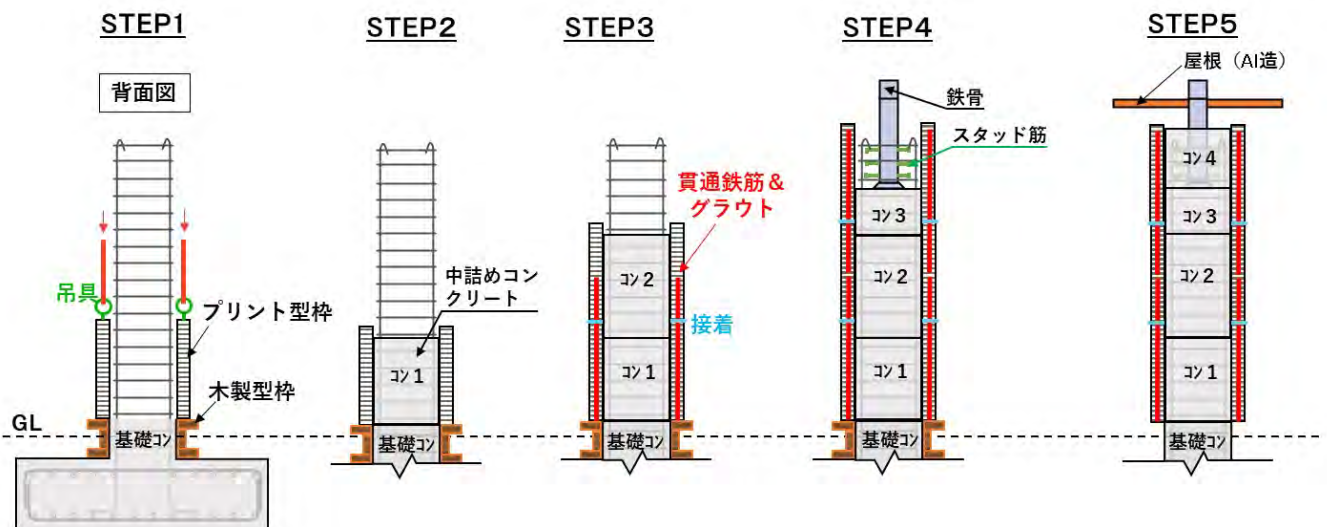


図-6 機能的支柱の施工手順



(a) 1ブロック目の設置



(b) 照明設置状況

写真-9 機能的支柱の施工時の様子

ことにより機能的支柱を構築した。これにより、従来の型枠・打込み工法で必要となる、コンクリート型枠工、支保工、また、照明用の型枠や排水孔用の型枠の設置作業が不要となり、現場作業を簡略化することができた。本プロジェクト内では高さ 2.6 m の機能的支柱を 3 ブロックに分割してプリントしたため、ブロック間の一体化の工程が発生した。ブロック分割は使用した 3D プリンタの稼働領域から決めたものである。今後、大きな 3D プリンタを使用すれば、その分高くまでプリント型枠を構築可能であり、ブロック間の一体化の工程も削減できる。

一方で、3DP で構築した埋設型枠については、規基準類が整備されておらず、構造部材として扱えるかどうかは慎重な検証を要する。したがって、現状では非構造体として扱わざるを得ず、プリント型枠分だけ躯体が厚くなる。このことは、プリント工法普及における障壁になると考えている。施工方法の開発とともに、本稿 2 章で示したようなプリント型枠の構造的性能の検証や、耐久性の検証を並行して行い、プリント部材を含む場合の設計方法も整備していく予定である。

4. おわりに

本稿では、建設用 3DP を使った、機能性を有する埋設型枠の構築と実構造物への適用事例を 2 件報告した。

1 件目は、短繊維補強モルタルで外殻部を埋設型枠として構築した、構造補強機能を有するデモ橋脚である。短繊維がプリント方向に配向し、巻き立て効果を発揮したことで、同一の構造断面の試験体よりも水平荷重に対する耐力・変形性能が向上した。

2 件目は、支柱としての構造的機能に加え、照明と排水という付属機能を付与した機能的支柱である。プリント経路を工夫し、プリント型枠自身により、複数の機能空間を区画するようにデザインした。型枠自体に付属機能の空間を付与しておくことにより、現地作業をブロック組み上げ・中詰めコンクリートの打込みのみとすることができ、複数機能を有する構造物を少ない現地作業で構築することができた。

5. 参考文献

- 1) (株) 日経 BP, 特集 建設 3D プリンター元年, 日経コンストラクション, 2022 年 5 月号, pp. 32-54, 2022 年
- 2) 松田聡美, 高見澤拓哉, 井口重信, 東 大智, 3D プリンティングで外枠を構築した梁の曲げ・せん断載荷試験, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, V-488, 2021 年
- 3) 鈴木三馨, 山本悠人, 木ノ村幸士, 畑明仁, 歩道橋のトポロジー最適化設計と 3D プリンティング技術を用いた製作および構造性能実証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 1291-1296, 2020.
- 4) 木ノ村幸士, 張文博, 川端康平, 河村圭亮, 3D プリンティングで外殻を構築したデモ橋脚の交番載荷試験による性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 1, pp. 1528-1533, 2022