

不陸な地盤面上での 3D プリンティング技術の開発と検証

田中 俊成*¹・臼井 達哉*²・古賀 快尚*³・宮本 真吾*⁴・木ノ村 幸士*¹

Keywords : T-3DP[®], 3D printing, uneven ground, 3D scanning, buildability, permanent formwork
T-3DP[®], 3D プリント, 不陸面, 3D スキャン, 積層安定性, 埋設型枠

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。建設分野でもセメント系材料の 3DP が登場しており、国内でも 3DP を用いた構造物の施工例が蓄積されつつある¹⁾。従来の型枠工法で製作困難な複雑形状の構造物を製作できることや、型枠レス化による省資源化等のメリットがあり、機械化施工によるコンクリート工の省人化や工期短縮も期待されている。

当社でも T-3DP[®]と称した 3D プリンタを開発し、複

雑形状の橋桁の構築²⁾や、機能性を付与した支柱の埋設型枠³⁾への適用など、建設用途への展開に向け検討を進めてきた。

現状の 3DP 技術の課題として、平滑な水平面上へのプリントが前提になっている点がある。図-1 に 3DP の技術レベルごとに、躯体構築までの工程を整理して比較した。現状の 3DP 技術では、水平面上へのプリントという制約のため、オンサイトでプリントするにせよ、プレキャスト部材を現地で組み立てるにせよ、事前に均しコンクリートと呼ばれる、土台となる水平なコンクリートを施工し、その上にプリント部材を構築する必要がある

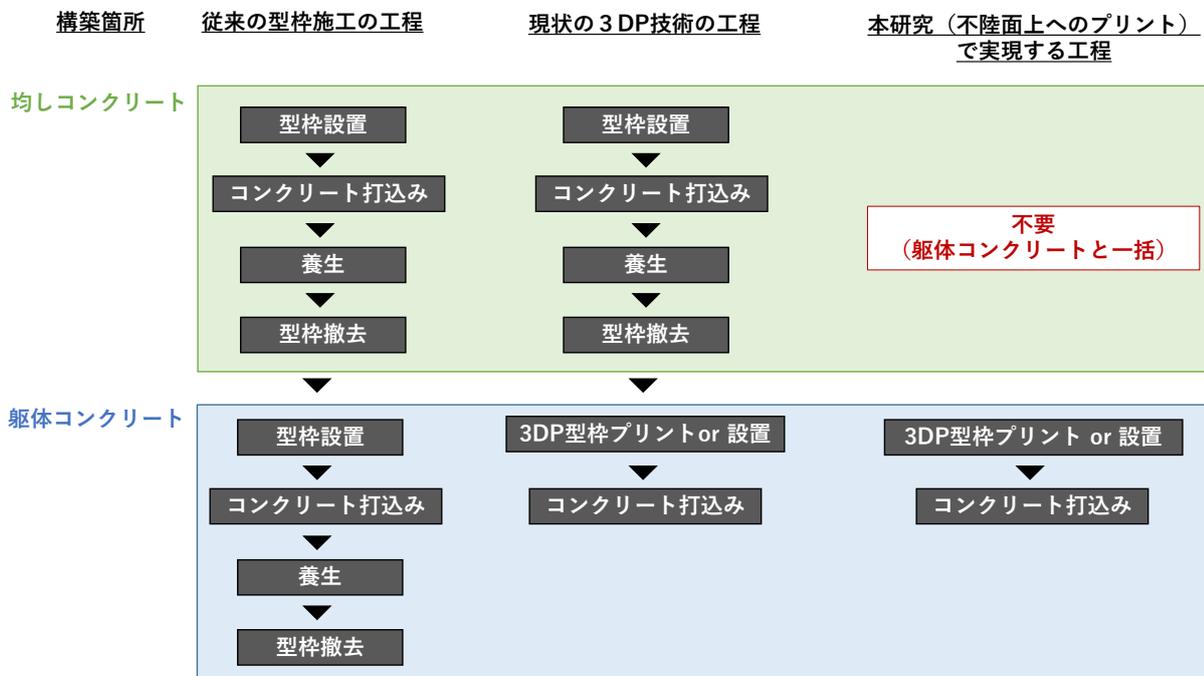


図-1 従来技術との工程比較

Fig.1 Process comparison with conventional construction

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

* 2 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

* 3 技術センター 生産技術開発部 地下空間技術開発室

* 4 土木本部 土木技術部

〃：現状で3DP構築可能な箇所

■：不陸面上へのプリントで、新たに3DP構築可能になる箇所



図-2 3DP の新たな適用先の例

Fig.2 Examples of new applications of 3DP

る。均しコンクリートの施工自体は、従来の型枠工法でも必要となる工程である。これに対し、3DP の持つ造形自由度の高さという特徴を活かし、不陸な地盤の形状に合わせて直接プリントすることができれば、直接基礎やフーチング等を均しコンクリートなしで、かつ型枠レスで一括構築できるため、現状の 3DP 技術以上の工期短縮が期待できる。また、不陸な掘削面上に構築するトンネルのインバートコンクリートや、床板・梁の断面補修など、3DP の用途拡大も見込まれる (図-2)。

そこで本研究では不陸な地盤面上に直接 3D プリントする技術を開発し、検証実験を通して所定の形状に安定的なプリントが可能かを確認した。まず、不陸な地盤面の凹凸を避けながらプリントする機能を開発した。次に、単純な不陸面として斜面地盤および曲面地盤上で小規模な積層実験を行い、画像解析によりこれらの地盤上での積層安定性を確認した。最後に、土木工事で直面しうる急勾配かつ凹凸のある掘削地盤を想定し、最大勾配 80%かつ最大高低差約 100 mm の凹凸を設けた模擬地盤上に埋設型枠をプリントする実験を行った。そして、埋設型枠の出来形や、型枠としての密閉性を評価することで、工法の成立性を検証した。

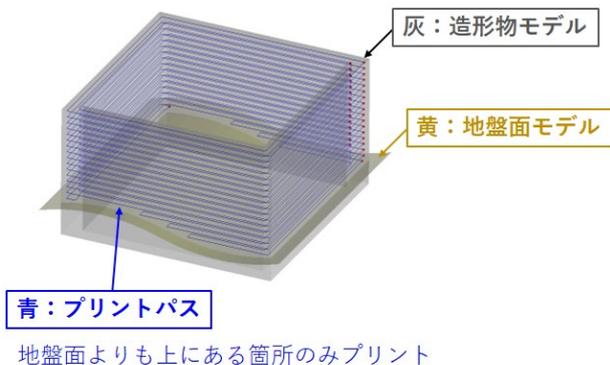


図-3 不陸面上でのプリントパスの例
Fig.3 An example of print path on curved ground

2. 不陸な地盤面上でのプリント機能の開発

2.1 プリント方法の概要

不陸面上でのプリントパス (3D プリンタのノズルの経路) のイメージを図-3 に示す。一般的なプリントパス計算ソフトでは、造形物の形状データをインプットすることで、その形状を造形するためのプリントパスを自動計算できる。本研究では、造形物の形状データに加え、地盤面の形状データもインプットし、造形物のうち、地盤面よりも上にある部分を判別してプリントパスを出力することで、不陸な地盤面上でのプリントパスを生成した。

2.2 小規模積層実験での積層安定性の確認

2.2.1 実験概要

3DP が工法として成立するには積層した 3D プリンティングモルタル (3DP モルタル) が安定的に自立し続けることが前提となる。水平面上の積層でも、積層速度が速かったり、3DP モルタルが過度に流動的であったりすると、積層途中で崩壊することがあるが、不陸面上ではさらに積層安定性が低下することが予想される。例えば図-3 のような高低差のある面上にプリントした場



図-4 曲面上での積層の様子 (Case-C)
Fig.4 3D Printing on a curved ground

合、不同沈下の発生が懸念される。また、図-4 は後述する Case-C のプリントの途中の様子であるが、不陸面上でプリントする場合、地盤面付近では階段状の積層になるため、下層の 3DP モルタルと地盤面の間に図-4 の小枠内に模式図で示したような凹みが生じる。これに起因して凹みの上の層が局所的に変形することが懸念される。そこで、まずは比較的単純な斜面地盤および曲面地盤上で積層し、積層安定性を確認した。実験ケースを図-5 に示す。Case-A, B, C の順に地盤面を水平面、斜面、波型曲面とした。造形物は 3 ケース共通で、中空四角柱とした。3DP による一列のプリント幅は 25 mm、一層の高さは 10 mm、プリント速度は 50 mm/s とした。プリント中の変形を分析するために、プリント実施時にはデジタルカメラにより図-5(a)~(c) に示した正面図の画角でプリントの様子を撮影し、2.2.3 に示す画像解析に用いた。

2.2.2 使用材料と練混ぜ方法

3DP モルタル配合は、水道水、普通ポルトランドセメント、最大粒径 2.5 mm の細骨材、高性能 AE 減水剤等の市販の材料で構成され、水粉体比は 0.28、砂粉体比は 0.75 である。練混ぜには容量 100 L のパン型強制練りミキサーを使用し、1 バッチの練混ぜ量は 75 L とした。練混ぜ時間は、粉体と細骨材を空練りしたのち、残りの材料を投入して 10 分間とした。

プリント材料のフレッシュ性状は、地盤工学会基準 JGS 1411-2012 に準拠して測定したベーンせん断抵抗により管理した。プリント供用時間内に、適宜圧送用のホッパー内の材料に対しベーンせん断抵抗を測定し、その値が安定的に積層可能な 0.4 kPa~1.0 kPa の範囲内⁴⁾にあることを確認しながらプリントを行った。本研究の実験で使用した 3DP モルタルのベーンせん断抵抗の実測値は 0.6 kPa~1.0 kPa であった。

2.2.3 プリント直後の変形の評価方法

粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry, 以下

PIV) によりプリント造形物の巨視的な変形性状の把握を試みた。PIV は 2 枚の画像から特徴点の移動ベクトルを抽出する手法である。

15 層目の積層が終了した時点で 30 秒間積層を中断し、画像解析用の特徴点を白色スプレー散布により作製した。15 層目と 25 層目時点での画像を PIV 分析することにより、16~25 層目の上載の間に 1~15 層目がどのように変形するかを評価した。

2.3 結果と考察

図-6 に PIV による変形分析の結果を示す。(a1)~(c1) は 3 ケースの分析結果の全体図である。これらの図中の小枠 1~6 の拡大図を(a2)~(c2)および(a3)~(c3)に示している。各図中のベクトルの向きがその点における変形方向を表しており、ベクトルの色がカラーバーに示す変位量に対応している。なお、ベクトルは拡大表示しており実際の変位量とは対応していないが、各位置の変位量の相対的關係は維持している。

まず、水平面上に積層した場合の傾向確認として Case-A に着目すると、図-6 (a1), (a2), (a3)のカラーマップより、以下の変形の傾向がみられた。

- ・傾向1 図-6 (a2), (a3)より、下向きの鉛直変位は、上の層ほど大きい。
- ・傾向2 図-6 (a3)より、水平変位は外向きであり、左右端部付近ほど変位が大きい。
- ・傾向3 図-6 (a3)より、水平変位も上の層ほど変位が大きい。

傾向 1 および傾向 3 の要因は、3DP モルタルのチキソトロピー性によりプリント後の経過時間が長くなるほど材料のこわばりが強くなること、鉛直方向の荷重はそれまでに積層した層全体で受け持つため後から積層されたこわばりの弱い層に変形が集中的に現れること、の 2 点が挙げられる。傾向 2 の要因は、以下のように説明できる。鉛直方向に積層する場合、外周および内部には拘束がなく自由変形が可能であるため、層全体が押しつぶ

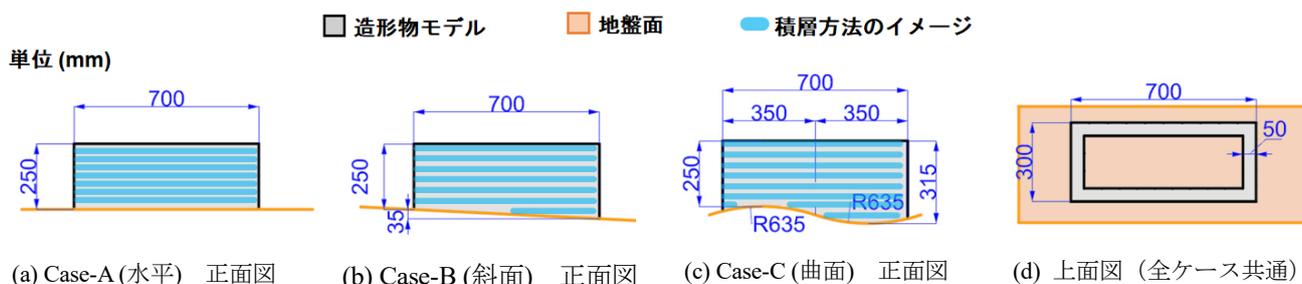


図-5 小規模積層実験のケース一覧
Fig.5 List of cases for small-scale 3D printing experiments

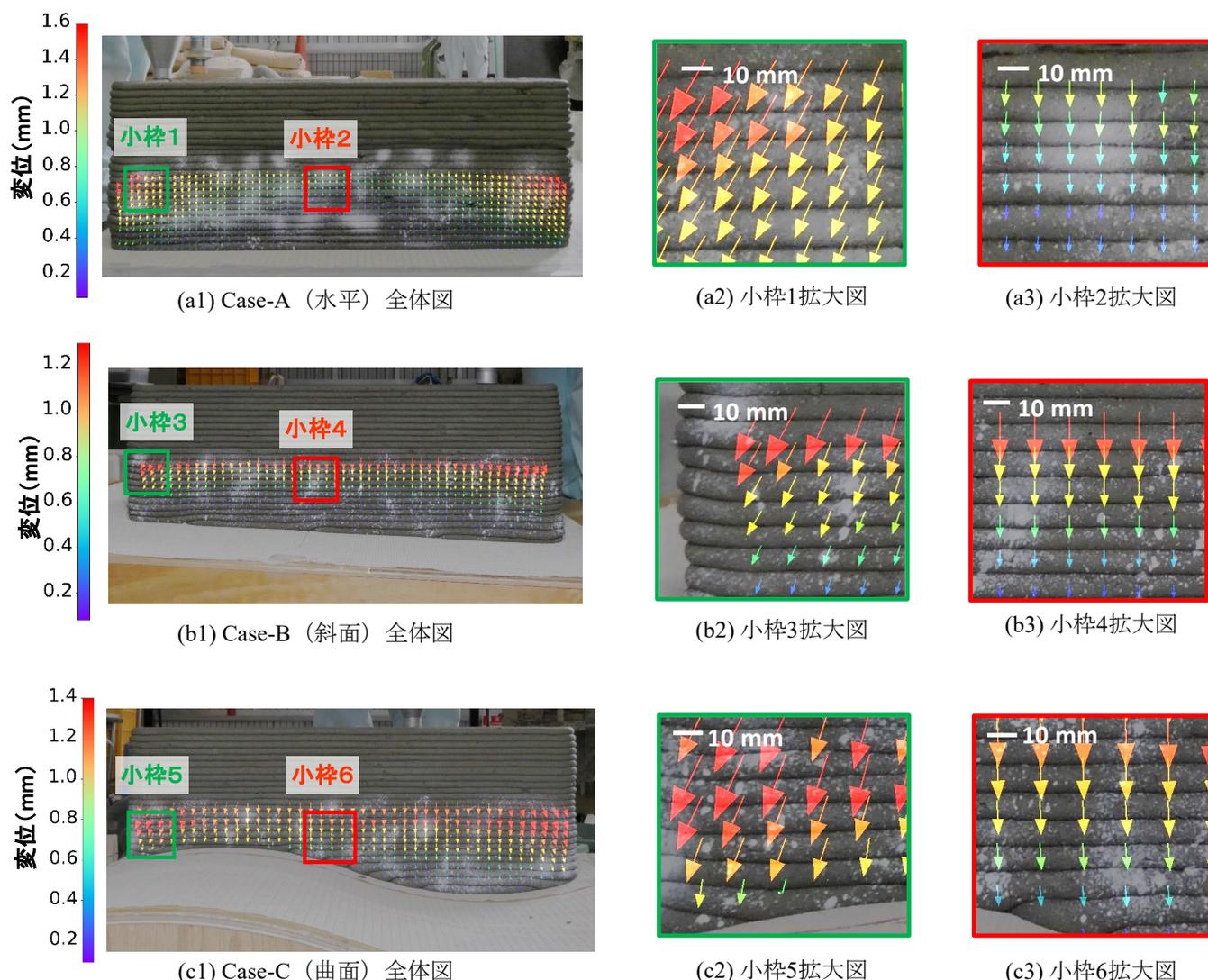


図-6 PIVによる変形分析の結果
Fig.6 Results of deformation analysis by PIV

されるように水平方向に広がる。その結果、正面から見ると、左右の端ほど水平変位が大きくなったものと考えられる。

次に、2.2.1 で懸念点として挙げた不同沈下や凹みに起因した局所的な変形の有無に着目し、Case-B および Case-C を確認する。巨視的な傾向として、鉛直変位が上の層ほど大きい傾向（傾向 1）、水平変位が左右端部付近ほど大きい傾向（傾向 2）、水平変位が上の層ほど大きい傾向（傾向 3）は Case-A と同様であった。小棒 3~6 内の変位ベクトルの現れ方も Case-A と同様であり、不同沈下の傾向は確認されなかった。また、小棒 4（図-6(b3)）および小棒 6（図-6(c3)）は、凹みの真上の位置に当たるが、局所的な変形や歪みは見られなかった。特に小棒 6 内左下の凹み部分を見ると、凹みは上層のモルタルにより埋められているが、上層がその分沈下する様子はなかった。モルタルのうち、通常は水平方向に広が

る分が凹みの充填に使われたものと考えられる。凹みのサイズは幅数 cm、高さ 1 cm ほどであったが、このスケールの凹みであれば上記の効果により問題なく積層ができることを確認できた。

以上より、小規模積層実験の範囲内では、積層安定性を損なうような変形が発生しないことを確認できた。

3. 模擬インバート部材プリント実験による検証

3.1 検証の概要

次に、土木工事で直面しうる範囲の勾配かつ凹凸のある地盤を想定し、最大勾配 80%かつ最大高低差約 100 mm の凹凸を設けた模擬地盤上に、コンクリート部材の埋設型枠として、より大型のモデルをプリントする実験を行った。土木工事で、このような急勾配かつ凹凸

を有する面にコンクリート部材を直接打設する例としてはトンネルインバートが挙げられる。本実験でのコンクリート部材の形状もトンネルインバートを模擬した形状とした（以降、模擬インバート部材と呼ぶ）。プリント後には3Dスキャンで出来形を評価した。その後、実際にコンクリートを打込み、モルタルの漏れや側圧による変状の有無を確認し、埋設型枠としての性能を評価した。

3.2 実験概要

3.2.1 3DP型枠のモデルと模擬地盤の製作

図-7に本実験で構築した3DP型枠のモデルを示す。まず、設計地盤面はR1500mmで湾曲した面がY方向に勾配4%で傾斜している。3DP型枠モデルは、面Aを設計地盤面のY方向の勾配に沿って押し出し、そこから内部をくりぬくことで井桁状とした。面Aの天端は、左側は巻厚450mmとなる曲線、右側は水平線で定めた。左側を巻厚450mmと設定したのは、トンネルインバートの一般的な巻厚は400mm~500mm程度であることから、巻厚450mmに相当する高さを不陸面上で安定的に積層できるかを確認することを意図した。設計地盤面内で3DP型枠をプリントする位置の最大勾配は80%となっている。3Dプリント時の1列の幅は25mm、1層の高さは10mmとし、3DP型枠部の厚さは50mm(=2列分)とした。井桁状の3DP型枠内部に後からコンクリートを打込むことで一つのコンクリート部材となる。模擬地盤面は、木材で作製した設計地盤面に不陸として粘土をランダムに貼付け、最大高低差100mmの凹凸を設けた。(図-8)。これを3Dスキャンしたものを地盤面データとして用いてプリントパスを計算した。図-9には例として、25層目までのプリントパスを示す。

3.2.2 3DP型枠のプリント

3DPモルタルには2.2.2と同様の材料を用いた。プリント速度は100mm/s~150mm/sとし、3DP型枠全体を約100分でプリントした。

3.2.3 出来形の評価と打込み時の側圧による変状評価

硬化後の3DP型枠の側面を3Dスキャナーにより3Dスキャンし、出来形を確認した。また、プリント完了から18時間後にスランプ15cmのコンクリートを打込み、側圧による3DP型枠の変状がないかを確認した。一般的なトンネルインバート工ではスランプ8cmのコンクリートが使用されることが多いが、本実験では型枠への側圧が、より厳しい条件になることを意図した。

3.3 結果と考察

図-10に図-9と同じ25層目までのプリント状況を示す。赤丸の部分に着目すると、模擬地盤面に沿って凸部は避けつつ凹部は埋めるように積層されていることが分

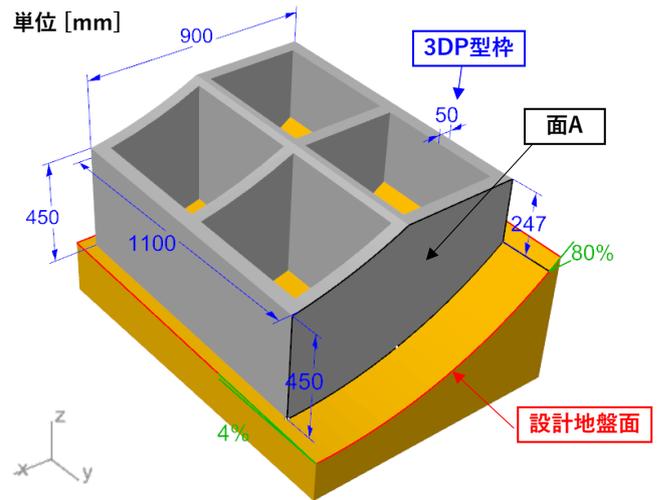


図-7 設計地盤面と3DPモデル
Fig.7 Designed ground surface and 3DP model



図-8 模擬地盤面
Fig.8 Artificial uneven ground

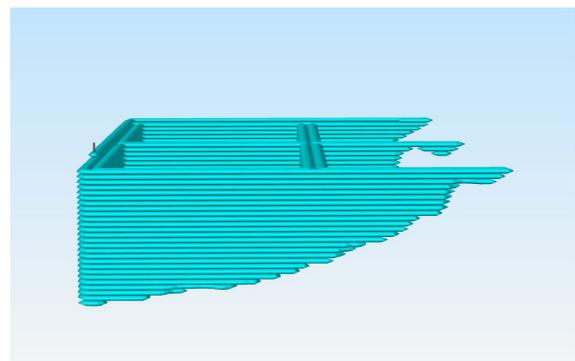


図-9 25層目までのプリントパス
Fig.9 Print path up to 25th layer

かる。プリント完了時の状況を図-11に示す。造形物モデルの天端が水平ではないため、3Dプリントでは上部が階段状の仕上がりとなっている。

図-12には3Dスキャンによる側面の出来形評価の結果を示す。カラーマップは、設計モデルとの水平方向の誤差を表し、外側方向をプラスとした。図-12において、



図-10 25層目までのプリント状況
Fig.10 State of print up to 25th layer

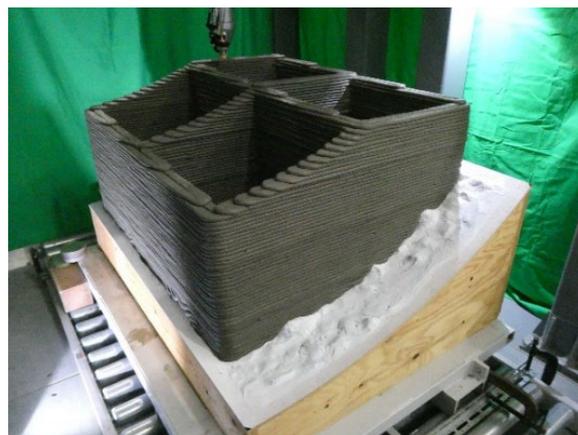


図-11 プリント完了時の状況
Fig.11 State at completion of printing

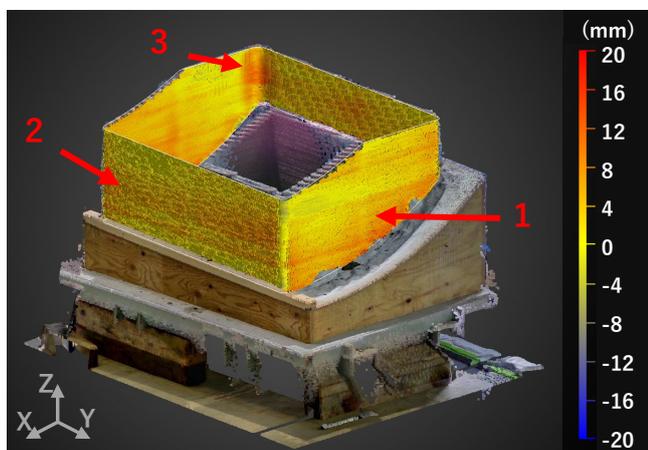


図-12 設計モデルに対する出来形
Fig.12 Shape quality for the design model



図-13 コンクリート打込み後の状況
Fig.13 State after concrete casting

矢印 1 や矢印 2 の付近で出来形が+10 mm 程度と比較的大きくなっているのは、3DP モルタルの材料性状が経時変化により若干柔らかくなり、吐出量が多くなったためである。また、矢印 3 の付近でも出来形が+15 mm 程度の箇所があるが、この位置は積層開始点および終点であり、閉合部の密着性確保のために、材料を余分に吐出する設定としたためプラスの出来形になった。

一方、全体的に設計地盤面の勾配下手方向に倒れこむような変形は認められなかった。また、地盤面の不陸に起因した積層の乱れもなかった。全体として設計モデルとの誤差は平均で+3.90 mm、標準偏差が 2.46 mm、最大値が+14.6 mm、最小値が -6.20 mm であった。例えば、国土交通省工事のインバート工の部材幅の管理規格値⁵⁾は-50 mm 以上、同様に護岸基礎工⁶⁾では-30 mm 以上であり、これらの基準を十分に満足する出来形であった。

図-13 には 3DP 型枠にコンクリートを打込んだ後の状況を示す。3DP 型枠には、側圧によるひび割れ等の変

状は確認されなかった。また、型枠全体の様子として、地盤面付近の 3DP 型枠にブリーディング水による濡れ色こそ観察されたものの、3DP 型枠と地盤面の界面や、3DP の層同士の間からのモルタル分の漏れはなく、型枠としての密閉性は問題なかった。

4. おわりに

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 基礎検討として行った、高さ 250 mm の小規模積層実験での画像解析の結果、斜面や曲面上といった単純な不陸面上に積層した場合には、不同沈下や局所的な変形等、積層安定性を損なうような変形は確認されなかった。
- (2) 勾配 80%かつ、最大 100 mm のランダムな凹凸を有する模擬地盤を作製して、模擬インバート部材の 3DP 型枠プリント実験を行い、一般的なインバート

部材の厚さである 450 mm まで約 100 分間で安定的にプリント可能なことを確認した。

(3) 模擬インバート部材の 3DP 型枠の出来形を 3D スキャナーで測定したところ、水平方向の出来形の誤差は平均で+3.90 mm であり、例えば国土交通省の管理基準値を十分に満足する値だった。

(4) プリント終了から 18 時間というごく若材齢の時点で、一般的なインバート工に用いられるものよりも流動性の高い、スランプ 15 cm のコンクリートを 3DP 型枠に打込んだが、側圧による変状や、モルタル分の漏れは観察されず、埋設型枠として使用可能なことを確認した。

なお、本研究では工法成立の前提として、不陸面上で 3DP 型枠を構築できるかという観点での検証を実施したが、今後は実際にコンクリート工事に適用しようとする場合に求められる、3DP 型枠と内部コンクリートの力学的一体性の検証を進めていく。

謝辞

本論文の実験で使用した積層パス形成ソフトは東レエンジニアリング D ソリューションズ (株) と共同開発したものである。ここに記して謝意を表す。

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.
- 2) 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.
- 3) 田中俊成，張文博，木ノ村幸士：3D プリンティングで製作した機能性埋設型枠の実適用，土木建設技術発表会 2022 セッション IV-4
- 4) 村田哲，張文博，木ノ村幸士，畑明仁：3D プリンティングで製作した積層体の硬化物性と収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1852-1857，2020.7
- 5) 国土交通省東北地方整備局：土木工事施工管理基準及び規格値 令和 4 年