

## 論文 斜面や曲面上に3Dプリントしたモルタルのプリント直後の変形特性

田中 俊成\*1・白井 達哉\*2・宮本 真吾\*3・木ノ村 幸士\*1

**要旨：**不陸面上で安定的に3Dプリント可能であるかを確認するための基礎検討として、斜面地盤および曲面地盤上に2種類の積層方法で3Dプリントをし、画像解析によりプリント直後の変形を分析した。不陸面上に3Dプリントした場合でも局所的な沈下や層間の滑りなど積層安定性を損なうような変形は見られなかった。巨視的な変形の傾向は水平面上に積層した場合と同様であり、層直角方向への層厚の変化と非拘束方向への水平変形が現れた。層厚の変化は3~5層が搭載されたのち概ね収束した。一方で、水平方向への変形は搭載される層数が増えるにつれて徐々に鈍化はするものの明確な収束は確認されなかった。

**キーワード：**3Dプリント, 不陸面, 斜面, 曲面, 変形特性, 積層安定性, 画像解析

## 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<sup>1)</sup>。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。

現段階の3DP適用事例は室内で部材をプレキャストした例が多い<sup>1)</sup>。そのため積層する基準となる面は水平かつ平滑な面とされていたが、今後の建設分野での普及を見据えると、現地地盤の形状に合わせてプリントする技術が有望であると考えている。これが可能であれば、均しコンクリート相当の土台とその上の構造物を型枠レスで一括構築できるなど、新たな適用法が見込まれる。

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<sup>2),3)</sup>、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。

そこで本研究では、不陸面上でプリントした造形物の積層安定性を確認することを目的に、基礎検討として以下の内容を実施した。まず、斜面および曲面上に2種類の積層方法でプリントをし、画像解析によりプリント直後の変形を分析して積層安定性を損なうような変形挙動が見られないかを確認した。次に、不陸面上での積層、水平面上での積層の両方で見られた層厚の変化、水平方向への変形について経時的な変化を詳細に分析し、プリント直後に発生する変形の機構について考察した。

## 2. 実験方法

## 2.1 プリントモデルと積層パス形成方法

3DPモルタル1列の幅は25mmとし、1層の高さ(以下、層厚)は10mmとした。プリント速度(ノズル移動速度)は50mm/sとした。

実験ケースを図-1に示す。地盤面種類と積層方法を変えた5ケースのプリントを実施した。全5ケースについて、プリントするモデルは図-1の上面図のような、上面から見た形状が奥行300mm、横700mm、幅50mm(3DPモルタル幅2列分)の中空四角柱形状とした。図-1(a)~(e)は5ケースの正面図を示す。モデルの高さは、積層領域内の地盤面の最高位置からの高さが250mm(25層分)となるように設定した。

ケース名の最初の漢字は地盤面種類を表す(水:水平面, 斜:斜面, 曲:曲面)。ハイフンに続くアルファベットは積層方法を表す(A:水平に積層, B:地盤面に沿って積層)。

斜面は正面から見た勾配が5%、奥行き方向には同一断面が続いているものとした(図-1(b), (d))。曲面は正面から見て半径635mmの円弧2つを端点で接続した波状になっており、奥行き方向には同一断面が続いているものとした(図-1(c), (e))。曲面地盤中の最大勾配は水平方向中央部で26%である。斜面と曲面は木材で作製した。

ケース水-Aは、水平面上に水平な積層パスで積層していく従来通りの積層方法である。

ケース斜-A, ケース曲-Aでは、水平な積層パスが地盤面に当接する位置で折り返すようにして、積層パスを出力した。図-2(a)はケース曲-Aのプリント時に地盤面直前で折り返している様子である。

ケース斜-B, ケース曲-Bでは、地盤面を鉛直方向に

\*1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 博(工) (正会員)

\*2 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室 博(工) (正会員)

\*3 大成建設(株) 土木本部土木技術部 トンネル技術室

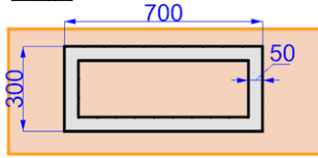
単位 [mm]

■ プリントモデル

■ 地盤面

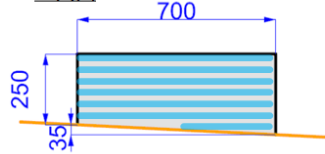
● 積層方法のイメージ

上面図



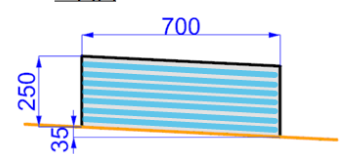
上面図  
(全ケース共通)

正面図



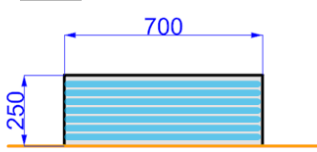
(b) ケース 斜-A 正面図  
(斜面上で水平に積層)

正面図



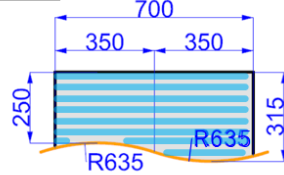
(d) ケース 斜-B 正面図  
(斜面上で地盤面に沿って積層)

正面図



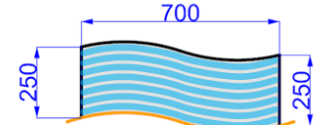
(a) ケース 水-A 正面図  
(水平面上で水平に積層)

正面図



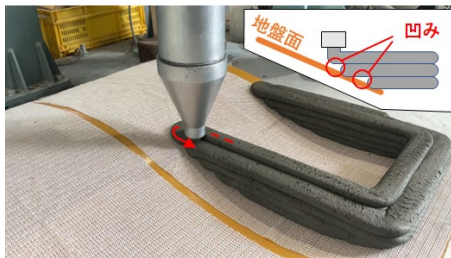
(c) ケース 曲-A 正面図  
(曲面上で水平に積層)

正面図



(e) ケース 曲-B 正面図  
(曲面上で地盤面に沿って積層)

図-1 実験ケース一覧



(a) ケース 曲-A の様子



(b) ケース 曲-B の様子

図-2 プリント実験の様子

10 mm ずつ平行移動した曲面上に積層パスを出力することにより地盤面に沿った積層パスを形成した。図-2(b)はケース 曲-B のプリント時に地盤面に沿ってノズルが動く様子である。

また、プリント実施時にはデジタルカメラにより図-1(a)～(e)に示した正面図の画角でプリントの様子を1層積層するごとに撮影し、2.3節に示す画像解析に使用した。

## 2.2 使用材料と練混ぜ方法

3D プリント材料としてモルタル系材料を使用した。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。水粉体比を質量比で 0.28、砂粉体比を質量比で 0.75 とした配合である。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、練混ぜ時間は材料投入後から 10 分間とした。

プリント材料の流動性は、地盤工学会基準 JGS1411-2012 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 0.4 kPa～1.0 kPa の範囲内にあることを確認しながらプリントを行った。上記の範囲は過去の検討において、安定的に積層可能なことを確認している範囲である<sup>5)</sup>。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。

## 2.3 プリント直後の変形の評価方法

### (1) 造形物の巨視的な変形状の評価

図-3 に巨視的な変形分析の概要を示す。全 5 ケースを対象に、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。分析には、画

像解析ソフトのPIV機能を用いた。今回の分析では特に以下の点に着目した。

水平に積層したケース斜-Aとケース曲-Aの場合は、下層の3DPモルタルと地盤面の間に図-2(a)内に図示したような凹みが発生する。これに起因して凹みの上の層が局所的に沈下しないかに着目した。地盤面に沿って積層したケース斜-Bとケース曲-Bの場合は、積層方向が水平ではないため、層間で滑るような挙動が見られないかに着目した。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作成するために、白色スプレーを造形物にまだら状に散布した。15層目時点の画像と25層目プリント終了時点での画像をPIV分析することにより、1層目～15層目が15層～25層目の上載によりどのように変形するかを評価した。

### (2) 各層の経時的な変形性状の評価

3章で詳説するが、2.3(1)の測定の結果、地盤面種類や積層方法が異なっても、主要な変形は層厚の変化と水平方向への変形であることが示唆された。そこで対象ケースをケース水-Aに絞り、特定のN層目に着目してN+1層目～25層目まで、上載層数が増えるごとに層厚と水平方向への変形の経時的な変化を確認した。ここではN=5, 10, 15, 20(層目)とした。

層厚の測定箇所は、対象とする層の水平方向中央部、水平方向の変形測定箇所は対象とする層の右端位置とした。変位の測定は画像解析ソフトにより、1pixel (= 0.2 mm 相当) 単位で行った。

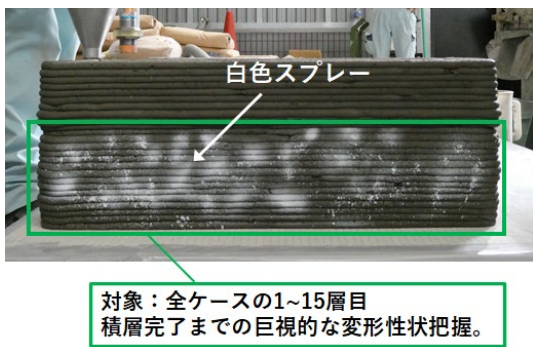
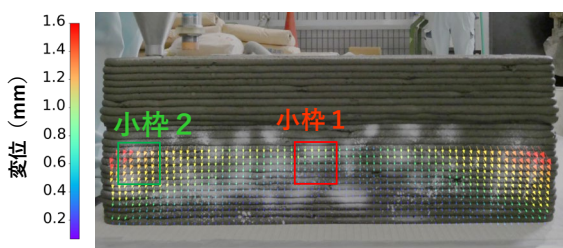
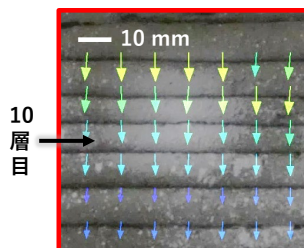


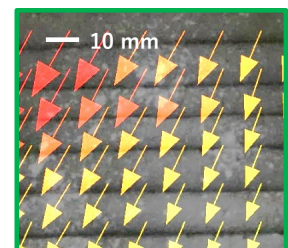
図-3 巨視的な変形分析の概要



(a1) ケース水-A 全体図



(a2) 小枠1拡大図



(a3) 小枠2拡大図

図-4 PIVによる巨視的な変形分析の結果

## 3. 結果と考察

### 3.1 造形物の巨視的な変形性状

図-4にPIVによる変形分析の結果を示す。図-4の(a1)～(e1)は5ケースの分析結果の全体図である。これらの図中の小枠1～10の拡大図を(a2)～(e2)および(a3)～(e3)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、各位置の変形量の相対的關係は維持している。

白色スプレーを塗布した1層目から15層目までをPIVの分析範囲としたが、1層目付近や15層目付近、左右の端部などスプレー塗布領域の境界付近はPIVの原理上、変位ベクトルを抽出できないためベクトルが表示されていない。

まず、水平面上で水平に積層したケース水-Aに着目する。図-4(a1), (a2), (a3)のカラーマップから、15層目プリント終了時点から25層目プリント終了時点までの変位の分布をみると以下の変形の傾向がみられた。

- ・傾向-1 : 鉛直変位は、上の層ほど大きかった(図-4(a2), (a3))。
- ・傾向-2 : 水平変位は、左右端部付近ほど外向きの変位が大きかった(図-4(a3))。
- ・傾向-3 : 水平変位も、上の層ほど大きかった(図-4(a3))。

傾向-1と傾向-3の要因は15層目プリント以前の下層の変形状況など各層の経時的変形特性を考慮する必要があるため、3.2節で詳細に整理する。

傾向-2については、図-5のように積層体を上面から見ると要因が把握できる。鉛直方向に積層していくと、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る。

次に斜面上で水平に積層したケース斜-Aおよび曲面上で水平に積層したケース曲-Aに着目する。まず、2.3(1)で懸念点として挙げた、下層の3DPモルタルと地盤面の間の凹みに起因した変形を確認する。

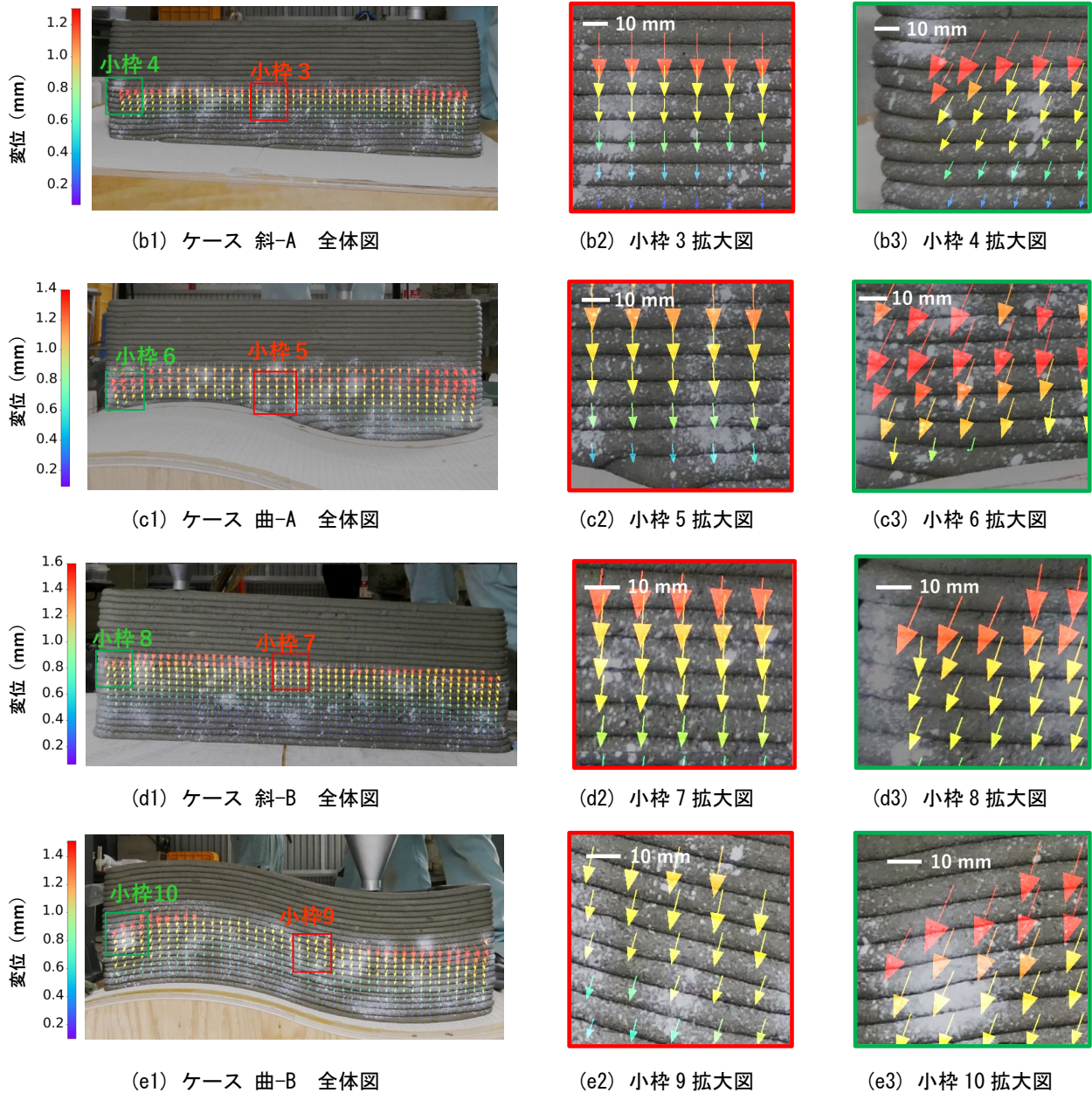


図-4（続き） PIVによる巨視的な変形分析の結果

小枠 3 (図-4(b2)) および小枠 5 (図-4(c2)) は、凹みの真上の位置に当たるが、小枠 3 や小枠 5 内の凹みに起因した局所的な変形や歪みは見られなかった。小枠 5 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、上層のモルタルの層上面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。また、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) はケース 水-A と同様であった。

次に、斜面上で地盤面に沿って積層したケース 斜-B

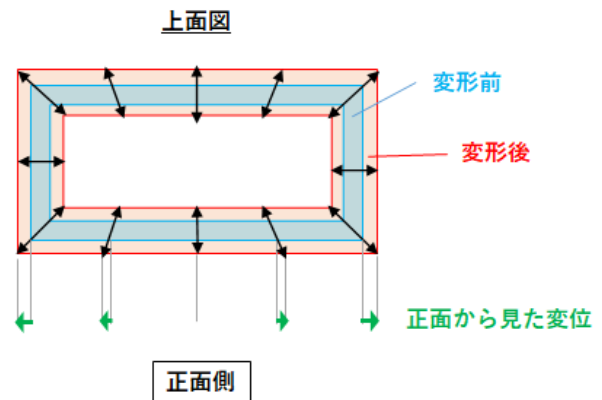


図-5 ケース 水-A の上面から見た変形のイメージ

および曲面上で地盤面に沿って積層したケース 曲-B に着目する。この2ケースで特徴的であったのが、水平方向中央部での変位方向である。前述の積層方法Aの3ケースでは水平方向中央部での変位方向は鉛直であったが、小枠 7 (図-4(d2)) および小枠 9 (図-4(e2)) では変形方向が鉛直方向から左に傾いていた。鉛直方向からの勾配は小枠 7 で 4.8%、小枠 9 では 24.3%だった。ケース 斜-B の層の勾配は 5%であり、ケース 曲-B の小枠 9 内の層の勾配は 26%である。つまり、水平方向中央部の変形は層方向に直交するように現れていた。この要因は、上の層の上載荷重は鉛直方向に働くものの、層平行方向の変形は層間の付着により拘束され、拘束のない層直角方向にのみ変形したものと考えられる。また、この結果から分かるように、2.3(1)で懸念点として挙げた、層間で滑るような挙動は見られなかった。

図-4(d2)、図-4(e2)より明らかであるが、層直角方向の変位は上の層ほど大きい。積層方向が水平である場合には層直角方向=鉛直方向であることを考慮すると上記の傾向は傾向-1と本質的に等しい。

また、小枠 8 (図-4(d3)) および小枠 10 (図-4(e3)) より、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) はケース 水-A と同様であった。

いずれのケースでも変形の要素はケース 水-A と同様であり、層直角方向に押しつぶされるような変形 (層厚の変化) と、非拘束方向への水平変形が主要な変形であることが示された。これらの変形の経時的傾向について 3.2 節で分析し、傾向-1 と傾向-3 の要因を整理する。

また、本節の結果より、不陸面に積層する2種類の積層方法ではいずれも局所的な沈下や層間の滑り等の積層安定性を損なうような変形は見られなかった。積層方法の種類は、積層体の力学的異方性を活かし、供用時の応力方向を考慮して使い分けことが有用と考えている。

### 3.2 各層の経時的な変形状

水平面上で水平に積層したケース 水-A を対象にして、層厚の変化と水平変位の経時的特性について考察する。

図-7には、N層目 (N=5, 10, 15, 20 とした) に上載された層数ごとに層厚および右端の水平変位を整理した。

まず、図-7(a)で N層目の層厚の変化に着目すると、

5層目、10層目、15層目、20層目のいずれにおいても、層厚の変化は上載層数が 3~5 層の段階で収束する傾向にあった。ただし、後述するように、水平変位については上載層数 3~5 層以降も鈍化しつつも継続していたことから、層厚の変化も上載層数 3~5 層以降、本分析で評価可能な 0.2 mm 以下の範囲で継続していた可能性がある。実際に、例えば図-4(a2)でケース 水-A の10層目に着目すると15層目積層時から25層目積層終了時ま

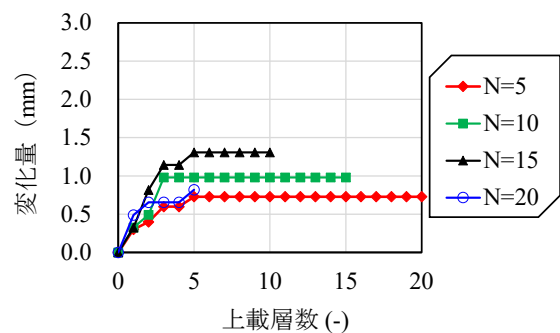
では 0.8 mm 程度の沈下が見られる。10層目の沈下量は10層目以下の層厚変化の和であるから、10層目やそれ以下の層の層厚も非常に緩やかに変化していたものの、その変位が分解能 (0.2mm) 以下にとどまっていたと考えられる。

層厚の変化がある段階で頭打ちになる理由としては、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、さらに、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ためと考えられる。

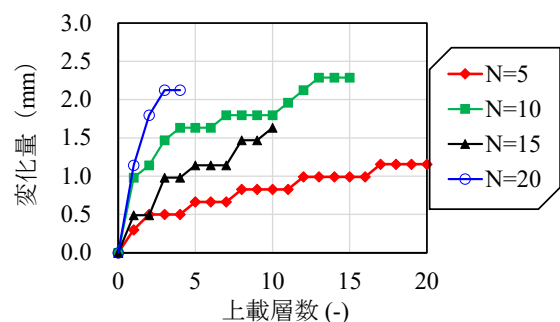
以上の結果から、傾向-1が説明でき、15層目プリント終了時点からの変位に着目すると、先に積層した層は上載層数 3~5 層以降では変形が概ね収束しており、あとから積層した層、すなわち上の層ほど変位が集中し大きくなる。なお、ケース 水-A のプリントでは1層の積層時間が1.5分であったため、3~5層は4.5分~7.5分に相当する。積層して8分以上たった層では沈下が収束するか非常に緩やかになるという結果であった。

一方で最終的な層厚の変化量は積層順とは明確な関係が見られず、0.7~1.3 mm であった。最終的な層厚の変化は、射出時の材料のフレッシュ性状にも依存するため、積層順だけでは整理できなかったものと考えられる。

次に、図-7(b)で N層目の水平変位に着目すると、5層目、10層目、15層目、20層目のいずれにおいても、上載層数が 3~5 層目付近で、水平変位が鈍化する傾向



(a) N層目の層厚の変化



(b) N層目右端の水平変位

図-6 N層目の変形の経時変化

が見られた。これは図-7(a)で層厚の変化が頭打ちになったタイミングと同様であることから、材料のこわばり発現によるものと考えられる。しかしその後、水平変位については明確に変形が収束するポイントは見られなかった。例えば5層目については上載層数が17層、積層時間にして26分経過時点でも水平変位が見られた。なお、上載層数3~5層目以降で変位が階段状に増加しているのは、変位の分解能(0.2mm)に対し発生変位が小さく、実際には連続的に生じている変位を段階的に捉えたためと考えられる。

水平方向の変形が収束しなかった理由は、外周方向には変形に対する拘束がないため、変形が鈍化した後も、上載荷重に応じて変形が継続するためである。

また、水平方向への変形速度(グラフの傾き)は、層厚の変化とは異なり積層順に依存した関係が見られ、15層目を除き、上の層ほど大きい傾向にあった。また、最終的な変形量は最大で2.3mmであった。15層目は、白色スプレー塗布のため積層を一時中断し、再開した際に射出量制御が安定せず16層目が上に覆いかぶさるように垂れた。その影響で水平方向の変位が拘束されたものと考えられる。この層を除いて上の層ほど水平方向への変形速度が大きかったのは、最下層では変位が拘束されて水平変位が小さくなるが、拘束の影響は地盤面から離れるほど小さくなるためと考えられる。また、過去に高さ1000mm以上の矩形ブロックを3Dプリントした際には、上部に向かって断面が広がるような傾向は見られなかったことから、地盤面からの水平変形の拘束の影響は、地盤面から一定程度離れると消失すると考えられるが、これについては今後の検証項目とする。

以上より傾向-3が説明できる。15層目プリント終了時点からの変位に着目すると、材料のこわばりにより下層は変形速度が鈍化しており、かつ地盤面からの拘束があり下層は水平変形が抑制されたため、上の層ほど水平変位が大きくなったものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、不陸面上で3Dプリントした場合の積層安定性を確認することを目的とし、2種類の積層方法で不陸面上に3Dプリントをし、プリント直後の変形性状を確認した。これにより以下の結果が得られた。

- 1) 不陸面上で水平に積層した場合には、地盤面と下層の3DPモルタルの間に凹みが生じるが、この影響で上層の積層安定性が損なわれることはなかった。
- 2) 不陸面上で地盤面に沿って積層した場合には、層方向に沿ってすべりが生じることはなかった。

いずれの地盤面種類と積層方法でも安定的に積層可能なことを確認した。巨視的な変形の現れ方は水平面で

水平に積層した場合と同様であり、以下のような変形の特徴が見られた。

- 3) 層直角方向の変位は上の層ほど大きい(傾向-1)
- 4) 水平変位は水平方向の端部付近ほど外向きの変位が大きくなる(傾向-2)
- 5) 水平変位も上の方ほど大きい(傾向-3)

これらの巨視的な変形性状の要因は、層厚の変化と、非拘束方向への水平変形の2つであると考えられた。そこで、3)~5)の巨視的な変形の機構を説明するために、上記2つの変形要素について経時的に整理した。この検討から以下の結果が得られた。

6) 層厚の変化については上載層数が3~5層の時点で頭打ちとなる。

7) 水平変形については上載層数の増加に伴い徐々に鈍化するが、明確には収束せず、水平変形は地盤面からの拘束の影響も受け、上の層ほど変形速度が速かった。

なお、プリント直後の層の変形は材料性状やプリント速度等にも影響を受けるため、今回の分析結果は一例であるが、3Dプリントで高品質な出来形を担保するにはプリント直後の変形も考慮に入れた運用が必須となる。変形の現れ方を定量的に把握しておくことで、変形量を考慮した設計モデル寸法の決定や、プリント途中での出来形予測・フィードバック等、プリント品質の向上に役立てることができる。

#### 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.32-54,2022.5
- 2) Li, Zhanzhao et al.:Fresh and hardened properties of extrusion-based 3D-printed cementitious materials: A review, Sustainability (Switzerland), Vol. 12, No. 14, pp. 1-33, 2020.7
- 3) 小倉大季,阿部寛之,菊地竜:3Dプリンティングに用いるセメント系材料の積層性評価手法に関する検討,令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, V-102, 2020.9
- 4) Wolfs, R. J. M., & Suiker, A. S. J.:Structural failure during extrusion-based 3D printing processes, International Journal of Advanced Manufact, Vol. 104, pp. 565-584, 2019.6
- 5) 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