## ◇論 文◇

# 材料押出方式3Dプリンターの異なるノズル経路が 積層モルタルのひび割れ形成と変形分布に与える影響

## Influences of Different Nozzle Paths in a Material Extrusion 3D Printer on Crack Formation and Deformation Distribution of Layered Mortar

黑野承太郎\*, 大森寬人\*, 橋本勝文\*\*, 中瀬皓太\*\*, 岸良 竜\*, 河野克哉\*\*\*, 杉山隆文\*\*

KURONO, Jotaro\*; OMORI, Hiroto\*; HASHIMOTO, Katsufumi\*\*; NAKASE, Kota\*\*; KISHIRA, Ryo\*; KONO, Katsuya\*\*\*; SUGIYAMA, Takafumi\*\*

## 要 旨

3Dコンクリートプリンティング(3DCP)は、コンクリート構造物建設において応用が進んで おり、革新的な技術になっている.この方法は、従来の施工法とは大きく異なっており、型枠 を用いずに所定の形状を有するセメント系材料を押出積層することで造形する.3DCPは、プリ ント構造の応力分布に応じてノズル経路や建設プロセスを定めることで、コンクリート構造と しての材料特性や力学性能を適切に与えることができるようになり、将来有望な技術になるも のと期待される.しかしながら、3Dプリンターからの材料押出パターンが適切に設計されて建 設された構造であっても、押出されたフィラメントが積層されたシステム間には材料界面/境 界やそれら分布の形成が避けられない.材料の界面や境界の存在は、外部応力の作用下でひび 割れを形成することになり、破壊プロセスに影響する.

本研究では、材料押出ノズル経路のパターンを変化させた角柱試験体を設計し、そこからコ ア抜きした円柱試験体を用いて圧縮応力にともなう内部ひび割れの伝播をX線CT法にて評価し た.さらに、3Dスキャンを用いることで、ノズル経路が異なるプリント材料の破壊挙動による 3次元変形を計測した.

キーワード: 3Dコンクリートプリンティング(3DCP), X線CT, ひび割れ, 変形, ノズル経路

<sup>\*</sup>中央研究所 研究開発推進部 高機能コンクリートチーム

Multi-Function Concrete Team, Central Research Laboratory \*\*北海道大学 Hokkaido University

<sup>\*\*\*</sup> ギソンセメント Nghi Son Cement Corporation

### ABSTRACT

Three-dimensional concrete printing (3DCP) is an innovative technology that has been showing remarkable development and many potential applications in concrete construction. Different from conventional construction methods, the 3DCP forms a layered structure made of cement-based material in a designated shape, without requiring any formwork. The 3DCP is seen as a very promising technology, being capable of providing required material characteristics and mechanical performance of concrete structures by properly programming the nozzle path and the building process according to the stress distribution in the structure to be formed.

However, 3D printed structures, even made with properly designed material extrusion patterns, inevitably have material interfaces and boundaries between the extruded filaments and distributed throughout the layered system. The presence of material interfaces and boundaries leads to formation of cracks under external stresses, which affects the fracture process of the structure.

In this study, prism specimens were prepared with the material extrusion nozzle path designed in several different patterns, core samples were taken from the specimens, and propagation of internal cracks occurring in response to compressive stress was evaluated by X-ray computed tomography. In addition, a 3D surface scanning system was used to measure three-dimensional deformation caused by fracture behavior of the specimens formed by different nozzle paths.

## *Keywords* : 3D concrete printing, X-ray computed tomography, Crack, Deformation, Nozzle path

## 1. はじめに

近年,さまざまな分野において発展と実用化が著 しい付加製造技術(AM:Additive Manufacturing) が建設分野においても大きな注目を集めている<sup>1)</sup>. AMは3Dプリンティング技術(以下,3DP)とも呼ばれ, 建設プロセスの自動化に資する技術としてさまざま な研究開発が行われている<sup>2)</sup>.3DPにはいくつかの方 式が存在するが,現在,建設分野で主流となってい るのは,3D CADデータを基に制御されたノズルから 一定の形状保持性を有した材料を吐出し,一層ずつ 積み重ねて物体を造形する材料押出方式である.

3DPによる積層体は、材料組成および積層装置性 能に加えて、積層プロセスに起因して形成される境 界層の存在により、物性に異方性が生じることが知 られている<sup>3)</sup>.この積層界面は、積層体表面から目視 で確認できる部分のみに形成されるものではなく、 積層体内部にも形成されていると考えられる.物体 の内部構造を非破壊で可視化できる方法としてX線 CT法が知られているが、HojaeらはX線CT法によっ て層間の空隙率と引張強度の関係を明らかにしてい る<sup>4)</sup>.また,著者らは積層体に対して圧縮載荷を行っ た際に,従来の型枠への流し込み施工による供試体 (以下,流込み供試体)には確認されない特殊な内

部のひび割れ進展挙動をX線 CT 法によって確認している $5^{5}$ .

ここで,3DPでは,設計データを造形する際に,三 次元空間内に材料を吐出・積層するため,積層方向 ならびに積層パターンが変化する.しかしながら, 積層方向の違いが破壊進展挙動に及ぼす影響を考慮 した研究事例はない.本研究では,積層方向ならび に積層パターンを変化させることで形成される積層 界面の違いが,圧縮載荷されるときの内部破壊進展 挙動に及ぼす影響を X線 CT 法によって観察した.加 えて,破壊前後の積層体表面の3Dスキャンによる三 次元での変形評価により,積層パターンの違いが変 形挙動に及ぼす影響を明らかとすることを目的とした.

## 2. 実験方法

#### 2.1 積層体の作製

造形材料には,結合材(以下B)に早強ポルトラン ドセメント(以下C,密度:3.15g/cm<sup>3</sup>),石灰石微粉 末(以下LSP,密度:2.71g/cm<sup>3</sup>)を,細骨材に珪砂 (以下S,密度:2.58g/cm<sup>3</sup>, F.M.:1.73)を,混和 剤に高性能減水剤(以下SP)を用いた.

モルタルの配合を、**Table 1**に示す.水結合材比 (以下W/B)は27%とした.高性能減水剤は練混ぜ水 に対して内割置換とした.材料の練上がり後の空気 量は2.1%であり、JIS R5201にしたがって得られた モルタルフロー値は168mm(15回落下振動後)であっ た.なお、積層体と同材料を用いて型枠への流し込 みによって作製した $\phi$ 50×100mmの円柱供試体の材 齢28日の圧縮強度は、67.4MPaであった.

Table 1 Mix proportion of mortar (モルタルの配合)

	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
vv/в (%)	W	В		¢	SP
		С	LSP	5	
27	365	913	456	456	Bx0.2%

上記モルタルを使用し, Fig.1に示す材料押出方式 3DP装置により寸法 幅100×高さ100×長さ400mmの 積層体を作製した.なお、本装置は、水平方向に移 動するノズルから材料を鉛直に吐出することで積層 体の層を,層を鉛直方向に積み重なることで積層体 の列を、それぞれ組み合わせることで積層体を作製 する.本研究では、層と層の間を層間、列と列の間 を列間と定義する. ただし, 積層体内部に形成され る層間および列間の空気層は特別に区別する必要の ない限り,層間の空気層と呼称する.3DP装置はノズ ル直径を14mm, ノズル射出幅を16.8mm, ノズル移動 速度を30mm/s, 一層当たりの高さを8mm, 積層完了 時の層数を12層とした.本論文で検討する積層経路 をFig.2に示す.積層経路は、一方向のみに積層する パターンI, 奇数層目は長辺方向, 偶数層目は短辺方 向に直交する二方向に層毎に交互に積層するパター ンⅡの2種類とした.積層後,材齢7日まで気中養 生(20℃, 60%RH)を行った後,作製した積層体から



Fig. 1 Material extrusion 3D printer (材料押出方式 3D プリンタ)

高さ方向にコア採取を行い、φ50×100mmの円柱供 試体を作製した.なお、積層経路制御ソフトの仕様 上、積層体各層の最外殻は円周状に描いたが、円柱 供試体には最外殻が含まれないように**Fig.2**に点線 で示す箇所でコア採取を行った.



(I) One direction



(I) Two orthogonal direction

## Fig. 2 The two patterns of the nozzle paths (積層経路)

#### 2.2 一次共鳴振動による積層体の品質評価

流込み供試体および積層体のコア抜きによって作 製した円柱供試体に対して,JIS A1127に基づき共 鳴振動法によって一次振動共鳴振動数を計測した. 従来,一次振動共鳴振動数計測は凍結融解作用およ び化学的作用によるコンクリートの劣化を,動弾性 係数等の物性値により評価する試験である.積層体 の内部に空気層が存在すると,波はこの空気層を迂 回して伝搬するため,積層体内部の粗密分布を知る ことができる.本研究では,流込み供試体と積層方 向が異なる積層体において,動弾性係数の違いを測 定するために用いた.測定は円柱状供試体の高さ方 向および直径方向で測定を行った.直径方向は,一 次共鳴振動数が最大値および最小値をとる二方向の 測定値を得た.

#### 2.3 圧縮試験によるひび割れ導入

コア採取によって作製した円柱供試体の材齢14 週で圧縮載荷を行った.載荷時には,供試体上下面 の列間の凹凸を考慮して石膏によるキャッピングし た.予察試験において,供試体表面に微細なひび割 れが発生した後に,終局時には積層体に載荷方向に 対して水平方向の列間における割裂ひび割れが卓越 して破壊することがわかった.本研究では,内部ひ び割れの進展をX線CT法により評価することを目的 としている.そのため,載荷速度を5.0MPa/minに制 御して,上述のような終局破壊に到達する以前に目 視で供試体表面に微細なひび割れを観察した時点で 載荷を中断した.このとき,載荷試験装置から出力 される荷重および変位を記録した.

#### 2.4 X線CT法

流込み供試体と積層体の内部構造および内部ひび 割れ進展挙動の観察のためにX線CT法を行った.撮 影条件を**Table 2**に示す. X線CT法では, X線源から 照射されたX線の物体透過前後のX線減衰比を検出 する.撮影中に物体を360°回転させることにより 全方位からの透過を行い、その後コンピュータによ る再構成処理によって断面の連続画像を取得する. 物体のX線吸収率は密度に依存するため、取得画像 は密度の分布画像とみなすことができる.すなわち, 取得画像上で輝度値の小さい(暗い)部分は低密度 の領域であり、本研究では空隙、ひび割れ、層間の 空気部分が該当する.輝度値の大きい(明るい)部 分は高密度領域であり、本研究ではセメントペース ト部や骨材が該当する.撮影時には、0.2mm厚のCu フィルタを用いることで,低エネルギーのX線を除去 し、リングアーチファクトの発生を低減した.

Table 2 X-ray CT method imaging conditions (X線 CT 法による撮影条件)

Tube voltage (kV)	100
Tube current (µA)	200
Image resolution (µm/pixel)	24.86
Image size (pixel×pixel)	2864×2864

#### 2.5 3Dスキャンによる変形評価

積層経路が変形に及ぼす影響を三次元的に評価す るため, 圧縮載荷前後において 3Dスキャンを行った. 従来のひずみゲージによる変形評価は、特定の点に おける変形を評価するものである.しかしながら, 特定の点ではなく、対象物表面の変形を空間分布と して取得したい場合や破壊の起点が事前に予測でき ない場合には 3Dスキャンによる変形評価が有効と なる<sup>6)</sup>. 3Dスキャンは一般的な製造業においても, 製 品の構造を分析し、逆算的に構造や製造方法を調査 するリバースエンジニアリングの手法の一つとして 用いられている. 3Dコンクリートプリンティングに おいては、3D CAD図面どおりに構造物が造形されて いるかどうかを検査する出来形検査に用いられた例 がある<sup>7)</sup>. このように, 3Dスキャンは 3Dプリンティ ング技術と併用されることが多く、本研究ではX線 CT法による内部構造の評価とあわせた積層体表面 の変形分布の評価に用いた.

3Dスキャンの様子をFig.3に示す. 使用した 3Dス キャナは白色光 LED を光源とする非接触式の光投影 方式である.スキャナに搭載された光源からパター ン光を照射し、物体表面の凹凸で反射したパターン をカメラで撮影することで物体表面の三次元座標デ ータを取得する.測定中に物体を回転させることで 物体表面の三次元座標を取得することができる.一 度のスキャンでは供試体を全方位からスキャンでき ないため、供試体の設置方向を変えて複数回のスキ ャンを行った.スキャン後、ソフトウェア上で取得 した点群データを結合し、ポリゴンデータに変換す ることで解析を行った.載荷前後でスキャンを行っ た二つの3Dスキャンデータに対し、載荷前のポリゴ ンデータの各頂点から載荷後のポリゴンデータの各 頂点までの最短距離を算出し、載荷による変形量δ と定義した.



Fig. 3 The 3D scanning process (3D スキャン測定の様子)

#### 21

### 3. 実験結果

以下に示す積層体の破壊挙動に関する評価結果に おいて、パターンIとⅡで見かけの密度の差は小さ く、空隙率はパターンIに対しパターンⅡでは3%程 度小さいことを確認している.本研究で示す結果は、 積層経路に依存した層間の空気層の量と配置の影響 を受けたものと考えられる.

#### 3.1 相対動弾性係数を用いた積層体の品質評価

コンクリートが繰り返し凍結融解作用を受けると き、コンクリートが膨張し内部劣化が進行すること で、動弾性係数が低下する.JISA1148にはコンクリ ートの凍結融解作用による内部の劣化状況を表わす 指標として,式(1)に示す相対動弾性係数が用いられ る.

#### $P_n = f_n^2 / f_0^2 \times 100 \tag{1}$

 $P_n$ は凍結融解nサイクル後の相対動弾性係数(%), f\_nは凍結融解nサイクル後の一次共鳴振動数(Hz), fbは凍結融解0サイクルの一次共鳴振動数(Hz)で ある.本研究では、流込み供試体に対する積層体内 部の積層界面における空気層の評価に用いるため、  $P_n$ をパターンnの相対動弾性係数(%),f\_nをパター ンnの一次共鳴振動数(Hz),f\_nを流込み供試体の一 次共鳴振動数(Hz)とする.**Fig.4**にパターンIおよ びIIにおける相対動弾性係数を示す.供試体高さ方 向では、パターンIおよびIIともに流し込み供試体 に対して約80%であり、積層経路による違いはみら





れない.パターンIによる積層は一方向であるため, 相対動弾性係数の最大値を得た直径方向(max)の方 向が積層方向に水平に近い方向であったと考えられ る.パターンIIでは,直交する二方向に積層してお り,どちらの直径方向においてもパターンIより低 い相対動弾性係数を示しており,最大値と最小値の 差が大きい.これは,積層経路の違いによって,内 部に形成される層間の空気層が大きく,複雑化する ためである.

#### 3.2 荷重-変位曲線

Fig.5に供試体表面へのひび割れ発生時点までに 得られた荷重・変位曲線を示す.パターンIのひび割 れ発生荷重は流込み供試体と同程度の荷重を有して いることがわかる.パターンⅡの供試体では,パタ ーンIと同程度の傾きを確認できるが,ひび割れ発生 荷重は流込み供試体の約70%となっており,積層経路 の違いによってひび割れ発生荷重に差異が生じてい る.また,載荷直後の荷重・変位関係について,流込 み供試体と積層体を比較すると,後者の方が変位の 増加に伴う荷重の増加は緩やかであることが確認で き,積層体特有の層構造に起因する応力伝達機構を 示していると考えられる.



#### 3.3 X線CT画像による内部構造評価

**Fig.6**に流込み供試体および積層体(パターンIおよびII)の載荷後のX線CT画像を示す.図中の白線は各断面画像の位置を示している.

#### (1) 内部空隙形状の観察

Fig. 6 a)および b)に示す流込み供試体内部の空隙形状が円形(球形)に近い形状であるのに対し,

Fig.6 c), d), e)および f)に示す積層体内部の空隙 形状は,多角形のような丸みを持たない形状をして いる.これは,材料吐出方向とノズル移動方向が垂 直になる過程でノズルから材料が吐出されるときに 受ける圧力で,空隙形状が変化したものと考えられ る.

#### (2) 内部ひび割れ進展挙動の観察

**Fig.6 a)**および **b)**の流込み供試体では,ひび割れが供試体内部をランダムに進展していることが確認できる.加えて,縦断面画像が示すように,ひび割れは供試体上面から下面に向かって一直線に進展している.

Fig.6 c)および d)のパターン I による積層体で





a) Casting specimen (Transverse section)



c) Pattern (I) (Transverse section)



e) Pattern ( II ) (Transverse section)





d) Pattern (I) (Longitudinal section)



f) Pattern (II) (Longitudinal section)

Fig. 6 X-ray CT Images (X線 CT 画像) は、図中に示すように、その近傍に存在する層間の 空気層を起点としてひび割れが進展している様子が 確認できる.

**Fig.6 e)**および f)の積層パターンIIによる積層体では、横断面および縦断面画像に示すように、形成される層間の空気層がパターンIと比較して、より複雑に形成されている.また、**Fig.6 f)**に白点線で図示しているように、紙面垂直方向の積層による層が傾斜していることが縦断面画像から確認できる.そのため、当該層においては、隣接する列との界面ではなく、フィラメント内部をひび割れが進展している.パターンIでもみられたように、必ずしも界面がひび割れ進展の経路になるわけではない.

Fig.5 より, パターン I および II の荷重-変位曲 線において、同等の剛性を示しながらパターンⅡで はパターン I に比較してひび割れ発生荷重が約30% 低下している. また, パターン I と比較してパター ンⅡでは、多数の層間の空気層からひび割れが進展 している.パターンIおよびⅡのX線CT画像におい て、空気部分を抽出し、体積の小さな気泡部分を除 去することで, 層間の空気層のみを三次元表示した 画像をFig.7 に示す. これより, パターン I に形成 される層間の空気層が一方向であるのに対し、パタ ーンⅡによる積層体内部の層間の空気層は格子状に 形成されている. そのため, パターンⅡでは, 上下 の層との接着面積が小さくなり、圧縮力に対して一 つ一つの層が抵抗力を発揮していたと考えられる. その結果, Fig. 6 e)およびf)に示すパターンⅡの断 面画像のように、微細なひび割れが多数発生したこ とが理解できる.

#### 3.4 3Dスキャンによる変形評価

**Fig.8**に載荷後の3Dスキャンデータおよび供試体 の様子を示す.スキャンデータは載荷前のポリゴン データからの最短距離をコンター図で示している. 載荷前に対して,膨張を正として膨張側を白に,収 縮側を黒としている.パターンIと比較してパター ンⅡでは,**Fig.6**e)およびf)で確認された多数の微 細ひび割れにより,供試体全長において大きな変形 が生じている.

計算された載荷前後のポリゴンデータの最短距離  $\delta$ を用いて、X線CT法により得られた断面画像と あわせて積層経路の違いによる変形分布の特性の評 価を行う. Fig.9 にパターン I およびIIにおける供 試体底面から5,25,45 および 65mm における断面 画像に載荷前後における変形量を可視化した図を示 す. 断面画像上に示す白色点線は,載荷前の供試体 表面座標(z=5,25,45,65mmにおける x-y 座標) である. また,図中の白色実線は,載荷による変形 を強調して表わすため,式(2)により算出した載荷に よる変形量を表す.

$$(x_{plot}, y_{plot}) = (x, y) + \delta/\delta_{max} \cdot (x, y)$$
(2)

δは載荷前後の各頂点までの最短距離,δmaxは供 試体全周におけるδの最大値である.

パターン I では、供試体底面より 5 mmの位置において大きな変形がみられ、供試体上部に向かうにつ





Pattern (II)

Pattern (I)

Fig. 7 Visualization of the voids formed between the layers (層間の空気層の可視化)

れて、変形量は小さくなっている.加えて、底面よ り25mmの断面画像上で確認できるように、画像水平 方向に積層されていることが確認できる.変形の方 向は積層方向に直交する方向、すなわち、隣接する 積層列が離れようとする方向に大きく膨張変形して いる.これより、空気層の端部がき裂の起点となっ て、ひび割れが進展していることがわかる.

パターンⅡでは,底面より25および45mmの位置に おいて大きく変形が生じており,65mmでは比較的小 さい.また,全断面においてFig.6 e)に示す層間の 空気層に起因するひび割れが確認でき,このひび割 れが破壊に大きな影響を及ぼしている.すなわち,



Fig. 8 Results of 3D scanning after loading (載荷後の 3D スキャン結果)



Pattern (I)



Pattern (II)

Fig. 9 The deformation of each cross-section (各断面における変形)

底面より25および45mmの断面画像下半分において, 大きく膨らむ軌跡にみられるように,大きなひび割 れ幅のひび割れが発生している.加えて,パターン Iでは,積層方向に直交する方向に膨張する様子が 確認できたのに対し,パターンIIでは,直交する二 方向に積層しているため,断面画像における垂直お よび水平方向に大きな違いはみられない.

## 4. まとめ

本論文で得られた知見を以下に示す.

- (1) 流込み供試体に荷重を載荷した場合と比較して, 積層体の場合は,層構造に起因して,荷重の増 加に伴い変位が緩やかに増加した.
- (2)一方向に積層した場合と比較して、直交する二 方向に交互に積層した場合では、複雑な層間の 空気層が形成され、多数の微細ひび割れが発生 し、相対動弾性係数が大きく低下した。
- (3) 一方向に積層した場合,層間の空気層から,隣 接する列が分裂するようにひび割れが進展し, 変形分布は異方性を示した.
- (4) 直交する二方向に積層した場合、変形分布に異 方性はみられなかったが、複雑に形成された層 間の空気層に起因する微細ひび割れによって、 供試体全体が大きく変形した。

## 参考文献

- 日本コンクリート工学会. 3Dプリンティングに よるコンクリート構造物構築に関する研究委員 会報告書. 2021.
- R.A. Buswell; W.R. Leal de Silva;
  S.Z. Jones et al. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research. 2018, 112, p. 37-49.
- T.T. Le; S.A. Austin; S. Lim et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. Cement and Concrete Research. 2012, 42(3), p. 558-566.
- 4) Hojae Lee; Jang-Ho Jay Kim; Jae-Heum Moon et al. Correlation between pore characteristics and tensile bond strength of additive manufactured mortar using X-ray computed tomography. Construction and

Building Materials. 2019, 226, p. 712-720.

- 5) 黒澤真一,河野克哉,大森寛人ほか.3Dプリンテ ィング積層したモルタルの圧縮下における内部 ひび割れ進展状況の観察.土木学会年次学術講 演会講演概要集.2022,77,V-571.
- 宮川義範,柴山 淳,金沢健司. 3Dスキャナによる試験体・構造物の変位分布計測. コンクリート工学. 2022,60(9), p. 796-802.
- 7) 山本伸也,小倉大季,阿部寛之ほか.建設用3Dプ リンティング技術の開発とその実用化.コンク リート工学. 2021,59(8), p. 655-660.