

論文 建設用 3D プリンタの積層経路が異なるモルタル積層体の圧縮破壊時におけるひび割れ進展挙動と変形分布の関係

中瀬 皓太*1・橋本 勝文*2・杉山 隆文*3・河野 克哉*4

要旨：3D プリンティング技術による構造物の構築においては、積層造形に起因する強度の異方性を考慮した積層経路の最適化が重要である。積層構造の特徴である層間の空気層の形成および破壊進展挙動には、材料積層時のプリンティング経路が影響を及ぼすと考えられる。本論文では、積層経路の違いが圧縮応力作用下の破壊挙動に及ぼす影響を評価した。特に、積層供試体に圧縮載荷によってひび割れが進展するとき、X 線 CT 法による内部構造および 3D スキャンによる変形分布の評価を行った。その結果、積層経路に依存する層間の空気層の形成に基づくひび割れ進展挙動と変形特性の関係を明らかにした。

キーワード：3D コンクリートプリンティング, X 線 CT 法, 3D スキャン, 積層経路, ひび割れ

1. はじめに

近年、様々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¹⁾。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様々な研究開発が行われている²⁾。従来のコンクリート施工では、単純形状の型枠内に均質に材料を充填して適切な締固めを行うものであった。しかしながら、3DP による施工では型枠を必要とせず、三次元空間内に材料を吐出および積層することで締固めを行わずに施工するものである。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って、積層体の物性に異方性が生じることが知られている³⁾。

上述の積層界面は、積層体表面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 X 線 CT 法を用いた画像解析によって、層間における空隙率と積層体の層間の付着力を表す引張強度の関係が明らかにされている⁴⁾。また、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が X 線 CT 法によって確認されている⁵⁾。

3DP では、設計データを造形する際に、三次元空間内に自由に材料を吐出・積層できるため、構造形態の決定における位相（トポロジー）最適化手法の活用と親和性が高い⁶⁾。トポロジー最適化は、制約条件下における目的性能を最大化する構造形態を導出する数理的手法である。これにより決定される構造を満足する積層経路を考

慮するとき、積層方向は一方向に限られるものではないと考えられる。すなわち、構造形態の最適化に加え、力学性能の異方性を考慮して構造物に生じる応力状態に応じた最適な積層経路を決定する必要がある。しかしながら、積層方向および積層経路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他に多く見られない。

3DP による積層体では層間の付着が問題視されており、引張強度試験を行った研究例が多いが、層間の空気層の形成やひび割れの進展がコンクリートの圧縮破壊特性に影響すると考えられる。そもそも、圧縮材料として利用されるコンクリートの 3DP 施工に伴う圧縮応力下の力学的挙動を把握しておくことは、今後の 3DP 積層部材および構造物の合理的な設計を可能とする上で重要である。

本論文では、積層経路を変化させ、形成される積層界面の違いが、圧縮応力下における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、積層経路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. 実験概要

2.1 積層体の作製

配合を表-1 に示す。積層体作製には、結合材（B）に早強ポルトランドセメント（C、密度：3.15g/cm³）を使用し、混和材として石灰石微粉末（LSP、密度：2.71g/cm³）を使用した。細骨材（S）として珪砂（密度：2.58g/cm³，F.M.：1.73）を使用し、混和剤には高性能減水剤を使用した。水結合材比（W/B）を 27%とし、高性能減水剤は練混ぜ水に対して内割置換とした。

*1 北海道大学大学院 工学院環境フィールド工学専攻（学生会員）

*2 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門准教授 博士（工学）（正会員）

*3 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門教授 Ph.D.（正会員）

*4 太平洋セメント（株） 中央研究所 リーダー 博士（工学）（正会員）

表-1 配合

W/B (%)	単位量 (kg/m³)				SP (B × %)
	W	B		S	
		C	LSP		
27	365	913	456	456	0.2

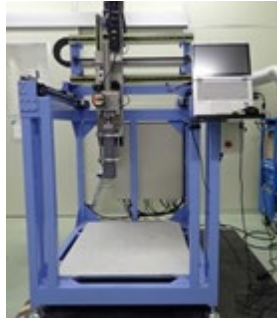
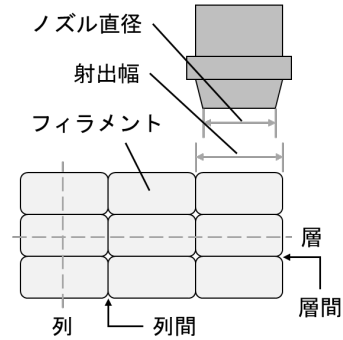


図-1 材料押出方式 3D プリント装置

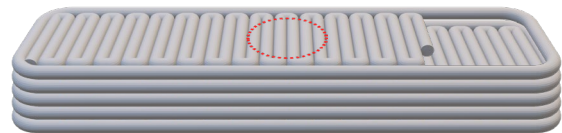
材料の練上がり後の空気量は 2.1%であり、JIS R5201 に従い得られたモルタルフロー値は、練上がり直後の 15 打フロー値が 168mm であった。なお、積層体と同材料を用いて型枠への流込みによって作製した $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体の材齢 28 日の圧縮強度は、67.4MPa であることを確認した。

図-1 に示す材料押出方式 3D プリント装置を用いて、寸法 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体を作製した。図-2 に本論文における積層体に関する用語を定義する。本来、「積層」とは「層を積み重ねること」であり、鉛直方向の積み重ねを表す。しかしながら、同一平面内の造形方向を変化させた例は少なく、平面内での材料吐出に関する用語の定義はされていない。本論文では、「積層」を広義に捉え、「材料吐出による造形」として、平面内での造形も「積層」と呼称する。また、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。3D プリント装置のノズル直径は 14mm、ノズル射出幅は 16.8mm であり、一層当たりの高さを 8mm、積層完了時の層数を 12 層、積層速度としてノズル移動速度を 30mm/s に設定した。本論文で検討する積層経路を図-3 に示す。図-3a) に示すパターン 1 では、外周を積層後、全ての層において短辺方向の積層により造形した。すなわち、パターン 1 では、全ての層において一方向に積層を行った。図-3b) に示すパターン 2 では、外周を積層後、奇数層目は長辺方向、偶数層目は短辺方向に積層を行い造形した。すなわち、層毎に直交する二方向に交互に積層した。積層後、材齢 7 日まで気中養生を行った後、作製した積層体から高さ方向にコア採取を行い、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を作製した。積層経路制御のソフトの仕様上、積層体各層の最外殻は円周状に描いているが、円柱供試体には最外殻が含まれ

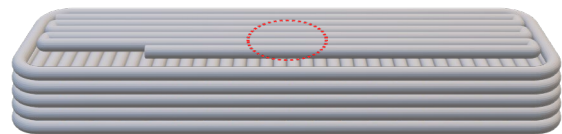


- 各層ごとのノズルの移動方向
⇒ 積層方向
- 積層体作製におけるノズル経路
⇒ 積層経路

図-2 本論文における積層体関連用語



a) 一方向に積層 (パターン 1)



b) 直交する二方向に交互に積層 (パターン 2)

図-3 積層経路

ないように図-3 に点線で示す箇所でコア採取を行った。

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採取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数を計測した。従来、凍結融解作用および化学的作用によってコンクリート内部に生じた劣化による動弾性係数等の物性値を測定する試験である。積層体においては、供試体内部に層間の空気層が形成されるとき、空気層を迂回して波は伝搬するため、内部の層間の空気層の形成に伴う硬化体としての特性を評価できると考えられる。本論文では、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において測定値を得た。

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 週で圧縮载荷を行った。载荷時には、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を行うことで、供試体断面に対し均一に载荷を行った。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

時には積層体に载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分かった。本論文では、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、载荷速度を 5.0MPa/min に制御して、上述のような終局破壊を迎える以前に目視で供試体表面に微細なひび割れが観察できた時点で载荷を中断した。このとき、载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。撮影条件を表-2 に示す。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捉えることができる。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、本論文では空隙、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、本論文ではモルタル部が該当する。撮影時、0.2mm 厚の Cu フィルタを使用し、低エネルギーの X 線を除去し、アーチファクトの発生を低減した。

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、圧縮载荷前後において 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。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用となる⁷⁾。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 図面通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た例がある⁸⁾。このように、3D スキャンは 3DP と親和性が高く、本論文では X 線 CT 法による内部構造の評価と合わせた積層体表面の変形分布の評価に用いた。

3D スキャンの様子を図-4 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、物体表面の点群データを取得する。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。载荷前後で測定した二つの 3D スキャンデータに対し、载荷前のポリゴンデータの各頂点から載

表-2 X 線 CT 法の撮影条件

管電圧 (kV)	100
管電流 (μA)	200
解像度 (μm/pixel)	24.86
画像サイズ (pixel × pixel)	2864 × 2864

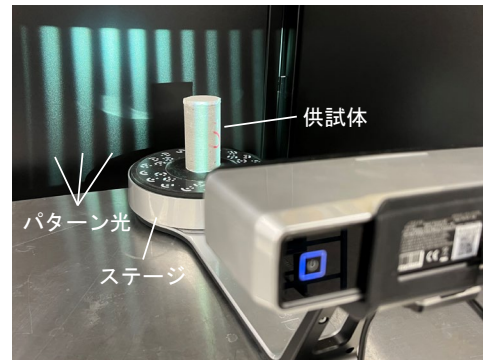


図-4 3D スキャンの様子

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、载荷による変形量 δ と定義した。

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 1 と 2 で見かけの密度の差は小さく、空隙率はパターン 1 に対し 2 では 3%程度小さいことを確認している。本論文で示す結果は、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

JIS A1148 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。

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (1)$$

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), f_0 は凍結融解 0 サイクルの一次共鳴振動数 (Hz) である。本論文では、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_0 を流込み供試体の一次共鳴振動数 (Hz) とする。図-5 にパターン 1 および 2 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 1 および 2 とともに約 80%であり、積層経路による違いは見られない。しかしながら、直径方向では、パターン 1 による積層は一方向であるため、相対動弾性係数の最小値をとる直径方向(1)が列間を跨ぐように伝搬した方向であると考えられる。すなわち、相対動弾性係数の最大値を得た直径方向

(2)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2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1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

図-6 に供試体表面へのひび割れ導入時点までに得られた荷重-変位曲線を示す。パターン1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分かる。パターン2の供試体では、パターン1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

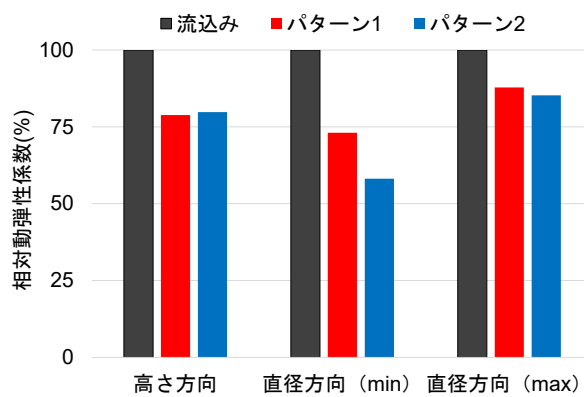


図-5 相対動弾性係数

れ発生荷重に差異が生じている。また、载荷直後の荷重-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

図-7 に流込み供試体および積層体（パターン1および2）の载荷後のX線CT画像を示す。図中の黄色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

図-7a)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、図-7c), d),

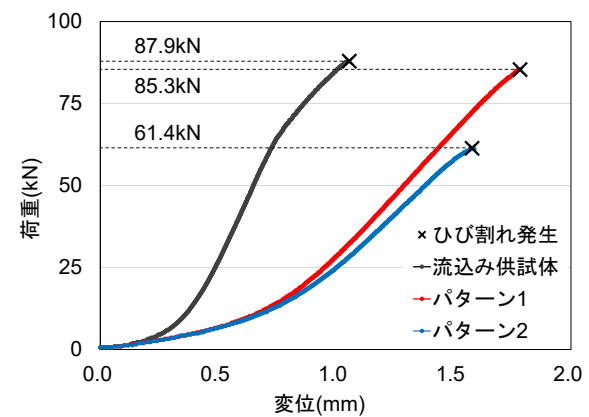
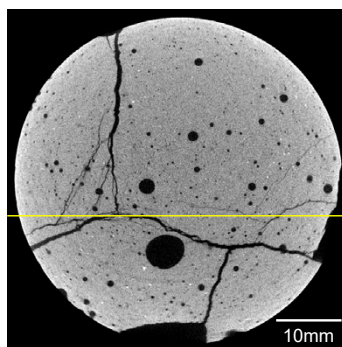
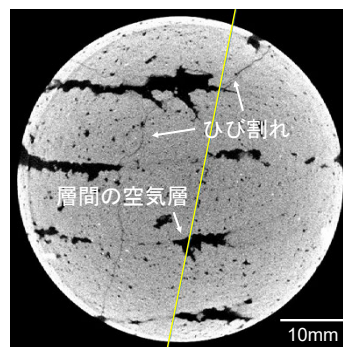


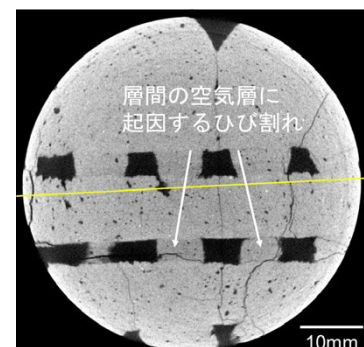
図-6 ひび割れ導入時点までの荷重-変位曲線



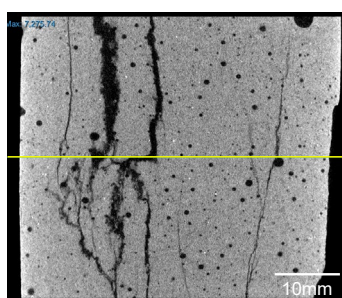
a) 流込み供試体
(横断面, 底面より 50mm)



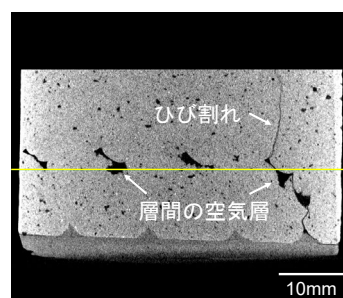
c) パターン1
(横断面, 底面より 12.5mm)



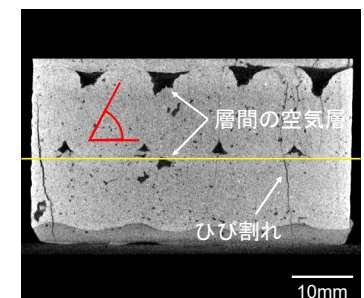
e) パターン2
(横断面, 底面より 12.8mm)



b) 流込み供試体
(縦断面)



d) パターン1
(縦断面)



f) パターン2
(縦断面)

図-7 X線CT画像

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

図-7a)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。

図-7c)および d)のパターン 1 による積層体では、図中に示すように、図上側に位置する水平方向のひび割れは、その近傍に存在する層間の空気層から進展している。これより、層間の空気層がひび割れ進展における起点となっていると考えられる。

図-7e)および f)のパターン 2 による積層体では、形成される層間の空気層がパターン 1 と比較して、より複雑に形成されている。また、図-7f)に赤く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。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。

図-6 より、パターン 1 および 2 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 2 ではパターン 1 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 1 と比較してパターン 2 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 1 および 2 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図-8 に示す。これより、パターン 1 に形成される層間の空気層が一方方向であるのに対し、パターン 2 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。加えて、パターン 2 では多くの空気層が形成されている。これは、直交する二方向に積層を行ったことで、上下の層における接地面が小さくなるためである。また、図-7f)に赤く示したように、層断面が傾斜することで空気層の形状も拡大したと考えられる。パターン 2 では、上下の層との接着面積が小さくなることで、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、図-7e)および f)に示すパターン 2 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

図-9 に载荷後の 3D スキャンデータを示す。図には载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。载荷前に対して、膨張を正として膨張側を赤に、収縮側を青とした。パターン 1 に対しパターン 2 では、図-7e)および f)で確認された多数の微細ひび割

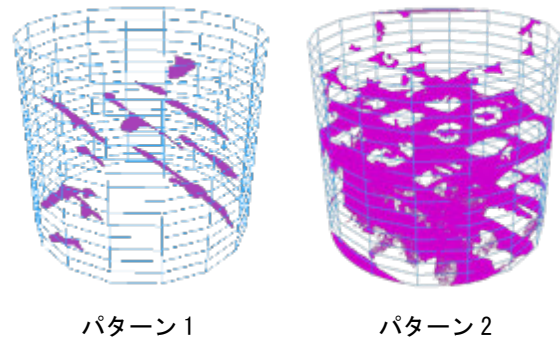


図-8 内部に形成された層間の空気層の可視化

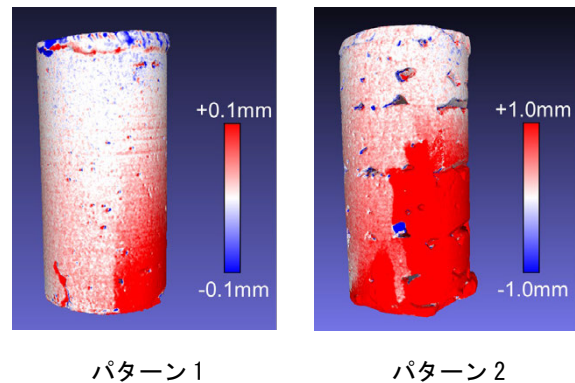


図-9 3D スキャン結果

れにより、供試体全長において大きな変形が生じている。

計算された载荷前後のポリゴンデータの最短距離 δ を用いて、X 線 CT 法により得られた断面画像と合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。図-10 にパターン 1 および 2 における供試体底面より 5mm, 25mm, 45mm および 65mm における断面画像に载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線は、载荷前の供試体表面座標 ($z=5\text{mm}$, 25mm, 45mm, 65mm における x-y 座標) である。また、図中の黄色線は、载荷による変形を強調して表すため、式(2)により算出した载荷による変形量を表す。

$$(x_{\text{plot}}, y_{\text{plot}}) = (x, y) + \frac{\delta}{\delta_{\text{max}}}(x, y) \quad (2)$$

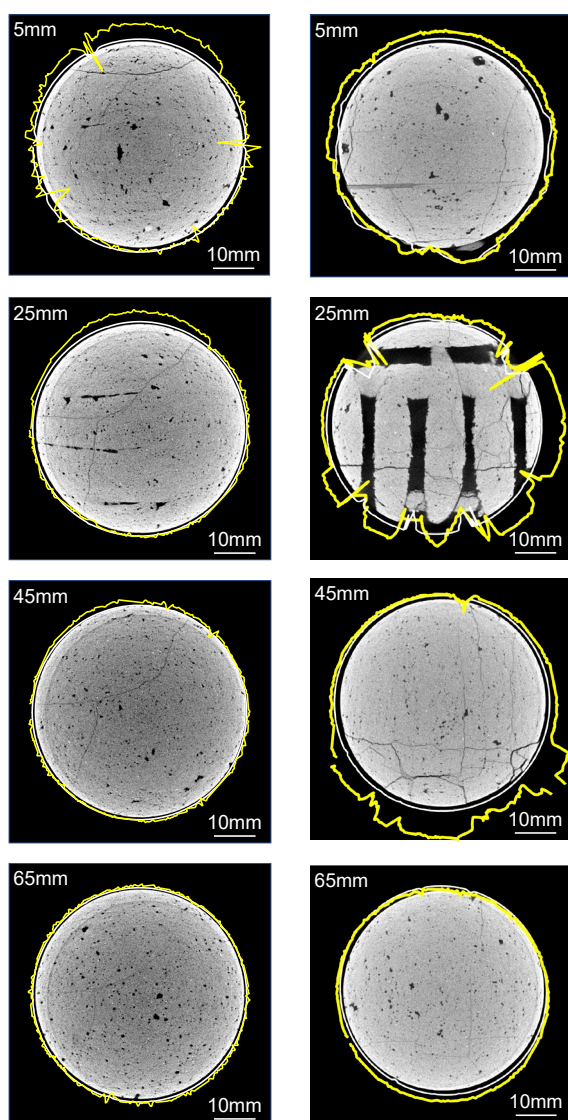
ただし、

δ : 载荷前後の各頂点までの最短距離

δ_{max} : 供試体全周における δ の最大値

である。

パターン 1 において、供試体底面より 5mm の位置において大きな変形が見られ、供試体上部に向かうにつれて、変形量は小さいものになっている。加えて、底面より 25mm の断面画像上で確認できるように、積層方向は画像水平方向である。変形の方法は積層方向に直交する方向、すなわち、隣接する列が離れようとする方向に大きく膨張変形している。ここから、積層体の破壊進展に



パターン 1 パターン 2
図-10 各断面における変形

において積層経路が大きく影響していることが分かる。

パターン 2 において、底面より 25mm および 45mm の位置において大きく変形しており、65mm では比較的変形は大きくない。また、全断面において図-7e) 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、底面より 25mm および 45mm の断面画像において、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 1 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 2 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見られない。

4. まとめ

本論文で得られた知見を以下に示す。

- 1) 一方向に積層した場合と直交する二方向に交互に積層した場合では、後者において複雑な層間の空気層により相対動弾性係数が大きく低下する。
- 2) 流込み供試体に対して積層体では、载荷直後の荷重-変位関係において、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する。
- 3) 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する。
- 4) 一方向に積層した場合、層間の空気層からひび割れは進展し、隣接する列が分裂する方向に変形分布は異方性を示す。
- 5) 直交する二方向に積層した場合、変形分布に異方性は見られないが、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、供試体全体において大きく変形する。

本論文では、圧縮応力下における評価を行ったが、より詳細な評価および積層経路を考慮した品質管理のために、引張および曲げを対象とした評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) R. A. Buswell et al.: 3D printing using concrete extrusion; A roadmap for research, Cement and Concrete Research, Vol.112, pp.37-49, 2018.
- 3) T. T. Le et al.: Hardened properties of high-performance printing concrete, Cement and Concrete Research, Vol.42, No.3, pp.558-566, 2012.
- 4) Hojae Le et al.: Correlation between pore characteristics and tensile bond strength of additive manufactured mortar using X-ray computed tomography, Construction and Building Materials, Vol.226, pp.712-720, 2019.
- 5) 黒澤真一ほか：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，V-571，2022.
- 6) 大野元寛：コンクリートへのトポロジー最適化の適用に関する研究動向，コンクリート工学，Vol.60，No.3，pp.282-290，2022.3
- 7) 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，Vol.60，No.9，pp.796-802，2022.9
- 8) 山本伸也，小倉大季，阿部寛之，菊池竜：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，Vol.59，No.8，pp.655-660，2021.8