

建設用 3D プリンタの積層経路の違いによる内部ひび割れ進展挙動の観察

Observation of Internal Crack Propagation Behavior due to Different Manufacturing Processes of 3D Concrete Printing

北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻 ○学生員 中瀬皓太 (Kota NAKASE)
 北海道大学大学院工学研究院土木工学部門 正員 橋本勝文 (Katsufumi HASHIMOTO)
 北海道大学大学院工学研究院土木工学部門 正員 杉山隆文 (Takafumi SUGIYAMA)
 太平洋セメント株式会社 正員 河野克哉 (Katsuya KONO)

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) が建設業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⁾。3DP にはいくつかの方式が存在するが、現在主流となっているのは、3D CAD データをもと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。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。一方で、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施工を行う。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^{1) 2)}。

上述の積層界面は、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 X 線 CT 法を用いて積層体の内部構造を観察した例として、Hojae らは X 線 CT 法によって得られる層間における空隙率と引張強度の関係を明らかにしている³⁾。また、著者らは積層体に対して圧縮荷重を行った際に、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を X 線 CT 法によって確認している⁴⁾。

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、積層方向は一方に限定されるものではないと考えられる。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他に多く見られない。本論文では、積層経路を変化させることで形成される積層界面の違いが、圧縮荷重され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。

2. 実験概要

2.1 積層体の作製

本実験に用いた配合を表-1 に示す。結合材 (B) には、セメントとして早強ポルトランドセメント (C) を使用し、混和材として炭酸カルシウム微粉末 (LSP) を使用した。細骨材 (S) として珪砂を使用し、混和剤には高性能減水剤 (SP) を使用した。水結合材比 (W/B)

表-1 配合表

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (B×%)
	W	B		S	
		C	LSP		
27	365	913	456	456	0.2



図-1 材料押出式 3D プリンティング装置

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。10L ホバートミキサを使用し、結合材および細骨材を投入し練混ぜを行い、続いて高性能減水剤を含む練混ぜ水を投入して練混ぜを行った。

材料練上がり後の空気量は 2.1%、JIS R5201 に従って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 $\phi 50 \times 100$ 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 プリンタ装置を用いて、 $100 \times 100 \times 400$ mm の供試体を作製した。3D プリンタ装置のノズル直径は 14mm、ノズル射出幅は 16.8mm、一層当たりの高さは 8mm とし、積層完了時の層数は 12 層とした。本論文では、積層経路の違いが破壊進展挙動に及ぼす影響を検討するため、図-2 に示すように、4 パターンの積層経路によって積層体を作製した。これまでの積層実績⁴⁾のある(1)外周から中心に向かって円を描くように印刷するパターンを基本として、(2)外周一周を積層後、長辺方向に印刷するパターン、(3)外周一周を積層後、短辺方向に印刷するパターン、(4)一層ごとに(2)と(3)を交互に繰り返すパターンの 4 種類の積層経路によって積層供試体を作製した。積層後、材齢 7 日ま

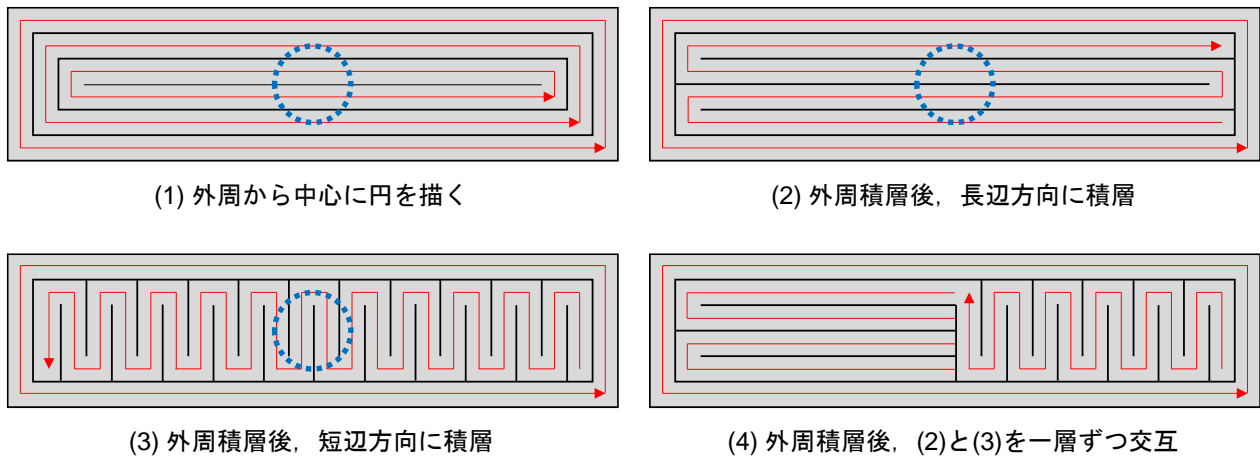


図-2 積層パターン

で気中養生を行った。

2.2 圧縮試験によるひび割れ導入

作製した積層体の積層高さ方向のコア抜きにより $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を作製した。载荷は材齢 98 日時点で行った。载荷の際、供試体上下面の層による凸凹を考慮し、上下面を石膏によってキャッピングすることで、供試体断面に均一に载荷した。载荷速度を $5.0\text{MPa}/\text{min}$ に制御して圧縮载荷を行った。作製した積層体の品質上、载荷により積層体に比較的大きなひび割れが進展した後は、容易に積層界面において割裂して破壊することが分かった。そのため、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。また、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。

2.3 X線CT法

積層経路の違いによる内部構造および内部ひび割れ進展について X線 CT法により観察した。撮影条件を表-2 に示す。X線 CT法では、X線源から照射された X線が物体透過前後の X線減衰比を検出する。撮影中に物体が 360° 回転することにより全方位からの透過を行い、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捉えることができる。撮影時、 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。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位曲線

図-3 に表面にひび割れを確認した時点までの荷重-変位曲線を示す。また、図-4 にひび割れ導入後の積層体の様子を示す。パターン(1)および(2)では、積層した直方体供試体において、主に供試体下部において、吐出された層同士が十分に付着していない。ひび割れは供試体下部の積層界面から卓越して進展しており、流込み供試体の半分以下の荷重で供試体表面にひび割れが発生している。供試体上部においては、下部と比較して良好な層間の付着が確認できる。以上の結果から、ひび割れ発生荷重の大きな低下の原因は、積層精度のばらつきによ

表-2 撮影条件

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

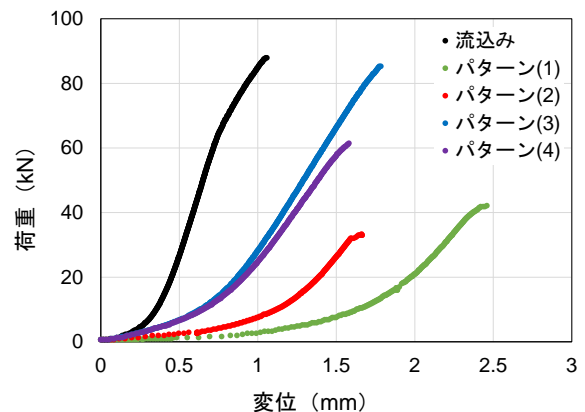


図-3 ひび割れ導入までの荷重変位曲線

るものである。なお、パターン(3)および(4)においては、直方体供試体において、積層が精度よく行われていることが認められる。パターン(3)において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(4)の供試体では、パターン(3)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と考えられる。また、流込み供試体と全パターンの積層体を比較した場合、载荷直後において、流込み供試体に対して積層体では、変位の増加に伴う荷重の増加は漸進的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。

3.2 X線CT法による内部構造観察

3.1 節で述べたように、パターン(1)および(2)による積

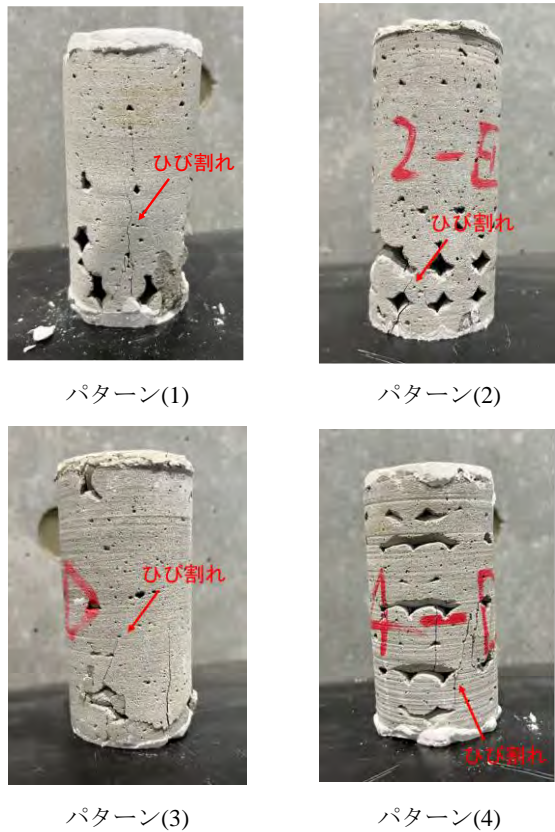


図-4 ひび割れ導入後の供試体

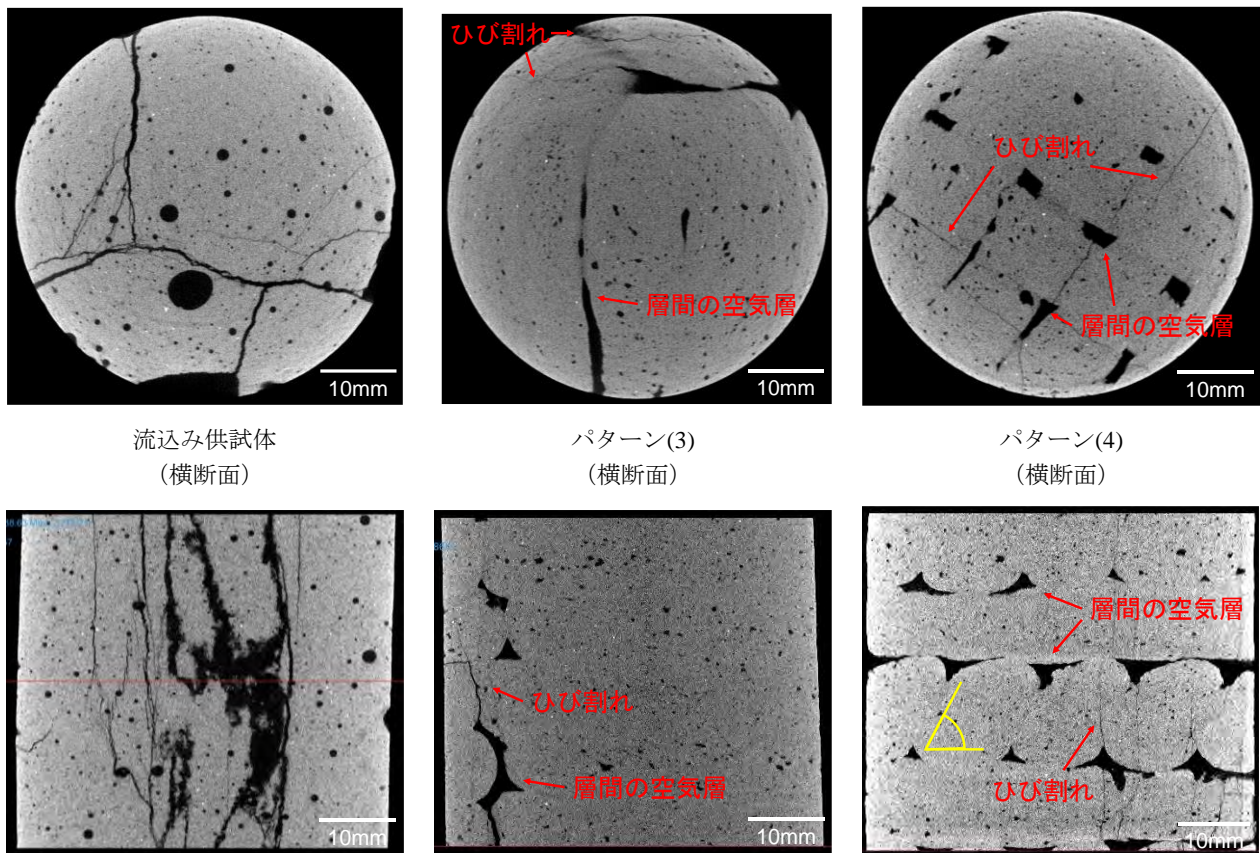
層体は、積層品質が大きく低下していることが確認された。加えて、本論文の範囲内では、積層経路を4パターン変化させているが、図-2 に青点線で示す円のようにコア抜きを行った場合、パターン(1), (2), (3)の各供試体において、積層経路による破壊進展挙動には大きな差がないと考えられる。そのため、本論文における X 線 CT 法による内部進展挙動の観察は、流込み供試体とパターン(3)および(4)において行うこととした。図-5 に流し込み供試体および積層体の X 線 CT 画像を示す。

(1) 内部空隙形状の観察

図-5 左に示す流込み供試体内部の空隙形状が比較的円形(球形)であるのに対し、図-5 中央および右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、製造プロセスにおいて、ノズルから材料が吐出される時受ける圧力および積層過程において材料吐出方向とノズル移動方向が垂直になる過程で空隙形状が変化したものと考えられる。既往の研究において、空隙率と引張強度に関して、層間の空隙率が引張強度に影響をあたえることが明らかにされている³⁾。これは、空隙率の上昇に伴い、層間の付着が悪化することに起因する。球形とは異なる空隙形状も 3DP 施工による特有の性質であると考えられ、引張強度へ及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。

(2) 内部ひび割れ進展挙動の観察

図-5 左の流込み供試体では、ひび割れが供試体内部



流込み供試体 (横断面)

パターン(3) (横断面)

パターン(4) (横断面)

流込み供試体 (縦断面)

パターン(3) (縦断面)

パターン(4) (縦断面)

図-5 X線 CT 画像

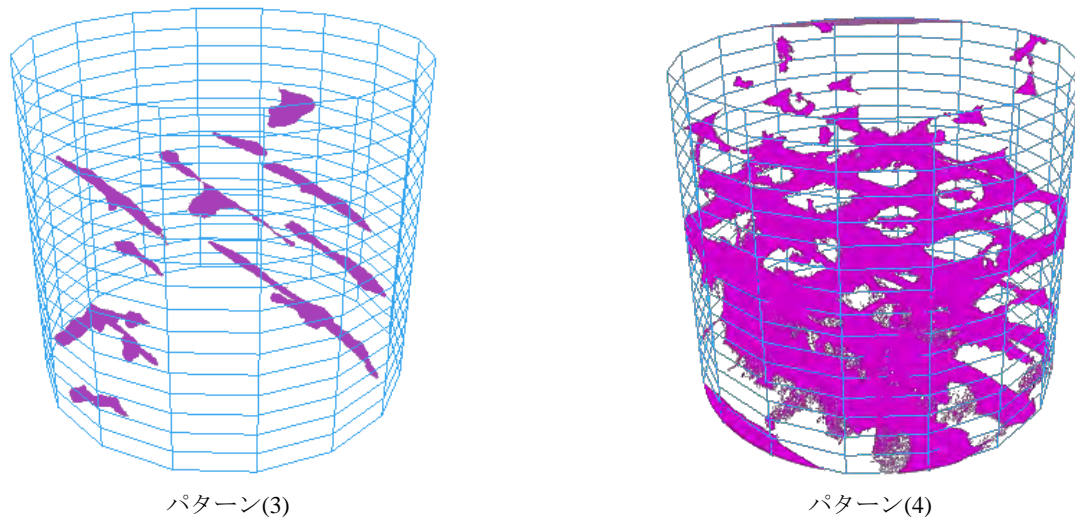


図-6 パターン(3)および(4)で形成される層間の空気層

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-5 中央の積層パターン(3)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弱点となっていると考えられる。しかしながら、図中の垂直方向に形成された層間の空気層から進展したひび割れはなく、断面における全ての層間の空気層がひび割れの進展の起点になるとは限らないと言える。

図-5 右の積層パターン(4)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(3)と比較して、より複雑に形成されている。また、図中黄色線で示すように、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、隣接する層との界面ではなく、層内部をひび割れが進展している。パターン(3)でも見られたように、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。すなわち、一定以下の層間の付着力が得られる場合、ひび割れ進展の経路となる層間の付着力のしきい値が存在する可能性がある。

図-5 より、パターン(3)および(4)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(4)ではパターン(3)に比較してひび割れ発生荷重が約 30%低下している。パターン(3)においては、ひび割れが発生した層間の空気層が一つであったのに対し、パターン(4)では、多数の層間の空気層からひび割れが進展していると考えられる。パターン(3)および(4)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-6 に示す。これより、パターン(3)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(4)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、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、図-5 右に示すパターン(4)の縦断面画像のよ

うに、微細なひび割れが多数発生したことが理解できる。

4. おわりに

3DP の積層経路を変更したときの積層体の破壊進展挙動に関して、X 線 CT 法によって内部構造を観察した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 積層品質が良好でない積層体では、流込み供試体に対して半分以下の荷重でひび割れの進展が確認され、積層精度が耐荷力に大きな影響を及ぼす。
- 2) 荷重-変位曲線において、流込み供試体に対して積層体は、載荷初期段階の変位の増加に対する荷重の漸進的な増加という層構造特有の挙動を示す。
- 3) 積層体内部のひび割れ進展挙動において、層間に形成された空気層を起点にひび割れが発生する。
- 4) 積層経路の影響により、層間の空気層が一方向に形成される経路に比べ、格子状に層間の空気層が形成され、層と層の接着面積が小さくなった経路では、約 70%の荷重でひび割れが発生する。

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, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger: 3D printing using concrete extrusion; A roadmap for research, Cement and Concrete Research, 112, 37-49, 2018.
- 3) Hojae Lee, Jang-Ho Jay Kim, Jae-Heum Moon, Won-Woo Kim, Eun-A Seo: Correlation between pore characteristics and tensile bond strength of additive manufactured mortar using X-ray computed tomography, Construction and Building Materials, 226, 712-720, 2019.
- 4) 黒澤真一，大森寛人，河野克哉，橋本勝文，中瀬皓太：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，土木学会全国大会，2022。