

論文 積層造形されたモルタルの不均質性が積層界面領域の圧縮強度に及ぼす影響

吉原 伶^{*1}・橋本 勝文^{*2}・楼 迪^{*3}・本田 佳己^{*4}

要旨 : 3D コンクリートプリンティングによる積層体には脆弱な積層界面領域が形成される。その一因に積層時の空隙の巻き込みが指摘されている。一方で、吐出時の材料流動により骨材が不均質に分布すると推測されるが、積層体内部の骨材分布を評価した例はほとんどない。本研究では、空間的に不均質な骨材分布および空隙分布が積層界面領域の圧縮強度に及ぼす影響を評価した。このとき、各骨材径および各空隙径を X 線 CT 画像の解析により定量化した。その結果、フィラメント中心部と比較して、積層界面領域では空隙径および骨材径ならびにセメントペースト体積率が異なることで、圧縮強度が低下することを明らかとした。

キーワード : 3D コンクリートプリンティング, X 線 CT, 骨材分布, 空隙分布, スタティックミキサー

1. はじめに

3D コンクリートプリンティング技術 (3DCP) は、従来の打込みによる施工とは異なり、フィラメント (紐状に吐出されたモルタル) を積層していくことで構造物を造形する。型枠が不要であることによる構造物の自由形状の実現や、施工の自動化および省人化による建設産業の生産性向上への寄与が期待されている¹⁾。一方で、積層造形により、隣接するフィラメント間には脆弱な積層界面領域が形成され²⁾、外力による積層体の破壊起点となる³⁾。積層界面領域の脆弱性については、フィラメント同士の付着強度が引張試験によって評価されてきた⁴⁾。積層界面領域の形成機構は、フィラメント表面の乾燥により表面が粗くなり、隣接するフィラメントが積層された際に空隙が巻き込まれることと考えられている⁴⁾。

他方、従来の打込み施工によるコンクリートでは、一般に粗骨材が型枠近傍に配置されにくい⁵⁾。型枠とコンクリートの境界には厚さ約 0.1mm のセメントペースト層、厚さ約 5mm のモルタル層が形成されており、型枠面からの距離が長くなるにつれて骨材体積率が大きくなる⁶⁾。さらに、圧縮強度は骨材体積率の増加に伴い低下することが解析的に明らかにされている⁷⁾。以上より、3DCP においても材料吐出時にノズル内部で空間的に不均質な骨材分布が生じ、積層体の力学特性に影響を与えると推察される。

また、3DCP のノズル内部でセメント系材料が圧力を受けながら押し出される流動挙動は、従来のコンクリートポンプ圧送における管内流動に類似する。コンクリートの管内流動では、断面方向の流速分布は栓流 (断面で速度分布が均一な流れ) となることが知られている^{8),9)}。

これは、流動初期の層流の状態における断面方向の不均一なせん断力分布によって粗骨材が断面中心方向に移動し、管壁との界面に厚さ数 mm 程度の潤滑層がモルタルやセメントペーストによって形成されるためである^{8),9)}。3DCP のノズル内壁との界面においても潤滑層の形成が考えられる¹⁰⁾。押し出し後のフィラメント外側でも潤滑層が維持されるならば、フィラメント外側に相当する積層界面領域で骨材体積率が低下すると推測される。

3DCP に用いられるモルタルのように高い粘度をもつ流体を管内で流動させる化学工学分野や食品工学分野においては、不十分な断面方向の混合による、組成の空間的な不均質性を解消するために、スタティックミキサーが用いられてきた¹¹⁾。スタティックミキサーは駆動部を持たない螺旋形状であり、管内に具備されることで流体を断面方向に攪拌し、材料を均質化する。3DCP のノズル内部にスタティックミキサーを具備することで材料が均質に吐出される可能性がある。

以上のように、3DCP のノズル内部で潤滑層が形成され、積層界面領域の力学特性については積層体全体の力学特性に影響を及ぼすと推察される。さらに、スタティックミキサーの具備によって、均質な材料が吐出されることが見込まれる。また、3DCP に用いられるモルタルは、潤滑層が形成される管壁から数 mm 程度^{8),9)}の範囲では、細骨材、セメントペースト、および空隙で構成されるため、モルタルの力学特性を支配する骨材分布および空隙分布の空間的な不均質性を評価することは重要である。

本研究では、(1)積層体内部の骨材分布および空隙分布の空間的な不均質性の評価、(2)空間的な不均質性が積層界面領域の圧縮強度に与える影響の評価、(3)スタティック

*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 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学院環境フィールド工学専攻

*4 北海道大学大学院 工学研究院工学系技術センター 理修

クミキサーによる積層体内部の均質化の評価を目的とした。X線CT法により取得した連続断面画像に対して新たに構築した画像解析手法を適用することで、各骨材径および各空隙径を定量化した。加えて、積層体内部から微小供試体を切り出し、一軸圧縮試験に供した。

2. 試験片の作製

2.1 3Dプリンタの概要

図-1に示すカートリッジ式の3Dプリンタを用いた。カートリッジ式はピストン押出機構により高圧力で材料を押し出すため、粘度が高い材料を安定して押し出すことができる。また、ピストンによる材料の押出速度により材料の吐出速度を制御できる。本研究では、シリンダの内径を50mm、ノズルの内径を20mmとした。図-2に示すように、螺旋状のスタティックミキサーをノズル内部に具備できるようにした。

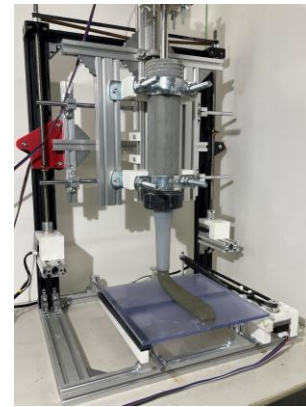


図-1 3Dプリンタ

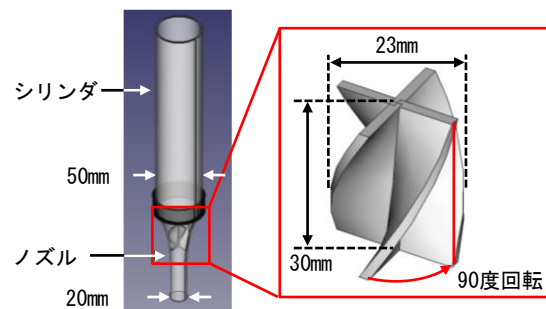


図-2 スタティックミキサー

2.2 材料

材料の配合を表-1に示す。水セメント比を0.19、砂セメント比を0.55とし、高性能AE減水剤をセメント質量に対して3%添加した。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には珪砂、混和剤には高性能AE減水剤を用いた。珪砂は大部分が結晶質シリカで構成され、骨材として用いた場合にCT画像上で分離抽出が容易になる。骨材径分布を図-3に示す。粒径が200 μ m未満の骨材の体積割合が1%未満、平均粒径が約500 μ mである。高性能AE減水剤の添加は、材料を吐出できる流動性と吐出後の材料が自立する自立安定性を確保しながら、これらの性質の時間変化を小さくするためである。セメントおよび珪砂をミキサー内に投入し、低速で30秒間練り混ぜ、水と高性能AE減水剤を添加し、2分間練り混ぜた後、高速で4分間練り混ぜた。さらに、エントラップトエアを減容するため、1分間振動台で振動を加えた。練混ぜ直後のフロー値は、0打の時に109.3mm、15打の時に176.2mmであることを確認した。

表-1 配合表

W/C (%)	単体量 (kg/m ³)			SP (C×wt%)
	W	C	S	
19	267	1405	773	3

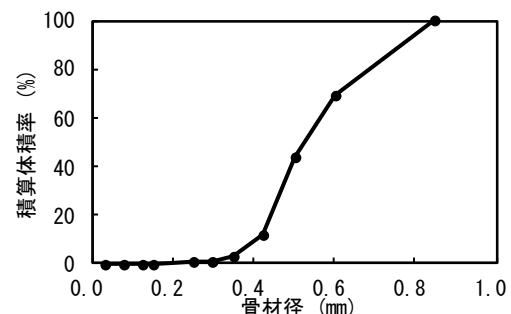


図-3 骨材径分布

2.3 試験片の作製

試験片の作製条件を表-2に、試験片の作製概要を図-4に示す。スタティックミキサーをノズル内部に具備せず、フィラメントを作製し、断面中心から1辺4mmの立方体を試験片(NF)として切り出した。2列2層の積層体を作製し、積層界面領域から1辺4mmの立方体を試験片(NL)として切り出した。図-2に示すようにスタティックミキサーをノズル内部に具備して、フィラメントを作製し、断面中心から試験片(SF)を切り出した。2列2層の積層体を作製し、積層界面領域から試験片(SL)を切り出した。この時、ピストンの押出速度を0.4mm/sec、ノズルの移動速度を2.5mm/secとした。スタンドオフ距離(ノズル先端から下層上面までの距離)を

表-2 試験片の作製条件

	スタティックミキサー	切出し箇所
NF	無	フィラメントの断面中心
NL	無	積層界面
SF	有	フィラメントの断面中心
SL	有	積層界面

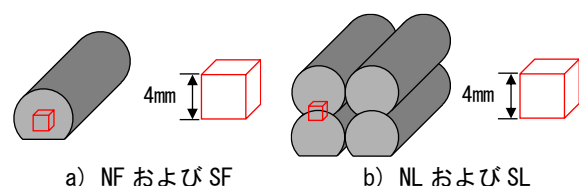


図-4 試験片の作製概要

30mm とした。積層体の 2 層目を吐出する際には、1 層目の積層後の高さを 15mm と仮定し、スタンドオフ距離を 30mm とするために、造形スペースからの距離を 45mm とした。ギャップタイム（上層と下層の積層時間間隔）を 400 秒とした。切削加工には、精密ワイヤソーを用いた。なお、X 線 CT 撮影のために、試験片の条件ごとに 3 体を用意した。小さい試験片では寸法誤差が試験片のサイズに対して相対的に大きくなるため、寸法誤差が圧縮試験結果に及ぼす影響を低減するために、圧縮試験には試験片の条件ごとに 10 体の試験片を用意した。

3. X 線 CT 画像解析手法

3.1 X 線 CT 撮影

X 線 CT 法により、試験片の連続断面画像を取得した。

表-3 に撮影条件を示す。撮影された画像はグレースケールであり、voxel 内の物体の密度が小さいほど輝度値は小さい値を示す。本研究では、空隙、骨材、セメントペーストの順に voxel 内の輝度値が小さい。

3.2 セメントペーストと骨材と空隙への三値化

グレースケール画像をセメントペースト、骨材、空隙に三値化するために Multi-Otsu 法¹²⁾を適用する。当該手法では、輝度値分布のクラス内分散を最小化するように閾値を決定する。しかしながら、画像には試験片の周囲の空気が含まれているため、空隙を示す voxel の割合が大きくなり、その影響を無視できない。Multi-Otsu 法を試験片で占められた関心領域に適用するために、図-5 に抽出方法を示すように 2864pixel×2864pixel の 1948 枚の画像から 800pixel×800pixel の 1000 枚の画像を関心領域として抽出した。図-6a) に関心領域の断面画像を示すように細かいノイズがある。これを除去するために、三次元 Gauss フィルタによって画像を平滑化した。Multi-Otsu 法を適用し、図-7 に輝度値分布を示すように、画

像をセメントペースト、骨材、および空隙に分離した。その結果、図-6b) に示す三値化画像が得られる。

3.3 骨材の分離抽出と各骨材径の取得

(1) 距離画像を用いた骨材領域の取得

図-6c) に、三値化画像から抽出した骨材領域を示す。Gauss フィルタによって平滑化されたことで、実際は空隙とセメントペーストの界面である領域が、空隙とセメントペーストの中間の輝度値である骨材領域としてカウントされる。これをノイズとして除去するために、骨材領域としてカウントされた各 voxel について、背景領域までの最短距離を計算し、10pixel より大きい領域を骨材領域と判定した。さらに、骨材領域の体積を元に戻すために、この段階で背景としてカウントされた各 voxel について、骨材領域までの最短距離を計算し、10pixel 以内の領域を骨材領域として判定した。加えて、骨材領域内部のノイズを穴埋め処理した。

(2) 骨材領域の分割および骨材径の取得

図-6d) に示すように、得られた骨材領域は隣接する

表-3 X 線 CT 画像の撮影条件

管電圧 (kV)	100
管電流 (μA)	200
解像度 (μm/pixel)	2.55
画像サイズ (pixel×pixel)	2864×2864
撮影枚数 (枚)	1948

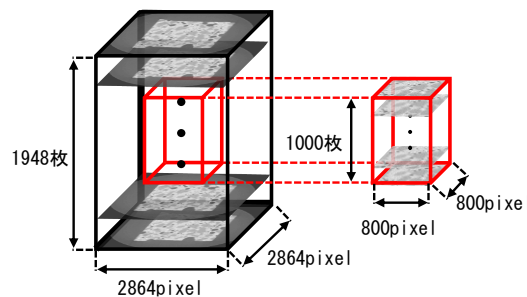
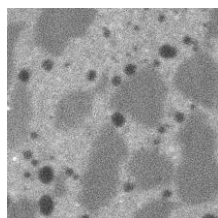
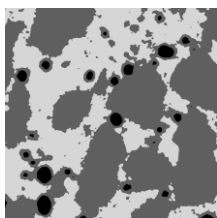


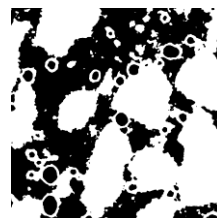
図-5 関心領域の抽出



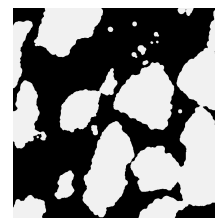
a) 関心領域の元画像



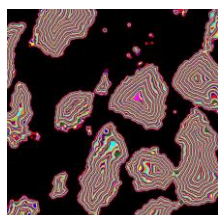
b) 三値化処理後の画像



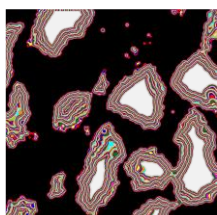
c) 骨材の二値化画像



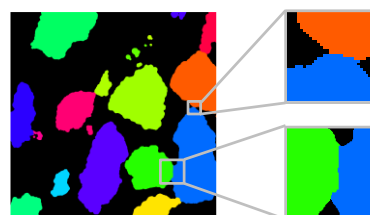
d) 骨材領域



e) 背景からの距離画像



f) 骨材コア (識別子)



g) 分割された骨材領域

図-6 画像処理過程における断面画像

骨材同士が結合しており、各 voxel は帰属する骨材が決定されておらず、各骨材の粒径を正確に算出できない。そのため、Watershed 法¹³⁾を適用することで各 voxel の帰属する骨材を決定した。Watershed 法を適用するには、各骨材の中心部に識別子が必要となる。そこで、骨材領域の各 voxel について、背景領域までの最短距離を計算した。同じ距離を持つ voxel に同じ色を割り当てると、図-6e)に示すように等高線のような画像が得られる。距離が 40pixel 以上の骨材領域を抽出することで、図-6f)中に白色で示す識別子が取得できる。得られた識別子は各骨材の中心部であり、骨材同士で分離していることが分かる。なお、解像度が 2.55 μm であるため、直径が 204 μm 未満の領域は削除されるが、径が 200 μm 未満の骨材の体積割合は 1%未満であることを確認しており、抽出されなかった極小の領域は無視できることとした。

背景からの距離に基づいて識別子の周囲の voxel を識別子に帰属させて、別の識別子の領域と接触した voxel を境界とした。Watershed 法を適用した後の画像を図-6g)に示す。なお、識別子ごとに異なる色を示している。骨材同士が接触している領域が異なる骨材として分割されていることが分かる。各骨材の体積を取得し、体積球相当径を骨材径として算出した。本研究で用いた骨材の平均粒径がおおよそ 500 μm であることから、関心領域の体積に対する 500 μm 以上の骨材の体積率、および 500 μm 未満の骨材の体積率を算出し、試験片の条件ごとに 3 体の試験片の結果を平均した。

3.4 空隙径の取得

骨材の場合と異なり、複数の空隙が実際に連結するため、空隙径の取得には Watershed 法を用いていない。三値化画像(図-6b))から各空隙の体積を取得し、体積球相当径を空隙径として算出した。径が 200 μm 以上の空隙をエントラップトエアとみなし、関心領域の体積に対する体積率を算出した。同様に、径が 200 μm 未満の空隙をエントレインドエアとみなし、関心領域の体積に対する体積率を算出した。試験片の条件ごとに 3 体の試験片の結果を平均した。

3.5 セメントペースト体積率の算出

セメントペーストが多い潤滑層がノズル内部において形成され、積層後においても維持されるならば、フィラメントの外側に相当する積層界面領域においてセメントペースト体積率は大きいと推測される。しかしながら、積層界面領域では積層の瞬間に粗大な空隙が巻き込まれる⁴⁾。巻き込まれた空隙の影響を取り除いた上でセメントペースト体積率を比較するために、式(1)に示すように 100%から 200 μm 以上の空隙率を減じた値でセメントペースト体積率を除した値 CR を真のセメントペースト体積率として求めた。試験片の条件ごとに 3 体の試験片の

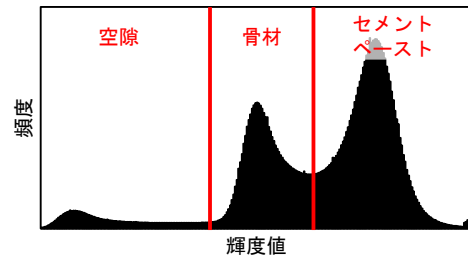


図-7 画像の三値化概要

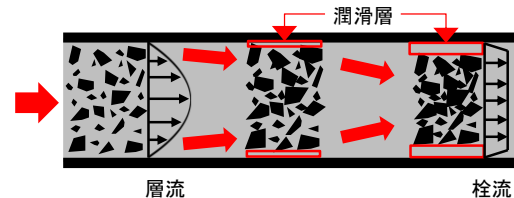


図-8 潤滑層の形成機構

結果を平均した。

$$CR = \frac{\text{セメントペースト体積率}}{100\% - 200\mu\text{m 以上の空隙率}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

4. 圧縮試験方法

試験片を温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 60%の条件で吐出から 14 日間気中養生した。試験片の条件ごとに 10 体ずつ一軸圧縮試験を行った。載荷速度を 0.05mm/min とした。試験機から得られた荷重から最大公称応力を算出し、圧縮強度とした。試験片が小さいことに起因する試験結果のばらつきを低減するために、得られた圧縮強度の最大値と最小値をデータから除外し、8 つの試験片の圧縮強度の平均値を求めた。

5. 結果と考察

5-1 X線 CT 画像解析結果

(1) 骨材分布

先述のように、ポンプ圧送されたコンクリートが管内を流動する際には潤滑層が形成されることが知られている⁸⁾⁹⁾。潤滑層の形成機構のイメージを図-8に示す。管内断面方向の不均一なせん断力分布によって、骨材が断面中心方向に移動し、管壁との界面ではセメントペーストによって潤滑層が形成される。管内を流動する挙動が類似する 3DCP のノズル内部においても潤滑層の形成が推測される。

NF, NL, SF, SL それぞれにおける 500 μm 以上の骨材体積率および 500 μm 未満の骨材体積率を図-9に示す。スタティックミキサーの有無にかかわらず、積層界面から切り出した NL, SL の 500 μm 以上の骨材体積率は、フィラメント中心から切り出した NF, SF の 500 μm 以上の骨材体積率より小さい。一方で、500 μm 未満の骨材体積率は、相対的には試験片の条件による変化が小さい。以上の結果から、ノズル内部での材料流動中に、大きい骨

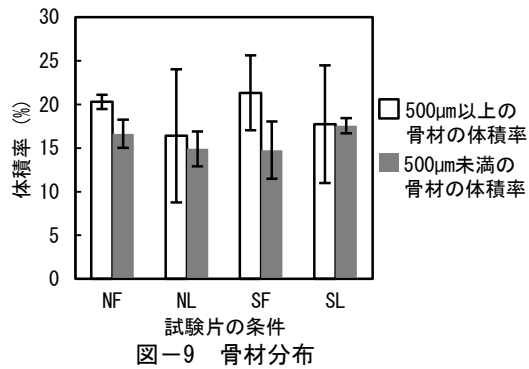


図-9 骨材分布

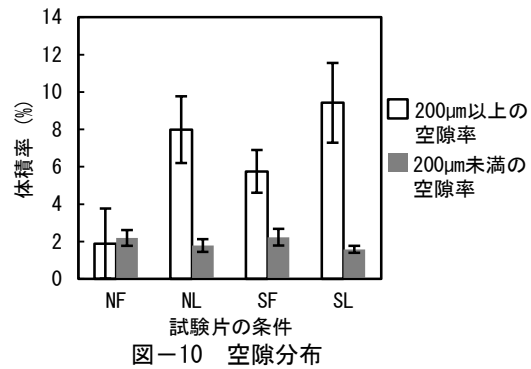


図-10 空隙分布

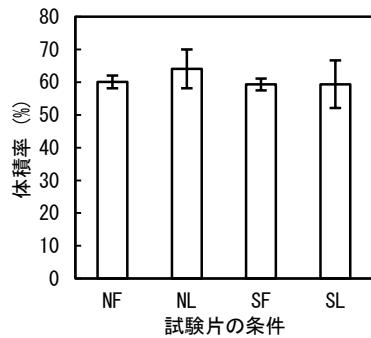


図-11 真のセメントペースト体積率 CR

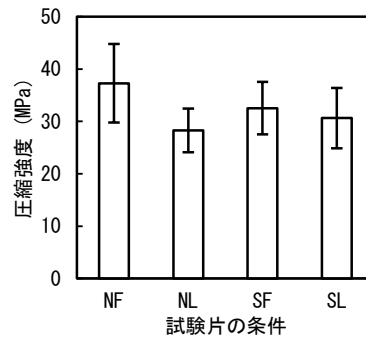


図-12 圧縮強度

材がノズル断面の中心方向に移動することで、吐出後であるフィラメント外側に相当する積層界面領域においても大きい骨材の体積率が小さくなると考えられる。

(2) 空隙分布

NF, NL, SF, SL それぞれにおける 200μm 以上の空隙率および 200μm 未満の空隙率を図-10 に示す。200μm 未満の空隙率は、試験片の条件によってほとんど変化しない。一方で、200μm 以上の空隙率については試験片の条件によって異なっている。

スタティックミキサーを具備した SF および SL における 200μm 以上の空隙量は、NF および NL における 200μm 以上の空隙量より大きい。これは、吐出時にスタティックミキサーによって材料が一時的に分割され、内部に空隙が巻き込まれたためと考えられる。

既往の研究では、積層の瞬間にフィラメント間に粗大な空隙が巻き込まれると指摘されている⁴⁾。吐出時に巻き込まれたフィラメント内部の粗大な空隙について、分布の空間的な不均質性を無視すれば、積層時に巻き込まれる空隙量は、積層界面から切り出した試験片 (NL, SL) とフィラメント中心から切り出した試験片 (NF, SF) における 200μm 以上の空隙率の差で表される。

スタティックミキサーを具備しなかった場合、NL における 200μm 以上の空隙率は、NF における 200μm 以上の空隙率より 6.1vol% 大きい。これは、既往の研究と同様に⁴⁾、積層時にフィラメント間に粗大な空隙が巻き込まれたためであると推察される。一方で、スタティックミキサーを具備した場合、200μm 以上の空隙率はスタティ

ックミキサーを具備しなかった場合と比較して増加するが、SL と SF における 200μm 以上の空隙率の差は 3.7vol% にすぎない。つまり、スタティックミキサーの具備により、積層時に巻き込まれる空隙量が小さくなっている。これまでに、材料の流動性の増加によって、積層時に巻き込まれる空隙量が低下することが示唆されている¹⁴⁾。さらに、セメント系材料はせん断力を与えられることで粘度が低下するビンガム流体であることも考慮すると、スタティックミキサーによって材料にせん断力が加えられ、吐出直後の流動性が一時的に増加することで、積層界面領域とフィラメント中心における 200μm 以上の空隙率の差が小さくなると推察される。

(3) セメントペースト体積率

NF, NL, SF, SL それぞれにおける真のセメントペースト体積率 CR を図-11 に示す。スタティックミキサーを具備しなかった場合、積層界面から切り出した NL の CR は、フィラメント中心から切り出した NF の CR より 4.0vol% 大きい。この結果は、ノズル内壁との界面で潤滑層が形成され、吐出後のフィラメント外側に相当する積層界面領域においてもセメントペースト体積率が大きい状態が維持されていることを裏付ける。

一方で、スタティックミキサーを具備した場合、積層界面から切り出した SL における CR は、フィラメント中心から切り出した SF における CR と概ね同じ値を示している。つまり、フィラメントの中心と外側で、セメントペースト体積率はばらつきがあるものの平均値では同じであると言える。潤滑層は材料の管内流動中に骨材

が断面中心方向に移動することで形成されるが、スタティックミキサーの具備によりノズルの断面中心から一時的に材料ひいては骨材が排除され、ノズル内壁における潤滑層の形成が阻害されると推察される。

5-2 圧縮強度

NF, NL, SF, SL の圧縮強度を図-12 に示す。スタティックミキサーを具備しなかった場合、積層界面から切り出した NL の圧縮強度は、フィラメント中心から切り出した NF の圧縮強度の 0.76 倍であり、積層された材料内部の不均質性が局所領域の圧縮強度に影響を及ぼしていることが分かる。一方で、スタティックミキサーを具備した場合、積層界面から切り出した SL の圧縮強度は、フィラメント中心から切り出した SF の圧縮強度の 0.94 倍であり、差が小さくなっている。

一般的にコンクリートでは、粗骨材体積率の増加、粒径の粗大化、空隙率の増加、および空隙径の粗大化に伴い、材料の圧縮強度は低下する。モルタルを材料とした本研究では、積層界面において、細骨材体積率および粒径が小さく、空隙率および空隙径が大きいことが明らかとなった。よって、フィラメント中心と積層界面領域の圧縮強度の違いは、空隙の空間的な分布に依存しており、細骨材の空間的な分布の影響は小さいと考えられる。

6. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 積層界面領域において 500 μm 以上の骨材体積率が小さく、200 μm 以上の空隙率およびセメントペースト体積率が大きい。
- (2) 積層界面領域において圧縮強度が小さい。これは、積層の瞬間にフィラメント間に 200 μm 以上の粗大な空隙が巻き込まれたためと考えられる。
- (3) スタティックミキサーにより、フィラメント中心と積層界面領域で材料組成の違いが小さくなるとともに、局所的な圧縮強度の差が小さくなる。

以上の知見から、吐出時にノズル内壁との界面で潤滑層が生じ、吐出後および積層後においても積層体の力学特性に影響を及ぼすと示唆される。また、スタティックミキサーの具備により、潤滑層の形成に伴う積層界面領域の局所的な材料分離を抑制できることがわかった。

参考文献

- 1) Delgado Camacho, D. et al.: Applications of Additive Manufacturing in the Construction Industry – A Forward-Looking Review, *Automation in Construction*, Vol.89, pp.110–119, May 2018.
- 2) Geng, Z. et al.: Layer-Interface Properties in 3D Printed Concrete: Dual Hierarchical Structure and Micromechanical Characterization. *Cement and Concrete*

Research, Vol.138, pp.106220, Dec. 2020.

- 3) Nakase, K., et al.: Influence of Print Paths on Mechanical Properties and Fracture Propagation of 3D Printed Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.438, pp.137019, Aug. 2024.
- 4) Sanjayan, J. G. et al.: Effect of Surface Moisture on Inter-Layer Strength of 3D Printed Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.172, pp.468–475, May 2018.
- 5) Huang, Q. hua, Li, C. zhi and Song, X. bin: Spatial Distribution Characteristics of Ellipsoidal Coarse Aggregates in Concrete Considering Wall Effect, *Construction and Building Materials*, Vol.327, pp.126922, Apr. 2022.
- 6) Kreijger, P. C.: The Skin of Concrete Composition and Properties. *Matériaux et Construction*, Vol.17, No.4, pp.275–283, Jul. 1984.
- 7) Wang, X., Zhang, M. and Jivkov, A. P.: Computational Technology for Analysis of 3D Meso-Structure Effects on Damage and Failure of Concrete, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.80, pp.310–333 Feb. 2016.
- 8) Choi, M. et al.: Lubrication layer Properties During Concrete Pumping, *Cement and Concrete Research*, Vol.45, No.1, pp.69–78, Mar. 2013.
- 9) Fataei, S., Secrieru, E. and Mechtcherine, V.: Experimental Insights into Concrete Flow-Regimes Subject to Shear-Induced Particle Migration (SIPM) during Pumping, *Materials*, Vol.13, No.5, Mar. 2020.
- 10) Yoshihara, R. et al.: Evaluation of Aggregate Distribution Heterogeneity in 3D Printed Concrete by Means of X-Ray CT, *Buildings*, Vol.14, No.4, pp.1132, Apr. 2024.
- 11) Ghanem, A., et al: Static Mixers: Mechanisms, Applications, and Characterization Methods - A Review, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol.92, No.2, pp.205–228, Feb. 2014.
- 12) Liao, P.-S., Chen, T.-S. and Chung, P.-C.: A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding, *Journal of Information Science and Engineering*, Vol.17, Vol.5, pp.713–727, Sep. 2001.
- 13) Vincent, L. and Soille, P.: Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13, No.6, pp.583-598, Jun. 1991.
- 14) Marchant, T., Sanjayan, J. and Xia, M.: Method of Enhancing Interlayer Bond Strength in Construction Scale 3D Printing with Mortar by Effective Bond Area Amplification, *Material and Design*, Vol.169, pp.107864, May 2019.