

論文 押出積層方式の3D プリンティング技術により作製されたモルタル硬化体の力学特性と破壊形態

浅見 仁博*1・大野 元寛*2・石田 哲也*3

要旨：本研究では、押出積層方式の3D プリンティング技術により作製されたモルタル硬化体に対し、圧縮、曲げ、割裂引張および層間付着強度を測定して力学特性を評価した。また、各試験でデジタル画像相関法による表面ひずみ分布の測定を行い、破壊形態に関する検討を行った。モルタルフィラメントの層間に肉眼で確認できる粗大な空隙が無い場合でも、プリント供試体の各種強度が打設供試体と比較して低下することが確認された。フィラメントの層間に粗大な空隙が存在する場合は、破壊力学におけるき裂や欠陥と同様に空隙周りの応力集中が生じ、ひび割れの発生箇所と進展方向を左右することが明らかとなった。

キーワード：3D プリンティング、積層、異方性、空隙、応力集中、デジタル画像相関法

1. はじめに

セメント系材料の3D プリンティング技術の研究開発が急速に進む中、硬化後の物性に関する知見が不足している。既往研究の多くが材料のフレッシュ性状を対象としており、プリントされた硬化体の強度や破壊形態に関する研究は限られている。3D プリンティングによる施工は従来の型枠打設による方式とは全く異なるため、力学特性に関する詳細な検討が必要である。

セメント系材料の押出積層方式による3D プリンティング技術では、ノズルから吐出・積層されるフィラメントの層間に離隔や空隙が生じる。フィラメントを打ち重ねる時間間隔が長いほど、層間の付着強度は低下する¹⁾。また、材料のフレッシュ性状とプリント条件によっては、フィラメント間に粗大な空隙が形成されることがある^{1,2)} (図-1)。既往研究では、層間付着強度の低下や層間に生じた粗大な空隙によって、型枠打設により作製された供試体と比べて3D プリントした供試体(プリント供試体)の強度が有意に低下することが報告されている^{1,3,4)}。しかし、破壊に至るまでのひび割れの発生や進展に層間が及ぼす影響は、未だ十分に検討されていない。

そこで本研究では、押出積層方式により作製されたモルタル硬化体を対象として、各種強度試験の実施と表面ひずみ分布の測定を行った。圧縮、曲げ、割裂引張および層間付着強度試験を、型枠打設供試体とプリント供試体の双方に対し実施した。また、载荷中の表面ひずみ分布はデジタル画像相関法(Digital Image Correlation: DIC)を用いて測定した。これによって、3D プリントされたモルタル硬化体の力学特性と破壊形態に関する理解を深めることを試みた。

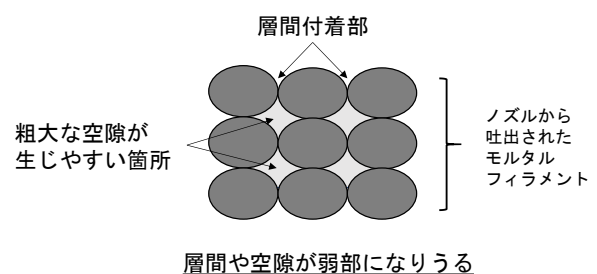


図-1 押出積層方式における吐出フィラメントの積層

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究で用いたセメントモルタルの配合を表-1に示す。使用材料は水、普通ポルトランドセメントを主成分とするプレミックス粉体、川砂、凝結調整剤である。水粉体比(W/P)は33%とした。モルタルに含まれる空気量の設計値は3%とした。

表-1 本研究で用いた3D プリンティング用のセメントモルタルの配合

水粉体比 (%)	単位量 (kg/m ³)			
	水	プレミックス粉体	川砂	凝結調整剤
33	260	787	1186	2.4

2.2 セメント系材料の3D プリンタ

本研究で用いた押出積層方式の3D モルタルプリンタを図-2に示す。本プリンタでは幅350mm、奥行き350mm、高さ750mmの範囲で造形可能であり、ノズルの移動速度およびモルタルの吐出量を調整できる。また、

*1 東京大学 工学部社会基盤学科 (学生会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

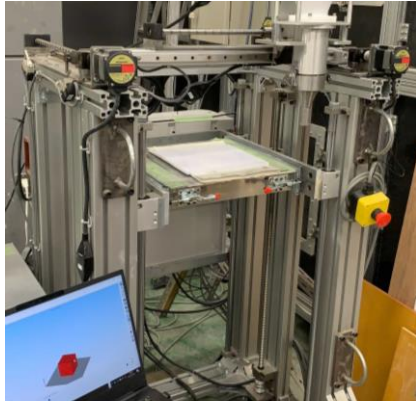


図-2 押出積層方式の3Dモルタルプリンタ

モルタルを吐出するノズルの先端は内径 10mm の円筒形状である。

プリントの手順として、はじめに積層体の 3 次元モデルをコンピュータ上で作成する。次に、市販のソフトウェアを用いてモデルを層状に分割し、各層におけるノズルの移動経路（プリントパス）を決定する。プリントパスとプリント条件（ノズルの移動速度、単位時間あたりのモルタルの吐出量など）を含めたデジタルデータに基づき、ノズルがモルタルフィラメントを吐出しながら移動して積層造形する。力学試験（2.4 節）では、3 次元モデル上のフィラメント幅および高さを 10mm に設定した。

2.3 デジタル画像相関法

載荷中の供試体の変位および表面ひずみ分布の測定には、2 次元のデジタル画像相関法（DIC）を用いた。DIC は物体表面の任意の領域（サブセット）のグレースケール分布を追跡することで、表面変位およびひずみを連続的に測定する画像解析技術である⁵⁾。本研究では、硬化したプリント供試体の表面に白と黒のスプレーを吹き付けることで、各サブセットに固有のグレースケール分布を生成した。デジタル画像の撮影には、有効画素数 2420 万ピクセルの CMOS センサーを内蔵する一眼レフカメラを用いた。力学試験中に 5 秒毎に撮影したデジタル画像を市販のソフトウェアで解析した。

2.4 力学試験

(1) 圧縮試験

圧縮強度試験用に $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を型枠打設および 3D プリンティングにより作製した。型枠打設供試体は 3 本作製した。プリント供試体は 1 辺 120mm の立方体を積層造形し、硬化後、所定の寸法にコア抜きして作製した。また、図-3 の通り、2 方向でコア抜きして、各方向で 5 本ずつ供試体を作製した。これは、載荷方向と積層方向の組み合わせが力学特性に異なる影響を与えると想定したためである。本研究では、同一平面上に隣接するフィラメントの打重ね間隔が 5 秒程度である一方、鉛直方向の打重ね間隔は 1 分程度であった。

型枠打設供試体は、材齢 21 日まで温度 20℃ で封緘養生した後、圧縮試験日まで水中養生した。プリント供試体は、材齢 21 日まで気中養生してコア抜きを行い、試験日まで水中養生した。材齢 35 日に供試体を水中から取り出し、端部を研磨した後、圧縮試験に供した。

(2) 曲げ試験

曲げ強度試験用に $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を型枠打設により 3 本作製した。プリント供試体は $60 \times 60 \times 250\text{mm}$ の角柱を積層造形し、硬化後に端部を切断することで $50 \times 50 \times 200\text{mm}$ の角柱供試体とした。各寸法をフィラメント厚さの 5 倍以上となるよう設定したため、型枠打設供試体とプリント供試体でわずかに寸法異なるが、寸法効果は無視できると仮定した。養生条件および試験材齢は圧縮試験用供試体のものと同一とした。曲げ試験は中央点載荷法により行い、図-4 の通り、異なる 2 方向から載荷した。

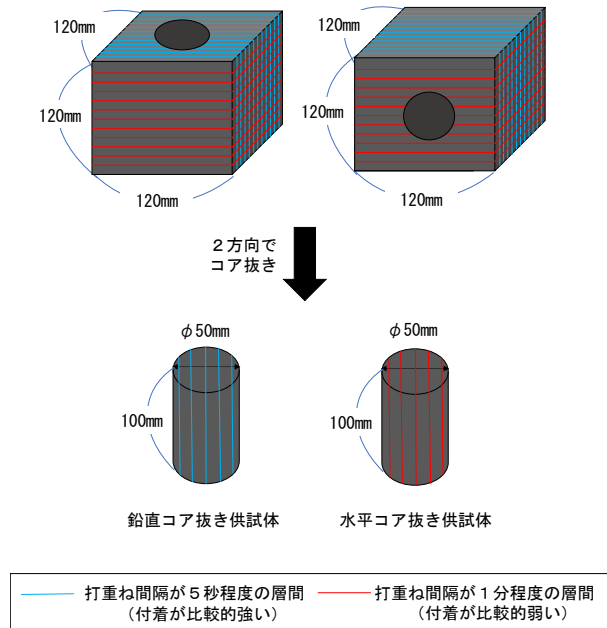


図-3 圧縮試験用のプリント供試体の作製

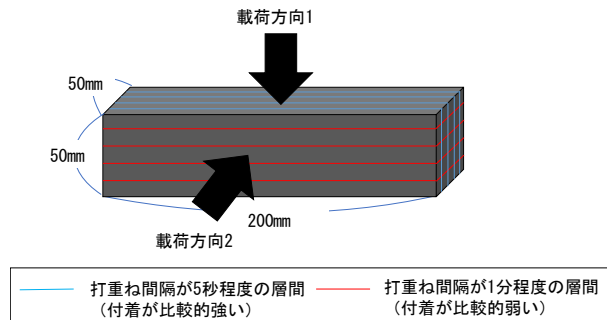


図-4 曲げ試験用のプリント供試体の載荷方向

(3) 割裂引張試験および層間付着試験

割裂引張試験および層間付着試験用に $\phi 50 \times 50 \text{mm}$ の円柱供試体を作製した。型枠打設供試体は各試験に対して3本ずつ作製した。プリント供試体は圧縮試験用供試体の作製と同様に、1辺120mmの立方体を積層造形し、硬化後に2方向からコア抜きして作製した。割裂引張試験は、载荷方向と層間の方向が直角となるよう载荷した(図-5)。層間付着強度は、载荷方向と層間の方向が平行となるよう载荷することで評価した。各試験と各载荷方向に対して供試体を5本ずつ作製した。ただし、層間付着試験の鉛直コア抜き供試体は、作製時の不備により3本のみとなった。養生条件は圧縮試験用供試体のものと同一とし、試験材齢は28日とした。

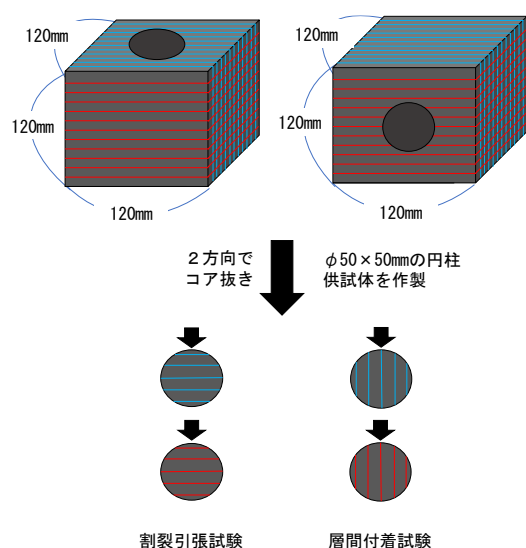


図-5 割裂引張試験および層間付着試験用のプリント供試体の作製と载荷方向

2.5 破壊形態に関する検討

2.4 節の力学試験は層間の付着性状に着目した検討であり、層間に粗大な空隙が生じることのないよう、フレッシュ性状やモルタルの吐出量を調整しながら供試体を作製した。しかし、材料本来の物性のばらつきや外気温湿度の変動によって、3D プリンティング用セメントモルタルのフレッシュ性状は顕著な影響を受ける。その結果、

高いプリント品質を常に確保することは容易ではなく、粗大な空隙を完全に除去することは難しい。そのため、粗大な空隙が強度や破壊形態を左右する可能性がある。

そこで、粗大な空隙がプリント供試体の力学特性に及ぼす影響を把握するため、あえて粗大な空隙が多く生じるように調整してプリント供試体を作製し、破壊形態の観察を行った。プリント品質はモルタルの吐出量、プリントパスおよびフィラメント厚さを変えることで調整した(図-6)。プリント供試体は $120 \times 120 \times 110 \text{mm}$ の角柱を積層造形し、硬化後に底面以外の端部を切断することで1辺90mmの立方体とした。各プリントパスに対して1つの供試体を作製した。比較のため、型枠打設供試体も1辺90mmの型枠に打設して作製した。供試体は材齢10日で圧縮試験に供し、積層体上面または打設面の垂直方向に载荷した。破壊形態の観察のため、载荷中に積層体側面を撮影しDIC解析を行った。

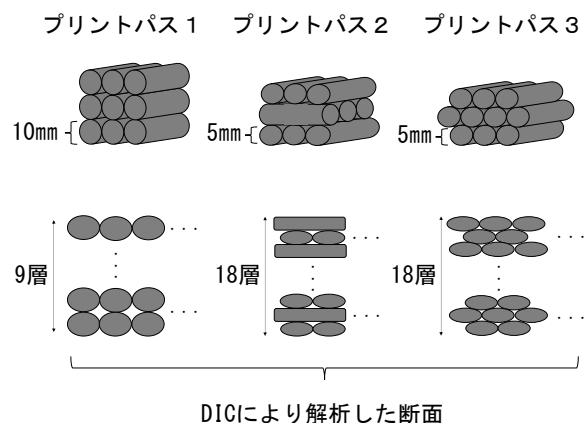


図-6 破壊形態に関する検討に用いたプリントパス

3. 実験結果および考察

3.1 力学試験結果

(1) 圧縮強度

表-2 に力学試験の結果を示す。圧縮試験では、極端に低い強度を示したプリント供試体 that 各コア抜き方向に対して1本あった(鉛直および水平方向にコア抜きした供試体でそれぞれ18MPaと28MPa)。これらの供試体では粗大な空隙が多く見られた。したがって、本来の目的である層間の付着性状の検討には不適切であると判断し、これらを外れ値とした。そのため、プリント供試体の強

表-2 型枠打設供試体とプリント供試体の力学試験の結果(平均値±標準偏差)

圧縮強度 (MPa)			曲げ強度 (MPa)			割裂引張強度 (MPa)			層間付着強度 (MPa)	
打設供試体	鉛直コア抜き	水平コア抜き	打設供試体	方向1	方向2	打設供試体	鉛直コア抜き	水平コア抜き	鉛直コア抜き	水平コア抜き
68±10	72±12	59±16	11.2±1.6	8.6±1.0	8.1±2.1	6.0±1.6	6.3±1.9	6.2±0.4	5.1±1.0	4.3±1.2

度の平均値および標準偏差は4本の供試体から算出した。

外れ値を除いた場合、型枠打設供試体と鉛直コア抜きプリント供試体で同程度の圧縮強度であった。一方、水平コア抜きプリント供試体は型枠打設供試体と比べて強度が平均値で13%低下した。ただし、測定サンプル数が少なく、試験結果のばらつきも大きいため、強度の試験値のみで層間による影響の有無を議論することは難しい。

2次元のDICでは平面上の変位およびひずみのみが解析可能であるため、曲面を有する円柱供試体には適用しなかった。実際、载荷中の供試体の観察からは、多くのプリント供試体において表面付近が剥離して破壊に至ることが確認された。また、試験後に破壊面を観察した結果、ひび割れが層間に沿って進展した箇所があることが確認された。この結果から、モルタル母材の強度と比べて、層間の付着強度が低い箇所があったと推定される。

水平コア抜き供試体では、打重ね間隔が長い層間が载荷方向と平行である。したがって、層間が弱部となって表面付近の剥離を生じ、圧縮強度が低下したと解釈できる。一方、鉛直コア抜き供試体の結果から、打重ね間隔が短い層間は付着強度が高く、圧縮強度の低下を生じないと考えられる。

(2) 曲げ強度

プリント供試体の曲げ強度は、コア抜きの方向によらず、型枠打設供試体よりも低下した(表-2)。型枠打設供試体と比べ、方向1と方向2の曲げ強度が平均値でそれぞれ23%と28%低下している。曲げ試験でのDICの結果からは、型枠打設供試体とプリント供試体でひずみ分布に特筆すべき差異は見られなかった。

既往研究では同様のプリント供試体の曲げ試験において、型枠打設供試体よりも強度が上昇することが報告されている^{2),4)}。これは、上層からの自重によって供試体底面のフィラメントが締め固められた結果であると考察されている。中央点载荷法の曲げ試験ではスパン中央の底面に最大の引張応力が生じるため、底面の強度増加が曲げ強度の増加につながる。

しかし、供試体底面には長さ方向と平行に複数の層間が存在する。そのため、層間が弱部である場合は、ひび割れの発生および進展の起点となる可能性がある。本研究で使用したモルタルでは、上層の自重による下層の締め固めの影響よりも、層間の強度低下の影響が卓越したと推定される。実際、打重ね間隔がより長い層間が底面にある方向2の曲げ強度が、方向1の曲げ強度よりも若干低い。すなわち、層間の強度が曲げ強度に影響を与えていると解釈できる。

(3) 割裂引張強度および層間付着強度

プリント供試体の割裂引張強度は、コア抜きの方向に

よらず、型枠打設供試体と同程度であった(表-2)。一方、プリント供試体の層間付着強度は、型枠打設供試体の割裂引張強度と比べて、鉛直コア抜き供試体で14%、水平コア抜き供試体で29%低下した。

これらの結果は、層間に生じる引張応力の方向が強度を左右することを示唆している。割裂引張試験では層間に沿った方向と平行に引張応力が卓越するため、層間の付着強度が試験結果に及ぼす影響が限定的であると考えられる。一方、層間付着試験では層間と直角方向に引張応力が卓越する。そのため、層間の付着強度がモルタル母材の引張強度を下回る場合、層間が弱部となって破壊に至ると考えられる。

図-8にDICによって測定した破壊直前の最大主ひずみ分布の例を示す。割裂引張試験では、载荷中に層間以外の箇所で複数本の微細なひび割れが生じた後、中央部分から割裂して破壊に至った。一方、層間付着試験では微細なひび割れの発生は見られず、層間から割裂して破壊に至った。この結果からも、層間付着試験では層間が弱部となって強度を左右していると推定される。

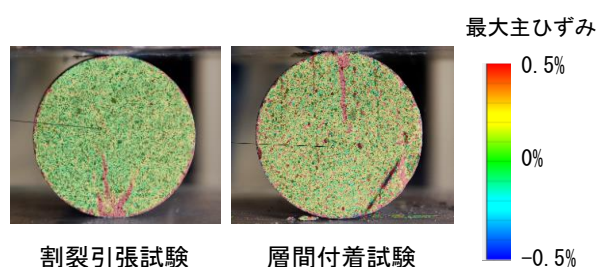


図-8 割裂引張試験および層間付着試験における最大主ひずみ分布の解析結果

3.2 破壊形態

(1) 粗大な空隙の分布

各供試体における粗大な空隙の分布を調べるため、DICで用いた供試体側面の撮影画像をグレースケールで2値化した(図-9)。

型枠打設供試体では、撮影した画像から判別できる空隙はプリント供試体と比べて著しく少ない。したがって、十分な締め固めを行った場合の気泡および空隙は、プリント供試体で生じる粗大な空隙よりも十分小さい。一方、プリント供試体では粗大な空隙が多く見られる。プリントパス2では、粗大な空隙が規則正しく配置されている点が特徴的である。また、プリントパス3では隣接する空隙同士が連結し、より大きな空隙を形成したと考えられる箇所がある。したがって、プリントパスが空隙の寸法や分布に影響を与えていることが分かる。

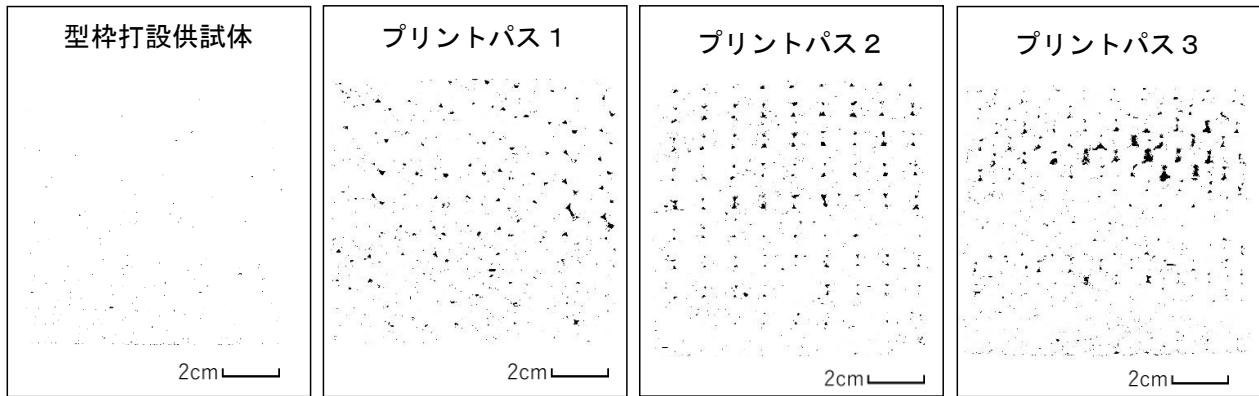


図-9 各供試体表面における空隙の分布

(2) 载荷中の最大主ひずみ分布

図-10 に DIC によって測定した型枠打設供試体における最大主ひずみ分布を示す。型枠打設供試体の圧縮強度は 71MPa であった。図-10 から、圧縮応力が 30MPa 以下の範囲では、0.5%以上の最大主ひずみを示す領域が載荷面の近傍に限られていることが分かる。したがって、十分に締め固められたモルタルの気泡および空隙では、顕著な応力集中は生じないと考えられる。また、高ひずみ領域の多くが、載荷面に直角な方向に進展していることが分かる。これは、載荷板と供試体の摩擦によって載荷面に平行に引張応力が生じ、微細なひび割れが発生・進展したためと考えられる。

プリント供試体では、全てのケースにおいて型枠打設供試体と比較して圧縮強度が低下した。また、圧縮応力が 10MPa の時点で、粗大な空隙の周囲に高ひずみ領域が生じている(図-11)。圧縮応力の増加と共に高ひずみ領域も拡大していくが、粗大な空隙を起点として発生および進展していることが分かる。また、先端が尖った形状の空隙に、より多くの高ひずみ領域が見られる。したがって、空隙の近傍に応力集中が生じており、破壊力学におけるき裂や欠陥と同様の役割を果たしている。

また、粗大な空隙の分布がひび割れの進展方向を左右している。プリントパス 3 の供試体では、空隙の寸法が

大きく、空隙同士の距離が比較的近い箇所が画像の右側上部に存在する。図-12 から、圧縮応力の増加と共に、それらの空隙を縫うような形で複数の高ひずみ領域の線が進展していくことが分かる。また、破壊直前のひずみ分布では、DIC によってひずみ値が算出されていない領域(色の付いていない領域)が見られた。これは、肉眼でも観察可能なひび割れを示しており、ひび割れが空隙に沿って進展していることが分かる。

以上の結果と考察から、フィラメントの層間に生じる粗大な空隙の寸法、形状および分布が、積層体の巨視的な強度を左右すると考えられる。これは、3D プリンティング技術を構造部材に適用する際の大きな技術的課題である。たとえば、空隙が密に分布している場合、各空隙周りの応力集中の領域が互いに干渉し、より複雑な応力場を生じる。すなわち、破壊進行領域が重なり合っており、初等的な線形破壊力学の範疇を超えている。また、空隙は 3 次元的に分布しているため、内部の損傷の進行の評価はさらに困難を極める。したがって、3D プリントされた積層体の力学性能を的確に評価するためには、空隙の 3 次元的な分布を適切に評価しつつ、空隙群の影響を平均化して巨視的な力学挙動を評価する力学モデルが必要となる。

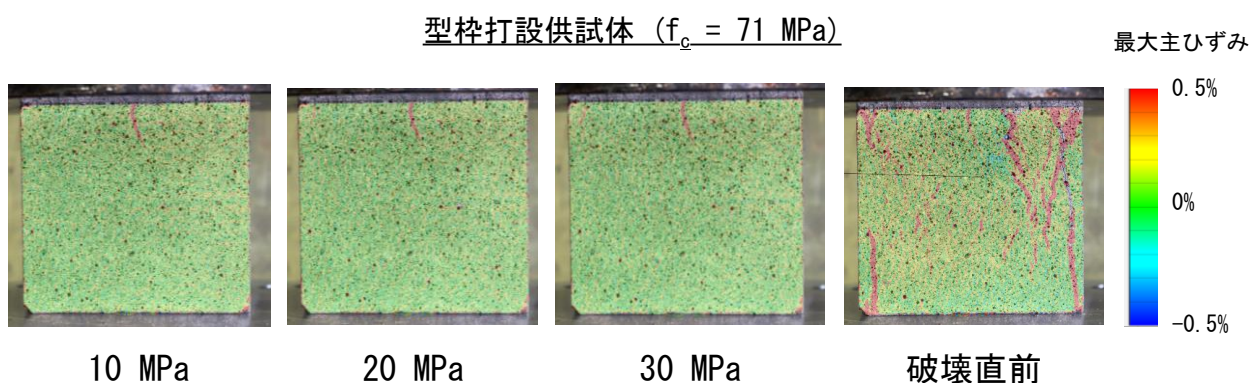


図-10 打設供試体における载荷中の最大主ひずみ分布

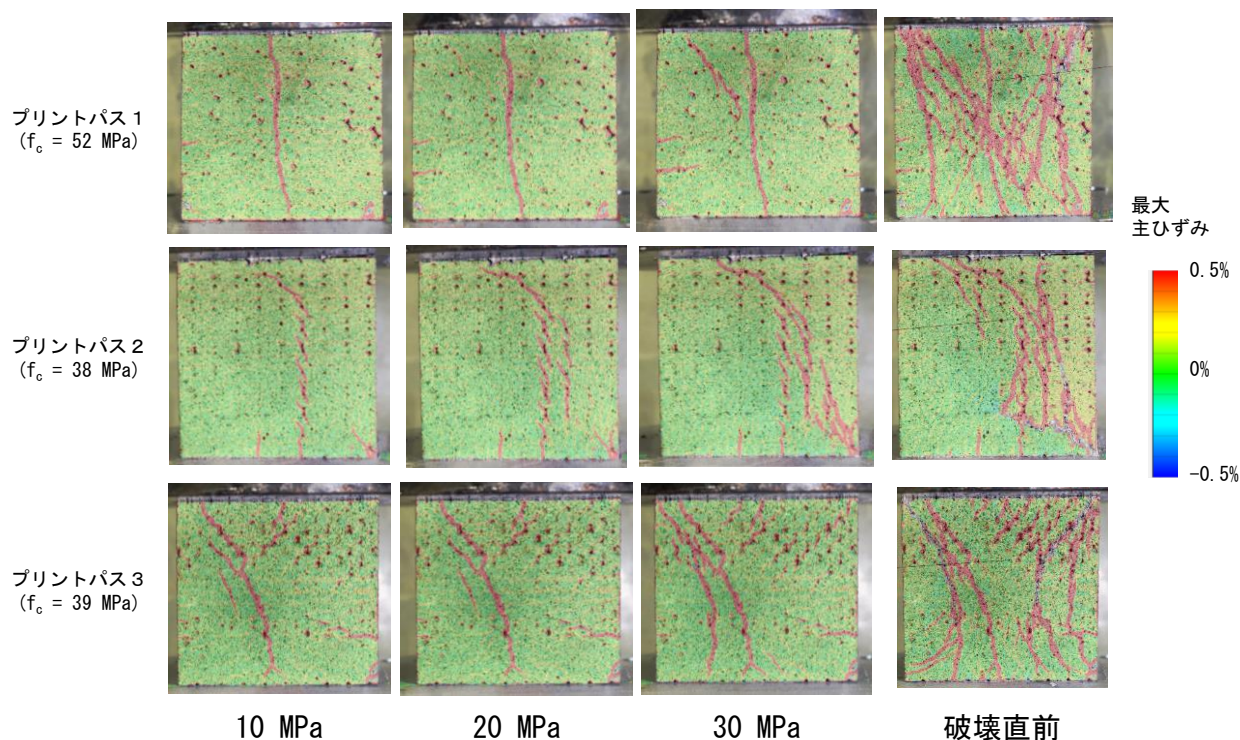


図-11 プリント供試体における载荷中の最大主ひずみ分布

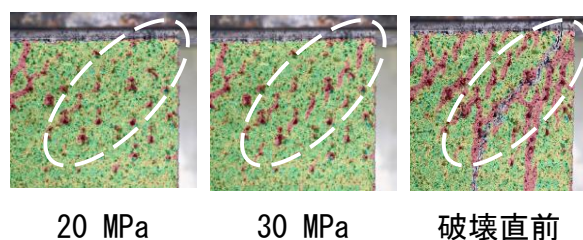


図-12 プリントパス 3 の最大主ひずみ分布の拡大図

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に挙げる。

- 1) モルタルフィラメントの層間の付着強度が母材の強度よりも低い場合、層間が弱部となって積層体の力学特性に異方性が生じる。
- 2) フィラメントの層間に粗大な空隙がある場合、空隙周囲に応力集中が生じ、積層体の強度が著しく低下する。また、ひび割れが粗大な空隙を起点として発生し、空隙に沿って進展していく。
- 3) 粗大な空隙が密に分布している場合、隣接する空隙の破壊進行領域が重なり合い、複雑な応力場と破壊の進行が生じる。
- 4) 積層体の巨視的な力学挙動を的確に評価するためには、3 次元的に分布する空隙群の影響を平均化して考慮する力学モデルの構築が必要となる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP19K15060 の助成を受けたものです。また、本研究で使用した材料は、大成建設株式会社から提供いただきました。3D モルタルプリンタは、大成建設株式会社、株式会社アクティオおよび独立行政法人国立高等専門学校機構有明工業高等専門学校の共同開発による試作機です。以上のご支援に深謝致します。

参考文献

- 1) Le, T. T. et al.: Hardened properties of high-performance printing concrete, Cement and Concrete Research, Vol.42, No.3, pp.558-566, 2012.3
- 2) Buswell, et al.: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, Cement and Concrete Research, Vol.112, pp.37-49, 2018.10
- 3) Panda, B., Paul, S. C. and Tan, M. J.: Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material, Materials Letters, Vol.209, pp.146-149, 2017.12
- 4) Wolfs, R. J. M., Bos, F. P. and Salet, T. A. M.: Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion, Cement and Concrete Research, Vol.119, pp.132-140, 2019.5
- 5) Sutton, M., Orteu, J. and Schreier, H.: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: basic concepts, theory and applications, Springer US, 2009