

# 報告 建設用コンクリート 3D プリンターによる積層構造体の層間補強に関する基礎的研究

宮田 賢優\*1・西脇 智哉\*2・古江 翔子\*3・深津 志向\*4

**要旨**：本報告では、建設用コンクリート 3D プリンターが作る積層物の問題点として、層間に生じるコールドジョイントのような不連続層の存在による強度低下を、金属繊維を埋設することで抑制するという考えを提案する。ここでは、金属繊維を層間に埋設した積層物に対して、圧縮、割裂、曲げ、せん断試験を行うことで、金属繊維が層間に及ぼす影響と力学特性を調査した。その結果、層間の金属繊維を適切に設置した場合には引張強度と曲げ強度の上昇が確認された。その一方で、金属繊維の挿入方法によっては空隙を生じて強度が低下するなどの課題も見つかった。

**キーワード**：3D プリンター，3D プリンティング，積層工法，コールドジョイント，繊維補強

## 1. はじめに

近年は様々な材料・機構による 3D プリンターが開発され、既に商用ベースにあるものも数多くある。中でも、フィラメント状の熱可塑性樹脂を融かした材料をノズルから射出して積層する機構の 3D プリンターが広く用いられている<sup>1)</sup>。建設分野においても、セメント系材料を対象とした 3D プリンティング技術の開発がされつつある。本研究では、チクソトロピー性を有するセメント系材料を吐出・積層させる形式の建設用コンクリート 3D プリンター（以下、建設 3D プリンター）を対象に検討を行う。現在、主にヨーロッパ諸国等において、セメント系材料を用いた建設 3D プリンターの研究が盛んに行われている<sup>2)3)</sup>。建設 3D プリンターには、時間短縮やコスト削減、省力化などの様々な利点がある。本邦の建設業界は就業者数の減少傾向に直面しており、少子高齢化により今後も建設技術者が減少し続けることが予想される<sup>4)</sup>。24 時間施工や建設現場の省人化を可能とする建設 3D プリンターには、現場作業員不足の解消や、危険作業の無人化による安全性向上など多方面に期待が大きい。

ここで、建設 3D プリンターによる積層物の問題点の一つとして、層間に生じるコールドジョイントのような不連続層の存在と、このことによる強度低下が挙げられる<sup>3)</sup>。そこで本研究では、層間に金属繊維を埋設することを提案し、不連続層による強度低下の抑制が可能であることを実験により確認する。ここでは、層間に用いる金属繊維の形状・材質・配置を実験パラメータとして、これを層間に埋設した積層試験体に対して、圧縮、割裂、曲げ、せん断試験を行い、金属繊維が層間に及ぼす影響と力学特性を確認する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究では、積層するセメント系材料にモルタルを使用した。このモルタルには、建設 3D プリンターに適したフレッシュ性状となるようにプレミックスされた材料を用いた。目標フロー値は、 $110 \pm 10 \text{ mm}$  (0 打)、 $140 \pm 10 \text{ mm}$  (15 打) であり、水添加率<sup>5)</sup>は 14.5% である。ここで、水添加率とはプレミックスモルタル材に対して添加する水の質量比である<sup>5)</sup>。層間に用いる金属繊維には、**写真-1**に示す繊維補強コンクリートに用いられる両端フック型の市販鋼繊維 (HDR, 密度  $7.85 \text{ g/cm}^3$ , 繊維長 30 mm, 直径 0.38 mm, 引張強度 2610 MPa 以上) と、市販の針金 (SWMGS-2, 密度  $7.59 \text{ g/cm}^3$ , 引張強度 448 MPa) を使用した。また、SWMGS-2 に関しては、直径が 0.55, 0.7, 0.9, 1.2 mm のものを長さ 30 mm に切断して使用した。



写真-1 両端フック型鋼繊維 (HDR)

### 2.2 建設 3D プリンター

**写真-2**に、本研究で使用する建設 3D プリンターを示す。門型のフレームに、写真のように上下左右方向に動く吐出ノズルが設置されており、ここに接続されたポンプからモルタルが供給される。これと併せて、下部の

\*1 東北大学 工学部建築社会環境工学科 (学生会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (学生会員)

\*4 前田建設工業株式会社 ICI 総合センター 修士 (工学)

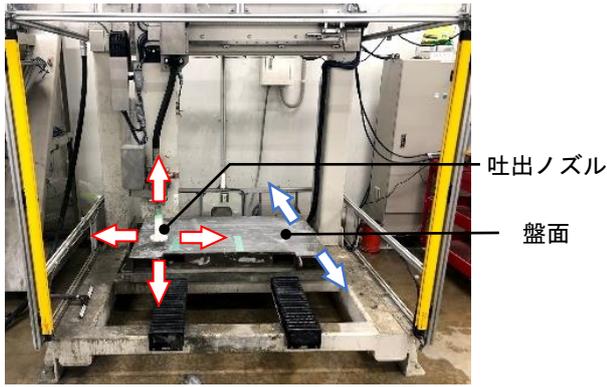


写真-2 建設 3D プリンター

盤面が写真の前後方向に移動することで、この盤面上に 3 次元的に積層物がプリントされる。

### 2.3 試験体作製方法

試験体は建設 3D プリンターによって作製した。図-1 に示す形状を 1 層として、幅 50 mm、長さ 500 mm、両端部を直径 100 mm の円状とするダンベル形状にモルタルを吐出して積層体を作製した。このとき、写真-3 に示す通り、1 層の高さを 10 mm として、これを 18 層まで積層させて、設計高さ 180 mm の積層体を得た。この積層体を、後述の試験方法に適した形状に切断し、試験体を作製した。得られた試験体は、気温 20 °C、相対湿

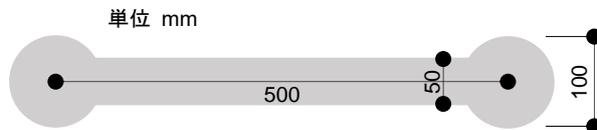


図-1 試験体形状分布図

度 50 % の恒温恒湿室にて気中養生を材齢 4 週まで行った。

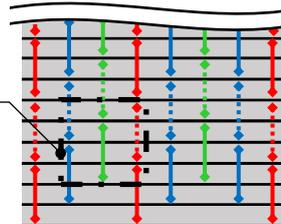
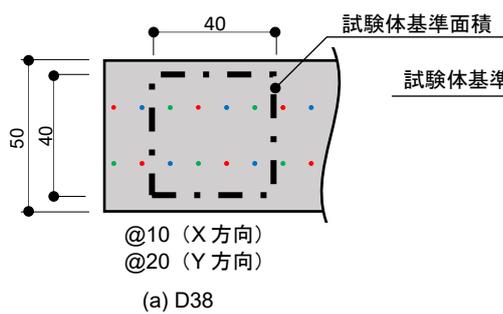
ここでは、特に補強を行わない積層体試験体に加え、層間に金属繊維を挿入した試験体を作製した。表-1 に、実験パラメータとした金属繊維の直径と埋設本数を示す。ここでは、圧縮試験体の断面積 (= 1600 mm<sup>2</sup>) を基準として、ここに埋設される SWMGS-2 金属繊維の総断面積が一定となるように計画した。図-2 には、それぞれのシリーズごとに、金属繊維を層間へ挿入した位置を示す。ただし、HDR を利用した D38 についてのみ、HDR と SWMGS-2 との引張強度比を考慮して総断面積は異なる値としている。また、図-3 には高さ方向への金属繊維の配置状況を示す。これらの図では、図-2 の平面図上

表-1 実験パラメータ

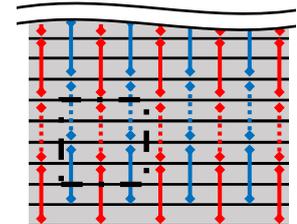
シリーズ	金属繊維直径[mm]	断面積当たりの埋設本数 [本/mm <sup>2</sup> ]	断面積当たりの金属繊維総断面積 [mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> ]
N0	—	—	—
D38	0.38	8	1.36
S55	0.55	20	4.75
S70	0.7	12	4.62
S90	0.9	7	4.45
S120	1.2	4	4.52



写真-3 積層試験体

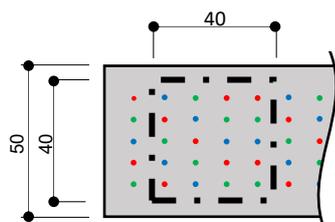


(a) 3段配置 (S55, S70, D38)



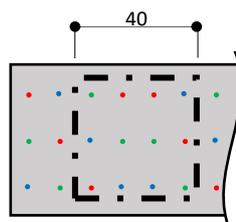
(b) 2段配置 (S90, S120)

図-3 補強金属繊維の断面配置



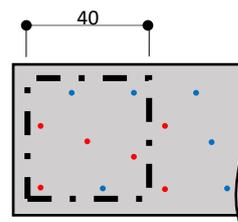
補強繊維間隔 @10 (X方向) @7 (Y方向)

(b) S55



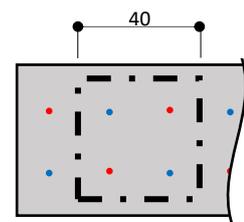
@10 (X方向) @20 (Y方向)

(c) S70



@20 or 40 (X方向) @20 or 40 (Y方向)

(d) S90



@20 (X方向) @20 (Y方向)

(e) S120

図-2 補強金属繊維の平面配置および断面配置

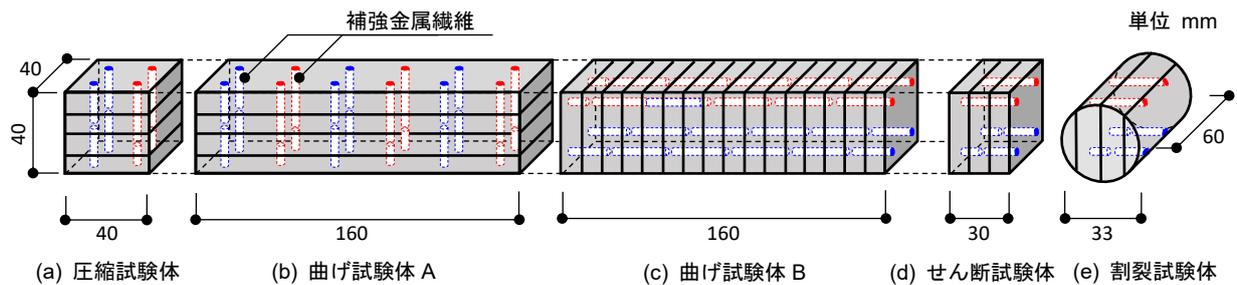


図-4 試験体概略図

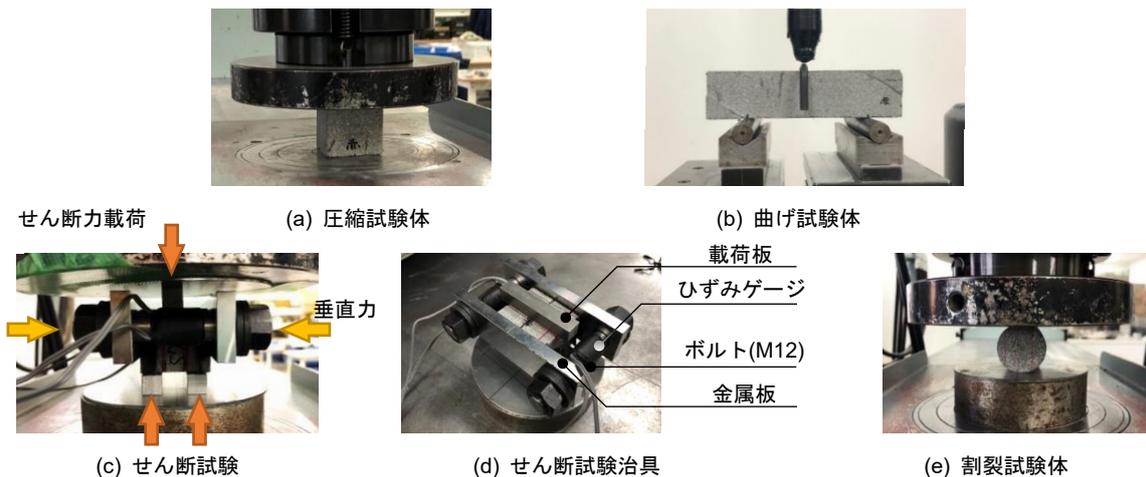


写真-4 試験状況

での点と、図-3 断面図上での線で示される金属繊維が、色分けにより対応している。金属繊維が積層体の内部でなるべく均一に分散されるよう、平面上および各層での高さ方向での配置をずらして挿入した。以上より、積層体の上下端から3層目以降のいずれの層間にも同じ量の金属繊維が配置されることから、任意の層から試験体を切り出すことが可能となる。具体的には、HDR (D38)、および細径 (S55, S70) の SWMGS-2 では、図-3(a)に従い3層を一つのグループとして、太径 (S90, S120) の SWMGS-2 では、図-3(b)に従い2層を一つのグループとして挿入した。

これらの金属繊維は、建設 3D プリンターによる積層直後に挿入した。具体的には、第3層目までを積層した後に建設 3D プリンターを一時停止し、金属繊維を予めセットしておいたガイドを用いて、手作業により所定の位置に挿入した。その後は、1層を積層するごとに建設 3D プリンターを一時停止して、同様の方法で各層の所定の位置に金属繊維を挿入した。18層の積層体を作製するのに要した時間は15分程度であるため、ここでの一時停止が試験条件に与える影響は限定的と考えられる。

## 2.4 実験方法

本実験では、建設 3D プリンターによる一般的な積層体の基本的な力学特性を、層間への金属繊維の挿入の有無と、金属繊維の分布をパラメータとした実験により取

得した。ここでは、積層物に用いる単位面積当たりの金属繊維の使用量を一定として、力学特性への影響を確認した。

圧縮試験は、JIS R 5201 を参考に、図-4(a)に示すように幅 40 mm、高さ 40 mm、長さ 40 mm の試験体を積層体から切り出して行った。切り出した試験体は、端面を研磨により調整した。この研磨面を加圧面とし、荷重用加圧板を用いて、毎秒  $2400 \pm 200$  N ( $1.5 \pm 0.125$  N/mm<sup>2</sup> 相当) の割合で、写真-4(a)の様に载荷して最大荷重を求めた。これを試験体の加圧面の面積で除した値として圧縮強度を求めた。

曲げ試験に関しては、JIS R 5201 を参考に、図-4(b)(c)に示す幅 40 mm、高さ 40 mm、長さ 160 mm の試験体を切り出し、写真-4(b)の様に3点曲げ試験を行った。なお、切り出す試験体は図-4(b)(c)に示す通り、金属繊維の配向が異なる2種類の試験体を用意した(以下、それぞれ曲げ試験 A、曲げ試験 B と表記)。毎秒  $50 \pm 10$  N ( $(3 \pm 0.6) \times 10^{-3}$  N/mm<sup>2</sup> 相当) の割合で载荷して最大荷重を求め、曲げ強度  $\sigma$  (以下、曲げ試験 A、B に対応する曲げ強度を、それぞれ曲げ強度 A、曲げ強度 B と表記) を式(1)により求めた。

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^3} \quad (1)$$

ここに、 $F$ : 曲げ荷重[N],  $L$ : 支点間距離[mm],  $b$ : 試験

片幅[mm],  $h$ : 試験片高さ[mm]である。

せん断試験に関しては、煉瓦に行う二面せん断試験<sup>6)</sup>を参考に、図-4(d)の様な幅 40 mm, 高さ 40 mm, 長さ 30 mm の三層分で行った。せん断載荷は、試験体の両端を金属板と M12 のボルトで固定して軸力を与えた状態で行い、載荷中の軸力は、このボルトに取り付けられたひずみゲージから換算して記録した。試験時の様子と使用した治具を写真-4(c)(d)に示す。せん断応力は、最大荷重をせん断面積で除した値として求めた。これと共に、Mohr-Coulomb のせん断破壊基準線を仮定して、軸応力とせん断応力の関係から、式(2)を用いてせん断強度と摩擦係数を求めた。

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma \quad (2)$$

ここに、 $\tau$ : せん断応力[MPa],  $\tau_0$ : せん断強度[MPa],  $\mu$ : 摩擦係数[-],  $\sigma$ : 垂直応力[MPa]とする。

割裂試験に関しては、JIS A 1113 を参考に、写真-4(e)の様に試験を行った。試験体の寸法は、図-4(e)に示す通り、直径 33 mm, 高さ 60 mm の試験体を積層体からコアドリルにより採取して用いた。毎秒  $180 \pm 120$  N ( $0.06 \pm 0.04$  N/mm<sup>2</sup> 相当) の割合で載荷して最大荷重を求め、引張強度 $f_t$ は式(3)によって求めた。

$$f_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (3)$$

ここに、 $f_t$ : 引張強度[N/mm<sup>2</sup>],  $P$ : 最大荷重[N],  $d$ : 試験体の直径[mm],  $l$ : 試験体の長さ[mm]である。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 物理的特性

##### (1) 圧縮試験

圧縮強度に関して、図-5 に示す通り、金属繊維の有無や分布による明確な違いは確認できなかった。圧縮強度に関しては、繊維補強コンクリートなどでも、補強繊維の混入による強度増進は限定的であることが知られている<sup>7)</sup>。特に、ここでは圧縮応力の軸方向に金属繊維を配置しているため、圧縮強度への影響は限定的であったと考えられる。さらに、N0 では試験結果のばらつきは小さかった一方で、金属繊維を用いたシリーズではばらつきが大きくなる傾向が見られた。特に S120 と S70 に関しては、圧縮強度の最小値が他のシリーズと比較して著しく小さな値を示す結果が見られた。これは、後述する試験体作製中の空隙による影響と考えられる。

##### (2) 曲げ試験

曲げ試験 A における曲げ強度は、図-6 に示す通り、金属繊維を用いた場合に減少が見られた。この結果からは、曲げ試験 A において金属繊維は曲げ強度の向上に寄与しないものと考えられる。

曲げ試験 B における曲げ強度は、図-7 に示す通り、その平均値は一定の傾向が見られない一方で、最大値に

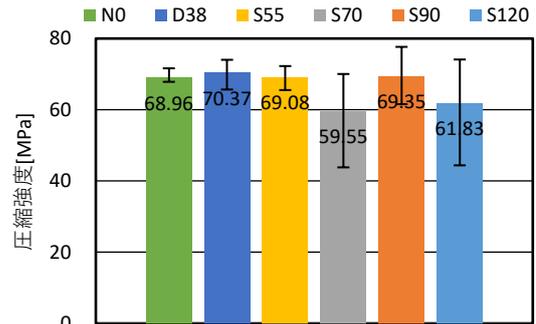


図-5 各シリーズの圧縮強度の平均値

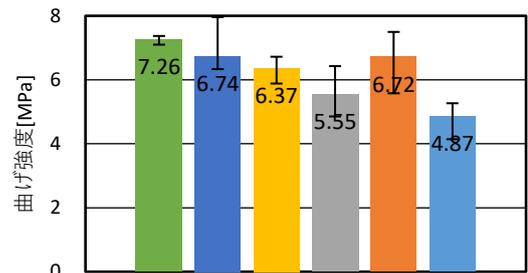


図-6 各シリーズの曲げ強度 A の平均値

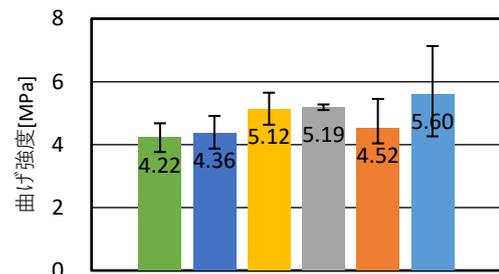


図-7 各シリーズの曲げ強度 B の平均値

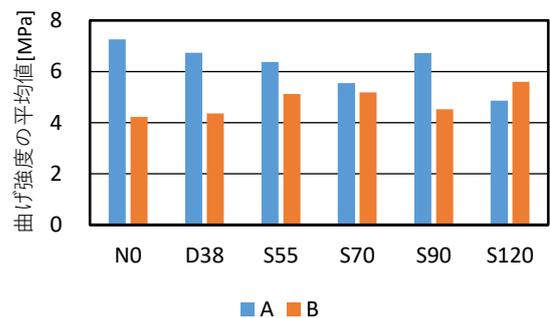


図-8 曲げ強度 A と曲げ強度 B の平均値の比較

着目すると繊維径が大きい場合に増加する傾向が確認できる。また、いずれのシリーズにおいても N0 を上回った。

図-8 に示す 2 つの曲げ強度の平均値の比較から、N0 に注目すると曲げ強度 A よりも曲げ強度 B が小さいことが確認できる。すなわち、層間が力学的な弱点となる

と考えられる。この一方で、S120 に関しては、曲げ強度 B が曲げ強度 A を上回っているため、金属繊維により特に曲げ強度 B を向上させ得るといった結果が得られた。

これらの曲げ試験から得られた結果となった理由は、後述する試験体作製中の空隙や、金属繊維の挿入角度による影響と考えられる。

ここでは3点曲げ試験としたが、純曲げ区間の大きい3等分曲げ試験についても、今後の検討課題としたい。

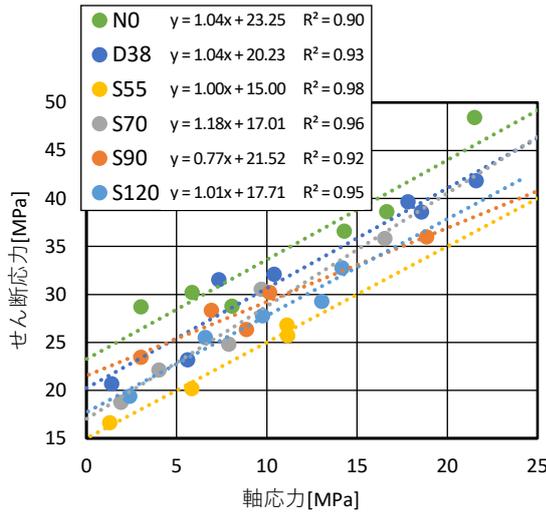


図-9 せん断試験における軸応力とせん断応力の関係

表-2 各シリーズのせん断強度と摩擦係数

シリーズ	せん断強度 $\tau$ [MPa]	摩擦係数 $\mu$	相関係数 $R^2$
N0	23.25	1.04	0.90
D38	20.23	1.04	0.93
S55	15.00	1.00	0.98
S70	17.01	1.18	0.96
S90	21.52	0.77	0.92
S120	17.71	1.01	0.95

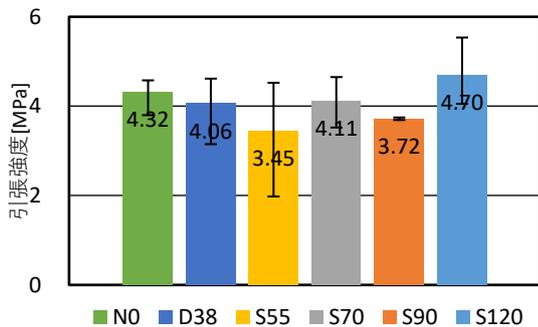


図-10 各シリーズの引張強度の平均値

### (3) せん断試験

各シリーズから得られたせん断応力と、せん断破壊時の軸応力を図-9 に示す。また、最小二乗法により算出した式(2)から得られるせん断強度と摩擦係数を表-2 に示す。決定係数  $R^2$  は全てのシリーズで 0.9 以上となり、

摩擦係数は S90 を除いて 1.0 程度となった。

また、せん断強度において金属繊維を挿入した試験体の値は、総じて N0 よりせん断強度が低くなった。金属繊維のシリーズに関しては、S90 のせん断強度が最も大きかったが、摩擦係数が 0.77 と小さい。そのため、せん断強度の信頼性が低い可能性があることを踏まえると、いずれの場合も金属繊維を用いない N0 と同様のせん断強度と考えられる。

### (4) 割裂試験

図-10 に引張試験の結果を示す。引張強度の平均値に差はないが、エラーバーで示す引張強度の最大値に着目すると、金属繊維を埋設したものは、N0 と比べて引張強度が大きくなる傾向がみられる。さらに、S120 に関しては、引張強度の最大値が他のシリーズと比べて大きな値を示しており、金属繊維が力学特性を向上させ得ることが確認できる。この理由に関しては、曲げ試験結果と同様に、後述する金属繊維の挿入時に生じる空隙や、挿入角度による影響が少なく、金属繊維が期待通りに働いたためと考えられる。

また、曲げ試験 B、せん断試験、割裂試験において、一部の試験体ではひび割れが層間に生じた。層間からひび割れが生じた試験体では、後述する不連続層の影響を受けたと考えられる。一方、層間以外の位置でひび割れが生じた試験体では、金属繊維の適切な挿入により、層間を十分に補強できたものと考えられる。

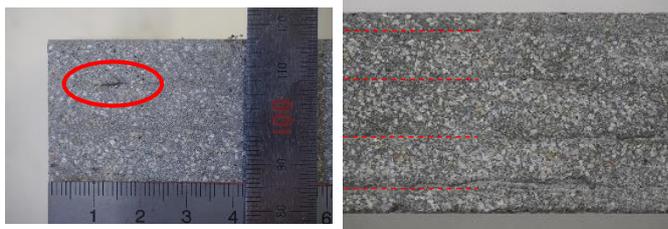
## 3.2 層間の補強とこれに伴う空隙

### 3.2.1 層間の不連続層

写真-5 に、積層体から切り出した試験体表面の様子を示す。写真-5(a)のように、層間に空隙が生じた試験体が確認された。また、写真-5(b)のように、層間に目視可能な不連続層が生じた試験体が確認された。これらの不連続層が生じている試験体では、力学特性が低下したものと考えられる。

### 3.2.2 挿入した金属繊維周囲の空隙

本研究で提案する、層間へ金属繊維を挿入する段階において、金属繊維の周囲に意図しない空隙が生じる場合が確認された。積層体の作製時には、前述のように建設 3D プリンターを随時一時停止して、手動にて金属繊維を積層体の上部から挿入している。この際に、特に金属繊維が積層体に対して垂直にならない場合など、写真-6 と写真-7 に示すように金属繊維周囲に空隙が生じる場合が見られた。また、写真-8 に示す通り、試験後の試験体の破断面を観察したところ、金属繊維の周りに大小様々な空隙が生じている場合があった。この空隙が試験体の欠陥となり、力学特性に影響を及ぼしたと考えられる。この一方で、このような金属繊維周囲の空隙は必ずしも生じるものではなく、十分にモルタルが充填されて



(a) 層間にみられる空隙 (b) 不連続層の様子

写真-5 コールドジョイント



(a) 横から見た写真 (b) 上から見た写真

写真-6 積層後の金属繊維挿入に伴う空隙



(a) 横から見た写真 (b) 上から見た写真

写真-7 成形時に見られた巻き込み空隙



(a) 曲げ(a)の破断面 (b) 曲げ(b)の破断面

写真-8 曲げ試験体の破断面の様子

いる場合には、金属繊維が強度の改善に寄与したものと考えられる。この金属繊維の周りの空隙の不安定さが、先に示した力学特性のばらつきに繋がったと考えられる。

本検討の範囲では、空隙を生じてしまう原因として、以下の点が考えられる。まず1点目として、金属繊維の挿入が必ずしも垂直に行われなかった点が挙げられる。特に直径の小さいS55やD38においては、挿入時に垂直を維持することが困難であった。鉛直方向からずれて角度が生じた状態で金属繊維をモルタルに挿入すると、写真-7のように金属繊維がモルタルを押しつけてしまい、空隙を巻き込んだと考えられる。2点目は、D38のように金属繊維が予め曲がっている場合や、Sシリーズが正確な直線形状ではない場合に、1点目と同様の理由で空隙を巻き込む場合があったと考えられる。最後に、建設3Dプリンターでは、積層後の試験体に振動を与えられないため、このような金属繊維による巻き込み空隙を除去することができなかつたと考えられる。これらの点は、今後の検討課題である。さらに、本研究では金属繊維を手作業で埋設しているが、実際の現場で使用の際は、金属繊維の埋設を自動化するための装置が必要である。この装置についても、今後の検討課題である。

#### 4. 結論

ここでは、建設3Dプリンターによる積層体について、層間に生じるコールドジョイントのような不連続層の存在による強度低下を、金属繊維を埋設することで抑制することを提案した。基礎的な実験を行った結果、下記の点が確認された。

1. 適切に金属繊維を挿入した場合には、層間を補強することで、各種の力学特性の改善が可能であること

が確認された。

2. 積層体の層間には、コールドジョイントのような不連続層が存在する場合があることが確認された。
3. 金属繊維の挿入が適切に行われなかった場合には、金属繊維の周囲に空隙を生じさせる場合があった。このような空隙は、力学特性の低下につながるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 円谷洋二, 早野誠治:『解説 3DプリンターAM技術の持続的発展のために』, (株)オプトロニクス社, 2019
- 2) 石田哲也, 木ノ村幸士: 3Dプリンティング技術がもたらす建設産業へのインパクト, コンクリート工学, Vol.58, No.1, pp45-51, 2020.1
- 3) Wangler, T., Roussel, N., Bos, F., Salet, T., Flatt, R.: Digital concrete: a review, Cement and Concrete Research, Vol. 123, Article Number 105780, 2019
- 4) 国土交通省: 平成29年度国土交通白書, p.3, 2017
- 5) 梶田秀幸, 寺西浩司, 家田葉里, 向山大貴, 宮野和樹: 建設用3Dプリンターに用いるセメント系材料の物性評価方法に関する研究(その1. プリンティング材料の押し出し性の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1273-1274, 2019.9
- 6) 中浜貴生, 畑中重光, 三島直生: 煉瓦目地のせん断試験方法および破壊基準に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, pp.1225-1232, 2009
- 7) Neves, R.D., Fernandes de Almeida, J.C.O.: Compressive behavior of steel fibre reinforced concrete, Struual Concrete, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8, 2005