論文 3D プリンティング技術で積層造形した繊維補強セメント複合材料の 力学特性評価

小倉 大季*1・阿部 寛之*2・菊地 竜*3・山本 伸也*4

要旨:繊維補強セメント複合材料で3Dプリントした積層体の力学特性を評価するために,積層体からコア抜きおよび切り出して供試体を採取し,圧縮試験,割裂引張試験ならびに曲げ試験に供した。圧縮試験の結果, 積層体から鉛直方向にコア抜きした供試体の圧縮強度は109 MPaで,圧縮強度とヤング係数の変動係数は型 枠に打ち込んで作製した供試体と比べて小さい値が得られた。また,各プリント層の界面(積層面)の方向 とひび割れが発生する方向とが一致する供試体に対して割裂引張試験を行った結果,ひび割れ発生強度は 3.50 MPaで,積層面とひび割れ面の方向が一致しない供試体に比べて3割ほど低い値となった。 キーワード:3Dプリンティング,付加製造技術,材料押出,繊維補強セメント複合材料,異方性

1. はじめに

近年,建設スケールの 3D プリンティング (Additive Manufacturing) 技術の研究開発が世界中で精力的に進め られている¹⁾。3D プリンティングとは、立体物を表すデ ータをもとにして、スライスされた 2 次元の断面形状を コンピュータで計算し、この結果をもとに材料を積層造 形して立体形状を作製する技術を指す。建設分野の 3D プリンティング技術はいくつかの方式があるが、主流と なっているのはフレッシュ状態のセメント系材料を押し 出して積層することで、立体形状を作製する技術(材料 押出方式)である。当該技術は、自由曲面を有する部材 を作製できるだけでなく、型枠工なしでのコンクリート 構造物の施工への展開なども見込まれ、様々な可能性が 期待できると考えられている。

この 3D プリンティングを用いた施工においては,補 強のための鉄筋を配筋することが難しいため,従来の鉄 筋補強の代替となりうる補強法が必要とされることがあ る。これまでにいくつかの補強法が提案されているが¹⁾, その一つに短繊維を使用した補強がある。たとえば,Le *et al.*^{2),3)} は収縮を抑えるために,Hambach *et al.*⁴⁾ は曲げ 強度を高めるために,繊維補強セメント複合材料を使用 したプリンティングを行い,その効果を評価している。

筆者ら 5^{,60} も 3D プリンティングに適した繊維補強セ メント複合材料を開発し、そのフレッシュ性状や力学特 性を検討してきた。既出の報告ⁿでは、繊維補強セメン ト複合材料で 3D プリンティングした積層体からコア抜 きおよび切り出して供試体を採取し、圧縮強度や引張強 度を評価し、型枠に打ち込んで作製した供試体との差異 が小さいことを確認した。しかし、各プリント層の界面 (以下,積層面と呼ぶ)の力学性能や積層体の異方性に ついては未検討であった。

そこで本論では、繊維補強セメント複合材料を用いて 3D プリントした積層体の力学特性を異方性も含めて評 価するために、プリント積層体からコア抜きおよび切り 出した供試体、ならびに型枠に打ち込んで作製した供試 体に対して、圧縮、割裂引張および曲げ試験を行った。 供試体のコア抜き・切出しの方向、積層面に対する載荷 方向、ならびに採取する供試体の寸法を変えることで、 それらが力学特性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験の概要

2.1 使用材料および練混ぜ方法

本研究で使用した繊維補強セメント複合材料は,水粉 体比を 0.24,砂粉体比を 0.80,繊維混入率 0.75 vol.% と した配(調)合である。粉体には,セメント,シリカフ ューム,フライアッシュ,石灰石微粉末を使用した。砂



図-1 3D プリンティング装置

*1 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)
*2 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター (正会員)
*3 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター
*4 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター 修士(工学) (正会員)

には,最大粒径 0.85 mm のものを用いた。混和剤には, ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。繊維には, 長さ6 mm,直径 0.012 mm のポリエチレン繊維を用いた。

材料の練混ぜには容量 120 L の二軸強制練りミキサを 使用し,練混ぜ時間は材料投入後から6分間とした。材 料の練り上がり直後の空気量は 5.8%,フロー試験(JIS R 5201)から得られたフロー値は 125 mm であった。

2.2 積層体のプリント方法

図-1に、本研究で用いた 3D プリンティング装置を示 す。マニピュレータを使用することでノズル先端を制御 して、所定の位置にセメント系材料を連続的に押し出す ことができる装置である。ノズルの移動速度は 100 mm/ 秒、プリント幅は 70 mm に設定し、1 層ごとのプリント 終了後にノズルを鉛直方向に 7 mm 上昇させ、次の層に 移行するように制御した。

図-2 に、本研究で作製したプリント積層体を示す。 積層体の形状は、幅 750 mm,奥行き 500 mm,高さ 350 mm の角筒形状である。プリント完了後は、表面均しや振動 台による締固めは行わずに、そのままの状態で養生に移 行した。なお、同一の配(調)合を用いて、型枠に打込 む方法でも供試体(以下、打込み供試体と呼ぶ)を採取 した。

2.3 供試体の養生および作製方法

プリントした積層体および打込み供試体は,水分が逸 散しない状態で実験室に1日間静置した後,恒温恒湿室 (温度20±2℃,湿度60±5%RH)に移動させ,材齢21 日まで封緘養生を行った。積層体は,材齢21日に恒温恒 湿室から取り出し,図-3に示すようにコア抜きおよび 切り出しを行い,力学試験に用いるための供試体(以下, プリント供試体と呼ぶ)を成形した。成形後の供試体は, 再び封緘した後,材齢27日まで恒温恒湿室で保管した。

積層体からのコア抜きや切出しは、採取方向や直径を

変えて複数本を採取した。 \mathbf{z} -1 に作製した供試体の一 覧を示す。圧縮試験用に,鉛直方向に ϕ 50 および ϕ 30 mm, 水平方向に ϕ 30 mm のコアをそれぞれ 5 本ずつ抜いた。 割裂引張試験用には,鉛直方向に ϕ 50 および ϕ 30 mm, 水平方向に ϕ 50 mm のコアを抜いた。また,3 点曲げ試 験用の供試体として,水平方向に40×40×160 mm の直 方体を10 体切り出した。

2.4 力学試験の方法

作製した供試体は,材齢27日に恒温恒湿室から取り 出して試験準備を行い,材齢28日に力学試験に供した。 力学試験は,圧縮試験,割裂引張試験ならびに3点曲げ



図-2 作製した積層体



図-3 積層体から採取した供試体

表-1 作製した供試体の一覧

試験項目	供試体名	作製方法	形状 (mm)	コア抜き/切出し方向	積層面に対する載荷方向	試験体数
	C-mold	打込み	ϕ 50 × 100	_	_	3
(JIS A 1107)	C-50V	プリント	$\phi 50 \times 100$	鉛直	垂直	5
	C-30V	プリント	$\phi 30 \times 60$	鉛直	垂直	5
	C-30H	プリント	$\phi 30 \times 60$	水平	平行	5
割裂引張試験	S-mold	打込み	$\phi 100 imes 200$	-	-	3
(JIS A 1113)	S-50V	プリント	$\phi 50 \times 50$	鉛直	_	5
	S-30V	プリント	$\phi 30 \times 30$	鉛直	-	5
	S-50Ha	プリント	$\phi 50 \times 50$	水平	垂直	5
	S-50Hb	プリント	$\phi 50 \times 50$	水平	平行	5
曲げ試験	B-mold	打込み	$40 \times 40 \times 160$	-	-	5
(JIS A 1106)	B-40Ha	プリント	$40 \times 40 \times 160$	水平	垂直	5
	B-40Hb	プリント	$40 \times 40 \times 160$	水平	_	5



図-4 円柱供試体 (φ30mm)のキャッピング状況



図-5 供試体の載荷方向(破線:積層面の方向)

試験を実施した。載荷方法は、それぞれ JIS A 1107:2012、 JIS A 1113:2018、JIS A 1106:2018 に準拠した。

圧縮試験では、ヤング係数とポアソン比を取得するた めに、ひずみゲージを貼り付けた。割裂引張試験用の供 試体には、ひび割れを検知するために、円柱底面(両面) の載荷軸と直交する方向にひずみゲージを貼り付けた。 直径 50 mm の供試体には検長 30 mm, 直径 30 mm の供 試体には検長 10 mm のひずみゲージを用いた。3 点曲げ 試験用の供試体には、底面(支点側)中央位置の長手方 向に検長 60 mm のひずみゲージを貼り付けた。

積層体から採取する供試体は、ばらつきが大きい可能

表-2 圧縮試験の結果一覧

	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
C-mold	107 (0.052)	36.9 (0.008)	0.221 (0.013)
C-50V	109 (0.012)	34.8 (0.003)	0.209 (0.009)
C-30V	95.6 (0.025)	33.7 (0.023)	_
C-30H	85.0 (0.036)	36.2 (0.036)	_

*(): 変動係数



図-6 コア抜きした供試体の外観

性が考えられたため、標本数は5とした。直径 50 mm の 円柱供試体は底面を両面研磨して平滑にしたが、直径 30 mm の円柱供試体は研磨機にセットすることが難しかっ たため、図-4のように石膏を用いてキャッピングした。

図-5 に、供試体の載荷方向の関係を整理した。図中 の破線は、積層面の方向を表している。プリントの層の 厚さは 7 mm であるため、いずれの供試体もプリント層 が4 層以上含まれていることになる。

3. 実験結果

3.1 圧縮試験

表-2 に, 圧縮試験から得られた結果の一覧を示す。 各値は,供試体5体(打込み供試体C-moldは3体)か ら得られた結果の平均値であり,括弧内は変動係数であ る。プリント供試体C-50Vは,打込み供試体とおおむね 同様の圧縮強度,ヤング係数を示した。

変動係数は,標本数が異なるため単純に比較はできな いものの,打込み供試体よりもC-50Vのほうが小さい結 果となった。プリント供試体の変動係数が大きくならな かった理由の一つとして,積層間の界面などに顕著な欠 陥が認められなかったことが挙げられる。図-6 は,積 層体からコア抜きした供試体の外観であるが,いずれの 供試体も積層間の不連続面が目視できないだけでなく, 空隙やひび割れなども観察されなかった。以上の結果か ら,3Dプリンティングで作製した積層体の品質は,ばら つきが小さかったことが示唆される。



図-7 圧縮強度とヤング係数の関係

表-3 割裂引張試験の結果一覧

	割裂ひび割れ発生強度 (MPa)
S-mold	5.40 (0.080)
S-50V	5.02 (0.184)
S-30V	5.75 (0.151)
S-50Ha	5.53 (0.057)
S-50Hb	3.50 (0.309)

* (): 変動係数

積層面の一体性については,積層面と載荷方向が平行 である C-30Hの圧縮強度が C-30V よりも11%小さい値を 示したことから,積層面の付着性能は母材よりも低い可 能性がある。

図-7に、圧縮強度とヤング係数の関係を示す。C-50V, C-30V, C-mold は圧縮強度とヤング係数に相関性が認め られるが, C-30H のみ傾向が異なった。これは,積層方 向(積層パス)の影響が表れていると推察されるが,デ ータ数が限られているため,詳細な検証をするにはさら なるデータの集積が必要である。

3.2 割裂引張試験

表-3 に、割裂引張試験から得られた結果の一覧を示 す。ひび割れ発生強度は、計測したひずみが不連続にな った時点の応力から求めた。各値は、供試体5体(打込 み供試体 S-mold は3体)から得られた結果の平均値であ り、括弧内は変動係数である。S-50Hb を除いて、ひび割 れ発生強度はおおむね同様の値であった。打込み供試体 S-mold よりもプリント供試体の変動係数が大きくなっ たのは、供試体の成形精度が影響すると推察される。プ リント供試体は、積層体からコア抜きしているため、円 柱の側面が若干波打つような形状となった。圧縮試験と は異なり、割裂ひび割れ試験は載荷面が円柱の側面とな るため、載荷板と供試体が均等に接触せずに、応力分布



図-8 引張応力-ひずみ関係

表-4 3 点曲げ試験の結果一覧

	曲げひび割れ発生強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)
B-mold	7.89 (0.034)	12.1 (0.096)
B-40Ha	8.27 (0.057)	14.4 (0.046)
B-40Hb	7.35 (0.081)	14.0 (0.090)

* (): 変動係数

に偏りが生じた可能性がある。

S-50Hb のひび割れ発生強度は 3.50 MPa であり, S-50V の 70%であることがわかる。ひび割れ発生強度が小さく なった理由は,弱面である積層面の方向とひび割れが発 生する方向とが一致したためであると考えられる。変動 係数は,ほかのケースと比較して大きい値を示した。

図-8 に、割裂引張試験で得られた応力-ひずみ関係 を示す。S-50Hbを除いたケースは、ひび割れ発生後も応 力が増加して破壊に至った。これは、ひび割れ発生後に 繊維がひび割れ面を架橋した効果である。S-50Hb は、ひ び割れが発生する面と積層面の方向が一致するため、ひ び割れ面を架橋する繊維が少なく、ひび割れの発生と同 時にひずみが急激に大きくなる挙動を示したと考えられ る。

3.3 曲げ試験

表-4 に、3 点曲げ試験から得られた結果の一覧を示 す。ひび割れ発生強度は、計測したひずみが不連続にな った時点の応力から求めた。各値は、供試体5 体から得 られた結果の平均値であり、括弧内は変動係数である。 B-40Ha ではひび割れ発生強度および曲げ強度が打込み 供試体の B-mold よりも若干大きい値を示したが、打込 み供試体とプリント供試体との差異は、割裂引張試験の 結果ほど顕著ではなかった。これは、割裂引張試験とは 異なり、ひび割れが発生する面と積層面の方向が一致す るケースが曲げ試験にはなかったためであると考えられ る。

図-9 に、曲げ試験で得られた応力-ひずみ関係を示 す。いずれの供試体も、ひび割れの発生と同時に供試体 が破断することはなく、繊維による架橋効果により応力 が再上昇して破壊に至った。打込み供試体の場合はひず みが 3000~6000 µ時点に最大応力に至ったが、B-40Ha の場合はひずみが 6000 µを超えた時点で最大応力に至 った。この挙動の差異は、モルタル内部の空隙構造や短 繊維の配向性などが供試体の製造方法によって変化した ためであると推察されるが、これを理解するにはさらな る分析が必要である。

4. おわりに

本研究では、繊維補強セメント複合材料で 3D プリン



トした積層体の力学特性を評価するために、プリント積 層体からコア抜きおよび切り出した供試体と型枠に打ち 込んで作製した供試体を用いて力学試験を行い、その結 果を考察した。供試体のコア抜き・切出しの方向、積層 面に対する載荷方向、ならびに採取する供試体の寸法を 変えて試験を行い、プリントした積層体の異方性につい ても検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 積層体から鉛直方向に直径 50 mm でコア抜きした供 試体を圧縮試験に供したところ、型枠に打ち込んで 作製した供試体と同等の挙動を示し、圧縮強度 109 MPa が得られた。打込み供試体と比べて圧縮強度や ヤング係数の変動係数が小さいことから、プリント 積層体の品質のばらつきが小さいことが示唆された。
- (2) 積層体からコア抜きした供試体を用いて割裂引張試 験を行った結果,載荷方向と積層面が一致するケー ス以外は,ひび割れ発生強度の平均値は 5 MPa 以上 であった。載荷方向と積層面が一致する供試体のひ

び割れ発生強度は、ほかの供試体と比べて 3 割程度 低下した。

(3) 積層体から 40×40×160 mm の直方体を切り出し,3 点曲げ試験に供したところ,打込み供試体と同等の ひび割れ発生強度,曲げ強度が得られた。いずれの 供試体も,ひび割れ発生と同時に供試体が破断する ことはなく,繊維による架橋効果により応力が再上 昇して破壊に至った。プリント供試体の曲げ強度は 14 MPa 以上であった。

謝辞

本論文で示した力学試験の一部は、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の活動のなかで実施した共通試験 で取り組んだものであり、委員会において実験方法に関 する貴重な意見をいただきました。ここに感謝の意を表 します。

参考文献

- 小倉大季:建設スケールの 3D プリンティング技術 に関する海外の研究動向、コンクリート工学、Vol. 56, No. 2, pp. 174-180, 2018.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F. and Thorpe, T.: Mix design and fresh properties for

high-performance printing concrete, *Materials and Structures*, Vol. 45, No. 8, pp. 1221–1232, 2012.

- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. F. and Thorpe, T.: Hardened properties of high-performance printing concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 558–566, 2012.
- Hambach, M., Möller, H., Neumann, T. and Volkmer, D.: Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (>100MPa), *Cement and Concrete Research*, Vol. 89, pp. 80–86, 2016.
- 小倉大季, Venkatesh N. Nerella, Viktor Mechtcherine:
 3D プリンティングに適したひずみ硬化型セメント 複合材料の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 1923-1928, 2018.
- 阿部寛之,小倉大季,田中博一: 3D プリンティング に用いる繊維補強セメント複合材料の積層性評価, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, V-102, 2019.
- 小倉大季,阿部寛之,田中博一: 3D プリンティング で作製した繊維補強セメント複合材料の力学特性, 土木学会第74 回年次学術講演会講演概要集,V-101, 2019.