

3D プリンティングに適した繊維補強セメント複合材料の開発と基礎物性評価

小倉 大季 阿部 寛之 菊地 竜 山本 伸也
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Basic Properties of Newly Developed Fiber Reinforced Cement-based Composite Suitable for 3D Concrete Printing

Hiroki Ogura, Hiroyuki Abe, Ryu Kikuchi and Shinya Yamamoto

材料押出方式の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た。この複合材料は、ノズルから連続的に押し出せて、高さ2mまで積層しても形状が保持される点に特徴がある。この材料で造形した積層体の力学性能を評価するために、積層体からコア抜きおよび切り出した試験体を力学試験に供した。その結果、圧縮強度85MPa以上、曲げ強度14MPa以上が得られ、曲げ応力下ではたわみ硬化挙動を呈した。さらに、表層透気試験と表面吸水試験を行い、積層体の物質移動抵抗性を評価した結果、積層体の品質のばらつきが小さく、各プリント層の界面に大きな空隙などが無いことを示唆するデータが得られた。

We have developed a fiber reinforced cement-based composite suitable for 3D printing by the material extrusion method. The major characteristics of this composite are that it can be continuously extruded from a nozzle and it maintains shape even when laminated up to a height of 2 m. In order to evaluate the mechanical properties of a laminated member made of this material, test cores were removed and subjected to mechanical testing. Compressive strength was found to be 109 MPa and bending strength 14 MPa, with deflection hardening behavior exhibited under bending stress. The interfacial integrity between printed layers was indirectly evaluated through a surface air permeability test and a surface water absorption test in addition to mechanical testing.

1. はじめに

近年、建設スケールの3Dプリンティング技術の研究開発が世界中で精力的に進められている。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。建設スケールの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ノズルから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。本技術は、コンクリート工事における型枠不要の機械化された施工を可能にするため、省人化や生産性向上に寄与するだけでなく、意匠の自由度向上や設計の合理化、型枠廃棄ゼロによる環境負荷低減などを実現できる技術としても期待される。

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

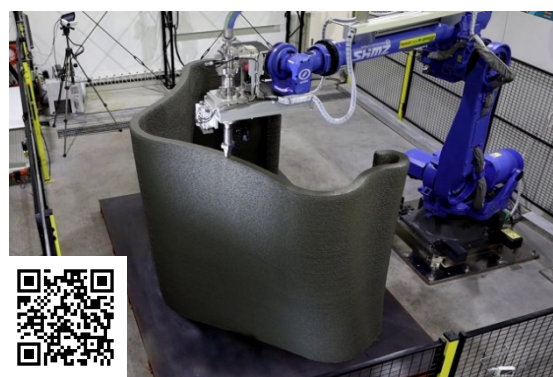


写真-1 開発した3Dプリンティング技術

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。

筆者らも材料押し出し方式の3Dプリンティングに適した繊維補強セメント複合材料「ラクツム®」(LaCTM: Laminatable Cement-based Tough Material)を開発し、優れた力学特性を有する積層体を造形できるプリンティング技術を構築した(写真-1)。この技術で作製した積層体の硬化物性を評価するために、既出の報告⁵⁾では、積層体からコア抜きおよび切り出した供試体に対して力学試験を行い、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、積層界面と呼ぶ)の一体性や力学性能、および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において、異方性も含めた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、ならびに型枠に打ち込んで作製した供試体に対して、圧縮試験、割裂引張試験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、積層界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について調べた。さらに、積層界面の一体性を間接的に評価するために、表層透気試験および表面吸水試験を行い、積層体の物質移動抵抗性も検討した。本論文は、文献^{6),7)}にすでに掲載されたものを再構成、加筆修正したものである。

2. 3Dプリンター用の繊維補強セメント複合材料

材料押し出し方式の3Dプリンティングでセメント系材料を積層造形する場合、材料に要求される性能は、当然ながら従来のコンクリートに求められる性能とは異なる。まず、細径のホースやプリントヘッドのノズルを通過させて移送しやすい性能(本稿では押し出し性と呼ぶ)が必要となる。この性能が低い場合、ノズルでの材料の閉塞が起きる可能性がある。また、プリントされた材料は、次にプリントする層(上層)の自重によって変形することを最小限に留める必要がある。自重に伴う変形は、積層体の崩壊を引き起こす可能性があるためである。この抵抗性を有する場合、積層性が高いといえる。

著者らは、この押し出し性と積層性を両立させた配合を探索するために、数値解析と実験の両輪で検討を行い⁸⁾、ラクツムという繊維補強セメント複合材料の開発に至った。フレッシュ状態では押し出し性と積層性を両立し、硬化後には高い力学性能と物質移動抵抗性を発揮する。



写真-2 高さ2mの3Dプリンティング状況



写真-3 作製した積層体



写真-4 積層体から採取した供試体

写真-2は、角筒断面(500×700mm)の積層体の造形状況である。高さ2mまで積層することが可能であり、プリント中およびプリント後も積層体は一定の形状を保ち、崩壊する予兆はなかった。高さ2mは、ロボットアームの可動範囲に伴う限界値であったが、可動範囲の制約さえなければ2m以上の積層体をプリントできる可能性は高いといえる。

3. 実験の概要

3.1 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

表-1 作製した力学試験用の供試体一覧

試験項目	供試体名	作製方法	形状 (mm)	コア抜き/切出し方向	積層面に対する荷重方向	試験体数
圧縮試験 (JIS A 1107)	C-mold	打込み	φ50×100	—	—	3
	C-50V	プリント	φ50×100	鉛直	垂直	5
	C-30V	プリント	φ30×60	鉛直	垂直	5
	C-30H	プリント	φ30×60	水平	平行	5
割裂引張試験 (JIS A 1113)	S-mold	打込み	φ100×200	—	—	3
	S-50V	プリント	φ50×50	鉛直	—	5
	S-30V	プリント	φ30×30	鉛直	—	5
	S-50Ha	プリント	φ50×50	水平	垂直	5
	S-50Hb	プリント	φ50×50	水平	平行	5
曲げ試験 (JIS A 1106)	B-mold	打込み	40×40×160	—	—	5
	B-40Ha	プリント	40×40×160	水平	垂直	5
	B-40Hb	プリント	40×40×160	水平	—	5

vol.% とした配合である。粉体には、セメント、シリカフェーム、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用した。砂には、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ーを使用し、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。

3.2 積層体のプリント方法

本研究で用いた 3D プリンティング装置は、ロボットアーム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。

写真-3 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。積層体は 2 体プリントし、1 体は力学試験に、もう 1 体は物質移動抵抗性を評価する試験に供した。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、そのままの状態養生に移行した。なお、同一の配合を用いて、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。

3.3 力学試験用の供試体の養生および作製方法

力学試験用に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、写真-4 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。表-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 φ50 および φ30 mm、水平方向に φ30 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 φ50 および φ30 mm、水平方向に φ50 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。

3.4 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 点曲げ試験を実施した。荷重方法は、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)の荷重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

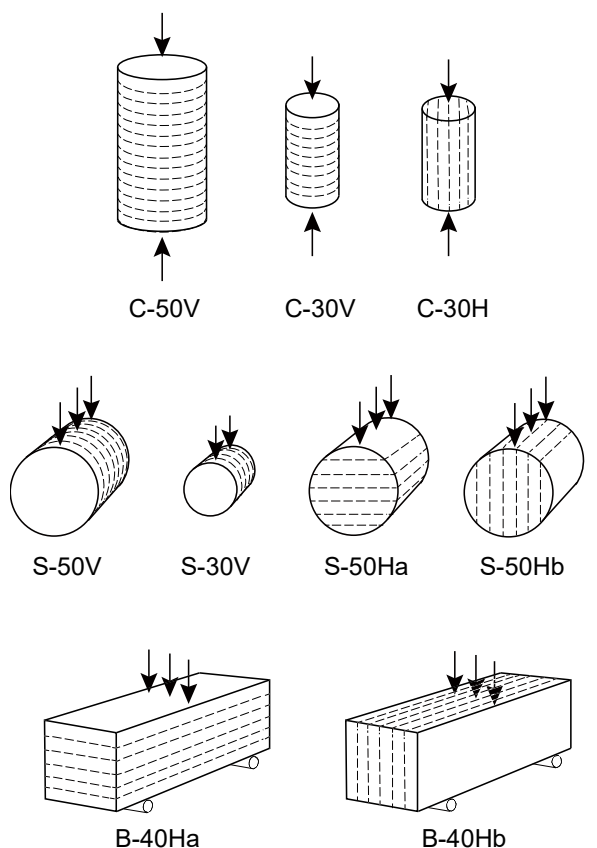


図-1 供試体の載荷方向(破線：積層界面の方向)

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性が考えられたため、標本数は5とした。直径50mmの円柱供試体は底面を両面研磨して平滑にしたが、直径30mmの円柱供試体は研磨機にセットすることができなかつたため、石膏を用いて両端部をキャッピングした。

図-1に、供試体の載荷方向の関係を整理した。図中の破線は、積層界面の方向を表している。プリントの層の厚さは7mmであるため、いずれの供試体もプリント層が4層以上は含まれていることになる。

3.5 表層透気試験および表面吸水試験の方法

物質移動抵抗性の評価に用いる積層体は、水分が逸散しない状態で実験室に1日静置した後、恒温恒湿室(温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%\text{RH}$)に移動させ、材齢7日まで封緘養生を行った。その後、材齢13日にダイヤモンドカッターを用いて、積層体の表層から10mm程度を切り出して、平滑な面を作製した。整形後の積層体は再び恒温恒湿室に移動し、材齢91日に試験するまで気中で保管した。

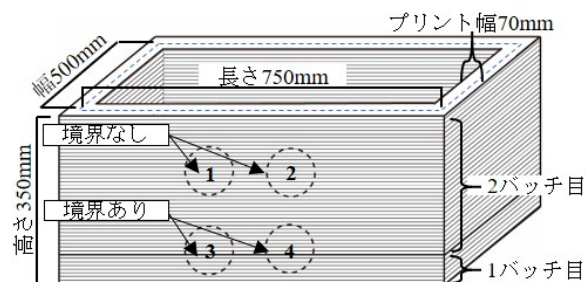


図-2 透気試験と吸水試験の測定位置

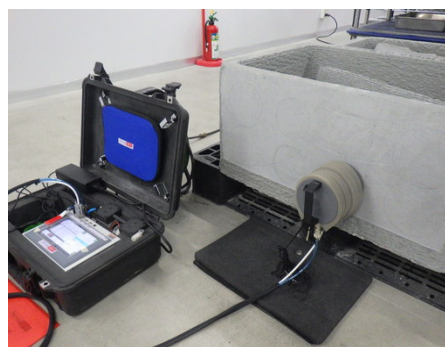


写真-5 表層透気試験(トレント法)

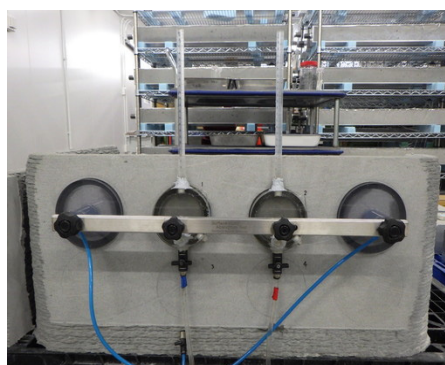


写真-6 表面透水試験(SWAT法)

図-2に、表層透気試験および表面吸水試験の測定位置を示す。表層透気試験は、写真-5に示すようにダブルチャンバーを用いたトレント法⁹⁾による試験を採用した。測定点毎に表層透気係数を算定し、品質グレードを評価した。表面吸水試験は、写真-6に示すように林・細田¹⁰⁾が開発した手法(SWAT法)を採用した。注水完了から600秒時点での吸水速度を算定し、品質グレードを評価した。なお、表層透気試験では、試験時の表面の含水率を5.5~6.0%未満とすることが推奨されている。本研究では、水分計(Tramex社、CMEX2)を用いて、積層体の表面含水率が5.0%以下であることを確認した後、透気係数および表面吸水試験を実施した。

4. 実験結果

4.1 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、ポアソン比を示した。

変動係数は、標本数が異なるため単純に比較できないものの、打込み供試体よりC-50Vのほうが小さい結果が得られた。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。写真-7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。なお、それぞれのケースの試験体寸法の平均値は、C-moldが $\phi 50.1\text{ mm} \times 97.4\text{ mm}$ 、C-50Vが $\phi 47.9\text{ mm} \times 98.9\text{ mm}$ 、C-30Vが $\phi 29.7\text{ mm} \times 56.5\text{ mm}$ 、C-30Hが $\phi 29.7\text{ mm} \times 56.2\text{ mm}$ であった。

図-3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、詳細な検証するにはさらなるデータの集積が必要である。

4.2 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、応力分布に偏りが生じた可能性がある。

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



写真-7 コア抜きした供試体の外観

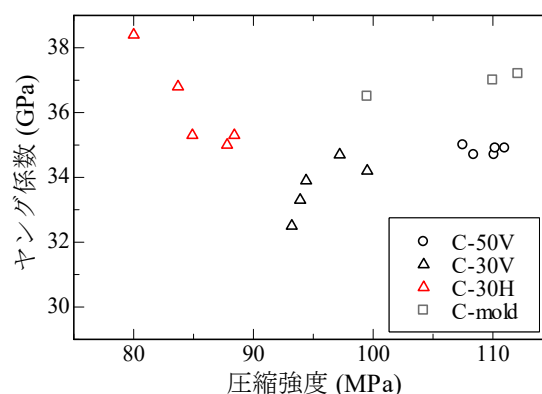


図-3 圧縮強度とヤング係数の関係

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

S-50Hbのひび割れ発生強度は3.50MPaであり、S-50Vの70%であることがわかる。ひび割れ発生強

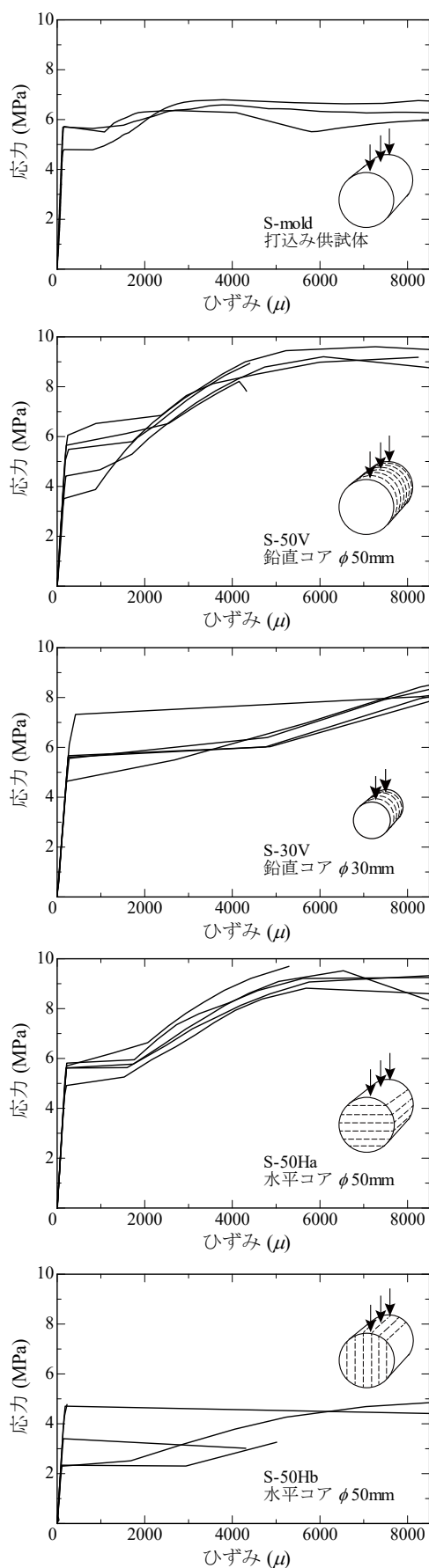


図-4 引張応力-ひずみ関係

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

度が小さくなった理由は、弱面である積層界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-4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界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。

4.3 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。曲げひび割れ発生強度は、計測したひずみが一時的に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よりも顕著ではなかった。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界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-5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にはひずみが3000~6000μ時点で最大応力に至ったが、B-40Haの場合にはひずみが6000μ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。

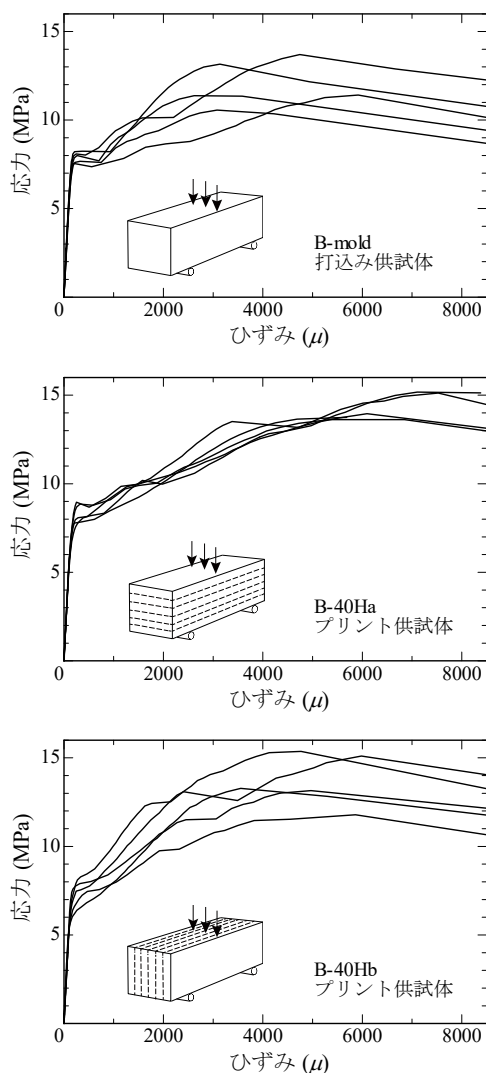


図-5 曲げ応力-ひずみ関係

4.4 表層透気試験および表面吸水試験

表-5に、表層透気試験と表面吸水試験の試験結果を示す。表層透気係数は、 $0.040 \sim 0.054 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であり、いずれの測定位置においても品質グレードは「良」($0.01 \sim 0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$)の評価であった。表面吸水係数は、すべての測定位置で $0.00 \text{ml/m}^2/\text{s}$ であり、品質グレードは「良」($0.25 \text{ml/m}^2/\text{s}$ 以下)の評価であった。なお、試験開始前の積層体の含水率は $3.4 \sim 3.6\%$ であった。これらの結果から、プリントした積層体の透気性および透水性は小さく、測定位置における物質移動抵抗性のばらつきは小さいことが明らかになった。この結果は、積層界面に大きな空隙などがなく、積層体の品質のばらつきが小さいことを示唆する。

写真-8に、プリント試験体の表層を切断した面(表層透気試験と表面吸水試験の計測面)を示す。積

表-5 表層透気試験および表面吸水試験の結果

測定点	トレント法		SWAT法		水分計 含水率 (%)
	表層透気係数 $kT(10^{-16} \text{m}^2)$	評価	表面吸水速度 $P_{600}(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$	評価	
1	0.040	良	0.00	良	3.6
2	0.040	良	0.00	良	3.4
3	0.052	良	0.00	良	3.4
4	0.054	良	0.00	良	3.5

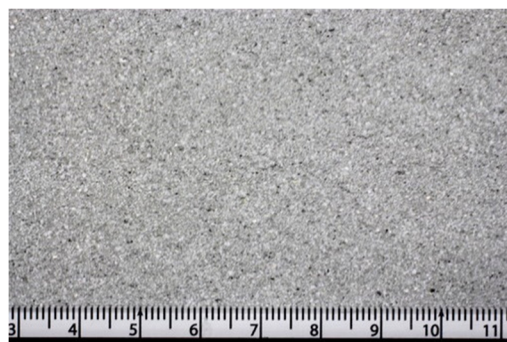


写真-8 積層体の表層をカットした面

層界面は、図の水平方向に 7mm おきに存在するが、目視ではその界面を確認できないことがわかる。また、気泡や空隙も少なく、ひび割れも認められなかった。目視観察からも品質のばらつきが小さいことが確認された。

5. おわりに

本研究では、開発した繊維補強セメント複合材料で3Dプリントした積層体の基礎物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った。また、積層界面の一体性を間接的に評価するために、表層透気試験と表面吸水試験を行った。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 50mm 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 109MPa 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、載荷方向と積層界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5MPa以上であった。載荷方向と積層界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40×40×160mm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14MPa以上であった。
- (4) 積層体の表層をカットして平滑にした面に対して、トレント法による表層透気試験およびSWAT法による表面吸水試験を行った結果、表層透気係数は $0.040\sim 0.054\times 10^{-16}\text{m}^2$ 、表面吸水速度はいずれの測定点でも $0.00\text{ml/m}^2/\text{s}$ であった。この結果から、積層界面に大きな空隙などがなく、積層体の品質のばらつきが小さいことが示唆される。

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>

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 小倉大季，阿部寛之，菊地竜，山本伸也：“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”，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1379-1384，2021
- 7) 阿部寛之，小倉大季，菊地竜，山本伸也：“3Dプリンティングで作製した繊維補強モルタル試験体の物質移動抵抗性”，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1403-1408，2021
- 8) 小倉大季，阿部寛之，菊地竜：“3Dプリンティングに用いるセメント系材料の積層性評価手法に関する検討”，土木学会第75回年次学術講演会講演概要集，V-102，2020
- 9) R.J.Torrent: “A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site”, *Materials and Structures*, Vol.25, No.6, pp.358-368, 1992
- 10) 林和彦，細田暁：“表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究”，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013