

論文 3D プリンティングの打重ねと打継ぎ条件が積層体の付着性状に与える影響

阿部 寛之^{*1}・小倉 大季^{*2}・山本 伸也^{*3}・菊地 竜^{*4}

要旨：3D プリンティングで作製した積層体の打重ね面と打継ぎ面の付着性状を評価するために、打重ね面と打継ぎ面を有する積層体に対して付着強度試験と直接 2 面せん断試験を行った。打重ね面を検討する実験ケースでは、打重ね時間間隔を 8 秒から 600 秒に変動させても、その積層界面の付着強度は同等の結果が得られた。また、打継ぎ面を有する積層体は、打継ぎ面に水湿しを施したほうが、水湿しを施さない条件よりも付着強度とせん断強度が大きくなる傾向が認められ、その変動係数は小さかった。

キーワード：3D プリンティング, 繊維補強モルタル, 打重ね, 打継ぎ, 付着強度, せん断強度

1. はじめに

近年、建設スケールの 3D プリンティングに関連する開発が世界中で進められている¹⁾。建設分野の 3D プリンティングにはいくつかの方式があるが、主流になっているのは、ノズルからフレッシュな状態のセメント系材料を押し出して積層を繰り返す方法（材料押出方式）である。当該技術は、自由な曲面を有する部材を作製できるだけでなく、型枠工なしで埋設型枠の作製²⁾やコンクリート構造物の施工への展開なども見込まれ、工期短縮や省人化などの可能性が期待できると考えられている。

積層造形に用いるフレッシュな状態の材料には、押出しに必要な流動性を維持しつつ、積層後は形状を保持する性質が要求される。さらに、硬化後の積層体の品質を向上させるために、各プリント層の界面の一体性を向上させることも重要である。一般的には、次の層をプリントするまでに要する時間（以下、打重ね時間間隔と呼ぶ）が短いほど積層界面の付着が良好になると考えられるが、実際の案件適用においては積層体が大規模になるため、打重ね時間間隔が長くなり、層間の一体性が不十分になることが懸念される。また、大規模な積層体をプリントする場合、3D プリンティングを一度中断し、翌日以降に硬化した積層体の上面（以下、打継ぎ面と呼ぶ）からプリントを再開する場合も想定される。しかし、このような打重ね面や打継ぎ面の付着性状を定量的に評価した事例³⁾は少ない。

筆者らは、3D プリンティングに適した繊維補強モルタルを開発し、そのフレッシュ性状や力学特性⁴⁾ならびに物質移動抵抗性の観点で積層界面の一体性⁵⁾を検討してきた。しかし、これらの研究では、打重ね時間間隔は 21 秒までの条件までしか検討していない。また、打継ぎ面

の一体性に関する検討は行っていない。

そこで本論では、打重ね時間間隔が積層界面の一体性に与える影響を調べるために、打重ね時間間隔を 8 秒から 600 秒に変動させて作製した積層体に対して付着強度試験を行った（以下、実験 1 と呼ぶ）。また、水平方向の打継ぎ面を有する積層体を作製し、付着強度試験、直接 2 面せん断試験を行った（以下、実験 2 と呼ぶ）。このとき、打継ぎ面の上に積層を行う前に、水湿しを行う条件と行わない条件で試験体を作製し、その影響を評価した。

2. 実験の概要

2.1 実験 1 および実験 2 の概要

プリントした積層体の概要を図-1 に示す。積層体は、1 層の積層経路が 600 mm、最上層までの高さが 170 mm、プリント幅が 80 mm とする壁面形状とした。実験 1 では、ノズルが最下層から積層体高さの半分に到達した後、一旦材料の吐出を停止し、所定の時間が経過した後に、プリントを再開させ、所定の高さまで積層を行った。なお、打重ね時間間隔の変化をすべての層に適用すると、材料の経時変化などの影響を受ける可能性があったため、積層体高さの半分の位置の層のみに対して打重ね時間間隔を変動させた。プリントした積層体は打重ね時間間隔を 8 秒、60 秒、300 秒、600 秒と変動させた 4 水準とし、計 4 体作製した。

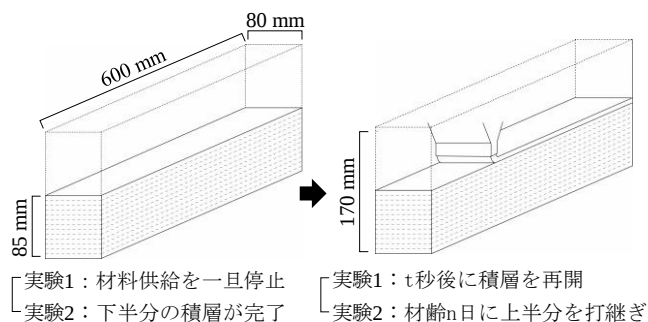
実験 2 では、3D プリンティング装置を使用した打継ぎの影響を検討するために、積層体高さの半分まで積層した後、一旦プリントを終了し、初期養生を行った。所定の日数が経過した後に、その積層体の上面にノズルを移動させ、プリントを再開し、所定の高さまで積層を行った。プリントした積層体は、打継ぎ日数を 1 日、7 日

*1 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)

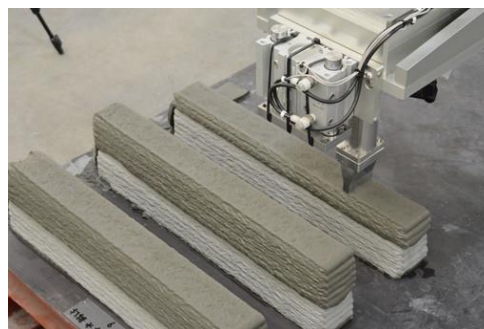
*2 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 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)

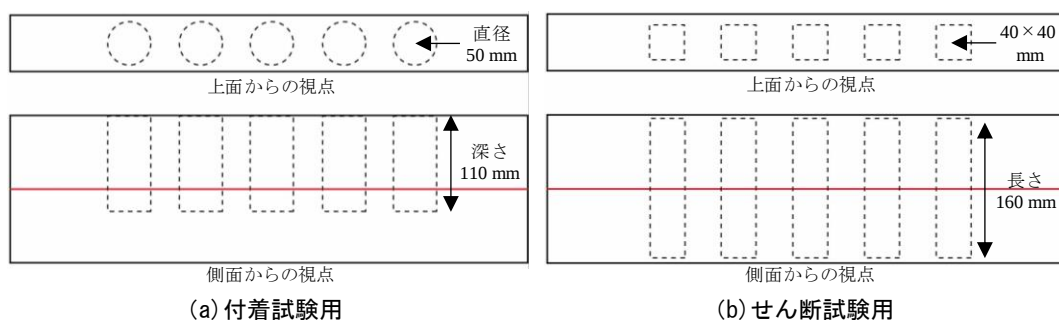
*4 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター



図ー1 プリントした積層体の概要



写真ー1 積層状況



図ー2 供試体の採取位置 (赤線：実験 1, 2 における打重ね面・打継ぎ面)

と変動させた 2 水準，打継ぎ面に水湿しを施すケースと施さないケースの 2 水準とし，比較用に打継ぎがない水準も作製した。

2.2 使用材料および練混ぜ方法

本研究で使用した繊維補強モルタルは，水粉体比 (W/P) を 0.24，砂粉体比 (S/P) を 0.80，繊維混入率を 0.75 vol.% とした配 (調) 合である。粉体には，普通ポルトランドセメント，シリカフェーム，フライアッシュ，石灰石微粉末を用いた。砂には，最大粒径 0.85 mm のものを用いた。混和剤には，高性能減水剤 (ポリカルボン酸系) を用いた。繊維には，長さ 6 mm のポリエチレン繊維 (直径 12 μ m) を用いた。練混ぜには，容量 120 L の 2 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。

2.3 材料のフレッシュ性状

材料の練上り直後の空気量は 6.3 % (実験 1)，5.7 % (実験 2)，フロー試験 (JIS R 5201) から得られるフロー値は 129 mm (実験 1)，132 mm (実験 2) であった。圧縮強度試験用の供試体は，型枠に打ち込んで作製し，材齢 1 日に恒温恒湿室 (温度 20°C，湿度 60 %RH) に移動させ，試験まで封かん養生とした。

2.4 積層方法および養生方法

3D プリンティング装置による積層状況を写真ー1 に示す。積層造形は，ノズルの移動速度を 80 mm/秒，1 層積層するごとに鉛直方向に 6.5 mm 上昇させ (積層ピッ

チ)，積層終了まで自動運転プログラムで制御した。なお，プリント時の環境は温度 $27 \pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度 40 %RH であった。

積層後はビニルシートで積層体を覆い，水分が逸散しない状態で保管し，材齢 1 日にビニルシートを解くまで初期養生を行った。また，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。材齢 1 日以降の養生については，実験 1 では，ラップフィルムで封かんし，恒温恒湿室に移動させ，試験に供するまで保管とした。実験 2 では，積層体高さの下半分を作製した後，実験 1 と同様の方法で初期養生を行った。材齢 1 日に初期養生を解き，所定の材齢で打継ぎを行う日まで，そのままの状態であつて静置した。なお，実際の適用の際は，打継ぎ面は封かん養生を行うことを想定しているが，本研究ではより厳しい条件となるように気中にて静置することにした。打継ぎを行う 30 分前に，打継ぎ面を霧吹きと濡れウエスで水湿しを行い，プリント直前に水分計で水分率を測定した。打継ぎした後は，積層体の下半分の作製と同様に初期養生に移行し，その翌日から恒温恒湿室に移動させて封かん養生した後，試験に供するまで保管した。

2.5 供試体の養生および作製方法

プリントした積層体は，材齢 14 日に恒温恒湿室から取り出し後，図ー2 に示すように切り出しを行い，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

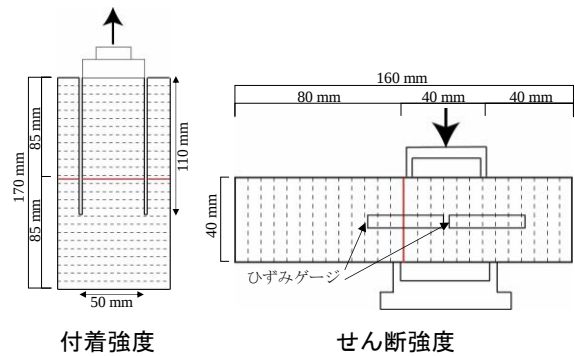
表－1 作製した供試体の一覧

実験	作製方法	打重ね時間 間隔	打継ぎ	水湿しの有無	供試体名	
					付着試験 [B]	せん断試験 [V]
1	打込み	—	—	—	B-mold	—
	プリント	8 秒			B-8s	
		60 秒			B-60s	
		300 秒			B-300s	
		600 秒			B-600s	
2	打込み	—	—	—	B-mold	V-mold
	プリント	8 秒	—	—	B-0d	V-0d
			1 日後	無	B-1d-D	V-1d-D
				有	B-1d-W	V-1d-W
			7 日後	無	B-7d-D	V-7d-D
				有	B-7d-W	V-7d-W

※[]:試験項目の略称

表－2 試験項目

試験項目	規 準	備 考
圧縮強度	JIS A 1108	供試体寸法： $\phi 50 \times 100$ mm
静弾性係数	JIS A 1149	同上
付着強度	JSCE-K 561-2013	付着力引張試験器
せん断強度	JSCE-G 553-2013	直接 2 面せん断試験， 供試体寸法：40×40×160 mm
水分率測定	—	高周波容量式，電気抵抗式の水 分計



図－3 供試体の荷重方向

(赤線：打重ね面・打継ぎ面，破線：積層界面)

ぶ)を整形した。整形後は，再び封かんした後，材齢 27 日まで恒温恒湿室で保管した。

作製した供試体の一覧を表－1 に示す。括弧内は試験項目の略称である。付着強度試験用の供試体には，コアリング機により鉛直方向に最上層から打継ぎ面より下の積層体に達するまで，円形の切込み($\phi 50$ mm，深さ 110 mm)を入れた。直接 2 面せん断試験用の供試体には，鉛直方向に 40×40×160 mm の直方体を切り出した。作製した供試体数は，強度のばらつきが大きい可能性が考えられたため，いずれのケースも 5 体とした。

2.6 打継ぎ前の水湿し方法

実験 2 の水湿し有のケースでは，打継ぎを行う 30 分前に，積層体の下半分の最上層(打継ぎ面)に霧吹きと濡れウエスで水湿しを行い，目視で確認できる水滴をウエスで拭き取った後，高周波容量式と電気抵抗式の水分計で打継ぎ面の水分率を測定した。高周波容量式は，表面から 40mm 程度の深さまでの平均的な水分率を，電気抵抗式は表層の水分率を各々評価できる水分計である。

2.7 力学試験の方法

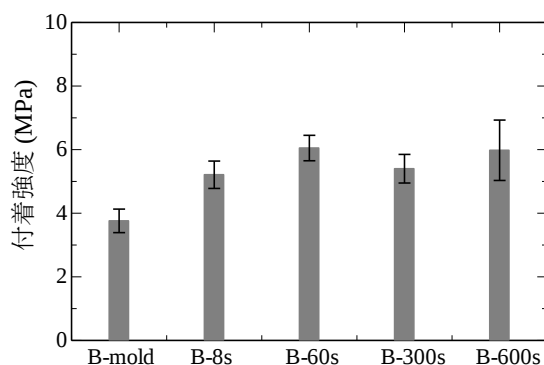
作製した供試体は，材齢 27 日に恒温恒湿室から取り出して試験準備を行い，材齢 28 日に力学試験に供した。力学試験は，圧縮強度試験，静弾性係数試験，付着強度試験，直接 2 面せん断試験を実施した。荷重方法は，表－2 に示す標準に準拠した。なお，実験 2 は，打継ぎした材料が材齢 28 日になった時点で力学試験に供した。

付着強度試験用の供試体には，円形の切込みを入れた箇所と鋼鉄付着ジグをエポキシ樹脂接着剤で貼り付けた。接着剤の硬化後，鋼鉄付着ジグと付着力引張試験器を固定し試験に供した。直接 2 面せん断試験用の供試体には，荷重面の偏心の影響を考慮して，荷重方向と直交する打継ぎ目(正面側)と打継ぎ目がない荷重点のそれぞれ中央位置の長手方向に検長 30 mm のひずみゲージを貼り付け，ひずみゲージから検知されるひずみの変化からひび割れを検知した。供試体の荷重方向は図－3 に示すとおりであり，図中の赤線は実験 1 の打重ね面，実験 2 の打継ぎ面を，破線は積層界面の方向を表している。

表－3 付着強度の結果一覧（実験 1）

供試体名	付着強度 [MPa]			破壊箇所 [数]	
	平均値	最大値	最小値	打重ね面	母材
B-mold	3.76 (9.73)	4.26	3.25	—	5
B-8s	5.21 (8.30)	5.77	4.48	—	5
B-60s	6.05 (6.66)	6.57	5.34	0	5
B-300s	5.40 (8.36)	5.77	4.54	0	5
B-600s	5.98 (16.0)	6.67	4.15	1	4

※() : 変動係数 [%]



図－4 付着強度の平均値と標準偏差（実験 1）

3. 実験 1 の結果および考察

3.1 圧縮強度試験および静弾性係数試験

型枠に打ち込んで作製した供試体の材齢 28 日時点の圧縮強度は 115 MPa であった。また、静弾性係数は 38.0 GPa であった。

3.2 付着強度試験

付着強度試験から得られた結果の一覧を表－3 に、付着強度の平均値と標準偏差を整理した結果を図－4 に示す。各値は、試験位置 5 箇所での平均値で、括弧内は変動係数である。

作製方法の差異に着目すると、プリント供試体 B-8s が付着強度 5.21 MPa であり、打込み供試体 B-mold に対して同等以上の強度であった。打重ね時間間隔の影響では、B-60s、B-300s、B-600s が、B-8s と概ね同等であり、付着強度 5 MPa 以上が得られた。破壊位置を観察すると、9 割以上が母材側で破壊し、打重ね面は 1 箇所のみだった。

以上の結果より、打重ね時間間隔が 8 秒から 600 秒までであれば、積層界面の付着強度に与える影響は小さいことが明らかとなった。

4. 実験 2 の結果および考察

4.1 圧縮強度試験および静弾性係数試験

型枠に打ち込んで作製した供試体の材齢 28 日時点の圧縮強度は 114 MPa であった。また、静弾性係数は 37.6 GPa であった。

表－4 水分率の結果一覧（実験 2）

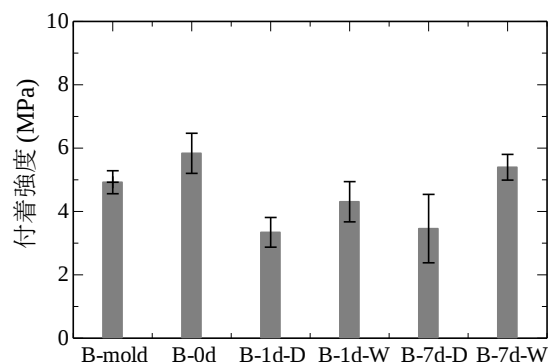
材齢	水湿しの有無	高周波容量式 [%]	電気抵抗式 [%]
1 日	無	6.5 (2.20)	4.1 (6.04)
	有	6.8 (7.38)	8.3 (9.90)
7 日	無	4.4 (1.27)	1.9 (3.39)
	有	5.4 (20.4)	8.7 (25.2)

※() : 変動係数 [%]

表－5 付着強度の結果一覧（実験 2）

供試体名	付着強度 [MPa]			破壊箇所 [数]	
	平均値	最大値	最小値	打継ぎ面	母材
B-mold	4.92 (0.363)	5.47	4.49	—	5
B-0d	5.84 (10.8)	6.57	4.76	—	5
B-1d-D	3.34 (14.0)	3.85	2.55	5	0
B-1d-W	4.31 (14.7)	4.93	3.51	5	0
B-7d-D	3.46 (31.2)	5.05	2.40	4	1
B-7d-W	5.40 (7.52)	5.97	4.78	5	0

※() : 変動係数 [%]



図－5 付着強度の平均値と標準偏差（実験 2）

4.2 水分率測定

打継ぎ面の水分率を測定した結果の一覧を表－4 に示す。各値は、9 箇所での測定した平均値で、括弧内は変動係数である。いずれの材齢においても、水湿しを行うと、電気抵抗式では水分率が增加する傾向が認められたが、高周波容量式では顕著な差を確認できなかった。使用した材料が 2.2 節に示した水粉体比 0.24 の配（調）合であり、透水性が小さいため、水湿しで与えた水分は、打継ぎ面の表面にのみ留まっていたと考えられる。

4.3 付着強度試験

付着強度試験から得られた結果の一覧を表－5 に、付着強度の平均値と標準偏差を整理した結果を図－5 に示す。各値は、試験位置 5 箇所での平均値で、括弧内は変動係数である。

作製方法の差異に着目すると、プリント供試体 B-0d が付着強度 5.84 MPa であり、打込み供試体 B-mold と同等

表-6 せん断試験の結果一覧

供試体名	せん断強度 [MPa]		
	平均値	最大値	最小値
V-mold	10.8(11.3)	12.9	9.20
V-0d	7.34(8.03)	7.96	6.25
V-1d-D	5.50(18.0)	6.68	4.33
V-1d-W	6.43(6.31)	6.83	5.71
V-7d-D	7.21(17.5)	9.35	5.91
V-7d-W	7.83(9.28)	9.03	6.75

※(): 変動係数 [%]

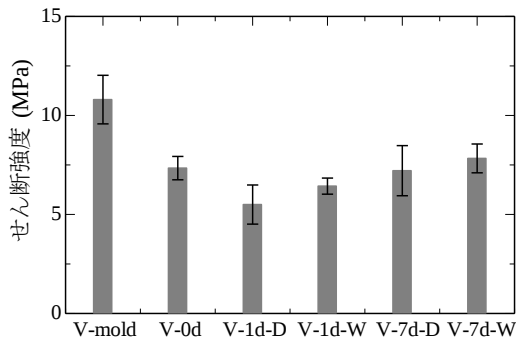


図-6 せん断試験の平均値と標準偏差

以上の付着強度を示し、実験 1 と同様の傾向だった。B-1d-D と B-7d-D では、強度差がほとんど生じておらず、打継ぎ日数が付着強度に与える影響は小さかった。

水湿しの影響に着目すると、水湿しを行った B-1d-W、B-7d-W のほうが、水湿しを行わない B-1d-D、B-7d-D よりも付着強度が 3 割程度大きい傾向であった。いずれの打継ぎ日数においても、水湿しを行うことにより打継ぎ面の付着強度が向上できることが確認された。

打継ぎを行った条件に着目すると、B-7d-W が最も強度が大きく、付着強度 5.40 MPa が得られた。一方、B-7d-D は、付着強度が小さく、変動係数が最も大きい値を示した。B-7d-D の付着強度が小さくなった要因は、打継ぎ面がドライアウトした影響が大きかったと考えられる。水分率の結果(表-4)からも気中にて静置中に乾燥が進行していることが確認でき、後から積層したフレッシュな状態の材料の水分が打継ぎ面を介して移動したためと推察される。破壊位置の観察では、打継いだプリント供試体の 9 割以上が打継ぎ面で破壊した。

4.4 せん断試験

直接 2 面せん断試験の試験状況を写真-2 に、せん断試験から得られた結果の一覧を表-6 に、せん断強度の平均値と標準偏差を整理した結果を図-6 に示す。

作製方法の差異に着目すると、プリント供試体 V-0d のせん断強度は 7.34 MPa であり、打込み供試体 V-mold よ

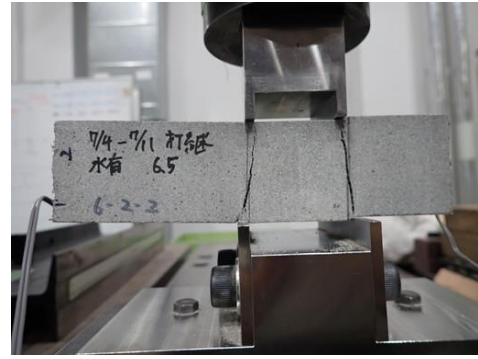
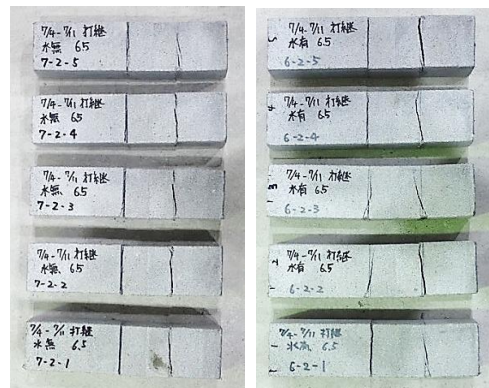


写真-2 せん断試験の状況



(a) V-mold

(b) V-0d



(c) V-7d-D

(d) V-7d-W

写真-3 破壊状況

りも小さい値を示した。これは、プリント供試体のほうでは、積層界面を繊維が架橋していないため、ひび割れ後の繊維による補強効果が期待できなかったことが理由と考えられる。

水湿しの影響に着目すると、打継ぎ日数によらず、水湿しを行った V-1d-W、V-7d-W は、せん断強度が 1 割程度大きくなる傾向であった。水湿しの影響は、付着強度試験の結果ほど顕著ではなかったが、せん断強度の向上が確認された。打継ぎを行った条件では、V-7d-W が最も強度が大きく、せん断強度 7.83 MPa が得られた。

試験後のひび割れ発生状況を写真-3 に示す。プリント供試体 V-0d は載荷点直下の積層界面を跨ぐように

斜め方向のひび割れが生じており、打込み供試体 V-mold と同様の傾向であった。水湿しを施さなかった V-7d-D は、供試体のすべてが打継ぎ目に沿って垂直方向のひび割れが発生したが、水湿しを施した V-7d-W は、一部の供試体に打継ぎ目を跨ぐような斜め方向のひび割れが確認された。ひび割れの特徴が V-0d と類似しており、せん断強度の平均値が同等以上であったことから、水湿しを行うことで打継ぎ面の付着性状が良好になったと考えられる。

以上の結果より、水湿しを行ったほうが、打継ぎ面のせん断強度を向上できることが確認された。

5. おわりに

本論では、繊維補強モルタルで 3D プリンティングして作製した積層体の打重ね面と打継ぎ面の付着性状を定量的に評価するために、プリントした積層体から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。打重ね時間間隔、打継ぎ日数ならびに水湿しの有無を変えて試験を行い、プリントした積層体の付着性状に与える影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 打重ね時間間隔の検討では、積層体に対して鉛直方向に円形の切込みを入れて付着強度試験に供したところ、打重ね時間間隔を 8 秒から 600 秒まで変動させても同等の結果を示し、付着強度 5 MPa 以上が得られた。600 秒までの打重ね時間間隔であれば、積層界面の付着強度に与える影響は小さいことが明らかとなった。
- (2) 打継ぎを有する積層体を付着強度試験に供したところ、材齢 7 日に水湿しを施したうえで打継ぎを行

った条件では、付着強度 5.40 MPa が得られた。水湿しを行わない条件よりも強度が大きく、変動係数が小さいことから、水湿しを施すことで積層体の打継ぎ面の付着性状が向上することを確認した。

- (3) 打継ぎを有する積層体から 40×40×160 mm の直方体を切り出し、直接 2 面せん断試験に供したところ、材齢 7 日に水湿しを施したうえで打継ぎを行った条件では、せん断強度 7.83 MPa が得られた。水湿しを施したほうが、水湿しを施さない条件よりもせん断強度が大きくなる傾向が認められた。

参考文献

- 1) R.A.Buswell, W.R.Leal de Silva, S.Z.Jones et al.:3D Printing using concrete extrusion:A roadmap for research, Cement and Concrete Research 112, pp. 37-49, 2018.
- 2) 山本伸也, 小倉大季, 阿部寛之, 菊地竜: 建設用 3D プリンティング技術の開発とその実用化, コンクリート工学, Vol.59, No.8, pp.655-660, 2021.
- 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) 小倉大季, 阿部寛之, 山本伸也, 菊地竜: 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.
- 5) 阿部寛之, 小倉大季, 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モルタルの積層界面の一体性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1552-1557, 2022.