

# 論文 3D プリンティングで作製した埋設型枠と一体化したコンクリートの諸特性に関する基礎的検討

山田 悠二\*1・服部 周平\*2・鎌田 太陽\*3・渡邊 学歩\*4

**要旨**：本研究では、材料押出方式の建設用 3D プリンティングにより埋設型枠を作製し、この埋設型枠にコンクリートを打設した場合におけるブリーディング特性、付着性、曲げ強度、鉄筋の腐食状況について検討を行った。その結果、埋設型枠にコンクリートを打設した場合、上面においてはブリーディングによる水の上昇は確認されなかった。フィラメント高さや積層によって生じる凹凸の有無は付着性への影響が小さく、コンクリートの水セメント比の影響がもっとも大きかった。曲げ強度はフィラメント高さが低い方が大きくなった。鉄筋の腐食は埋設型枠の使用によって生じにくくなる傾向にあることを確認した。

**キーワード**：3D プリンティング、材料押出方式、埋設型枠、付着性、曲げ強度、腐食抵抗性

## 1. はじめに

一般的なコンクリート施工では、型枠工事が行われ、その後にコンクリートの打設が行われる。一方で型枠工事における従業者の高齢化が進むとともに、従業者数が減少していることが指摘されている<sup>1)</sup>。したがって、今後もこれまでのような型枠工事を要するコンクリート施工を継続できなくなることも考えられ、型枠工事における省人化や工期短縮に対する抜本的な対策が必要である。

建設用 3D プリンティング（以下、3DP と称す）は、自由な造形を可能とするとともに、工期短縮や省人化を図ることができる技術として関心が高まっている<sup>2)</sup>。3DP を適用した施工実績は年々増加しており、用途先も拡大してきている<sup>3)</sup>。最近では、3DP により作製した積層体の埋設型枠としての利用について着目されてきており、公共工事においても埋設型枠としてフォーミングに利用され、橋梁の基礎に適用された実績もある<sup>4)</sup>。埋設型枠の作製に 3DP を適用することで、埋設型枠の作製に掛かる人員を減らすことができるだけでなく、足場や型枠の設置および撤去が不要となり、工期短縮にも寄与すると考えられる。さらに、3DP の方式として主流となってきた材料押出方式では<sup>5)</sup>、主に積層性の確保を目的として水結合材比を低いものとしたモルタルを印刷材料として用いることが多く、高強度となりやすい。このため、構造物の力学的性能や耐久性に有利に働く可能性もある。

その一方で、3DP により作製した埋設型枠（以下、3DP 型枠）を使用した場合における知見はまだ少なく、今後、重要構造物へのさらなる適用拡大を図るうえで、3DP 型枠とコンクリートが一体となった構造体における力学的特性や耐久性に関する知見を十分に蓄積しておく必要が

あると考えられる。

以上を踏まえて本研究では、材料押出方式によって作製した 3DP 型枠にコンクリートを打設した場合の基礎的な知見を得ることを目的に、ブリーディング特性、付着性、曲げ強度特性、コンクリート中の鉄筋の腐食特性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

#### (1) 使用材料および配合条件

3DP に使用したモルタルは、セメント、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームで構成される結合材、細骨材、混和材、繊維がプレミックスされた材料に、水結合材比が 32%となるように水を加えて練り混ぜたものとした。後述の付着強度試験および曲げ強度試験を実施した時のこのモルタルの圧縮強度（材齢 35 日）は 61.4N/mm<sup>2</sup>であった。コンクリートに使用した材料は、上水道（記号：W、密度：1.00g/cm<sup>3</sup>）、普通ポルトランドセメント（記号：C、密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）、細骨材（記号：S、表乾密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）、粗骨材（記号：G、表乾密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）、AE 減水剤（記号：Ad）とした。コンクリートの配合を表-1 に示す。配合は W/C=40%と W/C=65%の 2 水準とした。

#### (2) 試験体形状および養生

材料押出方式によりモルタルを積層して 3DP 型枠を作製した。作製した 3DP 型枠の概要を図-1 に示す。3DP 型枠の形状は矩形とし、外寸の一辺が 150mm、フィラメント厚さを 30mm とした。また、フィラメント高さを 10mm と 20mm の 2 水準とした。均質性を十分に確保する目的で 3DP 型枠のプリンティングの翌日から、7 日間

\*1 山口大学 工学部社会建設工学科講師 博（工）（正会員）

\*2 山口大学 工学部社会建設工学科

\*3 (株) Polyuse 材料研究開発部門 博（工）（正会員）

\*4 山口大学 工学部社会建設工学科准教授 博（工）（正会員）

表-1 コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				Ad (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度* (N/mm <sup>2</sup> )
		W	C	S	G				
65	47	170	262	855	1008	1.5	8.0	4.1	19.4
40	45	160	400	779	996	0.9	14.0	5.2	35.4

\*試験体は気中養生(20±4°C)を28日間行った。

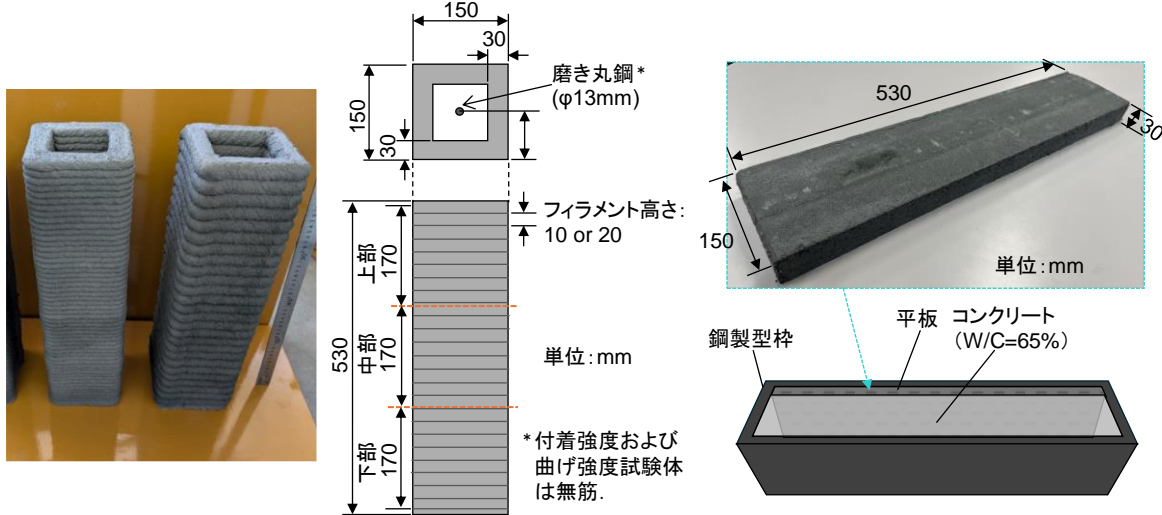


図-1 3DP型枠の概要

図-2 平板型枠を用いた試験体の概要

の封緘養生を行った。その後、3DP型枠をコンパネに立てた状態で設置し、コンパネと3DP型枠の界面の周囲をシーリングし、シーリング材の硬化後にコンクリートを打設した。コンクリートの打設から24時間経過後、コンクリート上面が硬化していることを確認し、上面と底面をアルミテープで被覆した状態で28日間の気中養生(20±4°C)を行った後、付着強度試験、曲げ強度試験、腐食試験に供した。なお、腐食試験に使用した試験体に関しては、φ13mmの磨き丸鋼を3DP型枠の中心に設置し、早期に腐食を生じさせるため十分な塩分を供給できるようにCl-濃度5kg/m<sup>3</sup>となるようにNaClを外添加したコンクリートを打設した。また、コンクリートの打設の際、3DP型枠内部に水湿しを行ってから打設する場合も設けた。水湿しは、コンクリート打設の前日に、十分に吸水した布を3DP型枠内部に貼付して行った。なお、高周波型の水分形で測定した水湿し前の3DP型枠の表面含水率はいずれも3%程度であった。

付着強度試験では、積層により生じる凹凸の有無の影響を確認するため、3DPにより3DP型枠と同じ厚さ30mmの平板を作製し、この平板とコンクリートを付着させた水準も設けた。平板はプリンティング後、こてで表面を平滑に均した。硬化後は3DP型枠と同様の工程で養生を行った。平板を用いた試験体の作製にあたっては、図-2のように、平板を鋼製型枠(内寸:150×150×530mm)の側面に配置した後、コンクリートを打設した。

## 2.2 試験方法

### (1) ブリーディング試験方法

ブリーディング試験をJCI-S-015-2018に準拠して実施した。試験容器は、内径:125mm、高さ:250mmのブリキ製のモールドとした。試料の高さは212±3mmとした。また、3DP型枠に打設したコンクリートについても、打設面上昇したブリーディングを経時的に採取した。このとき、ブリーディングの採取時間間隔はJCI-S-015-2018に準拠したが、ブリーディングを採取する際には試験体を傾けることなく実施した。

### (2) 付着強度試験方法

付着強度試験の実施状況の一例を図-3に示す。測定はJSCE-K-561-2023に準拠して実施した。アタッチメントは直径50mmの円形のものを使用した。手順としては、まず、内径50mmのコアビットを用いて試験体表面から円形に切込みを入れた。このとき、切込みの深さは40mmとし、コンクリートに10mmの深さまで切込みを入れた。その後、アタッチメントと3DP型枠をエポキシ樹脂で接着した後に測定を実施した。測定箇所について、3DP型枠を用いた試験体の場合は、試験体の底面から10~180mmまでを下部、180mm~350mmを中部、350mm~520mmを上部とし、ある一面とその対面で2箇所ずつ測定を行い、上部・中部・下部でそれぞれ4箇所ずつとして、1つの試験体に対して計12箇所を測定した。平板を用いた試験体に関しては、6箇所の測定を行った。結果については、測定器で読み取った荷重をアタッチメントの断面積で除して付着強度を求めた。

### (3) 曲げ強度試験方法

3DP 型枠の積層条件や打設前の処理の相違が材料レベルで強度に与える影響について検討するため、曲げ強度試験を JIS A 1106 に準拠して実施した。曲げ強度試験の実施状況の一例を図-4 に示す。荷重点を 2 点設け、荷重点間の距離を 150mm、支点間の距離を 450mm とした三等分点荷重とした。支点および荷重点となる箇所には、早強ポルトランドセメントを用いた W/C=27% のセメントペーストに石こうを少量添加したものを材料としてあらかじめキャッピングした。また、曲げ強度は式 (1) により算出し、3DP 型枠にコンクリートを打設したケースは断面を 150×150mm として断面二次モーメントを求めた。3DP 型枠単体のケースでは、式 (2) の通り、打設したコンクリートの断面 (3DP 型枠の内寸法) を 90×90mm とし、この分を差し引いて断面二次モーメントを求めた。

$$f_b = My/I \quad (1)$$

$$I = (BH^3 - bh^3)/12 \quad (2)$$

ここに、 $f_b$ : 曲げ強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $M$ : 最大曲げモーメント、 $I$ : 断面二次モーメント、 $B$  および  $H$ : 3DP 型枠の外寸の幅および高さ (=150mm)、 $b$  および  $h$ : 3DP 型枠の内寸の幅および高さ (=90mm)

### (4) 腐食試験方法

3DP による積層層は層間の緻密性に対する懸念もある反面、3DP による積層に用いられる材料は一般的なコンクリートと比べて緻密であることから、埋設型枠として使用した場合に物質移動抵抗性が高くなり、腐食に対する抵抗性が向上する可能性があると考え、本検討で検証した。試験体の端面をエポキシ樹脂でシールした状態で湿潤環境とした容器 (温度 20℃、相対湿度 90%) に設置し、7 日ごとにコンクリート中の鉄筋の自然電位を JSCE-E 601-2018 に従って測定した。コンクリート中の鉄筋にはリード線をはんだ付けしておき、これを DC/AC マルチメータに繋ぎ、飽和塩化銀ガラス電極を用いて測定を行った。測定位置は各試験体で付着試験と同様の上・中・下部の中央とし、その平均を測定値とした。測定値は以下の式(3)により CSE 電位に変換した。

$$E_{CSE} = E_{SSE} - 120 - 2.00 (t - 25) \quad (3)$$

ここに、 $E_{CSE}$ : 飽和硫酸銅電極使用時の自然電位、 $E_{SSE}$ : 飽和塩化銀電極使用時の自然電位、 $t$ : 測定時の温度 (℃)

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ブリーディング特性の検討

表-2 にブリーディング試験結果を示す。コンクリートをモールドに打設してブリーディング試験を実施した場合は、いずれの W/C のコンクリートにおいてもブリーディングによる水の上昇が認められた。一方、3DP 型枠にコンクリートを打設した場合には各種条件によらず、

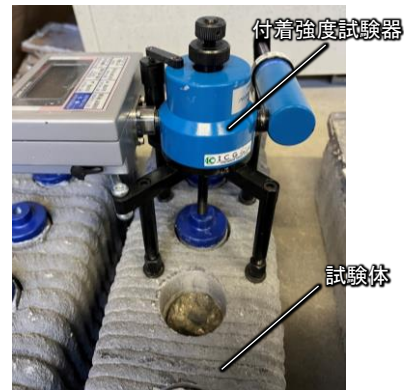


図-3 付着強度試験の状況

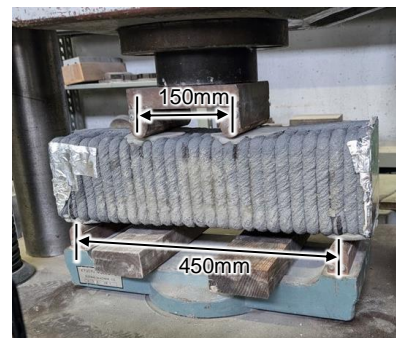


図-4 曲げ強度試験の状況

表-2 ブリーディング試験結果

容器	W/C (%)	フィラメント高さ (mm)	水湿し	ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
モールド	65	-	-	0.12
	40	-	-	0.16
3DP型枠	65	10	無し	0 (発生無し)
		20	有り	
	40	10	無し	
		20		

ブリーディングによる水の上昇が認められなかった。この要因として、ブリーディングによって発生した水が 3DP 型枠に吸水、あるいは 3DP 型枠とコンクリートの境界面に滞水したことが考えられる。

### 3.2 3DP 型枠とコンクリートの付着性の検討

図-5 に測定箇所と付着強度の関係を示す。図中の棒は測定箇所ごとの付着強度の平均値を示し、誤差範囲も付記した。また、図中の破線は断面修復における付着強度の目標値 (=1.5N/mm<sup>2</sup>) を示している (例えば 6)。まず、W/C=65% のコンクリートを打設したケース (図-5 a)) に着目すると、フィラメント高さ 10mm では上部・中部・下部で付着強度の平均が 2~2.4N/mm<sup>2</sup> 程度となっており、測定箇所での顕著な違いはなかった。フィラメント高さ 20mm では、中部・下部と比較して上部の付着強度の平均が 30% 程度低下するとともに、0.6N/mm<sup>2</sup> 程度の極端に低い付着強度も確認された。この点について、図中の右上の写真はフィラメント高さ 20mm の上部を短手方向にカットした断面の一例であるが、破線で囲った箇所のように 3DP 型枠に吸水されなかったブリーディングによ

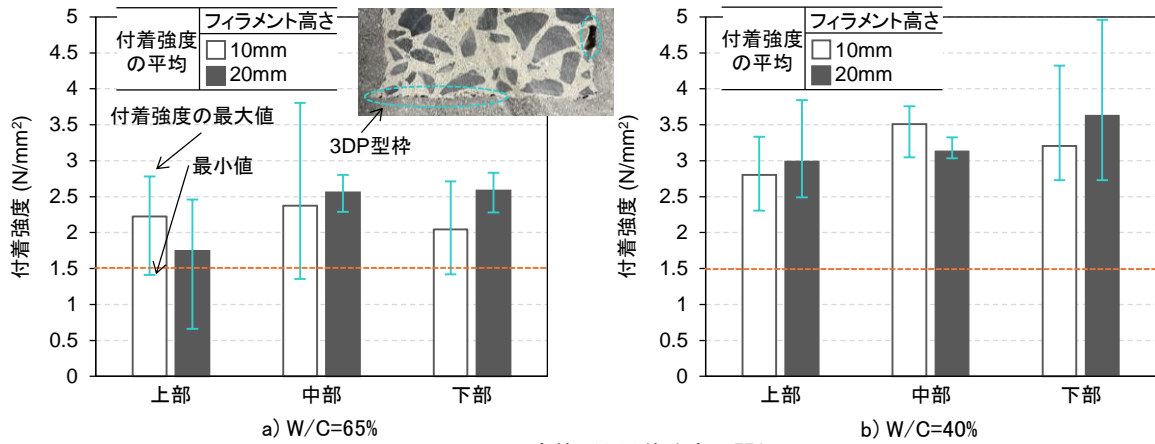


図-5 測定箇所と付着強度の関係

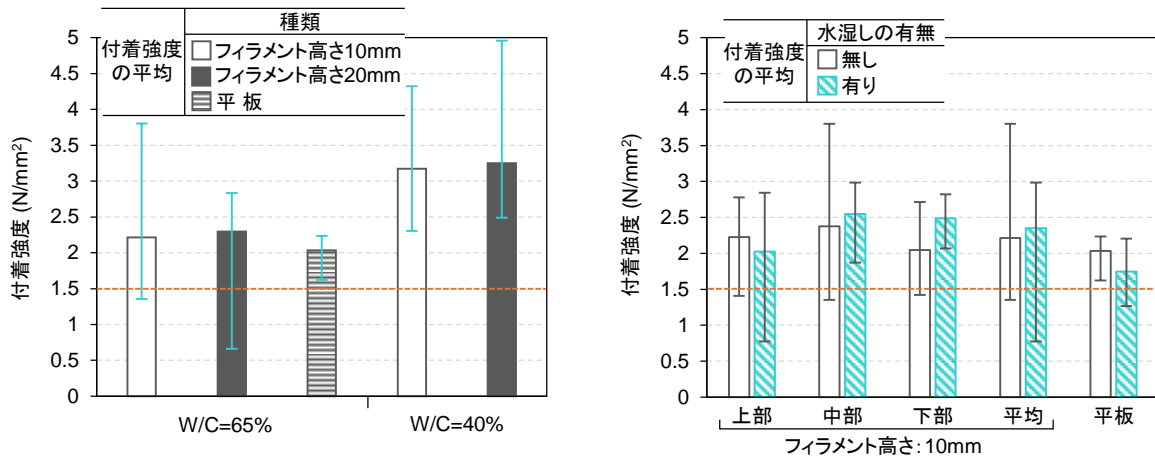


図-6 フィラメントの形状と付着強度の関係

図-7 水湿しの有無と付着強度の関係 ( $W/C=65\%$ )

る水が上部の界面で滞水して粗となったことや、振動締固めにより上昇したコンクリート中の気泡が界面付近で残存した影響ではないかと考えられる。 $W/C=40\%$ のコンクリートを打設したケース (図-5 b)) では、測定箇所での付着強度の平均は最大で 17%程度の変動があるが、65%のコンクリートを打設したケースと比べると極端な強度低下は生じなかった。また、各箇所の最低値は断面修復における付着強度の目標値  $1.5N/mm^2$  と比べても十分に大きく、いずれの測定箇所においても十分な付着が得られたと考えられる。

図-6 はフィラメントの形状と付着強度の関係について示したものである。図中の棒は試験体全体 (3DP 型枠では 12 箇所、平板では 6 箇所) の平均を示す。 $W/C=65\%$ のコンクリートを打設したケースに着目すると、平板ではフィラメント高さ 10mm と 20mm のものと比べて強度のばらつきが抑えられている。これは、コンクリートの打設方法の違いが表れたと考えられ、平板を用いた場合には横にした状態で打設したため、ブリーディングや気泡の影響が生じにくかったと考えられる。平均値で比較すると、フィラメント高さや積層体か平板によらず、いずれも同程度の付着強度となっており、フィラメントの形状による影響はそれほど大きくはなかった。一方で、

$W/C=40\%$ のコンクリートを打設したケースでは、65%のコンクリートを打設したケースよりも 1.5 倍程度、付着強度の平均が大きくなった。これは  $W/C=40\%$ では  $W/C65\%$ よりも 3DP 型枠表面とコンクリートの界面に析出する水和物が多くなったことなどにより、3DP 型枠表面との結合が強くなったためと考えられ、本実験の範囲ではこの影響が 3D モルタルの形状よりも大きかったと考えられる。

図-7 に水湿しの有無と付着強度の関係について示す。なお、水湿しの有無の影響について確認した試験体は、 $W/C=65\%$ のコンクリートを打設したフィラメント高さ 10mm の 3DP 型枠と平板である。また、図中の平均とは 3DP 型枠の上・中・下部の平均を指し、平板は 6 箇所の平均を表したものである。まず 3DP 型枠の測定箇所と比較すると、水湿し有りで中部と下部で同程度の平均値、ばらつきとなっており、また水湿し無しの場合に比べて強度の平均が大きく、ばらつきも小さくなる傾向にあった。しかし、上部では中部や下部と比べて強度の平均は低下しており、最低値は  $0.8N/mm^2$ 程度と極端に低下した。断面修復工法において、母材コンクリートが乾燥した状態で修復用のモルタルを施工することで、ドライアウト現象が生じることが知られており、この対策の一つとし

て水湿し（水打ち）がある<sup>9)</sup>。本研究では、硬化したモルタルにフレッシュコンクリートを打ち継いだ形となるため、断面修復とは逆転しているものの、3DP型枠界面付近のコンクリートにおいてドライアウト現象による影響を受けることも考えられる。中部や下部では水湿しによってドライアウト現象の影響を受けにくくなったことで強度増加に寄与したと考えられる。一方で上部では水湿しによってある程度、3DP型枠に水を含んだ状態となり、ブリーディングによって下部から上昇してきた水が3DP型枠に吸水されずに界面に滞水し、この箇所が硬化後に粗となったことで強度低下につながったのではないかと考えられる。また平板の結果では、水湿しによって付着強度の平均が低下しており、ばらつきも大きくなった。平板の場合は3DP型枠と比べてコンクリートと接する面積が小さくなるため、3DP型枠ほど水湿しによって供給される水を吸収しにくくなり、この水がコンクリートとの界面に滞水したためではないかと推察される。

表-3に付着強度試験を実施した全ケースにおける破壊状況を示す。ここで表中の母材とはコンクリートで破壊したケース、界面とは3DP型枠あるいは平板とコンクリートの界面で破壊したケース、型枠とは3DP型枠あるいは平板で破壊したケースを指す。W/C=65%のコンクリートを打設したものは、いずれのケースも界面で破壊が生じる場合がほとんどであった。一方、W/C=40%のコンクリートでは、多くの場合が型枠で破壊を生じた。これは、コンクリートと3DP型枠との付着が良好であり、試験深さである40mm（3DP型枠30mm+コンクリート10mm）のうち中心が位置する3DP型枠内部で破壊が生じたためと考えられる。

付着強度試験の結果、測定箇所によって付着性が極端に低下する場合もあるが、3DP型枠に打設するコンクリートのW/Cの調整や、水湿しを効果的に行うことで、いずれの箇所でも付着性を得られやすくなると考えられる。

### 3.3 曲げ強度特性の検討

図-8に破壊状況の一例を示す。目視による確認ではいずれの試験体においても、支点間の試験体下部の層間からひび割れが進展して破壊した。積層方向と加力方向が同じ条件で載荷を行った場合、層間が弱部となりやすいことは既往の研究でも報告されている<sup>たとえ8),9)</sup>。

図-9に曲げ強度試験結果を示す。フィラメント高さの影響に着目すると、いずれのW/Cのコンクリートにおいても、フィラメント高さ20mmよりも10mmの方が曲げ強度は高くなった。3DP型枠単体の曲げ強度試験結果では、フィラメント高さ10mmの方が20mmよりも強度が高いことが分かる。そのため、3DP型枠単体の強度の違いがコンクリートを打設した場合にも表れたと考えられる。李らは、層間の付着強度に関して、積層（フィラ

表-3 付着試験時の破壊位置

コンクリートのW/C	フィラメント高さ	水湿しの有無	破壊位置の数		
			母材	界面	型枠
65%	10mm	無し	1	11	0
	10mm	有り	0	12	0
	20mm	無し	2	10	0
	平板	無し	2	4	0
40%	10mm	有り	1	5	0
	10mm	無し	0	4	8
	20mm	有り	0	4	8



図-8 曲げ強度試験体の破壊状況

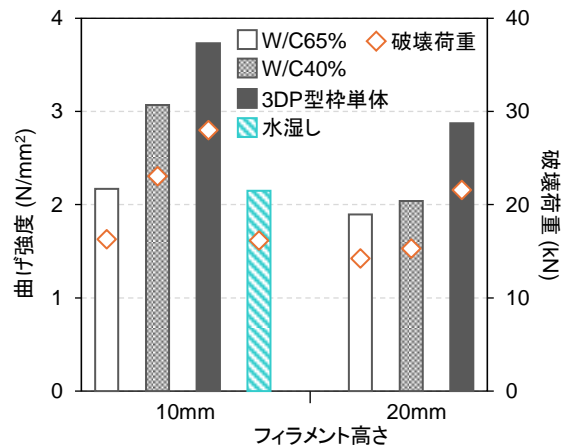


図-9 曲げ強度試験結果

メント)高さによる影響は明確ではなく、積層幅に依存することを報告している<sup>10)</sup>。これは、ノズルの径に対して積層幅が大きい場合、ノズルによる積層圧を受ける範囲が積層幅に対して相対的に小さくなるためである。本研究で積層（フィラメント）幅が一定であるが、フィラメント高さの違いにより強度が異なった要因としては、積層回数の影響が考えられる。フィラメント高さ10mmでは20mmの2倍の積層回数であるため、積層圧が繰返し加わったことで、フィラメント高さ10mmの層間の方がより緻密になったのではないかと考えられる。なお、水湿しによる曲げ強度への影響は認められなかった。

また、3DP型枠単体の方が3DP型枠にコンクリートを打設した場合よりも曲げ強度が高くなった。この要因について現段階では不明であり、今後も詳細な検討を継続して明らかとしたい。現時点では、コンクリートと3DP型枠に用いたモルタルの変形性の違い、断面形状の違いによる曲げモーメントの作用の変化等といった構造的な

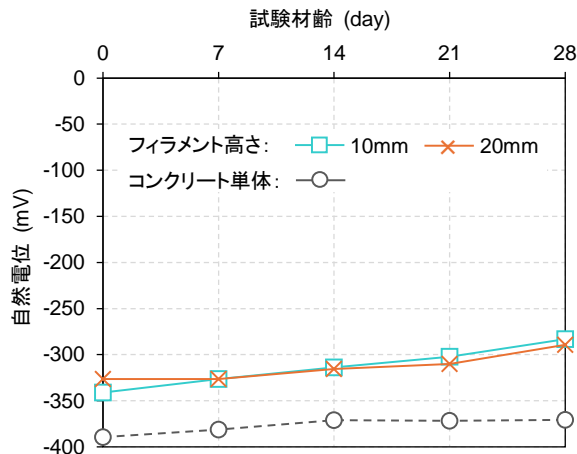


図-10 自然電位の測定結果

要因や、3DP 型枠内に打設したコンクリートが体積変化を生じ、その影響を受けて試験前から 3DP 型枠に微細なひび割れが生じていた可能性などを考えている。今後は 3DP 型枠を用いた RC 梁による荷重試験を予定しており、検討を継続することで詳細を明らかとしたい。

#### 3.4 鉄筋の腐食特性の検討

図-10 に自然電位の測定結果を示す。コンクリート単体のもものでは、電位が-400~-370mV 程度を推移しているのに対し、3DP 型枠を使用したケースでは開始時点で 320~350mV 程度となり、材齢経過に伴って貴化しており、材齢 28 日時点では-300mV よりも貴となった。これは気中養生により試験体が乾燥し、酸素が供給された状態から容器内の水分を吸収したことで初期には卑化した、その後は水分の救急が緩慢となったためと考えられる。これより、3DP 型枠の使用によりコンクリート内部の鉄筋の腐食が抑制されている可能性があることが示唆された。また、フィラメント高さによる相違はほとんどなかった。現段階では材齢が短いため、今後も測定を継続し、最終的には試験体を解体して内部の鉄筋の状況を確認する予定である。

#### 4. 結論

建設用 3D プリンティングにより作製した埋設型枠 (3DP 型枠) にコンクリートを縦打ちで打設して試験体を作製し、ブリーディング特性、3DP 型枠とコンクリートの付着性、曲げ強度特性、腐食特性に関する検討を行った。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 3DP 型枠にコンクリートを打設した場合、コンクリートの W/C の違いによらずブリーディングは発生しなかった。これは 3DP 型枠にブリーディングによる水が吸収されたためと考えられる。
- (2) 3DP 型枠とコンクリートの付着強度は、試験体の上部で極端に低下する場合があります、これはブリーディ

ング等の影響を受けた可能性がある。また、3DP 型枠の形状による影響は小さく、コンクリートの W/C の影響が強かった。水湿しにより全体的に付着強度が若干増大したが、3DP 型枠の吸水状況によっては逆に付着強度の低下を招く可能性がある。

- (3) フィラメント高さを低くすることで曲げ強度が高くなった。積層回数が増大により積層圧を繰返し受けたことが強度増大に寄与したと考えられる。
- (4) 自然電位の測定結果から、3DP 型枠の使用によってコンクリート内部の鉄筋の腐食が抑制される可能性を示した。

#### 参考文献

- 1) 日本型枠工事業協会：型枠大工雇用実態調査報告書 2022 年 12 月, [nihonkatawaku.or.jp/download/download.html](http://nihonkatawaku.or.jp/download/download.html), (閲覧日：2024 年 12 月 27 日)
- 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, pp.45-51, 2020.1
- 3) 木ノ村 幸士, 田中 俊成, 張 文博, 井坂 匠吾：建設 3D プリンティング技術の可能性と用途拡大に向けた研究開発, コンクリート工学, Vol.61, No.7, pp.600-607, 2023.7
- 4) 日経 XTECH：3D プリンターで道路橋のフーチング基礎部分を“印刷”、公共事業初, [xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00142/01786/](http://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00142/01786/), (閲覧日：2025 年 1 月 6 日)
- 5) 山本 伸也, 小倉 大季, 佐竹 省胤, 竹中 祐人：材料押出方式の 3D プリンティングによるコンクリート施工の事例, コンクリート工学, Vol.60, No.5, pp.448-454, 2022.5
- 6) 土木研究所：コンクリート構造物の補修施工マニュアル 2022 年版, 2024.12
- 7) 岩崎訓明：セメントペーストと骨材の付着機構, コンクリート工学, Vol.19, No.11, pp.96-99, 1981.11
- 8) 浅見 仁博, 大野 元寛, 石田 哲也：押出方式の 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1391-1396, 2021.7
- 9) 村田 哲, 張 文博, 木ノ村 幸士, 畑 明仁：3D プリンティングで製作した積層体の硬化物性と収縮特性, Vol.42, No.1, pp.1852-1857, 2020.7
- 10) 李 晨, 寺西 浩司, 丛启宾, 梶田秀幸：積層条件が 3D プリントされたモルタル積層体の層間付着強度および耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.2065-2070, 2024.7