

報告 3D プリンティングと常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートによる複合構造体の試験施工に関する報告

中村 允哉*1・坂上 肇*2・穴吹 拓也*3・石関 嘉一*4

要旨：3D プリンターにより積層した部材と常温硬化型超高強度鋼繊維コンクリートとの複合構造にて大規模部材を製造した。製造にあたり 3D プリンターの制御手法について考察すると共に、複合構造の力学的性能について検討した。その結果、3D プリンターにてモルタルを積層する際は、各層断面の幅厚比が適正であれば、出来形寸法をモルタルの吐出量とノズルの移動速度により制御できる事が分かった。また、3D プリンター用モルタルと常温硬化型超高強度鋼繊維コンクリートを用いた複合構造は、常温硬化型超高強度鋼繊維コンクリートが引張力を負担する事により、曲げ試験において最大荷重と靱性能の向上が見られた。

キーワード：3D プリンティング, 常温硬化型超高強度鋼繊維コンクリート, 複合構造, 機械化施工

1. はじめに

近年、セメント系材料をインクとする 3D プリンターに関する研究が国内外で行われている¹⁾。この 3D プリンターは、フレッシュな状態のセメント系材料を吐出しながらノズルが移動し、材料を積層する形で部材を形成する機構を有している。実現すれば、コンクリート構造物やその部材の製造において型枠の組立・解体作業や、コンクリートの打込み作業を大幅に省力化できるほか、従来の型枠を用いた工法では製造困難な形状の構造物の実現が可能になる。

こうした背景から、筆者らはロボットアームを用いてモルタルを積層し、小規模なモルタルブロック橋の製造等を実施してきた²⁾。

一方、セメント系材料は圧縮力を負担する材料として用いられ、構造部材では引張力を負担できる鉄筋などの鋼材との複合構造として適用している。従って、3D プリンターで実用的な構造物を構築する際においても、引張力の負担方法が課題となる。そこで筆者らは、3D プリンターで積層するモルタル(以下、3D 積層モルタルと略記)と、セメント系材料で引張力を負担できる常温硬化型超高強度鋼繊維コンクリート(以下、常温硬化型 UFC と略記)との複合構造を考案した。

筆者らは、3D 積層モルタルの断面寸法の制御手法と力学的性能について基礎的な実験を行った。次に 3D 積層モルタルと常温硬化型 UFC との複合構造の力学的性能を把握する実験を実施した。そして、最後にこれらの結果を元に複合構造体の製造実験を行った。本報ではこれらの実験について概要を報告する。

2. 常温硬化型 UFC との複合構造

本報における複合構造の断面概要図を図-1 に示す。本複合構造は、3D 積層用モルタルにて外殻を積層成型して打込み型枠とし、内部に構造耐力を負担できる常温硬化型 UFC を打込み一体とする構造である。

この複合構造を成立させるには、内部に充填する常温硬化型UFCの構造性能を担保するため、必要な断面寸法を確保し、3D積層モルタルを設計した寸法通りに形成しなければならない。また、3D積層モルタルとの一体性を確保するため、常温硬化型UFCの打込み時には内部に空隙や剥離を発生させず、所定の構造性能を発揮させる必要がある。

3. 3D 積層モルタルの断面寸法の制御実験

3.1 実験概要

3D プリンターにて設計寸法通りに部材を製造するには、3D 積層モルタルの出来形寸法(積層厚 $t(\text{mm})$ と積層

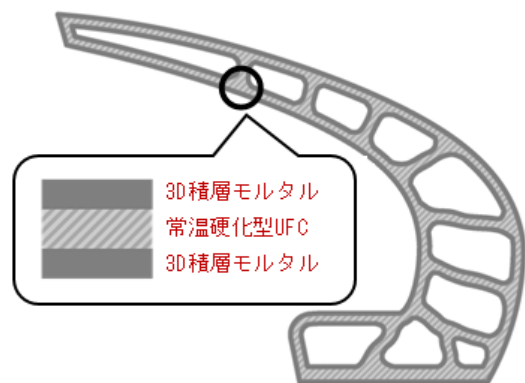


図-1 複合構造の断面概要図

*1 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 修士(工) (正会員)

*2 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 修士(工)

*3 株式会社大林組 技術研究所 構造技術研究部 修士(工) (正会員)

*4 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 博士(工) (正会員)

幅 $w(\text{mm})$ を制御する必要がある。3D 積層モルタルに完全なチキン性(圧送時の流動性と積層後の粘性)がある場合、吐出ノズルからのモルタルの吐出量 $Q(\text{ml/s})$ 、ロボットアームによるノズルの移動速度 $V(\text{mm/s})$ との間に次のような関係があり、出来形寸法が決まる。

$$Q = t \times w \times V \times 10^{-3} \quad (1)$$

本報では、式(1)より算出した出来形寸法(以下、理論値と略記)と、実際に吐出されるモルタルの出来形寸法(以下、実験値と略記)との比較を行った。

3.2 材料

3D 積層モルタルには、硬化促進剤を混合したプレミックスモルタルを使用し、作業環境や製造対象に応じて硬化速度の調整を行った。また、曲げ強度の向上を目的として、PVA(ポリビニルアルコール)繊維を混合している。

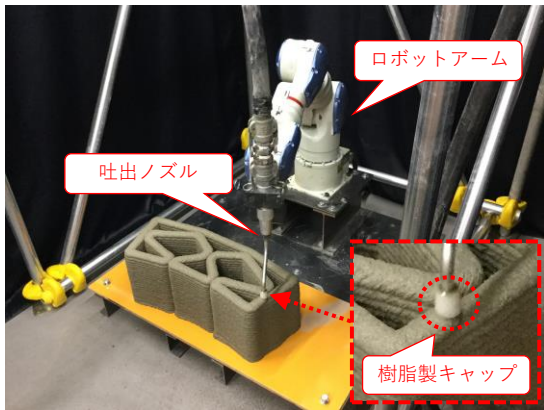


写真-1 製造装置



図-2 試験体概要

表-1 出来形寸法の理論値

No.	吐出量 Q (ml/s)	ノズル 移動速度 V (mm/s)	積層厚 t (mm)	積層幅 w (mm)	幅厚比 (w/t)
1	44.4	100	10	44.4	4.4
2			15	29.6	2.0
3			20	22.2	1.1
4		150	10	29.6	3.0
5			15	19.8	1.3
6			20	14.8	0.7
7		200	10	22.2	2.2
8			15	14.8	1.0
9			20	11.1	0.6

3.3 製造装置

製造装置を写真-1に示す。ロボットアームは可搬重量が 10kg の 7 軸単腕型を使用し、アーム先端には吐出ノズルを取付けた。なお、吐出ノズルの内径は 10mm で、先端にはモルタルを押し付けるための樹脂製キャップを取り付けた。

3.4 実験方法

出来形寸法の理論値を表-1に示す。本実験ではノズルの移動速度および積層厚をパラメータとして比較を行った。なお、本実験では図-2に示すように、モルタルを床型枠に1層で二つ吐出し、モルタルの積層厚および積層幅の実験値は、図中の4箇所の実測値の平均とした。

3.5 実験結果および考察

理論値と実験値の比較を図-3に示す。図より、理論値と実験値の整合性が高かったのは、No.2, No.4, No.7であった。これらのケースでは、積層するモルタルがノズル先端の樹脂製キャップにより型枠に押し付けられており、安定してモルタルが積層されていた。

一方で、No.1, No.3, No.5, No.8では、理論値と実験値の整合性が低く、No.6とNo.9は、写真-2(b)に示すようにモルタルが幅方向に波打ち、不安定な出来形とな

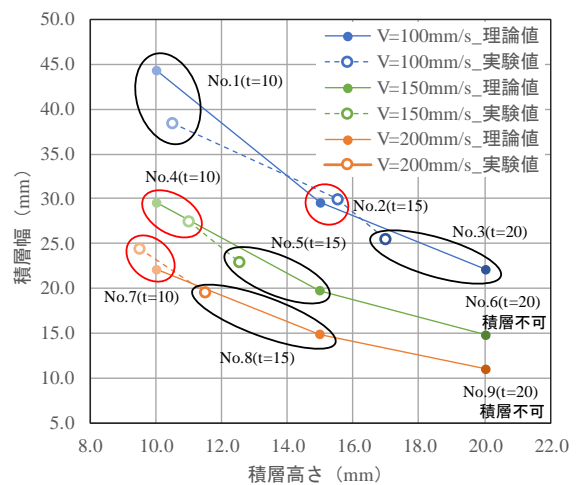
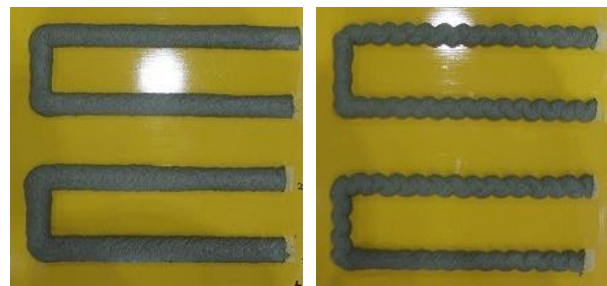


図-3 出来形寸法の比較



(a) 正常な出来形 (No.4) (b) 不安定な出来形 (No.6)

写真-2 試験体例

った。理論値と実験値の整合性が低かった理由として、No.1では、樹脂製キャップ 25mm に対して積層幅の理論値が 44mm と過大であり、モルタルが押さえ切れておらず、積層幅が不安定になったと考えられる。また、No.3、No.5、No.8 では、モルタルの自重による変形により積層厚が減少し、積層幅が増加したためであると考えられる。

なお、本実験の範囲内において、理論値と実験値の整合性が高かったケースにおける幅厚比（積層幅/積層厚）は、いずれも 2.0 以上であった。理論値による幅厚比が 2.0 以下である場合、実験では自重による潰れが生じ、幅厚比が 2.0 程度まで変形した。また、安定した積層幅を得ることが出来なかった No.1、No.6、No.9 を除き、式(1)を用いて実験値の積層厚と積層幅から吐出量を計算すると、理論値の 44.4ml/s に対し、±5%以内の値が得られた。

以上より、断面の幅厚比が自重等による変形の影響が少ない範囲であれば、式(1)により出来形寸法を制御できる事が分かった。

4. 3D 積層モルタルの力学的性能

4.1 実験概要

3D 積層モルタルの曲げ試験（JIS A 1106）（寸法：100×100×400mm）により、3D 積層モルタルで製造する部材の基礎的な力学的性能を検証した。本実験では、図-4 に示すように、モルタルの積層方向を部材軸方向に対して平行および垂直として製造した部材（以下、平行、垂直）について、通常の打込みで製造した部材（以下、標準）と曲げ強度を比較した。なお、使用する 3D 積層モルタルは、3 章にて挙げた材料と同様である。

4.2 実験方法

試験体の製造では、モルタルの層間に隙間が極力生じないように、理論値と実験値の差が小さい積層条件（吐出量 0.16m³/h、ノズルの移動速度 200mm/s、積層厚 10mm、積層幅 22mm（理論値））を採用した。なお、本実験では積層痕の影響を除外するために、写真-3(a)に示すひと

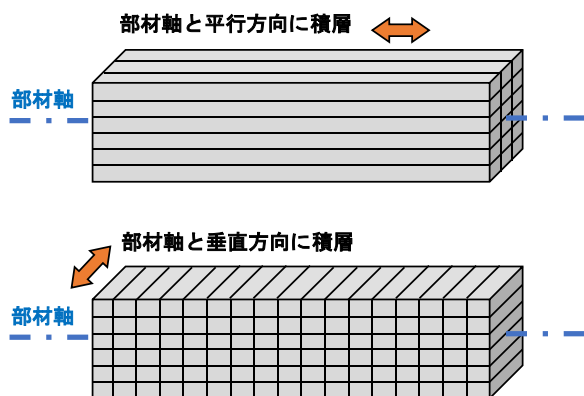


図-4 試験体の積層方向

回り大きい部材から、写真-3(b)のように試験片を切り出した。

4.3 実験結果および考察

標準の曲げ強度を基準とした平行および垂直の曲げ強度との比を図-5 に示す。曲げ強度は、平行および垂直ともに標準に比べやや大きくなり、積層造型した事による強度の低下等は見られなかった。なお、平行および垂直の破壊面の断面には層間の隙間は見られなかった。一方で、3 章で示したように不適正な条件で積層が行われると、想定した形状通りに積層されず、積層されたモルタル間に空隙部ができる可能性がある。

5. 複合構造の力学的性能

5.1 実験概要

3D プリンターでボイドを有する部材を製造し、ボイド内に常温硬化型 UFC を充填する複合構造を用いて、製造および力学的性質に関する検証実験を実施した。試験体の断面構成を図-6 に示す。試験体は幅 500mm×厚さ 120mm の断面内部に幅 50mm×厚さ 70mm の常温硬化型 UFC のコアが 5 つ均等に配置された断面で、高さが 1m の壁状部材である。

なお、使用する 3D 積層モルタルは、3 章にて挙げた材料と同様である。常温硬化型 UFC は、スランプフローが 600mm 程度で、自己充填性を有した材料である。この常温硬化型 UFC は、材齢 28 日において、圧縮強度は 180N/mm²、引張強度は 8.8N/mm²、曲げ強度は 32.6N/mm² を達成できるほか、高い引張靱性を有しており、単独で



写真-3 曲げ試験体製作状況

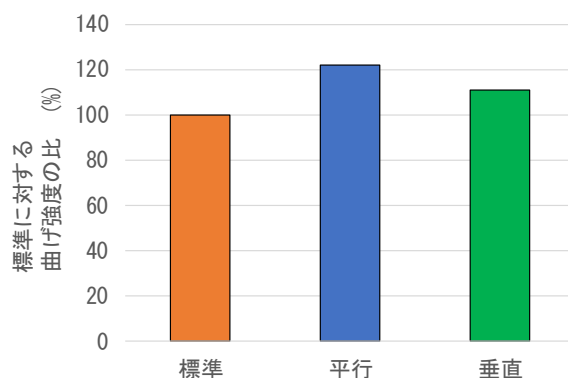


図-5 曲げ強度の比較

も構造体として使用が可能な材料である³⁾。

5.2 試験体製造方法

複合構造の製造に使用した装置を写真-4に示す。ロボットアームは可搬重量が10kgの6軸単腕型を使用し、アーム先端には吐出ノズルを取付けた。なお、吐出ノズルの軸部の内径は10mmで、先端にはモルタルを押し付けるための樹脂製キャップを取り付けた。

複合構造の製造は、最初に3Dプリンターでボイドを有する構造体を製造する。なお、3Dプリンターにて積層した構造体は3章の結果を加味し、各層の積層厚と積層幅を決定した。その後、写真-5に示すように、ボイド部分に人力にて常温硬化型UFCを打ち込んだ。

3Dプリンターで製造するボイドを有する部材は、高さ1mの中央位置で打継ぎ部を設けてあるが、コア部の常温硬化型UFCは打継ぐこと無く施工した。

5.3 実験概要

製造した複合構造の試験体(以下、No.1)の曲げ性状について確認するため、単純支持し3点曲げ試験を実施した。また、比較のため、3Dプリンターで製造した部材のボイド部分に常温硬化型UFCを充填しない試験体(以下、No.2)についても曲げ試験を実施した。なお、No.2については、高さ1mまで一度に製造し、打継ぎを設けない計画とした。

5.4 加力方法および計測方法

曲げ試験の荷重装置を写真-6に示す。試験体の支持は左端をピン支持、右端をローラー支持とし、支持点の間隔は800mmとした。部材中央において曲げモーメントが最大となるよう、スパン中央上部に油圧ジャッキ及び球座を取り付け、鉛直方向下向きに荷重を荷重した。試験体の幅が500mmと大きいことから、高さ200mmの加力梁を介して鉛直荷重を加えた。加力は1方向に押し切る単調荷重とした。荷重は部材中央の荷重点における鉛直方向荷重をロードセルにより計測した。変位は、部材中央の鉛直方向変位を変位計により計測し、鉛直下向きを正とした。また、変位は試験体の表裏で計測した値の平均値とした。

5.5 実験結果

最終破壊状況を写真-7および写真-8に示す。なお、写真-7は、No.1の最終破壊直後、写真-8は、No.1の破壊面の拡大写真を示している。

No.1とNo.2は、いずれも部材中央下端近傍にひび割れが見られ、最終的にほぼ試験体中央に破壊面が生じた。No.1の破壊面の常温硬化型UFC部分からは鋼繊維が多数突き出していた。また、ボイド内に常温硬化型UFCが隙間なく充填されていることが確認できた。なお、どちらの試験体においても圧縮縁のモルタルが圧縮破壊した様子は無かった。

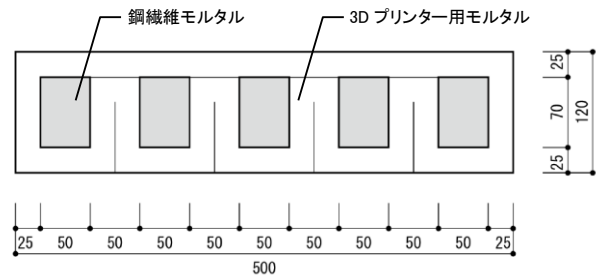


図-6 複合構造の断面構成

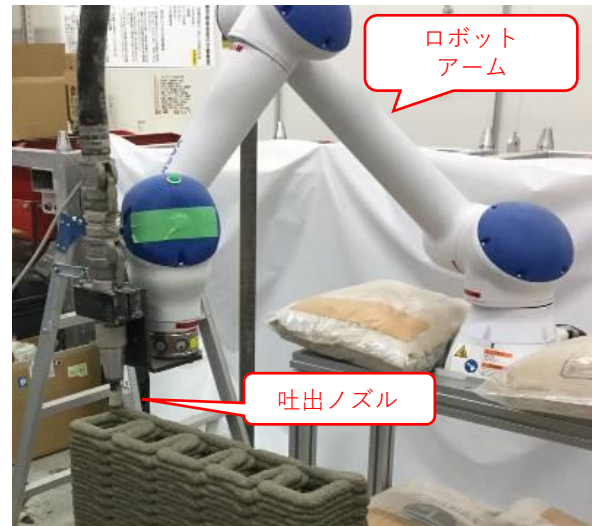


写真-4 製造装置



写真-5 常温硬化型UFC充填状況



写真-6 荷重装置

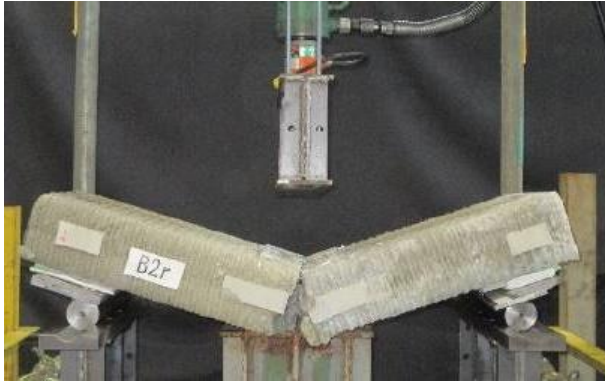


写真-7 破壊直後 (No. 1)



写真-8 破壊面の拡大 (No. 1)

次に、鉛直荷重と中央たわみの関係を図-7 に示す。図-7 より、No.2 では最大荷重後に脆性的な破壊が生じ、荷重が急激に減少したのに対して、No.1 では最大荷重後も緩やかに荷重が低下していることが分かる。また、最大荷重に着目すると、常温硬化型 UFC を充填しない No.2 の最大荷重は 22.5kN であったのに対し、No.1 の最大荷重は 47.4kN であり、No.1 は No.2 に比べて 2 倍以上の最大荷重を示した。

以上より、常温硬化型 UFC との複合構造とした事による補強効果を確認できた。

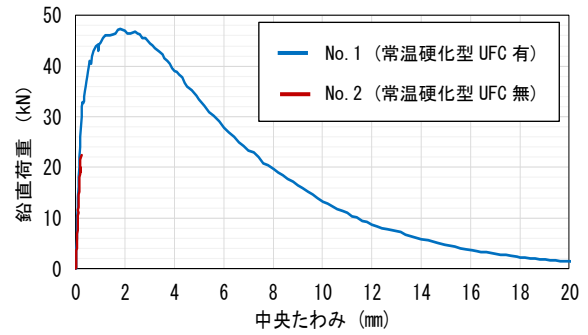
6 複合構造体施工実験

6.1 実験概要

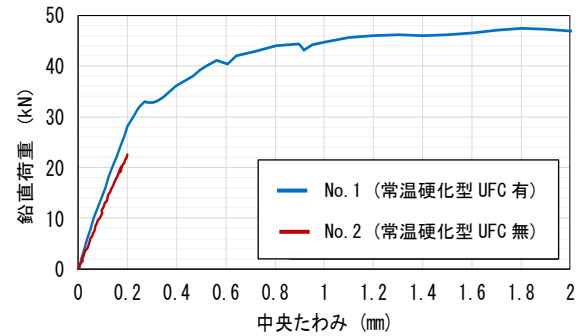
前章までに報告した、3D 積層モルタルと常温硬化型 UFC との複合構造に関する検討結果を踏まえ、著者らは実大規模の複合構造体の製造を実施した。本章ではその製造過程と結果について報告する。

製造する試験体の概要を図-8 に示す。対象とする製造物は、高さ 2500mm、幅 5000mm、奥行き 7000mm 程度の屋根付きベンチ型の試験体である。

試験体は、3D プリンターの製造装置であるロボットアームの稼働範囲、常温硬化型 UFC を打込む際の施工性、設置時における各試験体の重量等を加味し、奥行方向に 600mm 毎(両端のみ 500mm)で分割し、寝かせた状態で製



(a) 全体



(b) 荷初期

図-7 鉛直荷重-中央たわみ関係

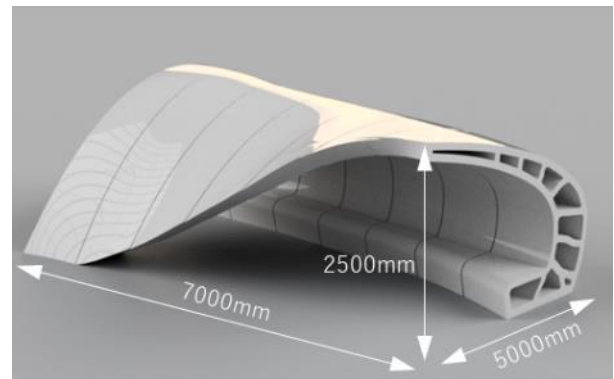


図-8 試験体全体イメージ

造した。

製造する試験体は、常温硬化型 UFC の有する高い引張強度と引張靱性を最大限活用するため、大きな片持ちを有する形状とした。また、断面に中空を多く含んだ形状により、各部材の軽量化を図るとともに、常温硬化型 UFC の使用量を密実に充填した場合と比較して約 60% 削減している。なお、3D 積層モルタルおよび常温硬化型 UFC は前章までに挙げた材料と同様である。

6.2 試験体製造

試験体の製造状況を写真-9 に示す。ロボットアームは可搬重量が 120kg の 6 軸単腕型を使用し、アーム先端には吐出ノズルを取付けた。

3D 積層モルタルは各層の積層厚を 5mm とし、積層幅は 30mm となるように、吐出後の形状を適宜計測して吐出量を調整した。

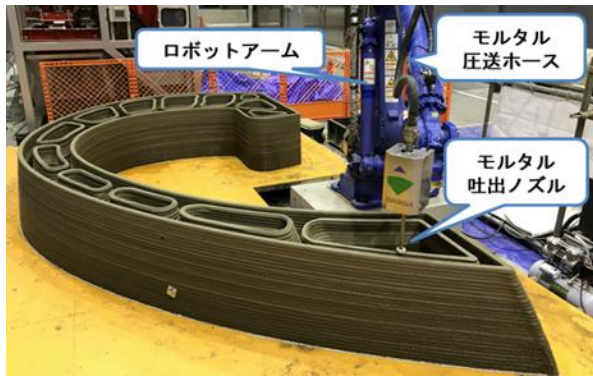


写真-9 試験体製造状況(モルタル積層)



写真-11 試験体設置状況



写真-10 常温硬化型 UFC 打込み状況



写真-12 完成状況

なお、試験体の建起こしと基礎への接続のため、3D 積層モルタルには硬化が完了する前に直径 24mm の穴を削孔し、常温硬化型 UFC 内に内径 20mm のインサートを仕込んだ。

6.3 常温硬化型 UFC 打込み

3D プリンターで積層成型した試験体への常温硬化型 UFC の打込み状況を写真-10 に示す。常温硬化型 UFC は容量 0.3m³ のコンクリートバケットを使用し、写真中に示した 2 箇所より打込んだ。なお、3D プリンターによる積層では、試験体各ピースに高さ 200mm 毎で打継ぎを設けているが、常温硬化型 UFC は打継ぐこと無く施工した。

試験体の設置状況を写真-11 に示す。試験体は片持ち部分の先端側を仮受け用の支保工により支持した。この支保工は、試験体が予め施工していた基礎と一体となるようにコンクリートを打込み、所定の強度が発現した事を確認した後に撤去した。

建起こしの結果、試験体への亀裂等は見受けられず、製造を含め実働約 3 か月で施工を完了した(写真-12)。

7. まとめ

3D 積層モルタルと常温硬化型 UFC との複合構造を考案し、3D 積層モルタルの断面寸法の制御実験と力学的性能実験、複合構造の力学的性能実験を行った。そして、

これらを元に構築した複合構造体の製造実験を実施した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 3D プリンターにてモルタルを積層する際は、各層断面の幅厚比が適正であれば、出来形寸法をモルタルの吐出量とノズルの移動速度により制御できる。
- 2) 3D 積層モルタルと常温硬化型 UFC を用いた複合構造は、常温硬化型 UFC が引張力を負担する事により、曲げ試験において最大荷重と靱性能の向上が認められた。
- 3) 3D プリンター用モルタルと常温硬化型 UFC との複合構造により、実大規模の試験体を製造できた。

謝辞

本研究では、材料の設計と供給において、デンカ株式会社様にご協力を頂きました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Perkins, I. and Skitmore, M.: Three-dimensional printing in the construction industry: a review, *International Journal of Construction Management*, Vol. 15, No.1, pp.1-9, 2015.
- 2) 坂上肇ほか：積層工法による部材製造に関する研究 その 1 ロボットアームを用いたモルタルブロックの製造, *日本建築学会大会*, pp.1293~1294, 2017
- 3) 平田隆祥ほか：常温硬化型 UFC 材料「スリムクリート」の開発, *セメント・コンクリート*, Vol.782, pp.24-28, 2012