

◇技術紹介 Technical Report◇

セメント系材料を用いた 3Dプリンターによる部材製造技術 3D Printing with Cement-based Materials

坂上 肇
石関 嘉一
金子 智弥
平田 隆祥

Hajime Sakagami
Yoshikazu Ishizeki
Tomoya Kaneko
Takayoshi Hirata

1. はじめに

一般に 3D プリンティングとは、断面形状を積層して立体を造形する製造方法で、模型や試作品の製造に広く利用されている。インクとなる材料としては熱硬化性樹脂や光硬化性樹脂が普及しているが、粉末状にした材料を結合することで金属やセラミックにも利用できる。

筆者らは、特殊モルタルをロボットアームの先端に取付けたノズルから一定速度で送り出す方式の 3D プリンターによる部材製造技術を開発した。この技術を用いれば、コンクリート構造物の製造において、型枠の組立・解体やコンクリートの打込み作業を大幅に省力化し、従来の型枠を用いた方法では製造が難しかった様々な形状の構造物を製造できる。本報では、その技術概要と、アーチ状ブリッジの製造例を紹介する。

2. 3D プリンターの概要

2.1 製造装置

製造装置を Photo 1 に示す。ロボットアームは 7 軸単腕で、可搬重量は 10kg である。特殊モルタルを吐出する吐出ノズルの軸部の内径は 10mm である。この吐出ノズルをロボットアームの先端に取り付けている。

吐出ノズルの移動経路データは、ソフトウェアによるオフラインティーチングで作成する(Photo 2)。これにより、積層経路が複雑な形状であっても、ロボットアーム本体のコントローラで直接的にティーチングを行うよりも、正確にかつ、早く行うことができる。

2.2 特殊モルタル

3D プリンターでは、ポンプで圧送した特殊モルタルをノズルから吐出し、積層造形することで構造物を製造する。そのため、モルタルには、圧送時に閉塞しないよう、流動性が必要となる。一方で、モルタルを積層していく上では、モルタル自体に自立性があり崩壊せず、さらに、早期に硬化して積層数が増えても自重による変形が少ないといった性質が必要となる。このように、特殊モルタルには、これを満足するための要件(圧送時の流動性と積層後の自立性を有する性質)が求められる。

特殊モルタルは、普通ポルトランドセメント、細骨材、硬化促進剤、有機繊維を主成分としている。また、特殊モルタルは、汎用のパン型ミキサーを用いて練り混ぜて、小型のモルタルポンプで吐出ノズルまで圧送する。Table 1 に特殊モルタルの強度特性を示す。

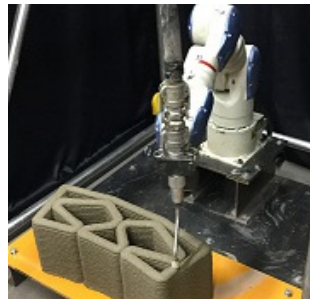


Photo 1 製造装置
Manufacturing Equipment

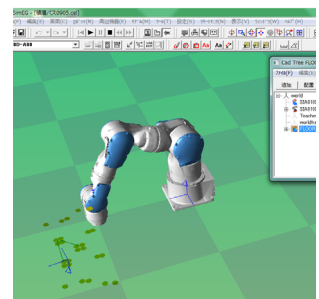


Photo 2 オフラインティーチング
Off-Line Teaching

Table 1 強度特性
Strength Property

試験項目	試験材齢	実験値
圧縮強度 (N/mm ²)	7 日	52.6
	28 日	60.6
曲げ強度 (N/mm ²)	28 日	3.6



Photo 3 切出し前(平行)
Before Cutting(Parallel)



Photo 4 切出し前(垂直)
Before Cutting(Vertical)

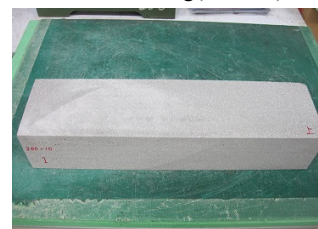


Photo 5 切出し後(平行)
After Cutting(Parallel)

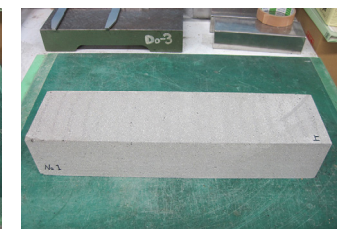


Photo 6 切出し後(垂直)
After Cutting(Vertical)

2.3 積層方向による曲げ強度特性

3D プリンターで製造する部材には、モルタルの積層方向による異方性により、曲げ強度に違いが生じることが想定される。そこで、Photo 3 および Photo 4 に示すように、部材軸方向に対して平行および垂直(以下、平行および垂直)に積層した試験体を製作し、曲げ試験に供した。また、比較対象として、鋼製型枠(断面 100mm×100mm、長さ 400mm)に通常の打込みで製作した標準の試験体(以下、標準)も作製した。なお、3D プリンターによる平行および垂直の試験体は、Photo 3 および Photo 4 に示した

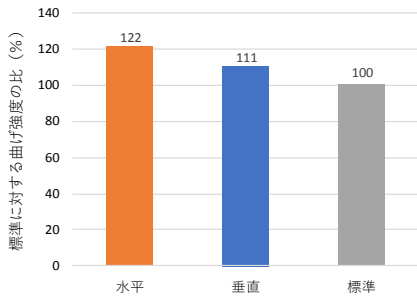


Fig. 1 曲げ強度の比較
Comparison of Bending Strength

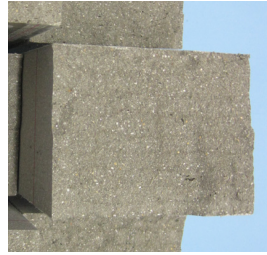


Photo 7 破壊面(平行)
Fracture Surface (Parallel)

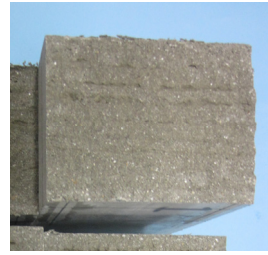


Photo 8 破壊面(垂直)
Fracture Surface (Vertical)



Photo 9 破壊面(標準)
Fracture Surface (standard)

一回り大きい部材から、Photo 5 および Photo 6 に示すように切り出して製造している。

標準と平行および垂直とした試験体の曲げ強度を比較すると、平行および垂直ともに標準に比べやや大きかったものの、明確な差は見られなかった(Fig.1)。次に、Photo 7 および Photo 8 に平行および垂直の破壊面を、Photo 9 に標準の破壊面を示す。3D プリンターで製造した試験体は、標準の試験体と同程度に一体化していることが確認できた。

2.4 出来形寸法の制御方法

3D プリンターで、設計寸法通りに部材を製造するには、積層するモルタルの出来形寸法(積層厚 $t(\text{mm})$ と積層幅 $w(\text{mm})$)を制御することが必要となる。積層するモルタルの出来形寸法は、吐出ノズルへのモルタルの吐出量 $Q(\text{m}^3/\text{h})$ とロボットアームによるノズルの移動速度 $V(\text{mm}/\text{s})$ (以下、ノズル速度)と式(1)の関係となる。

$$Q = t \times w \times V \times 3600 / 10^9 \quad (1)$$

なお、実際には、吐出後に自重によりモルタルに変形が生じ、設計通りの出来形寸法に狂いが生じてくるため、積層幅と積層厚のアスペクト比(積層幅/積層厚)を 2.0 程度以上とすると、安定した積層ができる。

3. アーチ状ブリッジの製造

6 ピースのモルタルブロックで構成するアーチ状ブリッジの製造を試みた(Photo 10)。モルタルブロックは、3D プリンターの特性を生かした中空を有する形状とし、積層時の平面寸法は、約 $500\text{mm} \times 250\text{mm}$ で、高さは、 500mm である。また、積層幅は、 35mm である。モルタルの吐出量の設定を、 $0.20\text{m}^3/\text{h}$ としたため、ロボットアームの送り速度 $150\text{mm}/\text{sec}$ 、積層間隔 11mm とすると式(1)により、積層幅は、およそ 35mm となる。実際にこの条件で積層すると、平均 35.1mm 、標準偏差 1.2mm で積層幅を制御できた。また、高さについては、遅延剤の使用量を調整することで 500mm を達成することができた。また、積層に要した時間は 20 分で、モルタルの積層に関わる人員は、オペレータ 1 名のみで実施できた。3D プリンターによる積層状況は Photo 1 に示す通りである。

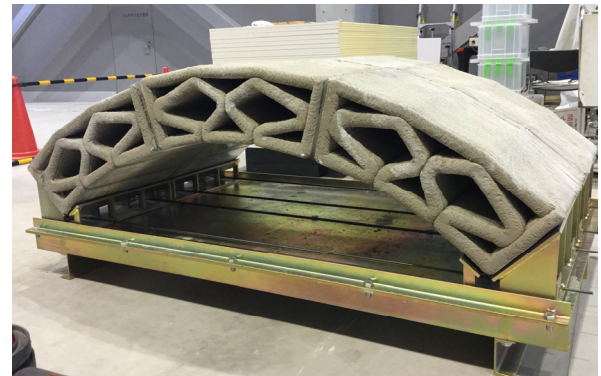


Photo 10 モルタルブロック
Mortar Block



Photo 11 アーチ状ブリッジ
Arched Bridge

製作したモルタルブロック 6 ピースをアーチ状に組立て、架設した(Photo 11)。

4. おわりに

コンクリート構造物の施工において、施工の大幅な省力化や様々な形状の構造物を製造できるセメント系材料を用いた 3D プリンターについて紹介した。

なお、3D プリンターの製造装置に使用するロボットアームを大型にすれば、実大レベルの構造物の製造も可能である。今後も、実構造物の製造に向けた取組みを継続して行う。

謝辞

特殊モルタルは、デンカ株式会社との共同開発であり、多大なるご協力を頂きました。記して御礼申し上げます。