

## 10 3Dプリンタで造形した砂型の特性および活用性評価

兼吉高宏, 山口 篤, 阿部 剛

### 1 目 的

バインダージェット方式の砂型積層造型装置は、造型速度が  $1\sim 10\times 10^4\text{cm}^3/\text{h}$  の装置が市販されており、レーザー焼結方式などの他の方式に比べて造型速度が速く生産性が高いことから、生産現場への導入が進んでいる<sup>1)</sup>。国家プロジェクトで開発された同方式の造型装置（シーメット(株)SCM-10、800）が複数の公設試で導入されており、兵庫県でも同装置を平成 29 年度に導入し積層造型装置を用いた鋳造技術の普及に取り組んでいる。

この装置は硬化剤（触媒）をコーティングした人工砂にフラン樹脂をインクジェット方式で塗布し、砂を硬化させている。通常の木型等を使ったフラン砂型とは造型方法が異なるため強度や通気性などの諸特性が異なると考えられる。

また、積層造型砂型は複雑形状中子の作製に有用であり、中子点数の削減、形状精度の向上、中量生産が可能など、メリットが大きい<sup>1)</sup>。その一方で強度がシェル中子の半分以下と低くシェル構造をとりにくい、砂粒度が細かく通気性が低い<sup>2)</sup> などの問題がある。このため通気度の確保ため中子に穴を通す、あるいは、中空構造にするなどの工夫<sup>1)</sup> が行われているが、このような砂型では強度がさらに低下すること、複雑な構造では未硬化砂の除去が困難であるなどの課題がある。

そこで本研究では、積層造型砂型の基礎的知見を得ることを目的とし、造型位置による曲げ強度、かさ密度の状態を把握するとともに、通気度特性についても評価を行った。特に、通気度測定においては、中子のガス逃げを想定し、砂型内部にバインダーを塗布せず硬化しない部分（以後、未硬化部）を設けた砂型の通気性についても評価を行った。

## 2 実験方法

### 2.1 造型装置

装置はシーメット(株)製 SCM-10H（SCM-800 相当）を用いた。この装置は、スルホン酸系無機硬化剤をコーティングした焼結法ムライト人工砂（平均粒径約 0.13mm）を 0.28mm ピッチで積層しながら、砂型部分にフラン樹脂

（以後、バインダー）をインクジェット方式で塗布し、硬化させることで造型する。本研究では、群栄化学工業(株)製 CCS1450-S4 の砂、バインダーは群栄化学工業(株)製 RPR-102A を使用し、添加量は 2% を標準の添加量とした。なお、本装置の造型エリアは  $400\times 800\text{mm}$ 、高さ 400mm である。

### 2.2 曲げ試験片

曲げ試験片は JIS に準じて標準試験片として  $22.4\times 22.4\times 172\text{mm}$  のものを、小型試験片として  $20\times 10\times 80\text{mm}$  の 2 種類を使用し、3 点曲げ試験を行った。なお支点間距離は標準試験片が 150mm および小型試験片が 50 mm とした。

### 2.3 造型

造型エリア内での強度のばらつきを調べるため図 1 に示すように、造型エリアに標準と小型の 2 種類の曲げ試験片を造型した。

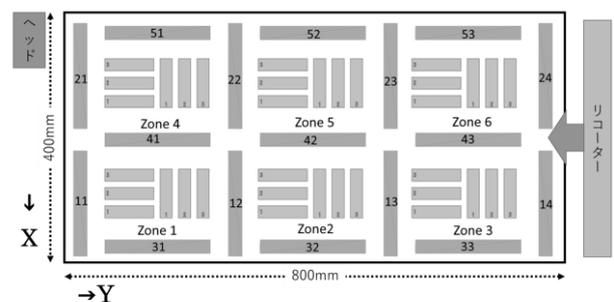


図 1 曲げ試験片の造型位置

また造型方向の影響を調べるために、リコーターの移動方向に対して垂直（X 方向）と水平（Y 方向）の 2 方向の試験片を作製している（図中縦方向が X、横方向が Y）。

バインダー量は、インクジェットヘッドの電圧を変化させ、吐出量が砂型重量の 1.7%～3.3%となるように変化させた。

### 2.4 バインダー量、かさ密度の評価

バインダー量の測定は、各標準サイズ試験片の曲げ試験破断部から約 20g の砂を採取し、 $950^{\circ}\text{C}$ 、1 時間の強熱減量から推定した。

かさ密度は、ノギスによる寸法測定から求め

た体積および重量を用いて計算した。

## 2.5 通気性試験

内部に未硬化部を持つ場合とバインダー量を変化させた場合の通気性を調べた。

φ50mm、厚さ 20mm の円筒試験片に直径 φ20mm、厚さ 5, 10, 15mm の未硬化部を内部に設けた。バインダー量については、φ50mm、厚さ 30mm の試験片を用い、バインダー量 1.3, 2.18, 2.4, 3.26, 3.91%の試料を作製し試験した。

通気性の評価は、JIS 通気度試験機に各試験片を取り付け JIS 通気度試験法に準じて行った。排気時間から試験体を通る空気の流速を求め、流速と圧力勾配から空気の透過度  $k$  を求めた。なお、通気度 (JIS) は空気透過度  $k$  より換算した。

## 3 結果と考察

### 3.1 かさ密度、曲げ強度の分布

図2に標準サイズ試験片でのかさ密度分布を示す。かさ密度は  $1.44\text{g/cm}^3$  から  $1.50\text{g/cm}^3$  までばらついている。従来の手筆め式でのかさ密度  $1.5\sim 1.6\text{g/cm}^3$  に比べると若干低めである。リコーターにより砂は Y 方向 (左から右) にリコートされるが、造型エリアのかさ密度分布を見るとリコート方向、すなわち左から右に密度が高く、リコート方法による影響が明瞭に認められる。なお、この傾向は小型試験片でも同様であった。

図3に標準試験片の曲げ強度分布を示す。図2のかさ密度分布と同様、左から右に行くほど強度が高くなっている。また Y (図中水平) 方向の試験片が X (図中垂直) 方向の試験片よりも強度が低く、また、別途積層 (Z) 方向についても強度を比較した結果、 $X>Y>Z$  の順に強度が高くなることがわかった。

図4は曲げ強度とかさ密度の相関をプロットしたものであり、明らかな相関関係が認められており、造型位置によるかさ密度の変化が強度に大きな影響を及ぼしていると考えられた。

なお、曲げ強度は他メーカーの積層造型砂型で測定した富田<sup>3)</sup>らの結果と同程度であった。

一方、中子としての利用を考えるとシェル鑄型の曲げ強度が  $4\sim 5\text{N/mm}^2$  であるのに比較して  $1/2\sim 1/3$  程度と低い値である。リコートパラメータなどの改善によりかさ密度を  $1.55\text{g/cm}^3$  程度に上げることができれば、強度も向上し、シェル中子の代用としての活用など適応範囲の

拡大が期待できる。

### 3.2 バインダー量による曲げ強度の変化

図5にバインダー量を変化させたときの曲げ

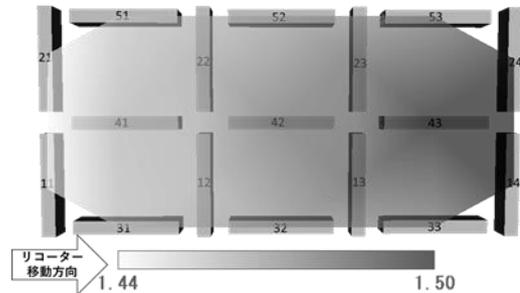


図2 造型位置におけるかさ密度の分布

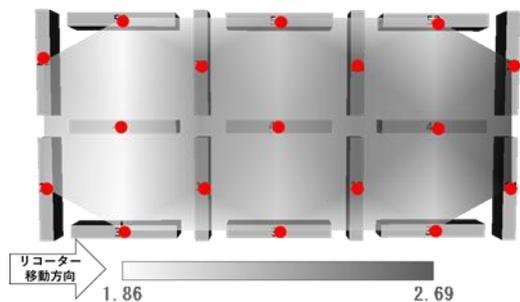


図3 造型位置における曲げ強度の分布

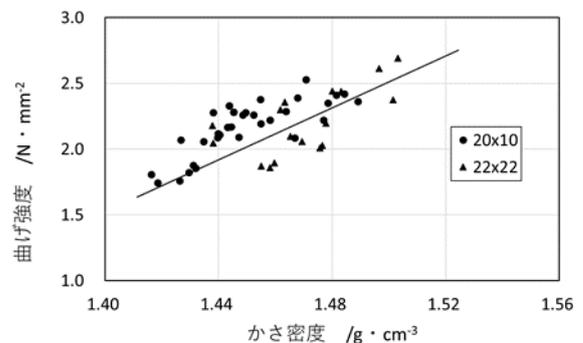


図4 曲げ強度とかさ密度との相関

強度の変化を示す。バインダー量の増加に伴い曲げ強度は単純に増加している。バインダー量が約 3.4%ではシェル鑄型の約 7 割の  $3.5\text{N/mm}^2$  程度の曲げ強度であった。強度が求められる複雑形状の中子などでは、バインダー量を増やすことも有効な方法と考えられる。

また、バインダー添加によるかさ密度の変化も認められた。図6にバインダー量によるかさ密度変化を示す。

なお、バインダーの重量増加分が密度に影響

するため、バインダー重量を差し引いて砂のみの重量より計算した修正かさ密度を併記している。

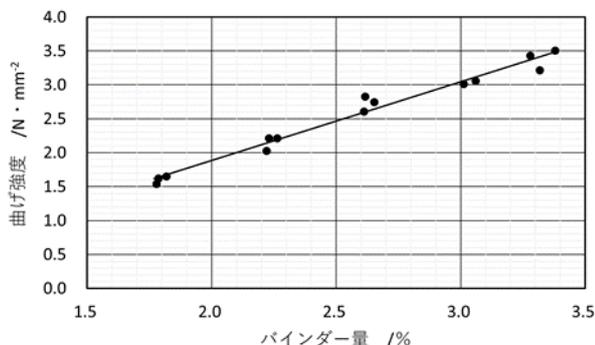


図5 バインダー量による曲げ強度の変化

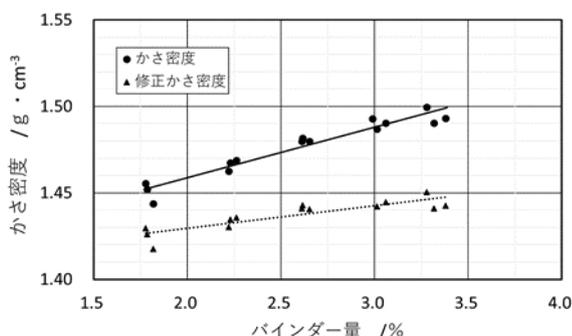


図6 バインダー量によるかさ密度の変化

バインダーの添加により、2%程度とわずかではあるがかさ密度が増加する傾向が認められた。これはバインダーの表面張力により砂が凝集し、かさ密度が増加したものと考えられる。

曲げ強度に対しバインダー量、かさ密度がどの程度影響しているのかを調べるために重回帰分析を行った。その結果を表1に示す。重相関係数は0.992で高い相関関係があることがわかる。また係数およびt値はそれぞれの因子が曲げ強度に対する影響度合いを示しており、バインダー量、かさ密度ともに曲げ強度と相関があることがわかった。

表1 曲げ強度に対する重回帰分析

	係数	標準誤差	t	P-値	重回帰統計	
修正かさ密度	0.22	0.10	2.22	0.05	重相関R	0.992
バインダー量	0.80	0.07	10.86	0.00	標準誤差	0.047
					観測数	14

### 3.3 通気性評価

図7に砂型の通気度に及ぼすバインダー量の影響を示す。バインダーの増加に従い直線的に透過度が減少する。透過度は粒径、粒子の形状係数、空隙率に依存し変化する。図中にかさ密度を記載しているが、バインダー添加によりかさ密度が増加している。本研究で粒径、形状係数は変化していないため、図6にも示したように、バインダーの添加によりかさ密度が増加し、空隙率が減少した結果、透過度が減少したと考えられる。

なお、バインダーの標準添加量2%の透過度(JIS)は78程度で、一般的なフラン砂型に比べて半分以下と低いが、これは積層造型砂型では砂の粒径が一般的なフラン砂型に比べ細かいことが影響している。

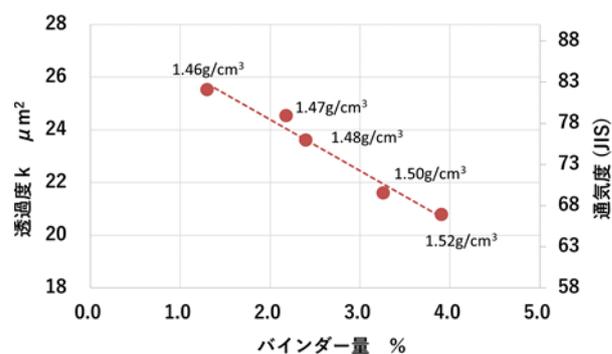


図7 通気性に及ぼすバインダー量の影響  
(図中の数字はかさ密度)

図8に砂型内部に未硬化部を設けた場合の透過度をかさ密度に対して整理して示した。未硬化部の増加に従い透過度が低下した。未硬化部0mmのかさ密度は1.49g/cm³程度であるが15mmでは1.57g/cm³と高い値となっており、かさ密度が増加し通気性が低下したと考えられる。硬化部分のかさ密度を1.49g/cm³と仮定し、未硬化部分のかさ密度を計算したところ、バインダーが添加されていないにもかかわらず、未硬化部分のかさ密度は1.62~1.65g/cm³で硬化部分よりかなり高い値であった。硬化していない砂は積層造型の際のリコートによる押しえつけや上に重なる砂の重量を硬化部分に比べて強く受けるため、緻密化されるものと考えられた。

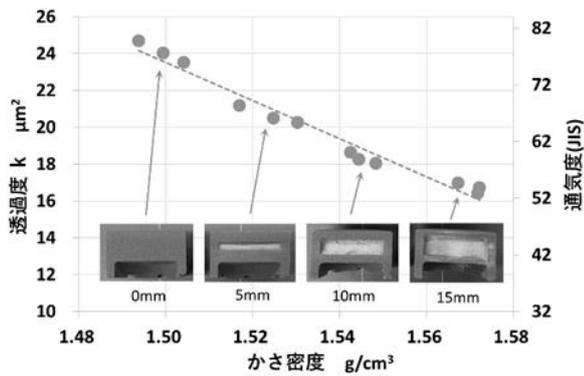


図8 未硬化部を持つ砂型の通気性  
(図中の数字は未硬化部厚さ)

#### 4 結 論

積層造型砂型の基礎的知見を得ることを目的とし、造型位置による曲げ強度、かさ密度、通気度特性について評価を行った。

砂型の曲げ強度には、バインダー量、かさ密度が大きく影響し、造型エリア内で明らかな分布が見られることが分かった。

また、通気度特性についても、かさ密度、バインダー量の影響を大きく受けるとともに、硬化していない砂は積層造型の際のリコートによる押さえつけや重なる砂の重量により緻密化され、通気度が低下することが分かった。

実際の casting プロセスにおいて積層造型砂型を活用するにあたっては、これらの状況を把握し安定した品質の鋳型を製造することが重要である。

#### 参 考 文 献

- 1) 岡根利光, 吉田 誠, 神戸洋史, 大場好一, 永井康弘, 小岩井修二, 戸羽篤也, 兼吉高宏, 鋳造工学, 90, 266 (2018)
- 2) 金森陽一, 樋尾勝也, 三重県工業研究所研究報, 41, 95 (2018)
- 3) 富田祐輔, 藤井英俊, 鋳造工学, 91, 148 (2019)

(問合せ先 兼吉高宏)