# 3D プリンタ造形物の強度評価と充填構造の設計 <sup>高橋</sup> 智<sup>1</sup>・児玉 和也<sup>2</sup>

## Strength Evaluation and Infill Structure Design of Objects by 3D Printing

## Satoshi TAKAHASHI<sup>1</sup> and Kazuya KODAMA<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Ishinomaki Senshu University,Miyagi 986-8580, Japan

### Abstract

In this study, we present an evaluation data of strength properties of fabricated objects by FDM type 3D printer. The specimen which varies in the lamination direction was shaped, and tensile test was carried out. In the test, strength properties of the specimen showed strongly anisotropy in the lamination direction. A finite element model using provided anisotropy was applicable to the strength evaluation of the bending deformation. Also, we propose a simple approach for infill structure design of 3D printed object. The validity of proposed infill design was confirmed by a finite element analysis and an experiment.

## 1. はじめに

近年、低価格(数十万円)な 3D プリンタがも のづくりの現場や教育機関に普及してお り<sup>(1)~(4)</sup>、本学においても機械部品の試作や位置 決め治具、鋳物型の製作などに活用されている。 最近では、ロボットの構造部品や筐体など強度が 必要な部品への活用も目立っている。これら部品 の設計においては、3Dプリンタ造形物の強度特 性を把握しておくことが重要である。低価格帯の 3D プリンタの多くはフィラメント状の樹脂を溶 融ノズル(出口径 0.4 mm 程度)から押出し、造 形テーブル上に積層する熱溶解積層(Fused Deposition Modeling, FDM) 方式であり、その造 形物の強度は異方性を有することが知られてい る<sup>(5),(6)</sup>。しかし、これら 3D プリンタによる造形 物の強度評価は十分とは言えず、さらなるデータ の蓄積が必要である。

一方、3D プリンタは CAD データ等から複雑 な形状を容易に造形できるだけでなく、従来の金 型成形では困難な閉じられた構造物内部の中空構 造も直接造形可能であることから、強度特性を変 化させるために内部の充填構造を設計でき る<sup>(7),(8)</sup>。

これらの背景より、本研究では低価格帯な

FDM 方式 3D プリンタに着目し、機種の違いや 積層方向の違いが造形物の強度特性に及ぼす影響 を実験的に評価する。また、実験により得られた 異方性物性値の強度解析への適用について検証す る。さらに、3D プリンタによって実現可能な内 部充填構造の簡易的な設計手法を提案し、設計し た構造物の強度特性を評価する。

#### 2. 強度評価の実験

#### 2.1 3D プリンタ機種と造形条件

研究には表1に示す2種類のFDM方式3Dプ リンタを用いた。どちらの機種も低価格帯の汎用 3Dプリンタとして、教育機関や個人ユーザーに 多く利用されている。ここでは便宜上、機種A (CreatorPro:Flashforge 社)、機種B(MF-1100; 武藤工業)と呼ぶ。機種AはRepRapと呼ばれ るオープンソースハードウェアを基に設計されて おり、筐体構造はボックス型、溶融ノズルの動き を2次元平面(X、Y軸)で制御し、造形テーブル の動きを積層方向(Z軸)に制御している。冷却 ファンは1つで、ノズル出口をスポット冷却する システムである。一方、機種Bは、筐体構造はフ レーム型、溶融ノズルは造形テーブルに対して横 軸(X軸)にのみ平行移動し、造形テーブルが前

<sup>1</sup>石卷専修大学理工学部機械工学科

<sup>2</sup>石卷専修大学理工学部機械工学科 平成 30 年度卒業生

	機種 A	機種 B
機種名称;メーカー	CreatorPro;Flashforge 社	MF-1100;武藤工業
筐体構造	ボックス型	フレーム型
X 軸 (横方向) の位置決め	溶融ノズルが移動	溶融ノズルが移動
Y 軸 (奥方向)の位置決め	溶融ノズルが移動	造形テーブルが移動
Z 軸(積層方向)の位置決め	造形テーブルが移動	造形テーブルが移動
溶融ノズル出口径	$\phi$ 0.4 mm	$\phi$ 0.4 mm
冷却ファン	1個、ノズル先端をスポット冷却	2個、造形物の全体を冷却
スライスソフトウェア	FlashPrint 3.28.0	KISSlicer 1.1.0.14

表1 FDM 方式 3D プリンタの仕様

後方向(Y軸)と積層方向(Z軸)に移動する。冷 却ファンは2つ有しており、ノズル出口より少し 離れた後方から、造形物全体を送風冷却するシス テムである。なお、各機種の造形パラメータは専 用スライスソフトウェアにて制御している。本研 究では、造形物の形状を 3D-CAD (Solidworks 2017)でモデリングし、図1に示す造形パラメー タを設定した。

## 2.2 実験材料

FDM 方式 3D プリンタの樹脂フィラメントに は、熱可塑性樹脂の汎用プラスチックやエンジニ アリングプラスチックが用いられる。低価格帯の 3D プリンタの多くは、溶融温度が低く、熱収縮 が小さい等の理由からポリ乳酸(PLA)樹脂の利 用が一般的である。本実験では PLA 樹脂フィラ メント(Verbatim 3D printer filament PLA 1.75 mm natural; 三菱ケミカルメディア)を用いた。

### 2.3 引張試験による強度評価

3D プリンタ造形物の強度特性を評価するた め、JIS K 7139のダンベル型引張試験片(タイプ A2 形状、平行部幅10mm、厚さ4mm)の形状に 従い、図2に示す3方向の試験片を造形した。造 形テーブルの横方向をX方向、奥行き方向をY 方向、積層方向をZ方向とし、試験片長手方向と 幅方向を基準に、それぞれXY試験片、XZ試験 片、ZY 試験片と呼ぶ。XZ 試験片については、平 行部がテーブルに接地しないためサポート材を付 け、造形後に除去した。なお、X 方向とY 方向の 造形による異方性は無いものと仮定し、YX 試験



片等は検討しない。各種5本、計30本の試験片 を造形し、万能試験機(AGS-X10kN;島津製作 所)を用いた引張試験により強度特性を評価した。 試験速度は5mm/minである。

#### 2.4 異方性解析モデルによる強度評価

引張試験によって得られた異方性特性が、CAE による強度解析の単純平板モデル(積層は考慮せ ず、異方性のみを考慮した平板モデル)の物性値 として適用できるかを検証するため、JIS K 7171 に基づいた3点曲げ試験の実験と数値解析を行っ た。試験片寸法は80×10×4mmの平板試験片 であり、試験速度は5mm/min、支点間距離は64 mmである。前節と同様に3方向の試験片を機種 Aにより造形した。曲げ実験には縦型伝動計測 スタンド(MX-2000N:イマダ)を用い、CAE に よる強度解析は有限要素法に基づいた線形直交異 方性弾性モデルとし、ソフトウェアは SolidWorksを用いた。

## 3. 強度評価の結果と考察

### 3.1 造形精度

図3、4は造形した各引張試験片の寸法誤差で ある。寸法誤差は、ノギスにて計測した実測値を 設計値(幅10mm、厚さ4mm)で除した値であ る。積層ピッチ 0.2 mm と幅の比は 0.02、厚さと の比は 0.05 であることを考慮すると、XY および XZ 試験片については、誤差は全体的に小さく概 ね期待通りの寸法精度が得られている。また、機 種 A と B による違いは小さく、再現性も良好で あることがわかる。一方、ZY 試験片については、 厚さの誤差が大きい。ZY 試験片の造形において は、小さな領域を積層方向に高く造形していくた め、筐体の揺れや Z 方向の位置決め精度の影響が 顕著に現れたと推察できる。また冷却方法の違い もあり、機種Bで造形したZY 試験片の厚さには 膨らみが見られ、溶融樹脂の冷却が不十分であっ たと考えられる。積層方向に細長い部材を造形す る場合は、機種の仕様に起因する寸法誤差を把握 することが必要である。

#### 3.2 引張特性

図 5、6 は引張試験の結果から算出した各引張 試験片の応力 – ひずみ線図である。なお、応力の 算出には、前節で実測した平行部の寸法を用いた。 XY および XZ 試験片については、最大応力を過 ぎるまでは、定量的ならびに定性的にほぼ同じ傾 向を示している。最大応力後の線図については、



試験片の破壊プロセス(塑性変形が集中的に起こ る箇所や亀裂が進展する箇所の違い)に起因した 差異がある。一方、ZY 試験片については、線図 の非線形部分はほぼ無く、積層部から脆性的に破 壊したと推察できる。図7、8は応力-ひずみ線 図を基にして得られた引張弾性率(ひずみ 0.05% から 0.25%間の傾き)と引張強さ(最大応力)を まとめたものである。比較のため、熱プレス法で 作製した金型試験片の結果も示す。XY および XZ 試験片については、金型試験片と比べ引張強 さは少し低いものの良好な強度特性を有している ことがわかる。また、造形方向の違いによる強度 の差は小さく、引張方向に垂直な積層方向であれ ば強度特性に大きな違いはないことを示唆してい る。一方、ZY 試験片については、他の試験片と 比べ弾性率と引張強さが低いことがわかる。特 に、引張強さは金型試験片の半分程度である。こ

## 3D プリンタ造形物の強度評価と充填構造の設計



れは、引張方向と積層方向が同じであることから、 積層間の接着強度が大きく影響していると考えら れる。特に機種 B のばらつきが大きいのは、造形 誤差および冷却の影響に起因するものと推察でき る。これらの結果から、3Dプリンタ造形物の強 度は、特に積層方向に注意して評価することが重

表2 解析に用いた直交異方性

	弾性率 (GPa)	降伏応力 (MPa)
X、Y 方向	2.55	44.86
Z(積層)方向	2.35	35.81



図10 解析結果の一例(応力分布)

要であることがわかる。

## 3.3 3 点曲げ試験による強度特性

表2は、引張試験結果により得られた異方性特 性であり、この値を強度解析の直交異方性値とし た。なお、X および Y 方向の降伏応力は 0.2% 耐 力を用い、Z方向の降伏応力は最大応力を用いた。 図9は3点曲げ試験の解析モデルである。ここで は解析精度を重視して、可能な限り細かな要素分 割を行った。

図10は、曲げ解析結果の一例を示したもので ある。解析モデルの最大主応力成分と表2で設定 した降伏応力を比較することで、塑性変形が始ま る箇所や荷重の大きさを予測することができる。 図11は各方向試験片の曲げ試験結果であり、解 析結果と代表的な実験結果の荷重-たわみ線図を





4 たわみ (mm)

6

8

10

0 0

2

(c) ZY 試験片 図11 3点曲げ試験の荷重ーたわみ線図

示した。実線は実験値、破線は解析値を示す。黒

丸は解析結果から予測した塑性変形開始点であ る。XY 試験片(厚さ方向に積層)の実験値は解 析値と比べて低い値を示した。これは積層面にお いて面内せん断力が発生したことが原因と考えら れる。一方、XZ 試験片(幅方向に積層)は、積層 面にせん断力は作用しないことから、実験と解析 の結果はよく一致している。ZY 試験片(長手方 向に積層)の実験値は、解析値に比べて低い値を 示し、他の試験片に比べ脆性的な破壊となった。 荷重方向と積層面内方向が同じであることから、 大きなせん断が生じ、理想的な曲げ変形にならな かったと考えられる。脆性的な破壊は、積層面の 接着強度に起因するものと考えられる。これらの 結果から、積層面に複合的な荷重が生じる場合や 定量的な評価が必要な場合は、異方性だけではな く積層間の接着強度等を考慮した解析モデルの構 築が必要であることがわかる。しかし、異方性の みを考慮した解析モデルでも、初期設計や塑性開 始箇所の定性的な評価においては十分に利用する ことができる。

#### 4. 充填構造の設計

## 4.1 充填率傾斜平板の設計

本研究では、内部充填構造の設計として、容易 に設計変更可能な平板モデルを提案する。図12 に示すように、内部充填構造を格子状として充填 率を80、60、40、20%とした3次元薄板をモデリ ングする。これらを任意の順に積層し、充填率 100%の薄板でサンドイッチすることで、様々な 内部充填率を有した平板の設計が容易にできる。 図13は内部充填率を設計した2種類の平板(全 15 層)について、厚さ方向の充填率を示したもの である。最外側の層は省略し、縦軸は第 n 層(n = 1~13)、横軸は充填率を示す。構造1は平板外 側の充填率を高くし、内側を低くした構造、構造 2は外側の充填率を低く、内側を高くした構造で ある。これらの構造の強度特性を評価するため、 先の3点曲げ試験と同様な数値解析を行った。ま た、機種Aを用い構造1と構造2の平板を厚さ を積層方向として造形し、曲げ実験によって設計 の妥当性を検証した。



(b) 構造 2 図 13 充填率傾斜平板の設計例

髙橋 智・児玉 和也



#### 4.2 充填率傾斜構造平板の強度評価

図14は、構造1の強度解析結果の一例を示し たものであり、内部充填構造の応力分布を局所的 に評価することも可能である。図15は、3点曲げ 試験結果の荷重-たわみ線図である。実線は実験 値、破線は解析値を示し、黒丸は解析モデルの応 力分布から予測した塑性変形開始点である。弾性 領域において実験値と解析値はよく一致してお り、充填構造を変化させることで、構造1は剛性 があり、構造2は剛性がない(しなる、低弾性)結 果が得られた。このように3Dプリンタ造形物の 強度特性は、内部充填率の設計によって変化させ ることが可能であることを検証できた。

#### 5. まとめ

本研究では低価格帯な FDM 方式 3D プリンタ に着目し、機種の違いや積層方向の違いが造形物 の強度特性に及ぼす影響を実験的に評価した。さ らに簡易的な内部充填構造の設計手法を提案し、 その妥当性を検証した。その結果以下のことが明 らかになった。

・長手方向に細長い形状を造形する場合は、機 種の仕様(位置決め精度、冷却方法)に起因する 誤差の把握が重要である。比較的広い領域の造形 においては、機種間の違いは小さく、また造形物 の再現性も良好である。

・積層方向と引張荷重の方向が同じ試験片は、 金型試験片に比べ強度が半分程度となった。これ は、積層間の接着強度の起因するものと考えられ る。その他の造形方向の試験片は、金型試験片と 同程度の強度を有する。



・引張試験によって得られた異方性物性値を用 いることで、解析モデルの積層を考慮せずとも、 曲げ変形を生じる構造物の強度特性(線形挙動、 塑性変形開始部)の評価が可能である。しかし、 複合的な荷重が生じる場合には、異方性だけでは なく積層間の接着強度等を考慮した解析モデルの 構築が必要である。

・内部充填構造の設計により構造物の強度特性 (剛性)を大きく変えることができ、その傾向を強 度解析によって評価できた。また、設計した内部 傾斜構造は、3Dプリンタを用いることで容易に 造形でき、その強度特性は解析値と同じ傾向を示 すことが検証できた。

今後は、3D プリンタ造形物のより正確な強度 評価のための力学的モデルの構築や、内部充填構 造設計の最適化手法について研究を進めていく。

#### 6. 文献

 (1) 高藤 圭一郎, 白山 晋, 日本機械学会九州支部 第 70 期総会講演会 (2017) no. 112.

 (2) 高野 晃伸,中川 雅人,吉川 杉生,中部学院大学・ 中部学院大学短期大学部 研究紀要 第 20 号 (2019) pp.
87-92.

(3) S.Brishetto, C. G.Ferro, R. Torre, P. Maggiore, *Curved and Layered Structures*, Vol. 5, Issue 1 (2018) pp. 80-94.

(4) X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui, *Composites Part B*, Vol. 110 (2017) pp. 442-458.

(5) 太田 崇文, 岡田 耕治, 齊藤 梓, 吉田 一也, 村澤

剛,川上勝,古川英光,日本機械学会論文集83巻850 号 (2017) p. 16-00567.

(6) 佐藤 一志,石川信幸,仙台高等専門学校名取キャンパス研究紀要第53号(2017) pp. 7-10.

(7) O. Schumacher, B. Bickel, J. Rys, S. Marschner, C. Daraio, M. Gross, *Journal ACM Trans*- actions on Graphics, Vol. 34, Issue 4 (2015) Article no. 136.

(8) L. Wang, J. Kang, C. Sun, D. Li, Y. Caoa, Z. Jin, *Materials and Design*, Vol. 133 (2017) pp. 62–68.