T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	産業応用に向けた3Dプリンタ製ロボット機構部品 ー第6報：充填形状・充填率・造形速度と梁の曲げ強度ー
Title(English)	Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot Relationship between Infill Pattern, Infill Density, and Printing Speed and Bending Strength of Beams
著者(和文)	大澤来実, 遠藤玄
Authors(English)	Kurumi Osawa, Gen Endo
出典(和文)	第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2023, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2023 The Society of Instrument and Control Engineers

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

産業応用に向けた 3D プリンタ製ロボット機構部品
第 6 報：充填形状・充填率・造形速度と梁の曲げ強度

○大澤 来実（東京工業大学），遠藤 玄（東京工業大学）

Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot
Relationship between Infill Pattern, Infill Density, and Printing Speed and Bending Strength of Beams

○ Kurumi OSAWA (Tokyo Tech), and Gen ENDO (Tokyo Tech)

Abstract: Beam-shaped specimens were fabricated using two types of 3D printers with different printing speeds and tested using three-point bending tests. Consequently, triangular infill pattern was stronger than line and gyroid, and the higher the infill density, the higher the strength. As for the printing speed, there was no significant difference in strength in the specimens with 100% infill density.

1. 緒言

近年，複雑な形状の部品をより早くかつ軽量に製作できることから，3D プリンタが普及している．3D プリンタには様々な種類があるが，中でも FFF 式は熱可塑性樹脂のフィラメント材料を熱で溶かし押し出すことで造形する方法であり，材料も含めて価格が安く手に入りやすいことから最も広く使用されている．

3D プリンタで造形した樹脂部品を使用して，減速機やロボットを開発している研究例 [1] が多くある．樹脂部品は金属に比べて著しく強度が低いが，充填率などの造形条件によって強度が大きく変化するという特徴を持っている．そのためこれまで，充填形状や造形方向をパラメータとして曲げ試験を実施した研究 [2][3] など，造形条件の違いによる強度の比較が行われてきた．これらは，寸法が規格に基づいており薄板で充填部分が少なく，PLA や ABS を扱ったものが多い．しかし，ロボットに応用する際には厚みを持った部品が必要になることが多い上に，より高強度な材料の使用が望まれる．そこで我々は，3D プリンタ部品をロボットに応用するため強度の高い造形物を作ることを目指し，充填形状・充填率・造形速度をパラメータとして，厚みのある梁形状の樹脂試験片の強度を測定する試験を実施した．

2. 評価試験の詳細

2.1 試験方法

12.2×12.2×80[mm] の梁形状の試験片を用意し，Fig. 1 に示すように Autograph（島津製作所，AGX-20kNVD）を用いて 3 点曲げ試験を実施した．ISO 178：2010 を参考にし，試験片の寸法は奥行きを 80[mm]，曲げ試験の支点間距離を 64[mm]，試験速度 2[mm/min]，圧子の半径 5[mm] と設定した．試験片の中央に圧子が来るよう調整し，試験片が割れるまでの変位と荷重を測定した．3D プリンタで造形すると寸法が CAD 上と異なることがあるため，実寸を測定し CAD の寸法を微調整することで試験片の寸法をそろえた．

2.2 試験片

3D プリンタには，Raise3D 社の Pro2 とグーテンベルク社の G-ZERO を使用した．これらは，造形速度の異なる FFF 式 3D プリンタとして選択した．スライサーソフトウェアは，それぞれ ideaMaker と PrusaSlicer を用いた．試験片の樹脂には，大塚化学株式会社のポチコンと呼ばれるチタン酸カリウム繊維強化材料 [4] を使用した．ポチコンは，カーボン長繊維強化を除き FFF 式 3D プリンタ用のフィラメント材料として我々が知る限り最も高強度であり，耐衝撃性・耐摩耗性に優れた材料である．

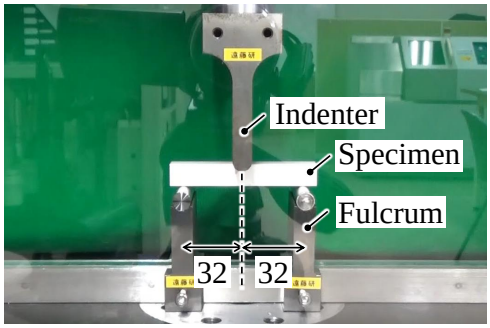


Fig.1 3 点曲げ試験の様子

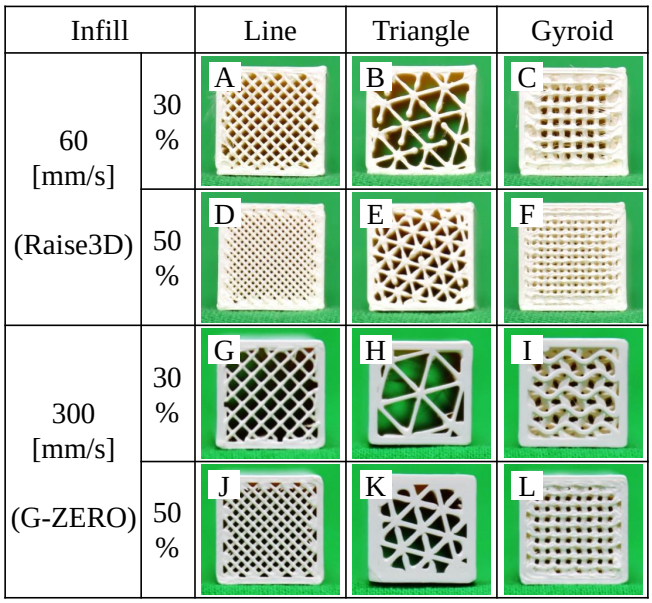


Fig.2 充填率 30%・50%試験片

製作した試験片の断面を Fig. 2，3 に示す．造形条件として，充填形状・充填率・造形速度をパラメータとした．充填形状は線状・三角形・ジャイロイドの 3 条

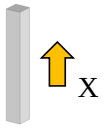
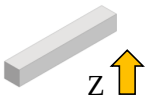
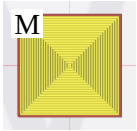
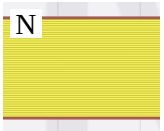
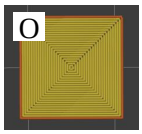
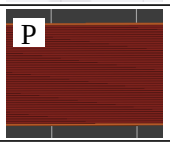
Infill (Number of infills)	Circle (21)	Line (44)
Lamination Direction)		
60 [mm/s] (Raise3D)		
300 [mm/s] (G-ZERO)		

Fig.3 充填率 100%試験片

件，充填率は 30%・50%・100%の 3 条件，造形速度は 60[mm/s]（Raise3D）・300[mm/s]（G-ZERO）の 2 条件で比較することとした．3D プリンタによって使用するスライサーソフトウェアが異なるため，Fig. 2 のように充填率が同じであっても充填形状には違いがある．そこで，充填速度による比較を行うため，充填形状が一致する充填率 100%の条件でも試験を実施することとした．この際，充填率 100%試験片は，Fig. 3 に示すような 2 種類の積層方向 X，Z で造形し，充填形状はそれぞれ同心円状（1 層あたり，外壁+21 周），線状 (1 層あたり，外壁+44 本) にして製作した．このような形状としたのは，充填形状を三角形などにすると内部に隙間ができ，実質 100%の密度にすることができないためである．充填率 30%，50%の積層方向は，Fig. 3 の同心円状と同様で X とした．その他の造形条件としては，ノズル径 ϕ0.4，押し出し幅 0.3[mm]，層厚 0.15[mm]，ノズル温度 270[°C]，ベッド温度 85[°C]，外壁の印刷速度は造形速度の半分と設定した．また外壁数については，充填率 30%・50%は 2，100%は 1 で実施した．これ以降，試験片はそれぞれ Fig. 2，3 に示しているアルファベットで呼ぶこととする．試験片は各条件につき 3 個ずつ製作し試験を行った．

2.3 評価方法

3 点曲げ試験では荷重と変位のデータが得られる．その値から応力とひずみを求めて評価する．応力 σ[MPa]，ひずみ ε[%] は以下の式で求められる．

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{600vh}{L^2} \tag{2}$$

ただし，試験片の幅を b[mm]，試験片の高さを h[mm]，荷重を F[N]，変位を v[mm]，支点間距離を L[mm] とした．正確には，充填形状によって断面 2 次モーメントは異なるが，$b \times h$ の中実の断面を持つ部材を扱うことを考えて応力とひずみを算出した．

また，充填形状や充填率により試験片の質量が変化するため，比強度についても評価を行う．比強度 S[Nm/g] は，以下の式で求められる．

$$S = \frac{\sigma_{max}}{\rho} \tag{3}$$

ただし，最大応力を σ_{max}[GPa]，試験片の密度を ρ[g/mm^3] とした．なお密度は，各試験片の質量 [g] と体積 [mm^3] を実測することで算出した．

3. 結果と考察

2.3 の計算式を用いて求めた応力ひずみ線図を Fig. 4 に示す．図に示されている avg. は，3 回実施した結果において，試験片が割れた瞬間の最大応力の平均値を示している．また，Fig. 4 で示した最大応力を基に，算出した比強度を Table 1 に示す．これらの試験結果からは，次のような考察ができる．

- 充填形状に関して，三角形が線状やジャイロイドに比べて強度が高い．これは比強度に直しても同じ結果であり，三角形は曲げに対して力を分散しやすい構造であるからだと考えられる．また形状についての考察として，B および E の断面に注目すると，三角形の形状が切れていることが分かる．これは，ノズルの温度が高くポチコンの溶融粘度が上がることで，層内において交差する箇所がある際に充填が最後までされなくなったからだと考えられる．しかし，ノズルの温度を低くすると樹脂が溶けにくくなり造形不可になることから，今回のような造形条件において，三角形に代表されるような層内で交点がある造形は難しかったといえる．
- 充填率に関して，同じ充填形状ならば 50%の方が 30%に比べて強度が高い．ただし比強度では，A～F の場合にはわずかな差ではあるが 50%の方が強度が低い結果となった．造形速度が遅いと 1 つ前の層が冷えた後に次の層を造形することになり，層間の密着度が低くなるため，充填率を上げてもそれほど強度が向上しなかったと考えられる．
- 造形速度に関して，積層方向 X の場合には 60[mm/s] が，積層方向 Z の場合には 300[mm/s] の方が強度が高い．X の場合には，一層あたりの面積が小さいことから造形速度による層間の密着度に差はないが，60[mm/s] では速度が遅いことによって長時間試験片が高い温度の状態に置かれることになり，結果アニール処理（熱可塑性樹脂に対して熱を加えることで，加工後の残留応力を取り除く処理）がかかることで強度が高くなったと考察できる．一方，Z の場合には一層あたりの面積が大きいが，300[mm/s] であれば速度が速いため前の層がまだ温かいうちに造形でき，層間の密着度を高めることができる．よって，このような強度の差が生まれたと考えられる．ただ，これらの値に大きな差はなく，300[mm/s] の場合には 5 倍の速度で同じ強度のものを製作できるため，時間的コストの削減につなげられると言うことができる．

今回の試験では，A～L に関しては積層方向 X のみについての議論であり，積層方向が変われば結果も変わる可能性があることには注意しなければならない．さらに，曲げ試験だけでなく，引張やクリープ変形に対しての強度を測定することも重要であると考えらえる．

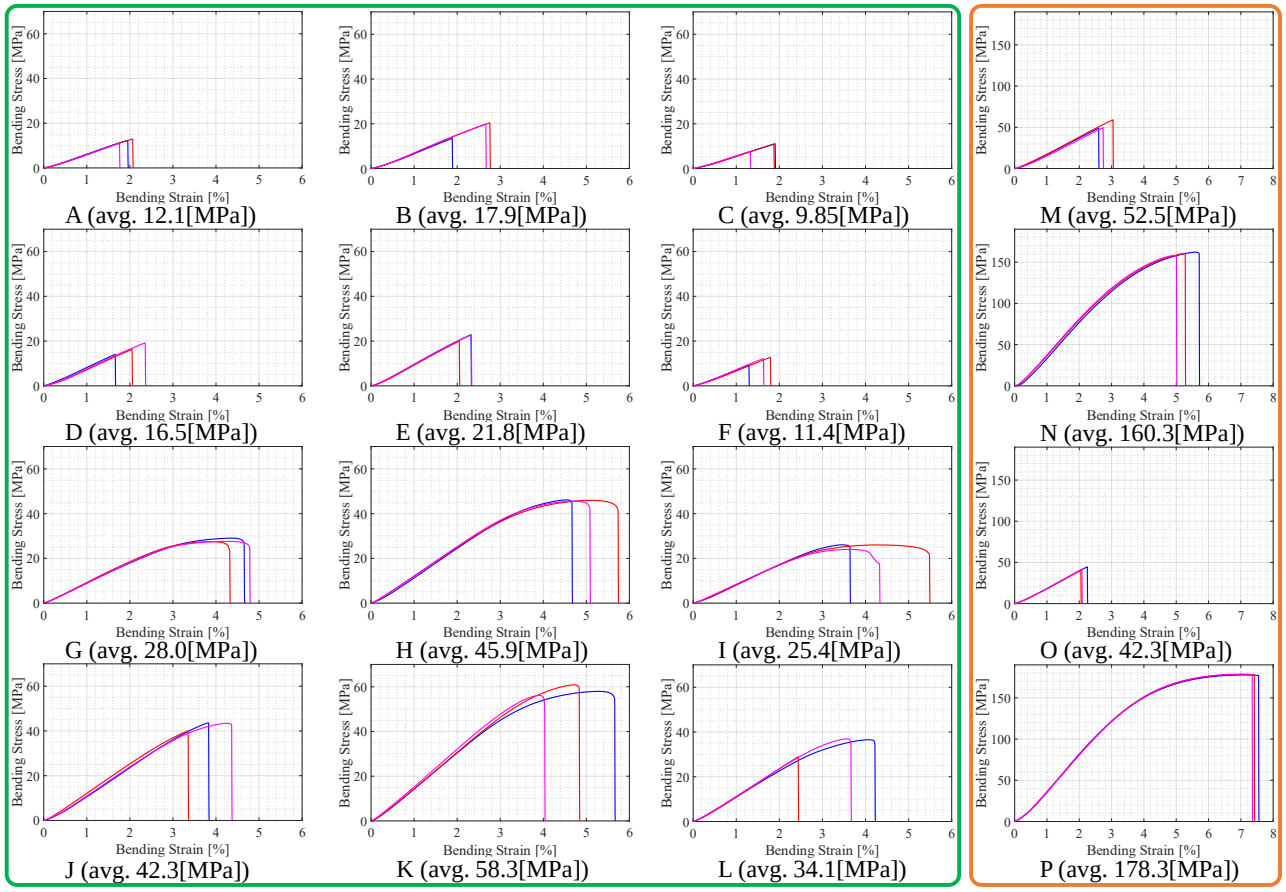


Fig.4 応力ひずみ線図（緑色の囲いは充填率 30%・50%の比較，黄色の囲いは充填率 100%の比較）

Table 1 比強度

Specimen	Weight (g)	Specific strength (Nm/g)
A	6.46	22.3
B	6.41	33.2
C	6.46	18.2
D	8.89	22.1
E	8.88	29.3
F	8.70	15.6
G	7.40	45.1
H	7.67	71.2
I	7.14	42.3
J	9.52	53.0
K	9.54	72.8
L	9.22	44.1
M	14.2	43.6
N	14.5	131.7
O	14.3	34.5
P	14.5	146.5

4. 結言

造形速度の異なる 2 種類の 3D プリンタを用いて，チタン酸カリウム繊維強化ナイロン樹脂の試験片を製作し，3 点曲げ試験により曲げ強度を測定した．その結果，充填形状においては三角形が，充填形状が同じであれば充填率が高い方が強度が高いことが分かった．造形速度に関しては，充填率 100%の試験片において強度に大きな差はないことが分かった．

今後の展望として，他の充填形状・充填密度・造形速度についても試験を実施することが考えらえる．また，今回の試験では試験片造形後にアニール処理を行わなかったが，これを実施することで強度に違いが表れるのか議論することも重要であると考えられる．

謝辞

本稿執筆にあたり，大塚化学株式会社の材料や情報のご提供，ならびにご助言を賜りました．ここに深甚なる謝意を表します．貴重なコメントと議論をいただきました武居直行教授（東京都立大学），太田祐介教授（千葉工業大学），高木健教授（広島大学）に感謝いたします．

参考文献

[1] 角田柊平，難波江裕之，鈴森康一，遠藤玄: “熱溶融積層方式による樹脂構造材を用いた四足歩行ロボット TITAN-E1 の開発”. ロボティクス・メカトロニクス講演会 *2022* 講演論文集, (2022).

[2] J. Antonio Travieso-Rodriguez et al.: “Mechanical Properties of 3D-Printing Polylactic Acid Parts subjected to Bending Stress and Fatigue Testing”. *Materials* 12.23, (2019).

[3] Márton Tamás Birosz, Dániel Ledenyák, and Mátyás Andó: “Effect of FDM infill patterns on mechanical properties”. *Polymer Testing* 113, p. 107654, (2022).

[4] 大塚化学株式会社: ポチコン「ティスモ」配合複合材料. Accessed on 29.09.2023. URL: https://www.otsukac.co.jp/products/chemical/poticon/.