

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	3Dプリント製樹脂部品の金属部品への摩擦接合及び支圧接合による締結部の設計法
Title(English)	Design Methods for Frictional and Bearing Joints Between 3D-Printed Parts and Metal Parts
著者(和文)	塚本悠太, 有賀嵩紘, 遠藤玄
Authors(English)	Yuta Tsukamoto, Takahiro Aruga, Gen Endo
出典(和文)	日本設計工学会 2025年度秋季大会研究発表講演会
発行日	2025, 11

3D プリント製樹脂部品の金属部品への 摩擦接合及び支圧接合による締結部の設計法

Design Methods for Frictional and Bearing Joints Between 3D-Printed Parts and Metal Parts

○塚本悠太（東京科学大学, Yuta TSUKAMOTO）※
有賀嵩紘（東京科学大学, Takahiro ARUGA）
遠藤玄（東京科学大学, Gen ENDO）

1 緒言

樹脂材料を用いた 3D プリントは、形状自由度の高さや造形の容易さから注目されている。このような 3D プリント技術は、3D プリンタの開発に加え、樹脂材料の開発が進んでおり、バルク材のエンジニアリングプラスチックや金属材料と同等の強度を有する材料も登場している¹⁾。そのため充填構造の工夫により軽量で、複雑な形状を容易に造形することのできる 3D プリント技術は試作部品に限らず、最終製品への適用も期待されている。しかしながら 3D プリント部品に関する研究の多くは、標準試験片を用いた樹脂材料単体の機械的特性の評価に限られており、機械部品の要素技術は十分に検討されていない。そのため 3D プリント部品の設計法は体系化されておらず、プロトタイプ用途に制限されているという現状がある。

機械製品には、樹脂材料を用いた 3D プリントによる製作が困難であるような、モータ等のアクチュエータやベアリング等の機械要素が多く用いられている。そのため 3D プリント技術の適用範囲を拡大するためには、このような部品と 3D プリント部品との締結について、設計法を構築する必要がある。従来用いられてきた金属部品とアクチュエータや機械要素との締結では、ねじを用いた部品締結法が多く用いられてきた。これはねじを用いた締結法が、締結力の管理や部品交換が容易であることと、規格品が十分に整備されているという特徴を有しているためである。このようなねじを用いた締結法は、被締結部品を介してねじをナットに対して締め付けることで、ねじに引張力（軸力）、被締結部品に圧縮力が作用する。さらに被締結部品に作用した圧縮力により、被締結部品間に摩擦力が生じ、部品が締結される。このような部品締結法は、摩擦接合と呼ばれる（図 1 (a)）²⁾。一方、摩擦接合により締結された被締結部品に対し、外部から摩擦力以上の力が作用すると、被締結部品間に滑りが生じる。このとき被締結部品は、ねじの側面と被締結部品の通し穴の内面の接触箇所に生じる支圧力により部品が締結されており、支圧接合（図 1 (b)）²⁾と呼ばれる締結法に遷移する。そのため摩擦接合では、被締結部

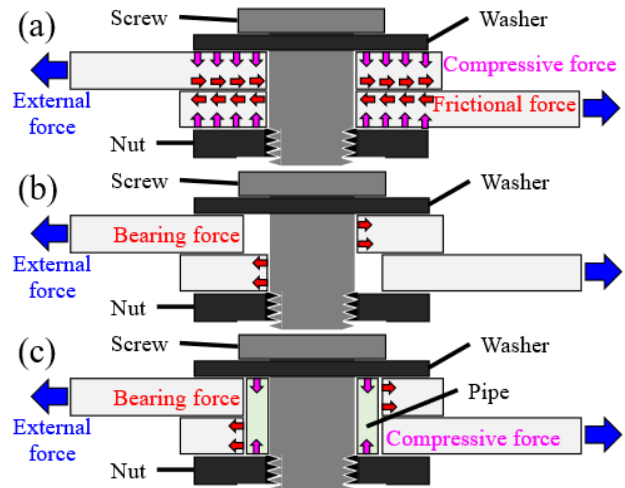


Fig. 1 Fastening method using screw
(a) Friction joint, (b) Bearing joint,
(c) Bearing joint using thin-walled pipe

品が低強度・低剛性である場合、被締結部品が大きく変形して十分な摩擦力が生じず、適切に締結することができない場合がある。さらに被締結部品の変形は、位置決め精度や締結部における剛性の低下の原因となり得る。そのため従来の 3D プリント部品は、大きな変形を防ぐため小さな締め付けトルクで締結されており、十分な締結力を担保することができないという課題がある。そこで著者らは以前の研究において、金属製薄肉円筒部品を用いた支圧接合による部品締結法を提案した（図 1 (c)）³⁾。本手法では被締結部品の通し穴に対して薄肉円筒部品を挿入し、薄肉円筒部品と同軸にねじを配置してナットに対して締め付けている。そのため薄肉円筒部品が、ねじを締め付ける際に被締結部品に生じる圧縮力を支えるため、被締結部品に変形が生じない。そして薄肉円筒部品の側面と被締結部品の通し穴の内面において、支圧接合により部品が締結されている。

従来の研究では、3D プリント製樹脂部品の締結に摩擦接合と金属製薄肉円筒部品を用いた支圧接合を適用した場合について、一定の締め付けトルクでの有効性の評価に限られている^{3)~5)}。そこで本研究では、適切な締め付けトルクと金属製薄肉円筒部品の寸法について評価し、設計法を提案することを研究目的とする。これらの部品締結法では、ねじの締め付け時に生じる圧縮力を、前者では被締結部品であ

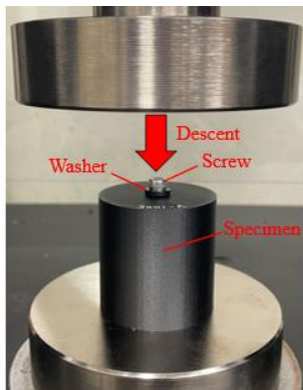


Fig. 2 Bearing strength test of 3D printed parts

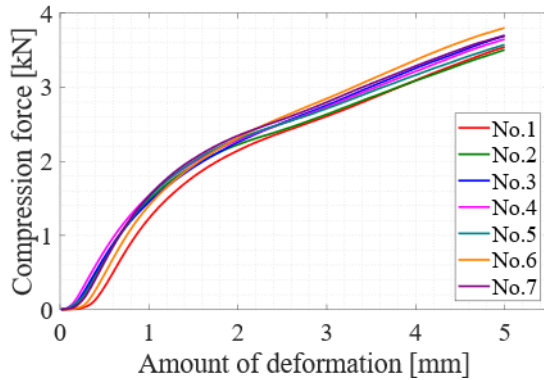


Fig. 3 Result of Bearing strength test

る 3D プリント製樹脂部品、後者では金属製薄肉円筒部品が支える必要がある。したがって、3D プリント製樹脂部品単体について、圧縮力と部品の変形量との関係を定量的に評価する。さらに以前の研究で得られた結果³⁾から、金属製薄肉円筒部品の適切な肉厚を評価する。これらの評価をもとに、3D プリント製樹脂部品の締結部についての設計法を提案する。

2 ねじの締め付け時に生じる圧縮力に対する 3D プリント製樹脂部品の評価実験

2.1 実験方法

図 2 に示すように精密万能試験機 (AGX-20kNVD, 島津製作所) を用いて、ワッシャ (内径 4.0 mm, 外径 10.0 mm, 板厚 2.0 mm) を介して 3D プリント製試験片の通し穴に挿入した M4 の六角穴付ボルトの頭に圧縮力を作用させ、圧縮力による部品の変形量を計測した。ここで試験片は厚さ 45 mm とし、短繊維炭素繊維強化樹脂フィラメント (Onyx, Markforged) を用いて、3D プリント (Onyx One, Markforged) により造形した。さらに、造形条件はノズル径を 0.4 mm, 積層ピッチを 0.1 mm として、37%の充填率, 三角形の充填構造, 2 層のウォール, 部品の上下面に 4 層のソリッドフィルを設定した。7 個の試験片について、試験速度を 1 mm/min として、部品の変形量が 5 mm に達するまで変形させ、評価した。

2.2 実験結果

図 3 に横軸を部品の変形量, 縦軸を圧縮力として、



Fig. 4 Appearance of specimen after test

実験結果を示す。ただし、1 N の圧縮力が作用した際の試験機の変位を 0 mm の部品の変形量として描画している。実験結果から、圧縮力と部品の変形量との間には 3 種類の関係があることがわかる。

第一に圧縮力が 0 N から 0.2 kN までの範囲であり、圧縮力に対して部品が大きく変形することがわかる。これはワッシャと被締結部品の接触面において、適切に圧縮力を伝達するために被締結部品に変形が生じたと推察される。

第二に圧縮力が 0.2 kN から 1.0 kN までの範囲であり、圧縮力と部品の変形量との間に比例関係がみられ、3D プリント製部品に比較的小さな変形量が生じながら圧縮力を支えられることがわかる。

第三に圧縮力が 1.0 kN 以上の範囲であり、圧縮力に対して部品が大きく変形することがわかる。さらに試験後には、図 4 に示すように試験片が大きく変形した。これは試験片が降伏し、3D プリント製部品が圧縮力を支えることができないことがわかる。

2.3 考察

前節の結果から、3D プリント製部品は圧縮力が 1.0 kN 以下の範囲では、比較的小さな変形に抑制することができる。ここで、ねじの締め付けトルクとねじに生じる軸力 (被締結部品に作用する圧縮力に対応) との関係は、以下の式で表すことができる⁶⁾。

$$T = kdF \quad (1)$$

ただし、 T は締め付けトルク (Nm), k はトルク係数, d はねじの呼び径 (m), F はねじの軸力 (N) を表す。ここで、一般的なトルク係数は 0.14 から 0.26 の範囲にある⁶⁾。そのためねじの軸力が 1.0 kN となる場合の M4 のねじの締め付けトルクは、0.56 Nm から 1.0 Nm の範囲にあることがわかる。したがって 3D プリント製部品に大きな変形が生じないように部品を締結するため、安全率を 2 とした場合には、締め付けトルクを 0.28 Nm 程度として締結する必要があることがわかる。ここで一般的な樹脂バルク材の締め付けトルクの指標である 0.5T 系列⁶⁾では、M4 の締め付けトルクは 0.75 Nm とするように設定されている。したがって 3D プリント製部品では、樹脂バルク材よりも小さい締め付けトルクで締結する必要がある。一方ワッシャの寸法を変更することで、ねじの

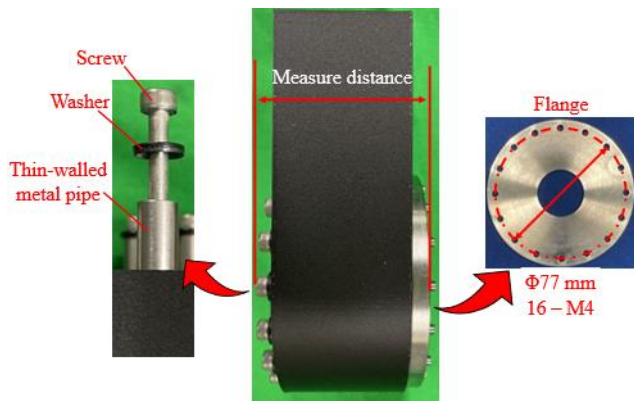


Fig. 5 Evaluation of wall thickness for thin-walled metal pipe for proposed bearing joint

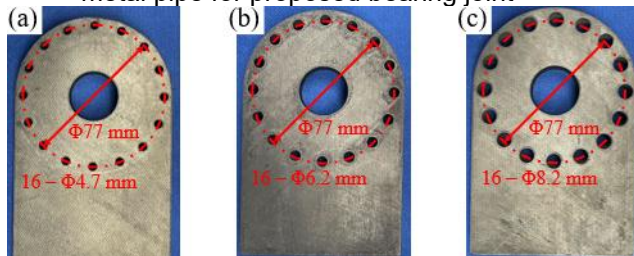


Fig. 6 Specimen used for evaluating appropriate wall thickness of thin-walled metal pipe

締め付け時に 3D プリント製樹脂部品に生じる面圧を抑制するといった対策も考えられる。しかしながら、今回は静的な試験片の変形量を評価しているが、試験片の応力緩和や外力による影響により、使用中に摩擦接合時の圧縮力及び摩擦力が低下する可能性がある。そのため、摩擦接合により 3D プリント製樹脂部品を締結することは困難であると考えられる。

3 金属製薄肉円筒部品を用いた 支圧接合による部品締結のための 金属製薄肉円筒部品の肉厚の評価

本章では、以前の研究で得られた実験結果³⁾について評価と考察を行い、適切な薄肉円筒部品の肉厚についての設計法を提案する。

3.1 実験方法

図 5 に示すように、厚さ 45 mm の試験片の通し穴に SUS304 製の薄肉円筒部品（内径 4.0 mm で 3 種類の肉厚（0.2 mm, 1.0 mm, 2.0 mm））を挿入したのち、ワッシャ（薄肉円筒部品の肉厚が 0.2 mm の場合、内径 4.0 mm, 外径 9.0 mm, 板厚 0.8 mm, それ以外の場合、内径 4.0 mm, 外径 10.0 mm, 板厚 2.0 mm）を介して薄肉円筒部品と同軸に M4 の六角穴付ボルト（頭の高さは 4.0 mm）を挿入した。そして、板厚 5.0 mm のフランジのめねじに対して締め付けトルクを 3.0 Nm として、六角穴付ボルトを締め付けた。この時の六角穴付ボルトの頭とフランジの端面との距離をデジタルノギスを用いて計測し、六角穴付ボルトの頭の高さ、ワッシャとフランジの板厚を差し引くことで、試験片の変形量を計測した。フランジは図 5、試験片は図 6 に示すように、それぞれ 77 mm のピッチ円直径に 16 等配

Table 1 Result of deformation and maximum compressive stress for thin-walled pipe

Wall thickness [mm]	0.2	1.0	2.0
Deformation [mm]	0.92	0.24	0.26
Maximum stress [MPa]	1605	341	142

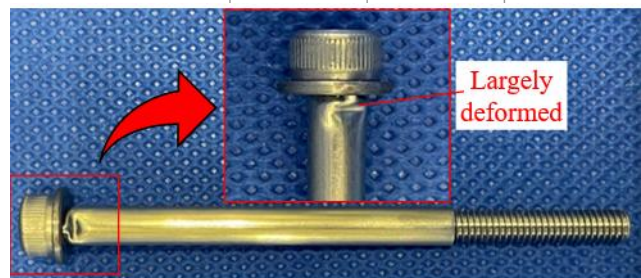


Fig. 7 Deformation in a 0.2 mm thick-walled pipe

でめねじと通し穴を設けた。フランジのめねじは M4 とし、試験片の通し穴は直径 4.7 mm, 6.2 mm, 8.2 mm（それぞれ薄肉円筒の肉厚が 0.2 mm, 1.0 mm, 2.0 mm に対応）とした。さらに試験片は、前章と同様の材料、造形条件で、3D プリンタ（X1, Markforged）を用いて造形した。

3.2 実験結果

それぞれの試験片と薄肉円筒の組み合わせにおいて、16 か所で計測した試験片の変形量の平均値を表 1 の 1~2 行目に示す。薄肉円筒部品の肉厚が 0.2 mm の場合、試験片に大きな変形が生じ、薄肉円筒部品の肉厚が 1.0 mm 及び 2.0 mm の場合、試験片には大きな変形が生じないことがわかる。これは図 7 に示すように、薄肉円筒部品の肉厚が 0.2 mm の場合には、薄肉円筒部品自体に変形が生じ、ねじの締め付け時の圧縮力を支えることができないことが原因であると考えられる。一方薄肉円筒部品の肉厚が 1.0 mm と 2.0 mm の場合には、薄肉円筒部品には変形が見られなかった。そのため、ねじの締め付け時の圧縮力を適切に支えることができていると考えられる。

3.3 考察

前節から薄肉円筒部品の肉厚により、ねじの締め付け時の圧縮力を適切に支えることができない場合があることがわかる。ここでねじの締め付け時の圧縮力のすべてを薄肉円筒部品が支えると考え、適切な薄肉円筒部品の肉厚について検討する。

第一に式(1)で示されるねじの締め付けトルクとねじの締め付け時の圧縮力との関係から、締め付けトルクを 3.0 Nm としてねじを締め付けた場合、ねじの締め付け時の圧縮力は 2.9 kN から 5.4 kN の範囲にあることがわかる。ここで薄肉円筒部品に作用する圧縮応力は、以下の式で表すことができる。

$$\sigma = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (2)$$

ただし、 σ は圧縮応力(MPa)、 D は金属製薄肉円筒部

Table 2 Inner and outer diameter of thin-walled metal pipe when applying T-series fastening torque for typical screw sizes

Size of screw	M3	M4	M5	M6
Fastening torque [Nm]	0.63	1.5	3.0	5.2
Inner diameter [mm]	3.0	4.0	5.0	6.0
Outer diameter [mm]	4.3	5.7	7.2	8.6

品の外径(mm), d は金属製薄肉円筒部品の内径(mm)を示す. このとき各肉厚の金属製薄肉円筒部品に生じる最大圧縮応力を表 1 の 3 行目に示す. ここで金属製薄肉円筒部品の材質は SUS304 であり, 引張強度は 520 MPa, 降伏強度は 205 MPa である⁷⁾. そのため金属製薄肉円筒部品の肉厚が 2.0 mm の場合は弾性変形, 肉厚が 1.0 mm の場合は塑性変形, 肉厚が 0.2 mm の場合は強度不足で大きな変形が生じていると推察される.

このことから, まず式(1)により締め付けトルクを設定して, ねじの締め付けにより生じる圧縮力の最大値を求める. そして式(2)により金属製薄肉円筒部品の機械的特性を制約として, 適切な圧縮応力が作用するように金属製薄肉円筒部品の内径及び外径を設定する. このようにして適切な金属製薄肉円筒部品を選定し, 適切な締め付けトルクによる締結を行うことができると考える. したがって, 多く用いられる M3 から M6 のねじにおいて, 締め付けトルクを T 系列⁸⁾の値とし, SUS304 製の薄肉円筒部品を用いて, 薄肉円筒部品に降伏が生じないように締結する場合 (最大応力が 205 MPa となるように設定), 表 2 に示すような断面の円筒部品を使用して締結すればよいと考えられる.

4 結言

本研究では, 3D プリント製樹脂部品を金属部品に対して締結する手法として, 従来用いられてきた摩擦接合と金属製薄肉円筒部品を用いた支圧接合に着目し, 有効性を定量的に評価して設計法を提案した. 3D プリント製樹脂部品に摩擦接合を適用する場合, バルク材の樹脂部品の半分程度の締め付けトルクで締結することや, ねじの締め付け時に部品に生じる面圧を抑制するなどの対策が必要であることが明らかになった. しかしながら, このような対策を実施した場合でも, 3D プリント製樹脂部品自体がねじの締め付け時の圧縮力を支えるため, 部品の応力緩和により, 適切に締結することができない場合があり得る. 一方で金属製薄肉円筒部品を用いた支圧接合を適用する場合, 適切な断面形状の金属製薄肉円筒部品によりねじの締め付けにより生じる圧縮力を支えられることを確認した. さらに締結時の締め付けトルクに対し, 金属製薄肉円筒部品の断面形状の選

定方法を示し, 代表的なねじについての断面形状の例を示した.

今回の検討は, 外力が作用しない締結部単体の評価に限られる. そのため, 静的・動的な外力が作用する条件の下で, 各締結法を評価し, 3D プリント製樹脂部品の部品設計法を構築する必要があると考える. さらに, 金属製薄肉円筒部品を用いた支圧接合において, 今回示した薄肉円筒部品の断面形状の選定法は解析に基づいたものに限られており, 実験により検証する必要があると考える.

謝辞

この成果は, NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託業務

(JPNP14004) の結果得られたものです. また, 本研究は, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2180 の支援を受けたものです.

参考文献

- 1) Endo, G., Rivollier, J., Barberan, P., Tsukamoto, Y., Kanai, N., Aruga, T., and Hodoshima, R. : Comparison of Three-Points Bending Tests On Short Fiber-reinforced Materials Manufactured by a 3D Printer, 第 43 回日本ロボット学会学術講演会, 1P1-07 (2025) .
- 2) 戸田圭彦, 山口隆司, 岑山友紀, 直江康司 : 高力ボルト摩擦接合継手の孔変形に基づいた支圧耐力に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 70, 3, pp. 333-345. (2014).
- 3) Endo, G., Tsukamoto, Y., Nabae, H., and Takaki, T. : Proposal of a Fastening Method for Deformable Plastic Parts and Rigid Metal Parts, 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp.1-6 (2023).
- 4) 関口兼司, 塚本悠太, 難波江裕之, 高木健, 遠藤玄 : 支圧接合により固定された樹脂製片持ち梁の見なし曲げ応力 - ひずみ特性, 第 25 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, 2E5-01 (2024) .
- 5) 塚本悠太, 難波江裕之, 有賀嵩紘, 遠藤玄 : 支圧接合により固定された樹脂製片持ち梁の軸方向荷重に対する見なし曲げ - ひずみ特性, 第 43 回日本ロボット学会学術講演会, 1P1-04 (2025) .
- 6) 東日製作所 : 東日トルクハンドブック, Accessed on 24. 09. 2025, URL : https://www.tohnichi.co.jp/download_services.
- 7) Kabuku Connect : SUS304, Accessed on 24.09.2025, URL : <https://www.kabuku.io/guide/metal/stainless/us304/>