

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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応力-ひずみ特性
Title(English)	
著者(和文)	塚本悠太, 難波江裕之, 有賀嵩紘, 遠藤玄
Authors(English)	Yuta Tsukamoto, Hiroyuki Nabae, Takahiro Aruga, Gen Endo
出典(和文)	第43回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 9
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

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応力－ひずみ特性

○塚本 悠太 (科学大) 難波江 裕之 (科学大) 有賀 高紘 (科学大) 遠藤 玄 (科学大)

This paper focuses on a fastening method for low-rigidity components, such as plastic parts, to metal components using a bearing-type joint with a thin-walled metal pipe, which can prevent fastened components from deformation or cracking during tightening. In this study, one metal and four plastic specimens were evaluated. One end of each cantilever beam was fastened using either conventional screw fastening or the bearing-type joint, while a concentrated axial load was applied to the other end. By measuring the bending stress-strain characteristics under these conditions, the effectiveness of the bearing-type joint for fastening low-rigidity components was validated.

1. 緒言

近年、産業用ロボットは運用コストと環境負荷を削減するため、消費電力の削減が求められている。この要求を達成するため、産業用ロボットの構造材の形状や材質の改善による軽量化が検討されてきた [1][2]。特に従来用いられてきた金属材料を樹脂材料により代替する取り組みは、構造材全体の質量を大きく削減できるため、樹脂材料の構造材への適用可能性について、基礎的な評価が実施されてきた [3]。さらに産業用ロボットでは、モータの動力を構造材を介して手先まで伝達する必要があり、構造材をモータ等の金属部品と締結する必要がある。しかしながら、従来のねじを用いた摩擦力による締結法やキーを用いた締結法のような被締結部品の剛性に依存した締結法では、樹脂製の構造材に変形が生じ、締結することができない。そのため、従来の締結法を代替し、低剛性材料に適用することのできる部品締結法が求められている。

そこで著者らは、締結力の管理の容易さや部品の交換可能性といった点からねじを用いた締結法に着目し、金属製薄肉円筒を用いた支圧接合による部品締結法を提案した [4]。建築学において、ねじ締結は図 1 に示すように、摩擦接合と支圧接合に分類される [5]。前者では、ねじの締め付けにより生じた軸力が被締結部品間に作用し、それにより生じた部品間の摩擦力で部品が締結される。そのため、剛性の低い被締結部品では部品が変形し、適用できないという課題がある。一方支圧接合では、ねじの側面と被締結部品の通し穴の内面での接触により部品が締結されている。そのため、金属製薄肉円筒をねじと同軸に配置し、ねじの締め付けにより生じる軸力を金属製薄肉円筒で受けることで部品の変形を抑制することができる。これまで本手法の締結力の評価として、図 2 に示すように、一端を支圧接合により固定した片持ち梁の另一端に集中荷重を作用させ、ねじの軸方向に対して垂直方向の荷重を作用させた場合の曲げ応力－ひずみ特性を定量的に評価した [6]。この評価では、従来用いられてきたアルミニウム合金を摩擦接合させた場合を比較対象として、5種類の樹脂材料(フェルカーボのみ摩擦接合、他4種類は支圧接合)を評価し、支圧接合により低剛性の樹脂材料を効果的に締結できることを確認した。しかしながら、ロボットの構造材には多様な方向の荷重が作用するため、片持ち梁の軸方向荷重に対する応力－ひずみ特性

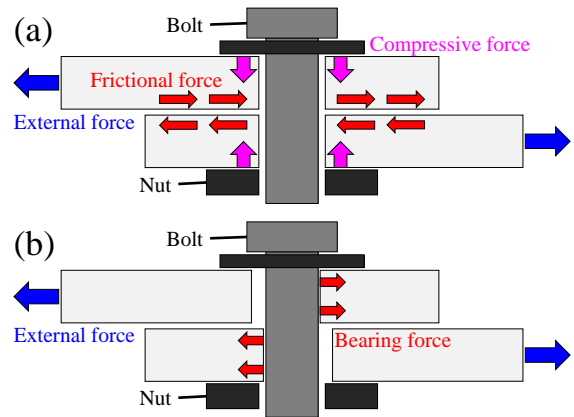


図 1 ねじを用いた部品締結 (a) 摩擦接合 (b) 支圧接合

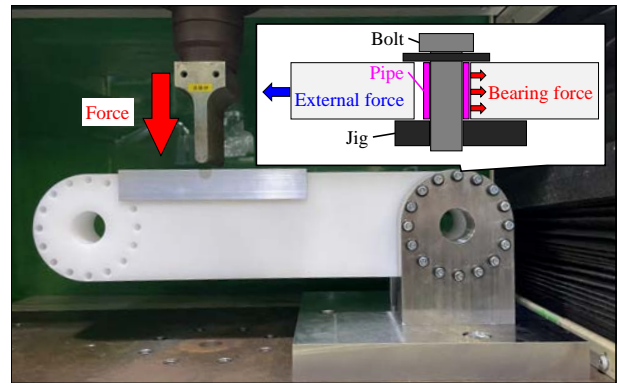


図 2 金属製薄肉円筒を用いて支圧接合し、ねじの軸方向に対して垂直方向の荷重を作用させた実験の様子

についても評価する必要がある。

したがって本稿では、これまでに実施した試験に用いた6種類の試験片のうち5種類の試験片について、一端を摩擦接合もしくは支圧接合で固定した片持ち梁の另一端に軸方向の集中荷重を作用させ、構造材全体の曲げ応力－ひずみ特性に対する接合部の影響を定量的に把握することを研究目的とする。

2. 試験片

試験片の形状を図 3 に示す。試験片の材料は、1種類の金属材料と4種類の樹脂材料の計5種類とする。金属材料は、従来の産業用ロボットに用いられてきたア

表1 機械的特性の公称値

Material	A5052	Feltcarbon	MC901	POM	POTICON
Density [g/cm ³]	2.7	1.3	1.2	1.4	1.3
Tensile strength [MPa]	260	270	96	65	114
Tensile modulus [GPa]	68	22	3.4	3.0	5.6
Bending strength [MPa]	-	300	110	94	199
Bending modulus [GPa]	-	18	3.5	3.0	7.0

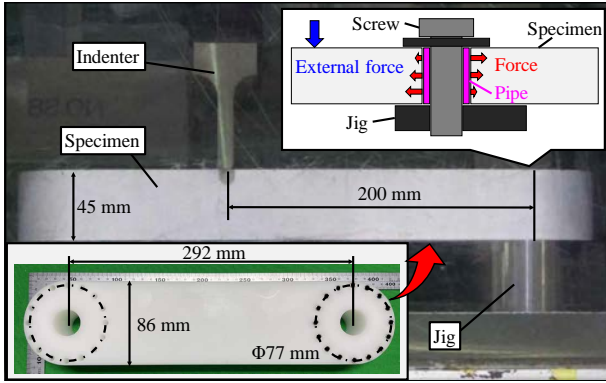


図3 ねじの軸方向に集中荷重を作用させた実験の様子

ルミニウム合金 (A5052) とし、比較材料として試験を実施した。一方樹脂材料は、フェルカーボ (双葉電子工業), MC901, POM, チタン酸カリウム繊維強化ナイロン樹脂 (POTICON(NTL34M), 大塚化学) を使用した。これら材料の機械的特性の公称値を表1に示す [7-11]。フェルカーボは、不織布状の炭素繊維の層を積層し、熱硬化性樹脂を用いて高圧成形した樹脂材料である。MC901とPOMは、一般的なエンジニアリングプラスチックである。これら3種類の材料はバルク材から切削加工して製作した。一方POTICONは3Dプリンタ材料POTICON filamentを3Dプリンタ (Raise 3D Pro2, Raise 3D) を用いて、ノズル径を0.4 mm, 積層ピッチを0.125 mm, 充填形状を三角形, 充填率を37%, ソリッドレイヤを上下4層ずつ, ウォールを2層として造形した。

3. 曲げ応力 - ひずみ特性測定

3.1 実験装置

実験装置を図3に示す。精密万能試験機 (AG-I (最大試験力 100 N), 島津製作所) を用いて圧子を降下させ、試験片の固定端の中心から 200 mm の位置に荷重を作用させた。試験条件は、試験速度を 6.0 mm/min として、変位が 0.5 mm に達するまで降下させたのち、変位が 0 mm に達するまで上昇させた。

3.2 試験片の締結部

試験片の固定端は、固定用の SUS304 製の治具に対し、試験片に 16 等配で設けた通し穴に M4 のねじを挿入し、締め付けトルクを付加して締結した。5 種類の試験片のうち、2 種類の材料 (A5052, フェルカーボ) は摩擦接合を適用し、締め付けトルクを 3.0 Nm として締結した。これらの材料では事前実験において、同様の締め付けトルクでねじを締め付けた際に試験片に

変形が確認されなかったため、試験片に直径 4.2 mm の通し穴を設け、直接ねじを用いて締結した。一方、3 種類の樹脂材料 (MC901, POM, POTICON) は締め付けトルクを 3.0 Nm として支圧接合により締結した。これらの試験片では、通し穴の直径を 6.2 mm として、内径 4.0 mm, 肉厚 1.0 mm の SUS304 製の薄肉円筒を通し穴に挿入し、M4 のねじを同軸に挿入して締結した。

4. 試験結果

圧子の降下量に対し、試験片からの反力として得られた試験力の結果を図 4(a) に示す。またこの結果から、曲げ応力 σ [MPa], 曲げひずみ ε [%] を以下のように導出した。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{6LF}{bh^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{100\sigma}{E} = \frac{150h\delta}{L^2} \quad (2)$$

ここで、試験片の幅を $b = 86$ mm, 高さを $h = 45$ mm, 支点間距離を $L = 200$ mm, 試験力により試験片に作用する曲げモーメントを M [Nm], 断面係数を Z [mm³], 縦弾性係数を E [MPa], 荷重を F [N], 変位を δ [mm] とした。試験片の固定条件と 3D プリンタ部品の充填形状により、支点間距離 L と断面係数 Z は変化するが、幅 b , 高さ h の中実断面を持つ片持ち梁と考えると、支点間距離 L 及び断面係数 Z を設定した。したがって、式 (1), 式 (2) を用いて得られた応力 - ひずみ特性は純粋な材料の機械的特性を示しておらず、試験片の内部構造や端部の固定方法による影響を含んでいる。そのため、このようにして得られた曲げ応力 - ひずみ特性を見なし曲げ応力 - ひずみ特性と呼び、見なし曲げ応力 - ひずみ線図を図 4(b) に示す。

A5052, フェルカーボ, MC901, POM, POTICON では、ひずみの変化に対して線形に応力が変化しており、弾性範囲内の変形であることがわかる。ここで、これらの実験により得られたひずみと応力から算出した曲げ弾性率は表2に示すとおりである。A5052 とフェルカーボでは、曲げ弾性率が公称値よりも小さい値となった。これは摩擦接合により部品を締結した場合、被締結部品に加えてねじが変形するため、締結箇所を含めた部品全体として剛性が低下したと考えられる。一方 MC901 と POM では、曲げ弾性率が公称値よりも大きい値となった。これは金属製薄肉円筒を用いた支圧接合により部品を締結した場合、被締結部品が変形して金属製薄肉円筒の側面と被締結部品の通し穴の内面が接触し、被締結部品が金属部品により支えられるた

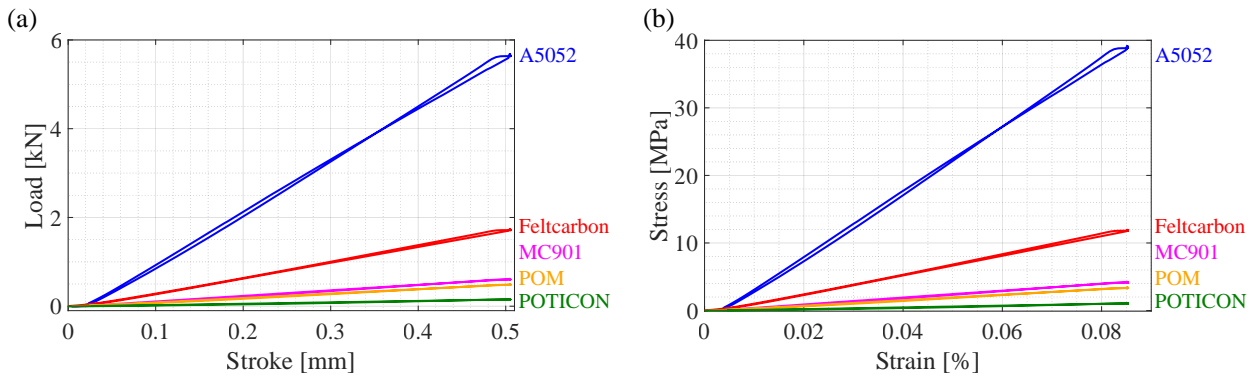


図4 試験結果 (a) 試験力-変位線図 (b) 見なし曲げ応力-ひずみ線図

表2 実験により得られた構造材全体の曲げ弾性率。ただし、A5052は引張弾性率を記載。また、POTICONは曲げ弾性率の37%の値を記載。

Material	Bending Modulus [GPa]	
	Reference	Experiment
A5052	(68)	47.6
Feltcarbon	18	14.4
MC901	3.5	5.08
POM	3.0	4.06
POTICON	2.6	1.29

め、締結箇所を含めた部品全体としての剛性が大きくなったと推察できる。このことから金属製薄肉円筒を用いた支圧接合では、軸方向の荷重を金属製薄肉円筒の側面と被締結部品の通し穴の内面との接触面での面圧に変換することができるため、低剛性部品の部品締結に有効であると考えられる。また、POTICONについては試験片の充填率が37%であるため、曲げ弾性率の公称値の37%の値と実験値を比較した。その結果、曲げ弾性率の実験値は公称値の37%より小さい値となった。これは試験片の充填形状が三角形で構成されているものの、片持ち梁に作用する軸方向荷重が試験片の造形方向と平行であるため、充填形状が試験片の剛性を向上させることに寄与していないこと。そして、片持ち梁に軸方向荷重を作用させた場合、図3の右上図に示すように、試験片の通し穴の側面に生じる応力に偏りが生じ、試験片の層間での変形に差が生じたことが原因であると考えられる。

5. 結言

1種類の金属材料と4種類の樹脂材料の計5種類の試験片を製作し、片持ち梁の一端を摩擦接合または支圧接合により締結し、もう一端に軸方向の集中荷重を作用させた場合の見なし曲げ応力-ひずみ特性を計測した。A5052とフェルカーボは摩擦接合、MC901、POM、POTICONは支圧接合で締結した場合を評価した。このうち、A5052とフェルカーボを摩擦接合で締結した場合は公称値よりも剛性が低下し、MC901とPOMを金属製薄肉円筒を用いた支圧接合により締結した場合には公称値よりも剛性が向上した。これは、摩擦接合

ではねじが変形したことで、締結箇所における剛性の低さが部品全体の剛性に影響を及ぼし、金属製薄肉円筒を用いた支圧接合で締結した場合には、金属部品の導入により部品の剛性が補強されたことが原因であると考えられる。このことから、軸方向の荷重に対する低剛性部品の締結手法として、金属製薄肉円筒を用いた支圧接合が有効であると考えられる。

謝辞 本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP20016)の一環として行われたものである。また、本論文は、技術研究組合産業用ロボット次世代基礎技術研究機構との共同研究の成果であり、技術研究組合産業用ロボット次世代基礎技術研究機構が共有著作権を有している。また、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)には本研究の遂行にあたり有益な助言を受けた。記して深甚の謝意を示す。

参考文献

- [1] B.J. Kim, D.K. Yun, S. H. Lee and G. Jang, "Topology optimization of industrial robots for system-level stiffness maximization by using part-level metamodels", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.54, pp. 1061-1071, 2016.
- [2] H. Kanazawa, H. Nabae, K. Suzumori and G. Endo, "Empirical Study for 3D-Printed Robot Design: Dimensional Accuracy of a Hole and Proposal of a New Shaft-Fastening Method", *2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 633-639, 2022.
- [3] N. Kanai, H. Nabae and G. Endo, "Empirical Strength Comparison of 3D printed Beams and Proposal of a Joining Method for Large Parts*", *2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 332-338, 2025.
- [4] G. Endo, Y. Tsukamoto, H. Nabae and T. Takaki, "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.

- [5] 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), Vol.70, No.3, pp. 333-345, 2014.
- [6] 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回システムインテグレーション部門講演会 (SI2024), pp. 2322-2324, 2024.
- [7] (Accessed: June 19, 2025) Kabuku Connect, ”A5052”, <https://www.kabuku.io/guide/metal/aluminum/a5052/>
- [8] (Accessed: June 19, 2025) Futaba, ”フェルカーボの特性・特徴”, <https://www.cfrp.mtb.futaba.co.jp/felcarbo>
- [9] (Accessed: June 19, 2025) 廣杉計器, ”MC ナイロンの材料性質”, <https://hirosugi.co.jp/technical/material/MC.html>
- [10] (Accessed: June 19, 2025) タキロンシーアイ, ”物性データ”, https://www.tkci-plate.jp/physical_property_data/
- [11] (Accessed: June 19, 2025) 大塚化学株式会社, ”ポチコンフィラメント”, <https://www.otsukac.co.jp/products/cat-composite-resin/filament.html>