

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見なし曲げ応力-ひずみ特性
Title(English)	Apparent Bending Stress-Strain Characteristics of Plastic Cantilever Beams Fixed by Bearing-Type Joints
著者(和文)	関口兼司, 塚本悠太, 難波江裕之, 高木 健, 遠藤玄
Authors(English)	Kenji Sekiguchi, Yuta Tsukamoto, Hiroyuki Nabae, Takeshi Takaki, Gen Endo
出典(和文)	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 予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2024, 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) 2024 The Society of Instrument and Control Engineers

# 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

○関口兼司（東京科学大学），塚本悠太（東京科学大学），  
難波江裕之（東京科学大学），高木健（広島大学），遠藤玄（東京科学大学）

## Apparent Bending Stress-Strain Characteristics of Plastic Cantilever Beams Fixed by Bearing-Type Joints

○ Kenji Sekiguchi (Science Tokyo), Yuta Tsukamoto (Science Tokyo),

Hiroyuki Nabae (Science Tokyo), Takeshi Takaki (Hiroshima University), and Gen Endo (Science Tokyo)

Abstract: In this paper, a bearing-type joint refers to a method of joining low-rigidity plastic components with metal components by inserting a thin-walled metal cylindrical pipe into the plastic component and passing a coaxial screw through it for fastening. By using the thin-walled cylinder to bear the axial force of the screw, this method prevents a decrease in fastening force and the collapse of the plastic component. In this study, we fabricated six types of test specimens (five types of plastic materials and one type of metal material). One end of each cantilever beam was fixed using either conventional screw fastening or the bearing-type joint method, while a concentrated load was applied to the other end. By measuring the bending stress-strain characteristics under these conditions, we discuss the relationship between plastic materials and joining methods.

### 1. 緒言

近年，産業用ロボットは消費電力を低減するために，軽量化が求められている．その方法の1つとして，産業用ロボットの構造部品を金属材料から樹脂材料に代替する取り組みがある．ロボット構造材に樹脂材料を適用する上で，金属部品との締結手法を検討する必要がある．従来の金属部品同士の締結では，ネジやキー溝，圧入による嵌め合いなどがある．これらは高剛性の部品同士では効果的であるが，低剛性である樹脂部品が変形してしまうため有効ではない．そのため，樹脂部品と金属部品を効果的に締結する新しい手法の検討が必須だと言える．

本研究では，モータの金属製フランジ部分と樹脂リンク部品の回転トルク伝達を目的とした締結を対象とする．中でも，部品同士の一般的な締結手法である，ネジ締結に着目する．建築学において，ネジ締結は Fig. 1 に示すように摩擦接合と支圧接合の2種類に分類される．水平方向の外力に抗する場合を例とすると，摩擦接合はネジにトルクを加えることで圧縮力を伝え，部材同士に生じる摩擦力で締結を行う手法である．一方，支圧接合は摩擦接合と比較すると，締め付けトルクが小さく，力の伝達が摩擦力，支圧力（ネジ穴とネジの軸が接触することで生じる局所的な圧縮力）の順番で行われる．具体的には，ネジにトルクを加えることで圧縮力が伝達され，部材の接触面に摩擦力が生じる．しかし，締め付けトルクが小さいため摩擦面が滑り，ネジ穴とネジの軸が接触し支圧力で締結を行う．建築学では，高い締め付けトルクで締結する高力ボルトは，発生する軸力が大きいことから摩擦接合，普通ボルトは，発生する軸力が小さいことから支圧接合による締結が行われている<sup>1)2)</sup>．

ロボットの部材同士の締結において，ネジを用いた摩擦接合による締結が頻繁に用いられている．しかし，低剛性である樹脂材料に対して摩擦接合を行うと，ネ

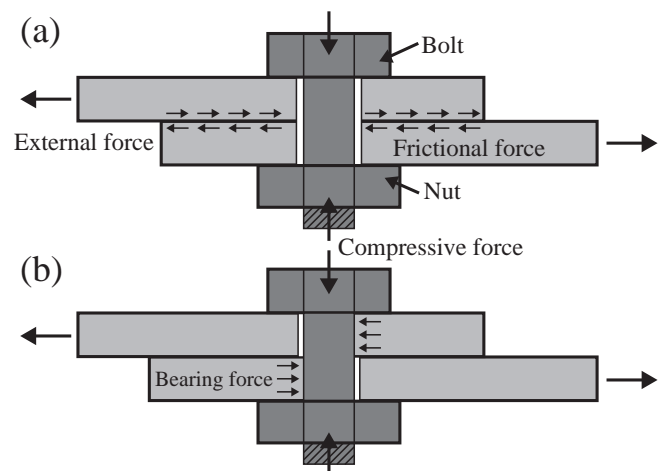


Fig. 1 Fastening method (a) Friction joint (b) Bearing joint

ジの圧縮力によって樹脂自体が変形してしまい，圧縮力を保持できないという問題点がある．そこで塚本らは，柔らかい樹脂材料と金属部品を締結する際に，金属製の薄肉円筒パイプを挿入し，同軸でネジを通し，金属部品とネジ締結する方法を提案した<sup>3)</sup>．ネジの軸力を薄肉円筒パイプが受けることで，締結力の低下や樹脂材料への沈み込みを抑制できる．これは，前述した支圧接合同等であるため本稿では，この締結手法を支圧接合法と呼ぶ．

これまでに，3Dプリント材料である Onyx の試験片を用いて，片持ち梁の一端を支圧接合し，他端に集中荷重を加えた際の変位量と押し付け力を測定することで，支圧接合法の有効性を検証した<sup>3)</sup>．しかし，1種類の樹脂試験片のみでしか測定を行っていなかった．支圧接合法の有効性を十分に検証するためにも，その他の樹脂材料で同様の測定を行う必要がある．そこで本稿では，計6種類の試験片を製作し，Fig. 2 に示すような片持ち梁の一端をネジによる接合または支圧接合し，

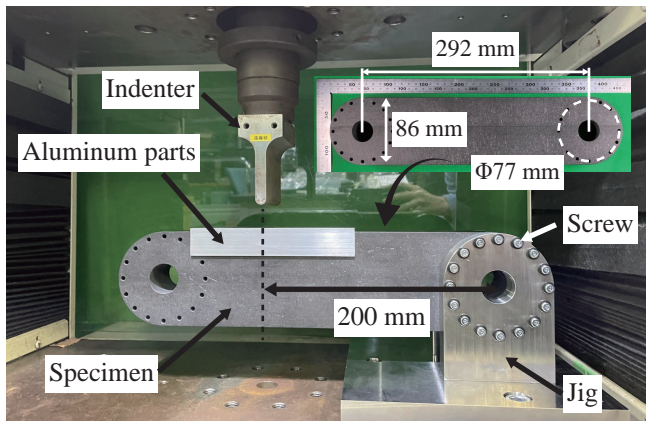


Fig. 2 Experimental setup

Table 1 Material properties

Material	A5052	FELCARBO	MC901	POM	POTICON	Onyx+CF
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	2.7	1.3	1.2	1.4	1.3	1.4
Tensile strength [MPa]	260	270	96	65	100	800
Tensile modulus [GPa]	68	22	3.4	3.0	5.6	60
Bending strength [MPa]	-	300	110	94	167	540
Bending modulus [GPa]	-	18	3.5	3.0	6.3	51

他端に集中荷重を加えた場合の曲げ応力-ひずみ特性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 Fig. 2 に示し、厚さを 45 mm とする。試験片は、5 種類の樹脂材料と 1 種類の金属材料の計 6 種類ある。アルミ合金 (A5052) は、従来の産業用ロボットで使われており、比較材料として試験を行った。樹脂材料として、FELCARBO (双葉電子工業 (株)), MC901, POM を使用し、3D プリント材料として POTICON (NTL34M, 大塚化学 (株)), Onyx+CF (Markforged) を使用した。公称の機械的物性値を Table 1<sup>4)5)6)7)8)9)</sup> に示す。FELCARBO は、熱硬化性樹脂に不織状の炭素繊維の層を積層し、高压成形、切削することで製造された樹脂材料である。MC901 と POM は、エンジニアリングプラスチックの 1 種であり、バルク材から切削して製作した。微細なチタン酸カリウム繊維により強化されたナイロン樹脂である POTICON filament を、3D プリンタ Raise 3D pro2 を用いて造形した。Onyx+CF は、短い炭素繊維で強化されたナイロン樹脂である Onyx (Markforged Inc.) に、連続炭素繊維である CF (F-FG-0005, Markforged Inc.) を加えることで強化した樹脂材料である。Eiger (Markforged Inc.) と呼ばれるスライスソフトと、3D プリンタである X7 (Markforged Inc.) を用いて造形した。造形条件として、積層ピッチは 0.125 mm、充填形状は三角形、充填率は 37%、8 層のソリッドレイヤ、2 層のウォールとした。

## 3. 曲げ応力-ひずみ特性測定

### 3.1 実験装置

Fig. 2 に実験装置を示す。精密万能試験機 (島津製作所製 AG-I, 最大試験力 100 kN) に取り付けられた圧子を用いて、試験片の固定端中心から 200 mm 離れた位置に荷重を作用させた。このとき、試験片表面にアルミ

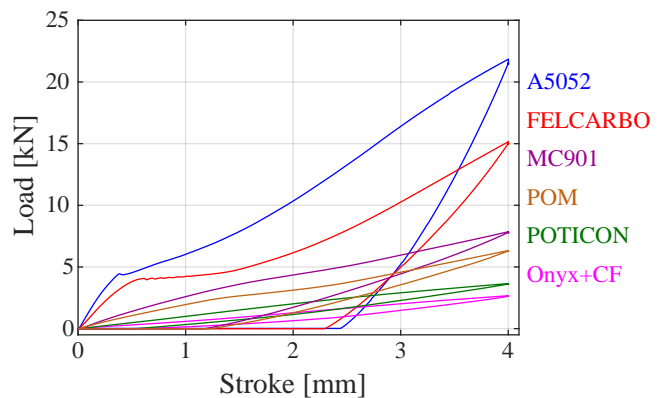


Fig. 3 Experimental result of stress-strain diagram

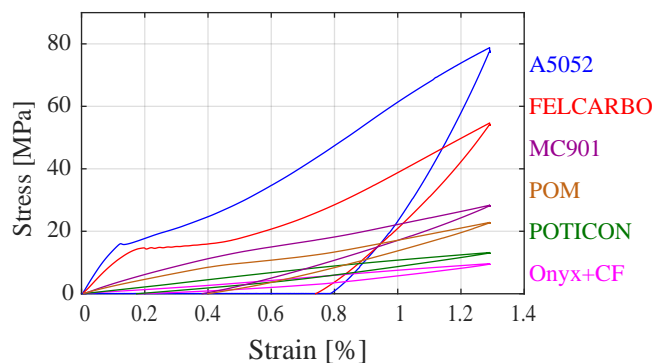


Fig. 4 Experimental result of stroke and load

材を設置することで、試験機の圧子による局所的な破壊を防いでいる。圧子がアルミ部材に接触し作用力が 10 N になった位置をゼロ点とし、そこからの降下量及び荷重を測定した。圧子を降下速度 3.0 mm/min で変位 4.0 mm に達するまで降下させた後、変位が 0 mm に達するまで圧子を上昇させた。

### 3.2 試験片の締結部

試験片の固定端は、SUS 製の固定治具と試験片にある 16 等配の通し穴に M4 ネジを挿入し、締め付けトルク 3.0 Nm で締結した。6 種類ある試験片の内、4 種類の樹脂材料 (MC901, POM, POTICON, Onyx+CF) は、支圧接合法を適用した。試験片の通し穴の直径を 6.2 mm とし、内径 4.0 mm、肉厚 1.0 mm の SUS304 の薄肉円筒を、通し穴に挿入し薄肉円筒の内側にネジを通して締結した。残りの 2 種類 (A5052, FELCARBO) は、直径 4.2 mm の通し穴に直接ネジを挿入して固定した。事前実験から、ネジを用いて直接固定した際に通し穴回りでの変形が確認されなかったため、このような方法で固定を行った。

## 4. 試験結果

圧子の降下量及び荷重の試験結果を Fig. 3 に示す。また、測定を通じて得られた変位と荷重のデータから、曲げ応力  $\sigma$  [MPa]、曲げひずみ  $\varepsilon$  [%] を以下のように導出した。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{FL}{bh^2/6} = \frac{6L}{bh^2} \cdot F \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \cdot 100 = \frac{600FL}{bh^2} \cdot \frac{bh^3}{4FL^3} \cdot y = \frac{150h}{L^2} \cdot y \quad (2)$$

このとき、試験片の幅を  $b = 45 \text{ mm}$ 、高さを  $h = 86 \text{ mm}$ 、支点間距離を  $L = 200 \text{ mm}$ 、縦弾性係数を  $E \text{ MPa}$ 、断面係数を  $Z \text{ mm}^3$ 、荷重を  $F \text{ mm}$ 、変位を  $y \text{ mm}$  とした。3D プリント部品の充填形状および、試験片の固定治具周りの形状が異なるため、断面係数  $Z$  は変化するが、 $b \cdot h$  の中実断面を持つ直方体として考え、 $Z$  を導出した。Fig. 4 に、式 (1)(2) を用いて求めた応力ひずみ線図を示す。

A5052, FELCARBO はそれぞれ、曲げ応力が 15.0 MPa, 14.5 MPa 以降で SS 曲線の傾きが緩やかになった。加えて、ネジの側面部が部材に埋め込まれ、ネジ自体が曲がった。傾きが変化した理由として、荷重を加えたことにより生じたモーメントにネジの摩擦力が耐え切れず、試験片の通し穴とネジ山が接触するまで滑ったことだと考えられる。その後は、荷重に耐え切れずネジが曲がってしまったと考えられる。

一方、MC901, POM, POTICON, Onyx+CF では、いずれも SS 線図の傾きの変化は確認されず、ネジが曲がることもなかった。これらの材質は低剛性であるため、試験片自体が変形したことで、締結部にかかる応力が大きくなり、結果的にネジが曲がらなかったと推察できる。また本試験の条件下では、試験片にある通し穴周りでの変形が見られず、支圧接合法を用いて固定治具に締結できることが確認された。

## 5. 結言

計 6 種類の試験片を製作し、片持ち梁の一端をネジによる接合または支圧接合し、他端に集中荷重を加えた場合の曲げ応力-ひずみ特性を定量的に把握した。A5052 や FELCARBO は治具と直接ネジ締結したが、荷重を加える過程でネジが変形してしまった。MC901, POM, POTICON, Onyx+CF は支圧接合法を用いて治具と締結した。本試験の条件下では、試験片にある通し穴周りでの変形が見られず、支圧接合法を用いて固定治具に締結できることが確認された。また荷重を加えても SS 線図の傾きの変化が確認されず、ネジが曲がることもなかった。しかし、これらは低剛性であるため、試験片自体が変形したことで、締結部にかかる応力が大きくなり、結果的にネジが曲がらなかったと考えられる。

## 6. 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。加えて貴重なコメント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] A. Nishimura and O. Minata. REFERENCE LOADS FOR ALLOWABLE STRESSES OF BEARING TYPE STRUCTURAL JOINTS. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers 1974.231, pp. 9–19, (1974). doi: 10.2208/jscej1969.1974.231.9.
- [2] 杉本悠真. 鋼製山留め材接合部における普通ボルトの軸力と孔ずれが接合部の力学的挙動と残留変形に与える影響. 鋼構造論文集 31.121, 121.43–121.55, (2024).
- [3] G. Endo et al. Proposal of a Fastening Method for Deformable Plastic Parts and Rigid Metal Parts. 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). (2023), pp. 1–6. doi: 10.1109/SII55687.2023.10039451.
- [4] Kabuku Connect, A5052. Accessed on 19.09.2024. URL: <http://kentiku-kouzou.jp/koukouzou-kourikiborutohutuboruto.html>.
- [5] Futaba, FELCARBO. Accessed on 19.09.2024. URL: <https://www.cfrp.mtb.futaba.co.jp/felcarbo>.
- [6] Hirosugi, MC. Accessed on 19.09.2024. URL: <https://hirosugi.co.jp/technical/material/MC.html>.
- [7] タキロンシーアイ, POM. Accessed on 19.09.2024. URL: [https://www.tkci-plate.jp/physical\\_property\\_data/](https://www.tkci-plate.jp/physical_property_data/).
- [8] 大塚化学株式会社: ポチコン「ティスモ」配合複合材料. Accessed on 19.09.2024. URL: <https://www.otsukac.co.jp/products/cat-composite-resin/poticon.html>.
- [9] Markforged, Onyx. Accessed on 19.09.2024. URL: <https://markforged.com/jp/materials/plastics/onyx>.