

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06506

研究課題名(和文)複合負荷を受ける軸部品に対する二方向同時締結技術の開発

研究課題名(英文)Development of mechanical joining process in two directions and its application to shaft components subject to complex loading

研究代表者

廣田 健治(Hirota, Kenji)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：50273256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：軸部品をモデル化した軸部材と円盤部材に対し、円盤部材の塑性変形により両部材を締結して一体化する工法において、単純な加圧動作だけで軸方向とねじり方向の二方向に十分な締結強度を得ることを試みた。周方向と軸方向に独立した溝を与えるAと、両者を組み合わせた形状を用いるBを検討した結果、A、Bとも二方向に母材と同等の締結強度が得られる加工条件が存在した。また、Bの方がより短い締結長さで同等の締結強度を達成できることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A new joining process was proposed to manufacture shaft products efficiently. As the shaft having a serrated, grooved and stepped zones formed the disc with a hole, mechanical locks were created in the axial and rotational directions between two components. Experiments using a steel shaft and an aluminum disc offered the optimum design of the shaft and conditions for connecting the components stiffly in both directions. The prototype of the shaft was improved to shorten the joining length. The revised shaft showed higher disassembling force in the axial direction and higher torque in the rotational direction than the prototype in comparison under the same joining length.

研究分野：塑性加工

キーワード：締結 塑性変形 軸部品 締結強度

1. 研究開始当初の背景

自動車のエンジンや駆動系部品では精密鍛造によるネットシェイプ化が進んでいるが、軸にギヤやカップリングが付随したような複雑形状では二部品を接合する必要がある。接合方法として溶接、ボルト締結、圧入などが用いられているが、コストや生産性に関してそれぞれ本質的な問題を抱えている。主要市場がアジアへと移り、部品加工においてもコスト削減が急務の課題となっており、これらの問題を解決しうる画期的な代替接合技術が期待されている。その一つとして塑性変形を利用した締結が注目されている¹⁾。この方法は部品成形の延長として既存のプレス工程の中に組み込むことができ、締結部では塑性変形による加工硬化と圧縮残留応力により十分な密着性と締結強度が得られる点が大きな特徴である。ボディパネルなど板材の接合ではスポット溶接からの置換を想定した研究が進められているが²⁾、軸部品に対しては図1(a)のように軸に与えた凹凸部に鍛造加工を利用して円盤部材を充填させる方法³⁾が見られる程度である。しかし、図1(a)の方法では結合荷重の増加や専用の加圧パンチが必要となるといった課題がある。

2. 研究の目的

研究代表者らは図1(b)のように軸に歯形を成形し、その形状を円盤の穴に転写して周方向のかみ合いを得る方法を提案している⁴⁾。穴表面付近の局所変形のため図1(a)の方法に比べ低荷重で結合でき、歯先と穴の重なり部分の変形を適切に制御することで母材よりも高いねじり強度が得られることを実証している。しかし、軸方向にはかみ合いがないため、利用範囲が限られている。

本研究では軸方向にも機械的なかみ合いが生成されるような軸形状を考案し、一工程の加圧で軸方向と周方向のかみ合いの同時生成を目指す。得られた締結体に対して、二方向の締結強度を評価し、複合的な負荷を受ける軸部品へも適用可能な接合方法を確立することを目的とする。

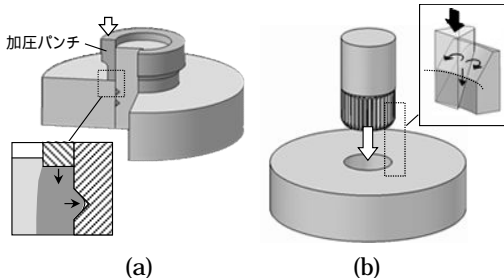


図1 塑性変形による軸と円盤部材の締結加工

3. 研究の方法

図1(b)の軸に外周に沿った溝部と溝部へ円盤材を流動させるための段部を与えることで、軸方向のかみ合いを生成する。具体的には図2に示す軸Aと軸Bを検討した。軸Aでは歯形部に隣接して溝部と段部が与えら

れている。軸の押込みに伴い、まず歯形部が円盤材の穴内面を成形して周方向のかみ合いが形成され、続いて段部の押込みによる材料流動で溝部に軸方向のかみ合いが作られる。しかし、軸Aでは周方向と軸方向のかみ合いを独立に与えるため、締結長さが長くなってしまふ。軸Bはこの課題を改善するために軸Aの溝を歯筋上の細かな溝に置換したものである。なお、軸Bでは段部の角Pから軸先端までの長さを軸Aにそろえ、締結長さを同等にしている。

歯形部の寸法形状、段部の幅Wおよび押込み量 δ は先行研究^{4)・5)}で良好な結果が得られた条件を採用し、本研究では段部の押し込み量 δ を変化させる。

この方法では軸を工具として円盤材を変形させる必要があり、被加工材として軸材にSKD11、円盤材に純アルミニウムA1070BD-Fを用いた。また、かみ合い部への材料流動を重視し、潤滑材として二硫化モリブデンを塗布した。

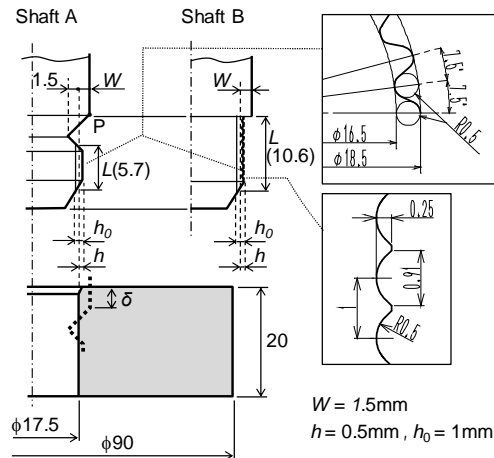


図2 実験条件

4. 研究成果

(1) 結合に要する荷重

図3に軸の押込みに伴う荷重の変化を示す。どちらの軸でも荷重の増加が急峻になる点が見られ、それ以前が歯形部、以降が段部の押込みにそれぞれ対応している。歯形部の成形荷重F1に対し段部の成形荷重はF2は4.4倍高くなった。この点に関して、軸の歯形部と段部が円盤材に重なっている部分の投影面積を求めると段部の方が9.2倍大きくなり、受圧面積に対応した変化と言える。

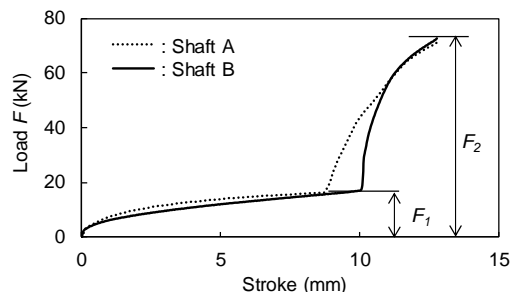


図3 締結時の加工荷重線図

歯形部の押し込み荷重はほぼ等しく、歯筋上の溝の有無の影響は見られない。また、溝の浅い軸 B では段部にテーパを与えておらず、その分だけ軸 A より荷重増加のタイミングが遅れているが、最終的な到達荷重には差は見られない。

(2) 円盤材の充填挙動

軸 A

図 4 にレーザー測定器による締結部の 3D 像と周方向、軸方向の充填形状を示す。図のように最小の充填高さを用いて各方向の充填率を定義し、段部の押し込み量 δ に対する変化を求めると図 5 のようになる。 $\delta < 0$ は歯形部のみが押し込まれている状態で、この時点でも歯形部の充填高さ比は 0.56 程度得られているが、段部の押し込みによりさらに充填が進むことがわかる。一方、溝部の充填は段部の押し込みとともに増加し、 δ が 2mm を超えると停滞している。 $\delta = 3\text{mm}$ では周方向、軸方向とも 0.75 程度の充填高さ比が得られた。

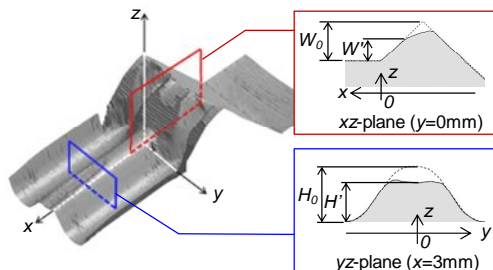


図 4 充填部の形状および充填率の定義

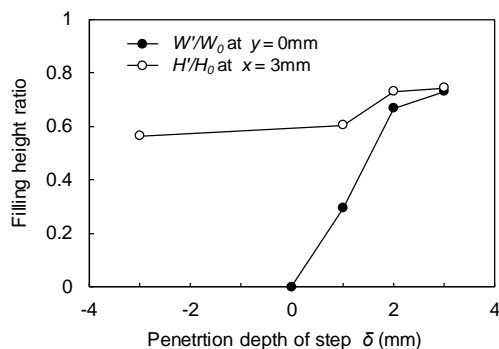


図 5 段部押し込み量と充填率 (軸 A、高さ比)

軸 B

周方向の充填挙動は軸 A と同等なため、軸方向の充填率を調査した。図 6 に段部の押し込み量に対する充填率の変化と、充填状況の一例を示す。溝が浅いため充填率は面積比で算出し、各溝の充填率の平均値をプロットしている。 $\delta = 0\text{mm}$ でも 20%程度充填しており、歯形部が転写される際にも溝部への材料流動が生じていると言える。段部の押し込み量とともに充填率は増加していくが、 δ が 1.5mm 以上になると飽和し、最終的に溝の 75%程度まで充填することがわかった。なお、軸 A の $\delta = 3\text{mm}$ の充填高さ比を面積比に換算すると 88%となり、軸 A の方が高充填となった。

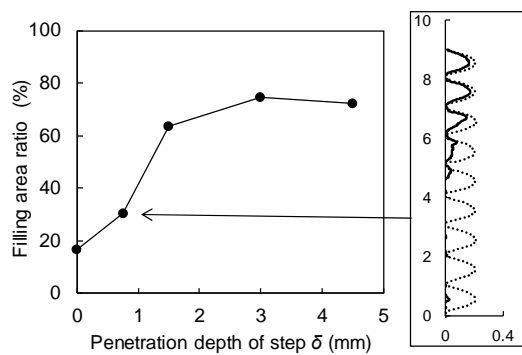


図 6 段部押し込み量と軸方向の充填率 (軸 B、面積比)

(3) 軸方向の結合力

結合体の軸を裏面側から押し抜くことで軸方向の結合力を評価した。図 7 に $\delta = 3\text{mm}$ の軸 A と軸 B の押し抜き荷重線図を示す。どちらの軸も押し抜き開始直後にピークを示し、その後緩やかに減少する傾向を示した。このため降伏値と最大値は近い値となった。

図 8 に段部の押し込み量による最大押し抜き荷重の変化を示す。押し抜き力は δ とともに増加し、その変化は充填率の変化と類似している。また、どちらの軸も溝に充填した円盤部材が軸方向にせん断された痕跡が見られた。軸 B よりも軸 A が高い値を示しているが、図 7 より降伏荷重には大きな差は見られないことがわかる。

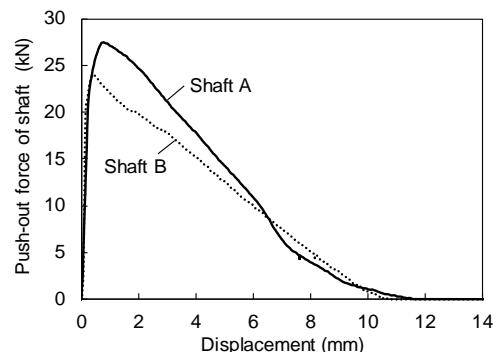


図 7 締結体の押し抜き荷重の変化 ($\delta = 3\text{mm}$)

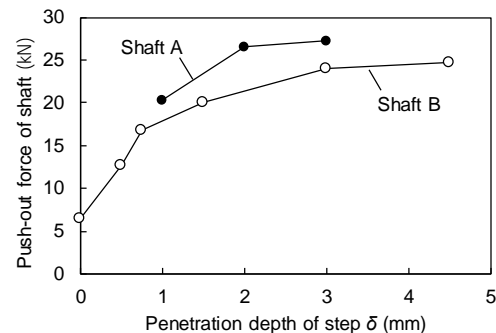


図 8 段部押し込み量と最大押し抜き荷重

(4) 周方向の結合力

$\delta = 3\text{mm}$ の結合体に対して一歯分のねじりを与え、トルクの変化を測定した。図 9 に $\delta = 3\text{mm}$ の軸 A と軸 B のトルク線図を示す。

初期にピークを示すが、押抜きの場合に比べるとトルクの減少は少ない。これは、円盤内に拘束された状態でねじりが続いたためと考えられる。ねじり後の軸の歯形内には円盤材の残留物が見られ、円盤に形成された周方向のかみ合いが軸の歯先円筒面に沿ってせん断されたことが推察される。軸 B の方が最大トルクは約 1.9 倍高くなった。この比は歯形部の長さ(図 2 の L)の比にほぼ等しく、締結部の中に歯形部を長く設置できる軸 B の特徴が現れた結果と言える。

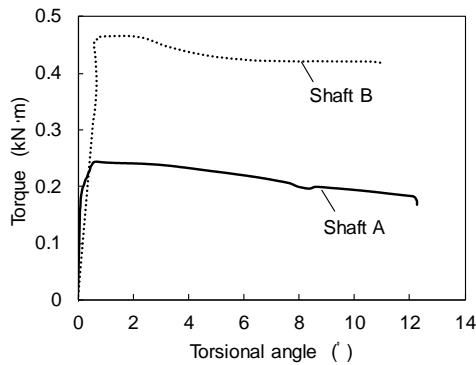


図 9 締結体のねじりトルクの変化 ($\delta=3\text{mm}$)

(5) 結合部のせん断強度

(3)、(4)より、周方向および軸方向の負荷に対し円盤材のかみ合い部がせん断されることがわかった。そこで、図 10 のように単一面内でのせん断変形を仮定し、かみ合い部の寸法と図 7 および図 9 の結果からせん断抵抗を概算した。図 11 にその結果を示す。負荷方向で比べると周方向より軸方向の方が、軸形状で比べると軸 A より軸 B の方がそれぞれ高い締結強度が得られている。点線は引張強さの 0.8 倍として見積もった円盤材のせん断抵抗である。引張強さから見積もっている

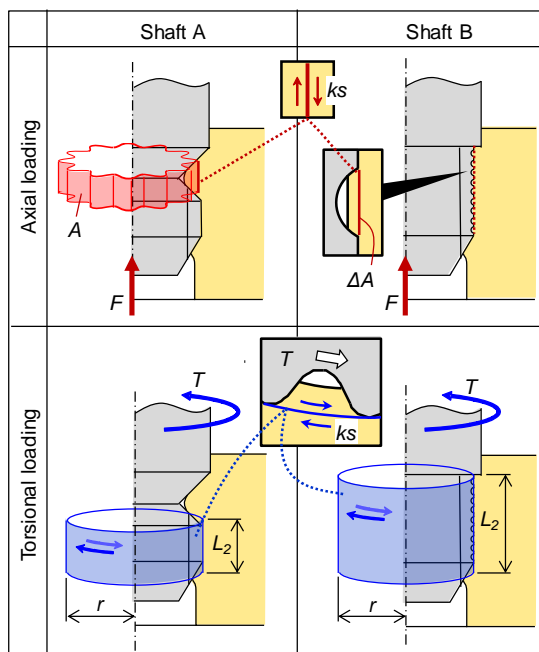
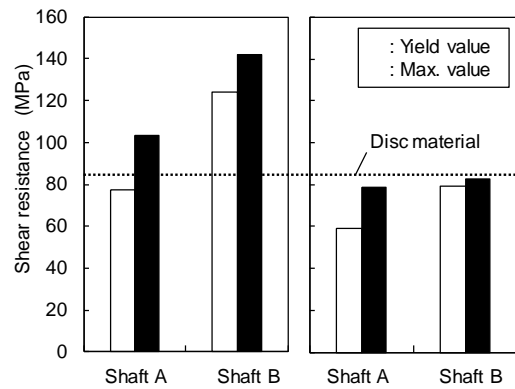


図 10 各方向の負荷に対する変形モデル



(a) 軸方向 (b)周方向
図 11 締結強度の比較 ($\delta=3\text{mm}$)

ことを考慮し最大値で比較すると、軸 A、B ともに母材と同等の結合強度が得られていると言える。

(6) 総括

歯形部および周方向の溝を付与した軸を円盤材に押込むことで、締結部に周方向と軸方向のかみ合いを一工程で付与することができた。このうち、軸方向のかみ合いについて、歯形転写部と独立に設置した軸 A と歯形転写部の中に設置した軸 B について比較を行った結果、以下の特徴が見いだせた。

どちらの軸も軸側に与えた凹凸部に対して締結により円盤材を充填させることができ、その状態の締結品は軸方向、周方向の負荷に対して円盤材と同等のせん断強度を有することが確認された。

部品の強度はせん断を受ける部位の面積が大きいほど高くすることができ、ねじりに対しては歯形部を長く設定できる軸 B の方がねじりトルクに対して有利であることが示唆された。

<引用文献>

- 1) 村上碩哉、塑性アセンブリ技術による製品の革新、塑性と加工、52 巻 603 号、2011、417-418
- 2) U. Beyer, B. Awiszus, Using Flat Clinching to obtain Plastic - Metal Compounds, Steel Research International, Special Edition, 2011, 673-678
- 3) 川目信幸、村上碩哉、アルミニウムダイカスト薄肉管と鋼軸の塑性流動結合技術の開発、塑性と加工、56 巻 659 号、2015、1048-1052
- 4) 廣田健治、松浦崇、北村憲彦、鶴飼須彦、松永啓一、ねじり強度を重視した焼入れ軸とフランジの塑性流動結合、塑性と加工、48 巻 552 号、2007、66-70
- 5) K. Hirota, K. Kitamura, Y. Ukai, K. Matsunaga, Joining of Stepped Shaft and Disc by Forming, Key Engineering Materials, 716, 2016, 458-463

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Kenji Hirota, Kazuhiko Kitamura, Yoshihiko Ukai, Keiichi Matsunaga, Joining of Stepped shaft and Disc by Forming, Key Engineering Materials, 査読有, 716, 2016, 458-463

DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KE.716.458>

Kenji Hirota, Kazuhiko Kitamura, Yoshihiko Ukai, Keiichi Matsunaga, Mechanical joining of shaft and holed disc in rotational and axial directions, Procedia Engineering, 査読有, 270, 2017, 980-985

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.862>

〔学会発表〕(計2件)

松岡裕介、北村憲彦、廣田健治、鵜飼須彦、松永啓一、薄い円板と軸との塑性結合、第66回塑性加工連合講演会、2015

廣田健治、北村憲彦、鵜飼須彦、松永啓一、軸と円盤部材の二方向同時塑性結合における結合強度の改善、平成30年度塑性加工春季講演会、2018

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

廣田 健治 (HIROTA, Kenji)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：5 0 2 7 3 2 5 6