



M. Usui



A. Shirayori

硬度差の無い金属製軸部品とフランジ部品の パンチレス塑性流動結合法の開発

薄井 雅俊* 白寄 篤**

1. 緒言

輸送機器などの複雑形状部品または多機能部品の製造において、生産性改善、コスト削減や環境負荷低減のために、複数部品の溶接・ボルト締結に代わる技術として金属の塑性を利用した結合法が研究されている。自動車の駆動機器などを対象とした軸と円盤部品の塑性結合方法には、塑性流動結合法¹⁾、シェービング接合^{2,3)}、植込み接合^{4,5)}などが提案されている。このうち塑性流動結合法は1980年前後に開発され、主に自動車部品において実用化されている方法である。従来は図1に示すように軸と円盤状の部材を精密なはめあいで組み立てた後に、軟質円盤部材の一部を円筒状の専用パンチで加圧し、硬質軸部材に設けた結合溝に軟質円盤部材を塑性流動させることによって結合するものであった。部品点数が少なく、プレス工程に組み込めるため、軽量・低コストで生産性が高い結合法である。村上らは、高精度かつ生産性の高い結合法であるという特徴に着目し、様々な部材の組み合わせに対して塑性流動結合法の展開を図ってきた^{6~10)}。しかし、従来の塑性流動結合法は軸部品輪郭形状に合わせた筒状の専用パンチが必要不可欠であり、パンチ作製・維持コスト、適用可能な形状の自由度、少量生産部品への適用の難しさなどが課題となっている。

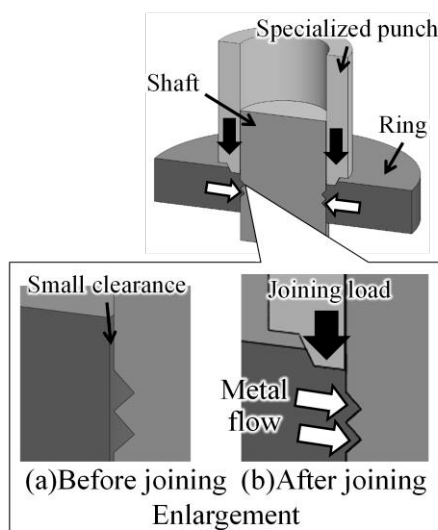


図1 従来の塑性流動結合法

近年では塑性流動結合法のさらなる応用として、広田ら^{11,12)}や F. Dorra ら¹³⁾などによって専用の結合パンチを必要としない新たな塑性流動結合法が研究されている。広田らの手法は、セレーション加工を施した焼入れ軸を軟質円盤部材の穴に押し込むことでセレーションの谷部に円盤部材を塑性流動させる方法である。軸抜き強度よりもねじり強度を重視した結合法であるが、硬度差が小さい材料の組合せではセレーションが潰れてしまい結合が難しい。一方 Dorra らの手法は、段付き軸の上下両端に圧縮荷重を負荷して小径部に塑性流動を生じさせる方法であり、硬度差に関係なく結合が可能である。しかし、軸が円盤を完全に貫通している部品でないと適用できない。また、塑性変形の生じる範囲を結合部に限定できないため軸部品の小径部全体がタル型に変形してしまう。

そこで著者らは、専用の結合パンチを必要としない塑性流動結合法として前述の方法とは異なる新たなパンチレス塑性流動結合法を開発した^{14~17)}。これまでの報告では、鉄鋼系材料(S45C と SKD11)の結合や異種材(A5056 と S45C)の結合において従来の結合法と同等以上の結合強度が得られることを明らかにし、専用パンチを必要としないために低コストであり、少量生産にも対応でき、異種材の結合にも有効な方法であることを示した。

しかし、このパンチレス塑性流動結合法は部品間の硬度差が必要不可欠であり、硬度差のない材料(同質材)の組合せでは軸部品、穴部品ともに塑性変形が生じることで結合強度(結合効率)が大幅に低下する。よって、本結合法を適用可能な材料の組合せには限りがあった。

そこで本研究では、パンチレス塑性流動結合法の適用範囲拡大の期待に応えるため、硬度差の無い材料にも適用可能なパンチレス塑性流動結合法を開発する。

2. 結合原理

2.1 これまでのパンチレス塑性流動結合法の原理

図2にこれまでに開発したパンチレス塑性流動結合法の概略を示す。この結合法では、軸部品と穴部品は互いの硬度を比較してどちらか片方が軟質材料となる組合せの材料を使用し(図2は軸が軟質の場合を示す)、硬質側の部

* 東京農工大学 工学府 機械システム工学専攻 産学官連携研究員

** 宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科 准教授

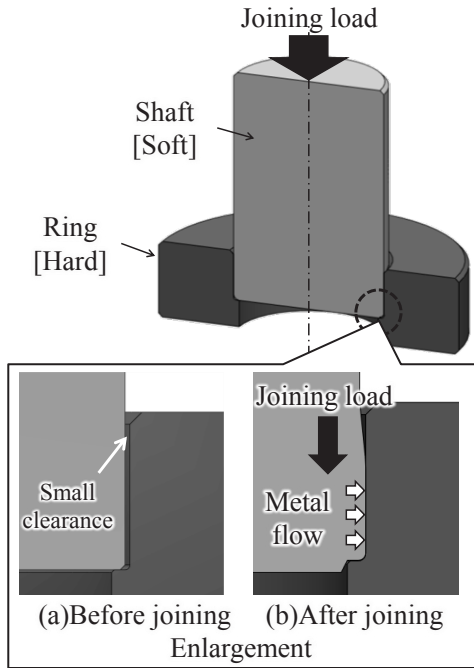


図2 パンチレス塑性流動結合法

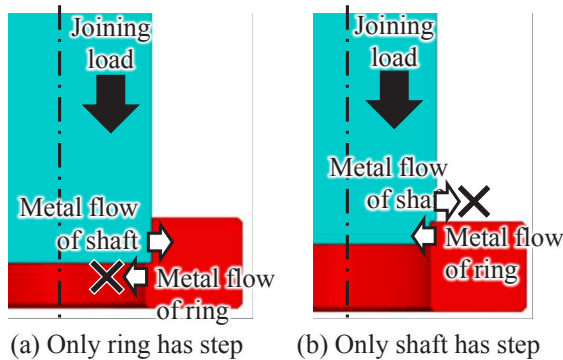


図3 硬度差の無い材料の結合(従来)

品に段付け加工を施す。直接軸端部に結合荷重を負荷することで段付け加工部がパンチの役割を果たし、局所的に高い面圧を発生させ、材料の硬度差によって微小な塑性流動が生じて結合される。

この方法は片側から荷重を負荷することで結合が可能であるため適用部品の自由度が高く、塑性流動の生じる範囲も段付き部周辺の微小範囲に限られ結合品が高精度である。また、特殊な工具や加工機を必要とせずプレス工程での結合が可能であるため、既存の結合方法からの移行も容易である。一定の結合荷重を負荷して結合を行う場合、結合強度に及ぼす軸外径と穴内径の寸法精度の影響は非常に小さく、結合部の加工には高い寸法精度を必要としない。一方で、結合部寸法の異なる条件でも結合部に生じる結合面圧に対する結合効率の関係はほぼ同じ直線に分布し、結合面圧に比例して結合効率が高くなる。

しかし、この手法では硬質側部材が塑性変形しないよう部品間の十分な硬度差が必要である。硬度差の無い材料の組合せでは図3に示すように軸、穴部品ともに塑性変形が

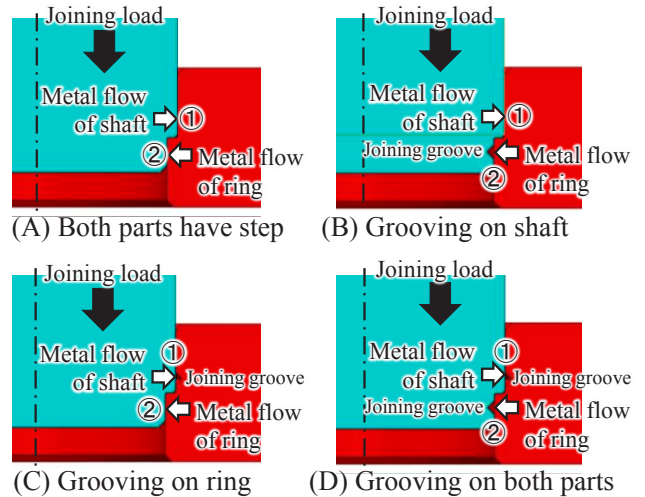


図4 硬度差の無い材料を結合するために提案

生じる。このとき×印で示す塑性流動は相手部品に接触せず結合力に関与しないため、負荷した結合荷重による仕事が無駄な変形に消費され、結合強度が大幅に低下する。

2.2 高度差不要なパンチレス塑性流動結合法の原理

本研究では硬度差の無い材料を塑性流動結合するために図4に示すように4つの結合手法を提案する。手法Aは軸、穴部品ともに段付け加工を施す方法であり、図中①および②の塑性流動を互いの段付け加工部で受け止めて結合力(締付圧力)を得る。手法B及びCは軸部品段付け加工部または穴部品内面のどちらかに溝加工を追加する方法であり、塑性流動によって溝に材料の一部が充填されることによる機械的かみ合わせと締付圧力によって結合力を得る。手法Dは軸部品・穴部品ともに溝加工を追加する方法であり、主に溝部の機械的かみ合わせによって結合力を得る。

3. 実験方法

本実験では、軸部品・穴部品ともに A5056-H112 材 ([HV1.0]110 程度, 引張強さ 350MPa 程度)を使用した。図5に手法AからDの実験に使用した試験片の寸法を示す。実験には、万能試験機(インストロン, 600DX)または手動プレス(長崎ジャッキ, NSP-15)を使用し、ロードセルとレーザ変位計を用いて実験中の荷重-ストロークデータを取得した。なお、伊西らの研究^{18),19)}では材料表面の油膜によって結合強度が低下する報告がなされており、本研究では結合前に全ての試験片表面を脱脂した。

まず、図6(a)に示す結合実験では、外径拘束治具等を用い、軸端部に結合荷重を負荷することで結合を行う。従来の硬度差を有するパンチレス塑性流動結合法と比較するため結合荷重は主に 30~60kN の範囲で設定した。また、より高い結合荷重を負荷した場合の挙動を調査するため一部条件では最大 75kN までの結合荷重を負荷した。結合荷重が最大の 75kN の場合でも、軸断面に生じる圧力は 239MPa 程度であり軸全体が降伏することはない。次に、

図 6(b)に示す軸戻し実験では、結合品を上下逆さにし、軸部品に結合時とは反対方向に荷重を負荷して押し抜く。この時、軸部品が穴部品から抜け始める荷重を結合強度（軸戻し耐荷重と呼ぶ）とした。

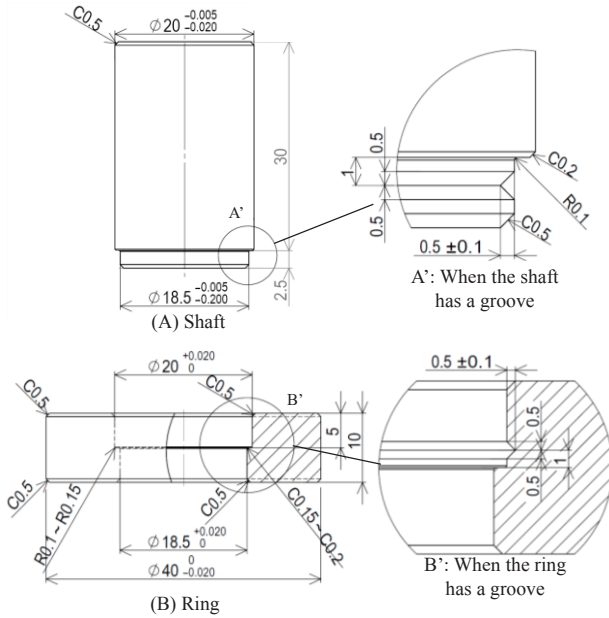


図 5 試験片寸法

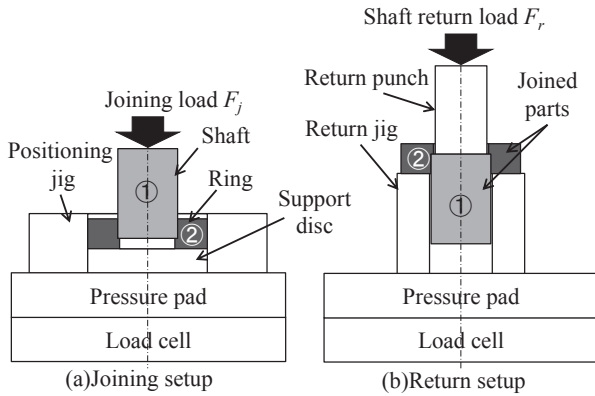


図 6 試験片および治具のセットアップ

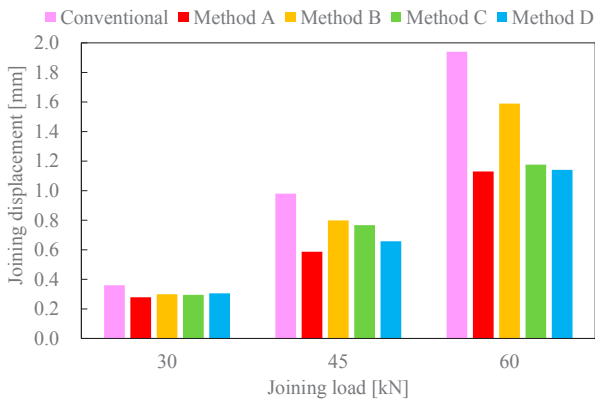


図 7 結合荷重と結合ストロークの関係

4. 実験結果

4.1 結合ストローク

塑性流動結合においては、結合品の寸法精度を担保するため結合時に必要な軸の押し込み量(結合ストローク)は小さい方が望ましい。図 7 に図 3(a)で示した従来のパンチレス塑性流動結合(穴部品のみ段付き)と提案する手法 A から D を用いて硬度差の無い 2 部品を結合した場合の、結合荷重 30kN, 45kN, 60kN を負荷するのに要した結合ストロークを示す。提案する手法はいずれの条件においても従来法(硬度差無)に比べて小さな結合ストロークで目標結合荷重を得ることが可能であった。

硬度差の無い材料の組合せでは軸、穴部品ともに結合部で塑性流動が生じる。従来法(硬度差無)では、軸部品端部は外径が拡大するように塑性流動し、穴部品内面とのすき間が充填されて変形が拘束される。しかし、穴部品の段付け下部が縮径する塑性流動は拘束されず、自由に変形できる。一方で、提案する手法は両部品に段付け加工が施されているため、両部品の塑性流動はどちらも部品間のすき間を充填して変形が拘束される。このように塑性流動による変形が拘束されるか否かによって必要な結合ストロークに差が生じたものと考えられる。

4.2 結合強度(軸戻し耐荷重)

図 8 に従来のパンチレス塑性流動結合(穴部品のみ段付き)と提案する手法 A から D を用いて硬度差の無い 2 部品を結合した場合の、結合荷重と軸戻し耐荷重の関係を示す。なお、従来の硬度差を有するパンチレス塑性流動結合(S45C 軸部品+A5056 穴部品)の先行研究¹⁴⁾の結果を併せて示す。実験した中で最も結合荷重の小さい 30kN(このとき段付け加工部に生じる公称面圧は約 661MPa)の場合、従来手法(硬度差無)の軸戻し耐荷重は非常に小さく、1.02kN しか得られなかった。一方で、提案する手法では最も軸戻し耐荷重の低かった手法 C, D でも 2.8kN 以上であり、従来法(硬度差無)の 2 倍以上の強度が得られた。また、提案する 4 つの手法を比較すると、結合溝の無い手法 A と結合溝を有する手法 B, C, D の差は小さく、結合荷重 30kN では軸戻し耐荷重に及ばず結合溝の影響はほとんど見られなかった。結合荷重 45kN の場合、結合溝の影

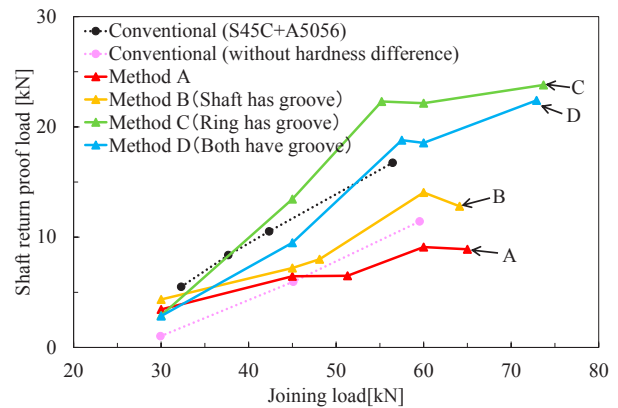


図 8 結合荷重と軸戻し耐荷重の関係

響による軸戻し耐荷重の差が表れ、穴部品側に結合溝を有する手法 C,D は手法 A,B よりも大きな軸戻し耐荷重が得られた。最も高い軸戻し耐荷重を得られた手法 C は 13.45kN であり、従来法(硬度差有)よりも大きな軸戻し耐荷重を得られた。結合荷重 60kN の場合、結合溝の無い手法 A と軸部品のみ結合溝を有する手法 B にも軸戻し耐荷重の差が表れ、手法 A の耐荷重は 9.1kN であり、従来法(硬度差無)よりもやや小さかった。一方で手法 B の耐荷重は 14.05kN であり、従来法(硬度差無)よりもやや大きな耐荷重を得られた。

提案する手法 A から D を比べると、前述の通り結合荷重 30kN では各手法に差はないが、結合荷重 45kN の場合には手法 A,B は従来法(硬度差有)より 30%以上軸戻し耐荷重が小さく、従来法(硬度差無)と同程度であり、十分な結合強度が得られなかった。手法 D は従来法(硬度差有)とほぼ同等の軸戻し耐荷重を得られ、手法 C は従来法(硬度差有)よりも大きな軸戻し耐荷重を得られた。

4.3 結合効率(軸戻し耐荷重/結合荷重)

図 9 に結合荷重に対する軸戻し耐荷重の割合を結合効率として示す。この値が高いほど、より低い結合荷重で高い強度を実現していることを意味する。

結合溝の無い手法 A は、結合荷重 30kN の場合の結合効率は約 11%と他の手法と同等だったが、結合荷重が大きくなっても結合効率はほぼ変わらず横ばいであった。手法 A では両部品への段付け加工によって図 4(A)の①軸部品の塑性流動と②穴部品の塑性流動が互いに半径方向逆方向の締付圧力を生じて結合される。この時、穴部品の結合後の外径は結合荷重 30kN の場合にはほとんど変化しなかったが、結合荷重 45kN で+0.015mm 程度、結合荷重 60kN で+0.03mm 程度大きくなっていった。このことから、①による半径方向外向きの圧力が高くなると穴部品全体がわずかに半径方向外向きに弾性変形し、穴が押し広げられることで②の締付圧力の一部が相殺されたため、結合荷重が大きくなっても結合効率が変化しなかったと考えられる。

軸部品に結合溝を有する手法 B の結合効率は結合荷重 45kN までは手法 A と同程度であったが結合荷重 60kN

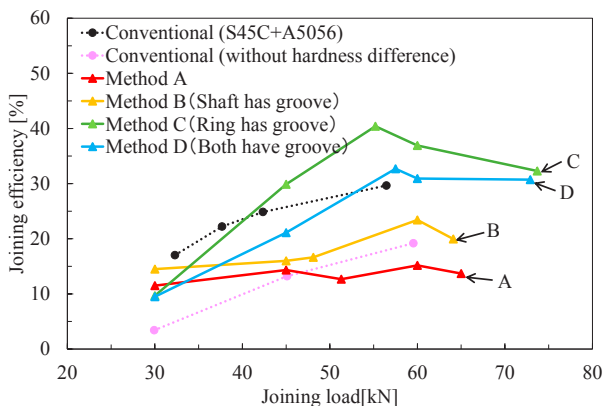


図 9 結合荷重と結合効率の関係

では手法 A や従来法(硬度差無)よりも高い約 23%の結合効率が得られた。このことから、結合荷重 50kN から 60kN の間で軸部品の結合溝に塑性流動した材料が充填され結合溝の効果が表れたと考えられる。

穴部品に結合溝を有する手法 C, 両部品に結合溝を有する手法 D は結合荷重 45kN から他の手法よりも結合効率が高くなり結合荷重 60kN では従来法(硬度差有)よりも高い約 32~40%の結合効率が得られた。このことから、穴部品の結合溝への塑性流動は結合荷重 30kN から 45kN の間で始まっており、軸部品の結合溝よりも早い段階で穴部品の結合溝の効果が表れたと考えられる。

一方で手法 B,C,D いずれの条件でも結合荷重 60kN 付近で結合効率のピークを迎え、それ以上の結合荷重では結合効率が上がらなかった。また、手法 B,C,D の結合後の穴部品外径の変化は手法 A より小さく、結合荷重 45kN で+0.01mm 以下、結合荷重 60kN で+0.02mm 以下であったが、結合荷重 65kN 以上では+0.05mm 程度大きくなっていった。このことから条件 B,C,D の結合溝への塑性流動による材料の充填は結合効率 60kN でピークを迎え、それ以降は手法 A と同様に穴部品全体の弾性変形によって締付圧力が相殺されて結合効率が上昇しなくなったものと考えられる。

4.4 結合溝への塑性流動の観察

4.3 で軸部品と穴部品、それぞれの結合溝への塑性流動について、穴部品結合溝の方がより早い段階からその効果を発揮していることを述べた。図 10 に結合荷重 60kN の結合品を切断し、結合溝部の断面を観察した結果を示す。手法 C および D の穴部品結合溝は塑性流動した材料が十分に充填されており、その割合は手法 C で 90%以上、手法 D で 75%以上であった。それに対して手法 B および D の軸部結合溝へ塑性流動した材料は少なく、手法 B で 35%以上、手法 D で 25%以上であった。いずれの場合にも軸部結合溝よりも穴部結合溝の方が塑性流動による充填が多かったことから、前述の通り、穴部結合溝の方が早い段階から塑性流動した材料が充填され始め、結合強度の上昇に大きく寄与する結果となった。また、両部品に結合溝を有する手法 D は軸部品と穴部品のどちらか片方だけに結合溝を有する手法 B,C に比べて、軸部結合溝と穴部結合

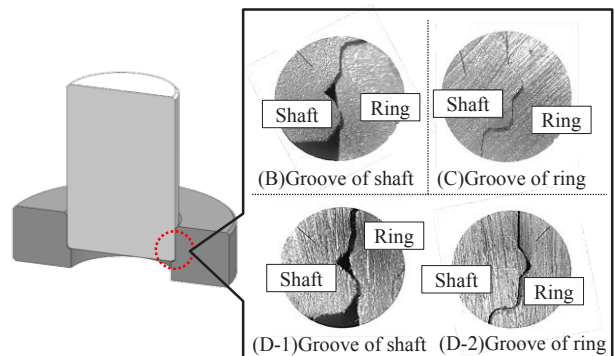


図 10 結合溝の塑性流動(結合荷重 60kN)

溝ともに塑性流動によって充填された材料が少なかった。これは、同じ結合荷重を負荷した場合、塑性流動する材料の総量はほぼ同じであり、結合溝が二つになったことで塑性流動の総量が分散したためである。

4.3 および 4.4 の結果から結合効率と結合溝への充填効率を考慮すると、硬度差の無い材料を塑性流動結合する場合には、提案する手法 C が最も効果的な結合手法であり、次いで手法 D も有効な結合手法であると言える。

4.5 結合溝形状縮小と配置変更による結合強度向上の検討

4.3 および 4.4 の結果から、結合溝への塑性流動がより多いほど結合効率が高くなること示された。そのため、より早い段階から材料の塑性流動が発生する段付け加工部に近いほど結合溝の効果が高くなると考えられる。また、図 10 で結合荷重 60kN を負荷しても結合溝への充填が 100%に満たなかったことから図 5 の結合溝形状は溝断面積が大きすぎた可能性がある。よって、結合溝形状の縮小と配置変更によって結合強度の向上が可能か検討した。

図 11 に図 5 の軸部品と穴部品の結合部拡大図に相当する変更後の溝形状と配置を示す。溝の幅は 1.0mm から 0.8mm に、深さは 0.5mm から 0.4mm に変更し、配置は段付け加工部に 0.4mm 近づけた。

溝形状変更後の軸部品と穴部品を用いた条件をそれぞれ手法 B',C',D'と呼ぶ。図 12 結合荷重と結合ストロークの関係を示す。比較のため従来法(硬度差無)と手法 A も併せて示す。溝形状を変更した手法 B',C',D'いずれも従来法

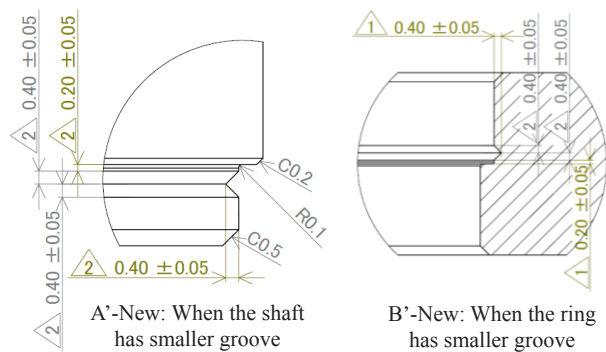


図 11 溝形状および配置の変更

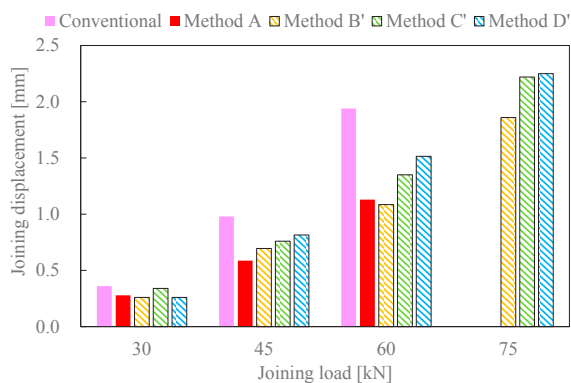


図 12 溝形状変更後の結合ストローク

(硬度差無)よりも小さな結合ストロークで目標結合荷重を得られた。また、図 7 の溝形状変更前の手法 B,C,D の結合荷重 45kN 以上での結合ストロークは手法 A に対しては平均 10%程度結合ストロークが長かったが、溝形状変更後の手法 B',C',D'は手法 A よりも平均 20%程度結合ストロークが長くなった。これは結合溝に流動する材料が溝形状変更前よりも増加した影響であると考えられる。

図 13 と図 14 に溝形状変更後の軸戻し耐荷重と結合効率を示す。比較のため溝形状変更前のデータを破線で示す。変更前と同様に結合荷重 30kN では各手法による軸戻し耐荷重の違いはほとんど見られないが、結合荷重 45kN では溝形状変更によって軸戻し耐荷重が向上する傾向が見られ、手法 C'および D'は従来手法(硬度差有)と同等以上の軸戻し耐荷重が得られた。特に軸部品に結合溝を有する手法 B'および D'は溝形状変更によって軸戻し耐荷重が大きく向上した。しかし、穴部品にのみ結合溝を有する手法 C'は溝形状変更による影響は小さかった。これは図 10 で示した通り、溝形状変更前から穴部結合溝は塑性流動による材料の充填が比較的多く、軸部溝形状は材料の充填が少なかったため、軸部品の方が結合溝形状変更の効果が大きかったものと考えられる。一方で、溝形状変更前は結合効率が低下していた手法 B の結合荷重 60kN 以上、手法 C,D の結合荷重 70kN 以上の条件では溝形状の変更によって結合効率が大きく向上した。

この結果から、材料の塑性流動量が多く、締付圧力が大

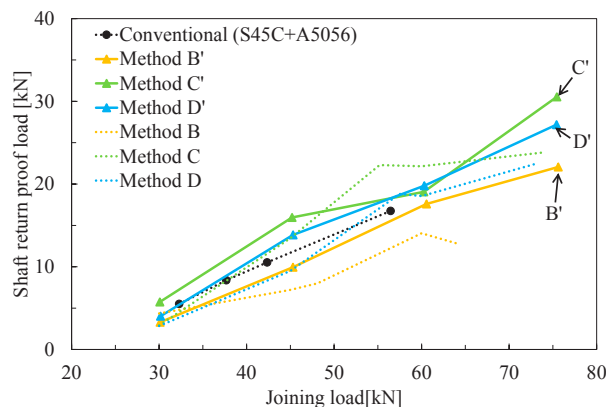


図 13 溝形状変更後の軸戻し耐荷重

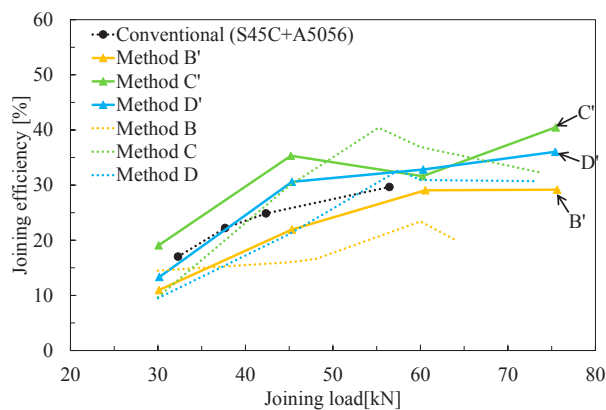


図 14 溝形状変更後の結合効率

きくなる箇所に適切な形状の結合溝を配置することで結合強度を向上させることが可能である。特に結合荷重の大きな条件で結合効率のピークを向上させることが可能である。

5. 結言

硬度差の無い材料をパンチレス塑性流動結合するために、両部品に段付け加工のみを施す手法と各部品の段付け加工部に結合溝加工を追加する手法を提案し、結合強度や結合溝への塑性流動の様子を調べた。また、結合溝形状の変更によって結合強度の向上を図った。その結果を以下に示す。

- 1) 両部品に段付け加工を施す手法 A によってパンチレス塑性流動結合が可能であるが、その結合強度は低かった。
- 2) 結合部に溝加工を追加することで結合強度は向上した。穴部品のみに溝加工を追加した手法 C が最も結合強度が高く、次いで軸・穴ともに溝加工を追加した手法 D の結合強度が高かった。軸部品のみに溝加工を追加した手法 B は、ほかの 2 つの手法に比べて結合強度の向上は小さかった。
- 3) 結合溝への塑性流動は、軸部結合溝よりも穴部結合溝の方が生じやすく、結合効率と結合溝への充填効率から穴部品のみに結合溝加工を追加する手法 C が最も効果的な結合手法であった。
- 4) 塑性流動による結合溝への材料充填効率を改善するため溝形状縮小と配置変更を行った。その結果、結合溝を使用するすべて結合手法で結合強度が向上し、特に穴部品に結合溝を有する手法 C、D は硬度差の有るパンチレス塑性流動結合よりも高い結合強度が得られた。

以上の結果から、両部品に段付け加工と結合溝加工を施すことで、硬度差の微小な材料のパンチレス塑性流動結合が可能であることを示した。特に穴部品に結合溝加工を追加することが有効であり、結合溝形状と配置を最適化することで従来の硬度差を利用したパンチレス塑性流動結合と同等以上の結合強度を得ることが可能である。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 金丸尚信・東海林昭・立見榮男・佐用耕作: 日立評論, 64-2(1982), 147-152.

- 2) 町田輝史・佐々木武三・坂本望: 塑性と加工, 47-544(2006), 373-378.
- 3) 佐々木武三・江上保吉: 塑性と加工, 47-545(2006), 432-436.
- 4) 花見真司・松本良・小坂田宏造・吉村豹治: 塑性と加工, 49-567(2008), 316-320.
- 5) Ryo Matsumoto・Takahiro Chiba・Shinji Hanami・Hiroshi Utsunomiya: Journal of Materials Processing Technology, 214(2014), 1995-2001.
- 6) 村上碩哉・高田将典・西川翔一郎・金丸尚信・井村隆昭: 平成 21 年度塑性加工春季講演会, (2009), 187-188.
- 7) 村上碩哉・大竹尚登・高田将典・西川翔一郎・金丸尚信・井村隆昭: 第 60 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2009), 357-358.
- 8) 浅野慎介・村上碩哉・大竹尚登・川目信幸: 日本機械学会 2011 年度年次大会 DVD-ROM 論文集, No. 11-1(2011), G040083.
- 9) 村上碩哉・川目信幸・鈴木行則・和田部雅司: 第 65 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2014), 81-82.
- 10) 川目信幸・村上碩哉: 塑性と加工, 56-659(2015), 1048-1052.
- 11) 広田健治・北村憲彦・鶴飼須彦・松永啓一: 塑性と加工, 52-603(2011), 429-433.
- 12) Kenji Hirota・Kazuhiko Kitamura・Yoshihiko Ukai・Keiichi Matsunaga: Journal of Materials Processing Technology, 214(2014), 2095-2101.
- 13) Florian Dörra・Michael Funk・Mathias Liewald・Hansgeorg Binz・Robin Köstlmeier: Procedia Engineering, 81(2014), 1988-1993.
- 14) 薄井雅俊・白寄篤・奈良崎道治・村上碩哉・川目信幸・鈴木行則: 塑性と加工, 55-640(2014), 456-460.
- 15) 薄井雅俊・白寄篤・奈良崎道治・村上碩哉・川目信幸・和田部雅司: 塑性と加工, 55-646(2014), 1008-1012.
- 16) Masatoshi Usui・Atsushi Shirayori・Michiharu Narazaki・Hiroya Murakami・Nobuyuki Kawame・Yukinori Suzuki・Masashi Watabe: Procedia Engineering, 81(2014), 1994-1999.
- 17) 白寄篤・薄井雅俊: 材料とプロセス 29-1(2016), 140.
- 18) 伊西穂高・北村憲彦・広田健二・鶴飼須彦・松永啓一: 第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2013), 35-36.
- 19) 伊西穂高・北村憲彦・広田健二・鶴飼須彦・松永啓一: 平成 26 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2014), 185-186.