

硬度差の小さい金属製軸部品と フランジ部品の塑性流動結合に関する研究

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 薄井 雅俊
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016014)

キーワード：塑性流動，機械接合，硬度差

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、一体成型や複数部品の溶接・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⁾、シェーピング接合^{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。図1に示すように開発当初の方法では、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、硬質部材の軸部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。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、焼入れ部材間の結合⁶⁾、鋼円盤と鋼管の結合⁷⁾、さらに延性の乏しいアルミダイカストのリングと鋼軸の結合^{8),9),10)}へと塑性流動結合法の応用展開を図ってきた。部品点数が少なく、プレス工程に組込めるため、軽量・低コストで生産性が高い結合法である。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。

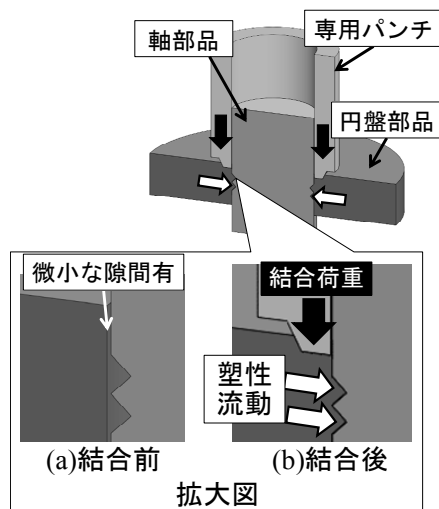


図1 従来の塑性流動結合法

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方法を提案し、その基本特性について調べてきた^{14),15),16)}。提案する結合法の概略は第2章で述べるが、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。これまでの報告では、鉄鋼系材料(S45CとSKD11)の結合と、異種材(A5056とS45C)の結合ともに、結合効率(軸戻し耐荷重/結合荷重)25%以上と従来の結合法と比較しても十分な結合強度を得ることが可能であった。また、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、結合部の加工に高い寸法精度を必要としないことを示した。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上に分布することを明らかにし、結合面圧を大きくすることで結合効率が高くなることを示した。これらの結果から、軸部品と穴部品の結合において、提案する塑性流動結合法は専用パンチを必要としないために低コストであり、非量産にも対応でき、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、提案する結合法には部品間の硬度差が必要であり、硬度差の微小な材料の組合せでは軸部品、穴部品ともに塑性変形が生じ、結合強度(結合効率)が大幅に低下する。

よって、この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、提案してきた結合法の適用範囲拡大のために硬度差の小さい材料にも適用可能な「パンチを必要としない塑性流動結合法」を検討する。

2. 結合原理

2・1 提案してきたパンチレス塑性流動結合法の原理

図2にこれまでに本研究で提案してきた「専用パンチを必要としない塑性流動結合法」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は軸が軟質な場合を示す)、硬質側の部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、専用パンチを用いずとも材料の硬度差によって微小な塑性流動が生じ、従来の塑性流動結合法と同等の結合強度が得られた。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。硬度差の微小な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の半分が無駄な変形に消費され、結合強度が大幅に

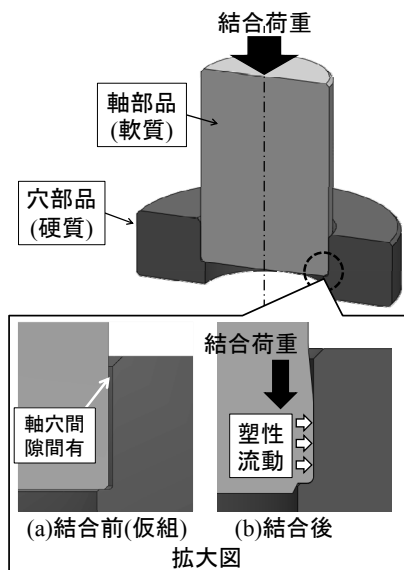


図2 専用パンチ不要な塑性流動結合法

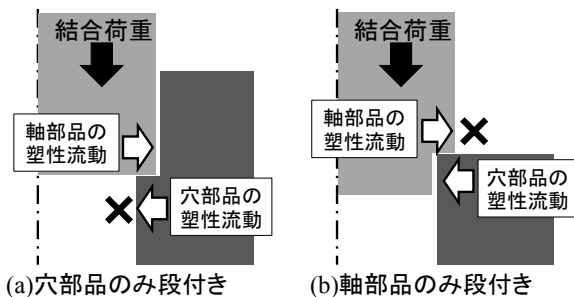


図3 硬度差の微小な材料の結合

低下する。よって、本結合法の適用可能な材料の組合せには制限があった。

2・2 新たに提案する塑性流動結合法の原理

本研究では硬度差の微小な材料を結合するために図4に示すように結合部に4つのパターンの工夫を加えることを検討した。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で示す塑性流動を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、手法Dは軸部品・穴部品ともに溝加工を施したものであり、塑性流動によって溝に材料の一部が充填されることで結合力を得る。

さらに、もう一つの手法として手法Aの両部品の段付け加工部の間に、結合材のリングを挿入する手法Eを提案する。手法Eでは、この結合材が塑性流動し両部品に密着する圧力によって結合する。結合材の硬度を変更することで両部品の不正な変形を避けつつ、結合することが可能であると考えられる。

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に使用した試験片の寸法を示す。実験には、図6に示す手動プレス装置を使用し、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する。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の表面に脱脂を施した。

まず、図7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。次に、図8に示す軸戻し実験では、結合品を上下逆さにし、軸部品

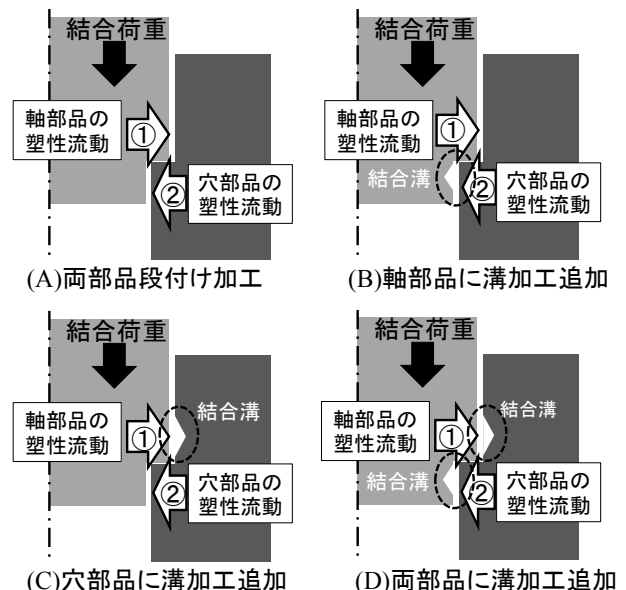


図4 硬度差の微小な材料を結合するための手法

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。

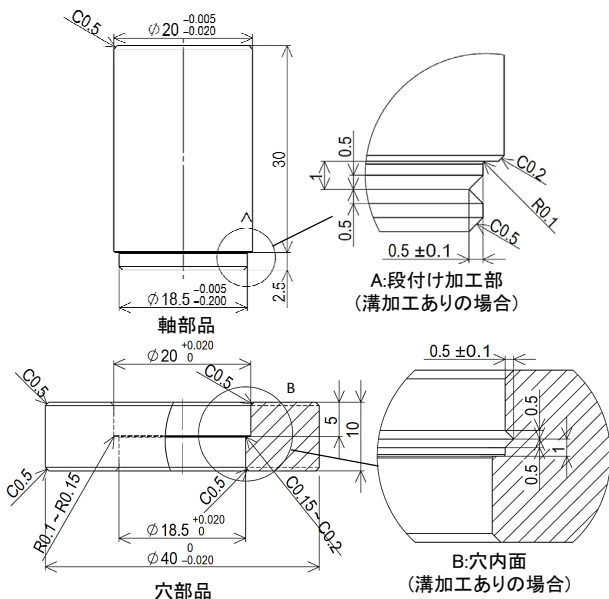


図5 試験片寸法

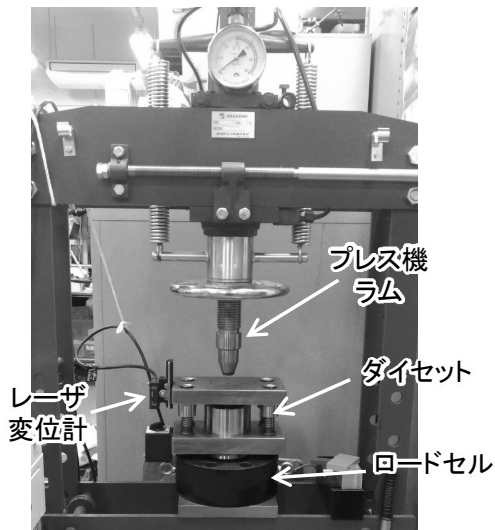


図6 実験装置

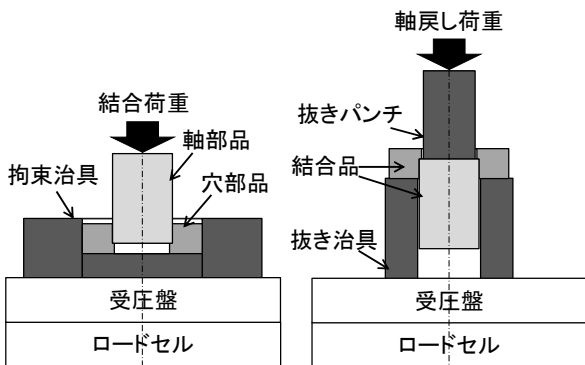


図7 結合実験概略

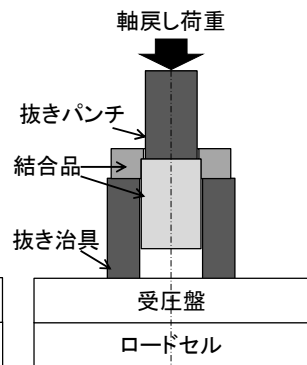


図8 軸戻し実験概略

4. 実験結果

4.1 段付けおよび溝加工の結合強度

図9に提案する手法Aから手法Dまでの結合荷重と軸戻し耐荷重の関係図を示す。なお、先行研究¹⁴⁾で十分な結合強度が得られた場合の硬度差がある従来のパンチレス塑性流動結合(S45C軸とA5056穴の結合)の結果を白抜き線の2重線で示す。これを見ると結合荷重30kN(このとき段付け加工部に生じる公称面圧は約661MPa)では、どの手法でも結合が可能であることが分かる。また、この荷重では軸戻し耐荷重に及ぼす結合溝への材料流動の影響は見られない。結合荷重45kNになると結合溝の影響が生じ、手法Cが最も高い軸戻し耐荷重を示している。結合荷重60kNになるとその影響はさらに顕著となる。また、硬度差があるパンチレス塑性流動結合の結果と比べると、手法A・Bの結合荷重45kN以上の場合には、どちらも十分な結合強度が得られなかった。一方で手法Dは硬度差がある場合とほぼ同等の結合強度を得られ、手法Cは硬度差がある場合よりもわずかに高い結合強度を得られた。

図10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。結合効率の結果においても、硬度差がある場合と比べて手法A,Bは十分な結合効率が得られていない。一方で手法Cは硬度差がある場合と同等以上の結合効率が得られているが、結合荷重

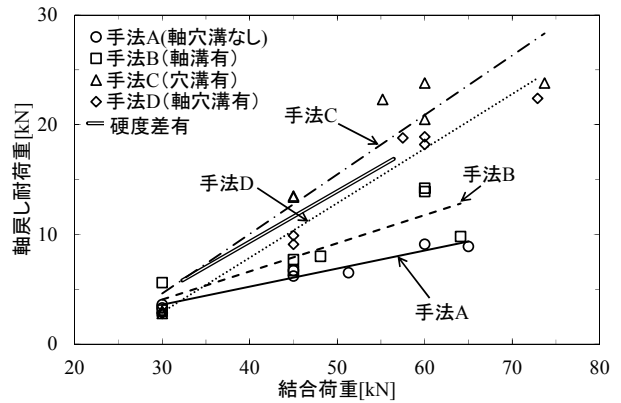


図9 結合荷重と軸戻し耐荷重の関係

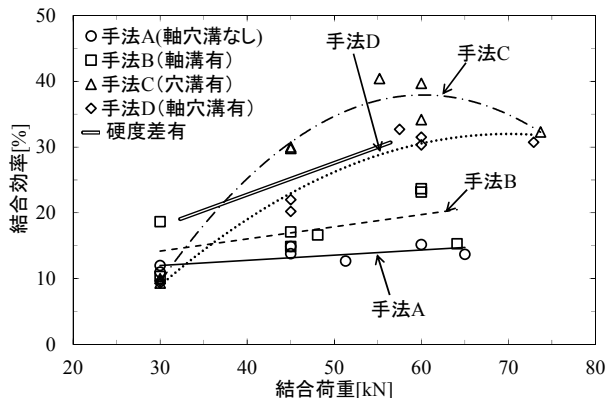


図10 結合荷重と結合効率の関係

60kN が結合効率のピークであり、結合荷重 60 kN 以上では結合効率が低下した。同様に手法 D も高度差がある場合と同程度の結合効率を得られたが、結合荷重 60kN 以上では結合効率が上がらなかった。

これらの結果から、手法 A(両部品への段付け加工)によって硬度差の微小な材料のパンチレス塑性流動結合が可能だが、その結合効率は 15%以下であった。また、段付け加工と合わせて結合溝加工を施すことでその結合強度は向上したが、手法 B による結合強度の向上は小さかった。一方で、手法 C では結合強度が大幅に向上した。手法 D も手法 B と比較すると結合強度の向上は大きかったが、手法 C の結合強度には及ばなかった。なお、手法 C の結合効率は他の塑性流動結合法^{1),6)-8)}と比較しても同等以上である。

4・2 結合溝への塑性流動割合

4・1 の結果から、手法 A,B では結合荷重 45 kN 以上の場合の結合力が小さいことが分かった。これは、図 4 の①で示した軸部品の塑性流動による半径方向面圧が高くなると、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に起因する。この弾性変形により図 4 中②の穴部品の塑性流動が減少し、手法 A では②による締付力が低下し、手法 B では軸部品結合溝に充填される②の塑性流動量が減少し、結合強度の低下をまねく。図 11 に結合荷重 60kN の結合品を切断した断面の観察結果と結合溝に塑性流動した材料の充填割合を示す。手法 B の軸部結合溝への塑性流動は 37.4%程度であったが、手法 C の穴部結合溝への塑性流動はほぼ 100%と非常に高く、前述の理由により、軸部品側よりも穴部品側の結合溝への充填割合の方が高かった。また、手法 D では軸部結合溝と穴部結合溝への塑性流動充填割合はそれぞれ 28.9%、75.2%であり、どちらの結合溝も手法 B および C の流動割合よりも低かった。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ると考えられるため、結合溝が二つになったことでその総量が分散したためである。これらの結果から、結合溝の充填割合の観点からも手法 C が最も適切な条件であると言える。

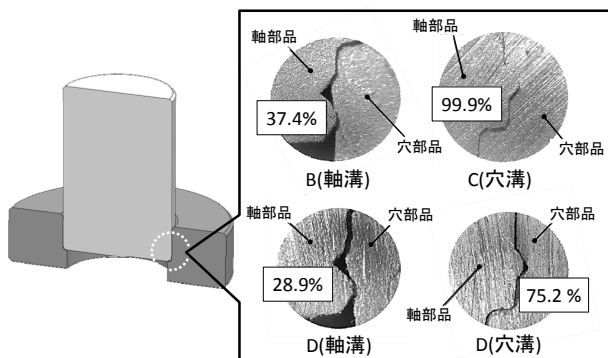


図 11 結合溝への塑性流動割合(結合荷重 60kN)

4・3 有限要素法解析

手法 B,C,D の結合溝充填効率を向上し、より結合効率を上げるために、有限要素法解析を用いて結合溝形状および配置の最適化を検討した。本検討では、有限要素法解析ソフトウェア LS-DYNA を用いて結合解析を行った。軸部品、穴部品および拘束治具を軸対称モデルとし、シェル要素を用いて 2 次元モデル化した。軸部品、穴部品ともに予測される変形の小さな部分の要素は一辺 0.5mm 程度、変形の大きな段付け加工部と溝加工部の要素は一辺 0.05mm 程度のサイズとした。静止摩擦係数は村上らの研究⁹⁾を参考にし、0.34 とした。結合工程では圧縮ラムに軸方向の強制変位を与えることで軸部品に結合荷重を負荷した。

図 12 に解析によって得られた結合荷重 60kN の場合の各手法における半径方向圧縮応力の分布を示す。各結果の中央に段付け加工部があり、左半分が軸部品、右半分が穴部品である。手法 A の結果を見ると、段付け加工部付近に大きな圧縮応力が存在し、軸部品と穴部品が互いに締付あっていることがわかる。特に段付け加工部より下側の穴部品の変形による応力が、上側の軸部品の変形による応力よりも小さく、4・2 で述べた穴部品弾性変形に起因する締付力低下が発生していることがわかる。手法 B から D においては材料の結合溝への流動が生じたことで、それと引き換えに接触部の圧縮応力が低下していることがわかる。また、どの条件においても大きな圧縮応力が発生している領域は溝加工部よりも段付け加工部に近い領域である。このことから、結合溝をより段付け加工部に近い位置に配置し、かつ溝形状をやや小さくすることで塑性流動による結合溝充填効率が可能であると考えられる。

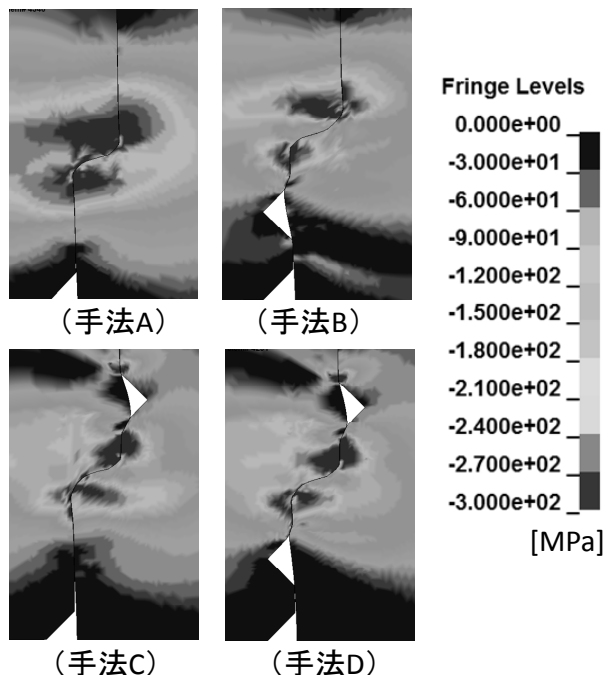


図 12 半径方向圧縮応力の分布(結合部拡大図)

4・4 溝形状・配置変更による結合強度向上

4・3の解析結果をもとに、結合溝形状の変更と配置を変更した。図13に図5の軸部品と穴部品の拡大部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。

図14と図15に溝形状と配置変更後の軸戻し耐荷重と結合効率を示す。変更前と同様に結合荷重30kNでは各手法による結合強度の違いは見られないが、どの手法においても変更後の方がわずかに結合強度が向上した。手法Bは結合強度45kN以上で変更前よりも大幅に結合強度が向上したが、従来の硬度差有パンチレス塑性流動結合よりもわずかに低い結合強度であった。手法C,Dは結合荷重60kN以下では溝形状・配置変更による結合強度の向上はわずかであったが、結合荷重75kNでは大きく結合強度が向上した。特に手法Cは結合荷重75kNでの結合効率が約40%に達した。

この結果から、解析に基づいた溝形状と配置の変更は適切であり、結合強度を向上させることができた。特に結合荷重60kN以上での効果が大きく、結合効率を大幅に向上させることが可能であった。また、変更後においても手法Cが最も適した結合手法であった。

4・5 結合材の結合強度

硬度差が微小な部品のもう一つの結合手法として、手法Aの両部品の段付け加工部の間に、結合材のリングを挿入

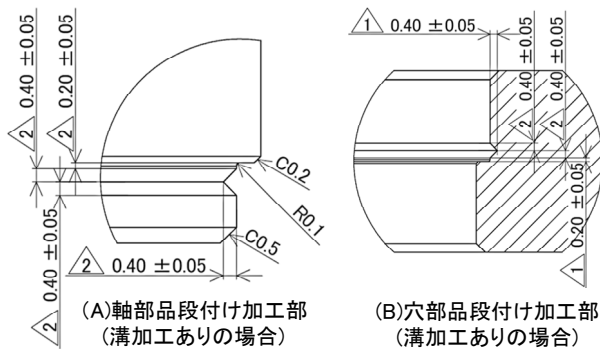


図13 変更後の溝形状とその配置

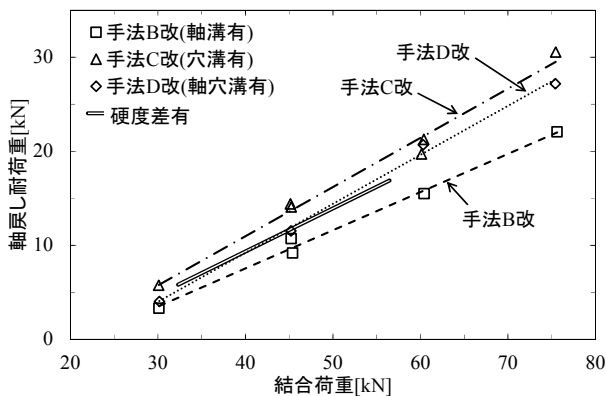


図14 溝形状・配置変更後の軸戻し耐荷重

する手法Eを検討した。手法Eでは、図16に示すように外径20mm、内径18.5mm、高さ2.0mmのリングを軸部品と穴部品の間に挿入して結合実験を行った。結合材には軸部品・穴部品と同じA5056-H112([HV0.5]110程度)とそれよりも軟質なA5056-H34([HV0.5]85程度)、A1050-H112([HV0.5]35程度)の3種類の材料を用いた。

図17にその結合強度を示す。どの条件においても結合材の材質による違いはほとんどなく、同じ結合荷重を負荷した場合の結合強度は同程度であった。これは同じ結合荷重を負荷した場合、軟質な材料ではより多くの塑性流動が生じ、結合材が軸・穴間に充填されて接触する面積が大きくなり、全体の締付力が同程度になったためと考えられる。また結合荷重35kNでは、硬度差有パンチレス塑性流動結合や提案する手法Aとほぼ違いが見られなかったが、結

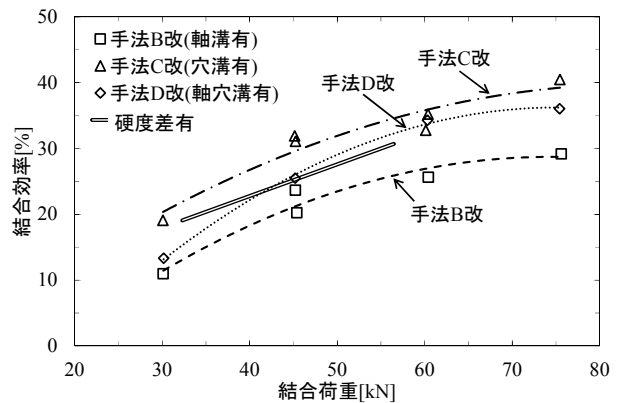


図15 溝形状・配置変更後の結合効率

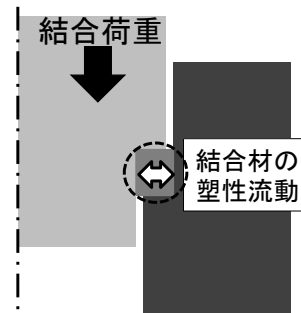


図16 手法Eの概略

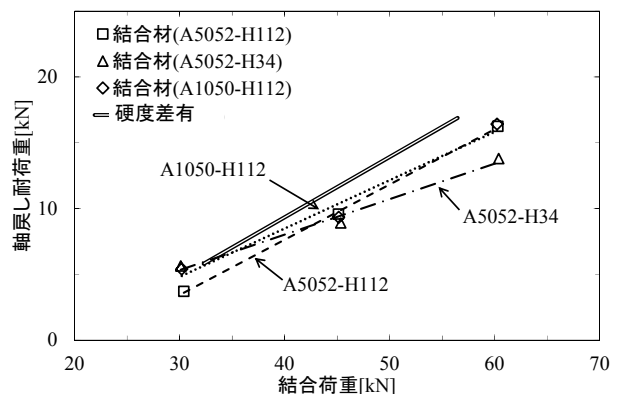


図17 結合材を用いた場合の軸戻し耐荷重

合荷重 45kN 以上では手法 A よりも大きな結合強度が得られた。その結合強度は硬度差有パンチレス塑性流動結合よりもわずかに小さかった。

5. 結言

硬度差の微小な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を施す手法と各部品の段付け加工部に結合溝加工を施す手法、そして両部品間に結合材を使用する手法を検討し、結合強度や結合溝への塑性流動割合を調べた。その結果を以下に示す。

- 1) 両部品に段付け加工を施すことでパンチレス塑性流動結合が可能であるが、結合強度は低かった。
- 2) 結合部に溝加工を施すことで結合強度は向上した。穴部品のみにも溝加工した場合がもっとも結合強度が高く、次いで軸・穴ともに溝加工した場合の結合強度が高かった。軸部品のみにも溝加工した場合には、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、流動割合の観点からは穴部品のみにも結合溝加工を施すのが最も適切であった。
- 4) 有限要素法解析による応力分布解析をもとに、溝形状と配置を改善した。その結果、すべての溝加工条件において結合強度が向上し、穴部品のみにも溝加工した場合には硬度差有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。
- 5) 結合材を用いることで、両部品に段付け加工を施した場合よりも大きな結合強度が得られたが、硬度差有パンチレス塑性流動結合の結合強度よりもやや低い結合強度であった。また、結合材の材質による強度差はほとんどなかった。

以上の結果から、両部品に段付け加工と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。特に穴部品のみにも溝加工を施すことが有効であり、有限要素法解析などを用いて溝形状とその配置を最適化することで硬度差がある材料よりも高い結合強度を得ることも可能である。結合溝加工が困難な場合には両部品間に結合材を使用することが有効であるが、得られる結合強度は硬度差の有る場合よりもわずかに劣る。

謝 辞

最後に、本研究は天田財団「一般研究開発助成(平成 28 年度)」の助成を受けたものであることを記し、関係各位に謝意を表します。

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) 花見眞司・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) 浅野偵介・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) 伊西徳高・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) 伊西徳高・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.