

PCR 加工による円管とフランジの塑性流動締結*

森 敏彦*¹, 広田健治*¹, 千田進幸*¹

Flow Joining of Tube and Flange by PCR Process

Toshihiko MORI*², Kenji HIROTA and Shinko SENDA*² Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Planetary Conical Rolling termed PCR is a new process for tube ironing, in which a number of rollers around the cone depress the tube thickness spirally. Because of rolling contact, galling or breakage in conventional ironing can be prevented and extremely high thickness reduction and mirror finishing of outer surface was demonstrated. Additionally, high pressure can be applied to the radial direction due to the high rigidity of the axis support cone. This stress state causes radial material flow easily and the possibility of giving a certain feature on tube surface by PCR was reported. In this paper, by replacing a die with the flange having a concavity, flow joining of tube and flange by PCR was discussed. Material flow into the concavity was investigated and it was found that filling-up volume was increased with increasing the material on the concavity, though it was not affected by the position of concavity. Joining strength to the axial direction was estimated with a simple model and required filling depth into the concavity was clarified. Joined component was subjected to the separation test and measured strength was in good agreement with calculated value.

Key Words: Plastic Forming, Formability, Fixing Element, Bearing, Planetary Conical Rolling, High Reduction Tube Forming, Joining

1. 緒 論

既報においてテーパローラ工具により円管の肉厚を逐次的に減肉していく PCR 加工 (プラネタリ・コニカル・ローリング) を提案し, その特徴を論じてきた^{①②}. この方法では転がり接触のため焼き付きや破断が生じにくく, 通常のごき加工に比べ非常に大きな壁厚減少率, 良好な寸法精度, 管外表面の鏡面化を実現できる. その要因として, 工具の軸剛性が高く板厚方向に高い面圧を加えられることを見だし, これを利用して管同士の間で半径方向重ね圧接や, 管外表面へ形状付与が可能なことを既報で報告した^{③④}. 本研究ではこの特徴を機械的締結に利用する方法を提案する. すなわち, 凹所を有する構造部材を管の外側に配置して PCR 加工を行えば, 凹所への材料流入により機械的な締結 (塑性流動締結) が実現される. また, 外材が十分な剛性を有する部材であればダイレスでの加工も可能となる. 機械的締結は圧接のような金属学的な接

合でないため組み合わせる材質に自由度があり, 流入を受ける側の部材にはセラミックなどの脆性材料を選ぶこともできる. また, 廃棄時には分別が容易であり材料リサイクルの点でも有効である. 本報では, アルミニウム合金製の管と厚肉フランジをダイレスで PCR 加工により締結することを試み, 加工特性および凹所への効率的な充填が得られる条件を明らかにした. また, 変形モデルによる強度類推と締結体の分離試験から, 本加工法による締結性能について考察を行った.

2. 加工原理

2-1 PCR加工 図1にPCR加工の原理を示す. 加工は素材を納めたダイスを回転させ, その中にバックアップレースで支持された多数のテーパローラを軸方向に送り込むことで行われる. 各ローラは自転しつつ管内壁を公転し, 管肉厚はダイスとローラとの間で螺旋状に逐次圧下されていく. 個々のローラ直下では周囲の材料拘束のため半無限体への押込みに近く, 高い圧縮応力場が形成される. また, 逐次加工であるた

* 原稿受付 2001年7月4日.

*¹ 正員, 名古屋大学工学部(〒464-8603 名古屋市千種区不老町).

E-mail: mori@mech.nagoya-u.ac.jp

め加工力も低く、転がり接触のため相対すべりも生じない。これらにより、破断することなく大きな壁厚減少を実現することができる。

2.2 締結機構 図 2(a)のように外材に溝を設けて内材に減肉加工を施す。このとき、内材から溝部への十分な材料流動が生じれば機械的締結が実現される。内材に生じる半径方向、円周方向、軸方向の垂直ひずみをそれぞれ ε_r , ε_θ , ε_z とすると、減肉加工では $\varepsilon_r < 0$ であり $\varepsilon_\theta + \varepsilon_z > 0$ である。塑性流動締結のためには、外材に設けた溝部への材料流動が生じるように $\varepsilon_\theta (> 0)$ を大きくすればよい。

通常のしごき加工ではポンチの傾斜角が小さいため、軸力の半径方向力は小さく $\varepsilon_\theta \approx 0$ である。また、ポンチは管内壁に全面で接触しており、塑性域が円周方向に連続しているため軸方向伸びも生じやすく $\varepsilon_z > 0$ である。このため、溝部への材料流動は起こりにくい。

これに対し、PCR加工ではローラとダイスとの間で圧延のように直接的に圧下が行われるため、半径方向に大きな圧縮応力が生じる。加えて、隣接ローラ間の未圧下領域が軸方向伸びを拘束して $\varepsilon_z \approx 0$ となり、さらにローラ直下の材料の圧縮応力場は高められる。したがって、管の外側に自由表面があれば $\varepsilon_\theta > 0$ となりやすく、容易に溝部への材料流動が生じる。

このように、PCR 加工では原理的に半径方向の材料流動が生じやすく、図 2(a)のような配置で加工を行えば管同士の機械的締結が期待できる。さらに、十分

な剛性をもつ構造体への接合を考えると、図 2(b)のようにダイスがなくても加工できると考えられる。本実験ではダイレス加工の可能性も含め管と厚肉フランジの締結を試みる。

2.3 加工装置 加工には汎用旋盤を用い、主軸のチャックにフランジを、芯押し台にテーパローラ工具を固定して行う。芯押し台はモータで駆動され、送り速度は任意に調節できるようになっている。テーパローラ工具は既報⁹⁾と同じで NTN 製の円錐ころ軸受け(ローラ個数 14, ローラ角 125° 最外包装円径 $d=64.6\text{mm}$)を使用した。

3. 実験方法および実験条件

3.1 加工素材 管材には既報⁹⁾と同一の高強度の固溶強化形アルミニウム合金 A5052-H14 の押し出し管を用いた。表 1 に機械的性質を示す。引張強さは 251MPa と高く、延性尺度の n 値は 0.09 と比較的低い。フランジは加工中にダイスの役割をするため、十分な強度と剛性が必要となる。本実験では、鋼材に匹敵する強度を持つ A2017 の押し出し材を使用した。なお、強度は A5052 の約 1.5 倍であり、締結時には溝部が変形しないことを確認している。

3.2 ダイス回転数, 工具送り速度 ダイス回転数は 350rpm (角速度 $\omega=36.7\text{rad/s}$)、工具送り速度は $v_0=1.16\text{mm/s}$ (0.21rev/s) で一定として実験を行った。

3.3 素材寸法および壁厚減少率 素材寸法を図 3 に示す。圧下率は既報⁹⁾と同様に壁厚減少率 R で定義し、素管壁厚を t_0 、製品壁厚を t とすれば(1)式で与えられる。

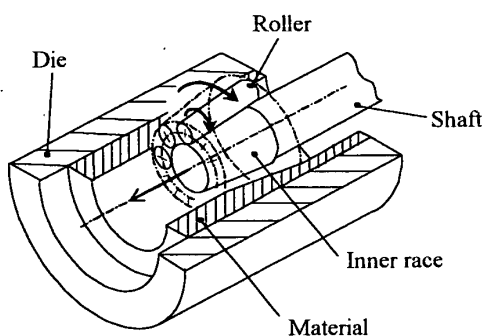


Fig.1 Outline of "Planetary Conical Rolling" (termed PCR)

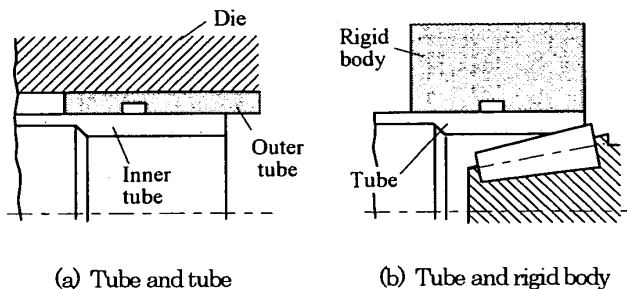


Fig.2 Schematics of flow joining by PCR

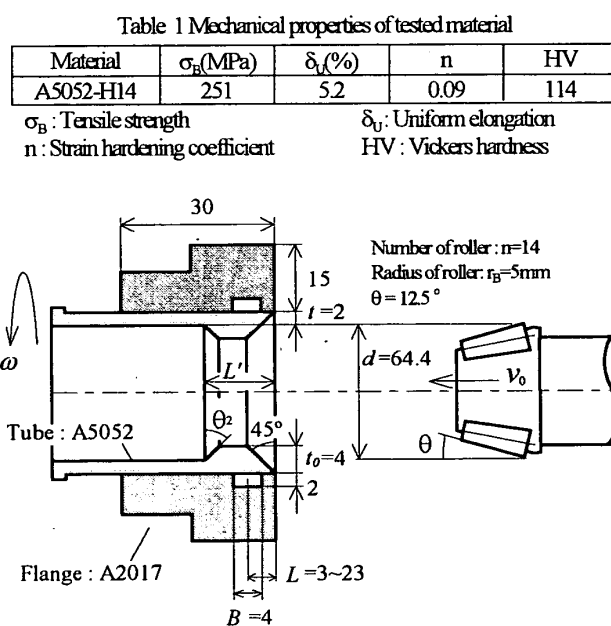


Fig.3 Experimental conditions

Table 1 Mechanical properties of tested material

Material	$\sigma_B(\text{MPa})$	$\delta_V(\%)$	n	HV
A5052-H14	251	5.2	0.09	114

σ_B : Tensile strength
 δ_V : Uniform elongation
 n: Strain hardening coefficient
 HV: Vickers hardness

$$R = \frac{t_0 - t}{t_0} \dots\dots\dots (1)$$

本実験では溝部への材料流動を議論するため、 $R=0.5$ で一定として、溝位置 L および圧下領域の形状(L, θ_2)を変化させた。

3.4 締結強度試験 締結性能評価のために図4に示すジグにより締結体の引張試験を実施する。各部位の寸法は類推される締結体の強度から、チャック部でのすべりやジグ自体が変形しないように設計した。引張試験には容量 1MN のアムスラー型万能試験機を使用する。

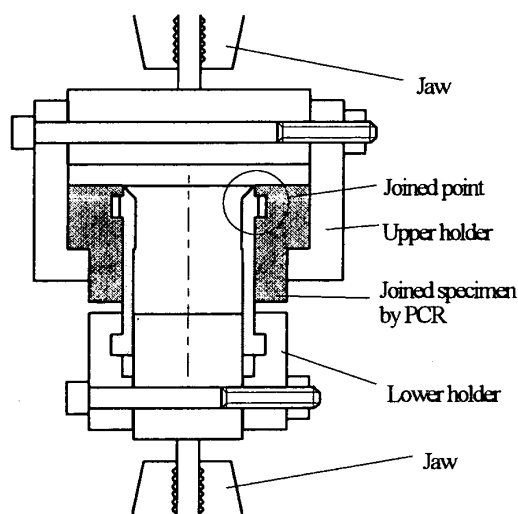


Fig.4 Jig for separation test of joined specimen

4 実験結果および考察

4.1 締結要件 軸力により管部が引張破断しても締結部が残っている状態を理想的な締結と考え、そのために必要な締結部分の寸法条件について考える。

4.1.1 溝部幅 B の決定 (十分な材料流動がある場合) 図5のように軸方向に引張力 F を与えた場合、管断面の垂直応力 σ_z は管肉厚を t 、管の外径を D_0 として(2)式で与えられる。一方、溝部にかかるせん断応力 τ_{rz} は溝部の幅を B として(3)式で表せる。

$$\sigma_z \cong \frac{F}{\pi D_0 t} \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_{rz} = \frac{F}{\pi D_0 B} \dots\dots\dots (3)$$

なお、 $D_0 \gg t$ とした。これより締結された管とフランジが軸力 F により分離する条件として次の二つが考えられる。

①管横断面での引張り破壊
 管の引張強さを σ_B とすれば $\sigma_z \geq \sigma_B \dots\dots (4)$

②溝部でのせん断破壊

溝部でのせん断抵抗を k_s とすれば $\tau_{rz} \geq k_s \dots (5)$
 せん断抵抗は経験的に $k_s = 0.5 \sim 0.8 \sigma_B$ であるが、ここでは安全側に見積もり $k_s = 0.5 \sigma_B$ とする。そして、(2)~(5)式より管破断時も締結状態にあるための条件を求めると(6)式が得られる。

$$B \geq 2t \dots\dots\dots (6)$$

すなわち、管肉厚に対して 2 倍以上の溝幅を設定すれば十分な締結が達せられる。

4.1.2 所要材料流入深さ 溝への材料流入が少ない場合には、図6(b)のようにせん断の前にシェーピングが起こる。このとき、実質せん断長さ AC' は流入が十分な図6(a)に比べて、シェーピングの行われた行程 h' だけ短くなる。このため、(6)式の B は $B-h'$ に補正され、締結要件は(7)式になる。

$$B \geq 2t + h' \dots\dots\dots (7)$$

ここで h' は溝への流入深さ Δ により変化し、以下のように見積られる⁶⁾。被加工材は n 値が小さいため加工硬化を無視し、局所せん断で変形が進むと仮定して、図6(b)から見かけのせん断抵抗 k_s [単位幅 (紙面垂直方向) あたりの加工力 F /溝幅 B] を考える。シェーピング時のせん断抵抗 k_{sv} は AD 面上でせん断降伏応力 k で変形が進むとして(8)式となる。行程 h での ΔADE の形状は図の Δ' と ϕ により規定され、体

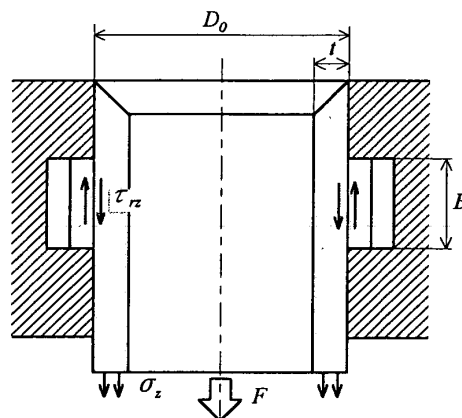


Fig.5 Stress state in the joined specimen under axial tension

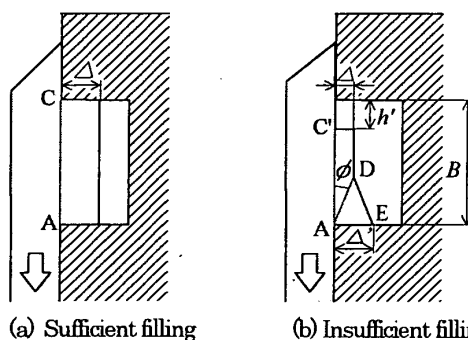


Fig.6 Difference in deformation depending on filling depth

積一定側と AD 面がせん断応力面となる条件 ($\angle ADE=45^\circ$) から (9)式, (10)式で結ばれる. (8)~(10)式より ϕ を媒介として, 行程 h に対する k_{sv} の関係が得られる. 一方, AC' 面上でせん断が行われる場合, せん断抵抗 k_{sh} は(11)式となる.

$$k_{sv} = \frac{k \cdot \Delta' (1 + \sin 2\phi)}{B} \quad \dots\dots (8)$$

$$\Delta' = \frac{2\Delta}{1 + \sin 2\phi - \cos 2\phi} \quad \dots\dots (9)$$

$$h = \frac{\Delta'^2 \cos 2\phi (1 + \cos 2\phi)}{4\Delta} \quad \dots\dots (10)$$

$$k_{sh} = \frac{k \cdot (B - h)}{B} \quad \dots\dots (11)$$

行程 h に対する k_{sv} および k_{sh} の変化を描くと図7のようになる. なお, 値は両軸とも無次元化してある. $k_{sv} > k_{sh}$ となった時点でシェービングからせん断に切り換わり, グラフの交点から各 Δ に対するシェーピン

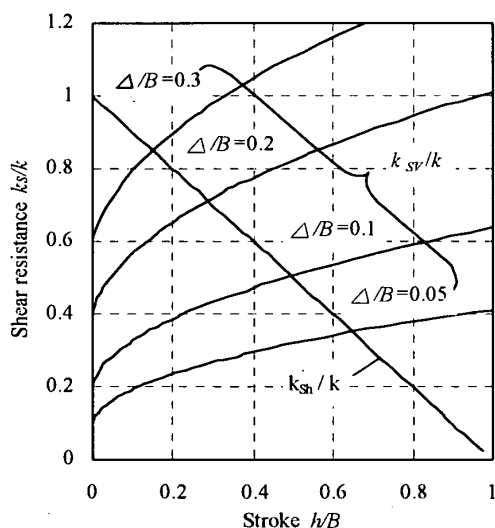


Fig.7 Change of joining strength depending on filling-up depth

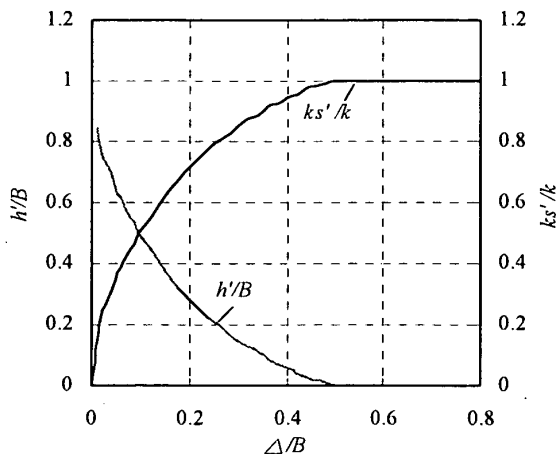


Fig.8 Influence of filling-up depth on joining strength and dominance of shaving deformation

グ行程 h' および締結強度 ks' が求まる. Δ に対する h' と ks'/k の変化を求めると図8のようになる. この線図より, Δ が小さいほど h' は長くなり, ks' は低下することがわかる. また, $\Delta > 0.5B$ では $h=0$ であり, (6)式により溝幅 B を決定できる.

4.2 PCR加工による塑性流動締結

4.2.1 溝部への材料充填機構

図9にローラにより圧下を受けている材料近傍の様子を模式的に示す. r 方向に圧下された材料は z 方向 (軸方向) へ伸び, その変位は A 領域に伝えられる. しかし, 圧下を受けない C,D 領域は伸びないため, A 領域の z 方向変位は周辺材料 C_A, D_A により拘束され A 領域では z 方向に圧縮力が作用する. このため, 図9(a)のように, ローラが溝を通過する前から溝部への材料流入が生じると考えられる.

同様に, ローラ直下の領域にも周囲の A,B,C,D 領域からの拘束により高い圧縮応力場が形成されている. したがって, ローラが溝を通過すると図9(b)のように溝に対応した領域IIで溝部への押し出し加工となり, このときの押し出し抵抗と軸方向伸びの抵抗との balan

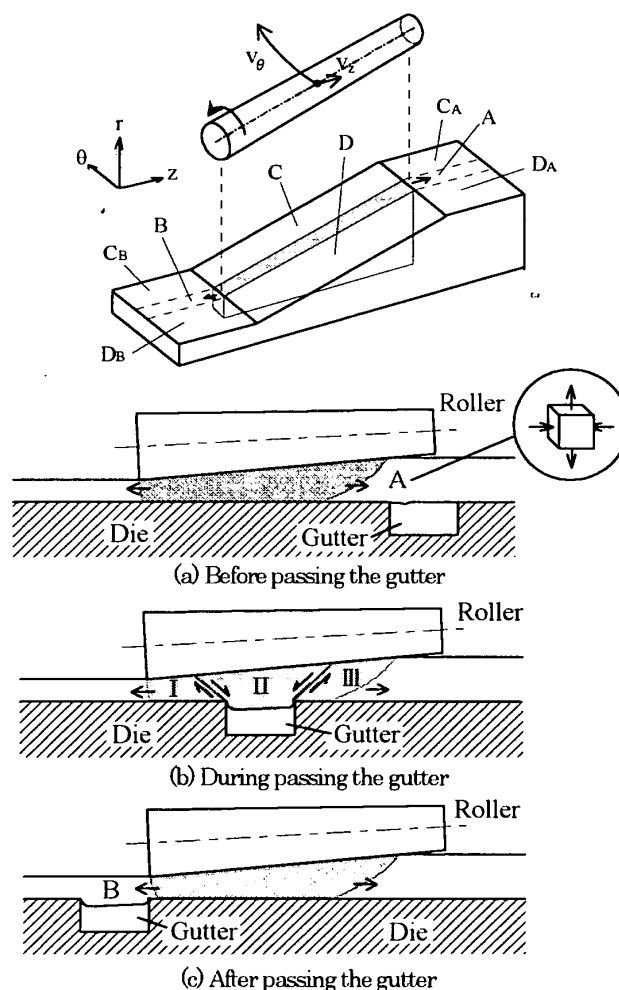


Fig.9 Mechanism of flow joining by PCR

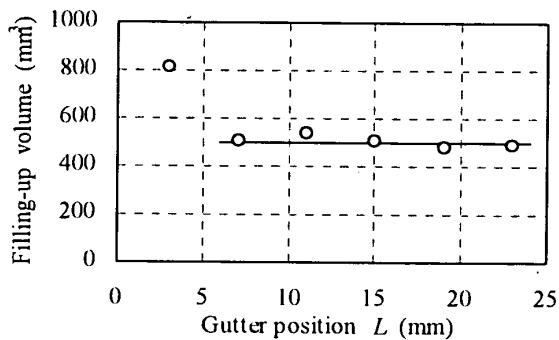


Fig. 10 Influence of gutter position on filling-up volume

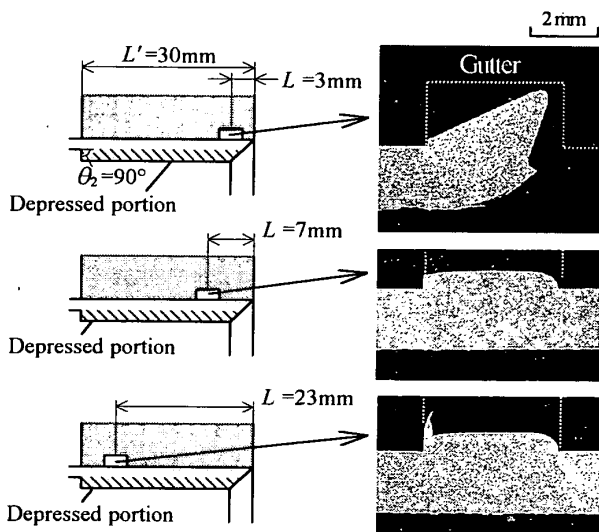


Fig. 11 Difference in filling-up behavior depending on gutter position

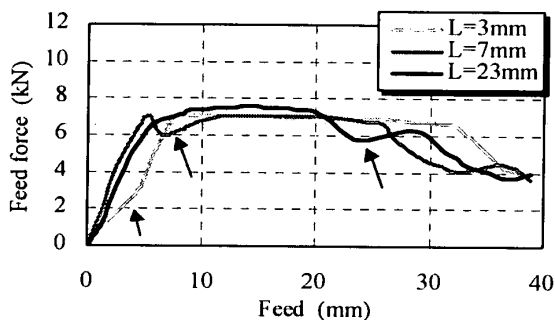


Fig. 12 Feed force diagrams (Stroke of L)

スにより溝部への材料流入量が決まると考えられる。

一方、ローラ後端側の B 領域にも若干の軸方向伸びが生じると考えられ、A 領域と同様の応力状態が予想される。このため、ローラが通過した後も、溝部への材料流入が持続されると考えられる。

4.2.2 溝位置に対する検討 管の形状を同一 ($L=30\text{mm}$, $\theta_2=90^\circ$) にし、溝位置を変えて締結を行った。図 10 に溝部への充填体積、図 11 に加工後の溝部断面写真を示す。 $L=3\text{mm}$ では管端部とフランジの

重なりが少ないため、圧下により管端部が溝内に引き込まれて折れ曲がりを生じている。このため、充填体積は多いが、溝幅方向にすきまが生じ十分な締結がなされていない。一方、 $L \geq 7$ では溝幅に渡って材料流入が生じており、充填形状および充填体積に関しても大きな差は見られない。

図 12 に行程に伴う軸送り力の変化を示す。いずれも軸力は行程中期でほぼ一定となっており、既報⁹⁾で述べたように定常的に壁厚圧下が行われている。それぞれの条件では、溝位置 L に対応した行程 (矢印で示す) で加工力の一時的な低下が見られ、溝によりダイスの拘束が解放された部位で圧下抵抗が下がり、外向きの流動が起きていることが推察できる。

図 13 は締結体から短冊状のサンプルを採取した際の断面写真であるが、管に反りが生じている。これは、逐次加工のため変形が管内表面側に局所化しやすく、この不均一によって生じた残留応力が解放されたことによると考えられる。写真より、残留応力は締結を解くように作用することがわかる。また、溝へ流入しない材料は、締結体の軸寸法変化を生む。このように考えると、締結に寄与しない壁厚圧下は極力避けるべきであり、溝位置 L はかみ込みが起こる範囲でできる

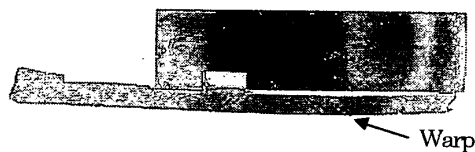


Fig. 13 Distortion of tube due to residual stress

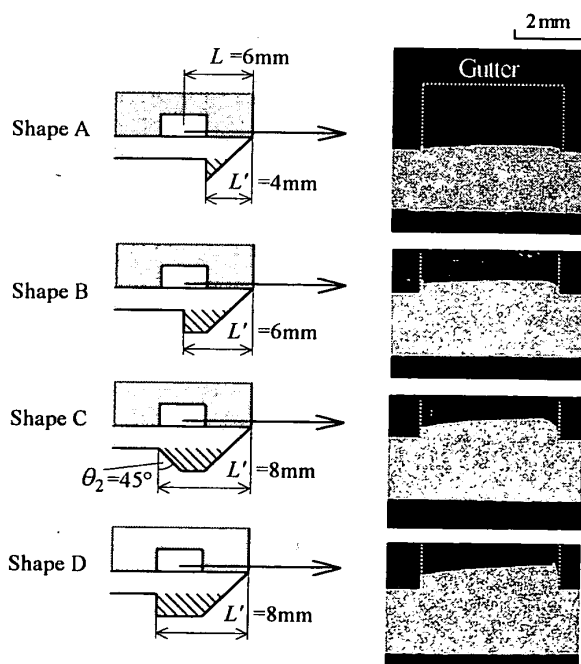


Fig. 14 Difference in filling-up behavior depending on tube end geometry

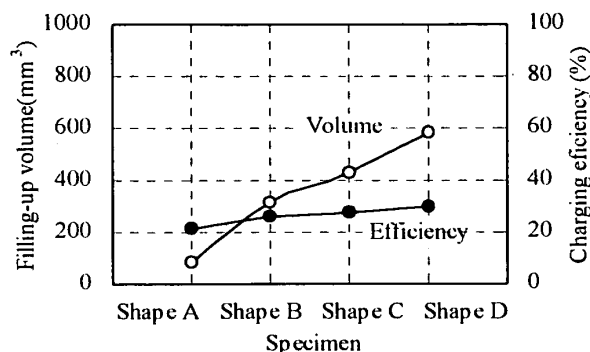


Fig.15 Comparison of filling-up volume and efficiency

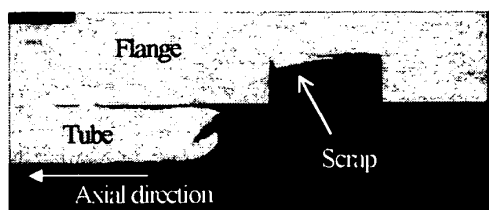


Fig.16 Cross section of specimen after separation test.

だけ小さくすることが望ましいと考えられる。 $L=3\sim 7\text{mm}$ での補完実験を行った結果、 $L=6\text{mm}$ を最適と判断した。

4.2.3 管端部形状に対する検討 次に溝位置を $L=6\text{mm}$ で固定し、管端部の形状を変えて締結を行った。図14に管端部形状と加工後の断面写真を示す。溝部への材料流入は条件A~Dの順に向上している。条件Dは図11(b)と差がないことから、これ以上前方へ圧下域を広げても軸方向伸びが増えるだけで充填の向上は期待できない。また、条件Cのように前方に傾斜 θ_2 をつけると、材料の折れ込み欠陥が低減される効果も確認された。図15に各条件での充填体積と充填効率を示す。ここで、充填効率は圧下体積に対する溝への充填体積の比である。A~Dでの充填の向上は、圧下体積(図9斜線部)の増加によるもので、効率の向上はわずかであることがわかる。今回は圧下率および溝寸法を一定としたが、より効率的な充填をはかるためには、これらを含めて管端部形状を見直す必要がある。

4.3 締結強度の評価 本実験では $B=4\text{mm}$, $t=2\text{mm}$ であり、最も深い充填の得られた試料では $\Delta=0.71\text{mm}$ であった。このとき、 $\Delta/B=0.18$ であり、

図8から $h'=1.3>0$ なので(7)式を満たさない。よって、本試料は締結部でシェーピングを伴って破断すると予想される。また、締結強度は、図8より $k_s/k=0.68$ であり、 $k=0.5\sigma_B$ として Table.1の値を用いて $k_s'=85.3\text{MPa}$ と計算される。

次に、この試料を実際に3.4に示した方法で分離させた。試験後の断面写真を図16に示す。溝内に残されたくずの形状から推論どおり溝部に充填した材料がシェーピングされていることがわかる。また、測定された破断荷重から締結強度を算出すると $k_s=81.0\text{MPa}$ となり計算値に近い値となった。逆に、この充填深さで完全な締結を実現するには、(7)式より $B>5.3\text{mm}$ とする必要がある。

5. 結 論

PCR加工による円管とフランジの塑性流動締結に関して検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) PCR加工において塑性流動締結が達せられる機構を加工中の応力状態から明らかにした。
- (2) 完全な締結を達成するために必要な溝部寸法および充填深さを簡単な力学モデルから定量化した。
- (3) 同一圧下率のもとで溝位置と管端部形状による充填挙動の違いを比較し、効果的な充填を達成するための条件を明らかにした。
- (4) 締結体の軸方向引張試験を行い、PCR加工により十分な締結が達せられることを確認した。また、締結体の破断時の変形および締結強度は、推論とほぼ一致していた。

参 考 文 献

- (1) 森敏彦・斉藤雄二、プラネタリ・コニカル・ローリング(PCR)の加工機構、機論,61-589,C(1995),3734-3741。
- (2) 森敏彦・斉藤雄二・中島邦彦、PCR加工における拡管の影響、機論,62-601,C(1996),3676-3683。
- (3) 森敏彦・中島邦彦、PCR加工におけるねじ山形成、機論,63-612,C(1997),2892-2898。
- (4) 森敏彦、PCR加工による異種円管の重ね圧接、機論,66-651,C(2000),3778-3784。
- (5) 日本塑性加工学会編、プレス加工便覧、丸善(1975)95-97。