軸圧縮力を付加したゴム膜による円管のバルジ成形*

村田 真^{*1}, 横内 康人^{*1}
小野寺 和宏^{*1}, 鈴木 秀雄^{*1}The Hydraulic Bulge of A Tube-Attached Lining
Rubber Membrane with Axial Compressive ForceMakoto MURATA, Yasuto YOKOUCHI,
Kazuhiro ONODERA, and Hideo SUZUKI

The authors have developed new equipment for tube bulging which initially puts a deflated rubber membrane into a work tube and drives the internal pressure through a membrane after an initial setting-up. Using this new equipment, the effects of the tube end condition and tube length on the deformed shape and the strain distribution are examined experimentally. Three cases of the tube end conditions of (A) axially fixed, (B) axially free and (C) axially compressed by force are parametrically investigated. The Results are concluded as follows: (1) Comparing at the same bulge height, the internal pressure is lower with the longer tube and also lower with the end condition changing from case A to C, (2) When the tube is short and/or the axial compressive force is small, the deformed shape appears as a barrel, and when the tube is long and/or the axial force and is large, it has a cylindrical region uniformly expanded at its center, and (3) The axial compressive force tends to prevent thickness reduction of the tube.

Key Words: Forming, Tube Forming, Bulge of Tube, Axial Compressive Force, Strain Distribution

1. 緒 言

管の二次加工による工業製品は、流体輸送用機器や熱交換器の部品および管継手等にとどまらず、今日では軽量化対策として、複雑な形状の機械部品にも用いられている⁽¹⁾。また、軽量化による性能向上や製品コストの節減のために、円管の二次加工の要求が今後ますます増大し多様化するといわれている⁽²⁾。バルジ加工は、管の二次加工において代表的かつ基本的な成形法の一つである。したがって、新しい加工技術を開発し、その成形特性を明らかにしておくことは、工業上極めて大きな意義がある。

これまで開発されたバルジ加工において、圧力媒体に液体あるいはゴムを用いる方法⁽³⁾がある。これらの二つのうちゴムを使用する方法は破損によるゴムの消耗という欠点をもつため、実用的には液体を圧力媒体として用いることが多く、研究の面でもこの方法に関する文献が多く見られる⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。ただし、油圧によるバルジ加工においても、製品に作動油を直接作用させるため、付着した油の洗浄に余分な手間とコストを必要

としたり、作動油を消耗するなど改善の余地がある。

著者らは、これらの改善をはかるため、作動油を円管状のゴム膜内に閉じ込め、ゴム膜を介して油圧を円管に伝達するバルジ装置⁽⁸⁾の開発を試みた。試作した装置は、油の直接接触を回避しているから上述の欠点を除いていることはいうまでもないが、そればかりではなく従来の直接接触形（以下従来形という）の液圧バルジ装置と比較して次のような優れた点を有している。

(1) 管端における作動油の漏れを防止する装置が不要であり、従来形の装置より簡便かつ小形である。

(2) 適当な導油管を使用することにより、長尺管の加工やその任意の一部の加工も容易となる。

(3) 管を装置にセットすることが容易であるから作業性が向上し、自動化の可能性が高い。

前報⁽⁹⁾においては、このゴム膜を用いる円管のバルジ加工と従来形のバルジ加工との比較検討を行い、このゴム膜を用いるバルジ加工法の有用性と特徴を明らかにした。一方、本報は開発したゴム膜方式の円管バルジ加工において、管端の支持条件あるいは軸方向圧縮力、成形部長さおよび肉厚等の成形条件が成形形状やひずみ分布等にいかなる影響を与えるかについて実験的に調べ、検討を加える。

* 昭和63年4月1日 第65期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年10月5日。

*¹ 正員、電気通信大学 (〒182 調布市調布エ丘1-5-1)。

2. 実験装置および試料円管

本実験で用いたゴム膜方式のバルジ装置を図1に示す。この装置における成形実験の手順を示すと以下のようである。まず、試料円管①をバルジ装置に装着し、管中央の成形部長さ l_0 （添え字0は変形前すなわち初期の値、以下同様）を残して管の両端部を管押え④で締め付け、半径方向の変位を拘束する。そして、導油管から給油し内圧 p_i を加えることにより、図のように円管がバルジ成形される。なお、スライド台⑧の上に設置された左右のブロックのうち、右側のものは台につねに固定、左側のブロックは選択した条件に応じて固定または変位自由の状態とすることができる。

本研究では、左側の管端部の条件として次の3通りを扱った。

条件1：端部固定であって、設定した成形部長さ l_0 は変形中も不変とする。

条件2：端部を拘束せずに変位自由とする。

条件3：左側の管押えを外部から押すことにより、円管に所定の軸圧縮力を負荷する。

条件2は条件3において軸圧縮力を零とおいた特別の場合に該当するが、ここでは独立に扱う。以下では、上記3条件をそれぞれ端部固定、端部自由および軸力負荷と呼ぶ。条件1について補足しておく、もしも端部自由であれば成形長さが初期値 l_0 より減少することは明らかであるから、端部を固定して縮みを阻止するときの拘束力は軸引張力となっている。したがって

表1 試料円管の機械的性質

Diameter d (mm)	Thickness t_0 (mm)	Ultimate Strength σ_a (MPa)	Elongation δ (%)	Material /Annealing
50	1.0	83	43.2	A1050TD 400°C 2 hour
	2.0	72	45.0	

①試料円管 ②オイルシール ③Oリング
④管押え ⑤心金 ⑥ギョム膜
⑦ギョム膜保持心金 ⑧スライド台 ⑨作動油

図1 ギョム膜を使用したバルジ成形装置

条件1, 2および3はそれぞれ正、零および負の軸力に対応している。また、軸圧縮力はバルジ装置本体とは別系統の油圧シリンダで負荷されており、以下ではその大きさを試料円管の初期断面積に対する公称応力で表示する。図2に油圧シリンダを含むこの装置の写真を示す。

図1あるいは図2に示されるように、成形部中央における張出し高さおよび軸方向の移動側管押えの変位はダイヤルゲージを用いて測定し、バルジングのための油圧と軸圧縮力負荷のための油圧は圧力変換器を用いて測定した。成形品の形状測定にはコントレーサを用い、肉厚の測定には最小目盛り $1\mu\text{m}$ の両球面マイクロメータを使用した。

実験に用いた円管はアルミニウム管(A1050 TD)であって、その寸法と主要な機械的性質を表1に示す。

3. 実験結果と検討

3.1 結果の表示法 バルジ加工による円管の樽形変形は中央面に関する左右の対称性、および中心軸に関する回転対称性を保つとみなすことができる。したがって、変形形状やひずみの分布は軸方向1/2領域について示す。また、管端部の条件が端部自由および軸力負荷の場合、成形部長さは初期値 l_0 より減少するので、考えている変形段階の長さを l で表す。なお、次節以降の実験結果は次のような無次元表示でとりまとめられている。

軸方向の位置：対称面からの距離を z として z/r_0 により表す。ただし、 r_0 は円管の初期半径である。

成形形状：任意の位置における変形後の半径を r とし円周方向公称ひずみ e_θ により表す。

$$e_\theta = \frac{r - r_0}{r_0} \quad (1)$$

張出し高さ：対称面 $z=0$ における円周方向公称ひず

図2 バルジ成形部

み e^* によって表す。すなわち式(1)において変形後の半径を $r=r_c$ とする。

成形部長さ：初期の成形部長さ l_0 を直径 $d(=2r_0)$ で無次元化して表す。

成形部の縮み：変形後の成形部長さを l として、 e_z で表す。

$$e_z = \frac{l-l_0}{l_0} \dots\dots\dots (2)$$

3.2 張出し高さと油圧 図3～図5は、ゴム膜を用いたバルジ成形装置によって実験より得られた作動油の油圧と成形部中央の張出し高さ e^* との関係を示したものである。図3は端部自由の場合について、成形部長さ l_0/d をパラメータとして油圧と張出し高さの関係を見たものである。図に示されるように、成形の初期すなわち変形があまり大きくないとき、成形部の長短による差は見られないが、変形が大きくなるに従って、同じ張出し高さを得るのに、成形部が短いほど高い油圧を必要とする。しかし、成形部長さ l_0/d が2.0以上になると油圧 p_i と e^* の関係にはほとんど差がなくなる。

図4は円管に軸圧縮力 ($\sigma_z = -15$ MPa) を加え、成形部長さをパラメータとして、張出し高さ e^* と油圧 p_i との関係を示したものである。本図と図3を比較すると、同じ張出し高さを生じさせるための油圧はどの成形部長さにおいても軸力負荷のほうが低くなっている。特にその成形部が短い $l_0/d=0.5$ の場合には圧力の低下は著しくなる。次に、同じ成形部長さについて管端部の条件を変え、張出し高さと油圧の関係を示したものが図5である。ここで、軸圧縮力が大きいほど成形に必要な圧力が若干ではあるが低下する傾向にある。

3.3 張出し高さと軸方向の縮み 管端部自由の場合について、成形部長さ l_0/d をパラメータとして張出し高さ e^* と軸方向の縮み率 e_z の関係を図6に示す。 $l_0/d=1.0$ の場合、張出し高さと軸方向の縮みの関係はほぼ直線的となっており、 l_0/d が1.0より小的时候は加速的に縮み、 l_0/d が1.0より大の場合には縮みが飽和している。つまり、同じ張出し高さにおいて、成形部長さが短いほど子午線方向の曲率半径が小となる傾向があるため、軸方向の縮みが大となる。しかし成形部長さ l_0/d が2.0以上になると、前述の子午線方向の曲率半径が軸方向の縮みに影響をあまり及ぼさなくなるために張出し高さと軸方向縮みの関係にあまり差が見られなくなる。これは後に図9あるいは図10で示すように、成形部が長いと中央はほぼ平坦のまま、管端部付近のみが半径方向に変形するメカニズムによって説明される。図7は軸圧縮力 ($\sigma_z = -15$ MPa) を負荷した場合で、軸力が軸方向の縮みを助長するた

図4 軸付加力を加えた場合の圧力と張出し高さ

図3 成形部長さを変えた場合の圧力と張出し高さ

図5 管端部の条件を変えた場合の圧力と張出し高さ

め、図6と比較して、縮みが全体的に大となっており、張出し高さと縮みの関係は管端部自由の場合と同じ傾向を示している。また、図8は成形部長さ l_0/d を2.0一定とし、軸圧縮力 σ_z をパラメータとして、軸方向の縮みを調べたものである。軸圧縮力 σ_z の絶対値が大になるにつれて、縮みが大となるように平行移動した形になっている。

3.4 バルジ成形形状 バルジ成形形状について成形条件を変えて検討を加える。図9(a)は成形部長さ $l_0/d=2.0$ とし、管端部の拘束等の条件をパラメータとして張出し高さ e^* = 0.50, 0.10, 0.15, 0.20 における成形形状を示したものである。張出し高さが小的时候はどの場合にもあまり差は見られず類似した形状となっているが、張出し高さが増加するにつれ差がはつ

きりする。軸圧縮力が大きいほど、バルジの形状は円弧状の樽形から平坦部を持つ円筒形に成形される。一方、軸圧縮力 $\sigma_z = -15$ MPa で張出し高さが低い場合にはバルジ形状の肩部がオーバーシュートしているが、成形が進むにつれてそれが解消され、張出し高さ $e^* = 0.2$ では完全に消失している。前述したように、管端部固定以外は、張出し高さの増加つまり成形が進むに従って成形部は縮んでいる。図9(b)は張出し高さ $e^* = 0.2$ に対応する写真である。軸圧縮力が大きいほど形状は樽形から平坦部を有する円筒形になることが示されている。図9(b)の写真には同(a)図に対応していない $\sigma_z = -20$ MPa および -30 MPa の場合(右端側の二つ)が含まれている。 $\sigma_z = -20$ MPa のものは $e^* = 0.1$ に対応し、この時点でオーバーシュートが認められ、以後内圧を増しても張出し高さはほとんど増加せずに座屈あるいは屈曲が起こる。 $\sigma_z = -30$ MPa の場合にはそれが顕著に現れており、写真の例では e^* が0.1弱にとどまっている。図10は、成形部長さ l_0/d を1.0~4.0の範囲で変え、張出し高さ $e^* = 0.1$ と0.2における成形形状を示している。図9と同様にどの成形部長さの場合にも、軸圧縮力が大きいと成形形状は樽形から円筒形となっている。また、 $\sigma_z = -20$ MPa の軸

図6 成形部長さが成形部長さの縮み率に及ぼす影響

図7 軸付加力を加えた場合の成形部長さの縮み率

図8 管端部の条件を変えた場合の成形部長さの縮み率

(a) 軸圧縮力を付加した場合の成形形状

(b) バルジ成形品

図9

図 10 管端部の条件を換えた場合の成形形状

圧縮力を負荷した場合、肩部が座屈あるいは屈服していることが認められる。

3.5 ひずみ分布 張出し高さ $e_s^* = 0.2$ に成形し管端部の拘束条件をパラメータとして肉厚ひずみ分布を図 11 に示す。ここでは肉厚ひずみはすべて負となるので、以下では絶対値によって肉厚ひずみの大小を論ずる。図 11(a) および (b) はそれぞれ成形部長さ $l_0/d = 2.0$ および 4.0 の場合である。また、肉厚を $t_0 = 2.0$ mm としており曲げ剛性が比較的大であるため、軸圧縮力 $\sigma_z = -30$ MPa となってもその成形形状に屈服は見られない。管端固定では軸方向に縮みがないために、その成形形状に添った母線の長さが増加する分だけ子午線方向に正のひずみが生じ、肉厚ひずみが最大となる。しかしこの場合、子午線方向ひずみが正值をとるとはいえ、他のひずみと比較して絶対値が小さいため、肉厚ひずみと円周方向ひずみの差はあまり大きくない。また、管端部自由の場合にはこの変形機構から円周方向だけの単軸応力状態に近い状態でバルジ成形がなされると考えられるため、肉厚ひずみは円周方向ひずみの約 $1/2$ となっている。また、常識的な結果であるが、軸圧縮力が増加するにつれて、肉厚ひずみの絶対値は減少する傾向が見られた。特に軸圧縮力 $\sigma_z = -30$ MPa の場合の肉厚ひずみは管端固定の場合の約 $1/5$ に減少している。

4. 結 言

試作したゴム膜による液圧バルジ装置を用い、管端部固定、管端部自由および軸方向圧縮力負荷の条件で、円管のバルジ成形を行い、種々の成形条件の影響について以下のような結果を得た。

(1) 張出し高さとお圧の関係においては、同じ張出し高さを得るのに、管端部固定、管端部自由および軸圧縮力負荷の順に油圧が減少する傾向が見られた。

(a) 成形部長さ 100 mm

(b) 成形部長さ 200 mm

図 11 管端部の条件を変えた場合の肉厚ひずみ分布

また、成形部が長いほど油圧は減少するが $l_0/d = 2.0$ 以上になると、その差はわずかであった。

(2) 張出し高さとお圧方向縮み率の関係においては、軸方向圧縮力が高いほど、また、成形部が短いほど縮み率は大となった。

(3) バルジ成形形状については、軸方向圧縮力が大となるにつれて、またその成形部長さが長くなるにつれて樽形から円筒形に近い形状となった。

(4) 軸圧縮力を負荷することによって、肉厚の減少を防止することが認められた。本実験においては、その減少の割合はひずみにして最大で約 $1/5$ になった。

文 献

- (1) 中村, パイプ加工法, (昭 59), 108, 日刊工業新聞社.
- (2) 真鍋・西村, 軽金属, 34-8 (昭 59), 439.
- (3) 高木, 塑性と加工, 12-120 (昭 46), 59.
- (4) 西村・遠藤・真鍋, 塑性と加工, 19-214 (昭 53), 918.
- (5) 蒲原・吉富・島口・野村, 塑性と加工, 23-255 (昭 57), 315.
- (6) 淵沢・亀井・奈良崎, 文献(5)の 351 ページ.
- (7) 栗原, 金属プレス, 1 (昭 60), 45.
- (8) 特許出願番号 60-180790.
- (9) 鈴木・横内・村田, 昭和 61 年度塑性加工春期講演論文集, 347.