外径を絞る押出しによる内歯部品の成形*

沢木 洋三^{*1}, 吉田 始^{*1}, 森 真介^{*2}

Shaping of Internal Geared Parts by Extrusion

Yozo SAWAKI, Hajime YOSHIDA and Shinsuke MORI

Shaping of an inner spline and an internal gear by extrusion was studied. Namely, the outer diameter of a hollow cylindrical workpiece was reduced by extrusion through a die. Then, an internal gear or an inner spline can be shaped by using a mandrel having corresponding teeth. The specifications of the splines and gears examined were as follows: splines-module $m=1.0-2.0$, number of teeth $Z=8-16$, tooth depth $h=1.25-2.5$ mm; gears- $m=1.0-1.5$, $Z=12-18$, $h=2.0-3.375$ mm. The material used was S15C steel. The criterion for shaping complete teeth is discussed in terms of a reduction in area and a compressive stress on a punch. It is shown that these limiting values are about 40 % and 700 MPa, respectively.

Key Words: Extruding, Inner Spline, Internal Gear, Formability, Reduction in Area, Forming Limit

1. ま え が き

一般に鋼製の動力伝達用歯車は、主として切削加工によって製作されている。しかし多量生産が必要な場合には、能率の向上、切りくずの削減等の加工コスト低減の要求から、塑性加工による歯車の成形が注目され、実験的研究⁽¹⁾や理論的研究⁽²⁾が行われてきている。

著者らは、外径を絞らない押出しによる外歯車の成形⁽³⁾や、内径を拡張する押出しによる内歯部品の成形⁽⁴⁾⁽⁵⁾に関する研究を行ってきた。後者の場合には、充てんした内歯部品を得るためには、断面減少率並びに型に負荷される面圧ともにかかなり高い値とする必要があることを報告した。

そこで、本研究では、試料の外径を絞って押出す方法により、充てんした内歯部品の成形が行えないかどうかについて主として断面減少率および面圧の点から検討した。対象とした歯形はインナスプラインおよび内歯車で、各種の成形条件を調べることにした。

2. 実 験 方 法

2.1 実験装置および実験方法 実験装置の模式図を図1に示す。実験は、まず成形目標としたスプラインまたは歯車の歯が切ってあるマンドレル1に先行試料4およびパンチ3を組合せた。これをコンテナ2内に挿入する。中心線より左側がこの状態を示す。これを圧縮試験機にセットし、パンチ3で押出す。このとき試料は、コンテナのダイス部分で外径を絞られ、内径側がマンドレル1に押付けられ、インナスプラインまたは内歯車が成形される。パンチを約17 mm押出した後、いったん除荷して後続試料5を挿入する。中心線より右側がこの状態を示す。これを再び押出すと、先行試料が成形品となる。パンチの降下速度は約0.2 mm/sで、できるだけ一定となるようにした。

この実験装置は、マンドレルを浮かせてフリーな状態としたマンドル浮動方式である。成形時に試料はマンドレルとともに押出されるので、両者の間のすべりが、マンドレル固定の場合と比べて少なくなる。よって、成形に必要な荷重を低く抑えることができる。

本実験では、コンテナ径 D_c を 32 mm で一定とし、ダイス小径 D_s を 24, 26, 28 mm の 3 種類とした。それぞれの D_s に対してマンドレル径 d_L を変化させた

* 原稿受付 1994年6月13日。

^{*1} 正員, 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。^{*2} 学生員, 静岡大学大学院。

場合の内歯部品の成形状態を調べた。

実験の対象としたインナスプラインおよび内歯車の諸元を、それぞれ表1および表2に示す。マンドレル径 d_L に相当するスプライン大径 D および歯先円直径 d は、歯数 Z を変えることによって変化させた。

2.2 試料 実験に使用した試料の材質は機械構造用炭素鋼 S15C である。1153 K で 80 min の焼なましを行ったもので、 n 乗則および平均変形抵抗はそれぞれ、 $\sigma = 715\epsilon^{0.215}$ MPa および 560.9 MPa である。試料は、外径 d_o をコンテナ径 D_c と等しくし、内径 d_i をマンドレル径 d_L と等しくした中空円筒形状で、機械加工後、ボンデライト・ボンデリュベの潤滑処理を行った。この場合、リング圧縮試験によって求めたせん断摩擦係数の値は、0.13 程度であった。なお、試料

表1 インナスプラインの諸元

m	1.0												2.0	
Z	8	10	11	12	14	8	9	10	11	12	14	16	7	
D	12	14	15	16	18	10	11	12	13	14	16	16	16	
χ	2.0					1.0							0	0.5
h	1.25												2.5	
Spec. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	

m:module χ :addendum modification coefficient
Z:number of tooth
D, d:outside diameter h:tooth depth

表2 インターナルギヤの諸元

m	1.0								1.25	1.5
Z	12	14	16	18	16	14	16	13	16	13
d	15	16	18	20	18	17	24	24	24	24
χ	0.75	0.25				0	0.75	0.6	0.5	0.5
h	2.0	2.0				2.25	2.0	2.8125	3.375	3.375
Spec. No.	1	2	3	4	5	6	7	8

図1 実験装置の模式図

の長さは 20 mm である。

実験は、主に容量 294 kN の圧縮試験機で行ったが、一部 1.96 MN の圧縮試験機も使用した。

3. 実験結果および検討

3.1 荷重行程曲線および成形品 インナスプラインおよび内歯車成形時の荷重行程曲線の一例を図2に示す。インナスプラインおよび内歯車成形時の荷重行程曲線は、ほぼ同様となっていた。

この押出しにより充てんした歯が得られたかどうかの指標として、成形度 A を用いた。すなわち試料中央部の軸直角断面上で、実際に成形された歯の高さ h' と、目標とした歯の高さ h との比を成形度 $A(=h'/h)$ と定義した。

成形度 100% で、試料中央部で充てんした歯が得られた場合でも図3の成形品の軸方向断面の写真およびその模式図に示したように、試料の前方および後方端部で充てんしない部分が現れることがあった。これらを先行の成形品前端部より未充てん長さ X , Y および X' とする。また、成形品の外径近傍は試料と型と

図2 荷重行程曲線

Front product Rear product
 X, Y, X' : Length of incomplete fill on tooth
 a, b, c : Height of end face

図3 成形品含軸断面の写真および模式図

の摩擦によって押出し方向と反対方向に引張られる。このことによって生ずる端面の凹凸を端面凹凸部 a, b および c で表すことにする。後続の成形品後端部の未充てん長さおよび端面凹凸部は、先行の成形品後端部のそれらとほぼ等しくなっていた。

3.2 ダイスキ小径 D_s の影響 内歯車のマンドレル径を一定とし、ダイスキ小径を変えた場合の成形途中の断面写真を図 4 に示す。また、成形時の最大荷重をパンチの断面積で除したパンチ面圧 σ_p を断面減少率との関係として示すと図 5 が得られた。図中にダイスキ小径の値を示しておいたが、ダイスキ小径が小さくなり、断面減少率が大きくなると、試料はより大きい変形を強いられ、パンチ面圧は大きくなる。

未充てん長さおよび成形度の変化を図 6 に示す。ダイスキ小径が小さく、断面減少率が大きい場合ほど成形度は向上し、未充てん長さも小さくなっている。図 5 の結果と合わせると、パンチ面圧が高い場合ほど、歯が充てんしやすいと言える。また後続の成形品の未充てん長さ X' のほうが、先行の成形品の未充てん長さ X よりも小さくなっている。すなわち後続の成形品のほうが先行の成形品よりも成形状態は良いと言える。

端面凹凸部の変化を図 7 に示したが、ダイスキ小径の

図 4 成形品の写真(歯車)

図 5 パンチ面圧の変化(歯車)

影響はあまり見られない。ダイスキ小径の小さいものほど、試料の絞られ方も大きく、試料と型との間の摩擦が大きくなる。このため端面の凹凸はこれとともに大きくなる。しかし、これとともに成形品の肉厚が薄くなり、端面の凹凸は小さくなる。よって両者の影響が相殺され結果的に端面の凹凸にはあまり変化がみられなかったものと考えられる。

これらの結果は内歯車のものであるが、インナスプラインでも同様であった。

3.3 マンドレル径 d_L の影響 ダイスキ小径を一定とし、歯数を変化させマンドレル径を変えた場合の成形品の写真を図 8 に、パンチ面圧の変化を図 9 に示す。マンドレル径が大きくなると、パンチ面圧は増加する。その増加率はダイスキ小径を小さくした場合とほぼ同じである。

未充てん長さおよび成形度の変化を図 10 に示す。ダイスキ小径を変えた場合と同様、断面減少率の高いものほど面圧が増加し、成形度の向上とともに未充てん長

図 6 未充てん長さおよび成形度の変化(歯車)

図 7 端面凹凸部の変化(歯車)

さが減少する。

端面凹凸部の変化を図 11 に示したが、マンドレル径を変化させても端面凹凸部にはあまり変化が見られない。

3・4 転位係数 χ の影響 インナスプラインのマンドレル径を一定とし、歯数を変えて転位係数を変化させた場合の成形品の歯部分の拡大写真を図 12 に、パンチ面圧の変化を図 13 に示す。横軸は図中に示した転位係数に対応する断面減少率である。転位係数を変化しても断面減少率はほとんど変わらず面圧も変化しない。

図 8 成形品の写真(歯車)

図 9 パンチ面圧の変化(スプライン)

図 10 未充てん長さおよび成形度の変化(スプライン)

未充てん長さの変化を図 14 に示す。未充てん長さ X' および Y の値はほとんど変化しないが、 X の値は、転位係数が大きくなると、小さくなるようである。転位係数が大きくなると歯の角度が緩やかになってくるために素材が流動しやすくなったためかもしれない。

端面凹凸部の変化を図 15 に示す。転位係数の影響はあまり見られない。これも面圧と同様、断面減少率の変化が小さいためと思われる。

3・5 面圧と断面減少率の関係 3・4 節までの結果より、内歯車、インナスプラインいずれの場合であっても、マンドレルを大きくする。または、ダイス小径を小さくすれば成形状態の良い内歯部品が得られることがわかった。すなわち、断面減少率を大きくすれば

図 11 端面凹凸部の変化(スプライン)

図 12 成形品の歯の拡大写真(スプライン)

図 13 パンチ面圧の変化(スプライン)

成形状態が良くなることになる。しかし、これとともに成形面圧は大きくなるから、型強度の面からは好ましくない。

そこで、充てんした歯を得るための、断面減少率の下限界について調べてみた。すべての実験結果を面圧と断面減少率との関係として示すと、図16のようになる。図中のデータ点に付けた数字は、それぞれ表1および表2の試験片番号および成形に用いたダイス小径 D_s の値を示したものである。歯の充てん未充てんの境界は断面減少率では約40%、パンチ面圧は約700 MPaである。この面圧は、ダイス鋼、高速度鋼等の型強度に対して十分低い値となっている。

また、図16の結果に、先に行われたアルミニウムの結果 A1200⁽⁶⁾⁽⁷⁾ を合わせて示したものが図17である。縦軸は、面圧を材料の平均変形抵抗で除して無次元化して示してある。詳細については、今後の研究を待たなければならないが、面圧を試料素材の平均変形抵抗で除した無次元化パンチ面圧として表せば、鋼試

料でもアルミニウム試料でもほぼ同様の関係として描かれることがわかる。充てん未充てんの境界は、断面減少率約40%、無次元化パンチ面圧約1.3となる。

なお、図17には、先に行われた内径を拡張する方法による押出しによりアルミニウム試料で内歯部品を成形したときの結果⁽⁸⁾ も合わせて示してある。この場合には、ヘリカルスプラインであること、マンドレルを支持していることなど、本実験結果とは単純に比較できないが、面圧と断面減少率の関係はほぼ同じ傾向を示すようである。

4. ま と め

押出しによる内歯部品の成形法として、スプラインおよび平歯車を歯切りしたマンドレルを用い、試料外径を絞ることにより、成形が可能であることが確かめられた。

すなわち、内歯車、インナスプラインいずれの場合にも、ダイス小径を小さくするまたは、マンドレル径

図14 未充てん長さの変化(スプライン)

図15 端面凹凸部の変化(スプライン)

図16 パンチ面圧と断面減少率の関係

図17 パンチ面圧と断面減少率の関係 (S15C, アルミニウム)

を大きくすると成形状態が向上(試料中央部で完全に充てんした歯が成形されるとともに試料端面近くでの長さ方向未充てん長さも減少)した。このことは、断面減少率と関係していることが明らかにされ、この値の高い場合ほど成形時の面圧が高くなり成形状態が改善すると言える。両者の関係は、成形面圧を平均変形抵抗との比で表すと、材質が鋼でもアルミニウムでもほぼ1本の曲線として表される。実用的見地からは、成形面圧は低く、かつ充てんした歯が成形されることが望ましい。この限界の値として断面減少率では、約40%、平均変形抵抗で除した無次元化パンチ面圧は約1.3が得られた(S15Cで約700 MPa)。

型および試料の製作を担当していただいた静岡大学工作技術センターの河合朝雄、松野貞雄、佐原和芳、神尾恒春、岩澤充弘、杉本正和の各位に感謝する。

文 献

- (1) 例えば、団野・田中, 塑性と加工, **28**-320 (1987), 964.
- (2) 例えば、木内・ほか2名, 塑性と加工, **29**-327 (1988), 356.
- (3) 泉澤・ほか2名, 塑性と加工, **32**-367 (1991), 982.
- (4) 泉澤・ほか3名, 機講論, No. 893-1 (1989-3), 186.
- (5) 吉田・ほか5名, 機講論, No. 921-2 (1992-8), 37.
- (6) 沢木・ほか2名, 機講論, No. 933-2 (1993-7), 87.
- (7) 吉田・ほか2名, 機講論, No. 931-2 (1993-8), 333.
- (8) 沢木・ほか2名, 機論投稿中.