

押出しによる内歯部品の成形に関する研究

静岡大学 工学部 機械工学科

教授 沢木洋三

(平成6年度研究開発助成 AF-94018)

1. 研究の背景

内歯車, 内はすば歯車等の内歯部品は, 現在ブローチ盤やギヤシェイパー等による切削加工によって製作されている。一方, 成形時間の短縮, 素材の歩留まりの向上等の要請から塑性加工による成形に関する研究が行われてきている。

本研究は, 先に著者等が提案した二段充てん法⁽¹⁾を基礎として内歯部品の押出し成形法の体系化, 実用化を目的としたものである。二段充てん法とは, 素材の塑性流動を起しやすくするために, 加工初期に一旦負の転位係数とした内歯を成形し, その後所定の正の転位係数となるように成形する方法である。低い成形面圧で, 充てんした歯を持つ成形品が得られ, 極めて有効な成形方法と考えられる。例えば, 図1は, この方法で成形されたインターナルヘリカルギアの1例である。

2. 初等解析

円筒状の試料を押出す事によって, 内径部分に歯車を成形する時の, 全仕事は,

- (1) 試料の塑性変形に費やされる塑性変形仕事,
- (2) 試料と型との摩擦仕事,



図1 インターナルヘリカルギアの成形品

モジュール $m = 1.5$ 歯数 $Z = 12$ ねじれ角 $\beta = 20^\circ$

(3) 試料内部のせん断変形に費やされるせん断仕事であると考えられる⁽²⁾。

以下これらの3つの仕事について解析するが, 簡単のため, 次のような2つの条件を仮定した。

- (1) 内歯車の押出し加工を単純な円筒形試料の押出し加工と考える。

実際の内歯車の押出し加工においては, 歯形成形部分での試料の変形は一様ではない。このような複雑な変形に対する仕事量を求めることは困難であるので, ここでは, 上のような仮定をおいて解析を行う事にした。

- (2) 試料を平均変形抵抗 σ_m の降伏応力を持つ完全塑性体で, 一様な変形をするものと仮定する。

2-1 押出し加工に費やされる塑性変形仕事

直径 d_0 , 長さ l_0 の円柱状の試料が押出し加工によって, 直径 d_1 , 長さ l_1 の円柱に成形された時の理想的な塑性変形仕事を考える。

この押出し加工に要した塑性変形仕事 W_p は, 変形体積を V とすると

$$W_p = V \int \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

仮定より $\sigma = \sigma_m$ であるので, 相当ひずみを求め, 塑性変形仕事を断面減少率 r で表すと

$$W_p = V \sigma_m \ln(1 / (1 - r)) \quad (2)$$

よって, 単位体積当たりの塑性変形仕事 w_p は

$$w_p = \sigma_m \ln(1 / (1 - r)) \quad (3)$$

となる。

2-2 摩擦仕事

ダイス内の試料にかかる圧力は, 平均変形抵抗に等しいと仮定する。

外周長さを u , 押出し方向長さを l とする, 横断面積 F の円板形の試料が押出し方向に $d\xi$ 変位するときに必要な摩擦仕事は,

$$\begin{aligned} dW_R &= \mu \sigma_m (u l / \cos \alpha) (d\xi / \cos \alpha) \\ &= -\mu \sigma_m (V / F) (l / \sin \alpha \cos \alpha) dF \quad (4) \end{aligned}$$

ここで, α はダイス半角であり, μ は摩擦係数である。

ダイス部での摩擦仕事は、ダイス入口（入口部面積 F_0 ）から出口（出口部面積 F_1 ）まで円板形の試料が変位したと考えると、

$$W_R = -V \sigma_m (\mu / \sin \alpha \cos \alpha) \int_{F_0}^{F_1} (1/F) dF$$

$$= V \sigma_m (\mu / \sin \alpha \cos \alpha) \ln(F_0/F_1) \quad (5)$$

単位体積当たりの摩擦仕事 w_R は、

$$w_R = \sigma_m (\mu / \sin \alpha \cos \alpha) \ln(F_0/F_1) \quad (6)$$

これを断面減少率 r で表すと次のようになる。

$$w_R = (\mu / \sin \alpha \cos \alpha) \sigma_m \ln(1/(1-r)) \quad (7)$$

2-3 内部せん断仕事

ダイスの入口（半径 R_0 ）と出口の狭い領域でのみせん断変形が起こっていると仮定する。まず最初に、入口部におけるせん断仕事は、中心角 ρ に対応する円周上の体積要素 dV とすると、

$$W_{s0} = \int_{V_0} \tau_0 \tan \rho dV \quad (8)$$

$$= \int_0^{R_0} \tau_0 \cdot (r_0/S) \cdot 2\pi r_0 S_E dr_0$$

$$= 2\pi S_E \tau_0 / S \cdot R_0^3 / 3$$

ここで、 V_0 は、せん断領域の体積であり、 S_E はせん断領域の押し出し方向長さである。また、 $S = R_0 / \tan \alpha$ であるので、

$$W_{s0} = 2/3 \tau_0 \tan \alpha \pi R_0^2 S_E \quad (9)$$

単位体積当たりの入口でのせん断仕事を求めると

$$w_{s0} = W_{s0} / V_0$$

$$= W_{s0} / \pi R_0^2 S_E$$

$$= 2/3 \tau_0 \tan \alpha \quad (10)$$

となる。同様に出口での単位体積当たりのせん断仕事は次のようになる。

$$w_{s1} = 2/3 \tau_1 \tan \alpha \quad (11)$$

よって、単位体積当たりの全せん断仕事は、(10)、(11)式より

$$w_s = w_{s0} + w_{s1}$$

$$= 2/3 (\tau_0 + \tau_1) \tan \alpha \quad (12)$$

ここで、入口と出口のせん断応力の平均を τ_m とすると

$$w_s = 4/3 \tau_m \tan \alpha$$

ミーゼスの降伏条件より、単位体積当たりのせん断仕事を平均変形抵抗で表すと

$$w_s = 4/3 \sqrt{3} \sigma_m \tan \alpha \quad (13)$$

となる。

2-4 全仕事と加工応力

単位体積当たりの全仕事 w は、(3)式、(7)式および(13)式より、

$$W = W_P + W_R + W_S$$

$$= (1 + \mu / \cos \alpha \sin \alpha) \sigma_m \ln(1/(1-r))$$

$$+ 4/3 \sqrt{3} \sigma_m \tan \alpha \quad (14)$$

塑性加工の全仕事は、平均加工力 P_m が塑性加工の全行程 S でなす仕事と等しいと考え、全行程 S は試料長さ l_0 に等しいので、

$$P_m S = A_0 l_0 w$$

$$P_m = A_0 w$$

よって、平均加工力を加工前の試料断面積で割った平均加工応力 σ は、

$$\sigma = P_m / A_0$$

$$= w \quad (15)$$

となり、平均加工応力は単位体積当たりの全仕事に等しくなるので、

$$\sigma = (1 + \mu / \cos \alpha \sin \alpha) \sigma_m \ln(1/(1-r))$$

$$+ 4/3 \sqrt{3} \sigma_m \tan \alpha \quad (16)$$

と表すことができる。ここで平均加工応力は、実験におけるパンチ面圧に相当している。

2-5 実験結果との比較

これまでに行われた押し出し加工の実験結果⁽³⁾について、二段充てん法の場合も含めて、断面減少率と面圧との関係として示すと、図2が得られた。鋼の場合、型と試料との摩擦係数はリング圧縮試験により0.13と測定されている。

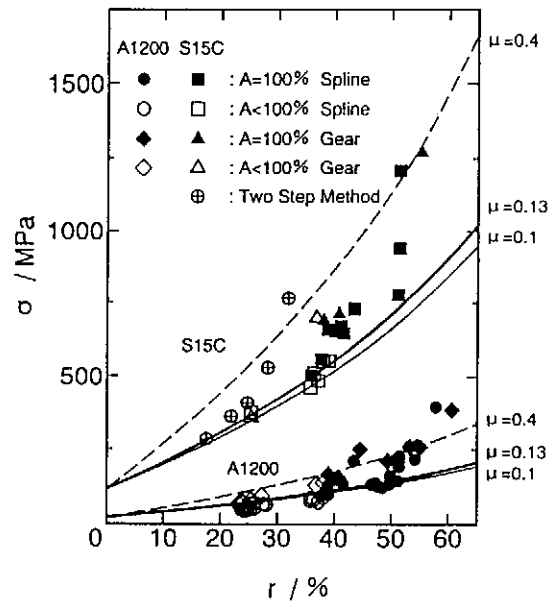


図2 断面減少率と面圧の関係

図中太い実線は、摩擦係数をこの値とし、式(16)の計算結果を示したものである。図より、実験値は、ほぼこの曲線の周りの点として表されている。なお、図中の細い実線及び破線は、(16)式にて、摩擦係数の値を0.1(潤滑が良い場合)、及び0.4(潤滑が悪い場合)とした場合の結果である。データ点は、すべてこれらの曲線の範囲にほぼ収まっていると言える。一本の曲線で表されなかった点については、歯形成部分での複雑な変形挙動を考慮していないので、この影響が、断面減少率が大きくなるに従って増加していると言うことかも知れない。

一方、アルミニウムでは、摩擦係数0.4とした計算曲線よりも高くなる場合も見られる等、鋼の場合よりもばらつきが幾分大きい。この理由としては、アルミニウムの潤滑被膜は弱く破れやすいため、試料ごとに潤滑状態が異なっていたためと考えられる。

3. 有限要素法

図2で見たように、加工応力と断面減少率との関係は、二段充てん法の場合であっても、初等解析からほぼ説明できる結果となっている。しかるに、通常の押し出し加工では、充てんした成形品を得ることが出来ないような断面減少率の低い範囲でも、二段充てん法では、成形が可能であるのは何故かと言った疑問に答えるために、ここでは有限要素法を用いた解析を行った。すなわち、二段充てん法による内歯車の押し出し加工中の材料の変形を調べてみた。

3-1 解析方法

解析には、汎用有限要素法プログラム(MARC K-4)を用いた。押し出し解析に使用したモデルを図3及び図4に示す。歯形の対称性から図3に示すように、解析モデルは、一つの歯の歯先の midpoint および歯底の midpoint と歯車の中心を結んだ線が側壁の境界となるようにした。一つの歯を2等分したものである。

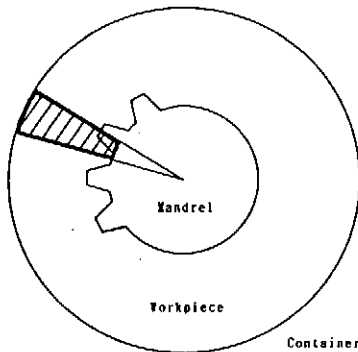


図3 解析モデル図(上面図)

試料は8節点立体要素を用い等方性材料とした。節点数は396、要素数は250である。試料の寸法は、外径 d_o をコンテナ径 d_c と等しく28mm、内径 d_i をマンドレル小径 d_s と等しく12mmとした。試料の材質は低炭素鋼S15Cで、ヤング率、ポアソン比および降伏応力は、この材料の値を用いた。また、試料の加工硬化に関しては、S15Cのn乗硬化式

$$\sigma = 715 \varepsilon^{0.216} \text{ MPa}$$

を用いた。

3-2 解析結果および検討

解析された試料の変形途中の形状を図5に示す。図5(b)の側面図及び(c)の上面図からわかるように、歯先部分では、試料が型に密着しておらず、充てんした成形品となっていない。マンドレルの形状から考えると歯先部分となる材料は、第二拡張部分まではマンドレルによって変形させられることはないはずである。しかし、解析結果(図5(b))を見るとマンドレルの第一拡張部分で歯底部分の材料が絞られるときに、歯先部分の材料が引張られマンドレルから離れるように変形している。この歯先部分のマンドレルから離れる量が、歯先部分の本来マンドレルによって絞られるはずの量より大きくなってしまえば、歯先部分は充てんされない。

これに対して、マンドレルの拡張部を一段階とした従来の方法⁽⁸⁾での試料の変形の様子を図6に示す。歯車の歯

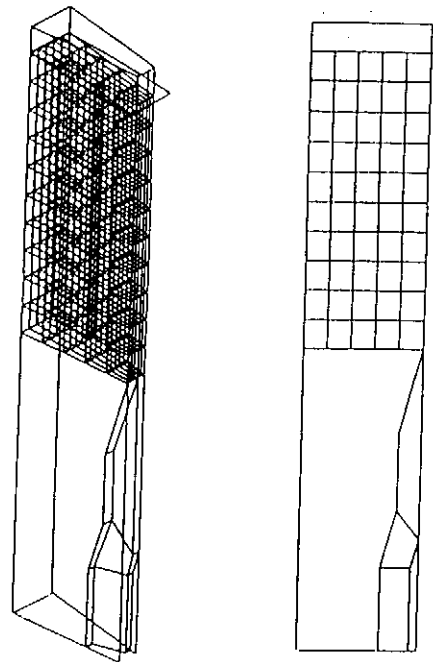


図4 解析モデル図

先部分が充てんしておらず、その未充てんの割合は、先の二段充てん法に比べて大きくなっている。この場合にも、マンドレルの拡張部分で歯底部分が絞られるときに、歯先部分の材料も引張られマンドレルから離れるように変形してゆく。しかし、二段充てん法の場合の方が、この歯先部分でマンドレルから離れる量が小さく、充てんされやすい成形法となったのは、このためと思われる。

4. まとめ

- (1) 押出しによる内歯部品の成形法に関し、塑性変形仕事、摩擦仕事、内部せん断仕事の点から解析し、これまでの実験結果がほぼ説明できることを示した。
- (2) 通常の押出しでは、充てんした成形品が得られないような、断面減少率の低い場合でも、著者等が提案した二段充てん法では、良好な成形品が得られる理由について、有限要素法により、解析した。その結果、マンドレル一段目で、歯底部分が絞られるとき、歯先部分が引張られ、マンドレル壁から離れるが、その量は、従来の方法に比べて小さくなっている事が明らかにされた。

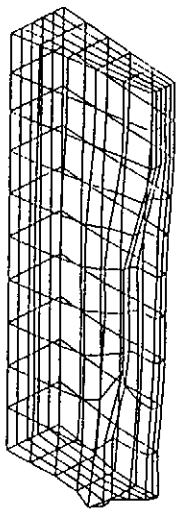
- (3) これら押出しによる成形法の実用化に当たっては、長手方向に生じる未充てん部分の解明等が残された問題である。また、外歯車の成形に対する二段充てん法の適用についても実験中であり、あわせて、詳細については、今後の研究に待ちたい。

謝 辞

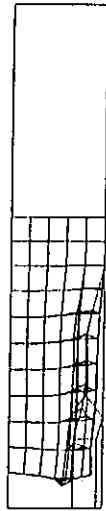
本研究は、(財)天田金属機械加工技術振興財団の研究開発助成金によって行われたものである。記して謝意を表します。

参考文献

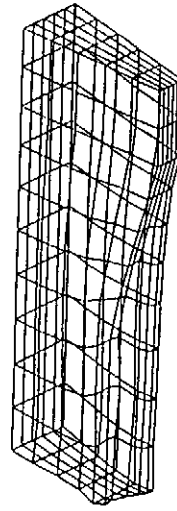
- (1) 沢木洋三・吉田始・泉澤正郎：日本機械学会論文集C 編 60-573(1994), pp.305.
- (2) 例えば、五弓勇雄：塑性加工の基礎，コロナ社，(1972), pp.376-378.
- (3) 泉澤正郎・吉田始・長瀬康男・大場信男：東海支部講演概要集 No.893-1, (1989), pp. 186-187.



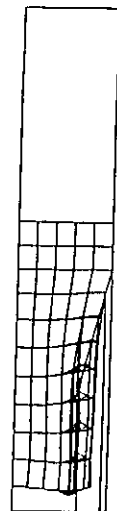
(a) 全体図



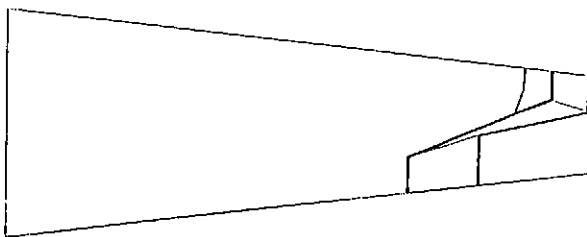
(b) 側面図



(a) 全体図

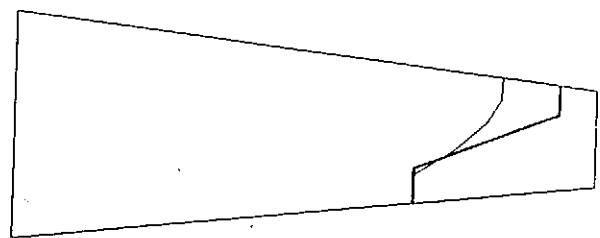


(b) 側面図



(c) 上面図

図5 解析結果



(c) 上面図

図6 解析結果(従来法)