

氏 名 ( 本 籍 )	加 藤 正 名 ( 千 葉 県 )
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 8 0 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 4 1 年 3 月 2 5 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 専 門 課 程	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 ( 博 士 課 程 ) 精 密 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	く さ び 型 工 具 に よ る 型 張 り 出 し 加 工 に 関 す る 研 究

( 主 査 )

論 文 審 査 委 員	教 授 竹 山 寿 夫	教 授 棚 沢 泰
	教 授 田 中 英 八 郎	教 授 戸 部 俊 美

## 論 文 内 容 要 旨

### 緒 言

張り出し加工や深絞り加工における成形限界の問題は板金プレス加工に関する研究の重要な問題点の一つであると考えられるが、今日、その本質はまだ十分明らかにされていないように思われる。

平行においたダイスとくさび形ポンチによる型張り出し加工は、もつとも基本的な板金プレス加工の一つであるが、大体の加工規準があるにすぎず、その系統的な研究は何らなされていないように思われる。

本研究では、くさび形工具による型張り出し加工について解析と実験による研究を行い、材料の

硬化特性から解析的に塑性不安定現象による成形限界を求めるとともに、実験により各種プレス用材料（アルミニウム、アルミニウム合金、銅、黄銅、軟鋼など）の成形限界を得ることを目的とした。

## 第1章 材料の加工硬化特性

加工の成形限界を規定すると考えられる塑性不安定現象は材料の加工硬化特性（真応力 $\sigma$ と対数歪 $\epsilon$ との関係）に依存する。それゆえ、実験に用いた各材料の加工硬化特性を引張り試験から求め、結果をべき関数

$$\bar{\sigma} = \sigma^* (\epsilon + C)^n \quad 1$$

で近似して、材料定数 $\sigma^*$ 、 $C$ 、 $n$ の値を定めた。なお、(1)式において、 $C=0$  とおくと、 $n$ 乗硬化特性

$$\sigma = \sigma^* \epsilon^n \quad 2$$

が得られる。

## 第2章 くさび形工具による型張り出し加工の解析

第2章、第3章は加工の解析結果である。本章では、第1図を参照して加工を構成する変形成をⅠ：ポンチ接触部、Ⅱ：自由部、Ⅲ：ダイス接触部に分け、各部に働く張力と変形量を求め、

ついで各部間の力学的、幾何学的関係を用いて行程線図（ポンチ力 $P$ と張り出し量 $H$ の関係）を求めた。

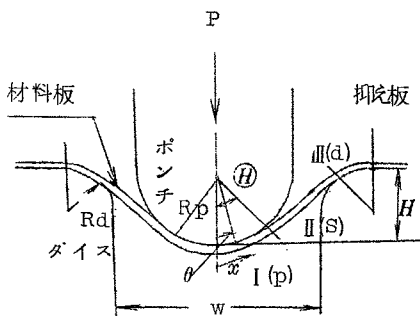
解析は全歪理論を用い、加工硬化特性として有効応力と有効歪の関係を(2)式で近似し、板の曲げ剛性と剪断力を省略した膜理論で取扱った。

また、板巾方向歪 $\epsilon_y$ は他方向歪に較べて比較的小さいので、板巾変形について実際の変形の両極限にあたる次の二つの場合について解析した。

- (i) 全変形成域で巾方向変形が生じない、すなわち

$$\epsilon_y = 0 \quad , \quad \sigma_y = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \quad 3$$

- (ii) 巾方向拘束力が比較的小さく巾方向歪 $\epsilon_y$ が他の部分に較べて大きい自由部では巾変形拘束力が生じない、すなわち



第1図 型張り出し加工模型図

$$\epsilon_y = -\epsilon_x / 2 \quad , \quad \sigma_y = 0 \quad 4$$

また、工具接触部では仮定(i)と同様に(3)式を仮定する。

工具接触部では張力  $T_x$  はベルト張力の式にしたがって分布し、張力  $T_x$  と歪  $\epsilon_x$  の関係は板厚方向応力  $\sigma_z$  を板と工具の間の接触圧力の  $1/2$  と考えて、

$$\frac{T_x}{\sigma^*} = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \cdot t_0 \frac{\epsilon_x^n}{\exp(\epsilon_x) + t_0 / 2R} \quad 5$$

で与えられた。ここで  $R$  は工具半径、 $t_0$  は変形前板厚である。

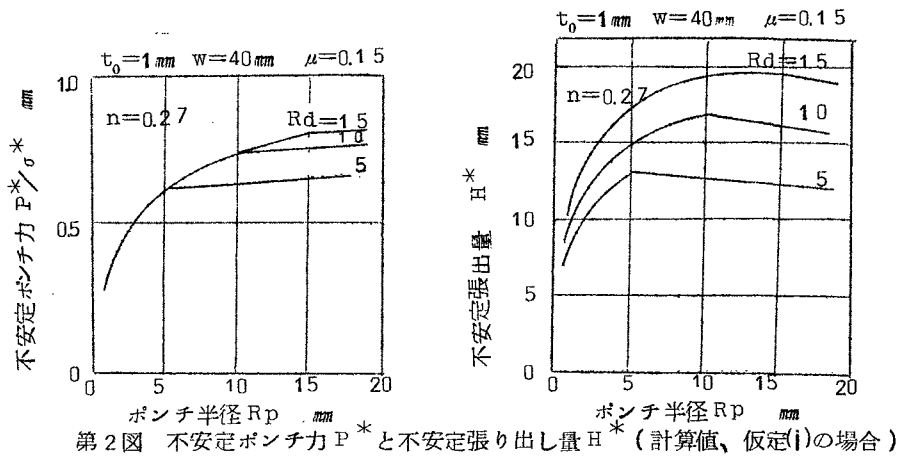
行程線図は板の各点における伸びを全変形域にわたって積分したものが変形後の板の周長に等しくなるように選ぶことによつて得られた。

### 第3章 くさび形工具による型張り出し加工の成形限界の解析

本章では板金プレス加工の成形限界について材料の金属学的な変形限界（破壊）と力学的な成形限界（塑性不安定現象——加工力またはこれにかわるものが最大値をとり局所変形を生じる現象）の両面から考察し、通常用いる延性金属では破壊よりも不安定現象の方が先に生じ、これによつて成形限界が規定されることを示した。次いで、くさび形工具による型張り出し加工の不安定条件を求めた。

加工の不安定は変形域の任意の1点で張力  $T_x$  (5式) が最大値に達することによつて生じ、その値は通常の解析では見過しがちであった比  $t_0/R$  によつて定まる板厚方向応力  $\sigma_z$  にも大きく依存し、比  $t_0/R$  が大きいほど不安定張力  $T_x^*$  は小さく、不安定歪  $\epsilon_x^*$  は大きくなることを示し、不安定ポンチ力  $P^*$  と不安定張り出し力  $H^*$  を定めた。第2図に仮定(i)の場合の計算結果をポンチ半径  $R_p$  に対して示した。曲線の傾向は  $R_p = R_d$  の点を境として異つており、加工において最初に不安定に達する場所すなわち破断箇所はこの点より小さな  $R_p$  ではポンチ接触端でありより大きな  $R_p$  ではダイス接触端である。

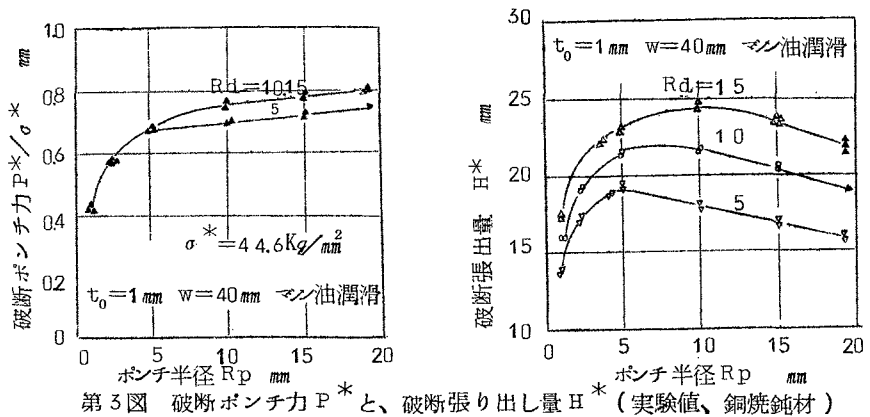
さらに、種々の条件の下で、不安定ポンチ力  $P^*$ 、不安定張り出し力  $H^*$  を計算し、これらに及ぼす材料定数  $n$ 、 $C$ 、板厚  $t_0$ 、ダイス間隔  $w$ 、摩擦係数  $\mu$  の影響量を明らかにした。



#### 第4章 くさび形工具による型張り出し加工の実験特性

本章では通常用いる各種板金プレス用材料の破断加工実験を行い、その実験特性(破断様式図、破断ポンチ力  $P^*$ 、破断張り出し量  $H^*$ 、平均伸  $\epsilon_M$  とポンチ半径  $R_p$  の関係など)を得た。破断様式は破断を生じる場所から3種すなわち押し込み破断(ポンチ中央で破断する場合)・接触端破断(工具接触端で破断する場合)・引張り破断(自由部で破断する場合)に分類され、各材料について径厚比  $t_0/R$  に依存して定められた。平均伸  $\epsilon_M$  は破断時の変形域全体にわたる平均の伸び歪で本加工の成形限界を表わす一つの量である。

実験を行った材料はその実験特性から2種類すなわち自由部の変形が比較的大きく比  $t_0/R$  が小さいと ( $t_0/R \leq 0.1$ ) 引張り破断を生じるA型(アルミニウム焼鈍材、軟鋼など)と自由部の変形が比較的小さく実験した範囲では引張り破断を生じないB型(24S、52S、銅の各焼鈍材および銅、3/7黄銅の各4分の1硬質材など)とに分類できた。



得られた成形限判定の基準は次のようなものである。

(1) 比  $t_0/R > 0.3$  なる範囲では押込破断またはこれに近い接触端破断を生じ、成形限は小さく、通常の加工には適さない。

(2) 比  $t_0/R \leq 0.3$  なる範囲では標準条件 (板厚  $t_0 = 1\text{mm}$ 、ダイス間隔  $w = 40\text{mm}$ 、マシン油潤滑) での加工の場合、平均伸  $e_M$  は、

$$\text{A型では } e_M = (0.65 \sim 0.85) e_u$$

$$\text{B型では } e_M = (0.6 \sim 0.7) e_u$$

である。ここで  $e_u$  は引張り試験における一様伸である。

- (3) 1. ダイス間隔  $w$  は平均伸  $e_M$  にはほぼ影響を及ぼさない。  
2. 板厚  $t_0$  が小さくなると平均伸  $e_M$  の上限が幾分大きくなる。  
3. 潤滑条件が良くなると平均伸  $e_M$  は増大する。

また、本章で得られた種々の実験特性は、銅焼鈍材について測定された破断ポンチ力  $P^*$ 、破断張り出し量  $H^*$  (第3図) を計算値 (第2図) と比較すると明らかのように、第2、3章で得られた計算結果で定性的には非常によく説明できた。そして、A型は解析における仮定(i)と(ii)の中間の性質を示し、B型はA型よりもより仮定(i)に近い性質を示した。

## 第5章 考 察

本章ではくさび形工具による型張り出し加工についてより詳細な考察を加え、次の結果を得た。

- (1) 前章までに得られた成形限についての計算値と実験値の差は主として、解析における板巾変形の仮定が実際の現象と異っていることによると考えられたので、自由部の変形に相当する広巾板の引張り試験を行い、得られた結果などを用いて解析の板巾変形についての仮定を修正した。修正された計算平均伸  $e_M$  はA型およびB型の特徴を良く表わしており、実験結果と成る程度の定量的一致を得た。
- (2) 加工のスプリング・バックについて解析的に検討し、本加工では張力が大きく作用しているのでこの影響は非常に少なくほぼ無視し得ることを明らかにした。
- (3) 第1章で得られた軟鋼材の加工硬化特性を2方程式で忠実に近似して成形限を計算し、軟鋼材の成形限について考察を加えた。

## 第6章 工具接触部のより詳細な解析

第2、3章における解析は応力および歪の板厚方向分布を無視したいわゆる膜理論であつて、曲げモーメントと板厚方向剪断力については考慮していなかつた。本章では、工具接触部の変形

をこれらを考慮して解析し膜理論の解と比較した。

曲げモーメント  $M$  と剪断力  $F$  を考慮した釣合式

$$\frac{d^2 M}{d\theta^2} + \frac{1}{\mu} \frac{dM}{d\theta} + \frac{1}{2} \frac{d^2 (T_x t)}{d\theta^2} + \frac{1}{2\mu} \frac{d(T_x t)}{d\theta} + \frac{R}{M} \frac{dT_x}{d\theta} - R T_x = 0 \quad (6)$$

は  $W_{00}$  によつて導かれたが、彼はこの方程式を正しく解いてはいない。

本章では(6)式を歪で表わし、さらに独立変数を角度  $\theta$  から歪  $\epsilon_x$  に変換して計算し、次の結果を得た。

- (1) 剪断力  $F$  は張力  $T_x$  に依存して唯一に定まり、その大きさはほぼ  $0.1 \frac{t_0}{R} T_x$  程度である。
- (2) 曲げモーメント  $M$  は計算した範囲では問題にほとんど影響を及ぼさない。
- (3) 歪勾配  $d\epsilon_x/d\theta$  は膜理論の解に較べ、ほぼ  $\epsilon_x < n/2$  なる範囲では小さく、 $\epsilon_x > n/2$  なる範囲では大きくなる傾向があるが、その隔りはわずかである。

## 総 括

本研究ではくさび形工具による型張り出し加工を解析および実験の両面から研究し、不安定張力は比  $t_0/R$  に依存することを見出しこれを用いて不安定現象による加工の成形限を解析的に求めるとともに、実験によつて各種プレス用材料の成形限を得た。

## 参 考 文 献

Heyer, R.H. and Maccabe, D.E. : Sheet Metal Ind., 40 - 439  
(1963) 779

Woo, D.M. : J. Appl. Mech. (Trans. A.S.M.E.), 25 - 4 (1958) 623

## 審 査 結 果 の 要 旨

金属薄板の型張り出し加工は、塑性加工法の一つとして実用されている。

しかし、素材の引張試験の伸び率をもつて加工の成否を判定する簡単な基準があるにすぎない。したがって、この加工の本質を明らかにし、その結果として実際的な基準を定めることが必要である。

この論文は、上記の目的のため著者が、実験と塑性力学による解析を行い、この加工法について系統的に行つた研究をまとめたものである。

全文は緒言および六章より成る。

緒言はこの加工法に関係のある従来の研究を述べたものである。

第一章は、焼鈍材、硬化材を含む各種の金属板の加工硬化特性を引張試験により詳細に定めたもので、この研究を展開する基礎となる。

第二章および第三章は、塑性力学による解析的研究である。工具はダイスとくさび形のポンチで、前者の肩および後者の先端は円筒面である。まず工具に接触する板の変形を定め、不安定部の歪とその位置を示す接触角との間の関係を各硬化指数、摩擦係数等に対して決定した。これらの結果に基づき加工の総合的性質を示すポンチ力・行程線図をえ、加工限界におけるポンチ力および張り出し量を定め、それらが材料の加工硬化指数、最初の板厚、工具曲率半径および間隔、摩擦係数等によつていかに異なるかを量的に明らかにした。特に板厚方向の応力を考慮し、(加工前の板厚  $t$ ) / (工具曲率半径  $R$ ) の影響を明確にし、工具より伝達される圧力が大きい程不安定張力が小さく、歪は大となることを見出した。これは、この加工のみならず他の加工にも応用しうる有用な結果である。

第四章は、実験による研究で材料および板厚等前述の諸量を種々に変えた場合について力と変形の測定を行つたものである。その結果、(1)加工の極限において生ずる板の破断は材質と  $t/R$  により引張破断・工具接触端破断・押込破断の三種の型に分類できることを示し、それを  $t/R$  を座標軸にとつた区分図に、また(2)極限ポンチ力、極限張り出し量と工具曲率半径の関係図にまとめて表示してある。

第五章は、考察で特にスプリングバック、自由部の変形、成形限、軟鋼材について必要を解析と実験を補かつて詳細な議論を行い、実用的な加工基準を与えた。

第六章は、剪断と曲げの影響を加えた解析を行い、以上の解析で用いた膜理論の近似で十分であることを確かめている。

以上を要約すれば、本論文は解析理論と実験によりくさび型工具による型張り出し加工に関する系統的な研究を行ないその結果として実際的な加工基準をえたもので、精密工学ならびに工業に寄与するものと考えらる。

よつて、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。