

囲み曲げ型円環成形法の研究 (第1報)

(スプリングバックに対する負荷時間の影響)

宇 都 竜 行・南 孝 一

A Study on the Forming Method of a Circular Tube with the Closing-in Bending Die. 1st Report.

(Effects of Load Time on the Spring Back)

Tatsuyuki UTO and Kouichi MINAMI

1. 緒 言

現在工業界において、著しい進歩をとげつつある量産、自動化、省力化に重大なメリットをもつ塑性加工技術の目的は、成形と材料の質的改善向上の両面に大別されると思う。前者における塑性加工の一部門として行われている曲げ加工は、理論的、実験的共に多くの研究がなされ、いろいろの問題点も逐次解決されて来た。一般的に曲げ加工の研究は、V型ダイスとポンチによるV型曲げ試験がなされ、その問題点は、曲げ荷重、曲げ半径、板の厚さ、材料の機械的性質、加工速度、加工温度等の加工条件が、スプリングバックという挙動にどんな影響を及ぼすかということである。

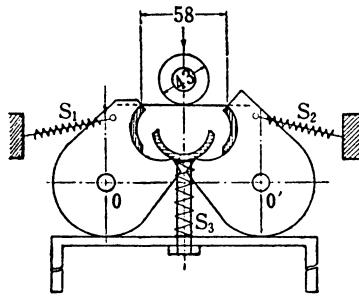
しかし未解決の点も多く、とくに曲げの精度を左右する問題点のスプリングバック、あるいは、変形過程の複雑さや、加工面において最終段階の強圧現象等の問題を含むプレスによる曲げ加工等は、なおその理論的解明に幾多の困難さを残している¹⁾²⁾。

本研究は、円環を曲げ加工により製作し、円環におけるスプリングバックについて検討した。なお円環を作る方法としては多くの加工法があるが、プレスを使用する場合としては、円筒心金で試片をU型、あるいは、波型にあらかじめ曲げ、左右、または、上下の円弧みぞ型を、水平、上下方向に作動させて、強圧の下で成形する。本研究では、まず円環成形法を検討し、プレスのような強圧は得られないが、きわめて短時間に成形出来る囲み曲げ型円環成形機を製作し実験することにした。しかしながら、実際にはこの円環成形機は曲げ荷重を測定することが困難であったため、代わりに、負荷時間をとり、これと板の厚さ、板の機械的性質等がスプリングバックに及ぼす影響を実験の上検討し、若干の理論的考察を試みた。

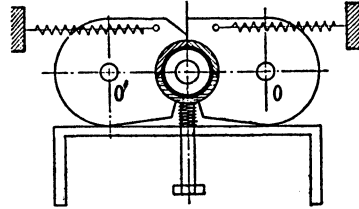
2. 実 験 方 法

2.1 実験装置

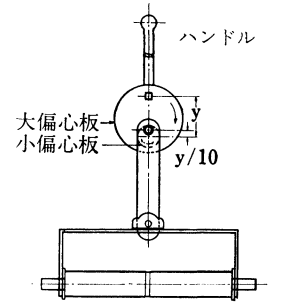
この実験に使用した機械、および測定装置は囲み曲げ型円環成形機、抵抗線動ひずみ計 (DS6-RX型)、電磁オシログラフ (EMO-62型)、ひずみゲージ (S108-L5)、ストップウォッチ



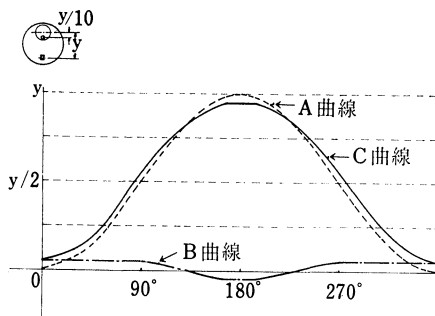
第1図 加工前



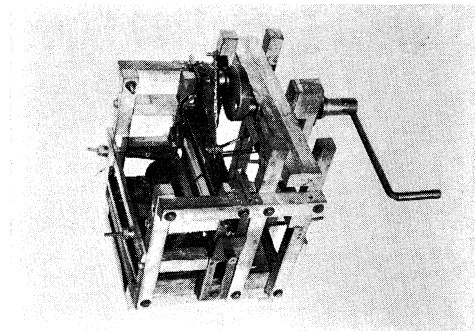
第2図 加工後



第3図 円筒心金運動装置



第4図 カム線図



第5図

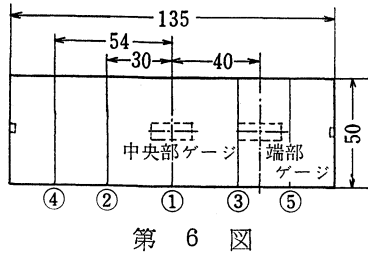
(1/10 秒読みとり) 等である。まず実験のために製作した機械は、第1～第3図に示すように円筒心金1個、4分の1円弧みぞ型(0, 0'を中心として回転す)2個、2分の1円弧みぞ型(上下運動をする)1個の計4個が試料を成形する主要部分である。第1図は加工前で円筒心金が試料をまさに加圧しようとする瞬間であり、第2図は加工後、円筒心金を中心として3方向から3個の円弧みぞ型が試料を圧縮曲げし、完全な円環に変形された状態を示している。なお図中の S_1, S_2, S_3 はそれぞれスプリングで加工終了後直ちに前述の4個の部分が、加工前の状態にかえるようにとりつけたものである。第3図は円筒心金を上下運動させるための装置で、大小2個の偏心板カムを組合せた機構である。手動式回転運動装置である。

第4図は偏心板回転による円筒心金の揚程線図(偏心板カム線図である)で、横軸にカムの回転角、縦軸に円筒心金の揚程をとったものである。A曲線は大偏心板の揚程曲線であり、B曲線は小偏心板の揚程曲線である。C曲線はA, B両曲線を合成したものであり、円筒心金の揚程曲線である。2個の偏心板カムを利用した理由は、曲線の最上点、すなわち、円環成形完了時の前後にわずかではあるが、できるかぎり負荷をあたえられるようにしたものである。

この偏心板カム以外に多くの良い機構もあるが、工作がむずかしくなるので前述の2枚の大小偏心板カムを使用した。

第5図は筆者らが試作した円環成形機の外観写真である。

次に加工時間、負荷時間、ひずみ速度、各ひずみ量をそれぞれ測定するため、第6図に示すようにひずみゲージ2枚を試料の中央部と端部とにそれぞれ張りつけた。ひずみゲージは抵抗線ひずみ



第 6 図

第 1 表

項目 厚さ	$E \left(\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right)$	$F(\text{kg})$	$\sigma_y \left(\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right)$	$\sigma_e \left(\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right)$	n	伸び (%)
0.27	2.0×10^4	48.5	27	40	0.05	24
0.4	2.0×10^4	46.5	27	38	0.02	26
0.6	2.1×10^4	50.8	18	23	0.15	44
0.8	2.1×10^4	56.6	18	25	0.2	46

計から電磁オシログラフへと接続される。電磁オシログラフにより試料の負荷によるひずみと時間の関係を記録する。第6図の①は試料の中心線，②，および③は円筒心金の軸線と試料の中心線とが一致しやすくなるように（左右2個の円弧みぞ型の縁とそれぞれ一致する）するためのけがき線である。④，および⑤のけがき線は，後述するところのスプリングバック量測定用の線である。

なお試料端部の切欠けはひずみゲージのリード線を引き出すためのものである。

2. 2 試験材料

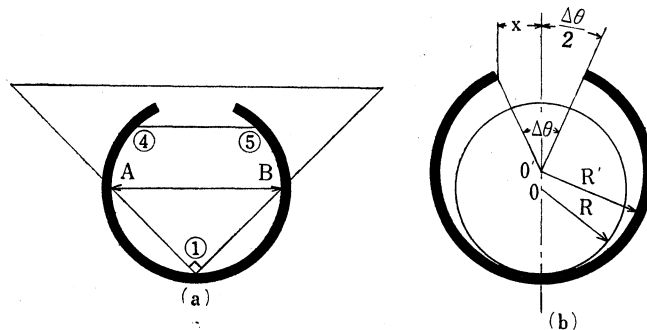
実験に使用した材料は素材より圧延方向に採取した薄軟鋼板の4種類で引張試験の結果は第1表に示すとおりである。

2. 3 スプリングバック量の測定法

スプリングバック量は円環成形終了後除荷と同時にね返った量である。そのね返りをスプリングバックと言っている。その状態を示すのが第7図(b)である。スプリングバック量は(b)図の $\Delta\theta$ で表わされるが，本実験では R/R' で表わすことにする。

ここで R は完成円環の内面の曲率半径であり，この実験では21.5mmである。また R' はスプリングバックにより生じた不完全円環の曲率半径である。

R/R' を求めるには R' を測定すれば良い。はね返りのために 0 は $0'$ にくるので，第7図(a)に示すように加工物の輪郭を紙上に複写し，④—⑤線に平行で，かつ①を頂点とする直角二等辺三角形の底辺 AB を求め，この AB の長さ $2R'$ を測定した。



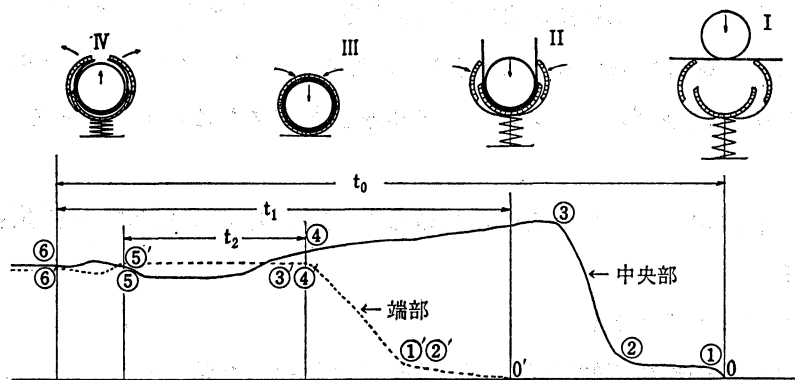
第 7 図

曲率中心 O' は当然 AB 線上にあるはずである。また(b)図より $\Delta\theta = 2\sin^{-1}x/R'$ であるから $\Delta\theta$ を知ることができる。このような方法をとったのはわずかの外力で変化し，また測定しにくい

からである。

2.4 予備実験と考察

以上の方法で実験をすすめてよいかどうか、すなわち実験結果のひずみ-時間曲線から囲み曲げ型機構による曲げ加工を塑性学、および塑性力学的に分析できるかどうかということと、いま一つは550枚におよぶ多量のひずみゲージを必要とし多額の経費を要するので、若干の実験結果から曲線の変化を類推できるならばゲージを張りつける必要がないというこの2つの理由から予備実験をした。この予備実験の一例が第8図で、板の厚さ0.6mmの場合のひずみ-時間曲線である。今後この曲線を変化曲線という。



第8図 行程ひずみ線図

第8図の上方の図は円環の成形工程を表わすもので、試料の変形状態と下方の変化曲線を対比させるために示したものである。変化状態の第I段階は円筒心金がまさに試料を加圧するところであり、第II段階は円筒心金で試料がU型に曲げをうけたところである。第III段階は円筒心金と3個の円弧みぞ型とにより円環に完成された段階であり、第IV段階は除荷された状態を示すものである。

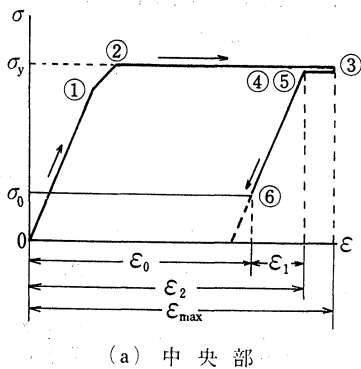
下方の曲線中実線は試料の中央部の変化曲線であり、破線は端部の変化曲線である。実線の原点0は円筒心金が両端支持の状態にある試料に接した瞬間であり、第I段階にあたる。①は円筒心金による負荷で試料が降伏したことを意味している。①から②の間は降伏が内部(板の厚さ方向)に進行しひずみは増加する状態である。③は高速負荷のために生じた過大ひずみ点で、曲率が R よりきわめて小さいことを表わしている。すなわち第II段階である。このⅡの変形は瞬間的であり、試料は円筒心金になじみながら変形を強制されるため曲率半径は R に近づくので過大ひずみは減少して行く。円環完了時の第III段階は④にあたる。④から⑤の除荷時まではいく分の変化があるが、しかし一定のひずみ量でなければならない。この変化は装置のクリアランスが必要以上にあるため、試料が円筒心金に完全に密着していないためであろう。除荷時の第IV段階、すなわち⑤からひずみはわずかに増加するが、⑥からは残留応力を持った残留ひずみ状態で安定する。

次に破線を実線と比較しつつ検討する。0'は0に相当し端部の負荷開始点であり、①に相当する①'は見られない。②'は②に相当する。これは①'が②'と同時に発生したものと考えられる。④'は④に相当し、③にあたる③'もまた見られない。これもまた③'と④'が同時に発生していると考え

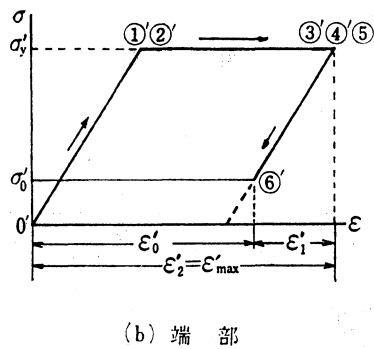
えられる。⑤'は⑤に、⑥'は⑥に相当している。中央部、端部共に一定ひずみの⑥、および⑥'において安定する。

この時のひずみが残留ひずみである。第8図中 t_0 , t_1 , および t_2 はそれぞれ中央部の加工時間、端部の加工時間、および加圧時間とする。この研究では t_0 を負荷時間とした。端部の変化曲線は中央部のそれに比較してきわめてゆるやかである。以上を塑性力学的に考えると次のように解される。

すなわち、試料を弾完全塑性体（本実験ではやや硬化型であるがここでは無視する）として応力 (σ)—ひずみ (ϵ) 曲線で第8図を表わせば第9図のように示される。ただし第8図の変化曲線では④、および④'以後にわずかなひずみの変化があるがこれを無視する。第9図において残留応力; σ_0 , σ_0' , 降伏応力; σ_y , σ_y' , 残留ひずみ; ϵ_0 , ϵ_0' , 戻りひずみ; ϵ_1 , ϵ_1' とする。なお図中の数字は第8図の数字に対応する。(a) 図の中央部の σ — ϵ 曲線と端部とのそれを比較すれば③が④、および⑤の位置にすれば (b) 図と同じ σ — ϵ 曲線になる。③は前述のように衝撃荷重のために、試料の中央部が円筒心金の曲率半径 R より小さいことを意味している。

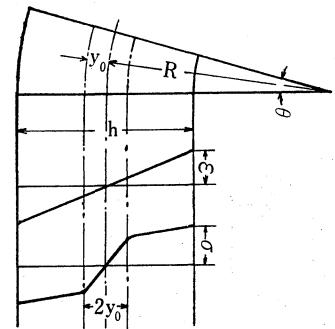


(a) 中央部



(b) 端部

第9図 応力—ひずみ線図

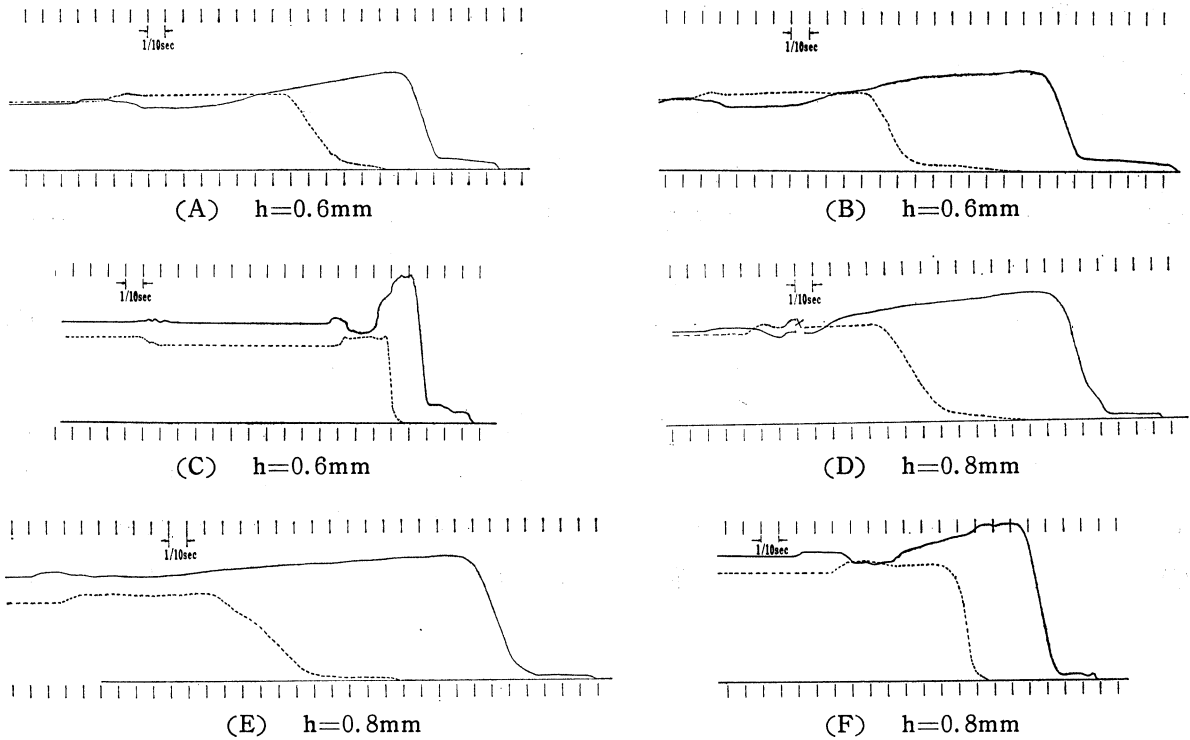


第9図

以上が予備実験の一例である。変化曲線の数例を第10図に示す。図のA, B, C図は 0.6 mm の場合、D, E, F図はそれぞれ 0.8 mm の場合である。これらの測定結果を表にしたのが第2表である。なお、表中の記号は前述のとおりで、 $\dot{\epsilon}_{max}$ は最大ひずみを時間（負荷開始時より最大ひずみ発生時までの時間）で除した値で最大ひずみ速度である。本実験の最大ひずみ速度は $8.2 \times 10^{-2} 1/sec \sim 1 \times 10^{-1} 1/sec$ である。また第10図のDで×印のあるものはその時間に電磁オシログラフの記録を中止したことを示す。なお、厚さ 0.27 mm, および 0.4 mm の場合は衝撃によるひずが過大で、ひずみゲージの許容量をオーバーするので予備実験では中止した。

以上の予備実験結果から次のように解釈した。

すなわち、高速度の負荷を試料にあたえ、一定応力の下に時間をあたえることにより曲げ加工することは、荷重の増加と同じような効果があり、塑性力学的にもその状態を説明できる。すべての試料が第9図と同じような σ — ϵ 線図になるので、ひずみゲージをすべての試料に張りつける必要はない。



第 10 図

第 2 表

ゲージ位置		中 央 部								
項目		$\epsilon_{max} \times 10^{-6}$	$\epsilon_0 \times 10^{-6}$	$\epsilon_2 \times 10^{-6}$	$\epsilon_1 \times 10^{-6}$	$\epsilon_0/\epsilon_{max} \times 10^{-2}$	$\epsilon_1/\epsilon_{max} \times 10^{-2}$	t_0 sec	t_2 sec	$\dot{\epsilon}_{max} \times 10^{-6}/\text{sec}$
0.6	A	21700	15040	16960	1920	69.3	8.8	2.4	1.2	38857
	B	20300	14500	15300	800	71.4	3.9	2.9	1.05	23604
	C	27810	19170	23792	4622	68.9	16.6	1.8	1.4	81794
0.8	D	28800	21500	25469	3969	74.6	13.7	2.8	1.3	43636
	E	24940	21170	22040	870	84.8	3.4	3.2	1.0	32815
	F	27470	20240	22206	1966	73.9	7.1	1.7	0.98	58234

ゲージ位置		端 部						
項目		$\epsilon'_{max} = \epsilon'_2 \times 10^{-6}$	$\epsilon'_0 \times 10^{-6}$	$\epsilon'_{1max} \times 10^{-6}$	$\epsilon_0/\epsilon_{max} \times 10^{-2}$	$\epsilon_1/\epsilon_{max} \times 10^{-2}$	t_1 sec	$\dot{\epsilon}'_{max} \times 10^{-6}/\text{sec}$
0.6	A	13250	12600	650	95.0	4.9	1.8	22457
	B	14850	13770	1080	92.7	7.2	2.08	14417
	C	14260	13000	1260	91.1	8.8	1.47	15844
0.8	D	15640	14490	1150	92.6	7.3	2.1	20853
	E	15250	13750	1500	90.1	9.8	2.1	14120
	F	16700	15200	1500	91.0	8.9	1.1	57586

また測定項目を負荷時間 (中央部の加工時間に等しい) t_0 , 板の厚さ h , およびスプリングバックの曲率半径比 R/R' との関係を求めることにした。

3. 本実験結果と考察

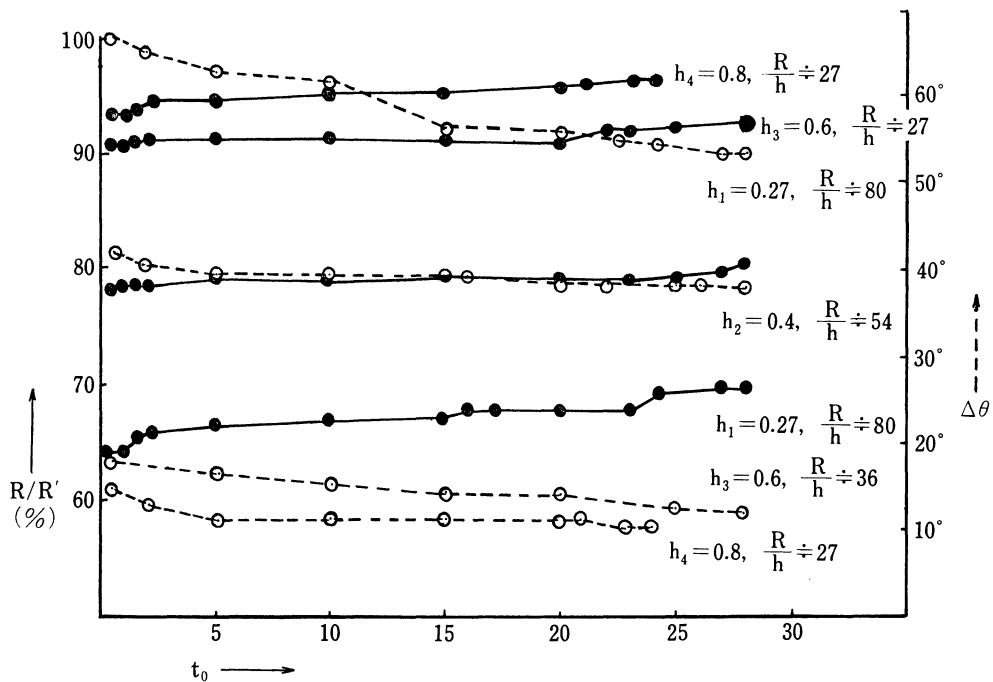
3. 1 実験結果

実験は予備実験と同じように行い、負荷時間を変化させた。機械は手動式のために加工速度を常に一定にすることは困難で、これからくるバラツキを少なくするために、同一条件の下で、4個ずつ同時に加工し、 R' はそれら4個の平均値をとった。この実験結果は第3表、および第11図である。

第3表は負荷時に対する R' , R/R' , および $\Delta\theta$ の実験値である。第11図は横軸に負荷時間 t_0 ,

第 3 表

項 目	板厚 $h(\text{mm})$	R' (実測値 mm)				R/R' (計算値%)				$\Delta\theta$			
		0.27	0.4	0.6	0.8	0.27	0.4	0.6	0.8	0.27	0.4	0.6	0.8
1	0.5	66.5	55.0	47.5	46.0	64.6	78.0	90.4	93.3	63°20'	41°33'	17°31'	14°45'
2	1	66.3	54.8	47.5	45.9	64.7	78.4	90.5	93.6	61°41'	41°23'	16°39'	13°37'
3	1.5	65.5	54.7	47.3	45.7	65.6	78.5	90.8	93.9	61°22'	40°05'	15°52'	13°15'
4	2	65.2	54.5	47.2	45.5	65.9	78.8	91.0	94.5	61°17'	39°46'	15°29'	13°11'
5	5	64.6	54.5	47.1	45.4	66.4	78.8	91.2	94.6	59°22'	39°32'	15°22'	11°50'
6	10	64.1	54.4	47.0	45.2	67.0	78.9	91.4	95.0	58°42'	39°18'	15°12'	11°41'
7	12	63.7	54.2	47.0	45.2	67.4	79.2	91.4	95.0	56°57'	39°05'	14°46'	11°41'
8	15	63.4	54.2	47.0	45.2	67.7	79.2	91.4	95.0	56°26'	39°05'	14°46'	11°41'
9	17	62.9	54.2	47.0	45.1	68.3	79.2	91.4	95.2	56°13'	39°05'	14°46'	11°16'
10	19	62.9	54.2	47.0	45.1	68.3	79.2	91.4	95.2	56°13'	39°05'	14°46'	11°16'
11	20	62.9	54.2	47.0	45.0	68.3	79.2	91.4	95.5	56°13'	39°05'	14°46'	10°56'
12	22	62.9	54.2	47.0	44.6	68.3	79.2	91.4	96.2	56°13'	39°05'	14°46'	10°19'
13	23	62.5	54.1	46.8	44.6	68.8	79.3	91.8	96.2	55°34'	38°45'	14°29'	10°19'
14	24	62.2	54.0	46.7		69.3	79.6	91.9		54°07'	38°27'	14°29'	
15	25	62.2	53.8	46.7		69.3	79.6	91.9		54°07'	38°02'	14°29'	
16	27	61.5	53.7	46.5		69.8	80.0	92.3		53°37'	37°57'	14°03'	
17	28	61.5	53.5	46.4		69.8	80.3	92.5		53°37'	37°45'	13°44'	

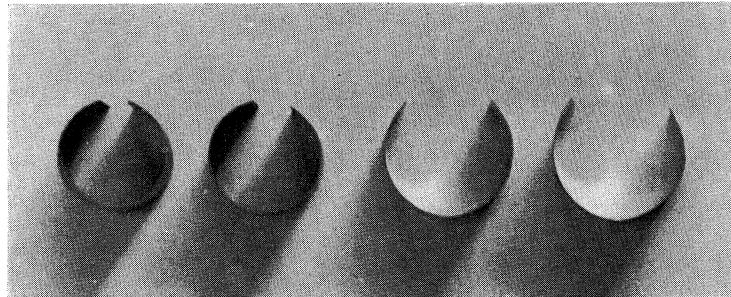


第 11 図

縦軸に R/R' , および $\Delta\theta$ をとり, 助変数として板の厚さ h , 曲率半径 R と厚さ h , 曲率半径 R と厚さ h の比 R/h をとったものである。

第11図に示すように板の厚さのいかんにかかわらず, 負荷時間の長いほどスプリングバック量は少い。次に R/h の大きいほどスプリングバック量も大きい。これはまた薄いほどスプリングバックは大きいということになる。特に 0.27mm の場合負荷時間を長くすることにより, スプリングバック量を 15% も小さくすることができることを示している。これらの現象は負荷時間を伸すことによって塑性変形が進んでいると同時に, 衝撃的変形は材料の中立軸まで塑性域を広げているためだろうと考えられる。松山, 鈴木両氏³⁾ は黄銅, 洋白, およびリン青銅の薄板をプレスでV型曲げ試験をしているが, 20T の加圧下で, スプリングバック量は時間とともに減小して, 3×10^2 sec 程度でほぼ一定になる傾向があると述べている。筆者らの研究ではやや時間不足の感がする。生産能率ともあわせ考えなければならぬので, 長時間は困難と思われる。

第12図は加工品のスプリングバック状態を示す実例写真で, 左より 0.8mm, 0.6mm, 0.4mm および 0.27mm の順である。厚いものはスプリングバックも少く, 薄いものほど大きいことを示している。また中央部の曲率は小さく, 端部の方は曲率も大きいようである。



第 12 図

3. 2 実験値と理論値との比較

曲げ加工によって表われるスプリングバックについての理論は, 全ひずみ理論, およびひずみ増分理論による平面ひずみ解, 全ひずみ理論による平面応力解, あるいは真直梁の均等曲げを一軸応力の弾塑性曲げとする初等理論等がある。しかし以上のいずれの解も縦対数ひずみが 0.1 以下ではほとんど一致するし⁴⁾⁵⁾, また R. Hill⁶⁾ は $R > (4 \sim 5)h$ ならば初等理論で十分近似できると述べている。

筆者らの研究では $R = 21.635 \sim 21.9$ mm, $h = 0.27 \sim 0.8$ mm で $R/h \doteq 80 \sim 27$ となるから初等理論で近似できる。 R/R' の値は次のようになる。

いま $\sigma - \epsilon$ の関係を

$$\left. \begin{aligned} 0 < \sigma < \sigma_y & \quad \epsilon = \sigma/E \\ \sigma_y < \sigma & \quad \epsilon = \sigma_y/E + (\sigma - \sigma_y/F)^{1/n} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに ϵ ; ひずみ, σ ; 実応力, σ_y ; 降伏応力, E ; ヤング率, F ; 塑性係数, n ; 硬化指数,

σ' ; 残留応力, ϵ' ; 残留ひずみ

で表わすことにすれば $\sigma' = \sigma - E(\epsilon - \epsilon') \dots (1)'$ が第9図Cより成立するから

$$\frac{R}{R'} = 4 \left\{ 1 - \frac{6K}{(n+1)(n+2)} \left(\frac{h}{2R} - \frac{\sigma_y}{E} \right)^{n-1} \left(\frac{R\sigma_y}{Eh} \right)^3 - \frac{12K(n-1)}{(n+1)(n+2)} \left(\frac{h}{2R} - \frac{\sigma_y}{E} \right)^{n-1} \left(\frac{R\sigma_y}{Eh} \right)^2 \right. \\ \left. - 3 \left\{ 1 - \frac{2K(2n+1)}{(n+1)(n+2)} \left(\frac{h}{2R} - \frac{\sigma_y}{E} \right)^{n-1} \right\} \left(\frac{R\sigma_y}{Eh} \right) - \frac{3K}{(n+2)} \left(\frac{h}{2R} - \frac{\sigma_y}{E} \right)^{n+1} + 1 \right\} \dots (2)$$

となる。ここに $K = F/E$ である。

なお (2) 式で $n=1$ の場合は

$$\frac{R}{R'} = (1-K) \left\{ 4 \left(\frac{R\sigma_y}{Eh} \right)^3 - 3 \left(\frac{R\sigma_y}{Eh} \right) + 1 \right\} \dots (3)$$

$n=1, K=0$ の場合は

$$\frac{R}{R'} = 4 \left(\frac{R\sigma_y}{Eh} \right)^3 - 3 \left(\frac{R\sigma_y}{Eh} \right) + 1 \dots (4)$$

(3) 式は実応力-ひずみ関係が弾性域, 塑性域ともに直線で近似される場合であり, (4) 式は弾完全塑性体の場合である。(2), (3), および (4) 式は $R\sigma_y/Eh = 1/2$ で $R/R' = 0$ となり完全弾性を意味しており, $R\sigma_y/Eh > 1/2$ では塑性曲げを行ない得ないことを示している。

本実験の試験材料の機械的性質を表わす第1表の数値を (1) 式に代入した結果は第4表のようになる。

第4表の実験値は最小値と最大値をとった。この最大, 最小値はともに第3表による。第4表から実験値が理論値より良好な結果を出している。これは囲み曲げ型機により衝撃的負荷をあたえたのち, 負荷時間を伸しているためであると思われる。厚さ 0.27mm, 0.4mm の場合は実験値と理論値に近いが, これは薄いものはスプリングバックしやすいくことを意味している。また厚さ 0.6mm, 0.8mm の場合, 実験値が時間の延長にかかわらず大差がないということは厚いほどスプリングバックしにくいことを意味している。

第 4 表

R/R' h_{mm}	理論値(%)	実験値(%)	誤差(%)
0.27	62.3	64.6~69.8	2.3~7.5
0.4	75.4	78.0~80.3	2.6~4.9
0.6	85.4	90.4~92.8	5.0~7.4
0.8	87.3	93.3~96.2	6.0~8.9

3.3 負荷時間とスプリングバック

第4表の実験値で小さい方は1sec位の短時間, 大きい値は20sec以上の負荷時間である。この負荷時間の大小はスプリングバックに大きな影響を持っている。筆者らの研究では負荷時間を加工速度と考えてもいいようである。今日時間は加工速度, 変形速度, あるいはひずみ速度という形で理論式にとりあつかわれている。筆者らの負荷時間をいかなる形で上述のスプリングバックの理論式にとり入れるかきわめて困難である。ここでは次のように考えるのが適当と思われる。除荷後の

スプリングバックを問題にしているので (1)' 式を $d\sigma'/dt = d\sigma/dt - E \left(\frac{d\epsilon}{dt} - \frac{d\epsilon'}{dt} \right)$ として検討することにする。 $d\sigma/dt$, $d\epsilon/dt$ は変形の前歴を表わし, $d\sigma'/dt$, $d\epsilon'/dt$ は変形後の時間効果を表わしている。この式の示す現象として応力緩和, クリープ, および弾性余効という三つがある。応力緩和とは変形を一定に保つために要する応力は時間と共に減少することで $d\sigma/dt < 0$ ($d\epsilon/dt = 0$) となる。これはまた $E \frac{d\epsilon'}{dt} < -\frac{d\sigma'}{dt}$ となり 残留応力においても 変形の時間効果より 応力の時間効果が大きいということになる。次にクリープとは一定の応力の下にひずみが増すことで $d\epsilon/dt > 0$ ($\frac{d\sigma}{dt} = 0$) となる。これもまた残留応力, 残留ひずみの間に $E \frac{d\epsilon'}{dt} > \frac{d\sigma'}{dt}$ が成立しひずみ, すなわち変形のすすむことを意味している。また弾性余効とは一定ひずみにおける応力が時間と共に減少して行くことで応力緩和とは変形域が異なるが同じような現象である。応力緩和は Maxwell, クリープは Vigot, 弾性余効は Boltzmann によりそれぞれ証明されたものである。また Boltzmann は変形前の過程がとくに重要だとしている。本実験においても初期の衝撃的変形は意義のあることと考えられる。

いずれにしても, 応力は時間と共に減少し, ひずみは時間と共に増加することになるから, 一定の小荷重でもひずみは増加して変形を安定にすることになる。

4. 結 論

囲み曲げ型による円環成形法について実験し, 主として負荷時間とスプリングバックについて検討したが, 以上をまとめると次のようになる。

(1) 負荷時間のいかにかわらうず, R/h の大きいもの, すなわち h の小さいものほどスプリングバックは大きい。

(2) R/h , および h のいかにかわらうず, 負荷時間の長いほどスプリングバックは小さい。本実験では 20sec 以上がよい結果を出している。

(3) 板の厚さ 0.27mm, 0.4mm のような薄板の場合, 第 I 段階の変形速度が大であると, 過大ひずみによる折目が表面に見られるが, これは衝撃的負荷の欠点であろう。しかし 0.6mm, 0.8mm には見られない。衝撃的変形は長所と同時に短所があり, 曲率半径 R についても同じようなことが言える。すなわち R/h に対して適正な変形速度が存在するというのである。

以上が囲み曲げ型円環成形法について一部の結論であるが, 材料が同種の軟鋼板であったため, E, F, σ_y, n 等の影響をまとめるまでにいたらなかった。上述の (1) はあらゆる曲げ加工に共通で良く知られていることである。次にすべての試料に第 I 段階の変形速度にあまり差をつけずに試験しなかったので, R/h に適した最大ひずみ速度 (変形速度) を求めえなかったことは残念である。

R/h に対して適当な変形速度, 負荷時間等をあたえうるような機構を整理すれば囲み曲げ型で能率的に円環を作りうると思う。

終りに引張試験等に御協力下さった工学部末永勝郎, 田中豊, 若原稔, 田中秀穂, 中西賢二, 末

吉秀一各先生，および当時の実験を一部担当された伊牟田義治，東栄一郎両学生に感謝します。

参 考 文 献

- 1), 3) 松山, 鈴木: 日本機械学会論文集, 27-175, p. 300~309 (1961).
- 2) 大森, 吉永: 塑性と加工, 8-77 (1967).
- 4) 益田, 室田: 工業塑性力学, 養賢堂, p. 171~175 (1963).
- 5) 葉山: 塑性学と塑性加工, オーム社, p. 205 (1969).
- 6) R. Hill: The Mathematical Theory of Plasticity邦訳: R. ヒル, 塑性学, 培風館, p. 283 (1965).

Summary

This is a report of effect caused by various factors on the spring back. For the purpose of this study, we made up Closing-in Bending Die, which is worked by hand control, to form a circular tube and experimented on the transformation process of a circular tube in the plastic bending of sheet metals (mild steel). Our main study was to find effect of the load time on the spring back.

The remarkable results are as follows;

The load time gives the same kind of effect on the material as the magnitude of the applied load. The load time of more than twenty seconds gives better effect on the spring back regardless of the thickness of metal.

Moreover, we tried to find theoretical grounds on the spring back and understood there are plenty of phenomena in the plastic bending with the Closing-in Bending Die.

We found the results obtained with our experiments were slightly different from the analysis (difference in about mean 5%). We understood the difference is brought on the mechanical nature of materials and an error with a hand instrument. We are sure, however, to have an accurate result by employing a high quality precision instrument and enlarging the magnitude of the applied load.