

帯板の面内曲げ加工及び実用加工機の開発に関する研究

東京都立科学技術大学 機械システム工学科

助教授 坂木 修次

(昭和62年度研究開発助成 AF-87022)

1. 研究の背景

面内曲げ加工は帯板状の素材をその面内に曲げ、平板円環状の部品を材料歩留まり良く加工する方法として知られている。この加工法は、連続してスパイラル状の成形品を加工することも可能であり、また、各種形材等の塑性曲げ加工において、座屈の発生限度及び割れ発生限度を評価するための基礎にもなっている。

面内曲げ加工におけるブランクの変形挙動及び加工限度を基礎事項は既に検討され、弾塑性横座屈を抑える方法として、軸引張りの負荷が有効であることが明らかにされている。しかし、実用加工法の基準化のためには、横座屈の発生を抑えるための工具配列などについてさらに検討する必要がある。

2. 研究の目標

帯板に均等曲げモーメントを負荷した場合の弾塑性横座屈の発生機構を実験的に詳細に検討し、ブランクの倒れ角及び横たわみの発生状況より横座屈限度を求める方法を確認する。ブランクの寸法及び材料特性に関わる弾塑性横座屈限度を表わす近似解析結果をもとに、簡便に横座屈限度の加工度を求めることが可能な計算図表を提案する。

実用加工法の一例として、所定の半径をもつドラムに軸引張り力によって、ブランクを巻付ける加工を試み、軸引張り付加の効果及び異常変形の発生と加工限度について検討する。

3. 研究成果の概要

- (1) 均等曲げモーメントを負荷した場合の弾塑性横座屈限度

純アルミニウム板半硬質材、これを中間焼なまし及び焼なまし処理を行った材料について、均等曲げモーメント負荷による面内曲げ加工を試みた。ブランクの寸法は板幅 $h = 32\text{mm}$ 、板厚 $t = 4.0 \sim 2.0\text{mm}$ 、変形部の長さ $l_s = 128\text{mm}$ としている。これによって、板幅 h 及び板厚 t に関する断面比 h/t は $8.0 \sim 16.0$ になり、変形部の長さ l_s と板幅 h に関する細長比 l_s/h は 4.0 になっている。

面内曲げ実験装置の概略を図1に示す。曲げ荷重の負荷はブランクの板幅 h の64倍の長さを持つ負荷棒によって、疑似的な均等曲げモーメントを負荷している。

面内曲げ加工では、弾塑性横座屈及びびれ・割れの発生が主な加工限度になる。弾塑性横座屈の発生限度はブランクの変形過程におけるブランクの各方向変位を測定することによって求めることができる。ブランクの中央部には、横たわみ測定器及び倒れ角測定器を取り付けている。

加工の過程で、横座屈の発生を示すグラフの典型例として、中間焼なまし材の例を図2に示す。図によれば、加工度の増加に対して倒れ角 β 及び横たわみ u ともに、急激に増加する点が観察される。このような場合は、面内変形が到達する最大

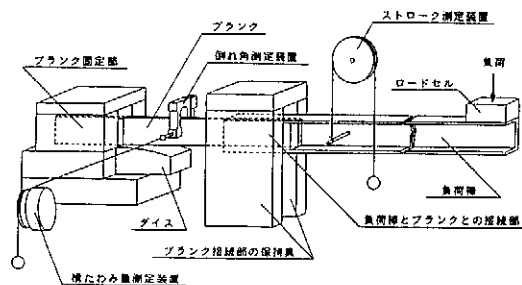


図1 面内曲げ実験装置の概略図

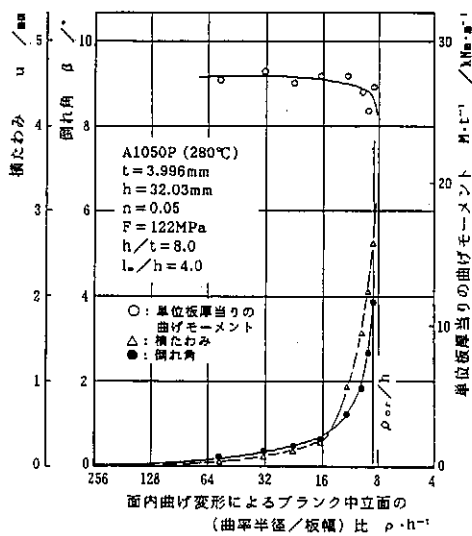


図2 均等曲げモーメント負荷による弾塑性横座屈限度の典型例
(中間焼なまし材 $t = 4.0\text{mm}$)

値を横座屈限度の加工度としてとらえる。他の例のように、焼なまし材及び断面比が小さく、弾塑性横座屈限度の加工度が大きい場合、また、断面比が大きく、弾塑性横座屈限度の加工度が小さい場合ともに、この一連の実験条件では、倒れ角 β がおよそ $2 \sim 3^\circ$ 発生する点を横座屈の発生点として判断できる例が多い。

一般に、これらの横座屈限度において、曲げモーメントは最大値または急激な低下の開始点になっている。

面外変形は横座屈発生限度の $1/2 \sim 1/3$ 程度の加工度より生じ始めている。その理由の一つは、ブランク及び加工機の材料的または幾何学的初期不完全性によるものと思われる。

帯板がその両端に均等曲げモーメントを受けて弾性域で横座屈を発生する場合の座屈荷重を求める理論式を、面内曲げ加工における弾塑性横座屈限度の面内曲げ変形量に拡張した近似式は次のようになっている。

$$\frac{\rho_w}{h} = \frac{1}{2} (n+2)^{-\frac{2}{n+1}} \left[\frac{0.23}{1-0.63t/h} \left(\frac{F}{G} \right) \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \left(\frac{h}{t} \right) \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad (1)$$

ここで、 ρ_w/h : 弾塑性横座屈限度の(曲率半径/板幅比)、 n : 加工硬化指数、 F : 塑性係数、 G : 横弾性係数、 h : 板幅、 t : 板厚、 l_0 : 両端をはさみ支持した場合のブランク長さ、曲げ荷重: 均等曲げモーメント。

近似計算結果と実験結果との比較を表1に示す。表の計算値によれば、断面比が小さい場合及び焼なまし熱処理を施した場合は面内曲げ加工度は高くなっている。

実験値も同様の傾向が見られるが、加工度が高い場合ほど実験値は計算値ほどの加工度に至っていないという特徴が見られる。板厚が薄く、断面比が大きいため、僅かな加工度で横座屈を発生する場合は、実験値の加工度は計算値よりも高くなる例がある。

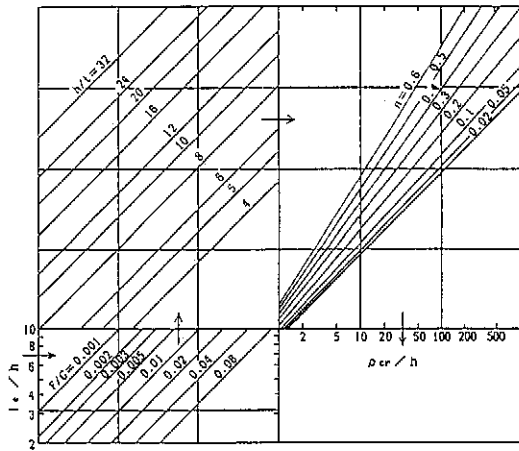
これは、ねじり剛性を規定する横弾性係数の値が面外曲げ変形の進行とともに低下する傾向にあることと、ブランクの弾性領域の大きさによるものと思われる。式(1)を計算するための計算図表を図3に示す。

この図表によって弾塑性横座屈限度の加工度及びばす諸因子の効果を視覚的に理解することが可能になる。実際の加工における弾塑性横座屈限度の加工度は表1に示すとおり、材質及び加工の程

表1 弾塑性横座屈限度の加工度及び補正係数

材 料 (JIS)		A1050P H24								
熱処理温度 /°C (90 min)		400			265	280	280	なし		
実	板 厚 t/mm	4.0	3.0	2.0	4.0	3.0	2.0	4.0	3.0	2.0
	板 幅 h/mm	32.0			32.0			32.0		
	断面比 $h \cdot t^{-1}$	8.0	1.07	16.0	8.0	10.7	16.0	8.0	10.7	16.0
狭	細長比 $l_0 \cdot h^{-1}$	4.0			4.0			4.0		
	加工硬化指数 n	0.25	0.39	0.39	0.05	0.06	0.04	0.04	0.03	0.13
糸	塑性係数 F/MPa	118	200	224	122	109	118	125	133	250
	横弾性係数 G/GPa	26*			26*			26*		
作	$\sigma_{0.2}/\sigma_0$	0.27	0.29	0.27	0.87	0.83	0.92	0.91	0.98	0.99
	ランクフォード値 r	0.84	0.82	0.74	0.49	0.55	0.53	0.44	0.37	0.38
横座屈限度の加工度 ρ_w/h	計算値 (A)	4.4	9.7	34	7.4	20	117	9.4	29	123
	実験値 (B)	6.1	13.9	47	9.2	22	92	11.7	25	75
補正係数 $K (B/A)$		1.4	1.4	1.4	1.2	1.1	0.8	1.4	0.9	0.6
最大曲げひずみ ϵ_{max}		0.08	0.05	0.01	0.05	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01

*: アルミニウムハンドブック(朝倉書店)



加工荷重：均等モーメント、境界条件：挟み支持（面内変位のみ自由）、 ρ_r/h ：弾塑性横座屈限度の（曲率半径/板幅比）、 n ：加工硬化指数、 F ：慣性係数、 G ：横弾性係数、 h ：板幅、 l ：板厚、 m ：ブランク長さ。

図3 弾塑性横座屈限度の計算図表

度によって補正が必要となる。実際の加工限度はこの図表の結果に対して安全率を考慮すべきものと思われる。

(2) 巻付け曲げ加工における加工限度

面内曲げ加工の一例として、帯板のほぼ一定の軸引張りを負荷して、所定の半径のドラムに1回転以内あるいは多数回巻きの方法で巻付ける曲げ加工を試み、十分な加工度を得るための軸力付加率などの加工条件を明らかにしている。

試料には耐食アルミニウム A6063S T6 及びこれを焼なまし処理した帯板を用いた。T6 処理材の加工硬化指数 n 値は 0.06~0.08 である。ブランクの板幅 h は 30mm、板厚 t は 3.0、4.0、5.0mm とする。これによって、断面比 h/t は 10.0~6.0 になっている。細長比 l/h は、加工機の工具配列よりおよそ 9.0 になっている。

連続面内曲げ加工装置の概略を図4に示す。この装置は主要機構として、ブランクを巻取るドラムとその駆動用減速モーター及び軸引張り負荷装置から構成されている。曲げ荷重はブランクを取付けたドラムを回転し、ブランクが曲げ荷重負荷

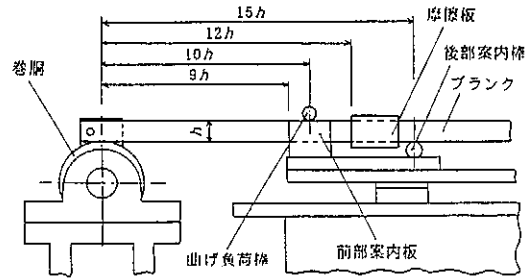


図4 面内巻付け曲げ加工機の工具配列

棒に接触することによって負荷される。ドラムの半径 r_d は 64mm で板幅 h の 2.13 倍になっている。ブランクに対する負荷は軸引張りを負荷することによって行っている。軸引張り力はブランクの両面を摩擦材を取付けた板で挟みつけることによって生じる摩擦力で負荷しており、その大きさは任意に設定可能である。

1回転曲げ加工は 270° を限度として行った。一例として、板厚 3.0mm の T6 処理材についての面内曲げ加工限度を図5に示す。

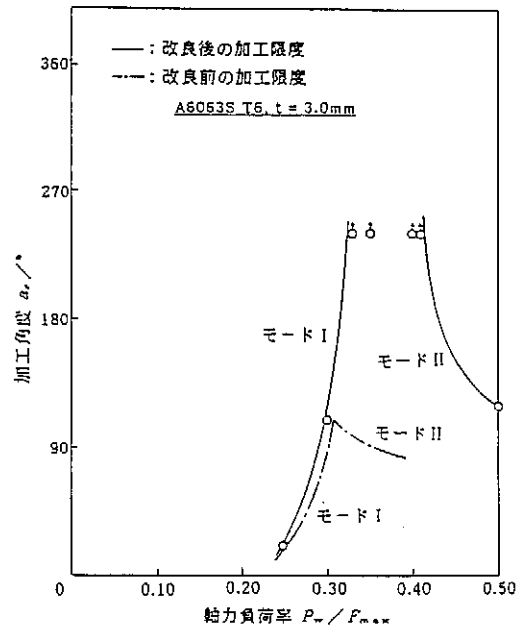


図5 巻付け曲げ加工における加工限度

板厚 t が 3.0mm、断面比 h/t が 10.0 の場合は軸力付加率 $P_w/F_{max}=0.25$ の軸引張りを負荷しても加工角度 α は 20° に過ぎないが、 $P_w/F_{max}=0.32$ の場合はおよそ 110° の加工角度を示しており、軸引張り付加の効果を示している。

この断面比の場合は、さらに軸引張りを高めることによって、むしろ加工度が低下する現象が現れる。

ここで発生する異常変形、主として次の 2 つに分類される。

- ① ブランクの圧縮側部分の面外への連続した波状座屈変形：変形モード I (図 6-1)。
 - ② ブランク全体が横倒れする座屈変形：変形モード II (図 6-3)。
- なお変形モード II の発生限度は、曲げ負荷棒の取付け位置の改良によって、大幅に改善されている。

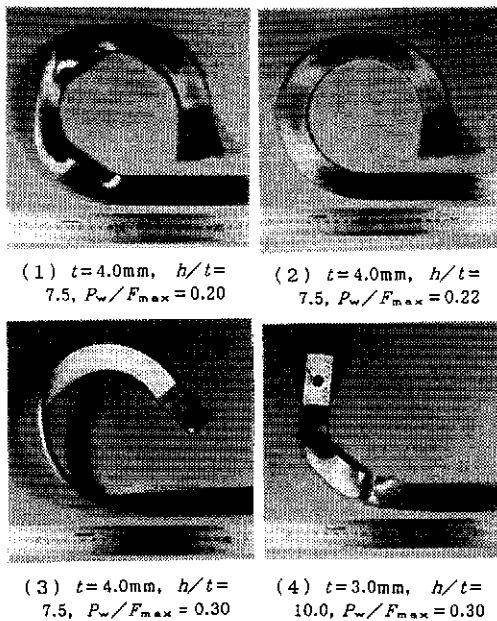


図6 面内巻付け曲げ加工結果 (A6063S T6材)

板厚が 4.0mm で断面比 h/t が 7.5 の場合は軸力付加率 $P_w/F_{max}=0.22$ 以上で 270° 以上の完全な加工が可能である (図 6-2)。

これに対して、 $P_w/F_{max}=0.2$ の場合はモード I の座屈変形により加工角度 α は 70° にとどまっている (図 6-1)。 $P_w/F_{max}=0.3$ の場合はモード II の座屈変形により横倒れを発生している (工具配列改良前、図 6-3)。図 6-4 は座屈発生後に破断に至った例 (T6、 $t=3.0$ 、 $P_w/F_{max}=0.30$) である。

ブランクの圧縮側に生じる波形の座屈変形は、一般に加工の初期において、加工角度が増加するにつれて顕著になる傾向がある。これはブランクの面内曲げ変形に伴う面内のせん断変形を誘発して、ブランクの圧縮側の圧縮応力が大きくなること、また、加工の進行によってブランクの固定端におけるブランクの長手方向軸まわりの拘束が減少するためと思われる。図 6-3 に示すような、横倒れ変形は加工角度が 90° 付近で発生するのが特徴である。

このように、発生原因の異なる異常変形があり、軸力付加率の影響も異なるため、工具配列及びブランク形状によって最適な軸力付加率を選択する必要があると言える。

4. おわりに

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成によってなされたものであり、財団に対し深く感謝致します。

5. 発表論文

- 1) 坂木修次：平成 2 年度塑性加工春季講演会、(1990-5)、359。
- 2) 坂木修次：東京都立科学技術大学研究報告、第 4 号、1。
- 3) 内海能亜・坂木修次：平成 3 年度塑性加工春季講演会論文集、(1991-5)、471。
- 4) 坂木修次：第 42 回塑性加工連合講演会論文集、(1991-9)、予定。