

U曲げ加工したはりの曲げ強さに及ぼす 加工硬化の影響

南 孝 一

(1983年10月15日 受理)

Effect of Work Hardening on the Bending Strength of U-Forming Beam

Kouichi MINAMI

I. 緒 言

機械部品に限らず、ほとんどの構造物、器具類は複雑な断面形状に加工されている。これは断面を目的に応じた形状に加工することによって強化するためである。この加工時、金属材料は再結晶温度以下で加工、すなわち冷間加工すると加工前より硬化する加工硬化現象を起こすことはよく知られている。冷間加工によって断面形状を変えた場合は、形状変化による強化ばかりでなく、加工硬化による強化も当然考えられる。

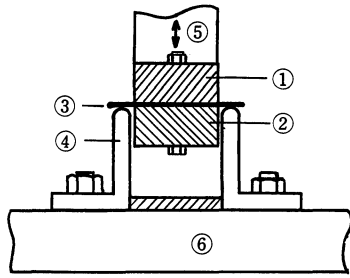
本研究では、試験片をU曲げ加工により作製し、曲げ試験を行ない、加工硬化が曲げ強さに及ぼす影響を実験的に検討した。なお試験片は加工後焼鈍した試験片（素材のまま加工したのち焼鈍し加工硬化を除いた）と加工前焼鈍した試験片（素材を焼鈍したのち曲げ加工することにより、加工硬化を与えた）および焼鈍した未加工の平板試験片の3種類を用いた。

II. 実 験 方 法

1. 試験片作製

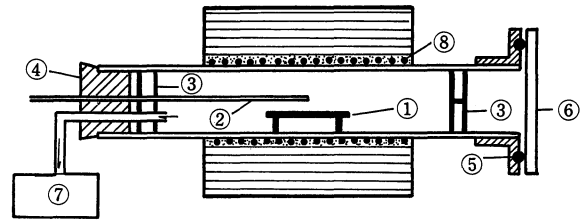
実験に用いた銅板素材は、板厚 1.0 mm, 0.8 mm, 0.6 mm の3種類である。この素材より、長さ方向を圧延方向にして、幅 51 mm, 長さ 150 mm の試料を採取した。さらに幅はベルトグラインダで320番まで研削したのちエメリペーパー0番で研磨して、幅 50 mm, 長さ 150 mm に仕上げた。

U曲げ加工に際しては、スプリングバック、スプリングゴウなどの現象が起こり、精度不良の原因になっている¹⁾。本研究でも、焼鈍後の試料を曲げ加工した時、スプリングゴウを起こし、試料はポンチにはりつく現象が起こった。この防止策として、工業界ではカウンターホルダーが用いられている²⁾³⁾。本研究では、図1に示すように、ポンチと同一寸法の型を作製し、その間に試料を置きボルト締めした。すなわち下側の型にカウンターホルダーの代りをさせることによってスプリ



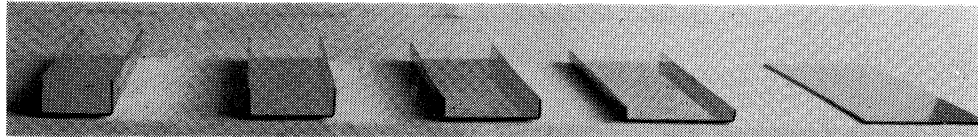
- | | |
|-------------|----------|
| ① ポンチ | ④ ダイス |
| ② カウンターホルダー | ⑤ プレス |
| ③ 試料 | ⑥ プレスベット |

図 1 曲げ装置



- | | |
|-----------|---------|
| ① 試料台 | ⑤ Oリング |
| ② 熱電対 | ⑥ 蓋 |
| ③ 遮熱板 | ⑦ 真空ポンプ |
| ④ シリコンゴム栓 | ⑧ ニクロム線 |

図 2 真空電気炉



25 30 35 40 平板

図 3 試験片の形状 (加工後焼鈍)

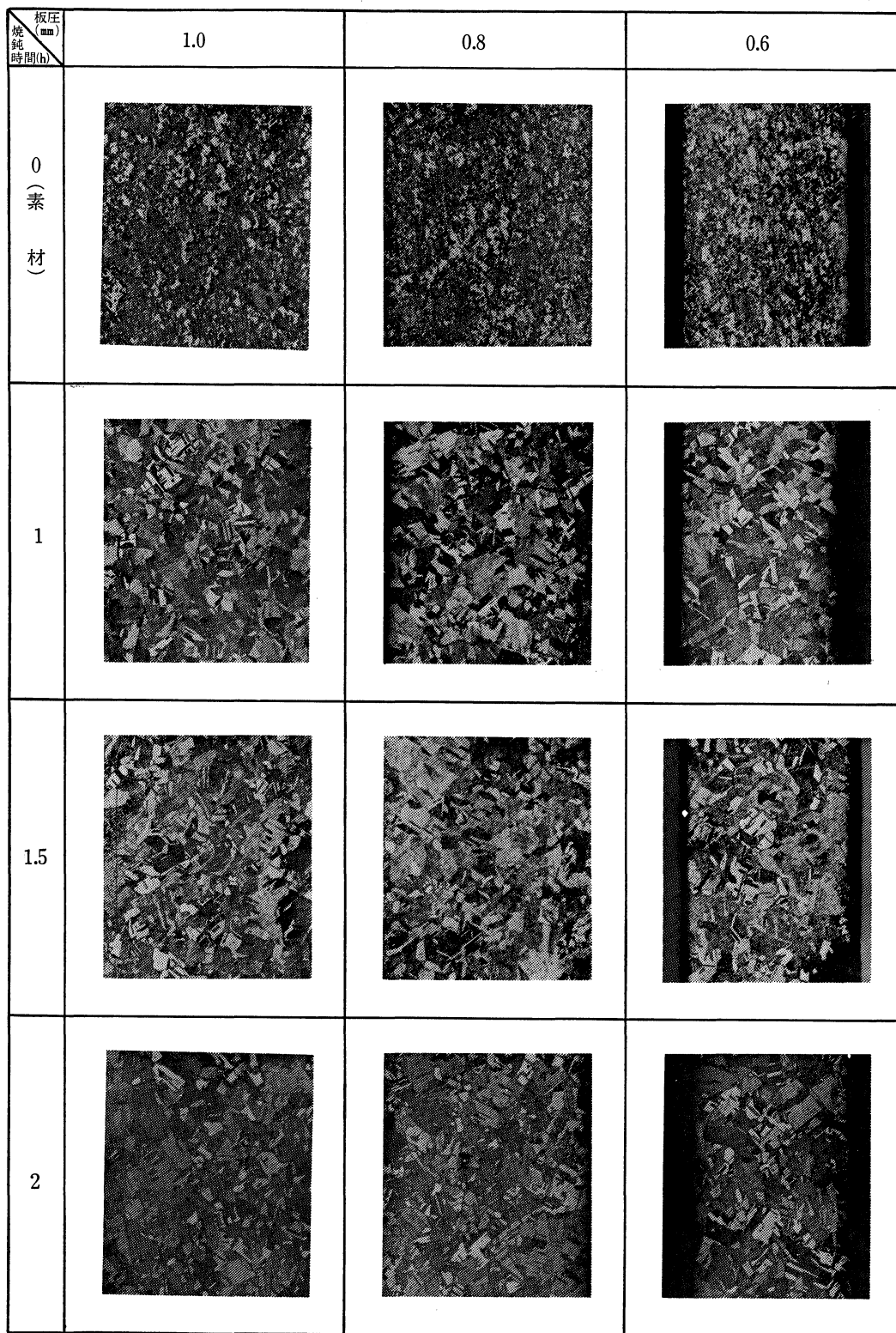
ングゴウを防止した。ポンチとカウンターホルダーの間に固定した試料をダイス上に置き、捻子プレスで加圧し、曲げ加工し試験片とした。なおポンチは、長さ 200 mm、厚さ 19 mm で、幅は 40 mm、35 mm、30 mm、25 mm、の 4 種類を用いた。U曲げ加工した試験片は、ポンチ幅 4 種類、板厚 3 種類、焼鈍方法 2 種類の各組み合わせに対し、15 枚ずつ合計 360 枚である。なお潤滑剤として 1 号マシン油を用いた。

2. 熱処理方法

焼鈍による試料表面の酸化防止のため、図 2 に示す真空電気炉を試作した。外径 70 mm、内径 60 mm の炉心管にニクロム線を直巻きし、アルミナセメントで埋没した上を石綿で巻き、外側をアルミ板で覆った横型炉である。炉内の均熱部と試料の均一加熱を考慮して、1 回に焼鈍した試料数は、平板の場合、1.00 mm 5 枚、0.8 mm は 6 枚、0.6 mm は 8 枚、曲げ加工後の試験片は、幅 40 mm、30 mm、25 mm の各 1 枚ずつを重ねた 4 枚である。

焼鈍は温度 650°C で 1 時間温度保持したのち炉中冷却した。なお焼鈍中の真空度は、0.1~0.07 Torr で全く酸化膜は形成されなかった。板厚 1.0 mm の曲げ加工後焼鈍した試験片の形状写真を図 3 に示す。

焼鈍時間は、引張試験と硬度測定から得た機械的性質の結果から判断した。引張試験は JIS 5 号試験片を用い、焼鈍時間 1 時間、1.5 時間、2 時間の 3 種類について行なった。なお耐力と弾性係数は試験片にひずみゲージを張り付け測定した。つぎに硬度の測定は、1 で述べた試料を用い、焼鈍後、試料中心部より圧延方向に平行な断面と圧延方向に直角な断面について、マイクロビッカース硬度計を用いて測定した。



0.2mm

図 4 焼鈍時間による組織の変化(圧延方向に直角)

3. 曲げ試験

曲げ試験は万能引張圧縮試験機を用い、スパン 120 mm の両端自由支持はりとして、中点荷重で行なった。荷重の測定は圧縮ロードセルで、たわみみの測定は圧縮ポンチを取り付けたクロスヘッドの移動距離を 100 倍に拡大して行ない、荷重とたわみを X-Y レコーダで記録した。なおクロスヘッドの移動速度は、0.5 mm/min である。

III. 実験結果および考察

銅の機械的性質や結晶粒の大きさは焼鈍温度と密接な関係がある。銅の焼鈍温度は、600°C～700°C が適当とされている⁴⁾。本研究で試作した真空電気炉の焼鈍条件決定のため、焼鈍温度は、650°C とし、温度保持時間を 1 時間、1.5 時間、2 時間の 3 種類変化させ、機械的性質および結晶粒の大きさを測定した。その結果は表 1 および図 4 である。

表 1 は焼鈍時間に対する機械的性質の変化である。引張強さは素材に比較して、板の厚さにかかわらず、また焼鈍時間に関係なく約 1% 程度低下している。耐力は各板厚とも、すべての焼鈍時間で、2 kg 台に低下している。つぎに全伸びは、素材の約 39% に対し、3 種類の板厚とも焼鈍時間を問わず約 44%～51% になっている。弾性係数は、板の厚さ 1.0 mm, 0.8 mm, 0.6 mm とも、素材は $1.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 、焼鈍材はすべての焼鈍時間で $1.2 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ である。硬度は、圧延方向に平行な断面と直角な断面について測定した。素材の硬度約 82～Hv87 に対し、焼鈍材は約 51～Hv68 に低下している。しかし焼鈍後の硬度にばらつきがあるのは、結晶粒が完全に均一化していないためと思われる。結晶粒の大きさは、図 4 に示した顕微鏡組織写真からわかるように、均一ではないが、素材に比較して焼鈍材はかなり成長している。しかし、時間別の結晶粒度について

表 1 焼鈍時間による機械的性質の変化

板厚(mm)	焼鈍時間(h)	機械的性質		全伸び (%)	弾性係数 $\times 10^4 (\text{kg/mm}^2)$	硬 度 (H.v)	
		引張強さ (kg/mm^2)	耐 力 (kg/mm^2)			⊥	//
1.0	0 (素材)	25.3	16.3	39.2	1.1	83.1	83.2
	1	22.5	2.6	48.2	1.2	51.3	51.1
	1.5	22.3	2.4	49.9	1.2	52.0	57.3
	2	22.5	2.4	51.3	1.2	53.0	56.3
0.8	0 (素材)	24.9	17.3	38.9	1.1	82.7	87.3
	1	22.5	2.7	48.2	1.2	54.8	53.8
	1.5	22.6	2.6	49.4	1.2	54.5	58.1
	2	21.9	2.9	47.6	1.2	53.2	56.6
0.6	0 (素材)	24.3	14.7	38.5	1.1	83.1	82.0
	1	22.5	2.5	47.2	1.2	59.3	58.4
	1.5	22.5	2.6	44.7	1.2	61.4	62.6
	2	22.5	2.6	43.8	1.2	67.9	54.7

⊥：圧延方向に直角断面 //：圧延方向に平行断面

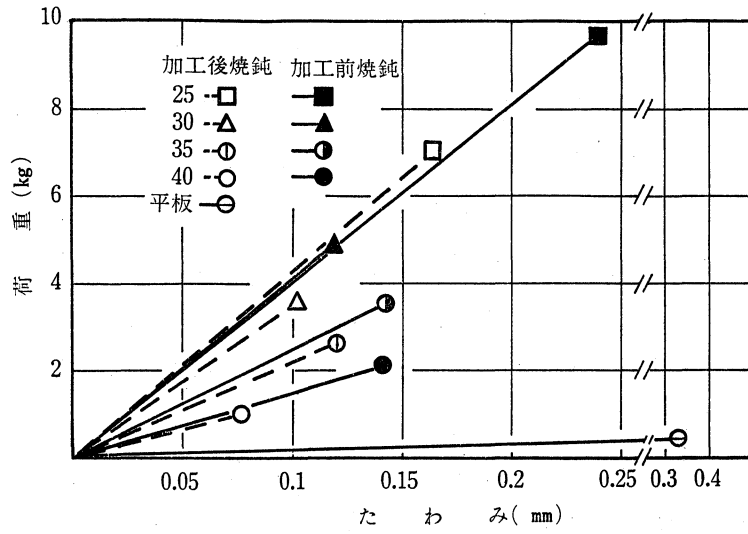


図 5 荷重とたわみの関係 (1.0mm)

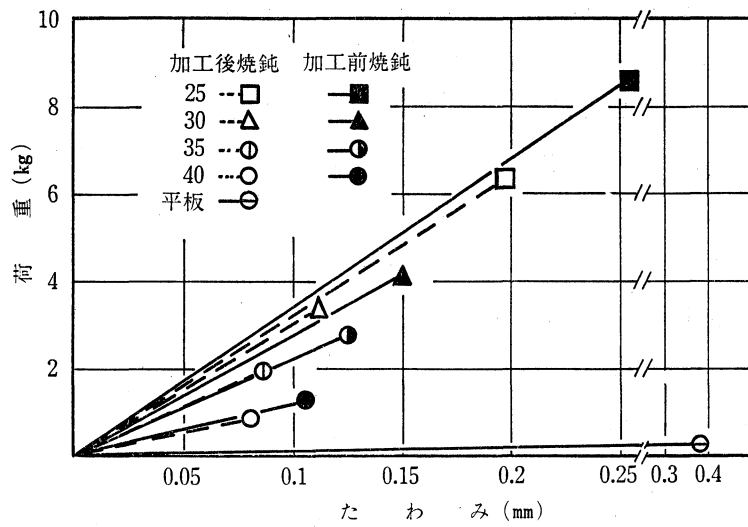


図 6 荷重とたわみの関係 (0.8mm)

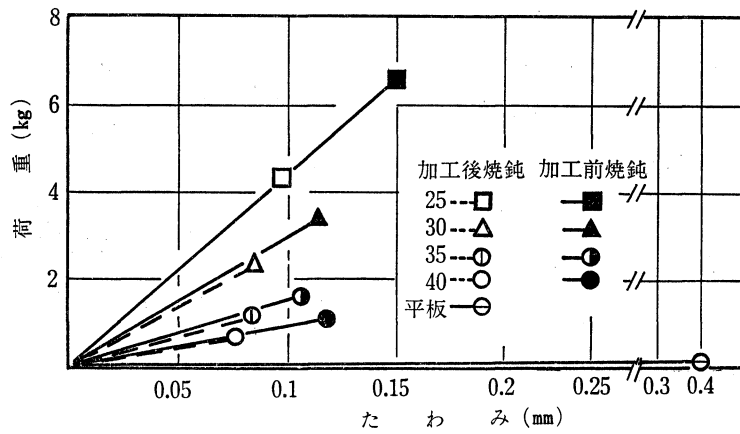


図 7 荷重とたわみの関係 (0.6mm)

は不均一で、数値的に示すまでに至らなかった。

以上の機械的性質の測定結果に基づき、焼鈍温度 650°C、温度保持時間 1 時間に決定した。

曲げ試験は、焼鈍したままの平板、U曲げ加工後焼鈍した試験片およびU曲げ加工前焼鈍した試験片について行なった。X-Y レコーダで記録した荷重-たわみ線図上で、荷重とたわみが比例関係にある最大荷重と、これに対応するたわみを読み取り、15 枚の平均値を算出した。このようにして求めた値を板厚ごとに、荷重とたわみの関係で示したのが図 5、図 6、図 7 である。

図 5 は板厚 1.0 mm の荷重とたわみの関係を示したものである。焼鈍したままの平板と加工後焼鈍した試験片を比較すると、平板の荷重に対して、曲げ加工後焼鈍した試験片は、幅の減少につれて荷重は増加している。このことは断面形状によって強度が増したことを意味している。さらに加工前焼鈍した試験片の荷重は、加工後焼鈍した試験片の荷重より、いずれの曲げ幅においても増大している。この荷重の増加すなわち強度の増大は加工硬化によるものと思われる。

図 6 は板の厚さ 0.8 mm の場合の荷重とたわみの関係である。図から明らかなように、平板の最大荷重に対し曲げ加工後焼鈍した試験片の最大荷重は、幅の減少に伴って増大している。平板の最大荷重 243 g に対し、幅 40 mm では 847 g に増大している。同じ幅 40 mm でも、加工前焼鈍した試験片では 1266 g に増大している。この傾向はすべての幅について言える。

板厚 0.6 mm の荷重とたわみの関係を示したのが図 7 である。板厚 0.6 mm の場合も、板厚 1.0 mm、0.8 mm の場合と同様に、幅が減少するに従い荷重は増大し、加工後焼鈍したものよりも加工前焼鈍した試験片の荷重が大きくなっている。

加工後焼鈍と加工前焼鈍試験片の曲げ部の硬度がいかに変化するかを見るため、切断面の硬度を測定した。幅 40 mm の場合の測定結果を図 8 に示す。図のように加工後焼鈍した試験片は、曲げの内側、中心、外側の各部とも、ほとんど硬度の変化は見られない。しかし、加工前焼鈍した試験片では、各板厚とも中心から内側あるいは中心から上側に向かって、すなわち試料表面に向かうにつれ、明らかに硬度の増大が見られる。これらの硬度の変化から、加工前焼鈍した場合は、曲げ部の材料が塑性変形により加工硬化したことを示している。一方、加工後焼鈍した場合は、焼鈍以前に受けた加工ひずみが除去されたことを示している。

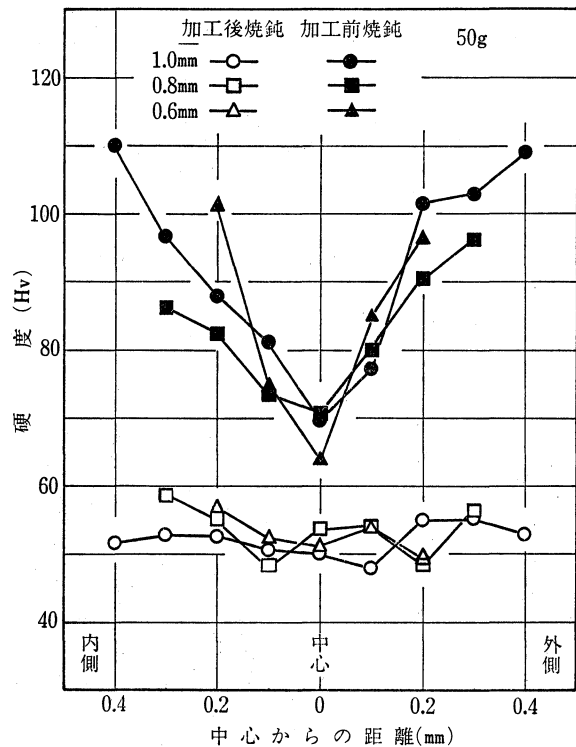


図 8 曲げ部の硬度

以上の曲げ試験結果からわかるように、平板に比べ、加工後焼鈍した試験片の荷重が増大したのは、断面形状の変化、すなわち断面二次モーメントの増加による耐荷重の増加である。さらに、加工後焼鈍した試験片に比較して、加工前焼鈍した試験片の荷重の増大は、加工硬化によるものと考えられる。

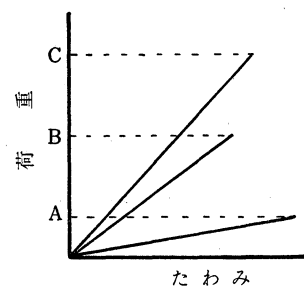


図 9

ここで、加工硬化と断面形状との関係を検討してみよう。これまで見てきた図5, 6, 7を模式的に示すと図9のようになる。図9において、焼鈍した平板の荷重をA, 加工後焼鈍した場合の荷重をB, 加工前焼鈍した試験片の荷重をCとする。(B-A)は、形状変化による荷重の増大、すなわち断面二次モーメントによる強化を示し、(C-B)は加工硬化による強度の増大を意味していることになる。これらの荷重の増加分と加工前焼鈍の荷重Cの比をとると、(B-A)/Cは、形状変化による強化の割合になる。(C-B)/Cは、加工硬化によって強化された割合を示す。また、A/Cは、平板の有していた強度の割合ということになる。表2にその計算結果を示す。

表2において、板の厚さ1.0mmでは、40mm幅において約52%と高い数値を示しているが、他は25%~27%と平均した値を示している。次に板厚0.8mmの場合は、加工硬化の影響は18%~33%で、この場合も幅40mmにおいて高い値を示している。さらに、板の厚さ0.6mmの場合は、加工硬化の影響は約29%~38%で、1.0mm, 0.8mm, と同じ傾向である。このように、幅40mmにおいて、加工硬化の影響が高いのは、同一の板厚ですべての幅の曲げにさいしても同じ加工硬化を受けているとすると、幅40mmの場合は折り曲げ部に対する加工硬化部分が大きい

表 2. 強度に及ぼす加工硬化と断面形状の割合

板厚 (mm)	曲げ後の幅 (mm)	荷重 (g)			加工硬化 (%) (C-B)/C	断面形状 (%) (B-A)/C	平板 (%) A/C
		A	B	C			
1.0	平板	416					
	40	1,020	2,125		52.0	28.4	19.5
	35	2,677	3,620		26.0	62.6	11.4
	30	3,660	4,900		25.3	66.2	8.4
	25	7,055	9,716		27.3	68.3	4.2
0.8	平板	244					
	40	848	1,266		33.0	48.0	19.2
	35	1,940	2,780		30.2	61.0	8.8
	30	3,414	4,160		17.9	76.2	5.8
	25	6,330	8,640		26.7	70.4	2.8
0.6	平板	120					
	40	670	1,086		38.3	50.6	11.0
	35	1,160	1,631		28.8	63.8	7.3
	30	2,361	3,430		31.1	65.3	3.5
	25	4,320	6,600		34.5	63.6	1.8

めと思われる。また、1.0 mm が特に大きいのは、図 8 に示した硬度からも推察できる。つぎに、断面形状の影響は、どの板厚とも幅の減少につれて、その割合が増加傾向にあるのは、断面二次モーメントの増加によるものと思われる。

このように、冷間加工すると形状変化のみならず加工硬化による強化も大きいことを実験的に確認できた。さらに曲げ部の径、結晶粒度、加圧時間、加圧力、併用する板の種類等の影響をより詳細に検討する必要がある。

IV. む す び

U曲げ加工したはりの曲げ強さに加工硬化がどの程度影響するかを認識するため、板厚の違う 3 種類の銅板を用い、4 種類に形状をかえて曲げ試験を行ない、断面形状との関係を比較した結果をまとめると次のようである。

1. 曲げ後の幅が大きい場合に加工硬化の影響が大きい。幅 40 mm の場合、板厚 1.0 mm は 52%、0.8 mm は 33%、0.6 mm は 38%であった。
2. 他の幅でも約 18%~35%の加工硬化の影響を示した。

なお、本研究を進めるにあたり、終始適切な助言をいただいた宇都龍行先生に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 加藤健三：金属塑性加工学。丸善，296-297 (1971)
- 2) 中川威雄他：薄板のプレス加工。実教，74-76 (1978)
- 3) 橋本 明：プレス曲げ加工。日刊工業，50-60 (1977)
- 4) 濱住松二郎：非鉄金属および合金。内田老鶴圃，39-40 (1979)