

U 曲げ加工したはりの曲げ強さに及ぼす加工硬化と 断面形状の影響

南 孝 一

(1985年10月15日 受理)

Effect of Work Hardening and Cross-Sectional Shape on the Bending Strength of U-Forming Beam

Kouichi MINAMI

I. 緒 言

板金を塑性加工によって多種多様な断面形状に成形した製品は、自動車、建材、キャビネット、電気製品などの広範な分野において大量に使用されている。これらの製品の断面形状は所要の機能と強度を有するように成形されている。金属材料に塑性加工を行うと、加工後材料は残留ひずみのためひずみ硬化すなわち加工硬化する。塑性加工による断面形状の変化は、断面係数の増大による強化ばかりでなく、加工硬化による強化も考えられる。

筆者は、焼鈍したままの平板をU曲げ加工したはりとU曲げ加工後焼鈍したはりの曲げ試験の結果、加工硬化がはりの曲げ強さに影響していることを報告した¹⁾。先の報告では、曲げ加工に用いた平板の幅を 50 mm 一定として、フランジ高さを 4 段階 (5, 7.5, 10, 12.5 mm) に変化させたため、ウェブ幅は同じフランジ高さに対して 1 種類に限定された。

本報では、フランジ高さを 3 種類にし、同じフランジ高さに対しウェブ幅を 3 種とり、はりの曲げ強さに断面形状 (フランジ高さ H , ウェブ幅 W) と加工硬化がどのように関係するかを実験的に検討した。

II. 実 験 方 法

1. 試験片

実験には板厚が $t=0.585$ mm (以下 0.6 mm と記す), 0.8 mm, 1.025 mm (以下 1.0 mm と記す) の 3 種の市販銅板を用い、引張試験片及びU曲げ加工用平板は長手方向が素材の圧延方向と平行になるように採取した。

U曲げ加工用平板はシャーリング後フライス加工しエメリーペーパー 0 番で切削面を研磨して仕上げた。このようにして作製したU曲げ加工用平板は、各板厚につき、幅 35, 40, 45, 50, 55 mm,

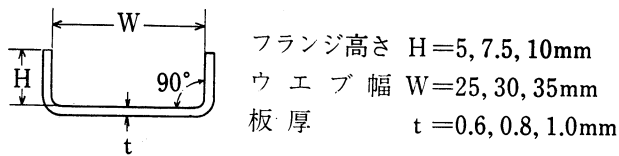


図 1. 成形断面形状

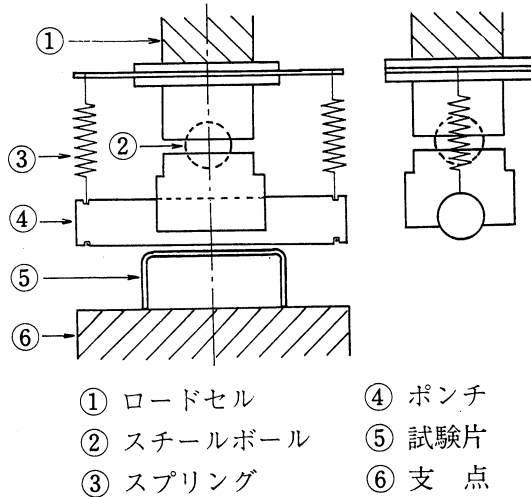


図 2. 負荷装置

ランス: $1.1t$ (t は板厚), ポンチ先端半径: 1.0 mm , 潤滑油: 1号マシン油, 背圧 (ナット締付トルク): 未焼鈍の平板は 15 kgf-cm , 焼鈍した平板は 7 kgf-cm であった。

U曲げ加工により成形した曲げ試験片は, ウェブ幅 $W=25, 30, 35 \text{ mm}$, フランジ高さ $H=5, 7.5, 10 \text{ mm}$, 板厚 3種, 焼鈍した平板をU曲げ加工した試験片と未焼鈍の平板を曲げ加工後焼鈍した試験片の2種, これらをそれぞれ組み合わせた54種類である。

焼鈍は試料表面の酸化防止のため, 内径 60 mm の炉心管にニクロム線を巻いて自作した真空電気炉を用いて焼鈍した。焼鈍条件は先の報告と同じく, 焼鈍温度 650°C で1時間温度保持後, 炉中冷却した。1回に焼鈍した試料数は, 平板は 1.0 mm 5枚, 0.8 mm 6枚, 0.6 mm 8枚, U曲げ加工後の試験片は, 同一フランジ高さでウェブ幅 $25, 30, 35 \text{ mm}$ の各1枚ずつを重ねた3枚である。

焼鈍した供試材の JIS 5号試験片による引張試験結果を表1に示した。縦弾性係数および耐力は塑性域用ひずみゲージを貼り付けて測定した。

2. 曲げ試験

曲げ試験は, スパン 120 mm の両端支持ばりに中央集中荷重で行った。負荷はフランジ部を下側にしてウェブ側に 0.5 mm/min の速度で行った。フランジ部を上にして負荷すると, 圧縮ポンチと試験片フランジ部との接触は2点の点接触となり, 除荷後試料面にポンチの痕跡が見られたのでフランジ部を下にして4点接触にした。負荷装置は, 図2に示すように, 曲げ荷重測定用ロードセルの先端に取り付けたポンチが微少な試料の傾きに対して調心するように, スチールボールを介しボ

長さ 150 mm である。これらの平板を図1に示す形状寸法にU曲げ加工し曲げ試験片とした。

プレス金型でU曲げ加工を行う場合, 製品形状精度は加工条件 (ポンチ・ダイスのクリアランス, 潤滑油, ポンチ刃先形状, 背圧力) により大きく影響される²⁾³⁾⁴⁾。本研究では, 自作した曲げ型を使用して捻子プレスで曲げ加工したので, 焼鈍した平板の曲げ加工においてはスプリングゴウが, 未焼鈍材の曲げ加工においてはスプリングバックが起こった。これらの防止策として, 先の報告と同様カウンターホルダーの代わりにポンチと同一寸法の型を作製し, その間に平板をはさみ, ナットの締付トルクを調節することにより成形した。このU曲げ時の加工条件は, 片側クリア

表 1. 供試材の機械的性質

機械的性質 板厚(mm)	引張強さ kgf/mm ²	耐力 $\sigma_{0.2}$ kgf/mm ²	破断伸び %	縦弾性係数 kgf/mm ²
1.0	22.5	2.8	50	1.27×10^4
0.8	22.3	3.0	49	1.27
0.6	22.3	2.5	43	1.20

ンチとロードセルをスプリングで組み付けた装置を自作した。たわみは荷重測定用ロードセルを取り付けたクロスヘッドの変位量を伸長拡大機構の拡大比 100 倍で測定した。これらの荷重とたわみの関係を X-Y レコーダーで記録した。

Ⅲ. 実験結果および考察

1. 試料断面形状と断面係数

平板にU曲げ加工を加え断面形状を変化させることによって断面係数がどのように変化するかを計算してみる。いま計算モデルとして図3のような断面形状の両端支持ばりとして、P：荷

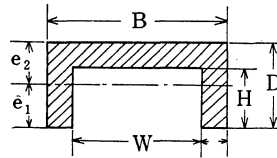


図 3. 計算モデル

重、 σ ：荷重点における応力、M：曲げモーメント、I：断面二次モーメント、Z：断面係数、 e_1 、 e_2 ：はりの中立軸から上側および下側の最外側までの距離、 η ：中立軸から任意点までの距離、とすると、

$$I = \frac{(BD^2 - WH^2)^2 - 4BDWH(D-H)^2}{12(BD - WH)}, \quad e_1 = \frac{BD^2 - WH^2}{2(BD - WH)}, \quad e_2 = \frac{BD^2 - 2WHD + WH^2}{2(BD - WH)},$$

$$\sigma = \frac{M}{I} \eta \quad (1)$$

で表される。

このような断面の図心がはりの高さの中央にない場合 (1) 式より

$$\sigma_t = Me_1/I, \quad \sigma_c = Me_2/I$$

となり、フランジ部の下側最外側に引張応力 σ_t が、ウェブ部上側最外側に圧縮応力 σ_c が作用することになる。また

$$I/e_1 = Z_1, \quad I/e_2 = Z_2 \quad \therefore \sigma_t = M/Z_1, \quad \sigma_c = M/Z_2$$

本報で用いた全てのはりで、 $e_1 > e_2$ となるため、 $Z_1 < Z_2$ となり、常に $\sigma_t > \sigma_c$ (絶対値でも) となるので、フランジ部最外側の最大引張応力 σ_t だけについて考えればよい。

はりを設計する場合、許容応力を σ_b とすると、 $\sigma_b = M/Z$ として、そのはりに生ずる最大曲げモ

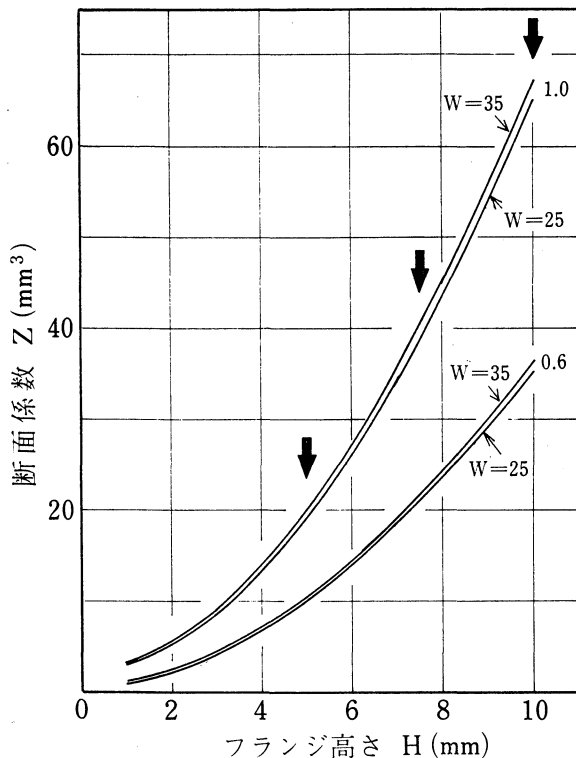


図 4. フランジ高さ と断面係数の関係

板厚 1.0 mm, 0.6 mm, ウェブ幅 $W=25, 35$ mm でフランジ高さ H を 1.0~10 mm まで変化させた場合の断面係数 Z_2 の計算結果を図 4 に示した。

ウェブ幅を一定にしてフランジ高さを変えた場合、断面係数は指数函数的に増加している。この断面係数の増加によって最大曲げモーメントも断面係数に比例して増加する。つぎにウェブ幅と断面係数との関係は、同じフランジ高さに対してウェブ幅が 25 mm から 35 mm に変化しても断面係数の増加は微小（例えば、板厚 1.0 mm, フランジ高さ $H=10$ mm の場合、ウェブ幅が 25 mm から 35 mm に増加しても Z_2 の値は 60.05 から 67.45 mm³）である。このことは、ウェブ幅を 25 mm から 35 mm まで 10 mm 変化させても断面係数の増加による曲げモーメントの増加は少ないことを示している。図中に 3 本の矢印で示す点は本報で用いた試験片のフランジ高さ $H=5, 7.5, 10$ mm の位置である。

2. 実験結果

曲げ試験で求めた荷重-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を読み取り、10枚の平均値から最大曲げ荷重を求めた。ウェブ幅を一定として、フランジ高さ と最大曲げ荷重との関係を示したのが図 5, 図 6, 図 7 である。実験に用いた試料は、フランジ高さを 3 種類にしたため、フランジ高さ $H=7.5$ mm に変曲点を有するグラフに見えるが、図 4 の矢印の 3 点を結んだとして対比すると、同じ傾向を示していると考えられる。

図 5 はウェブ幅 $W=25$ mm の場合のフランジ高さ と最大曲げ荷重との関係を示したものである。焼鈍したままの平板と U 曲げ加工後焼鈍したはりの最大曲げ荷重を比較すると、3 種の板厚とも、

一メントと、使用するはりの材料の許容曲げ応力から、 $Z=M/\sigma_b$ で計算して得た断面係数の値に基づいてはりの断面を決定している。この σ_b の値はそのはりの使用条件によって決定される。したがって、フランジ部下側の最外側に作用する最大引張応力 σ_t も許容応力 σ_b の範囲になければならない。本報の U 曲げ加工後焼鈍したはりの最大曲げ応力は $\sigma_t=0.9\sim 2$ kgf/mm² の範囲にあった。この値は表 1 に示した耐力 (2.5~3 kgf/mm²) 以下であり、静下重下で行った本研究では問題ないと考えられる。

したがって、本報のようにウェブ幅 W とフランジ高さ H を変化させた場合は、許容応力 σ_b の値を一定とすると、断面係数 Z_2 の増加につれ曲げモーメント M も増大することになる。

板厚 1.0 mm, 0.6 mm, ウェブ幅 $W=25,$

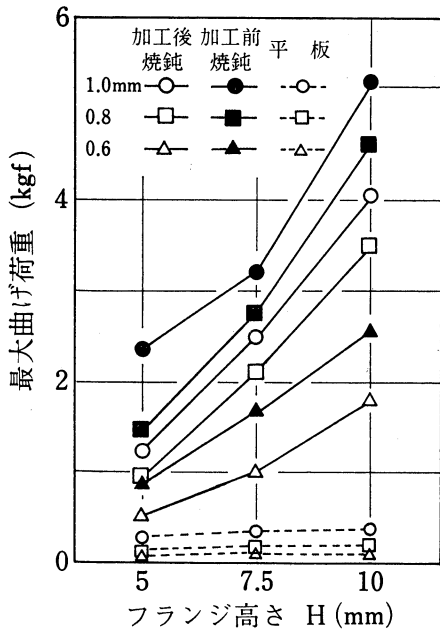


図 5. フランジ高さ と最大曲げ荷重の関係 (W=25mm)

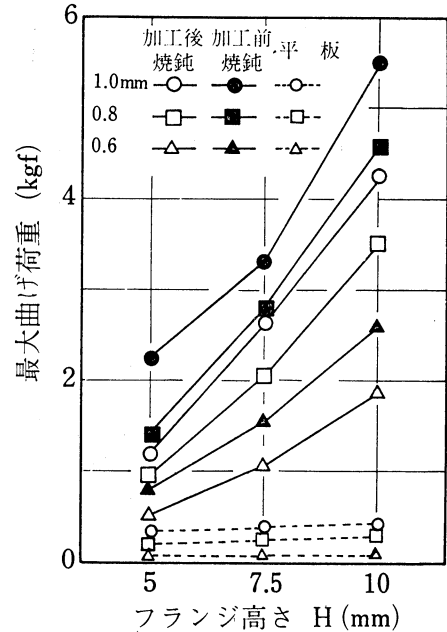


図 6. フランジ高さ と最大曲げ荷重の関係 (W=30mm)

平板の最大曲げ荷重は大して変化していないが、U曲げ加工によってフランジを有するはりの最大曲げ荷重はフランジ高さの増加につれ飛躍的に増大している。

次に、U曲げ加工前に焼鈍したはりの最大曲げ荷重とU曲げ加工後焼鈍したはりの最大曲げ荷重を比較すると、板厚、フランジ高さのいかんにかかわらず、焼鈍後曲げ加工したはりの最大曲げ荷重は加工後焼鈍したはりのそれよりかなり増加している。

ウェブ幅 30 mm の場合のフランジ高さ H と最大曲げ荷重との関係を示したのが図 6 である。ウェブ幅 25mm と同様、未成形の平板に比べ、加工後焼鈍したはりの最大曲げ荷重は、フランジ高さの増加につれ著しく増大している。また焼鈍後曲げ加工したはりの最大曲げ荷重は加工後焼鈍したはりの最大曲げ荷重よりさらに増加して

いる。しかも両者の最大曲げ荷重の増加傾向は、板厚 1.0 mm、フランジ高さ H=7.5 mm を除き、ほぼ平行する形で増加している。

図 7 はウェブ幅 W=35 mm の場合のフランジ高さ と最大曲げ荷重との関係である。加工後焼鈍したはりの最大曲げ荷重は、焼鈍したままの未成形の平板に比較して、ウェブ幅 W=25 mm, 30 mm と同様に、どの板厚においても増大している。曲げ加工前に焼鈍したはりと曲げ加工後焼鈍したはりの最大曲げ荷重の関係も図 5、図 6 と同様の傾向を示している。

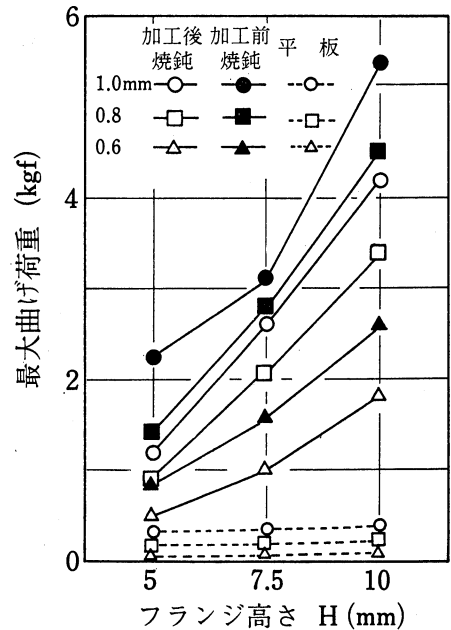


図 7. フランジ高さ と最大曲げ荷重の関係 (W=35)

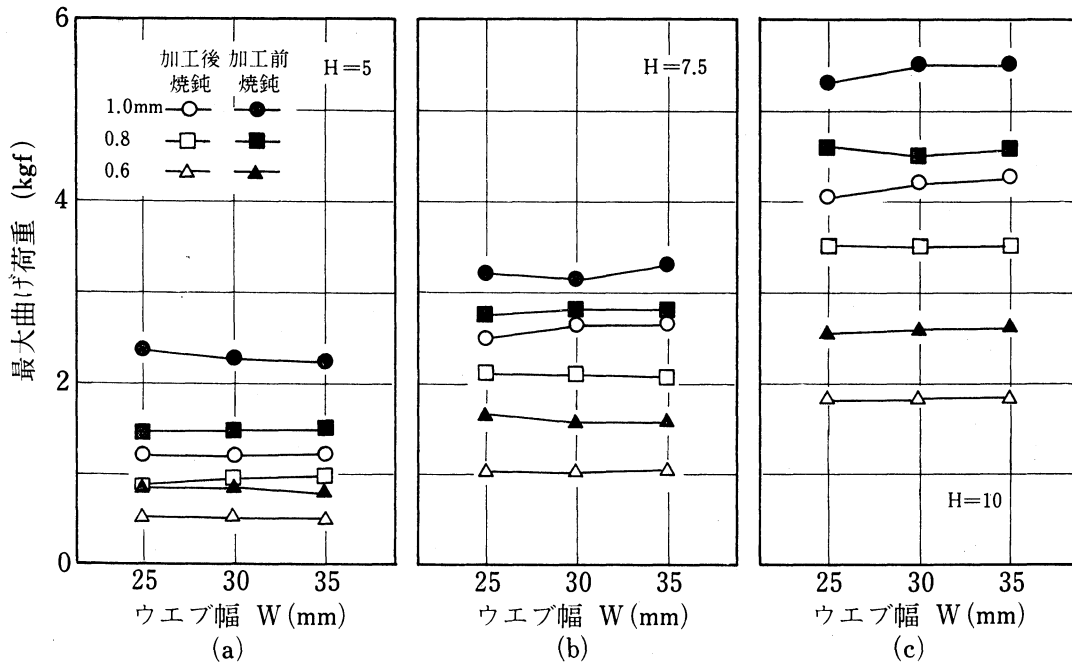


図 8. ウェブ幅と最大曲げ荷重の関係

このように、ウェブ幅 $W=25, 30, 35$ mm とともに板厚にかかわらず、加工後焼鈍したり最大曲げ荷重が未成形の平板の最大曲げ荷重より大きく、さらに、フランジ高さの増加につれ最大曲げ荷重が増加している。これはフランジ高さの増加による断面二次モーメントあるいは断面係数の増加のため最大曲げ荷重が増加したことを表わしている。すなわち、断面形状の変化によって強化されたことを示している。

一方、板厚、ウェブ幅を問わず、曲げ加工前焼鈍したはりの最大曲げ荷重が、曲げ加工後焼鈍したはりの最大曲げ荷重より増加したのは、断面二次モーメント又は断面係数は同一であるため形状変化による強化は考えられず、U曲げ加工による曲げ部のひずみ硬化すなわち加工硬化によるものと考えられる。

次に、フランジ高さを一定にし、ウェブ幅が変化したときの最大曲げ荷重の変化を示したのが図 8 である。図からわかるように、フランジ高さの増加につれ最大荷重の増加は前述の通りである。しかし、同一フランジ高さでウェブ幅が変化しても、曲げ加工後焼鈍したはり、焼鈍後曲げ加工したはりとも最大曲げ荷重の変化は顕著に表われなかつた。また、曲げ加工後焼鈍したはりにウェブ幅の増加による強度の増加が見られないのは、1. の計算結果からもわかるように、断面二次モーメントあるいは断面係数の増加が少ないためと考えられる。これは、曲げ加工を行っても曲げひずみを受ける部分すなわち加工硬化を受ける部分はある限られた範囲、つまり加工硬化の及ぶ範囲は一定の限られた範囲にとどまり、最大曲げ荷重に影響するようなウェブ部の広範囲にわたって加工硬化しなかつたことを示している。

3. 強度に対する断面形状と加工硬化の割合

表 2. 強度に対する断面形状と加工硬化の割合

板厚 t (mm)	フランジ高さ H (mm)	ウェブ幅 W (mm)	最大曲げ荷重 (kgf)			平板(%) P_0/P_2	断面形状(%) $(P_1-P_0)/P_2$	加工硬化(%) $(P_2-P_1)/P_2$
			P_0	P_1	P_2			
0.6	5.0	25	0.044	0.512	0.860	5.1	54.4	40.5
		30	0.064	0.508	0.852	7.5	52.1	40.4
		35	0.073	0.516	0.800	9.1	55.4	35.5
	7.5	25	0.064	1.020	1.688	3.8	56.6	39.6
		30	0.073	1.020	1.576	4.6	60.1	35.3
		35	0.092	1.064	1.568	5.9	62.0	32.1
	10	25	0.073	1.834	2.552	2.9	69.0	28.1
		30	0.092	1.840	2.600	3.5	67.2	29.2
		35	0.104	1.856	2.600	4.0	67.4	28.6
0.8	5	25	0.144	0.900	1.450	9.9	52.1	37.9
		30	0.166	0.900	1.435	11.6	51.1	37.3
		35	0.217	0.952	1.445	15.0	50.9	34.1
	7.5	25	0.166	2.100	2.750	6.0	70.3	23.6
		30	0.217	2.096	2.820	7.7	66.6	25.7
		35	0.248	2.073	2.800	8.9	65.2	26.0
	10	25	0.217	3.503	4.600	4.7	71.4	23.8
		30	0.248	3.460	4.550	5.5	70.6	24.0
		35	0.307	3.500	4.587	6.7	69.6	23.7
1.0	5	25	0.287	1.208	2.350	12.2	39.2	48.6
		30	0.349	1.196	2.260	15.4	37.5	47.1
		35	0.359	1.196	2.241	16.0	37.3	46.6
	7.5	25	0.349	2.490	3.212	10.9	66.7	22.5
		30	0.359	2.640	3.133	11.5	72.8	15.7
		35	0.410	2.640	3.300	12.4	67.6	20.0
	10	25	0.359	4.050	5.300	6.8	69.6	23.6
		30	0.410	4.218	5.500	7.5	69.2	23.3
		35	0.434	4.271	5.516	7.9	69.6	22.6

焼鈍した未成形の平板の最大曲げ荷重を P_0 、U曲げ加工後焼鈍したはりの最大曲げ荷重を P_1 、U曲げ加工前に焼鈍した試験片の最大曲げ荷重を P_2 とすると、 (P_1-P_0) は断面形状の変化による最大曲げ荷重の増加、 (P_2-P_1) は加工硬化による最大曲げ荷重の増加分を表わすことになる。これらの値と加工硬化をもつはりの最大曲げ荷重 P_2 との比をとると、 $(P_1-P_0)/P_2$ は断面形状の変化による強化の割合を、 $(P_2-P_1)/P_2$ は加工硬化による強化の割合を、 P_0/P_2 は未成形の平板の強度割合を示すことになる。これらの計算結果を示したのが表 2 である。

表 2 において、加工硬化がはりの曲げ強さに占める割合は、フランジ高さ 5 mm、板厚 0.6 mm では 35.5~40%、板厚 0.8、 $H=5$ で 34.1~37.9%、板厚 1.0mm、 $H=5$ mm では 46.6~48.6% になっている。さらにフランジ高さ $H=7.5$ mm、10 mm と増加するにつれ加工硬化の影響は減少

し、逆に断面形状による強化の割合が増大している。しかし、フランジ高さ $H=10\text{ mm}$ の場合、板厚 0.6 mm で $28\sim 29\%$ 、 0.8 mm で $23.7\sim 24\%$ 、 1.0 mm で $22.6\sim 23.6\%$ の加工硬化の影響がある。その値は成形前の平板の強度割合よりはるかに大きな値である。

一方、同じフランジ高さでウェブ幅が変化した場合は、加工硬化による強化の割合に明確な差異は認められなかった。板厚 0.6 mm と 1.0 mm のフランジ高さ 7.5 mm において、実験値に 7% 位のばらつきがあった以外は、同一フランジ高さに対してウェブ幅が変化しても 5% 以下の範囲で増減し、一定の傾向は示さなかった。その理由は、同一ポンチ半径、同一背圧、同一ポンチ・ダイスすきまの下でのU曲げ加工では、曲率部と平坦部で加工硬化を受ける範囲および加工硬化率が変わらなかったためと考えられる。

IV. む す び

U曲げ加工により成形したはりの曲げ強さに、加工硬化と断面形状がどの程度影響しているかを調べるための基礎資料を得るため、フランジ高さ $H=5, 7.5, 10\text{ mm}$ 、ウェブ幅 $W=25, 30, 35\text{ mm}$ 、板厚 $t=0.6, 0.8, 1.0\text{ mm}$ について実験した結果つぎのことが明らかになった。

1. フランジ高さが同一でウェブ幅が変化しても、加工硬化による曲げ強さへの影響は見られなかった。その理由は曲率部と平坦部の加工硬化率が変わらなかったためと考えられる。
2. はりの曲げ強さには、ウェブ幅に関係なく、フランジ高さが小さいほど加工硬化の影響は大きい。
3. はりの曲げ強さには、ウェブ幅に関係なく、フランジ高さが大きいほど断面形状の影響は大きくなる。
4. はりの曲げ強さには、フランジ高さ $H=5\sim 10\text{ mm}$ の範囲では、断面形状が加工硬化より大きく影響している。

最後に本研究に際して有益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) 南 孝 一 鹿児島大学教育学部研究紀要 35, 107 (1983)
- 2) 中野 望他 塑性と加工 Vol'21 No.237 (1980-10)
- 3) 日本塑性加工学会編 プレス加工便覧 丸善 227-239 (1975)
- 4) 中川威雄他 薄板のプレス加工 実教 74-76 (1978)