

板材曲げ加工におけるハーフスロットベンディングの 効果に関する研究

日本大学理工学部機械工学科 教授 星野倫彦
(平成 16 年度研究開発助成 AF-2004020)

キーワード： 板金プレス曲げ，ゆがみ抑制，ハーフスロット，ビス穴

1. 緒言

近年，プレス曲げ加工の分野では，多様な製品を短納期で対応することが求められ，CAEを用いた金型の設計などによる高能率の生産システムが開発されている¹⁾。その金型設計の段階で形状不良を事前に予測し，適切な金型形状を作成することが必要である。しかし現在，加工部近傍にビス穴やドリル穴を有する板材の曲げ加工において，穴の変形の予測と所要の製品を得るための金型の修正は現場の経験と勘に依存しており，時間とコストを要している²⁾。

そこで本研究では，穴の寸法，位置などの様々な条件下で曲げた場合の板材の変形の計測と FEM 解析による変形の予測を通じ，工具設計に必要なデータベースの構築を図る。

本報では，実験を行う際の計測法を検討し，その測定結果の一部を報告する。実験結果は動的陽解法解析ソフト「LS-DYNA ver.970」の結果と比較し，解析に用いたモデルが妥当であるか検証を行い，穴の変形を抑制することが可能な溝(以下，スロット)の形状を検討したのでこれも報告する。

2. 実験方法³⁾

実験の対象としたのは，家電ケースなどのビス穴等を曲げ部近傍に有する場合⁴⁾であり，通常ビス穴を開けた後に曲げ加工されている。この穴の曲げ加工によるゆがみを測定するために，X-Y テー

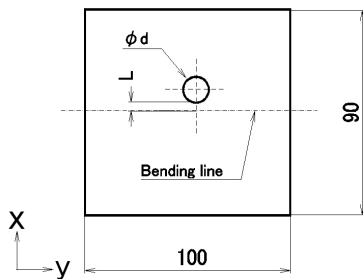
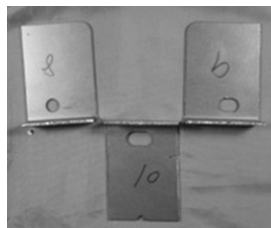


Fig.1 Model of test piece

ブルとレーザー変位計を用いた。曲げ加工前のビス穴の形状，位置を Fig.1 に示す。対象とするビス穴は Fig.2 に示す。



(a) Before bending

(b) After bending

Fig.2 Test piece

本研究では，プレス曲げ加工を行い，パンチ先端の半径が 0.6mm，ダイ肩部の半径は 2.0mm，ダイ及びパンチ先端部

の角度は 88° のものを使用した。また，加工機はアマダ社製 HDS8025NT を使用し，加工方法はスプリングバックが穴に与える影響を考え，影響の少ない加圧曲げを行った。

Fig.3 に穴を測定した箇所と，試験片の加工前後での形状の変化を断面図で示す。測定を簡略にするため，穴の全体ではなく，変形が最大となる中心部分のみ測定した。試験片を Fig.4 に示す X-Y テーブルを用いて，Y 方向 25μm ピッチ，X 軸方向長さ 5.0mm の走査線 200 本上をレーザー変位計が動くようにし，その位置の試験片の高さ(Z 軸)を変形前の基準としてレーザー変位計で上部より測定することで穴の形状を得た。

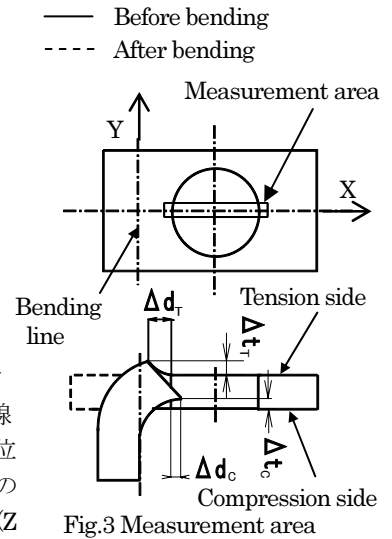


Fig.3 Measurement area



Fig.4 Measuring device

3. 実験結果

レーザー変位計の測定結果より作成した曲げ加工後の穴形状(L=1.5mm，φ=5.0mm の時の)の曲げ引張り側を Fig.5 に示す。Fig.5 中の X 軸方向の負側に曲げの中心部分(以下，曲げ線)がある。また，Fig.5 は 1 本の走査線上の測定点を 1 本の等高線として結び，都合 200 本を重ねてグラフ表示したものである。

Fig.5 より，曲げ線から離れている部分(図中の X>7.0 の範囲)は変形していないことが分かる。これは，曲げ線上で曲げ内側で圧縮，外側で引張となる板面 X 方向の応力⁵⁾が，

穴によって開放されているためだと考えられる. Fig.5 をもとに作成した穴 ($\phi 5.0\text{mm}$) の変形量 (Δd_r , Δd_c , Δt_r , Δt_c のそれぞれの最大値) と曲げ線と穴との距離 L との関係図を Fig.6 に示す.

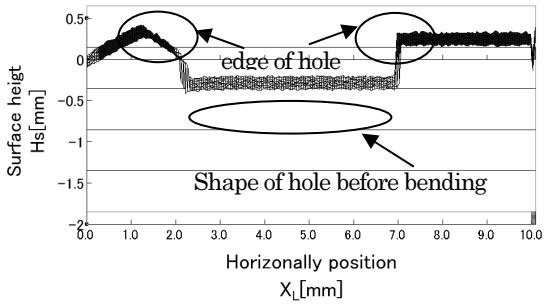


Fig.5 Deformation of hole

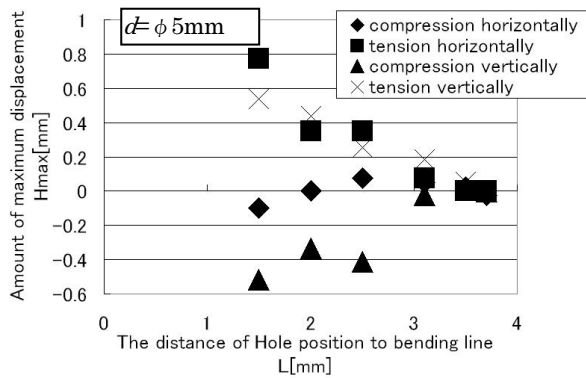


Fig.6 Maximum displacement of $d=\phi 5\text{mm}$

Fig.6 には、それぞれの変位量の最大値を示すが、圧縮、引張側ともにまた、 X 軸、 Z 軸方向ともに、全体的に曲げ線からの距離が長くなるにつれて穴の変形量も少なくなっていくことが分かる。これも先程と同様に距離が長くなるにつれて穴にかかる応力が減少しているからだと考えられる。次に曲げ線からの距離が $L=2.5\text{mm}$ の場合の、穴直径の変形量と加工前の穴の直径 d との関係図を Fig.7 に示す。

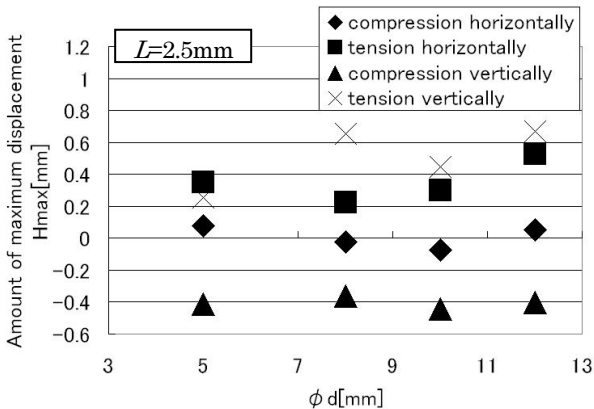


Fig.7 Maximum displacement of $L=2.5\text{mm}$

Fig.7 より、 $\phi 8\text{mm}$ を境に穴の直径を増加させると引張側の変形量も増加することが分かる。これは穴の直径が大きくなると、穴の円周部分が曲げ線方向に広がっていくために、穴に作用する荷重に耐える穴の縁部分が減少したためだと考えられる。

4. 解析条件

解析に用いた板材の物性値は SS400 を想定し、弾塑性体とした。また、工具は SKD11 を想定し、剛体とした。モデルとしては、 $L=2.5 \cdot \phi 8$, $L=2.5 \cdot \phi 10$, $L=2.5 \cdot \phi 12$, $L=3.1 \cdot \phi 5$, $L=3.5 \cdot \phi 5$ のものを用いた。解析モデルを Fig.8 に、解析条件を Table1 に示す。

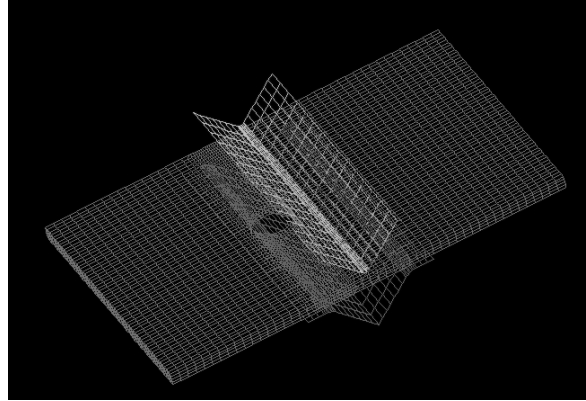
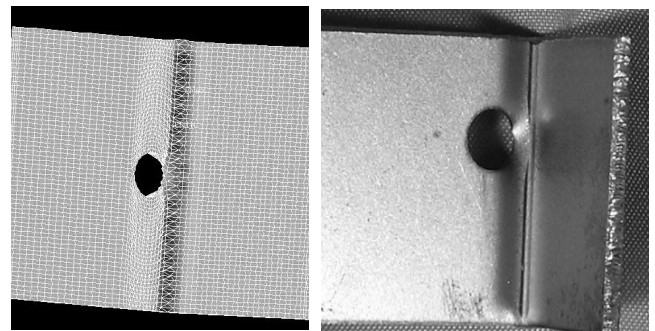


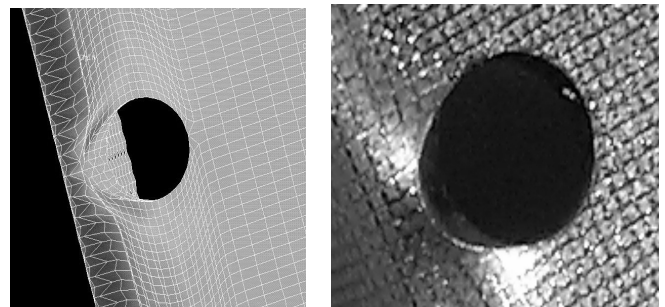
Fig.8 Analysis model

Table1 Mechanical properties of work-pieces

	Work piece	Punch, Die
Material	SS400	SKD11
Mass density [kg/m^3]	7.85×10^3	7.85×10^3
Young's modulus [GPa]	210	210
Poisson's ratio [-]	0.3	0.3
Strength coefficient [MPa]	441	
Hardening exponent [-]	0.169	



(a-1) Analysis (a-2) Experiment
(a) Compression side



(b-1) Analysis (b-2) Experiment
(b) Tension side

Fig.9 Comparison of analysis with experiment

5. 解析結果

まず、解析の妥当性を確認するため実験結果と解析結果の比較を行った。比較は、 $L=1.7\text{mm}$ 、 $\phi=5.0\text{mm}$ のモデルで行った。解析結果と実験結果を Fig.9 に示す。

Fig.9 より圧縮側、引張側とも形状が似ている結果を算出することができた。形状が似ているので、数値でも比較を行った。比較方法は、

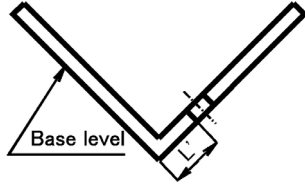


Fig.10 Model of measurement

Fig.10 に示すように穴のない面を基準面とし、そこから最も接近している穴周辺部までの距離を $L\text{mm}$ とし、測定した。測定器具は、

精度 $1/20\text{mm}$ のノギスを使用した。測定結果を Table2 に示す。また、 L の位置をかえた場合の応力の変化について比較した。その結果を Fig.11 に示す。ここで、Fig.11 中の \times と数字は、最大応力地点とその値を示している。

Table2 Comparison of analysis with experiment

	Analysis $L_{FEM}[\text{mm}]$	Experiment $L_{EXP}[\text{mm}]$
$L=2.5 \cdot \phi 8$	3.80	3.70
$L=2.5 \cdot \phi 10$	4.00	4.00
$L=2.5 \cdot \phi 12$	4.30	4.00
$L=3.1 \cdot \phi 5$	4.60	4.55
$L=3.5 \cdot \phi 5$	4.80	4.55

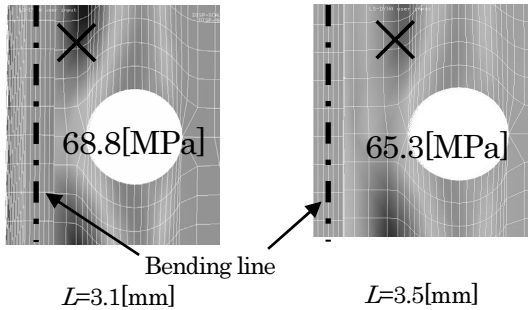


Fig.11 Result of analysis

Table2 より様々な条件でほぼ同等の値を示すことができた。このことから FEM 解析の結果の妥当性を確認することができた。また Fig.11 より、実験において曲げ線からの距離が長くなると変形量が減少する理由が、応力の減少によって引き起こされることを確認することができた。

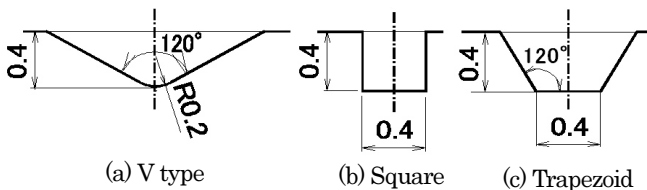


Fig.12 Shape of slot

6. スロット形状

次にスロットの形状について検討を行った。Fig.12 にその形状を示す。なお、スロットは、中心線と曲げ線が一致する

位置に付けた。スロットを付けた解析モデルは、 $L=1.5 \cdot \phi 5$ の寸法で行った。比較方法は、穴が最も変形の起きる曲げ線に垂直な方向の、穴径の 2 点間距離の変化量で表した。また、2 点間距離の変化量は穴の直径方向の変化量 Δd と、立体的に変形した場合の板厚方向の変化量 Δt に分けられる。また穴の変形は曲げの圧縮側と引張側で異なる。Table3 に FEM 解析による各スロットの変形量を表す。なお、変化量はそれぞれ直径、板厚が増加する方向を正とする。

Table3 Analytical result with slot

	Diameter transform [mm]		Thickness transform [mm]	
	Δd_r	Δd_c	Δt_r	Δt_c
V type	0.93	-0.24	0.02	-0.63
Square	0.96	-0.18	0.00	-0.70
Trapezoid	0.75	-0.23	0.04	-0.57
No slot	1.58	-0.21	-0.37	-0.91

この結果から、スロットを入れることにより形状に関わらず穴の変形を抑制することがわかった。その中でも、台形断面のスロットが最も変形を抑制することわかった。この理由としては、正方形型はスロット同士が接触し、効果がなくなったためである。また、V 型に関しては、台形型より応力を緩和することができなかつたため変形量が多くなつたと考えられる。

7. スロットの適用範囲

台形型スロットが最も穴の変形量を抑制することができることがわかつたため、スロットを入れた場合の実験を行った。本報では、穴直径を 5mm で一定とし、曲げ線からの距離 L のみ変化させ実験を行った。Fig.13 に引張側の曲げ線からの距離と直径の変化量の関係図を示す。Fig.13 より、穴が曲げ線から遠ざかるにつれて穴にかかる応力が減少し、変形量が減少していくことが分かる。また穴が曲げ線に近いところではスロットが変形の抑制をしているが、 $L=2.5\text{mm}$ 以上では大きな変化は無いことが分かる。また $L=2.0\text{mm}$ から $L=2.5\text{mm}$ では急に変形量が減少している。これは穴が曲げ線から遠ざかることにより穴とダイの接触が発生し、穴の縁が潰されて見かけ上の変形量が減少したためだと考えられる。

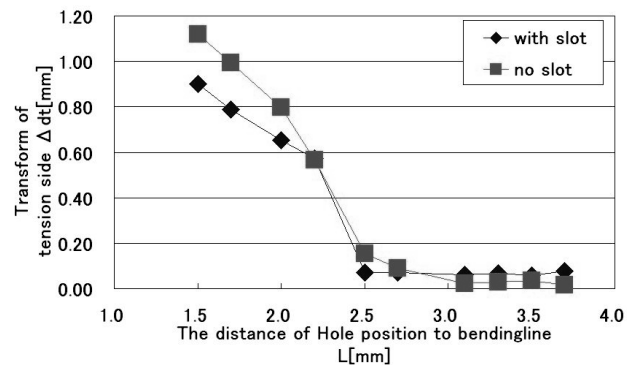


Fig.13 Transform of tension side

次に Fig.14 に圧縮側の曲げ線からの距離と直径の変化量の関係図を示す。Fig.14 より、こちらも穴が曲げ線から遠ざかるにつれて変形量が減少していくことが分かる。また穴が曲げ線に近い場合はスロットが変形を抑制しているが、 $L=2.5\text{mm}$ 以上では引張側と同様にスロットの抑制があまり働いていないことが分かる。また、スロットの無い場合の $L=2.2\text{mm}$ までの変形量は、他の傾向に反して、穴から遠ざかるにつれて増加していることが分かる。これは、曲げ線に近く引張側と圧縮側の穴の変形がともに大き過ぎるために、一度起きた圧縮の変形が引張側の変形に伴い、径方向に引張られてしまったためと考えられる。

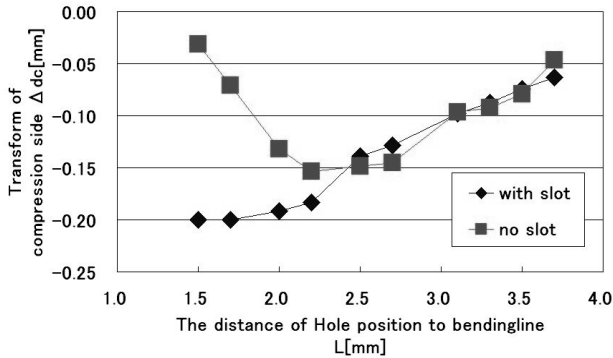


Fig.14 Transform of compression side

Fig.15 に、引張側における曲げ線からの距離と板厚方向の変化量の関係図を示す。Fig.15 より、曲げ線からの距離がはなれるごとに変形量が減少していくことがわかる。しかし、 $L=1.5\text{mm}$ から 2.0mm まではこの傾向と反し、特に $L=1.5\text{mm}$ において盛り上がる縁であるのに負の変形量になっている。これは、曲げ線に近く、変形が非常に大きいため、一度引張られ盛り上がった後、さらに引張られて最終的に移動した結果となったためと考えられる。

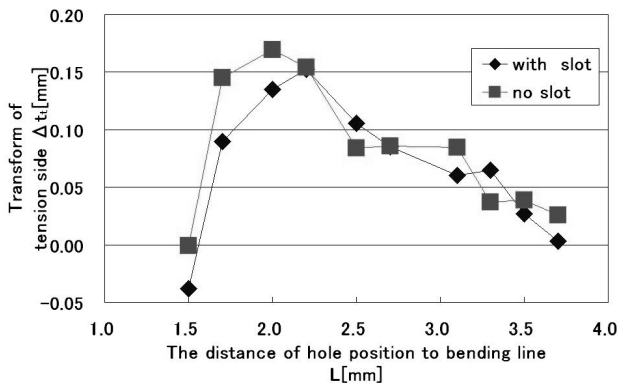


Fig.15 Transform of tension side

Fig.16 に、圧縮側における曲げ線からの距離と板厚方向の変化量の関係図を示す。Fig.16 より、圧縮側の変形と同様に曲げ線からの距離が離れるにつれて変形量が減少していくことが分かった。また、スロットのある場合とない場合で比較すると、スロットにより変形が減少していくことが分かった。

穴が曲げ線に近い場合では、傾向に反して曲げ線に近づくにつれて変形量が減少していった。これは、前述したように穴がダイとの接触により一度変形したものが押しつぶされ、見かけ上変形が減少したためだと考える。

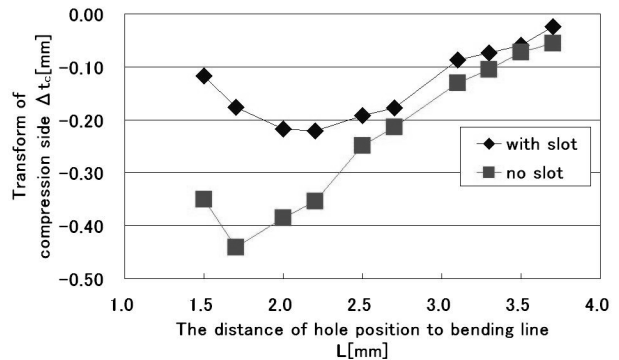


Fig.16 Transform of compression side

8. 結言

これらのことから以下のことが分かった。

- (1) 穴付き板材の曲げ加工において、穴の不整形変形を解析することが確認できた。
- (2) 穴直径が $\phi 5\text{mm}$ の条件では、穴の不整形変形が起こる曲げ線までの距離が半別できた。
- (3) FEM 解析により穴の不整形変形を最も抑制するスロットは、台形型のスロットであることが分かった。
- (4) スロットの効果は、穴が曲げ線から近いところでは大きいですが、離れているところでは減少する。
- (5) プレス曲げ加工において、穴の変形には曲げ応力だけでなく工具との接触も影響する。
- (6) X-Y テーブルとレーザー変位計により、穴の変形を 2 次元的に測定できた。

謝辞

本研究は、(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を受けて測定装置を購入し、曲げ加工では(株)アマダの協力を得て、測定などは大学院生の三鍋友博君、学部生の水野撰君、佐藤真吾君によって進められたので、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 楊 明：塑性と加工，44-506(2003)，219-223。
- 2) 日本塑性加工学会編：わかりやすいプレス加工，(2000)，205-216，日刊工業新聞社。
- 3) 三鍋友博，内田幸彦，星野倫彦：平 18 塑加春講論，(2006)，163-167。
- 4) 米村泰貞：実例プレス加工と金型設計の改善，(1970)，199-216，日刊工業新聞社。
- 5) 永井康友：塑性と加工，24-272(1983)，948-953。