論文

傾斜した超高張力鋼板の直接穴抜き加工

安部 洋平* 中野下 茂広**

森 謙一郎* Purwo Kadarno**

Direct Punching of Inclined Ultra-High Strength Steel Sheets

Yohei ABE*, Shigehiro NAKANOSHITA**,

Ken-ichiro MORI* and Purwo KADARNO**

(Received on April 17, 2012)

The direct punching of inclined ultra-high strength steel sheets having low ductility was carried out to improve the quality of the sheared edge. In the direct punching of an inclined sheet, the contact between the sheet and punch becomes gradual because of touch from the bottom edge of the punch, and thus the sheared portion tends to bend in the latter half of punching. As the strength of the sheet increased, a burr was formed around the final sheared edge due to the low ductility, and the sheared edge without a burr was not obtained for a 980 MPa grade steel sheet. To prevent the occurrence of burrs, punches having inclined and curved bottoms were developed. In these punches, the contact with the sheet was changed, full contact with the inclined bottom and contact of both edges with the curved bottom. In the punches having the inclined and curved bottoms, small burrs and no burrs were obtained for the 980 MPa grade steel sheet, respectively.

Key words: shearing, punching, high strength steel sheets, inclined sheet, sheared edge, punch shape.

1. 緒言

自動車の軽量化と衝突時の乗員保護に対して、引張強さが 1GPa を超えるような超高張力鋼板の利用が車体骨格部材において増加している¹⁾。骨格部材では、ブランク加工された板材は深絞りや曲げ加工により立体的に成形された後に穴抜き加工やトリミングされている²⁾。立体的な部材の傾斜した面に穴が抜かれる場合、軟鋼板において傾斜が小さい場合では直接穴抜き加工が行われているが、高張力鋼板では低延性と高強度のために切口面性状の低下、金型損傷などが問題となっている。この場合、傾斜しないように座面が成形されたり、カム機構を導入して垂直に穴抜き加工が行われたりしているが、製造コストが増加する。このため、傾斜した高張力鋼板の直接穴抜き加工法を開発することが望まれている。

傾斜した板材を穴抜き加工すると板材はパンチと逐次的に接触してせん断される。板材の直線刃せん断加工では、加工力を小さくするために上刃はシャープ角を有しておりせん断が逐次的になり、シャープ角を大きくすると板材が曲がる^{3)~5)}。また、アルミニウム板の切断加工において切口面性状を向上させるために板材を傾斜させて切断加工を行っており⁶⁾、傾斜した板材のせん断加工では傾斜角度によっ

て切口面性状が変化する。高張力鋼板の穴抜き加工では傾斜していない場合においても破断面が増加して加工が困難になっており^{7)~10)}、傾斜した加工は一層困難になる。

本研究では、傾斜した超高張力鋼板の直接穴抜き加工を行い、板材の変形挙動、切口面性状を調べ、直接穴抜き加工によってかえりのない切口面を得られる傾斜角度と鋼板強度の関係を求めた。また、パンチ底部の形状によって板材のせん断変形挙動を制御して、直接穴抜き加工できるパンチ底部形状の基礎的な検討を行った。

2. 傾斜した超高張力鋼板の直接穴抜き加工条件

穴抜き加工に用いた超高張力鋼板は、厚さ 1.4mm の 980MPa 級鋼板であり、比較のために 270MPa, 590MPa 級鋼板も加工を行った。引張試験により得られた鋼板の機械的特性を Table 1 に示す。鋼板の引張強さの増加とともに伸びが減少している。

Table 1 Mechanical properties of steel sheets used for punching

Sheet	Thickness /mm	Tensile strength /MPa	Elongation /%	<i>n</i> -value	Yield ratio /%
980MPa	1.40	1027	18.7	0.12	60.4
590MPa	1.40	600	26.2	0.14	74.3
270MPa	1.41	333	41.2	0.19	67.0

* 豊橋技術科学大学工学部 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1
Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441-8580, Japan.

** 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 同上
Graduate student, Toyohashi University of Technology, ibid.

傾斜した鋼板の直接穴抜き加工条件を Fig. 1 に示す. 傾斜角度は $\alpha=0, 5, 15^\circ$ であり, 傾斜を保持するように板押えとダイにより板を固定した. 板押え力は本実験における最大パンチ荷重の約 1.2 倍であり, 穴抜き加工における穴周辺の板材のはね上がりは防止されている. パンチは直径 10mm の SKH51 相当材であり, 平坦な底部を有しており, パンチガイドにより鋼板の直上まで支持されている. 穴抜きクリアランスと板厚の比 c は 20%とした. 防錆油がついた鋼板に対して材料試験機により $0.3\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度で 3 回の加工が行なわれ, 以後は代表的な結果を示す.

Fig. 1 Punching conditions for inclined ultra-high strength steel sheet

3. 平坦底パンチによる直接穴抜き加工性

3.1 板材の変形挙動と切口面

傾斜した 590MPa 級鋼板の穴抜き加工における $\theta=0^\circ$ の板材断面の変形挙動を Fig. 2 に示す. ここで, θ は左端部から穴に沿った角度, s はパンチストロークである. 鋼板が傾斜していると, 板材は左側からパンチと接触して逐次的にせん断されている. $\alpha=5^\circ$ では板材はほぼパンチ底面と平行にせん断されているが, $\alpha=15^\circ$ では初期に接触した部分が分離しているために抜かれた板材は大きく曲がっている.

Fig. 2 Deforming behavior in cross-section of sheet in punching for 590 MPa grade steel sheet and $\theta=0^\circ$

傾斜した 980MPa 級鋼板における板材の上面と $\theta=0^\circ$ の断面の変形挙動を Fig. 3 に示す. 上面の変形形状において, ストロークとともに $\theta=0^\circ$ から板材がパンチと接触してせん断が逐次的に行われている. $\alpha=5^\circ$ において, Fig. 2 に示した 590MPa 級鋼板はパンチ底面と平行にせん断されているが, 延性の小さい 980MPa 級鋼板は左側が早期に分離したために板材が大きく曲がっており, 小さな角度においても穴抜き加工が困難になっている.

Fig. 3 Deforming behavior in upper surface and cross-section of sheet in punching for 980 MPa grade steel sheet

590MPa 級鋼板における直接穴抜き加工された切口表面と断面を Fig. 4 に示す. $\alpha=0^\circ$ ではかえりは生じてなく, だれ, せん断面と破断面が観察される. $\alpha=5^\circ$ においてはかえりが生じてなく, $\alpha=15^\circ$ では Fig. 2 に示したように抜かれた板材が曲がりながら分離したために $\theta=180^\circ$ では微小なかえりが発生している.

980MPa 級鋼板における直接穴抜き加工された切口表面と断面を Fig. 5 に示す. $\alpha=0^\circ$ ではかえりは生じていないが, $\alpha=5, 15^\circ$ では Fig. 3 に示したように抜かれた板材が曲がったためにかえりが発生しており, $\alpha=5^\circ$ では板材の曲がり大きいためにかえりが大きくなっている.

切口面においてかえりが生じやすい $\theta=180^\circ$ における各種鋼板の切口面性状を Fig. 6 に示す. $\alpha=0^\circ$ では, かえりを生じていないが, 鋼板の強度と傾斜角度の増加とともに, 破断面とかえりが増加している.

Fig. 4 Sheared edge and cross-section of 590 MPa grade steel sheet

Fig. 5 Sheared edge and cross-section of 980 MPa grade steel sheet

Fig. 6 Depth percentage of sheared edge of steel sheets for $\theta=180^\circ$

980MPa 級鋼板に対して $c=20\%$ ではかえりが生じていたためにダイ直径を小さくしてクリアランスを小さくした。 $\alpha=15^\circ$ における 980MPa 級鋼板の切口面性状に及ぼすクリアランス比の影響を Fig. 7 に示す。 $c=16\%$ 以下では θ の大きな範囲で二次せん断面が生じている。これはクリアランスが小さくなったためにパンチ角部付近から生じたクラックの進展方向が変わったためである。 $c=16\%$ 以下ではかえりが発生していないが、二次せん断面は製品や後加工における破壊の起点になるために抑制しなければならない。

Fig. 7 Effect of clearance ratio on depth percentage of sheared edge for $\alpha=15^\circ$ and 980 MPa grade steel sheet

$c=20\%$ において直接穴抜き加工によってかえりが発生しない切口面を得られる範囲を Fig. 8 に示す。鋼板の引張強さとともに、直接穴抜き加工できる範囲が小さくなっており、980MPa 級鋼板では傾斜した板材をかえりなしで直接穴抜き加工することはできない。

Fig. 8 Limiting direct punching range without burr for $c=20\%$

3.2 穴直径

$\alpha=15^\circ$ における 980MPa 級鋼板の穴直径に及ぼすクリアランス比の影響を Fig. 9 に示す。穴直径はマイクロメータにより測定され、最小直径とした。クリアランス比の増加とともに抜かれる板材に作用する曲げモーメントが増え、加工後の穴縁のスプリングバックが大きくなり穴直径は増加している。また、小さい θ においては板材が傾斜しているために穴直径が大きくなっている。

穴の直径に及ぼす鋼板の引張強さの影響を Fig. 10 に示す。鋼板の引張強さと傾斜角度の増加とともに穴直径が大

きくなっている。これは、傾斜角度の増加による曲げモーメントの増大と鋼板の高い変形抵抗によりそれぞれ加工後の穴縁のスプリングバックが増えたためである。

Fig. 9 Effect of clearance ratio on punched hole diameter for $\alpha=15^\circ$ and 980 MPa grade steel sheet

Fig. 10 Effect of tensile strength of steel sheets on punched hole diameter

3.3 穴抜き加工荷重

980MPa 級鋼板における穴抜き加工荷重ーストローク曲線を Fig. 11 に示す。傾斜角度が大きいくほど最大荷重が小さくなっているが、最終ストロークが増加している。 $\alpha=0^\circ$ では均一に穴抜き加工されるために荷重は1個のピークであり、 $\alpha=5^\circ$ ではピークが2個現れており、 $\alpha=15^\circ$ では逐次的なせん断と分離のために荷重はほぼ一定である。

Fig. 11 Punching load-stroke curve for 980 MPa grade steel sheet

最大穴抜き荷重と鋼板の引張強さの関係を Fig. 12 に示す。鋼板の引張強さとともに最大荷重は大きくなっている。

Fig. 12 Effect of tensile strength of steel sheets on maximum punching load

穴抜き加工仕事に及ぼす鋼板の引張強さの影響を Fig. 13 に示す。加工仕事は Fig. 11 に示す穴抜き加工荷重ーストロークの曲線の面積から求めている。傾斜角度が増加するとせん断する材料が増えるために増加している。また、鋼板の引張強さとともに増加しているが、980MPa 級鋼板は延性が低いために増加率が小さくなっている。

Fig. 13 Effect of tensile strength of steel sheets on punching work

4. 傾斜と曲面底部パンチによるかえりの防止

傾斜した板材の穴抜き加工では、せん断が逐次的になって抜かれた板材が曲がると $\theta=180^\circ$ においてかえりが発生する。かえりを防止するための傾斜と曲面底部パンチを Fig. 14 に示す。傾斜底部パンチでは、パンチの底部角度を板材の傾斜角度と同じ 15° にして、パンチ底部の全周が板材と接触するようにして、曲がりを防止してかえりを抑制する。また、曲面底部パンチでは $\theta=0^\circ$ と 180° から板材をせん断して曲がりを低減する。なお、曲面底部パンチでは $\theta=180^\circ$ の角部において破損を防止するために端部が少し平坦になっている。

Fig. 14 Punches having shaped bottoms for preventing occurrence of burr for 980 MPa grade steel sheet

傾斜と曲面底部パンチを用いた穴抜き加工における板材の上面と断面の変形挙動を Fig. 15 に示す。傾斜底部パンチ

では、抜かれた板材が一様に接触してせん断されている。曲面底部パンチではパンチ底の円弧の両端部付近から板材が逐次せん断している。

Fig. 15 Deforming behavior in upper surface and cross-section of sheet in punching using punches having inclined and curved bottoms for 980 MPa grade steel sheets

傾斜と曲面底部パンチを用いた穴抜き加工荷重—ストローク曲線を Fig. 16 に示す。傾斜底部パンチでは、パンチの全周の板材を同時に変形させているために荷重が最も大きく、最終ストロークが最短になっている。曲面底部パンチでは材料を逐次せん断しているために最大荷重は傾斜底パンチより小さく、最終ストロークは平坦パンチよりも短くなっている。

Fig. 16 Punching load-stroke curve using punches having inclined and curved bottoms for 980 MPa grade steel sheets

傾斜と曲面底部パンチを用いて穴抜き加工された切口表面と断面を Fig. 17 に示す。 $\theta=180^\circ$ においてパンチと擦れた痕が少し残っている。傾斜底部パンチでは切口面に微小なかえりが生じているが、曲面底部パンチではかえりが発生していない。パンチ底部の形状を最適化することによってかえりの発生を防止でき、傾斜角度が 15° の超高張力鋼板を直接穴抜き加工できたが、実製品のプレスではより高速なメカプレスによる数万回以上の加工が要求されるためにパンチの耐久性の調査が今後必要である。

Fig. 17 Sheared edges of 980 MPa grade steel sheet using inclined bottom and curved bottom punches

5. 結 言

傾斜した超高張力鋼板の直接穴抜き加工において、板材の変形挙動、切口面性状、穴直径などを求めるとともに、加工できる範囲を拡大させるパンチ底部の形状を提案して、以下に示す知見を得た。

- 1) 傾斜した鋼板の直接穴抜き加工では、鋼板の引張強さとともに初期に接触した 0° での分離が早くなって抜かれた板材が曲がり、最後に接触する 180° ではかえりが発生した。
- 2) 鋼板の引張強さとともにかえりが発生しない切口面を得る範囲は減少し、980MPa 級超高張力鋼板ではかえりなしで直接穴抜き加工することはできなかった。
- 3) 15° 傾斜した 980MPa 級鋼板の直接穴抜き加工において、傾斜底部パンチではかえりを小さくでき、曲面底部パンチではかえりを防止できた。

鋼板と金型を供給していただきました㈱ベルソニカ、成形実験に協力くださった当時本学学部 4 年次岡本康成氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 林 央：塑性と加工, **52**-606 (2011), 756-760.
- 2) 鈴木 弘：塑性加工, (1980), 14, 裳華房.
- 3) 前田 禎三：精密機械, **16**-192 (1950), 291-295.
- 4) 日本塑性加工学会編：せん断加工, (1992), 224, コロナ社.
- 5) Mackensen, A., Golle, M., Golle, R. & Hoffmann, H.: CIRP Annals - Manufacturing Technology, **59** (2010), 283-286.
- 6) 山崎 進・尾崎 龍夫：日本機械学会論文集(C 編), **56**-530 (1990), 2779-2785.
- 7) 柳生 聖司・長井 美憲・桑田 尚：塑性と加工, **46**-534 (2005), 651-655.
- 8) 安部 洋平・森 謙一郎・鈴井 啓生：塑性と加工, **50**-580 (2009), 414-418.
- 9) 米澤 翔太・松野 崇・村上 碩哉・大竹 尚登・栗山 幸久・金丸 尚信：塑性と加工, **52**-610 (2011), 1198-1202.
- 10) 村川 正夫・中村 健太・土屋 敏郎・松本 朗・古閑 伸裕：第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2011), 117-118.