論文

PWパンチを用いた高張力鋼板穴抜き部の穴広げ性と疲労特性

松野 崇* 栗山 幸久**

村上 碩哉*** 米澤 翔太**** 金丸 尚信*****

Hole Expansion Ratio and Fatigue Properties in Piercing of High-Strength Steel Sheets by PW Punch

Takashi MATSUNO*, Yukihisa KURIYAMA**,

Hiroya MURAKAMI***, Shota YONEZAWA**** and Naonobu KANAMARU*****

(Received on June 16, 2010)

In this study, the hole expansion ratio and fatigue properties of high-strength steel sheets pierced using a “press working (PW) punch” were investigated. The PW punch, which was developed to prevent seizing between a punch and a hole surface, was reported to have the effect of smoothing a pierced edge. The PW punch increased the hole expansion ratio at a minute clearance compared with a conventional punch, and at larger clearances, the PW punch decreased it. The reason for this is considered to be the fact that the PW punch suppresses work hardening in the vicinity of the pierced surface and induces work hardening at the inner part of the pierced edge with an increase in clearance. Regarding the fatigue properties, the hole made using the PW punch had a higher fatigue limit than that made using conventional punches at large clearances. This is because a PW punch reduces roughness in the fracture zone.

Key words: shearing, piercing, hole expanding, fatigue, high-strength steel.

1. 緒言

近年、地球温暖化防止を目的とした二酸化炭素排出規制に伴い、自動車部材の軽量化のニーズが高まっている。また、衝突安全性確保の観点から部材に求められる強度は増しており、鉄鋼材料に関しては部材増強と軽量化の両立を目的に、既存の軟鋼から高張力鋼への置換が進んでいる。

軟鋼板に比べると高張力鋼板の成形性は低い¹⁾ため、その成形には工夫が必要である。特に、高張力鋼板の抜き穴の穴広げ性は軟鋼に比べて低下し^{1)~3)}、疲労特性はその母材強度並みに向上しないことが指摘されている^{4)~8)}。穴抜き方法を改善してこれらの特性を向上させるべく、焼鈍打抜き⁹⁾、2回打抜き¹⁰⁾、コイニング¹¹⁾、¹²⁾等の多くの方法が提案され、その効果が実証されてきた。穴広げ性改善を狙っ

た穴抜き方法ではないが、対向ダイスせん断や上下抜きによる穴広げ性改善も報告されている¹³⁾、¹⁴⁾。最も簡易な方法としてはパンチ、ダイス間のクリアランスを調整することで穴広げ性と疲労特性を改善することができる。森ら³⁾は超高張力鋼板の穴広げ性について調査し、クリアランスに応じて変化する抜き穴の硬さと凹凸が主に穴広げ性を劣化させると指摘している。また、疲労特性については、吉武ら⁸⁾はクリアランスが狭まるほど疲労特性は向上し、その原因はクリアランスが狭まった結果として穴抜き面の破断面粗さが低減するためであるとしている。これらの知見はいずれも、穴抜き面の平滑化により穴広げ性と疲労特性を改善できることを示している。

微小クリアランスの穴抜きにおける焼き付き防止を目的に開発されたPWパンチ（プレスワーキングパンチ）は、その付帯効果として、微小クリアランス以外の条件でも穴抜き面を平滑化し、通常のパンチを用いる場合と比べて破断面を減少する効果がある¹⁵⁾。したがって、PWパンチによる穴抜きは、パンチ交換のみで行える簡易な穴広げ性、疲労強度改善技術として期待できる。

以上の背景のもと、本報では高張力鋼板を対象に、穴広げ性と疲労特性に及ぼすPWパンチの効果を検証する。微小クリアランス下における高張力鋼板の穴広げ性と疲労特性について明確に述べた報告はないため、合わせて、その影響についても調査を行う。具体的には被加工材板厚の0.6%の微小クリアランスから20%のクリアランスまでの条件でPWパンチと通常のパンチによる穴抜きを行い、そ

* 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 〒293-8511 富津市新富 20-1 Technological Development Center, Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi, Futtsu 293-8511, Japan.

** 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 同上 Technological Development Center, Nippon Steel Corporation, ibid. 現在：横浜国立大学 安心・安全センター 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 Center for Risk Management and Safety Sciences, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan.

*** 東京工業大学大学院 理工学研究科 機械物理学専攻 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 Department of Mechanical Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8552, Japan.

**** 東京工業大学大学院 理工学研究科 機械物理学専攻 同上 Graduate Student, ibid

***** アイダエンジニアリング(株) 〒252-0146 相模原市緑区大山町 2-10 Aida Engineering, Ltd., 2-10 Ohyama-cho, Midori, Sagami-hara 252-0146, Japan.

これらの試験片に対して穴広げ試験と疲労試験を行うことで、穴広げ性と疲労特性に対するパンチ形状とクリアランスの影響を明らかにする。比較として、リーマ加工穴についてもその穴広げ性と疲労特性を調べ、抜き穴、特に微小クリアランス穴との違いを明確にする。さらに、抜き穴面の硬度、残留応力、形状、粗さの観点から、得られた試験結果に対するメカニズムの考察を行う。

2. 実験条件

2.1 穴抜き条件と供試材

PW パンチと通常の直角刃パンチ (以下, RA パンチと称する) を用い, 穴抜き試験を行った。PW パンチの形状を Fig.1 に, その寸法値を Table 1 に示す。PW パンチは, 刃先の面取り角 θ_b がチッピングを防止し, 丸み R_c と減径部 E がパンチと被加工材との接触面を減らすことで焼き付きを防止する。このような形状はパンチ肩部付近での滑らかな素材流動を起こすことも考慮して設計されたものである¹⁵⁾。本試験においては, 形状因子を明確にするため, PW パンチ, RA パンチともに母材を超硬合金 V30 製とし, TiCN コーティングを施した。なお, 工具表面は $0.05 \mu\text{mRz}$ 以下の鏡面加工である。

穴抜きには, 最大荷重 3000kN の高剛性プレス機 (株式会社エンジニアリング製 UL3000) を使用した。ガス圧による板押さえを用い, その荷重はプレススライドが下死点の際に 40kN となるように設定した。また, スライドストロークは 120mm, 運動曲線は正弦波, 切り刃の噛合い量は 0.5mm, 毎分 50 回の打抜き速度に設定し, 潤滑油は用いなかった。

抜き穴は試験片の中央に加工し, クリアランスは穴広げ試験用として 0.6%t, 2.0%t, 5.0%t, 12%t, 20%t の 5 種類, 疲労試験用として 0.6%t, 12%t の 2 種類を用いた。ここで, “%t” は鋼板の板厚に対する割合を示す。

また, 供試材には, 高張力鋼板として 590MPa 級熱延鋼板 (析出強化材) を用いた。Table 2 にその機械特性を示す。

Fig. 1 Shape of PW punch

Table 1 Dimension of PW punch in Fig.1

ϕD [mm]	ϕA [mm]	θ_b [deg]	R_c [mm]	R_d [mm]	E [mm]
10.0	9.6	45	0.1	13	0.1

Table 2 Mechanical properties of the specimen

Thickness [mm]	Yield stress [MPa]	Tensile Stress [MPa]	Total elongation [%]
3.2	509	612	27

2.2 切り口面性状の測定条件

穴抜き, および, リーマ加工における切り口面性状の分

析のため, 切り口面の形状, 粗さ, 硬さ, および, 残留応力の測定を行った。以下, その測定条件を述べる。

(a) 切り口面形状と粗さ 抜き穴面の形状はせん断面率を測定し, 各水準における抜き穴面の最大粗さとして, クリアランス 0.6%t 抜き穴のせん断面粗さ, クリアランス 12%t 抜き穴の破断面粗さ, および, リーマ加工面の粗さ (R_y , JIS-01) を測定した。粗さ測定装置には (株) 東京精密製 "SURFCOM 1900DX" を用い, せん断面, 破断面, リーマ面の板厚方向中央部を円周方向に沿って 1 ライン測定し, その長さを 1.25mm とした。

(b) 切り口面硬さ 抜き穴断面・外観形状の模式図とともに, 硬さ測定位置を Fig.2 に示す。抜き穴のせん断面上を, せん断開始点より 0.1mm の部分を起点に板厚方向に沿って 0.2mm ピッチで硬さを測定し (以下, 表面硬さという), さらに, かえり側の板面を起点として切り口面の輪郭形状に沿って穴の径方向の間隔 0.08mm で 3 列 (切り口面に近い側を 1 列目とする) の硬さを 0.2mm ピッチで測定した (以下, 内部硬さという)。測定荷重は表面硬さの場合 500gf, 内部硬さの場合 125gf とした。

Fig.2 Position of hardness measurement on the pierced edge

(c) 切り口面残留応力 (株) 理学電機製微小焦点 X 線応力測定装置 PSPC-MSF 型を用い, 板厚中心を基準とした 0.6mm ピッチの 5 点において抜き穴の円周方向の残留応力測定を行った。残留応力測定用の試験片は, X 線が切り口面に当たるように, 穴抜き, リーマ加工試験片を半分に切断したものを使用した。

2.3 穴広げ試験条件

100×100mm の鋼板中央に $\phi 10\text{mm}$ の穴加工を施し, N 数を 5 として該試験片に対し対頂角が 60 度である円錐パンチによる穴広げ試験を行った。穴広げ率は, 以下の式(1)により表される。

$$\lambda = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで d_0 は初期の打抜き穴径 ($\phi 10\text{mm}$), d_1 は穴広げ時のき裂が鋼板の板厚を貫通した時点における径である。抜き穴との比較としてリーマ穴に対しても穴広げ試験を行った。記載以外の試験条件は日本鉄鋼連盟規格 JFS T 1001 199 に準拠した。

2.4 疲労試験条件

(株) 東京衡機製造所製疲労試験機による平面曲げ疲労試験を行った。試験片は 100×100mm の鋼板に $\phi 10\text{mm}$ の穴加工を施し, その穴加工部が中央となるように Fig.3 に示す輪郭形状に切削加工した。板表面は母材のままとし, 仕上げ加工は行っていない。

また、試験は応力比を-1、周波数を 25Hz とし、室温大気中にて実施した。破断寿命は試験片が分離するまでとし、1000 万回時間強度を疲労限とした。応力振幅は穴部を除く断面積でモーメントを除するネット応力にて整理した。

Dimension unit: mm

Fig.3 Shape of the specimen for plane fatigue test

3. 実験結果

3.1 切り口面性状

(a) 切り口面形状と粗さ 各クリアランスでの抜き穴のせん断面率の結果を Fig.4 に、各クリアランスでの抜き穴面の外観写真を Fig.5 に示す。

Fig.4 より、0.6%t クリアランス穴で双方のパンチともにせん断面率はほぼ 100%であり、クリアランスの増加とともにせん断面率が減少している。その減少率は RA パンチの方が高く、0.6%t 以外のクリアランスでは PW パンチ穴のせん断面率が RA パンチ穴に比べて高い。

また、Fig.5 より、両パンチとも抜き穴の光沢部であるせん断面表面に筋状の模様が確認できるが、PW パンチの方が表面性状は良好である。クリアランス 2.0%t と 5.0%t においては、両パンチともに複数の 2 次せん断面が生じており、凹凸が大きいことが予測される。

Fig.4 Ratio of the shearing zone vs. clearances

Fig. 5 Appearances of pierced surface

続いて、打抜き面粗さの測定結果を Fig.6 に示す。せん断面の粗さはリーマ穴とほぼ同等であり破断面の粗さと比べてその値は著しく低い。また、PW パンチ穴の破断面粗さは RA パンチのものよりも低くなっている。RA パンチ穴のせん断面表面の筋状模様は、RA パンチと PW パンチ穴のせん断面粗さの差として表れているが、その差は 0.5 μm 以下であり、2つのパンチ穴のせん断面粗さはほぼ同等であると見なせる。

Fig.6 Roughness on the each part of hole surface

(b) 切り口面硬さ 抜き穴の表面硬さと内部硬さの測定結果を、それぞれ、Fig.7, Fig.8 に示す。

Fig.7 より何れのクリアランスにおいても PW パンチ穴の表面硬さは RA パンチ穴よりも低い。一方、Fig.8 より測定した 3 列 (抜き穴面に近い方から 1 列目、2 列目、3 列目) の全てで PW パンチ穴は RA パンチ穴よりも内部硬さは高い。特に、2 列目と 3 列目で PW パンチ穴は RA パンチ穴よりも加工硬化が大きい。したがって、RA パンチと比較して PW パンチは、抜き穴内部の加工硬化を誘起し、表面の加工硬化を抑制すると見なせる。

クリアランスで比較すれば、双方のパンチによる抜き穴で、表面硬さと 1 列目の内部硬さの差、1 列目と 2 列目の内部硬さの差がクリアランス量の増加とともに低下しており、クリアランス量が小さいほど抜き穴表面に加工硬化が集中している。特に、0.6%t クリアランスでは、1 列目の内部硬さと表面硬さの差が約 100Hv (最大値同士で比較) であり、抜き穴表面近傍への加工硬化の集中が著しい。

なお、リーマ穴面はほとんど加工硬化しておらず、グラフからは除外した。

(c) 切り口面残留応力 切り口面の周方向残留応力は、Fig.9 に示す測定結果となった。

残留応力の分布は、リーマ穴と 0.6%t 抜き穴では PW パンチ穴のだれ側 1 点を除いて板厚方向に一樣であり、12%t 抜き穴では破断面の中央部付近でピーク値となっている。

パンチ形状の比較では、0.6%t クリアランスで、だれ部を除いた板厚方向のほぼ全てで PW パンチ穴の残留応力は RA パンチ穴よりも圧縮側となり、12%t クリアランスでは、PW パンチ穴は RA パンチ穴よりも引張残留応力が低くなっている。クリアランスに対する傾向としては、0.6%t 抜き穴は 12%t 抜き穴に比べて著しく残留応力が圧縮側となり、その値はリーマ穴とほぼ同等であった。

3.2 穴広げ試験結果

Fig.10 に穴広げ試験結果を示す。

PW パンチ穴では、0.6%t から 5%t にかけてクリアランス

Fig.7 Surface hardness of the pierced edges

Fig.8 Inner hardness of the pierced edges

Fig.9 Residual stress of the cut edges in circumferential direction (Tensile is defined positive)

量の増大とともに穴広げ率は低下し、5%t よりも大きなクリアランスではクリアランス量の増大とともに穴広げ率は向上している。0.6%t における穴広げ率が約 70%と最も高く、最低値となった 5%t での穴広げ率との差は約 30%である。

RA パンチ穴も PW パンチ穴と同様の傾向を示し、0.6%t から 12%t まではクリアランス量の増大とともに穴広げ率

は約 40%まで低下し、12%t 以上ではクリアランス量の増大とともに穴広げ率は向上している。穴広げ率が 65%と最も高いクリアランスは 20%t であり、最低値(40%)である 12%t での穴広げ率との差は約 25%であった。定量的な違いはあるものの、RA パンチ穴の穴広げ率とクリアランスとの関係は、文献^{1),3)}に報告されている 590MPa 級高張力鋼板の傾向に一致している。

2つのパンチ穴の違いでは、0.6%t から 2%t までのクリアランス域で PW パンチ穴の穴広げ率が RA パンチ穴よりも高くなり、5%t よりも大きなクリアランス域では RA パンチ穴の穴広げ率が PW パンチ穴よりも高くなっている。リーマ穴を除く全ての水準の中では 0.6%t における PW パンチ穴の穴広げ率が最大であった。

なお、グラフからは除外したが、リーマ穴の試験片は評価装置の上限値である 140%以上の穴広げ率であった。

Fig. 10 Results of hole expansion tests

3.3 疲労試験結果

疲労試験結果として、Fig.11 に S-N 曲線を、Table 3 に疲労限を示す。

Fig.11 より、0.6%t クリアランスにおける PW, RA パンチ穴の全ての疲労寿命域での時間強度は 12%t クリアランスの穴のものよりも高くなっている。0~100 万回寿命域のリーマ穴時間強度は 12%t 穴より若干高い程度であり、0.6%t の PW, RA パンチ穴よりも低い。

Table 3 より、PW パンチの効果は 12%t クリアランスにおいて確認でき、その疲労限は 12%t RA パンチ穴と比較して約 30MPa (12%t RA 穴疲労限の約 20%) 程向上している。一方で 0.6%t クリアランスでは PW パンチ穴の疲労限が若干 RA パンチ穴よりも高くなっているが、ばらつきの範囲内と考えられ、パンチ形状に関わらずほぼ同程度の疲労限

Fig.11 S-N curves of the pierced and reamed hole

と見なすことができる。10MPaの差はあるものの、リーマ穴の疲労限も0.6%t抜き穴とほぼ同程度であった。

Table 3 Fatigue strength of the pierced and reamed hole[MPa]

	PW	RA	Reamer
0.6%t clearance	247	242	234
12%t clearance	197	164	

続いて、疲労破面写真をFig.12に示す(図中の矢印は疲労き裂の伝播方向を示している)。

0.6%tクリアランスでの双方のパンチ穴とリーマ穴では疲労き裂はパンチ側とダイ側の板表面に近い抜き穴表面からほぼ同時に発生しており、この2か所のき裂が伝播、会合して試験片が破断に至っている。き裂の会合位置はFig.12(a), (c), (e)の板厚中央部付近での段差として確認することができる。一方で、12%tクリアランスでは双方のパンチ穴ともにそのような明確な段差は確認できず、板厚下部側(ダイ側)の疲労破面に対して、板厚上部側(パンチ側)は延性破壊面に近い破面形態となっている。この観察結果より、12%tクリアランスで打ち抜かれた穴では疲労き裂は破断面側のいずれかの位置で発生し、そのき裂が板厚上部へ伝播した後に、負荷応力が素材の耐久値を超えて延性破壊に近い状態で素材が破断したことが推察できる。

なお、上述の疲労き裂と伝播の傾向は、PWパンチ、RAパンチともに同様であった。

Fig.12 Fracture surface of the fatigue specimen

4. 考 察

4.1 切り口面性状

(a) 切り口面形状と粗さ 文献⁶⁾と同様に、本報の実験においてもパンチ刃先の面取りのため、穴抜き時の破断が起こりにくくなることでPWパンチ穴のせん断面率がRAパン

チ穴よりも高くなっている。粗さがなぜ異なるかについては、本報の実験結果からは推察することができず、そのメカニズムの解明は今後の課題である。

(b) 切り口面硬さ 硬さに関しては、RAパンチと比較してPWパンチ刃先の面取り部が素材変形の局所化を緩和し、より広範囲に変形を拡散させていることが、PWパンチ穴の表面硬度がRAパンチ穴よりも低く、逆に内部硬度が高い結果となって表れている。

(c) 切り口面残留応力 せん断面はパンチ側面により擦られるため、バニシ加工されたような面となる。この、バニシによる圧縮残留応力¹⁶⁾が打抜き面の残留応力として測定されており、0.6%tにおけるPWパンチとRAパンチ穴の残留応力の違いは双方のパンチによるバニシ形態の違いであると考えられる。PWパンチの側面は、小径の丸みを有しているためにローラーバニシ加工に近く、平滑なRAパンチ側面によるバニシに比較して塑性流動の量が増えるために、穴面の残留応力がより圧縮になったと推測される。リーマ穴については、切削時の拡径によりその切り口面に圧縮の残留応力が付与される解析結果が示されており¹⁷⁾、本報の実験結果においても同様の結果となっている。

また、破断面部の引張残留応力に関しては、打抜き時に発生するき裂の応力集中に起因していると考えられる。数値シミュレーションによる確認が必要であるが、き裂長さが長い程、すなわち、破断面率が大きい程応力集中は増すと考えられ、破断面率が高い12%tRAパンチ穴の破断面部は12%tPWパンチ穴のものよりも高い引張残留応力となったと推測される。

4.2 穴広げ率

文献^{3), 11), 18)}で指摘されているように、穴広げ率に影響する切り口面の因子は、粗さ、凹凸、かえり、加工硬化であり、特に加工硬化がその主因子となる。今回の実験結果でも140%以上の穴広げ率であるリーマ穴に対し、加工硬化以外の因子がほぼ同等である0.6%tクリアランスの抜き穴の穴広げ率が70%程度であることから、穴広げ率に対する加工硬化の影響が大きいことが示唆される。よって、以下では加工硬化の観点から考察を述べる。

Fig.7, Fig.8より、表面硬さの値はクリアランス量の増加とともに内部硬さの値に近づく。穴広げ時の割れが抜き穴面表層より発生すると考えれば、表面硬さの値が内部硬さの値よりも大きいクリアランス域では穴広げ率への表面硬さの寄与が大きく、表面硬さの値と内部硬さの値の差が小さいクリアランス域では内部硬さの影響が大きくなる。PWパンチによる抜き穴の穴広げ率は0.6%tから2%tのクリアランス域でRAパンチ穴のものよりも高く、逆に2%tより大きなクリアランス域ではRAパンチ穴よりも小さくなるのが、この考察を裏付けている。

クリアランスに対する穴広げ率の傾向は、加工硬化の勾配の影響と思われる。これまでに、穴広げ率に対して穴縁の歪勾配が寄与することが調べられており、その理由は低歪部は高歪部に対して局部くびれを防止する保護作用があるためとされている^{19), 20)}。本試験の0.6%tの抜き穴では切り口面の表面硬さは各クリアランス中最大となるが、その穴広げ率は他のクリアランスのものと同等、または、それ

以上となっている。加工硬化の勾配を歪勾配と同等と捉えれば、その理由を内部硬さ 1~3 列目のバリ側から 0~1mm に分布している加工硬化の低い部分が切り口面表層の局部くびれを防止する保護作用として働くためと考えることができる。Fig.7, Fig.8 よりクリアランスの増加とともに表面硬さと内部硬さの最大値は低下し、一方で、内部硬さの 2 列目, 3 列目の硬さが高くなることから硬さの低い局部くびれ保護層の領域は減少している。これらの効果が相乗し、Fig.10 のように、ある特定のクリアランスで穴広げ率が最小となるような傾向になったと思われる。

Fig.5 の破面外観より、抜き穴面の凹凸が大きい 5.0%t 抜き穴の穴広げ率が小さいとの解釈もできるが、2 次せん断面の生じない 12%t 抜き穴の穴広げ率も同様に小さいため、凹凸のみの影響で穴広げ率が最小となるクリアランスが存在するとは断定できない。

4.3 疲労特性

時間強度に関しては、疲労き裂の伝播挙動が影響する。そのため、打抜き面の残留応力が時間強度を決定する主因であると考えられる。Fig.9 より、残留応力に対するクリアランスの影響は大きく、最も引張残留応力の高くなった 12%t 抜き穴は 0.6%t 抜き穴よりも時間強度が劣っている。一方で、残留応力はクリアランスによる違いと比較してパンチ形状の影響をあまり受けておらず、そのため、PW パンチと RA パンチの間で明確な時間強度の差は現れていない。また、0.6%t 抜き穴とリーマ穴との時間強度差の原因は、切り口面の残留応力がほぼ同じであるために特定することはできない。恐らくは、0.6%t 抜き穴で圧縮残留応力が分布している部分（切り口面からの距離）がリーマ穴よりも大きく、圧縮残留応力によるき裂伝播抑制の効果が高いために 0.6%t 抜き穴の時間強度がリーマ穴よりも優れていたと思われる。ここで、0.6%t 抜き穴の加工硬化部位は明らかにリーマ穴よりも広く、圧縮残留応力分布部位も同様に広いと推測した。

疲労限に関しては、疲労き裂の発生挙動が影響するため、打抜き面の残留応力、硬さ、粗さがその因子となり、特に破断面粗さがその主因子であることが指摘されている⁸⁾。本報の実験においても、1) 3.2 節に述べたように、著しく疲労限が他の水準より劣る 12%t 抜き穴には破断面が存在し、破断面からの疲労き裂発生と伝播が主体で素材の破断が起こっている。2) RA パンチ穴と比較して破断面粗さの低い(Fig.6 参照) PW パンチ穴の疲労限は RA パンチ穴よりも高い値である、という点が文献⁸⁾の結果を裏付けている。

5. 結 言

本報では 590MPa 級の析出強化型高張力鋼板を対象に、クリアランスが 0.6%t から 20%t までの通常のパンチ (RA パンチ) と PW パンチによる抜き穴の穴広げ率と疲労特性を調査し、以下の結果を得た。

- (1) 5%t 以上のクリアランス域では PW パンチ穴は抜き穴内部の加工硬化が RA パンチによる穴抜きよりも高くなるために、穴広げ率が劣化した。一方で、2%t 以下の小クリアランス域において PW パンチ穴は RA パンチ穴よりも抜き穴表面の加工硬化が低減し、穴広げ率が改善した。

- (2) PW パンチ穴は 12%t クリアランスにおいて RA パンチ穴よりも破断面粗さが低減し、そのために疲労限は RA パンチによる抜き穴よりも向上した。
- (3) 0.6%t 微小クリアランスでは、PW パンチによる抜き穴、RA パンチによる抜き穴ともに疲労限と時間強度は 12%t での抜き穴よりも高く、パンチ形状による差異はなかった。
- (4) 0.6%t 微小クリアランスでは、RA パンチ、PW パンチ穴ともに、リーマ加工穴よりも穴広げ率は著しく低く、疲労限は同程度であり、時間強度は劣る結果であった。

参 考 文 献

- 1) Woestmann, S., Kohler, T. & Schott, M. : SAE Technical Paper, SAE-2009-01-0802(2009).
- 2) Comstock, R.J. Jr., Scherrerand, D.K. & Adameczyk, R.D. : J. Mat. Eng. , **15**(6) (2006), 675-683.
- 3) Mori, K., Abe, Y. & Suzuki, Y. : J. Mater. Process. Technol., **210** (2010), 653-659.
- 4) Konieczny, A. & Henderson, T. : SAE Special Publications, SP-2103(2007), 41-50.
- 5) Sperle, J-O. & Trogen, H. : Scandinavian J. Metal., **18**(1989), 147-154.
- 6) Shirasawa, H. : ISIJ Int., **34**-3 (1994), 285-289.
- 7) Sanchez, L., Gutierrez-Solana, F. & Pesquera, D. : Eng. Failure Analysis, **11**(2004), 751-764.
- 8) 吉武明英・塩崎毅・大村雅紀 : 自動車技術, **33**-4(2002), 203-208.
- 9) 町田輝史・中川威雄 : 塑性と加工, **16**-172(1975), 365-370.
- 10) 中川威雄・吉田清太 : 塑性と加工, **10**-104(1969), 665-671.
- 11) 中川威雄・Vladimir Cupka・高野豊春・町田輝史 : 塑性と加工, **16**-172(1975), 365-370.
- 12) 十代田哲夫・三浦正明・中屋道治 : 神戸製鋼技報, **54**-3(2004), 29-32.
- 13) 近藤一義・岩間龍郎・大石孝治 : 塑性と加工, **23**-262 (1982), 1058-1065.
- 14) 安部洋平・池田豊・森謙一郎 : 平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2008), 35-36.
- 15) 村上碩哉・笠原延修・望月佳彦・金丸尚信・井村隆昭 : 塑性と加工, **50**-577(2009), 119-123.
- 16) Murthy, R.L. & Kotiveerachari, B. : Precision Eng. **3** (1) (1981), 172-179.
- 17) Kang, J., Johnson, S. W. & Clark, A. D. : J. Eng. Mat. and Tec., **124**(2002), 140-145.
- 18) 吉田佳典・石原裕洋・湯川伸樹・石川孝司 : 平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 139-140.
- 19) 山田嘉昭 : 塑性と加工, **4**-24(1963), 885-896.
- 20) 後藤學・林哲録・三沢正幸 : 日本機械学会論文集 C 編, **59**-565 (1993), 2855-2862.