論文

自動車用高張力鋼板における穴抜き工具刃先摩耗が穴抜き部材
疲労強度に及ぼす影響

松野 崇* 瀬戸 厚司*

末廣 正芳* 吉田 佳典**

Effect of Punch Wear on Fatigue Strength of Pierced High-Strength Steel Sheets

Takashi MATSUNO*, Atsushi SETO*,

Masayoshi SUEHIRO* and Yoshinori YOSHIDA**

(Received on May 16, 2013)

The effect of tool wear on the fatigue strength of pierced steel sheets has been investigated through a plane bending test, in which three kinds of high-strength steel were used as specimens. The tools for this study sustained wear after 10,000 piercing shots on commercial JIS-S45C steel. The results show that the tool wear possibly reduces the fatigue strength of the pierced steel sheets. The possibility of such deterioration depends on the type of material. The holes pierced on the ferrite-pearlite or precipitation-strengthened steel do not induce the reduction in fatigue strength by the tool wear. Nevertheless, the holes on the ferrite-martensite steel induce deterioration, probably caused by residual stress. The tool wear induces tensile residual stress around the burr side of the holes; this residual stress probably accelerates the propagation of fatigue cracks. The tool wear hardly affects the roughness and hardness of the pierced surface, which are other factors related to fatigue strength.

Key words: punching, piercing, fatigue, high-strength steel, tool wear.

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いる。これら部材増強と軽量化の両立の観点から, 既存の軟鋼から高張力鋼へ置換が進んでいる¹⁾。一方, 自動車用の高張力鋼板においては穴抜き部を有する部材(以下, 穴抜き部材)の疲労強度の改善が課題である。鋼板の強度が高ければ切欠きに対する疲労強度への感受性が強い。よって, 高強度な鋼板ほど穴抜き部の粗さが及ぼす疲労強度低下への影響が大きく, 穴抜き部材の疲労特性はその鋼材の引張強度並みには向上しない^{2)~6)}。

このような課題に対し, 穴抜き方法の面から様々な解決策が提案され^{7)~9)}, その効果が実証されている。しかしながら, これらの報告に用いられた工具については新品と摩

耗品の区別がなく, 穴抜きのショット数に伴う工具刃先形状の変化は考慮されない場合が多い。製品のかえり高さや湾曲等のせん断欠陥が工具の摩耗とともに増すことが報告されており^{10)~12)}, これらによって穴抜き部材の疲労強度も工具摩耗の影響を受けると考えられる。よって, 穴抜き部材の疲労強度の評価を実際の製品に近いものとするためには, 穴抜き部の疲労強度に対する工具摩耗の影響を明確にし, これらを考慮した評価を行わなければならない。特に, 高張力鋼板では工具摩耗が軟鋼の場合よりも進行しやすく, このような評価は重要である。

一般的には, 工具摩耗が進むほど穴抜き面の粗さは増し, その疲労特性は劣化すると考えられることが多い。しかしながら, このような傾向をメカニズムも含めて系統的に調査した例はない。上述した製品のかえり高さの増加や湾曲の発生は主として刃先の丸みの影響であるが, 刃先の丸みにより穴抜き面の粗さが増すとの報告はなされていない。むしろ穴抜き部の粗さは刃先の丸みにより改善することが報告されている^{9), 13), 14)}。また, かえり高さが増すことによる穴抜き部材の疲労強度低下もさほど顕著ではない⁶⁾。すなわち刃先丸みによる穴抜き面粗さの改善効果とかえり高さの増加が小さいことを合わせて考えれば, 工具摩耗が進

* 新日鐵住金 (株) 鉄鋼研究所
〒293-8511 富津市新富 20-1
Steel Research Laboratories, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation,
20-1 Shintomi, Futtsu, 293-8511 Japan.

** 岐阜大学 工学部 機械システム工学科
〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1
Department of Mechanical and Systems Engineering, Gifu University,
1-1 Yanagido, 501-1193 Japan.

むほど穴抜き部材の疲労強度が低下するという概念は疑問である。

このような背景のもと、本報では鋭利な刃先を有する新品工具および 10000 回穴抜き後の摩耗工具を用いた穴抜き試験を行い、これらの試験片に対してその平面曲げ疲労特性を調査した。合わせて、穴抜き部の形状、粗さ、硬さ、および残留応力を調査し、工具摩耗がこれらの特性に及ぼす影響を検証した。これらの工具摩耗特性より、工具刃先摩耗と穴抜き部材の疲労特性との相関を考察した。

2. 実験方法

2.1 供試材

フェライト・パーライト型の高張力鋼板である A 材と析出強化型の高張力鋼板である B 材、および、フェライト・マルテンサイト型の高張力鋼板である C 材を供試材として用いた。その機械的特性を Table 1 に示す。A 材は強度が最も低く、伸びも高い。B 材と C 材の強度レベルと伸びはほぼ同じであるが、B 材の方が C 材よりも降伏応力が高い。

Table 1 Mechanical properties of three materials

Material ID	A	B	C
Tensile strength [MPa]	448	609	629
Yield stress [MPa]	305	549	416
Elongation[%]	36	28	28
Thickness[mm]	2.9		

2.2 穴抜き実験

新品工具および連続穴抜きにより摩耗させた工具(以下、摩耗工具)により供試材に直径 10 mm の穴抜きを行った。ここで新品工具を、研磨による工具刃先の仕上げ後に一度も穴抜きが行われていないパンチおよびダイスとして定義する。摩耗工具は新品工具の状態から市販の S45C 冷間圧延材(板幅 50 mm, 板厚 3.0 mm)を 10000 回穴抜きすることにより作成した。パンチとダイのクリアランスは 0.3 mm (板厚の 10%) とし、工具の材質は SKH51 とした。

Fig. 1 は新品工具と摩耗工具の刃先の共焦点レーザー顕微鏡像である。鋭利な新品工具の刃先に対し、摩耗工具の刃先は大きく丸くなっている。レーザーにより測定した刃先形状を円弧近似したところ、その刃先半径はパンチで約 11 μm 、ダイで約 25 μm であった。

2.3 穴抜き面の分析方法

(1) 粗さ測定 三鷹光器(株)製非接触式三次元形状測定装置 NH-3N を用いて穴抜き部破断面の算術平均粗さを測定した。穴かえり側より 0.3 mm ピッチで 4 ライン測定し、測定ラインの長さは 1.0 mm とした。

(2) 硬さ測定 穴抜き面の断面を切り出し、圧痕荷重を 0.49 N とし、穴抜き面から 0.08 mm の位置のビッカース硬度を測定した。測定位置の模式図を Fig. 2 に示す。

(3) 残留応力測定 (株)理学電機製微小焦点 X 線応力測定装置 PSPC-MSF 型を用いて穴周方向の残留応力を測定した。測定は板厚中心を基準に 0.6 mm ピッチで 5 点行った。丸穴のままでは X 線を穴抜き面に照射することが難しかった

Fig. 1 Edges of the initial and the worn tools

Fig. 2 Position of Vickers hardness estimation

め、残留応力測定用の試験片として穴抜き部を半円状に切断したものを使用した。

2.4 疲労試験

(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。試験片形状を Fig. 3 に示す。板表面は受け入れたままとし、仕上げ加工等を行わなかった。

Fig. 3 Specimen for bending fatigue test

また、試験は応力比を -1、周波数を 25 Hz とし、室温大気中にて実施した。破断寿命は負荷トルクが 1.0 N・m 低下する繰返し数とし、1000 万回の疲労寿命を達成する負荷応力を疲労限とした。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。

3. 実験結果

3.1 穴抜き部性状

(1) 穴抜き部形状 Fig. 4 に穴抜き部外観と塑性流動エッチングを施した穴抜き部断面の写真を示す。Fig. 4(a-1), (b-1), (c-1) の新品工具による抜き穴 (以下, 新品工具抜き穴) と Fig. 4(a-2), (b-2), (c-2) の摩耗工具によって設けられた抜き穴 (以下, 摩耗工具抜き穴) を比較すれば, 全ての鋼材で摩耗工具抜き穴のだれ高さとせん断面長さは新品工具抜き穴よりも増加している。だれ高さとせん断面長さの定義は Fig. 2 を参照されたい。Fig. 4(c-1) と (c-2) に見られるように, 工具摩耗によるだれ高さのせん断面長さの変化率 (工具摩耗に伴うだれ高さ・せん断面長さの変化量/新品工具抜き穴におけるだれ高さ・せん断面長さ) は特に C 材で大きい。また, Fig. 4(a-2), (b-2), (c-2) より, 摩耗工具抜き穴に懸念される過大なかえり高さは生じていない。新品工具抜き穴と摩耗工具抜き穴のかえり高さはほぼ同等である。

(a-1) Initial (a-2) Worn
Shear droop / t : 6.2 % (a-1) Initial (a-2) Worn
Burnished surface / t : 34 % (a-1) Initial (a-2) Worn
Burnished surface / t : 39 %

(a) Material A

(b-1) Initial (b-2) Worn
Shear droop / t : 4.9 % (b-1) Initial (b-2) Worn
Burnished surface / t : 32 % (b-1) Initial (b-2) Worn
Burnished surface / t : 36 %

(b) Material B

(c-1) Initial (c-2) Worn
Shear droop / t : 4.3 % (c-1) Initial (c-2) Worn
Burnished surface / t : 21 % (c-1) Initial (c-2) Worn
Burnished surface / t : 26 %

(c) Material C

Fig. 4 Pierced surface by the initial and worn tools

(2) 破断面粗さ Fig. 5 に破断面における算術平均粗さ Ra の測定結果を示す。Fig. 5 から, 破断面粗さは新品工具と摩耗工具の抜き穴で大きな差はない。いずれの鋼種においてもその差は $2 \mu\text{m}$ 以内である。

なお, 新品工具と摩耗工具の抜き穴における粗さの差異は鋼種により異なった傾向を示す。A 材においては摩耗工具抜き穴の破断面粗さが新品工具のものより若干高いものの (Fig. 5(a) 参照), 他の鋼種ではむしろ摩耗工具により粗さが改善する傾向が伺える (Fig. 5(b) と (c))。

Fig. 5 Roughness on pierced surface

(3) 穴抜き部硬さ Fig. 6 は穴抜き部の硬さ測定結果である。Fig. 6 よりいずれの鋼種においても新品工具抜き穴と摩耗工具抜き穴で硬さの差は小さい。A 材においては板厚全体を通して若干の摩耗工具による硬さの低下が確認できるものの, 他の鋼種は双方の工具による抜き穴でほぼ同等の硬さである。

鋼種による違いでは, A 材, B 材および C 材の順に穴抜き部硬さの平均値が高い。

Fig. 6 Hardness of the cross section to the pierced surface

(4) 穴抜き部残留応力 Fig. 7 に残留応力の測定結果を示す。全ての鋼種において, 摩耗工具抜き穴の残留応力は板下面側(かえり側)で新品工具抜き穴よりも引張側である。その差異の最大値は C 材, B 材および A 材の順で大きく,

A 材で約 260 MPa, B 材で約 315 MPa, C 材で約 335 MPa である。また、板下面を除けば、新品工具抜き穴と摩耗工具抜き穴の残留応力はほぼ同等である。

Fig. 7 Residual stress on pierced surface

3.2 疲労試験

(1) 疲労限 Fig. 8 に疲労試験結果 (S-N 線図) を示す。

まず、鋼材による疲労強度の違いをみれば、Fig. 8(a), (b), (c) より工具摩耗の有無に関わらず C 材, B 材および A 材の順で 10 万回から 1000 万回にかけての時間強度が高い。

さらに、100 万回時間強度から疲労限にかけて着目すれば、Fig. 8(a) より A 材では新品工具抜き穴よりもむしろ摩耗工具抜き穴の時間強度が高い。ただし、疲労限ではその差異は非常に小さい。Fig. 8(b) より B 材では 100 万回時間強度から 1000 万回にかけての時間強度の差異はほとんどみられない。Fig. 8(c) より C 材では摩耗工具抜き穴の疲労限は新品工具抜き穴のものより若干低下しており、その差異は約 30 MPa (新品工具抜き穴疲労限の約 1 割) である。

続いて、10 万回から 100 万回の時間強度に着目すれば、A 材と B 材で新品工具と摩耗工具抜き穴の試験結果はほぼ同等である。C 材では摩耗工具抜き穴の時間強度に対し、新品工具抜き穴の時間強度は低い。しかしながら、その値には若干のばらつきが見受けられる。

(2) 疲労き裂の可視化 疲労き裂の起点を明らかにするべく、ヒートティント法¹⁵⁾による疲労き裂の可視化を行った。ヒートティント法では疲労試験途中の試験片を取り出して加熱し、試験片の表面全体を酸化させて着色する。疲労き裂も自由表面であるため、加熱時に着色される。着色後に疲労試験を再開し、疲労破断後にその破面を観察すれば加熱時の疲労き裂を着色部として観察することができる。今回の観察では、試験片を 320 °C に昇温した後に 10 分保持し、その後放冷することで着色した。

Fig. 9 に加熱着色された疲労き裂を示す。Fig. 9(a) は B 材を 250 MPa で約 145 万回負荷した際の疲労き裂である。疲労き裂はかえり側の板表面(I)と穴抜き面破断部(II)の 2 か所から生じている。板表面からの疲労き裂が破断部の疲労き裂に比して大きい。Fig. 9(b) は C 材を 305 MPa で約 145 万回負荷した際の疲労き裂である。疲労き裂はだれ側(III)と抜き穴の板下面側(IV)双方に生じている。これらの疲労

(a) Material A

(b) Material B

(c) Material C

Fig. 8 Result of bending fatigue test

き裂の比較を行えば、かえり側から発生した疲労き裂がだれ側より発生したき裂に対して圧倒的に大きく、板厚の半分以上を占めている。また、かえり側の疲労き裂中には 2 つのき裂が会合した跡とおもわれる段差を確認できる。

4. 考察

一般に、疲労限は部材の表面粗さと硬さ、および残留応力に影響される。穴抜き部材における疲労限は穴抜き面の凹凸⁶⁾、残留応力¹⁶⁾と強い相関があることが報告されている。

本報の実験における穴抜き面の凹凸に関しては、3.1 節の(1)に述べたようにいずれの鋼種においても摩耗工具抜き穴は新品工具抜き穴に比してせん断面率が高く、穴抜き面全体を通して平滑である。加えて、3.1 節(2)より破断部の表面粗さは双方の抜き穴で大きな差異は無い。これらの結果は、工具摩耗による穴抜き面の凹凸の変化が穴抜き部の疲労限に対して有利に作用することを意味する。また、穴抜き部の硬さに関しては、3.1 節(3)に示したように全ての

Fig. 9 Fatigue cracks colored by heat-tint method

鋼種で新品工具抜き穴と摩耗工具抜き穴に大きな差異が無い場合、疲労限に与える影響は小さいと推測される。

一方、残留応力に関しては 3.1 節(4)に述べたように、いずれの鋼種においても摩耗工具抜き穴は新品工具抜き穴に比して板下面側で引張残留応力が高い。このような傾向は、疲労限を低下させる一因となりうる。これより、以下では残留応力の観点から 3.2 節の疲労試験の結果を考察する。

Fig. 8(c)より C 材の摩耗工具抜き穴の疲労限は新品工具抜き穴のものより約 1 割低下しているが、これは板下面側の高い引張残留応力の影響が強く発現した可能性が考えられる。3.2 節(2)に示したように、穴抜き部の疲労破断に対しては板下面側より生じた疲労き裂が支配的であった。ただし、Fig. 8(a), (b)より A 材と B 材では残留応力に差異が生じているにもかかわらず新品工具抜き穴と摩耗工具抜き穴の間に疲労限の差異はみられない。この原因は不明であるが、おそらくは疲労限に寄与する疲労き裂発生寿命と進展寿命の比率が影響している。疲労き裂の先端は局所的な塑性域となり、塑性域では残留応力は緩和される。よって、残留応力は主に疲労き裂の進展寿命に寄与する。C 材のようなフェライト・マルテンサイト鋼は DP (Dual Phase) 鋼と呼ばれるが、他の鋼種と異なり DP 鋼の穴抜き部においては微視き裂が複数存在することが報告されている¹⁷⁾。このような微視き裂はフェライト中のマルテンサイト近傍に生じるマイクロボイドに起因しており、その進展寿命が C 材の疲労限に占める割合は大きいと思われる。微視的な疲労き裂の観察によりこのようなメカニズムの妥当性を検証する必要があるが、これは今後の課題としたい。

なお、本報において分析した結果からは工具摩耗により抜き穴の板下面側で引張残留応力が増す明確な理由は分らない。摩耗したダイ刃先の丸みが一因と推察されるが、詳細なメカニズムの解明は次報以降で検討する予定である。

5. 結 言

強度または強化機構の異なる 3 種の高張力鋼板を対象に、10000 ショット後の穴抜き工具刃先の摩耗が穴抜き部材の疲労強度に及ぼす影響を調査した。得られた結果は以下の通りである。

- i) 引張強度に関わらず、フェライト・パーライト鋼と析出強化鋼では新品工具と摩耗工具を用いた穴抜き部材の疲労限はほぼ同等であった。
- ii) フェライト・マルテンサイト鋼においては工具摩耗に伴って穴抜き部材の疲労強度が低下した。ただし、その低下量は小さい。また、フェライト・マルテンサイト鋼における穴抜き部材の疲労限は、工具摩耗により低下した際も析出強化鋼より高い結果を示した。
- iii) いずれの鋼種においても、工具摩耗が穴抜き面の粗さと硬さに及ぼす影響は小さい。
- iv) 工具摩耗によるフェライト・マルテンサイト鋼の疲労限低下には、工具摩耗により誘起される抜き穴の板下面側における引張残留応力が寄与すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Keeler, S. & Ulintz, P.: Met. Form., **45-5**(2011), 24-28.
- 2) Konieczny, A. & Henderson, T.: SAE Special Publications, SP-2103(2007), 41-50.
- 3) Sperle, J.-O. & Trogen, H.: Scandinavian J. Metal., **18**(1989), 147-154.
- 4) Shirasawa, H.: ISIJ Int., **34-3** (1994), 285-289.
- 5) Sanchez, L., Gutierrez-Solana, F. & Pesquera, D.: Eng. Failure Analysis, **11**(2004), 751-764.
- 6) 吉武明英・塩崎毅・大村雅紀: 自動車技術, **33-4**(2002), 203-208.
- 7) Westwood, J. C.: Proc. Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., **19** (1979), 207-216.
- 8) 十代田哲夫・杵渕雅男・三浦正明: 日本機械学会 M&M2005 材料カンファレンス講演論文集, (2005), 187-188.
- 9) 松野崇・栗山幸久・村上碩哉・米沢翔太・金丸尚信: 塑性と加工, **52-606**(2011), 795-800.
- 10) 長屋稔: 塑性と加工, **10-99** (1969), 269-275.
- 11) 早川暢祥・吉田佳典・湯川伸樹・石川孝司: 第 57 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2006), 143-144.
- 12) Hernandez, J., Franco, P., Estrems, M. & Faura, F.: J. Mater. Process. Technol., **180** (2006), 143-150.
- 13) 長谷明・宮原征行・石田隆一・奥村宏道・小久保一郎: 昭和 50 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1975), 329-332.
- 14) 松野崇・栗山幸久・米沢翔太・村上碩哉・大竹尚登: 塑性と加工, **53-620**(2012), 836-837.
- 15) 関護雄・川辺敏雄: 立命館大学理工学研究所紀要, **5**(1960), 103-109.
- 16) 塩崎毅・玉井良清・稲積透: 自動車技術会学術講演会前刷集, **144-12**(2012), 15-18.
- 17) Dalloz, A., Besson, J., Gourgues-Lorenzon, A.-F., Sturel, T. & Pineau, A.: Eng. Frac. Mech., **76** (2009), 1411-1424.