

(論文)

高強度鋼板のせん断端面の遅れ破壊性に及ぼす加工条件の影響

森原竜司*1・白木厚寛*2・中屋道治*2

Effect of Shearing Condition on Hydrogen Embrittlement at Sheared Edge of High-Strength Steel Sheets

Ryuji MORIHARA・Atsuhiko SHIRAKI・Michiharu NAKAYA

要旨

引張強さが1,180 MPaを超える高強度鋼板の適用に当たっては、遅れ破壊の懸念があるため残留応力の抑制を図った適切な加工条件の選定が必要である。本研究では、遅れ破壊が発生しやすい部位の一つであるせん断端面の遅れ破壊性に及ぼすクリアランスおよび工具摩耗の影響を調査した。1,470 MPa級鋼板を用い、クリアランスを種々変更し、摩耗の程度が異なるパンチを用いてせん断加工した試験片を作製し塩酸に浸漬した。その結果、遅れ破壊による割れの数にクリアランス10~15%が多く、10%未満や20%を超える場合は少ないこと、摩耗したパンチを用いると割れ数が増加することが分かった。以上の傾向はせん断端面の残留応力の変化と一致することを示した。

Abstract

Delayed fracture is a concern in the application of high-strength steel sheets with a tensile strength exceeding 1,180 MPa, and it is necessary to select appropriate processing conditions to suppress residual stress. In this study research has been conducted to clarify the effect of clearance and tool wear on the delayed fracture of a sheared edge, one of the areas susceptible to delayed fracture. Test pieces were made by shearing a 1,470 MPa grade steel sheet with various clearances and punches with different wear levels and were immersed in hydrochloric acid. The results show that the number of cracks caused by delayed fractures becomes high when the clearance is 10-15%, and low when the clearance is less than 10% or greater than 20%, and that the number of cracks increases when a worn punch is used. These trends are consistent with the changes in the residual stress of the sheared edge.

検索用キーワード

せん断加工, 打抜き加工, 穴抜き加工, 遅れ破壊, 高強度鋼板, 残留応力, 自動車

まえがき = 燃費向上を目的とした自動車の車体軽量化および衝突安全性向上のため、高強度鋼板の適用が拡大している。とくに引張強度が1,180 MPa級以上の鋼板では水素により引き起こされる遅れ破壊の感受性が高まることが知られており、適用に当たっては考慮が必要である^{1), 2)}。自動車部品は主にブランク加工、穴抜き加工を経た後、プレス加工などにより成形され、その後、トリムやピアス穴抜き加工が実施される場合もある。とくにブランク加工、打抜き加工などのせん断加工によって生じる端面（せん断端面）は、局所的に高い引張残留応力が生じ遅れ破壊の発生リスクが高い^{3)~7)} 部位であることが知られており、それに着目した材料評価や遅れ破壊抑制のための工法開発がなされている^{7)~9)}。

せん断加工の条件にはクリアランス、工具摩耗、材料の傾斜角度、材料の拘束条件、打抜き速度などが挙げられ、主にかえりや2次せん断面などの欠陥を抑制する観点において適正条件の検討が行われている^{10)~14)}。これらの条件のうち、工具の摩耗は実際の量産プレスにおいて不可避的な現象であることに加え、とくに高強度鋼板では摩耗の進行が早く¹⁵⁾、その影響を明らかにすることは重要である。これまでに穴広げ性に代表されるせん断

端面の加工性への影響に関しては複数の報告がなされているが^{16)~19)}、遅れ破壊についての検討は少ない。そこで本検討では、せん断加工の基本的条件であるクリアランスとともに遅れ破壊に及ぼす工具摩耗の影響について検討を行った。なお、せん断端面の遅れ破壊にはせん断加工により生じる残留応力の影響が大きいことが報告されており^{6), 9), 20), 21)}、本検討においても残留応力に着目し遅れ破壊への影響を検討した。

1. 実験方法

1.1 せん断端面の遅れ破壊試験方法

供試材には、板厚1.2 mmおよび1.4 mmの1,470 MPa級冷延鋼板を用いた。表1に機械的特性を示す。

せん断加工には直径10 mmの丸穴の打抜き加工を用

表1 供試材の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of sample steels

Sample	Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
X	1.2	1,321	1,537	6
Y	1.4	1,427	1,578	5

*1 技術開発本部 材料研究所 *2 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター鋼板開発部

いた。打抜き工具の模式図を図1に示す。打抜き工具はパンチとダイにより構成されるが、パンチの方が摩耗が顕著であることが報告されており¹⁵⁾、本研究ではパンチの摩耗を検討対象とし、以下の二種のパンチを用いた。いずれもダイス鋼製 (HV730) であり、一種は新品のパンチ、もう一種は多数の打抜きに使用し先端に摩耗が生じたパンチである。新品パンチは実験中に摩耗が進行する可能性があるため、1本あたりの打抜き回数が20回以内となるように管理し、摩耗の影響を排除した。実験に用いたパンチ先端の断面形状を図2に示す。摩耗パンチは周方向に均一に摩耗しておらずA部に顕著に摩耗が生じていた。これらのパンチを用い、ダイ径を変化させて以下の式で示される打抜き時のクリアランスを種々変更して打抜き加工を実施した。クリアランス条件を表2に示す。

本検討ではダイ径を0.1 mm刻みで変更したため、クリアランスは板厚によって若干異なるが、以降は便宜的

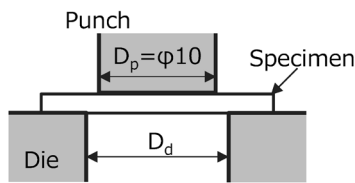


図1 打抜き試験方法
Fig.1 Set up for punching test

にクリアランスが小さい順に7, 10, 15, 20, 25%と称する。なお、端部の断面観察から見かけのクリアランスを確認したが、値のバラつきはあるものの、クリアランスの序列が逆転することがないことは確認した。

$$CL = (D_d - D_p) / t \times 100$$

ここに、CL：クリアランス

D_d ：ダイの直径

D_p ：パンチの直径

t：板厚

図3に摩耗パンチを用いた場合のせん断端面の外観を示す。パンチ摩耗部に相当するA部ではB, Cに比べてせん断面比率が高く周方向でばらつきが認められる。新品パンチを用いた場合についてはせん断端面のせん断面比率はおおむね周方向で均一になっていることを確認した。新品パンチ、摩耗パンチともかえりの発生は認められなかった。

打抜き後の試験片は、水素導入のため塩酸に浸漬した。浸漬条件については予備試験で割れが発生する条件を確認し、塩酸濃度5%かつ浸漬時間48時間とした。塩酸浸漬後は、顕微鏡を用いてせん断端面を全周観察し、割れの数と発生した位置を記録した。遅れ破壊による割れの例を図4に示す。端面における割れは板厚方向のかえり側(写真上部)では周方向に進展しており、板厚中央からせん断面付近では板厚に対して

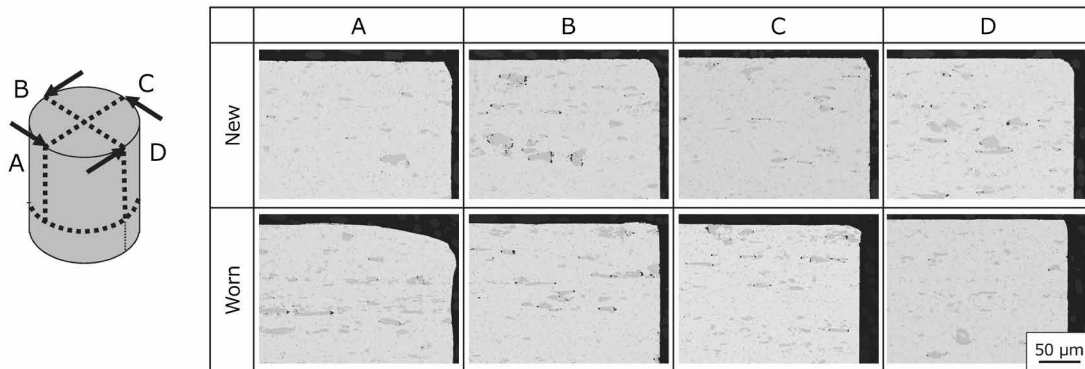


図2 新品および摩耗パンチの矢印で示した面における断面形状
Fig.2 Cross-sectional observations of new punch and worn punch pointed by arrows

表2 打抜きクリアランス条件
Table 2 Punching clearance condition

sample	Nominal clearance	7	10	15	20	25
X 1.2mm	Dd (mm)	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6
	Calculated clearance (%)	8.3	12.5	16.7	20.8	25.0
Y 1.4mm	Dd (mm)	10.2	10.3	10.4	10.6	10.7
	Calculated clearance (%)	7.1	10.7	14.3	21.4	25.0

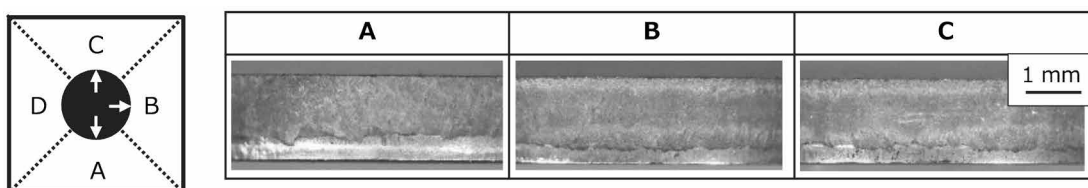


図3 摩耗パンチを使用した打ち抜き後の端面 (材料Y, クリアランス15%)
Fig.3 Appearance of edges sheared by the worn punch (sample: Y, clearance 15%)

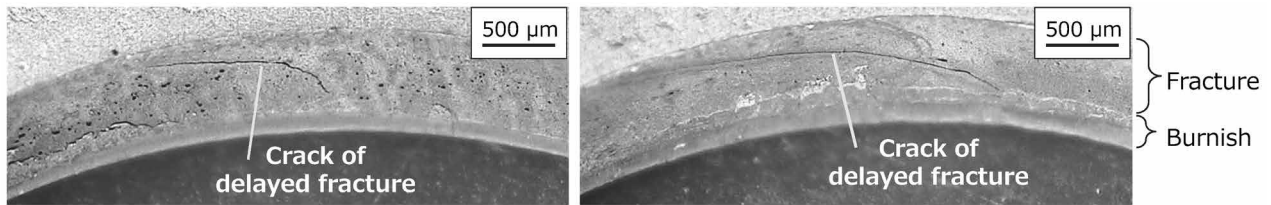


図4 打抜き端面に生じた遅れ破壊による割れ (左: 材料X, クリアランス10%, 右: 材料Y, クリアランス7%)
 Fig.4 Examples of delayed fracture cracks in sheared edge (left: sample X, clearance 10%, right: sample Y, clearance 7%)

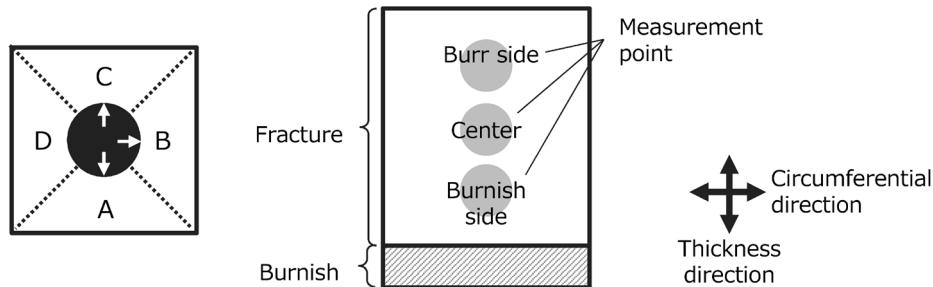


図5 残留応力の測定位置
 Fig.5 Measurement position of residual stress

45°方向に徐々に向きを変えている。このような形状を持つ割れを遅れ破壊による割れと判定し、偏析を起点とする溝状の腐食や介在物などによる点状のピットとは区別した。

1.2 セン断端面の残留応力測定

端面に生じた残留応力はX線解析法により測定した。測定には株式会社ガク製微小部応力測定装置 AutoMATE II を用いた。測定は $\sin^2\psi$ 法により行い、線源にはCr管球を用いた。回折面は α -Fe(211)、X線照射領域直径は0.3 mm、応力定数は -318 MPa/deg とした。また、測定位置および方向を図5に示す。打抜き後のサンプルを対角線に沿って4分割に切断した後、A、B、C方向の面の破断面内の破断面側、中央、せん断面側の3カ所で周方向および板厚方向の残留応力を測定した。

2. 実験結果

2.1 遅れ破壊試験結果

図6に塩酸浸漬後のせん断端面の割れ数とクリアランスの関係を示す。低クリアランス(7%)領域では、割れ数は少ないが、クリアランスが増加すると割れ数は増加し10~15%にて最大となり20%以上では再び低下している。材料を比較すると板厚が厚く強度が高いY材にて割れ数が多い傾向が見られる。また、いずれの材料においても摩耗したパンチで打抜くと新品パンチと比較して割れが増加することが分かる。なお、図7に示す通り割れが生じた部位は、パンチの摩耗が大きい部位(A)とその反対側(C)に集中していた。

2.2 セン断端面の残留応力測定結果

クリアランス約10%、15%、20%における破断面内3カ所において測定した板厚方向残留応力について図8(材料X)および図9(材料Y)に示す。両供試材ともに

板厚方向の残留応力のかえり側が大きくせん断面側が小さいことが分かる。また摩耗したパンチを使用した場合はいずれにおいてもかえり側および中央部の残留応力が増加した。いっぽうでせん断面に近い位置では明確な傾向は認められず、摩耗によりむしろ低下しているものも認められる。さらに遅れ破壊試験で割れが多く発生したクリアランス10、15%は割れの少なかった20%と比較してかえり側~中央部の残留応力が高かった。材料X、Yの残留応力の差はこれらのクリアランスおよびパンチの摩耗による差と比較して軽微であった。

図10は同様に円周方向の残留応力を測定した結果である。かえり側からせん断面側まで残留応力に大きな変化は認められない。また、摩耗したパンチと新品パンチとの差異は小さかった。

以上より、摩耗したパンチの使用により割れの数が増加する要因として端面のかえり側の板厚方向残留応力の増加が挙げられる。図11、図12に塩酸浸漬後の端面の割れの数とかえり側の板厚残留応力の関係を示す。両者には相関関係が認められ、パンチ摩耗による板厚方向残留応力の増加が遅れ破壊を促進していると考えられる。

本検討で用いたパンチは周方向の特定の箇所での摩耗していた。しかし遅れ破壊による割れは摩耗部位に加えてその反対側の端面においても発生が認められた。図13に摩耗パンチで打抜きした端面における板厚方向の残留応力を打抜き穴周りで測定した結果を示す。残留応力は、摩耗部(A)とその反対側(C)で高い値を示し、その間の(B部)では低位であった。この結果は、遅れ破壊による割れ発生位置と傾向が一致しており、周方向の割れ分布に関しても残留応力が影響していることがわかった。

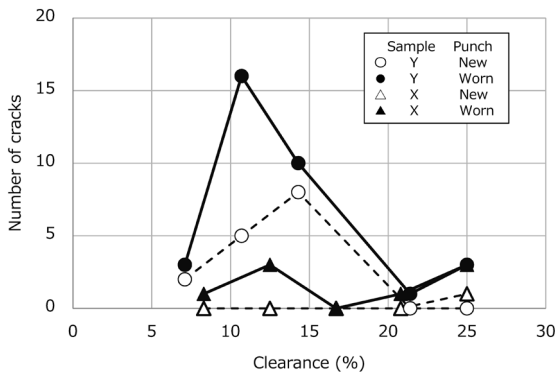


図6 せん断面に発生した割れの発生数とクリアランスの関係
Fig.6 Relations between the number of cracks observed in sheared edge and clearance

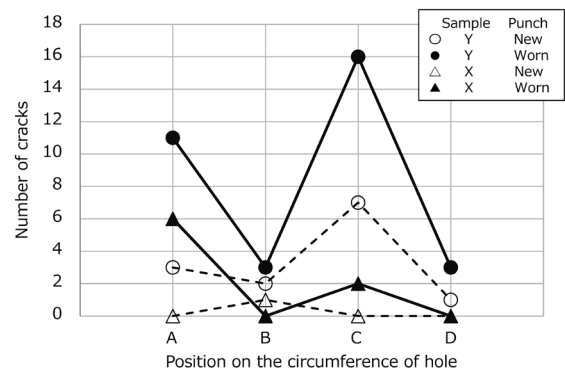


図7 打ち抜き穴周りの各位置のせん断面に発生した割れの発生数
Fig.7 Number of cracks observed in sheared edge around the hole

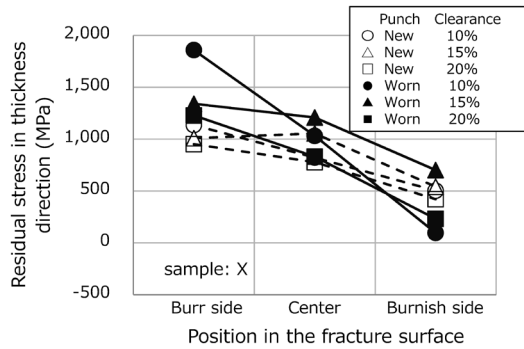


図8 板厚方向残留応力の板厚方向分布 (材料X)
Fig.8 Distribution of residual stress in thickness direction along thickness (sample : X)

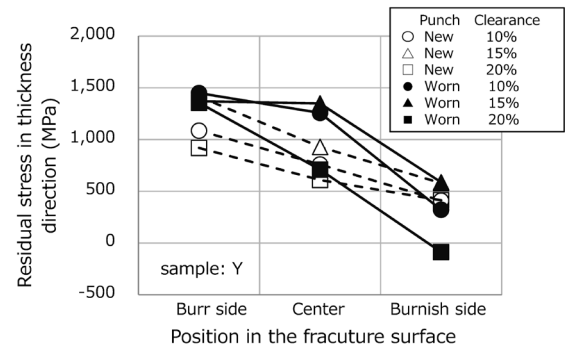


図9 板厚方向残留応力の板厚方向分布 (材料Y)
Fig.9 Distribution of residual stress in thickness direction along thickness (sample : Y)

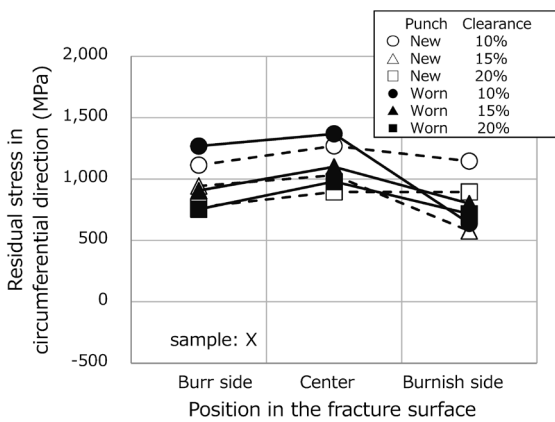


図10 周方向残留応力の板厚方向分布 (材料X)
Fig.10 Distribution of residual stress in circumferential direction along thickness (sample : X)

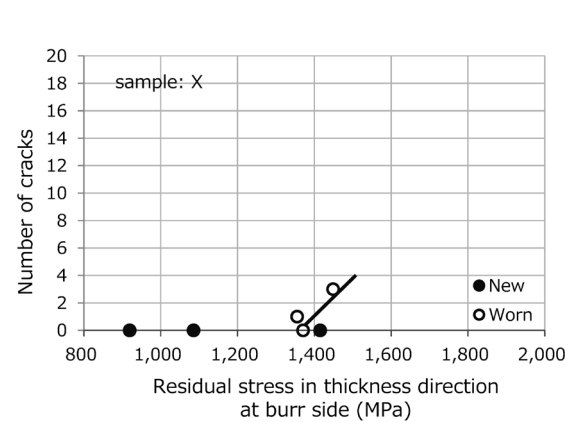


図11 破断面側の板厚方向の残留応力と割れ数の関係 (材料X)
Fig.11 Relationship between residual stress in thickness direction on burr side and number of crack (sample : X)

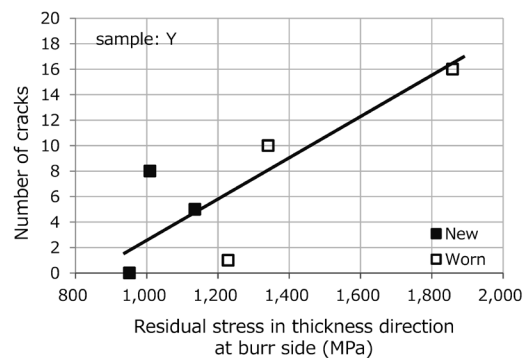


図12 破断面側の板厚方向の残留応力と割れ数の関係 (材料Y)
Fig.12 Relationship between residual stress in thickness direction on burr side and number of crack (sample : Y)

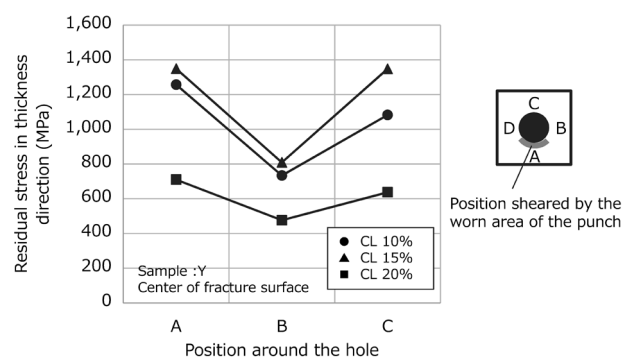


図13 打ち抜き穴周りの各位置における残留応力
Fig.13 Residual stress in thickness direction around the hole

3. 考察

3.1 セン断端面の遅れ破壊と残留応力

図4に示したように本検討で見られたせん断端面の遅れ破壊による割れはかえり側では板厚方向に対して垂直(打抜き穴周方向)に近い向きに発生しており, せん断面側に向かうにつれて向きを変えて中央部からせん断面側では45°の向きに変化している。このような変化を示す原因については以下のように考えられる。図8, 9にて示した端面に生じる板厚方向の残留応力はかえり側で大きく, せん断面側に向かうにつれて減少している。また周方向の残留応力(図10)は板厚方向と比較して小さく, かえり側, 中央部, せん断面側にかけて同程度である。この残留応力と割れの向きを図14に模式的に示す。せん断端面の遅れ破壊は板厚方向の残留応力

が支配的なかえり側では周方向に沿って進展し, 板厚方向および周方向の残留応力が同程度となる破断面中央～せん断面側では両方向の残留応力の影響を受け, 約45°方向に進展すると考えられる。

3.2 パンチ摩耗による残留応力増加メカニズム

せん断端面はだれ, せん断面, 破断面およびかえりにより構成される¹⁴⁾。図15にパンチ摩耗およびクリアランスの変化によるせん断端面の構成比率の変化を示す。かえりは本検討では見られなかったため省略した。摩耗パンチで打抜いた場合には新品パンチに比べてせん断面およびだれが増加していた。これは摩耗によりなだらかになったパンチ先端部の応力集中が低下し, き裂が発生せずにパンチ押し込みが進行したため, と考えられる。

図16に破断直前の圧縮応力に及ぼすパンチ摩耗の影響を模式的に示す。パンチの押し込み量増大に伴いダイ

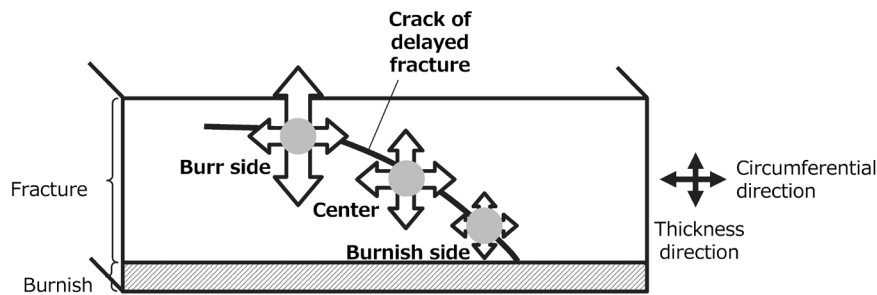


図14 セン断端面の遅れ破壊による割れと残留応力の模式図

Fig.14 Schematic illustration of crack of delayed fracture and residual stress on sheared edge

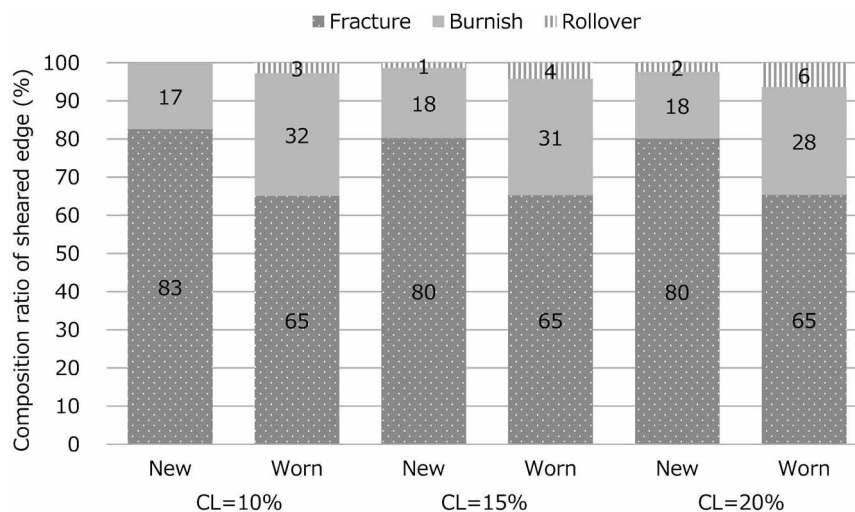


図15 パンチ摩耗およびクリアランスとせん断面の構成(材料Y)

Fig.15 Composition ratio of sheared edge and punch wear and clearance (sample : Y)

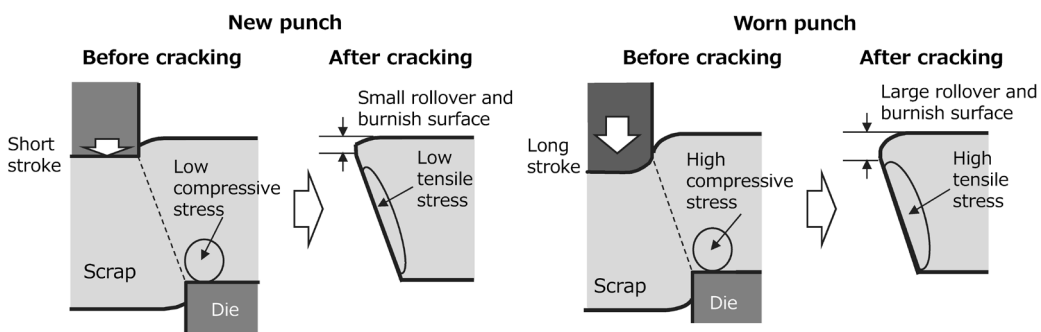


図16 破断直前と破断後の材料変形状態の模式図

Fig.16 Schematic illustration of material deformation just before cracking

からの反力およびダイ直上の圧縮応力は増加すると考えられ、せん断面比率が高い摩耗パンチの方がより高い圧縮応力が生じていたことが示唆される。せん断後の端面に生じる板厚方向の引張残留応力は、破断直前のダイ直上の圧縮応力が大きいほど大きくなることが報告されており⁴⁾、摩耗したパンチにて、端面の残留応力が増加した要因の一つとして考えられる。

3.3 割れ発生位置の周方向分布

前述のように、遅れ破壊による割れはパンチの摩耗部位に加えてその反対側の端面においても発生していた。これには図13に示した周方向の残留応力の分布が影響していることを示した。図3に示したようにパンチ摩耗部の反対側の端面ではせん断面比率は摩耗部に比べて低いいため、残留応力が高い理由については、図16に示したメカニズムとは別の要因が存在すると考えられる。周方向で打抜き時の亀裂の発生タイミングが異なることや、局部的な摩耗によりパンチの軌道が不安定になることなどが影響する可能性があるが、詳細は不明であり、今後の検討課題である。

むすび = 本研究では、1,470 MPa級鋼板を用いてせん断加工部での遅れ破壊に及ぼすクリアランスおよび工具摩耗の影響を調査した。クリアランスは今回調査した7~25%の範囲では10~15%において、10%未満や20%以上に比べて遅れ破壊が発生しやすいこと、パンチの摩耗により遅れ破壊が発生しやすくなることが明らかになった。またその傾向は残留応力の変化と一致することが確認された。

本結果によると、せん断端面の遅れ破壊の適切な評価のためにはクリアランスと共に工具の摩耗状況を管理することが重要である。またクリアランスの選択によって工具摩耗の影響を低減できる可能性があることが示唆された。

なおクリアランスによって残留応力に変化が生じた理由としては打抜き時の破断タイミングや応力状態の違い⁵⁾などが考えられるが、詳細は明らかでない。また本検討では上記の変化を残留応力に着目して検討したが、せん断加工時の大規模な塑性変形に伴い材料には加工硬化、格子欠陥、ボイド発生などの残留応力以外の変化も生じている。これらについてもせん断端面の遅れ破壊に影響を及ぼしている可能性があり、今後の検討が期待される。

参 考 文 献

- 1) 松山晋作. 遅れ破壊. 日刊工業新聞社, 1989, p.203.
- 2) T. Chiba et al. Scripta Materialia. 2023, Vol.223, No.15, p.115072.
- 3) 吉野正崇ほか. 鉄と鋼. 2013, Vol.99, No.4, p.302-306.
- 4) 森謙一郎ほか. 塑性加工連合講演会講演論文集. 2020, Vol.71, p.395-396.
- 5) 安富 隆ほか. 塑性加工連合講演会講演論文集. 2020, Vol.71, p.179-180.
- 6) 崎山裕嗣ほか. 鉄と鋼. 2022, Vol.108, No.10, p.784-794.
- 7) K. Mori, et al. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020, Vol.4, No.2, p.54.
- 8) 内海幸博ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.3.
- 9) 安富 隆. ぶらすとす. 2022, Vol.5, No.60, p.815-816.
- 10) 増田雪也ほか. 品質工学. 2004, Vol.12, No.1, p.97-104.
- 11) 安部洋平ほか. 塑性と加工. 2013, Vol.54, No.627, p.348-352.
- 12) 岩谷二郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.2, p.33.
- 13) 戸畑潤也ほか. 自動車技術会論文集. 2024, Vol.55, No.1, p.193-198.
- 14) 日本塑性加工学会. せん断加工. コロナ社, 1992, p.231.
- 15) 古閑伸裕ほか. 塑性と加工. 2014, Vol.55, No.646, p.1024-1028.
- 16) 松野 崇. 素形材. 2012, Vol.53, No.10, p.2-7.
- 17) P. Larour, et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022, Vol.1238, No.1, p.012041.
- 18) 安部洋平ほか. 塑性と加工. 2009, Vol.50, No.580, p.414-418.
- 19) 湯川伸樹ほか. 塑性と加工. 1998, Vol.39, No.454, p.35-39.
- 20) 北條智彦ほか. 日本機械学会M&M材料力学カンファレンス. 2021, GS18.
- 21) 松野 崇ほか. 塑性加工連合講演会講演論文集. 2022, Vol.73, p.331-332.