簡易対向ダイスせん断法を適用した 下穴せん断条件が穴広げ性に及ぼす影響

加藤 浩三* 近藤 一義** 中村 悟***

柿田 亨*** 余郷 時康***

Influence of Prehole Punching Condition on Formability in Hole Expansion Utilizing Simplified Opposed-Dies Shearing Process

Kohzoh KATOH*, Kazuyoshi KONDO **, Satoru NAKAMURA ***,

Tohru KAKITA *** and Tokiyasu YOGOH ***

(Received on March 12, 2015)

This study was aimed at developing a new prehole shearing process to promote excellent formability of the subsequent hole-expansion process for manufacturing automobile wheel disks made of high-tensile-stress steel. A “simplified opposed-dies shearing process” was newly proposed for forming a prehole for the hole-expansion process, since the original opposed-dies shearing process requires relatively complicated tool sets regardless of its excellent properties for hole expansion. As a result of the series of experiments with the simplified opposed-dies shearing process as the prehole forming process for the hole expansion process, the simplified opposed-dies shearing process was found to show an improvement of 0.3 in the expansion ratio over that in the case of the conventional shearing process.

Key words: punching, hole expansion, shearing, opposed-dies shearing process, work hardening, experimental analysis.

1. 緒言

穴広げ加工では、前工程の下穴せん断条件が穴広げ性に著しい影響を及ぼす。すなわち、下穴せん断時の塑性変形において加工硬化が進展すると、出発素材が有している塑性変形能が費やされてしまうため、次工程の穴広げ工程のための塑性変形能が乏しくなり、穴広げ素材のリム部内縁において破断が生じやすい。一方、中川らは、薄板材を対象とした一連の穴広げの研究において、『下穴成形に切削加工を適用した穴広げ加工では、下穴内縁部に加工硬化層が無い場合、穴広げ性の点で最も優れている』ことを示している^{1)~5)}。著者らの一人により開発された対向ダイスせん断法は、本質的には塑性変形を伴う分離成形でありながら、部分的に切削的な分離機構を適用しているため、分離面に加工硬化層が残留しないという利点がある^{6)~11)}。けれども、対向ダイスせん断法の利点の反面、慣用せん断法と比較す

ると、工具コストの点で不利である。そのため、生産現場の状況によっては、対向ダイスせん断法の成形機構を適用しながら、工具構成については簡易化することが、生産コスト及び品質の両観点から有利な場合がある。

本研究では、自動車用ホイールのディスク中央部に配置されているリム付きの塑性成形穴の穴広げ性を研究の対象としており、この穴広げ成形の下穴のせん断法として、対向ダイスせん断法に着目した。対向ダイスせん断法の適用に際しては、生産現場の生産条件を配慮して、工具構成を簡易化した対向ダイスせん断法（以降「簡易対向ダイスせん断法」と称する。）の適用を検討する。検討に際しては、提案する簡易対向ダイスせん断法を実験室スケールのプレス成形により検証することとし、下穴成形条件が、後続の穴広げ性に及ぼす影響を評価する。

2. 実験方法

2.1 簡易対向ダイスせん断法の概要

Fig. 1 は提案する簡易対向ダイスせん断法の概要を示したものであり、全工程は二つの工程から構成されている。まず、第1工程は予穴を有するブランクを用いて、負のクリアランス条件下で、パンチによる切込みを行う工程である。この際、ブランク内径側の余剰材料はスクラップとし

* 岐阜工業高等専門学校機械工学科 〒501-0495 本巣市上真桑 2236-2
Department of Mechanical Engineering, National Inst. of Tech., Gifu College,
2236-2, Kamimakuwa, Motosu, Gifu, 501-0495, Japan.

** 豊田工業大学 〒468-8511 名古屋市中白区久方 2-12-1
Toyota Technological Institute, 2-12-1, Hisakata, Tenpaku, Nagoya,
468-8511, Japan.

*** 中央精機㈱ 〒471-0836 愛知県豊田市鴻ノ巣町 1-18
Central Motor Wheel Co., Ltd., 1-18, Kohnosu, Toyota, 471-0836, Japan.

て排除されるが、切削的な分離機構による切込み工程であるため、「せん断応力を被り加工硬化が促進される面」と「せん断分離面」とが異なる。そのため、せん断分離面には加工硬化層が蓄積されない利点がある。第2工程では、工具の衝突を避けるために正のクリアランス条件に変更する。そのためパンチは第1工程で用いたものと同一のままで、ダイのみを内径の大きいものに交換する。これにより、ブランクの残りの板厚を慣用せん断により分離する。

Fig. 1 Schematic of "simplified" opposed-dies shearing process

これら二つの工程から構成される分離面は、「負のクリアランスの切削的な分離機構に基づく加工硬化の無い上部分離面」と「正のクリアランスの慣用せん断に基づく加工層を伴う下部分離面」の二つから構成される。そのため、簡易対向ダイスせん断法は、全分離面が加工硬化層の無いオリジナルの対向ダイスせん断法に対して、加工硬化の進展の点では不利である。

一方、簡易対向ダイスせん断法の二つの工程は、実際の加工工程では、多段のプレスステージのうちの2ステージ内で実現されるため、提案する分離工程が2ステージに亘ること自体はコスト上の問題にはならない。オリジナルの対向ダイスせん断法においては、負のクリアランスによるパンチとダイの衝突を回避するために、工具を分割構造として、多動プレスを用いる必要がある。一方で提案する簡易対向ダイスせん断法を実機に展開する場合には、分割構造の工具は不要であり、またパンチは2工程で同形のものを適用し得る点で、工具コストの負荷を省くことができる。またプレス機械についても単動タイプで対応可能である利点がある。

2.2 実験装置

Fig.2 は実験装置の外観写真であり、最大能力 1500kN の3 動油圧プレスである。このプレスには工程に応じて穴広げの予穴成形のせん断のための工具セット、あるいは穴広

Fig. 2 Hydraulic press machine for experiment

げのための工具セットが配置されて各実験が行われる。

Fig.3 は2.1 節で概説した簡易対向ダイスせん断法の工具概要図であり、これにより、後続の穴広げ工程のための予穴を成形する。成形に際しては、ブランクホルダとダイホルダの間にスペーサーを配置し、これにより第1工程の圧下量を制御した。ただし、データ整理に際しては、第1工程後のテストピース寸法を測定した圧下量を用いている。なお、簡易対向ダイスせん断法の第2工程の実験に際しては、第1工程で使用したダイを取り出し、第2工程用の穴径の大きいダイをセットして行った。

Fig.4 は穴広げ工程の工具概要図である。穴広げ工程では、まず、簡易対向ダイスせん断法で下穴が設けられたブランクについて、表裏の向きは同じままでセットされる。次にブランクは、上部のリング形状の板押さえを介して 65kN の力で保持される。この状態で、下部の円錐形状パンチが上昇することにより、穴広げ加工が実現される。穴広げの成形性を評価する尺度として、式(1)により定義される穴広げ率を採用した。

$$\lambda = (d_b - d_i) / d_i \quad (1)$$

ただし、 d_i は予穴の初期直径であり、 d_b は穴広げ後の直径である。この穴広げ率の定義では、例えば穴広げにより直径が2倍になった場合の穴広げ率は1.0である。

Fig. 3 Tool set of prehole shearing for hole expansion

Fig. 4 Tool set for hole expansion process

2.3 穴広げに伴うリム部の破断の評価方法

穴広げ実験後のブランク中央部のリム部の破断の有無により、穴広げの成形性を評価した。Fig.5 は穴広げ後のテス

トピースサンプルであり、それぞれ(a)は穴広げ成形が成功した場合、(c)はリム部で破断が生じた場合、及び(b)は(a)と(c)の中間的な状況であり、リム部にくびれが発生した場合である。

Fig. 5 Photos of test piece samples after hole expansion process

2.4 実験条件

実験条件を Table 1 にまとめて示した。実験に供した材料は自動車用熱間鋼板の SPFH590 である。本鋼種は研究の対象としている車両ホイールディスクと同じものである。実験用のブランクは円盤形状で外径は 130 mm であり、板厚が 3.5 mm である。円盤の中央部には矩形でコーナーに丸みのある穴が設けられている。この穴形状は実機の穴と全く同一であり、実機においては搬送中の回転を防止するために設けられているものであるが、Fig.1 に示された簡易対向ダイスせん断法においては、第 1 工程時の予穴の位置づけである。なお、この第 1 工程時の予穴直径は、青木らの研究事例から¹²⁾、分離面性状に著しく影響を及ぼす因子であると考え、本研究では実機のシミュレーション実験の位置づけから、同予穴直径を 1 水準のみとしている。

この第 1 工程における負のクリアランス条件は-20%とした。また、パンチの圧下量は板厚に対して、10%から 70%の範囲である。第 2 工程のクリアランスは元板厚の 3.5 mm に対して 12%としている。

簡易対向ダイスせん断法によって得られる穴広げ用の予穴直径は板厚 3.5 mm に対して 36 mm と小さく、穴広げ条件としては比較的厳しい条件である。

潤滑条件としては協同油脂製の塑性加工用潤滑剤「クリアループ PB-120」が用いられ、穴広げの実験に際しては、円錐パンチの表面に塗布された。

Table 1 Conditions of experiment

Material of blank	Hot rolled steel for auto (High-tensile-stress steel) SPFH590; $\sigma = 964 \varepsilon^{0.18}$ MPa
Dimension of blank	Thickness; 3.5 mm, Outer diameter; 130 mm Centering hole shape; Square with round corner in radius 5mm Square side length; 27.6mm
Prehole shearing process	Punch diameter; 36 mm Punch profile radius; 0 mm, 0.1 mm Blank holder; Polyurethane spring "Misumi AZ20-40"
	Clearance at first step; -20% Punch penetration depth at first step relative to the thickness; 10%, 30%, 40%, 50%, 70% Clearance at second scrap rejection step 12% (Based blank thickness 3.5 mm)
Hole expansion process	Conical punch shape with cone angle of 30 deg Holding force for blank flange; 65 kN Lubricant; Commercial petroleum oil "Clear-Lub PB-120"

3. 実験結果と考察

3.1 予穴の穴あけ工程の第 1 工程の圧下量が後続の穴広げ性に及ぼす影響

Fig.6 は簡易対向ダイスせん断法を用いた予穴の穴あけ工程において、第 1 工程の圧下量が、後続の穴広げ工程の成形性に及ぼす影響を示したものである。第 1 工程のパンチ肩半径は 0.1 mm で、クリアランスは-20%の条件である。横軸はブランク厚みで基準化された第 1 工程の圧下量であり、縦軸は式(1)により定義された穴広げ工程の穴広げ率である。各プロットは一つのテストピースに対応しており、○記号は穴広げが破断なく完了した場合、×記号はリム部に破断が生じた場合、及び△印は両者の中間的な状況であるくびれが生じた場合である。実線の曲線は、破断が生じるか生じないかの境界を示す曲線である。圧下率 30%の条件に極大があり、この穴広げ率は 1.1 である。

Fig.6 Influence of punch penetration depth in 1st step on hole expansion ratio. Punch profile radius 0.1 mm. Clearance -20%

Fig.7 は Fig.6 に基づく上記の結果を考察するためのものであり、予穴の穴あけ工程の 1 工程の圧下量が、穴あけ完了後の分離面の様相に及ぼす影響を示したものである。縦軸は分離面のせん断面（パニシ面）と破断面の構成割合であり、パラメータの●記号はせん断面を表しており、▲記号は破断面を表している。破線の 45 度の斜線は、第 1 工程におけるパンチ圧下量が、分離完了後のせん断面高さに一致する場合には、せん断面のプロット（●記号）が、この線上に位置することを意図して描かれている。圧下率 10%の場合に着目すると、せん断面割合のプロットは斜線より上部に位置している。このことは、圧下率 10%における分離面のせん断面は、簡易対向ダイスせん断法に基づく第 1 工程に生成されたせん断面と、後半の慣用せん断に基づく第 2 工程時に生成されたせん断面とから構成されていることを意味している。従って同じせん断面のうちでも上部は簡易対向ダイスせん断法の切削的な分離機構により構成された加工硬化の比較的小さい面であり、下部は慣用せん断に基づく加工硬化した面であると推察される。

Fig.8 は、以上の推察を確認するためのものであり、簡易対向ダイスせん断法による穴あけ分離面のせん断面（パニシ面）における硬度分布である。横軸はせん断面（パニシ面）の表面から板厚方向下向きの位置を示しており、縦軸はビッカース硬さを示している。また、パラメータは簡易対向ダイスせん断法の第 1 工程における圧下量であり、板厚で除して基準化した値である。圧下量が 10%の場合には、

表面からの 0.5 mm の位置までは、硬度は比較的低く、0.5 mm の位置から上昇している。このことは、表面から 0.5 mm までのバニシ面においては、簡易対向ダイスせん断法による切削的な分離機構により、加工硬化が抑制されていることを示している。一方、0.5 mm から右方向（板厚下方）では、硬度が増加しており、加工硬化が生じていることを示している。この理由は、この領域のバニシ面は簡易対向ダイスせん断法の第 2 工程の慣用せん断機構により生成されたためである。この解釈は Fig.6 において、圧下率が 10% の条件では穴広げ率が 0.7 程度と低く留まっている結果と対応している。

Fig.7 Relationship between composition of separated surface and punch penetration depth in 1st step

Fig.8 Hardness distribution in thickness direction with punch penetration depth in 1st step as a parameter

Fig.7 において、圧下率が 30% から 50% の領域ではせん断面の曲線は斜線と一致している。このことは、この圧下率条件で生成されたせん断面は、簡易対向ダイスせん断法の第 1 工程の切削的な分離機構で生成されたもののみから構成されていることを示しており、加工硬化が抑制されていることを意味している。この結果は、Fig.8 において圧下率 30% と 50% の硬度分布が低く留まり、加工硬化の進展が抑制されていることと対応している。また、Fig.6 において穴広げ率が良好である結果とも対応している。

Fig.7 において、圧下率が 50% 以上の領域では、せん断面の曲線は斜線より下側に位置している。このことから、50% 以上の圧下率領域では、簡易対向ダイスせん断法で生成されるせん断面高さは、第 1 工程の圧下量よりも小さく、簡易対向ダイスせん断法の切削的な分離機構による加工硬化の抑制効果を充分には期待できないものと推察される。

Table 2 は簡易対向ダイスせん断法における第 1 工程の圧下率をパラメータとして、各圧下率条件の分離面の写真を示したものである。各写真において、せん断面（バニシ面）は光沢のある部分であり、破断面は灰白色の粗い様相の部分である。圧下率の大きい条件の 70% の写真では、光沢のあるせん断面（バニシ面）の厚みは、第 1 工程の大きな 70% の圧下率の割には小さい。この理由は簡易対向ダイスせん断法の第 1 工程終期で破断が生じたせいである。第 1 工程の圧下率が大きい場合に、破断が生じる理由は以下のとおりである。すなわち、負のクリアランス条件下で、大きな圧下量の場合には、第 1 工程の後期で抜きクズ体積を排除するための抵抗が増大するため破断が生じる。この破断に起因した表面性状の劣化のため、次工程の穴広げ率が低下したものと推察される。この推察は、Fig.6 において圧下量が 70% の条件で、穴広げ率が比較的低く留まっている結果と対応している。

Table 2 Influence of punch penetration depth in 1st step on separated surfaces. Clearance - 20%

Punch penetration depth	Features of separated surface
10%	← Burnished surface ← Fractured surface
30%	← Burnished surface ← Fractured surface
50%	← Burnished surface ← Fractured surface
70%	← Burnished surface ← Fractured surface

3.2 簡易対向ダイスせん断法と簡易せん断法の予穴成形方法の相違が穴広げ率に及ぼす影響

Fig.9 は慣用せん断により穴広げの下穴を成形した場合の結果であり、横軸はクリアランスであり、縦軸は穴広げ率である。クリアランスの変化に伴って穴広げ率は変化しており、クリアランス 24% の条件で穴広げ率は最大値の 0.8 である。Fig.6 に示したように簡易対向ダイスせん断法を適用して穴広げの下穴を成形した場合の最大の穴広げ率は 1.1 である。従って、簡易対向ダイスせん断法は慣用せん断に比較して、穴広げ率が 0.3 向上している。

Fig.9 Hole expansion ratio in case of conventional shearing for prehole without blank holder

Fig.10 は、上記の簡易対向ダイスせん断法の優位性を考察するために、穴広げの予穴の分離面付近の加工硬化分布を、慣用せん断との比較において示したものである。横軸は円孔の分離表面から材料の内面に向かう方向の位置であり、縦軸はビッカース硬さである。板厚方向についての測定位置は、せん断面（パニシ面）の中央部である。慣用せん断の場合には、表層から内部に向かって緩慢に硬度が減少しているが、簡易対向ダイスせん断法の場合は、表層にごく近い内部から著しく低い値になっている。以上のことから、簡易対向ダイスせん断法によって成形された予穴の場合には、慣用せん断と比較して、加工硬化が抑制され、ひいては破断が抑制されて穴広げ率が向上したものと考えられる。

Fig.10 Comparison of hardness distribution in radial direction between simplified opposed-dies shearing process and conventional shearing process

4. 結 言

車両ホイールディスクの穴広げ性の向上を目的として、穴広げの予穴の成形に簡易対向ダイスせん断法を適用することを検討した。検討に際しては、実機ディスクの形状を部分的に抽出した材料モデルを用いた実験室的な検討方法を採用した。検討の結果、以下の結果が得られた。

(1) 負のクリアランス条件-20%で実施した、簡易対向ダイスせん断工程における第1圧下時の圧下量条件については、30%が穴広げ性の観点から最も良好な条件である。この理由については、第1工程の圧下量が30%より低い条件では、分離面のせん断面（パニシ面）について、第1工程の負のクリアランス条件下で分離された面のみならず、第2工程の正のクリアランス条件下（すなわち慣

用せん断）により分離されたせん断面も存在し、この部分の加工硬化のため穴広げ性不良の結果になった。このことは、硬度分布の評価により裏付けられた。一方、第1工程の圧下量が70%の高い圧下量の条件下では、負のクリアランスの第1工程の段階で、抜きクズの体積が大きく、ひいてはこの排除抵抗が大きいため、第1工程の終期で破断面が生じ、この表面性状の劣化のため、穴広げ率が低下したものと推察された。

(2) 慣用せん断法と簡易対向ダイスせん断法の2つの下穴せん断法が穴広げ性に及ぼす影響を比較したところ、簡易対向ダイスせん断法による下穴成形は、慣用せん断法よりも後続の穴広げ成形時の成形性に及ぼす影響が良好であり、特に第1工程の圧下量30%の条件では、穴広げ率が慣用せん断法の場合より約0.3穴広げ率が高い結果が得られた。この理由については、硬度分布の測定結果から、簡易対向ダイスせん断法による分離面の方が慣用せん断法より加工硬化程度が低いことから、穴広げ成形時の破断が抑制されたためであると考察された。

参 考 文 献

- 1) 中川威雄・吉田清太:理科学研究所報告, **44-2**(1968), 91-106.
- 2) 中川威雄・吉田清太:理化学研究所報告, **44-3**(1968), 150-162.
- 3) 細野和典・中川威雄・吉田清太:塑性と加工, **9-92** (1968), 637-642.
- 4) 中川威雄・吉田清太:塑性と加工, **10-104**(1969), 665-671.
- 5) 中川威雄・Vladmir, C.・高野豊晴・町田輝史:塑性と加工, **16-178**(1975),1081-1088.
- 6) 近藤一義・渡辺亮・高田久於男・吉田元昭:塑性と加工, **12-129** (1971), 733-741.
- 7) 近藤一義:塑性と加工, **29-324** (1988), 21-25.
- 8) 近藤一義・岩間龍郎・大石孝治:塑性と加工, **23-262**(1982),1058-1065.
- 9) 近藤一義・木村陽次:日本機械学会論文集(第3部), **35-277** (1969),1972-1979.
- 10) Hirota, K. & Kondo, K.: Proc. of 6th ICTP, **3**(1999), 2239-2244.
- 11) 広田健治・近藤一義・寺山寛・永安伸行:日本機械学会論文集(C編), **65-634** (1999), 2549-2554.
- 12) 青木勇・笹田昌弘・中村高志:日本機械学会論文集(C編), **76-767** (2010), 1844-1849.