

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6558515号
(P6558515)

(45) 発行日 令和1年8月14日 (2019.8.14)

(24) 登録日 令和1年7月26日 (2019.7.26)

(51) Int.Cl.

F I

B 2 1 D 5/01 (2006.01)

B 2 1 D 5/01 Z

B 2 1 D 22/00 (2006.01)

B 2 1 D 22/00

B 2 1 D 37/20 (2006.01)

B 2 1 D 37/20 Z

G O 6 F 17/50 (2006.01)

G O 6 F 17/50 6 8 O C

G O 6 F 17/50 6 1 2 H

請求項の数 9 (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2019-509571 (P2019-509571)

(86) (22) 出願日 平成30年7月13日 (2018.7.13)

(86) 国際出願番号 PCT/JP2018/026587

(87) 国際公開番号 W02019/039134

(87) 国際公開日 平成31年2月28日 (2019.2.28)

審査請求日 平成31年2月18日 (2019.2.18)

(31) 優先権主張番号 特願2017-160055 (P2017-160055)

(32) 優先日 平成29年8月23日 (2017.8.23)

(33) 優先権主張国・地域又は機関
日本国 (JP)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 000001258

J F E スチール株式会社

東京都千代田区内幸町二丁目2番3号

(74) 代理人 100103850

弁理士 田中 秀▲てつ▼

(74) 代理人 100105854

弁理士 廣瀬 一

(74) 代理人 100116012

弁理士 宮坂 徹

(74) 代理人 100066980

弁理士 森 哲也

(72) 発明者 藤井 祐輔

東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J

F E スチール株式会社知的財産部内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 金属板のせん断加工面での変形限界の評価方法、割れ予測方法およびプレス金型の設計方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

せん断加工された金属板を曲げ加工を含むプレス成形で成形する際における、上記金属板のせん断加工面での変形限界を評価する変形限界の評価方法であって、

曲げ加工を受ける金属板の曲げ外側表面とせん断加工面との境界近傍に発生するひずみの分布のうち、評価位置における、せん断加工面での板厚方向の表面ひずみ分布の勾配と上記曲げ加工による曲げ稜線方向の表面ひずみ分布の勾配との2つの表面ひずみ分布の勾配から求めた指標値と、せん断加工面に発生する張力との関係から、せん断加工面での変形限界を評価し、

上記指標値は、上記2つの表面ひずみ分布の勾配を変数とし、上記各勾配とそれぞれ正の相関がある値であることを特徴とする変形限界の評価方法。

【請求項 2】

上記指標値は、2つの表面ひずみ分布の勾配の自乗平均であることを特徴とする請求項1に記載した変形限界の評価方法。

【請求項 3】

上記指標値は、2つの表面ひずみ分布の勾配の和であることを特徴とする請求項1に記載した変形限界の評価方法。

【請求項 4】

上記せん断加工面に発生する張力は、曲げ加工の成形シミュレーションによって算出した値であって、そのせん断加工面に発生する張力として、曲げ加工部における板厚中心に

10

20

沿った有限要素に発生する引張応力を使用することを特徴とした請求項1～請求項3のいずれか1項に記載した変形限界の評価方法。

【請求項5】

上記せん断加工面に発生する張力は、曲げ加工の成形シミュレーションによって算出した値であって、そのせん断加工面に発生する張力として、曲げ加工部における板厚方向に分布する有限要素の応力の平均値を使用することを特徴とした請求項1～請求項3のいずれか1項に記載した変形限界の評価方法。

【請求項6】

上記2つの表面ひずみ分布を求めるための、板厚方向と曲げ稜線方向の各表面ひずみを、曲げ加工の成形シミュレーションによって算出することを特徴とした請求項1～請求項5のいずれか1項に記載した変形限界の評価方法。

10

【請求項7】

上記評価位置を、対象とする曲げ加工で端面を变形するときに亀裂が発生すると推定される位置とすることを特徴とした請求項1～請求項6のいずれか1項に記載した変形限界の評価方法。

【請求項8】

せん断加工された金属板を曲げ加工を含むプレス成形で成形した場合の割れの有無を予測する割れ予測方法であって、

曲げ加工を受ける上記金属板の曲げ外側表面とせん断加工面との境界近傍に発生するひずみの分布のうち、せん断加工面での板厚方向の表面ひずみ分布の勾配と上記曲げ加工による曲げ稜線方向の表面ひずみ分布の勾配との2つの表面ひずみ分布の勾配を変数とした指標値と、せん断加工面に発生する張力との関係を、予め求めておき、

20

上記関係と、評価位置での上記2つの表面ひずみ分布の勾配から求めた指標値とから、せん断加工面での割れを予測し、

上記指標値は、上記2つの表面ひずみ分布の勾配を変数とし、上記各勾配とそれぞれ正の相関がある値であることを特徴とする割れ予測方法。

【請求項9】

請求項1～請求項7のいずれか1項に記載した変形限界の評価方法、若しくは請求項8に記載した割れ予測方法を用いて、金属板端面での割れ発生を抑制したプレス金型の形状を設計することを特徴とするプレス金型の設計方法。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、せん断加工した後の金属板（素材）を、曲げ加工を含むプレス成形で成形して加工する際における、せん断加工面（端面）に発生する割れを評価、予測する技術、及びその技術に基づき金属板の割れを抑制可能な金型形状の設計方法（決定方法）に関する技術である。

【背景技術】

【0002】

プレス成形は、代表的な金属加工技術の一つであり、一対の金型の間に金属板を挟んで挟圧し、その金属板を金型の型形状に倣うように成形することで、金属板を所望の製品形状に加工する技術である。そして、このプレス成形は、自動車部品、機械部品、建築部材、家電製品等、幅広い製造分野で用いられている。

40

【0003】

このプレス成形における成形性の主な課題の一つとして割れがある。この割れには、主に、素材の引張り変形による割れと、曲げ変形による割れと、それらの複合変形による割れとがある。引張り変形による割れは素材の延性に大きく起因し、成形限界線図を用いた割れの予測手法で評価することが一般的である。一方、曲げ変形による割れは、金型の曲げ半径 R と素材の板厚 t との比である曲げ性 R/t に大きく起因し、素材の表面に亀裂が発生しない最小の曲げ半径と板厚 t の比を実験的に求めることで、割れの予測をする方法

50

が一般的である。引張り変形と曲げ変形の複合変形による割れの予測手法としては、例えば、金型の曲げ半径 R と金属板に発生する張力を用いた予測手法（特許文献 1）がある。

【0004】

上記の割れは、いずれも金属板の表面から亀裂が発生し、亀裂が板厚方向に貫通する場合の事例である。

しかし、その他に、割れ発生事例として、せん断加工された素材の端面が変形を受けることで、端面から亀裂が発生して割れに至る事例がある。素材の端面は、せん断加工により強い変形をすでに受けているため延性に乏しく、また、破断面やバリといった凹凸へ応力が集中することで、亀裂が発生しやすいという特徴がある。このため、割れに対する評価方法や予測方法が上記とは異なる。

10

【0005】

従来では、この素材の端面の割れに関しては、引張り変形によって引き起こされる伸びフランジ割れに対する評価方法について多くの検討がなされており、例えば、端面に沿った方向のひずみ勾配や端面と直交する面内方向のひずみ分布の勾配とを用いた予測手法（特許文献 2）などが提案されている。ここでいうひずみ分布の勾配（本明細書では「ひずみ勾配」とも記載する）とは、ある長さに分布するひずみの単位長さ当たりのひずみの変化である。しかし、曲げ変形や、引張り変形と曲げ変形の複合変形により引き起こされる素材の端面の割れに関しては、有効な予測方法や評価方法が少ない。しかしながら、このような素材の端面での割れに関し、特に引張り強度 590MPa 級以上の高強度鋼板で課題として顕在しはじめています。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】特許第 5630312 号公報

【特許文献 2】特許第 5146395 号公報

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献 1】風間 宏一、永井 康友著「板の曲げ加工時に生ずる端部反り変形の解析」、塑性と加工、第 45 巻、第 516 号、2004 年、p. 40-44

【発明の概要】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

本発明は、上記のような点に着目してなされたものであり、せん断加工された素板（金属板）の端面に曲げ変形や引張り変形と曲げ変形の複合変形により引き起こされる割れの評価や予測の手法を提供し、プレス金型の設計方法に反映すべき技術を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

課題を解決するために、本発明の一態様は、せん断加工された金属板を曲げ加工を含むプレス成形で成形する際における、上記金属板のせん断加工面での変形限界を評価する変形限界の評価方法であって、曲げ加工を受ける金属板の曲げ外側表面とせん断加工面との境界近傍に発生するひずみの分布のうち、評価位置における、せん断加工面での板厚方向の表面ひずみ分布の勾配と上記曲げ加工による曲げ稜線方向の表面ひずみ分布の勾配との 2 つの表面ひずみ分布の勾配から求めた指標値と、せん断加工面に発生する張力との関係から、せん断加工面での変形限界を評価する。

40

【発明の効果】

【0010】

本発明の一態様によれば、対象となる金属板（素材）をせん断加工後に変形させる際における、端面の変形限界が評価出来る。この結果、本発明の一態様によれば、端面からの割れの発生有無を精度よく予測したり、割れの発生を抑えたりすることができる金型形状

50

の設計が可能となる。

また、本発明の一態様によれば、単純曲げ、曲げと引張りとの複合変形、引張り変形の複数の形態を一つの指標で評価することが出来る。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】曲げ加工を含むプレス成形で成形した成形品の一例を示す図である。

【図2】曲げ加工時に型からの浮きが発生した状態の一例を示す図である。

【図3】張力と指標値との関係から分かる、変形限界線や端面での割れの発生しない領域の例を示す図である。

【図4】単純曲げ成形を行う例示する模式図で、(a)は側面図、(b)は試験片1とパンチ21との関係を示す平面図である。 10

【図5】複合曲げ成形を行う例示する模式図で、(a)は側面図、(b)は試験片1とパンチ32との関係を示す平面図である。

【図6】張力と、2つのひずみ勾配の自乗平均からなる指標値との関係を示す図である。

【図7】張力と、2つのひずみ勾配の和からなる指標値との関係を示す図である。

【図8】実施例における曲げ成形による製品形状を示す図である。

【図9】実施例における引っ張り変形と曲げ成形が複合した変形によって成形された製品形状を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】 20

次に、本発明に基づく実施形態について図面を参照しつつ説明する。

金属板を曲げ加工を含むプレス成形で成形した成形品の例を、図1に示す。図1は鞍形状にプレス成形した場合の例である。この図1において、符号1Bは、金属板1を曲げる際の曲げ線位置となる曲げ稜線方向となる。符号10Aは、端面（せん断加工面）となる。また符号Zが、曲げ外側表面とせん断加工面との境界近傍のうちの、亀裂が発生しやすい箇所の例である。

【0013】

そして、発明者らが種々の検討をした結果、素材1（金属板1）をプレス成形した際に、図2に示すように、素材1の端面は曲げ加工時に反りが発生（例えば、非特許文献1）して、素材1の端面側が金型の曲げ部から浮く。このため、素材1の中央部側（図1の符号1Ba参照）では、金型の曲げ半径Rに近い曲げ半径で曲げ変形を受けるが、素材1の端面側（図1の1Bb参照）では、金型の曲げ半径Rとは異なる曲げ半径で曲げ変形を受ける。 30

【0014】

このとき、曲げ変形と引張り変形との複合変形の場合、引張り変形を強めていくと、金型に対する素材端面の浮きは減少する傾向があるが、素材1の強度が590MPa以上または板厚が1.0mm以上となると、素材1の端面10Aでの浮きが無くなる前に割れが発生してしまうことが分かった。したがって、従来のように、金型の曲げ半径Rを用いた割れの予測手法では、端面10Aからの割れを精度よく予測できないことが分かった。

【0015】 40

また、曲げ変形時には素材1の板厚方向Xに非常に大きなひずみ勾配が発生するため、素材1の端面10Aに沿った方向のひずみ勾配や端面10Aと直交する面内方向のひずみ勾配は相対的に影響が小さくなる。そのため、それらを用いた従来の予測手法では、曲げ変形が含まれるプレス成形の場合、端面10Aの割れを予測することが困難であることが分かった。

【0016】

更に、発明者らは、せん断加工された素材1の端面10Aに様々な変形を加えて割れの有無を検討した結果、下記の知見を得た。

端面10Aからの亀裂は、その発生部に与えられる最大主ひずみの方向と直交する方向に進展する。その際、最大主ひずみの方向と直交する方向のひずみ勾配が大きいほど、亀 50

裂の発生と進展を抑制する傾向がある。そして、最大主ひずみの方向と直交する様々な方向のうち、ひずみ勾配が最大となる方向の値が最も抑制効果を発揮する。しかし、ひずみ勾配が最大となる方向は素材1の端面10Aに加わる変形によって一定とはならず、また、前述のように素材1の端面10Aは曲げ変形時に反りが発生するため、最大となる方向を特定することは難しい。

【0017】

そして、本実施形態の方法は、プレス加工における、金属板1のせん断加工面10Aでの単純曲げ変形、及び引張り変形と曲げ変形が複合した変形のいずれでもあっても、せん断加工面10A（せん断によって形成された端面10A）での変形限界の評価や割れの予測を、一つの指標値で統一的に且つ精度良く評価可能とするための技術を提供するものである。

10

発明者らは、上記のような知見に基づいて、亀裂発生部の近傍Zにおける板厚方向Xの表面ひずみ分布の勾配と、曲げ稜線方向Yの表面ひずみ分布の勾配との2つの表面ひずみ分布の勾配から求めた指標値と、せん断加工面に発生する張力との2つをパラメータとして、金属板1のせん断加工面10Aでの変形限界を評価する評価方法、それに基づいた端面割れの予測方法を考案した。

【0018】

（指標値について）

本実施形態で使用する金属板1のせん断加工面10Aでの変形限界を評価する評価、それに基づいた端面割れの予測で用いる指標値について説明する。

20

本実施形態の指標値は、曲げ加工を受ける金属板1の曲げ外側表面とせん断加工面10Aの境界近傍に発生するひずみの分布のうち、せん断加工面10Aでの板厚方向Xの表面ひずみ分布の勾配と、せん断加工面10Aから離れる方向に向かう曲げ加工による曲げ稜線方向Yの表面ひずみ分布の勾配との、2つの表面ひずみ分布の勾配を変数とした値である。ここで、曲げ外側表面とは、曲げ加工によって凸に変形する側の表面である。

【0019】

指標値は、例えば、下記(1)式のような、上記2つの表面ひずみ分布の勾配の平均値とする。この例では、 $\Delta \varepsilon_{combine}$ が指標値となる。なお、ひずみ勾配は、一般にひずみの急峻さを表す。

ここで、曲げ稜線方向Yの表面ひずみは、曲げ加工を受ける金属板1の曲げ外側表面での端面10Aから曲げ稜線方向Yに向かう表面ひずみであり、その勾配は、端面10Aを起点として当該端面10Aから離れる方向の勾配となる。また板厚方向Xの表面ひずみ分布の勾配は、曲げ外側表面から内面側に向かう勾配とする。

30

$$\Delta \varepsilon_{combine} = (\Delta \varepsilon_{thickness} + \Delta \varepsilon_{ridgeline}) / 2 \quad \dots (1)$$

ここで、

$\Delta \varepsilon_{thickness}$ ：板厚方向Xの表面ひずみ分布の勾配

$\Delta \varepsilon_{ridgeline}$ ：曲げ稜線方向Yの表面ひずみ分布の勾配

である。

40

【0020】

端面10Aから発生する亀裂は、亀裂発生部の近傍Zの板厚方向Xの表面ひずみ分布の勾配と曲げ稜線方向Yの表面ひずみ分布の勾配との2方向の勾配と相関があると知見を得ているが、(2)式のように、それら2方向の勾配の自乗平均からなる指標値 $\Delta \varepsilon_{combine}$ は、さらに端面10Aでの亀裂と相関が高い。このため、(2)式で算出した評価値を用いることで、せん断加工面10Aでの変形限界の評価や端面割れの予測を、より高い精度で行うことが可能となる。

$$\Delta \varepsilon_{combine} = 0.5 \times ((\Delta \varepsilon_{thickness})^2 + (\Delta \varepsilon_{ridgeline})^2)^{0.5} \quad \dots (2)$$

50

ここで、

$\Delta \varepsilon_{thickness}$: 板厚方向 X の表面ひずみ分布の勾配

$\Delta \varepsilon_{ridgeline}$: 曲げ稜線方向 Y の表面ひずみ分布の勾配

である。

【0021】

また、本実施形態の指標値を用いた端面 10A での変形限界の評価や端面割れの予測は、複数の曲げ変形に対し一つの指標値で行うことが出来ることに併せ、ひずみ勾配の最大となる方向を特定しなくとも、最大ひずみ勾配の値を簡便な方法で求められるという利点もある。また、本実施形態の指標値は、単純引張り変形の割れについても適用可能である。

10

なお、簡易的な評価手法として、(3) 式のように、板厚方向 X の表面ひずみ分布の勾配 $\Delta \varepsilon_{thickness}$ だけから指標値を算出して、端面 10A からの割れの発生有無を評価しても良い。

すなわち、

$$\Delta \varepsilon_{combine} = \Delta \varepsilon_{thickness} \cdots (3)$$

としても良い。

【0022】

これは、割れの評価指標として、曲げ加工においては、板厚方向 X の表面ひずみ分布の勾配の値の方が、曲げ稜線方向 Y の表面ひずみ分布の勾配の値よりも寄与度が高いためである。このため、精度は下がるがものの、(3) 式はより簡便であるという利点がある。

20

また別の簡便な方法として、(4) 式のように、板厚方向 X と曲げ稜線方向 Y の 2 つの表面ひずみ分布の勾配の和を指標値としても良い。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{combine} \\ = \Delta \varepsilon_{thickness} + \Delta \varepsilon_{ridgeline} \\ \cdots (4) \end{aligned}$$

【0023】

ここで、上述の(1)式は、2つの表面ひずみ分布の勾配から指標値を求める際に、2つの表面ひずみ分布の勾配を単純平均で平均化した場合の例であるが、曲げ加工では板厚方向 X の表面ひずみ分布の勾配の方が、寄与度が高いという観点から、(5) 式のように、板厚方向 X の表面ひずみ分布の勾配側の重み付けを大きくして、加重平均で指標値を求め

30

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{combine} = & (a \times \Delta \varepsilon_{thickness} \\ & + b \times \Delta \varepsilon_{ridgeline}) \\ & \cdots (5) \end{aligned}$$

ここで、a, b は重み係数であり、 $a > b$ の関係に設定する。例えば、 $a = 0.7$ 、 $b = 0.3$ のように設定する。

【0024】

同様に、(2) 式や(4)式においても、板厚方向 X の表面ひずみ分布の勾配側の重み付けを大きく設定しても良い。

例えば、(4) 式のように、2つの表面ひずみ分布の勾配の和を指標値とする際に、(6) 式のように、板厚方向 X の表面ひずみ分布の勾配側の重み付けを大きく設定しても良い。

40

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{combine} = & a \cdot \Delta \varepsilon_{thickness} \\ & + b \cdot \Delta \varepsilon_{ridgeline} \\ & \cdots (6) \end{aligned}$$

ここで、a, b は重み係数であり、 $a > b$ の関係に設定する。例えば、 $a = 1.3$ 、 $b = 0.7$ のように設定する。

【0025】

(評価値の正規化)

50

更に、上記指標値である $\Delta \varepsilon_{combine}$ を、金属板1の局部伸びの逆数で正規化するようにしても良い。

例えば、素材1の局部伸び $L-E1$ を使用し、下記(7)式のように、指標値に対し、金属板1の局部伸び $L-E1$ の逆数を乗算して、指標値を正規化する。

$$\Delta \varepsilon_{combine} \leftarrow \Delta \varepsilon_{combine} / L-E1 \quad \dots (7)$$

【0026】

ここで、局部伸び $L-E1$ は、素材1を所定の形状（例えば長方形形状の平板）で引張り試験することで求められる。具体的には、局部伸び $L-E1$ は、素材1が破断するまでの伸び（全伸び）から引張り強さが最大となる伸び（均一伸び）の差分から求める。多くの素材1では均一伸びと局部伸び $L-E1$ は同等となることが多いため、均一伸びや、全伸びの半分の値を、局部伸び $L-E1$ の代わりに採用しても良い。その他にも、素材1の局部伸び $L-E1$ を求める方法はあるが特に限定されない。

【0027】

（せん断加工面に発生する張力）

せん断加工面に発生する張力は、せん断加工面（端面）に沿って素材表面と平行な方向に向かう単位面積あたりの力（以下、単に張力という）とする。

曲げ加工部は曲げ変形により、板厚中心よりも曲げ外側と曲げ内側のそれぞれに引張応力と圧縮応力が発生するため、曲げ変形による応力と端面に沿って平行に発生する張力との分離が困難である。そこで、曲げ加工部の板厚中心の応力、または曲げ加工部の板厚全体の平均応力を用いることが好ましい。また、簡易的には、曲げ加工部に隣接して曲げ変形を受けてないせん断端面の張力であれば曲げ変形の応力は含まれないため、板厚中心や全体の応力の平均値を採用しても良い。

張力の算出は成形シミュレーションによって該当部の有限要素に発生する引張応力を求め、その引張応力の値を評価用の張力として使用することが簡便である。

【0028】

（指標値及び張力を求める評価位置について）

ここで、指標値 $\Delta \varepsilon_{combine}$ を求める評価位置は、対象とするプレス成形による曲げ加工で端面10Aの変形時に亀裂が発生すると推定される位置とすることが好ましい。例えば図1における符号Z位置である。せん断加工面において、曲げ変形された符号Z位置で、張力の値およびひずみ勾配が大きくなり、その位置で亀裂が最初に発生しやすい。

端面変形時に亀裂が発生すると推定される位置は、予め実験や成形シミュレーションで求めた、ひずみが一番大きくなる位置とすればよい。例えば、曲げ加工によって、曲げられる端面部分における、曲率変化が一番大きな位置若しくはその近傍を評価位置とする。

【0029】

（せん断加工による端面（せん断加工面10A）について）

せん断加工後による端面10Aについて説明する。

せん断加工は、一対のパンチとダイを用いて素材1にせん断変形を与え、割れを生じさせることで、素材1を2個以上に分離する方法である。

本実施形態では、一般的なせん断加工により所定輪郭形状にせん断されることで、せん断加工面10Aを有する素材1が作製される。

ここで、せん断加工された素材1の端面10Aの性状は、パンチとダイスの間隔であるクリアランスにより変化するが、本実施形態は端面10Aの性状に限定されない。ただし、クリアランスは加工荷重が低く、パンチとダイの損傷が少なくなる観点から、素材1の板厚の5～20%の範囲にすると良く、特に、引張り強度590MPa以上の鋼板に対しては8～15%とすることが好ましい。なお、クリアランスを5%以下にしてせん断加工をすることでせん断加工面10Aを広く作成する方法もあるが、本実施形態は、どのような方法でせん断加工をして評価する試験片（素材1）を作製しても適用することが出来る

。

そして、所定輪郭形状にせん断加工された素材1を試験片として、種々の変形を与え、上記の張力や、指標値のためのひずみの勾配を求める。

【0030】

(単純曲げ変形の付与について)

せん断加工された試験片の端面10Aに対して曲げ変形を与える方法は、試験片1を曲げる金型や治具等の曲げ半径Rと、端面10Aの亀裂有無とを確認できる方法であればどのような方法でもよい。

簡易的には、V曲げ加工やU曲げ加工のパンチの先端半径Rを変えながら試験片1の端面10Aを曲げて、亀裂の有無を確認する方法が良い。その他にもロールフォーミングな

10

【0031】

(引張り変形と曲げ変形の複合変形の付与について)

試験片の端面10Aに引張り変形と曲げ変形の複合変形を与える方法は、ビードや素材1を挟圧する機構により試験片1に与える引張り応力が変更でき、かつ素材1を曲げる金型や治具等の曲げ半径Rと端面10Aの亀裂有無とを確認できる方法であればどのような方法でもよい。簡易的には、ハット形状の絞り成形金型を用いることで、パンチの曲げ半径Rとクッション圧、およびビードの有無を変えて種々の複合変形を与えるのが良い。

引張り変形と曲げ変形の複合変形は、例えばドロー成形によるプレス加工で発生する。

【0032】

(曲げ加工による割れの評価方法について)

上記の方法により亀裂が発生した位置での、亀裂が発生する直前の張力と、素材1表面のひずみ勾配を求める。

具体的には、曲げ変形を受ける素材1の外側表面とせん断加工された端面10Aの境界で求めるのが好ましい。これは、亀裂の発生が上記の境界で発生しやすいためである。

張力とひずみ勾配の求め方は、公知の手法を採用すれば良い。張力とひずみ勾配の求め方としては、例えば、素材1の表面に微小なマークをつけてマークの変形からひずみを求める実験的な方法や、有限要素法による成形シミュレーションによりひずみを予測する方法などがあるが、これに限定されず、公知の方法を適用すれば良い。このようにして、表面ひずみの分布を求め、求めた表面ひずみの分布からひずみ勾配を算出する。

20

30

【0033】

マークの形状は、サークルパターン、ドットパターン、グリッドパターン、同心円パターン等、成形後にひずみを計測できる形状であればよい。また、マーク方法は、電解エッチング、フォトエッチング、インクによる転写(スタンプ印刷)等があるが、いずれの方法を用いてもよい。ただし、けがきは亀裂発生を誘発するため好ましくない。成形シミュレーションの場合は、せん断加工を再現する必要は無く、せん断加工された素材1の端部の形状を再現したモデルや、端部の形状を単に平坦としたモデルを用いればよい。

【0034】

3次元のソリッド要素を用いた有限要素法による成形シミュレーションを用いると精度良く張力が算出できる。

40

ひずみ勾配は、亀裂が発生すると推定される部分の近傍で算出することが好ましい。板厚方向Xのひずみ勾配の算出範囲は狭いほど良く、素材1の板厚の90%以下が好ましく、50%以下とすることがより好ましい。これは、初期に発生する亀裂は微小であるため、それを評価する範囲も同じく微小な範囲で算出すると精度が良いためである。曲げ稜線方向Yのひずみ勾配の算出範囲は10mm以下が好ましく、5mm以下がより好ましい。これは、曲げ変形時に素材1の端面10Aに発生するそりが上記の範囲にあり、このそりの変形を考慮するためである。

【0035】

(変形限界の評価について)

次に、上述の指標値を用いた、金属板1のせん断加工面10Aでの変形限界の評価方法

50

の一例について説明する。

上述のように、同一の鋼種において、上記の単純曲げ変形や上記の引張り変形と曲げ変形の複合変形の変形条件を変えて、せん断加工面10Aでの亀裂が発生する直前の張力と、その亀裂が発生する直前の曲げを含む変形における同一箇所での指標値との組からなる取得値（張力、指標値）との組のデータを3組以上取得する。使用する張力は、亀裂が発生する直後としても良いが、出来るだけ亀裂初期の状態のときが良い。ただし、張力の算出は、出来るだけ亀裂発生が小さいときの状態での張力を使用することが好ましいため、亀裂が発生した直前の状態の張力を採用している。また、評価に余裕代を持たせるために、亀裂発生直前よりも前の状態で上記の取得値を取得するようにしても良い。

そして、図3のように、取得した複数の取得値を通る曲線を変形限界線とする。図3では、5点の取得値を使用した場合を例示している。取得値は多い方が好ましいが、3点以上あれば、変形限界線を設定可能である。

【0036】

求めた変形限界線によって、曲げ変形時におけるせん断加工面10Aでの変形の限界を評価する。変形限界線は、関数式に変換しておけばよい。変形限界線は、例えば2次曲線などに近似する。

そして、例えば、この変形限界線よりも下側の領域を、端面で割れの発生しない領域とする。

すなわち、プレス成形によって製品形状に成形する際における曲げ変形部分の端面10Aの曲げ形状が、この変形限界線以下に収まるように、プレス成形品を決定するようにしても良い。又は、プレス成形によって製品形状に成形する際における曲げ変形部分の端面10Aにおいて、この変形限界線未満に収まるように、プレス金型の形状を決定したり、プレス加工の工程選定を行うようにしたりしても良い。

【0037】

（割れの予測）

上記のようにして、予め、曲げ加工部の端面に発生する張力と指標値の関係を求めておき、その関係に基づき、図3の「割れの発生しない領域」内に位置するか否かで割れが発生するか否かを予測する。

そして、割れが発生すると予測（評価）された位置に対し、その金属板端面10Aでの割れ発生が抑制されるように、プレス成形で使用するプレス金型の設計変形を行う。

【0038】

（効果）

以上のように、本実施形態によれば、対象となる素材1をせん断加工後に変形させる際の、端面10Aからの割れの発生有無を精度よく評価することが可能となる。

この評価方法は、割れの発生を予測する方法としても活用できる。例えば、自動車のパネル部品、構造・骨格部品等の各種部品をプレス成形する際に用いる金型の形状が適切であるか精度良く予測できるようになる。また、プレス成形を安定して行うことができるのでプレス成形品の不良率が低減でき、プレス金型の製造期間の短縮にも貢献できる。

強度が高い素材1は一般的に延性が低いため、素材1のせん断加工面10Aを変形させることで割れが容易に起きやすい。そのため、本発明は強度が高い素材1ほど有効である。具体的には、引張り強度590MPa以上の素材1を対象とすることが好ましく、引張り曲げ強度980MPa以上の素材1はさらに好ましい。また、素材1の種類としては、プレス成形のように大量生産をする素材1を対象とするとコスト面で秀でており、金属板1や特に鋼板を対象とすることが好ましい。

【実施例】

【0039】

次に、本発明に基づく実施例について説明する。

表1に示す3種類の素材A、BおよびCを対象に本発明の検証を行った。各素材1に対してせん断加工を行って、矩形形状の試験片を作製した。

そのせん断加工は、10×20mmの矩形のパンチと、10.3×20.3mmの矩形

10

20

30

40

50

のダイスを用いた（不図示）。金型のクリアランスは、素材 1 の板厚によって変更し、素材 A が板厚の 15 %、素材 1 B が板厚の 10.7 %、素材 1 C が板厚の 8.3 % とした。

【0040】

【表 1】

材料	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	全伸び [%]	局部伸び [%]	板厚 [mm]
A	924	1236	12.4	6.0	1.0
B	780	994	13.2	6.1	1.4
C	1183	1493	8.1	4.5	1.8

10

【0041】

試験片に対し、単純曲げ変形、及び引張り変形と曲げ変形の複合変形の 2 形態の曲げ加工を実施して、各形態での曲げ加工における、張力とひずみ勾配との関係を求めてみた。併せて、単純引張り変形についての、張力とひずみ勾配との関係を求めてみた。

単純曲げ変形は、図 4 に示す頂角 90° の V 曲げ金型により試験片 1 の端面 10 A に曲げを与えた。パンチ 21 の頂点の曲げ R 部にせん断加工部のダレ側が接するように試験片を設置した。そして、パンチ 21 の先端の曲げ半径 R を 0.5 mm ピッチで変えて変形試験を実行し、試験片の端面 10 A に亀裂が発生しない最小の曲げ半径を求めた。符号 20 はダイを示す。

20

その後、成形シミュレーションにより最小曲げ半径で曲げられたときの端面 10 A での張力とひずみ勾配を算出した。

なお、板厚方向 X のひずみ勾配の算出範囲は各素材 1 の板厚の 50 % とし、曲げ稜線方向 Y のひずみ勾配の算出範囲は 5 mm とした。

【0042】

引張り変形と曲げ変形の複合変形は、図 5 に示すハット形状の絞り成形金型により素材 1 の端面 10 A に与えた。パンチ 32 の曲げ R 部に対し、試験片 1 のせん断加工部のダレ側が接するように試験片 1 を設置した。符号 30 はダイを、符号 31 はしわ押さえ板を示す。

パンチ 32 の肩部の曲げ半径 R は 5 mm と 10 mm の 2 種類を用いて、しわ押さえ力を 2.5 トンピッチで変えて試験をし、それぞれの曲げ半径で試験片の端面 10 A に亀裂が発生しない最小のしわ押さえ力を求めた。その後、成形シミュレーションにより同じ条件で複合変形を与えられた時の端面 10 A での張力とひずみ勾配を算出した。板厚方向 X のひずみ勾配と曲げ稜線方向 Y のひずみ勾配の算出範囲は上記の曲げ変形の場合と同じである。

30

【0043】

併せて、試験片に対し引張り試験を実施して、試験片の端面 10 A に亀裂が発生しない最小の引張り力を求めた。その後、成形シミュレーションにより同じ条件で引張り変形を与えられた時の端面 10 A の張力とひずみ勾配を算出した。この場合には、曲げ稜線方向 Y のひずみ勾配として端面 10 A から引張り方向と板厚方向に直交する方向のひずみ勾配を使用して、端面 10 A での張力及び各種のひずみ勾配を算出した。

40

そして、上記のようにして求めた張力と各種のひずみ勾配から求めた指標値との組からなるデータを複数取得した。

【0044】

<実施例 1>

実施例 1 は、本実施形態に基づき、指標値としての $\Delta \varepsilon_{combine}$ を (2) 式に基づき二乗平均値として算出して、張力と評価値との関係を整理した結果である。その整理した結果を図 6 に示す。張力の算出は成形シミュレーションによって曲げ変形部の板厚中心に位置する有限要素に発生する引張応力から算出した。

<実施例 2>

50

実施例 2 は、本実施形態に基づき、指標値としての $\Delta \varepsilon_{combine}$ を (4) 式に基づき 2 つのひずみ勾配の和として算出して、張力と評価値との関係を整理した結果である。その整理した結果を図 7 に示す。張力の算出は成形シミュレーションによって曲げ変形部の板厚方向に分布する有限要素に発生する応力の平均値から算出した。

【0045】

(検証)

<検証 1>

上記表 1 に示す 3 種類のうちの素材 A からなる鋼板を、上型及び下型からなる金型でプレスすることで曲げ加工からなる変形を加えて、図 8 に示す製品形状に変形した。これを金型の曲げ R の条件を変えて種々実行した。

そして、図 8 の符号 Z で示す位置をそれぞれ評価位置として、各評価位置 Z で割れが発生した場合と、割れが発生しない場合の曲げ加工条件を取得した。

そして、上記プレス成形とは別に、上記各加工条件で成形する場合について、有限要素法を用いて 3 次元プレス成形シミュレーションを行い、それぞれの条件でプレス成形した場合における、評価位置 (Z 位置) でのせん断加工面に沿った張力と、上記 (2) 式で求めた指標値との組からなる評価データを取得した。

その複数の評価データについて、実施例 1 で求めた変形限界線 (図 6 参照) のどちらに位置するか確認したところ、割れが発生した場合の評価データは、すべて変形限界線よりも上側に位置し、割れが発生しなかった場合の評価データは、すべて変形限界線よりも下側に位置していることを確認した。

【0046】

<検証 2>

同様にして、変形後の製品形状を図 9 に示す形状に設定して、上記検証 1 と同様な検証を行った。ここで、図 9 に示す形状への加工は、ドロー成形によって行った、ドロー成形によるプレス成形は、曲げ変形位置に曲げ変形と引っ張り変形とが複合した変形が発生する。

この場合においても、割れが発生した場合の評価データは、すべて変形限界線よりも上側に位置し、割れが発生しなかった場合の評価データは、すべて変形限界線よりも下側に位置していることを確認した。

【0047】

<検証 3>

また、上記 2 つの検証 1 及び検証 2 について、指標値を上記 (4) 式によって求め、実施例 2 (図 7) によって求めた変形限界線を使用した場合についても検証した。この場合においても、割れが発生した場合の評価データは、すべて変形限界線よりも上側に位置し、割れが発生しなかった場合の評価データは、すべて変形限界線よりも下側に位置していることを確認した。

【0048】

<検証 4>

更に、鋼板の素材を B 及び C に変更して、上記と同様な検証も実施した。この場合においても、実施例 1 及び実施例 2 のどちらを使用した場合も、割れが発生した場合の評価データは、すべて変形限界線よりも上側に位置し、割れが発生しなかった場合の評価データは、すべて変形限界線よりも下側に位置していることを確認した。

このように、本発明に基づいて曲げを含むプレス加工を行う際におけるせん断加工面での変形限界を精度よく評価できることがわかった。

そして、本発明に基づく方法では、一つの評価基準で、単純曲げ変形の変形限界と、曲げ変形と引っ張り変形とが複合した変形の変形限界を評価できることがわかる。

ここで比較のために、端面に沿ったひずみ勾配を指標値として使用して、上記検証 1 及び検証 2 と同様にして変形限界線を求めて評価、検証した場合、割れが発生した場合の評価データの一部分が、変形限界線よりも下側に位置していた。

【0049】

以上、本願が優先権を主張する、日本国特許出願 2017-160055（2017 年 8 月 23 日出願）の全内容は、参照により本開示の一部をなす。

ここでは、限られた数の実施形態を参照しながら説明したが、権利範囲はそれらに限定されるものではなく、上記の開示に基づく各実施形態の改変は当業者にとって自明なことである。

【符号の説明】

【0050】

1 素材（金属板）

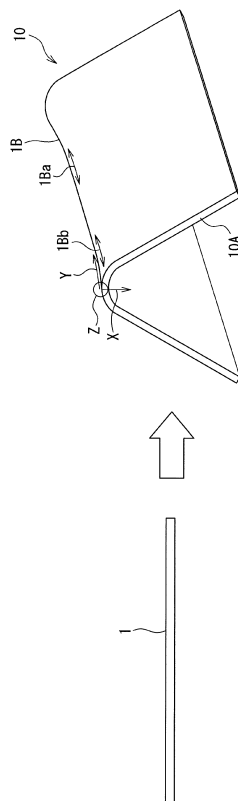
10A せん断加工面（端面）

X 板厚方向

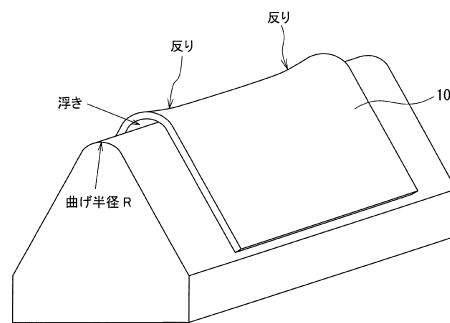
Y 稜線方向

10

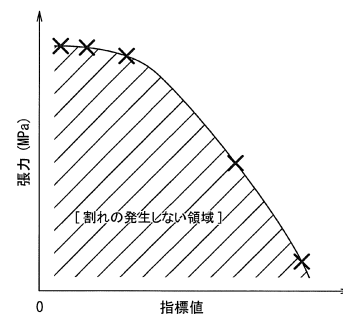
【図 1】



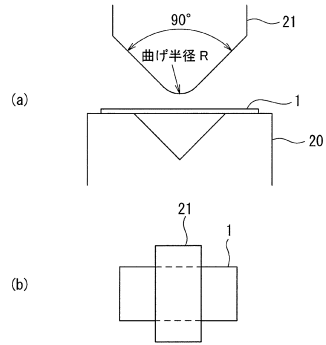
【図 2】



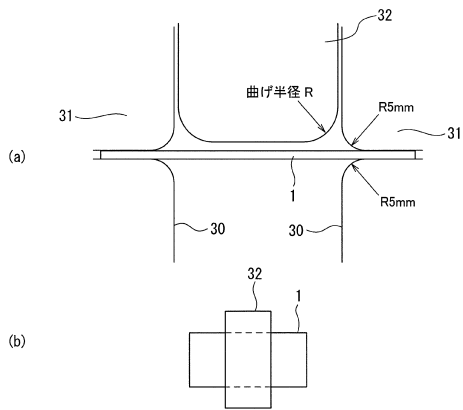
【図 3】



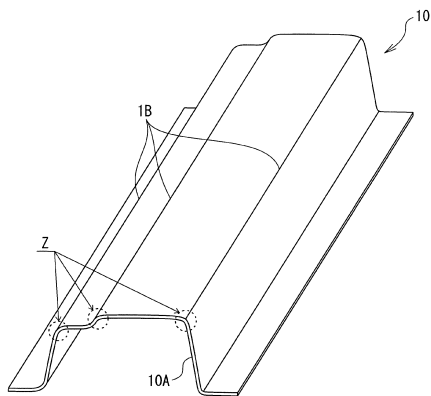
【図 4】



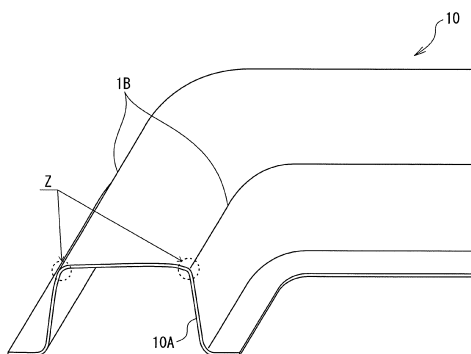
【図 5】



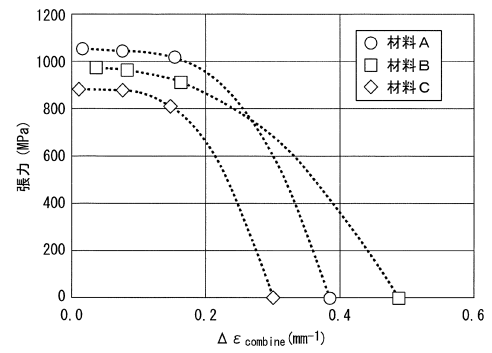
【図 8】



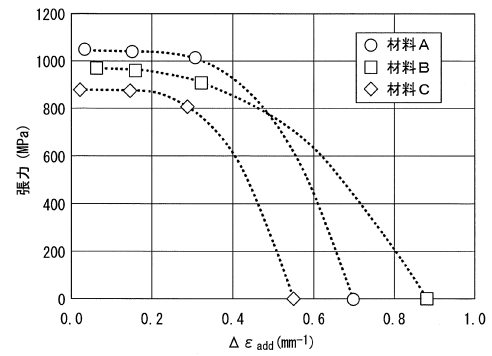
【図 9】



【図 6】



【図 7】



フロントページの続き

(72)発明者 藤井 健斗

東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社知的財産部内

(72)発明者 山▲崎▼ 雄司

東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社知的財産部内

審査官 飯田 義久

(56)参考文献 特開2014-115269 (JP, A)

特開2011-043452 (JP, A)

特開2014-016807 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B21D 5/01

B21D 22/00

B21D 37/20

G06F 17/50