

超高張力鋼板のプレス成形における割れ発生に及ぼす せん断加工の影響と割れ発生防止

豊橋技術科学大学 工学部 生産システム工学系
講師 安部洋平
(平成18年度一般研究開発助成 AF-2006008)

キーワード：超高張力鋼板，せん断加工，割れ

1. 研究の目的と背景

近年，地球温暖化防止の観点から自動車の二酸化炭素排出量の削減と燃費の向上が要求されている。そのために自動車の軽量化が望まれており，車両重量の1/3程度を占めるプレス車体部品の軽量化が重要になっている¹⁾。軽量化のために自動車用プレス部品へ比強度の大きな高張力鋼板の適用が拡大してきている。外板のパネル類は440MPa級，サイドメンバーなどの骨格部材では590MPa～780MPa級が主流となりつつある。乗員保護の観点から高強度が必要なバンパーレインフォースやドアビームなどの部材には引張強さが1GPaを超える超高張力鋼板も使われている^{2,3)}。

高張力鋼板や超高張力鋼板は高強度のためにプレス成形荷重が大きく，プレス部品の形状凍結性も低く，更に，低延性のため割れが生じやすい。一般的にプレス部品はブランキング，絞り加工，せん断加工，フランジ曲げ成形が用いられて製造されている⁴⁾。フランジ曲げ成形時には材料端部が伸びフランジとなって引張応力が発生⁵⁾し，端部に割れを生じる場合がある。軟鋼板では延性が十分であるために問題とならないが，高張力鋼板や超高張力鋼板では割れが非常に生じやすく，産業界において割れの防止法の開発が望まれている。

伸びフランジ成形における応力分布は，曲げ線から板角端部に向かうにつれて板端部の長手方向の引張応力とひずみが増加して板角端部で最大⁶⁾になっているため，板角端部の変形を小さくすることにより割れを防止できる。板角端部の変形を小さくするには，角端部の曲げ角度や長手方向の曲げ角度の減少，および，ブランク形状の修正があるが，製品形状が変わってしまうために容易でない。製品形状を変えずに成形できる方法が望まれている。

また，割れの生じる端部は，フランジ成形前にせん断されており，せん断条件を変化させると切口面形状に影響をおよぼす。破断面では切口面が大きくなるためにフランジ成形時に粗さの切欠き効果によって割れが生じやすいと考えられる。一方，せん断条件により切口の変形量も異なり⁷⁾，延性の低下が生じて割れを起し易くなることもある。しかし，超高張力鋼板は実用されて間もないためせん断切口面性状とフランジ成形の割れについての十分な説明は

なく，類似した変形形態である穴広げ加工においていくつか報告されている⁸⁻¹⁰⁾。

本研究では，超高張力鋼板のフランジ成形における割れとせん断切口面との関係を調査する。また，フランジ成形にて板角端部に生じる引張応力を分散させるための逐次接触パンチによる伸びフランジ成形法を提案してフランジ割れ防止法を開発する。

2. せん断加工と伸びフランジ成形条件

2・1 超高張力鋼板と高張力鋼板

鋼板には公称板厚が1.4mmの980MPa級超高張力鋼板および390MPa級と780MPa級の高張力鋼板を用いた。780MPa級と980MPa級の鋼板はデュアルフェーズ鋼である。引張試験により得られた板材の材料特性を表1に示す。

表1 引張試験により得られた鋼板の材料特性

| 鋼板 | 板厚/ mm | 引張強さ/ MPa | 伸び/% | n 値 |
|----------|-----------|--------------|------|------|
| 980MPa 級 | 1.41 | 1027 | 18.7 | 0.12 |
| 780MPa 級 | 1.41 | 823 | 19.0 | 0.12 |
| 390MPa 級 | 1.39 | 389 | 35.8 | 0.18 |

2・2 伸びフランジ成形条件

一般的に超・高張力鋼板は複雑な形状の部品へ加工されるが，単純化して図1に示すせん断加工とフランジ成形の2段の成形を行う。1段目ではブランクを凹形にせん断して，2段目で伸びフランジ成形を行い，ブランク中央角端部が伸びフランジ変形となる。

伸びフランジ成形条件を図2に示す。凹形にせん断されたブランクを伸びフランジ成形して角部に引張応力を発生させる。角部の引張応力はフランジ長さLにより変化させ，その変化量は1mm毎とした。ブランク角端部には伸びフランジ率の算出のためにけがき線を入れた。穴広げ加工^{9,10)}において限界穴広げ率が大きくなる最適なクリアランスがあったためにせん断加工においてせん断クリアランス比cを10%から25%に変化させて種々の切口面を得た。

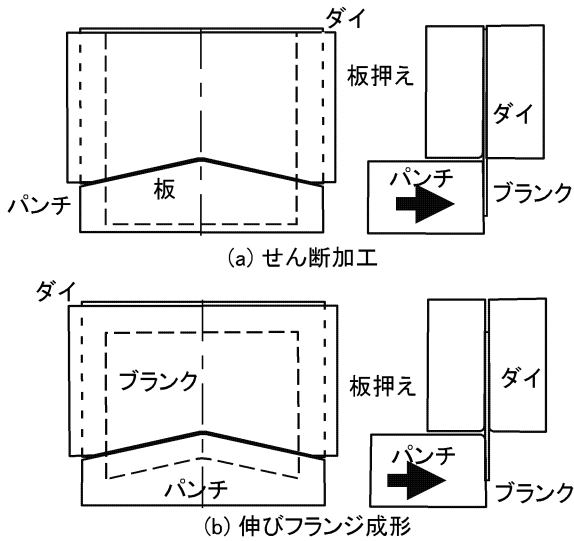
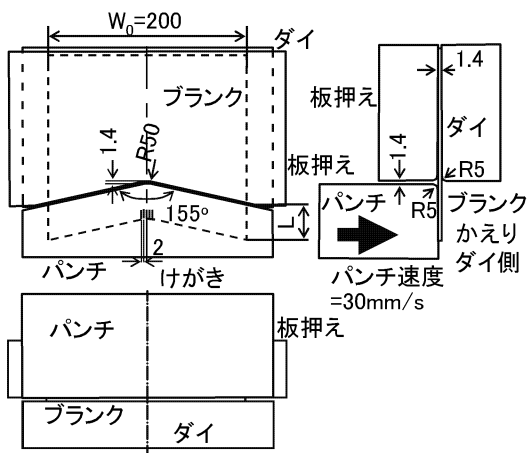


図1 せん断加工と伸びフランジ成形



3. せん断加工と伸びフランジ成形結果

3・1 超高張力鋼板の切口面性状

980MPa 級鋼板における切口面と断面形状を図3に示す。だれ、せん断面、破断面とかえりが形成されている。穴抜きクリアランス比 $c=4\%$ では、二次せん断面が生じており、二次せん断面近くの破断面でくぼみが発生している。穴抜きクリアランス比 $c=20\%$ では一般的なせん断切口面であり、 $c=30\%$ では大きなかえりが生じている。

切口面性状の構成割合と穴抜きクリアランス比の関係を図4に示す。980MPa 級鋼板では、低い延性のためにせん断面とだれの割合が小さく、破断面の割合が大きい。穴抜きクリアランス比の増加とともに、だれは増加しており、 $c=25\%$ では小さなかえりが生じはじめて 30% ではさらに大きくなっている。

3・2 伸びフランジ成形結果

780MPa 級鋼板におけるフランジ割れを図5に示す。せん断クリアランス比 $c=25\%$ では角部端部にて引張りにより割れを生じているが $c=15\%$ では発生していない。

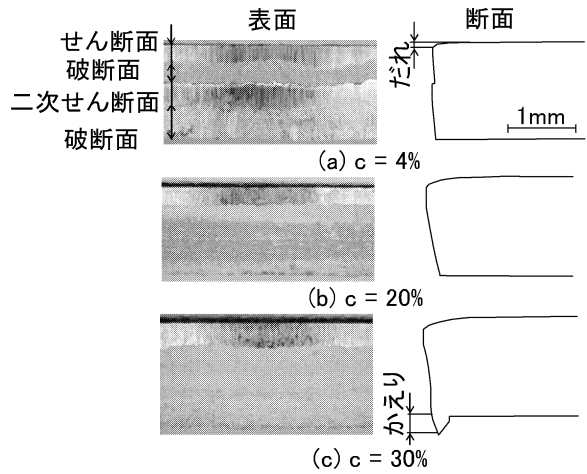


図3 980MPa 級鋼板における切口面と断面形状

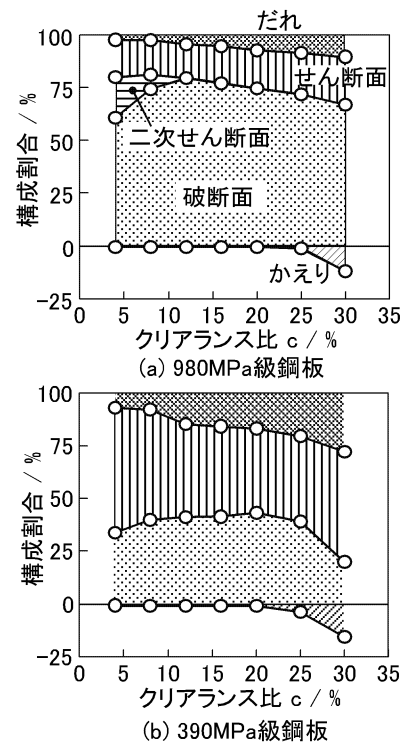


図4 切口面性状の構成割合と穴抜きクリアランス比の関係

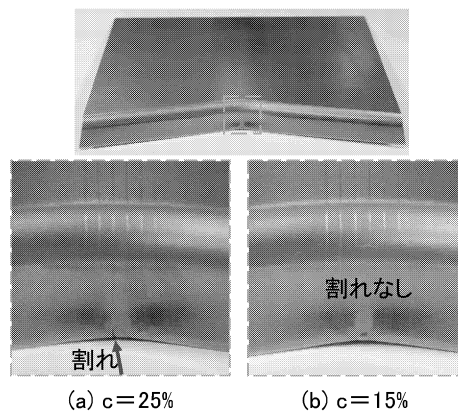


図5 780MPa 級鋼板におけるフランジ割れ

限界伸びフランジ率とせん断クリアランス比の関係を図6に示す。限界伸びフランジ率は、フランジ割れの生ずる直前の曲げ長さにおける最大の伸びフランジ率である。それぞれの鋼板において限界伸びフランジ率が最大になるせん断クリアランス比が存在する。クリアランス比の増加とともに切口の変形量が低下するが、過大となると図3や4に示すようにかえりが発生して割れの起点となっていると考えられる¹⁴⁾。最適なせん断クリアランス比に設定することにより限界伸びフランジ率が向上できる。

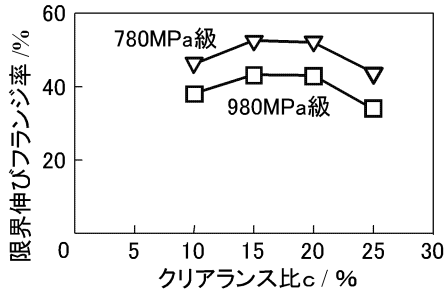


図6 限界伸びフランジ率とクリアランス比の関係

4. 逐次接触パンチによる伸びフランジ成形

4.1 逐次接触パンチによる伸びフランジ成形法

鋼板角端部での引張りを低減させる逐次接触パンチによる伸びフランジ成形法を図7に示す。角端部でのフランジ割れを防止するためパンチ部に傾斜をつけて逐次的に外側より接触させる。逐次接触パンチでは、板材の両端部から徐々に曲げられて角端部の引張応力を低減でき、割れを防止できる。

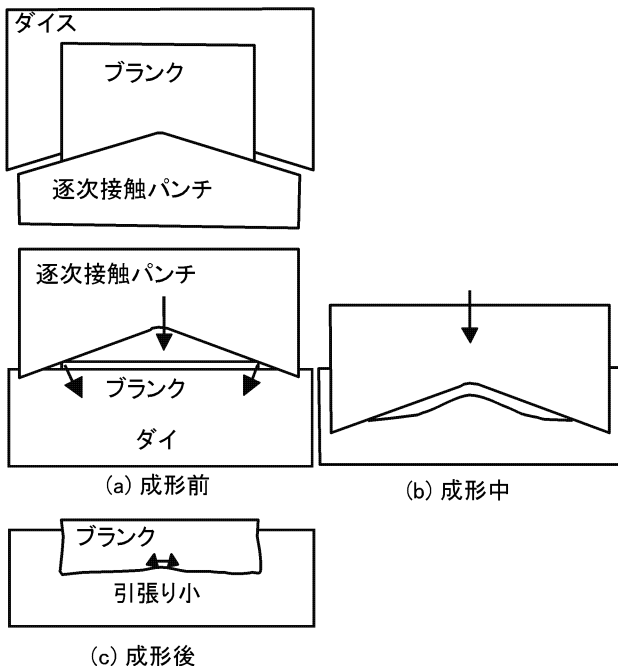


図7 鋼板端部での引張りを低減させる逐次接触パンチによる伸びフランジ成形法

4.2 逐次接触パンチによる伸びフランジ成形条件

逐次接触パンチによる伸びフランジ成形条件を図8に示す。 blanks は、せん断により発生したかえりがダイ側でありダイと板押えにより固定されて、逐次接触パンチにより折り曲げられる。角端部の引張りをコントロールするためにパンチ傾斜角度 α を0から65°までに、傾斜幅Wとblank幅 W_0 の比を傾斜幅比として0.1から1.0に設定した。また、前章と同様に角部での引張応力を変化させるためにblankの曲げ長さLを変化させている。blankはせん断加工により得て、せん断クリアランス比は前章より最適であった20%としている。

変形挙動の観察に市販の動的陽解法ソフト LS-DYNA ver.970を用いた。変形の対称性から、1/2のみを対象とし、blankは弾塑性体シェル要素に、金型は剛体シェル要素にした。金型とblankの摩擦はクーロン摩擦を仮定して摩擦係数は0.15とした。なお、計算時間はペンティアム4プロセッサ搭載のコンピュータでパンチストロークによるが約40分程度である。

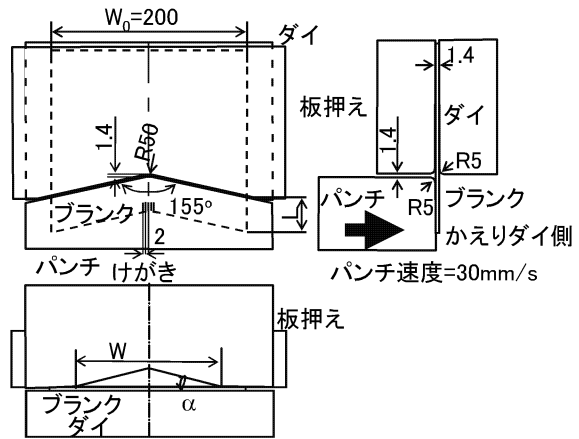


図8 逐次接触パンチによる伸びフランジ成形条件

5. 逐次接触パンチによる伸びフランジ成形

5.1 逐次接触パンチによる伸びフランジ成形性の向上

780MPa級鋼板の $W/W_0=1.0$ 、 $L=17\text{mm}$ における計算されたblankの変形挙動を図9に示す。 $\alpha=0^\circ$ ではパンチが一樣にblankに接触するため板端部は一樣に曲げられている。一方、 $\alpha=10^\circ$ ではパンチが外側から接触するため外側から逐次曲げられている。

計算による長手方向のひずみ分布を図10に示す。最終パンチストローク s_e はパンチとフランジ長さにより変化するために、パンチストロークsと最終パンチストロークの比を用いて示している。 $\alpha=0^\circ$ では、 $s/s_e=0.6$ にて既に角端部において大きな長手方向ひずみが発生している。一方、 $\alpha=10^\circ$ では $\alpha=0^\circ$ より $s/s_e=0.6$ 、 $s/s_e=1$ ともに引張りひずみが低減されている。

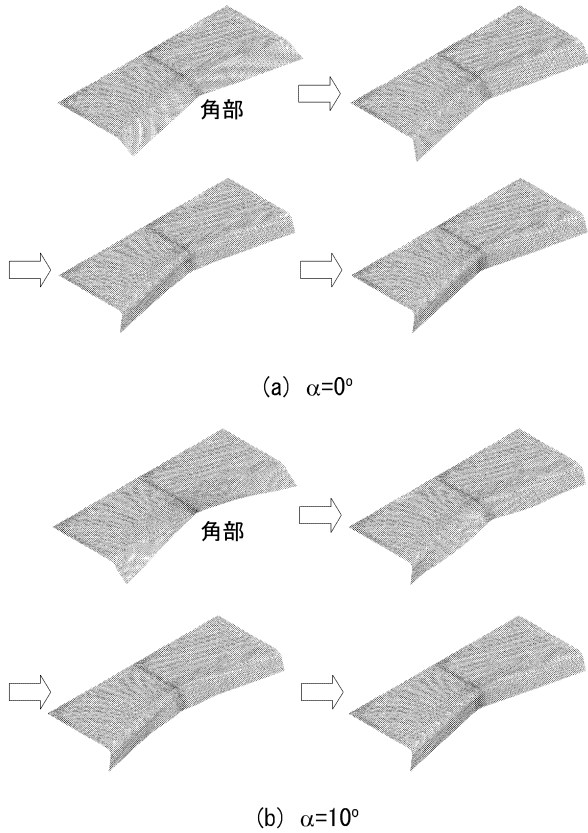


図 9 780MPa 級鋼板の $W/W_0=1.0$, $L=17\text{mm}$ における計算されたブランクの変形挙動

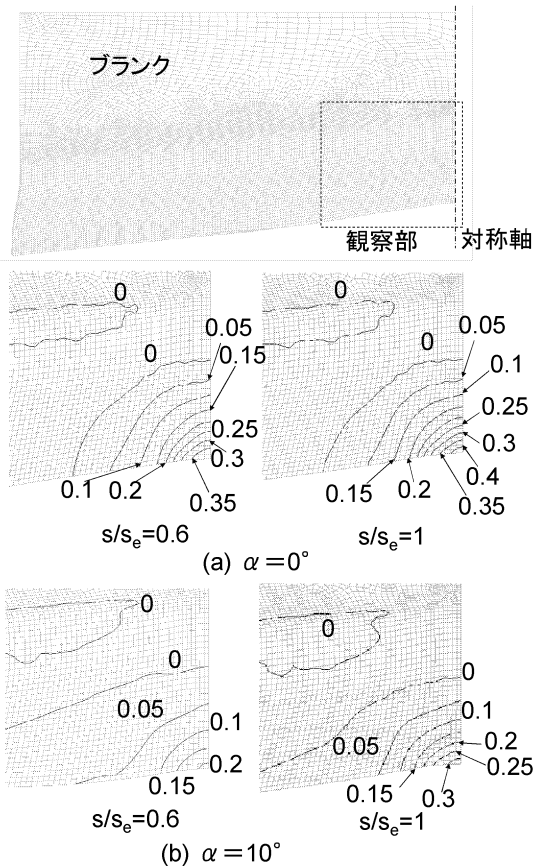


図 10 計算による長手方向のひずみ分布

計算による 780MPa 級鋼板の $W/W_0=1.0$, $L=17\text{mm}$ における角端部での長手方向のひずみ履歴を図 11 に示す。パンチストロークの増加とともに伸びフランジ率は増加している。 $\alpha=10^\circ$ では、 $\alpha=0^\circ$ より緩やかに増加し、図 10 に示したようにひずみが分散されるために最終値も低下している。

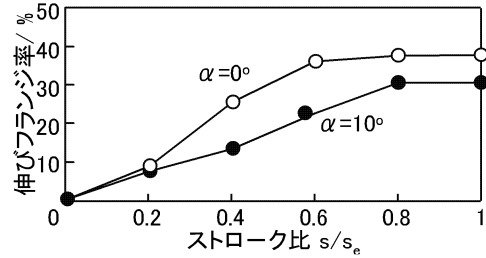


図 11 計算による 780MPa 級鋼板の $W/W_0=1.0$, $L=17\text{mm}$ における角端部での長手方向のひずみ履歴

実験による 780MPa 級鋼板の $W/W_0=1.0$, $L=17\text{mm}$ におけるフランジ割れを図 12 に示す。 $\alpha=0^\circ$ では割れが生じているのに対して、 $\alpha=10^\circ$ では、割れを防止できている。

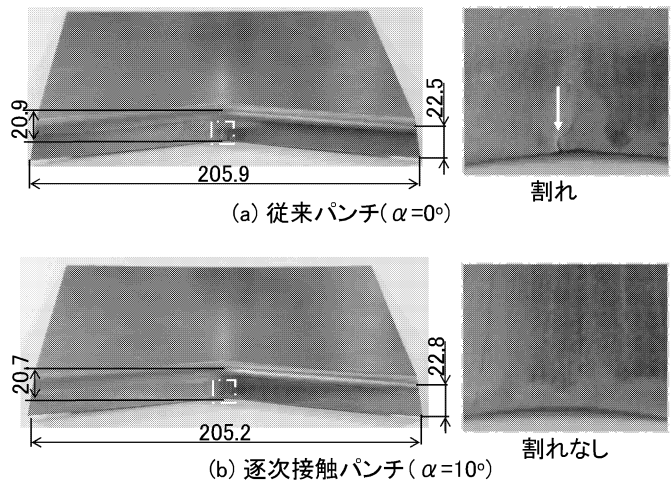


図 12 実験による 780MPa 級鋼板の $W/W_0=1.0$, $L=17\text{mm}$ におけるフランジ割れ

780MPa 級鋼板における実験と計算による伸びフランジ率とフランジ長さの関係を図 13 に示す。フランジ長さの増加とともに角部での伸びフランジ率は増加し、伸びフランジ率が限界に達するとフランジ割れが生じている。計算と実験は同様の傾向であり、実験にて限界伸びフランジ率を求めておくことで有限要素シミュレーションにより割れを予測できる。

980MPa 級鋼板での伸びフランジ率とフランジ長さの関係を図 14 に示す。780MPa 級鋼板と同様に伸びフランジ率が限界に達すると割れが生じている。また、パンチ傾斜角度の増加に伴い伸びフランジ率が減少しており引張りを低減できている。

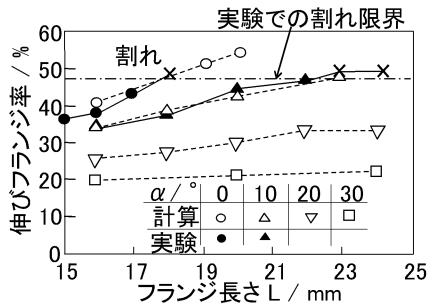


図 13 780MPa 鋼板における実験と計算による伸びフランジ率とフランジ長さの関係 ($W/W_0=1.0$)

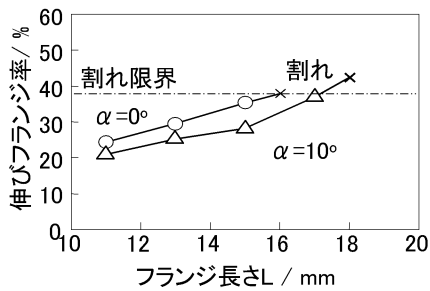


図 14 実験による 980MPa 級鋼板での伸びフランジ率とフランジ長さの関係 ($W/W_0=1.0$)

5・2 計算によるパンチ傾斜角度と傾斜幅の最適化

前章のように角端部の限界伸びフランジ率によりフランジ割れが予測できるため計算により最適なパンチ傾斜角度と傾斜幅について検討する。パンチ傾斜角度の増加により割れの防止が期待されるが、傾斜が大きくなるとパンチストロークが過大となり、プレス機のスローク制約から成形できなくなる。そこで、パンチ角度と傾斜幅を変えて影響を調査した。

パンチ高さにおよぼすパンチ傾斜角度と傾斜幅の影響を図 15 に示す。パンチ傾斜部高さ h_0 はパンチのフィレットを無視して二等辺三角形に近似すると幾何学的に次式となる。

$$h_0 = 0.5 W \tan(\alpha)$$

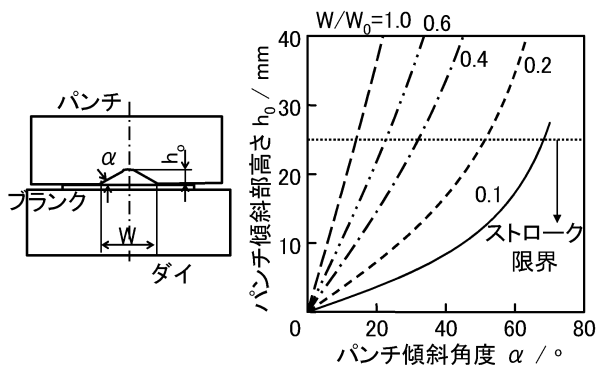


図 15 パンチ高さにおよぼすパンチ傾斜角度と傾斜幅の影響

本実験のプレス機のスロークからパンチ傾斜高さは 24mm が限界である。

計算による長手方向のひずみにおよぼす角度と傾斜幅の影響を図 16 に示す。ストローク限界も図に示している。パンチ傾斜角度と傾斜幅が大きいほど角端部の伸びフランジ率が小さくなっているが、傾斜角度が大きい場合でも幅が 0.2 以下になるとひずみが分散されず、傾斜の効果が少なくなってしまう。

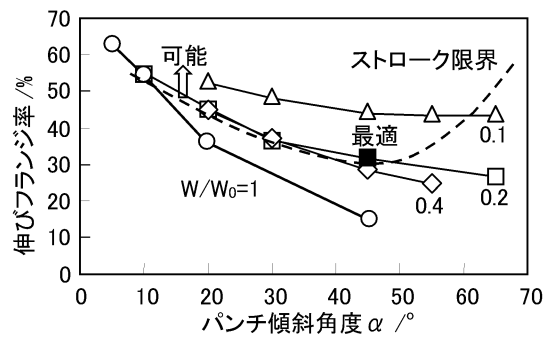
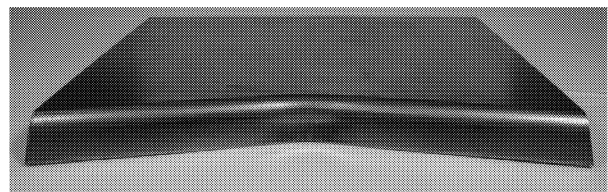
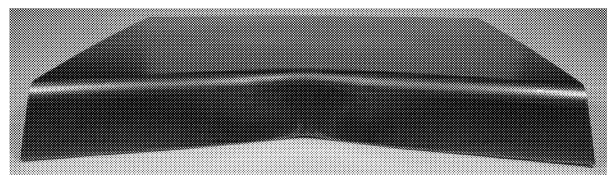


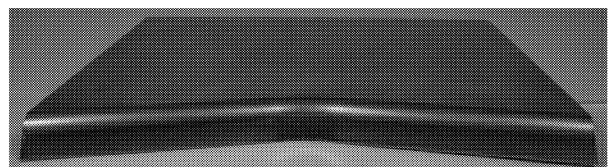
図 16 計算による長手方向のひずみにおよぼす角度と傾斜幅の影響 (980 MPa 級鋼板, $L=23\text{mm}$)



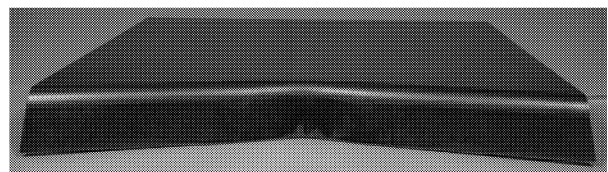
(a) $\alpha=0^\circ$, $W/W_0=1.0$, $L=17\text{mm}$, 780MPa 級鋼板



(b) $\alpha=45^\circ$, $W/W_0=0.2$, $L=27\text{mm}$, 780MPa 級鋼板



(c) $\alpha=0^\circ$, $W/W_0=1.0$, $L=15\text{mm}$, 980MPa 級鋼板



(d) $\alpha=45^\circ$, $W/W_0=0.2$, $L=21\text{mm}$, 980MPa 級鋼板

図 17 従来のパンチと最適形状である $\alpha=45^\circ$, $W/W_0=0.2$ でフランジ割れが生じる直前の製品

780MPa 級鋼板と 980 MPa 級鋼板における従来のパンチと最適形状である $\alpha=45^\circ$, $W/W_0=0.2$ でフランジ割れが生じる直前の曲げ長さの製品を図 17 に示す。780MPa 級鋼板の最適なパンチでは、これ以上の曲げ長さに対してはプレス機のストロークが限界であったため、成形実験ができなかった。しかしながら、780MPa 級と 980MPa 級鋼板に対して最適な逐次接触パンチを用いることにより、フランジ曲げ長さをそれぞれ 1.6 倍以上と 1.4 倍長くできている。

6. まとめ

本研究では、超高張力鋼板のフランジ成形における割れとせん断切口面との関係を調査した。また、フランジ成形にて板角端部に生じる引張応力を分散させるための逐次接触パンチによる伸びフランジ成形法を提案してフランジ割れ防止法を試みて、以下の知見を得た。

- 1) 限界伸びフランジ率が最大になるせん断クリアランス比が存在し、最適なせん断クリアランスに設定することで伸びフランジ率が向上できる。
- 2) フランジ成形において逐次接触パンチにより板材の両端部から徐々に曲げて板角端部の引張応力を低減することによりフランジ割れを防止できる。
- 3) パンチ傾斜角度の増加により角部の伸びを緩和できる。また、パンチ傾斜幅と板幅の比が 0.2 より小さくなると効果が小さくなった。
- 4) 限られたパンチストロークにおける最適な逐次接触パンチにより 780MPa 級と 980 MPa 級鋼板のフランジ曲げ長さをそれぞれ 1.6 倍以上と 1.4 倍長くできた。

謝 辞

本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団およびスズキ財団の研究助成によって行われたものであり、ここに感謝の意を表します。材料と金型を供給していただきました㈱ベルソニカ、成形実験と計算に協力していただきました当時豊橋技術科学大学修士多田亮太氏と乗田克哉氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 林央：プレス技術，**44-7**(2006)，18-23.
- 2) 福水良太・小池正俊：塑性と加工，**46-534**(2005)，590-594.
- 3) 杉山隆司：同上，**46-534**(2005)，552-555.
- 4) 例えば，鈴木弘：塑性加工，裳華房，(1980)，14.
- 5) 例えば，中川威雄・阿部邦雄・林豊：薄板のプレス加工，実教出版，(1977)，185.
- 6) 同上，180.
- 7) 柳生聖司・長井美憲・桑田尚：塑性と加工，**46-534**(2005)，651-655.
- 8) 広瀬洋三・中居修二・福山東成・上野行一：同上，**35-404**(1994)，1071-1075.
- 9) 飯塚栄治・比良隆明・吉武明英：同上，**46-534**(2005)，625-629.
- 10) 安部洋平・森謙一郎・鈴木啓生：同上，**50-580** (2009)，414-418.
- 11) 鈴木清・中川威雄・町田輝史：同上，**16-179**(1975)，1171-1173.