

座面にセレーションを有する極小ねじの圧造プロセスに関する研究 第2報 - 金型内部応力に及ぼす予備成形パンチ形状の影響 -

牟禮雄二*, 小中浩志**, 東 俊浩**, 馬見新宗徳**, 杉山一雄**

A Study of Heading Process of Minimum Screw with Serration at Bearing Surface - Effect of Preforming Punch Shape on Internal Stress of Die -

Yuji MURE, Hiroshi KONAKA, Toshihiro HIGASHI, Munenori MAMISHIN and Kazuo SUGIYAMA

We have optimized a new heading process of minimum screw with serration at bearing surface by using rigid plastic FEM analysis in a previous report. Preforming punch shape which performed piercing and upsetting simultaneously was the optimal. In this paper, the effect of preforming punch shape on the internal stress of die and punch was evaluated by using elastic FEM analysis. As a result, we concluded that the same design plan of preforming punch as a previous report was the optimal and there was a correlation between internal stress of die and diameter of case.

Keyword : Elastic FEM analysis, Heading, Die stress, Cold forging, Evaluation function

1. 緒 言

締結部品の一つである「ねじ」は、塑性加工技術に支えられて、高精度化、小型化により適用範囲が拡大されてきた。ねじは、一般的に製造コストや生産性を考慮し、頭部を冷間圧造¹⁾で、ねじ部を転造により製造されている。冷間圧造では素材としてコイル材を使用し、所定長さに切断後、ヘッダー装置により頭部成形を行うことで、均質で低コストな加工品が得られる。

ところで、ねじについて工学的に解決すべき重要な研究課題は、緩みの原因解明²⁾³⁾である。弱電パーツの締結に使用されている極小ねじにおいては、緩み防止のために頭部に異形要素を形成するなど、形状が複雑化する傾向にある。頭部形状が複雑化することにより、従来の圧造プロセスと比較して塑性流動が変化し、さらに圧造時の金型内部応力が複雑に変化することに起因する金型寿命の低下が大きな問題となっている。そこで、圧造プロセス設計⁴⁾の見直しが必須となっている。過去にねじの冷間圧造⁵⁾やヘッダー工具の耐久性に関する研究⁶⁾が行われているが、いずれも単純形状を扱っており、複雑形状部品に対して塑性流動と金型内部応力および金型破壊を定量的に関連付けて論じた研究は皆無である。

本研究では、頭部座面にセレーションを有する極小ねじを対象に、計算機シミュレーション技術として広く利用されている剛塑性有限要素解析ソフトを利用して、1ダイ2ブロー方式の冷間圧造プロセスを最適化するにあたり、プリフォーム形状の見直しに主眼を置いた。すなわち、プリ

フォームを成形するための予備成形パンチを数種類の傾斜角を有する円錐体の基本要素でモデル化し、予備成形パンチ設計を基本要素の組み合わせ最適化問題と定義した。第1報では、最適化のための評価関数として被加工材の成形性（加工荷重、塑性ひずみ、欠陥の有無等）を考慮した。その結果、予備成形で穿孔と平面および傾斜面での据込みを同時成形する予備成形パンチ形状が最適解であると結論付けられた。

本報では、第1報に続き、金型内部応力を評価関数として、パンチおよび金型内部応力に及ぼす予備成形パンチ形状の影響について評価した。また、成形ダイスと補強ケースとの直径比について新たな知見を得たので報告する。

2. 圧造プロセス

2.1 対象形状と圧造金型

現状の圧造プロセスをFig. 1に示す。冷間圧造用炭素鋼のコイル材から円柱ブランクを切断し、頭部の予備成形後に、十字穴及び座面に緩み防止用のセレーションを有するフランジをHeading成形（以下、主成形と呼ぶ）する。

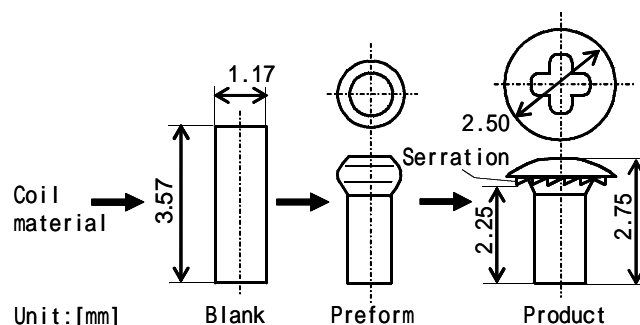


Fig. 1 Heading process of screw with serration

* 機械技術部

** (株)ユニオン精密

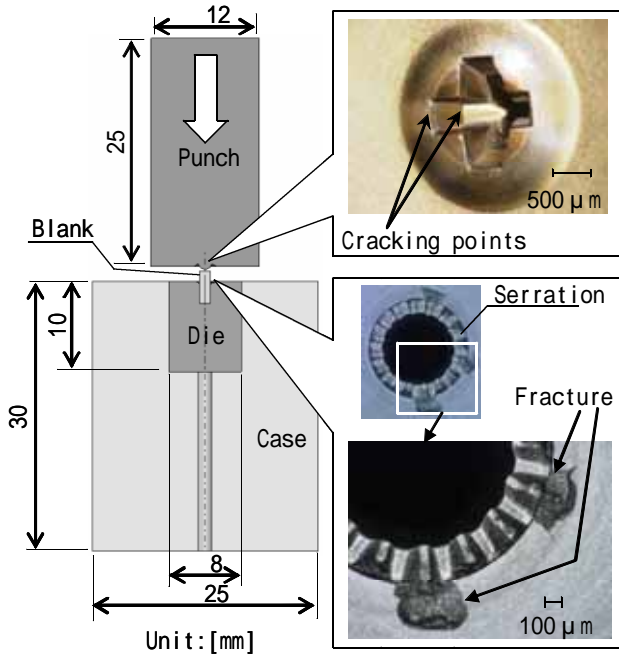


Fig. 2 Schematic illustration of die configuration and photograph of heading punch and die

圧造金型をFig. 2 に示す。金型は、パンチ、ダイスおよび補強ケースで構成されている。図の右上は、パンチの成形部の拡大写真であり、現状では矢印で示す2カ所でクラックが発生している。また、右下は、セレーションを有するダイスの拡大写真であり、セレーション外周部で破壊されている様子を示したものである。

2.2 予備成形パンチ

第1報において新たに設計した予備成形パンチをFig. 3 に示す。なお、図は軸対称半断面を表示している。現状の予備成形パンチは、円弧とテーパより構成される凹型の円錐台である。パンチ形状を最適化する場合、設計の自由度が高く、一意的に決定することができない。そこで、パンチ形状をある傾斜角を有する円錐体の基本要素として定義し、金型寿命の伸長を目的に、加工荷重の低減効果が大きい基本要素を組合せて予備成形パンチ形状を設計した。

3. 金型の弾性変形解析方法

金型の解析モデルをFig. 4 に、解析条件をTable 1 に示す。また、予備成形パンチで予備成形したプリフォームを用いて主成形した時の荷重 - ストローク曲線をFig. 5 に示す。被加工材料の塑性変形解析と金型の弾性変形解析を同時に行うと膨大な時間を要し、実用的ではない。そこで、本報では最初に圧造における被加工材料の塑性変形解析を実施し、パンチとダイスに作用する力を求め、その結果を基に圧造金型の弾性変形解析を実施した。なお、金型の弾性変形解析は、Fig. 5 の結果から加工荷重が最大となる最終ストロークにて実施した。こうすることで効率的な解析

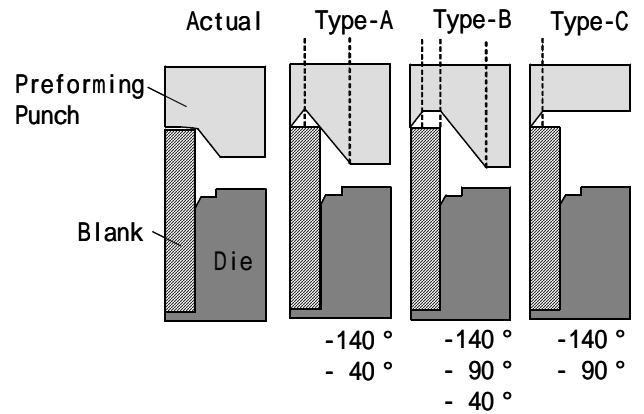


Fig. 3 Schematic illustration of preforming punch and die configuration

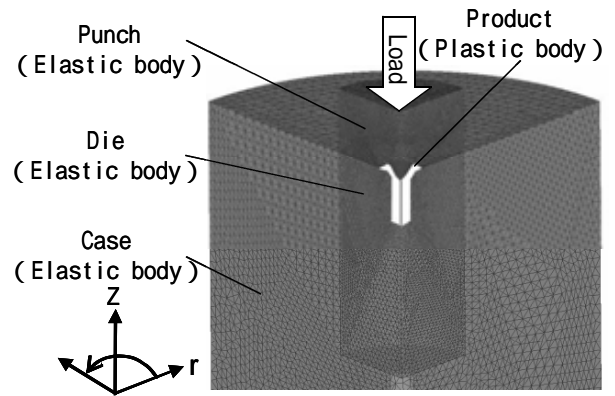


Fig. 4 FEM model for elastic deformation analysis

Table 1 Analysis conditions

Young's modulus and poisson's ratio of Sintered hard alloy (Die and Punch)	540GPa, =0.22
Young's modulus and poisson's ratio of SCM440 (Case)	203GPa, =0.3
Coulomb friction coefficient between Die and Case	$\mu=0.3$

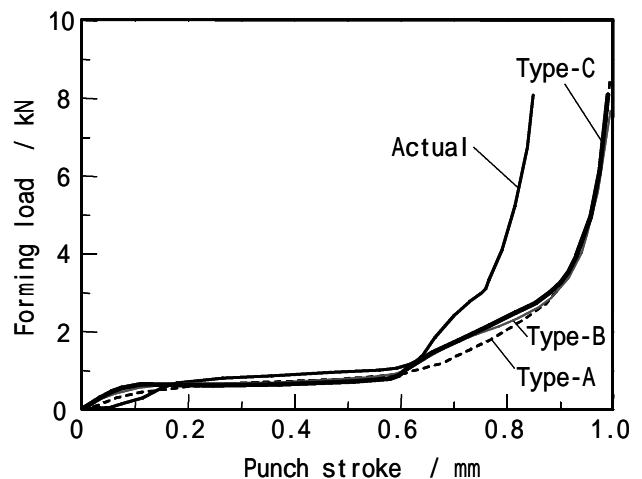


Fig. 5 Forming load - punch stroke curve in heading

が可能となる。なお、本報では、塑性変形および弾性変形が取り扱える有限要素解析ソフトDEFORM-3D Ver6.0 (SFTC社製)を解析ソルバーとして用いた。金型の弾性変形解析においては、対称性を利用して、金型全体の1/4を解析モデルとした。パンチ、ダイスおよび補強ケースは、弾性体として定義した。ダイスとパンチは超硬合金を用い、縦弾性係数を540GPa,ポアソン比を0.22とした。補強ケースはSCM440を用い、縦弾性係数を203GPa,ポアソン比を0.3とした。ダイスと補強ケースの接触面に作用するクーロン摩擦係数 μ の値は、0.3とした。

4. 解析結果及び考察

4.1 パンチ応力に及ぼす予備パンチ形状の影響

FEM解析から得られた主成形におけるパンチのせん断応力分布をFig. 6に示す。なお、各図の応力スケールは、応力の増減を把握しやすくするため、-300~300MPaに統一されている。

-Z方向のせん断応力において、Fig. 2に示した現状工程でのクラック発生位置と同様の部位で、破損の原因と推察される高いTension応力が発生している。また、Z-r方向のせん断応力についても同様である。このことから本FEM解析の妥当性が裏付けられた。

Type-A, Type-BおよびType-Cでは、現状工程と比較して応力値が大幅に減少しており、パンチ寿命の伸長が期待できることを示唆している。すなわち、予備成形パンチ形状を変更した効果があることが分かる。金型破壊を回避するため成形時のパンチに作用するTension応力は、局所的な集中が無く、応力分布は可能な限り均一である事が望ましい。こうした観点から設計案を考察すると -Z方向のせん断応力において、Type-Cで高いTension応力が発生しているのに対し、Type-AおよびType-Bでは高いTension応力の発生が無く、均一化されている。中でもType-Bは、応力分布の均一性が他案より良好である。そのことは、Z-r方向のせん断応力においても確認できる。

クラック発生位置における -Z方向およびZ-r方向の最大せん断応力値と予備成形パンチ形状の関係をFig. 7に示す。なお、当該位置は、Fig. 6の最大応力発生位置とは異なる場合がある。設計案はいずれも現状工程と比較して応力値が大幅に低減していることが分かる。-Z方向のせん断応力では、Type-Aが最低値となっている。また、Z-r方向のせん断応力は、現状工程がTension応力であるのに対して、全設計案でCompression応力となっており、金型寿命の伸長にとって良好な結果となっている。

以上の結果から、予備成形パンチ形状の設計案はいずれも主成形パンチにて発生する応力低減に効果があり、Type-B, Type-A, Type-Cの順で良好であると結論付けられる。

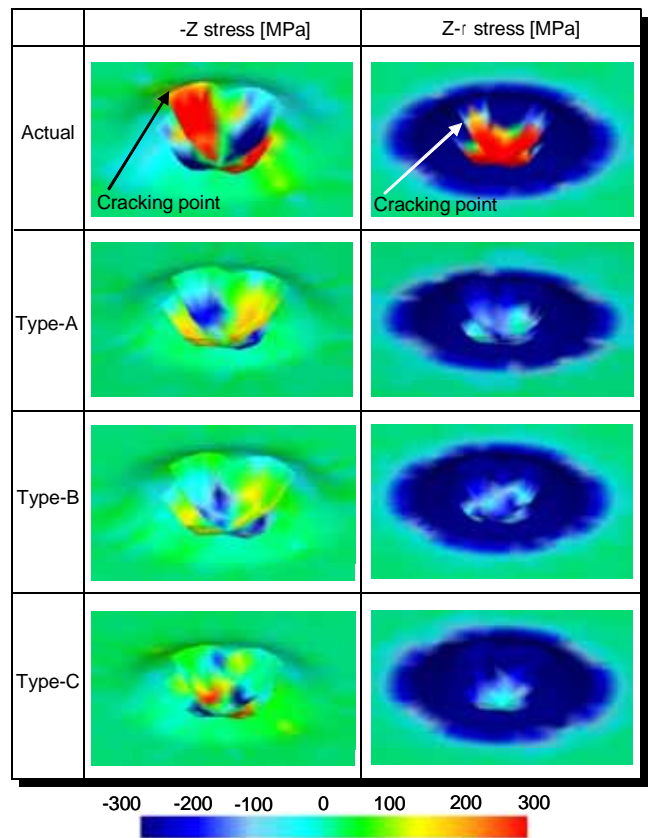


Fig. 6 Effect of preforming punch shape on shearing stress of heading punch

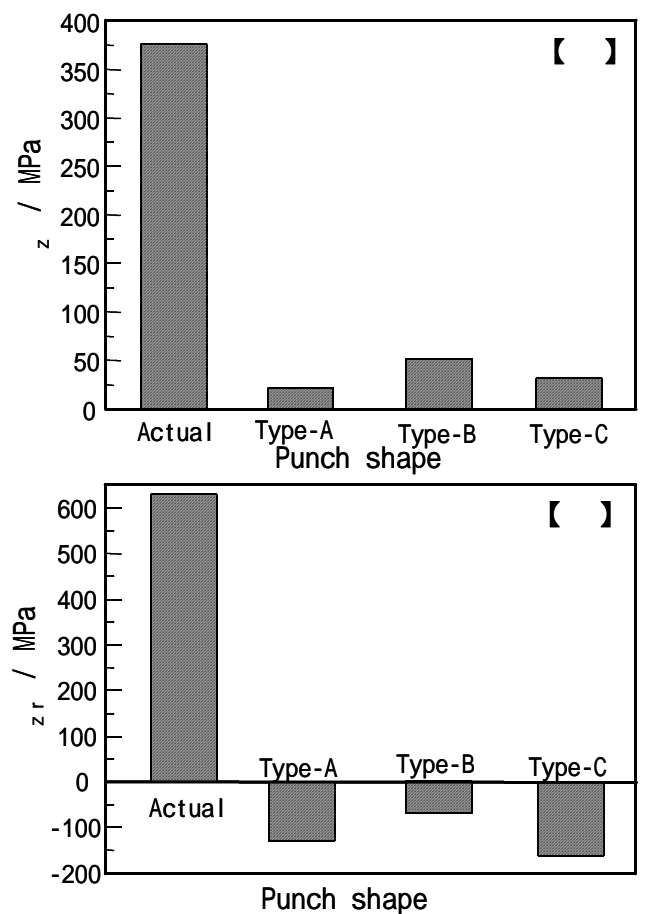


Fig. 7 Effect of preforming punch shape on maximum shearing stress of heading punch

4.2 ダイス応力に及ぼす予備パンチ形状の影響

FEM解析から得られた主成形におけるダイスの各方向のせん断応力分布をFig. 8に示す。なお、パンチ応力と同様に各図の応力スケールは、応力の増減を把握しやすくするため、 $-Z$ 方向では $-120 \sim 120\text{MPa}$ 、 $Z-r$ 方向で $-300 \sim 300\text{MPa}$ に統一されている。また、図はダイスの3/4カット断面を示している。

図よりFig. 2のダイスのセレーション外周部で発生している破壊と同様の位置に、破壊の原因となりうるTension応力が、いづれの方のせん断応力分布図でも発生しており、本FEM解析の妥当性が裏付けられた。

$-Z$ 方向では、ダイス上端面のセレーション部に高い応力が集中しているが、当該応力はダイス下部へ伝播していないことが確認できる。前述の高い応力は、塑性流動の複雑さに起因し、Tension応力およびCompression応力が混在しているため、ダイスの破壊を促進するものと推察される。現状工程およびType-Aのセレーション外周部には、ダイス破壊の要因となり得るTension応力の領域が多く見られ、特にType-Aのセレーション領域(図のA1)のTension応力値が大きくなっているのが特徴的である。逆に、Type-BおよびType-Cのセレーション領域(図のA2, A3)においては、Compression応力が発生している。

$Z-r$ 方向では、ダイス上端面のセレーション外周部にダイス破壊の要因となり得る高いTension応力領域がリング状に出現しており、当該応力は、ダイス下部へ向かって放射状に伝播していることが確認できる。また、現状工程およびType-Aのセレーション部においてはCompression応力は見られないが、Type-BおよびType-Cのセレーション部(図のP1, P2)にはCompression応力が見られ、ダイスにとっては良好であると推察される。

ダイスのクラック発生位置であるセレーション外周部における $-Z$ 方向および $Z-r$ 方向の最大せん断応力値と予備成形パンチ形状の関係をFig. 9に示す。いづれの方のTension応力が発生している。 $-Z$ 方向の最大せん断応力値では、Type-Bが現状工程より約30%低下して良好な結果を示しているのに対し、Type-AおよびType-Cはいずれも現状工程より同等か増加している。特に、Type-Aでは約27%増加しており、ダイス寿命の観点から好ましくないと推察される。また、 $Z-r$ 方向の最大せん断応力値では、現状工程と比較して低減しているのはType-Cのみであり、Type-Aは現状と同等であり、Type-Bでは現状よりも応力値が増加している。しかし、現状工程と比較してその増減量はわずかであることが分かる。

以上のせん断応力分布および最大せん断応力値の結果から総合的に判断すると、予備成形パンチ形状の順位付けはType-B, Type-C, Type-Aの順であると結論付けられる。

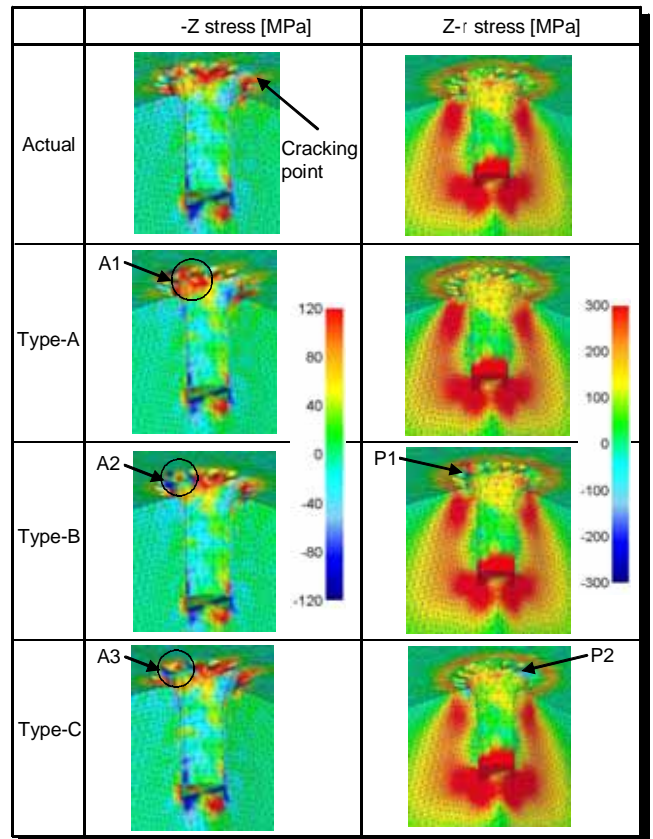


Fig. 8 Effect of preforming punch shape on internal shearing stress of die in heading

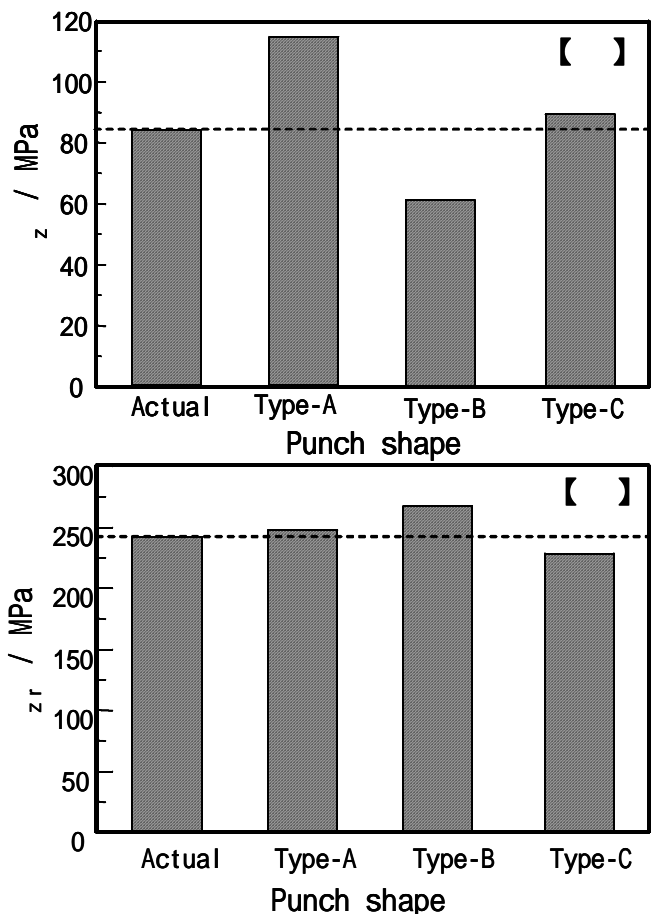


Fig. 9 Effect of preforming punch shape on internal maximum stress of die in heading

4.3 評価関数による予備成形パンチ形状の最適化

設計した予備成形パンチ形状は複数あるため、設計案の良否を評価する必要がある。的確な評価を行うために、第1報と同様に評価関数により最適化を実施した。評価項目がE1, E2, E3, . . . , Enなど多数の場合、評価関数Eを次式とすると、

$$E=f(e_1+e_2+e_3+\dots+e_n) \dots\dots\dots (1)$$

Eをいかに定めればよいかと言う問題に帰着する。評価項目をe₁:パンチの応力値, e₂:ダイスの応力値, e₃:第1報の結果とし、それぞれに重みw_iをかけて加重すると次の式で表される。

$$E=\sum_i w_i e_i \dots\dots\dots (2)$$

各設計案および現状プロセスの評価値eおよび重みwをTbale 2に示す。本研究では、式(2)が最小となる設計案を最適設計案とする。

評価値eについてはそれぞれ4区分とし、最小値を1, 最大値を5とした。重みwについては3区分とし、加工品の品質, ダイス寿命など重要度の高い順に重み付けを実施し、パンチ応力結果を1, ダイス応力結果を2, 第1報における塑性変形解析結果を3とした。

次に、式(2)を用い設計案を総合評価した結果をFig. 10に示す。図よりType-BおよびType-Cでは現状工程より改善されることが分かる。この中で、第1報と同様に予備成形で穿孔と平面および傾斜面による据込みを同時成形するType-Bを最適設計案と結論付ける。

5. 補強ケースの圧入径についての考察

冷間圧造では、高い成形圧力により円周方向のTension応力が発生し、ダイス破壊に至る場合がある。ダイス破壊を回避するため、補強ケースにダイスを圧入する工夫がなされる。すなわち、成形時にダイスに発生する円周方向のTension応力に対抗するCompression応力を圧入により予めダイスに与えておき、成形時のTension応力と相殺することでダイス破壊を防ぐものである。圧入に関する設計因子として、圧入時の締め代(ダイス外径と補強ケース内径との差)と圧入径(補強ケース内径またはダイス外径)が考えられるが、従来は締め代しか注目されていなかった。しかし、加工品形状の複雑化に伴い、塑性流動の複雑化に起因する金型寿命低下のため、圧入径についても定量的に考察する必要があると考える。そこで、本報ではダイスに発生する応力に及ぼす圧入径の影響について弾性変形解析を実施した。解析に用いたモデルをFig. 11に示す。解析条件および解析方法は第3章と同様で、締め代は1.2%とした。また、加工品のフランジ直径をdとし、補強ケース内径を

Table 2 Evaluation value and weight

Evaluation Item Design No.	1	2	3
	Punch	Die	Deformation Analysis
1 Actual	4	3	3
2 Type-A	2	4	4
3 Type-B	1	1	1
4 Type-C	3	2	2
Weight	1	2	3

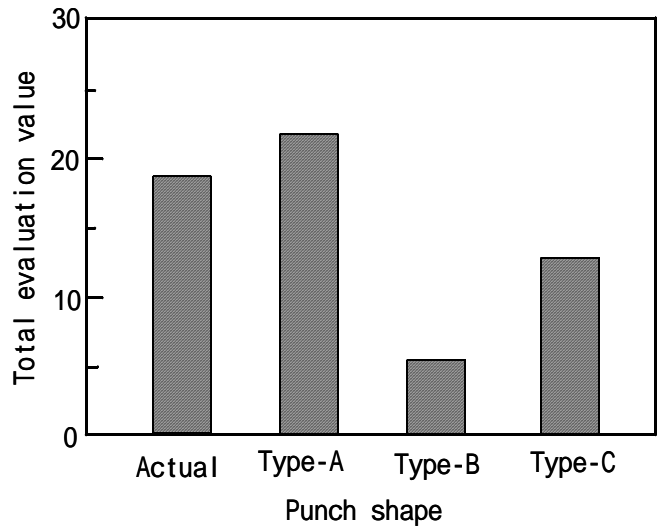


Fig.10 Result of evaluation

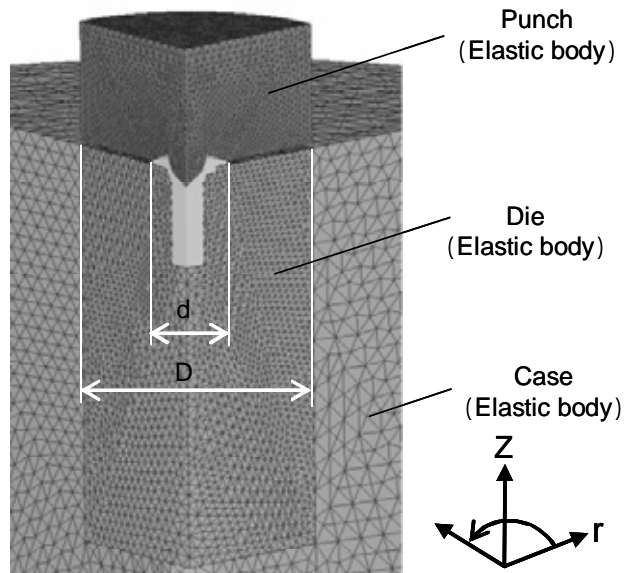


Fig.11 FEM model for elastic deformation of press fit

Dとした時、直径比D/d=1.5, 2, 3, 4(現状), 5の5条件で解析を実施した。クラック発生部における補強ケース内径と加工品のフランジ直径との比とr-方向の最大せん断応力値の関係と-Z方向の最大せん断応力値の関係をそれぞれFig.12およびFig.13に示す。

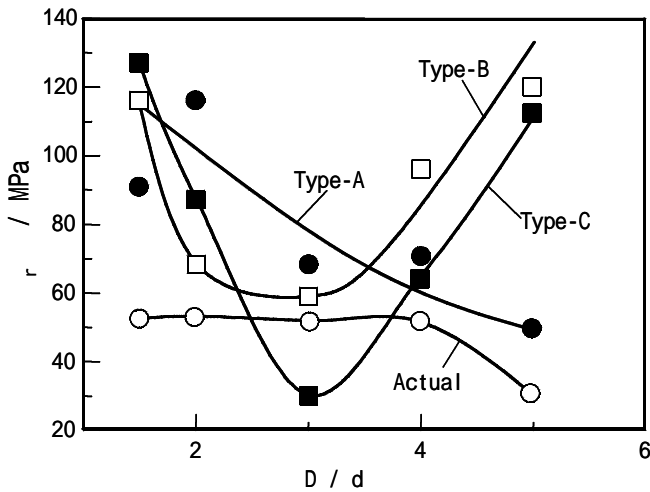


Fig.12 Effect of diameter ratio on shearing stress r of die

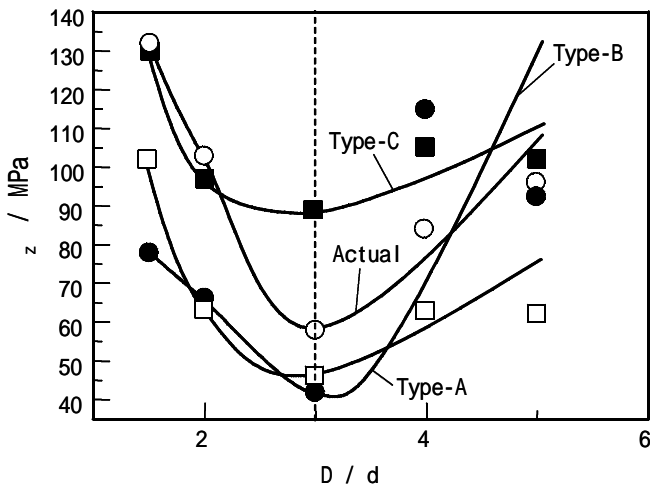


Fig.13 Effect of diameter ratio on shearing stress z of die

r - 方向では、現状工程の場合、直径比4までは応力値に変化がないが、4を越えると低下する。Type-Aでは、直径比が大きくなると応力値は低下する。一方、Type-BおよびType-Cでは、直径比3で応力値は最小となり、特に、Type-Cでは設計案の中でも応力値が最低となっている。

- Z方向では、全ての設計案において、直径比3で応力値が最小となることが確認できる。最適案とされたType-Bでは設計案中応力値が最低となっている。以上の結果から、補強ケースの圧入においては、ダイスに作用する応力が最小となる最適な補強ケース内径が存在することが分かった。

6. 結 言

座面に緩み防止用セレーションを有する極小ねじの冷間圧造プロセスに関して、プリフォーム形状を最適化するため、複数の予備成形パンチを設計し、FEMによる金型の弾性変形シミュレーションを実施した。その結果、第1報と

同様に予備成形で穿孔と平面と傾斜面での据込みを同時に実施する予備成形パンチ形状が最適解であると結論付けられた。また、補強ケースの圧入において、ダイスに作用する応力が最小となる最適な補強ケース内径が存在し、本研究においては補強ケース内径と加工品のフランジ直径との直径比3が最適値であった。

参 考 文 献

- 1) 小川淑勝：塑性と加工，28-320，931-936(1987)
- 2) 泉聡志，木村成竹，酒井信介：機論A，72-717，780-786(2006)
- 3) 泉聡志，横山喬，岩崎篤，酒井信介：機論A，71-702，204-212(2005)
- 4) 小沢順造：塑性と加工，47-541，91-94(2006)
- 5) 益田亮：塑性と加工，8-81，519-527(1967)
- 6) 田村清，富田正一，安藤美明，勝又武敏：塑性と加工，13-135，291-297(1972)