

539.388.24 : 620.162-41

みぞ付き円板の液圧バルジ試験によるプレス成形性の評価*

(第 2 報, みぞの幾何学的条件に関する検討)

河 合 望**, 黒 崎 靖***

1. ま え が き

液圧バルジ試験は, 金属薄板の応力-ひずみ関係⁽¹⁾~⁽³⁾, 塑性不安定⁽⁴⁾ など 2 軸応力下における 塑性力学的諸問題の検討手段として, 従来から多く用いられてきた。一方, 金属薄板のプレス成形性評価への利用といった実用的見地からも, しばしば検討対象とされてきた。限界バルジ深さ⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 等 2 軸応力下における n 値⁽⁶⁾ などによる純粋張出し性評価, 吉田ら⁽²⁾ の α 値によるフランジ流入性評価, 円およびだ円バルジ試験による成形限界線の作成⁽⁷⁾⁽⁸⁾ などかなりの成果が得られている。しかし, その反面多くの問題点も指摘されている⁽⁹⁾。中でも, 常にバルジ頂点近傍において破断を生ずるため, 変形および強度特性に関する情報にある程度制約が加わることが一つの大きな弱点となっている。

この問題への一つの対策として, 著者ら⁽⁹⁾ は, あらかじめバルジ素板に同心円状みぞを加工しておき, 破断半径位置を管制するバルジ試験法を試みた。この結果, 特定のみぞ寸法の試験片の破断試験を行うことにより, 円板の深絞り性および張出し性評価に有効な二, 三の尺度をみいだすことができた。しかし, 評価尺度に及ぼすみぞの形状, 寸法の影響についてなお若干不明の点が残された。そこで本研究では, みぞの形状, 寸法の最適条件をさぐると共に, 本法の標準試験条件の提案を行いたい。

記 号

 $\sigma_\phi, \sigma_\theta$: 子午線方向および円周方向の応力 $\sigma_{eq}, \epsilon_{eq}$: 相当応力および相当ひずみ $\epsilon_\phi, \epsilon_\theta, \epsilon_t$: 子午線方向, 円周方向および板厚方向の対数ひずみ $d\epsilon_\phi, d\epsilon_\theta, d\epsilon_t, d\epsilon_{eq}$: $\epsilon_\phi, \epsilon_\theta, \epsilon_t$ および ϵ_{eq} の増分 t_0, t : 初期ならびに変形後の板厚

* 昭和 51 年 11 月 10 日 第 27 回塑性加工連合講演会および昭和 52 年 11 月 22 日 第 28 回塑性加工連合講演会において講演, 原稿受付 昭和 53 年 1 月 17 日。

** 正員, 名古屋大学工学部。

*** 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

 R, r_0 : 初期ならびに変形後の半径位置 ϕ : 要素の法線が工具対称軸となす角度 p : バルジ圧力 r : 異方性係数

2. 実 験 条 件

本研究では, できるだけ広範囲の n 値および r 値にわたって検討を行うため, 表 1 に示すような低炭素鋼, チタン, 工業用純アルミニウム, 銅, 黄銅など 15 種類の薄板 (公称板厚 0.8 mm) を準備し, これに液圧バルジ試験, 引張試験および各種成形性試験を施す。以下に実験条件の詳細を記す。

2.1 液圧バルジ試験 使用した液圧バルジ試験装置は前報⁽⁹⁾のものと同一で, バルジ深さ h に対する液圧 p の変化を $\pm 1\%$ 以内の精度で, X-Y レコーダに自動記録しうようになっている。ダイス穴径 $2r_0$ は 50 mm, ダイス肩半径は 2 mm である。以下, 図 1 に示す記号を用いる。直径 100 mm の円板をジグにより旋盤に固定し, あらかじめ工具研削盤によって成

表 1 供試材の引張り特性値 (板面内平均値)

材 料 名	n 値	r 値	F kgf/mm ²	引張強さ S_r kgf/mm ²	全伸び e_{IT} %
キルド鋼A	0.213	1.85	53.7	31.3	31.9
キルド鋼B	0.229	1.62	56.6	32.2	40.9
リムド鋼A	0.215	1.26	56.3	32.6	31.0
リムド鋼B	0.209	1.03	57.7	33.8	36.7
特殊リムド鋼A	0.235	1.49	49.0	27.6	42.2
特殊リムド鋼B	0.237	1.82	47.6	26.6	46.2
チ タ ン	0.141	3.08	55.1	36.7	44.1
工業用純アルミニウム					
軟 質 材	0.262	0.83	16.0	8.72	36.1
半 硬 質 材	0.107	1.09	14.8	10.5	19.1
無 酸 素 銅					
軟 質 材	0.446	0.97	51.6	22.3	47.0
硬 質 材	0.010	0.50	31.2	29.4	6.8
タフピッチ鋼 1/4 H 材	0.263	0.92	43.7	23.8	39.7
60/40 黄銅					
1/4H 材	0.388	0.96	88.1	41.1	40.9
半 硬 質 材	0.154	1.14	75.7	48.8	21.6
硬 質 材	0.043	1.23	62.4	51.4	8.2

$$\sigma = F\epsilon^n$$

形したバイトを用いて円板と同心にみぞを切削する。試験片の寸法詳細を図2に示す。みぞの形状として、前報⁽⁹⁾の円弧みぞのほか、角みぞAおよびBの合計3種類を採用し、深さ δ および初期半径位置 R_g を種々変更する。円弧みぞおよび角みぞAの場合、油圧は常にみぞを付した面に加える⁽⁹⁾。破断時のバルジ深さ h_{cr} および p_{cr} は、前述のX-Yレコーダより読取る。バルジ張出し速度は、約0.2 mm/sとする。

2.2 引張試験 引張試験片はJIS 13B号の規格(公称標点距離50 mm)に従って作成し、インストロン形引張試験機(島津オートグラフIS-5000形)によってチャック引張速度10 mm/minで試験する。板面内において、圧延方向に対して0°, 45°および90°の3方向に試験片を採取し、それぞれから求めた引張り特性値の平均値 $[\frac{1}{4}(\sigma_{0^\circ} + 2\sigma_{45^\circ} + \sigma_{90^\circ})]$ を表1に示す。

2.3 成形性試験 本論文では、フランジ部を完全拘束した場合のポンチ張出し加工を純粹張出し⁽¹⁰⁾と呼ぶことにする。円板の深絞りおよび純粹張出し試験において採用した加工条件は既報⁽¹¹⁾と同一であるので、ここでは要点のみを記す。ポンチ半径 r_1 が20 mm

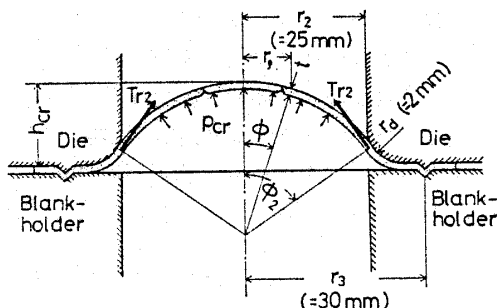


図1 みぞ付き円板の液圧バルジ試験における記号の説明

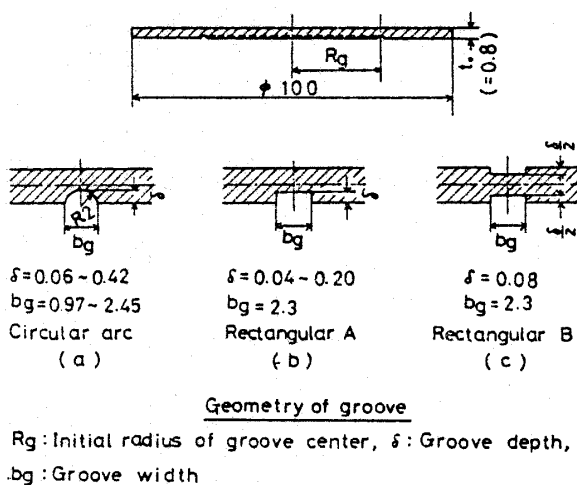


図2 試験片の寸法(単位: mm)

の平頭ポンチ(肩半径 $r_p=4$ mm)と球頭ポンチ($r_p=20$ mm)の2種類を採用し、 r_p の影響を調べる。ポンチ面潤滑剤として、比較的低摩擦のみつろうを用いる。これにより、常にポンチプロフィール部破断のみを生じさせ、成形性評価の議論を簡明にした⁽¹¹⁾。深絞りにおけるフランジ面潤滑剤は、牛脂黒鉛混合剤である。

3. 実験結果

前報⁽⁹⁾では、特定のみぞ寸法を有する試験片の破断実験より求まる限界バルジ深さ h_{cr} および破断圧力 p_{cr} を用いて、成形性評価尺度を導いた。しかし、ここでは比較的浅い円弧みぞのみ($\delta/t_0 \leq 0.125$, δ : みぞ深さ, t_0 : 素板の初期板厚)を検討対象としたが、本研究ではさらに広範囲のみぞ条件を用いる。そして、まず h_{cr} および p_{cr} に及ぼすみぞ条件の影響から検討を始めることにする。

3.1 限界バルジ深さに及ぼすみぞ形状の影響 一例として、工業用純アルミニウム軟質材を用い、みぞの初期半径位置 $R_g=10$ mmの円弧みぞ試験片について、 δ/t_0 を種々変更し、バルジの進み h に伴う圧力 p の変化をみたものが図3である。図には参考のため、みぞなしの場合の $p-h$ 曲線が付記してある。図によれば、 $\delta/t_0 > 0.2$ とみぞが深くなると、 $p-h$ 曲線はみぞの影響を多少受け、破断直前にわずかに p が低下するものの、みぞなしの場合とおおむね一致することがわかる。しかし、破断時期 h_{cr} はみぞが深くなるほど早まり、したがって破断内圧 p_{cr} も減少している。全く同様の結果は、みぞ形状や R_g が異なっても見られることが分かった。

図4は、 h_{cr} のダイス穴半径 r_2 に対する相対値 $(h_{cr}/r_2)_b$ に及ぼす δ/t_0 の影響をみたものである。図では、 δ/t_0 が小さいほど $(h_{cr}/r_2)_b$ の変化率が大きく、みぞの加工誤差の影響を受けやすいこと、および $R_g=10$ mmと20 mmにおいて、 δ/t_0 が0.2を越えると $(h_{cr}/r_2)_b$ はほぼ一致することの2点が注目される。この理由はめいりょうではないが、前者の現象が

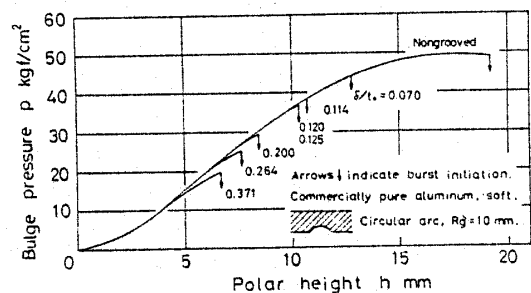


図3 バルジ圧力 p -バルジ深さ h 線図

生じた一因として次のことが推定される。すなわち、みぞを深くするとみぞ周辺部の拘束が相対的に強くなり、みぞ底部のひずみ径路は平面ひずみ状態に向かうようになる⁽¹²⁾。これは材料強化をもたらし、破断荷重ひいて破断内圧、限界バルジ深さなどの低下を緩和する。

図 5 は、 R_g の影響を詳細にみたものである。ここでは、 $\delta/t_0=0.125$ と 0.250 の二つの場合について、円弧みぞと角みぞ A の実験点がプロットされている。図によれば、みぞの形状による差異は 6% 以下と比較的小さく、また、 $(h_{cr}/r_2)_b$ は $\delta/t_0=0.125$ の場合 $R_g=10$ mm において極小となり、 $\delta/t_0=0.250$ の場合既に図 4 でみたように、 $R_g \geq 10$ mm の範囲でほぼ一定となっている。みぞの形状についてさらに詳細に知るため、 $\delta/t_0=0.096$ というようにかなり浅い場合の R_g と $(h_{cr}/r_2)_b$ の関係を、3 種類のみぞ形状につい

て比較した結果を図 6 に示す。図によれば、いずれのみぞ形状の場合にも、 $R_g=10$ mm において $(h_{cr}/r_2)_b$ は極小を示している。図 4~6 から明らかなように、みぞが $\delta/t_0 \leq 0.2$ というように浅い場合には、破断に対して最も敏感となる R_g が存在することが分かるが、みぞ形状の影響はほとんど認められない。

以上の結果から、本研究では破断部初期半径位置を正確に固定しうる長所を持つ円弧みぞを用いることにする。問題は δ/t_0 および R_g の大きさであるが、前述の図 4~6 の結果を参照して次のように選ぶ。すなわち、 δ/t_0 の値としては 0.2 を境として比較的浅いみぞ 0.125 および比較的深いみぞ 0.250 の二つを選び、一方 R_g としては 10 mm を基準とし、それより小さい値 0 mm およびそれより大きい 20 mm の三つを選ぶことにする。そして、 δ/t_0 と R_g のどの組合せが成形性評価尺度を得るのに最適かに焦点を絞って、以後検討を進める。

3.2 純粋張出し性評価尺度 前報⁽⁹⁾では、限界バルジ深さおよびみぞ外縁部の限界板厚ひずみを有効な純粋張出し性評価尺度として提案した。しかし、両者は良好な直線関係で結ばれており⁽⁹⁾、測定は前者の方がはるかに容易であるので、ここでは限界バルジ深さ h_{cr} のみを検討対象とする。

図 7 (a) および (b) は平頭ポンチ、図 8 (a) および (b) は球頭ポンチによる純粋張出しの相対限界成形深さ (h_{cr}/r_1) クランプと相対限界バルジ深さ $(h_{cr}/r_2)_b$ の関係を、各種のみぞ寸法についてみたものである。図 7 に示す平頭ポンチの場合をみると、 $\delta/t_0=0.125$ 、 $R_g=10$ mm のみぞ寸法の結果が最も良好な直線関係を示すことが分かる。 $R_g=20$ mm の結果でもそれ程悪くないが、 $R_g=0$ mm の結果には大きなばらつきが生じている。一方、図 8 の球頭ポンチの場合

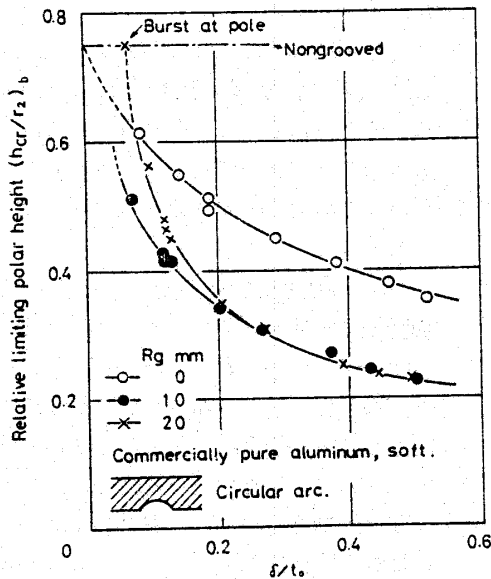


図 4 相対限界バルジ深さ $(h_{cr}/r_2)_b$ に及ぼす δ/t_0 の影響

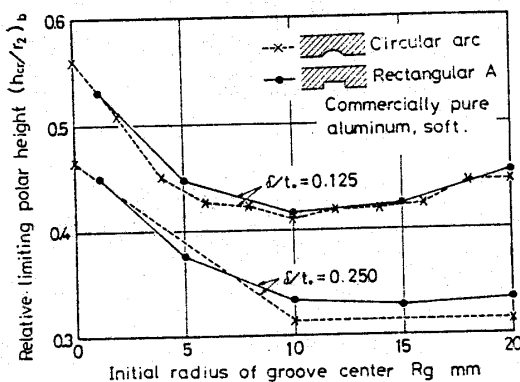


図 5 相対限界バルジ深さ $(h_{cr}/r_2)_b$ に及ぼすみぞの初期半径位置 R_g の影響

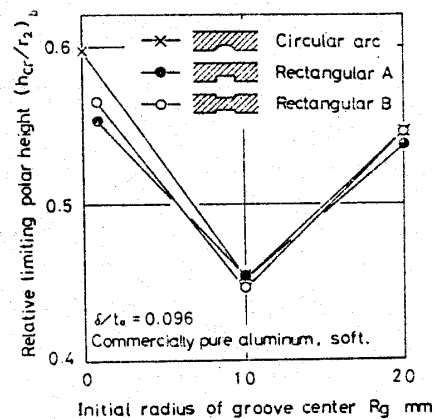


図 6 相対限界バルジ深さ $(h_{cr}/r_2)_b$ に及ぼすみぞ形状の影響

には, $\delta/t_0=0.125$, $R_g=0$ mm の結果が最も良好な直線関係を示すが, $R_g=10, 20$ mm の結果もそれ程悪くない. しかし, $\delta/t_0=0.250$ の結果は, 平頭および球頭ポンチのいずれの場合にもばらつきは大きいようである.

図9は, ポンチ張出しおよびバルジ試験 ($\delta/t_0=0.125$) における破断予定部のひずみ経路を $\epsilon_\theta-\epsilon_\phi$ 関係として, 工業用純アルミニウム軟質材について示すものである. 平頭ポンチ張出しのひずみ経路は, $R_g=10$ mm のバルジ試験のものにきわめて近接しており, 球頭ポンチ張出しの結果は, $R_g=0$ mm のものと比較的類似の変化をたどることがわかる. 上述の相

関関係の相違は, このように, 破断予定部のひずみ経路の類似性に求められるようである.

結局, 前述の結果を総合すると, 破断位置が固定できればみぞは浅い方が張出し性評価能力は良好となるようである. δ/t_0 が大きくなると, 前述のようにみぞ部は平面ひずみ状態に向かう傾向を持ち, また, 応力およびひずみの厚さ方向および子午線方向のこう配, さらには後述の局部的二次バルジ効果などが現れ, これらが相関連して破断に影響してくるものと考えられる. しかし, 元来薄板の軸対称張出し加工は比較的等2軸に近い応力状態が支配的で, 上述の因子の影響は少ないはずの加工法である. したがって, 上述結果は, 破断予定部のひずみ経路を管制しうる範囲内のできる限り δ/t_0 を小として上述影響因子の抑制をはかることが実用上望ましいと解釈できる. ただし, あまり δ/t_0 が小さいと図4にみたように加工誤差の影響が大きくなる. 両条件の妥協として, $\delta/t_0=0.125$ が実用上適当と考えられる.

また, R_g については, 平頭および球頭ポンチを通して共通の値を選ぶとすれば, $R_g=10$ mm が最も適当と考えられる. これらの値は, 前報⁽⁹⁾においてとりあえず採用され, 詳細な検討が加えられたものであるが, ここに, ほぼ最適条件であることが確認されたわけである.

3.3 深絞り性評価尺度 前報⁽⁹⁾によって, 純粋張出し試験から得られる相対荷重負担能力 ($T_{or}/(A_0 \cdot S_T)$) クランプは深絞り性評価尺度として優れており, 修正相対バルジ強さ L_b はそれに代わる簡明な尺度として, 十分実用に耐えるものと推奨された. そこで, 初めに, みぞ寸法の変更により両者の関係がどのような影響を受けるかの検討から始めることにする.

相対荷重負担能力 ($T_{or}/(A_0 \cdot S_T)$) クランプは次式で表される (記号は図10参照).

$$\left(\frac{T_{or}}{A_0 \cdot S_T}\right)_{\text{クランプ}} = \frac{(t\sigma_\phi)_{r_i} r_i}{t_0 S_T r_1} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, T_{or} は破断力, $A_0^*=2\pi r_1 t_0$ (r_1 はポンチ半径, t_0 は素板初期板厚), $(t\sigma_\phi)_{r_i}$ は接触開始部半径 r_i

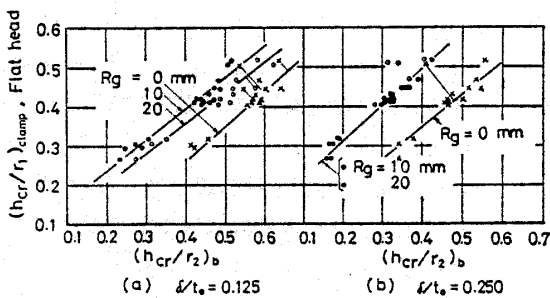


図7 相対限界バルジ深さ $(h_{cr}/r_2)_b$ と平頭ポンチ張出しにおける相対限界成形深さ $(h_{cr}/r_1)_{\text{クランプ}}$ との関係

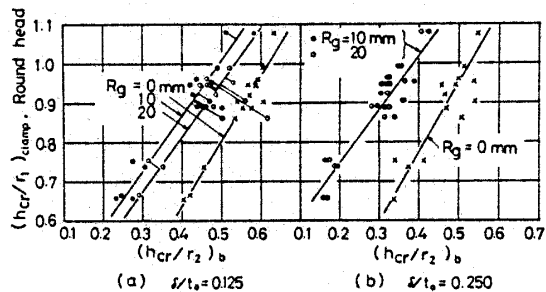


図8 相対限界バルジ深さ $(h_{cr}/r_2)_b$ と球頭ポンチ張出しにおける相対限界成形深さ $(h_{cr}/r_1)_{\text{クランプ}}$ との関係

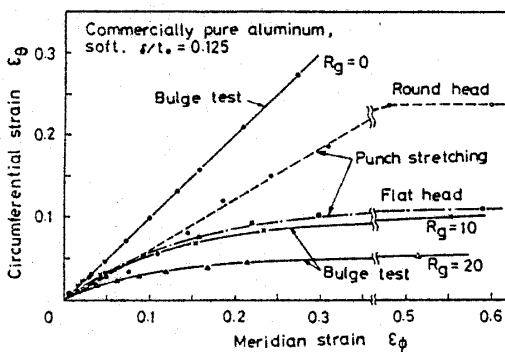


図9 ポンチ張出しおよびバルジ試験における破断予定部のひずみ経路

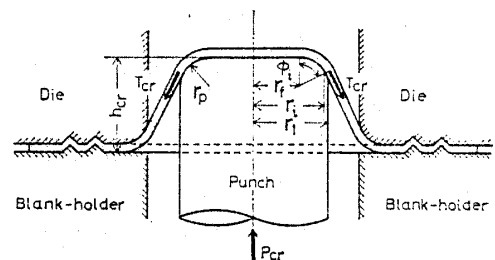


図10 純粋張出し試験における記号の説明

における単位円周長さ当たりの子午線方向張力, S_T は引張強さである. 修正相対パルジ強さ L_b は式 (1) 中の $(t\sigma_\phi)_{ri}/(t_0S_T)$ を次式に示すようにパルジ試験で得られる L_{r2} で置換したものと定義される (図 1 参照).

$$L_{r2} = \frac{(t\sigma_\phi)_{r2}}{t_0S_T} = \frac{p_{cr}r_2}{2t_0S_T \sin \phi_2} \dots\dots\dots (2)$$

$$L_b = L_{r2} \frac{r_i}{r_1} = L_{r2} \left(\frac{r_f}{r_1} + \frac{r_p}{r_1} \sin \phi_i \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに, $(t\sigma_\phi)_{r2}$ はダイス穴位置における単位円周長さ当たりの子午線方向張力である. L_b が $\{T_{cr}/(A_0 \cdot S_T)\}$ クランプの代用尺度となるには, $(t\sigma_\phi)_{ri}/(t_0S_T)$ と L_{r2} の相関が前提となる. みぞ寸法を変更して両者の関係を調査したのが, 図 11 (a), (b) (平頭ポンチ) および図 12 (a), (b) (球頭ポンチ) である. 図 11 の平頭ポンチの場合, $\delta/t_0=0.125$, $R_f=10$ mm のものが最も良好な直線関係を示し, また量的にもきわめて良い一致を示している. 図 12 の球頭ポンチの場合には, いずれの場合も相関は良くないが, $\delta/t_0=0.125$, $R_f=10$ mm のものが比較的良好な直線関係を示している.

式 (3) 中の $\sin \phi_i$ は, 前報⁽⁹⁾と同様に次式で示される $\sin \phi_2$ (図 1 参照) との直線関係を利用して定めうる.

$$\sin \phi_i = A \sin \phi_2 + B \dots\dots\dots (4)$$

パルジ形状に球面近似を仮定すれば, $\sin \phi_2$ は

$$\sin \phi_2 = \frac{2h_{cr}r_2}{h_{cr}^2 + r_2^2} \dots\dots\dots (5)$$

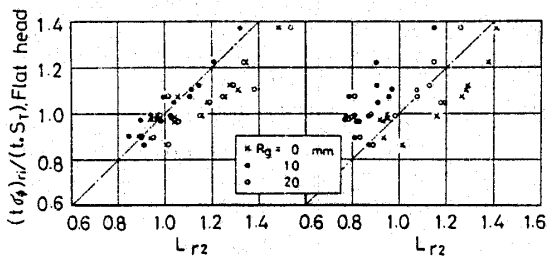


図 11 L_{r2} と平頭ポンチ張出しの $(t\sigma_\phi)_{ri}/(t_0S_T)$ との関係

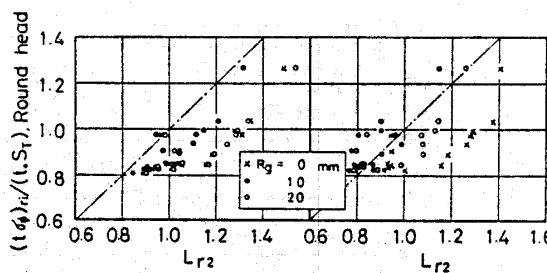


図 12 L_{r2} と球頭ポンチ張出しの $(t\sigma_\phi)_{ri}/(t_0S_T)$ との関係

となり, 結局 h_{cr} を測定すれば $\sin \phi_i$ を求めることができる. 式 (4) 中の定数 A および B は, 厳密にはポンチ形状によって異なるが, 球頭ポンチ張出しの結果を用いて定めておけば, 大きな誤差なく平頭ポンチの場合にも適用しうることが前報によって分かっている⁽⁹⁾.

3.2 節および本節の結果からみて, 純粋張出し性および L_{r2} のいずれに対しても $\delta/t_0=0.125$, $R_f=10$ mm のみぞ寸法が比較的良好な結果を示すことがわかる. したがって, このみぞ寸法を採用して L_b を求めれば (この場合, $A=0.562$, $B=0.510$ となる⁽⁹⁾), 深絞り性評価尺度として有効となることが期待される. 図 13 は, L_b と限界絞り比 $L.D.R.$ との関係を示すものであるが, チタンを除けば L_b は良好な深絞り性評価尺度となることが結論される.

以上, 円板の純粋張出し性および深絞り性評価に最適のみぞ寸法を検討してきたが, $\delta/t_0=0.125$, $R_f=10$ mm の円弧みぞが両者を通してほぼ妥当なものと結論される. 結局, このみぞ寸法の試験片で 1 回のパルジ破断試験を行い, p_{cr} と h_{cr} を測定すれば, 任意の r_p のポンチによる純粋張出し性および深絞り性を評価しうる尺度すなわち限界パルジ深さおよび修正相対パルジ強さを得ることができる. ただし, この方法はポンチプロフィール部破断⁽⁹⁾を生ずる場合にのみ有効である点に留意すべきである. なお, 本研究および従来からの提案尺度の比較は, 前報⁽⁹⁾で示されており, 軟鋼, 工業用純アルミニウム, 60/40 黄銅, 銅といった材料範囲内では, 現在のところ, 上述条件下で本試験法が最も精度が高い.

4. 理論的考察

3 章において, 最適みぞ寸法が明らかにされた. しかし, 試験片の変形および破断挙動に対してみぞがど

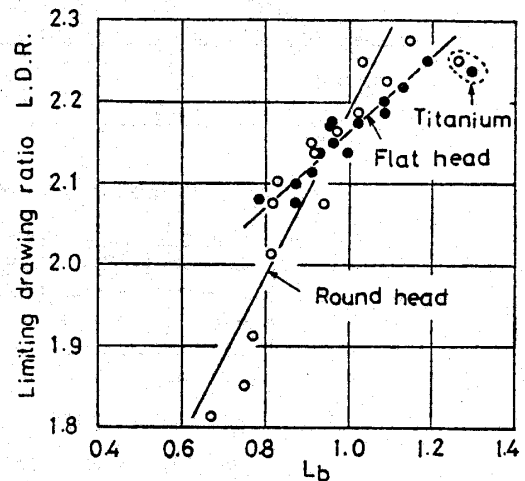


図 13 L_b と限界絞り比 $L.D.R.$ の関係

のような役割を果たしたかに関しては、なお不明の点が多い。本章では、みぞ付き試験片のモデルに対して理論解析を施し、本試験法の基礎的特性に対する理解を深めたい。

図 14 に、対象とした計算モデルを示す。 $\delta/t_0 = 0.125$ 、みぞ幅 $b_g = 2$ mm、放物線状のみぞ形状を対象とし、みぞの初期半径位置 R_g を種々に変更する。みぞ部では、実際には応力ならびにひずみが板厚方向に複雑に変化すると考えられるが、ここでは簡単のためこの影響を無視し、初期板厚が若干不均一な場合に対する近似解法として膜理論的取扱いを採用する。使用した基礎式および解法は付録に示してある。Hill の異方性理論⁽¹³⁾に基づき、Woo の解法⁽¹⁴⁾に準拠して軸対称形状液圧バルジの解析を行う。ただし、みぞ部での解の収束を確保するため、ミルソンの公式⁽¹⁵⁾を採用する。使用した計算機は、名古屋大学大型計算機センターの FACOM 230-75 である。

以下、工業用純アルミニウム軟質材を例に計算結果を述べる。図 15 は、バルジ圧力 p のバルジ深さ h に対する変化を種々の R_g に対してみたものである。図にはみぞなしの場合の理論曲線および実験点、さらにみぞ底部に Hill の拡散くびれ発生条件⁽¹⁶⁾を適用した場合の理論限界バルジ深さを * 印によって示してある。 $p-h$ 曲線に対する R_g の影響は小さくみぞなしのものとはほぼ一致すること、および $R_g = 10$ mm において理論限界バルジ深さは極小となることがみられ、3章に述べた実験結果と一致している。また、図中にみぞなし試験片に対する $L_{r2} = (t\sigma_\phi)_{r2} / (t_0 S T)$ の数値解と球面近似値の比較を示すが、実用上問題となる $h > 10$ mm の範囲ではその差は 4% 以下で、共に実験

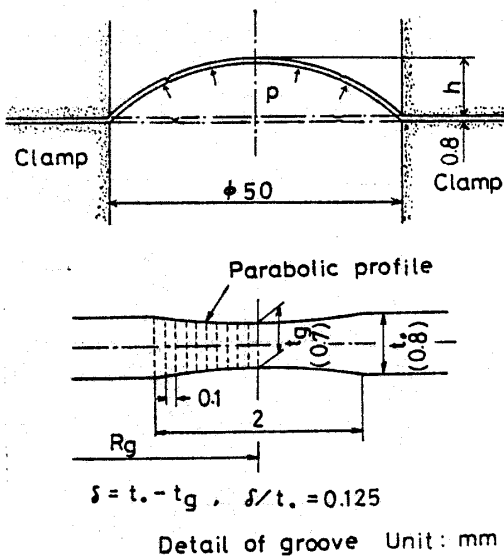


図 14 計算の対象とした工具ならびにみぞ条件

値と良い一致を示している。

図 16 は、みぞ底部における子午線方向の伸びひずみ ϵ_ϕ の h に伴う進行状況を示すものである。図には実験点も一部付記してある。図によれば、 $R_g = 10$ mm の時の ϵ_ϕ の増加速度が最も早い、拡散くびれ発生時における ϵ_ϕ は R_g によらずほぼ一定（厳密には $R_g = 5$ mm の場合 ϵ_ϕ は極めて弱い極大値を持つ）となっている。この結果、 $R_g = 10$ mm の場合に限界バルジ深さが極小を示すことになる。

図 17 は、みぞ底部 (R_g の位置) およびこれより初期位置で 1 mm 小さい周辺部位置における板厚中央面の曲率半径 ρ_ϕ および ρ_θ のバルジ深さ h による変化状況を示すものである。ここに、 ρ_ϕ および ρ_θ は子午線方向および円周方向の曲率半径である。図によれば、 σ_ϕ および ρ_θ ともに周辺部よりみぞ底部において小となり、みぞ底部はいわば局部的二次バルジ変形を生ずることが知れる。この現象をみぞ底部の ρ_θ についてみると、 R_g が小なるほど ρ_θ は小さくしたがって局部的二次バルジが顕著となることが分かる。この理由は現在のところめいりようでないが、工具対称軸方向のつりあい式 $t\sigma_\phi = p\rho_\theta/2$ より、 ρ_θ が小なるほど同一内圧(したがってほぼ同一バルジ深さ)に対する $t\sigma_\phi$ は小さく、ひいて ϵ_ϕ は抑制されることになる。

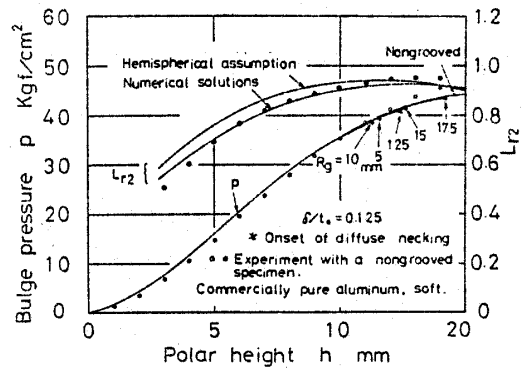


図 15 バルジ圧力 p および L_{r2} のバルジ深さ h による変化 (理論値)

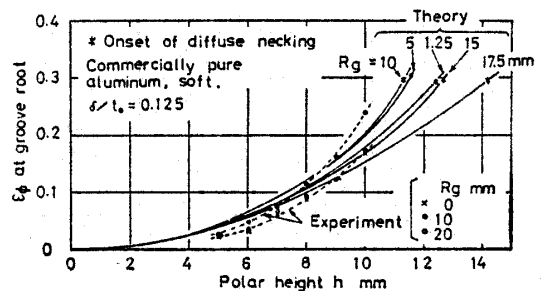


図 16 みぞ底部の ϵ_ϕ のバルジ深さ h による変化 理論値

このようにして、 R_g が小なるほど局部的二次パルジが生じやすく、 ϵ_ϕ 抑制効果が強くなる反面、元来素板はクランプ位置より中心に向かうほど拘束が弱く、 ϵ_ϕ は大きくなる傾向を持つ。結局、以上の重ね合わせとして、 $R_g=10$ mm 近辺で ϵ_ϕ の進行が最も早く、この結果最も早期に塑性不安定に至ったものと解釈される。

このように、本解析法は近似解法ながら実験結果の理解には十分役立つ。しかし、計算結果によれば、 n 値および r 値が大きくなるほど、拡散くびれ発生以前に解の拡束が困難となる傾向が見られた。よって、各種金属材料のすべてに対して L_{r2} について L_b を理論的に予知することはなお今後の検討課題として残される。

5. 結 論

みぞの形状、深さおよび半径位置を種々変更し、15 種類の金属薄板に対してみぞ付き円板の液圧パルジ試験を実施し、試験片の変形および強度特性に及ぼすみぞ条件の影響について検討を行った。その結果、円板の深絞り性および純粋張出し性評価に最適なみぞ寸法を明らかにすることができた。結果を要約すると以下のようにである。

(1) 限界パルジ深さ h_{cr} に及ぼすみぞ深さ δ の影響を調べた結果、ある程度深い δ ($\delta/t_0 \geq 0.2$, t_0 は素板板厚) を採用すると、 h_{cr} に及ぼす δ の誤差の影響が少なくなること、および δ/t_0 が 0.2 以下になると、みぞの初期半径位置 $R_g=10$ mm (ダイス穴半径の 0.4

倍) において h_{cr} は極小を示し、破断に対して最も敏感となる R_g が現れることが分かった。

(2) 限界パルジ深さに及ぼすみぞ形状の影響について検討した結果、本実験条件の範囲内では有意の形状差は認められなかった。したがって、破断部初期位置を正確に固定できる長所を持つ円弧みぞが推奨される。

(3) 純粋張出し性評価尺度として限界パルジ深さを採用し、その評価能に対するみぞ寸法の影響を検討した結果、平頭ポンチ張出しの場合に対しては $\delta/t_0=0.125$, $R_g=10$ mm, また球頭ポンチ張出しの場合に対しては $\delta/t_0=0.125$, $R_g=0$ mm が最適であることが分かった。しかし、前者のみぞ寸法を平頭および球頭ポンチを通して採用しても、実用上大きな誤差はない。

(4) 液圧パルジ試験のダイス穴位置における単位円周長さ当たりの子午線方向張力は、 $\delta/t_0=0.125$, $R_g=10$ mm のみぞ寸法の場合、純粋張出しの接触開始部位置における同一量と最も高い相関を示すことが分かった。したがって、このみぞ寸法より求めた修正相対パルジ強さ L_b は、チタンを除いた材料範囲(軟鋼, 工場用純アルミニウム, 60/40 黄銅および銅, $n=0.01 \sim 0.446$, $r=0.50 \sim 1.85$) では、深絞り性評価尺度として極めて有効であることが分かった。

(5) 上記(1)~(4)を総括すると、 $\delta/t_0=0.125$, $R_g=10$ mm の円弧みぞにより 1 回の破断試験を実施し、限界パルジ深さ h_{cr} および破断内圧 p_{cr} を測定すれば、平頭および球頭ポンチの場合を通して、円板の純粋張出し性および深絞り性を評価しうる尺度 h_{cr} および L_b を得ることが結論できる。

(6) 膜理論による近似解法を用いて、液圧パルジ試験におけるみぞ付き円板の変形挙動を解析したところ、(1) で述べた結果すなわち $\delta/t_0=0.125$ とみぞが比較的浅い場合、 $R_g=10$ mm で限界パルジ深さが極小となることが理論的にも証明された。

〔付録〕 4 章で述べた軸対称形状の液圧パルジ変形の理論解析に用いた基礎式と解法の要点を以下に記す。

〔基礎式〕 子午線方向のつりあい式：

$$d(t\sigma_\phi)/dr_\xi = (\sigma_\theta - \sigma_\phi)t/r_\xi \dots\dots\dots(6)$$

工具対称軸方向のつりあい式：

$$t\sigma_\phi = pr_\xi / (2 \sin \phi) \dots\dots\dots(7)$$

体積一定則：

$$d(r_\xi^2)/d(R^2) = t_0 \cos \phi / t \dots\dots\dots(8)$$

Hill の異方性理論⁽¹³⁾に基づく応力-ひずみ増分関係式

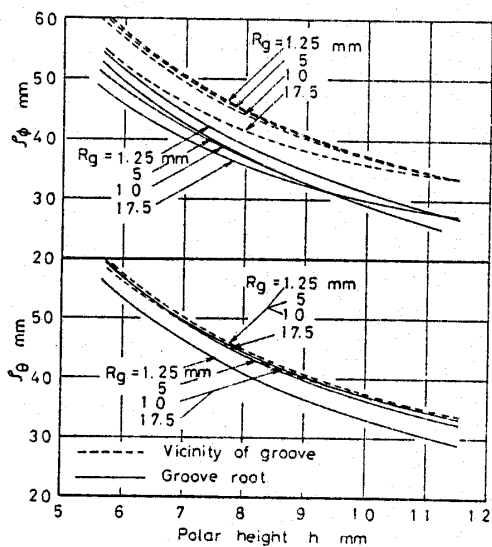


図 17 ρ_θ および ρ_ϕ のパルジ深さ h による変化 (理論値, 工業用純アルミニウム軟質材, $\delta/t_0=0.125$)

(面内等方性を仮定):

$$\frac{d\varepsilon_\phi}{(1+r)\sigma_\phi - r\sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_\theta}{(1+r)\sigma_\theta - r\sigma_\phi} = \frac{-d\varepsilon_t}{\sigma_\phi + \sigma_\theta} \quad \dots\dots\dots(9)$$

相当応力の定義式:

$$\sigma_{eq} = (\sigma_\phi^2 - \alpha\sigma_\phi\sigma_\theta + \sigma_\theta^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(10)$$

相当ひずみ増分の定義式:

$$d\varepsilon_{eq} = \beta(d\varepsilon_\phi^2 + \alpha d\varepsilon_\phi d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_\theta^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに, $\alpha = 2r/(1+r)$, $\beta = (1+r)/(1+2r)^{1/2}$

n 乗硬化則:

$$\sigma_{eq} = F \left(\int d\varepsilon_{eq} \right)^n \quad \dots\dots\dots(12)$$

境界条件: クランプ位置において $d\varepsilon_\theta = 0$

初期条件: $\varepsilon_\phi = \varepsilon_\theta = \varepsilon_t = 0$

式(6)および(8)は, みぞ外部では台形公式, またみぞ部ではミルソンの公式⁽¹⁵⁾を用いて差分式となし, これらと式(7)および(9)~(12)を連立させて解を求める. 解法の大要は Woo の手法⁽¹⁴⁾に準拠している. 各ステップにおいて, バルジ圧力 p を適宜仮定し, 頂点で板厚ひずみ増分 $d\varepsilon_{tp}$ ($= -0.01$ もしくは -0.02) を与えてクランプ位置まで解を求め, 境界条件 $d\varepsilon_\theta = 0$ (実際には $0 \leq d\varepsilon_\theta \leq 0.0025 \times |d\varepsilon_{tp}|$) とし

た)を満足しているかどうかを調べる. 不十分な時, p を修正して同様の計算を行う. 図 14 に示す幾何学的寸法を計算対象とし, 要素分割は 0.25 mm (みぞ外部) もしくは 0.1 mm (みぞ部) おきとした.

文 献

- (1) Mellor, P.B., *J. Mech. & Phys. Solids*, 5 (1956), 41.
- (2) 吉田・ほか3名, 塑性と加工, 11-114 (昭 45-7), 513.
- (3) 西村・宮川, 塑性と加工, 14-144 (昭 48-1), 3.
- (4) 宮川・西村, 塑性と加工, 8-76 (昭 42-5), 238.
- (5) 吉田・宮内, 機誌, 71-597 (昭 43-10), 1372.
- (6) 吉田・ほか2名, 理化学研究所報告, 45-5 (昭 44-9), 116.
- (7) Venter, R., ほか2名, *Int. J. Mech. Sci.*, 13 (1971), 299.
- (8) Minh, H.V., ほか2名, *Int. J. Mech. Sci.*, 16 (1974), 31.
- (9) 河合・黒崎, 機論, 43-365 (昭 52-1), 67.
- (10) 吉田・ほか8名, 理化学研究所報告, 41-5 (昭 40-9), 208.
- (11) 河合・ほか2名, 機論, 40-338 (昭 49-10), 2956.
- (12) Azrin, M. and Backofen, W.A., *Metallurgical Transactions*, 1 (1970), 2857.
- (13) Hill, R., *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, 193 (1948), 281.
- (14) Woo, D.M., *Int. J. Mech. Sci.*, 6 (1964), 303.
- (15) 一松, 数値計算, (昭 43), 181, 至文堂.
- (16) Hill, R., *J. Mech. & Phys. Solids*, 1 (1952), 19.