平面ひずみの引抜き, 押出し加工における 中心割れ発生について*

守 時

—*1

Central Bursting in Drawing and Extrusion under Plane Strain

Hitoshi MORITOKI

Central bursting is dealt with, with respect to the collapse of a unique solution. In general, there are two cases bringing about multiplicity: one is statical and the other is kinematical one. The latter corresponds to localized necking. These two multiplicities occur simultaneously in plane strain processes. There are two modes which can be realized at localized necking, but only one mode is possible in a plane strain process. The criterion for central bursting is given as $(\varepsilon_1/n)(p/k) = -1$, where p =average pressure, k =shear strength, ε_1 is the tensile strain in forming direction, and n is work hardening exponent. The influences of die geometry and manufacturing conditions on the central bursting are examined.

Key Words: Ductile Fracture, Plasticity, Plastic Instability, Plastic Forming, Extrusion

1. 緒 言

冷間加工において発生する内部割れは, 外見からはそれが発生したか否かを容易に識別することが困難であることから, 加工上非常に厄介な問題の一つである。

引抜き, あるいは押出し加工における中心割れ現象が工具形状あるいは加工条件などにどのように依存しているかについては, これまでの実験的な研究により, 定性的には比較的詳細な点まで明らかにされてきた⁽¹⁾⁽²⁾。他方解析的な研究については, Avitzur⁽³⁾⁽⁴⁾による解析を挙げることができる。そこでは, 正常な過程と割れの発生した場合のそれぞれについて動的許容速度場を想定し, これらに基づいて算出される変形エネルギーを比較し, 後者のそれが前者より低い場合に割れが発生するとの規準に基づき, 割れ発生を考察している。この規準によって, 実験結果を定性的には表しうることが示された。

しかしながら, 内部割れ現象は, たとえ同一の素材で同一の加工条件のもとであっても, 必ず発生するというものではなく, 生産現場では通常は 1 000 本に数

本というように非常に低い確率で現れることが稀でない。このことから素材内部に分散している材質的な欠陥(ボイドあるいは介存物)が, き裂発生に大きく関与していることが推測され, このような観点に基づいた研究も盛んに進められてきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これを裏付けるように, 銅素材中の酸素濃度とき裂発生限界との間の相関が実験的にも示されている⁽⁷⁾。

著者は薄板の成形限界に関して発生モードと限界について包括的な考察を試みた⁽⁸⁾。同一の境界条件のもとで解の多価性を許容できる規準として, 静的規準と運動学的規準の 2 種類がある。局所くびれ現象は後者の規準に対応し, ミーゼスの降伏条件に基づくときには, 平面ひずみ速度場でなければならないことが要請される。そして, これはひずみ速度場に不連続を許容しうる場とも一致していることが示された。薄板の成形性を論じた, この手法は三軸応力状態にある塑性変形挙動にも拡張することが可能である。そこで本報では, この種の方法により, 引抜き, 押出し加工における中心割れ現象を考察することを試みた。これらの加工は, 通常は軸対称の変形過程にあるが, 平面ひずみ変形下におけるすべり線場の解法では, 軸対称変形の解析に比べ, 応力状態を比較的単純に精度良く求めることができる利点があるので, ここではひとまず実

* 原稿受付 平成元年 11 月 20 日。

*1 正員, 秋田大学鉱山学部 (〒010 秋田市手形学園町 1-1)。

用的な軸対称変形への一つの足掛りとして、引抜きと押出し加工を平面ひずみ条件下に限定して考察した。

2. 唯一性の崩壊

Hill は降伏曲面と塑性ポテンシャル面が同一の曲面で表すことのできる変形材料に関して、解の一意性が保証される十分条件を考察し、剛塑性体において体積積分

$$\int_V \left(\frac{2}{3} h \Delta \dot{\epsilon}_{ij} \Delta \dot{\epsilon}_{ij} - \sigma_{ij} \Delta \dot{u}_{i,k} \Delta \dot{u}_{j,i} \right) dV > 0 \quad \cdots (1)$$

が一意性の判定規準であることを示した⁽⁹⁾。ここで σ_{ij} , ϵ_{ij} , u_i は応力、ひずみ、変位の成分であり、 h は塑性曲線のこう配である。 $\dot{}$ は時間微分を、 Δ は多価となっている解のうちの任意の二つの解の差を示す。この条件は、物体表面のトラクションを F として

$$\int_S \Delta F_i \Delta \dot{u}_i dS = \int_V \Delta \dot{s}_{ij} \Delta \dot{u}_{j,i} dV = 0 \quad \cdots (2)$$

が解の多価条件であることから出発している。ここで s_{ij} は公称応力である。座標軸方向を主方向に採ったとき、式(2)は

$$\Delta \dot{s}_i \Delta \dot{u}_{i,i} = \Delta \dot{s}_i \Delta \dot{\epsilon}_i = 0 \quad \cdots (3)$$

で条件付けられる。添字が一つの成分は主方向に関する成分であることを示す。公称応力は

$$\left. \begin{aligned} \dot{s}_i &= \dot{\sigma}_i - \sigma_i \dot{\epsilon}_i \\ \Delta \dot{s}_i &= \Delta \dot{\sigma}_i - \sigma_i \Delta \dot{\epsilon}_i \end{aligned} \right\} \quad \cdots (4)$$

の関係にある。本研究では式(3)を唯一解の崩壊条件とする。

添字 1 の方向を最大主変形速度の方向に採る。多価の解が存在できるようになったときに、多価性は少なくとも ϵ_1 に関しては現れるものと想定できるので、 $\Delta \dot{\epsilon}_1 \neq 0$ とする。このとき体積一定の条件から、同時に $\Delta \dot{\epsilon}_2 = 0$, $\Delta \dot{\epsilon}_3 = 0$ とすることはできないので、式(3)を満足させることのできる条件は

$$\left. \begin{aligned} \text{(i)} \quad & \Delta \dot{s}_1 = 0, \Delta \dot{s}_2 = 0, \Delta \dot{s}_3 = 0 \\ \text{(ii)} \quad & \Delta \dot{s}_1 = 0, \Delta \dot{\epsilon}_2 = 0, \Delta \dot{s}_3 = 0 \\ \text{(iii)} \quad & \Delta \dot{s}_1 = 0, \Delta \dot{s}_2 = 0, \Delta \dot{\epsilon}_3 = 0 \end{aligned} \right\} \quad \cdots (5)$$

の 3通りである。方向 1 を基準に採っているため、(ii) と (iii) の場合は方向に関してそれぞれ 2 と 3 を入れ換えた関係になっている。したがって、考察は (i) と (ii) の場合を中心に行うことにする。条件 (i) は静的な要請条件であり、大域的である。これに対して、条件 (ii) と (iii) は運動学的条件であり、局所的であるといえる。

ミーゼスの降伏条件とレビー・ミーゼスの構成式に従う素材について考察する。このとき応力とひずみ速度が

$$\dot{\epsilon}_i = a_{ij} \dot{\sigma}_j, \quad a_{ij} \equiv \frac{9}{4} \frac{\epsilon_g}{n} \frac{\sigma'_i \sigma'_j}{\sigma_g^2} \quad \cdots (6)$$

で関係づけられる。ここで、 σ'_i は偏差応力成分であり、相当応力 σ_g と相当ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_g$ は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_g &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ \dot{\epsilon}_g &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_1 \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_2^2} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (7)$$

である。 $\dot{\epsilon}_g$ については体積一定の条件を用いて $\dot{\epsilon}_3$ 成分を消去している。相当ひずみは相当ひずみ増分 $d\epsilon_g$ の積分値として定義される。素材の加工硬化特性を

$$\sigma_g = \sigma^* \epsilon_g^n \quad \cdots (8)$$

で表す。ここで σ^* , n は材料定数である。

応力比、ひずみ速度比、さらに相当応力により無次元化した平均垂直応力を

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \beta = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}, \quad \gamma = \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}, \quad \bar{\sigma} = \frac{1}{3\sigma_g} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \cdots (9)$$

と定義する。式(6)より応力比とひずみ速度比の間には

$$\gamma = \frac{2\alpha - \beta - 1}{2 - \alpha - \beta} \quad \cdots (10)$$

の関係があり、これらを用いて式(7)は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_g &= \sigma_1 \frac{2 - \alpha - \beta}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + \gamma + \gamma^2} \\ \dot{\epsilon}_g &= \dot{\epsilon}_1 \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + \gamma + \gamma^2} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (11)$$

となる。式(9), (11)を用いて、平均垂直応力は

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{c} \frac{1 + \alpha + \beta}{2 - \alpha - \beta}, \quad c \equiv \sqrt{3} \sqrt{1 + \gamma + \gamma^2} \quad \cdots (12)$$

であり、式(10)と結び付けて、さらに

$$\alpha = \frac{\gamma + c\bar{\sigma}}{1 + c\bar{\sigma}}, \quad \beta = \frac{-1 - \gamma + c\bar{\sigma}}{1 + c\bar{\sigma}} \quad \cdots (13)$$

の関係を得る。

解の多価性を考える際、多価となった任意の二つの解を取り上げ、これらを A , B の符号で区別する。物理量に付けられたこれらの添字はそれぞれの解に帰属していることを表すものとする。多価となる変形は A , B がともに塑性変形の過程にある場合と、これらの一方が剛体化する場合に分類できる。それぞれについて検討する。

2.1 多価性の静的許容条件 式(5-i)で規定される多価性を考える。

(1) 塑性過程にある場合 式(6)を式(4)に代入する。式(5-i)の条件を具体的に表すと

$$(\delta_{ij} - \sigma_i a_{ij}) \Delta \dot{\sigma}_j = 0 \quad \cdots (14)$$

となる。上式を満足する、恒等的に零でない $\Delta \dot{\sigma}_i$ が存

在するには、これらの係数行列式が零でなければならない。したがって、

$$\sigma_{iA} = 1 \quad \dots\dots\dots (15)$$

が導かれる。式(6)、(11-1)を考慮して、静的な多価性発生規準は

$$\frac{\varepsilon_{gD}}{n} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{(2-\alpha-\beta)(\sqrt{1+\gamma+\gamma^2})^3}{1+\alpha\gamma^2+\beta(1+\gamma)^2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。添字 D はこの条件による限界であることを示す。

(2) 剛体過程のある場合 過程 B が剛体化しているとする。 $\dot{\varepsilon}_{iB} = 0$ であるので

$$\dot{s}_{iA} = \dot{\sigma}_{iA} - \sigma_{iA} \dot{\sigma}_{jA}, \quad \dot{s}_{iB} = \dot{\sigma}_{iB} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。応力空間における座標軸 σ_i の基底を $\mathbf{g}_i$ とすると、式(5-i)の条件より、過程 B における応力増分は

$$\dot{\sigma}_B = \dot{\sigma}_{iB} \mathbf{g}_i = \dot{s}_{iA} \mathbf{g}_i \quad \dots\dots\dots (18)$$

である。多価性が発生した時点において、降伏曲面上の応力点における法線方向ベクトルとして

$$\mathbf{p} = \nabla \sigma_g = \frac{3}{2\sigma_g} \sigma'_i \mathbf{g}_i \quad \dots\dots\dots (19)$$

を定義すると、過程 B が剛体化していることから

$$\dot{\sigma}_B \cdot \mathbf{p} = \frac{3}{2\sigma_g} \sigma'_i \dot{s}_{iA} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

でなければならない。式(20)において、過程 B がもっとも弱い剛体化である、中立過程にあるときは、式(6-2)を考慮して

$$\begin{aligned} \sigma'_i \dot{s}_{iA} &= \sigma'_i (\delta_{ij} - \sigma_{iA} \sigma_{jA}) \dot{\sigma}_{jA} \\ &= \sigma'_i (1 - \sigma_{iA} \sigma_{iA}) \dot{\sigma}_{jA} = 0 \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

となる。一般に $\dot{\sigma}_{iA} \neq 0$ であるので、式(21)を満足するには、式(15)の関係が成り立っていなければならない。これは、塑性過程にある場合の限界である式(16)を導く。

2.2 多価性の動的許容条件 式(5-ii)で規定される多価性を取扱う。

(1) 塑性過程にある場合 式(4)、(6)を用いて、この条件は

$$\left. \begin{aligned} (\delta_{ij} - \sigma_{iA} \sigma_{jA}) \Delta \dot{\sigma}_j &= 0 \quad (i=1, 3) \\ a_{2j} \Delta \dot{\sigma}_j &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

となる。恒等的に零でない $\Delta \dot{\sigma}_i$ の存在を条件に、これらの係数行列式を零と置くと、

$$a_{22} = 0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

でなければならない。式(6)の a_{ij} の定義から、これは

$$\sigma'_2 = 0, \quad \dot{\varepsilon}_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (24)$$

を意味し、方向2に関する平面ひずみ変形であることを要請している。さらに式(24-1)から

$$a_{2i} = 0, \quad a_{i2} = 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

である。したがって、式(22)は

$$(\delta_{ij} - \sigma_{iA} \sigma_{jA}) \Delta \dot{\sigma}_j = 0 \quad (i, j=1, 3) \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。ふたたび $\Delta \dot{\sigma}_i \neq 0$ の要請から、

$$\sigma_{iA} = 1 \quad (i=1, 3) \quad \dots\dots\dots (27)$$

でなければならない。式(24)の条件のもとで、式(10)の関係から

$$\gamma = 0, \quad \alpha = \frac{1}{2}(1+\beta) \quad \dots\dots\dots (28)$$

であるので、式(5-ii)に基づく運動学的な多価性の規準である式(27)は

$$\frac{\varepsilon_{gL}}{n} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1-\beta}{1+\beta} \quad \dots\dots\dots (29)$$

となる。添字 L は運動学的許容条件による限界であることを示す。

(2) 剛体過程のある場合 過程 B は剛体化しているもので、 $\dot{\varepsilon}_{iB} = 0$ 、 $\Delta \dot{\varepsilon}_2 = 0$ の条件から、塑性過程 A においても $\dot{\varepsilon}_{2A} = 0$ でなければならない。したがって、式(24)、(25)が成り立つ。静的許容条件の場合と同様の取扱いにより、式(21)の関係が成立するが、式(24)より $i=2$ については省略される。したがって、 $i=2$ を含まない式(21)の関係から式(27)が得られ、これより式(29)が導かれる。

式(5-iii)の場合の多価性は、方向2と3を入れ換えることにより、方向3に関する平面ひずみ速度変形

$$\gamma = -1, \quad \beta = \frac{1}{2}(1+\alpha) \quad \dots\dots\dots (30)$$

が要請され、その規準は

$$\frac{\varepsilon_{gL}}{n} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \quad \dots\dots\dots (31)$$

で与えられる。

3. 局所くびれによる限界

局所くびれ面は運動学的観点から見ると、ひずみ速度場の不連続面に相当している。ある平面を境にひずみ速度の不連続な場が存在したとき、考察物体の連続性が維持されるためには、その面内に関するひずみ速度成分は不連続とはなりえない。さらに、体積一定の条件から、その面に垂直な方向の垂直ひずみ速度成分についても同様である。これらの条件から、ひずみ速度場の不連続面は $\gamma=0$ と $\gamma=-1$ の2種類の形態以外は採り得ないと結論づけることができる⁽⁸⁾。これらは、ともに平面ひずみ速度変形であることを要請している。不連続面の法線ベクトルは、このひずみ速度が零である主方向以外のほかの二つの主方向を二分する方向(互いに $\pi/4$)にある。

唯一解の崩壊に関する運動学的条件である、式(5-ii)、(5-iii)から要請される変形は、それぞれ $\gamma=0$ [式

(28)], $\gamma = -1$ [式(30)] であり, ともに平面ひずみ速度変形でなければならなかった。したがって, これらは局所くびれの形態とも整合していることを示している。

本研究では, 加工条件を板幅方向に関して平面ひずみ変形にあるとしている。いま, 座標軸 x_1, x_2, x_3 の方向を素材の長さ, 板厚, 板幅方向に採ることとする。加工される板の幅方向は, 仮定から主方向であり, 中央面では座標軸方向のすべての方向が主方向と一致している。このとき, 座標系の定義から式(30)の関係が成り立っている。これらを唯一解崩壊の静的許容条件に基づく式(16)に代入すると, 運動学的条件による式(31)と全く同じ結果が得られる。したがって, 本加工条件の場合唯一解の崩壊規準に関する2種類の条件は区別がなくなる。 $\gamma = -1$ の条件を式(13-1)に代入し, これを用いて式(31)は

$$\bar{\sigma} \frac{\epsilon_g}{n} = \frac{2}{3} \quad \text{..... (32)}$$

となる。さらに式(11)を用いて, 上式は ϵ_1 に関して

$$\bar{\sigma} \frac{\epsilon_1}{n} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{..... (33)}$$

と表される。

4. すべり線場の解析

素材中央面上の塑性域が板幅方向に関して一直線(入口側, 出口側の剛体域がこの直線上で接している)上でのみ可能であるような, すべり線場の解について考察する。中央面上の塑性域が有限な領域を占めるような変形は剛性域と変形域の境界決定が煩雑であることと, 中心割れ変形がほとんど前者の形態のもとで現れることから, 本論文では前者のみを取扱った。

解析の手法は Hill による引抜き加工の解析に従っている⁽¹⁰⁾。 k をせん断降伏応力とし, 諸量を $2k$ で割った値に $-$ を付けて表示することにする。加工条件として以下の記号を用いる。

α_D : ダイス半頂角

τ_f : ダイス面の摩擦せん断応力

p : 平均圧縮応力

t_b : 後方引張応力(引抜き加工)

c_f : 前方圧縮応力(押し出し加工)

h_i, h_o : 変形前, 変形後の板厚

そのときの減面率と板伸びひずみは

$$r = 1 - \frac{h_o}{h_i}, \quad \epsilon_1 = -\ln(1-r) \quad \text{..... (34)}$$

の関係にある。

ミーゼスの降伏条件のもとでは, $\sigma_g = \sqrt{3}k$ の関係にあるので, 式(32), (33)は

$$\bar{p} \frac{\epsilon_g}{n} = -\frac{1}{\sqrt{3}}, \quad \bar{p} \frac{\epsilon_1}{n} = -\frac{1}{2} \quad \text{..... (35)}$$

となる。

5. 中心割れ発生と加工条件との関係

設定された加工条件 α_D, τ_f のもとで, すべり線場が完成すると, 式(34)によりそのときの減面率 r が判明し, 板伸びひずみ ϵ_1 が求められる。これによる ϵ_1/n と, 算出される板中央面の平均圧力 $\bar{p}_c$ の積が式(35-2)で指定される $-1/2$ より小さくなると, 局所くびれに相当する中心割れが発生することになる。

すべり線場による結果は非硬化材料にのみ適用できるものであり, 加工硬化材料については応力状態は非硬化材料のそれとは相当に異なるであろうことが推察される。しかし, 応力比 α, β , さらにこれらで関係づけ

図 1 加工ひずみ ϵ_1^{**} と割れ発生ひずみ ϵ_1^* の比較(引抜き加工)

られる $\bar{\sigma}, \bar{\tau}$ については, 応力値それ自身よりも加工硬化特性の影響を受け難いであろうと想像される。そこで板中央の圧力 $\bar{p}_c$ については素材の加工硬化特性に関係なく, 非硬化材料において計算されたその値が適用できるものと仮定した。

引抜き加工について, 最初に考察する。減面率 r に対する, 幾何学的な板伸びひずみ ϵ^* [式(34)] と割れ発生ひずみ ϵ^* [式(35-2)] において $\bar{p} = \bar{p}_c$ としたときの ϵ_1 の関係を n で規格化して図1に示す。中心割れは, 素材が相当に大きく冷間加工された後に発生する現象であるので, 比較的小さな加工硬化指数を取り上げることにし, ここでは $n=0.1$ とした。 $\bar{\tau}_f=0, \bar{\tau}_b=0$ において a_D による変化の様子を図(a)に, $a_D=10^\circ$, $\bar{\tau}_b=0$ において $\bar{\tau}_f$ による変化の様子を図(b)に, さらに $a_D=10^\circ, \bar{\tau}_f=0$ において $\bar{\tau}_b$ による変化の様子を図(c)に示す。これらの線図には2種類の破線が描かれているが, 一方は仮定した応力場の形態が適用できる限界を, 他方は入口側でバルジが発生する限界を

示している。出口側のそれは現れていない。 ϵ^* の曲線は ϵ^* の曲線と必ず交差するとは限らないが, 場合によっては2点で交差することもある。 ϵ^* が ϵ^* より下部にある加工条件のもとでは加工による板の伸びひずみが中心割れ限界値を越えているので, この領域では中心割れ発生が予測される。したがってこれらの交点を求めることによって, 種々の加工条件における中心割れ発生限界を算出することが可能となる。これを図2に示す。図(a)では $\bar{\tau}_f=0, \bar{\tau}_b=0$ において n 値による違いを, 図(b)では $n=0.1, \bar{\tau}_b=0$ において $\bar{\tau}_f$ 値による相違を, 図(c)では $n=0.1, \bar{\tau}_f=0$ において $\bar{\tau}_b$ 値による影響を示している。 $\bar{\tau}_f, \bar{\tau}_b$ の大きいほど解の適用限界が減面率の低い値のところまで下がる傾向が図(b), (c)にみられる。この限界近傍で表示された曲線はほとんど直線に近いことから, 限界線を越えて解をいくぶん延長しても差支えないであろう。押し出し加工について類似の結果を図3に示す。ここでは

図2 引抜き加工における中心割れ発生限界

図3 押し出し加工における中心割れ発生限界

$\bar{\epsilon}_b$ が $\bar{\epsilon}_f$ に置き換えられている。図 2, 3 の図 (a) を比較すると, n 値に関して引抜き加工と押出し加工の間に, 定性的な傾向に類似性はあるが, その大きさについては, 相違が見られる。実用の加工条件のもとで考えた場合, 押出し加工では $n=0.14$ 程度までの比較的小さな加工硬化指数においてのみ中心割れの危険性が現れるのに対して, 引抜き加工では焼鈍された, 相当に延性のある素材においても割れ発生の可能性があるといえる。引抜き, 押出し加工の比較(図 2, 3)において一部異なるところは, 一つには図 (c) に見られるように, 引抜き加工における後方引張応力 $\bar{\epsilon}_b$ の中心割れに及ぼす影響が押出し加工における前方圧縮応力 $\bar{\epsilon}_f$ のそれとは逆の傾向を示すことである。これは $\bar{\epsilon}_b$ が引張応力を正符号に採っているのに対し, $\bar{\epsilon}_f$ は圧縮応力を正符号に採っていることを配慮すると現象的に諾けることである。押出し加工では, 多くの加工はピレット側面が拘束されていることが多く, そのときには, バルジが発生するとしても出口側のみである。これに対して自由押出しでは入口側にも発生し, そしてこの入口側バルジのほうが発生しやすい。図 3(a) にはこの入口側バルジ限界も表示しておいた。仮定したすべり線場の適用限界は, 押出し加工では対象とした範囲には現れていない。

上界法による Avitzur らの結果⁽⁴⁾と比較して, 図 2, 3 で示された本解析の大きな特徴は, 減面率の比較的小さな加工において中心割れを予測していないことである。加工の定性的な現象考察から, このことは合理的な結果と考えられる。

ボイドが成長するためには, 丸棒引張試験片におけるくびれ部中心の応力状態の類推から, 一般に平均圧力が静水圧引張りの状態にあることが必要とされている。限界ひずみと平均圧力の積が一定であるという関係式(35)は局所くびれの規準に基づいてはいるが, これまで提唱されている延性破壊限界の平均静水圧依存性⁽¹¹⁾を定性的にもよく表しているといえる。

Orbegozo は軸対称引抜き加工において内部割れの発生を放射線を用いて検出した結果を報告している⁽²⁾。本解析は平面ひずみ変形下の加工であるので, 変形条件は Orbegozo のそれとは異なっているが, これらの間の比較を図 4 に示した。これらの結果には非常によい相関が認められる。

5. 結 論

平面ひずみ条件下にある板の引抜き, 押出し加工における中心割れを, 唯一解崩壊の規準に基づいて推定

図 4 中心割れ発生の実験値との比較(引抜き加工)

し, 以下の結論を得た。

- (1) 中心割れ発生基準は $\bar{p}(\bar{\epsilon}_1/n) = -1/2$ で与えられる。
- (2) 減面率の小さな加工においては, 入口側あるいは出口側バルジの発生が予測されるが, これらが発生する減面率よりも少し小さな減面率においては, 中心割れは現れない。
- (3) 引抜き加工と押出し加工を比較して, 中心割れ発生の危険性は引抜き加工において高いといえる。
- (4) ダイス半角 α_0 の小さい程中心割れは発生し難い。
- (5) 引抜き加工ではダイス摩擦, 後方張力の増加に伴い, 中心割れの危険性は高まるが, これに対して押出し加工ではダイス摩擦, 前方圧縮力の増加はその危険性を低くしている。

文 献

- (1) Jennison, H. C., *Trans. AIME*, **89**(1930), 121.
- (2) Orbegozo, J. I., *Annals CIRP*, **16**(1968), 319.
- (3) Avitzur, B., *Trans. ASME, Ser. B*, **90**(1968), 79.
- (4) Avitzur, B. and Choi, C. C., *Trans. ASME, Ser. B*, **108**(1986), 317.
- (5) Oh, S. I., ほか 2 名, *Trans. ASME, Ser. B*, **101**(1979), 36.
- (6) Ayada, M., ほか 2 名 (Lange, K. 編) *Advanced Technology of Plasticity*, Lange **1**(1987), 553, Springer-Verlag.
- (7) 田中・吉田, 東海大学紀要(工学), **21**(1981), 107.
- (8) 守時, 機論, **56**-522, A(1990), 352.
- (9) Hill, R., *J. Mech. Phys. Solids*, **5**(1957), 153.
- (10) Hill, R. (鶴津・ほか 2 名訳), 塑性学, (1954), 162, 培風館.
- (11) Bridgman, P. W., *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*, (1952), 38, McGraw-Hill, London.