

(討12)

冷間据込み鍛造の成形限界

新日本製鐵 八幡 技術研究所
 " 生産技術研究所

○ 中島 浩 衛
 南部 好 機

1. まえがき

鋼材の冷間鍛造において据込み鍛造を行なう場合、加工を受ける素材の外表面が円周方向に拡がってしばしば割れを発生する。この割れ発生をもって成形限界とするとき、この成形限界を支配する変形条件の影響、及び材質的な要因についても実験的検討を加えて成形限界曲線の概念について提示を行なった。更に成形限界をシミュレートさせる試験方法を考案して破壊機構の面から考察を加えた。

2. 実験方法

据込み鍛造試験方法として円柱圧縮試験を主体に行なった。圧縮工具はサブプレスを用い、圧縮変形中の試料の端面の拘束条件を変えるため工具端面を平滑のもの、及び同心円溝を刻んだ拘束型工具の2種類を使用した。変形過程での歪を測定するため図1に示すように刻印($l_{\theta_0} = 1.0\text{mm}$, $l_{z_0} = 2.0\text{mm}$)をつけ対数歪をとった。さらに比較の意味でヘディング加工も行なった。実験に使用した試験材としては表1, 2に示すS35C, S45C材を用いた。

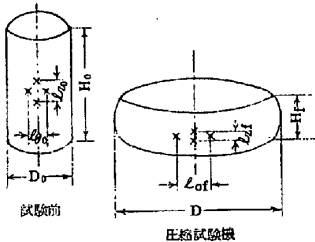


図1. 歪測定法

表1. 供試材の化学成分

鋼種	C	Si	Mn	P	S
S35C	0.36	0.22	0.71	0.012	0.005
S45C	0.43	0.29	0.65	0.021	0.004

表2. 供試材の機械的性質

鋼種	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	硬度
S35C	37.7	57.8	33.9	60.1	169
S45C	—	72.0	26.7	46.0	194

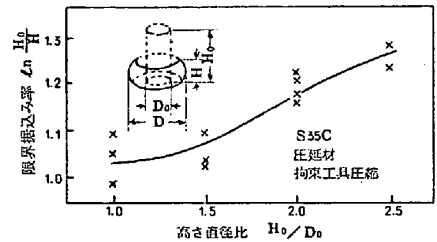


図2. 素材寸法比と成形限界

3. 据込み成形の成形限界

3.1 限界据込み率と素材寸法及び潤滑条件の影響

拘束型の圧縮試験を行なうとき、円柱試験片の H/D (高さ/直径)が大きくなるにつれて図2に示すようにバレルング部に割れの発生する限界据込み率は大きくなる。また割れの発生する円周方向の伸び歪 ϵ_{θ} と据込み率との関係を図3に示すように素材寸法比のみならず潤滑条件が変わっても据込み限界が異なっている。図3の ϵ_{θ} と λ との関係は同一成形条件であればほぼ一様な直線関係で表示されるが、寸法条件、潤滑条件が異なると変形の進行過程が異なり図3の勾配が異なっていることがわかる。

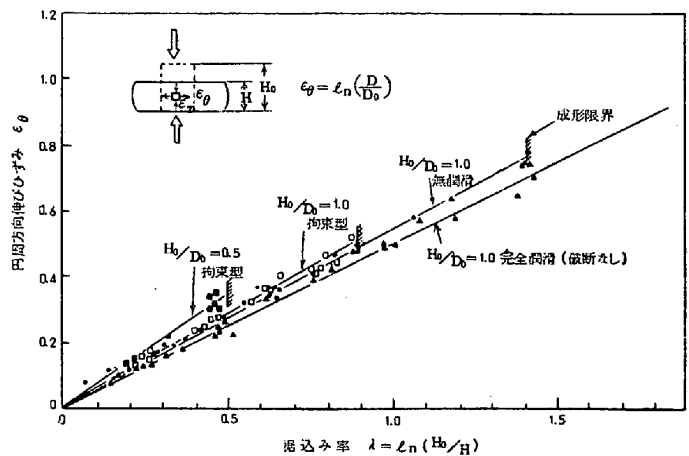


図3. 局部成形性と据込み率の関係 (S35C)

3.2 成形限界と変形経路の関係

素材寸法条件、端面拘束条件及び潤滑条件を変えたときの成形限界が異なる現象を解明するため、変形過程の歪の発達状態について測定を行なった結果図4がえられた。これよりわかるように、歪の発達状態を示す歪比 $d\epsilon_{\theta}/d\epsilon_z$ が成形条件によって異なっている。すなわち $d\epsilon_{\theta}/d\epsilon_z$ は全変形過程で一定ではなく、寸法比 H/D が大きくなるにつれて次第に小さくなる。図4にあわせて示してあるように一軸引張り変形条件、純粋剪断変形条件、及び単純圧縮変形条件を示してあるように、 H/D が大きく、かつ完全潤滑条件に近づくほど単純圧縮変形に近づくことがわかる。このように成形条件の違いによる変形経路の違いによるものと認識できる。全般的には類似し

たパターンであるが歪比 $d\epsilon_\theta/d\epsilon_z$ を異にする変形経路の違いによって割れの発生する成形限界を大巾に異にしていることがわかる。これらの成形限界歪を結ぶと一つの成形限界曲線 (Forming Limit Diagram) がえられた。

$H/D=|1.0|$ のヘッディング加工を行なって、そのときの成形限界と変形経路を図4にあわせて示したが、円柱圧縮試験結果と同様であり、同じF.L.D上にプロットされた。以上のことから変形経路によって成形限界が異なる現象は、¹⁾ 著者らの薄板のプレス成形における成形限界の概念と一致すると考えることができる。

4. F.L.Dに及ぼす熱処理条件及び引抜き加工の影響

4.1 熱処理の影響

S45C材を用いて圧延まゝ材、焼準、焼鈍、球状化処理によってそれぞれ組織を変えた。そのときの機械的性質を表3に示した。これらのF.L.Dを求めた結果を図5に示すように、均一球状化処理を行なったものが一番成形限界が大きいことを示している。球状化処理材、焼準材、圧延まゝ材、焼鈍材の順で成形限界が低下する。焼鈍材のように粗大塊粒組織のものは圧延まゝ材よりも成形性が劣ることを示している。また板状の切欠き引張り試験法によってもほぼ同じ変形経路が再現でき、そのときの値を図5にあわせて示しておいたが順位がほぼ同じである。

4.2 引抜き加工の影響

S35Cについて据込み圧縮試験前に、引抜き率9~38%の予加工(引抜き加工)を与えるとき、その機械的性質は全伸びが32%(圧延まゝ材)から15%に変化した。これらのF.L.Dは図6-1に示すようにほとんど変化していないことが認められる。しかしながら変形経路の点からみると引抜き加工率が小さいと変形が単純圧縮側に近づく傾向がみられ、図6-2のように示された。これと同様な事実は戸沢²⁾の報告にもあり、引抜き材の優先方位から説明している。定性的には塑性異方性(r値)によって説明ができる。

5. 変形機構のシミュレーション

5.1 据込み成形の応力状態

据込み成形の割れの発生する側面の応力経路及び応力状態について工藤³⁾が解析を行っている。変形過程で生ずる軸方向圧縮応力 σ_z と円周方向応力 σ_θ からなるが、この2軸応力

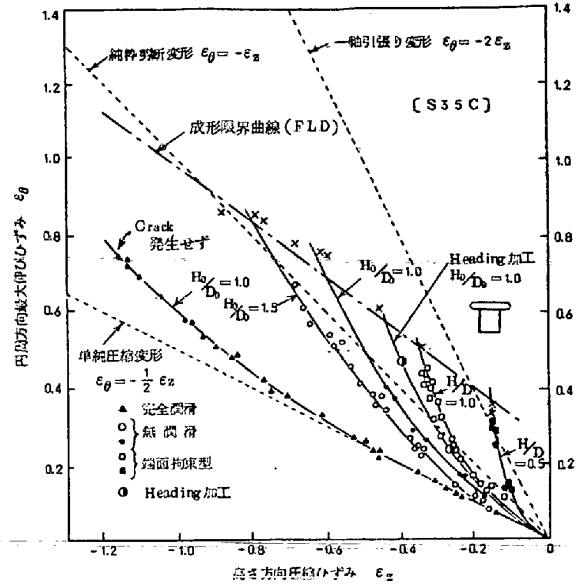


図4. 変形経路と成形限界曲線

表3. S45C材の熱処理による機械的性質

特性値	処 理 条 件				
	圧延材	球状化1	球状化2	焼鈍	焼準
引張り強さ (kg/mm ²)	72.0	64.4	57.3	63.6	69.3
全伸び(%)	26.7	31.1	34.0	28.1	28.7
絞 り(%)	46.0	65.0	60.6	42.9	49.8

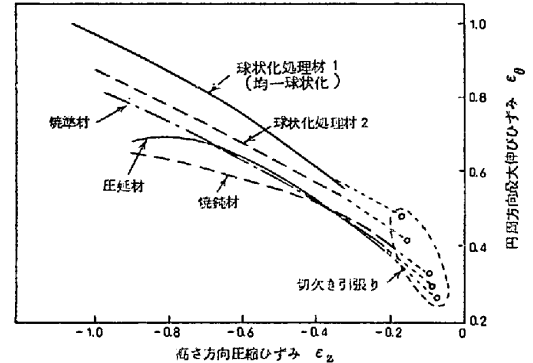


図5. S45C熱処理材の成形限界曲線

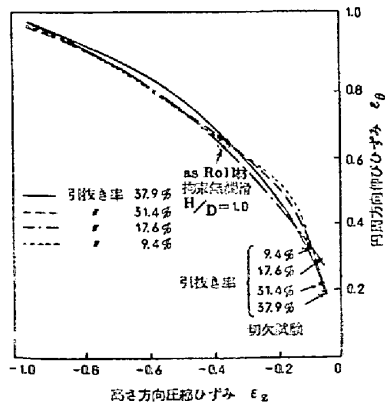


図6-1. 引抜き材の成形限界

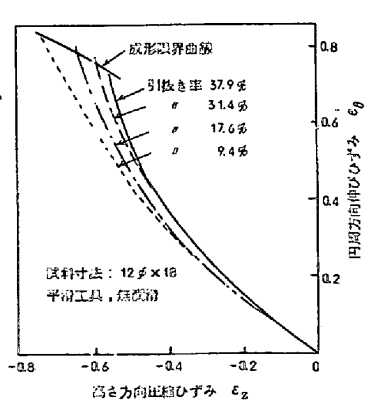


図6-2. 引抜き材の変形経路

状態について考えると図7に示すように圧縮-引張りの2軸応力状態が $\sigma_1/\sigma_2 = -1.0$ のときは純粋剪断と等価であり、 $\sigma_1 \neq \sigma_2$ のときは、剪断応力 τ と剪断面に垂直方向応力 σ_n が作用したものと等価と考えることができる。これは薄肉の中空試験片を用いたねじり試験において軸力付加によって再現できる。これらの応力間の関係式は(1)、(2)式で表わされる。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_n}{2} + \left\{ \left(\frac{\sigma_n}{2} \right)^2 + \tau^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_n}{2} - \left\{ \left(\frac{\sigma_n}{2} \right)^2 + \tau^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots (1)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \dots (2)$$

軸力 σ_n を変化させると、応力比 $\alpha = \sigma_2/\sigma_1$ は大巾に変化させることができ、各種の応力経路が再現できることになる。

5.2 軸力付加ねじり試験

5.1で述べた背景のもとに図8に示す試験片を用いて軸力付加のねじり試験を行なった。軸力は油圧にて一定の軸方向応力(引張り、圧縮)を付加でき、ねじり試験中、軸力と同時に軸方向の変形、トルク、ねじり角度の測定を行なった。材料(S35C)の降伏応力 $\sigma_y = 38 \text{ kg/mm}^2$ に対して軸力の範囲は $-0.7 \leq \sigma_n/\sigma_y \leq 1.2$ にて実験を行なった。そのときの歪速度 $\dot{\gamma} = 51 \text{ sec}$ にて行なった。

各種の応力条件で軸力付加ねじり試験を行なったときのトルク曲線を図9に示した。純粋剪断試験($\sigma_n=0$)のトルク曲線を基準に考えると、引張り応力の軸力が増大するにつれて最大トルク及び破断歪が減少し、 $\sigma_n/\sigma_y \geq 0.5$ となると不安定と思われる破断前に最大値がみられる。また逆に圧縮軸力が増大すると最大トルク及び破断歪が増大する。

5.3 シミュレーションテストによる破断限界

軸力付加ねじり試験での破断歪 ϵ_1 と軸方向歪 ϵ_L の両者から、主歪 ϵ_1, ϵ_2 が(3)式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\epsilon_L}{4} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{3}{2} \epsilon_L \right)^2 + \tau^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \epsilon_2 &= \frac{\epsilon_L}{4} - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{3}{2} \epsilon_L \right)^2 + \tau^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

この破断時の主歪 ϵ_1 と破断時の応力比 $\alpha (= \sigma_2/\sigma_1)$ の関係を図10に示した。推定される変形経路を図10にあわせて示したが、厳密には図4に示した $-1 < \alpha < 0$ ($\sigma_n/\tau > 0$)の範囲の変形経路が異なっている。

そこで図4に示したF.L.Dと同様にねじり試験結果を整理すると図11がえられた。円柱圧縮試験からえられるF.L.Dと軸力付加ねじり試験のF.L.Dを比較すると、 $-1.0 < \epsilon_2 \text{ or } \epsilon_2 < 0$

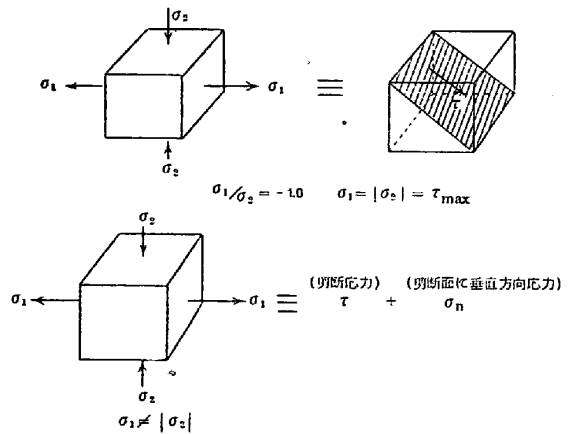


図7. 圧縮-引張り2軸応力の等価状態

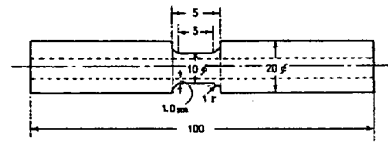


図8. 軸力付加ねじり試験用試験片

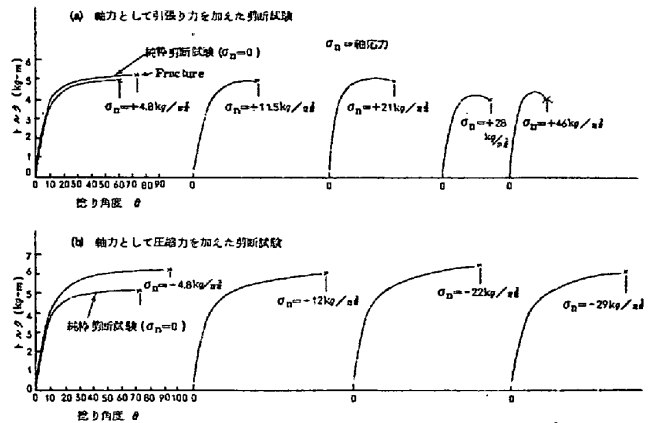


図9. 軸力付加ねじり試験のトルク曲線

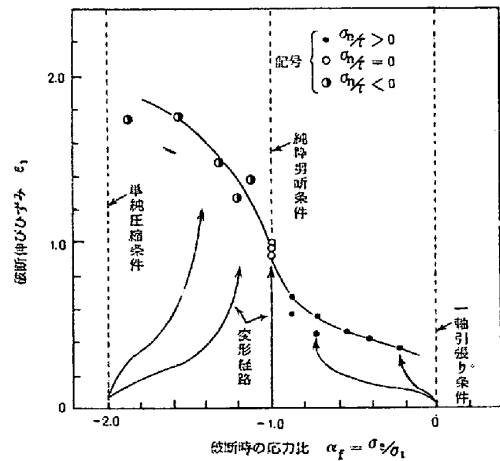


図10. 破断時の応力比と破断歪

の範囲では円柱圧縮のF.L.Dの方が高目となっているが、全般的に両者はよく類似した限界値特性を示しているといえる。

その他のシミュレーションとして図12に示すような薄板状の切欠き試験片を製作して引張り試験を行なうと図5にもあわせて示しておいたが、図11のように、変形経路は一軸引張り条件に近いが、F.L.Dとよく一致している。また丸棒の一軸引張り試験を行なうと、F.L.Dよりもはるかに高い値を示す。これは引張り試験片の形状として板状のものを作り板厚と板巾の比 (t_0/w_0) を0.05~1.0まで変化させてこれを用いて引張り試験を行なうと、破断歪は大巾に異なり t_0/w_0 が1に近づくると破断歪が大巾に大きくなることを示した。このことはネッキングによる応力状態が t_0/w_0 によって大きく変ることによるものであると考えることができることから説明できる。

5.4 2軸応力下の破壊応力に関する考察

σ_n, τ の2軸応力下における破断歪 $\bar{\epsilon}_f = F(\epsilon_L, r_f)$ と破断の相当応力 $\bar{\sigma} = F(\sigma_n, \tau_f)$ 及び破断の最大剪断応力 $\tau_{max} f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ の関係を整理すると図13がえられた。これよりわかるように $\bar{\sigma}_f$ 及び $\tau_{max} f$ と $\bar{\epsilon}_f$ の間には比例関係があり、破壊応力が大きくなる変形条件、変形経路のものほど破壊までの変形が大きくなることを示している。広い変形条件下では最大剪断応力一定の条件はなりたらず、最大剪断応力の変形条件依存性を示している。工藤は円柱圧縮実験結果について応力解析によって図13と同様の結果を示している。これらの結果を合せて考えると、圧縮変形を主体とする2軸応力下の破壊条件式として破断応力 τ_{cr} が歪履歴 r 、静水圧応力成分 $\textcircled{1}$ によって影響をうけ、 $\tau_{cr} = a + b\textcircled{1} + cr$ の形として表わされることが知られているが定性的になり立つことを裏付けている。

6. まとめ

据込み成形の成形限界が円柱圧縮試験片の寸法、端面の拘束条件によって変形経路を介して異なることを示し、各種の変形条件によってF.L.Dが求まることを示した。また材料の熱処理による組織変化によるF.L.Dの違い及び引抜き加工による影響も明らかにした。これらのF.L.Dを求めるシミュレーションテストとして軸力付加ねじり試験を行なって再現し、これらの破壊応力の歪履歴依存性を示した。

参考文献

- 1) 中島 他; 19回塑性加工連合講演会前刷集('68), 227
- 2) 戸沢 他; 19回塑性加工連合講演会前刷集('68), 37
- 3) 工藤 他; 塑性と加工8-72('67), 17

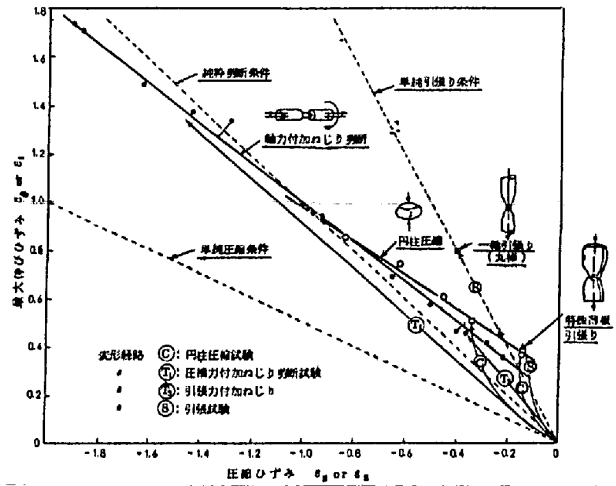


図11. 2軸応力下の変形限界 (S55C)

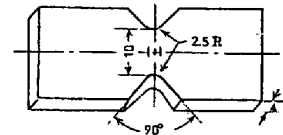


図12. 特殊切欠き引張り試験片

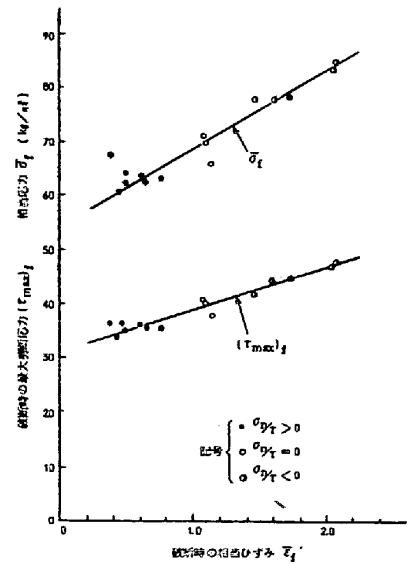


図13. 破断相当歪 $\bar{\epsilon}_f$ と破断相当応力 $\bar{\sigma}_f$ 及び最大剪断応力 ($\tau_{max} f$) の関係