セルロースアセテートによる光塑性応力解析*
(第 3 報, 速度依存性を考慮した有孔帯板の応力集中係数)但 野 茂*¹, 石 川 博 将*¹Photoplastic Stress Analysis on Cellulose Acetate
(3rd Report, Stress Concentration Factor of a Strip
with Hole Considering Rate Effect)

Shigeru TADANO and Hiromasa ISHIKAWA

In the previous papers, the authors reported a new method for photoplasticity on cellulose acetate. This method made it possible to determine experimentally the values of stress and strain considering strain rate in the model. Therefore, in this paper the photoelasto plastic stress analysis of a strip with a hole under tension was carried out. The ratios of hole diameter to the gauge width in the plane models were chosen to be 0.1, 0.3 and 0.5. The head speed of the specimen was kept constant during loading. The distribution of stress and strain, the stress concentration factor in the elasto plastic region and the development of the plastic region were obtained taking rate effect into account. As a result, the stress on the smallest cross section increased as head speed increased. However, the distribution of strain, the spread of the plastic region and the stress concentration factor were not influenced.

Key Words: Plasticity, Experimental Stress Analysis, Photoplasticity, Cellulose Acetate, Stress Concentration Factor, A Strip With A Hole, Rate Effect

1. 緒 言

高分子モデル材料の光学的性質により, 塑性域までの応力, ひずみ状態を実験的に解析する光塑性実験法の研究が古くから行われてきた。同法の研究は, 最適なモデル材料を見いだすことに帰着する。著者らは, 光塑性モデル材料として, セルロースアセテートが有効であることを, これまで示してきた^{(1)~(6)}。特に, 本論文の第 1 報⁽⁴⁾では, 単軸引張試験により, 次の光学的・力学的特性を見いだした。(1)降伏応力, ヤング率および降伏しま次数は, 対数表示のひずみ速度と雰囲気温度との線形関係で表される。(2)応力-ひずみ, 応力-しま次数, しま次数-ひずみの各関係は, 降伏点の諸量でそれぞれ無次元化すれば, ひずみ速度および雰囲気温度に無関係な Ramberg-Osgood タイプの式で定式化できる。(3)ひずみ速度はしま次数としま次数速度から推定でき, 降伏しま次数はしま次数速度により得られる。第 2 報⁽⁵⁾では, これらの各関係を, 単軸圧縮試験および二軸試験で検証した。その結果, 単軸圧縮応力場と単軸引張応力場の各関係にはほとんど差

は見られなかった。また, 二軸応力場の応力-ひずみ-光則は, 単軸応力場のそれに, 応力を主応力差で, ひずみを主ひずみ差で単純に置き換えることによって, 表されることがわかった。さらに, セルロースアセテートの初期降伏曲面は, Tresca の条件を満足することも確かめた。これらの基礎実験式を用いると, 今まで困難であったひずみ速度の影響を考慮したセルロースアセテート平面モデルの光塑性応力解析が可能となった。

本論文では, 上記のセルロースアセテートによる光塑性応力解析法の妥当性を確認するため, 引張負荷を受ける有孔帯板の応力解析を行った。この問題は, 典型的な弾塑性問題の一解析例として, 数多く報告されてきた。たとえば, 塑性理論解析⁽⁷⁾⁽⁸⁾, 有限要素法による数値解析⁽⁹⁾, 光塑性モデル実験法^{(10)~(16)}, 光弾塑性皮膜法⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾などがある。しかしながら, これらの研究は, 文献(14)を除いて, 外力に対して一義的に変形がきまる静的な平衡状態での解析である。なかでも, モデルに高分子材料を使用する光塑性モデル実験法において, 精度の良い応力解析を行うには, 高分子材料特有の粘性効果を考慮する必要がある。同法のこれまでの報告には, 本論文のように速度依存性を考慮して, 解析した例はほとんど見当たらない。本研究では, 円

* 昭和 63 年 3 月 30 日 第 65 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 62 年 9 月 9 日。

*¹ 正員, 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)。

孔の大きさを3種類変えた有孔帯板を用いて、一定引張速度下の光塑性実験を行った。そして、各変形段階でモデルに生じたしま次数分布から、ひずみ速度を考慮した応力分布、ひずみ分布および応力集中係数を求め、その結果を検討した。また、それらの結果に対する一定引張速度の影響についても議論した。なお、実験方法や解析手法がいささか煩雑ではあるが、大橋ら⁽¹⁴⁾⁽¹⁹⁾は、巧妙に時間効果を取り入れた光塑性実験を行っていることは、注目に値する。

2. 光塑性応力解析法

セルロースアセテートによるひずみ速度の影響を組み込んだ光塑性応力解析のための基礎実験式の誘導過程は、前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾で詳細に報告した。ここでは、実際の応力解析に必要な基礎関係式を再録し、速度依存性を考慮した光塑性応力解析手法を示す。なお、使用した記号の意味は以下のとおりである。

$\Delta\dot{\epsilon}$: 主ひずみ差速度 $=\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2$ h^{-1}

T : 雰囲気温度 $^{\circ}\text{C}$

N : しま次数

$\dot{N}$: しま次数速度 h^{-1}

$\Delta\sigma$: 主応力差 $=\sigma_1 - \sigma_2$ MPa

$\Delta\epsilon$: 主ひずみ差 $=\epsilon_1 - \epsilon_2$

σ_Y : 単軸降伏応力 MPa

ϵ_Y : 降伏ひずみ $(=5.7\% \text{ constant})$

N_Y : 降伏しま次数

単軸降伏応力 σ_Y と降伏しま次数 N_Y は、 $\Delta\dot{\epsilon}$ および T により、それぞれ式(1)、(2)で表示される⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$\sigma_Y = 5.70 \log \Delta\dot{\epsilon} - 0.57T + 49.6 \quad (1)$$

$$N_Y = 0.48 \log \Delta\dot{\epsilon} - 0.08T + 8.62 \quad (2)$$

降伏応力-降伏しま次数関係式は、式(1)、(2)から $\Delta\dot{\epsilon}$ を消去すれば、式(3)となる。

$$\sigma_Y = 11.88N_Y + 0.38T - 52.76 \quad (3)$$

応力-ひずみ関係式と応力-しま次数関係式は、ともに Ramberg-Osgood タイプの式で定式化でき、それぞれ式(4)、(5)で表せる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_Y} = 0.55 \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_Y} \right) + 0.45 \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_Y} \right)^{20} \quad (4)$$

$$\frac{N}{N_Y} = 0.82 \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_Y} \right) + 0.18 \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_Y} \right)^{20} \quad (5)$$

上式(4)、(5)から $(\Delta\sigma/\sigma_Y)^{20}$ を消去すると、セルロースアセテートの応力-ひずみ-光則が、式(6)で得られる。

$$\frac{N}{N_Y} = 0.40 \left(\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_Y} \right) + 0.60 \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_Y} \right) \quad (6)$$

$0 < (\Delta\epsilon/\epsilon_Y) < 1$ のときのしま次数-ひずみ関係式は、式(7)で表される⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_Y} = 0.25 \left(\frac{N}{N_Y} \right) + 0.75 \left(\frac{N}{N_Y} \right)^{2.1} \quad (7)$$

また、 $(\Delta\epsilon/\epsilon_Y) \geq 1$ におけるしま次数-ひずみ関係式は、以下のようにして求めた。まず、塑性域の応力-ひずみ関係式を、次式で簡単に近似する。

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_Y} = H \left(\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_Y} \right) + C \quad (8)$$

上式の H は、加工硬化係数を示し、 $d(\Delta\sigma/\sigma_Y)/d(\Delta\epsilon/\epsilon_Y)$ であるが、ここでは一定とする。塑性域における応力-ひずみ関係の実験結果⁽⁵⁾を最小二乗法で最適化し、式(8)の係数 H, C を決めると、それぞれ、0.038, 0.962 となった。なお、これらの係数を代入した式(8)は、式(4)の応力-ひずみ関係式と、 $(\Delta\epsilon/\epsilon_Y) \geq 1$ の領域で、良く一致していることを確認した。それゆえ、式(8)を式(6)に代入すると、加工硬化を考慮した塑性域のしま次数-ひずみ関係式(9)が得られた。

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_Y} = 2.36 \left(\frac{N}{N_Y} \right) - 1.36 \quad (9)$$

主ひずみ差速度 $\Delta\dot{\epsilon}$ は、しま次数 N としま次数速度 $\dot{N}$ から次式(10)で推定できる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$\log \Delta\dot{\epsilon} = \frac{\log \dot{N} + (a_2 T + a_3) N^2 - b^2}{b_1 - a_1 N^2} \quad (10)$$

上式で、 $a_1 = -1.65 \times 10^{-3}$, $a_2 = 2.97 \times 10^{-4}$, $a_3 = 4.95 \times 10^{-3}$, $b_1 = 1.01$, $b_2 = 2.24$ である。

第1報⁽⁴⁾で示したように、 $\dot{N}$ は塑性域で一定となる。そのため、塑性域の $\Delta\dot{\epsilon}$ は、 $\dot{N}$ の値のみで一義的に決まる。したがって、式(10)に $N = N_Y$ を代入し、式(2)を用いて $\Delta\dot{\epsilon}$ を消去すると、 N_Y と $\dot{N}$ の関係が、次式で近似的に表示された⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$N_Y = 0.48 \log \dot{N} - 0.08T + 7.79 \quad (11)$$

セルロースアセテートの初期降伏曲面は、前報(5)の結果から、Tresca の条件を満足し、式(12)で表せた。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \Delta\sigma = \sigma_Y \quad (12)$$

以上の基礎実験式を用いて、次の手順に従うと、平面問題の光塑性応力解析ができる。つまり、あらかじめ正方格子を描いてある解析モデルの試験片に、引張負荷を与える。負荷中、その格子の各交点におけるしま次数 N を単位時間ごと測定する。これにより、モデル内の N と $\dot{N}$ の分布がわかる。これらの値を用いて、応力分布、ひずみ分布を算出するわけであるが、まず、式(11)でその $\dot{N}$ に対する N_Y を計算する。そして、測定した N が計算で求めた N_Y より小さければ、その点は降伏点前となる。また、測定した N のほうが大きければ、その点は塑性域となる。この判別から、モデル

図1 有孔帯板試験片

内の弾塑性境界が容易に決定できる。次に、 $\Delta\epsilon$ の値は、いま注目している点が降伏点前の領域ならば、 N と $\dot{N}$ を式(10)に代入して得られる。また、その点が塑性域にあるならば、 $N=N_Y$ として⁽⁴⁾、 $\dot{N}$ と式(10)から求める。これで、モデル内の $\Delta\epsilon$ 分布がわかる。

モデル内の各点における主応力差 $\Delta\sigma$ と主ひずみ差 $\Delta\epsilon$ の値を算出するには、降伏点前の領域では、式(7)と式(6)を、塑性域では式(9)と式(6)を用いれば良い。式(6)、(7)、(9)中にある N_Y は、すでに式(11)で得られている。また σ_Y の値は、この N_Y を式(3)に代入するか、あるいは $\Delta\epsilon$ の値を式(1)に代入すれば、簡単に計算できる。当然のことながら、いずれの式を用いても算出した σ_Y は同一の値となる。

3. 実験条件および試験片

本研究の有孔帯板の光塑性応力解析には、厚さ4mmのセルロースアセテート板から、図1で示すモデル試験片を製作した。その形状は、全長180mm、幅 $D=50$ mmであり、中央部に直径 R の円孔を有する。また、変形中モデル内の各位置におけるしま次数変化を追跡するために、試験片中央部50mm×60mmの領域には、2.5mm間隔の正方格子を刻んだ。これは、ハイトゲージを用いて入れた、深さが約0.1mmのけがき線である。この程度のけがき深さならば、生成するしま次数に影響を与えないことを確認した。しかし、応力集中が起こり、早期に、き裂が発生する危険性のある円孔端部までは、けがき線は黒色の細線として等色線に残るため、写真から各交点のしま次数を読取るには都合が良かった。

モデル試験片の円孔径と幅の比 R/D は、0.1, 0.3, 0.5の3種類とした。ひずみ速度を考慮した光塑性応力解析の妥当性を検討するため、それぞれのモデル試験片について、引張試験機クロスヘッド一定移動速度を、0.1, 1, 10 mm/min.にして負荷を与えた。試験片に作用する一定引張速度を、 $\dot{\epsilon}_0=(\text{クロスヘッドの移動速度/有効試験片長さ})$ で表示すると、それぞれのク

図2 各 R/D のときの平均応力-平均ひずみ線図

ロスヘッド移動速度のとき、 5.7×10^{-2} , 5.7×10^{-1} , 5.7 h^{-1} となった。ここで、有効試験片長さは105mmである。負荷中、しま次数の変化のようすは、単位時間ごと写真で撮影した。撮影の間隔は、 $\dot{\epsilon}_0$ が $5.7 \times 10^{-2} \text{h}^{-1}$ のとき2min, $5.7 \times 10^{-1} \text{h}^{-1}$ で30s, 5.7h^{-1} で2sご

とした。撮影は円孔の縁にき裂が発生した試験片が破断するまで行ったので、1回の実験で20~40枚の写真を要した。なお、全実験は、25°Cの一定雰囲気温度中で行った。

4. 実験結果および考察

4.1 しま次数分布 有孔帯板の平均応力 σ_0 を(荷重/最小断面積)、平均ひずみ ϵ_0 を(クロスヘッドの移動距離/有効試験片長さ)とし、 $R/D=0.1, 0.3, 0.5$ のそれぞれの試験片を一定引張速度 $\dot{\epsilon}_0$ で引っ張った場合の、 σ_0 と ϵ_0 の関係を図2に示す。図2から明らかなように、各 R/D の場合とも、変形初期には ϵ_0 と σ_0 は直接関係にあるが、変形が進むにつれて、 σ_0 はほぼ一定となった。また、セルロースアセテート有孔帯板の引張変形は、 $\dot{\epsilon}_0$ の影響を受け、 $\dot{\epsilon}_0$ が大きいほど σ_0 も大きくなっている。このことから、光塑性応力解析を任意の引張速度で行うには、速度依存性を考慮する必要性のあることが明らかである。図2で示される計9種類の全実験について、引張変形中各瞬間の解析を行った。本報告では、煩雑さを避けるため、応力およびひずみの解析結果は最小断面に限定する。

図3は、各 R/D の試験片が変形中、最小断面上に生じたしま次数分布を示す。図3には、各引張速度 $\dot{\epsilon}_0$ における結果を合わせて表示した。なお、図3の各実験における平均ひずみ ϵ_0 の最大値は、一定となっていない。これは、変形量が大きくなると、最小断面上円孔端部近傍でネッキングが生じてしまい、しま次数が読取れなくなった。そこで、その読取り限界の変形量まで、それぞれ図示したためである。なお、後に示す図4~7の各線図においても、その変形量までの結果を図示した。図3から、各 R/D の場合とも、しま次数分布には $\dot{\epsilon}_0$ の違いによる明確な差は見られていない。つまり、変形中のしま次数分布はどのような速度で引っ張っても、 ϵ_0 に対してほぼ一様となった。またその分布は、円孔端部で急激に大きくなっている。各 R/D の図を比較すれば、各変形段階における、円孔の大きさがしま次数の分布に及ぼす影響が良くわかる。

4.2 しま次数速度分布、ひずみ速度分布 本実験法では、前述のように図3のしま次数分布だけでは、応力、ひずみの値を算出できない。しま次数速度 $\dot{N}$ の値が必要である。そこで、各 R/D における最小断面のしま次数速度分布を示したのが図4である。同図は、一例として本実験における最小の引張速度、すなわち $\dot{\epsilon}_0=5.7 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ の場合の結果である。図4から明らかなように、 $\dot{\epsilon}_0$ が非常に小さいのにもかかわらず、 $\dot{N}$ は、図3のしま次数の場合と同様に、変形初期

段階でも、円孔端部で非常に大きな値となり、さらに変形が進むにつれ、それは増加している。また、 R/D の値が小さくなるほど、 $\dot{N}$ が急激に増加する領域は、より円孔端部に近づく。ところが、 $R/D=0.1, 0.3$ の場合には $\epsilon_0=4\%$ 、 0.5 の場合には、 3% をすぎると、 $\dot{N}$ は減少した。特に、 $R/D=0.5$ のときはその傾向が著しく、 ϵ_0 が 5% 時点のしま次数速度分布では、最小断面内でほぼ一様となった。

図5には、図4のしま次数速度のときの主ひずみ差

図3 最小断面の測定しま次数分布

速度分布 $\Delta \dot{\epsilon}$ を示す。図5を見ると、 $\Delta \dot{\epsilon}$ の分布は、図4のしま次数速度分布と類似した挙動を示していることがわかる。すなわち、変形が進むにつれて、円孔近傍の $\Delta \dot{\epsilon}$ は増加するが、ある変形量になると減少しだす。円孔端部の $\Delta \dot{\epsilon}$ が最大値をとるときの ϵ_0 の値は、しま次数速度の場合と同一である。また、図5でわかるように、最小断面上に限っても、ある一定の ϵ_0 における $\Delta \dot{\epsilon}$ の最大値（円孔端部）と最小値（板縁）の差が、10倍以上にもなることがある。それゆえ、速度効果を考慮しないで、精度の良い光塑性応力解析は行え

ないことが理解できる。また、興味深いことに、 $R/D=0.1$ の場合は、円孔端部から、5 mm 以上離れた領域の $\Delta \dot{\epsilon}$ は、変形が進んでもほとんど変化していない。この現象は、 $R/D=0.3$ のときは、15 mm 以降で見られるが、 $R/D=0.5$ では見られない。

図3と図4および図5の結果から、最小断面上のしま次数が変形につれて急激に増加するにもかかわらず、しま次数速度および主ひずみ差速度はある点から減少しだすため、その点の応力が増加しないことにな

図4 最小断面のしま次数速度分布

図5 最小断面の主ひずみ差速度分布

り、図2の平均応力-平均ひずみ線図に対応した応力分布が得られることになる。なお、 $\dot{\epsilon}_0$ が 5.7×10^{-1} , 5.7 h^{-1} のときの $\dot{N}$ 分布および $\Delta \epsilon$ 分布は、図4, 5の $\dot{\epsilon}_0 = 5.7 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ の場合に比べて、それらの値が全体的にほぼ1けたおよび2けた高い値を示すだけで、定性的には図4, 5の結果と類似していた。

4.3 応力分布, ひずみ分布 最小断面上の各点で測定したしま次数としま次数速度から、算出した主応力差 $\Delta \sigma$ 分布を図6に、主ひずみ差 $\Delta \epsilon$ 分布を図7

に示す。

各 R/D における最小断面の主応力差分布に対する引張速度 $\dot{\epsilon}_0$ の影響が図6からわかる。図6には、降伏点を越えて塑性域にある点を●印で示した。これにより各引張速度下での最小断面上における塑性域の進展の様子が明らかである。●印の位置を注意深く観察すると、 $R/D=0.3, 0.5$ の場合は、変形が進むにつれて、塑性域は円孔端部からしだいに外側に広がっていくが、 $R/D=0.1$ のときではそのような進展は見られず、

図6 最小断面の主応力差分布

図7 最小断面の主ひずみ差分布

円孔端部にとどまっている。この塑性域の進展のようすには、 $\dot{\epsilon}_0$ の影響をほとんど受けていない。この現象は、セルロースアセテートの降伏応力が、式(1)で示されるように、ひずみ速度の増加につれて増加するためである。また $\Delta\sigma$ の分布は、変形初期には円孔端部では高く、円孔から離れるにつれて徐々に低下している。しかし、 $R/D=0.3, 0.5$ の場合には、変形が進み、円孔端部から塑性域が広がってくると、最小断面内の $\Delta\sigma$ 分布は一様に近づく。また、 $\dot{\epsilon}_0$ が増すにつれて、断面全域にわたって $\Delta\sigma$ は増加している。図6の主応力差分布は、図2の平均応力-平均ひずみの線図の挙動と、定性的に良く対応していることがわかる。

図7には、各 R/D の最小断面上における主ひずみ差 $\Delta\epsilon$ 分布に対する引張速度 $\dot{\epsilon}_0$ の影響を示す。 $\Delta\epsilon$ は、いずれの R/D の場合でも、円孔端面が非常に大きく、変形が進んで端面から塑性域に入っても、その傾向は変わらない。また、その分布には $\dot{\epsilon}_0$ による明確な差は認められない。この理由は、図3のしま次数分布に $\dot{\epsilon}_0$ の影響が見られないことと、しま次数-ひずみ曲線が、応力-ひずみ、応力-しま次数の各曲線に比べて、ひずみ速度の効果が非常に小さいこと⁽⁴⁾による。図7で示される程度の差ならば、主ひずみ差の分布には $\dot{\epsilon}_0$ の影響をほとんど受けないとみなせる。したがって、もしポアソン比が同一ならば、セルロースアセテートによる光塑性モデル実験で、有孔帯板のプロトタイプ金属における主ひずみ差分布が容易に推定できる。

以上のように、変形中各瞬間の主応力差、主ひずみ差の分布が、速度依存性を考慮して得られた。本実験のような平面応力状態においては、この主応力差が、最大せん断応力 $\tau_{\max}$ の2倍に等しく、主ひずみ差は、主せん断ひずみ γ_1 に相当する。式(12)からわかるように、セルロースアセテートの降伏条件は、Trescaの条件式に従うため、塑性域の進展の度合いが、主応力差の値から容易に求めることができる。このように、塑性変形を扱う場合、主応力差および主ひずみ差の値は重要な情報量となるが、モデル内の各点における応力成分や主応力成分が必要なときもある。そのためには、等傾線を測定すれば、せん断差応力積分法を用いて応力分離が行える。しかしながら、本実験において、一定速度で変形中、塑性域まで任意の方向に対する等傾線を精度良く測定することは困難だった。そのため本報告では、応力成分についての議論はしない。

4.4 応力集中係数 図8に、各 R/D のときの応力集中係数に及ぼす引張速度 $\dot{\epsilon}_0$ の影響を示す。変形中、最小断面内円孔端部で最大主応力差が生じる。ここで、有孔帯板モデルの円孔中心を原点にとり、負荷

方向を y 軸、それと垂直な方向を x 軸とすれば、最大主応力差の点では、 x 方向の応力 σ_x は零なので、主応力差の値がそのまま y 方向応力 σ_y の最大値となる。この値を $\sigma_{\max}$ とし、平均応力 σ_0 で除した ($\sigma_{\max}/\sigma_0$) で応力集中係数を表し、図8の縦軸にとった。また、図8の横軸は、最小断面の平均 $\Delta\epsilon$ を式(1)に代入し、算出された平均降伏応力 σ_{y0} で、 σ_0 を除した値 (σ_0/σ_{y0}) とした。図8をよく観察すると、各 R/D の場合とも応力集中係数は、 $\dot{\epsilon}_0$ が大きくなるに伴い、わずかではあるが高くなる傾向が見られる。しかし、この程度の差ならば、 $\dot{\epsilon}_0$ にほとんど影響はないとみなせるだろう。これは、図6と図2からもわかるように、円孔端部に

図8 各 R/D のときの応力集中係数

図9 塑性域の進展

生じる最大応力が、 $\dot{\epsilon}_0$ の増加に伴い増加しているが、そのときの σ_0 も増加するために、図8で表示したように応力集中係数を表すと、ほとんど $\dot{\epsilon}_0$ の影響が見られなくなった。図8における各 R/D の場合とも、弾塑性変形中における応力集中係数の変動は、ほぼ1本の曲線上にのっていることがわかる。Javornicky⁽¹²⁾は、セルロイドを用いた光塑性実験により、 (σ_0/σ_{r0}) が0.8以上の応力集中係数の実験結果を報告している。図8の各図に示してある×印は、Javornickyの実験結果である。本実験と彼の結果を比較すれば、各 R/D とも、 (σ_0/σ_{r0}) が1以上で本実験の結果のほうが、いくぶん高めになっている。なお、×印を図8に表示するに際し、 $\sigma_{r0} = \sigma_1$ (セカント降伏強さ $=0.68E$)⁽¹²⁾とした。図8中の一点鎖線は、円孔を持つ有限帯板の弾性域における応力集中係数を示す⁽²⁰⁾。

4.5 塑性域の進展 一例として $R/D=0.5$ のときの変形に伴う塑性域の進展の様子を図9に示す。図9には、引張速度 $\dot{\epsilon}_0$ の違いによる結果を3枚並べて示した。 ϵ_0 が2, 3, 4%の時点で、モデル内の各格子点上の主応力差が降伏応力を超えた位置を、それぞれ●, ○, ○印で表した。変形につれて、円孔端部から塑性域が周辺へと徐々に広がるようすがわかる。またこれまでの結果から予想がつくが、それには引張速度の影響はほとんど見られていない。

5. 結 論

本論文は、著者らが前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾で示した速度依存性を

考慮した光塑性応力解析法により、引張負荷を受けるセルロースアセテート有孔帯板の平面応力解析を行った。そして、以下の結論を確認した。

(1) セルロースアセテート有孔帯板の引張変形は、引張速度の影響を受け、引張速度が速いほど、最小断面の平均応力が高くなる。

(2) 最小断面上円孔端部周辺のしま次数速度および主ひずみ速度差は、変形につれて増加するが、ある変形量をすぎると減少しだす。

(3) 最少断面上の主応力差分布は、明らかに引張速度の影響を受ける。

(4) 同一変形時のしま次数分布、主ひずみ差分布は、引張速度にほとんど影響しない。

(5) 引張速度の増加につれて降伏応力および最小断面の平均応力も上昇するため、塑性域の進展度合や弾塑性域の応力集中係数には引張速度の影響は見られない。

最後に、本実験に協力していただいた本学部学生宮田靖志君(現在、サッポロビール(株)勤務)に感謝する。

文 献

- (1) 石川・但野・秦, 機論, 51-464, A (1985), 1073.
- (2) 石川・但野, 機論, 51-461, A (1985), 286.
- (3) 但野・石川, 機論, 53-487, A (1987), 609.
- (4) 但野・石川, 機論, 54-497, A (1988), 139.
- (5) 但野・石川, 機論, 54-497, A (1988), 146.
- (6) 但野・石川, 機論, 54-498, A (1988), 365.
- (7) Stowell, E. Z., *NACA Tech. Note*, No. 2073 (1950), 1.
- (8) 石川, 機論, 41-342 (1975), 401.
- (9) 例えば, Marcel, P. V. and King, I. P., *Int. J. Mech. Sci.*, 9 (1967), 143.
- (10) Frocht, M. M. and Thomson, R. A., *Proc. 3rd U. S. Nat. Congr. Appl. Mech.*, (1958), 533.
- (11) Mönch, E. and Loreck, R., *Proc. Int. Symp. Photoelast.* (1963), 169.
- (12) Javornicky, J., *J. Strain Anal.*, 3-1 (1968), 39.
- (13) Morris, D. H. and Riley, W. F., *Exp. Mech.*, 12-10 (1972), 448.
- (14) 大橋・西谷・浜本, 機論, 39-326 (1973), 2931.
- (15) Rautu, S. and Leibson, E., *Exp. Mech.*, 23-5 (1983), 99.
- (16) 島本・高橋, 機論, 49-447, A (1983), 1450.
- (17) 河田, 東大航空研集報, 1-5 (1959), 320.
- (18) Theocaris, P. S. and Marketos, E., *J. Mech. Phys. Solids*, 12 (1964), 377.
- (19) 大橋, 塑性と加工, 12-129 (1971), 790.
- (20) 西田, 応力集中, (1967), 258, 森北出版.