切欠きを有するセルロースアセテート板の破断強さに及ぼす
ひずみ速度と温度の影響*長 澤 徹^{*1}, 石 川 博 將^{*2}The Effect of Strain Rate and Temperature on the Breaking Strength of
Notched Cellulose Acetate Plates

Tohru NAGASAWA and Hiromasa ISHIKAWA

The mechanical property of cellulose acetate in the range of room temperature is affected remarkably by the strain rate and temperature. In this paper, the effect of strain rate and temperature on the breaking strength and the fracture surface of notched cellulose acetate plates are examined. As a result, the breaking strength of notched cellulose acetate plates increased with increased strain rate and decreased with increased temperature. The breaking strength is approximated by the power law incorporating the strain rate and the temperature. The equation proposed gives a good agreement with the experimental results, so the breaking strength of notched cellulose acetate plates could be predicted. The observation of the fracture surface shows the fact that the fracture surface is influenced by the strain rate but not by the temperature.

Key Words: Material Testing, Notch, Breaking Strength, Cellulose Acetate, Strain Rate Effect, Temperature Effect, Fractography

1. 結 言

化学工業の技術の進歩に伴いプラスチック材料は、その特徴がいかに金属材料にとって替わってきている。高強度および耐熱性の良いプラスチック材料の開発もなされており、一例として、ナイロン、ポリカーボネートおよびセルロースアセテートなどがある。一般にプラスチックの機械的性質はひずみ速度および温度に影響される⁽¹⁾⁽²⁾。但野ら^{(3)~(5)}は、光塑性実験によりセルロースアセテートの降伏およびしま次数に及ぼすひずみ速度と温度の影響を明らかにした。

また、プラスチック材料でも、切欠きにより降伏点または引張強さが増加し、切欠半径によって、破壊挙動は延性から脆性へ遷移することが知られている^{(6)~(8)}。百武ら^{(9)~(11)}は、ポリカーボネートを用いた一連の広範囲な切欠試験から、延性-脆性遷移限界条件などについて検討した。

本論文では、セルロースアセテートの切欠試験片の

破断強さおよび破面に及ぼすひずみ速度と温度の影響を明らかにした。セルロースアセテートはポリカーボネートに比べ、常温近傍で顕著なひずみ速度および温度依存性を示すプラスチック材料である。実験は、4種類の切欠半径 ρ を有する試験片を製作し、引張速度および温度を変えて引張試験を行った。その結果、切欠きを有するセルロースアセテート板の破断強さは、ひずみ速度の上昇とともに増加し、温度の上昇により減少する。破断強さは、ひずみ速度および温度効果を組込んだ $1/\rho$ の n 乗則で数式近似できた。また、破面観察から切欠試験片の破面は、ひずみ速度の影響を顕著に受けるが、温度にはほとんど影響されないことが明らかになった。

2. 供試材料および実験方法

供試材料は、市販のセルロースアセテート板 [900 mm×1 800 mm×4 mm ダイセル化学工業(株)] を用いた。セルロースアセテート板は購入時点で、周辺部にすでに応力が残留しているので初期応力のない中央部分から試験片を切り出した。

切欠試験片の形状は、試験片全長 220 mm、切欠底寸法 10 mm、試験片幅 20 mm の両側 U 字切欠きである。標点間距離 (チャック間距離) は 100 mm であり、

* 平成 2 年 3 月 10 日 東北支部第 25 期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年 3 月 27 日。

*¹ 正員、北海道教育大学釧路分校 (〒085 釧路市城山 1 丁目 15 番 55 号)。

*² 正員、北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)。

切欠半径 ρ は 0.15, 0.5, 1.0, 3.0 mm の 4 種類を選んだ。また、平滑試験片の形状は、10 mm $\times$ 220 mm $\times$ 4 mm の短冊状とした。両側 U 字切欠試験片の製作は、まずプラスチックドリルで穴をあけた後、穴と板縁の間をフライスにより切断した。加工による残留応力の発生の有無を偏光板により観察したところ、切欠底近傍には残留応力がほとんど生じていないことが確認された。供試材の切り出し方向による異方性は認められなかった。本実験では、切欠試験片を引張速度 $v=0.5, 5, 50, 500$ mm/min および室温近傍での温度 $T=20, 25, 30, 35^\circ\text{C}$ のもとで引張り、破断させた。使用した引張試験機は、島津オートグラフ S-2000-C (島津製作所製) である。

3. 実験結果および考察

3.1 切欠試験片の荷重-伸び曲線 一例として、図 1 と図 2 に $T=25^\circ\text{C}$, 引張速度 $v=0.5, 5, 50, 500$ mm/min における切欠半径 $\rho=3.0$ および 0.5 mm の荷重-伸び曲線を示す。図中の $\times$ 印は破断点である。図 1 において見られるように、引張速度の増加に伴い破断荷重が増加する。引張速度が遅い場合、伸びが 2 mm 近傍で降伏とみられる現象が現れ、軟化した後に加工硬化が生じ、荷重が上昇していく過程で破断する。引張速度の増加に伴い上記のような降伏と見られる現象は現れにくくなる。平滑材の引張試験も合わせて行ったが、荷重-伸び曲線は、 $\rho=3.0$ mm の場合と同じ傾向を示した。

図 1 荷重-伸び曲線 (ひずみ速度効果)

図 3 荷重-伸び曲線 (温度効果)

図 2 荷重-伸び曲線 (ひずみ速度効果)

図 4 荷重-伸び曲線 (温度効果)

図2においても図1と同様に、引張速度の上昇に伴い破断荷重の増加が見られる。例えば引張速度 $v=0.5$ と 5 mm/min の曲線では、降伏と見られる現象は現れず、最大荷重点を越えた後破断する。引張速度の増加に伴い、荷重が上昇していく過程で破断する傾向がある。このような傾向は $\rho=1.0$ および 0.15 mm の場合にも見られた。また実験から、 ρ が小さくなるに従い伸びの減少が見られ、切欠きによる拘束効果が認められた。

図3と図4に、引張速度 $v=5 \text{ mm/min}$ 、温度 $T=20, 25, 30, 35^\circ\text{C}$ における切欠半径 $\rho=3.0$ および 0.5 mm の荷重-伸び曲線を示す。両図とも、温度の上昇による破断荷重の減少が見られる。また、温度上昇によって曲線の形状に顕著な差は見られない。 $\rho=1.0$ および 0.15 mm の場合も同様であった。以上の切欠試験で、破断荷重は、引張速度の上昇とともに増加し、温度の上昇により減少することが確かめられた。

3.2 切欠きを有する試験片のひずみ速度の算出

標点間距離内での変形が一樣である短冊状の平滑試験片のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は $\dot{\epsilon} = \text{引張速度 (mm/min)} / \text{標点間距離 (mm)}$ で求められる。切欠きを有する試験片では、切欠底近傍での変形が著しくなる一方、切欠以外の場所では変形していない部分もあるため、ひずみ速度の分布が一樣ではない。本実験では、実際に変形している領域でのひずみ速度を算出するため、光塑性実験法より切欠材の有効変形領域 L を測定した。図5は $T=25^\circ\text{C}$ 、引張速度 $v=0.5 \text{ mm/min}$ において、切欠半径 $\rho=3.0 \text{ mm}$ の試験片の全伸び δ が、それぞれ $2.0, 2.25, 3.0, 3.75 \text{ mm}$ での光塑性写真である。実験により、実際に変形している領域は標点間距離（チャック間距離）の $1/3$ 程度であった。全伸び δ が約 2

図5 有効変形領域の確認

mm までは、荷重とともに変形領域が増加する弾性域である。その後最大の変形領域 ($\delta=2.25 \text{ mm}$) が得られるが、塑性変形 ($\delta=3.0 \text{ mm}$) が進行しても、有効変形領域の大きさ L に顕著な差はない⁽¹²⁾。切欠底に極度の変形 ($\delta=3.75 \text{ mm}$) が生じると、その領域は次第に小さくなる。ここでは、最大の有効変形領域を測定し、その領域内の平均のひずみ速度を求めた。有効変形領域 L は切欠半径 ρ が小さくなるに従い若干減少する傾向が見られたが、それぞれの有効変形領域の測定値は $\rho=3.0, 1.0, 0.5, 0.15 \text{ mm}$ について、 $36 \sim 29 \text{ mm}$ の範囲であり、ほぼ一定とみなすことができた。切欠底寸法や板厚により、有効変形領域の大きさは変化するものと思われるが、本論文では、一定ひずみ速度下の切欠試験片の破断強さを求めるため、有効変形領域 L を 30 mm とした。この値を標点間距離として、平滑試験片および切欠試験片の平均ひずみ速度を求めた。それぞれの引張速度における平均ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は $\dot{\epsilon} = 1, 10, 100, 1000/\text{h}$ となった。以後平均ひずみ速度を単にひずみ速度と呼ぶ。

3.3 破断強さに及ぼす切欠半径、ひずみ速度および温度の影響 図6は横軸に $1/\rho$ をとり、 $T=20^\circ\text{C}$ においてひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を変えた時の破断強さ σ_f を示す。図において、○, ●, △, □印はそれぞれ $\dot{\epsilon}=1, 10, 100, 1000/\text{h}$ の実験結果を示す。 $1/\rho$ の値が零の時の○, ●印などは、それぞれのひずみ速度における平滑材の破断強さ σ_f である。図からも明らかなように、切欠半径を変えた場合においてもひずみ速度の上昇により、破断強さが増加する。 $\rho=3.0 \text{ mm}$ ($1/\rho=0.33 \text{ mm}^{-1}$) の破断強さ σ_f は、すべてのひずみ速度において平滑材の σ_f より大きい。ところが $\dot{\epsilon}=1/\text{h}$ の場合、切欠半径 ρ の減少とともに切欠材の破断強さ σ_f は、平滑材の σ_f より低くなる。しかし、ひずみ速度の増加に伴いそれぞれの切欠材の σ_f は、平滑材の σ_f より大きくなる。他の温度においても同様の傾向が認められた。

図7に $\dot{\epsilon}=1/\text{h}$ 、温度 $T=20, 25, 30, 35^\circ\text{C}$ における破断強さ σ_f を示す。図からもわかるように、温度の上昇による破断強さ σ_f の減少が明らかである。また、切欠半径 $\rho=3.0 \text{ mm}$ の破断強さ σ_f を起点としたとき、 ρ の減少とともに温度の上昇による σ_f の低下の割合が増加する。図6および図7からわかるように、切欠半径 ρ を有する試験片の破断強さは、ひずみ速度および温度の影響を顕著に受ける。

図6、図7において、それぞれの切欠試験片の破断強さ σ_f を、次式のように $1/\rho$ の n 乗則の実験式で近似する。

$$\sigma_f = A(1/\rho)^B \dots\dots\dots (1)$$

一例として $T=20^{\circ}\text{C}$, 35°C における破断強さ σ_f と $1/\rho$ の関係を両対数で表すと図 8, 図 9 になる。図内の $\circ$, $\bullet$, Δ , $\square$ 印はそれぞれ $\dot{\epsilon}=1, 10, 100, 1000/\text{h}$ における実験結果である。各直線は最小二乗法によって最適化した近似直線である。切欠半径 ρ が小さくなるに従い、低ひずみ速度ほど温度上昇による σ_f の低下が著しい。また、ひずみ速度の上昇に伴い σ_f の低下が緩慢になる。

式(1)の係数 A は、図 8, 図 9 で $1/\rho=1$ での破断強さ σ_f の値であり、図 10 にそれぞれのひずみ速度と温度に対して $\circ$, $\bullet$, Δ , $\square$ 印で示す。図より係数 A を、ひずみ速度の対数と温度の関数とし次式で表示できる。

$$A = 8.64 \log \dot{\epsilon} - 1.11T + 57.9 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)の係数 B は、図 8, 図 9 での各直線の傾きを示し、図 11 にそれぞれのひずみ速度と温度に対して $\circ$,

$\bullet$, Δ , $\square$ 印で示す。図 11 より係数 B を、ひずみ速度の対数で近似でき次式のように表示される。

$$B = C \log \dot{\epsilon} + D \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)の係数 C および係数 D は温度の関数になる。それぞれ最適化を行い、各温度における係数 C および係数 D の関係を図 12 に示す。図において $\bullet$ 印は係数 C を表し、 $\square$ 印は係数 D を示す。図より、係数 C および係数 D は、

$$C = 7.25 \times 10^{-3} T - 1.11 \times 10^{-1}$$

$$D = -2.18 \times 10^{-2} T + 2.87 \times 10^{-1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

以上により、破断強さ σ_f は $1/\rho$ の n 乗則で関数近似ができた。とくに係数 A および係数 B にひずみ速度と温度の効果が組込まれている。式(1)で近似した破断強さ σ_f の計算値を図 6 および図 7 に実線で示す。図から明らかなように、近似曲線と各実験結果は良く一致しており、破断強さ σ_f に及ぼすひずみ速度効果および温度効果の傾向がよく表されている。以上の手法により、ひずみ速度と温度を考慮した両側切欠きを有するセルロースアセテート板の破断強さの予測が可能となった。

3.4 破面に及ぼすひずみ速度と温度の影響 破

図 6 破断強さに及ぼすひずみ速度効果

図 7 破断強さに及ぼす温度効果

図 8 破断強さと $1/\rho$ の関係

図 9 破断強さと $1/\rho$ の関係

面観察は、破断に至るまでの過程を知る上で有効な手段である⁽¹³⁾。上田ら⁽¹⁴⁾は、エポキシ樹脂に現れる破面形態と力学特性に及ぼすひずみ速度などの影響を詳細に調べた。本論文においても破断面のマクロ観察を行い、切欠きを有するセルロースアセテート板の破面に及ぼすひずみ速度および温度の影響を明らかにした。

一例として、図13に $T=20^{\circ}\text{C}$ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1$,

図10 係数Aとひずみ速度の関係

図11 係数Bとひずみ速度の関係

図12 係数Cおよび係数Dと温度の関係

10, 100, 1 000/h における切欠半径 $\rho=3.0$ および 0.15 mm の破面を示す。それぞれのひずみ速度で引張った時に生じる相対する一組の破面を隣接して示す。左から右に行くに従いひずみ速度は増加する。

それぞれの破面を観察すると、切欠底からき裂が発生し、き裂発生点にミラー部が形成された破面である。例えば、 $\rho=3.0$ mm の破面は、ひずみ速度のいかんにかかわらず、微小なミラー部を形成するシェブロン形の破面である。なお平滑材の破面も $\rho=3.0$ mm の破面と同様であった。一方、 $\rho=0.15$ mm の破面は、ひずみ速度が小さい (例えば $\dot{\epsilon}=1, 10/\text{h}$) 場合、切欠底全断面にミラー部が見られる平滑な壁開形の破面である。しかし、ひずみ速度の増加により、ミラー部分が小さくなり他の部分はシェブロン形の破面に変化する。

さらに、破面と図1～図4の荷重-伸び曲線に対応し比較すると、負荷過程で破断した破面はすべて微小なミラー部を形成するシェブロン形の破面であり、一方、最大荷重の後に破断した破面は、ミラー部の大きい平滑な壁開形の破面である。一般に言われているように⁽¹⁵⁾、ミラー部の大きさはひずみ速度の増加によって減少することが認められた。以上から、切欠半径およびひずみ速度による荷重-伸び曲線の変化は、上述の破面形態とよく対応すると言える。他の温度 $T=25, 30$ および 35°C の破面でも、同様の傾向が見られた。

$\dot{\epsilon} = 1 \quad 10 \quad 100 \quad 1000 / \text{h}$
 $\rho = 3.0 \text{ (mm)}$

$\dot{\epsilon} = 1 \quad 10 \quad 100 \quad 1000 / \text{h}$
 $\rho = 0.15 \text{ (mm)}$

図13 各ひずみ速度における破面状態

したがって、破面に及ぼす温度の影響はないと判断される。破面の変化に影響を及ぼす要因は、温度よりむしろひずみ速度である。

4. 結 論

本論文では、両側U字切欠きを有するセルロースアセテート板の破断強さと破面に及ぼすひずみ速度と温度の影響を明らかにした。

板厚 4 mm のセルロースアセテート板を用いて、切欠半径 $\rho=0.15, 0.5, 1.0, 3.0$ mm の試験片を製作し、引張速度 $v=0.5, 5, 50, 500$ mm/min および温度 $T=20, 25, 30, 35^{\circ}\text{C}$ の条件のもとで、引張試験を行った。さらに破面観察を行った。実験結果を要約すると、

(1) 切欠きを有するセルロースアセテート板の破断強さはひずみ速度および雰囲気温度の影響を顕著に受ける。すなわち、破断強さは、ひずみ速度の上昇とともに増加し、温度の上昇により減少する。

(2) 切欠きを有する板の破断強さは、ひずみ速度および温度効果を組込んだ $1/\rho$ の n 乗則で数式近似できた。これにより、ひずみ速度と温度を考慮した切欠きを有するセルロースアセテート板の破断強さの予測が可能となった。

(3) 観察された破面は、切欠底からき裂が発生し、き裂発生点にミラー部が形成された破面である。平滑材および $\rho=3.0$ mm の破面は、ひずみ速度の影響をほとんど受けない微小なミラー部を形成するシェプロ

ン形の破面である。 $\rho=1.0$ mm 以下の破面は、ミラー部が大きい平滑な壁開形の破面である。この破面は、ひずみ速度の増加によりミラー部が小さくなり、他の部分はシェブロン形の破面に変化する。上記の二つの破面は温度に影響されないことが明らかになった。

なお本研究において、終始、適切なるご助言をいただいた北海道大学工学部、野口 徹教授ならびに但野茂講師に感謝の意を表する。

文 献

- (1) Bauwens-Crowet, C., ほか 2 名, *J. Polym. Sci.*, A-2, 7 (1969), 735.
- (2) Parvin, M. and Williams, J. G., *Int. J. Fract.*, 11-6 (1975), 963.
- (3) 石川・但野・奏, 機論, 51-464, A (1985), 1073.
- (4) 但野・石川, 機論, 54-497, A (1988), 139-153.
- (5) 但野・石川, 機論, 54-503, A (1988), 1410.
- (6) 成沢・ほか 3 名, 材料, 28-311 (1979), 77.
- (7) Takano, M. and Nielsen, L. E., *J. Appl. Polym. Sci.*, 20-8 (1976), 2193.
- (8) Prabhakaran, R., ほか 2 名, *J. Appl. Polym. Sci.*, 22-10 (1978), 3011.
- (9) 西谷・百武, 機論, 49-445, A (1983), 1071.
- (10) 百武・西谷, 機論, 50-453, A (1984), 888.
- (11) 百武・西谷, 機論, 52-479, A (1986), 1683.
- (12) 高橋・島本, 機論, 44-382 (1978), 1901.
- (13) 北川・小寺沢, フラクトグラフィ (破壊力学と材料強度講座-15), (1977), 1-38, 倍風館.
- (14) 上田・ほか 2 名, 機論, 44-378 (1978), 433-451.
- (15) 成沢, 高分子材料強度学, (1982), 205, オーム社.