ポリカーボネートのみぞ付板の引張試験*

百 武

秀**

The Tension Test of Grooved Plates of Polycarbonate

by

Hiizu HYAKUTAKE

(Faculty of Engineering, Fukuoka University, Fukuoka)

The method of straining grooved tensile specimens suggested by Hill has been applied to the finding of the criterion for necking of polycarbonate. The specimen is in the form of a strip grooved obliquely on its surface. If such a strip is pulled in tension, deformation will be confined to the grooved regions. The state of stress produced in the zone of deformation is biaxial, owing to the constraint of the surrounding material. It is by the measurement of the maximum load, for a range of groove angles, that the deduction of the criterion for necking of polycarbonate under any state of combined stress is possible.

The results are as follows: The due stress at the maximum load increases appreciably, as the state of stress in the grooved region changes from that of thin-walled tube subjected to internal pressure to that of uniaxial tension of solid bar. In order to examine the anisotropy of polycarbonate plate, the small specimens cut at five different angles with respect to the longitudinal direction were each tested in simple tension. The strip specimens were found approximately isotropic.

In consequence of these investigations, it is concluded that necking of polycarbonate is due to mechanical instability, in so far as the stress of the specimen is in a state of tension between the biaxial and the uniaxial.

(Received Aug. 12, 1968)

1 緒 言

ポリカーボネートを常温の下に普通で引張ると、Fig. 1 に示すように荷重-伸び線図はなめらかな曲線で最大荷重点をこえ、そこで試験片の一部に顕著なくびれが起り、荷重は急速に減少し、その後は一定荷重の下で cold-drawing の過程が続行する。このような挙動はすでによく知られているところであり、ポリカーボネート以外にもいわゆるかたくて粘り強い高分子材料によくみられるものである。

くびれの発生から cold-drawing までの荷重-伸び線図の形は、軟鋼の引張試験における荷重-伸び線図で上降伏点から下降伏点までの形に似ている。しかし、ポリカーボネートでは、最大荷重点で軟鋼の場合におけるような降伏現象（材料内部における変化）は起こっていない。ポリカーボネートにおける荷重最大の点は、mechanical instability に起因するもので、軟鋼の引張りでいえば最大荷重点すなわち引張強度の点に²⁾相当する。この考えはすでに Vincent や Andrews らによって述べられている。ポリカーボネートについて

各種の静試験（引張り、ねじり、内圧）を行ないこの考えが妥当であることは前に報告したとおりである。⁴⁾たとえば、Fig. 1 にみられるようにくびれが進行し、荷重は下がっても真応力は連続的に増加する。試験片⁴⁾に生ずる顕著な変化、たとえば、deformation bands の発生は荷重の山を越えた後で起こる。このように荷重の山を境にして材料の内部に著しい変化が起こる兆

Fig. 1 Stress-deformation curve for polycarbonate, in which the deformation is increment of distance between grips.

* 原稿受理 昭和43年8月12日

** 正会員 福岡大学工学部 福岡市七隈

Fig. 2. Equivalent stress-strain curve for polycarbonate.

Fig. 3. A graph of true stress against strain for polycarbonate, with Considère's construction applied to show the point of instability and neck formation

候は認められなかった。

薄肉円筒のねじりと内圧試験の結果を相当応力、相当ひずみで表わせば Fig. 2 に示すように、両者はほぼ1本の曲線で表わすことができ、それは引張試験の応力-ひずみ曲線とよく一致する。この曲線に沿って内圧、引張り、ねじりの順にそれぞれの荷重の最大点がある。内圧を受ける薄肉円筒で instability の条件が満たされて neck が生ずるときの相当ひずみは、一軸引張りの場合よりも小さいことは Hill⁵⁾ の計算に示されている。なお、Fig. 2 にみるように、薄肉円筒のねじりと内圧試験における相当応力-相当ひずみの関係はよく合っているから、ポリカーボネートでは応力-ひずみの関係に静水圧の影響はないとみてよいだろう。

以上述べたことをまとめて Fig. 3 に示す。この図はポリカーボネートにおける Considère の作図である。ひずみが小さい間は応力はひずみに比例して増加し、 $\sigma = 4 \sim 5 \text{ kg/mm}^2$ の A 点で応力-ひずみ線図は直線から離れて曲がり始める。そして C 点（ひずみ約

6.9%）で $\varepsilon = -1$ からの直線 TC に接し、そこで mechanical instability の条件が満たされて neck ができる。薄肉円筒の内圧試験ではそれより低い B 点（ひずみ約 4.6%）で necking が起こる。

このようにポリカーボネートでは一軸引張りのみならず組合せ応力の下でも、necking の発生は mechanical instability の条件が満たされて起こると考えれば、necking 発生時の相当応力は二軸引張りから一軸引張りへ移るにつれてその値は増加するだろう。このことは応力状態に応じて necking の発生点が Fig. 3 の曲線に沿って A から C へ移っていくことを意味する。

組合せ応力を簡単に作る方法として Hill⁶⁾ の提案したみぞ付板の引張りを応用する。この方法によれば一軸引張りから内圧を受ける薄肉円筒までの任意の biaxial の応力状態を作ることができる。なお、この方法を金属材料に適用した例はいくつかある。

2 みぞ付板の引張り

詳細な理論は Hill⁶⁾ に従い、その原理を Fig. 4 に示す。幅の広い板の両側に、深いみぞを引張軸に対して斜めに θ 傾けて付ける。この板を荷重 L で引張ればみぞの左右の部分はみぞから ψ 傾いた V の方向に剛体的に移動し、変形はみぞ底の部分に限定され、そこに biaxial な応力状態ができる。みぞ底の応力状態は $\theta = 54^\circ 44'$ のとき一軸引張り、 $\theta = 90^\circ$ のとき内圧を受ける薄肉円筒に相当する。したがって、 θ を $54^\circ 44'$ から 90° まで適当に変えれば、引張りから内圧試験までの任意の応力状態を作ることができる。

最大引張荷重 L 、およびそのときの角度 ψ を測定すれば necking 発生時の応力状態が計算できる。みぞ底の主応力 σ_1 、 σ_2 は次の式を満足する。

$$\frac{\sigma_1}{\sin(\theta - \psi) + \cos \theta} = \frac{\sigma_2}{\sin(\theta - \psi) - \cos \theta} = \frac{L}{hl \cos \psi} \quad (1)$$

ここで h 、 l はそれぞれみぞ底の厚さおよびみぞの長さであり、厚さ方向の応力 $\sigma_3 = 0$ とする。

π 平面上の偏差応力ベクトルの大きさ（ $= \sqrt{2/3} \times$ 相当応力）は

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{L}{hl \cos \psi} \left[\sin^2(\theta - \psi) + 3 \cos^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Fig. 4. Pulling of grooved plate, the sides of the groove move apart inclined at an angle ψ to the groove.

偏差応力ベクトルと内圧を受ける薄肉円管における応力ベクトルとのなす角は

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{3 \cos \theta - \sin(\theta - \phi)}{\cos \theta + \sin(\theta - \phi)} \right] \quad (3)$$

である。

3 試 験 片

市販のポリカーボネート、厚さ 5 mm (幅 1 m, 長さ 2 m) の板から試験片を切り出し、みぞはセーパで付ける。みぞの部分はペーパー研磨、次いで入念にバフ仕上げする。シリコン油中 140°C に 5 時間保ち、徐冷 0.1°C/min の前処理を行なった。この処理で残留応力の大部分は除去されるようである。

試験片の形状と寸法を Fig. 5 に示す。引張時にみぞ底の変形に伴って生ずる曲げモーメントを打ち消すようみぞは 2 本付ける。この 2 本のみぞで、みぞ底の厚さおよびみぞと引張軸とのなす角度の差はそれぞれ 0.05 mm, 1/4° 以下である。

角度 ϕ の測定には Hundy たちの方法を用いた。それは $\tan \theta = 4 \tan \phi$ を満足する ϕ を中心に、多数の直線を 1° 間隔にみぞをはさんで扇形に野書く。ダイヤモンド針を用い、できるだけ細い線を引いた。野書き線を付けた試験片 (試験前) の写真を Fig. 6 に示す。みぞ底に neck が生じた後では、みぞをはさむ直線はその方向が V の方向でない限り、もはや一直線でなくなる。試験後みぞをはさむ各直線の相対的なずれを測定して角度 ϕ を知ることができる。

Fig. 5. Dimensions of specimen (mm).

Fig. 6. A fan of straight lines on the specimens' surface to measure the angle ϕ (Before testing).

実験は空気調和した室内 (23±1°C, 50±3% R. H.) で行なった。引張試験機は Instron 型で、つかみの移動速度はすべて 0.5 mm/min とした。

4 実 験 結 果

材料の異方性の有無を確かめるため、板の長手方向に対し、0°, 15°, 30°, 45°, および 90° の五つの方向に試験片を切り出し、前処理 (140°C, 5 時間保持, 0.1°C/min 徐冷) して引張った。各試験片の荷重-伸びの関係、および最大荷重時における応力は、切出しの方向にほとんど関係なくほぼ一定であった (Fig. 7)。したがって、この材料には強度の異方性はないといつてよいだろう。

みぞ付板の引張試験は 14 個の試験片について $\theta = 55^\circ$ から 90° の間で行なった。引張荷重が最大値に達すればただちに除荷する。このときみぞ底にはみぞに沿って一様な neck が生じている。 ϕ を求めるためのみぞをはさむ各直線のずれは 0.1 mm まで測定したので、 ϕ の精度は ±0.5° 以下である。実験の結果をまとめて Fig. 8 に示す。この図は最大荷重時のみぞ底の主応力成分から求めた偏差応力ベクトル (第 (2) 式) を π 平面上に作図したもので、応力ベクトルの方向は第

Fig. 7. The maximum stress in tension test. Specimens were cut at five different angles with respect to the longitudinal direction of plate.

Fig. 8. The deviatoric stress vector on the π plane.

(3)式で与えられる。この平面上で Mises の降伏条件は円となる。この図で横軸は $\theta=90^\circ$ の場合、すなわち薄肉円管の内圧試験に、斜めの線は $\theta=54^\circ 44'$ すなわち一軸引張りの場合に相当する。図中◎印はそれぞれ薄肉円管の内圧試験、および平板の引張りにおける最大荷重時の値であり、これらはいずれもおおのの応力状態に相当するみぞ付板の引張の結果にほぼ等しい。図にみるように、応力状態が内圧を受ける薄肉円管の場合から一軸引張りに移るにつれて、最大荷重点すなわち necking 発生点の偏差応力ベクトルは大きくなる。このことは Fig. 3 で necking の発生点が B から C へ移ることに相当する。

5 結 言

いろいろの組合せ応力状態におけるポリカーボネートの necking 発生条件を調べるために、Hill の提案したみぞ付板の引張試験を行なった。この方法は幅の広い板の両側に深いみぞを付けて引張るもので、変形はみぞ底に限定される。みぞの方向と引張軸のなす角に応じて、みぞ底に一軸引張りから内圧を受ける薄肉円管までの任意な biaxial の応力状態を作ることができる。

引張荷重が最大時における、したがって neck 発生時の相当応力は応力状態が内圧の場合から一軸引張りに移るにつれて明らかに増加する。以上のことからポリカーボネートに necking が起こる条件は、試験片の応力状態が二軸引張りから一軸引張りの間では mechanical instability であると考えてよいだろう。

なお、この実験で使用したポリカーボネート板には強度の異方性はほとんどなかった。

この研究にあたり懇切なご指導を賜わった九州大学応用力学研究所樋口教授に深く感謝致します。

(昭和43年5月22日 日本材料学会第17期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば Hechelhammer, W, und G. Peilstocker, Kunststoffe, **49**, 3 (1959), Robertson, R E., General Electric Report, No. 64-RL-3794 C (1964), 樋口正一, 百武 秀, 日本材料学会第4回研究発表会講演予稿集, p 17 (1967).
- 2) Vincent, P.I., Polymer, **1**, 7 (1960).
- 3) Andrews, R D, A S. Argon, J A Godrick, and W. Whitney, Bull. Am. Phys Ser II, **12**, 322 (1967).
- 4) 樋口正一, 百武 秀, 日本機械学会九州支部講演論文集, No. 68-2, 53 (1968).
- 5) Hill, R., J. Mech. Phys Solids, **1**, 19 (1952).
- 6) Hill, R, J Mech Phys Solids, **1**, 271 (1953).
- 7) たとえば Hundy, B B, and A. P. Green, J. Mech. Phys Solids, **3**, 16 (1954), Lianis, G., and H Ford, J Mech. Phys. Solids, **5**, 215 (1957), Ellington, J P, J. Mech. Phys Solids, **6**, 276 (1958)
- 8) Hill, R, "Mathematical Theory of Plasticity", 17 (1950) Clarendon Press, Oxford.
- 9) 百武 秀, 九州大学応用力学研究所所報, No. 27, 31 (1967), Hyakutake, H., Proc. 11th Japan Congr. Materials Research, p. 164 (1968).