ポリカーボネイトの計装化シャルピー衝撃特性に関する研究*

(衝撃速度と温度の影響)

木田 外明^{*1}, 鈴木 恵^{*1}
伊藤 和英^{*2}, 正木 康嗣^{*3}

Study on Instrumented Charpy Impact Characteristics of Polycarbonate (Effects of Impact Velocity and Temperature)

Sotoaki KIDA, Megumu SUZUKI,
Kazuhide ITOH and Yasushi MASAKI

The instrumented Charpy impact characteristics of polycarbonate are investigated in terms of the effects of impact velocity and temperature. The results obtained are as follows: (1) The inertia load appearing in the load wave initiated by striking the test specimen against the hammer of the impact tester is corrected by a mean square approximation method. The maximum load and the absorbed energy can be determined by this method. (2) The maximum load and the specific absorbed energy per real cross-sectional area decrease with increase in the impact velocity. There is constant temperature taking the lowest load in the relationship between the maximum load or the specific absorbed energy per real cross-sectional area and temperature. The lowest load or energy is shifted to the higher temperature by the higher impact velocity. (3) The relationship between the dynamic fracture toughness, K_{Ic} and $\dot{K}_I$, or between K_{Ic} and temperature is similar to the relationship between the maximum load per real cross-sectional area and the impact velocity, or between the maximum load and the temperature, respectively. (4) The patterns of fractured surface correspond to the instrumented Charpy impact characteristics when the conditions of impact velocity and the temperature are changed.

Key Words: Instrumented Charpy Impact Test, Polycarbonate, Impact Velocity, Temperature, Specific, Absorbed Energy, Dynamic Stress Intensity Factor, Fractograph

1. 緒 言

エンジニアリングプラスチックの中でポリカーボネート (polycarbonate, 以下 PC と略す) は, 耐衝撃性に優れた性質をもっているが, その機械的性質は速度依存性や温度依存性があり, 特に切欠きに敏感といわれている。従来, 衝撃特性は衝撃曲げ試験の代表的なアイゾットやシャルピー衝撃試験機を用いることにより, 材料を破壊するのに必要なエネルギーにより評価されてきたが, この評価は材料を比較するには有効であるが, 材料設計や機械設計に使用するには難しいと言われている。

前報⁽¹⁾では, 荷重-変位関係を測定できる計装化シャルピー衝撃試験機を用い, 試験片の切欠き長さや温度が計装化シャルピー衝撃特性に与える影響について報告したが, 衝撃強度を考える場合, 温度と衝撃速度とは関連するので, 本報では衝撃速度と温度が計装化シャルピー衝撃特性に与える影響について研究する。特に, 衝撃速度が高くなると試験片の慣性荷重の影響

が波形に入り⁽²⁾⁻⁽⁶⁾, 著しい振動波形を示すので, その影響する因子を調べて補正法を検討する。次に, 補正した荷重-変位線図をもとにして, その最大荷重より動的応力拡大係数を, 荷重-変位線図下の面積より吸収エネルギーを求め, また走査形電子顕微鏡を使って微視的破面を観察し, それらへの衝撃速度と温度の影響について考察する。

2. 実 験

2.1 実験試料 供試片は板厚 5 mm のポリカーボネート (NF-2000 U 三菱瓦斯化学) である。試験片はすべて成形方向が試験片の長手方向になるように切出した。試料の機械的性質を表 1 に示す。また試験片の形状寸法を図 1 に示す。切欠き長さは 1.5 および 4.5 mm の 2 種類とする。それゆえ, 切欠き長さ a と板幅 W との比, 相対切欠き長さ a/W は, 0.1 および 0.3 である。切欠きの加工は初めの長さ 1.2 および 4.2 mm は糸鋸で入れ, 残りの 0.3 mm はタッピング法により注意深く入れた。なお荷重波形に著しい振動が現れる場合および荷重波形の補正法の検討に使用した試験片の形状寸法については 3.1 の考察で示す。

2.2 実験方法

2.2.1 計装化シャルピー衝撃試験機 試験機は

* 原稿受付 平成 4 年 7 月 3 日。

^{*1} 正員, 金沢工業大学 (〒921 石川県石川郡野々市町畠が丘 7-1)。

^{*2} 准員, 日産自動車(株) (〒104 東京都中央区銀座 6-17-1)。

^{*3} 学生員, 金沢工業大学大学院。

秤量 14.7 J の小形シャルピー衝撃試験機で、荷重と変位が測定できるようにした計装化シャルピー衝撃試験機 (CHARPACFS 2000 米倉製作所) である。この試験機の荷重-変位計測系の模式図を図 2 に示す。衝撃荷重はハンマーの刃先端部 (タップ部) の両側に貼ったひずみゲージにより検出し、デジタルメモリースコープで荷重信号をデジタル信号に変換して記録する。このデジタル信号をパーソナルコンピュータに取り込み、時間関数として得られる荷重波形を、初期速度からエネルギーの損失によるハンマーの速度低下分を補正した後、荷重-変位曲線が得られる。なお衝撃速度 V は次式で求めた。

$$V = \sqrt{2gL(1 - \cos \alpha)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 g は重力の加速度、 L はハンマーの回転中心から試験片打撃位置までの距離、 α はハンマーの振上げ角度で本研究では 15, 35, 75, 130° の 4 種類とした。これより、衝撃速度 V は 0.6, 1.2, 2.4, 3.6 m/s となる。さらに、試験温度は -200, -50, 0, 20, 60°C の 5 種類としたが、低温側はアイスボックス中に温度により液体窒素、ドライアイス、氷などの冷媒を入れて試験片を間接的に冷却し、高温側は電気炉中に試験片を入れ、衝撃実験に先立ってこれらの状態で約 6 時間放置した後実験を行った。また、破面の微視的観察には走査形電子顕微鏡 (ALPHA 30 A 明石製作所) を使用した。

2・2・2 動的応力拡大係数 Brown ら⁽⁷⁾ によって求められた片側にき裂のある帯板の 3 点曲げ試験片の応力拡大係数の式を使用する。衝撃試験ではそれを次

表 1 機械的性質

Elastic modulus E [GPa]	Tensile strength σ_B [MPa]	Poisson's ratio ν	Percentage elongation δ [%]
2.2	58	0.36	89

図 1 試験片

式で示す。

$$K(t) = \frac{3P(t)S\sqrt{a}}{2BW^2} Y(\xi) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $P(t)$ は時間 t での荷重、 B , W , S はそれぞれ試験片の板厚、板幅、スパン長、 a は切欠き長さ、 $\xi = a/W$ は相対切欠き長さ、 $Y(\xi)$ は板幅の補正項で、 $S/W = 4$ のとき

$$Y(\xi) = 1.93 - 3.70\xi + 14.53\xi^2 - 25.11\xi^3 + 25.80\xi^4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。この時間関数の応力拡大係数 $K(t)$ を動的応力拡大係数と呼び、本報では切欠きからき裂が発生する時間 t_B を求め、この時間での $K(t_B)$ を動的破壊じん性値 K_{Id} とした。

3. 結果と考察

3・1 荷重-変位波形の最初のピーク値に影響を与える因子 図 3 は、計装化シャルピー衝撃試験機のハンマーのタップ部に貼られたひずみゲージで検出した荷重波形と試験片の切欠き先端の横 1 mm の位置に貼られたゲージ長さ 1 mm のひずみゲージで検出したひずみ波形を示す。試験片に貼られたひずみゲージから得られるひずみ波形は小さな振動波形を示しながら増加するが、ハンマーのタップ部のひずみゲージで得られる荷重波形は著しい振動波形を示しながら増加することがわかる。なお、横軸は前報で述べたと同様な方法で時間 t から変位 δ に換算した。この荷重波形

図 2 荷重-変位計測系の模式図

図 3 荷重-変位線図

の最初の波形は慣性荷重が関係し、以後振動波形となると考えられるため、荷重波形の最初のピーク値 P_0 に注目して考察する。

3・1・1 衝撃速度と温度の違いが最初のピーク値に及ぼす影響 図4は衝撃速度をパラメータとして、ピーク荷重 P_0 と温度の関係を示したものである。なお、この図は相対切欠き長さ a/W が0.1の場合である。この図より、 P_0 は衝撃速度を低くするか、あるいは温度を高くすると減少することがわかる。この傾向は前報で述べた弾性係数と温度との関係と類似している。

3・1・2 試験片の形状寸法の違いが最初のピーク値に及ぼす影響 試験片の形状寸法は図1に示すものが基本であるが、本項では、試験片の形状寸法の違いが最初のピーク値に及ぼす影響について検討する。すなわち、図5(a)では、板厚を3, 4, 5 mm, 図5(b)では、板幅を5, 10, 15 mm, 図5(c)では、スパン長を30, 40, 50, 60 mm, また図5(d)では、相対切欠き長さを0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5と変化させることにする。なお、それらの場合における衝撃速度と温度は図中に示した。これらの図から、最初のピーク値は試験片の板厚および板幅に影響されるが、スパン長さと相対切欠き長さについてはそれほど影響されないことがわかる。

3・2 荷重波形の補正方法 ハンマーの衝撃速度を高くするか温度を低くすると荷重波形の立上りの振動波形は大きくなり、振動波形はコンプライアンス一定の直線に重ね合わされる。そこで、コンプライアンス一定の直線が真の荷重波形と考えた補正波形を示す⁽⁹⁾。

図3にハンマーのタップ部に貼られたひずみゲージで検出した荷重波形と試験片の切欠き先端の横1 mmの位置に貼られたゲージ長さ1 mmのひずみゲージで検出したひずみ波形を示した。衝撃速度、温度および試験片の形状寸法が違っていても、両者のひずみゲージから得られる荷重-変位線図およびひずみ-変位線図は一般的には図6のように示される。ひずみ-変位線

図で最大ひずみ $\epsilon_{\max}$ まででき裂が進展しはじめると考えられるので、 $\epsilon_{\max}$ に対応する変位 δ_i を求める。(ここに多くの予備実験では変位 δ_i に対応する荷重は $P_{\max}$ とほぼ等しくなる。)そして点 δ_i と荷重-変位線図における荷重の最大値 $P_{\max}$ 点とを直線で結んでおく。次に、荷重波形の0から $P_{\max}$ まで最小二乗近似直線を、パーソナルコンピュータに記録されている測定波形の全測定点を使用して求める。この方法で求めた近似直線と測定波形の立上り部分および上述の方法で求めておいた $P_{\max}-\delta_i$ 線との交点をそれぞれA, Bとすると、直線ABは測定波形を近似した直線となる。さらに、B点と原点Oを結び、この直線OBを真の荷重信号と考え、この荷重信号を真の補正波形とする。

$a/W=0.1$, 試験温度 20°C で、衝撃速度を1.2, 2.4, 3.6 m/sに変化したときの上述の補正をした荷重-変

図4 衝撃速度と温度の違いが最初のピーク値に及ぼす影響

図5 試験片の形状寸法の違いが最初のピーク値に及ぼす影響

位関係を図7に示す。実線は測定波形、破線は測定波形を最小二乗近似した直線、細い実線は補正波形である。これより、最小二乗近似した破線は衝撃速度が遅いときは補正波形と一致し、測定波形の原点を通る。衝撃速度が大きくなると最小二乗近似した直線は補正波形より上方にずれてくる。すなわち、 $\triangle OAB$ の面積に相当する吸収エネルギーは、衝撃速度が低いとき

図6 一般的な荷重-変位およびひずみ-変位線図

図7 補正した荷重-変位線図

は零に近く、衝撃速度が高くなれば大きくなる。しかし、衝撃速度と温度条件が等しければ、吸収エネルギーはほぼ同じ値を示すこともわかった。ここに $\triangle OAB$ に相当する吸収エネルギーには試験機の弾性変形のひずみエネルギーや試験片の飛散のための運動エネルギーも含まれている。それゆえ、真の補正波形で最大荷重 P_B に対する変位点、C点を求め、四角形OABCの面積から $\triangle OAB$ の面積を引いた $\triangle OBC$ を吸収エネルギー w として以後採用する。

3.3 衝撃速度と温度の違いが衝撃破壊挙動に及ぼす影響 図8は、 $a/W=0.3$ としたときの温度をパラメータとして衝撃速度と単位面積当たりの最大荷重 P_{max}/A (以後 P_B/A をこのように表す) および比吸収エネルギー w/A との関係を示したものである。 P_{max}/A は衝撃速度が高くなると低下し、低下の度合は 60°C の場合が最も著しいことがわかる。また、 w/A も衝撃速度が高くなると低下し、低下の度合は 60°C の場合が最も著しく、 -200°C のときはほとんど変化しないことがわかった。これは、衝撃速度が高くなると切欠き先端で塑性変形が拘束され⁽⁹⁾、延性破壊からぜい性破壊へと遷移したためと考えられる。

さらに、 $a/W=0.3$ で衝撃速度をパラメータとして温度と P_{max}/A および w/A との関係を示したのが図9である。 P_{max}/A の最小値と w/A の増加し始める温度は、衝撃速度 0.6 m/s の -50°C から衝撃速度 1.2 m/s の 0°C へと移行する。このことから衝撃速度を高くするとぜい性破壊をおこす温度は高温側に遷移することを示している。衝撃速度 3.6 m/s の場合は実験値はほぼ一定となったが、 P_{max}/A の最小値と w/A の増加し始める温度はさらに高温側にあることを示してい

図8 衝撃速度と P_{max}/A および w/A の関係

る。

3・4 衝撃速度と温度の違いが動的破壊じん性値に及ぼす影響 図10は、温度をパラメータとして切欠きからき裂が発生するときの荷重を用いて求めた動的破壊じん性値 K_{I_d} と衝撃速度の関係を示している。衝撃速度が高くなると K_{I_d} はやや減少するようである。

次に、温度が $-200, 0, 60^\circ\text{C}$ の場合で、動的破壊じん性値 K_{I_d} と動的応力拡大係数の時間微分 $\dot{K}_I$ との関係を図11に示す。 K_{I_d} は $\dot{K}_I$ が大きくなると温度 $0, 60^\circ\text{C}$ では減少し、 -200°C では減少した後増加することがわかる。 $\dot{K}_I$ が大きくなると K_{I_d} が減少する傾向は K_{I_d} と衝撃速度との関係と類似している。

次に、 -200°C で K_{I_d} が減少した後、増加する理由について考察してみる。 K_{I_d} の減少域と増加域との比吸収エネルギーを調べて見ると、違いがみられなかった。また、それらの領域の破面の微視的観察によっても違いがみられなかった。これらのことから、切欠き先端の塑性域の大きさは変化がないように思われる。そこで次に、平面ひずみ状態での切欠き先端の塑性域

半径 r_p と降伏応力 σ_Y との関係を式(10)を用いて考察する。

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_{I_d}}{\sigma_Y} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

衝撃速度を高くすると降伏応力は増加する。しかし、降伏応力が増加しても塑性域半径は変わらなかったことから、式(4)より K_{I_d} が増加したのと考えられる。また、図12は衝撃速度をパラメータとして K_{I_d} と温度との関係を示す。この関係は $P_{\max}/A$ と温度との関係で衝撃速度を変えた場合と類似であり、 K_{I_d} の最低値を示す温度は衝撃速度が高くなると高温側に移行することを示唆している。これより、塑性拘束が緩和

図9 温度と $P_{\max}/A$ および w/A の関係

図10 衝撃速度と動的破壊じん性値の関係

図11 K_{I_d} と $\dot{K}_I$ の関係

図12 K_{I_d} と温度の関係

図 13 切欠き先端の破面解析

されて大変形が可能となる T_w は⁽¹⁾、衝撃速度が高くなると高温側に移行する。すなわち、衝撃速度が高くなると切欠き先端で塑性変形の拘束が大きくなり脆性破壊がおきやすくなる。この傾向は温度を低下させるときも同様であることが知られている。

3・5 巨視的および微視的破面観察 $a/W=0.3$ 、温度が 60°C で衝撃速度を 1.2, 2.4, 3.6 m/s と変化させたときの微視的破面を図 13 に示す。巨視的破面はいずれも平坦であるが、試験片表面で切欠きに近いところで延性破壊とみられるネッキングは、衝撃速度が大きくなるとわかりにくくなっている。これは衝撃速度が高くなるにつれて試験片表面で切欠きに近いところが平面応力状態から平面ひずみ状態に近づくためである。この現象は衝撃速度を一定にして温度を低下させた場合も現れる。

微視的破面観察によると、衝撃速度が大きくなるにつれ切欠き先端の延性領域は少なくなり、ミラー領域およびハックル領域とも共に小さくなる。また、ティアラインも短くなるようである。このことから衝撃速度が高くなると切欠き先端で塑性変形が拘束されることがわかる。ここで、衝撃速度が 2.4 m/s と 3.6 m/s の比吸収エネルギーと破面形態を調べたところ、ほとんど同じ値およびほぼ同じ形態を示したことから、試験片の切欠き先端での塑性変形の拘束はほぼ同じ状態であると思われる。また比吸収エネルギーの値がほぼ同じである温度 0°C 以下の破面もまた、同じ状態を示していることから塑性変形の拘束はほぼ同じ状態であると思われた。

4. 結 言

ポリカーボネートの計装化シャルピー衝撃特性への衝撃速度と温度の影響を調べた結果、次の結論が得られた。

(1) 荷重-変位線図は衝撃速度、温度により著しい振動波形となる。この振動波形の最初のピーク値は、試験片の形状寸法、特に板厚と板幅に影響され、スパ

ン長さと相対切欠き長さによる影響は少ない。

(2) 試験機のハンマーと試験片の衝突により生じる振動を伴う測定波形を最小 2 乗近似した直線で示し、これにより最大荷重および吸収エネルギーを求めた。さらに、それらを用いて考察した結果により、この補正法は本研究の衝撃速度（約 4 m/s 以下）の範囲において有効な補正法であることがわかった。

(3) 単位面積当たりの最大荷重と比吸収エネルギーは、衝撃速度が高くなると低下する。また、単位面積当たりの最大荷重と比吸収エネルギーと温度の関係は、最低値を示す温度があり、衝撃速度が高くなるとその最低値は高温側に移行する。

(4) 動的破壊じん性値 K_{Id} と $\dot{K}_I$ の関係は単位面積当たりの最大荷重と速度の関係と類似の傾向を示し、また K_{Id} と温度の関係も単位面積当たりの最大荷重と温度の関係と同じ傾向を示す。

(5) 破面の巨視的および微視的観察によると、破面形態は、衝撃速度、温度を変化させたときの計装化シャルピー衝撃特性とよく対応することがわかった。

本研究を進めるに当たり多くの御援助をいただいた、米倉製作所代表取締役米倉頭氏、実験材料を御送付下さった関係会社、および実験に協力してくれた本学学生林真二、二上朗、北岡仁志、中村貢君、図面を整理してくれた本学機械工学科材料力学研究室の卒研生に感謝する。

文 献

- (1) 木田・ほか 2 名, 機論, 57-544, A(1991), 3051.
- (2) 小林・ほか 2 名, 鉄と鋼, 72-15(1986), 2133.
- (3) 浦辺・丸山, 鉄と鋼, 74-3(1988), 567.
- (4) 大塚・松本, 機論, 54-500, A(1988), 815.
- (5) 林・田中, 衝撃工学, (1988), 157, 日刊工業新聞社.
- (6) 後藤・鷹合, 材料, 38-429(1989), 101.
- (7) 岡村, 線形破壊力学入門, (1976), 218, 培風館.
- (8) 伊藤, 金沢工業大学修士論文, (1991).
- (9) Knott, J. F. (宮本訳), 破壊力学の基礎, (1977), 213, 培風館.
- (10) 日本材料学会編, 機械材料学, (1991), 101, 日本材料学会.