

衝撃によるポリカーボネートの損傷

石井, 秀夫
九州大学応用力学研究所 : 助手

篠崎, 高茂
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

田代, 昭正
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

長浜, 智基
九州大学応用力学研究所 : 助手

他

<https://doi.org/10.15017/4785184>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 66, pp.145-152, 1988-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



衝撃によるポリカーボネートの損傷

石井秀夫* 篠崎高茂†
田代昭正† 長浜智基*
川建和雄‡

概 要

衝撃試験を行い、ポリカーボネートの損傷状態を調べた。衝突体の速度を変化させることにより供給エネルギーを変えて、数種の損傷試片を作った。これを用いて、静的試験及び衝撃試験を行った。これらの結果及び顕微鏡観察により、損傷を四段階、即ち弾性、降伏域発生、亀裂発生及び破壊の各状態に区分した。

Key words: Impact, Damage, Polycarbonate

1. 緒 言

高分子樹脂の破壊の研究の中で、ポリカーボネート(PC)の切欠き試片による研究は多い¹⁾²⁾³⁾。PC材料自身は延性材料であるが、切欠きによる応力集中により脆性材料のような破壊を示すことがある。本研究では、脆性破壊の原因となる切欠き底の局部降伏域の発生と亀裂の発生について、研究するために三点曲げ衝撃試験を行った。

供給エネルギーを各種与えることにより、数種の試片を作成した。これを用いて、静的試験及び衝撃試験を行った。その結果をもとにして、損傷状態を四段階に区分した。その損傷状態と降伏域や亀裂との関係について説明を試みた。

2. 供試片と実験方法

供試片は市販のポリカーボネート(パンライト)板から、高さ10mm、幅10mm、全長55mmに加工した。切欠き寸法は、深さ2mm、その先端半径1mmにフライス加工を施した。

空気式滑走台上をすべる重量0.620kgfのハンマを衝突させることにより試片に横衝撃を与えた。又、供給エネルギーは衝突速度を変えることにより、変化させた。試片支持台は鋼製であり、その支持間距離は40mmである。その支持台には歪ゲージを接着して、その出力を波形記憶装置に記録した。その記憶

* 九州大学助手、応用力学研究所

† 文部技官、九州大学応用力学研究所

‡ 九州大学教授、応用力学研究所

装置を介して、動荷重—時間線図を求めた。その荷重検定は静的試験により行った。

最初に、供給エネルギーと降伏域発生及び破壊の関係を求めた。次に、破壊には至っていないけれども損傷を受けている試片の静的特性と耐衝撃特性を求めた。即ち、損傷を受けている試片を使って再度の衝撃試験を行い、吸収エネルギー及び動荷重を計測し、耐衝撃特性を求めた。又、クロスヘッド速度 1 mm/min での静的曲げ試験を TOM 万能試験機により行い、荷重-たわみ線図、仕事量及び最高荷重を計測し、静的特性を求めた。

3. 実験結果

3.1. 供給エネルギーと試片の損傷

衝突速度を 1.6 m/s から、3.2 m/s まで変えることにより、77 kgf·mm から 330 kgf·mm までの範囲の供給エネルギーを試片に与えた。図 1 に示すものは、その時得た衝突速度と供給エネルギーの関係である。顕微鏡観察によって、供給エネルギーに対する試片の損傷状態を、弾性状態 (○印)、降伏発生状態 (△印)、及び破壊状態 (×印) として、三段階に区分した。

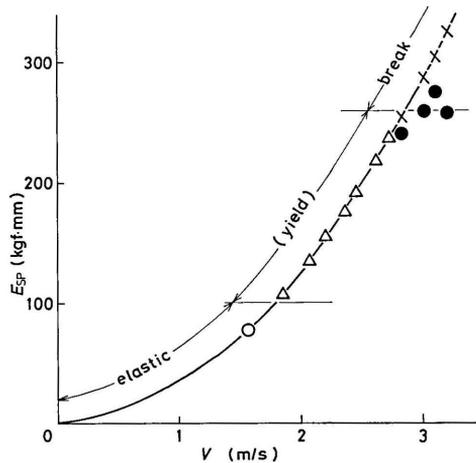


図 1 衝突速度と供給エネルギー

ポリカーボネートの衝撃による損傷状態の三段階は次の通りである。供給エネルギー $E_{sp} < 100$ kgf·mm の範囲は、切欠き底に降伏域が発生していない弾性状態を表す。次に、 $100 < E_{sp} < 260$ kgf·mm の範囲は、降伏域の発生があった降伏域発生状態である。そして、 $E_{sp} > 260$ kgf·mm の範囲は、試片は破壊し、分離した試片はハンマの進む方向とは逆の方向に飛んでいった破壊状態を示す。又、破壊した時の吸収エネルギーも合わせて●印で示した。

3.2 供給エネルギーと耐衝撃特性

衝撃試験により損傷を受けた試片に再度衝撃を与え、それが破壊する時の吸収エネルギー E_{AB} を求めた。衝突速度 3.2 m/s、供給エネルギー 330 kgf·mm で試験を行った。その結果を図 2 に示す。横軸に最

初の衝撃で与えた供給エネルギー、縦軸に再衝撃時に得た吸収エネルギーを採った。最初の衝撃による損傷を弾性状態（○印）と降伏域発生状態（△印）に分けて図示した。

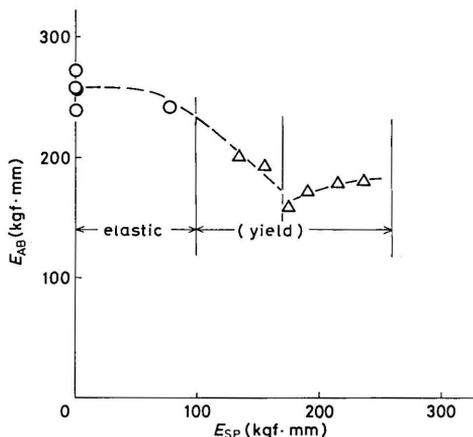


図2 供給エネルギーと吸収エネルギー

供給エネルギー $E_{SP} < 100 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ では、再衝撃時の吸収エネルギーは、最初の衝撃で破壊するエネルギーにほぼ等しい。又、 $170 < E_{SP} < 260 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ の範囲では、再衝撃時の吸収エネルギーは、ほぼ一定である。そして、 $100 < E_{SP} < 170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ の範囲は、その間の遷移過程と考えられる。最初の供給エネルギーが大きいく程、再衝撃時の吸収エネルギーは小さい。即ち、この遷移過程では、供給エネルギーが大きいく程、損傷が大である。切欠き底に発生した降伏域が内部に成長する過程であると考えられる。このように $E_{SP} \cong 170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ の所に一つの境界があることがわかる。

供給エネルギーと損傷の関係を得るために行った、衝撃試験において、計測した最高荷重 P_b を図3に示す。この図に見るように、 $E_{SP} \cong 170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ の付近において、最高荷重 P_b は 115 kgf から 145 kgf に階段上に変化する。図2に示した再衝撃試験を行って得た吸収エネルギーと供給エネルギーの関係の結果と同様に、この付近に境界があらわれた。こは、降伏域がほぼ飽和に達した状態と考えられる。

供給エネルギーが $170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ を越えて増え続けると、降伏して硬化している領域の一番弱い所に亀裂を生成することになる。降伏域の内部の最先端付近で、すべり線が交叉している弱い所から亀裂は発生する⁴⁾。ほぼ同時に数個所に発生した亀裂も、その中の一つが次第に成長が速くなり、破壊に至るものと考えられる。この結果により、降伏域における損傷状態を $100 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ から $170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ までと $170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ から、 $260 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ までの降伏域発生と亀裂発生に二つに分割する。これらに弾性と破壊を合わせて、損傷状態を四つの領域に区分する。

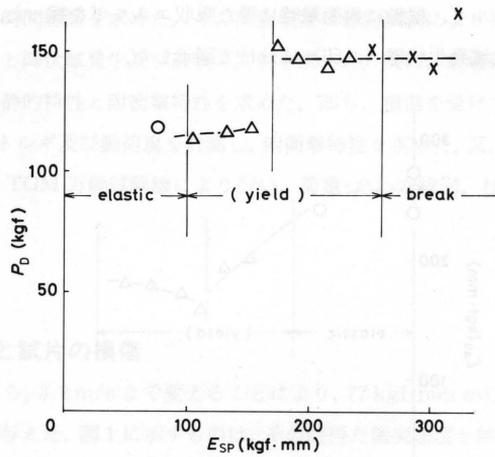


図3 供給エネルギーと動荷重

3.3 供給エネルギーと静的特性

損傷を受けた試片を用いて静的曲げ試験を行い、破壊荷重 P_S 及び破壊までの仕事量 U を求めた。その結果を図4及び図5に示す。破壊荷重及び破壊までの仕事量は両者とも同じ傾向を示すことがわかる。即ち、 $E_{SP} < 100 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ の範囲では処女材と同程度の量を持ち、ほとんど損傷を受けていないことがわかる。又、 $100 < E_{SP} < 170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ の範囲は、衝撃試験結果に見られたように遷移状態に対応する。更に、 $170 < E_{SP} < 260 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ と大きくなると、仕事量はほぼ一定の値を示す。この様に静的曲げ試験結果に於いても前節で述べた再衝撃試験の結果と全く同じ様に、損傷状態を弾性、降伏域発生、亀裂発生及び破壊と四段階に区分することができる。

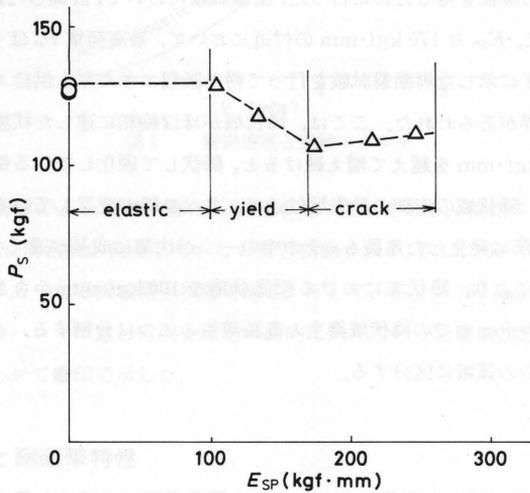


図4 供給エネルギーと静荷重

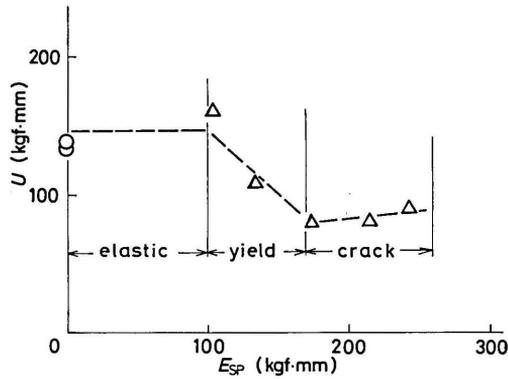


図5 供給エネルギーと静試験の仕事量

4. 考 察

ポリカーボネート切欠き試片の図2から図5に示す実験結果を用いて、図6の模式図を描いた。供給エネルギーを用いて区分した。即ち、100、170、260 kgf·mm で区切り、弾性、降伏域の発生、亀裂の発生及び破壊の各領域とした。

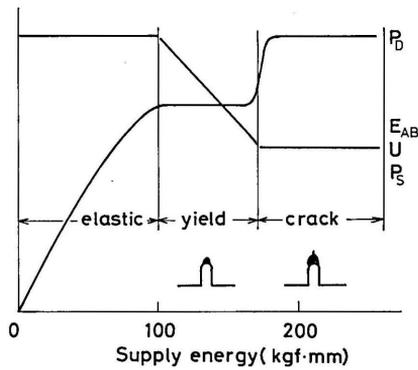


図6 模式図 (供給エネルギー対動荷重, 吸収エネルギー, 仕事量, 静荷重)

供給エネルギー E_{sp} 100 kgf·mm 以下の領域では、吸収エネルギー、静的破壊荷重及びその仕事量を供給エネルギー0である処女材の値と比較すると、いずれも処女材とほぼ同じ値をとる。即ち、ほとんど損傷を受けない弾性領域であると考えられる。

供給エネルギー 100 kgf·mm から 170 kgf·mm までの領域は、降伏域発生領域である。供給エネルギー 100 kgf·mm を受けて切欠き底に微小降伏域が発生し成長する。この時、荷重は 115 kgf である。更に供給エネルギーを増加すれば、荷重はほぼ一定であり、エネルギーは吸収されるから、この間変形が起こっていることを意味する。これは降伏によるすべり帯の変形であると考えられる。こうして、降伏域は、内部へ成長し、だんだん明瞭に見えるようになる。

次に供給エネルギーが $170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ を越えると、荷重が増える。降伏域は、ほぼ飽和に達し、硬化した降伏域に更に、荷重が加わり始める。そして、その領域での限界値に達すると微小亀裂の発生が起こるものと考えられる。Millsはこのディスク状のものをクレイズであって亀裂ではないと言っている¹⁾。又北川は破壊の核と言って、亀裂と区別している⁵⁾。しかし、どの大きさまでがクレイズであり、どの大きさから亀裂であるという判別は困難である。この微小亀裂は、視野に見えない段階で、既に相当数発生していると考えられる。その中の幾つかが成長し、視野にあらわれる。実体顕微鏡により、倍率60倍で観察すると、供給エネルギー E_{sp} が $220 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ から $235 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ の間で、これを見ることができる。

図7aが側面から見た微小亀裂の写真である。降伏域の先端のすべり帯の交叉している点から亀裂は発生している。又図7bは少し斜めの方向から、降伏領域全体を見た写真である。白っぽい部分が降伏域であり、その上部の円状のものが微小亀裂である。これら発生した微小亀裂も途中で停止するものが多く、より大きい微小亀裂に吸収される。これらの微小亀裂が成長している間荷重はほぼ 145 kgf と一定である。供給エネルギー $170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ から $260 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ までの領域が、この亀裂発生領域である。

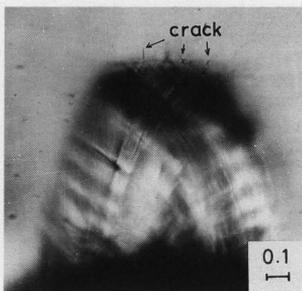


図7a 微小亀裂の写真

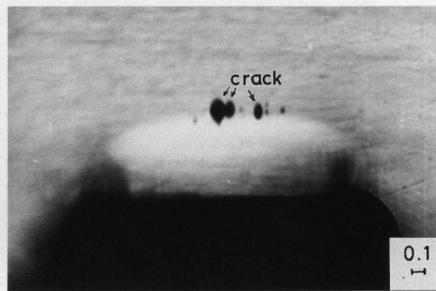


図7b

供給エネルギーが $260 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ を越すと亀裂は、急激な成長をはじめ破壊に達する。この領域は破壊領域である。図8は、供給エネルギーを $290 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ 与えて破壊した時の荷重-時間線図である。矢印Aの水平部分は、模式図の供給エネルギーが $100 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ から $170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ の降伏域発生領域に対応している。又、亀裂発生領域の荷重一定の領域も荷重-時間線図の中にあらわれている。

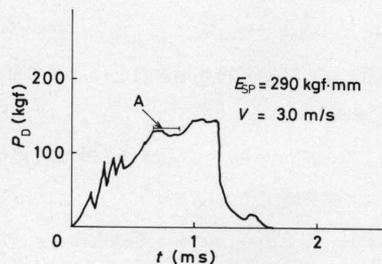


図8 動荷重-時間線図

同じ切欠き試片で静的三点曲げ試験を行うと図9の荷重-たわみ線図となる。切欠き底に微小降伏域が発生したのは、矢印の位置 40 kgf である。最小断面での公称応力は、 3.2 kgf/mm^2 である。切欠き応力集中係数 2.25 を掛けると最大応力 8.2 kgf/mm^2 となり、単軸引張降伏応力 6.3 kgf/mm^2 に近い値をとる。しかし、動的降伏荷重 115 kgf は、公称応力 10.8 kgf/mm^2 、最大応力 24.3 kgf/mm^2 となり、静的降伏応力に比べて 3 倍程大きな値をとる。静試験と動試験の破壊曲線図 8、図 9 を比較しても、曲線の形状に差があり、静破壊と動破壊での試験片の応力分布に違いがあることがわかる。極端な例として、引張側の完全降伏、反対側の圧縮降伏を仮定して計算すると、荷重 115 kgf での応力は 7.2 kgf/mm^2 となり、単軸引張降伏応力に近い値となる。

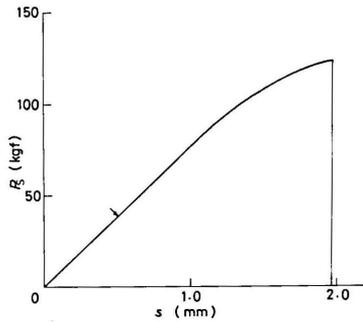


図9 静荷重-たわみ線図

微小亀裂は切欠き底の少し内部に発生する。百武らは、切欠き底から微小亀裂までの距離は、切欠き底までの半径にほぼ等しいと言っている⁹⁾。今回の実験で、ほぼ同様な結果を得た。

5. 結 言

静的試験、衝撃試験の結果及び顕微鏡観察により、横衝撃を受ける切欠き試片(切欠き深さ 2 mm, 切欠き半径 1 mm) PC は、次の四段階に分類することができる。

- (1) 弾性領域：供給エネルギー E_{sp} が $100 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ 以下では、弾性変形を受けるだけで、ほとんど損傷を受けていない。そして、処女材と同じ性質を示す。
- (2) 降伏域発生領域： $100 < E_{sp} < 170 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ では、切欠き底から降伏域は発生し、次第に内部へ進む。その間、荷重 115 kgf とほぼ一定である。
- (3) 亀裂発生領域： $170 < E_{sp} < 260 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ では、降伏域は硬化し、飽和する。荷重の増加が起こり、切欠き底から少し内部へはいった、すべり帯の交叉した所に、微小亀裂が発生する。荷重 145 kgf とほぼ一定の値をとる。
- (4) 破壊領域： $E_{sp} > 260 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$ になると、亀裂の成長は急速に大きくなり、完全な破壊が起こる。

参 考 文 献

- 1) Mills, N. J. : The mechanism of brittle fracture in notched impact tests on polycarbonate, *J. Mater. Sci.* **11** (1976) 363.
- 2) Kitagawa, M. : Plastic deformation and fracture of notched specimens due to bending in glassy polymers, *J. Mater. Sci.* **17** (1982) 2514.
- 3) 百武 秀, 西谷弘信 : 切欠きをもつ硬質プラスチックの曲げによるぜい性破壊の条件, *機論*, **51**-462, **A** (昭 60) 478.
- 4) Chau, C. C., Li, J. C. M. : Fracture of shear bands in atactic polystyrene, *J. Mater. Sci.* **16** (1981) 1858.
- 5) 北川正義 : 高分子切欠き材のぜい性破壊, *機論*, **50**-456, **A** (昭 59) 1539.
- 6) 百武 秀, 西谷弘信 : 切欠きをもつポリカーボネート板状および丸棒試験片の破損の条件, *機論*, **52**-479, **A** (昭 61) 1683.

(昭和 63 年 5 月 30 日 受理)