

ポリカーボネートの衝撃試験における破壊遷移現象

石井, 秀夫
九州大学応用力学研究所

篠崎, 高茂
九州大学応用力学研究所

田代, 昭正
Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

<https://doi.org/10.15017/6768397>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 120, pp. 47-52, 2001-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



ポリカーボネートの衝撃試験における破壊遷移現象

石井 秀夫*¹ 篠崎 高茂*¹ 田代 昭正*¹

(2000年11月30日受理)

Transitional phenomena of Fracture on Impact test for Polycarbonate

Hideo ISHII, Takashige SHINOZAKI and Akimasa TASHIRO

Abstract

Polycarbonate is a ductile material, but some specimens with notch look like brittle materials on impact tests. We can see plastic regions on the bottom of the notch. We can see that three Fracture types are brittle, mixed and ductile type with increasing temperature or decreasing thickness. Ductile fracture type has larger plastic region than brittle fracture type. We show that the absorbed energy depends on plastic region.

Key words: Brittle, Ductile, Notch, Temperature, Impact

1. はじめに

熱可塑性高分子材料ポリカーボネートは一般に延性材料である。このような延性材料でも切り欠きを付けた試験片では脆性材料のような破壊挙動を示すようになる。切り欠き形状以外にも、試験片の厚さ、あるいは試験温度等の外部条件を変えることにより、延性破壊から脆性破壊へと破壊の遷移を生ずる¹⁾²⁾。また内部条件である分子量及び熱処理条件等の条件を変えても、破壊の遷移を生ずる。

本研究では計装化したシャルピー型横衝撃試験機を用い、外部的な条件である試験温度、および試験片厚さ、切り欠き半径等の条件を変えて破壊の遷移現象を取り扱う。荷重-時間線図から求められる破壊エネルギーと吸収エネルギーの関係を比較し、試験片の破面観察からの破壊遷移について考察する。

2. 実験方法

供試片は、市販の材料ポリカーボネート（パンライト）厚さ10mmの板材より切り出した。Fig.1は試験片の寸法を示す。試験片の幅 h は材料の板厚10mmをそのまま用いた。試験片の厚さ t は2mm、3mm、4mm、5mm、10mmに、試験片長さは55mmに加工した。試験片の切り欠き深さ d は2mmに、切り欠き半径 r は、0.5mm、1.0mmの二種類を加工した。これらの試験片はシリコン油中に130℃で2時間保持し、0.1℃/minで

徐冷を行なう熱処理を施した。

試験は、空気式滑走台上を滑る重量0.620kgfのハンマーを衝突させることにより、試験片に横衝撃を与える方法をとった。試験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。その記憶装置を介して、荷重-時間線図を求めた。その荷重検定は静的に行なった。吸収エネルギーはハンマーの衝突前後の速度を測定し、その両者の運動エネルギーの差から求めた。

試験温度は、試験片の周りに恒温槽を作り、液化炭酸ガスまたは温風を送って、-50℃から75℃までの所定温度に一定時間保持するようにした。その試験温度は、恒温槽

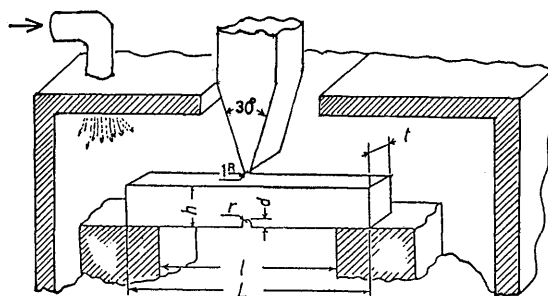


Fig. 1 The dimensions of specimen. A sketch of device.

*1 九州大学応用力学研究所

の中に試験片の側に試験片と同じ材料のものに熱伝対を貼り、計測した。試験は恒温槽の内部を所定の温度に2分間保った後、ハンマーを落下させることにより行った。そのハンマーが通過する所の恒温層の窓をすばやく開けて、一秒以内の短い時間にハンマーを試験片に衝突させて行ったので、ほぼ衝突の瞬間まで試験温度を所定の温度に保つことが出来た。

3. 実験結果及び考察

3.1 吸収エネルギー

試験片厚さ、および試験温度を変えて各種の試験を行い、吸収エネルギーを求めた。この試験結果から延性破壊と脆性破壊があり、厚さの変化や試験温度の変化により破壊の遷移現象が起きることが明瞭に示された。そこで、試験温度の比較的高い温度で起きる延性破壊、比較的低い温度で起きる脆性破壊及び、その中間に位置する混合破壊の三つの破壊形態に区分して議論する。

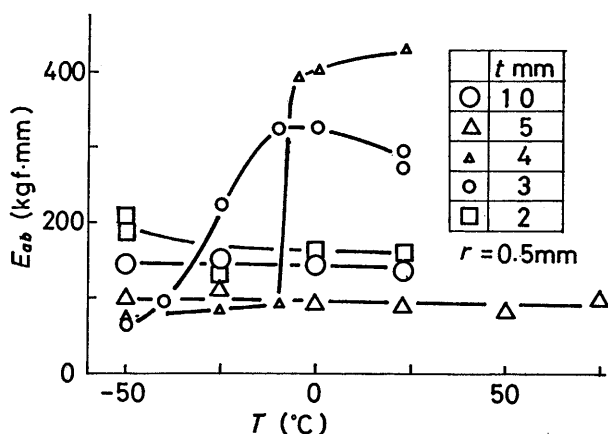


Fig. 2 The absorbed energies v.s. Temperature.
(the notch radius 0.5 mm specimens)

Fig.2 は切り欠き半径 0.5mm で、厚さ $t = 2, 3, 4, 5, 10$ mm の試験片について、吸収エネルギーと試験温度の関係である。特に厚さ 3 mm と 4 mm の試験片では吸収エネルギーの大きな変化である破壊の遷移現象が見られる。

厚さ 2 mm の試験片では、室温と 0 °C で延性破壊であり、- 25 °C と - 50 °C は混合破壊であった。それらの吸収エネルギーの値は脆性破壊する他の厚さの吸収エネルギーに比較すると、比較的大きな値を示した。厚さ 3 mm の試験片では、- 40 °C の脆性破壊から 0 °C の延性破壊へと吸収エネルギーの上昇する大きな変化が起きている。この変化は破壊の遷移現象と対応している。厚さ 4 mm の試験片では、- 10 °C から - 5 °C の範囲で吸収エネルギーの上昇変化が起きている。この脆性破壊から延性破壊への遷移現象

は、厚さの小さい 3 mm の現象に比べて吸収エネルギーは急激な変化を示している。厚さ 5 mm と 10 mm の試験片では試験温度条件の - 50 °C から室温までの範囲はすべて脆性破壊で、吸収エネルギーは小さい値を示した。

厚さ 3 mm の試験片では、- 40 °C の脆性破壊から 0 °C の延性破壊までの 40 °C の温度範囲の吸収エネルギーのゆっくり上昇する変化の遷移に対し、厚さ 4 mm の試験片では、- 10 °C の脆性破壊から室温の延性破壊までの約 33 °C の温度範囲に遷移が起きている。特に - 10 °C の脆性破壊から - 5 °C の混合破壊までの狭い温度範囲では、急激な吸収エネルギーの上昇する変化により遷移が起きていることを示している。厚さ 3 mm の試験片では - 25 °C で混合破壊になり、厚さ 4 mm の試験片では - 5 °C で混合破壊になっているので、厚さ 5 mm の室温で脆性破壊する試験片について、試験温度 50 °C 及び、75 °C まで上げて試験を行った。この温度範囲では、吸収エネルギーの値にそれ程の変化はなく、75 °C でも脆性破壊を示し、遷移現象は見られなかった。しかし、破面を観察すると、試験温度 50 °C から 75 °C と徐々に切り欠き底の延性領域が拡大し、混合破壊に遷移しようとする様子を見ることが出来た。

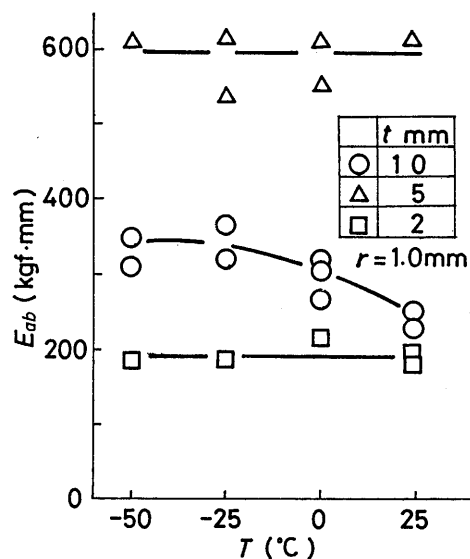


Fig. 3 The absorbed energies v.s. Temperature.
(the notch radius 1 mm specimens)

Fig.3 は切り欠き半径 1 mm の厚さ $t = 2, 5, 10$ mm の試験片の吸収エネルギーと試験温度の関係である。

厚さ 2 mm、5 mm の試験片は室温で延性破壊を示した。両者共に、0 °C 以下の低温では混合破壊を示し、- 50 °C の試験温度に下げても共に脆性破壊にまでは至らなかった。これらの混合破壊は、破面観察で判定したもので、吸収エネルギーでは室温での値とそれほどの変化がなく、明瞭に破壊形態の違いを判定することが出来なかった。厚さ 10 mm

の試験片では室温から - 50 °C の試験温度範囲ではすべて脆性破壊である。

3.2 衝撃値

Fig.4 は Fig.2 の切り欠き半径 0.5 mm の吸収エネルギーを最小断面積で除し、衝撃値を求めた結果である。厚さ 10 mm、5 mm、4 mm の脆性破壊形態では、厚さや温度に関係なく衝撃値の値はほぼ等しい値を示している。しかし脆性破壊の衝撃値を同じ温度の厚さで詳細に観察し比較すると、試験片の厚さが大きいほど衝撃値の値は小さい傾向が見られる。

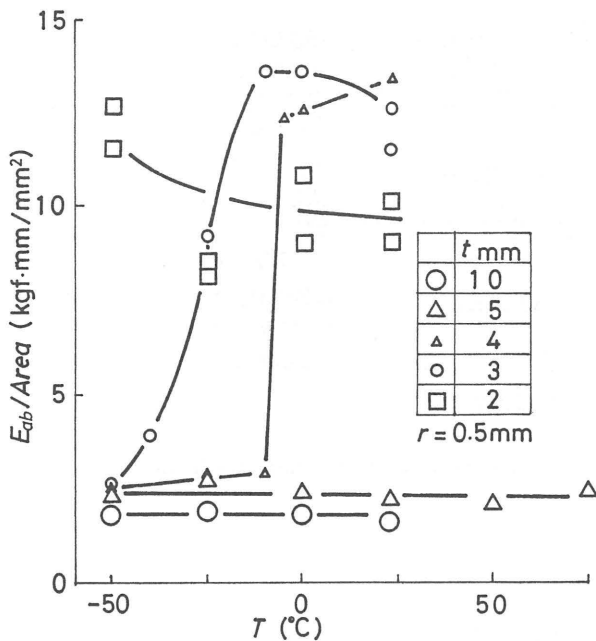


Fig. 4 Impact value v.s Temperature. (the notch radius 0.5 mm specimens)

Fig.5 は Fig.3 の切り欠き半径 1 mm の吸収エネルギーを最小断面積で除し、衝撃値を求めた結果である。厚さ 10 mm の脆性破壊形態の衝撃値を前図の切り欠き半径 0.5 mm の脆性破壊形態の衝撃値と比較すると、少し大きい値を示している。しかし、延性破壊形態では、その値の幅は大きいので、切り欠き半径による相違を見つけることは困難である。衝撃値の厚さや切り欠き半径による差は、切り欠き底及び側面に出来る塑性領域による差である。切り欠き半径が大きいほど塑性領域の大きさは相対的に大きくなる。また厚さが大きいほど側面の塑性領域の占める割合が相対的に小さくなるのが原因である²⁾。

3.3 荷重時間線図と破壊形態

荷重-時間線図及び破面写真から三破壊形態に区分する。三破壊形態区分には Yee の荷重-変位モデルがある⁴⁾。また三破壊形態の典型的な例である切り欠き半径 0.5 mm、試験片厚さ 3 mm の実験結果を併せて Fig.6 に示

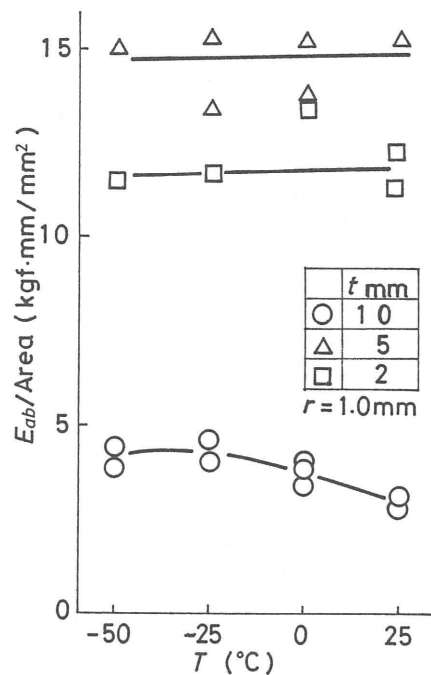


Fig. 5 Impact value v.s Temperature. (the notch radius 1 mm specimens)

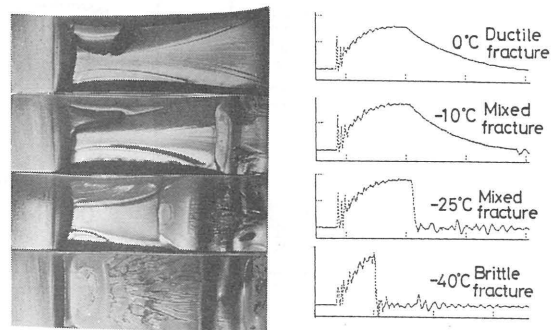
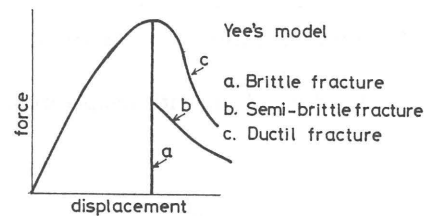


Fig. 6 Load v.s Time and The fracture surface.

す。試験温度 - 40 °C の脆性破壊 (Brittle f.)、試験温度 - 10 °C と - 25 °C の混合破壊 (Mixed f.)、および試験温度 0 °C の延性破壊 (Ductile f.) の破面写真と荷重-時間線図である。混合破壊形態については、荷重-時間線図が異なる二例について示した。混合破壊の二例を見るとシャルピー型衝撃試験のような三点曲げ試験では Yee のモデルのように単純に荷重-時間線図のみでは、破壊形態を判定出来ないことがわかる。この差は切り欠き底に出来た塑性領域の大きさの違いで生じていることが、破面写真を比較することで理解できる。

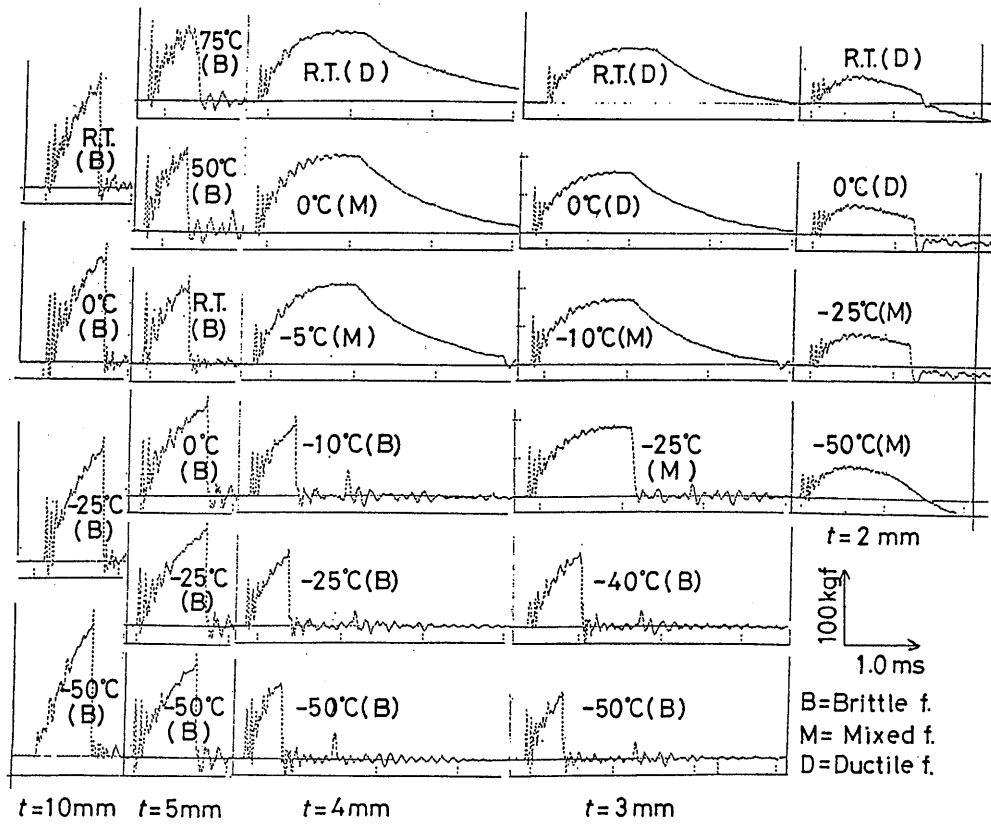


Fig. 7 Load v.s. Time with temperature and thickness on the notch radius 0.5 mm specimens.

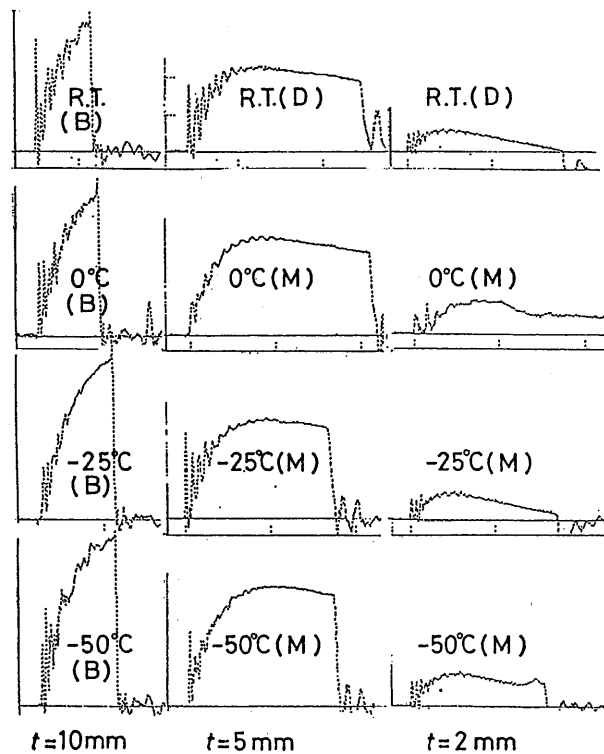


Fig. 8 Load v.s. Time with temperature and thickness on the notch radius 1 mm specimens.

3.4 荷重-時間線図と破壊遷移現象

Fig.7は切り欠き半径 0.5 mm の試験片の荷重-時間線図である。試験片の破面により、破壊形態を脆性破壊、延性破壊、および混合破壊の三破壊形態に区別し、荷重-時間線図を見る。図に各破壊形態を識別して脆性破壊を B(rittle)、混合破壊を M(ixed)、延性破壊を D(uctile) と記入する。

この図を見ると試験温度が低温で脆性破壊し、温度が高くなるに従い、混合破壊を経て、延性破壊へ遷移していく、その傾向が分かる。厚さ 10 mm では、この試験温度範囲では全て脆性破壊である。厚さ 5 mm では、室温より高温の 75℃ に高くなっても荷重-時間線図では、脆性破壊であった。厚さ 4 mm になると室温では、延性破壊となった。厚さ 3 mm では、Fig.4 の例で示したように脆性破壊、混合破壊、延性破壊と綺麗な線図を見ることが出来る。厚さ 2 mm の試験温度 - 50℃ の荷重-時間線図では、延性破壊の様相を示している。しかし、破面で見るとまだ延性破壊になる前の混合破壊であった。又、図を横方向の同じ試験温度で比較すると、厚さが小さくなるに従い、脆性破壊から延性破壊になっていくことがわかる。

Fig.8は切り欠き半径 1 mm の試験片の荷重-時間線図である。厚さ 10 mm の試験片は全て脆性破壊である。厚さ 5 mm の試験片は室温では、延性破壊であり、それより低温で 0℃ から - 50℃ の試験範囲までは、混合破壊である。厚さ 2 mm の試験片でも同様に、試験温度が室温で延性破壊であり、0℃ 以下では混合破壊であった。これも荷重-時間線図ではなく、破面で判定し、各破壊形態を記号で図に記入する。

3.5 荷重-時間線図の解析

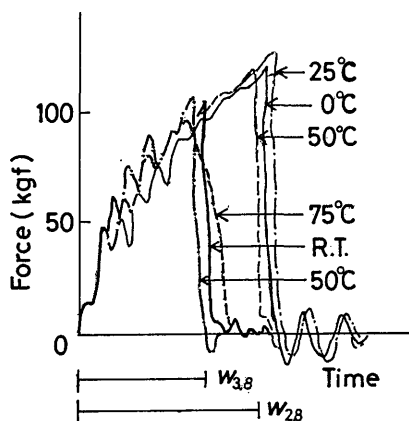


Fig. 9 Load vs. Time(The specimens with the notch radius 0.5 mm ,the thickness 5 mm.)

Fig.9はFig.7の厚さ 5 mm の試験片の荷重-時間線図の結果を同じ座標に描いたものである。衝突速度は二群に分かれていることを考えれば、破壊時の変位はほぼ同じ値を示している。

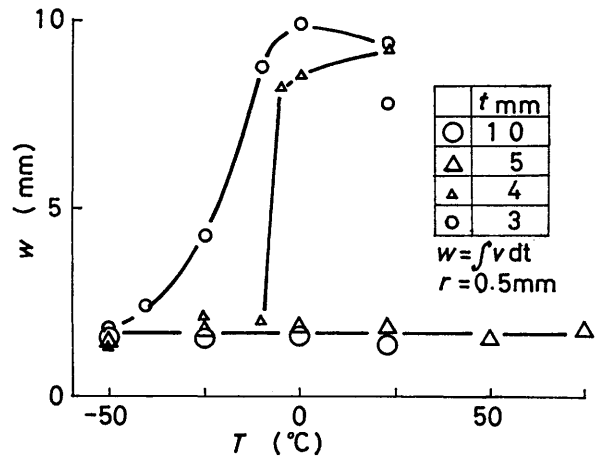


Fig. 10 The displacements of the notch radius 0.5 mm specimens.

切り欠き半径 0.5 mm、試験片厚さ 10,5,4,3 mm の試験結果について荷重-時間線図を解析し、変位、応力、エネルギーについて考察する。Fig.10は、荷重-時間線図を解析し求めた破壊時の変位と試験温度の関係である。荷重-時間線図より、 $\int v dt$ の式を時間 0 から破壊時間 t_b まで、積分して変位を計算する。速度は衝突前の速度から衝突後の速度に一定減速度で変化すると仮定した。Fig.9で示したように脆性破壊時の変位は試験温度に関係なくほぼ一定の値が求まった。Fig.10の変位と試験温度との関係はFig.2で示した吸収エネルギーとよく似た図であった。これから、吸収エネルギーの値は破壊までの変位に大きく関係があり、延性破壊で吸収エネルギーが大きいのも破壊までの変位が大きいことに依存していることがわかる。

Fig.11は最大荷重値より求めた公称応力の試験結果である。応力分布を単純に弾性応力分布していると仮定して計算した。混合破壊については記号 M を記している。混合破壊や延性破壊でも弾性分布で計算し、比較した値を示した。完全塑性応力分布を仮定すれば、およそ 2/3 の値となる。厚さ 10 mm と 5 mm の試験片では脆性破壊である。試験温度が高くなるほど、応力は減少する傾向がある。脆性破壊する試験片の厚さについて比較すると、厚さが小さいほど応力は大きな値である。これは、脆性破壊の進展時に起きる側面の塑性領域に影響している。この領域は切り欠き半径に影響され、厚さには関係なく、ほぼ一定の大きさが生成される。脆性破壊では、脆性破面に対して、側面の塑性領域の大きさの占める割合は、厚さが小さいほど相対的に大きくなる。亀裂を形成する脆性破面に対して、塑性領域破面を形成するには、単位面積当たりの仕事量で比較すると約 10 倍になるので²⁾、相対的に側面の塑性領域は小さくなる様な厚さが大きい試験片ほど公称応力は小さくなる。

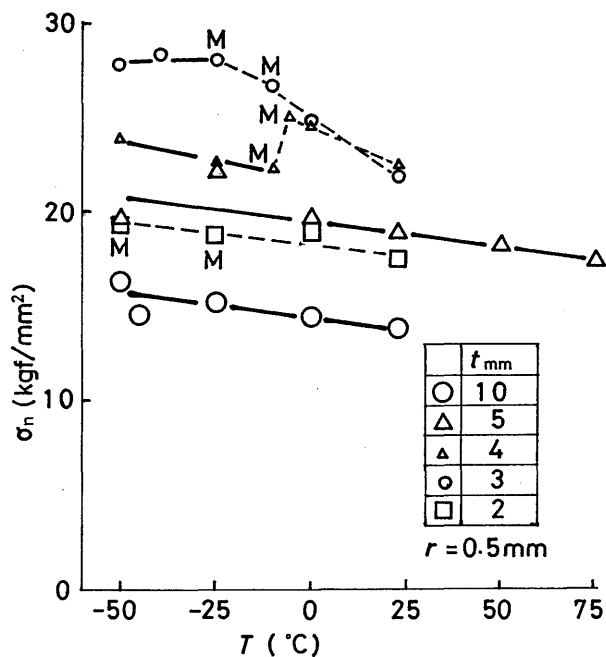


Fig. 11 The normal stresses of the notch radius 0.5 mm specimens.

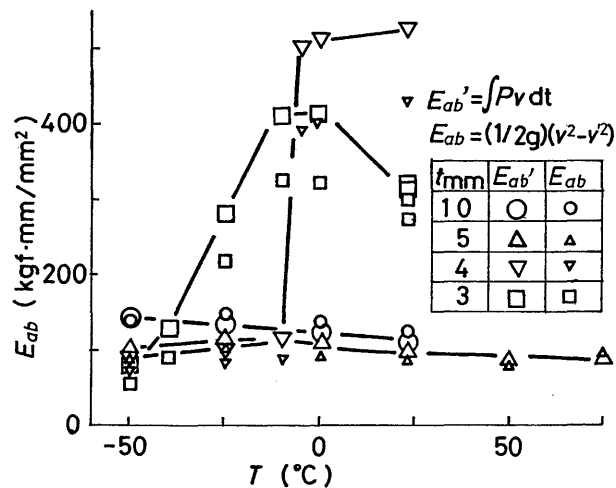


Fig. 12 The absorbed energies of the notch radius 0.5 mm specimens.

荷重一時間線図より、変位を求めたのと同様に速度を仮定して、 $\int P v dt$ の式より、吸収エネルギーを求めた⁵⁾。Fig.12 に、そのエネルギーと運動エネルギーの差で求めた吸収エネルギーを対比して示す。全般的に、線図から求めたエネルギーの値が運動エネルギーの差で求めた値よりも大きい傾向を示した。脆性破壊領域のエネルギーは、比較的両者は一致している。しかし、延性破壊領域のエネルギーは、脆性破壊領域のエネルギーよりも、その差が大きく表れた。その原因は破壊時間まで長くなるので、速度を一樣に減速とした仮定では、延性破壊のエネルギー計算は、誤差が比較的大きくはいるからであろうと考える。

4. まとめ

ポリカーボネート材料の試験温度及び、試験片厚さを変えた衝撃試験の結果により、脆性破壊から混合破壊を経て延性破壊へ変化する破壊の遷移現象を判別し、その条件を得た。切り欠き半径 0.5 mm の試験片の試験温度の変化の試験結果では、厚さ 3 mm 及び 4 mm で、0 °C より低温で遷移現象が起きた。厚さ 3 mm では緩やかな吸収エネルギーの変化の遷移現象であり、厚さ 4 mm では急激な吸収エネルギーの変化の遷移現象であった。この 1 mm の厚さの違いによる大きな変化は重要な因子があるものと推定される。切り欠き半径 1 mm の試験片での結果では、厚さ 5 mm 以下では延性破壊であり、厚さ 10 mm では脆性破壊であった。厚さ 6 mm または 7 mm の試験片では 0 °C 付近の試験温度で遷移現象が起こったと予想される。また、これらの破壊の遷移現象は荷重一時間線図でおよその判別は出来た。しかし、荷重一時間線図からでは、混合破壊と延性破壊の形態の区別が困難な場合があり、破面観察で判別しなければならないことがわかった。

荷重一時間線図を解析して、変位、応力を求めた。脆性破壊時の変位は試験温度に関係なくほぼ一定の値を示した。その線図より破壊エネルギーを時間により積分して求め、吸収エネルギーと比較した。ほぼ同じ様な値が求めたので、吸収エネルギーは破壊エネルギーに依存していることが分かった。また、脆性破壊時の公称応力の値は低温になるほど大きくなる傾向が見られた。

この原稿をまとめるにあたって、助言をして頂いた日本文理大学川建教授及び本研究所の橋本助教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 百武秀、西谷弘信、ポリカーボネート切り欠き平板の静的降伏及び破壊における板厚効果、機論,50-453 (昭 59),pp888-893
- 2) 石井秀夫、篠崎高茂、川建和雄、ポリカーボネートの吸収エネルギーと破面エネルギーの関係、九州大学応用力学研究所報、平成 10 年 3 月,pp1-9
- 3) N.J.Mills, The mechanism of brittle fracture in notched impact tests on polycarbonate, J.Mater.Sci.11 (1976), pp363-373
- 4) A.F.Yee, The yield and deformation behaviour of some polycarbonate blends, J.Mter.Sci.,12(1977), pp757-765
- 5) 加賀谷忠治、加藤政則、八嶋昭弘、川口幸宏、江上登:S15CK 同種摩擦圧接継手の延性一ぜい性遷移挙動、材料,40,455(1991),pp1025-1029
- 6) 日本機械学会編、"衝撃破壊工学",p183(1990) 技報堂
- 7) J.F.Knott (宮本博訳) ,"破壊力学の基礎",p132 (昭 52) 培風館