

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

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

川建, 和雄
日本文理大学 : 教授

<https://doi.org/10.15017/4744043>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 83, pp.1-9, 1998-03. 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吸収エネルギーと破面エネルギーの関係

石 井 秀 夫* 篠 崎 高 茂†
川 建 和 雄‡

概 要

延性材料である高分子材料ポリカーボネートは、切り欠きを付けることにより、脆性材料であるような破壊の遷移現象が起きる。その破壊の典型的な三破壊形態を示す。また衝撃試験の吸収エネルギーについて、脆性破面に生じる塑性領域が、どんな役割をしているか、破面とエネルギーの関係から考察する。

Key words: brittle, ductile, notch, 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)}。このような外部的な条件以外に、分子量及び熱処理条件等の内部的な条件を変えても、破壊の遷移を生ずる。

本研究では、シャルピー型横衝撃試験機を用い、試験片の厚さを変えた破壊の遷移現象を取り扱い、破壊における吸収エネルギーと破面との関係を考察する。延性材料が示す脆性破壊における塑性領域の重要性を指摘し、併せて、ポリカーボネートの吸収エネルギー及び衝撃値について、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 10 mm の板材より切り出した。図 1 に試験片の寸法を示す。試験片の幅 b は、材料の板厚 10 mm をそのまま用いた。試験片の厚さ t は 1 mm から 13 mm までに、試験片長さ L は 55 mm に加工した。さらに試験片の切り欠き深さ d は 2 mm に、切

*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

‡日本文理大学教授

り欠き半径 r は 0.15 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm の 4 種類に加工した。これらの試験片はシリコン油中に 130°C で 2 時間保持し、0.1°C/min で除冷を行う熱処理を施した。

試験は、空気式滑走台上を滑る重量 0.620 kgf 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 l は 40 mm である。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。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。

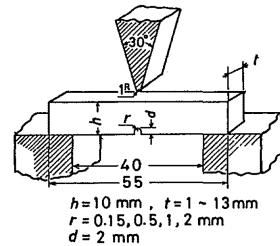


図1 試験片の寸法

3. 試験結果

3.1 破壊の遷移現象

図2には、吸収エネルギー E_{ab} と試験片の厚さ t の関係を示す。切り欠き半径 0.15 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm の 4 種類の試験片を用い、厚さ t を 1 mm から 13 mm まで変えて得た試験結果である。吸収エネルギー曲線は、1 本の延性曲線と各切り欠き半径に依存する 4 本の脆性曲線に分かれる。

吸収エネルギー曲線は、試験片厚さの増大とともに上昇する。試験片がある厚さになると、吸収エネルギーは急激に減少する。この時の厚さを遷移限界厚さ t_m とする。切り欠き半径 0.15, 0.5, 1.0, 2.0 mm に対し、遷移限界厚さ t_m は 1.5, 4.5, 6.5, 9.5 mm で、切り欠き半径が大きくなるに従い、大きくなる。吸収エネルギー曲線は、この厚さ t_m を境に、厚さの小さいところの延性曲線及び厚さの大きいところの脆性曲線から成る。この曲線の急激な変化の現象は、延性破壊から脆性破壊への破壊の遷移現象を示す。

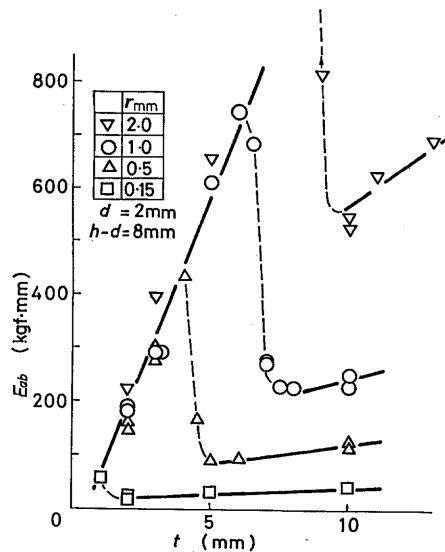


図2 吸収エネルギーと厚さの関係

ポリカーボネートの破壊現象は延性破壊、混合破壊及び脆性破壊の三破壊形態に区分される³⁾。図3には、切り欠き半径 r を 1.0 mm 一定とし、試験片の厚さ t を変化させて得た、三破壊形態の例を示す。試験片厚さ 5 mm の延性破壊形態、厚さ 8 mm の脆性破壊形態、及びその中間 6.5 mm の厚さの混合破

壊形態の破壊破面と荷重-時間線図である。厚さ 5 mm の場合、全体が塑性領域の延性破面である。厚さ 8 mm の場合、切り欠き底に塑性領域を若干含み、その先端の中央部に亀裂の核があり、その核から成長した平坦な脆性破面である。厚さ 6.5 mm では、切り欠き底の延性破面が全体の半分ほどに成長したので、脆性破面に比べて、平坦な亀裂伝播面が小さくなった破面である。荷重-時間線図から、変形時間がわかる。延性破壊では、破壊までの時間が長く、脆性破壊では、その時間は短くなっている。

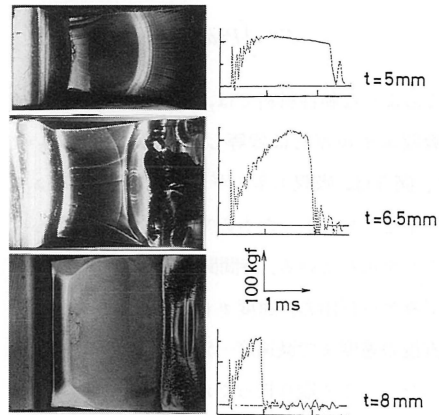


図3 破面と荷重-時間線図

3.2 吸収エネルギー及び衝撃値

図4には、衝撃値と試験片厚さの関係を示す。一般に衝撃値は脆性破壊での議論であるが、ここでは延性破壊にまで拡大解釈し、衝撃値は単位面積あたりの吸収エネルギーと定義して議論する。その延性破壊の衝撃値は、一定でなくばらついている。この原因は、厚さや切り欠き半径により、延性破面が異なるからであると考えられる。脆性破壊では、試験片の厚さが大きくなるほど、衝撃値は少し減少しているように見える。しかし、切り欠き半径が一定の時、試験片厚さが大きい範囲であれば、衝撃値はほぼ一定であると見なすことが出来る。このように脆性破壊の衝撃値は、各切り欠き半径に対してある一定値をとり、その値は、切り欠き半径が大きいほど大きな値を取る。

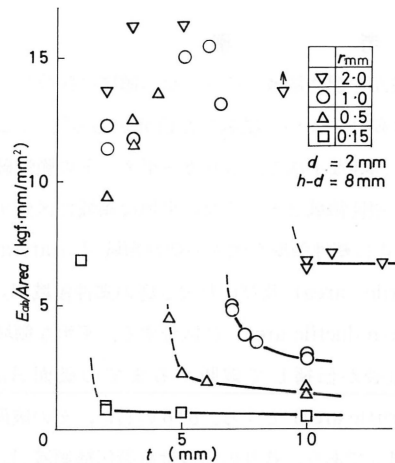


図4 衝撃値と厚さの関係

金属では、一般に衝撃試験で得た衝撃値は、動的試験での強度評価に利用されている。本実験のポリカーボネート材料のように、塑性領域を含む脆性破壊では、試験片厚さ、切り欠き半径や試験温度などにより、衝撃値は異なる値を示す⁴⁾ので、その時の試験条件は重要な因子である。

3.3 破壊エネルギー

脆性材料では、荷重 P -時間 t 線図から求められる破壊エネルギーは、塑性変形を伴わない有効エネルギー、即ち亀裂の生成とその拡大成長に費やされるエネルギーとして、次式のように定義される。

$$E = \int P v dt \quad (1)$$

このような脆性材料では、その破壊エネルギーは吸収エネルギーとほぼ等しいと報告されている⁵⁾。図5は、吸収エネルギー E_{ab} に対し、破壊エネルギーをプロットしたもので、両者がほぼ等しいことを示している。時間間隔 $5 \mu s$ 、荷重 P はひずみゲージ出力、速度 v は、衝突速度から破壊直後の速度まで減速度一定と仮定したものをを用いた。ここで取り扱ったポリカーボネートでは、切り欠き底及び側面に塑性領域を含んでいるにも関わらず、切り欠き半径 2 mm の試験片以外は、破壊エネルギーは吸収エネルギーにほぼ等しい結果が得られた。これは塑性領域の大きさが比較的小さいことによるものと思われる。

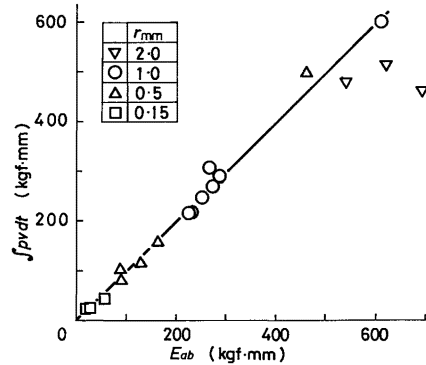


図5 破壊エネルギーと吸収エネルギー

4. 考 察

破面を塑性領域とそうでない領域に区分して破壊靱性について議論した研究がある⁶⁾。ここでも同様な手法で、ポリカーボネートの脆性破面を塑性領域とそうでない平坦な領域に区分する。更に塑性領域を側面の塑性領域 A_{ld} (lateral ductile area) 及び切り欠き底の塑性領域 A_{nd} (notch ductile area) に区分する。平坦な領域は亀裂が伝播して破断するまでの破面 A_{br}

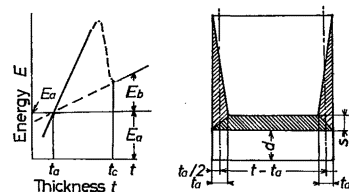


図6 $E-t$ 線図及び破面のモデル

(brittle area) とする。図6の右に、その破面の模式図を示す。図の斜線部分が塑性領域 A_{ld} と塑性領域 A_{nd} であり、残りの領域は亀裂伝播領域 A_{br} であるとする。

破壊エネルギーは、これらの破面を形成したエネルギーから成り立つと仮定する。図5の結果より、破壊エネルギー E を吸収エネルギー E_{ab} に置き換えることが出来るとして、各区分した破面を形成するエネルギーを、側面の塑性領域エネルギー E_{ld} 、切り欠き底の塑性領域エネルギー E_{nd} 、及び亀裂伝播領域エネルギー E_{br} と定義する。

$$E_{ab} = E_{nd} + E_{ld} + E_{br} \quad (2)$$

上式の吸収エネルギー E_{ab} は破面を形成する三つの領域で成り立つ。吸収エネルギーに含まれる試験片飛散時の運動エネルギーや熱損失となる熱エネルギーなどは、ここでは無視している。

4.1 側面の塑性領域の影響

4.1.1 吸収エネルギー曲線の解釈

図6の左に、図2の吸収エネルギー曲線を模式的に示す。曲線は、遷移厚さ t_c を境に、左右に延性曲線と脆性曲線に分かれる。脆性破壊の起こる範囲 $t > t_c$ で考えることとする。その脆性曲線を厚さの小さい方に延長し、延性曲線との交点を厚さ t_a 、エネルギー E_a とする。

厚さ t における試験片の吸収エネルギー E_{ab} は、厚さ t_a に対応する領域のエネルギー E_a とその領域以外
のエネルギー E_b の和で、

$$E_{ab} = E_a + E_b \quad (3)$$

の様に表される。ここで、側面の塑性領域 A_{ld} を形成するエネルギー E_{ld} はエネルギー E_a と等しいと仮定すれば、

$$E_{ld} = E_a \quad (4)$$

$$E_{nd} + E_{br} = E_b \quad (5)$$

となる。

図7に、破面写真から求めた側面の塑性領域の幅 t_a を示す。切り欠き半径が一定であれば、試験片の厚さが大きいところで、塑性領域幅 t_a はほぼ一定となる。図8に、写真から求めた、塑性領域の幅 t_a を切り欠き半径 r に対して示す。併せて、図6の左の模式図の方法で求めたグラフ上での厚さ t_a を示す。グラフで求めた厚さ t_a 及び、写真で求めた t_a は、切り欠き半径が大きくなるほど大きくなる。両者は切り欠き半径に対して、同様な傾向であるので、グラフ値 t_a は写真値 t_a に対応していることがわかる。即ち、側面の塑性領域エネルギー E_{ld} はエネルギー E_a に対応した値であり、この値は切り欠き半径が大きくなるとともに大きくなる。

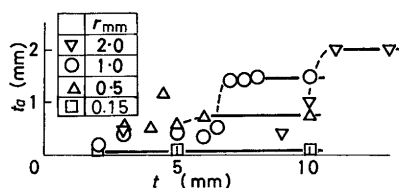


図7 側面の塑性領域の大きさ

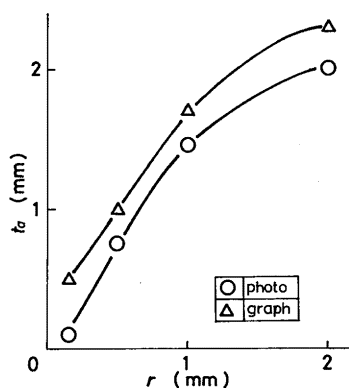


図8 側面の塑性領域の大きさ

4.1.2 衝撃値

図9には、 $(dE_b/dt)/(h-d)$ の式で計算した衝撃値の値 α_t を示す。これは側面の塑性領域の影響が小さい、即ち、厚さ t の大きい試験片に当てはまる衝撃値の値である。併せて、試験片厚さ10 mmの衝撃値 α_{10} と遷移厚さ t_c における衝撃値 α_c の値を図9に示す。 α_t の値は、遷移厚さでの衝撃値 α_c よりも明らかに小さい値である。この三者の衝撃値は側面の塑性領域の相対的な大きさ (t_a/t) に従い、 $\alpha_c > \alpha_{10} > \alpha_t$ の順に小さくなる。これは側面の塑性領域の大きさが、衝撃値に影響を与えていることを示している。衝

撃値 α は、切り欠き半径2, 1, 0.5, 0.15各mmの試験片では、4.6, 1.55, 0.8, 0.35各kgfmm/mm²となる。また α は、切り欠き半径1mmより小さい範囲では、切り欠き半径にほぼ比例する。即ち、 $\alpha_k = kr$ 、 $k = 1.55$ kgfmm/mm²となることが導かれる。衝撃値が切り欠き半径による異なるのは、切り欠き底の塑性領域の大きさと関係が深いからであると考える。

4.2 切り欠き底の塑性領域の影響

図10には、破面から計測した切り欠き底の塑性領域の大きさ s と試験片厚さ t の関係を示す。切り欠き半径0.15mmでは、大きさ s は厚さ t に関係なく約0.1mmである。その他の切り欠き半径についても、厚さ t の大きなところでは、切り欠き半径により、大きさ s はほぼ一定であり、その値は切り欠き半径が大きいほど大きい。

図11には、図10から求めた塑性領域大きさ s と切り欠き半径 r の関係を示す。その s は r に比例する。ほぼ $s/r = 0.65$ である。図9と図11の関係から、衝撃値 α は塑性領域大きさ s と比例関係にあることがわかる。しかし、切り欠き半径2mmの試験片では、この衝撃値 α も比例関係から大きくはずれている。この原因は塑性領域が大きくなり、変形が二次元で議論出来る範囲を越えたからであると考える。

5. 衝撃値及び吸収エネルギーの解釈

5.1 衝撃値

図9の衝撃値 α は、(5)式の側面の塑性領域を除いて求めたエネルギー E_0 を用いて求めた値である。この領域を形成している破面を、切り欠き進展方向の大きさ、即ち、リガメントの長さ $(h-d)$ 方向に区分すると、切り欠き底の塑性領域の大きさ s の破面と亀裂伝播領域の大きさ $(h-d-s)$ の破面に区分される。この破面を(5)式のエネルギーに対応させると、前者は切り欠き底の塑性領域エネルギー E_{nd} に、後者は亀裂の伝播領域エネルギー E_{br} となる。

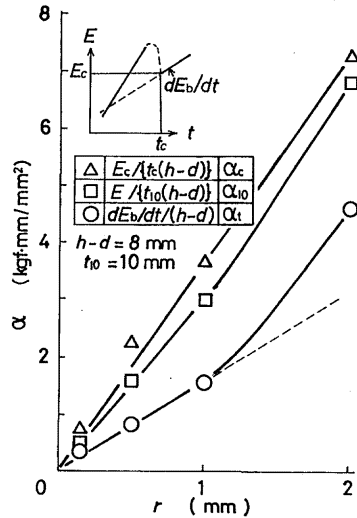


図9 単位面積当たりの破面エネルギー

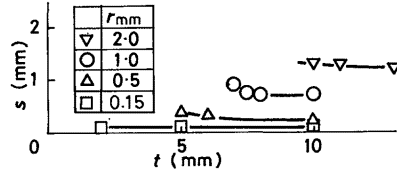


図10 切り欠き底の塑性領域の大きさ

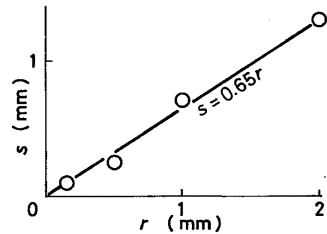


図11 切り欠き底の塑性領域の大きさ

エネルギー E_{nd} は、塑性領域の単位面積あたりのエネルギー α_d で、またエネルギー E_{br} は、亀裂破面の単位面積あたりのエネルギー α_b で構成されていると仮定すると、衝撃値 α_t は α_d 及び α_b の値が分かれば、

$$\alpha_t = \alpha_d \times s / (h-d) + \alpha_b \times (h-d-s) / (h-d) \quad (6)$$

と求められる。ここで、衝撃値 α_t は一对の破面を形成するエネルギーであるから、 α_d は一对の塑性領域の破面を形成する単位面積あたりのエネルギーであり、また α_b は一对の亀裂破面を形成する単位面積あたりのエネルギーであると解釈する。延性破面の単位面積あたりのエネルギーは、図1の吸収エネルギーの延性曲線の傾き dE/dt の値をリガメントの長さ $(h-d)$ で割って求めると 16.5 kgfmm/mm^2 値となる。これを塑性領域の単位面積あたりのエネルギーで成り立つとし、 α_d の値は 16.5 kgfmm/mm^2 とする。

図12には、衝撃値と切り欠き半径の関係を示す。図9で示した脆性曲線の傾きから求めた衝撃値 α_t は白丸印で示す。これに対し、式(6)で、第1項の塑性領域のみを考慮して求めた衝撃値を白三角印で示す。図より、切り欠き半径 1 mm 以下では、衝撃値白三角印は衝撃値 α_t に大体あっている。これは先に図9と図11の比較から導き出した、衝撃値 α_t は塑性領域大きさ s とほぼ比例関係にある結論を支持するものである。しかし、切り欠き半径の大きな 2 mm の値では、衝撃値 α_t から大きく外れている。これは塑性の変形が大きく、二次元問題では十分に説明できないからであると考えられる。

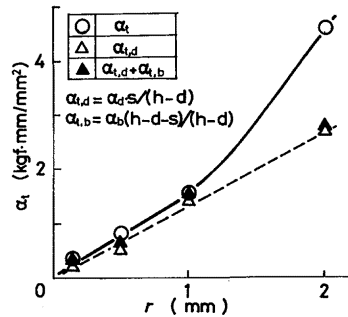


図12 単位面積当たりの破面のエネルギー

切り欠き半径が小さい場合について、前述した計算法を吟味してみる。例えば $r=0.15 \text{ mm}$ の時、 α_t の値は、 0.21 kgfmm/mm^2 となり、計測値 0.35 kgfmm/mm^2 の値の 60% 相当分しか表さない。切り欠き半径が r が小さい時は、塑性領域は小さくなるから、塑性領域のみを考慮に入れた近似では、精度が悪くなるものと考えられる。ここで、図9において導いた関係 $\alpha_t = kr$ 、 $k=1.55 \text{ kgfmm/mm}^2$ を利用し、 $r=0.1 \text{ mm}$ の時、得られる値 $\alpha_t=0.155 \text{ kgfmm/mm}^2$ を α_b の値として採用することにする。

式(6)の中で、 $\alpha_b=0.155 \text{ kgfmm/mm}^2$ 、 $\alpha_d=16.5 \text{ kgfmm/mm}^2$ を用い、亀裂破面を考慮して求めた、衝撃値を図の黒三角印に示す。図12で、黒三角印と白三角印の値を比較すると、黒三角印の値の方が計測値に近い値を示す。切り欠き半径が小さい試験片の計算値は、亀裂破面を考慮した方が、相対誤差が小さくなる。しかし、塑性領域のみを考慮した白三角印の値は、十分に衝撃値 α_t を近似していることはすでに述べた通りである。

5.2 吸収エネルギー

図12から、各切り欠き半径に対する衝撃値 α_t は、塑性領域の大きさ s で決まるエネルギーで近似できることがわかったので、側面を含む破面全体を形成する塑性領域の面積と吸収エネルギーについて考察する。厚さ 10 mm 、 5 mm 、 2 mm の試験片について、図6のモデル図に従い、破面の塑性領域の占める面積

を求める。図13に、破面の塑性領域の面積(plastic area)と切り欠き半径との関係を示す。但し、延性破壊試験片については、破面の塑性領域の面積として全断面積をとった。

図13で求めた塑性領域の面積に、塑性領域の単位面積あたりのエネルギー a_0 を掛けて、破面全体のエネルギーとして吸収エネルギーを求める。図14は実験で求めた吸収エネルギー(白丸印, 白三角印, 白四角印)と計算で求めた吸収エネルギー(黒丸印, 黒三角印, 黒四角印)を示す。厚さ10 mmの試験片ではすべて脆性破壊であり、厚さ5 mmの試験片では、切り欠き半径0.5 mm以下では脆性破壊である。厚さ2 mmの試験片では切り欠き半径0.15 mmのみ脆性破壊である。図より、試験片厚さ2 mmの延性破壊以外は、比較的計算値と実験値があっている。即ち、ポリカーボネートのほぼ吸収エネルギーは塑性領域を形成するエネルギーで表すことが出来る。

6. 結 言

(1) ポリカーボネートの吸収エネルギー曲線は、脆性破壊曲線と延性破壊曲線の2本の曲線に区分される。

(2) ポリカーボネートの吸収エネルギーは $E = \int Pvd\tau$ で表される破壊エネルギーとほぼ等しい。

(3) ポリカーボネートの延性領域の破面を形成する単位面積あたりのエネルギーは16.5 (kgfmm/mm²)である。

(4) 切り欠き底の塑性領域の大きさ s は切り欠き半径 r とともに大きくなり、切り欠き半径の約0.65倍である。

(5) 脆性破壊の衝撃値は切り欠き半径に依存し、切り欠き底の塑性領域の大きさに関係する。

(6) ポリカーボネートの脆性破壊の吸収エネルギーは側面の塑性領域、及び切り欠き底の塑性領域で占める破面エネルギーでほぼ決まる。

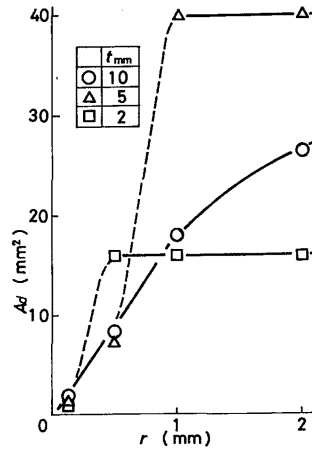


図13 塑性領域の面積

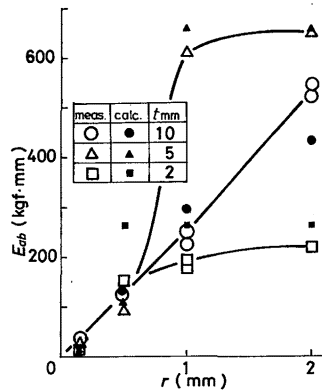


図14 吸収エネルギー

参 考 文 献

- 1) 百武 秀, 西谷 正: 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), pp. 888-893
- 2) N. J. MILLS: The mechanism of brittle fracture in notched impact tests on polycarbonate, J. Mater. Sci. **11** (1976), pp. 363-373
- 3) A. F. YEE: The yield and deformation behaviour of some polycarbonate blends, J. Mater. Sci., **12** (1977), pp. 757-765
- 4) 加賀谷忠治, 加藤政則, 八嶋昭弘, 川口幸宏, 江上 登: S 15 CK 同種摩擦圧接継手の延性一ぜい性遷移挙動, 材料, **40**, 455 (1991), pp. 1025-1029
- 5) 日本機械学会編, “衝撃破壊工学”, p. 183 (1990) 技報堂
- 6) J. F. Knott (宮本博訳), “破壊力学の基礎”, p. 132 (昭 52) 培風館

(平成 9 年 10 月 17 日 受理)