

プラスチック板材の脆性破壊強度と破面模様について

瀧本 昭夫*・古海 純彦**・国木 信生***
松隈 浩一****・吉村 健治*

A Relationship between the Fracture Strength and the Fracture Surface Markings of Brittle Plastic Plates

Akio TAKIMOTO, Sumihiko FURUUMI, Nobuo KUNIKI,
Kouichi MATSUKUMA and Kenji YOSHIMURA

Abstract

An experimental relationship between the fracture strength and the parabola marking density on the fracture surface has been investigated on the plate material of the unsaturated polyester resin. Fracture tests were conducted both on mild notch tensile specimens and on single edge notch impact specimens having the arbitrary notch depth and radius. The fracture strength in tension decreases with the length to width ratio in the outside loading method and increases with that in the inside loading method. The fracture energy decreases in different degrees in each method of loading. The parabola marking density on the fracture surface increases as the fracture strength increases in tension. The fracture energy and the parabola marking density increase with the decreases in the notch depth and/or sharpness in Charpy impact tests. Consequently, the parabola marking density increases with the increases in the fracture strength and energy both in tension and impact tests. The results are discussed on the energy point of view by using the analytical fracture markings and reasonable conclusion is drawn.

1. 緒 言

ガラス状プラスチック材例えば P. M. M.A. の破面模様は鏡面、遷移及び粗面の領域を成し各々の領域内でも種々の破面模様を呈する。それらの中でも最も良く観察されるのは遷移領域近傍の放物線模様であり、その形成機構モデルは Feltner¹⁾ や Berry²⁾ によって示されている。著者らは 1 次及び 2 次波速度による干渉を考えて、点 (小円)、だ円 (及び翼型だ円)、放物線及び双曲線模様の生成する事を示し、中でも Berry の定応力解を適用した結果は実験結果をかなり良く表現し得る事を示した³⁾。だ円及び放物線模様共に 1 次き裂の伝播と共に大きくなりその大きさは干渉開始距離 e 値等によって表し得る。一方 Berry の式⁴⁾ によ

れば運動エネルギーは 1 次き裂の伝播と共に大きくなる。これらの点から破面模様の大きさと運動エネルギーの間には何らかの関係が存在することが予測される。脆性破壊エネルギーは表面エネルギー及び運動エネルギーに費やされる大きさで決まり、又脆性破壊強度の 2 乗に比例する量としても表し得る。従ってこの研究では、これら破面模様、脆性破壊強度及び破壊エネルギーの間に存在する関係を引張り及び衝撃試験により追求したものに加えて解析解により検討した結果を報告する。

2. 実験方法

供試材は、熱硬化性不飽和ポリエステル樹脂である。これは液状であるが、硬化剤及び硬化促進剤を適量混入し、所望の型に注型し硬化させる。そして、残留応力除去及び材料の均質化を図るため、80°C で 2 時間加熱する。こうして得られた材料は、高い脆性を示し、またその破面にはプラスチック脆性材料に特徴的な破

* 生産機械工学科
** 大学院生産機械工学専攻
*** 生産機械工学科 (現、新日本製鉄株式会社)
**** 生産機械工学科 (現、日産自動車株式会社)

面模様が見られる。

実験は、静的な試験として単軸引張試験を動的な試験としてシャルピー衝撃試験を行った。試片は上述の板材からそれぞれ機械加工及び手仕上げによって作成した。引張試片は、厚さ (t) 4 mm, 幅 (W) 104 及び 116 mm, 治具板間距離 (G), $0.1W \sim 2W$ の矩形を成し、中央に切欠き長さ $2C_{01} = 0.3W$ の丸み切欠きを導入した。切欠き半径 (r) は、10 mm と 5 mm (幅 104 mm の試片) 及び 2 mm (幅 116 mm のもの) とした。設計上の応力集中係数 (K_t) は、それぞれ 3.5, 4.5 及び 7.5 である。衝撃試片は、切欠き半径及び切欠き深さの影響を求める為に、特に厚さ 6 mm, 幅 15 mm, 長さ 70 mm とし、長さ方向中央に、片側端面切欠きを持つものを用いた。切欠き半径及び切欠き深さを変数として、前者は 0.5~5 mm まで 5 種類及び後者は 1~3 mm まで 3 種類変化させた。

引張試験は、容量 5 ton の島津オートグラフ引張試験機にて、クロスヘッドスピード 0.5 mm/min, 室温で単軸引張試験を行った。負荷方法としては、治具板間距離を変化させたものについて、切欠きの外側または内側に集中負荷が加わる外側負荷 (Outside Loading) 及び内側負荷 (Inside Loading) を考え、荷重がそれぞれの負荷様式になるよう設計した治具にて、破壊実験を行った。衝撃試験は、容量 3.96 J のシャルピー試験機を用い室温にて切欠きの反対側から打撃を加えた。なお両試験に際し、試片表面は、微細な傷も取り除くよう注意深くバフ研磨仕上げをして試験に供した。

引張試験では、破壊強度 (σ_f) 及び破壊に要したエネルギー (U_0) を、衝撃試験では、衝撃吸収エネルギー (E_i) などを算出した。

試験後、試片の破面をそれに平行に注意深く切り取り、ニコン光学顕微鏡下、100~1000 倍で破面模様観察を行い、必要に応じて写真撮影をした。又、70~2800 倍のモニターテレビにても破面模様やその密度測定などを行った。

3. 実験結果及び考察

脆性プラスチック材料の破面には、点 (小円) 状のものからだ円又は翼型だ円、さらに放物線状の種々の模様が見られる。これらの模様は、き裂伝播の 2 次波速度 (V_2) と 1 次波速度 (V_1) の比で定量されることが報告されている³⁾。又 V_2/V_1 の比を 1.0 以上にすると双曲線模様の出現も可能であり実際にその様な破面模様も観察されている。この報告では、機械的諸性質の

測定に加えてそれら模様の密度変化に主眼をおき、それと破壊強度及び破壊に要したエネルギーなどの関係について検討を加えた。ここで模様密度とは、破面上で単位面積内に存在するこれら模様の個数であり、これを破面模様密度 (以後 ρ_p と記す) とした。 ρ_p 値の増加による破壊靱性の増加については、Cotterell⁵⁾ も P.M.M.A. を用いて提唱しているが、破面模様の定量関係とは何の相関性も見出していない。前述したように我々は、不飽和ポリエステル樹脂の引張試験及び衝撃試験でこれらの関係を見出し、特に引張試験では、負荷様式による強度変化との相関性も調べ興味ある関係を得た。何れの場合も破壊強度及び破壊エネルギーの上昇と共に破面模様密度が高くなる傾向を把握した。下記にそれらについて詳しく報告する。

写真 1 にプラスチック破面模様の 1 例を示す。それぞれ放物線破面模様密度 $\rho_p = 364, 515$ 及び $1520/\text{mm}^2$ のものであるが、何れも $200 \sim 10,000$ 程度の大きさの放物線模様がみられる。 ρ_p 値が大きくなると共に当然個々の模様の大きさは細くなり、図中 (a) 及び (c) の比較、即ち、同じ設計応力集中係数のものでは、 ρ_p 値が大きい程、破壊強度も大きいことが確認できる。さて、この ρ_p 値が一試片内でき裂伝播長さと共にど

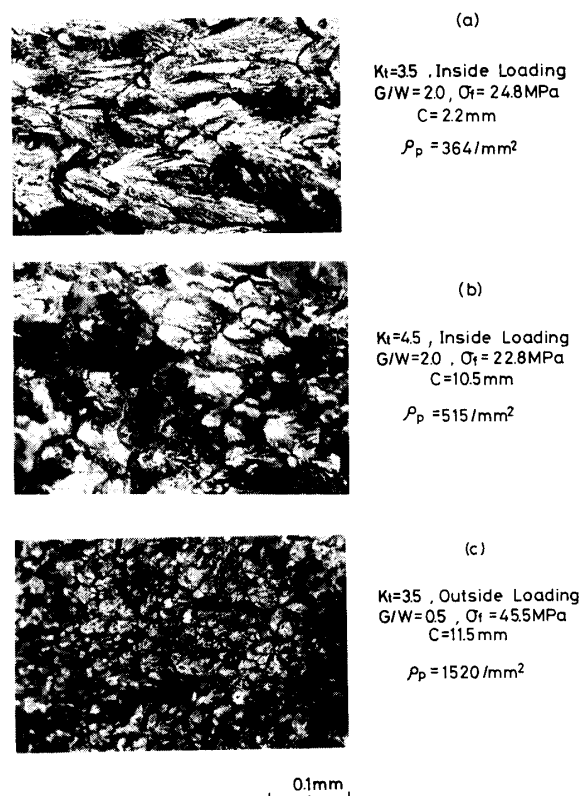


Photo. 1 Examples of the marking densities having different fracture strengths in tension.

のように変化しているかを示したのが図1及び図2である。両図ともき裂伝播長さの変化と共に ρ_p 値も相

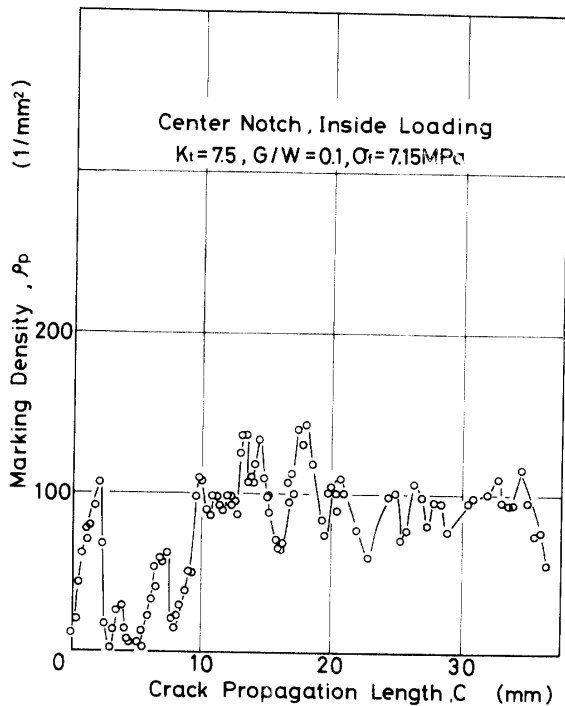


Fig. 1 Variation of the marking density with the crack propagation length for a tensile specimen of the fracture strength, $\sigma_f = 7.15$ MPa.

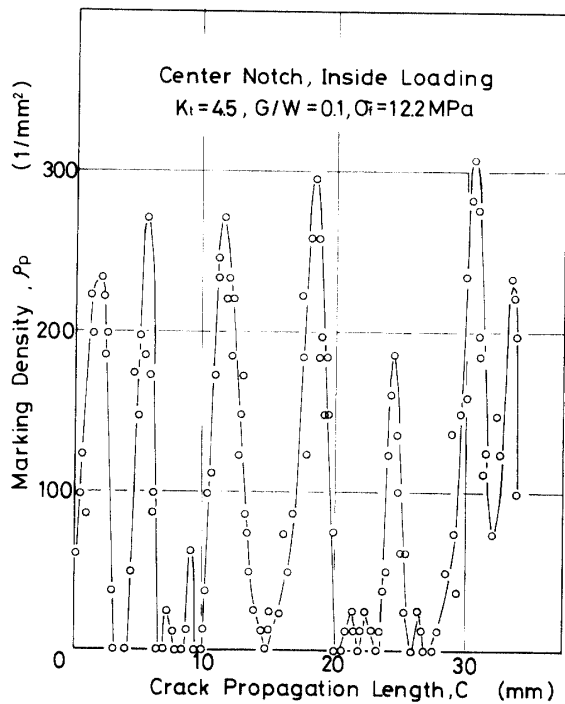


Fig. 2 Variation of the marking density with the crack propagation length for a tensile specimen of the fracture strength, $\sigma_f = 12.2$ MPa.

当変動しながらその極大値は増加する傾向を示している。一方、き裂伝播はしばしば主き裂からの分岐を伴う(即ち、分岐破壊)ものであるが、両図の横軸は主き裂の伝播長さを示したものであり、切欠き底のき裂開始点からの距離である。破壊核位置は試片厚さ方向の中央に常に存在するとは限らないので、 ρ_p 値は破壊核位置の厚さ方向の偏心距離を一定に保ちながら伝播距離(C)だけを変化させ測定した。図1には破壊強度の低い試片の結果を示した。この場合、き裂長さが10 mm程度のところで ρ_p 値は割合安定した値に達しているが、それに比べ図2に示した破壊強度が12.2 MPaの結果では、不規則な変動はき裂伝播の終り近くまで続き且つその振幅も大きい。さらに破壊強度が大きくなればこの振幅も大きく、変動も激しいものとなっている。なおこれら密度変化は先に述べた分岐破壊のひん度とも関係しており、分岐の度合が激しい程、密度曲線の振動も激しい。図3は、いくつかの引張試験結果を総括して、横軸に相対き裂長さ(き裂伝播長さを破壊の起点となった微小き裂の半径で割った値)、

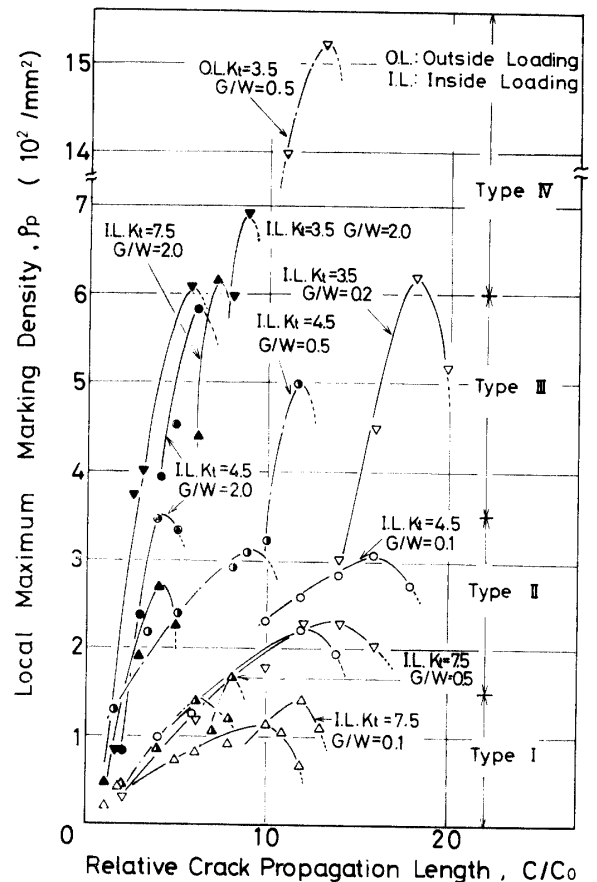


Fig. 3 An increase in the local maximum of the marking density with respect to the relative crack propagation length for various tensile specimens.

縦軸に極大破面模様密度を示したものである。またき裂伝播様式の種類は、破壊強度の小さいものに対する直線状伝播様式即ち全然分岐しないで破壊するもの (Type I)、分岐伝播様式 (Type II)、直線状伝播様式に微少なささくれが伴うもの (Type III)、分岐状伝播様式に微少なささくれが伴うもの (Type IV) と分けられることが報告⁶⁾されており、各破面模様密度範囲に応じそれらの伝播様式も付記した。図より最大破面模様密度 (以後 ρ_p^{max} と記す) の高いものは、相対き裂長さに対して、急激な立ち上がりを示し、短い伝播距離で最大値に到達する傾向を示している。又ここには破壊強度の値は示していないが、Type I から Type IV に至るにつれて、破壊強度 (σ_f と記す、破壊荷重を切欠き部正味断面積で割った値) は高くなっており、 ρ_p^{max} 値の高いもの程、 σ_f 値も高くなっている⁶⁾。これらの関係を ρ_p^{max} 値と σ_f 値で表現してみたものが図4である。実験は16種類の負荷様式及び試片形状の異なるもので行ったわけであるが、全体として明白な増加傾向を示している。なお前掲の写真1の (a) 及び (c) は Type IV のき裂伝播様式で壊れたものの破面写真であり (b) は Type III のものの例である。

σ_f 値と破壊エネルギーの関係は、破壊に関与する全体積を V とすると、脆性破壊では、全エネルギー

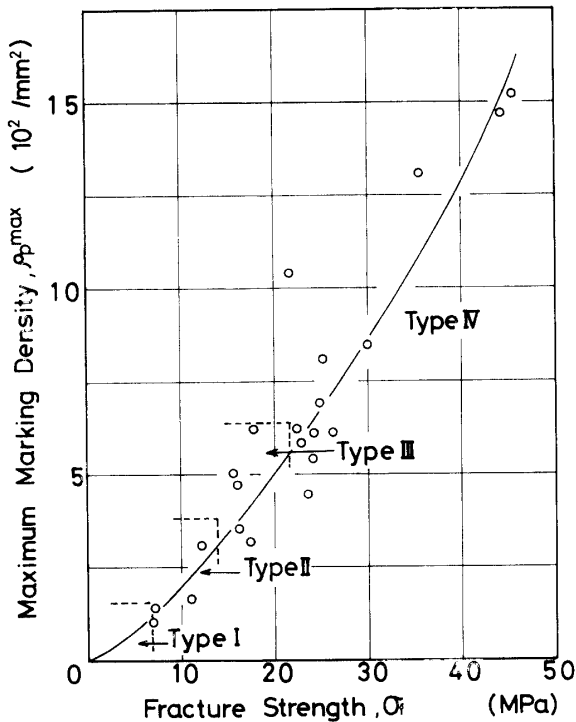


Fig. 4 A relationship between the maximum value of the marking density and the fracture strength for mild notch tensile specimens.

は $U_T = V \times \int \sigma d\epsilon = \sigma_f^2 \times V / 2E$ となり、 σ_f の2乗に比例することになる。一方応力ひずみ線図により求めた吸収エネルギーが全て破壊に消費されるとして求めた関係は図5である。図より吸収エネルギー (U_e) に対し、 ρ_p^{max} 値は増加の傾向を示すことはわかるが、前述の16種の引張試験の結果を1図に表現している為か

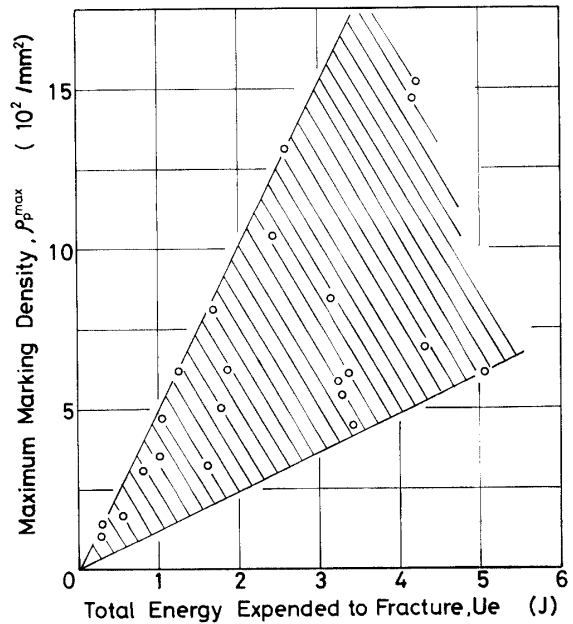


Fig. 5 A relationship between the maximum value of the marking density and the total energy expended to fracture (fracture energy) for mild notch tensile specimens.

なりの幅を持つ帯状を示している。この拡がりの主な理由は上記の如く、負荷様式及び試片形状 G/W 値の違う試片を用いた全ての結果を示した為であり、同一負荷様式でも G/W 値の変化により当然試片の体積が異なり、破壊に関与する有効体積 (V_{ef}) も異なっている事と考えられる。吸収エネルギーが破壊時に全部開放されると考えると、同じ破壊強度のものでも G/W 値が異なれば、等価ヤング率 ($E' = (V_{ef}/V) \times E$) も変わり吸収エネルギーが変わってくることになる。従って同図の全消費エネルギーに対する ρ_p^{max} 値変化は、負荷様式及び試片体積を考慮しなければならない。次にこの点について検討する。

引張試験は第2項でも述べた如く、負荷方法として外側負荷及び内側負荷を考え、それぞれの方法について試片形状 G/W 値を変化させて行った。 G/W 値と σ_f 値の関係及び単位有効体積当りの吸収エネルギー U_e/V_{ef} 値と ρ_p^{max} 値の関係を図6 (外側負荷) 及び図7 (内側負荷) に示す。図6 (a) では、 σ_f 値は G/W

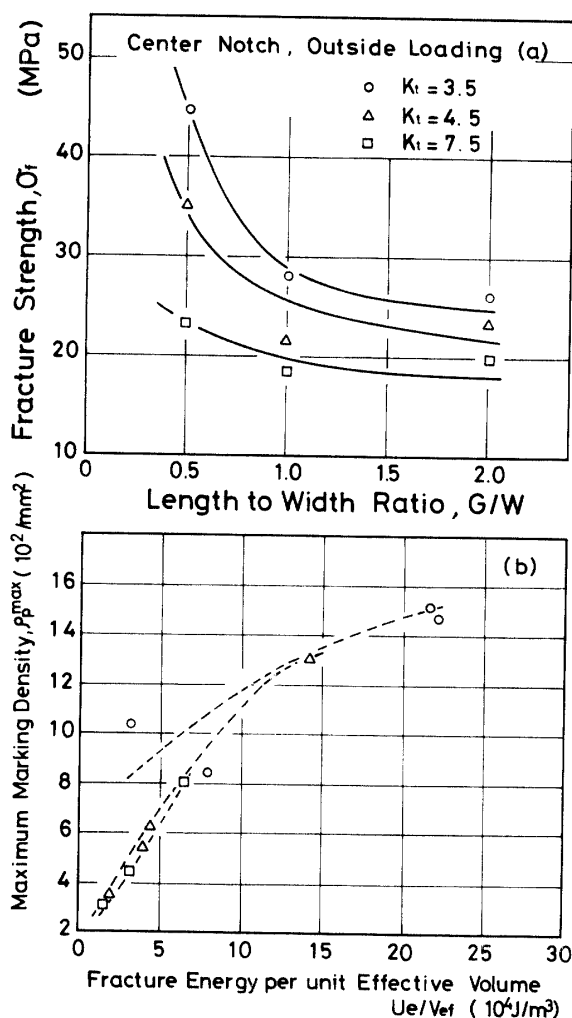


Fig. 6 Two relationships are shown for the center notch specimens fractured in the outside loading method: (a) the loss in the fracture strength with the length to width ratio of a tensile specimen, (b) the increase in the maximum value of the marking density with an increase in the fracture energy per unit effective volume.

値の増加に対して減少傾向にある。図中の点は、3試片以上の平均値であり、設計応力集中係数が大きい程、 σ_f 値は低い値を示している。同図 (b) は、図 5 に示したデータのうち、外側荷様式のものについて有効体積当りのエネルギーと ρ_p^{\max} 値との関係を示したものである。ここで有効体積とは、エネルギーを主として蓄える体積 (V_{ef}) のことであり、 $V_{ef} = (G \times W - S) \times t$ (S は切欠き部空隙面積) と定義した。この関係を見ると U_e/V_{ef} 値の増加に対しては、 ρ_p^{\max} 値は明らかに増加している。なおここでは報告していないがこの場合 U_e 値は G/W 値の増加と共に減少する⁷⁾。又 G/W 値の増加は有効体積の増加をもたらすことにな

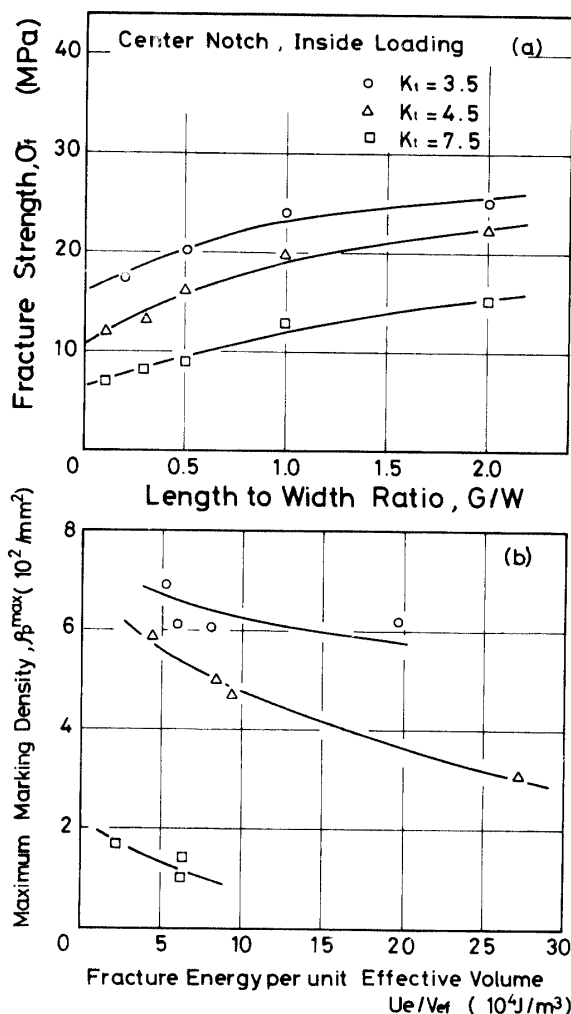


Fig. 7 Two relationships are shown for the center notch specimens fractured in the inside loading method: (a) the increase in the fracture strength with the length to width ratio of a tensile specimen, (b) the loss in the maximum value of the marking density with an increase in the fracture energy per unit volume.

り、結果として、 U_e/V_{ef} 値は G/W 値の増加に対し減少する事になり、その減少割合は大きい。従って図 6 (a) において G/W 値が 2.0 (右端) の値は同図 (b) の左端に近い点に相当することになり、逆に G/W 値が 0.5 に相当するものは (b) 図の右端に近い点に相当することになる。ここで図 4 に示した関係、 $\rho_p^{\max} = a \times \sigma_f$ (ここで a は正の定数) を考えると、試片形状 G/W 値が小さくなる程、破壊強度が大きくなり、破壊エネルギーも大きくなり、最大破面模様密度 ρ_p^{\max} も大きくなるという関係が成立している。図 7 の内側荷荷の場合、(a) 及び (b) と外側荷荷とは対称的な傾向を示している。 σ_f 値は G/W 値の増加と共に増加の傾向を示すが、 U_e/V_{ef} 値は、外側荷荷と同様に減

少する。又ここには報告していないが、 U_e 値そのものは、 G/W 値と共に増加し、その増加割合はゆるやかである。ところが、 V_{ef} 値の G/W 値による増加はそれ以上の割合となり、結果として U_e/V_{ef} 値は、緩慢に減少することになる。従って ρ_p^{max} 値は、 U_e/V_{ef} 値に対して減少傾向を示すことになる。しかしここでも σ_f 値及び U_e 値の増加と共に ρ_p^{max} 値が増加する傾向が現れており、この傾向はこれまで述べて来た事と一致する。

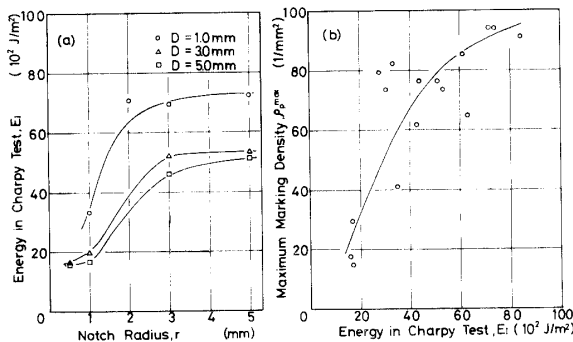


Fig. 8 Two relationships are shown for Charpy test on single edge notch specimens where the notch depth and radius are changed: (a) the absorbed energy increases with an increase in the radius, (b) the maximum value of the marking density increases with an increase in energy.

図8には衝撃吸収エネルギー（以後、 E_i と記す）と切欠き半径 (r) の関係を示した。図中切欠き深さ (D) は3段階に変えたが、それぞれについて r 値を大きくすると E_i 値は増加し、 $r=1\sim 2$ mm の間で急激な増加傾向を示している。さて衝撃試片の破面についても模様密度変化を求めた。そのうち ρ_p^{max} 値と E_i 値の関係を同図 (b) に示した。図に示す如く、 E_i 値の高いもの程、 ρ_p^{max} 値の大きい傾向が現れている。以上引張試験及び衝撃試験の両結果にみる如く、何れも破壊強度及び破壊エネルギーの高いもの程最大破面模様密度が高いという事実が示された。

これまでは、放物線破面模様密度の実測値について述べて来た。前にも触れた様に破面模様の形状には、点 (小円)、翼型だ円及び放物線状のものがある。その1例として、不飽和ポリエステル樹脂のものを写真2に示す。(a) 及び (b) は引張試片破面で観察されたもので、(a) には翼型だ円状の例を (b) には放物線状のそれを示す。また (c) には衝撃試片破面における放物線模様例を示す。これらの模様の形成機構については、「き裂伝播の1次波と2次波の干渉結果の根拠」と言う考え方で説明されることは先に紹介した。この結

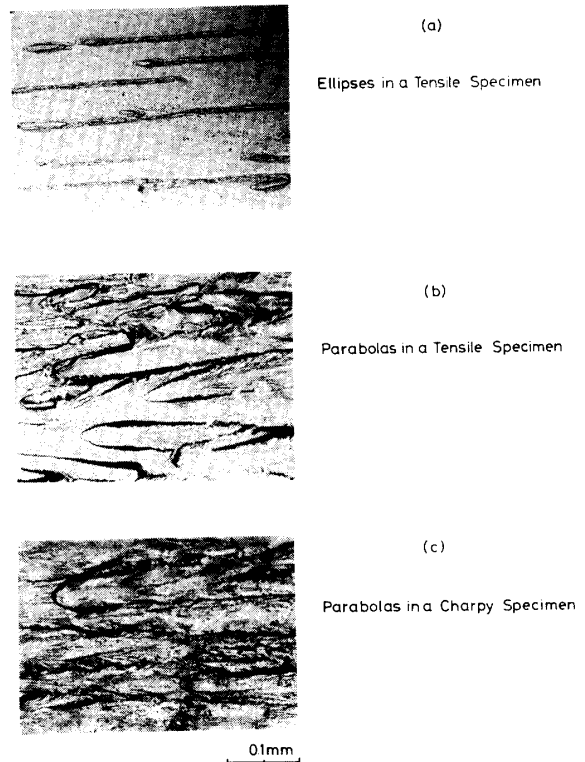


Photo. 2 Typical fracture markings of ellipses and parabolas observed in tension and impact tests.

果を用いて、次に模様変化、模様密度、運動エネルギーなどについて検討してみる。

今 xy 平面で、 $x=0$ の点に直径 $2C_{02}$ の微小2次き裂があり、 x の負の方向の遠方上にある1次き裂長さ $2C_{01}$ から発生した1次き裂伝播波が x 軸に沿って進行してくるとする。この1次波が $x=-d$ (d は臨界距離) なる距離に達した時に直径 $2C_{02}$ の2次き裂核から2次波の伝播を誘発し、 $x=-e$ ($e < d$) のところで両波の干渉が始まる (e は干渉開始距離)。1次波は等速で伝播し、2次波には、Berry⁴⁾ の加速度伝播を考え、干渉模様を表現する式として次式が提案されている³⁾。

$$\beta'(d+x)/C_{02} = (\alpha-1)^2 \{ \alpha - (n-1) \}^2 + n \ln [(\alpha-1)^2 + \{ \alpha - (n-1) \}^2] - \{ n \ln (2-n) \} / 2 \quad (1)$$

ここで $\alpha = (x^2 + y^2)^{1/2} / C_{02}$

$n = 2(\sigma_g / \sigma_c)^2$, $\beta' = V_m / V_1$

σ_g : グリフィス応力, σ_c : 臨界応力

V_m : き裂伝播最大速度, V_1 : 1次波速度

この関係を用いて、縦軸に y/C_{02} を横軸に x/C_{02} をとり、 $\beta'=1.0, n=1.95$ として $d=3\sim 60$ の範囲でマイクロコンピュータにより干渉模様を描かせてみたのが図9である。この干渉模様は実際に観察される破面模

様に酷似しており、相対臨界距離 d/C_{02} が大きい値をとるにつれ、模様は点(小円)、翼型だ円及び放物線状に変化することが分る。

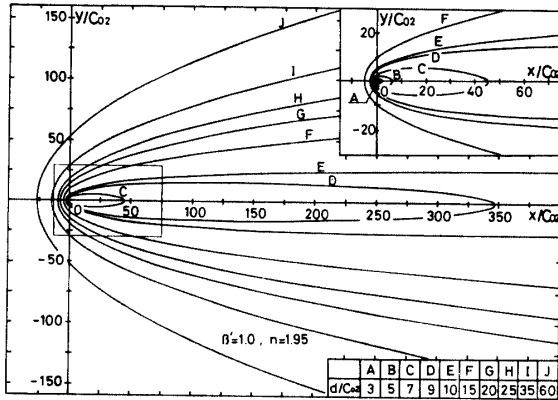


Fig. 9 Analytical interference markings calculated by Eq. (1).

一方、Berry の運動エネルギー式に n 及び σ_g を代入して表現し直すと相対運動エネルギーは、

$$K/4\gamma C_{01} = (1/n)(C_1/C_{01})^2(1 - C_{01}/C_1) \times \{1 - (n-1)C_{01}/C_1\} \quad (2)$$

C_1 : 1次き裂伝播長さ

となる。この関係を示したのが図 10 である。相対 1次き裂長さ (C_1/C_{01}) の増加と共に相対運動エネルギー $K/4\gamma C_{01}$ 値は大きくなり、 n 値が小さくなる程、即ちき裂伝播速度が速くなる程、 $K/4\gamma C_{01}$ 値が大きくなっている。

今、比較的短い 1次き裂 C_{01} を持つ試片の場合、相対 1次き裂伝播長さ C_1/C_{01} 値が大きくなればなる程、相対干渉開始距離が大きくなるという事も報告⁸⁾ され

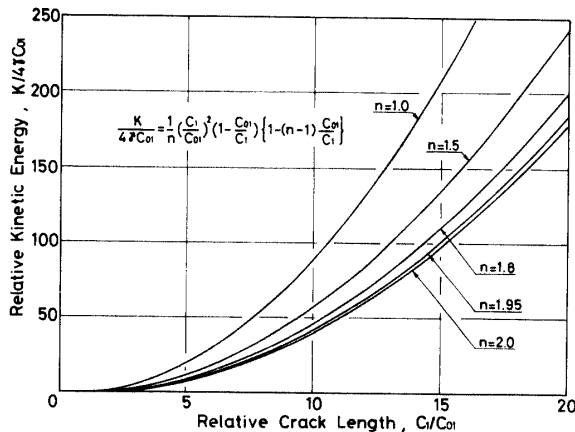


Fig. 10 Relationships between the relative kinetic energy and the crack length for different n values.

ている。また、 C_1/C_{01} 値が大きくなれば、 e/C_{02} 値も大きくなり干渉模様も図 9 に示す如く、点(小円、図中 A)から翼型だ円(例えば図中 C)さらに放物線(例えば図中 I)へと変化する。次に図 9 の干渉模様図を用いて破面模様密度を検査する為には、個々の模様の面積を求める必要がある。そこでこれらを翼型だ円状及び放物線状の 2 種類に分けて面積を算出し、その結果を図 11 に示した。同図 (a) は、前者の計算結果で $\beta'=1$, $n=1.95$, 変数 $d/C_{02}=2.0\sim 7.9$ の間で変化させた例である。図 9 又は (1) 式からもわかる如く翼型だ円の大きさは e/C_{02} 値で表現出来、実際の破面模様も e/C_{02} 値で割合良く表現出来る³⁾ ので模様の大きさは e/C_{02} 値を基準に表した。図中の点はマイクロコンピュータによる計算値であり、両軸とも常用対数で

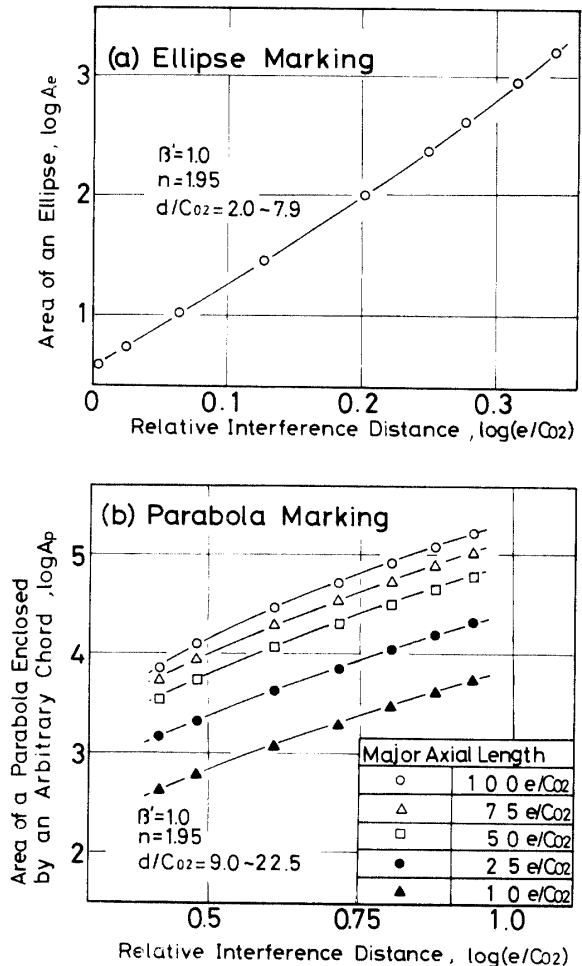


Fig. 11 Area enclosed by the interference marking is plotted to the relative interference distance, e/C_{02} , which indicates the first relative distance for the primary crack front to interact with the secondary crack front to result in an interference marking: (a) for ellipse markings and (b) for parabola markings.

示した。同図 (b) は、放物線模様計算結果である。放物線模様は翼型だ円とは違い閉じていないため、面積評価の範囲を決めなければならない。その基準を干渉開始距離 e/C_{02} の 10 倍, 25 倍, 50 倍, 75 倍及び 100 倍のところの最小弦長で閉じ, $\beta' = 1.0$, $n = 1.95$, $d/C_{02} = 9.0 \sim 22.5$ まで変化させ, 各々の面積を算出した。また, 放物線模様も e/C_{02} の大きさを定量できるので, 横軸の評価は e/C_{02} の大きさを基準とした。 e/C_{02} 値が大きくなるとそれに応じて, 翼型だ円及び放物線模様共に大きくなることが定量的にわかる。従って, 単位面積中に存在し得る干渉模様は面積の逆数即ち $1/A$ で与えられることになる。今, $C_{01} = 2.75 \text{ mm}$ の引張試験の e 値測定結果を参考にして, 放物線模様の例で試算してみると次の様になる。横軸 x/C_{02} を $100e/C_{02}$ まで積分した結果では, 干渉開始距離 e を $2.5 \mu\text{m}$ 及び $5 \mu\text{m}$ の両模様で比較してみると, 前者の相対運動エネルギー ($K/4\gamma C_{01}$) は図 10 より 35.5, 単位面積当りの模様密度 ρ_p は図 11 より 9.8×10^{-5} となる。同様に後者は, 109.7 及び 1.7×10^{-5} となる。従って e 値の小さい模様, 即ち小さい放物線模様で破面を埋めた方 ($35.5 \times 9.8 \times 10^{-5} = 3.5 \times 10^{-3}$) が大きい模様でそれを埋める ($109.7 \times 1.7 \times 10^{-5} = 1.9 \times 10^{-3}$) より大きな運動エネルギーを有することになり, 結果として微小な模様による破壊, 言い換えれば模様密度の高い方が破壊エネルギーが高いことが証明される。なおここでは $C_{01} = 2.75 \text{ mm}$ の鋭いき裂を持つ不飽和ポリエステル樹脂の実例で試算したが, 一般的にも模様密度が大きくなれば破面模様も小さくなり, 個々の模様の持つ運動エネルギーを考えると, 結果として破壊エネルギーも大きくなり, 破壊強度も大きくなる事が分る。

4. 結 言

不飽和ポリエステル樹脂の板材を用いて切欠き付き

引張試験及び衝撃試験を室温で行い, 機械的諸性質の測定に加えて, 破面上に観察される微視的な放物線模様密度なども測定し, それらと破壊強度及び破壊エネルギーとの関係を調べた結果, 次の結言を得た。

- 1) 引張破壊強度及び破壊エネルギーの高い程, 最大破面模様密度が高くなる。
- 2) 外側負荷様式では, 試片形状 G/W 値が大きくなると破壊強度が減少し, 最大破面模様密度も減少する。
- 3) 内側負荷様式では, 試片形状 G/W 値が大きくなると破壊強度が増加し, 最大破面模様密度も増加する。
- 4) シャルピー衝撃試験では切欠き半径が大きくなる程及び切欠き深さが浅くなる程, 破壊エネルギーが大きくなり, 最大破面模様密度も増加する。
- 5) 破面模様の近似式及びき裂伝播に伴う運動エネルギー式によれば, 破面模様密度が高い程, 破壊エネルギーが大きくなる。

参 考 文 献

- 1) C.E. Feltner: Univ. Illinois Theoretical and App. Mech. Report, 224 (1962)
- 2) J.P. Berry: J. Appl. Phys. **33**, 1741 (1962)
- 3) 瀧本昭夫, 国木信生, 川本敬雄, 高谷博史: 日本機械学会講論集, No. 817-1, 31 (1981)
- 4) J.P. Berry: J. Mech. Phys. Solids, **8**, 194 (1960)
- 5) B. Cotterell: Int. J. Frac. Mech, **4**, 209 (1968)
- 6) 瀧本昭夫, 国木信生, 松隈浩一: 日本機械学会講論集, No. 815-1, 34 (1981)
- 7) 松隈浩一: 学上論文, 山口大学 (1981)
- 8) 高谷博史: 学上論文, 山口大学 (1982)

(昭和 57 年 4 月 20 日 受理)