

PMMAの計装化衝撃試験と破壊靱性評価*

小林俊郎*¹, 宮田 博*², 菊澤賢二*³, 東原 隆*⁴

INSTRUMENTED IMPACT TEST AND EVALUATION OF FRACTURE TOUGHNESS IN PMMA

TOSHIRO KOBAYASHI, HIROSHI MIYATA,
KENJI KIKUSAWA AND TAKASHI HIGASHIHARA

In the present study, fracture toughness of PMMA is evaluated based on the instrumented impact test and static three-point bending test. In the measurement of true fracture load in the instrumented impact test, a very difficult problem associated with a remarkable inertial loading effect is pointed out. However, it is shown that the inertial loading effect can be controlled by changing the period (τ) of vibration in specimen. It is also shown that the fracture toughness (K_I) is affected by the loading rate (\dot{K}). It is observed in the tested range of \dot{K} ($3.8 \cdot 10^{-3} \sim 2.3 \cdot 10^4 \text{ MNm}^{-3/2} \text{ s}^{-1}$) that the changing tendency can be divided into three types. That is, K_I increases monotonously at first, then decreases, and increases once again with increasing loading rate. Furthermore, it is observed that a feature of fracture morphology is the change from a stable fracture to an unstable one with increasing in \dot{K} .

Key Words: Dynamic Fracture, PMMA, Instrumented Impact Test, Inertial Loading Effect
Fracture Toughness, Loading Rate, Fracture Morphology

1. 緒言

金属, セラミックスとならぶ3大材料の1つである高分子材料は, 軽量性・成形性・非磁性・電気的特性等に優れており, 現在種々の分野で使用されている。

ところで, 多くの構造用高分子材料の破壊挙動は本質的に脆性であり, 静的ならびに動的負荷における破壊靱性値の測定が重要な課題となっている。従来, 脆性高分子材料の簡便なシャルピー式衝撃試験に関しては, 植村らにより比較の目安である衝撃値についての一連の研究がある。⁽¹⁾

計装化衝撃試験においては, 荷重と変形に関する情報や最近では破壊靱性値そのものが得られるようになってきているが,⁽²⁾ 一般に脆性材料では慣性による著しい振動波の影響により真の破壊荷重の測定が困難とされている。⁽³⁾⁻⁽⁴⁾ ASTM E24.03.03委員会では予き裂付試験片の線形破壊領域で, しかも慣性の影響の少ない低速度衝撃試験法によって動的な破壊靱性値を求める規格案を提出しているが, その後の進展

が見られていないのが現状である。⁽⁵⁾

そこで本研究では, 代表的な脆性高分子材料であるPMMA (メタクリル樹脂) を用い, 計装化シャルピー衝撃試験における慣性の影響ならびに吸収エネルギーの解析法について検討した。

また, 予き裂を導入した試験片について衝撃試験ならびに静的試験を行い, 負荷速度を変化させた場合の破壊靱性値と破面形態について検討した。

2. 実験方法

本試験に用いたPMMA試験片を図1に示す。試験片は平板試料から機械加工によりエッジワイズ方向に採取した。図1(a)は硬質プラスチックのシャルピー衝撃試験方法における6号試験片(JIS K7111-No.6)であり, (b)は金属材料の標準シャルピー衝撃試験片(JIS Z2202-No.4)である。なお, それぞれの試験片には, 切欠き先端半径 $\rho=0$ の予き裂(一定負荷下でポップ・イン式に導入)および $\rho=0.1\text{mm}$ のスリットを導入した。

* 平成元年3月10日 東海支部第38期総会講演会において講演, 原稿受付 平成元年5月17日。

¹ 正員, 豊橋技術科学大学工学部 (〒440 豊橋市天伯町字雲ヶ丘1-1)。 ³ 非会員, 旭化成工業(株) (〒524 守山市小島町515)。

² 学生員, 豊橋技術科学大学大学院 (〒440 豊橋市天伯町字雲ヶ丘1-1)。 ⁴ 非会員, タカオカ化成工業(株) (〒490-11 愛知県海部郡甚目寺字流80)。

衝撃試験には容量14.7Jの計装化シャルピー衝撃試験機を用いて、衝撃速度を0.19~4.28m/sと変化させ、ハンマ荷重ならびに試験片に貼付した歪ゲージ（共和ゲージ;KSN-2-E3;ゲージ長2mmを主き裂先端真横2mmの位置に貼付）信号を測定した。図2に、これら計測システムのプロック線図を示す。なお、動的破壊靱性値の評価にはKalthoffが提唱する衝撃応答曲線法を計装化シャルピー衝撃試験に適用した。(3)

また静的試験にはインストロン型万能試験機を用い、クロスヘッド降下速度0.05~50mm/minと変化させた3点曲げ破壊靱性試験を行った。

そして、破断後の試料について光学顕微鏡等を用い巨視的破面観察を行った。

3. 結果および考察

3.1 慣性の影響ならびに吸収エネルギーの解析

図3に波形が変化しない条件、つまり負荷エネルギー容量 $E_0 \geq 3Et$ (Et :全吸収エネルギー)を満たす(6)低衝撃速度での計装化シャルピー衝撃試験より得られた、両試験片の代表的なハンマ荷重-時間曲線および

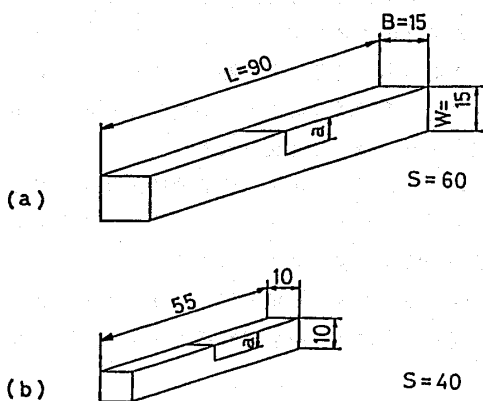


図1 試験片形状

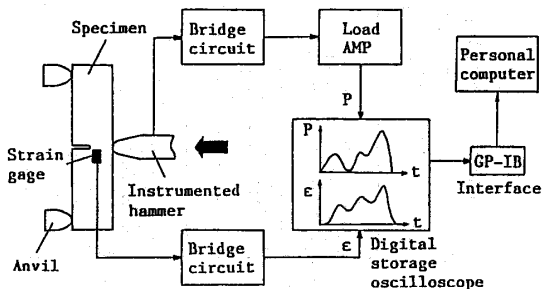


図2 衝撃試験の計測システム

試験片に貼付した歪ゲージ出力-時間曲線を示す。いずれも弾性型の脆性破壊形式が確認される。試験片の真の荷重を反映すると考えられる歪ゲージ出力に対し、(a)試験片ではハンマ荷重に慣性の影響が大きく重畳している。これはハンマ・試験片・アンビル間に無接触状態が生じる、すなわちloss of contactが主因であると思われる。(7)

Server(8)は、このような振動波の周期 τ を経験式として与えている。

$$\tau = 1.68 (SWEBCs)^{1/2} / Co \dots \dots (1)$$

ここでSは支点間距離、WおよびBは試験片の幅、厚さ、Eはヤング率、Csは試験片のコンプライアンス、Coは試験片中の縦波の速度である。

経験式によれば、(b)試験片の τ は比率的に(a)試験片のほぼ2/3となり本試験結果と比較的良好一致を示した。また、負荷衝撃速度を同一とした場合においても、 τ の短い(b)試験片ではハンマ荷重に重畳する振動の振幅が小さいのが観察された。

これらの現象をloss of contactと考え合わせると、(b)試験片で慣性による振動波の振幅が抑制されているのは、振動波の周期 τ が短くなることにより試験片の無接触時間が短く繰り返される影響によるものと

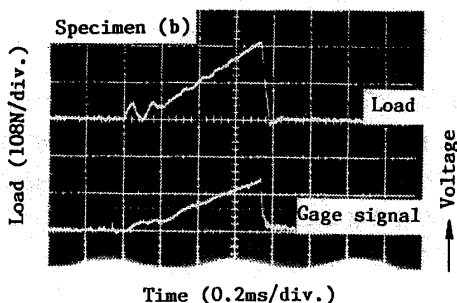
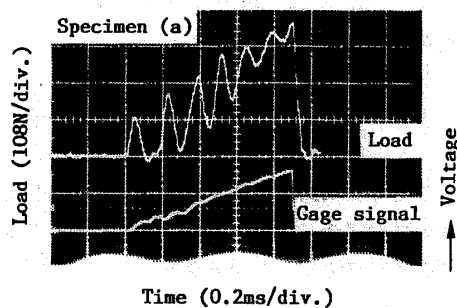


図3 代表的なハンマ荷重、歪ゲージ出力-時間曲線 ($\rho = 0.1mm, a/W = 0.5, E_0 \geq 3Et$)

考えられる。したがって、衝撃試験時に τ の短い比較的慣性の影響が重畳しにくい試験片を用いた低速度衝撃試験により、簡便な解析および評価が可能であると思われる。但しこの点については、衝撃値のばらつきや変動が試験片形状にあまり影響されないかどうか等につき更に今後検討の余地がある。

ところで、シャルピー衝撃試験による1つの簡便な破壊靱性評価法として吸収エネルギーによる解析が挙げられる。(4)

そこで比較的慣性の影響の少ない (b) 試験片を用い、異なる予き裂長さを導入した試験片について低速度での計装化シャルピー衝撃試験における吸収エネルギーの解析をまず行った。一般に脆性材料のシャルピー衝撃試験より得られる全吸収エネルギー E_t には、試験片の真の変形・破断エネルギー E_f のほかに、試験機の弾性変形等に消費されるエネルギー E_m および試験片の飛散に費やされるエネルギー E_k が含まれている。(9)

全吸収エネルギー E_t は、次式によりエネルギー成分を分類することができる。ここで E_s は試験片に吸収・貯えられるエネルギーである。

$$E_t = E_s + E_m = E_f + E_k + E_m \dots\dots (2)$$

計装化シャルピー衝撃試験で実測されるコンプライアンス C_t は、試験片および試験機のコンプライアンスより成り立っていると考えられ、次式によって表すことができる。

$$C_t = C_s + C_m \dots\dots\dots (3)$$

ここで C_s は試験片のコンプライアンス、 C_m は試験機のコンプライアンスである。そこで、 E_s は近似的に次式で求めることができる。

$$E_s = E_t (C_s / C_t) \dots\dots\dots (4)$$

従来、 C_s は静的負荷を前提にした公式により理論的に求められていたが、 C_t 、 C_s 、 C_m は衝撃速度依存性を示し 1 m/s 以下の速度で急激に変化し、脆性的な破壊挙動を示す材料の動的な C_s は次式で与えられることが報告されている。(10)

$$C_s = \frac{S^2}{E B W^2} Y + \frac{0.29 W^2}{(W - a)^2} \left(\log \frac{1}{V_0} - 0.339 \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$Y = 27.11 (a/W)^3 - 8.56 (a/W)^2 + 1.77 (a/W) + 0.829 \dots\dots\dots (6)$$

ここで V_0 は衝撃速度、 a はき裂長さである。

また、 E_k は試験片が破断直後のハンマ速度でハンマと直線上での衝突をすると仮定すると、運動量保存則より近似的に次式で与えられる。

$$E_k = m M^2 (1 + e)^2 V_f^2 / (2 (m + M)^2) \dots\dots\dots (7)$$

ここで m は試験片質量、 M はハンマ質量、 V_f は破断直後のハンマ速度、 e はハンマと試験片間の回復係数であり本試験条件下では $e = 0.35$ を測定している。実際の試験片破断後の飛散エネルギーには、 E_m より解放されるエネルギーの一部も付加されるが、ここでは E_s より解放される E_k をこのように推定することとする。

図4に求めた各吸収エネルギー値の例を示す。本供試材の真の変形・破断エネルギー E_f は、全吸収エネルギー E_t の約50~65%であった。但し、ここで言う E_f は、純粹な破面表面エネルギーに比べれば、まだ余分のエネルギーを包括したマクロな意味での便宜的なものであることを断っておきたい。例えば破断前における試験片の振動や運動のエネルギー等も一部包含されていると考えられる。

以上の吸収エネルギーの解析により得られた真の変形・破断エネルギー E_f より、線形破壊力学に基づき動的破壊靱性値の算出を試みる。

弾性歪エネルギー解放率 G_c は、き裂が単位面積当り進展するときに解放されるエネルギーであるから、

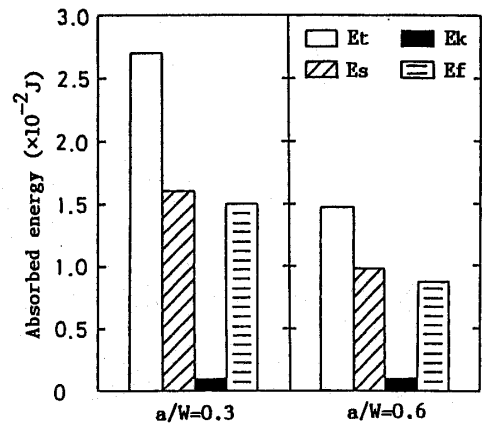


図4 吸収エネルギーの解析例

次式のように定義される。

$$G_c = \frac{dU}{dA} = \frac{1}{2} \left(P \frac{dU}{dA} - u \frac{dP}{dA} \right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、Uは弾性歪エネルギー、Pは荷重、uは変位、Aはき裂面積である。

また、コンプラインスの定義よりGcは次式のように表される。(11)

$$G_c = \frac{1}{2} P^2 \frac{dC}{dA} = \frac{U}{BWC} \cdot \frac{dC}{d(a/W)} = \frac{U}{BW\phi} \dots\dots\dots (9)$$

ここでφは、切欠き比a/Wに依存する形状関数である。

ところで、(9)式における限界の弾性歪エネルギー-Uは先に求めた真の変形・破断エネルギーと等価であるので、シャルピー衝撃試験より得られる限界弾性歪エネルギー解放率Gcは次式で示される。

$$G_c = Ef / (BW\phi) \dots\dots\dots (10)$$

図5に先に求めたEfと形状関数BWφの関係を示す。ほぼ原点を通る良好な関係となり、この勾配よりGc=421J/m²を得た。これを応力拡大係数に換算するとK_I=1.13MN・m^{-3/2}となり衝撃応答曲線法で求めた値K_I=1.08MN・m^{-3/2}と比較的良好一致を示した。

3.2 破壊靱性値に及ぼす負荷速度の影響 図6に静的3点曲げ試験および衝撃応答曲線法を用いた衝撃試験で評価した破壊靱性値に及ぼす負荷速度の影響を、

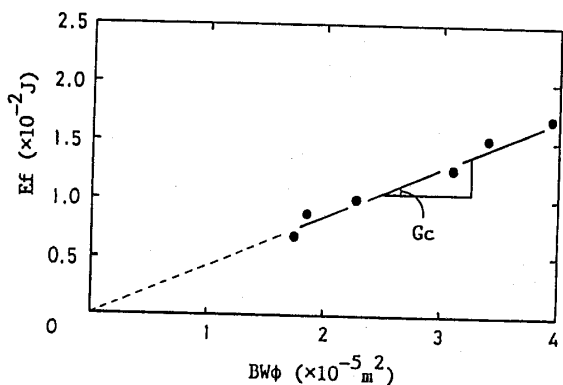


図5 EfとBWφの関係

Server⁽⁸⁾が歪速度に変わる指標として用いた応力拡大速度 \dot{K} (=K_I/t_r)で整理した結果を示す。ここでt_rは破壊開始点までの時間である。

破壊靱性値K_Iには負荷速度依存性が認められ \dot{K} の増加に対しK_Iが単調な増加(A領域)、低下(B領域)、そして再び増加に転じる(C領域)各領域の存在が観察された。但し、B領域は緩やかな低下を示す領域と急激な低下を示す領域より成っており、 \dot{K} =10³MNm^{-3/2}S⁻¹近傍で急激な低下となる。しかし、それ以前の領域より破面形態の変化が認められるので、一応ここも特にB領域と定義する。 \dot{K} に対するK_Iの傾向は両試験片とも同じであり、静的試験で得られた最大値に対し、衝撃試験で得られた最小値は約40%程度であった。

また、破断後の試験片について巨視的破面観察を行った結果を図7に示す。脆性高分子材料に見られる典型的な破面形態⁽¹²⁾⁻⁽¹³⁾が観察された。なお、本供試材では、これらの破面形態が負荷速度により特徴的に変化するのが確認された。

静的試験を行った試験片では、予き裂先端に鏡面領域

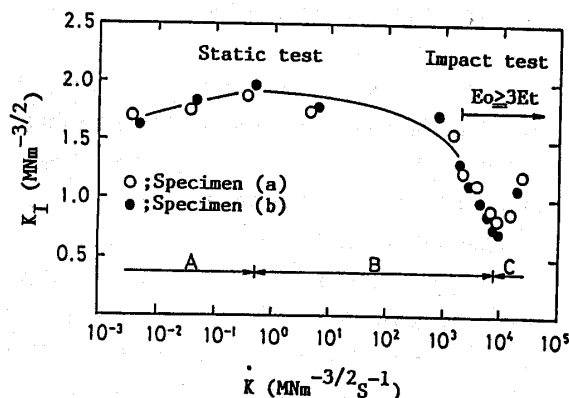


図6 破壊靱性値に及ぼす負荷速度の影響

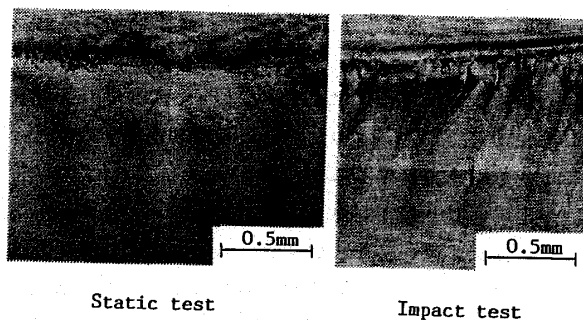


図7 静的および衝撃試験での代表的な破面形態

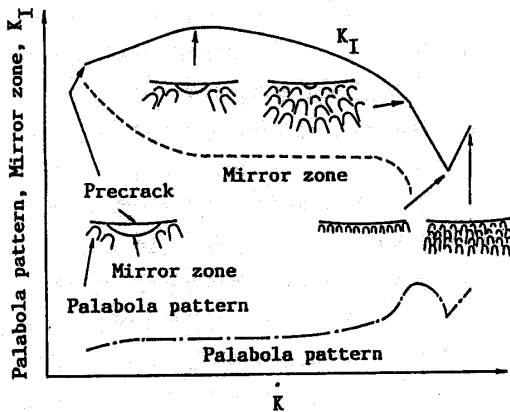


図8 負荷速度に対する破面形態の模式図

域が形成され、周辺にパラボラパターンの領域が形成されているのに対し衝撃試験を行った試験片では鏡面領域の形成が見られなくなる。また、高負荷速度域では個々のパラボラパターンの大きさが小さくなることも観察された。

\dot{K} に対し変化した破面形態の模式図を図8に示す。これらより負荷速度を増大させると、比較的緩やかなき裂成長を伴う鏡面領域形成型の安定破壊から、パラボラ領域形成型の不安定き裂成長破壊へと移行するのが認められる。

したがって、図6に示すA領域における単調な靱性値の増加は粘弾性材料としての粘性的な要素が関与していることも考えられる。またB領域における急激な靱性値の低下には、破壊挙動の変化に伴うクレイジング等の影響が密接に関与していると考えられる。

なおC領域での靱性値の増加については、き裂先端あるいは微視的にみたクレイズフィブリル先端での局所的な温度上昇⁽¹⁴⁾およびincubation time⁽¹⁵⁾等の影響が推測されるが今後更に検討が必要である。

4. 結言

代表的な脆性高分子材料であるPMMAについて、静的ならびに計装化衝撃試験を行った結果以下の結論を得た。

- (1) 衝撃試験時に τ の短くなるような試験片形状を用いることにより、ハンマ荷重に重畳する慣性の影響を抑制することができる。
- (2) 衝撃試験で得られた吸収エネルギーを解析した結果、真の変形・破断エネルギー E_f は全吸収エネルギー E_t の約50~65%であった。また、 E_f と形状関数 $BW\phi$ の関係より評価した破壊靱性値と、衝撃応答曲線法より求めた値は比較的よ

い一致を示した。

- (3) 破壊靱性値は負荷速度に依存し、静的試験で得られた最大値に対し衝撃試験での最小値は約40%であった。また、 \dot{K} により3つの変化領域が存在するのが認められた。
- (4) 破断した試験片を巨視的に観察した結果、負荷速度の増加に対し比較的緩やかなき裂成長を伴う安定破壊から不安定き裂成長破壊へと移行するのが認められた。

参考文献

- 1) 例えば植村, 機論, 46-409, A, (昭55), 1007.
- 2) 小林, 機械設計, 32-1(1988), 91.
- 3) Kobayashi, T., ほか3名, Eng. Fract. Mech., 31(1988), 873.
- 4) Kobayashi, T., ほか2名, Eng. Fract. Mech., 28(1987), 21.
- 5) 小林, 鉄と鋼, 71-6(1985), 645.
- 6) 小林・ほか2名, 鉄と鋼, 72(1985), 2133.
- 7) Kalthoff, J.F., Int. J. Fract., 27(1985), 277.
- 8) Server, W.L., J. Test. Eval., 6(1978), 29.
- 9) Abe, H., Chandan, H.C. and Bradt, R.C., Amer. Ceramic Soc. Bull., 57-6(1978), 587.
- 10) 小林・ほか2名, 機構論, No. 880-2(1988), 139.
- 11) Williams, J.G., Fracture Mechanics of Polymers, (1984), 68, Ellis Horwood.
- 12) 成沢, 日本材料強度学会誌, 7(1972), 8.
- 13) 成沢・ほか2名, 日本材料強度学会誌, 13(1978), 104.
- 14) Rice, J.R. and Levy, N., Physics of Strength and Plasticity, (1969), 277, MIT Press.
- 15) Kalthoff, J.F., Eng. Fract. Mech., 23(1986), 289.