PMMA 材の動的破壊靱性に対する試験片厚さ効果について*

和田 均^{*1}, 清家 政一郎^{*1}, 村瀬 勝彦^{*2}Investigation of Specimen Thickness Effect
on Dynamic Fracture Toughness of PMMA

Hitoshi WADA, Masaichiro SEIKA and Katsuhiko MURASE

The purpose of the present study is to investigate the effect of specimen thickness on the fracture toughness of PMMA under impact loading. A dynamic finite-element method and a strain gage method are applied to measure the dynamic fracture toughness. Further, problems on determining the dynamic fracture toughness by the present technique are investigated. Consequently, the following conclusions were drawn: (1) The dynamic fracture toughness of PMMA becomes larger as the specimen thickness decreases from 15 mm to 5 mm. (2) The fracture toughness of PMMA increases rapidly as the loading rate increases in the range between 1.3×10^4 (MPa $\sqrt{\text{m/s}}$) and 6.7×10^4 (MPa $\sqrt{\text{m/s}}$). (3) The measurement of the dynamic fracture toughness by the present method is limited to the higher range of loading rate.

Key Words: Fracture Toughness, High Polymer Materials, Impact Strength, Stress Intensity Factor, Finite Element-Method, Strain Gage, Air Gun, Crack

1. 緒 言

高分子材料である PMMA 材は種々の優れた特性をもつことから、一般に工業用材料として広く使われている。したがってこの材料に対する破壊挙動を調査することは、強度設計上重要な課題である。特に、き裂をもつ PMMA 材が動的負荷を受ける場合の破壊抵抗である動的破壊靱性は、負荷速度依存性、試験片の大きさによる効果⁽¹⁾などをもち、しかもある負荷速度で際だった最小値をもつことから重要な意味をもつことになる。したがって、これらの効果を系統的に調査することは、PMMA 材のみならず種々の材料の動的破壊靱性に対する一般的な理解を深める上にも極めて重要であると考えられる。特に試験片厚さ効果については、静的破壊靱性が板厚の増加につれて急激に低下することが一般に知られており、衝撃荷重下での PMMA 材に対するこの効果に興味あるところである。一方動的破壊靱性の測定法に関しては、現象が速く、応力波の伝ばを伴い破壊機構が複雑になることから、まだ統一的

な見解が得られていないのが現状である。

本研究は、衝撃荷重下の PMMA 材の破壊靱性に対する種々の効果について調査することを目的として、Yokoyama and Kishida⁽²⁾の手法に基づいた、エアガンを用いた一点衝撃曲げ実験⁽³⁾と有限要素法による数値計算の併用による動的破壊靱性の決定法によって、比較的負荷速度の高い領域における動的破壊靱性に対する試験片厚さの効果について詳細に調査したものである。また本手法による動的破壊靱性の決定上の問題点などについても合わせて調査している。

2. 実験方法

2.1 実験装置 図1は、著者らの研究室で作製したエアガンによる衝撃負荷試験装置および計測システムを示したものである。試験装置は銃身、ストライカ、入力棒、試験片支持台からなる。ストライカの材質は PMMA 材であり、直径 21.8 mm、長さ 200 mm の丸棒である。入力棒の材質はストライカと同じであり、直径 20 mm、長さ 2 000 mm の丸棒である。ストライカはコンプレッサ[明治機械製作所(株)製, APT-55 K, 5.5 kW]を用いて、空気タンクに貯えた圧縮空気を電磁弁で解放することで砲身(材質 S 45 C, 内径 22.7 mm, 外径 45 mm, 長さ 1 000 mm)より射出され

* 原稿受付 平成5年8月30日。

^{*1} 正員, 大同工業大学 (〒457 名古屋市南区大同町2-21)。^{*2} 正員, 名城大学理工学部 (〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)。

図1 実験装置系

図2 試験片の支持

図3 試験片形状とゲージ位置

る。射出されたストライカは入力棒に衝突し、入力棒を介して試験片に衝撃荷重を加えることができる。入力棒の支持には、ストライカからの入射応力波に極力影響を及ぼさないように、摩擦抵抗が少ないテフロン板を使用している。試験片は図2に示したように入力棒に接触させてアジャスタブルジャッキ上の2本の支持棒の上に載せ、水平方向(荷重方向)には支持点を設けず、試験片の慣性力のみで破壊させるようにしている。試験片に作用する衝撃荷重は、入力棒を伝ばするひずみパルスを入力棒中央に接着したひずみゲージによって測定している。また破壊時間は、試験片のき裂先端近傍に貼付したひずみゲージの出力から決定する。それぞれのひずみゲージからの出力信号は、ブリッジボックスを介し、直流増幅器〔共和電業(株)製シグナルコンディショナ, CDV/CDA-230 C, 応答周波数範囲 0~200 kHz〕により増幅して、デジタルメモリー〔理研電子(株)製, TCL-005-DG, 6 cha, 4096 word/cha, 10 bit, 最小サンプリングタイム 50 ns/W〕に記録

した後、16ビットマイクロコンピュータ〔日本電気(株)製, PC-9801 VX〕に転送して処理をする。また必要に応じてX-Yプロッタ〔ローランド・ディー・シー(株)製, DXY-1200〕にて図形を出力する。

2・2 供試材および試験片 試験片素材は、市販のPMMA材である。破壊試験片の形状を図3に示す。板厚 B は $B=5, 10, 15$ mm (幅 W , 長さ L は各々 $W=30$ mm, $L=140$ mm) の3種類とした。き裂は試験片周辺を所定の寸法にフライス盤にて仕上げ、中心部にメタルソーで幅 1.5 mm, 深さ 5 mm, 先端が 60° のV字形の溝を入れた後、炉内で約 150°C に加熱し軟化したところでジグに取付けた剃刀の刃により入れた。その後、約 20 時間かけて室温まで徐々に降下させ実験に供した。なお、き裂長さ C は約 8 mm であった。表1は試験片素材のおもな機械的特性である。表中の縦弾性係数は、応力波の伝ば速度から算出したものである。

2・3 衝撃荷重の測定⁽²⁾ ストライカの衝撃により入力棒に発生したひずみパルスは、棒内を伝ばして

試験片面で一部は反射し、一部は透過する。一次元弾性波伝ば理論に基づくと、試験片に作用する入力荷重 $P_i(t)$ は入射ひずみパルス $\varepsilon_i(t-t')$ と反射ひずみパルス $\varepsilon_r(t+t')$ によって次式のように与えられる。

$$P_i(t) = AE_i \{ \varepsilon_i(t-t') + \varepsilon_r(t+t') \} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 A は入力棒の横断面積、 E_i は入力棒の縦弾性係数、 t' は応力波がゲージ位置から先端まで伝ばするのに要する時間をそれぞれ表す。また $\varepsilon_i(t-t')$ および $\varepsilon_r(t+t')$ は、入力棒の先端から 1000 mm の位置に曲げの影響を取り去るために、二軸のロッゼトゲージ [ミネベア (株) 製、エポキシ/フェノール系樹脂ベース、ゲージ長 1 mm] を円周上に 2 枚接着し、4 ゲージ法によって次式により計算している。

$$\varepsilon_i(t+t'), \varepsilon_r(t-t') = \varepsilon(t)/2(1+\nu) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 ν は入力棒のポアソン比、 $\varepsilon(t)$ は 4 ゲージ法によって得られるひずみレベルをそれぞれ表す。

3. 動的破壊靱性の決定

3.1 動的応力拡大係数の計算法 応力波伝ば問

表 1 試験片素材の機械的特性

Young's modulus E_s (GPa)	Density ρ (kg/m ³)	Poisson's ratio ν
4.97	1.18×10^3	0.388

図 4 き裂先端まわりの要素分割

図 5 Chen 問題

題を有限要素法でシミュレートするために、8 節点四辺形アイソパラメトリック二次要素⁽⁴⁾を用いた。要素剛性マトリックスは、ガウスの四点積分公式を用いて計算している。運動方程式の質量マトリックスにはコンシステントマスマトリックスを用い、外力は実験で測定した荷重の時間変化を最小二乗法で曲線の当てはめを行い、得られた多項式によって与えている。またこの運動方程式は、直接数値積分法⁽⁵⁾(Newmark β 法、 $\beta=1/4$)によって解いている。

動的応力拡大係数 $K_I(t)$ は、図 4 に示したようにき裂先端に接する要素の中間節点をき裂先端側の 1/4 の点に移動させることによって、応力の $1/\sqrt{r}$ の特異性が得られることが知られている Barsoum⁽⁶⁾ の方法により、き裂先端に接するき裂面上の節点変位 v から

$$K_I(t) = 2vG\sqrt{(2\pi/e)/(x+1)} \quad \cdots \cdots (3)$$

によって計算している。ここで x は平面ひずみ状態では $(3-4\nu)$ を平面応力状態では $(3-\nu)/(1+\nu)$ を与え、 G は横弾性係数、 e はき裂先端から変位 v を得た節点までの距離をそれぞれ表す。なお式 (3) によって動的応力拡大係数を計算することの妥当性を検討するために、一般によく知られている図 5 に示した Chen の問

図 6 Chen 問題の要素分割図

図 7 Chen 問題の動的応力拡大係数

題⁽⁷⁾について、要素分割数を変えて計算し検討している。図6は要素分割図(中間節点を省略して表示している)であり、対称性を考慮して図5の斜線で示した部分を計算している。図7がその結果である。式(3)によって図6のMesh B程度の要素分割で精度よく動的応力拡大係数が計算できることがわかる。

3・2 破壊時間 t_f と動的破壊靱性 K_{Id} の決定

破壊時間 t_f を測定するためのひずみゲージ[ミネベア(株)、エポキシ/フェノール系樹脂ベース、ゲージ長0.2 mm]は、き裂先端から約1.5 mmのき裂延長上に貼付している。このゲージからの出力信号は、き裂先端への応力波の到達によって立上り、き裂の進展によって急激な増加を示す。この急激な増加が破壊の開始を明確に示すことから、図9に示したように信号の立上りから破壊開始時間までの経過時間を破壊時間 t_f として定めた。

動的破壊靱性 K_{Id} の決定は、図8に示したような要素分割(中間節点を省略して表示している)で平面ひずみを仮定してシミュレートした動的応力拡大係数 $K_I(t)$ の有限要素法による結果に、き裂先端近傍に接着したひずみゲージの信号から測定した破壊時間を、図9に示したように当てはめて決定している。なお、図9に示したき裂開始時間以後(当てはめた t_f 以後)の $K_I(t)$ のFEM計算結果は、き裂の進展を計算に考

慮していないから意味をもたないことになる。

4. 結果および検討

図9は、試験片厚さ $B=15$ mm に対する動的応力拡大係数の有限要素シミュレーション結果から動的破壊靱性を決定した一例である。負荷速度は、これまでき裂進展時の動的応力拡大係数を、応力波がき裂先端に到達してからき裂が進展開始するまでの時間で除した値、すなわちき裂が進展開始するまでの平均応力拡大係数速度で定義されているのが一般的である。この定義は、試験方法によってはき裂進展までの動的応力拡大係数が時間の経過とともに単調に増加せず、複雑な変化を示す場合⁽⁸⁾もあり、動的破壊靱性に直接影響を及ぼす負荷速度としては疑問があると思われる。したがって、ここではき裂進展時の応力拡大係数速度で定義するのがより合理的であると考え、動的応力拡大係数の時間変化を示す曲線のき裂進展時に相当する点の接線の傾きを負荷速度として定義する。

板厚変化に対する動的破壊靱性の測定結果を図10に示す。なお有限要素法による計算では、すべて平面ひずみ状態を仮定して計算している。本研究で得られた結果は、負荷装置としてエアークラッシュを用いていることから、比較的負荷速度の高い領域での動的破壊靱性が得られている。すなわち、動的破壊靱性が最小値を示す負荷速度付近⁽³⁾⁽⁹⁾からそれ以上の高い領域での結果を示している。図からわかるように、試験片厚さが $B=15$ mm から5 mm へと薄くなるにつれて動的破壊靱性が大きくなっている。このことの説明として、金属材料などでは、板厚が薄いと板厚方向の変形拘束が緩和されるため、試験片のき裂先端で生ずる塑性変形が大きく、せん断形破壊となり破壊靱性が大きくなるとしているが、PMMA材においてもこのことが当てはまるものと考えられる。

図8 要素分割例

図9 動的破壊靱性の決定

図10 動的破壊靱性の板厚効果

破壊開始時間は、試験片表面で測定されたものであり、破壊開始は板内部から起こるものと考えられる。これらのことから、動的破壊靱性の決定において測定上の問題を含んでいる。有限要素法で三次元的に計算することは容易であるが、試験片の板厚内部での動的応力拡大係数、き裂進展時間を直接測定することは極めて困難である。すなわち厚い試験片に対して有限要素法での計算において平面ひずみ状態を仮定し、得られた動的応力拡大係数の時間変化に対して、試験片表面で測定した破壊時間を当てはめて得た動的破壊靱性は、危険(大きい)側の値を与える可能性がある。また応力拡大係数が板厚内部での値よりも板表面でかなり小さくなる三次元解析結果⁽³⁾と合わせて考えれば、この板厚効果は、さらに助長されることが考えられる。これらの差異がいか程であるかについて今後調査する必要があると考える。

一方、強度設計上重要な最小破壊靱性を見極めるためには、種々の効果について系統的に調査する必要があるが、負荷速度の広い範囲での測定を行うためには、一つの試験装置で試験することは一般に困難である。したがってなんらかの工夫をするか、別の負荷装置によって測定する必要がある、これらのことについても今後研究を進める予定である。

5. 結 言

以上のように、衝撃荷重下の PMMA 材の破壊靱性に対する種々の効果について調査することを目的として、エアガンをを用いた一点衝撃曲げ実験の有限要素法による動的応力拡大係数のシミュレーション結果と、き裂進展開始時間のひずみゲージによる測定結果の双方からの動的破壊靱性の決定法によって比較的負荷速度の高い領域における動的破壊靱性に対する試験片厚さの効果および負荷速度の影響について詳細に調

査した結果、次のような事項が明らかとなった。

(1) PMMA 材の動的破壊靱性は、試験片厚さが 5 mm から 10 mm, 15 mm と厚くなるにつれて小さくなる傾向が確認された。したがって、十分厚い試験片によって動的破壊靱性を評価することが必要である。

(2) PMMA 材に対する動的破壊靱性は、負荷速度が 1.3×10^4 [MPa $\sqrt{\text{m/s}}$] から 6.7×10^4 [MPa $\sqrt{\text{m/s}}$] の範囲においては、いずれの試験片厚さにおいても負荷速度の増加につれて急激に増加する。

(3) 本手法による動的破壊靱性の測定は、負荷速度の高い領域に限定され、広い負荷速度領域における動的破壊靱性を得るためには、なんらかの工夫をするか、他の試験装置によって測定する必要がある。

最後に、本研究の一部は大同特殊鋼(株)からの研究費援助により行われたものであることを記し、感謝の意を表す。また有限要素法による数値計算は、大同工業大学情報処理センターの HITAC M-640/20 によったことを記し、感謝の意を表す。

文 献

- (1) 前川・柴田, 機論, 59-560, A(1993), 125.
- (2) Yokoyama, T. and Kishida, K., *Exp. Mech.*, 29-2(1989), 188.
- (3) Wada, H., ほか 3 名, *Proc. of ISIE*, II(1992), 569.
- (4) Cook, R. D., ほか 2 名, *CONCEPTS AND APPLICATIONS OF FINITE ELEMENT ANALYSIS*, Third Edition, (1988), 163, Wiley.
- (5) Newmark, N. M., *J. Eng. Mech. Div.*, 85(EW), (1959), 67, ASCE.
- (6) Barsoum, R., *Int. J. Num. Methods Eng.*, 10-1(1976), 25.
- (7) Chen, Y. M., *Eng. Fract. Mech.*, 7(1975), 653.
- (8) 宮田・小林, 第 3 回材料の衝撃問題シンポジウム前刷集, (1989-12), 157.
- (9) 小林・ほか 3 名, 機論, 55-520, A(1989), 2434.