コースティックス法による異相高分子材料の 衝撃破壊挙動に関する実験的検討*

伊藤 秀明^{*1}, 江 角 務^{*2}
高 橋 賞^{*3}, 佐 藤 運 男^{*4}

Experimental Study on Impact Fracture Behavior of Bonded Dissimilar Materials by Caustics Method

Hideaki ITO^{*5}, Tsutomu EZUMI,
Susumu TAKAHASHI and Kazuo SATO

^{*5} Shibaura Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
3-9-14, Shibaura, Minato-ku Tokyo, 108-8548 Japan

In this paper, dynamic stress intensity factors of bonded dissimilar materials were determined by using caustics methods. Bonding between epoxy resin and polycarbonate composed specimens by epoxy bond. Upper materials of specimens were epoxy resin and polycarbonate. Lower materials were polycarbonate with V notches for all. V notch length was 3 mm. As the result of this experiment, dynamic stress intensity factor of bonded materials was larger than non-interface specimen. It is clear that crack tips influenced these interfaces and mechanical properties of upper materials. In dynamic behavior, each specimens showed a similar tendency up to 300, 600 and 900 μ s. Dynamic stress intensity factor increase became less at 300, 600 and 900 μ s, and afterwards became more. Cracks were propagated at $t=950 \mu$ s for interface next reached interface and became interface crack. Dynamic fracture toughness of bonded materials was larger than non-interface specimen, but time of crack propagated were faster than this.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Stress Intensity Factor, Composite Materials, Interface, Impact Load, Caustics Method, Fracture Mechanics

1. 緒 言

近年の異種接合材料の研究において、均質材料内部のき裂に対する研究⁽¹⁾⁽²⁾が多くなされている。しかし、これらの研究は、引張試験や純曲げ試験を数値解析により行ったものであり、実験解析による報告は意外に少なく、衝撃三点曲げ試験に至っては、数例報告されているのみである。均質材料内部にき裂や内部欠陥が生じた場合、荷重が負荷されるとそのき裂は進展し、界面に到達し、界面き裂となる。さらに材料の特性を生かすことなく破壊に至るので、このような材料のき裂の挙動を知ることは重要である。

また、近年の機械・構造物の高速化・巨大化により、材料が過酷な使用条件下におかれることが多くなり、き裂を有する材料の動的挙動を解析することは、機械・構造物の安全性を確保する上で重要である⁽³⁾。

実験により応力拡大係数を算出する方法には、種々の方法があるが、コースティックス法⁽⁴⁾⁽⁵⁾は非接触的にき裂先端より、直接応力拡大係数を算出する有力な手法である。また、高速度カメラの使用により動的コースティックス像の撮影が可能となり、動的応力拡大係数の算定⁽⁶⁾や、高速進展き裂の挙動の解析⁽⁷⁾が可能となっている。き裂の動的挙動の解析として、衝撃三点曲げ試験がよく用いられ、尾田ら⁽⁸⁾は、衝撃三点曲げ試験における動的応力拡大係数の簡便評価式を提案し、また青木ら⁽⁹⁾は、有限要素法を用いたコースティックス法のシミュレーションにより、衝撃三点曲げ試験による三次元破壊靱性を算定する研究を行っている。

本研究では、異相高分子材料の衝撃破壊挙動の解析を落錘式衝撃三点曲げ試験により、コースティックス法と簡易形高速度撮影法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾との組合せにより、き裂の挙動を実験により検討した。

その結果、異種接合材料の動的破壊靱性値が、界面のない材料の値よりも大きい値を示したが、き裂進展時間は速くなるという結果が得られた。

2. 基 礎 理 論

衝撃荷重条件における応力拡大係数を算出する理論

* 原稿受付 1999年5月20日。

^{*1} 正員、芝浦工業大学大学院(☎108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)。

^{*2} 正員、芝浦工業大学工学部(☎108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)。

^{*3} 正員、関東学院大学工学部(☎236-8501 横浜市金沢区六浦4834)。

^{*4} 正員、芝浦工業大学工学部(☎330-8570 大宮市深作溜井原307)。

E-mail: m698105@sic.shibaura-it.ac.jp

式はなく、実験式あるいは簡便評価式があるが、これらはロードセルを使用するもので、き裂先端の情報とロードセルの値との間に、時間差が生じるために扱いが困難になる。したがって、き裂先端近傍の情報を用いて動的応力拡大係数を算出する、コースティック法が有力である。

コースティック法によるモード I における動的応力拡大係数 K_I は式(1)で与えられる⁽⁷⁾。

$$K_I = \frac{1.671}{z_0 d |c_0|} \cdot \frac{1}{\lambda^{3/2}} \cdot \left(\frac{D_{\min}}{\delta} \right)^{5/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 z_0 は試験片からスクリーンまでの距離、 z_i は光の焦点から試験片までの距離、 d は板厚、 c_0 はコースティック定数、 λ は光学系の倍率である。また δ は材料定数であり、衝撃荷重負荷時はせん断波速度に依存するため式(2)を使用する⁽¹²⁾。ただし、静止き裂に衝撃荷重が負荷された場合は 3.17 である。

$$\delta = 3.1702 + 0.0964 (\dot{a}/C_s) - 0.1443 (\dot{a}/C_s)^2 + 1.4994 (\dot{a}/C_s)^3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_s = \sqrt{E/\rho} \cdot \sqrt{1/2(\nu+1)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\dot{a}$ はき裂進展速度、 C_s は材料のせん断波速度であり、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比である。スクリーン上のコースティック像の最小直径 $D_{\min}$ を測定し、動的応力拡大係数 K_I を算出する。

また、コースティック定数 c_0 は材料によっては、ひずみ速度に依存するとされ⁽¹²⁾、実験条件に応じたコースティック定数を正確に把握することが、真の動的応力拡大係数を算出する条件となる。そこで、清水らが提案した方法⁽¹³⁾を用いて、実験条件に合ったコース

ティック定数を算出した後に、動的応力拡大係数を算定した。試験片に集中荷重を負荷して、スクリーン上に形成されるコースティック像より、集中荷重 P を算出する式を用いてコースティック定数を算出する。集中荷重 P は式(4)で与えられる。また、コースティック法における感度を表すパラメータである複屈折性感度 ξ は、式(5)により集中荷重を負荷した際のコースティック像から求めることができる。複屈折性感度を有する材料では、スクリーン上のコースティック像が二重になるので、二つの直径を測定する。集中荷重を算出する際、光学系は収束光を用いるため、倍率 λ は式(6)による。

$$P = \frac{0.785}{z_0 |c_0| (1 \pm \xi)} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \cdot \left(\frac{D_{\text{in, out}}}{2.6} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\xi = \{1 - (D_{\text{out}}/D_{\text{in}})^3\} / \{1 + (D_{\text{out}}/D_{\text{in}})^3\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\lambda = (z_0 - z_i)/z_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、像の内側の最大直径を D_{in} 、外側の最大直径を D_{out} とする。 D_{in} 、 D_{out} のどちらを用いても荷重 P を評価することができる。 D_{in} を用いるときは $(1 + \xi)$ 、 D_{out} を用いるときは $(1 - \xi)$ である。この式を利用して、実験条件に合った光学定数を算定し、式(6)により応力拡大係数を算定する。衝撃荷重は、落錘にひずみゲージを貼り、その出力により求めた。

3. 試験片および実験装置

供試材として、板厚 $d=6$ mm のポリカーボネート (PC 1600 透明、タキロン製) とエポキシ樹脂とを使用した。接合には、エポキシ樹脂系接着剤を使用し圧着した。試験片形状および寸法を図 1 に示す。また、組合せを表 1 に、ヤング率とポアソン比を表 2 に示す。

Table 1 Dimension and materials of test specimens

Type of specimens	Upper Material	Lower Material	W_u W_l	W	a	a/W	a/W_l
Type A	Epoxy resin	Polycarbonate	15	30	3	0.1	0.2
	Polycarbonate	Polycarbonate	15				
Type B	Polycarbonate	Polycarbonate	15	30	3	0.1	0.2
	Polycarbonate	Polycarbonate	15				
Type C	Epoxy resin	Polycarbonate	10	30	3	0.1	0.15
	Polycarbonate	Polycarbonate	20				
Type D	Polycarbonate	Polycarbonate	10	30	3	0.1	0.15
	Polycarbonate	Polycarbonate	20				
Type E	Polycarbonate	Polycarbonate		30	3	0.1	

Table 2 Mechanical properties of test specimen

	E [MPa]	ν
Epoxy resin	3.0×10^3	0.36
Polycarbonate	2.3×10^3	0.36

Fig. 1 Dimension and shape of the test specimens

簡易形高速度撮影法を用いる際、多数枚の同一形状の試験片を準備しなければならない。そこで、試験片加工にはフライス盤を用い、上下端面を揃えた後、接着剤により圧着固定した。き裂は $a=3.0$ mm の V ノッチ加工を施し、先端曲率半径が 0.1 mm となるようにバイト先端をオイルストーンにより研磨した。

衝撃三点曲げ試験に使用した衝撃負荷試験装置と動的コースティック像の撮影に使用した、簡易形高速度撮影装置⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を図2に示す。この荷重装置は、落錘の自由落下を利用した方式であり、落錘の重量および落下高さを調整することにより、衝撃荷重を変えられるようにしてある。簡易形高速度撮影法に用いる装置は、デジタルリターダ(RE-306, 菅原研究所)、ストロボスコープ(PS-244 AA, 菅原研究所)そしてランプハウス(SLA-601, 菅原研究所)である。同一形状の試験片を各種多数枚用意して、ストロボスコープを単発発光に設定し、デジタルリターダにより遅延させ、ランプハウスより発光させる。試験片の上部にアルミはくを貼り、落錘に導線を装着し、落錘が試験片に着弾すると、それがトリガとなり発光する。このときカメラのシャッタースピードをバルブにして、発光した後

Fig. 2 Dynamic loading unit by a drop weight and high speed photography unit of dynamic caustic patterns

Fig. 3 Dimension and shape of test specimen

に閉じる。以上により、同一形状の試験片を用いて、動的コースティック像の連続撮影を行う。

4. 実験結果および考察

4.1 コースティック定数の算定 コースティック定数 c_0 の算定に用いた検定板を図3に示す。この検定板に衝撃負荷装置により集中荷重を負荷し、スクリーン上に得られた、コースティック像の一例を図4に示す。図4は、衝撃荷重を負荷してから、 $400 \mu\text{s}$ と $600 \mu\text{s}$ 後のものである。荷重条件は、異相高分子材料の実験条件と同様にした。このコースティック像の荷重方向に対して垂直方向の直径を測定し、式(5)により複屈折性感度を算出した後、式(6)よりコースティック定数を決定した。実験に使用したエポキシ樹脂とポリカーボネートのコースティック定数および複屈折性感度を表3に示す。

4.2 衝撃破壊特性 本実験は落錘重量 $w=3.1$ N, 落下高さ $h=600$ mm で行った。図5に試験片Aにおける動的コースティック像の一例を示す。図中の細線は、スクリーン上に設けたグリッド線であり、コースティック像の測定時の基準に使用する。また、太線は接合界面である。コースティック像の測定に関しては、ポリカーボネートのような複屈折性感度(光学的異方性)を有する材料では像が二重になるので、き裂に対して垂直方向の内側の直径を測定するほうが、精度がよいとの報告⁽⁴⁾に準拠した。また、図6に試験片Aと同様に他の試験片 Type B~E の、き裂進展前後における動的コースティック像の写真の一例を示す。

Table 3 Optical constants of test specimen

		c_0 [m^2/N]	ξ
Epoxy resin	Static	-1.279×10^{-10}	-0.206
	Dynamic	-1.230×10^{-10}	-0.197
Polycarbonate	Static	-1.509×10^{-10}	-0.230
	Dynamic	-1.254×10^{-10}	-0.230

Fig. 4 Caustic pattern under concentrated load

図7(a), (b)に, コースティック像から求めた動的応力拡大係数と時間の関係を示す。衝撃荷重負荷後 $300\ \mu\text{s}$ までは, 各試験片とも同じ傾向を示したが, $600\ \mu\text{s}$ 以降になるとばらつきが始める。また時間が $300, 600, 900\ \mu\text{s}$ 付近で, 各試験片の動的応力拡大係数の上昇がゆるやかになり, その後急上昇する傾向がある。図7より明らかなように, 各試験片において, 時間 t が $600\ \mu\text{s}$ までは, ほぼ同様の傾向を示した。その後, 接合材料における, 動的応力拡大係数が急上昇する時間帯が異なり, Type A, B については, $600\ \mu\text{s}$ 以後で, また Type C は $650\ \mu\text{s}$, Type D では $700\ \mu\text{s}$ 以後となり, 界面のない試験片 Type E については, $750\ \mu\text{s}$ 以後となった。これは, 試験片 Type A, B

の形状が, 体積比 $1:1$ であり, $1:2$ である Type C, D より V ノッチ先端から界面までの距離があるため, 上昇する時間が早いものと思われる。したがって, 界面と荷重を受ける上相材料の影響により, 均質材料と異なる挙動を示すことがわかった。これにより動的応力拡大係数は, 時間の経過とともに振動を伴いながら, 上昇しているのがわかる。この傾向は均質材料において, 衝撃荷重が負荷された後に発生する, 応力波や支持点反力の影響によるものであると思われるが, 本実験で使用した接合材料においても, 同様の傾向が得られた。

図8は, 接合材料の上相と下相の曲げ剛性 EI の比と, 接合材料の動的応力拡大係数に対して界面がない

Fig. 5 Dynamic caustic patterns under impact three-point bending test (Type A : $a=3.0\ \text{mm}$)

Fig. 6 Dynamic caustic patterns under impact three-point bending test (Type B, C, D and E : $a=3.0\ \text{mm}$)

試験片 Type E との比をとり、その関係をグラフにしたものである。ここで、添字の U は上相、 L は下相の意味であり、●印が接合材料である。動的応力拡大係数比は、同一時間における比較を行ったものである。曲げ剛性比が大きくなるにつれて、時間帯の多少の誤差はあるが、動的応力拡大係数の比が増加しているのがわかる。すなわち、異種材料を接合した試験片 Type A, C については、界面のない試験片 E より動的応力拡大係数が高い値を示し、同質材料を接合した試験片 Type B についても同様に、高い値を示した。また Type D については、界面がない試験片とほぼ同じ傾向となった。したがって、動的応力拡大係数に影響を与えるのは、き裂先端と界面までの距離であることがわかった。

また界面を有する各試験片の動的破壊靱性 K_{Id} は、

(a) Type A, B and E : $a=3.0$ mm

(b) Type C, D and E : $a=3.0$ mm

Fig. 7 Relationship between dynamic stress intensity factor and time

接合界面がない試験片、Type E より大きい値を示した。これは、界面あるいは衝撃力を受ける材料の影響であると思われる。き裂が進展する時間は、試験片 E では $1000 \mu s$ であったが、その他の試験片では $950 \mu s$ であった。これにより、き裂が進展する時間を支配しているのがき裂がある材料すなわち下相の材料であることがわかる。本研究で使用了試験片形状のように、界面を有する材料においては、き裂は V ノッチ頂点より進展し、界面に到達する。その後、界面き裂となり接合面がはく離し、接合構造の破壊に至る。これは、曲げを受けていた下相の材料のき裂が界面に到達して破断した後に、応力が開放され、接合面がはく離したものと考えられる。

界面が存在しない試験片 E においては、き裂が荷重点にまで進展して、全壊したのに対して、他の試験片は界面き裂となり、接合構造は破壊したものの、荷重

Fig. 8 Relationship between dynamic stress intensity factor ratio and flexural rigidity ratio

Fig. 9 Relationship between dynamic fracture toughness ratio and flexural rigidity ratio

点にまでき裂が進展することはなかった。き裂が進展し、界面を貫通することはまれで、本実験で用いた接着剤が介入している場合では、上相材料の接合界面部に欠陥がある場合に、き裂が欠陥の箇所到達したときに上相が破壊する試験片があった⁽¹⁴⁾。

図9は接合材料の上相と下相の曲げ剛性 EI の比をとり、各試験片の破壊靱性値との比較を示したグラフである。ここでの動的破壊靱性値は、各試験片のき裂が進展する前に得られた、最大応力拡大係数の値を採用した。曲げ剛性の比が大きくなるに伴い、破壊靱性値が大きくなっているのがわかる。これにより、き裂が存在する材料の材料物性値よりも大きい材料と接合することにより、破壊靱性の値を低下させることができる。しかし、図7より明らかであるが、き裂が進展する時間は、界面がない試験片よりも速くなっている。すなわち、異種材料を接合することにより、破壊靱性値を大きくすることができ、き裂が進展する時間は、逆に速くなる結果となった。同質材料を接合した試験片 B, D については、動的破壊靱性の値がわずかではあるが、大きい値を示した。これは、接合界面による影響であると思われる。

また、き裂が進展中のコースティック像は、き裂の進展が速く、き裂先端と界面までの距離が短いため、写真に捉えることができなかった。界面き裂に対しても同様であった。したがって、界面き裂を有する異種接合材料の衝撃破壊挙動の解析も必要と考えられるが、この点に関しては今後さらに詳細な検討を進めたい。

以上により、簡易形高速度撮影法を用いても、多数枚の同一形状の試験片を用意すれば、き裂の動的コースティック像の撮影ならびに動的挙動の解析が、十分可能であることがわかった。

本実験は、モード I のき裂に対する衝撃破壊挙動の解析を行ったが、実際の機械・構造物のき裂は混合モードの場合が多い。したがって現在、均質材料中に傾斜き裂を有する異相高分子材料の静的および動的応力拡大係数の算定を行っている、これについては続報とする。

5. 結 言

本研究では、異相高分子材料の均質材料中のき裂に対して衝撃破壊試験を行った。き裂と界面との距離の違いと荷重を受ける上相材料の材料物性の違いが、応力拡大係数に与える影響を検討した結果、次の知見が得られた。

(1) 荷重を受ける上相材料の性質とき裂先端から界面までの距離が動的応力拡大係数の値に影響を与える。

(2) き裂は界面に到達し、界面に沿って進展して界面はく離し破壊する。

(3) 接合界面を有する材料の破壊靱性値は、界面のない材料よりも大きくなるが、き裂が進展する時間が速くなる傾向が得られた。

(4) 簡易形高速度撮影法により、き裂の動的挙動の解析が可能であることがわかった。

文 献

- (1) 結城良治・曹相鳳・松本敏郎・木須博行, 機論, **53**-492, A (1987), 1581-1589.
- (2) 野田尚昭・荒木清巳・Fazil ERDOGAN, 機論, **57**-537, A (1991), 1102-1109.
- (3) 青木繁, 機誌, **84**-784 (1981), 243-249.
- (4) 高橋賞・清水紘治, 機械の研究, **37**-4 (1985), 485-490.
- (5) Lagarde, A., *Static and Dynamic Photoelasticity and Caustics*, (1987), 247, SPRINGER-VERLAG.
- (6) 末次正寛・清水紘治・高橋賞, 機論, **59**-559, A (1993), 693-700.
- (7) Taudou, C. and Ravi-Chandar, K., *Exp. Mech.*, **32**-9 (1992), 203-210.
- (8) 尾田十八・谷口佳文・柳沢正行, 機論, **57**-533, A (1991), 64-71.
- (9) 青木繁・木村延, 機論, **58**-554, A (1992), 1785-1791.
- (10) Ezumi, T., Sano, K. and Takahashi, S., *Proceedings of the Second Symposium on High Speed Photography and Photonics*, (1995), 194-203.
- (11) 江角務・高橋賞, 光弾性学論文集, **18**-1 (1998), 7-14.
- (12) 西岡俊久・橋高弘幸・内山秀敏・村上竜介・板倉慧悟, 機論, **55**-520, A (1989), 2410-2415.
- (13) 清水紘治・末次正寛・妹尾武・高橋賞, 機論, **63**-609, A (1997), 914-919.
- (14) 伊藤秀明・江角務・高橋賞, 日本非破壊検査協会 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集, (1998-1), 200-205.