衝撃負荷を受ける積層材料に対する破壊制御設計 の体系化に関する一考察*

吉 村 健 佑^{*1}, 江 角 務^{*2}

A Study on Systematizing of Fracture Control Design for the Laminated Materials Subjected to Impact Load

Kensuke YOSHIMURA^{*3} and Tsutomu EZUMI^{*3} Graduate School of Mechanical Engineering, Shibaura Institute of Technology,
3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135-8548 Japan

In recent years, the laminated materials are designed and used widely in aerospace applications, for example. Therefore, it is important to evaluate the fracture characteristic of the laminated materials. In this research, the basic study on fracture control design for the laminated materials subjected to impact load is systematized. The dynamic fracture behavior is analyzed by using the high-speed video camera and the digital image correlation method. The dynamic stress intensity factor is experimentally calculated based on interfacial mechanics. In addition, the mixed-mode ratio, dynamic fracture toughness and kinking angle are evaluated from the dynamic stress intensity factor for the control and forecast of fracture. And, the characteristic of mixed-mode fracture criterion showing the condition and the behavior of fracture is examined. It is shown to be able to properly act as fracture control design by the materials evaluation method.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Stress Intensity Factor, Impact Strength, Fracture Control Design, Composite Material, Interfacial Mechanics, Delamination

1. 緒 言

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics; 炭素繊維強化プラスチック)積層材料に代表される先端積層材料は、航空宇宙分野をはじめとする幅広い分野で使用されている。今後、構造部材を主として更なる積層材料の大幅導入が期待される。しかし、積層材料は異なる材料を組み合わせているため、材料特性の不連続が存在し、異物衝突などに起因する衝撃負荷を受けると、容易に内部損傷(層間き裂)が発生する。そして、その材料の大幅な強度低下から、破壊に至ることが問題となっている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。この金属材料をはじめとする、従来の連続的な工業材料とは異なる、積層材料特有の設計技術に対する不確定性を解消する必要がある。よって、破壊制御設計の体系化を図り、欠陥き裂を内在しながら衝撃破壊の予測や制御が可能となるよう、材料設計技術を高度化させることは重要である。

衝撃負荷を受ける積層材料の破壊の予測や制御を行うには、破壊力学を基礎とした材料評価をすることが必須となる。しかし、異材界面き裂である層間き裂

の破壊において、き裂先端近傍は、複素応力拡大係数に支配される複雑な混合モード状態となる⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。更に衝撃負荷下での破壊は、き裂進展挙動が瞬間的であるための確に評価しがたい。以上のことから、その精確な衝撃層間破壊挙動の解析が困難となる。衝撃負荷下では、準静的負荷下とは異なるき裂開口挙動を示すため、混合モード状態での衝撃破壊の解析手法を確立することは、材料評価を行う上で重大な課題である。

本研究では、六種類の積層構成の異なる三層の試験片を用いて落錐式衝撃三点曲げ試験を行い、ハイスピードビデオカメラとデジタル画像相関法⁽⁷⁾を使用することにより、衝撃層間破壊挙動の解析を行った。動的応力拡大係数を算出し、混合モード比、動的破壊靱性値とき裂進展方向を関連付けた。以上の三つの破壊パラメータにより、衝撃破壊の予測や制御を行う上で、重要な評価となる混合モード破壊クライテリオン⁽⁸⁾の評価曲線を導いた。この評価曲線の有用性を検証し、衝撃負荷を受ける積層材料に対する破壊制御設計の体系化を図るための基礎研究を行った。

2. 試験片

2.1 供試材 供試材は、エポキシ樹脂(EP)、ポリメタクリル酸メチル樹脂(PMMA)、ポリカーボネート樹脂(PC)の三種類を使用した。これらを組み合わせ、

* 原稿受付 2009 年 3 月 24 日。

^{*1} 正員、芝浦工業大学大学院工学研究科(〒135-8548 東京都江東区豊州 3-7-5)。^{*2} 正員、芝浦工業大学工学部。

E-mail: m407065@sic.shibaura-it.ac.jp

上下層材は同じ供試材とし、六種類の積層構成の異なる三層の試験片を製作した。各試験片の供試材の組み合わせを表1に示し、各供試材の材料特性を表2に示す。動的破壊靱性値 K_{ICD} は、予備実験により得られた本研究と同じ衝撃速度下での値である。

2.2 試験片形状 各供試材の寸法は、横 140mm、縦 10mm、厚さ 6mm とした。積層接着する際には、中層材と下層材の間に厚さ 0.05mm のポリプロピレンフィルムを試験片端から 40mm まで挟み、端面き裂となる非接着面を成型した。供試材の接着にはアクリル系接着剤(ハードロック:電気化学工業)を使用した。また、デジタル画像相関法は、画像の濃淡情報を基に解析を行う。このため、撮影範囲となる試験片のき裂先端近傍に、白と黒のスプレーで噴霧し、斑点状のランダムパターンを製作した。試験片形状寸法を図1に示す。

Table 1 Combination of materials under tests

Specimen type	Upper/Lower material	Middle material
Type A	EP	PC
Type B	PC	EP
Type C	PMMA	EP
Type D	EP	PMMA
Type E	PC	PMMA
Type F	PMMA	PC

Table 2 Material characterization

	Shear modulus μ [MPa]	Poisson's ratio ν	Dynamic fracture toughness K_{ICD} [MPa $\cdot$ m $^{1/2}$]
EP	1.10×10^3	0.36	0.69
PMMA	1.05×10^3	0.38	1.03
PC	0.84×10^3	0.36	2.61

Fig. 1 Configuration of specimen

3. 実験方法

実験装置の構成を図2に示す。ハイスピードビデオカメラ(FASTCAM-MAX120K/120KC:Photron), 落錘式衝撃荷重装置, 解析用パーソナルコンピュータ, メタルハライドファイバー照明装置(LS-M350:住田光学ガラス)を使用した。試験片の支持点間を120mmとして、錘であるストライカーを落下させ、落錘式衝撃三点曲げ試験を行った。ストライカーの重量は3.1Nであ

り、高さ600mmから自由落下させた⁹⁾。ここで、落下速度は、 g を重力加速度、 H を落下高さとする、理論 $\sqrt{2gH}$ から本研究では約3.4m/sとなる。しかし、実際の実験下においてストライカーは、ガイドワイヤーなどの接触による抵抗を受けている。よって、理論的な落下速度よりも減少し、本研究では3.1m/sで試験片に落下することを、予備実験より確認した。試験片のき裂先端を中心に縦10mm×横5mmを撮影範囲とし、き裂が進展する瞬間をハイスピードビデオカメラで撮影した。シャッタースピードを1/150,000sec, 撮影コマ数を30,000fpsとした。解像度は256×128画素である。また、鮮明な画像を得るため、照明装置を用いて、撮影範囲を照射した。

Fig. 2 Experimental setup

4. 解析方法

4.1 デジタル画像相関法によるき裂開口変位の解析 デジタル画像相関法は、物体が変形する間の特定の時刻における画像と、一定時間経過した画像を比較する。その二枚のデジタル化された濃淡画像から、ある領域の変形前後の移動量を、輝度値分布の相関を用いて検出することにより、任意の測定箇所の変位やひずみを求めることができる。画像解析を行うために非接触で測定でき、測定対象となる材料、測定箇所や変位速度の制約がないことが特長である。

本研究では、この利点を活かし、実験より得られた画像データをデジタル画像相関法システム(Istra3D ver 1.0.2.0: Dantec Ettmeyer GmbH)を用いて、時間毎に初期き裂進展直前までのき裂前縁の開口変位(δ_u , δ_d)を解析した。開口変位は、き裂の上 0.1mm と下 0.1mm の変位を測定することで求め、き裂先端から $r = 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5$ mm の五点を解析した。相関演算における計算領域(サブセット)の大きさは 8×8 画素とした。図3には、測定点と衝撃荷重が加わってから $0.0\mu\text{s}$ と $300.0\mu\text{s}$ における Type A の変位分布の一例を示す。

Fig. 3 Measurement point and analysis result with the digital image correlation method (Type A)

4.2 変位外挿法による動的応力拡大係数の算出 本研究では、異材界面き裂の応力拡大係数における Erdogan⁽¹⁰⁾ の定義をもとに、結城ら⁽¹¹⁾が提案した変位外挿法を適用し、動的応力拡大係数 $K_1(t)$, $K_2(t)$ および $K_t(t)$ を算出した。

$$\left. \begin{aligned} K_1(t) &= \lim_{r \rightarrow 0} C \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \left[(\cos Q + 2\varepsilon \sin Q) \delta_y \right. \\ &\quad \left. + (\sin Q - 2\varepsilon \cos Q) \delta_x \right] \\ K_2(t) &= \lim_{r \rightarrow 0} C \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \left[(\cos Q + 2\varepsilon \sin Q) \delta_x \right. \\ &\quad \left. - (\sin Q - 2\varepsilon \cos Q) \delta_y \right] \\ K_t(t) &= \sqrt{K_1^2(t) + K_2^2(t)} = \lim_{r \rightarrow 0} C \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \sqrt{1 + 4\varepsilon^2} \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{2 \cosh(\varepsilon \pi)}{(\kappa_1 + 1)/\mu_1 + (\kappa_2 + 1)/\mu_2} \\ Q &= \varepsilon \ln \left(\frac{r}{L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

異材界面き裂先端近傍の変位場が得られれば、式(1)と図4に示すように、外挿式より、 $K_1(t)$, $K_2(t)$ および $K_t(t)$ が振動特異性の影響の少ない外側のき裂先端近傍の開口変位を用いて、最少二乗法によりき裂先端の応力拡大係数を算出することで精度良く求められる。デジタル画像相関法から解析した、各測定点のき裂開口変位(δ_x , δ_y)をもとに、各測定点の動的応力拡大係数 $K_1(r)$, $K_2(r)$ および $K_t(r)$ を求め、時間毎に $K_1(t)$, $K_2(t)$ および $K_t(t)$ の実験的算出を行った。また、バィマテリアル定数 ε と κ_j は次式で定義される。

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} \right) / \left(\frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right) \right] \quad (3)$$

$$\kappa_j = \begin{cases} 3 - 4\nu_j & \text{Plane strain} \\ (3 - \nu_j)/(1 + \nu_j) & \text{Plane stress} \end{cases}, \quad (j = 1, 2) \quad (4)$$

式(3)と式(4)に示す μ_1 , μ_2 , ν_1 , ν_2 はそれぞれ、材料1, 2の横弾性係数とポアソン比である。 L は代表長さであり、本研究では、き裂長さの2倍とした。

Fig. 4 Calculation of dynamic stress intensity factor

4.3 混合モード比、動的破壊靱性値、き裂進展方向の算出 異材界面き裂の応力場は、モードⅠとモードⅡが作用する混合モード状態となる。この混合モード状態を表す複数の破壊パラメータで、衝撃破壊の条件や挙動を特性づける必要がある。これを混合モード破壊クライテリオン⁽¹²⁻¹⁵⁾といい、衝撃破壊の予測や制御を行う上で、重要な評価となる。本研究では、算出した動的応力拡大係数から混合モード比 γ 、動的破壊靱性値 K_{ICD} 、そしてき裂進展方向 θ_0 を算出し、関連付けることで、衝撃破壊の条件や挙動を表す混合モード破壊クライテリオンの評価曲線を導いた。

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{K_2(t)}{K_1(t)} \right) \quad (5)$$

γ の算出は、動的応力拡大係数 $K_1(t)$, $K_2(t)$ の比をとり、式(5)で与えられる。また、 K_{ICD} の算出は、初期き裂進展直前の動的応力拡大係数 $K_0(t)$ を用いて評価を行った。そして、 θ_0 の算出は、周方向応力最大モデル⁽¹²⁾を適用した。次式に示すき裂先端を中心として、周方向の引張の応力拡大係数 K_σ の分布を求めることで、 θ_0 を算出することができる。

$$K_\sigma = \frac{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}}{2 \cosh(\pi \varepsilon)} [B(\theta, \varepsilon, \gamma) \cos Q - C(\theta, \varepsilon, \gamma) \sin Q] \quad (6)$$

材料の組み合わせによって変化するバィマテリアル定数 ε が十分小さい場合は、式(6)の第二項を省略し、近似して評価することが可能である。しかし、 ε が大きい場合、振動域が異材界面き裂先端から広範囲に反映され、第二項の影響が残ることで近似が成立しない。したがって本研究では、振動域を考慮し、その外側の安定な解から $r \rightarrow 0$ となるき裂先端への外挿により、周方向の引張の動的応力拡大係数 $K_\sigma(t)$ の分布を算出した。4.2節で得られた時間毎の各測定点の動的応力拡大係数 $K_1(r)$, $K_2(r)$ から、次式を提案し、 $K_\sigma(t)$ の分布を算出した。

$$K_\sigma(t) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{K_1^2(r) + K_2^2(r)}}{2 \cosh(\pi \varepsilon)} [B(\theta, \varepsilon, \gamma(r)) \cos Q - C(\theta, \varepsilon, \gamma(r)) \sin Q] \quad (7)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} B(\theta, \varepsilon, \gamma(r)) &= W_j \left[2 \cos\left(\frac{\theta}{2} + \gamma(r)\right) - (\cos\theta + 2\varepsilon \sin\theta) \right. \\ &\quad \left. \times \cos\left(\frac{\theta}{2} - \gamma(r)\right) \right] + \frac{1}{W_j} \cos\left(\frac{3\theta}{2} + \gamma(r)\right) \\ C(\theta, \varepsilon, \gamma(r)) &= W_j \left[2 \sin\left(\frac{\theta}{2} + \gamma(r)\right) - (\cos\theta + 2\varepsilon \sin\theta) \right. \\ &\quad \left. \times \sin\left(\frac{\theta}{2} - \gamma(r)\right) \right] + \frac{1}{W_j} \sin\left(\frac{3\theta}{2} + \gamma(r)\right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \exp\{-\varepsilon(\pi - \theta)\} \\ W_2 &= \exp\{\varepsilon(\pi + \theta)\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\gamma(r) = \tan^{-1} \left(\frac{K_2(r)}{K_1(r)} \right) \quad (10)$$

$K_{\sigma}(t)$ が最大値となる $K_{\sigma\max}$ の方向が θ_0 となる。しかし、 $\theta_0=0^\circ$ である界面へ進展する場合も考慮し、総合的な判断が必要となる。本研究では、初期き裂進展直前における、上述の三つの破壊パラメータが、衝撃破壊の条件や挙動を特定する一つの指標になるとして評価をした。 K_{ICD} と γ の関係から衝撃破壊の条件を特定し、 θ_0 と γ から衝撃破壊の挙動の特定を行った。

5. 実験結果および考察

5.1 衝撃破壊の条件の特定 図5に各試験片の動的破壊靱性値 K_{ICD} と混合モード比 γ の平均値の関係を示す。Type AとType Bは供試材にEPとPCを使用しており、接着力(動的界面強度)は同値であるが、Type Bのほうが K_{ICD} と γ は低い値となった。つまり、モードIが大きく作用していると、 K_{ICD} が低くなることが示された。これは、Type CとType DそしてType EとType Fを比較しても同じ傾向となった。一般的に、静的荷を受ける際の異材界面き裂は、モードIIである面内せん断変形に強く、モードIである開口変形には弱いとされている⁽¹³⁾。衝撃荷を受ける本研究結果においても、同様の傾向が得られた。よってモードIとモードIIの関係を表す次式の楕円則⁽¹⁴⁾を適用して、動的界面強度 K_{ICD}^* 、 K_{2CD}^* の算出を行った。

Fig. 5 Relation between dynamic fracture toughness and mixed-mode ratio of each specimen

Type AとType B, Type CとType DおよびType EとType Fそれぞれの組み合わせにおいて、 K_{ICD} のみの動的破壊靱性値 K_{ICD}^* と K_{2CD} のみの動的破壊靱性値 K_{2CD}^* といった動的界面強度を算出することで、衝撃破壊の条件を特定した。図5の共に示す曲線は、楕円則によって描いたものである。

$$\left(\frac{K_{ICD}}{K_{ICD}^*} \right)^2 + \left(\frac{K_{2CD}}{K_{2CD}^*} \right)^2 = 1 \quad (11)$$

5.2 衝撃破壊の挙動の特定 図6に各試験片のき裂進展方向 θ_0 と混合モード比 γ の平均値の関係を示す。共に示す曲線は、 θ_0 の算出の際、式(7)のように γ が関連しており、周方向応力最大モデルから描いたものである。 θ_0 は各試験片で $63^\circ \sim 69^\circ$ の範囲となり、き裂の上部へ進展する場合は、約 65° の角度で進展することが分かった。しかし、き裂の上部へ進展せずに、 $\theta_0=0^\circ$ である界面へ進展する場合も考慮して評価しなければならない。このき裂がどちらへ進展するかを判別する手段として、次式のように、各試験片の引張の動的応力拡大係数 $K_{\sigma}(t)$ の最大値 $K_{\sigma\max}$ と進展方向の材料の動的破壊靱性値 K_{ICD} を比較して評価を行った⁽¹⁵⁾。以下、 θ_0 は上述の評価を踏まえた、実際のき裂進展方向 θ_0^* と記述する。

$$K_{\sigma\max} \geq K_{ICD} \quad (12)$$

Fig. 6 Relation between kinking angle and mixed-mode ratio of each specimen

5.3 混合モードクライテリオン 5.1節と5.2節で衝撃破壊の条件と挙動を特定した。これらをもとに図7に示す、混合モード破壊クライテリオンの評価曲線を導いた。図7の左側に動的破壊靱性値 K_{ICD} と混合モード比 γ の関係を示し、楕円則によって衝撃破壊の条件を表した。右側は、 K_{ICD} と実際のき裂進展方向 θ_0^* の関係を示し、周方向応力最大モデルによって衝撃破壊の挙動を表した。混合モード破壊クライテリオンの評価曲線は、積層材料の構成により変化するため、各試験片で異なるが、本研究結果の場合は、ほぼ同様の傾向であった。よって、簡易的に判別できるように、

Fig. 7 Characteristic of mixed-mode fracture criterion

平均値の一本の曲線で示した。右側の衝撃破壊の挙動は、き裂の進展方向の材料が PC の場合、 $K_{\sigma max} = K_{ICD} (2.61 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ を境に、き裂の上部 ($\theta_0^* = 69^\circ$) または界面 ($\theta_0^* = 0^\circ$) へ進展するのかが分かれることを表している。

得られた各試験片の K_{ICD} と γ の実験値から、衝撃破壊の挙動を推測した。Type A の場合、中層材に PC を使用しているため、 $K_{\sigma max} < K_{ICD}$ となる。これより、 $\theta_0^* = 0^\circ$ となる界面へとき裂が進展する。また、Type B の場合は、中層材に EP を使用しているため、 $K_{\sigma max} > K_{ICD}$ となり、中層材へと約 63.5° でき裂が進展する。き裂が上部へ進展する場合は、Fleck⁽¹⁶⁾らが提唱しているように、き裂が界面中を若干進展した後に、き裂進展する方向が定まると考えられる。その後の中層材と上層材の二段目の界面に関しては、上層材に PC を使用しているため、 $K_{\sigma max} < K_{ICD}$ となる。よって、上層材には進展せずに中層材と上層材の界面へとき裂が進展することが考えられる。

これらの推測を踏まえ、実際の破壊形態と比較し検証を行った。図 8 には、上述の各試験片の推測とハイスピードビデオカメラで得られた実際の破壊形態を示す。各試験片で比較すると、大きく三種類に分かれた。Type A と Type F は、き裂が界面へと進展した後に止まった。Type B と Type E は、僅かに界面に進展した後に、中層材へとき裂が進展し、二段目の中層材と上層材の界面で止まった。Type C と Type D は、中層材へ進展した後に、二段目の界面に僅かに進展し、更に上層材へと約 65° で進展した。この傾向は推測と良く一致しており、混合モード破壊クライテリオンを特性づけられていることが確認できた。そして、初期き裂を有する一段目の界面のみならず、その上の二段目の界面においても、推測できており、積層材料全体の評価を行っていることが確認できた。これより、動的界

Fig. 8 Fracture morphology of each specimen

面強度 K_{ICD}^* , K_{2CD}^* と被着材の材料特性(横弾性係数 μ , ポアソン比 ν および動的破壊靱性値 K_{ICD})から、混合モード破壊クライテリオンの評価曲線を導くことで、き裂の発生・進展の予測が可能となることが分かった。

5.4 破壊制御設計へのアプローチ 混合モード破壊クライテリオンの評価曲線を用いて、破壊制御設計へとアプローチする手法を述べる。図 9 のように、動的界面強度と被着材の材料特性といった積層材料の構成を決定することで、その積層材料固有の混合モード破壊クライテリオンの評価曲線を作成することができる。そして、部材となる積層材料の使用箇所にかかる荷重形式を決定することにより、部材の強度が特定でき、更に破壊形態の特定が可能と

Fig. 9 Approach to fracture control design

なる。また、積層材料の決定の際には、混合モード破壊クライテリオンの評価曲線の均衡を考慮することで、使用部材に対して、理想的な強度と破壊形態をもたせる積極的な破壊制御を行うことができる。このように、部材の衝撃破壊の予測や制御に至るだけでなく、積層材料の決定へとフィードバックすることで、使用部材の最適な材料開発が可能となる。破壊制御設計の体系化を図るため、本研究で示すハイスピードビデオカメラとデジタル画像相関法を用いて衝撃層間破壊挙動の解析を行い、混合モード破壊クライテリオンの評価曲線を作成する材料評価手法の有効性を提案した。

6. 結 言

本研究では、衝撃負荷を受ける積層材料に対する破壊制御設計の体系化を図るための基礎研究を行った。ハイスピードビデオカメラとデジタル画像相関法を使用することにより、衝撃層間破壊挙動の解析を行った。解析結果から、衝撃破壊の条件や挙動を表す混合モード破壊クライテリオンの評価曲線を導き、有用性を確認した。この積層材料固有の混合モード破壊クライテリオンの評価曲線を作成することで、衝撃破壊の予測や制御、更には使用部材の最適な材料開発が可能となる。理想的な破壊を実現させる破壊制御設計の体系化の一手段として、破壊力学に基づいた本研究で示す材料評価手法の有効性を提案した。

参考文献

- (1) Wosu, S.N., Hui, D. and Dutta, P.K., Dynamic mixed-mode I/II delamination fracture and energy release rate of unidirectional graphite/epoxy composites, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, No.10 (2005), pp. 1531-1558.
- (2) Aoki, Y., Suemasu, H. and Majima, O., Fracture Mechanical Study on Mechanism of Damage Accumulation in Composite Laminates, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 67, No.662 (2001), pp. 1563-1568.
- (3) Masuda, M., Kusaka, T. and Horikawa, N., Effects of Strain Rate and Mode Ratio on Mixed Mode Interlaminar Fracture Behavior of Carbon-Fiber/Epoxy Composite Laminates, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 67, No.663 (2001), pp. 1833-1839.
- (4) Boniface, V. and Banks-Sills, L., Stress Intensity Factors for Finite Interface Cracks Between a Special Pair of Transversely Isotropic Materials, *Transaction of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 69, No.3 (2002), pp. 230-239.
- (5) Omiya, M., Kishimoto, K. and Shibuya, T., Finite Element Analysis of Interface Crack in Bimaterial Media using Cohesive Force Model, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 66, No.643 (2000), pp. 532-539.
- (6) Nagai, M., Ikeda, T. and Miyazaki, N., Stress intensity factor analysis of a three-dimensional interface crack between dissimilar anisotropic materials, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, No.16 (2007), pp. 2481-2497.
- (7) Yoneyama, S., Kobayashi, Y. and Ogawa, T., A Method for Evaluating Mixed-mode Stress Intensity Factors from Displacement Fields around a Crack Tip, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 72, No.719 (2006), pp. 1025-1032.
- (8) Wan, B., Sutton, M.A., Petrou, M.F., Harries, K.A. and Li, N., Investigation of Bond between Fiber Reinforced Polymer and Concrete Undergoing Global Mixed Mode I/II Loading, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, No.12 (2004), pp. 1467-1475.
- (9) Ito, H., Ezumi, T., Takahashi, S. and Sato, K., Experimental Study on Impact Fracture Behavior of Bonded Dissimilar Materials by Caustics Method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 66, No.644 (2000), pp.816-821.
- (10) Erdogan, F. and Wu, B.H., The Surface Crack Problem for a Plate With Functionally Graded Properties, *Transaction of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 64, No.3 (1997), pp. 449-456.
- (11) Yuuki, R. and Xu, J.Q., Stress Intensity Factors for the Interface Crack between Dissimilar Orthotropic Materials, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 57, No.539 (1991), pp. 1542-1549.
- (12) Yuuki, R. and Xu, J.Q., Fracture Criteria on Kinking of a Crack out of The Interface in Dissimilar Materials, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 56, No.529 (1990), pp. 1945-1951.
- (13) Ikeda, T., Komohara, Y., Nakamura, A. and Miyazaki, N., Criteria for Fracture and Kinking of Mixed Mode Interface Crack, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 66, No.644 (2000), pp. 796-803.
- (14) Yuuki, R., Liu, J.Q., Xu, J.Q. and Kim, Y.H., Study on the Mixed Mode Fracture Criterion of Interface Crack, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 43, No.493 (1994), pp. 1206-1210.
- (15) Chang, J., Xu, J.Q. and Mutoh, Y., A general mixed-mode brittle fracture criterion for cracked materials, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, No.9 (2006), pp. 1249-1263.
- (16) Fleck, N.A., Hutchinson, J.W. and Suo, Z., Crack path selection in a brittle adhesive layer, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 27, No.13 (1991), pp. 1683-1703.