多軸駆動型はく離試験法による粘着シートの界面強度評価と
Y 字型はく離過程の検討*増田 良太^{*1}, 井上 裕嗣^{*1}, 岸本 喜久雄^{*2}
早川 基行^{*3}, 稲 男 洋一^{*3}Evaluation of Interface Strength for Adhesive Sheet and Investigation
of Y-Type Peeling Using Multi-Axes Driven Peel MethodRyota MASUDA^{*4}, Hirotugu INOUE, Kikuo KISHIMOTO,
Motoyuki HAYAKAWA and Yoichi INAO^{*4} Department of Mechanical and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan

For guaranty of quality of the non-based adhesive sheet, one kind of adhesive used in flat panel display (FPD), damage of adhesive in a laminate process should be controlled to evaluate the interface strength. Standard examinations are not suitable for evaluating the interfacial strength because measured the peel force F includes other influences of peeling. In this paper, we developed Multi Axes-driven Peel method (MAP) to measure the peel force F from 30 to 180 degrees of the peel angle. The delamination energy and the energy dissipation were evaluated considering energy balance in steady state. This delamination energy dependency on the peel angle was discussed to observe the peel front. Then peel force in a laminate process can be obtained by the Y-type peeling test. The prediction of peel force in the Y-peel test using the delamination energy and energy dissipation measured by MAP were in good agreement with the experimental result.

Key Words: Adhesive, Peel Test, Peel Angle, Y-Peel, Laminate Process, Dissipation Energy

1. 緒 言

粘着剤はオフィスや家庭だけでなく、自動車や建築、エレクトロニクスなどの幅広い分野で使用されている。粘着剤は梱包用テープのように基材の片側に粘着剤が塗付され片側だけに接着力を持つものと、両面テープのように粘着剤自身がシート状になり両側に接着力を持つものに大別される。近年、粘着剤の市場はフラットパネルディスプレイ (FPD) 市場と共に拡大した。FPD は様々な役割を持った機能性フィルムが多層構造になっており、そのフィルム同士を張合わせるために「基材レス粘着シート」と呼ばれる粘着剤が使用されている。基材レス粘着シートは3層からなり、粘着剤が接着力の異なる2枚のはく離フィルムに挟まれる構造となっている。機能性フィルムは図1に示す「ラミネート」と呼ばれる工程で張合わされる。まず、右側から送り出された基材レス粘着シートの、接着力

の弱いのはく離フィルム1をはがす。次に下側から送りだされた機能性フィルムを張り合わせる。この工程を繰り返すことで機能性フィルムを積層させることができる。ラミネート工程では、はく離部のロールは位置を変えることで、はく離角度を変えることができる。

FPD に使用される粘着剤は可視光透過性を必要とされるため、はく離時に粘着剤に損傷があってはならない。そのため、様々なはく離角度において粘着剤への負荷を把握しなければならない。

粘着剤の界面強度を評価する方法としては JIS な

Fig.1 Laminate process

* 原稿受付 2008 年 10 月 3 日。

^{*1} 正員, 東京工業大学大学院理工学研究科(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。^{*2} 正員, フェロー, 東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻。^{*3} リンテック(株)(〒335-0005 茨城県水戸市 5-14-42)。

E-mail: masu@mep.titech.ac.jp

どに規定されている 90 度はく離試験 (JIS : K 6854-1), 180 度はく離試験 (JIS : K 6854-2, ASTM : D 903), T 字はく離試験 (JIS : K 6854-3, ASTM : D 1876) などがある。これらの標準試験は、はく離時のはく離力を測定する試験であるが、界面をはがすのに必要な力以外の影響も含まれているため、界面強度を評価する場合など適さない場合がある⁽¹⁾⁽²⁾。はく離試験については実験的・解析検討がなされており、Kim と Aravans⁽³⁾ はフィルムの弾塑性の影響を考慮し、はく離強度を評価した。Tvergaard と Hutchinson⁽⁴⁾ は、き裂先端の破壊進行領域に対して結合力モデルを適用し、き裂の進展抵抗の解析を行っている。Wey と Hutchinson⁽⁵⁾ は種々の試験条件で粘着剤の弾塑性を考慮したはく離進展解析を行い、はく離強度を求めた。はく離挙動のはく離角度による影響を評価する方法としては、大宮・岸本⁽⁶⁾ らによりマルチステージピール試験法が提案されている。Ma・岸本⁽⁷⁾⁽⁸⁾ は損傷力学に基づいた界面結合モデルを定式化し、実験から界面パラメータ同定することで、界面を含む構造物の強度設計と結び付ける方法を提案した。一方、各種条件下においてはく離挙動を分類する試みが行われている。Aubrey⁽⁹⁾ は、はく離速度に注目し、はく離速度によって変化するはく離挙動を分類した。山田・戸田⁽¹⁰⁾ は空間時間的にはく離のパターンを分類した。

一方、はく離試験としての問題がある。粘着剤の界面強度は、はく離角度により変化することが知られている⁽⁶⁾。そのため、ラミネート工程のはく離強度を評価するためには、広範囲のはく離角度ではく離試験を行わなければならない。しかし、JIS などの標準試験では限られた角度でしかはく離試験が行えない。また、ラミネート工程のはく離力を測定する方法として、Korin⁽¹¹⁾ の Y 字はく離試験がある。しかし、はく離とともにく離角度は変化し、定常はく離状態ではく離力の測定が行えていない。

そこで本研究では‘多軸駆動型はく離試験法’を提

案し、広範囲のはく離角度ではく離力を測定できる‘2 軸駆動型はく離試験’と、定常状態で Y 字はく離ができる‘3 軸駆動型 Y 字はく離試験’を行った。2 軸駆動型はく離試験では、はく離角度 30 から 180 度ではく離力を測定し、エネルギーバランスを考慮し、界面強度を得た。はく離角度 30, 90, 180 度において粘着部のはく離挙動を光学顕微鏡で観察し、界面強度の角度依存性について検討した。次に Y 字はく離を行った。Y 字はく離のエネルギーバランスと力の釣り合いに、2 軸駆動型はく離試験により求めたはく離エネルギーと粘着剤の散逸エネルギーを同定することで、Y 字はく離におけるはく離力を予測する方法を提案し、エネルギーバランス式の妥当性について検討した。

2. 実験方法の検討

2.1 はく離試験法 はく離試験は図 2 のように被着体に貼り付けた粘着剤を一定の角度 θ ではがしたときのはく離力 F を測定する試験である。畑⁽¹²⁾ は外力が行う仕事が全てはく離に使われるエネルギーとし、そのときのエネルギーを界面強度とした。このとき、単位幅あたりのはく離力を F 、はがす方向のはく離角度を θ とすると、粘着剤を引きはがすときに要したはく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ は、

$$\Gamma(\theta) = F(1 - \cos \theta) \quad \cdots \cdots (1)$$

となる。しかし、式 (1) のはく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ には、はく離に使用されるエネルギー以外のものが含まれている場合は、この方法で界面強度を評価できない。

2.2 マルチステージピール試験 粘着剤の界面強度を評価する試験法として岸本・大宮⁽⁶⁾ らは、マルチステージピール試験法 [Multi-stage Peel Test (MPT)] を提案し、エネルギーバランスを考慮した界面強度を、種々のはく離角度で評価した。マルチステージピール試験では、図 3 に示すようなベアリングを用いた治具に試験片を取り付け、下向きに荷重 F を

Fig. 2 Peeling method

Fig. 3 Multi-stage peel test

負荷することにより、はく離試験を行う。このとき、試験左側にぶら下げた錘により、水平応力方向に荷重 F_h を負荷することで、はく離角度 ϕ を種々変化させることができる。

はく離が定常で進行しているとき、系のエネルギーバランスを考えることで界面強度を評価できる。粘着剤が単位長さをはく離する際のはく離荷重がする仕事 W_{out} は、はく離エネルギー $\Gamma(\phi)$ 、はく離の起こる前後で、はく離力 F によって粘着剤に発生する弾性ひずみエネルギーの変化量 W_e 、塑性ひずみエネルギーの変化量 W_p 、及び、接着したときに発生する残留応力による弾性ひずみエネルギー W_{res} の和と釣り合うので、

$$W_{out} = \Gamma(\phi) + \Delta W_e + \Delta W_p + W_{res} \dots\dots\dots (2)$$

が成立する⁽⁶⁾。ここで、 P 、 P_h をそれぞれの単位幅当たりのはく離荷重 F 、死荷重 F_h が行う仕事、 E を縦弾性係数、 h を粘着剤の厚さ、 σ_{res} を残留応力とし、はく離前に塑性ひずみは生じていないものとする、式 (2) は次式のように表わすことができる。

$$P - P_h = \Gamma(\phi) + \Delta W_p + \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} K_{coil}^2 + \frac{1}{E} \left[\frac{F^2}{2h} \pm \int_0^h \sigma_{res}(t)^2 dt \right] \dots\dots\dots (3)$$

ここで、フィルムは平面応力状態と考え、粘着剤が十分に薄い場合、粘着剤に分布している残留応力は厚さ方向に一定とみなせるので式 (3) は次式のように書き直せる。

$$P - P_h = \Gamma(\phi) + \Delta W_p + \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} K_{coil}^2 + \frac{1}{E} \left[\frac{F^2}{2h} \pm (\sigma_{res})^2 h \right] \dots\dots\dots (4)$$

これより、はく離強度評価を行うことが出来る。しかし、マルチステージピール試験は、はく離とともに被

着体が受動的に動く仕組みのため、ベアリングと試験片の摩擦力がはく離力に含まれる。はく離速度が速くなると被着体の慣性力ではく離角度が安定しない場合がある。このため、被着体部が能動的に動く‘多軸駆動型はく離試験法’を提案した。

2・3 2軸駆動型はく離試験

2軸駆動型はく離試験では、図4のようにはく離力を測定するロードセル部と粘着剤を固定する被着体がシャフトモータと呼ばれる直線状に動くモータによって同期され、矢印方向に一定の速度で駆動する。これにより、はく離角度 θ を一定に保持したままはく離試験を行うことができる。シャフトモータはリニアモータと同じ原理で動作し、従来のボールねじとモータで動かす方法より幅広い速度領域で動かすことができる。本研究で用いたシャフトモータでは速度領域 1.2~60 m/min で、最大推進力は 240 N、はがすことができる粘着剤の最大の長さは 40 cm である。はく離試験が正確に行われていること、はく離時のはく離挙動を確認するためビデオカメラによりはく離角度、各軸の速度と、はく離部先端のフィルムの形状を撮影した。

はく離試験開始時におけるロードセルと被着体部の写真を図5に示す。粘着剤(破線で囲んだ部分)がはく離角度 θ で被着体に取り付けられている状態で、矢印の方向に動く。ロードセルがモーメントの影響を受けないように、ロードセルはベアリングを介して台に固定した。そして、ロードセルの傾きをビデオカメラで撮影した。実際にはく離試験を行うと、最初に設定した角度が微小に変化することがあったが、それに追従するようにロードセルも傾いたため、はく離力の測定結果に曲げモーメントの影響はなかった。

次に定常はく離における系のエネルギーバランスを考える。Wey と Hutchinson⁽⁵⁾ は種々の試験条件で粘着剤の塑性散逸エネルギーがあるとして解析を行い、はく離強度を求めた。ラミネート工程では粘着剤が曲げられてはく離するため、粘着剤の塑性や弾塑性により

Fig. 4 Two axes driven peel test

Fig. 5 Adhesive installed load cell

散逸エネルギーが発生する場合が考えられる。そこで、図 6 のように (a) フィルムのみを引張りをはく試験と、(a') フィルムと粘着剤を引張りをはく試験を行うことで、粘着剤部で発生する散逸エネルギー W_d を求める方法を提案する。(a) の場合について式 (4) は次式のように

$$F_a(1 - \cos \theta) = \Gamma(\theta) + \frac{1}{E_1} \frac{F_a^2}{2h_1} + \Delta W_p + W_{res}$$

なる。

$$F_a(1 - \cos \theta) = \Gamma(\theta) + \frac{1}{E_A} \frac{F_a^2}{2h_A} \times \frac{E_A h_A^3}{24(1 - \nu_A^2)} K_{coil}^2 + \Delta W_p + W_{res} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 θ は、はく離力の方向と被着体の角度であり、これを本報では、はく離角度とする。界面強度の異方性を検討するには、有限要素法を使用して⁽¹³⁾より混合モード比を求める必要があるが、次節の Y 字はく離試験での取り扱いを簡便にするためはく離エネルギーを θ の関数とした。

(a') の場合には、粘着部でエネルギー散逸 W_d が生ずるとし、

$$F_b(1 - \cos \theta) = \Gamma(\theta) + \frac{F_b^2}{2(E_B h_B + E_{Adh} h_{Adh})} + \frac{E_B h_B^3 + E_{Adh} h_{Adh}^3}{24(1 - \nu_B^2)(1 - \nu_{Adh}^2)} K_{coil}^2 + \Delta W_p + W_{res} + W_d \dots \dots \dots (6)$$

となる。ここで、 E_A , E_B , E_{Adh} , ν_A , ν_B , ν_{Adh} , h_A , h_B , h_{Adh} はそれぞれ、接着力の弱い方のはく離フィルム、逆側のはく離フィルム、粘着剤のヤング率、ポアソン比と厚さである。残留曲率 K_{coil} と塑性エネルギー ΔW_p , 残留応力 W_{res} が無視できるとすると式 (5), (6) より散逸エネルギー W_d は下記のように求めることができる。

$$W_d = F_b(1 - \cos \theta) - F_a(1 - \cos \theta) + \frac{1}{E_A} \frac{F_a^2}{2h_A} - \frac{F_b^2}{2(E_B h_B + E_{Adh} h_{Adh})} \dots \dots \dots (7)$$

これより、試験 (a) と (b) を行うことで散逸エネルギー

Fig. 6 Two type peel method

W_d を見積もることができる。

2・4 3 軸駆動型 Y 字はく離試験

Y 字はく離試験では、図 7 のようにシャフトモータとロードセルの組合せを 3 軸用い、Y 字ではく離させる。定常ではく離させるために試験片をはく離させる 2 つの軸と送り出す軸を同期させる。それぞれ、はく離フィルムのはく離方向、はく離フィルムと粘着剤のはく離方向、試験片を送り出す方向のはく離力を F_1 , F_2 , F_3 とする。フィルムの曲げ剛性が小さい場合、軸間のはく離角度の組合せを変えることで任意のはく離角度を θ_1 , θ_2 として試験を行うことができる。定常はく離時における力の釣合いを考えると、 F_1 , F_2 , F_3 は、はく離角度 θ_1 と θ_2 によって下記のように求められる。

$$\begin{cases} F_1 \sin \theta_1 - F_2 \sin \theta_2 = 0 \\ F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 - F_3 = 0 \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

これより、 F_2 , F_3 は F_1 と θ_1 , θ_2 によって表すことができる。このとき、塑性エネルギー ΔW_p と残留応力 W_{res} が無視できるとき、定常はく離状態における系のエネルギーバランスは、はく離力 F_1 , F_2 , F_3 のする仕事をそれぞれ P_1 , P_2 , P_3 とすると、

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 - P_3 &= \Gamma(\theta) + \Delta W_e + W_d \\ &= \Gamma(\theta) + \frac{F_1^2}{2E_A h_A} + \frac{F_2^2}{2(E_B h_B + E_{Adh} h_{Adh})} \\ &\quad - \frac{F_3^2}{2(E_A h_A + E_{Adh} h_{Adh} + E_B h_B)} + W_d \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

となる。これより、はく離角度 θ_1 , θ_2 が決まると F_1 の 2 次関数となり、

$$W_e(\theta_1, \theta_2) F_1^2 - A(\theta_1, \theta_2) F_1 + \Gamma(\theta_1 + \theta_2) + W_d = 0 \dots \dots \dots (10)$$

と書き表せる。ここで、

Fig. 7 Y-type peel test

$$\begin{cases} W_e(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2E_A h_A} + \frac{1}{2E_B h_B} \left(\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \right)^2 \\ - \frac{1}{2(E_A h_A + E_B h_B)} \left(\cos \theta_1 + \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \cos \theta_2 \right)^2 \\ A(\theta_1, \theta_2) = 1 + \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} - \cos \theta_1 + \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \cos \theta_2 \\ \dots\dots\dots (11) \end{cases}$$

である。2 軸駆動型はく離試験において、はく離エネルギー $I(\theta)$ と、散逸エネルギー W_d が求まれば式(10)の 2 次方程式を F_1 について解くことで任意のはく離角度 θ_1, θ_2 において F_1, F_2, F_3 が予測できる。

3. 試 験 片

はく離試験に使用した基材レス粘着シートを図 8 に示す。粘着剤にアクリル系ポリマー、はく離フィルムに PET 系ポリマーを使用した。はく離フィルム A, B, C は離型剤の塗付量とシリコンレジン添加量を調節することで接着力に差をつけており、試験片 1 ではフィルム A は B より、試験片 2 では B は C より弱い力ではがせるように材料設計をされている。本研究ではフィルム B と粘着剤界面のはく離力を測定するために試験片 1 のフィルム A をはく離したところに、接着力の高い C を張り合わせた試験片 2 を作成した。はく離試験では、はく離シートをラミネート工程

Fig. 8 Two types of non-base adhesive sheet: Peel strength between upper film and adhesive is stronger than other side

Fig. 9 Tensile stress-strain curves in each film at tension speed 500 mm/min

ではがす方向に並行に 5 cm 幅に切り、短冊状にしたものを使用した。

はく離フィルムのヤング率と降伏応力を求めるためフィルムをダンベル型に打ち抜いた試験片を使用し、フィルム A, B と C の引張試験を行った。速度依存性を検討するため引張速度 10, 100, 500 mm/min で試験を行った。引張速度 500 mm/min における、各フィルムの応力-ひずみ線図を図 9 に示す。また、各速度におけるヤング率 E と 0.2% 耐力として求めた降伏応力 σ_y を表 1 に示す。この結果、この速度範囲では速度依存性をほとんど示さないことが分かったため、各結果の平均をとり、フィルム A, B と C のヤング率を $E_A=259, E_B=267, E_C=275$ GPa, 降伏応力を $\sigma_{yA}=10.5, \sigma_{yB}=10.0, \sigma_{yC}=10.0$ MPa とした。

4. 2 軸駆動型はく離試験

4・1 はく離力測定 はく離速度 1.2 m/min で、はく離角度 30 度から 180 度ではがしたときのはく離力を測定した。30, 60, 90, 180 度で引きはがしたときのはく離力の応答を図 10 に示す。はく離開始からのはく離力は一定の値で進展した。しかし、はく離角度が 30 度の場合は、はく離力が一定になるまで時間を要

Table 1 Young's modulus and Yield stress

	Film A		Film B		Film C	
V mm/min	E_A MPa	Offset σ_{yA} MPa	E_B MPa	Offset σ_{yB} MPa	E_C MPa	Offset σ_{yC} MPa
10	258	10.0	276	10.0	306	9.0
100	260	10.0	267	10.0	298	10.0
500	258	11.5	257	10.5	222	11.0
ave.	259	10.5	267	10.0	275	10

Fig. 10 Peel force history for peel angle 30, 60, 90 and 180 degree

し、変動が大きかった。はく離角度が約 30 度未満では定常はく離が行えなかったため、30～180 度の間ではく離力を測定した。本研究では粘着剤の散逸エネルギーを測定するため、図 6 のように試験片 1 について

(1a) フィルム A を引張りはく離させる場合

(1a') フィルム B と粘着剤を引張りはく離させる場合

の試験を行った。試験片 2 についても同様に、(2a) フィルム B を、(2a') フィルム C と粘着剤を引張りはく離させる場合の試験を行った。以降の試験結果で (a) は●, (a') は○, (b) は▲, (b') は△で表示し、フィルムだけを引張りはがした試験は実線、フィルムと粘着剤を引張りはがした場合は破線で表記している。

4.2 試験結果と考察 試験片 1 と 2 を図 6 の試験法ではく離させたときの、はく離力 F とはく離角度 θ の結果を図 11 に示す。これより、はく離角度が小さいほどはく離力は大きくなった。そして、フィルム A と粘着剤の界面をはく離させることにより、フィルム B と粘着剤の界面のはく離力の方が大きく、フィルムを引張りはく離させるより、フィルムと粘着剤を掴む方がはく離力は大きくなった。本試験で用いたはく離フィルムを塑性変形させるためには、表 1 の引張試験の結果より 380 N の荷重が必要であるが、はく離力は十分小さいためフィルムは塑性変形しない。なお、測定したはく離力に対し、バラつきがあったため 30, 90, 150 度で 5 回ずつ試験を行った。

次に、はく離エネルギーとはく離角度の関係について検討する。図 12 は、横軸にはく離角度 θ を、左軸にはがし方 (1a), (2a) について式 (5) より求めたはく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ と、はがし方 (1a'), (2a') について式 (6) より求めたはく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ と散逸エネルギー W_d の和を示す。ここで、式 (5), (6) の記号は試

験片 1, 2 に対応させ、引張り試験の結果を使用した。粘着剤のヤング率は、はく離フィルムに比べ小さいものとした。これより、はく離角度 60 度から 180 度では、はく離エネルギーはほぼ一定の値となり、はく離角度にあまり依存しないことが分かる。はく離角度 60 から 30 度にかけては 1 J/m^2 程度減少している。散逸エネルギーは実線と点線の差となり、角度に関わらずほぼ一定の値となっている。右軸にひずみエネルギー W_e を示す。これより、はく離エネルギーに対しその影響は小さいことが分かる。

はく離角度とはく離挙動の関係について検討するため、はく離角度 30, 90, 180 度におけるはく離部の現象を観察した。はく離部先端を真横から撮影したものを図 13 の左に示す。フィルムの側面は見えにくいため破線で補助線を引いた。これより、180 度に近付くにつれ曲率は大きくなり、30 度では、はく離部先端でフィルムが折れ曲がっている。次に定常はく離中の粘着層の変形を観察するため、図 14 のように被着体を透明なアクリル板に変え、はく離先端を被着体の後ろから光学顕微鏡で観察した。図 13 にはく離角度 30, 90, 180 度の観察結果を示す。真ん中は試験片 1, 右は試験片 2 についてである。左の色の薄い部分は粘着剤のはく離した部分で、右方向にはく離が進行している。これを見ると、はく離部先端の粘着剤は波のような模様になっていることが分かった。模様の長さを 10 ずつ計測したものの平均を図 13 に示す。はく離角度 30, 90, 180 度を比較すると、30 度の突起状の長さは他の角度に比べて 1～2 割程度長くなっている。これは角度により粘着剤での変形が異なることを示す。また、試験片 1 と試験片 2 を比較すると、はく離力の弱い試験片 1 の方が試験片 2 より短くなっている。こ

Fig. 11 Relationship between peel force F and peel angle θ measured by 2 driven axes peel test

Fig. 12 Left: Relationship between $\Gamma(\theta)$, $\Gamma(\theta) + W_d$ and peel angle θ . Right: Relationship between elastic energy ΔW_e and peel angle θ

れは、はく離力が大きいと粘着剤の変形が大きくなることを示す。

以上、本節で検討したことからはく離角度によりはく離挙動が変化することが分かった。はく離エネルギーははく離力に比べ変化が小さい。これは、はく離角度が小さい場合、被着体に対して行う仕事が大きくなることを示す。はく離角度が大きくなるに従いはく離力は、ほぼはく離に使用される。観察結果から、はく離角度により界面での変形は図 15 のように垂直方向とせん断方向の応力の割合が変化していると考えられる。粘着剤のはく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ は、はく離角度 90 から 180 度までほぼ一定の値を示し、30 度で小さくなった。はく離部の観察では 90 度と 180 度の粘着剤の変形はあまり変わらず、30 度では界面に対してせん断方向に変形していた。これより、はく離角度 90 から 180 度では、はく離先端でのモード角 $\phi = \tan^{-1}(\sigma_{12}/\sigma_{22})$ は変わらないと考えられるため、はく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ のはく離角度依存性はない。そして、はく離角度 30 度ではせん断方向の変形が大きくなるため、モード角は大きくなると推定される。また、界面強度の異方性を考慮した、はく離進展解析⁽¹³⁾ によると、せん断方向に弱い界面強度のはく離エネルギーは、はく離

角度が 90 から 180 度では一定の値を示し、30 度では小さくなる。これは図 12 のはく離エネルギーの傾向と一致している。

よって、これらの結果より、本試験で使用した粘着テープはせん断方向に弱い界面強度であると考えられる。

5. Y 字はく離試験

図 7 のように Y 字はく離試験を行い、各はく離力 F_1, F_2, F_3 と、はく離角度 θ_1, θ_2 を測定した。次に式 (10) に 2 軸駆動型はく離試験により求めたはく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ と散逸エネルギー W_d を代入し、はく離力 F_1, F_2, F_3 を予測した。Y 字はく離試験で測定したはく離角度 θ_1, θ_2 より、予測したはく離力 F_1^*, F_2^*, F_3^* を横軸に、Y 字はく離試験で測定した各はく離力 F_1, F_2, F_3 をプロットしたものを図 16, 17 に示す。図 16 は試験片 1 について、図 17 は試験片 2 についてプロットしたものである。 F と F^* が一致していると、斜めに引いてある線に近くなり正確に予測できていることになる。白塗りの記号は弾性ひずみエネルギー W_e と散逸エネルギー W_d を考慮していない場合の予測値である。これより、Y 字はく離試験におけるはく離力 F_1, F_2, F_3 の値を正確に予測できていることが分かる。はく離力が高いところでは弾性ひずみエネ

Fig. 13 Film curvature and peeling behavior of front for peel angle 30, 90 and 180 degree

Fig. 14 Observation to see cohesive behavior

Fig. 15 Model of peeling behavior

Fig. 16 (Specimen 1) Relationship between predicted force F^* and measured force F

ギ W_e と散逸エネルギー W_d を考慮した方が、予測値 F^* に近付くことが多い。

はく離力に小さいところと大きいところに別れるのは、はく離角度 θ_1 , θ_2 が小さい場合、力の釣合いより、はく離力 F_1 , F_2 , F_3 のいずれかが大きくなるためである。

6. 結 論

本研究で提案した 2 軸駆動型はく離試験により、広範囲のはく離角度 30°~180° で基材レス粘着シートのはく離力を測定した。次にエネルギーバランスを考慮し、はく離エネルギーを求めた。はく離挙動の観察により界面強度の角度依存性を検討した。定常 Y 字はく離のエネルギーバランスと力の釣合いから、Y 字はく離におけるはく離力を予測し、実験より求めたはく離力と比較・検討した。これにより次の結論を得た。

(1) 2 軸駆動型はく離試験により、はく離力の弱い粘着剤についても、はく離角度 30°~180° 度ではく離力が測定できる。はく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ とはく離先端での散逸エネルギー W_d は“フィルムのみを引張りはがす試験”と“フィルムと粘着剤を引張りはがす試験”を行うことで求めることができる。

(2) はく離角度 60° から 180° にかけてはく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ のはく離角度依存性はなかった。粘着部の観察より、この範囲においてモード角 $\phi = \tan^{-1}(\sigma_{12}/\sigma_{22})$ は変化しないと推定される。はく離角度 60° から 30° にかけてはく離エネルギーは減少したため、この角度領域では、はく離角度依存性をもつ。観察より、粘着部へのせん断方向の負荷が大きくなり、モード角 ϕ が大きくなると推定される。これより、せん断方向に弱い界面であると分かる。

Fig. 17 (Specimen 2) Relationship between predicted force F^* and measured force F

(3) 定常 Y 字はく離時のエネルギーバランスと力の釣り合いに、2 軸駆動型はく離試験で得たはく離エネルギー $\Gamma(\theta)$ と粘着剤の散逸エネルギー W_d を同定することで、Y 字はく離試験におけるはく離力を予測できる。予測値と実験値は良く一致しており、エネルギーバランスの考え方の妥当性と予測方法の有効性が示された。

文 献

- (1) Kaeble, D. H., Theory and Analysis of Peel Adhesion: Mechanisms and Mechanics, *Transactions of the Society of Rheology*, Vol. 3 (1959), p. 161.
- (2) Kawashita, L. F., Moore, D. R. and Williams, J. G., Comparison of Peel Tests for Metal-Polymer Laminates for Aerospace Applications, *The Journal of Adhesion*, Vol. 81 (2005), pp. 561-586.
- (3) Kim, K. S. and Aravas, N., Elastoplastic Analysis of the Peel Test, *International Journal of Solids*, Vol. 24, No. 4 (1988), pp. 417-435.
- (4) Tvergaard, V. and Hutchinson, J. W., The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 40 (1992), pp. 1377-1397.
- (5) Wei, Y. and Hutchinson, J. W., Interface strength, work of adhesion and plasticity in the peel test, *International Journal of Fracture*, Vol. 93 (1998), pp. 315-333.
- (6) Omiya, M., Inoue, H. and Kishimoto, K., Evaluation of Interfacial Strength by Multi-stages Peel Test, *Key Engineering Materials*, Vol. 261-263 (2004), p. 483.
- (7) Omiya, M., Kishimoto, K. and Yang, W., Interface Debonding Model and its application to the Mixed Mode Interface Fracture Toughness, *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 11 (2002), p. 263.
- (8) Ma, F. and Kishimoto, K., A Continuum Interface Debonding Model and Application to Matrix Cracking of Composites, *The Japan Society of Mechanical En-*

- ginn*, Vol. 39, No. 4 (1996), pp. 496-507.
- (9) Aubrey, D. W., Welding, G. N. and Wong, T., Failure mechanisms in peeling of pressure-sensitive adhesive tape, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 13, No. 10 (1969), pp. 2193-2207.
- (10) Yamazaki, Y. and Toda, A., Stability of Tunnel Structure and Relationship between Peel Load and Spatiotemporal Pattern by Deformed Adhesive during Peeling, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 73, No. 8 (2004), pp. 2342-2346.
- (11) Korin, C., Tryding, J., Lestelius, M. and Hallbäck, N., Y-peel characterization of adhesively bonded carton board—An objective method, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 21, No. 2 (2007), pp. 197-210.
- (12) Hata, T., Mechanisms of Adhesive Failure, *The Journal of Adhesion*, Vol. 4, No. 2 (1972), pp. 161-170.
- (13) Masuda, R., Inoue, H. and Kishimoto, K., Analysis of Peeling Process of Adhesive Tape Using Cohesive Interface Force Model With an Anisotropic Strength, *JASCOM*, Vol. 8 (2008), pp. 25-30.
-