

引きはがし速度が接着剥離力に及ぼす影響

Influence of Peeling Rate on Peeling Force of Adhesives

精密工学専攻 30号 鈴木 翔伍

Shogo Suzuki

1. はじめに

近年,家電製品,自動車,建築などで接着構造の応用分野が急速に拡大している.接着構造が面接合であること,負荷応力が発生しないことなどの利点に加えて,接着剤の進歩がその背景にある⁽¹⁾.応用分野の拡大に合わせて,接着構造設計手法も進歩し,面接着の特徴を生かした設計手法が開発されつつあり,いわゆる構造接着なども実用されつつある.

応用分野の拡大に伴う課題として,廃製品化した接着構造物の解体リサイクルの難しさが指摘されている.内在化している面接合部を製品外部から解体する難しさである.こうした要請に応えた成果として,解体しやすい接着構造,例えば,剥がれやすい接着剤の開発がある⁽²⁾.

本研究は薄板接着構造を効率的に引きはがし解体する手法に関するものである.これまでの研究で提唱してきたワイヤ駆動解体システム⁽³⁾における解体速度の設定方法と最適化に関する考え方を述べる.

2. 基本概念

従来までの研究では,接合部の分離・破壊に関わる力学的考察は,接着強度の保証を目的としたものがほとんどであった.しかし,本研究は積極的な接合部解体を目的としており,既存の薄板接着構造の最弱部を最小の力負荷(引きはがし力)によって解体できることを理想としている.

さらに,リサイクルを目的とした解体においては解体能率,すなわち単位時間当たりの解体面積(解体幅×解体速度)の大きさが問われる.この解体能率を向上させるにあたって問題となるのは,解体に要する力,すなわち引きはがし力の速度特性である.引きはがし力があまりに大きすぎると,引きはがしている対象物体が作業中に破断し,作業を中断させてしまう.したがって,解体速度には上限があり,これを高速化するためには,速度特性に基づいて引きはがし力を可能な限り小さくできる解体作業設計手法が必要である.

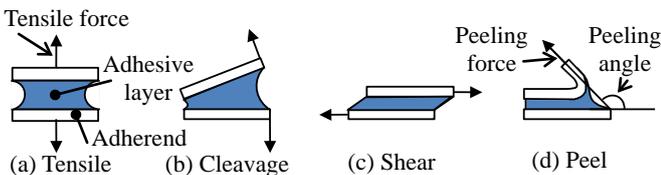


Fig.1 Types of detachment

解体のための接着部の分離(ある種の破壊)様式として Fig.1 のような 4 様式が考えられる.同図(a)の引張力と(c)のせん断力の負荷による破壊は,解体のための負荷様式としては適していない.なぜならば,面接合である接着の優れた特徴を發揮できているからである.(a),(c)より解体に要する力負荷を小さくできる様式は,剛体とみなせる被着体の引きはがしに適用される同図(b)の割裂,弾性体とみなせる被着体の引きはがしに適用される同図(d)の剥離である.

本研究では,廃自動車内装に多用されているプラスチック等の薄板被着体を解体することを目的としている.以下の本研究では,(d)の剥離について扱う.剥離においては,(a)の引張

応力,(c)のせん断応力が複合的に発生していると考えられる.以下の本文では, Fig.1(d)で示される引きはがし力を剥離力(Peeling force)と呼ぶことにする.また剥離角を同図のように定義する.

廃製品を剥離解体する場合, Fig.1(d)に示す剥離角を常に一定となるよう作業することは困難であり,また実用的ではない.リサイクルの場合,種々の形状を有する廃製品が順次剥離解体対象になるからである.したがって,剥離角がある範囲内で変化することを想定した実用的剥離プロセスの設計を考えざるを得ない.

以下の本文では,解体能率の向上を目的として,最初に剥離力の角度依存性を明らかにし,次いで剥離速度が剥離力に及ぼす影響を明らかにする.最後に最小の剥離力をもって高速解体する最適作業設計についての考え方を述べる.

3. 実験装置及び実験手順

3.1 実験装置

Fig.2 に剥離力の角度依存性を明らかにするための実験装置を示す.試料台を中心軸で回転させることによって任意の剥離角度を設定できる.剥離力を常に一定の剥離角のもとで粘着テープに作用させることができる.

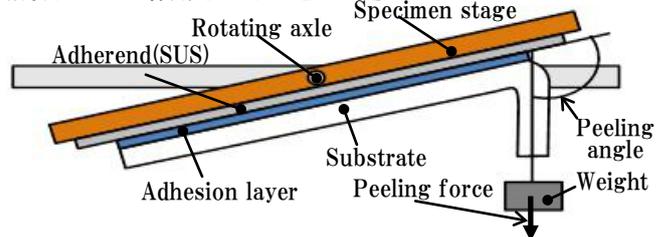


Fig.2 Experimental set up for constant peeling angle

剥離速度の影響を明らかにするための実験装置を Fig.3 に示す.モーター駆動されるワイヤによって一定の剥離速度で粘着テープを把持したワイヤを巻き取ることができる.ワイヤと供試テープの間にはロードセルが挟まれており,剥離力を計測する.試料台の回転によって,また剥離位置によって剥離角度 θ は連続的に変化する. Fig.4 に示すように,代表的位置での角度を $\theta_i, \theta_o, \theta_f$ として定義している.本研究での場合, $\theta_i > \theta_o > \theta_f$ である.試料台の中心は滑車の巻き付き位置と縦軸線が一致している.

剥離プロセスのパラメータを Fig.4 に示す.

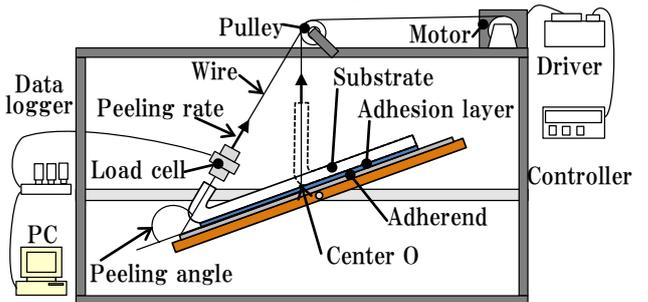
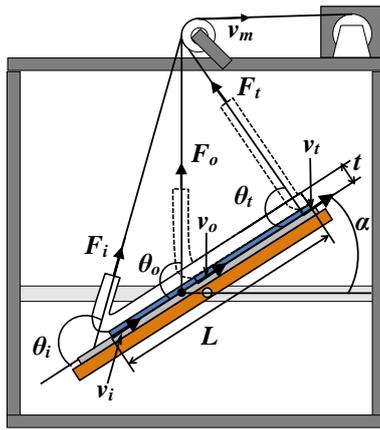


Fig.3 Experimental system for peeling rate



| | |
|---------------------------------|------------|
| Motor driving rate [mm/min] | v_m |
| Initial peeling rate [mm/min] | v_i |
| Middle peeling rate [mm/min] | v_o |
| Terminal peeling rate [mm/min] | v_t |
| Initial peeling force [N] | F_i |
| Middle peeling force [N] | F_o |
| Terminal peeling force [N] | F_t |
| Initial peeling angle [degree] | θ_i |
| Middle peeling angle [degree] | θ_o |
| Terminal peeling angle [degree] | θ_t |
| Angle of adherend [degree] | α |
| Length of tape [mm] | L |
| Thickness of tape [mm] | t |
| Width of tape [mm] | b |

Fig.4 Experimental parameters of peeling process

3.2 実験手順

被着体として、JISによる剥離実験で一般的に使われているステンレス鋼を用いた剥離実験の手順は以下の通りである。

- ① 被着体表面を洗浄する。
- ② 洗浄した被着体表面を十分に乾燥させる。
- ③ 被着体に粘着テープを接着させる。
- ④ ゴムローラで一定荷重を加えてテープを圧着する。
- ⑤ テープを2時間養生させる。
- ⑥ 被着体の角度を調節して剥離角 θ を設定する。

剥離角度特性実験では、

- ⑦ テープ先端に錘を取り付ける。
- ⑧ テープが剥がれ始めるまで錘を増やす。
- ⑨ テープが剥がれた際の錘の重量を剥離力として記録する。

剥離速度特性実験では、上記のうち、

- ⑦ モーター速度を設定し、任意の剥離速度でテープを剥離する。

以下の本文では、剥離速度 v_m はモーター駆動のワイヤ巻き取り速度で表現する。したがって、接合端での剥離速度とは異なる場合がある。

3.3 供試材

実験に使用した粘着テープの仕様を Table.1 に示す。主たる接着剤として、広く実用されているアクリル系を用いた。

Table.1 Tested adhesive tapes

| Substrate material | Adhesion material | Elastic modulus (substrate) GPa | Viscous modulus (adhesion) Pa·s | Tape thickness mm | Tape width mm |
|--------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------|
| Polypropylene (PP) | Acrylic (AC) | 1.96 | 50~2000 | 0.1 | 20 |
| Cloth (C) | Acrylic (AC) | | 50~2000 | 0.15 | 20 |
| Polyethylene (PE) | Acrylic (AC) | 3.92 | 50~2000 | 1 | 20 |

4. 実験結果

4.1 剥離力に及ぼす剥離角の影響

剥離角 θ の変化が剥離力 F に及ぼす影響を Fig.5 に示す。剥離角 θ がおよそ 100° までは、粘着テープの違いが見られるが、それ以上の剥離角領域では供試テープの影響がほとんど見られなくなっている。

剥離力 F は剥離角 θ の増大に反比例して減少する。剥離角 θ が $100^\circ \sim 120^\circ$ の範囲では、剥離力 F はほぼ一定値となる。 120° を越えると、剥離力はやや上昇傾向を見せる。本実験条件の範囲では、粘着テープの材種、厚さは剥離力 F に大きな影響を及ぼさなかった。

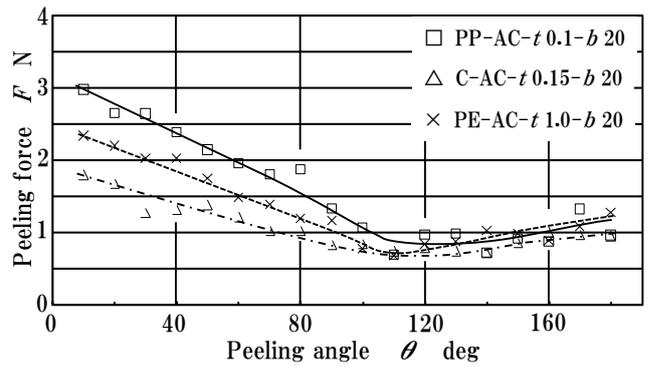


Fig.5 Influence of peeling angle on peeling force

以上より、剥離力 F に及ぼす剥離角 θ の依存性は、剥離角が $90^\circ \sim 100^\circ$ 以下で特に顕著に見られた。

4.2 剥離力に及ぼす剥離速度の影響

Fig.3の装置を用いて、モーター駆動速度 v_m をパラメータとした剥離実験をした。

中間剥離角 θ_o が 90° の場合の剥離力 F の実測例を Fig.6 に示す。剥離開始時点でパルス状の剥離力を示し、その後は剥離角の影響でなだらかに上昇する。なお、図中にも示すように、この時の剥離角は開始時点で 137.5° 、終了時点で 42.5° である。

剥離速度 v_m をパラメータとした場合の剥離力実測曲線を Fig.7 に示す。低駆動速度では剥離力 F が小さな変動であるのに対して、駆動速度が $600 \sim 1200 \text{ mm/min}$ の速度域では振動的成分を含んだ剥離力 F を示す。

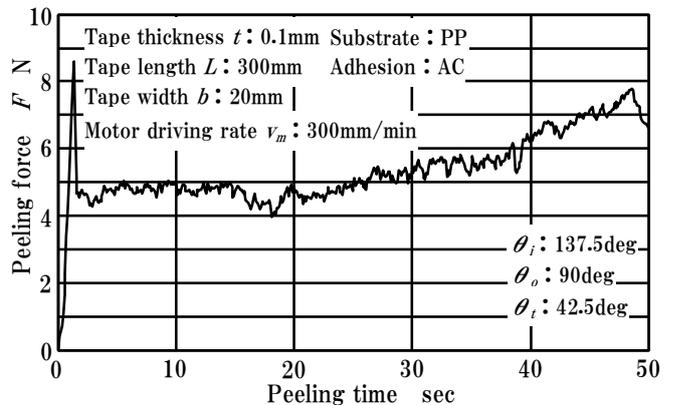


Fig.6 Typical record of peeling force

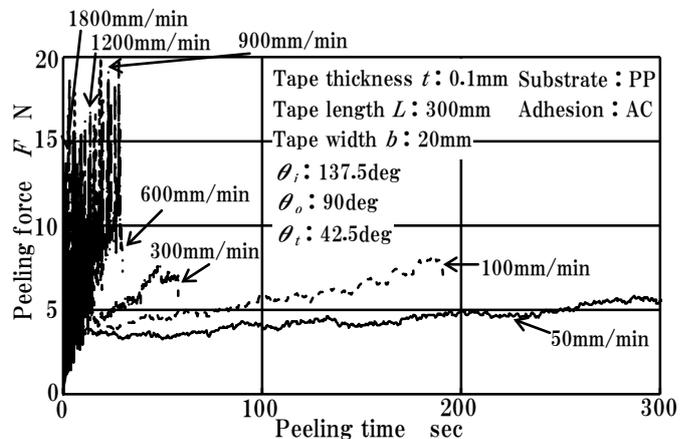


Fig.7 Records of peeling force

剥離速度 v_m が剥離力 F に及ぼす影響についての実験結果を Fig.8~Fig.11 に示す。中間剥離角 θ_o が 45° の場合が Fig.8, 90° の場合は Fig.9, 120° の場合が Fig.10, 180° の場合が Fig.11 である。

剥離角が小さい条件域の場合、剥離速度 v_m 及び剥離角は剥離力 F の変動に影響を及ぼしている (Fig.8)。一方、剥離角が大きい条件域の場合、剥離力 F は剥離速度 v_m と剥離角の影響をほとんど受けず、5 N 程度で安定している (Fig.10, Fig.11)。中間剥離角 90° の場合は、中間的な値を示す (Fig.7, Fig.9)。

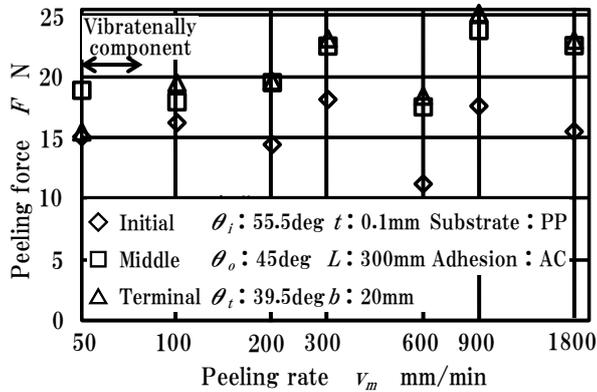


Fig.8 Influence of peeling rate on peeling force for middle peeling angle $\theta_o=45$ degree

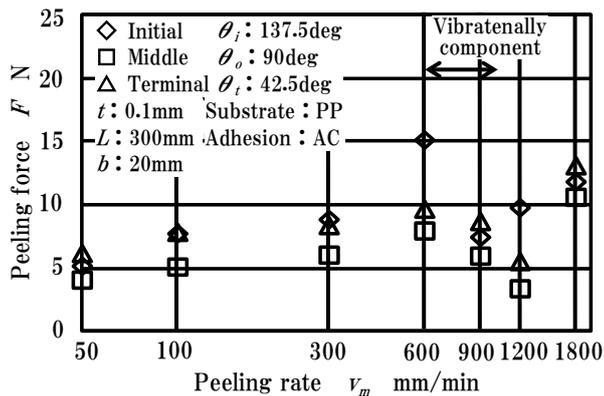


Fig.9 Influence of peeling rate on peeling force for middle peeling angle $\theta_o=90$ degree

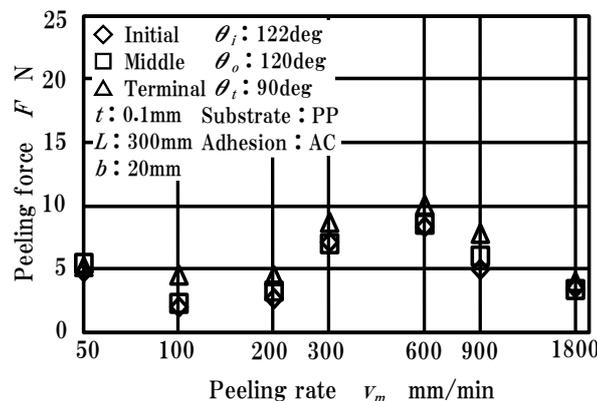


Fig.10 Influence of peeling rate on peeling force for middle peeling angle $\theta_o=120$ degree

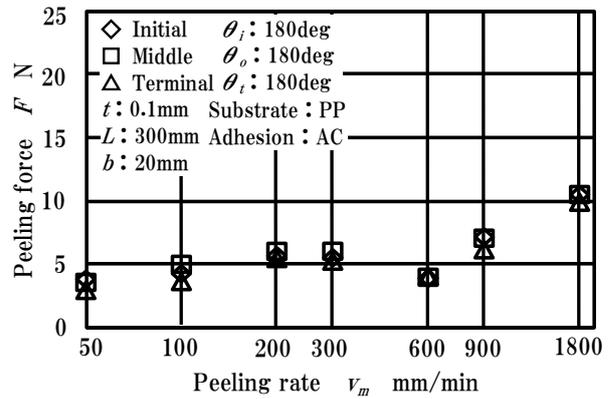


Fig.11 Influence of peeling rate on peeling force for middle peeling angle $\theta_o=180$ degree

5. 考察

5.1 剥離力に及ぼす剥離角及び剥離速度の影響

剥離角の変化により、Fig.5 に示すような剥離力の曲線をとることについては以下のような解釈が与えられている^{(3)~(5)}。すなわち、粘着テープをはりとしてモデル化し、剥離力 F によって接着端に発生する引張応力 σ_c を次のように導いた。

$$\sigma_c = A \sin \frac{\alpha}{2} + B \sin \alpha \quad (1)$$

A 及び B は、基材の材料特性及び形状により決まる。上式の右辺第一項ははりの曲げモーメントによるものであり、第二項は接着剤面に垂直に作用するせん断力によるものである。(1)式を図で示すと Fig.12 のようになり、ほぼ Fig.5 の傾向を説明することができる。

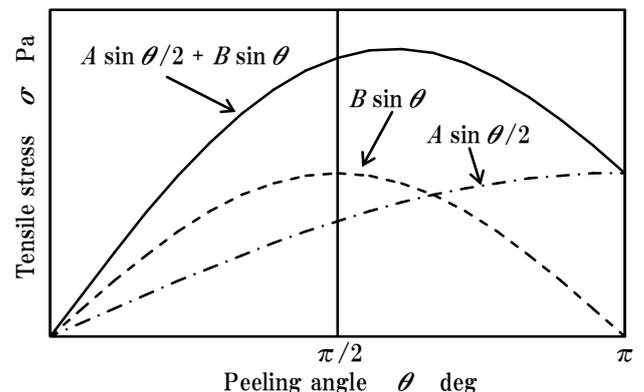


Fig.12 Influence of peeling angle on tensile stress

(1)式的前提は、接着剤の粘弾性効果及びテープの塑性変形を無視した純弾性理論である。剥離の場合、接着端には角度依存性のある応力集中が発生すると言われている。したがって、剥離角に対する応力集中効果も Fig.5 の傾向を説明するモデルの一つとなる⁽⁶⁾。

本研究の剥離速度は、解体能率を優先してかなり高速域の条件を採用しており、接着層で粘弾性効果が発現すると言われる $0.1 \sim 1 \text{ mm/min}$ の速度域をかなり上回っている。したがって、剥離力 F への速度依存性すなわち粘弾性効果を無視することができると思われる。

剥離角が大きい場合、粘弾性効果が発現しない速度域が存在することは、Fig.10 及び Fig.11 の結果からも確認できる。すなわち、界面破壊が発生するガラス状剥離領域とみなせる。いわゆる、糊残りが発生しない界面破壊領域であることは、試験片表面の観察によっても確認している。

5.2 剥離解体の最適作業設計

本研究では、ワイヤ巻き取り機構による剥離解体方式を採用している(Fig.3, Fig.4 参照)。その理由は、ワイヤ方式が以下のような長所を備えていることに考慮したものである。

- ① 駆動系がシンプルなメカニズムなため、省スペース化が可能。
 - ② 反力に対して柔軟に対応できる。
 - ③ 自重の割合には大きな力を出すことができる。
 - ④ 簡易軽量なメカニズムのため、低コストかつメンテナンス性に優れる。
 - ⑤ 移動性に優れる。
- しかし、次のような短所も考えられる。
- ⑥ ワイヤ干渉が起る可能性。
 - ⑦ ワイヤ自身のみによる作業方向の変更が不可。

前記⑦で述べたように、ワイヤ駆動剥離解体機構の場合、自身のみではその剥離力の方向を変化させることができない短所がある。そこで、剥離力を小さくする剥離角の作業領域で解体作業を実現するために、本研究では滑車を併用している。

滑車は、その配置によりワイヤの方向を変化させることが可能であり、さらに、構成部品としてシンプルで省スペースでの利用も可能な長所を備えている。

以上の基本的剥離機構をベースとした場合、最小駆動力及び最大剥離速度(最大解体能率)を実現できる最適剥離作業は以下のように設計できる。考え方の基本は接着構造の最弱部を解体作業で利用することである。

- ① 剥離角は、およそ $90^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で設定できればよい。この範囲内の特定の角度に固定する必要はない。
- ② 剥離角の調整により、解体対象形状に適応して接合端に大きな引張応力集中を発生させることができれば、剥離力はさらに小さくできる。Fig.1 の(a)引張モード、(c)せん断モードによる解体は避ける。
- ③ 粘弾性効果を発現させないために、剥離速度はテープが切れない範囲において、より高速な条件域を採用する。
- ④ 解体対象の形状が剥離角を小さく設定しなければならないような場合、すなわち、剥離角が 90° より小さい場合、剥離速度を低速化させる。

上記①については、Fig.8～Fig.11として、既の実験結果を示してある。Fig.10～Fig.11は、剥離角が $90^\circ \sim 180^\circ$ の範囲内で行われており、剥離力は角度に関係なく小さくかつ安定している。実際の現場における解体作業を想定して、上記の内容を検証するために剥離角が連続変化する基材形状を対象とした実験を行った。結果をFig.13に示す。

同図中に示すように、半球全周にわたって、幅 20mm の接着層を形成し、滑車の位置を半球の中心真上(Center)と左端真上(Left)の二位置に設定し、剥離力曲線を求めた。なお剥離開始点はいずれの場合も、半球左端位置(剥離角度 180°)である。

Fig.13の結果によると、半球の左半分においては、左端側駆動モードの剥離力が中心駆動モードより小さい。また、右半球においては、逆に中心駆動モードの剥離力が左端駆動モードより小さい。この実験の場合、剥離力が約 20N に達すると、基材テープの伸び現象が発生し、剥離力は直線的に増加するようになる。この伸びの大きさは中心駆動モードがより小さく、テープ切断のトラブルに対し余裕があった。

以上の傾向は、次のように理解できる。Fig.13に示す半球の左側においては、左端駆動モードの剥離角が中心駆動モードのそれより小さい。一方右半球においては、中心駆動モードの剥離角が左端駆動モードのそれより大きい。したがって、Fig.5の結果と合わせて、Fig.13の傾向を理解することができる。

この場合、剥離角が小さい剥離作業領域、すなわち、剥離力が

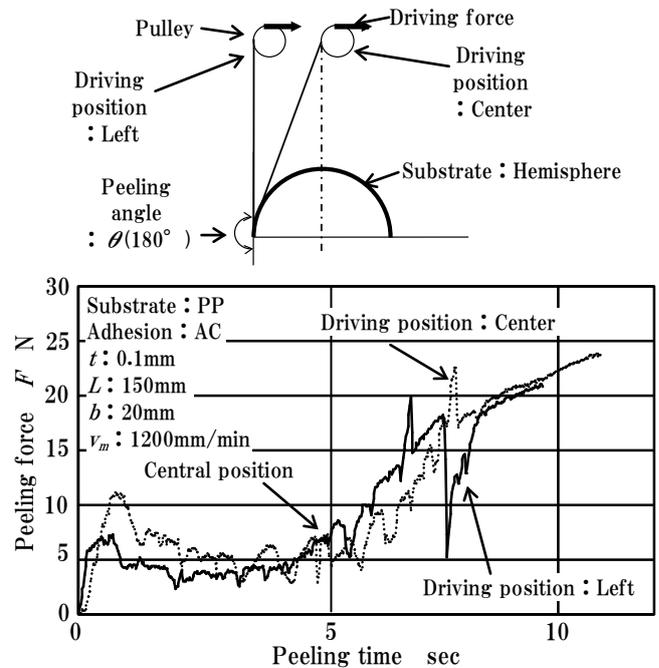


Fig.13 Influence of driving position on peeling force for hemisphere

大きくなる右半球部の領域において、より小さな剥離力を得られる駆動モードを選択すべきである。すなわち、中心駆動モードが最適駆動位置となる。

6. まとめ

薄板接着構造の効率的な剥離解体を目的として、剥離角を考慮して剥離速度が剥離力に及ぼす影響について明らかにした。その結果は以下のようにまとめられる。

- ① 剥離角がおよそ $90^\circ \sim 100^\circ$ 以下では剥離力に及ぼす剥離角の影響が大きく、剥離角がそれより大きい条件域では剥離力にほとんど影響しない。
- ② 剥離角が大きく、なおかつ本実験で採用したような高速剥離条件域では、剥離力はほぼ一定で剥離速度の影響はほとんど見られない。ただし、剥離角が小さい条件域では剥離速度が剥離力に影響を有している。
- ③ 前記の①、②の結果を基礎として、滑車を備えたワイヤ駆動剥離解体装置の最適作業設計について考察し、その内容の妥当性について確認実験をした。

本実験では、剥離速度を高速化しても剥離力はほぼ一定との結果を示した。しかし、さらに高速化した場合もその傾向が維持されるかどうかは更なる実験が必要と思われる。例えば、本文の Fig.6 及び Fig.7 で示したように、剥離開始時に見られるパルス状の高い剥離力がより顕著になり、結果としてテープ切れというトラブルに繋がることが予測される。これら的高速化阻害因子については、今後の研究が待たれる。

参考文献

- (1) Alphonsus V. Pocius, 接着剤と接着技術入門, 日刊工業新聞, 東京, (1999)
- (2) 剥がしたいときに剥がせる接着剤, NIKKEI MONOZUKURI, Sept. (2011), pp.68-77
- (3) 三田村隆司, 面接合部解体機械システムに関する基礎研究, 2003年度中央大学理工学部精密機械工学科卒業論文
- (4) 黒川慎, 製品の引きはがし解体に関する基礎研究, 2008年度中央大学理工学部精密工学専攻修士論文
- (5) 高分子学会, 接着, pp274-276, 丸善, 東京, (1966)
- (6) 日本材料科学会, 接着と材料, pp61-88, 裳華房, 東京, (1996)