

接着接合法の塑性加工への応用に関する研究 (接着接合体のスプリングバックを考慮した曲げ加工)

拓殖大学 工学部 機械システム工学科
教授 杉林俊雄
(平成5年度研究開発助成 AF-93005)

キーワード：接着接合体，ベンディング，スプリングバック

1. 研究の目的と背景

曲げ加工した金属薄板を部材として用いる構造物の組立工程において、従来では曲げ加工後に部材の接合が行われている。しかし、接合後に曲げ加工を行えば作業工程が少なくなり、コストや部材の接合に関する精度の点からも有利となる。金属薄板の接合法として有効な方法には、圧接や接着接合が挙げられる。圧接には、設備の大型化や接合後の部材に発生する残留応力などの問題がある。これに対して、接着接合は作業が容易であり、接合後の部材に発生する残留応力も少ない¹⁾。さらに、両面粘着テープ（以下両面テープと呼ぶ）を用いた接着接合は気密性保持、耐衝撃性などの面で接着剤よりも優れており、近年、接着剤に加え、両面テープで金属薄板を接合した接着積層材の曲げ加工法も提案されている。

曲げ加工において重要な問題点は加工後に発生するスプリングバックである。従来の曲げ加工では、曲げ変形部に引張負荷を加えるなどの方法によりスプリングバック量を減少させる加工が行われている。しかし、あらかじめスプリングバック量を予測できれば、特別な加工を行う必要がなくなり、作業工程の減少やコストの削減につながる。また、接着接合後に曲げ加工を行う場合には、接着層と金属薄板の弾性定数の差などにより、従来の曲げ加工方法では充分スプリングバックを減少できないことも考えられる。このことから、最終的に必要な形状になるようスプリングバック量を予測し、これを考慮して曲げ加工することが重要となる。

本報告では、二枚の金属薄板を接着剤及び両面テープで接合した三層積層材に対して三点曲げ試験を行い、曲げ加工後のスプリングバックについて実験的に検討する。さらに、スプリングバック量を考慮に入れ、目標の形状に曲げ加工する加工法を提案する。また、提案した加工法を行うために必要な三点曲げ加工時の支点間距離（スパン）とスプリングバック量の関係を検討する。

2. 加工に要する荷重と 加工後のスプリングバック量

2.1 試験片

被着体材料にはアルミニウム合金 A5052、冷間圧延鋼板 SPCC を使用した。Table 1 に被着体材料の機械的性質を示す。金属薄板の寸法は長さ 90mm、幅 25mm とし、

Table 1 Mechanical properties of adherend materials

| | Young's modulus E MPa | Yield stress σ_y MPa | Poisson's ratio ν |
|-------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| A5052 | 73 | 165 | 0.3 |
| SPCC | 165 | 174 | 0.3 |

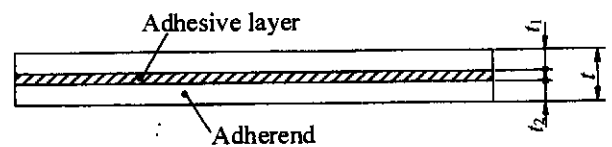
Table 2 The combination of metal plates

(a) Bonded with adhesive resin

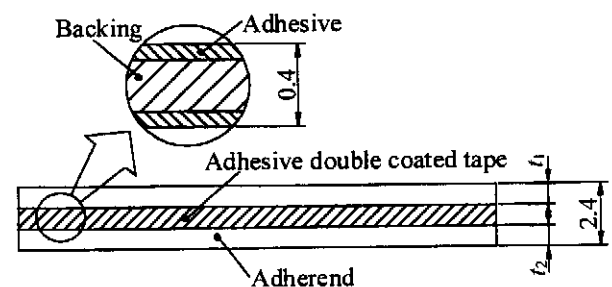
| | a | b | c | d | e |
|----------|------|------|------|------|------|
| t_1 mm | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| t_2 mm | 0.5 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.5 |
| t mm | 1.55 | 1.85 | 2.05 | 2.25 | 2.55 |

(b) bonded with adhesive double coated tape

| | L1 | U1 | L2 | U2 | C |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| t_1 mm | 0.5 | 1.5 | 0.8 | 1.2 | 1.0 |
| t_2 mm | 1.5 | 0.5 | 1.2 | 0.8 | 1.0 |
| t mm | 2.4 | | | | |



(a) Sandwich plate bonded with adhesive resin



(b) Sandwich plate bonded with adhesive double coated tape

Fig.1 Shape and dimension of specimen

板厚は、それぞれ 0.5、0.8、1.0、1.2、1.5mm とした。接着剤は住友スリーエム(株)製二液性常温硬化型エポキシ系接着剤 DP420 を使用した。両面テープは住友スリー

エムケイ製 VHB アクリルフォーム接着材 Y4922 (厚さ 0.4mm) を用いた。曲げ負荷に対する試験片は二枚の金属薄板を接着剤または両面テープで接合した三層積層材とした。Table 2 に金属薄板の組み合わせを示し、Fig.1 に試験片形状をそれぞれ示す。接着剤による接合の場合は板厚 1.0mm の金属薄板と各板厚の金属薄板を組み合わせた。両面テープによる接合の場合は板厚の合計が 2.0mm となるように組み合わせた。また、比較のため接合していない一枚板の試験片(P 試験片)も用いた。なお、接着層厚さはほぼ 0.05 mmとし、両面テープの厚さは 0.4 mmとした。

2.2 実験方法

Fig.2 に三点自由曲げ試験の方法を示す。Fig.2(a)は加工前、Fig.2(b)は加工後の状態をそれぞれ示している。試験片の下面側に設置した変位計により押し込み変位を測定し、この測定値により上部ポンチの変位を制御して曲げ試験を行った。

2.3 実験結果

接着剤で接合した積層材の曲げ加工時における荷重-変位曲線と加工後におけるスプリングバック量をそれぞれ Fig.3、Fig.4 に示す。Fig.3 の図(a)は A5052、図(b)は SPCC を被着体とした場合の結果である。荷重-変位曲線において積層材と板厚 2.0mm の一枚板とを比較すると、板厚 2.05mm の c 積層材 (Table 2 (a)参照) と一枚板はほぼ同じ傾向の曲線となった。また、加工後のスプリングバック量も c 積層材と一枚板とでほぼ同じ値を示した。これは、接着剤の剛性が比較的高く、また接着強度も高いためである。従って、本接着剤で接合した積層材は一枚板のような単体の材料とみなすことができる。

両面テープで接合した積層材の曲げ加工時の荷重-変位曲線と加工後におけるスプリングバック量をそれぞれ Fig.5、Fig.6 に示す。Fig.5 の図(a)は A5052、図(b)は SPCC を被着体とした場合の結果である。荷重-変位曲線において、加工に要する荷重は L1、U1 積層材 (Table 2 (b)参照) がその他の積層材に比べて高くなった。また、各積層材と板厚 2.0mm の一枚板とを比較すると、積層材の加工に要する荷重は一枚板の加工に要する荷重よりも低くなった。加工後のスプリングバック量は積層材の方が板厚 2.0mm の一枚板よりも大きくなり、L1、U1 積層材のスプリングバック量がその他の積層材に比べ小さくなった。これらの結果が得られる理由は以下のように考えられる。両面テープの変形可能量は接着剤の変形可能量に比して充分に大きいため、長手方向の両面テープの変形量が大きくなる。また、接着強度が接着剤に比して低いため、長手方向にすべりを生じる。その結果、両面テープで接合した積層材では Fig.7 に示すように試験片端部にずれを生じ、接着剤で接合した積層材のように単一材料とみなすことができない。従って、

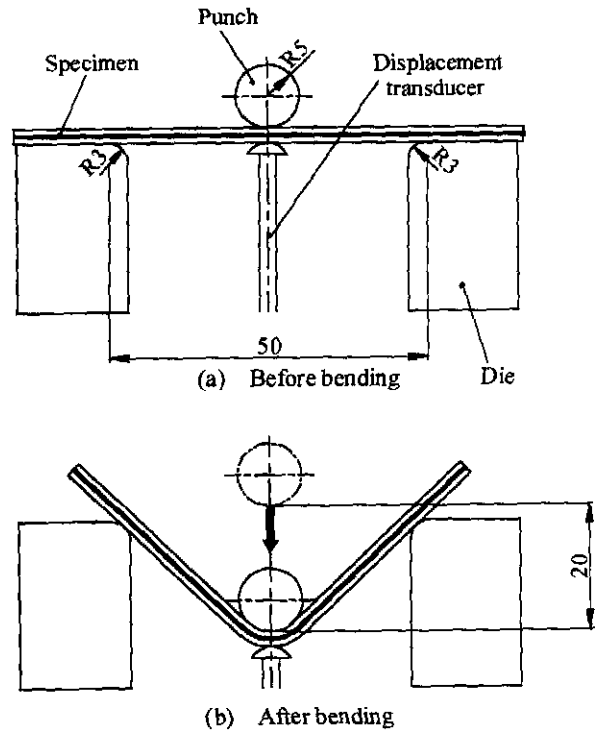
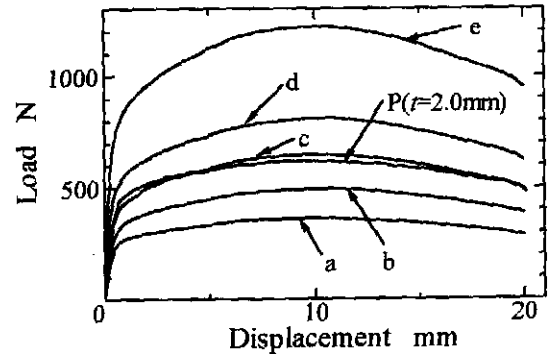
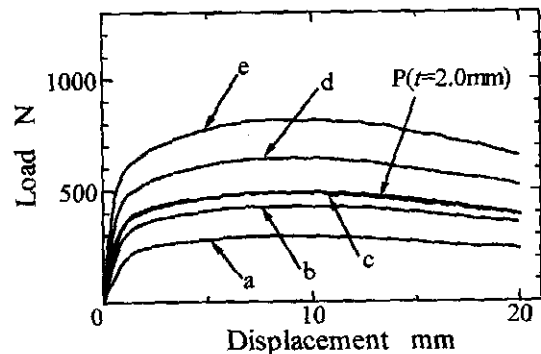


Fig.2 Three point bending test



(a) A5052



(b) SPCC

Fig.3 Load-displacement curves for sandwich plate bonded with adhesive resin

両面テープで接合した積層材の変形挙動は、二枚の金属薄板を接合せずに重ね合わせて加工した状態に近くなり、

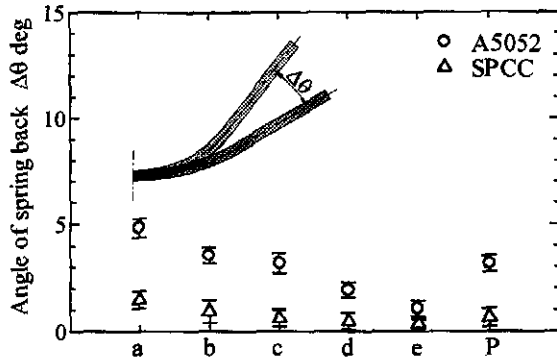


Fig. 4 The angle of spring back for sandwich plate bonded with adhesive resin

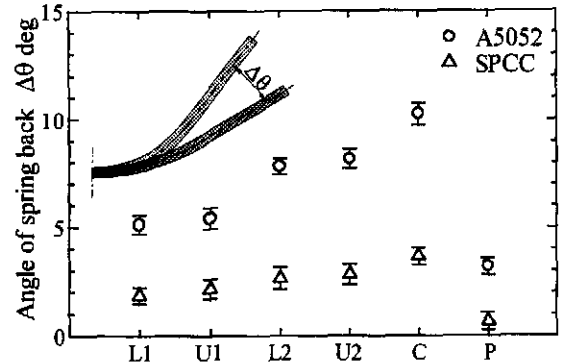
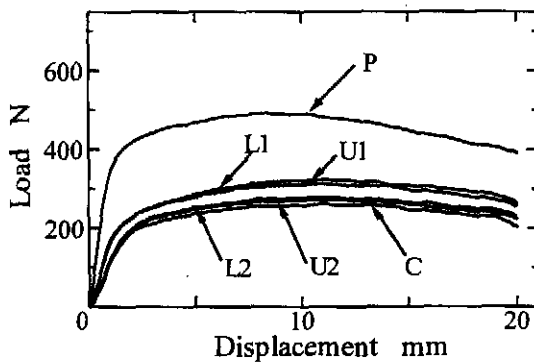
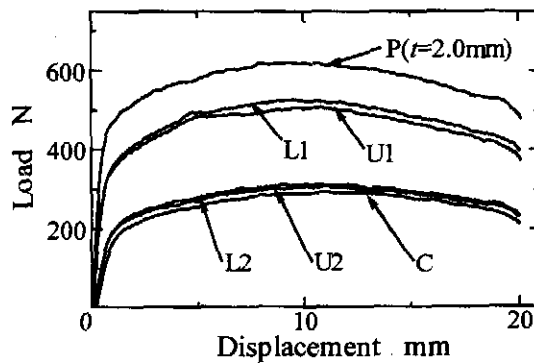


Fig. 6 The angle of spring back for sandwich plate bonded with adhesive double coated tape



(a) A5052



(b) SPCC

Fig. 5 Load-displacement curves for sandwich plate bonded with adhesive double coated tape

積層材を構成する二枚の金属薄板の曲げ剛性に依存する。L1 積層材と U1 積層材、及び L2 積層材と U2 積層材を比較すると、Fig. 5 と Fig. 6 にそれぞれ示すよう荷重-変位曲線とスプリングバック量は同じ傾向でほぼ同一の値となった。これは試験片の上下で板厚、すなわち断面二次モーメント I の異なる板を接合した場合、上下が逆になっても加工に要する荷重やスプリングバック量は同一であることを示している。

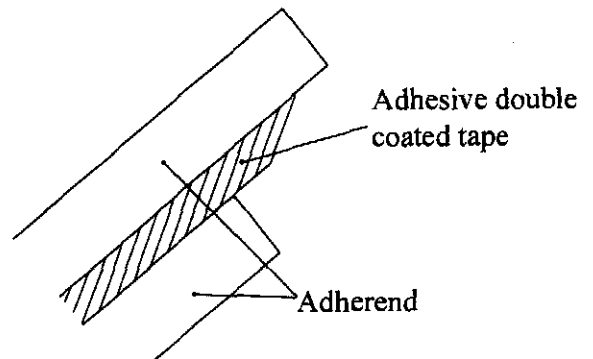


Fig. 7 Edge of specimen bonded with adhesive double coated tape after bending

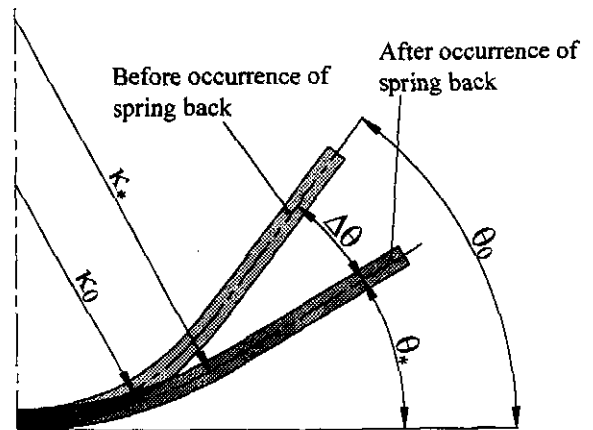


Fig. 8 Occurrence of spring back

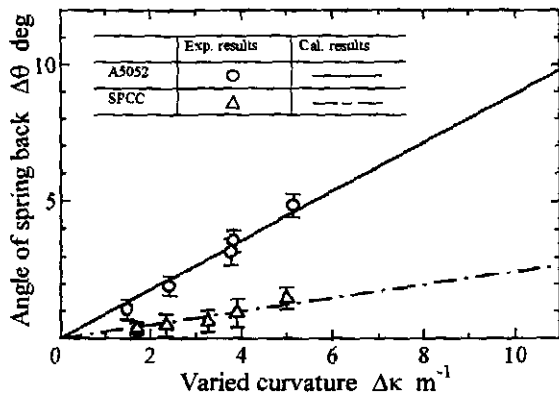
3. スプリングバック量の予測

3.1 曲げ理論に基づくスプリングバックの予測法

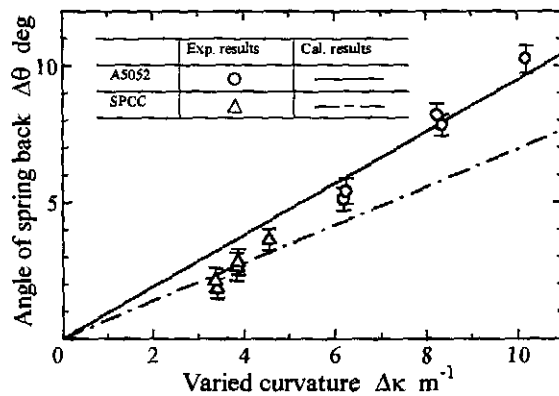
曲げ加工後に除荷すると Fig. 8 のようにスプリングバックが生じる。スプリングバック量 $\Delta\theta$ は一枚板の曲げ理論²³⁾²⁴⁾より式(1)として表される。

$$\Delta\theta = \frac{M_0\theta_0}{EI\kappa_0} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 θ_0 はスプリングバックが生じる前の角度（以下初期曲げ角度と呼ぶ）、 M_0 及び κ_0 はそれぞれ初期曲



(a) Bonded with adhesive resin



(b) Bonded with adhesive double coated tape

Fig.9 Angle of spring back-varied curvature relation for sandwich plate

げ角度 θ_0 におけるモーメント（以下初期曲げモーメントと呼ぶ）と曲率である。式(1)より、スプリングバックは縦弾性係数 E 、断面二次モーメント I 、初期曲げモーメント M_0 に依存して生じる。ここで接着剤で接合した積層材は単一材料とみなせるため、接着部を断面積の小さい金属に置き換え、I型断面の金属であると仮定して断面二次モーメント I を算出した。また、両面テープで接合した積層材は二枚の板を単純に重ね合わせたものとして断面二次モーメント I を算出した。これらの断面二次モーメント I を用いて算出したスプリングバック量 $\Delta\theta$ と曲率変化 $\Delta\kappa$ との関係及び実験結果を Fig.9(a)、(b)にそれぞれ示す。Fig.9に示すように、計算結果と実験結果はほぼ一致した。従って、積層材にも式(1)を用いることが可能である。また、接着積層材を曲げ加工した際に発生するスプリングバック量を予測することも可能であると考えられる。

3.2 スプリングバック量を考慮した加工

スプリングバック量を考慮して曲げ加工を行い、スプリングバックが生じた後に目標の形状にするためには、スプリングバックが生じた後の角度 θ_0 （以下目標曲げ

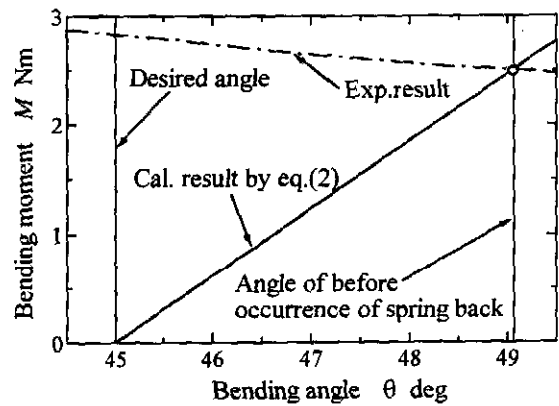


Fig.10 Bending in consideration of the angle of spring back

角度と呼ぶ）と初期曲げ角度 θ_0 の関係を知る必要がある。これらの関係は式(1)及び曲げ角度 θ 、曲率 κ の関係から式(2)によって表される。

$$\theta_0 = \left(1 + \frac{M_0}{EI\kappa_*}\right)\theta_* \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 κ_* はスプリングバックが生じた後の曲率（以下目標曲率と呼ぶ）である。初期曲げ角度 θ_0 と初期曲げモーメント M_0 は未知数であるが、実験により測定できる。従って、あらかじめ実験を行い、曲げ角度 θ と曲げモーメント M の関係を測定すれば、スプリングバック量を考慮した加工が可能になる。

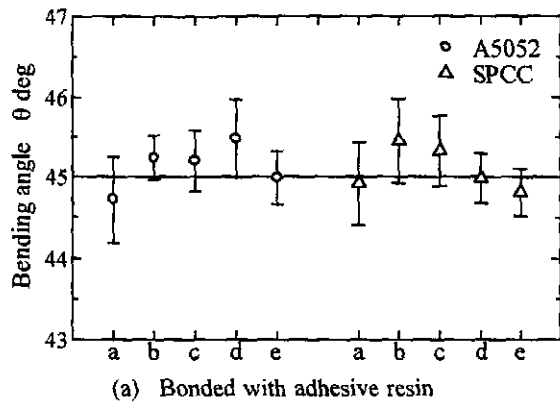
加工の一例として、アルミニウム合金 A5052、板厚 1.0mm、0.5mm の薄板を接着剤で接合した a 積層材について、目標曲げ角度 $\theta=45^\circ$ に加工する手順を示す。

まず、縦弾性係数 E 、断面二次モーメント I 、目標曲率 κ_* 、目標曲げ角度 θ_* の値をそれぞれ式(2)に代入し、初期曲げモーメント M_0 と初期曲げ角度 θ_0 の関係を直線で表す (Fig.10 の太線)。次に、実験により曲げモーメントと曲げ角度の関係を調べる (Fig.10 の一点鎖線)。両線の交点 (Fig.10 の○印) の示す角度がスプリングバック量を含んだ初期曲げ角度 θ_0 となる。すなわち、目標曲げ角度 θ_* が 45° の場合はスプリングバック量を考慮に入れた初期曲げ角度 θ_0 は約 49.7° となる。

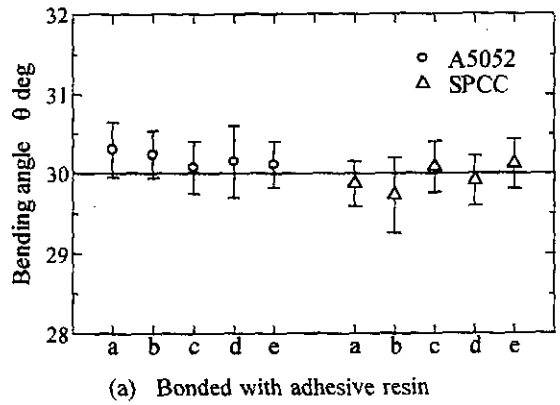
以上の手順により、各積層材についてスプリングバックを考慮した加工を行った。目標曲げ角度 θ_* は 45° 、 30° 、 15° とした。ここでは、A5052を接着剤で接合した積層材を用い、目標曲げ角度 θ_* を 45° 、 30° に設定した時の結果を Fig.11、Fig.12 にそれぞれ示す。全ての結果について約 1° のばらつきがみられた。しかし、目標曲げ角度 θ_* はそのばらつきの範囲に入っており、本方法により接合後の曲げ加工が可能になると考えられる。

4. スパンとスプリングバック量の関係

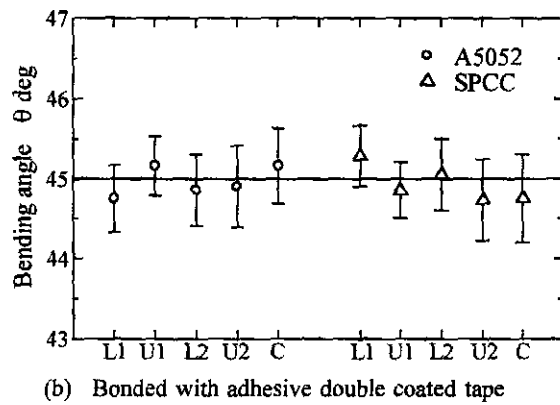
曲げ加工後に発生するスプリングバック量 $\Delta\theta$ を予測するためには、ある目標曲げ角度 θ_* において初期曲げ



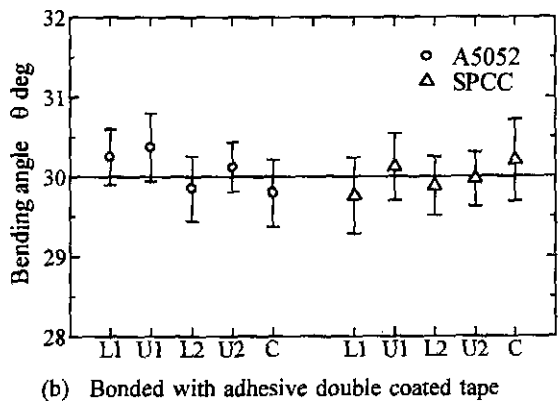
(a) Bonded with adhesive resin



(a) Bonded with adhesive resin



(b) Bonded with adhesive double coated tape



(b) Bonded with adhesive double coated tape

Fig.11 Results of bending test was set of desired angle for sandwich plate ($\theta = 45^\circ$)

Fig.12 Results of bending test was set of desired angle for sandwich plate ($\theta = 30^\circ$)

角度 θ_0 がスパンによらず一定とならなければならない。そこで、Fig.13 に示す変形を仮定し、目標曲げ角度 θ_0 及びスパン l 、変位 y を関係を求めた。目標曲げ角度 θ_0 を 45° とし、スパン l を21mmから30mmの範囲で変化させ、算出した変位 y の値まで積層材を変形させる実験を行った。

ここでは、被着体材料をA5052とし、板厚1.0mmの板を接着剤で二枚接合したA-c積層材、両面テープで接合したT-C積層材により得られた結果を示す。まず、加工時の荷重と変位 y の関係をFig.14に示す。また、それぞれのスパン l とスプリングバック量 $\Delta\theta$ の関係をFig.15に示す。○印は接着剤で接合した場合、□印は両面テープで接合した積層材の結果である。Fig.14の荷重-変位曲線においてスパン l が25mmよりも短い場合、変位 y が5~6mmに達した後、加工に要する荷重が急激に増加した。Fig.15に示すようにスプリングバック量 $\Delta\theta$ の値はスパン l が25mmよりも短くなると減少した。このような結果が得られる理由は以下のように考えられる。曲げ剛性が一定であれば、曲げ加工に要する曲げモーメントは変化しない。このため、Fig.14に示すように加工に要する荷重が増加する。加工に要する荷重が増加すると、ダイ肩部での摩擦力の増加し、曲げ変形している部分は曲げ負荷と引張負荷が同時に作用した状態にな

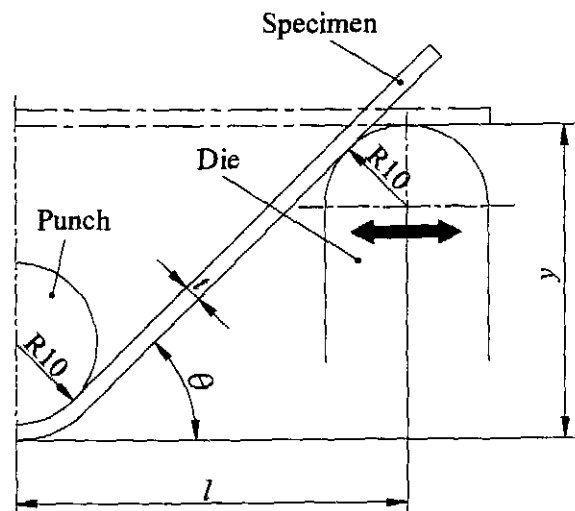


Fig.13 Change of the span

る。従って、曲げ剛性が変化した場合と同様の効果が生じ、曲げモーメントが減少する³⁶⁾。式(1)よりスプリングバック量 $\Delta\theta$ と初期曲げモーメント M_0 は比例関係にあるため、スプリングバック量 $\Delta\theta$ も減少する。この時の引張力を測定するため、Fig.16に示す位置にひずみゲージを貼付し実験を行った。Fig.16(a)は加工前、Fig.16(b)は加工後の形状を示す。スパン l は21mmと30mm

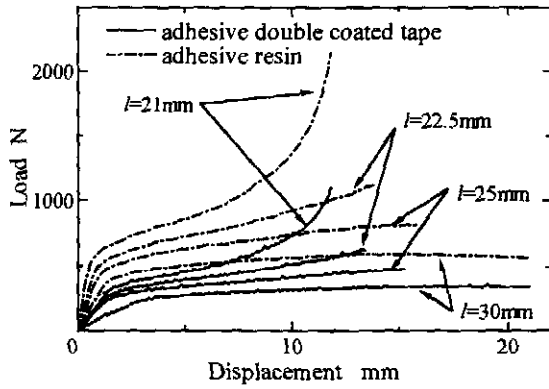


Fig.14 Load-displacement curves for the span was changed

の二種類とした。試験片には A5052、板厚 2.0mm の一枚板を用いた。ゲージ 2、ゲージ 3 の位置は曲げ加工後、Fig.16(b)に示すように支点よりも上側になる。このため、この位置でひずみは生じなかった。また、スパン l が 30mm の場合、引張力の発生が小さいため、ゲージ 1 の位置でもひずみは生じなかった。Fig.17 にスパン l が 21mm の場合におけるゲージ 1 でのひずみと変位の関係を示す。Fig.17 に示すように変位が 7~8mm に達した後、ひずみが急激に大きくなった。これは試験片に引張力 P が作用したためである。この引張力 P はダイ肩部での摩擦により生じていると考えられる。

以上の結果から、スパン l が短い場合、曲げモーメントの予測が困難になり、スプリングバック量の予測、さらにスプリングバック量を考慮した加工も困難となる。従って、スパン l を決定するときには引張荷重が増加しないような寸法とする必要がある。

5. 結言

本研究では、二枚の金属薄板を接着剤、及び両面テープで接着接合した三層積層材に対して三点曲げ試験を行い、加工後のスプリングバック量について実験的に検討した。得られた結果を以下に示す。

1. 接着剤で接合した積層材の荷重-変位曲線とスプリングバック量は、板厚が近い一枚板の値とほぼ一致した。
2. 両面テープで接合した積層材では、積層材と近い板厚の一枚板よりも加工に要する荷重は低くなり、スプリングバック量は大きくなった。
3. 一枚板の曲げ理論が積層材にも適用できるため、計算によりスプリングバック量を予測し、それを考慮した加工が可能である。
4. スパンを小さくすると、引張り曲げの状態になりスプリングバック量は減少し、予測が困難になる。

謝辞

本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により行いました。深く感謝いたします。

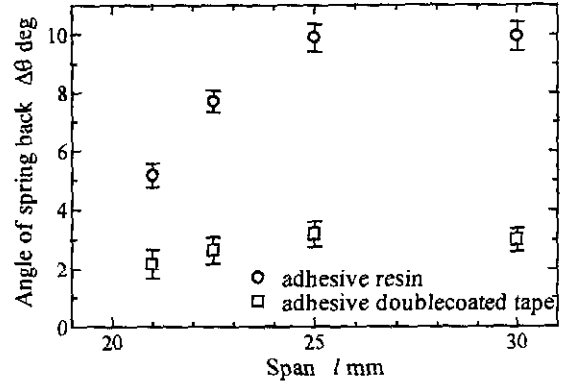
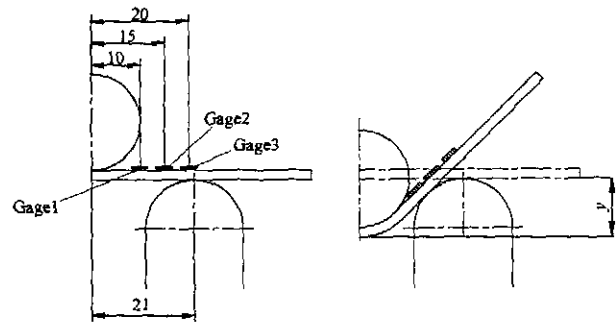


Fig.15 Relation of span and angle of spring back



(a) Before bending (b) After bending

Fig.16 Location of strain gage($l=21\text{mm}$)

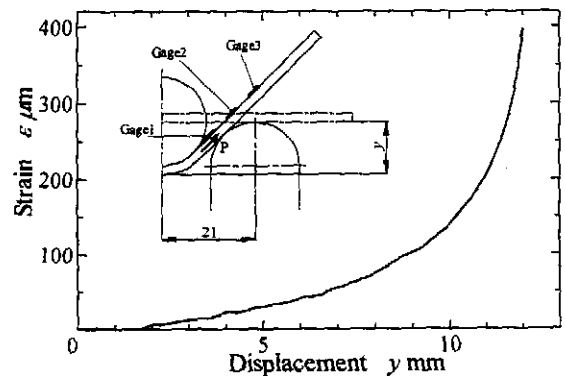


Fig.17 Strain-displacement curve for occurrence of tensile load (gage1, $l=21\text{mm}$)

参考文献

- 1) "最新 接合加工技術とその応用", 日本機械学会編, 日刊工業新聞社, pp.13-81, 1993.
- 2) 吉田総仁, "弾塑性力学の基礎" 共立出版, pp.128-133, 1997.
- 3) 益田森治, 室田忠雄, "工業塑性力学", 養賢堂, pp.37-53, 1986.
- 4) 平修二, "現代塑性力学", オーム社, pp.57-73, 1990.
- 5) 中原一郎, "材料力学 上巻", 養賢堂, pp.98-100, 1990.
- 6) S.Timoshenko 著, 鶴戸口英善, 国尾武 訳, "材料力学 上巻", 東京図書, pp.88-131, 1986.