FRP 単純重ね継手の接着強度に及ぼす 接着部の形状とラップ長の影響*

宮 入 裕 夫** 福 田 秀 昭***
永 井 正 洋*** 村 松 篤 良**

Effects of Joint Shape and Lap Length on Adhesive Strength of FRP Single Lap Joints

by

Hiroo MIYAIRI, Hideaki FUKUDA, Masahiro NAGAI
and Atsuyoshi MURAMATSU

(Institute for Medical and Dental Engineering, Tokyo Medical and Dental University, Tokyo)

Recently, the adhesive bonding technique has become an important problem as FRP is now being applied to large structural constructions. In the past, the studies of structural adhesive bonding were usually made on the adhesive lap joints of aluminum adherents, and the fracture behaviors of these adhesive joints were simply followed by identifying the fracture type as the cohesion fracture of adhesive layers or the interfacial fracture. However, FRP lap joints usually show very complicated fracture. So, in this report, it was attempted to investigate the fracture behaviors and the configuration of the FRP adhesive lap joints. The correlation between deformation and fracture of the lap joints was examined based on the experimental results. The results showed that the deformation of the lap joint was directly related to the joint shapes (lap length and scarf angle). Furthermore, the fracture behaviors of FRP adhesive joints were discussed and clarified.

(Received June 11, 1980)

キー・ワード：スカーフ継手，被着材の変形，接着部の破壊，ウレタン系接着剤

1 緒 言

強化プラスチック (FRP) の大形構造物への応用は近年ますます盛んになっており，特殊な構造物を除いては，そのほとんどが接着および機械的接合を用いた組立て構造となっている。そのため FRP の大形構造物の組立ては工場生産された部分構造物の接合技術に依存しており，FRP 構造における接着接合はとくに基礎的な重要な問題となっている^{1,2)}。しかし，接着に関する研究は，従来，アルミニウム合金を被着材とした重ね継手に関する基礎的な問題を対象としたものが多く，理論的な研究については，O. Volkersen, M. Goland and E. Reissner⁴⁾などの報告がある。そして，これらの解析はすべて接着層に生ずる応力に関するもので，負荷応力についても被着材は接着層に対し平行

に負荷される場合について行っている。また，スカーフ継手に関しては接着層全面にスカーフ角を施した特殊な場合について F. Thamm⁵⁾の解析があるが，結果は接着層の応力分布を対象としたものである。そして，接着部の破壊は接着剤の凝集破壊か接着剤/被着材の界面破壊を対象としたものでおよそ実用的な FRP 接着継手の破壊の様相とは異ったものである。

本報では，FRP 接着継手としては最も基本的な重ね継手の接着部の破壊について破壊の状況とラップ部の形状に注目し，被着材の変形と接着部の破壊について検討した。そして，被着材の変形と接合部の寸法形状，ラップ長，スカーフ角との関係については両者の相関を把握するとともに FRP 接着部の破壊挙動に関し基礎的な検討を行ったものである。

2 被着材および接着剤

被着材は一般構造用 FRP として用いられているガラス/ポリエステル⁶⁾の構成によるもので，ガラス含有率は 39wt. % を目標としてハンドレイアップ法により

* 原稿受理 昭和55年 6 月11日

** 正 会 員 東京医科歯科大学医工器材研究所

*** 東京医科歯科大学医工器材研究所 東京都千代田区神田駿河台

成形した。

Table I はマット／ロービング (M/R)FRP 被着材の構成とガラス含有率を示したもので、マトリックスには常温硬化型の一般用ポリエステル樹脂を使用した。また、接着剤には二液性のウレタン系無溶剤型接着剤として市販されているもので (ユニボン5000A, 三洋化成製)、とくにプラスチック系被着材に対してはサンディングまたはプライマなどの表面処理を施さなくても充分接着力が発揮できると称せられているものである。したがって、一般構造用接着剤として使用されているエポキシ系の接着剤と異り、耐衝撃性の改良のため接着剤の弾性係数も従来のものに比べ多少低くなっている。また、接着剤は他の構造用と同じく、主剤と硬化剤 (ユニボン5000A, ユニボン5005(N)) とに別れており、両者の配合比を 1:1 として使用するもので、それらの詳細は Table II に示すとおりである。

Table I. Constitution of glass fiber reinforced plastics.

Glass fiber reinforced materials	Matrix	Glass contents (wt.%)
Glass mat/Roving cloth/Glass mat (M 600 + R 580 + M 600)	Polyester resin	39.0

Table II. Characteristic of urethane adhesive.

Item	Adhesive	
	Base polymer Unibon 5000A	Hardener Unibon 5000N
External appearance	Yellowish brown	Blue color
Viscosity (CPS/25°C)	12 000	30 000
Specific gravity (20°C/4°C)	1.2	1.4
Solidity (%)	100	100
Time to the solid state	—	72
Hardness (Shore D)	—	65
Mixture ratio (wt)	—	1:1
Base polymer: Hardener	—	—

3 継手寸法と試験方法

3.1 継手寸法と接着方法

Fig. 1 は試験を行った重ね継手の形状および寸法を示したもので、ラップ長 l は $l=12.5, 25.0, 50.0$ mm, スカーフ角 θ は $\theta=90^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ の各組合せについて試験した。そのときの試験片幅は $b=15, 20, 25$ mm の 3 種類を選択した。接着方法は被着材接着部の一方に接着剤を塗布し、もう一方をそれに重ね合わせ、その後、50 g/cm² の圧力下で 20℃, 2 時間養生したものである。なお、試験までは 23℃, 55% RH の標準状態に 3 週間以上放置した。また、接着層厚さは接着前後の厚さ測定の結果約 0.2 mm 程度となっている。

Fig. 1. Configuration and dimensions of test specimens.

3.2 試験方法

重ね継手の引張せん断試験は荷重速度 1.5 mm/min として、23℃, 55%RH の標準状態において試験を行った。伸びの測定はラップ長の異なる各種重ね継手についてすべて標点距離 L を $L=80$ mm とした。なお、試験の際生ずる被着材の伸びは接着部の変形に比べてきわめて小さく、したがってここでは被着材の変形を無視した。また、接着破壊試験に関してはそれぞれの条件につき最低 5 本以上とし、それぞれの平均値をもって表示した。

4 接着継手の応力-伸び線図と破壊の状況

Fig. 2 はラップ長 $l=25$ mm, 試験片幅 $b=15.0$ mm の接着継手について、スカーフ角 θ をパラメータに、せん断応力-伸び ($\tau_0-\delta$) 線図を示したものである。接着継手の伸びは θ の減少にともない減少し、継手のみかけの剛性は増大することが示される。そして、 θ の減少にともない接着部の応力集中は低減されるため、みかけの平均せん断破壊強度は増加する。また、このような線図は、試験片幅の変化にともない多少異なるが、ラップ長の増加に対し、接着部の剛性は減少し、

Fig. 2. Average shear stress and elongation diagrams.

破壊伸びは増加する。したがって、ラップ長の増加はウレタン系の接着剤では接着部の変形の増大と剛性の低下となって現れ、従来のエポキシ系の接着剤とは異り、ラップ長の増加は破壊伸びの増加となって接着強度に大きく寄与していることが示される。

接着部での破壊の状況はラップ長とスカーフ角との変化によってその様相は異なる。まず、ラップ長に関しては、 $l=12.5$ mm のものについてはほとんどが接着

剤の凝集破壊を示し接着剤と母材との界面破壊は少い。また、スカーフ角の減少にともない接着剤の凝集破壊の現れる傾向は増大する。しかし、 $l=25.0, 50.0\text{mm}$ の接着継手については接着剤の凝集破壊、接着剤/母材との界面破壊は現れず、すべて FRP 母材の層間破壊となる。Fig. 3 はラップ長 $l=50.0\text{mm}$ 、スカーフ角 $\theta=90^\circ$ の場合に負荷の増大にともなう生ずる被着材の変形の様相を示したもので、被着材はラップ長端部で局所的な変形を生じ、母材の損傷は金属系の被着材に比べ大きいことが示される。

$P = 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 \text{ (Kg)}$
 $T = 0, 0.07, 0.13, 0.20, 0.27, 0.33, 0.40, 0.47, 0.53 \text{ (Kg/mm}^2\text{)}$
 $l = 50 \text{ mm}, \quad \theta = 90^\circ$

Fig. 3. Deformation of single lap joint under tension-shear stress.

Fig. 4 はスカーフ角の変化にともなう変化する重ね継手の典型的な破壊状況を示したものである。接着部の破壊は接着剤の凝集破壊、界面破壊はほとんどなく、すべて FRP 母材の層間破壊となる。スカーフ角 $\theta=90^\circ$ では被着材端部の母材表面から破壊が発生し、破面の先端は母材のマット/ロービング層に沿って接着部の中心部へと進展していく。したがって、このような破壊には母材でのマット層の破壊の発生を防止することが接着部の強度向上となることが示唆される。しかし、スカーフ角が $\theta=45^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ と減少するにともない接着部での破壊の発生は接着層端部のスカーフ部に移行し、母材のマット/ロービング層のはく離が進展して破断に至る。そのときの破壊発生位置は θ

Fig. 4. Typical state of scarf and single lap joints.

の減少とともに被着材表面層に近づくことが示される。したがって、このような破壊では接着層端部での曲げ変形にともなう母材の層間のはく離が大きな原因となっており、接着部の破壊防止にはスカーフ角端部での破壊の発生の防止が重要課題となることが指摘される。

5 接着強度に及ぼす継手の形状寸法

Fig. 5 はスカーフ角をパラメータに試験片幅 $b=15, 20\text{mm}$ の場合の接着継手の平均せん断破壊強度 τ_B と被着材の板厚 t とラップ長 l とで決まるジョイントファクター $\sqrt{t/l}$ との関係を示したものである。それによると継手の接着強度は試験片の幅により多少異なるが、スカーフ角の減少にともない τ_B は増加する。そして、スカーフ角を有する接着継手のラップ長は l を接着層の長さとして定めたため実際の平行部がここで示される値より小さい。したがって、 $\sqrt{t/l}$ は $\theta=90^\circ$ 以外のスカーフ継手では平行な接着層は l より小さく、 l を平行な接着層長さとして定めれば θ の減少による接着強度の増大はさらに大きくなるものと考えられる。図に示すように $\tau_B - \sqrt{t/l}$ 線図は試験片の幅の増加にともな

Fig. 5. Breaking shear strength and joint factor diagrams.

って上に凸の曲線となる傾向を示す。また、接着継手の強度はジョイントファクターの増大とともに θ の影響は大きくなることが示される。しかし、 θ の減少による影響は l の大きな接着継手ほど τ_B への効果は低下する。したがって、このような状況から判断すると、 θ の減少による破壊強度への効果は一般に幅の広い試験片のほうが大きい、実用的な l の大きな接着継手では静的破壊試験でみる限り顕著な力学的効果は現れない。そして、試験片幅の広い接着継手に関しては、接着部側面に生ずる応力集中について、 θ による接着部の応力集中の低減と同時に充分な検討が必要である。

6 接着部母材のひずみ測定

FRP 重ね継手の接着部での破壊状況から、母材の

破壊は接着継手の大きな問題点であることが指摘される。そこで、ラップ長の大きい実用的な接着継手について FRP 母材のひずみの測定を行った。

その結果、接着部の母材のひずみ分布は $\theta=90^\circ$ と $\theta=45^\circ$, 30° , 15° のスカーフ継手とはまったく異なることから、ここでは実用的なラップ長 $l=50$ mm について行った $\theta=90^\circ$ と $\theta=15^\circ$ の場合について検討した。なお、ひずみの測定にはゲージ長 3 mm の 1 軸のひずみゲージ (KFP-3-350-CI-65, 共和電業製) を用いた。

(a) Adherent strain and tension load diagrams, ($\theta=90^\circ$)

(b) Adherent strain and tension load diagrams ($\theta=15^\circ$)

Fig. 6. Adherent strain and tension load diagrams of the scarf and single lap joints.

Fig. 6 (a), (b)は $\theta=90^\circ$ と $\theta=15^\circ$ のラップ継手の FRP 母材に生ずるひずみを縦軸に、継手に加えた荷重を横軸として表示したものである。 $\theta=90^\circ$ の場合のひずみはすべて圧縮ひずみとなり、ゲージ #1 (以下ゲージ位置については # を付けて表示する) を除き #2~#6 のものは荷重の増大に対しほぼ直線的に増加する。そして、#1 では他のひずみ量に比べひずみの

大きさも大きく、また、荷重の増加にともなって非線型的な挙動を示す。これは FRP のような弾性係数の低い被着材に生ずる接着部端部での局部的な曲げ変形によるもので、他の部分のひずみに比べ 4~5 倍の値となっている。また、#1 のひずみは圧縮ひずみを呈しており、接着部には被着材の局部的な曲げにより接着部端部には大きな離断応力の作用することが示される。 $\theta=90^\circ$ の場合は Fig. 3 で示した接着部の変形でも充分理解することができる。スカーフ角を有する $\theta=45^\circ$, 30° もほぼ $\theta=15^\circ$ と同じく、その挙動は $\theta=90^\circ$ の場合とかなり異なることが示される。接着部に加わる荷重の増大にともない #2~#6 のひずみはほぼ直線的に大きくなるが、#1, #7 のひずみは非線型的な挙動を示す。そして、#1 のひずみは $\theta=45^\circ$, 30° の場合も $\theta=15^\circ$ の場合と同じく荷重の増大とともにほぼ 1000 μ 程度のひずみを最大値として低下する。したがって、#1 でのひずみは破壊近傍ではむしろ引張りひずみとなることが予想される。一方、#7 のひずみは荷重 P の増加とともに増大し、また、 θ の増加とともに増大する。そして、接着部の変形は #7 が圧縮ひずみでなおかつ #7 の反対側が大きな引張りひずみとなっていることから、ここでの被着材の局部的な曲げが接着部端部の破壊の要因となっていることが考えられる。

Fig. 7 (a), (b), (c)は上記の現象をさらに詳細に調べるため、 $\theta=90^\circ$, 45° , 15° の場合について被着材に生ずるひずみ分布を表示したものである。なお、図中の #7 は同一母材ではないが参考のため付記した。その結果、 $\theta=90^\circ$ では #1 の圧縮ひずみは他のひずみに比べて大きく、#1, #2 の間でのひずみの変化が大きく、#1 近傍での被着材の局部的な曲げが顕著である。

$\theta=45^\circ$, 15° については θ の減少にともないひずみ分布は荷重の増大に対しその様相は変化し徐々に滑らかになるが、#6 近傍でのひずみの大きさおよびその変化は急激になることが示される。また、 θ の減少によるひずみ分布の緩和はとくに接着部端部で大きいことが示される。

Fig. 8 は接着継手に加わる荷重が $P=200$ kg の場合について、 $\theta=90^\circ$, 45° , 30° , 15° の被着材接着部のひずみ分布を示したものである。 θ の変化にともなうひずみ分布は $\theta=90^\circ$ を除いてほぼ同じ傾向であるが $\theta=45^\circ \sim 15^\circ$ では #5, #6 近傍でのひずみの変化に顕著な相違がみられる。また、 $\theta=90^\circ$ の場合、#1 のひずみはほぼ $\theta=45^\circ \sim 15^\circ$ の場合の #7 の大きさと同じく、いずれの場合も接着層でのせん断応力に加え接着部端部での局部的な曲げ変形の大きいことが示される。

7 結 言

FRP 重ね継手の接着強度に関する基礎的な問題と

Fig. 7. Strain distribution of adhesive joints.

して、スカーフ角の影響、被着材の変形、破壊の様相等に関し検討を加え、接着部の破壊の防止に関し議論したものである。その結果を要約すると次のとおりで

Fig. 8. Influence of the scarf angle on adherent strain distribution.

ある。

(1) 接着部端部にスカーフ角 θ をとることにより、接着部の局所的な曲げ変形は減少する。しかし、その力学的効果は $\theta=45^\circ$ 近傍までの範囲で現れる。

(2) また、スカーフ角の減少にともない、破壊の発生部位は徐々に被着材表面に近づき、接着部の剛体的な変形は θ の減少により緩和される。

(3) したがって、接着部の破壊の防止にはスカーフ角端部の処理が破壊発生防止に効果のあることが示される。また、そのためにはマット材の層間ではなく離強度の向上が接着強度の増大に有効であろうと考える。

(4) スカーフ角を付けることにより接着部の被着材の荷重分担が増大し、そのため、接着層でのせん断応力が低下し、接着部の界面破壊防止にはよい結果をもたらす。

おわりに、本研究に際し、試料の提供にご協力いただいた三洋化成工業(株)の池上勝彦氏、ならびに日本硝子繊維(株)の長谷川政弘氏に対し、厚くお礼申し上げます。

(昭和54年6月21日 第17回接着研究発表会にて講演)

参考文献

- 1) Allen, K.W., Adhesion 4, Applied Science Publishers, 55 (1980) London.
- 2) 牧 広, 島村昭治, “複合材料技術集成”, 712 (1976) 産業技術センター
- 3) Volkersen, O., Luftfahrtforschung, **15**, 41 (1938).
- 4) Goland, M., and E. Reissner, J. Appl. Mech, Trans ASME, **66**, A-17 (1944).
- 5) Thamm, F., J. Adhesion, **7**, 301 (1976).
- 6) 宮入裕夫, 福田秀昭, 村松篤良, 材料, **26**, 651 (1977).