FRP 接着構造体の強度*

早 川 雄 三**

The Strength of FRP Bonded Structure

by

Yuzo HAYAKAWA

(Research Laboratories, Chemical Products Division Takeda Chemical Industries, Ltd., Osaka)

It is important to choose a suitable jointing method for the construction of FRP structure by jointing the parts of FRP. In this study, jointing was performed by means of adhesives. The selection of adhesives, the bonding condition and mechanical properties of bonded joint were examined using two types of substrates, FRP and SMC.

The effect of number of ply and adhesive pressure, interlaminar shear strength (ILSS), flexural strength and Izod impact strength of bonded beam were also studied. The results obtained are as follows.

(1) When non-bonding material is at or near the substrate surface, the surface preparation by sanding or cleaning causes the substrate failure and the bond strength becomes greater than the untreated one. On the contrary, when non-bonding material is with the substrate, it is necessary to choose the surface preparation method of substrate depending on the type of adhesives.

(2) Since the bond strength is greatly affected by the flexural rigidity of substrate, it seems to be necessary to refer to the flexural rigidity when the bond strength is compared.

(3) The strength and rigidity of bonded structure depend on the properties of substrate. In the case when the lateral load is worked on bonded structure, if suitable rigidity of substrate, adhesive pressure and number of ply for shearing force are chosen, the shearing failure does not occur on adhesive layer and the strength and rigidity of bonded structure does not decrease for flexural force.

(4) For impact, bonded structure is advantageous to unbonded one with respect to impact strength. Especially for the direction of impact, the strength of bonded structure remarkably increases if the volume of adhesives is increased.

(Received June 10, 1972)

1 緒 言

FRP を材料とした構造体は、一体成形法で得られることに特徴がある。いま、FRP 構造体として、分割されたものを組合わせて一つの構造体とする方法をとった場合、必然的に接合という問題が生じる。FRP の接合には、ボルトやリベットなどによる機械的な接合法と、ウェットレイアップによる積層接着法および接着剤による物理的、化学的な接合法とが考えられる。機械的な接合法では、FRP の寸法精度の問題から、接合時に局部応力の発生、接合後の応力緩和、さらに接合部の肉厚が薄い場合のささえ強度などの問題が、また積層接着法では、作業性、硬化後の後処理などの問題が生じる。一方、接着剤による接合法では、荷重

の形式による接着強度と破壊の関連、FRP の剛性、接着剤および FRP の剛性の差による接合部の力学的特性などの問題がある。

本報では、接着剤による接合法をとりあげ、接着接合体に使用できうる接着剤、接着条件および接合体の基本特性を検討した後、接着構造体として接着はりについて、その力学的特性の検討を行なった。

2 接着強度について

2・1 実験

使用した接着剤を Table I に示す。被着材としては、表面上にパラフィンあるいは離型剤などの非接着物を有する積層板 (FRP) として、チョップドストランドマット (CM455) 3 プライをイソフタル酸系ポリエステル樹脂 (ポリマール 6702) で手積法で積層し室温硬化させたものと、内部離型剤など内部に非接着物を有するプレス成形板 (SMC) として、金属シケ

* 原稿受理 昭和47年6月10日

** 正 会 員 武田薬品工業(株)化成品研究所

大阪市東淀川区十三西之町

Table I. Kinds of adhesive.

A	Polyurethane (FRB-5 : Takeda Chemical)
B	Polyurethane (Urethane sealant : Takeda Chemical)
C	Acrylic (A-1955-20 : Hughson Chemical)
D	Acrylic (RD-2035-2 : Hughson Chemical)

ンを内部離型剤とする SMC (ポリマールマッ 310) を, 成形温度 120℃, 成形圧力 210 kg/cm²/30°cm, 成形時間 3 分で硬化させたものの 2 種類について行なった. 接着強度を求める実験は, 接着剤層に引張力が作用する場合を Cross Lap 試験片で, せん断力が作用する場合を Lap Joint 試験片で, それぞれ ASTM D 1344-57 および ASTM D 1002-64 に準じて測定した. Fig. 1 に試験片の形状寸法を示す. 被着材の接着のための表面処理としては, サンディングは耐水研磨紙 CC-100 で, 溶剤で被着材表面を清浄にする場合はメチルエチルケトン (MEK) を使用した. 試料の接着は, 試作した接着ジグを使用し, 接着圧を 2, 1, 0 kg/cm² (ただし接着剤層の厚みを均一にするため 1 kg/in² 負荷) にとり, それぞれ室温硬化後, 状態調整のため 48 時間室温に放置して実験に供した. また試験機はインストロン試験機を用い, 負荷速度は 1 mm/min とした.

Fig. 1. Dimension of test specimen.

2.2 結果と考察

(1) 表面処理の影響

接着剤としてウレタン系接着剤 A を用い, 接着圧 1 kg/cm² で作成した Cross Lap 試験片について検討した. FRP では, パラフィン面, 離型剤面を無処理の場合, サンディング処理の場合として検討した. そのときの破壊面を Fig. 2 に示す. パラフィン面では, 無処理の場合でも被着材破壊と接着界面破壊の混合破壊となり, 強度もかなり高くなるが, サンディングを行なうと, 接着面全体の被着材破壊となり強度はさらに向上する. 一方, 離型剤面では, 無処理の場合は界面破壊となりほとんど接着されていないが, サンディングを行なうと, パラフィン面の場合と同様に被着材

Fig. 2. Fracture surface of FRP cross lap test specimen.

Fig. 3. Fracture surface of SMC cross lap test specimen.

破壊となる. このことから, 表面上に非接着物を有する場合は非接着物の種類によって異なるが, 表面をサンディングによって粗面にする処理またはそれを除去する処理を行なえばよいと考えられる. SMC では, MEK 処理とサンディング後 MEK 処理の場合について検討した. そのときの破壊面を Fig. 3 に示す. サンディング後 MEK 処理した場合は, 接着界面破壊と接着剤破壊の混合破壊になるが, MEK 処理のみでは被着材破壊となる. それゆえ内部に非接着物を有する場合は, 表面を清浄にする処理を行なえばよいと考えられる.

(2) 接着剤および接着圧の影響

Fig. 4. Relation between bond strength and adhesive pressure of FRP cross lap test specimen.

表面処理として、FRP ではパラフィン面でサンディング処理、SMC では MEK 処理を行なった Cross Lap および Lap Joint 試験片を用い、4 種の接着剤

について接着圧を変えて検討した。それぞれの接着強度と接着圧の関係を Fig. 4 から Fig. 7 に、そのときの破壊面を接着圧 1 kg/cm^2 について Fig. 8, 9 に示す。まず、接着剤層に引張力が作用する場合、強度は、FRP, SMC とも、接着圧が小さくなるほど、すなわち、接着剤層の厚みが厚くなるほど大きくなる。また、せん断力が作用する場合は逆に、接着圧が大きいほど、すなわち、接着剤層の厚みが薄くなるほど強度は大きくなる。この結果はすでに報告されている結果と一致する。しかし、両試験片とも接着圧 1 kg/cm^2 以上では強度にはそれほど差は認められない。これは、実験を行なった範囲の接着圧では、 0 kg/cm^2 を除いて接

Fig. 5. Relation between bond strength and adhesive pressure of SMC cross lap test specimen.

Fig. 6. Relation between bond strength and adhesive pressure of FRP lap joint test specimen.

Fig. 7. Relation between bond strength and adhesive pressure of SMC lap joint test specimen.

Fig. 8. Fracture surface of cross lap test specimen.

Fig. 9. Fracture surface of lap joint test specimen.

着剤層の厚みが被着材の表面状態によって決まってしまうため、 1 kg/cm^2 以上では、接着剤層の厚みが変わらないためと考えられる。

一方、破壊面を比較すると、両試験片とも FRP ではウレタン系接着剤 B のみが接着界面破壊と被着材破壊の混合破壊となり、その他はすべて被着材破壊となった、また SMC では、ウレタン系接着剤 A のみが被着材破壊となり、その他は接着界面破壊と接着剤破壊の混合破壊となった。このことを強度と比較すると、FRP の場合は、Cross Lap 試験片では、接着剤およびこの実験で観察された破壊の差はそれほど強度に影響をおよぼさないが、Lap Joint 試験片では、破壊の差および同一破壊であっても接着剤の種類によって強度に顕著に影響をおよぼすと考えられる。また SMC では、両試験片とも接着剤によって破壊に大きな差が認められるゆえ強度差も大きい。

(3) 接着剤層厚みおよび被着材の剛性の影響

接着剤層厚みと強度の関係は、Cross Lap 試験片の場合、接着剤層が厚くなると、接着剤の伸び変形が有効に作用して、接着剤層が薄い場合よりも強度が向上する。また、Lap Joint 試験片では、接着剤層が薄いと、せん断変形が起こりにくくなり、接着剤層が厚い

Fig. 10. Effect of thickness of adhesive layer on bond strength.

Fig. 11. Fracture surface of FRP cross lap test specimen varied thickness of adhesive layer.

場合に比べて強度が向上する。しかし両試験片とも引張りあるいはせん断力のみが作用するだけではなく、曲げの影響を受ける。そこで Cross Lap 試験片を用い、接着剤にウレタン系接着剤 A を使って、接着剤層厚みと被着材の曲げ剛性の影響について検討した。

接着剤層厚みの影響について求めた結果を Fig. 10 に、破壊面を Fig. 11 に示す。明らかに、接着剤層が厚くなるほど接着剤の伸び変形によって強度はさらに向上する。またそのときの破壊は接着剤層の厚みにかかわらずすべて被着材破壊となり、接着剤にはなんら変化が認められなかった。

また、曲げ剛性の影響について求めたのが Fig. 12 で、破壊面を Fig. 13 に示す。まず破壊が被着材の曲げ剛性にかかわらず、すべて被着材破壊になったことから、曲げ剛性による接着強度の変化は、曲げ剛性が小さいと被着材が、引張力によるよりも曲げの影響を大きく受け、低荷重で降伏し破壊するため強度が小さ

Fig. 12. Effect of flexural rigidity on bond strength.

Fig. 13. Fracture surface of SMC cross lap test specimen varied flexural rigidity.

くなるが、曲げ剛性が大きくなると、曲げの影響を受けにくくなり、ほとんど引張力によって破壊するため強度が大きくなると考えられる。さらにこの場合、接着剤層の厚みによる影響は、曲げ剛性が小さいと、接着剤の伸び変形が生じるよりも先に被着材が曲げ破壊してしまうため強度に差をほとんど生じないが、曲げ剛性が大きくなると、接着剤の伸び変形的作用によって、強度に差を生じるようになると考えられる。

3 接着はりの強度について

3.1 実験

被着材として SMC、表面処理として MEK 処理、接着剤としてウレタン系接着剤 A を用い、層間せん断力 (ILSS)、曲げ強度および衝撃強度について検討した。試験片は、Fig. 14 に示すごとく厚さ 11 mm を基準とし (これを接着枚数 1 とする)、接着枚数 2 の場合は、板厚約 5.5 mm のものを 2 枚、3 の場合は約 4 mm のものを 3 枚、4 の場合は約 3 mm のものを 4 枚、それぞれ所定の接着圧で接着し、比較検討した。実験方法として、ILSS は、インストロン試験機に先端半径 $3R$ の曲げジグをとりつけ、Span-Depth 比を 5 にとり、負荷速度 1 mm/min で測定した。また、曲げ試験は島津オートグラフ IS-2000、アイゾット衝撃試験は秤量 300 kg-cm で試験片締付けトルク 30 kg-cm とし、それぞれ JIS K 6911 に準じて行なった。

Fig. 14. Dimension of test specimen.

3.2 結果と考察

(1) ILSS

ILSS について求めた結果を Fig. 15 に示す。図中△印 (Fig. 17, 18 についても同じ) は、おのおのの接着枚数に対応する板厚の試験片単独の値である。図より、ILSS は、接着枚数 2 の場合および接着圧 0 kg/cm² の場合を除いて、接着枚数が多くなるほど接着枚数 1 の場合の値に近づく、しかもその値は、おのおのの試験片単独の値にほぼ等しくなっている。これは、破壊の相違によるものであって、Fig. 16 に接着圧 1 kg/cm² の場合の破壊面を示す。ここで黒線は接着面を示す。まず、接着枚数 3 および 4 の場合は、破壊は

Fig. 15. Relation between ILSS and number of ply.

Fig. 16. Fracture surface of ILSS test specimen.

接着面に生じず被着材に生じた。それゆえ ILSS はおのおのの試験片単独の値にほぼ等しくなると考えられる。しかし、接着圧 0 kg/cm² の場合はすべての試験片について破壊は接着面に生じるゆえ ILSS はかなり低い値となる。これは、接着剤層にせん断力が作用する場合、接着剤層が厚いと強度が薄い場合に比べて小さくなることに対比される。また接着枚数 2 の場合は、接着圧の大きさにかかわらず、すべて接着面で破壊を生じたため、接着圧 0 kg/cm² の場合と同様 ILSS は小さくなる。一方、接着枚数 2 および 4 の場合は、せん断応力最大面に接着面が存在するが、接着圧 0 kg/cm² を除いて、接着枚数 4 の場合はその面で破壊しなかったことおよび試験片単独の値に差が認められることから、接着する板の剛性の相違によって破壊面に差を生じると考えられる。

(2) 曲げ強度

曲げ強度および曲げ弾性率について求めた結果を、Fig. 17, 18 に、破壊面を Fig. 19 に示す。曲げ荷重が作用する場合は、ILSS の場合とは逆に、接着枚数が少なくかつ接着圧が大きいものほど接着枚数 1 の場合の値よりも大きい、あるいはそれに近く、しかも試験片単独の値にほぼ等しい。これは、接着枚数にかかわらず破壊がすべて最外层繊維の引張破壊となったことから、曲げを受ける場合、接着面が多くまた接着圧

Fig. 17. Relation between flexural strength and number of ply.

Fig. 18. Relation between flexural modulus and number of ply.

Fig. 19. Fracture surface of flexural test specimen.

が小さくなるにつれ試験片全体の曲げ剛性が小さくなるためと考えられる。また、接着枚数4の場合、接着圧による影響がほとんど認められないのは、試験片単独の強度および剛性が他のものに比べて大きいからである。小さいために、接着はりにした場合、接着圧によって試験片全体の強度および剛性にそれほど影響をおよぼさないためと考えられる。

(3) 衝撃強度

衝撃強度について求めた結果を、Fig. 20 に、破壊面をFig. 21 に示す。積層方向 (Flat wise) に衝撃荷重が作用する場合は、接着枚数が増えるほどまた接着圧が小さくなるほど衝撃強度は接着枚数1の場合の

Fig. 20. Relation between Izod impact strength and number of ply.

Fig. 21. Fracture surface of Izod impact test specimen.

値よりも大きくなる。これは Flat wise 方向の場合、破壊は接着枚数および接着圧にかかわらず接着面近傍の被着材の層間せん断破壊となったことから、接着剤層が厚くかつ接着面が多くなるにつれ、試験片全体の接着剤の体積が増加し、衝撃エネルギーを著しく吸収するため強度が向上すると考えられる。しかし、積層方向に直角方向 (Edge wise) では、接着圧が小さいほど接着枚数1の場合に比べて強度は大きくなるが、接着枚数の差はそれほど強度に影響をおよぼさない。これは、衝撃荷重に対して、Edge wise 方向では接着剤の体積増加による、エネルギー吸収率が Flat wise 方向ほど著しくないためと考えられる。

4 結 論

接着接合体の基本特性および接着構造体として接着はりの強度について検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 被着材表面に非接着物を有する場合は、非接着

物の種類によって異なるが、表面をサンディングによって粗面にするか、またはそれを除去するような処理を行なえば、被着材破壊となり強度も向上する。また、内部に非接着物を有する場合は、接着剤の種類に応じて適当な処理方法を選択しなければならない。

(2) 接着強度は、曲げ剛性によって大きく変化する。それゆえ接着強度の比較には曲げ剛性を付記する必要がある。

(3) 接着構造体の強度および剛性は、被着材単独の性質に依存する。横荷重が作用する場合、せん断力に対しては、特に、被着材の剛性、接着圧、接着枚数を

適当に選べば、接着面でせん断破壊を生じることなく、また曲げ荷重に対して、接着構造体の強度および剛性が低下することもない。

(4) 衝撃荷重に対しては、接着構造体は強度向上のために有利である。特に、衝撃荷重の作用する方向に対して、接着剤の占める体積を大きくすれば著しく衝撃強度が向上する。

(昭和47年3月27日 第1回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 中尾一宗, 繊維と工業, 3, 2, 103 (1970).