FRP 接着継手材の曲げ疲労挙動について†

奥田 聡* 仁科 修治* 渡辺 哲夫**

On Bending Fatigue Behavior of Adhesive Bonded Joints of FRP

by

Satoshi OKUDA*, Shuji NISHINA* and Tetsuo WATANABE**

The bending fatigue behavior of adhesive bonded joints of FRP was investigated under relatively low cycle repeated stress, and the effect of type of over-laid plate in adhesive bonded part and the effect of atmospheric temperature on fatigue strength were examined. The specimens used were orthophthalic acid unsaturated polyester reinforced with glass mat or glass mat combined with roving cloth. The mother plate and the over-laid plate of the specimens were made of the same material. The fatigue testing machine was developed originally by the authors and the bending method of 4 point supporting system was adopted. And the bending moment was applied by an unbalanced rotating weight. The stress cycle was 400 cycles/min constant and the testing air temperatures were 23°C, 50°C and 80°C. The following results were obtained from the experiments.

(1) The observed fatigue strength of the adhesive bonded joint was increased more as the over-laid plate was strengthened, if the bending stress imposed on the adhesive surface area was adopted as the stress amplitude.

(2) The fatigue strength of the both-side adhesive bonded specimen was twice that of the plain specimen, and the increase of fatigue strength for the one-side adhesive bonded specimen was between 1.3 and 1.6 times.

(3) The fatigue strength was considerably decreased at above 50°C.

(4) Dynamic creep properties were much influenced by the atmospheric temperature.

(5) The formula proposed previously by the present authors for the estimation of fatigue life in the tensile fatigue test, which is given as Eq. (1), was found to be applicable also for the bending fatigue test.

キー・ワード：FRP，接着継手材，曲げ疲労強度，雰囲気温度

1 緒 言

FRP (ガラス繊維強化プラスチック) のハンドレイアップ成形およびスプレーアップ成形を主とする水タンク、クーリングタワー、その他 FRP 構造物は継手として接着継手が一般的である。接着継手材は平滑材に比べて強度的に弱く、強度上の問題となることが多い。とくに疲労強度については強度設計上充分注意されねばならない^{1)~3)}。そこで著者らは、実際の強度設計に適用可能な基礎資料を得ることを目的として接着補強層の形式を変えた数種類の試験片について比較的低サイクルでの引張疲労試験および曲げ疲労試験を行った。このうち引張疲労試験については、先に接着補強板の形式の違いによる影響、環境剤としての水の影響が報告されている⁴⁾。本報では、FRP 接着継手材の 4 点曲げ方式による曲げ疲労挙動から接着補強板の影響および雰囲気温度の影響を調べたので報告したい。

2 試 験 片

試験片として Fig. 1 および Fig. 2 に示すような接

着母材に補強板を接着した接着継手材を使用した。接

Fig. 1. One side adhesive-bonded specimen.

Fig. 2. Both side adhesive-bonded specimen.

† 原稿受理 昭和60年7月30日 Received July 30, 1985

* 正会員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川, Faculty of Engineering, Doshisha University, Karasuma-imadegawa, Kami-kyo-ku, Kyoto

** 三菱樹脂(株)平塚工場 平塚市真土, Mitsubishi Plastics Industries Ltd., Shindo, Hiratsuka

着母材および補強板のマトリックスとしてはオルソフタル酸系不飽和ポリエステルを6%ナフテン酸コバルト0.4 phr と55%メチルエチルケトンパーオキサイド1.0 phr で硬化させた後、室温で12時間放置、その後80℃で3時間後硬化を行った。強化材としてはEガラスのチョップドストランドマット(400 g/m²)およびはん用ロービングクロス(600 g/m²)を用いて積層した。ガラス含有率は、いずれも約30重量%に調整した。実用に即した疲労試験資料を得る目的で補強板(オーバーレイ)の長さを40 mmとしたが、これは実際のFRP構造物のオーバーレイ部の長さの約1/4に相当する。オーバーレイ接着部平面はあらかじめ#40のサンドペーパーで磨いた後、マトリックスと同一樹脂で接着させ、同一条件で後硬化した。試験片は、標準試験片(長さ250 mm, 幅20 mm, 厚さ3 mm)となる平滑材とそれを母材とし接着した接着継手材であるが、Table I に種類と積層構成の一覧を示す。

(1) 平滑材(標準試験片, 接着母材): マット4 プレイ

(2) 接着継手試験片は補強板の種類によって次のように分類する。

(i) M2材(補強板がマット2 プレイのもの, 厚さ

Table I. Kinds and construction of specimen.

Classification of specimen symbols		Laminating constructions
Plain specimen (Mother plate)	P	Chopped strand mat, 4 plies (400 g/m ²)
One side adhesive-bonded specimen	M 2	Chopped strand mat, 2 plies
	M 3	Chopped strand mat, 3 plies
	M 4	Chopped strand mat, 4 plies
	M2R	Mat 1 ply+Rovingcloth 1 ply +Mat 1 ply (600 g/m ²)
Both side adhesive-bonded specimen	M1T/M2R	One side... Mat 1 ply+Glass Tape 1 ply Another side... Mat 1 ply+Roving cloth 1 ply+Mat 1 ply

1.7 mm)

(ii) M3材(補強板がマット3 プレイのもの, 厚さ2.6 mm)

(iii) M4材(補強板がマット4 プレイのもの, 厚さ3.4 mm)

(iv) M2R材(補強板がマット1 プレイ・ロービングクロス1 プレイ・マット1 プレイのもの, 厚さ2.3 mm)

(v) M1T/M2R材(補強板がM2R材については上記と同一の構成であるが, M1T材はマット1 プレイ・ガラステープ1 プレイより成り, Fig. 2 に示したようにM2R材の反対面に接着した。厚さ1.0 mm) タンクなどに使用した場合, 内面はロービングクロス(R)で強化をとくに充分にし, 外面はとくに強度を期待せず接合部シールだけの目的でM1T材を接着した。

補強板の幅はいずれも20 mm である。

3 実験装置

試験機は新たに試作した不平衡質量回転型に属する定応力振幅の両振曲げ疲労試験機で、その概要図をFig. 3 に示す。試験片負荷部分の詳細図および寸法をFig. 4 に示す。荷重負荷装置として4点曲げ方式を採用し、試験片に均一な曲げモーメントがかかるようになっている。繰返し曲げ荷重は重さの異なる重錘をモータの回転軸に取り付け、いわゆる回転不平衡質量によって発生させ試験片に作用させる。また試験片にかかる荷重は固定側チャックを支えている金属プレートに4枚のストレンゲージをはりつけ、増幅器を通してペン書きオシログラフで記録した。試験片の変位振幅は、振動側のチャック部に変位計を接触させ増幅器を通してペン書き記録計にて記録した。

試験条件は次のとおりである。

- (1) 繰返し周波数 400サイクル/分 一定
- (2) 試験温度 23℃, 50℃, 80℃

Fig. 3. Testing machine.

Fig. 4. The major components of 4-point bending fatigue testing machine.

Fig. 5. Pattern of fatigue fracture.

Fig. 6. Progress of debonding surface of adhesive joint.

(3) 試験環境 空気中

4 実験結果および考察

4・1 疲労による破断過程

試験片の破断の形態は2種類であり引張破断とせん断破断に分けられる。一例として50℃のときの破断の形態をFig.5に示す。せん断破断の一般的破断過程はFig.6に示すような(I),(II),(III),(IV)の四つの段階で説明される。

(I) 補強板中央部に2~3mm程度の白化が生じる。ほとんどの場合、接着面のはく離によるもので、まだ下部接合部の分離はない。

(II) 中央の白化が進行し、さらに左右からも白化が見られる。下部接合部の分離が見られ変位振幅がそのために(I)のときよりも増大する。

(III) 白化がさらに進行し、ほぼ全域が白化し中央から見て左右どちらの接着面が破壊されるか予測できない。このはく離は、接着面または接着面近傍のマトリックスとガラス積層層のはく離である。

(IV) 左右どちらかの接着面が完全に白化する。また、引張破断においては(I),(II)のようなはく離が見られるものの、それ以上の進展はなく、補強板に引張破断が発生する。

なお破断結果はM2材において7本中4本、M3材では9本中1本が引張破断であったが、M4材での引張破断は見られなかった。M1T/M2R材は全部せん断破断であった。

4・2 動的クリープ特性

Fig.7にM3材について差動変圧器で測定したたわみ δ の変化曲線すなわち動的クリープ曲線の一例を示

Fig. 7. Dynamic creep curve of M3 specimen.

す. なお, このたわみは振動側(四つの支点のうち内側の2点)のチャック部のたわみを示したものである. 試験温度80℃, 50℃, 23℃における各種応力振幅下の動的クリープを見たものであるが, 変位振幅は温度の上昇とともに大きくなり, 破断時間が低サイクル側に移行する. また同じ応力下では初期の変位振幅は高温になるほど大きくなることが認められたことで動的クリープ特性には, 雰囲気温度の影響が顕著である. 動的クリープ曲線は, 静的クリープ曲線と同様に遷移クリープ, 定常クリープおよび加速クリープの三期間に分けることができるが, 本試験での接着材試験片は加速クリープの第三期に至って変位振幅が急激に増加した. よって弾性率の低下もこの第三期において著しいと考えられる.

4・3 疲労強度の比較

Fig. 8, Fig. 9 および Fig. 10 に各種接着継手材および平滑材のそれぞれ80℃, 50℃, 23℃における応力の変化曲線すなわちS-N曲線の一例を示す. 曲線は測定データの最小二乗法により求めたものである. 接着継手材の応力については, 平滑母材試験片と比較する意味において補強板の厚さを無視し平滑母材の板厚に対して応力計算を行った. 80℃におけるM2材, M3材, M4材, M1T/M2R材の各種接着継手材と平滑材のS-N曲線を比較するとM2材はそれほど違いないがM3材, M4材, M1T/M2R材は平滑材よりかなり上に位置する. これは補強板の厚さの増加による曲げ剛性の増加に起因していると思う. このうちM3材については, 50℃では平滑材よりわずかに上に位置する.

Fig. 8. S-N curves at 80°C.

Fig. 9. S-N curves at 50°C.

Fig. 10. S-N curves at 23°C.

23℃では平滑材の強度に比べて大差がなかった。また M3材の S-N 曲線は温度が上ると 10^5 回付近までは他の接着継手材と同程度の疲労強度低下を示す。それ以上の繰返し数では水平に近くなる。さらに繰返し数が鉄鋼での疲労限と言われる 10^7 回に達すると 50℃の疲労強度は 23℃のそれによく接近した。これは、内部摩擦による蓄熱状態が試験温度と同一になり、外部の温度の影響を受け難くなったためと思われる。M1 T/M2 R 材については、23℃の疲労強度は他のものに比べて高いが、温度が上ると疲労強度の低下が著しい。これらの傾向は 10^7 回における疲労強度と環境温度との関係を示した Fig. 11 にも見られる。

Fig. 11. Fatigue strength at 10 cycles temperature diagram.

疲労試験による強度は M1 T/M2 R 材→M4 材→M2 R 材→M3 材→M2 材→平滑材の順に低下した。これより接着補強材が強力になるにしたがって接着継手材のみかけの疲労強度が大きくなることがわかる。なお平滑材の疲労強度に比べると接着継手材は、たとえば 50℃において M1 T/M2 R 材が約 2 倍、M2 R 材、M3 材がそれぞれ 1.6 倍、1.3 倍の疲労強度を有することが認められた。

4・4 剛性低下について

Fig. 12 に M1 T/M2 R 材のセカント係数比（繰返し数 20 回におけるセカント係数を基準とする）と n （繰返し数）の関係を示した。セカント係数比は剛性率の比を表している。各種接着継手材のセカント係数比が繰返し数の増加とともに低下したことで剛性の低下が認められる。また n/N (N : 破断までの繰返し数) に対して示すと $n/N=0.15$ から 0.8 程度まで一定の剛性低下といえるが、 $n/N=0.8$ を超えると少し急こう配の剛性低下となる。

Fig. 12. Secant modulus ratio during fatigue.

4・5 疲労寿命の推定

疲労寿命推定のため Fig. 13 に M1 T/M2 R 材の全振幅応力 $2\sigma N$ （振幅応力の 2 倍）と繰返し数 N の関係を示した。この $2\sigma N$ は N サイクルのヒステリシスで蓄積されるエネルギーに比例し、これによって疲労破壊が起るものと仮定すると、

$$2\sigma N = KN^m \quad (1)$$

の関係が成立する。M1 T/M2 R 材、その他 M2 R 材はいずれも $2\sigma N$ - N 線図でほぼ同一の直線上にのり、同様な機構で疲労破壊が進展していることが認められる。なお、式(1)において材料定数 m 、 K を求めると、 $m=0.87$ であった。 K は低サイクル側でせん断強度が大き

Fig. 13. $2\sigma N$ - N curves of M1T/M2R specimen at 80°C, 50°C and 23°C.

いため高い値を示す。このとき M1 T/M2 R 材では,
 $K_{23^{\circ}\text{C}}=69.2(\text{kg/mm}^2)$, $K_{50^{\circ}\text{C}}=51.3(\text{kg/mm}^2)$, $K_{80^{\circ}\text{C}}=37.9(\text{kg/mm}^2)$ であった。

5 結 言

FRP 接着継手材の 4 点曲げ疲労試験を行ったところ, その補強板の効果について先に報告している引張疲労試験の結果とほぼ同様な効果を認め, 実用上の設計資料として有用な結果を得た。

(1) 接着継手材は接着面積に関する曲げ応力を応力振幅に採用するならば, 接着補強材が強くなるにしたがって, みかけの疲労強度が大きくなる。

(2) 平滑試験片と比較して両面接着継手材は約 2 倍, 片面接着継手材は 1.3 倍から 1.6 倍の疲労強度を有する。

- (3) 疲労強度は 50℃ 以上でかなり低下する。
- (4) 動的クリープ特性は温度の影響が顕著である。
- (5) 引張疲労試験で提案された疲労寿命推定のための式は, 曲げ疲労試験についても成立することが確認できた。

(昭和 60 年 3 月 19 日 第 14 回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 宮入裕夫, 福田秀昭, 村松篤良, 強化プラスチック, **21**, 61 (1975).
- 2) 宮入裕夫, 福田秀昭, 村松篤良, 強化プラスチック, **24**, 5 (1978).
- 3) 宮入裕夫, 福田秀昭, 村松篤良, 強化プラスチック, **25**, 506 (1979).
- 4) 奥田 聡, 仁科修治, 渡辺哲夫, 材料, **34**, 376 (1985).

書 評

“PVC Technology, 4th. Ed.”

W. V. Titow (編)

(1984年, Elsevier Applied Science 発刊, 23×15.5 cm, 1197ページ, £110.00)

本書は26章から成りたっており, 一般に使用されているほとんどの PVC 材料を, 応用面を重視して取り扱っている。

構成は大きく三つに分けることができる。最初は, PVC 樹脂, 可塑剤, 安定剤等の物理・化学的性質および, 可塑化, 安定剤の働きを詳しく説明しており, 用途に合った配合の組立てができるようにその指針および, 評価法を多くの例を使い, 説明している。

つぎに, コンパウンド法やインジェクションなど各種成形法やラミネート, 接着, 印字など実際に製品を作る上で必要な技術についても詳しく記述されている。

最後には, 加工法として特殊な分類に属するペースト加工法に必要なレオロジーや配合法, 応用例と, PVC ラテックス, PVC 溶液加工の概要や配合例などを説明している。

巻末には, 原材料・製品の ISO, BS, ASTM, DIN 規格がまとめられているので, バンドブックとしても価値がある。

本書は全体的に平易な文章で書かれており, これから PVC 加工を勉強しようという技術者には好適な参考書であろう。また配合物の商品名やその物性などの最新のデータも多く記載されており, この分野の技術者にも有用な書物であろう。

(京都大学工学部 升田利史郎・瀧川 敏算)