組合せ積層 FRP の疲労強度*

遠 藤 吉 郎**

Fatigue Strength of FRP of Combined Laminae

by

Kichiro ENDO

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

The fatigue tests have been carried out with glassfibre reinforced plastics composed of laminae of various types, such as chopped strand mat, cloth, and roving. The criterion of the fatigue failure is found to be the strain amplitude in the outmost layer. Provided that the rigidity of the FRP of combined laminae and the allowable strain amplitude of the outmost layer are known, the fatigue strength of the combined FRP is to be obtained, though the second layer seems to have a little effect. When the inner layer has considerably lower strength than the outmost layer, the fatigue failure is initiated in the inner layer even under bending fatigue. In this case, the criterion is the strength of the inner weak layer, but the adjoining layers have some effect on the fatigue strength of the combined FRP. When cloths are used for the outmost layer and their warps have a large angle with the load direction, the layers are hardly expected to have strengthening effect.

(Received July 24, 1970)

1 緒 言

ガラス繊維強化樹脂（以後 FRP と称する）を実用する場合に、経済性、成形、剛性などに対する考慮より、単一種類の繊維を補強材として用いるほかに、種々の補強材の積層を組み合わせる用いる場合が多い。このような構造はとくに曲げ部材に有利であり、曲げ剛性についてはある程度の推定が可能であり、また測定も容易であるが、疲労強度については知られないことが多い。たとえば Table I はクロスとマットの層を

Table I. Bending fatigue strength of polyester reinforced with cloth and mat¹⁾ 1800 cpm.

Cloth 1000-114	Mat	Volumetric percent of glass	Static bending strength (kg/mm ²)	Fatigue strength at $N=5 \times 10^6$ (kg/mm ²)
16 ply	0 ply	52.3	25.1	5.6
12	2	44.0	22.1	5.7
8	5	39.6	18.2	5.0
3	8	33.2	13.1	3.0
	10	21.9	10.4	3.0
	7	19.7	7.5	2.5
	3	9.0	5.6	1.7
	0	0	4.2	0.7

組み合わせたポリエステル FRP の曲げ疲労強度であるが、この表からはガラス繊維含有量の効果のほかは明りょうに知り得ない。

また Table II からは、積層の中心部にマットより強度の高いロービング・クロスを用いても効果はなく、表面に両面とも平織りクロスを用いるよりも、片面により強い朱子織りクロスを用いた方が疲労強度が高いことを示している。これは後者の方が曲げ剛性（曲げ弾性率）が大きくなり、平織りクロス部のひずみがそれだけ小さくなったことによるものと考えられる。

ここでは補強材の組合せを系統的に変化させて曲げ疲労試験を行ない、組合せ FRP と単一 FRP の曲げ疲労強度の差、内部層による疲労強度の変化について

Table II. Bending fatigue strength of polyester reinforced with combined laminae²⁾ 1800 cpm.

Resin	Reinforce- ment	Volu- metric percent of glass	Static bending strength (kg/mm ²)	Rigidity of bending (kg/mm ²)	Fatigue strength at $N=10^7$ (kg/mm ²)
Ester GA20	SC+M+PC	30.0	15.6	826	3.5
Ester GA20	PC+M+R +M+PC	30.0	10.8	731	2.7
Ligolac 1557A	PC	40.0	29.1	1398	7.0
Polylite 8010	M	21.5	17.0	769	3.0

SC Satin cloth, PC Plain cloth, M Mat, R Roving cloth

* 原稿受理 昭和45年7月24日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

の試験結果を述べ、設計資料としたい。

2 試験材料および試験方法

基材の樹脂として不飽和ポリエステルを用いる。強化材としては無アルカリガラス繊維のチョップド・マット、朱子織りまたは平織りクロス、ロービング・クロスを用い、それぞれM、C、Rの記号を付す。試験は組合せ積層の最外層を変化させた場合と、最外層は同じで内部層を変化させた場合の2部にわけられる。これらの試験材料の構成とその記号を Table III および Table IV に示す。表には便宜上商品名を用いた。成形は手積、加圧成形で、24 hr 常温硬化したのち、120℃で 24 hr のキュアを施してある。

Table III. Constitution of the combined FRP used in the tests of Part I where the laminae of the most outer layer is varied.

Symbol	Reinforcement	Ply	Volumetric percent of glass	Thickness (mm)	Resin
CMC	Satin cloth ES 21 GH	1	41	0.25	Epolac N-340
	Mat EMG 400	8	20	5.5	
	Satin cloth ES 21 GH	1	41	0.25	
MCM	Mat EMG 400	1	12	1.0	
	Satin cloth ES 21 GH	8	30	2.8	
	Mat EMG 400	1	12	1.0	
C	Satin cloth ES 21 GH	20	41	5.0	
M	Mat EMG 400	5	12	5.5	

Table IV. Constitution of the combined FRP used in the tests of Part II where the laminae of the inner layer are varied, the outmost layer being remained the same.

Symbol	Reinforcement	Ply	Volumetric percent of glass	Thickness (mm)	Resin
CR...RC	Plain cloth EMH 25 GH	1	23	0.3	Polymal YG3008 -A
	Roving cloth EWR 55	8	65	5.4	
	Plain cloth EMH 25 GH	1	23	0.3	
CM ·MC	Plain cloth EMH 25 GH	1	28	0.25	
	Mat EMG 450	5	15	4.3	
	Plain cloth EMH 25 GH	1	28	0.25	
CMRM- RMC	Plain cloth EMH 25 GH	2	4.8		
	Roving cloth EWR 55	2			
	Mat EMG 450	3			

試験片形状を Fig. 1 に示す。試験は両振りの平面曲げであり、試験片厚さは Table III, IV に示された各層の厚さの和であって、5~6 mm で一定ではない。外層にクロスを用いたときは、その縦繊維方向と応力

Fig. 1. Shape of test piece.

軸を一致させた場合 ($\theta=0^\circ$) のほかに、 45° に交差させた場合 ($\theta=45^\circ$) の試験も行なった。3・1の最外層を変化させた材料に対しては定荷重型の平面曲げ、3・2の内層を変化させた材料に対しては定たわみ型の平面曲げで試験し、繰返し速度はともに 1 800 cpm である。試験ふん囲気は特別の制御をしなかったが、試験片表面温度は30℃をこえないよう送風機で調整した。

3 試験結果

3・1 組合せ積層の最外層を変化させた場合

M材と MCM材の S-N 曲線を Fig. 2 に、C材と

Fig. 2. S-N curves of M and MCM under plane bending of constant moment type. $\theta=0^\circ$, $f=1\ 800$ cpm.

Fig. 3. S-N curves of C and CMC under plane bending of constant moment type. $\theta=0^\circ$, $f=1\ 800$ cpm.

CMC材の $S-N$ 曲線を Fig. 3 に示す. 定荷重型疲労試験であるので, 最外層に破損を生じると急激に破壊する. 外層にマットを用いた Fig. 2 では内層に強度の高いクロスを入れた MCM の方が単一種の M より疲労強度の応力値が高く, 外層にクロスを用いた Fig. 3 ではその逆である. 内部に挿入された積層材の弾性率により, 全体としての曲げ剛性が変化し, Fig. 2 では MCM の外層に与えられる繰返しひずみが単一種の M のそれより小さくなり, Fig. 3 では CMC の外層に与えられる繰返しひずみが単一種の C のそれより大きくなるためと考えられる.

このような最外層より疲労破損を生じる組合せ FRP では, 最外層のひずみに注目すべきであると考えられるので, 試験結果をひずみ振幅で表わしてみる. 疲労試験片と同一形状の試験片で静的曲げ試験を行ない, ひずみゲージによって表面のひずみ ε_0 とモーメントの関係を求める. 試験片の厚さ h , 最外層の一層の厚さ t とするとき, 最外層の平均ひずみは

$$\varepsilon = \varepsilon_0(h-t)/h$$

で与えられる. 曲げモーメントより得られた σ と ε の関係を疲労試験における応力振幅 σ_a とひずみ振幅 ε_a の関係に近似して, 試験結果を ε_a-N 線図で示すと, Fig. 4, 5 が得られる.

図より明らかなように, ひずみ振幅が同一であると,

Fig. 4. ε_a-N curves of M and MCM converted from Fig. 2.

Fig. 5. ε_a-N curves of C and CMC converted from Fig. 3.

単一種 FRP, 組合せ ERP の寿命はほぼ一致する. 組合せ FRP の曲げ剛性あるいは最外層のひずみは推定, 測定ともに容易である. したがって, 最外層の補強材の種類, ガラス含有量を同じくする単一 FRP のひずみ振幅で表わした疲労強度がわかっていれば, 組合せ FRP の疲労強度を曲げモーメントまたは応力値で表わすことができる.

しかし, 厳密にみると, 内層がクロスでできている MCM は, 内層までマットでできている M に比べていくぶん寿命が長く, 内層がマットでできている CMC は, 内層までクロスである C よりもやや寿命が短い傾向がみられる. 疲労破損が最外層に生じたのち内層への伝ば抵抗がクロスとマットで異なり, 前者の方が強いと考えられる.

3・2 組合せ積層の内部の層を変化させた場合

3・1 の組合せ FRP では構成が簡単で, 破損は常に最外層の積層部より生じたが, Table IV に示すような組合せ積層の FRP では, その剛性が問題になると同時に, 破損も最外層より発生するとは限らない. そのため静的な性質から吟味する必要がある.

Fig. 6 は静引張試験による応力ひずみ線図を示す. 荷重方向の影響は CR.....RC が最大で CMRMCMC がこれにつき, CM.....MC は非常に小さい. ロービング・クロス R と平織りクロス C は引張りにおける応力方向 θ の影響が大きく, $\theta=0^\circ$ では弾性に近い性質を示すが, $\theta=45^\circ$ では粘弾性的性質を示す. 一方マット M は積層面内では方向性をもたない. このことが CR.....RC が CMRMCMC より方向性が大きく, かつ前者の弾性率が $\theta=0^\circ$ で最大になる理由である. CM.....MC は最外層の C の方向性が, 大きくはないがわずかに現われたものである. 図中○印は引張試験において FRP に特有の微音を発生した位置を示す. これは繊維束に微小き裂を生じるひずみを示すと考え

Fig. 6. Stress-strain diagrams under tensile tests. Mark ○ shows the location where a characteristic cracking noise occurs.

られ、CM……MC と CMRMRMC とはそれぞれ $\theta=0^\circ$ と $\theta=45^\circ$ で同じひずみに現われているのは、マット部にまず微小き裂を生じることを示す。同じ θ に対して前者と後者で微小き裂を生じるひずみが異なる主原因はそれぞれのマット部のガラス含有量が同一でなかったことにありと思われるが、さらに後者のM層が薄いこと変形が拘束されたことも考えられる。CR……RC の微小き裂発生に対する方向性はクロス単一FRP に対して従来知られている程度に近い。

静的曲げによる応力-表面ひずみを Fig. 7 に示す。だいたいの傾向は Fig. 6 の引張りに対するものと一致しているが、曲げにおいては最外層の応力分担が大きく影響するため、 $\theta=45^\circ$ においては最外層クロスの粘弾性的性質が全体に影響して、各種組合せ FRP の応力-ひずみ線図の差が、引張りにおけるより小さくなっている。

Fig. 7. Stress-strain diagrams under bending tests.

Fig. 8. ϵ_a - N curves under plane bending of constant deflection type. Points with star mark * show the strain amplitude at the outer surface of second layer where the fatigue failure initiated. $f=1800$ cpm.

疲労試験は定たわみ式で行なったため、試験中の剛性低下が著しく、とくに $\theta=45^\circ$ では繰返し数の対数に対してほぼ直線的に剛性低下する。破損を初期モーメントより20%剛性低下で定義して求めた ϵ_a - N 線図を Fig. 8 に示す。Fig. 6, 7 とほぼ同様の傾向がみられる。

$\theta=45^\circ$ では CM……MC と CMRMRMC にはあまり差がみられないが、大きいひずみ振幅で後者の方がやや弱いようである。CR……RC はとくに弱い。前2者の断面をみると、内部のM層にき裂がみられるが、後者には20%剛性低下においてもき裂がみられない。 $\theta=45^\circ$ におけるクロス FRP は粘弾性的性質を示すとともに、マクロなき裂を生じないで繊維に沿った微視き裂を生じて破損に至り、疲労強度は低い³⁾。CM……MC と CMRMRMC では最外層のCがこのような疲労破損をしたのち、内部のMが破損の進展を妨げ、第二層のMの強度が支配的であるのに対し、CR……RC は内部のロービング・クロスも $\theta=45^\circ$ にあって強化作用をもたないため、疲労強度は非常に低い。このように $\theta=45^\circ$ においては最外層のクロスは疲労強度にあまり寄与せず、表層より疲労破損を生じても、内部の層が疲労強度に影響をもっている。

$\theta=0^\circ$ では CR……RC はき裂が最外層より発生して内部に進展するが、CM……MC と CMRMRMC は第2層のM部にき裂を生じている。CM……MC は $\theta=0^\circ$ では $\theta=45^\circ$ より相当強い。 $\theta=0^\circ$ では内部のMより疲労破損を生じたが、内部のMの各層の厚さが明りょうでないので、Mの表面に最も近い位置のひずみ振幅を用いてあらわすと、図中*印のついた点、および破線の S - N 曲線になり、 $\theta=45^\circ$ の ϵ_a - N 曲線に近づく。両者の差は最外層のCの強化作用の差を示している。

CR……RC と CMRMRMC を比較すると、ひずみ振幅で表わした疲労強度にはほとんど差がみられない。しかし、表面応力または曲げモーメントの振幅で表わせば前者の方が相当に強くみられることは Fig. 7 より理解されるであろう。後者の CMRMRMC は第2層のMより疲労破損を生じたので、第2層の外側のひずみ振幅で、*印のついた点をとると、破線の ϵ_a - N 曲線になる。このようにみると CMRMRMC は CR……RC より相当に弱くなるが、なお CM……MC の修正した破線より強い。後者では第2層のMに発生したき裂は内部へすみやかに進展するが、前者では第3層のRの疲労強度が高いため、M層よりのき裂の進展がR層により妨げられるためである。

3・1 においては CMC も最外層のCより疲労き裂が発生し、3・2の結果と異なっている。これは前者のCは朱子織りで荷重分担が大きく、Mのガラス含有量が多いのに比して、後者のCは平織りで荷重分担がそれほど小さくなく、かつMのガラス含有量が少ないためと考えられる。したがって、内層の強度が最外層のそれより著しく低くないときは3・1で述べたように、最外層のひずみによって強度を推定できるが、3・2のように、内層が相当に弱く、内層より破損の始ま

る場合は、その層のひずみによって強度が定まる。しかも CMC のように単純な組合せ FRP と異なり CMRMRC のように複雑な組合せ FRP では、最弱層の強さだけでなく隣接する層の性質が影響を及ぼすことに注意しなければならない。

4 結 言

異種の層を積層した組合せ FRP の曲げ疲労強度は一般には最外層のひずみ振幅によって定まる。組合せ FRP の剛性と最外層の疲労強度のひずみ振幅を知れば、組合せ FRP の疲労強度をほぼ推定できる。しかし、第2層の性質も影響をもつようである。内部に外層より相当に弱い層を含むときは、曲げ疲労でも内層より破損が始まることもあり、このときもその層の疲労強度だけでなく、隣接する層の性質が強度に影響を

もつ。積層材の外層部にクロスを用いた場合、繊維と荷重の角が大きいときは、これによる強化作用は期待できなくなるので注意を要する。

この研究は当時の大学院および学部学生、奥田雄三、元木敏雄、土屋 彰、浦田嘉人の4君の研究の一部より抽出して整理したものである。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Hagen, H., Kunststoffe, 47, 359 (1957).
- 2) 島村昭治, 機械試験所所報, **15**, 457 (1961).
- 3) Endo, K., Y. Okuda, and T. Motoki, Proc. 11th Japan Congress on Materials Research, 131 (1968).