透過光法による強化プラスチックの動的特性の測定*

藤 井 太 一** 水 川 清** 座 古 勝***

The Measurement with Respect to Dynamic Characteristics of Fiberglass Reinforced Plastics (FRP) by the Light Transmission Method

by

Taichi FUJII, Kiyoshi MIZUKAWA and Masaru ZAKO

(Faculty of Engineering, Osaka City University, Osaka)

The nondestructive test of Fiberglass Reinforced Plastics (FRP) under stress has called much attention of scientists for investigation of its disintegration by fatigue because the phenomenon of stress-whiting takes place in the test. This phenomenon will thus present significant source for researches. The light wave transmission method will prove more effective than the ultrasonic wave transmission method because the stress-whiting occurs by random reflection. In our experiment, therefore, the light of electric bulbs with tungsten filaments was passed through FRP under stress, and the decrease of the transmitted light was measured. As the relation between the number of cycles and the amount of the transmitted light was obtained in this way, it provides clue to suggest the mechanism of fatigue of FRP. Moreover¹⁾ it revealed also the number of the layers and the direction of the glass fiber. The light wave transmission method is thus shown as both practical and effective as well as easily available for nondestructive test of FRP.

(Received Aug. 29, 1969)

1 緒 言

¹⁾ 前報において、おもに強化プラスチック (FRP) の静的非破壊検査 (ガラス繊維方向, ガラス繊維布積層枚数, ひずみ量) の方法について研究発表を行なった。ガラス繊維方向は, 透過光の散乱によって判別でき, ガラス繊維布積層枚数は, 透過光強度によって測定され, また, ひずみ量は, 負荷によるガラスフィラメントの変化で生ずる透過光の回折像変化から測定された。これらの結果から, 光学的手法による検査の可能性が認められた。しかし, 非破壊検査の実行化にあたっては, 上記の静的検査よりも応力下における動的検査方法が重要となろう。

²⁾ 応力下の FRP に見られる現象に応力白化がある。この応力白化は, FRP 内における樹脂部のき裂と, 樹脂と繊維間のハク離によって生ずる現象であり, FRP の疲労とともに進行する。したがって, 応力白化と疲労には, 密接な関係があると推察される。それゆえ, この関係を見いだす事は, FRP の非破壊検査

の実行にさしあたり大きな手がかりとなろう。この関係を捕えるため筆者らは, 平行光線を試料に透過させる透過光法を考えた。今回は, その結果と, その結果より予測される FRP の破壊モデルの提案を発表する。

2 応力白化測定

2・1 原理

一般に, 着色物体が白く見えたり, 粉碎によって物体が白化する現象は, 乱反射の影響とされている。これと同様に, FRP 疲労による白化現象は, 表面および内部に乱反射の原因のため, いわゆるハク離, き裂の発生のため生じたと考えられる。したがって, 白化進行状態と疲労進行状態の関係を見だし, これによって白化測定より疲労状態を検査する事ができると考えられる。

2・2 実験方法および装置

静荷重, 動荷重の2種類の実験を行なった。とくに, 動荷重については, 定荷重式繰返し試験, 定たわみ式繰返し試験を行なった。

白化進行測定は, 平行光束装置より得られた平行光線を, 5 mm×5 mm のスリットを介して試料に透過させ, 各応力, 各繰返し時における透過照度を測定し, 透過比を下式に従って算出する事によって求めた。

透過比表示;

* 本報を「強化プラスチックの非破壊検査方法に関する研究(第2報)」(A Study on Nondestructive Testing's Method of Fiber Reinforced Plastics, II)とする。

原稿受理 昭和44年8月29日

** 正 会 員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本町

*** 学生会員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本町

静荷重の場合,

$$R_s = \frac{\text{各応力下透過照度}}{\text{初期状態透過照度}} \quad (1)$$

動荷重の場合,

$$R_d = \frac{\text{各繰返し時の透過照度}}{\text{初期状態時の透過照度}} \quad (2)$$

2・2・1 静荷重 負荷方法は、オルゼン万能試験機を用い、初期荷重 100 kg を30秒間作用させ、除荷後、試料を取り出し透過照度を測定した。ついで、荷重を 100 kg 増加させ、同様に作用させ透過照度を測定し、破断にいたるまで荷重を増加させながら透過照度を測定した。

Fig. 1 に試験片形状を示す。

Fig. 1. Size of specimens.

(a)の場合、どの部分で破断するか判定できないため、平行部全体を一边 5 mm の正方形に分割し、破断するまで全部分について透過照度を測定した。

(b)の場合、切欠き先端、両側切欠きの中間部、切欠きより充分離れた部分の 3 箇所について透過照度を測定した。

使用した試料は、ロービングクロス、マットにポリエステル樹脂を含浸積層した平板材料である。

2・2・2 動荷重 定荷重試験は、シエンク PHQD 試験機を用い、各繰返し時における透過照度を測定した。繰返し速度は、毎分 1 600~2 000 回である。Fig.

Fig. 2. Apparatus of experiment for repeated tension and compression.

Material	t (mm)
CRRRC	4
RRRR	4
RRR	3

Fig. 3. Size of specimen.

2 に装置概略図, Fig. 3 に試験片形状を示す。

使用した試料は、ロービングクロスと平織クロスにポリエステル樹脂を含浸積層した平板材である。

定たわみ試験は、片持繰返し曲げ試験機を用い、各繰返し時における透過照度と同時に、ひずみ計を用いて剛性低下を測定し、両者の対比を調べた。繰返し速

- 1 : Test specimen
- 2 : Lx meter
- 3 : Slit
- 4 : Lens
- 5 : Source
- 6 : Strain gauge
- 7 : Servo motor
- 8 : Exciting part
- 9 : X-Y recorder

Fig. 4. Apparatus of experiment for repeated bending.

Fig. 5. Size of specimen.

度は、毎分 1000 回である．Fig. 4 に装置概略図，Fig. 5 に試験片形状を示す．

使用した試料は、マツに塩化ビニールを含浸積層した平板材である．

2・3 実験結果

2・3・1 静荷重結果 前述のごとく、試験片の表面を分割し、荷重毎に透過照度を測定したが、Fig. 6 は、最終破断部における初期荷重からの透過比変化を示した図である．いずれの材料についても破断応力までを 3 段階に分割するような変化を示している．以下説明のため、それぞれの変化段階を、第 1 段階、第 2 段階、第 3 段階とする．

Fig. 6. Relation between stress and transmission.

ロービングクロス積層の場合、第 1 段階の応力 (0～5 kg/mm²) において、照度変化が少ないので、材料になんらの被害をも受けていないように思われるが、表面に微小き裂が発生している事が、同一材料を用いた超音波減衰測定実験より確められた．Fig. 7 に実験装置、Fig. 8 に、その結果を示す．この図から明らかのように、透過比変化の第 1 段階と同じ応力 (0～5 kg/mm²) において、急激な減衰を示しているが、それ以上の応力では、変化が少ない．この事をさらに調査するために、超音波減衰率と表面あらさの関係を調査した．Fig. 9 に結果を示す．この図から、減衰の著しいのは、凹凸の深さでなく、凹凸の数によると考えられる．したがって、Fig. 8 での超音波減衰の著しい応力

Fig. 7. Apparatus of experiment using ultrasonic wave.

Fig. 8. Relation between stress and attenuation.

Fig. 9. Relation between surface roughness and attenuation.

(5 kg/mm²) までは、き裂の数が増加し、それ以上の応力では、数よりき裂深さが増加したために超音波減衰の影響が現われなかったと思われる．しかし、深さが増加すれば当然、光の乱反射の影響を受け、Fig. 6 における第 2 段階変化に移行したと考えられる．さらに、荷重増加により、繊維と樹脂間のハク離が生じ、乱反射の影響が大となり、第 3 段階の変化に至ったと

Fig. 10 Relation between stress and transmission for specimen with V-notch.

考えられる。

Fig. 10 は、切欠き材料の透過比変化を示す。

切欠き先端部では、初期荷重ですでに変化が生じているが、これは、応力集中によるき裂発生のためであり、切欠きからの距離に対応して、Fig. 6 の3段階変化を示している。また、両側切欠き中間の透過比変化と、切欠き先端の透過比変化が、破断前に一致している。これは、ハク離が、切欠き先端から発生し、両側切欠き間全体に及んで破断に至る事を示している。

2・3・2 動荷重結果 Fig. 11~13 は、Fig. 12 の定荷重式引張圧縮試験装置より得られた、繰返し応力による透過比変化、S-N 曲線を示す。いずれの材料

Fig. 11. S-N curve and relation between number of cycles and transmission for polyester laminates reinforced by roving glass cloth.

Fig. 12. S-N curve and relation between number of cycles and transmission for polyester laminates reinforced by roving glass cloth.

Fig. 13. S-N curve and relation between number of cycles and transmission for polyester laminates reinforced by plane woven and roving glass cloth.

についても、繰返し応力が高くなるほど、透過比変化こう配が大きくなり、破断直前より円弧をえがくようにして低下している。これを、静荷重の場合と同様に破断が、繊維と樹脂のハク離によると考えると、透過比低下曲線の曲率半径が大きい事は、曲率半径が小さい場合に比べて、ハク離が速く進展したと考えられる。また、疲労限に達するような繰返し応力のときは、わずかなバラツキがあるが、ほぼ直線的に透過比が変化している。これは、ハク離が発生していない事を示している。

平織クロスとロービングクロス組合せ材とロービングクロス材とを比較すると、ロービングクロス材の方が、ハク離が急速に進展しているのが認められる。

Fig. 14 (a)~(c) は、ロービングクロスについての荷

Fig. 14. Relation between number of cycles and transmission for varying loads.

Table I. Comparison of decreasing amount of rigidity for decreasing amount of transmission.

σ_a	3.1 (kg/mm ²)				5.14 (kg/mm ²)				7.45 (kg/mm ²)			
	G	β_G	R_a	β_R	G	β_G	R_a	β_R	G	β_G	R_a	β_R
10^2	0.99	0	0.97	0	0.98	0	0.95	0	0.95	0	0.92	0
10^3	0.99	0	0.97	0	0.97	1	0.94	1	0.92	3	0.88	4
10^4	0.98	1	0.96	1	0.96	2	0.92	3	0.83	12	0.83	9
10^5	0.97	2	0.95	2	0.95	3	0.88	7				
10^6	0.92	7	0.87	10	0.80	18	0.78	17				

 G : Reduction of rigidity R_a : Transmission β_G : Decreasing amount of G from 10^2 cycles β_R : Decreasing amount of R from 10^2 cycles

重変動による透過比変化を示す。図中の細線は、変動を受けない場合の透過比変化曲線である。

Fig. 14 (a) のように、荷重変動率が小さいときは、変動後も、無変動の透過比変化曲線に一致するが、(b) のように、荷重変動率を大きくすると変動後の曲線よりずれ、寿命が延び、さらに、(c) のように、3 段階荷重変動を行なうと、2 段階荷重変動時よりもずれが大きく、寿命が延びている事が認められる。これらの結果から、FRP においても金属と同様に、トレーニング効果が生ずると思われる。

以上は、透過光により白化状態を測定した結果であるが、白化と剛性低下の関連を見いだすために、Fig. 4 の剛性低下と透過照度が同時に測定できる装置で実験を行なった。Fig. 15, 16 にその結果を示す。

Fig. 15. Relation between number of cycles and reduction of flexural rigidity for vinyl chloride laminates reinforced by mat glass cloth.

Fig. 16. Relation between number of cycles and transmission for vinyl chloride laminates reinforced by mat glass cloth.

Fig. 15 は、繰返し数を剛性低下の関係、Fig. 16 は、繰返し数と透過比変化の関係を示す。両図を比較すると、Fig. 15 よりも Fig. 16 の方が、バラツキが大きいが、Fig. 15 の剛性が低下し始める繰返し数と、Fig. 16 の透過比が低下し始める繰返し数が一致している。

Table I は、各繰返し数における透過比変化量 (β_R) と剛性低下変化量 (β_G) を、応力毎にまとめたものである。この表より、 β_R と β_G の一致性がうかがわれる。すなわち、Fig. 15, 16 における変化割合の相似性がうかがわれる。したがって、光学的手法による透過比測定によって、剛性が検査されうると考えられる。

2・4 考察

静荷重を受ける場合の透過比変化、動荷重（繰返し荷重）を受ける場合の透過比変化の結果から、透過比低下の原因は、微少き裂より繊維と樹脂間のハク離であると考えられる。また、超音波減衰実験から、FRP の破壊の出発は、表面および内部の樹脂におけるき裂であると考えられる。すなわち、破壊に至るまで、まず樹脂部にき裂が発生し、そのき裂が進展し、樹脂部とガラス繊維のハク離へと移行し、ついで破断に至ると考えられる。このことから、FRP の破壊を、樹脂部のき裂、ハク離によるガラス繊維の破断の 2 種行程に分割し、FRP の破壊のモデル化を行なった。Fig. 17 にそのモデルを示す。このモデルにおいて、コンデンサーが万一破壊しても通電する。しかし、万一抵抗が破壊すれば通電しなくなる。一方、FRP において、

$e_i(t)$ Input
 $e_o(t)$ Output
 $R(t)$: Fatigue function of glass fiber
 $C(t)$: Fatigue function of resin

Fig. 17. Fatigue model of FRP.

万一樹脂部にき裂が発生しても破断しないが、ガラス繊維がハク離によって破断すれば FRP も破断する。この両者の対比から、モデルの抵抗をガラス繊維の破壊、コンデンサーを樹脂部の破壊と考える。ここで、モデルの抵抗をコンデンサーを時間的な変化量と考えたのは、ガラス繊維の時間的な破壊、樹脂部の時間的な破壊を考えるためである。

透過光による透過比低下結果を、このモデルについて考えると、入力電圧 (e_i) を入射光量、出力電圧 (e_o) を出光量とし、繰返し毎の白化による照度低下は、抵抗とコンデンサーの時間的な変化によって、出力電圧 (e_o) が低下する事である。すなわち、今回の透過比低下 (R_d) の実験結果と出力電圧 (e_o) 低下が一致するような、抵抗とコンデンサーの時間的な変化量を見いだす事によって、FRP の疲労破壊機構が解明できると考えられる。また、このモデルは、破壊に対する単位モデルを考えたものであり、実際の挙動については、この単位モデルを、種々に組合わせて考えられると思う。

3 む す び

光学的手法による FRP の非破壊検査とその破壊モ

デルの提案を行なった。第1報で述べたように、Schaper らは、光学的手法は不可能であると断言しているが、第1報、第2報の結果から、不可能であると断言できない。確かに、弾性係数、密度等の機械的性質と光学との関連は、光速度にあり、その光速度の測定が困難であるため、光学の検査方法の可能性に対して大きな壁となっている。しかし、光速度に無関係な応力白化等を考える上では、超音波、X線よりも光学的手法の方が、非破壊検査としては有効的であろう。

(昭和44年5月20日 日本材料学会第18期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 藤井太一, 水川 清, 座古 勝, **19**, 803 (1970).
- 2) 島村昭治, 日本機械学会誌, **71**, 70 (1968).
- 3) Kittel, C., "Introduction to Solid State Physics", Chap. 4, 5 (1956) Johnwily & Sons, New York
- 4) 五十嵐寿一, "音響と振動" (1968) 共立出版
- 5) 飯田修一ら, "光学の測定" (1967) 朝倉書店
- 6) Gibson, J., "Nonlinier Control", Chap. 4 (1963) McGraw-Hill
- 7) 高橋喜久雄, "電子工学" (1962) 昭晃堂