



Title	積層方法の異なるFRP積層板の平面曲げ疲労強度の比較
Author(s)	浅野, 一彦; ASANO, Kazuhiko
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 35(2), 97-108
Issue Date	1984-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23852
Type	departmental bulletin paper
File Information	35(2)_P97-108.pdf



積層方法の異なる FRP 積層板の平面曲げ疲労強度の比較

浅野 一彦*

The Relation between the Methods of Construction of the FRP Board and the Fatigue Strength by the Flexural Fatigue Test

Kazuhiko ASANO*

Abstract

The relation between the methods of construction the FRP board and the fatigue strength was investigated by the flexural fatigue test.

A summary of the results is as follows:

1. The fatigue strength of the FRP was weakened at the secondary bond.
2. The flexural fatigue test could be used to identify the faults in construction, as shown in Fig 7, 8 and 9.
3. The fatigue strength was weakened when construction at the roving cloth was stopped.
4. Under the flexural fatigue test, the strengths of FRP boards can be compared by using the load number 10^5 .

There remain many problems to be solved in regard to the fatigue test, but I think it will turn out to be the best method for comparing the strengths of FRP Boards.

緒 言

現在、静的試験では FRP 積層板の方法、環境等による強度評価を行なうことは困難である。

しかし、年々、FRP 船も大型化しており積層も長時間、多数の人手で行なわれることになり、人意的影響等を受けやすく、その積層状態の適確な評価が必要となっている。

著者は FRP 積層板の積層方法、環境等による層間強度の評価に疲労試験が有効な手段と考え、積層方法（2次接着）の異なる試験材を作製し、疲労強度の比較を行なった。

試 験 材

試験材として、ガラス構成が(MR)×4, 8ply と MRMRM, 5ply の FRP 積層板において、各々 3 種類の 2 次接着（24 時間放置後再積層）回数の異なる FRP 積層板を作製した。なお、2 次接着以外は各々、同一作業条件下で積層されている。

基材

ガラス繊維	日本硝子繊維	マット (M)	600 g/m ²
		ロービング (R)	810 g/m ²
樹脂	昭和高分子	157BQTN, 6 ボイズ	

* 北海道大学水産学部漁船工学講座 (Laboratory of Engineering of Fishing Boat, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

ガラス基材構成および積層方法

1. $(MR) \times 4$, 8ply の FRP 積層板

試験材 1. (MR) を連続積層, $(MR) \times 4$

2. $(MR) \times 2$ を連続積層後, 24 時間放置して, さらに $(MR) \times 2$ を連続積層,
 $(MR) \times 2 + (MR) \times 2$

3. (MR) の積層を各々 24 時間放置して積層,
 $(MR) + (MR) + (MR) + (MR)$

2. $MRMRM$, 5ply の FRP 積層板

試験材 4. 各層を連続積層, $MRMRM$

5. 1-2 層間と 4-5 層間を 24 時間放置して積層, $M + RMR + M$

6. 各層間ごとに 24 時間放置して積層, $M + R + M + R + M$

以上, 試験材の積層は (有) 服部造船所で行なわれた。

試 験 方 法

疲労試験は (株) 東京衡機製造所の PWO 型平面曲げ疲労試験機による両振り平面曲げ疲労試験である¹⁾。

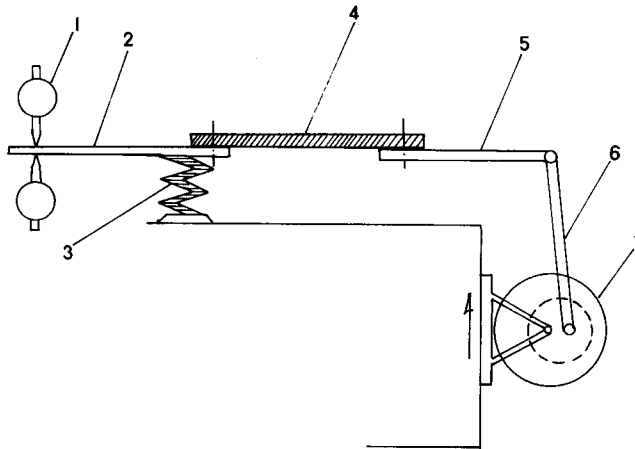


Fig. 1. Fundamentals of flexural fatigue test machine.

- | | | |
|--------------------------------|------------------|--------------------|
| 1. Dial gauge | 2. Measuring arm | 3. Dynamo. Spring. |
| 4. Test piece | 5. Driving arm | 6. Connecting rod |
| 7. Double eccentricity device. | | |

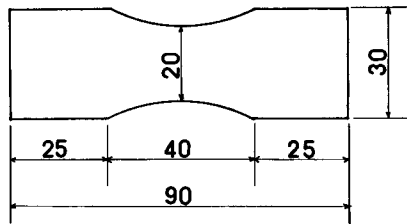


Fig. 2. Dimensions of test piece (mm).

図1に疲労試験機の原理図を示す。

図2には試験片の形状を示す。

疲労試験の繰返し速度は1200R/M (20 Hz)である。疲労試験中の試験片の剛性保持率(見かけ上の)は適時に疲労試験機を停止して測定を行なった。

試験片の破壊の判定は剛性保持率80%に低下した時点をもって破壊と見なしている。

試験結果と考察

1. (MR)×4, 8ply のFRP 積層板

図3, 4, 5に各試験材のS-N線図を示す。各図中の数字は試験片番号, 黒丸Tは図7, 8, 9の様な破壊形状を示した試験片, 黒丸Rは試験片表面のR層の剝離により剛性保持率が80%を割った試験片を示す。

疲労試験における応力と負荷回数については, FRPの疲労試験では負荷回数 10^5 附近を境いに大きく変化することが多く, 今回の試験結果についても負荷回数 $N < 10^5$ と $N > 10^5$ の2ヶ所に分けて回帰直線を求めている。

試験材 1

$$N < 10^5 \quad \sigma = -2.45 \log N + 17.12 \quad R = -0.90$$

$$N > 10^5 \quad \sigma = -0.39 \log N + 8.13 \quad R = -0.65$$

ここで, σ 応力, N 負荷回数, R 相関係数である。

試験材 2

$$N < 10^5 \quad \sigma = -0.74 \log N + 9.81 \quad R = -0.38$$

$$N > 10^5 \quad \sigma = -0.13 \log N + 6.39 \quad R = -0.22$$

試験材 3

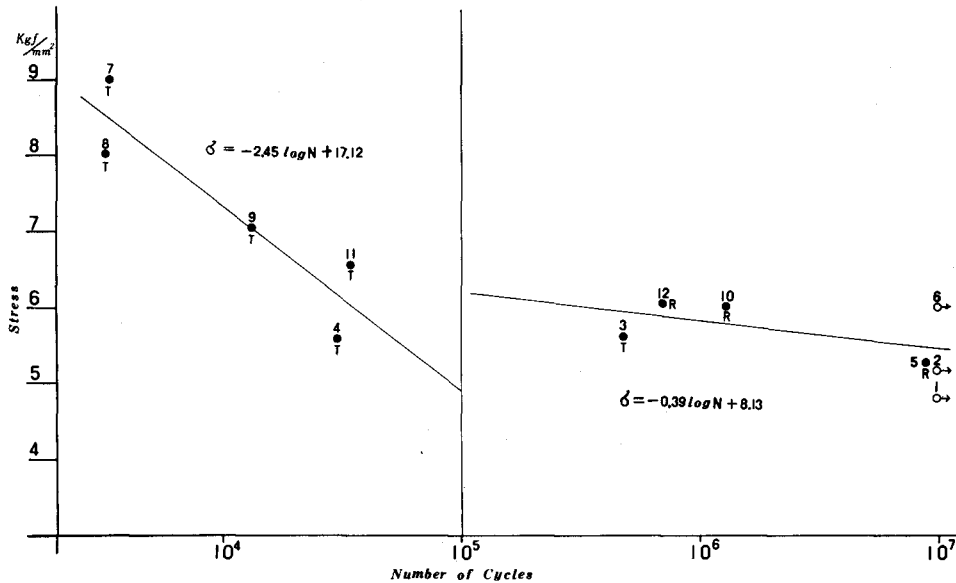


Fig. 3. S-N Lines of tested piece No. 1.

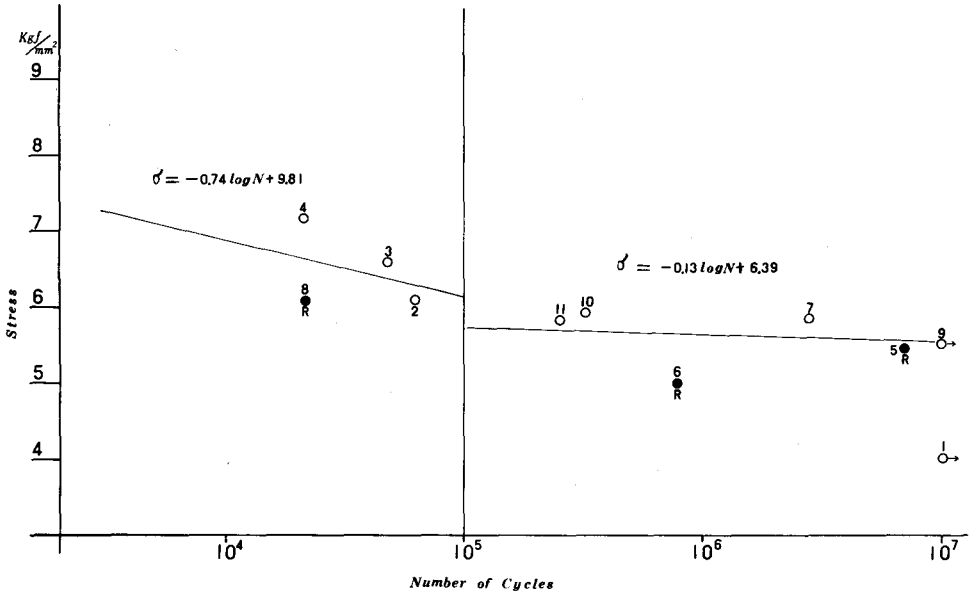


Fig. 4. S-N Lines of tested piece No. 2.

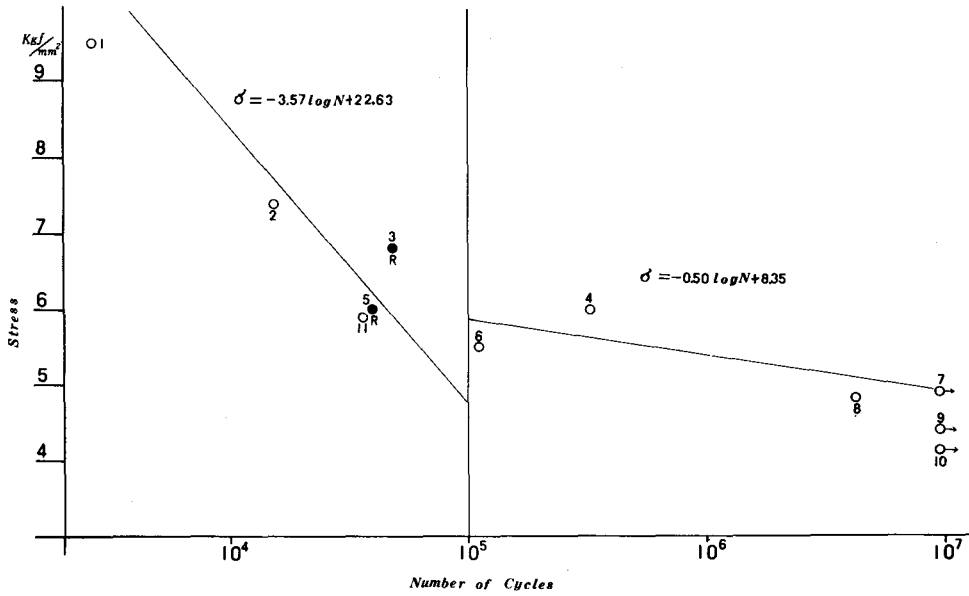


Fig. 5. S-N Lines of tested piece No. 3.

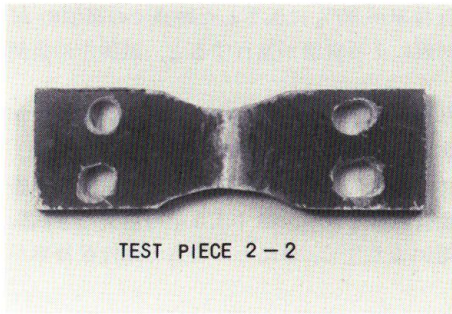


Fig. 6. Damaged Surface of tested piece No. 2-2.

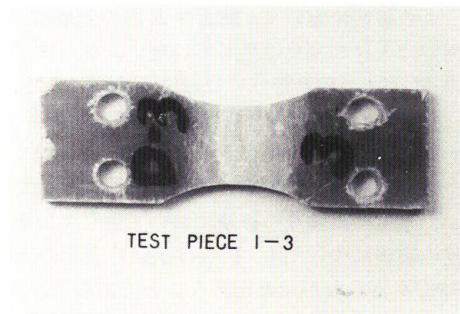


Fig. 7. Damaged Surface of tested piece No. 1-3.

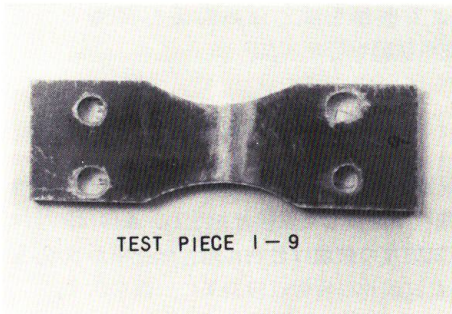


Fig. 8. Damaged Surface of tested piece No. 1-9.

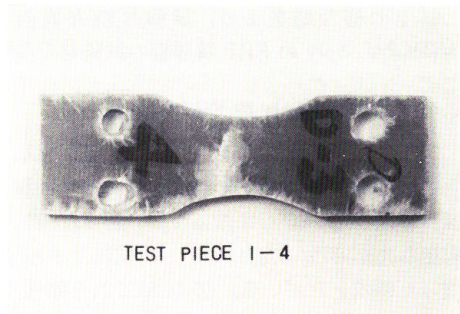


Fig. 9. Damaged Surface of tested piece No. 1-4.

$$\begin{array}{lll}
 N < 10^5 & \sigma = -3.57 \log N + 22.63 & R = -0.97 \\
 N > 10^5 & \sigma = -0.50 \log N + 8.35 & R = -0.73
 \end{array}$$

これらの疲労試験において試験片の破壊は3種類の形状を示した。

図6は著者が行なっている平面曲げ疲労試験での代表的なM面での破壊形状である。この時の裏側のR面は中央部が白化している。

図7, 8, 9の破壊形状は試験材1の試験片のみに生じたM面での破壊形状である。この時の裏側のR面はほぼ完全な状態である。

この破壊については、他の試験片では図6に示される様に荷重を受ける中央部で一条の線として破壊が生じるのに対し、図7, 8, 9の破壊は表面のM層とR層の間で剝離が生じており、破壊の進行は表面のM-R層間に広がって行く。この様に、図7, 8, 9の様な破壊を生じた試験材1は他の試験材に比べ、2次接着層のない最良の条件で積層されているにもかかわらず、試験材表面のM層とR層の間になんらかの欠陥を有していることが示された。また、この破壊は試験片の裏側のR層がほぼ完全な状態であることより、非常に早期の時点で生じていることがわかる。

これら、試験材1の積層欠陥の原因については不明であるが、このようなFRP積層における強度上の欠陥を発見できたことは今回の疲労試験での大きな成果と考える。

3番目の破壊状態は試験片の表面のR層の剝離により剛性持保率が80%以下となるものである。

この破壊において、表面の R 層の剝離により剛性保持率が 80% に低下した時点での裏側の M 面では大きな変化は生じていない。さらに、 R 層の剝離による破壊が進行すると、試験片の裏側の M 面での破壊形状はほぼ図 6 の様になる。

ただし、低応力時には組織破壊は試験片表面の R 層の剝離だけで止まり、剛性保持率も 70%~75% を維持したまま負荷回数 10^7 まで行くことが多い。図 10 にその一例を示す。

さらに、試験片表面の R 層の剝離については試験材 1 の図 7, 8, 9 の様な破壊をした試験片を除いた全ての試験片の破壊において生じていることが観察されており、図 3, 4, 5 中の白丸の各試験片の破壊についても、破壊は試験片表面の R 層の剝離により生じ、単にその時点で剛性保持率が 80% を下らなかつたと言うことであろう。

これらの実験より、本来の目的の 2 次接着の影響については試験材 1 の原因不明の積層欠陥や、試験片表面の R 層の剝離による破壊などで明確にすることはできなかった。

ただ、各試験材において破壊しなかつた試験片と比較すると疲労強度は積層条件の順になることがうかがえる。

以上の様な結果より、試験片の R 面の剝離による影響を除くため両面を M 層とした $MRMRM$, 5ply の FRP 積層板の試験材を作製して疲労試験を行なった。

2. $MRMRM$, 5ply の ERP 積層板

図 11, 12, 13 に各試験材の $S-N$ 線図を示す。

この疲労試験において、試験片の剛性回復という現象が生じた。図 11, 12, 13 中の Δ 印は剛性保持率が一度、80% を割った後、再度、80% 以上に剛性が回復した試験片を示し、 \blacktriangle 印は剛性は回復したが 80% に達しなかつた試験片を示す。なお、試験片の破壊は最初に剛性保持率が 80% を割った時点としている。図 14 にこれら剛性回復をした試験片の疲労試験結果の一部を示す。

疲労試験結果については、各試験材共に負荷回数 $N > 10^5$ で破壊した試験片が少ないため、応力と破壊負荷回数の関係は $N < 10^5$ についてだけ求めている。

試験材 4

$$N < 10^5 \quad \sigma = -0.85 \log N + 10.26 \quad R = -0.48$$

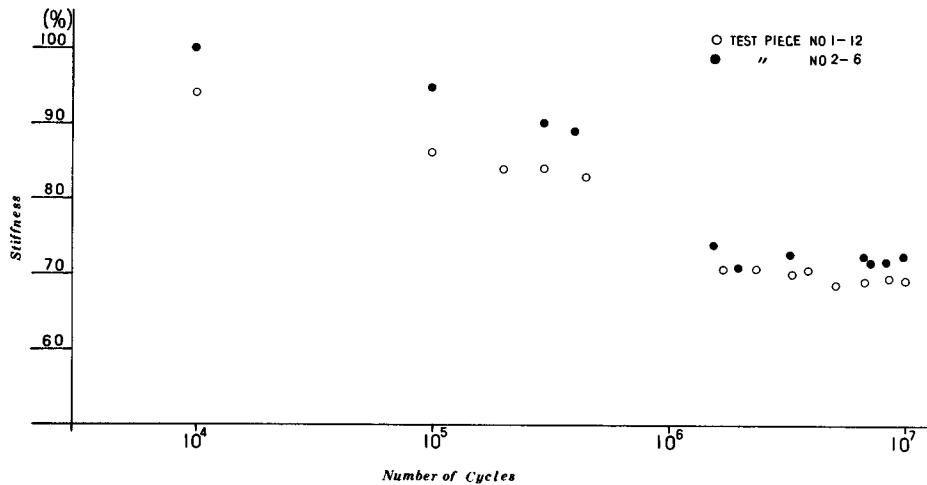


Fig. 10. Examples of fatigue tests in which there was a break at the roving cloth.

浅野：FRPの積層板の疲労強度の比較

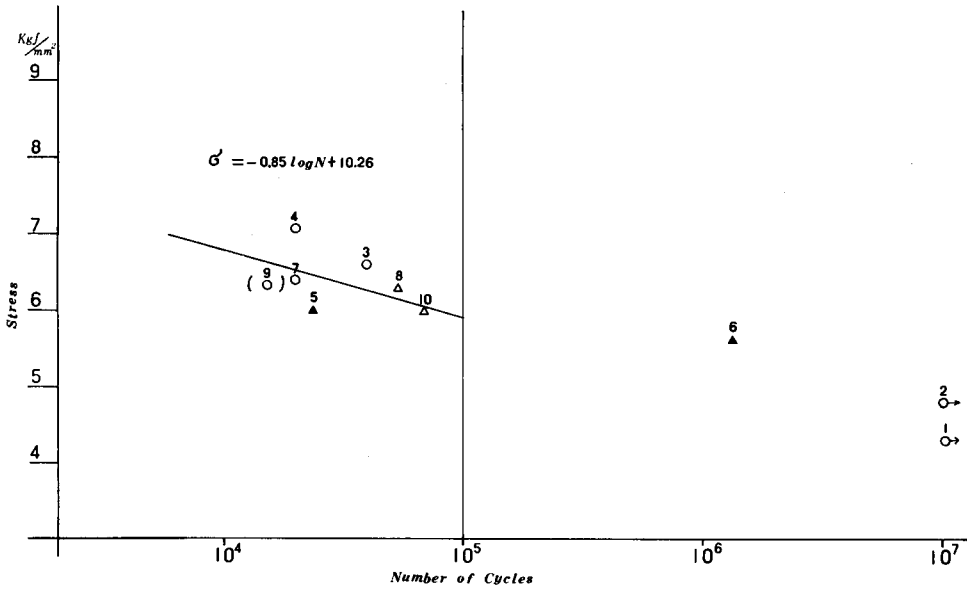


Fig. 11. S-N Lines of tested piece No. 4.

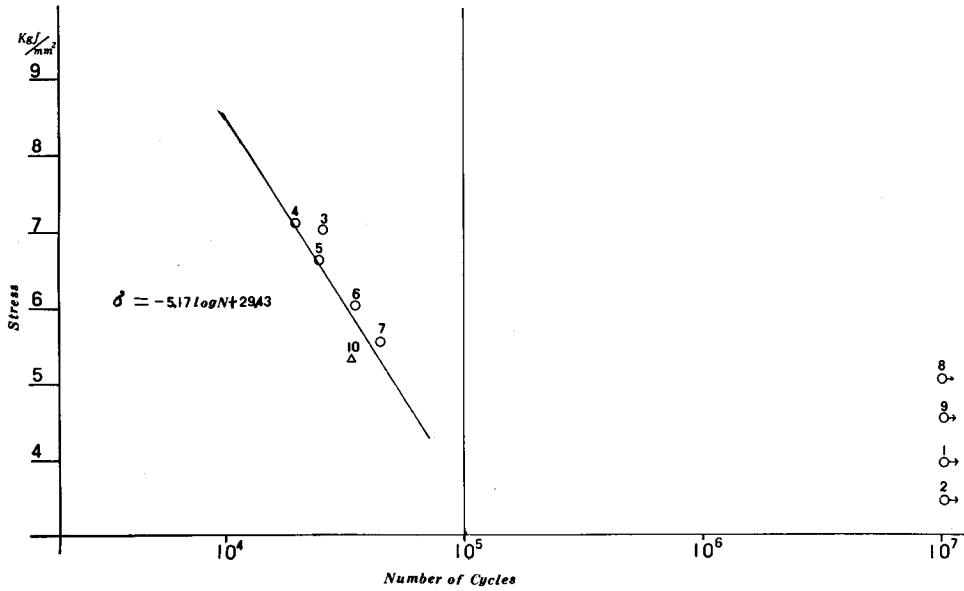


Fig. 12. S-N Lines of tested piece No. 5.

試験材 5

$N < 10^5$

$$\sigma = -5.17 \log N + 29.43$$

$$R = -0.89$$

試験材 6

$$N < 10^5 \quad \sigma = -2.15 \log N + 15.22 \quad R = -0.93$$

また、図 11, 12, 13 より各試験材の時間強度（負荷回数 10^7 まで耐えられる応力値）は試験材 4 で約 5.5 kg/mm^2 、試験材 5 で約 5.0 kg/mm^2 、試験材 6 で約 4.8 kg/mm^2 と推定される。

以上より、このグループでの疲労試験では実験結果のバラツキはあるものの、疲労に対する強度は試験材料 4, 5, 6 の順となり、FRP 積層板の積層時における 2 次接着回数が多くなるにしたがって疲労強度が低下することが示された。

また、今回の疲労試験や他の FRP の疲労試験結果を見ても²⁾、疲労試験において負荷回数 $10^5 \sim 10^7$ の間で破壊することは少ない。さらに、各疲労試験結果において負荷回数 $10^5 \sim 10^7$ の間で破壊した試験片の応力と負荷回数との相関性については、それらの回帰直線の傾きは小さく、ほぼ水平と考えてもよいぐらいである。

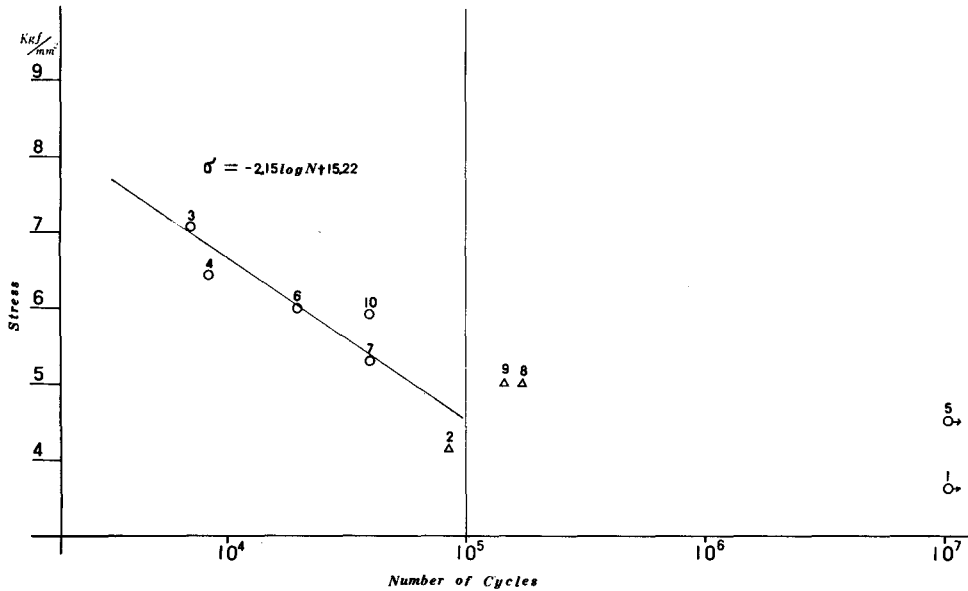


Fig. 13. S-N Lines of tested piece No. 6.

Table 1. Data on tested

T.P No.	E	R	D	T	P	D×P
4- 5	890	6.0	101	5.0	72	73
4- 6	890	5.6	107	5.3	71	76
4- 8	890	6.3	99	4.8	72	71
5-10	780	5.3	141	6.2	64	90
6- 8	840	4.9	104	5.6	77	80
6- 9	840	5.0	108	5.5	74	80

E: Stiffness (kg/mm²)

R Load of fatigue test (kg/mm²)

D: Value of dial gauge (mm)

T Thickness of tested piece (mm)

P: Point of recovered stiffness (%)

これらより、FRPの疲労試験では負荷回数 10^5 までの試験成績により各種要因による強度比較などは十分に可能と考える。

このことは従来、長時間かかるとされてきた疲労試験の短縮（負荷回数 10^7 では4～6日かかるのが 10^5 では1～1.5時間となる。）となり、試験効率ばかりではなく、疲労試験のFRP製品等の強度評価の実用化にも利用できよう。

次に、図11, 12, 13の△, ▲印の試験片の剛性回復現象（以後、80%剛性回復と言う。）について考察する。

これら、80%剛性回復は図10に示す様に、剛性保持率が90%前後より急激に剛性の低下が生じ、剛性保持率が70%前後で剛性の回復が始まる。

今、この剛性保持率が70%前後で剛性の回復が始まることに注目し、各試験片の各種値を表1に示す。（試験片6-2を除く。）

表1の各試験片の曲げ弾性率は各試験材全体の平均値であり、かなりのバラツキを含んだ値である³⁾。

表1で示される様に、80%剛性回復の始まる時点での疲労試験機のダイヤルゲージの値（D×

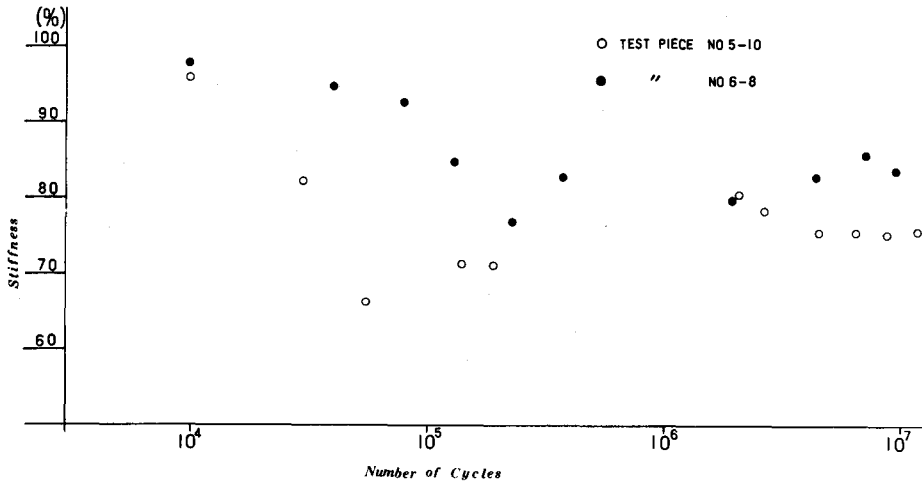


Fig. 14. Examples of fatigue tests in which stiffness was recovered.

pieces that recovered stiffness

T.P No.	D×P/T	0.9D/T	E×P	Hz	0.9 Hz	R×P×T
4- 5	14.6	18.3	641	12.9	14.4	21.6
4- 6	14.3	18.2	632	13.5	15.2	21.1
4- 8	14.8	18.5	641	12.3	13.8	21.8
5-10	14.5	20.4	499	14.1	16.7	21.0
6- 8	14.3	16.7	647	14.5	15.6	21.1
6- 9	14.5	17.7	622	13.9	15.4	20.4

Hz: Number of vibrations at point of recovered stiffness

0.9 Hz: Number of vibrations at point of 90% stiffness

P, ダイナモスプリングの振幅の値。)を試験片の板厚 (T) で除した値は ($D \times P/T$) は 14.3~14.8 と一定である。このことより、著者は 80% 剛性回復現象は疲労試験機と試験片との共振現象により生じたのではないかと考える。

すなわち、疲労試験の過程において試験片の剛性低下により疲労試験機の応力検出用ダイナモスプリングとの共振周波数が低下し試験片周波数 20 Hz に同調し、急激な剛性低下が生ずる。さらに、試験片の剛性低下にしたがい共振周波数が低下し共振現象は止まり、この時点で大きな組織破壊の生じない応力下の試験片は剛性回復に向う。

以上の仮説の補足のため、表 1 に共振現象が剛性保持率が 90% の時点で生じるとして、各試験片の剛性保持率が 90% の時点でのダイヤルゲージの値を試験片の板厚で除した値 ($0.9D/T$) と試験片自体の剛性回復の始まる時点での共振数(Hz)と剛性保持率が 90% 時点における共振数(0.9 Hz) を求めている。

これら試験片の共振数は曲げ弾性率のパラッキもあり、先に示した ($D \times P/T$) の値に比べパラッキが大きくなっているが剛性回復の始まる時点での共振数はほぼ 13.5 ± 1 Hz の値となっている。また、各試験片の剛性保持率 90% 時点と剛性回復時点の共振数の差は約 1.5 Hz でパラッキも小さい。

ここで、試験片と疲労試験機のダイナモスプリングとの共振現象のはずれる周波数を 19 Hz と仮定するとダイナモスプリングによる共振数の上昇は約 4.5 Hz となる。この 4.5 Hz を試験片の剛性保持率 90% 時点の共振数を加えるとほぼ 20 ± 1 Hz となり、疲労試験での繰返し速度となる。

ただ、今回の試験片と疲労試験機との共振に関しては、ダイナモスプリングの物性等に未知な点が多く、さらに一度、剛性の低下した試験片が共振による荷重が除かれたとしても剛性が回復することができるかなどの問題もあり、今回の実験だけでは 80% 剛性回復現象の解明は困難である。

さらに、80% 剛性回復の生ずる応力下での負荷回数 10^7 以上の動向について実験を行っており、その結果を図 15 に示す。この疲労試験でも他の 80% 剛性回復を行なった試験片と同様に、一度、剛性保持率 75% 位までに低下し、再度、85% まで剛性が回復している。さらに、その後、小さな剛性回復現象を生じながら負荷回数 $6 \sim 9 \times 10^7$ の間で剛性保持率 80% を保ち、その後、徐々に剛性低下を生じ負荷回数 1.5×10^8 に至る。このような疲労試験結果において剛性保持率が最初に 80% を割った時点をもって破壊と見なすことの正否についても再検討の必要があろう。

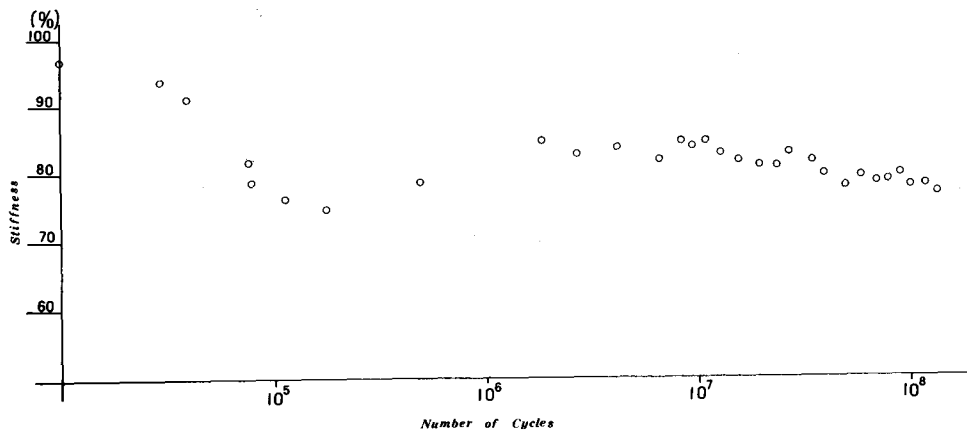


Fig. 15. Results of fatigue test with load above 10^7 . Tested piece No. 6. $\delta = 4.8$ kg/mm².

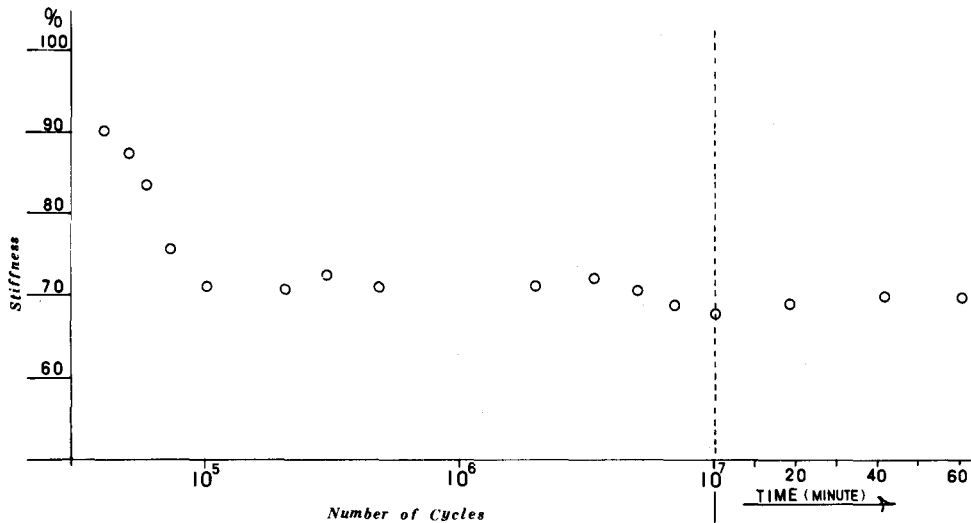


Fig. 16. Recovery of stiffness after fatigue test was stopped. (MR)×4, 8 ply, $\delta=5.62$ kg/mm².

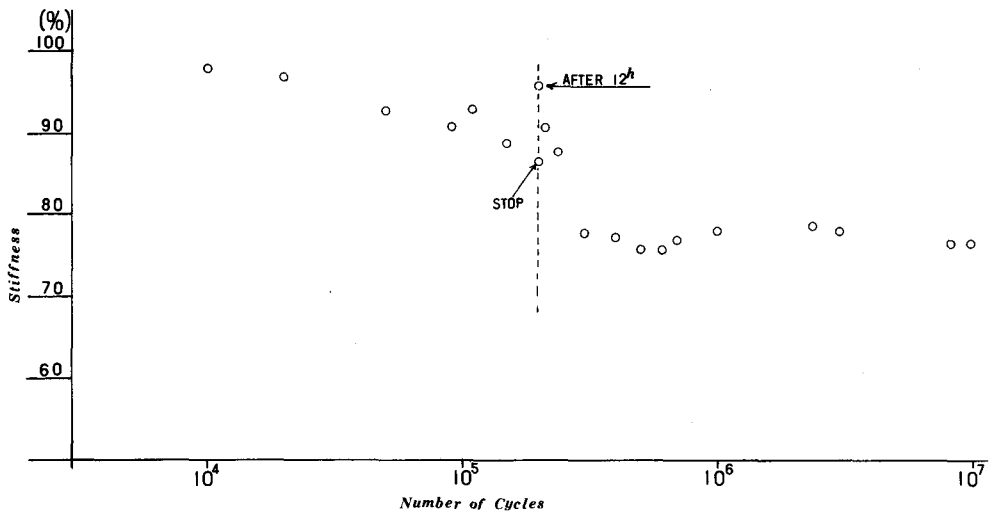


Fig. 17. Results of fatigue test that was stopped after 12 hours. (MR)×4, 8 ply, $\delta=5.65$ kg/mm².

また、剛性の回復に関しては、FRP 疲労試験において試験の中断により生じることがある。著者の行なっている疲労試験では試験片の剛性保持率を計測するため疲労試験機を停止している。この際疲労試験の繰返し負荷により加熱された試験片の樹脂が疲労試験の中断により冷却され、剛性は増加する。しかし、低応力下または短時間の中断では疲労試験の中断による影響は小さい¹⁾。この例として、応力 5.6 kg/mm² 時の疲労試験停止後の時間と剛性回復の関係を図 16 に示す。

さらに、図 17 に疲労試験機を約 12 時間停止した時の疲労試験結果を示す。この時、疲労試験再開時の剛性は中断時(12 時間前)に比べ 10% ほど剛性が回復している。しかし、疲労試験再開後は急速に剛性は低下しており、その後の経過についても図 17 を見る限り、疲労試験による影響は小さい様である。

以上、著者の行なっている実験での疲労試験中断による影響は短時間の中断でもあり、さしたる支障はないものとする。

結 言

FRP の疲労試験では疲労試験機の種類や試験方法等により異なる値を示す²⁾。

さらに、FRP 積層板の疲労試験データも少なく、特に著者の使用している疲労試験機でのデータは皆無に等しい状態である。

この様に、FRP 積層板の疲労試験には試験方法を含め、多くの問題がある。

今回の疲労試験では、他の物性試験と同様に大きな計測値のバラツキや試験環境等に問題を含んでいるが

1. 2 次接着による疲労強度低下の計測。
2. 図 7, 8, 9 に示される積層欠陥の発見。
3. ロービン層で積層を止めることは疲労強度低下につながる。
4. 疲労強度の比較は負荷回数 10^5 までの短時間で可能である。

などの結果が得られた。

また、今回の疲労試験の問題点として、80% 剛性回復、図 7, 8, 9 の積層欠陥の解明などがあるが今後の 2 次接着を含めた FRP 積層時の各要因の強度への影響の解明などに疲労試験が有効な試験方法であることが示されたと考える。

文 献

- 1) 浅野一彦 (1980). FRP 積層板の物性 I. 疲労試験における剛性と硬さの低下について. 北大水産彙報 31, 246-251.
- 2) 丹羽誠一 (1977~1980). FRP 船講座. 船舶 553-584.
- 3) 浅野一彦 (1981). FRP 積層板の物性 III. 曲げ試験における板厚の影響について. 北大水産彙報 32, 176-181.