

接 着 層 の 疲 労

元 起 巖* 時 光 富 士 雄*

Iwao Motoki

Fujio Tokimitsu

Fatigue Strength of Adhesives by Repeated Fatigue Test Under Constant Deflection

Synopsis

In the previous paper, we reported the relation between mechanical, physical factors and a bonding condition, which give the best adhesive strength.

These results were applied the several practical bonded cores.

On the other hand, we must guarantee their life, especially when vibration and repeated stresses are given.

We tested the fatigue strength of adhesives by the repeated fatigue test under constant deflection and discussed the relation between fatigue strength and their material properties. We obtained the following relationship which fatigue life is dependent on λ or η and s .

$$\log N = \frac{k_1 + k_2 \lambda^{1/2}}{k_3 s + k_4} \text{ or } \frac{k_5 + k_6 \eta^{1/2}}{k_7 s + k_8}$$

where $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8$ is the constant, s, N, λ and η are respectively load, the cycle number of repeated stresses to specimen, logarithmic decrement and viscosity of adhesives. From above results, it is desirable to research material or adhesives properties, in order to make good practical bonded cores.

I. ま え が き

接着剤ならびに接着技術のめざましい発展ぶりから、接着物も多種多様なものが作られている。この事実は接着の利点を生かした接着物が作られることを意味しているものといえよう。また接着に関する信頼性が高まったものともいえる。具体的にはミサイルの弾頭を初めとして大きな構造材料の重要部門に使われていることも周知のことである。電気機器においても、その電気特性を向上させるために、リベット、ボルト締めにかかわって接着によって作られる製品も数多く現われるようになった。⁽¹⁾変圧器鉄心の積層鉄心、巻鉄心もその一例である。前報にはこれら鋼板の接着に関して、鉄心接着用接着剤と接着工作法ならびにこれら鋼板接着強度を支配する諸因子の解析を行なって接着の反応速度論的な取り扱いにより、接着強度と接着条件との関係を明らかにしたが、この結果は最良の接着強度を得るための指針を与えたに過ぎず、接着鉄心の強度に対する実用上の信頼性を保証するための振動、特に繰り返し応力による接着層の疲労について割愛したので、ここでこれら製品としての設計基準、安定性をより確かなものにするために接着層の疲労について解析を行なった結果を述べる。

II. 材 料 の 疲 労

1. 材 料 の 破 壊

* 中央研究所

外部から接着物ならびに材料が時間的に変動応力を受ける時は、その最大応力が静的破壊応力より小さい場合でも、ある繰返し数の後に破壊することがあるので、実用面で振動、あるいは繰返しを受ける応力に対する振動特性を明らかにすることが必要である。この繰返し応力による破壊を疲れ破壊⁽²⁾といって、一般に接着物ならびに材料の疲れと呼ばれているものである。金属材料については、これら疲労に関して数多くの研究がなされているが高分子材料、特に接着物に関しては、その例がほとんどないといっても過言ではない。

接着物も高分子材料も静的荷重を受けて破壊する場合には、大きい塑性変形を生じた後に破壊する場合と、ほとんど塑性変形を起こさないで破壊する、この二つの破壊形式が考えられる。これに反して疲れ破壊の場合には、荷重がある回数、繰返された後に材料にきわめて小さい部分だけに微細なクラックを生じ、その後の荷重の繰返しによってクラックがきわめて徐々に進展し、残部の断面積が減り、この有効断面積が静的荷重破壊応力に等しくなった時、瞬間的に破壊すると考えられている。

2. 疲 れ 試 験

疲れ破壊の場合は、その繰返し荷重が材料の静的荷重よりも低いことは、前記したとおりであり、両者の破壊機構は全く別のものであるので、静的破壊強度から疲れ強度を知ることは一般的にはできない。このために材料の疲れ強度を求める方法としては、実際の使用条件に

合致した応力、繰り返し条件で行なうべきであり、疲れ試験もそのために実用条件に対応する引張り、圧縮、曲げ、ねじれ試験法が採用され、一定寸法形状の材料に実際に変動荷重を加えて、材料が破壊するまでの応力の繰り返し回数を求める試験が行なわれている。

これら使用される試験機を大別すれば

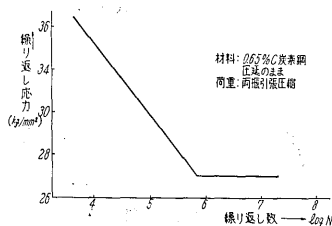
- (1) 引張り、圧縮疲れ試験機
- (2) 回転曲げ疲れ試験機
- (3) 平面曲げ疲れ試験機
- (4) ねじれ疲れ試験機
- (5) 組合せ応力疲れ試験機

などがある。

接着物の試験に関しては、Federal Test Method Standard No. 175 に記されてある。この試験法の大約は Single Lap Joint 接着を行なった接着試験片に定屈曲繰り返しを与えるもので、試験片寸法は、 $25.4 \times 62 \times (1 \sim 2)$ 接着面積は 2.54 cm^2 である。

3. 疲労強度の表示法

疲労強度をあらわすために、一定寸法形状の材料にある一定の変動荷重を加えて、材料が破壊するまでの応力の繰り返し回数で表示する方法が一般に行なわれる。



第 1 図 S-N 曲線
Fig. 1. S-N curve for
0.6% C-steel

第 1 図に示すように縦軸に繰り返し応力を横軸に破壊までの応力繰り返し数を対数目盛でとって図示し、その材料、接着物の振動特性を表わすものである。この曲線は S-N 曲線または wöhler curve と呼ばれ、第 1 図に例示した 0.65% C 炭素鋼について説明すれば、この S-N 曲線は右下りの傾斜部とほぼ水平部からできていて、鋼（金属材料）においてはその繰り返し数が $10^6 \sim 10^7$ 回の間で S-N 曲線は水平になり、この水平以下の繰り返し応力はこれを無限回繰り返しても破壊が生じない限界を与えるので、この水平部分の応力を疲れ限度または耐久限度と呼んでいる。金属ではその疲れ試験は 10^7 回まで行ない、 10^7 回で破壊しない応力の最大値をもって疲れ限度としている。接着物の疲労試験でも、前述の Fed. Test Method Std. No. 175 には同じく 10^7 回で破断しない応力を接着物の疲れ限度としている。

4. 接着層に現われる疲労現象

接着物に繰り返し荷重による疲労を与えた場合の疲労機構については、まだ明確には説明できないが、大別して次の二つに分けることができる。

- (1) 外力によって接着剤層に微細なクラックを生じ、このクラックがその後の繰り返し数で成長し疲労破壊にいたるもの
 - (2) 化学的なぜい化現象（鎖状高分子では重合度の低下、三次元構造高分子では架橋密度の低下、酸化など）が因子となるもの
- などに分けられる。

これらの疲労現象に関する理論的な取扱いは金属材料では、幾多の仮説が立てられていて、これらを大別すると

- (1) S-N 曲線の誘導に関するもの
 - (2) 平均応力あるいは組合せ応力が作用する場合の疲れ限度線図に関するもの
- などである。

5. 疲労強度（S-N 曲線誘導に関する）仮説

S-N 曲線の誘導に関するものとしては

- (1) 金属材料を構成している結晶格子が外部からの繰り返し応力でひずみを生じ、これが結晶内に残留格子として存在し、この残留格子のひずみが繰り返し応力、繰り返し数によって加算されて破壊に至るとする説⁽³⁾
 - (2) 外部応力によって、材料に与えられたエネルギーの一部が内部摩擦エネルギーとして消費され、このエネルギーが疲れ破壊に関与するとして取り扱った説⁽⁴⁾
 - (3) 繰り返し応力を受けた場合、外部応力によって材料の塑性部分が変位する。この応力—塑性ひずみ特性が材料の疲労特性を支配するとして取り扱った説⁽⁵⁾
- などがある。

榎本は疲れ破壊の S-N 曲線に関してつぎのような仮説を提唱している。

金属材料の対数減衰率は繰り返し応力の大なる場合に大きく、また疲れ限度以上の応力がある回数以上に繰り返した後も繰り返した応力の高いほど大きくなることが知られているので、材料の対数減衰率 λ と繰り返し応力 S との関係をつぎのようにおく。

$$\lambda = aS^m \dots\dots\dots(1)$$

ここに a と m は材料によって定まる定数。

また材料に引張り、圧縮の応力が与えられると、材料の対数減衰率 λ と 1 サイクル中の単位体積当たりの損失仕事 ΔW との間には、つぎの関係で与えられる。

$$\Delta W / W \cong 2\lambda \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{ここに } W = S^2 / 2E$$

E : 縦弾性係数

$\Delta W/W$: 比損失

式(1)式(2)から

$$\Delta W/W = a_1, S_e^m \qquad a_1 : 2a$$

または

$$\Delta W = CS^{m+2} \dots \dots \dots (3) \qquad C : a/E$$

ここでさらに次のような仮定をおいて、金属材料が疲れ限度以上の繰り返し応力を受けると、エネルギーの一部は内部摩擦として消費されるが、これが1サイクル中にある量を起こすと、その越えた部分が疲れ破壊に関与し、このエネルギーが繰り返し応力の後にある一定量に達すると、その金属は破壊すると考える。この疲れに関与しない限界の内部エネルギー損失を ΔW_e とすると、式(3)は次のようになる。

$$\Delta W_e = 2\lambda W_e = CS_e^{m+2} \dots \dots \dots (4)$$

したがって1サイクル中に疲れ破壊に関与するエネルギーは、

$$\Delta W - \Delta W_e = C(S^{m+2} - S_e^{m+2}) \dots \dots \dots (5)$$

となる。

このエネルギーがある一定量 K に達した時に破壊が起こると仮定すると、 N を破壊までの繰り返し数として

$$K = C(S^{m+2} - S_e^{m+2})N \dots \dots \dots (6)$$

両辺を対数でとり S/S_e の形で表わすと

$$\log N = \log \left(\frac{K/C}{S_e^{m+2}} \right) - \log \left[\left(\frac{S}{S_e} \right)^{m+2} - 1 \right] \dots \dots \dots (7)$$

となり

$$\log N = \log N_c - \log \left[\left(\frac{S}{S_e} \right)^{m+2} - 1 \right] \dots \dots \dots (8)$$

$$C = \frac{a}{E}, \qquad N_c = \frac{K/C}{S_e^{m+2}}$$

となり式(8)は応力 S と破壊までの繰り返し数 N の関係を示し、 $S-N$ 曲線を表わす式となる。式(8)で $S=S_e$ とおくと $N \rightarrow \infty$ となり S_e は疲れ限度を表わす。

式(7)で繰り返し応力が疲れ限度よりもはるかに高いと考えると、 S_e^{m+2} は S^{m+2} に対して無視することができる。したがってこの式は

$$K = CS^{m+2}N$$

$$\log S = \frac{1}{m+2} \left(\log K - \log C \right) - \frac{1}{m+2} \log N \dots \dots \dots (9)$$

となって $S-N$ 曲線の傾斜部の漸近線を与え、その傾斜は、 $1/m+2$ である。また漸近線と $S=S_e$ なる水平線との交点は

$$\frac{K/C}{S_e^{m+2}}$$

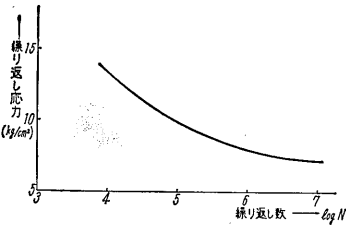
であり、式(8) N_c に等しく N_c は限界繰り返し数であり、 K, C, S_e, m などは材料によって定まるものである。

III. 高分子材料の疲れ強さ

接着体が接着剤に比べて強度的にはるかに大きいものであれば、当然に外部から応力を加えた場合の疲労破壊は接着層で起こると考えられる。このことは接着剤として使用される高分子材料の疲労強度にほかならないので、接着物の疲労強度について考察する前に解説的に高分子材料の二、三の疲労特性について述べる。

高分子材料では材料単独の疲労特性に関する研究例は比較的少なく、その大半がフェノール積層板、ポリエステル積層板などの各種積層板とゴム材料特にタイヤコード⁽⁶⁾についてのものがかなり多い。

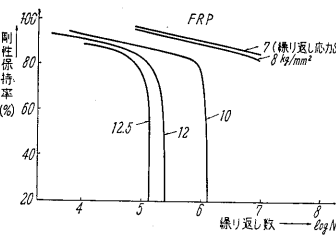
第2図はFRPの疲労特性、 $S-N$ 曲線を示したもので、金属ほど明白な疲労限界を示していないが、繰り返し数の 10^7 回での応力値はほぼ静的破壊強度の $1/4$ 程度の



第2図 FRP $S-N$ 曲線
Fig. 2. $S-N$ curve for FRP

値を示している。FRP 積層板における疲労破壊は樹脂とガラス繊維との界面の分離が大半であり、試験的に得られる結果としては樹脂とガラス繊維が分離した後もガラス繊維が破断しないかぎり全体が破壊にいたらない⁽⁶⁾で、疲労限度の尺度として定めにくい点がある。第3図は、FRP 積層板に一定荷重の繰り返し応力を加えたときの剛性保持率の変化を示したもので、繰り返し応力の大きいものほど剛性保持率変化が大きくなることが示されている。また一定荷重のもとでの繰り返し数に対して剛性保持率が初めは徐々に低下するが、その後繰り返し数のある値(剛性保持率 80~90%)を過ぎると急に剛性率が低下し疲労破壊にいたる。

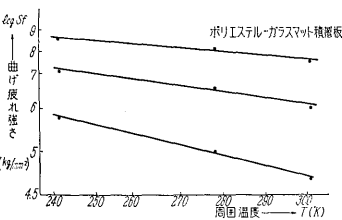
このように繰り返し一定荷重を与えた後の材料の強度



第3図 疲れ試験中の剛性変化
Fig. 3. Decrease of rigidity of FRP during fatigue test

的な挙動を追跡することは材料が疲労破壊する $S-N$ 曲線よりもより重要な意味をもったものとして実用価値がある。FRP のようにガラス繊維と樹脂層間とに“はくり”が生じ、その疲労限度の繰返し数の不明確なものには、このような試験方法が適していると考えられる。

A.S.T.M. の D 671-51 T によればプラスチック材料の疲労限界を求めるのに剛性率によって、その判別を規定している。これによると材料の静的強度に対して、繰返し応力のもとで剛性率が $\frac{1}{2}$ 低下した点の繰返し数をもってその材料の疲労点と規定している。

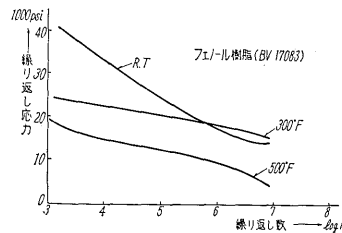


第 4 図
疲れ強さ—周囲温度
Fig. 4.
Influence of temperature on fatigue life of FRP

(7)
第 4 図は、FRP 積層板の曲げ疲労強度についての温度特性で、この関係から疲れ強さ O_f は
$$O_f = kT^{-a}$$

T : 絶対温度 k : 定数
 a : 材料固有の定数

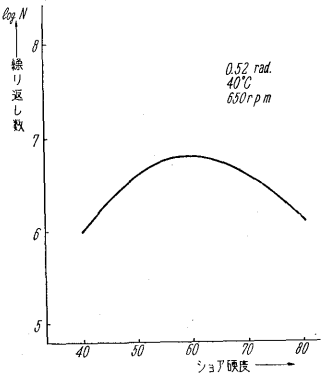
で表わすことができる。周囲温度の低下とともに疲労強度は増加する様子を示している。



第 5 図
周囲温度— $S-N$ 曲線
Fig. 5.
 $S-N$ curves for phenolic resin at elevated temperature

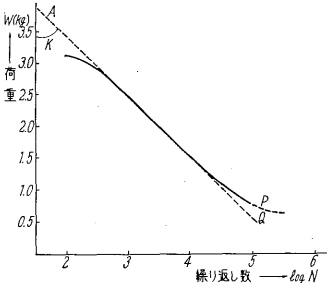
(8)
第 5 図は、フェノール積層板の疲労強度の温度特性で、室温では $S-N$ 曲線は繰返し荷重が低荷重に移行するにつれて破壊サイクルが増大を示し、金属に似た $S-N$ 曲線を描くが、高温で $S-N$ 曲線はその形体を異にし繰返し応力値の変化が室温にくらべて小さいが、わずかの繰返し応力の変化によって、破壊にいたる繰返し数が大きく変化する。また高温における $S-N$ 曲線の傾斜がゆるやかで繰返し数 10^6 回では室温の値に近い。

これは、材料構造が鎖状高分子と違って三次元構造の網目構造をとっているため、温度に対する物性変化が小さいために大差なくなるのではないかと考えられる。



第 6 図
繰返し数—ショア硬度
Fig. 6.
Relation between hardness and fatigue life for rubber

(9)
第 6 図は、防振ゴムを定変化ねじれ疲労試験によってショア硬度と寿命との関係を求めたもので、防振ゴムは硬度が大きければ、それだけ静的には大きな応力に耐えうるであろうが、実験の結果ではショア硬度 50 ないし 60 付近のものにおいて最も長寿命を有することが観測される。この関係については接着疲労強度の項で述べるが、疲労強度は材料の構成因子に関係する静的強度と材料の対数減衰率に左右されることがわかっているので、硬度 50~60 付近において最も破壊寿命が長いことがあっても、むしろ当然のことかも知れない。



第 7 図
レーヨントイヤコードの $S-N$ 曲線
Fig. 7.
Characteristic of flexing fatigue of rayon tire cord

(10)
第 7 図は、レーヨントイヤコードについて T 式試験機において荷重をかえ切断までの回数との関係を示したもので荷重の増加に伴って切断までの回数の対数の減少する状態は、ある範囲内において大体直線関係を示し、この関係は次の一般式で表わされている。

$$S = A - \frac{1}{K_1} \log N \dots \dots \dots (10)$$

この関係式を II. 5 項で述べた疲労強度に関する榎本説と対比して考察する。榎本の説で疲労振幅が疲れ限度よりもはるかに高いところでは、 $S-N$ 曲線の傾斜部の漸近線として式(9)が与えられたが、式(10)も全く同様の意味をもち、式(10)の定数は次式の関係として説明ができる。

$$A = \frac{1}{m+2} (\log K - \log C) = \frac{1}{m+2} \log k' E$$
$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{m+2}$$

この関係で定数 A は弾性項に基因し K, m, k' は材料によって定まる定数となる。

第1表 高分子材料、積層板の耐久比
Table 1. Fatigue ratio of highpolymer and laminate

	10 ⁷ 回疲れ強さ/引張り強さ 耐久度
メタクリル樹脂	0.31
硬質塩化ビニル	0.33
ポリカーボネート	0.14
FRP	0.26~0.33
フェノール積層板(綿)	0.23
合板(フェノール接)	0.31
木 材	0.22
鋼材/鋼材 (アラルダイトAN-100)	0.32
アルミ合金 17S T	0.25
ステンレス鋼	0.36

第1表は参考までに高分子材料の耐久比、繰返し数 10^7 回での静的引張り強度に対する繰返し応力値を示したもので、高分子材料も金属材料と同様に繰返し応力値は静的強度の $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ になる。

IV. 接着物の疲労強度⁽¹¹⁾

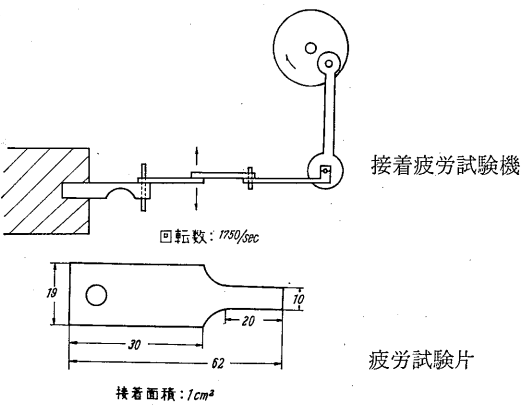
接着物の疲労強度に関しては、現状ではデータの集積段階に過ぎず、疲労強度を支配する因子については確証が与えられていない。

第2表 接着剤配合組成
Table 2. Compositions of adhesives

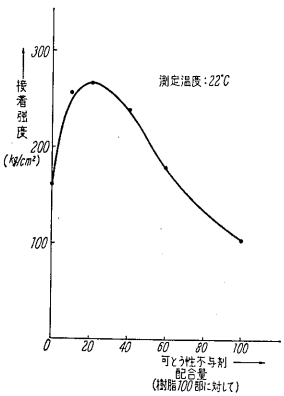
名称	L 0	L 1	L 2	L 4	L 6	L 10
エポコート 834	100	100	100	100	100	100
可とう性付与剤 Thiokol LP-3	0	10	20	40	60	100
硬化剤酸無水物	32	32	32	32	32	32

われわれは鉄-鉄を第2表に示すエポキシ系接着剤を用いて A.S.T.M. D 671-51 T 規格プラスチック材料定屈曲疲労試験機を用いて接着層の疲労強度を追跡した。第8図に疲労試験機、疲労試験片を示す。

この系の接着剤強度は被接着体強度よりも小さく、接着破壊も接着剤の凝集破壊であるので、繰返し応力を受けた場合の接着層の疲労は当然に接着剤の物理的性質に支配される。接着剤ならびに高分子材料の物理的性質のうち機械特性、特に材料強度を支配するものは、剛性率 G (弾性率 E) であり、耐振、耐衝撃、クリープ特性に関するものには、内部粘性 η である。したがって接着



第8図 試験機および試験片
Fig. 8. Testing machine and test piece

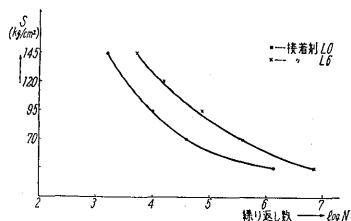


第9図
可とう性不与剤
Thiokol LP-3
配合量—接着強度
Fig. 9.
Bonding strength of
adhesives listed on
table 2

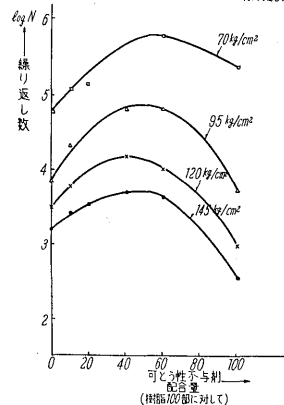
疲労強度を支配する因子として、 G, η がどのような挙動で接着疲労強度を支配してゆくに着眼点を置き、解析を試みた。第9図は、第2表接着剤についてその接着強度を示したもので、エポキシ樹脂100部に対し可とう性付与剤の配合量20部近辺に接着強度の山を示し、20部近辺を境に可とう性付与剤配合量比にしたがって接着強度は低下している。第10図は、第2表接着剤の二、三の $S-N$ 曲線を示したが、金属ほど明らかな疲労限界は示していない。繰返し数 $10^6 \sim 10^7$ 回近辺より傾斜がゆるやかになっていることがわかる。

第11図は、繰返し応力一定下での可とう性付与剤配合量に対する繰返し破壊回数を対数で目盛ったもので可とう性付与剤60部近辺でもっとも繰返し数が多い。材料に応力が与えられた場合、応力に応じて変形する。材料に与えられた応力と応力によって変形したひずみ量の積は材料の弾性ひずみエネルギーであり、いいかえれば材料の外部応力に対する順応性の尺度と解釈できる。接着剤についても外部応力に対してエネルギー量としての取扱いをし接着層の疲労強度を支配する因子としてこの弾性ひずみエネルギーに着目し疲労強度との関係について考察してみる。

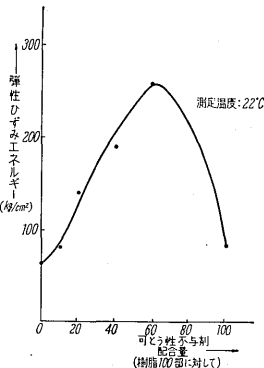
各接着剤の弾性ひずみエネルギーは第12図に示すと



第 10 図
S-N 曲 線
Fig. 10.
S-N curves for some
adhesive listed on
table 2



第 11 図 各荷重に対する破
断サイクル-可とう性
不与剤 Thiokol LP-3
配合量
Fig. 11. Fatigue life of ad-
hesives under constant
repeated stresses



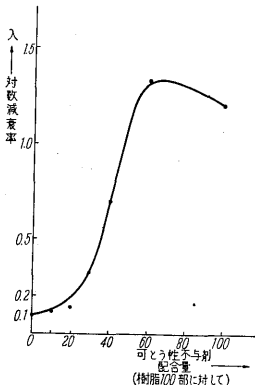
第 12 図 可とう性不與剤
Thiokol LP-3 配合量
—弾性ひずみエネルギー
—
Fig. 12. Elastic energy
of adhesives

おりである。この関係を第 11 図で示した関係と対比してみるとほぼ相関的な関係のあることを認める。したがって接着疲労強度は大略的に接着剤の弾性ひずみエネルギーが関係し、疲労強度の尺度として取り扱ってもよさそうである。

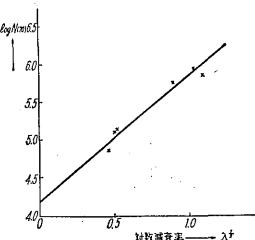
また接着物ならびに材料が引張り、圧縮などの繰り返し応力を受ける場合応力-ひずみ曲線はヒステリシスループを描く。このループ面積は加えられた応力のエネルギーの一部を熱として消散される値に相当する。すなわち粘弾性的に Maxwell Voight 模型を用いて導かれる動的弾性率と損失弾性率の比に相当する。このヒステリシスループに關係する材料の因子はとりつめていえば内部粘性 η が 1 サイクル中に変位した量に等しい。この内部粘性 η は自由ねじれ振動法によって求めることができる。自由ねじれ振動法とは材料の上端を固定し下端に慣性棒をとりつけ慣性棒をその重心を通る垂直軸のまわりに僅か振動させて試験片にねじり振動を起こさせて、慣性棒の振動周期 T 振動の減衰率(対数でとったもの) λ から材料の諸特性 G , η が次式より求めることができる。

$$G = \frac{12 \pi^2 l I}{b h^3 T^2} \quad \eta = \frac{12 l I \lambda}{b h^3 T}$$

b : 試験片幅



第 13 図
可とう性不與剤 Thiokol
LP-3 配合量—対数減衰率
Fig. 13.
Logarithmic decrement
of adhesives



第 14 図
応力一定化での疲労破壊サイ
クル対数減衰率
Fig. 14.
Relation between fatigue life
under repeated stress,
70 kg/cm², and logarithmic
decrement of adhesives

- h : 試験片厚み
- l : 試験片長さ
- I : 慣性能率
- T : 振動周期
- λ : 慣性棒の振幅の対数減衰率

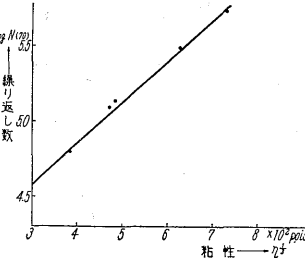
上式から η を求めるため、各接着剤について自由ねじれ振動法から λ を求めた。 λ の値を第 13 図に示す。第 14 図は一定繰り返し応力(繰り返し数 10^7 回近辺の応力)下での各接着剤の破壊サイクルの対数値と接着剤の対数減衰率 λ との関係を図示したもので、明白な直線関係を得たのでこの関係についてつぎの実験式を導いた。

$$\log N_{70} = k_1 + k_2 \lambda \quad \dots \dots \dots (11)$$

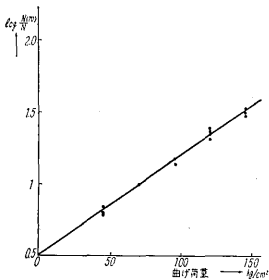
すなわち接着疲労強度は接着剤の対数減衰率 λ , または内部粘性 η に關係することがわかった。

第 15 図は、第 14 図の関係を η との関係について図示したものである。

第 16 図は、第 14 図で示した $\log N_{70}$ と任意の繰り返し応力 S で破壊した繰り返し数 N との比, すなわち $\log \cdot N_{70}/N$ と繰り返し応力 S との関係を示したもので、この間にも明確な直線関係が得られつぎの実験式が



第 15 図
応力一定下での疲労破壊サイ
クル—粘性
Fig. 15.
Relation between fatigue life
under repeated stress,
70kg/cm², and viscosity of
adhesives



第 16 図
繰り返し応力 70kg/cm² 一定
での各応力の破壊サイクルと
の比率
Fig. 16.
Relation between fatigue
life ratio and repeated
stresses

与えられる。

$$\log N = \frac{\log N_{70}}{k_3 S + k_4} \dots\dots\dots (12)$$

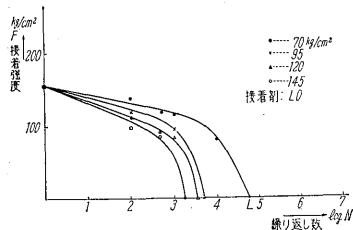
したがって式(11)を式(12)に代入すると

$$\log N = \frac{k_1 + k_2 \lambda^{1/3}}{k_3 S + k_4} = \frac{k_5 + k_6 \eta^{1/3}}{k_3 S + k_4} \dots\dots\dots (13)$$

の実験式が得られる。ここに実験条件の範囲から接着物の疲労強度は繰り返し加えられる応力に反比例し、接着剤の対数減衰率あるいは内部粘性 η に比例する関係として得ることができた。

$$\log N \approx \frac{\lambda}{S} \approx \frac{\eta}{S} \dots\dots\dots (14)$$

またとくにわれわれが興味あることは、接着物が繰り返し応力のもとで繰り返し数に対し接着強度がどんな挙動を示すかにある。



第 17 図
接着強度—繰り返し
数 (F—N 曲線)
Fig. 17.
Bonding strength
of adhesive after
N cycle under
constant repeated
stresses

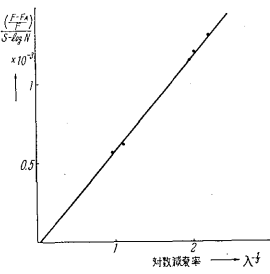
第 17 図は、一定繰り返し応力下で繰り返し数に対する接着強度変化を示したものでこれら接着強度は、はじめはゆるやかに低下するが、接着強度が静的接着強度に対しある値(70~80%)まで低下すると、急に接着強度が低下してまもなく破断する。この関係図示を例に $F-N$ 曲線と称して取り扱う。

第 18 図は、第 17 図で得た結果について接着強度が急激に低下するまでの接着強度の低下比率 $\frac{F-F_A}{F}$ を単位応力 S 、単位 $\log N$ 当たり直し、接着剤の対数減衰率 $\lambda^{1/3}$ でプロットしたものでこの間にも直線関係が得られこれに関し実験式として次式が導かれた。

$$F_A = F[1 - S \cdot \log N (k_7 \lambda^{1/3} + k_8)] \dots\dots\dots (15)$$

F_A ：一定応力下での繰り返し数に対する接着強度
この関係はまた

$$\log N \approx \frac{\lambda}{S} \approx \frac{\eta}{S}$$



第 18 図
単位応力単位 $\log N$ あた
りの接着強度低下比率—
対数減衰率
Fig. 18.
 $\frac{F-F_A}{F} / S \cdot \log N_A$ vs.
logarithmic decrement

となる関係で与えることができるので $S-N$ 曲線から実験的に導かれた式と一致する。

以上接着剤の疲労強度は接着物に加えられる繰り返し応力に対し反比例し、接着剤の物理的性質としての内部粘性 η に比例する関係を見出した。

V. む す び

接着鉄心など接着物の強度に対する実用上の信頼性を保証するための1段階に振動、繰り返し応力による疲労特性に関する関係を明らかにした。この結果今まで経験的に構造材料として作成された製品に対する耐久性、また新たに製作しようとする製品の設計基準と、その安定性について、より確かな指示を与えることができるものと期待することができる。またこれらの結果は接着物の疲労に関したものであるが、接着層のみでなく当然高分子材料全般にもこの考え方は導入できる。なお接着物の繰り返し応力下での疲労に対するその他の諸因子については機会を改めて報告することにする。

参 考 文 献

- (1) 元起厳, 石井勇次: 富士時報 36 No.3 (1963)
- (2) 川田雄一: 金属の疲労と設計 オーム社
- (3) 西原利夫, 小林篤郎: 機械学会論文集 12 42 (昭 21)
- (4) N. Enomoto: Proc. A.S.T.M. 55 903 (1955)
- (5) E. Orowan: Welding, J. June (1952)
- (6) 島村昭治: 工業材料 9 No.10 52 (1961)
- (7) 島村昭治: 材料試験 8 463 (1959)
- (8) G.H. Stevens: Fatigue test of phenolic laminate at high stress
- (9) 榎木義一, 福田正成, 町田好宏: 材料試験 5 No.38, 654 (1956)
- (10) 岡村勲, 桜井季男: 材料試験 4, No.21 164 (1955)
- (11) 谷口利久雄, 元起厳, 時光富士雄: 第16回日本化学会講演 (昭 38) 工化誌 投稿中
- (12) 井上幸彦: 工化誌 55, 262 (昭 27)
- (13) 中川鶴太郎: レオロジー 岩波全書



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。