U.D.C. 678.643.: 620.178.3

# エポキシ樹脂接着剤の疲労試験

Adhesive Fatigue Test of Epoxy Resin

左 海 孝 之\* 田 中 康 文\*
Takashi Sakai Yasufumi Tanaka

## 内 容 梗 概

エポキシ樹脂接着剤は強い接着強度で注目されておりながら、繰返し応力による疲労試験はほとんど行なわれていない。しかし振動荷重の存在する構造部材に接着剤で結合した継手部分が存在する場合、継手の疲労強度はぜひ確認しておく必要がある。このためエポキシ樹脂接着剤によるアルミニウム合金板の重ね合せ継手について疲労試験を行ない、その耐久線図によって疲労強度の検討を行ない、また接着剤の劣化による疲労強度の低下の影響についてもあわせ検討した。

### 1. 緒 言

エポキシ樹脂接着剤によるアルミニウム合金板の重ね合せ継手の強度は、その静的強度に関してはすでに多くの実験例<sup>(1)</sup>があり、また接合部の力学的な検討も、一般の接着剤について静的な場合にはある程度なされている<sup>(2)</sup>。しかし継手の疲労強度に関しては、簡単な実験例<sup>(3)</sup>があるほかは、エポキシ樹脂接着剤はもちろん一般の接着剤についても報告が見当らない。しかし接着剤による接合法を車両へ応用する場合、継手には静的荷重とともに振動荷重が常に存在しているために、継手の疲労強度は是非確認しておく必要がある。

今回エポキシ樹脂接着剤によるアルミニウム合金板の重ね合せ継 手について、引張せん断応力による疲労試験を行ない、また促進劣 化後の試験片についても同様の疲労試験を行ない、継手の疲労強度 について検討した。

## 2. 実 験 方 法

#### 2.1 接 着 剤

エポキシ樹脂接着剤としてボンド  $E_{30}$  を使用した。ボンド  $E_{30}$  は 樹脂と硬化剤からなる二液性、常温硬化形接着剤で、その混合比(重量比) は 100:8 である。

#### 2.2 疲労試験片

アルミニウム合金板として厚さ 2 mm の 52 S-0 材(以下アルミ板という)を使用した。疲労試験片は**第1**図に示すような重ね合せ継手で、重ね長さ l は 12、20、30 mm の 3 種類である。

アルミ板の接着面の前処理は、まず継手の荷重方向に対して直角方向に、エメリーペーパ No.05 にて研摩後、アルコールおよびベンゾールで清掃し、次に $75^{\circ}$ C、10 分間のクロム酸処理 $^{(1)}$ を行ない、最後に水洗後、デシケータ中で1 日間乾燥した。

接着方法としては試験片両面に接着剤を塗布して重ね合せ,0.025 kg/mm²の締付力(接着剤の厚さ約0.07 mm)にて1日間放置後,接着強度の増加と安定のために,80°C,1時間のアフターキュアを施した。なお強度試験を行なうにあたっては,試験片の外部にはみ出した接着剤は完全に除去した。

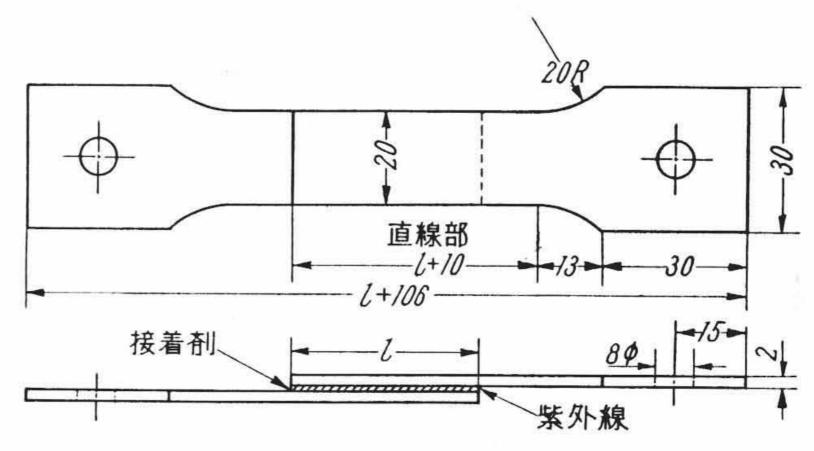
接着強度は一般に温度の影響を受けるので、疲労試験中温度は 20°C一定に保った。促進劣化後の疲労試験も同様に20°C一定とした。

## 2.3 疲労試験機

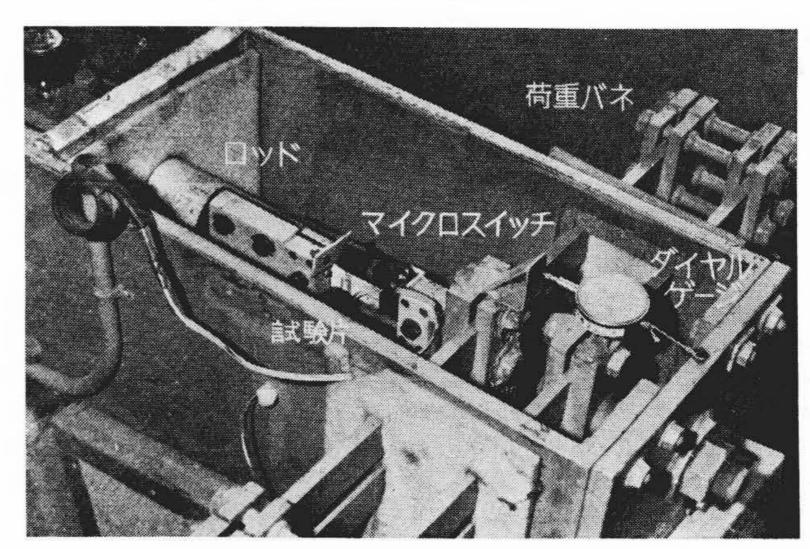
疲労試験機には自家製の横形疲労試験機を使用した。第2回は試験機に取り付けた試験片および荷重バネの一部を示す。

次に試験機の構造の概略を示す。試験片はクランク軸より出たロッドと,4枚の板バネよりなる荷重バネとの中間部に結合され,クランク軸の偏心に応じた往復運動が,試験片を介してバネに与えら

## \* 日立製作所笠戸工場



第1図 疲 労 試 験 片



第2図 疲労試験機の構造の一部

れる。したがって荷重バネのたわみによる力が試験片に引張力として働く。バネのたわみは試験機の運転を停止して、ダイヤルゲージによって測定した。

試験片の取り付けは $8\phi$ のボルト,ナットによって取付金具に締め付けて固定され、スライド式の金具により、試験片に与える平均 荷重が任意に調節できる。

試験機は3台使用したが、その荷重バネは静的検定の結果バネのたわみと引張荷重の関係は直線的で、ヒステリシスはほとんど認められなかった。動的検定によって求めた荷重バネの動的バネ常数はそれぞれ107、130、132 kg/mmで、試験機の回転速度は900 rpmである。

なお試験温度を一定にするため、外気温度に応じて加熱または冷 却のできる温度調節装置が試験機に取り付けてある。

#### 2.4 促進劣化試験機

疲労試験片の促進劣化試験機としてはウエザーオーメータ (WO M-B-S 形)を使用し、劣化試験温度は試験片と同じ位置に取り付けたブラックパネル温度計が  $60^{\circ}$ C になるようにした。ウエザーオー

メータによる劣化試験と自然暴露試験の時間の関係については供試材料によって差があるが、測光法によるとウエザーオーメータの光源ランプの光エネルギーは、太陽光線の一年間の平均光エネルギーの約40倍<sup>(4)</sup>であるので、今回の試験においては促進劣化試験時間の倍率として40倍を使用した。

したがってウェザーオーメータによる 220 時間の試験を自然暴露 1年相当と考えることにし、3年および5年相当の促進劣化後の試 験片について疲労試験を行なった。

試験片をウェザーオーメータに取り付けるにあたっては**第1**図の 矢印で示すように、常に試験片の片面一方向のみに紫外線が照射さ れるようにした。

## 3. 実験結果および結果の検討

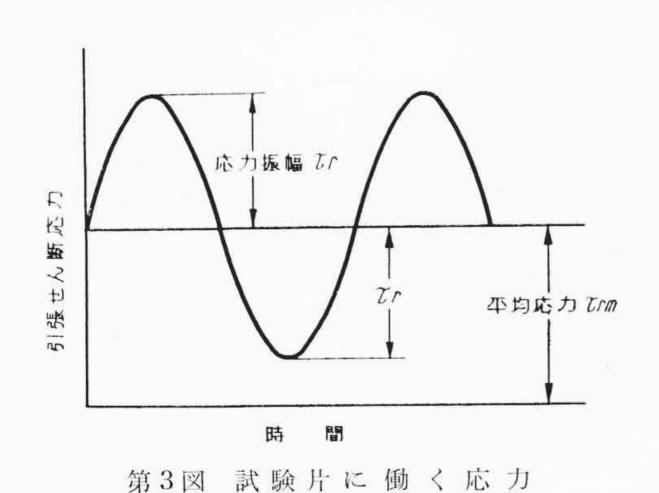
# 3.1 劣化前の疲労強度

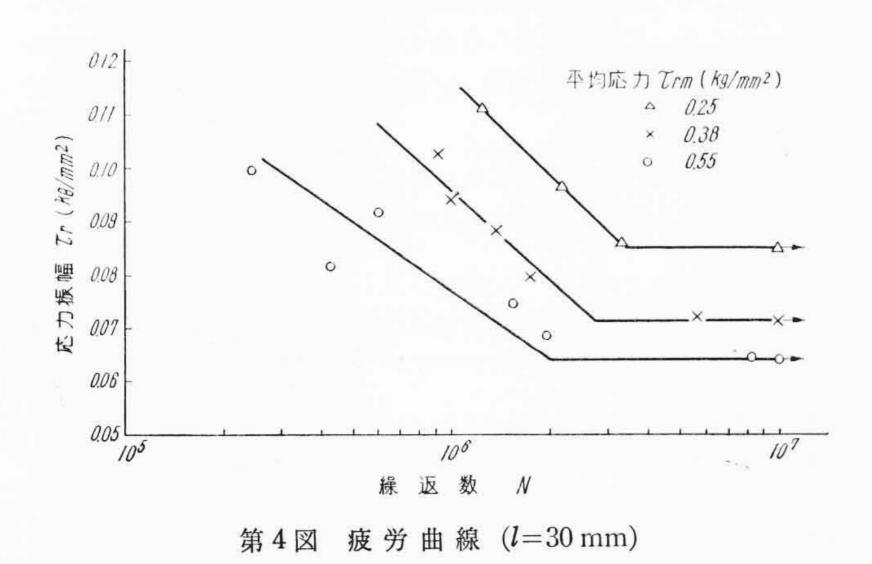
疲労試験片に加わる繰返し引張せん断応力については, 第3図に 示す各記号で表示することにする。

重ね長さ  $l=30 \, \mathrm{mm}$  の疲労試験片の  $3 \, \mathrm{種類}$ の平均応力についての疲労曲線を**第**  $4 \, \mathrm{図}$ に示す。  $3 \, \mathrm{種類}$ の平均応力のうち最大は静的強度の約 1/2 になるようにした。疲労曲線には明らかに平均応力の影響があらわれており、平均応力が大きいほど応力振幅は小さくなっている。いずれの場合においても繰返し数がだいたい  $10^6 \sim 10^7$  の範囲内において、曲線が水平と見なしうる部分があらわれている。この水平部分の応力振幅を疲労強度と考えることにする。

同様にして重ね長さ l=20 および 12 mm の場合の疲労曲線を第 5 図および第 6 図に示すが、重ね長さ l=30 mm の場合とだいたい似た傾向を示している。

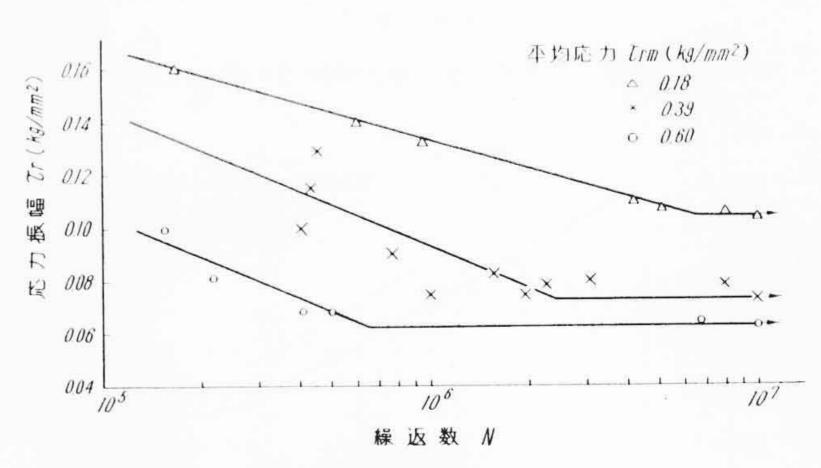
以上の各疲労曲線をさらに整理して疲労強度についてまとめると 第1表のようになり、これらの疲労強度から耐久線図を求めると第 7図のようになる。耐久線図は重ね長さがかわると多少の変化はあ るが、その差は比較的少ない。したがって今回の実験の程度の範囲 では、静的強度と疲労強度の比は、重ね長さをかえてもほぼ一定で あるが、平均応力によって変化すると考えることができる。これら



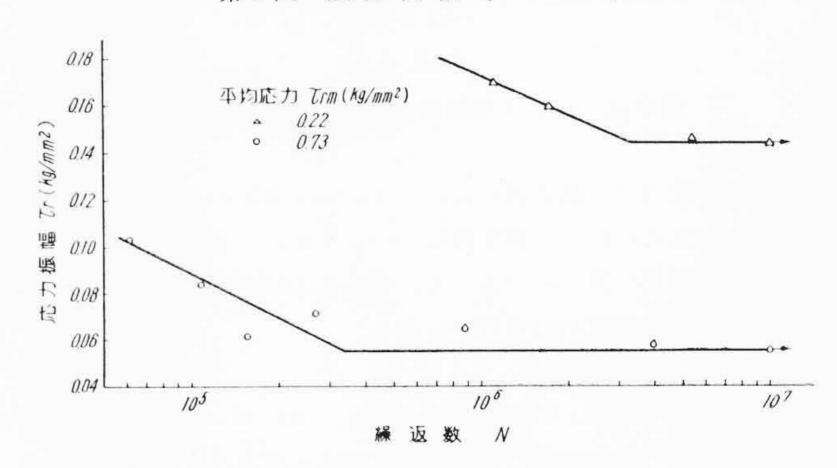


の耐久線図のだいたいの平均を図のように点線の直線で示してみる。しかるときA点は平均応力が零の場合の応力振幅が静的強度の1/10をあらわしており、またC点は応力振幅が零の場合で、ちょうど静的強度に一致している。ただしABの範囲内においては繰返し応力の過程において、試験片には引張りせん断応力とともに一部圧縮せん断応力が働くことになり、BCの範囲とは継手に働く応力状態が違ってくるのでABの範囲には実験結果は適用できない。ABの部分については別に実験が必要である。

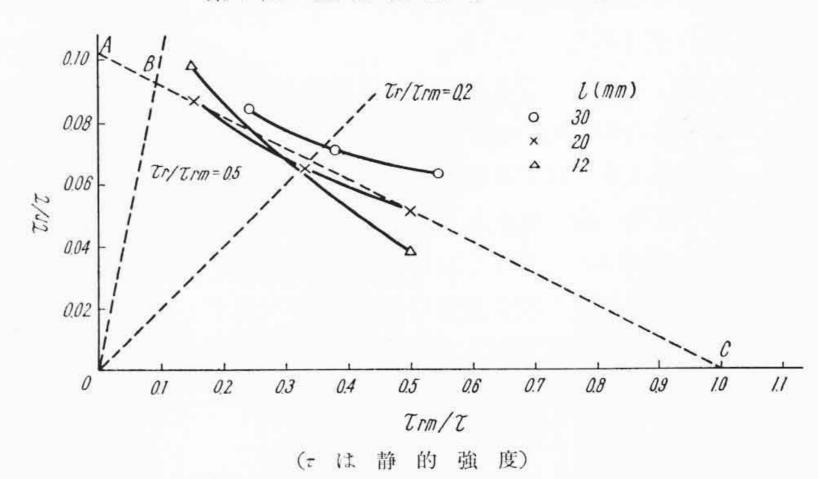
接着剤による接合法を実際に応用する場合,たとえば鉄道車両においては、走行中常に振動荷重が働いており、部材に加わる静的荷重と振動荷重の比は約0.2である(5)。このような荷重が働く場合の



第5図 疲労曲線 (l=20 mm)



第6回 疲労曲線 (l=12 mm)

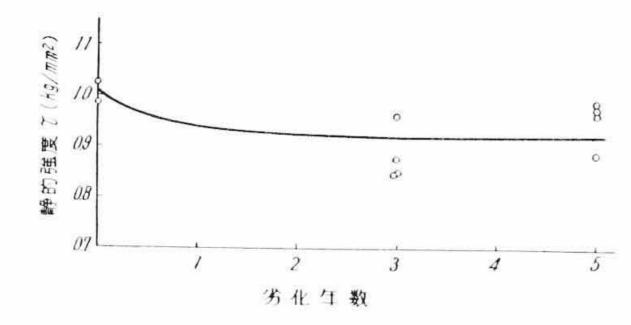


第7図 耐 久 線 図

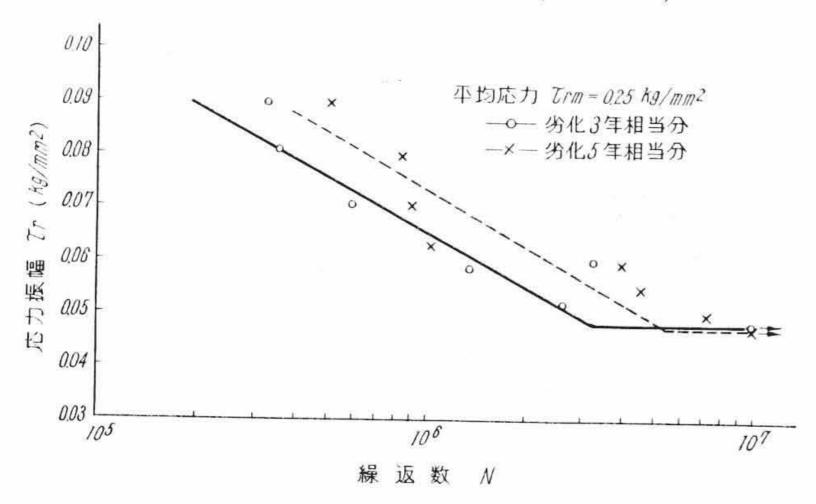
	第	1表 疲	労	強	度	
重ね長さ $l({ m mm})$	平均応力 τ <sub>rm</sub> (kg/mm²)	疲労強度 τ <sub>r</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	静的強度 τ (kg/mm²)	$ au_{rm}/ au$	$\tau_r/\tau$	限界繰返し数 N
	0.248	0.085		0.246	0.084	3.4 ×10 <sup>6</sup>
30	0.381	0.072	1.007	0.388	0.072	$2.7 \times 10^{6}$
	0.550	0.064		0.546	0.064	$2.0 \times 10^{6}$
	0.180	0.104		0.151	0.087	6.5 ×10 <sup>6</sup>
20	0.391	0.078	1.195	0.327	0.065	2.3 ×10 <sup>6</sup>
	0.599	0.062		0.501	0.052	0.69×10 <sup>6</sup>
T-2 TServ	0.218	0.143	1 400	0.149	0.098	3.3 ×10 <sup>6</sup>
12	0.728	0.055	1.460	0.498	0.038	0.34×10 <sup>6</sup>

第2表  $\tau_r/\tau_{rm}=0.2$  の場合の許容応力

重ね長さ <i>l</i> (mm)	$ au_{rm}/ au$	$\tau_r/\tau$	平均応力 $\tau_{rm}$ $(kg/mm^2)$	応力振幅 <sup>7</sup> r (kg/mm²)	単位幅当りの強度 (kg/mm)	
					$ au_{rm} ullet l$	$\tau_r \cdot l$
30	0.36	0.072	0.363	0.073	10.90	2.19
20	0.33	0.066	0.395	0.079	7.90	1.58
12	0.32	0.065	0.467	0.095	5.61	1.14



第8図 促進劣化後の静的強度 (l=30 mm)



第9図 促進劣化後の疲労曲線 (l=30 mm)

継手の許容応力は,第7回において  $\tau_r/\tau_{rm}=0.2$  の直線と耐久線図の交点から求められる。第2表にこのようにして求めた値を示す。この結果各継手の許容応力として,平均応力は静的強度の約 34%,応力振幅は静的強度の約 6.7% になる。

#### 3.2 劣化後の疲労強度

重ね長さ *l*=30 mm の試験片について,ウェザーオーメータによる促進劣化後の静的強度の変化は第8図に示すようになり,3年および5年相当の促進劣化による差はほとんどなく,いずれも劣化前の約8%の低下になっている。

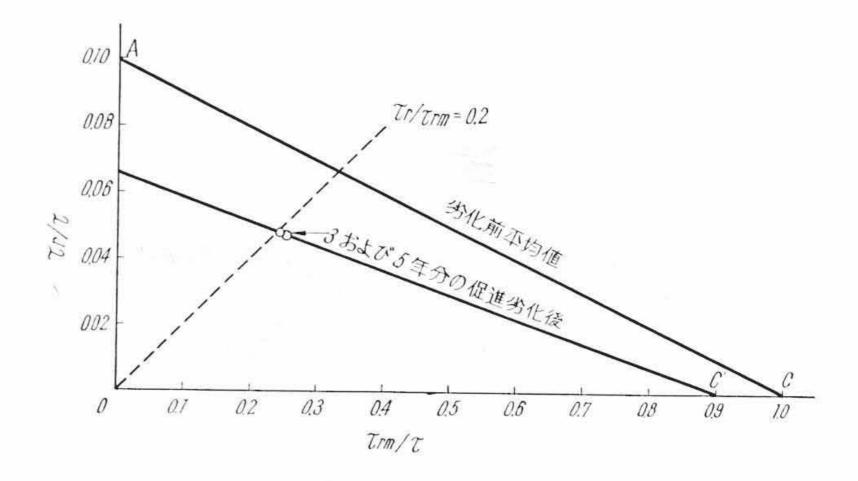
疲労試験は3年および5年相当の2種類の促進劣化後の試験片について平均応力 $0.25 \, \mathrm{kg/mm^2}$ で行ない,第9図に示す各疲労曲線を得た。促進劣化後の疲労曲線においても劣化前と同様に繰返し数 $10^6 \sim 10^7$  の範囲に疲労限があるが,その疲労強度は促進劣化時間の相違による差はほとんどなく,いずれも応力振幅  $\tau_r = 0.047 \sim 0.048 \, \mathrm{kg/mm^2}$  で,劣化前の疲労強度の約56% まで低下しており,促進劣化による静的強度の低下率より相当大きい影響を示している。このように接着強度の低下が静的強度よりも疲労強度に大きくあらわれていることは,実用上注意を要する問題である。

促進劣化試験においては、試験片における接着剤の部分は両面が2枚のアルミ板ではさまれており、実際に紫外線の照射を受ける部分は接着部の端面のみである。したがつて接着剤の劣化はこの部分から進行していくものと考えられる。継手に引張せん断力が働いた場合に接着剤の応力分布を考えてみると、重ね長さの両端において応力分布は最大値をとり、これが継手の強度に大きい影響をもっているので<sup>(2)</sup>、接着部の端面における接着剤の劣化はその疲労強度に及ぼす効果が大きいことが推察される。

さて今回の促進劣化後の疲労試験については限定された条件で実験したので十分ではないが、だいたいこの程度の疲労強度の低下が重ね長さの異なる場合においても起りうると考え、第7回を参考に

第3表 促進劣化後の許容応力 (τr/τrm=0.2)

重ね長さ <i>l</i> (mm)	$\tau_{rm}/\tau$	$\tau_r/\tau$	平均応力 <sup>てrm</sup>	応力振幅	単位幅当りの強度 (kg/mm)	
t (IIIII)		800	$(kg/mm^2)$	(kg/mm <sup>2</sup> )	$ au_{rm} \cdot l$	$\tau_r \bullet l$
30	0.240	0.048	0.242	0.048	7.26	1.44
20			0.287	0.057	5.75	1.14
12		0.350	0.070	4.20	0.84	



(では劣化前の静的強度) 第 10 図 促進劣化後の耐久線図

して耐久線図を求めると 第10 図 のようになる。C'点は促進劣化後の静的強度である。

振動荷重の存在する車両部材に使用する場合の許容応力を,劣化前の場合と同様にして  $\tau r/\tau_{rm}=0.2$  の場合について求めると第3表に示すようになる。この結果各継手の許容応力を劣化前の静的強度に対する比率で求めると,平均応力は約24%,応力振幅は約4.8%になる。この平均応力および応力振幅はいずれも劣化前の疲労強度の約71%に相当する。

今回の試験に選んだ劣化条件は種類が少ないが,劣化に伴なう疲労強度の低下は無視できないことが判明した。継手の使用環境がそれぞれ異なった場合に,劣化による疲労強度の低下もまた異なった結果が予想されるので,今後それぞれの場合の劣化条件における試験が必要と考えられる。

# 4. 結 言

エポキシ樹脂接着剤を使用し、アルミ板の重ね合せ継手について 疲労試験を行ない、また促進劣化後の試験片についても同様に疲労 試験を行なった。それらの結果をまとめると次のようになる。

- (1) 劣化前の疲労試験においては
  - (a) 疲労曲線からはほとんど疲労限に達したと見られる点がだいたい繰返し数が  $10^6 \sim 10^7$  の範囲に存在する。
  - (b) 疲労強度は平均応力が大きくなるにしたがい低下する。
  - (c) 耐久線図を静的強度の比で求めると,重ね長さにあまり 関係しない曲線を示している。

したがって振動荷重の存在する継手の許容応力として、平均 応力は静的強度の約34%,応力振幅は静的強度の約6.7%にな る。

(2) 劣化後の疲労試験においては、振動荷重の存在する継手の 許容応力は、劣化前の許容応力の約71%まで低下する。

#### 参 考 文 献

- (1) たとえば接着科学委員会編:接着,549(昭35,高分子学会)
- (2) M. Goland and E. Reissner: J. Appl. Mech., 11, A 417 (1944)
- (3) M. Ross: Sheet Metal Ind., 1967 (Sept. 1949)
- (4) 松田: 高分子材料試験法, I (高分子実験学講座, 7) 298 (昭34, 共立出版)
- (5) 飯島, 永弘: 日立評論, 83, 933 (昭 31-7)