繰返し衝撃引張荷重に対するエポキシ樹脂注形材 の衝撃疲労強度とその信頼性†

岡 部 永 年* 矢 野 利 行**
鎌 田 功*** 森 忠 夫****

Impact Tensile Fatigue Strength and Reliability for Filler Reinforced Epoxy Resin Castings Subjected to Repeated Tensile Loads

by

Nagatoshi OKABE, Toshiyuki YANO
(Heavy Apparatus Engineering Lab., Toshiba Co., Fuchu)
Isao KAMATA
(Hamakawasaki Works, Toshiba Co., Kawasaki)
and Tadao MORI
(Heavy Apparatus Engineering Lab., Toshiba Co., Tsurumi)

The impact tensile fatigue tests were conducted on alumina and silica filler reinforced epoxy resin castings. From the experiments, the properties of these resin castings under repeated impact tensile loads were clarified and the scatter properties of their strength were statistically analyzed. Safety factors and allowable stresses for resin castings under service impact tensile loading were studied on the basis of failure probability theory. The results were as follows:

(1) The fatigue tensile strength σ_i of resin castings subjected to repeated impact tensile loading shows a scatter of logarithmic normal distribution and can be estimated statistically by the following formula.

$$\sigma_i N_f^{m_i} = \xi D_i \mu_i S_i^u$$

where m_i and D_i are the parameters of impact fatigue properties, N_f is the life to failure, $\hat{\mu}_i$ and S_i are statistical values and u is the parameter of probability.

(2) The strength constant D_i is closely related to the static tensile strength σ_B , and it can be estimated from the latter.

(3) The safety factor and the allowable stress of these resin castings under service impact loads can be determined according to the expectative failure probability. It is useful for the most suitable structural design.

(Received Apr. 11, 1983)

キー・ワード：粒子分散強化形エポキシ樹脂注形材，衝撃引張疲労強度，ばらつき特性，安全率，信頼性

1 緒 言

粒子分散形プラスチック複合材料は，重電開閉機器における絶縁構造部材として支持碍子や碍管あるいは絶縁操作部品に盛んに使用されている。従来，この種の複合材料には機械的強度をほとんど期待せず，諸電

気的特性（耐電圧，絶縁抵抗，耐アーク性，耐トラッキング性など）が重視されてきたが，最近では機器のコンパクト化や構造合理化，あるいは大電圧大容量化に伴い静的荷重のみならず苛酷な衝撃荷重をも絶縁構造部材に直接担わせるような設計が行われるようになり，機械的強度メンバーとしての長期信頼性も要求される。それゆえ，機械強度設計上，衝撃負荷に対する疲労強度やその信頼性が非常に重要視されるようになってきた。

そこで，本研究では，前報¹⁾での繊維強化形プラスチック複合材料としてのエポキシ樹脂積層材に引き続き，重電開閉機器において要求される前述の諸電気的特性

† 本報を「絶縁構造材料の衝撃破壊強度とその信頼性（第3報）」（Impact Strength and Reliability of Insulating Structural Materials, III）とする。
原稿受理 昭和58年4月11日

* 正 会 員 東京芝浦電気(株)重電技術研究所 府中市東芝町

** 東京芝浦電気(株)重電技術研究所 府中市東芝町

*** 東京芝浦電気(株)東芝浜川崎工場 川崎市川崎区浮島町

**** 正 会 員 東京芝浦電気(株)重電技術研究所

横浜市鶴見区末広町

に優れるエポキシ樹脂にアルミナ粒子やシリカ粒子を混入させた粒子分散強化形プラスチック複合材料としてのエポキシ樹脂注形材に対して衝撃引張荷重下での疲労強度特性についての究明, 並びにその強度のばらつき特性についての解析を行った. その結果, エポキシ樹脂材の衝撃引張疲労強度は, エポキシ樹脂積層材の場合同様, 各静的引張強さ並びにそのばらつきの統計量から破壊確率論的に推定できることを明らかにした. また, 実機重電開閉機器での機械強度設計において不可欠な負荷の方のばらつきを考慮し, 開閉動作時の実働衝撃負荷に対する絶縁構造部材の安全率(中央安全率)あるいは許容応力(設計応力)を破壊確率論的に決定する信頼性設計法についても検討した.

2 実験

2.1 供試材および試験片

本実験に供した粒子分散強化形複合材料としてのエポキシ樹脂注形材(以下, 単に注形材と記す)は分散強化材として湿式あるいは乾式のアルミナ粒子, あるいはシリカ粒子をそれぞれ充てんしたエポキシ樹脂を使用し, Fig. 1 に示すような寸法形状の試験片を金型注形で直接作製した. この試験片の両端にはエポキシ樹脂との接合性のよい前処理を施した雌ねじ付き金属ブッシュが埋め込まれている. これらの注形材の基本樹脂組成および硬化条件を Table I に示す.

Fig. 1. Geometry of a specimen.

2.2 実験方法

衝撃疲労試験には, 円筒と丸棒との縦衝撃現象を利用した繰返し衝撃引張荷重装置を用いた²⁾. Fig. 2 は試験片に対する衝撃引張荷重方式, 並びに試験片の取り

Fig. 2. Method of impact tensile loading.

Fig. 3. Wave pattern of impact tensile loading.

付け状態を示したものである. 円筒の自由落下による1回の衝撃によって試験片には, Fig. 3 に示すような単一パルスの引張応力が作用する. この実測波形中に示す T は負荷上昇開始時点から除荷過程に入るまでの時間を表し, ここでこの時間 T を衝撃引張応力の負荷持続時間と定義しておく, その負荷持続時間 T は円筒の長さによって決まり, その長さが長くなるほど, 負荷持続時間 T は長くなる.

実験方法としては, 大気中, 室温にて任意の設定落下高さから円筒を繰返し自由落下させ, 試験片が破断

Table I. Resin composition and cure condition for various filler reinforced casting resins.

	Sign of specimen	Composition		Weight ratio	Condition of cure
		Casting resin			
Alumina filler reinforced casting epoxys	[A-I]	Resin	Bisphenol epoxy	100	Precure : 115°C×5 hours
		Hardener	Acid-anhydride	30	
		Filler	Dry alumina	250	
	[A-II]	Resin	Bisphenol epoxy Cycloaliphatic epoxy	90 10	Aftercure : 130°C×10 hours
Hardener		Acid-anhydride	30		
Filler		Wet alumina	250		
Silica filler reinforced casting epoxys	[S]	Resin	Bisphenol epoxy	100	Precure : 120°C×12 hours
		Hardener	Acid-anhydride	30	Aftercure : 120°C×15 hours
		Filler	Silica	250	

するまでの衝撃負荷の繰返し数を疲労破壊寿命 N_f とした。試験片に作用する衝撃引張荷重 F_i の大きさは円筒の設定落下高さ h の平方根 $\sqrt{h}$ に比例し次式で表される。

$$F_i = \alpha_i \sqrt{h} \quad (1)$$

ここで、 α_i ：実験定数

したがって、破壊寿命 N_f に対する衝撃引張疲労強度としては、円筒の設定高さ h を基に式(1)で算出した衝撃引張荷重 F_i を試験片破断部の初期断面積 A_0 で除した公称引張応力 σ_i を用いてデータの整理を行った。なお、衝撃引張応力の負荷持続時間 T としては、円筒の長さ $L=1000, 2000, 3000 \text{ mm}$ の各場合での、 $T=400, 800, 1200 \mu\text{sec}$ で実験を行った。

3 実験結果および考察

3.1 各注形材の衝撃引張疲労強度特性

Fig. 4 は3種類の各注形材 [A-I], [A-II], [S]

Fig. 4. Relation between the life to failure and tensile stress for various resin castings subjected to repeated impact tensile loads.

が、それぞれ単一パルスの安全片振衝撃引張荷重を繰返し受けた場合の衝撃引張応力 σ_i と破壊寿命 N_f との関係を示したものである。負荷持続時間 $T=800 \mu\text{sec}$ の場合について着目してみると、わかるようにいずれの注形材においても衝撃負荷の繰返し数の増加とともに疲労損傷の累積による強度低下が明らかに認められ、 σ_i と N_f との関係は次式で表される。

$$\sigma_i N_f^{m_i} = D_i \quad (2)$$

ここで、 m_i, D_i ：衝撃引張疲労強度特性パラメータ

Fig. 4 中の実線は $T=800 \mu\text{sec}$ の場合の各衝撃疲労強度データに対して最小2乗法により式(2)を決定したときの推定値を示している。一方、衝撃引張応力 σ_i

の大きさを一定にしてその負荷持続時間のみを変えて $T=400, 800, 1200 \mu\text{sec}$ とした場合の各衝撃疲労強度データに着目してみると、破壊寿命 N_f に明りょうな負荷持続時間依存性が認められ、負荷持続時間 T が長くなるほど破壊寿命 N_f は短くなる傾向がある。

そこで、疲労損傷の累積による強度低下の傾向、すなわち、強度劣化指数 m_i は負荷持続時間 T に無関係に一定な材料定数であると仮定して式(2)で各負荷持続時間 $T=400, 800, 1200 \mu\text{sec}$ における強度定数 D_i を求め、 D_i と T との関係を両対数の関係で表すと、Fig. 5 のようになる。両者の関係はいずれの注形材に

Fig. 5. Relation between duration time of impact tensile loading T and strength constant D_i for impact fatigue.

おいてもほぼ直線関係にあり、次式で表すことができる。

$$D_i = D_i^* T^{-n_i} \quad (3)$$

したがって、式(2), (3)より繰返し衝撃引張荷重に対する各注形材の疲労強度 σ_i およびその負荷持続時間依存性は次式で表されることになる。

$$\sigma_i N_f^{m_i} T^{n_i} = D_i^* \quad (4)$$

ここで、 n_i ：負荷持続時間依存指数

D_i^* ：強度定数

Table II は全実験データを基に最小2乗法で決定した衝撃引張疲労強度特性パラメータ (m_i, n_i, D_i^*, D_i) を示す。なお、式(2)における強度定数 D_i は式(4)において $T=800 \mu\text{sec}$ の場合の値に相当し、次式の

Table II. The parameters m_i, n_i, D_i^*, D_i of impact tensile fatigue strength properties.

Specimen	Dependent exponents		Strength constants	
	m_i	n_i	D_i^*	D_i
[A-I]	0.1195	0.3943	0.6395	10.64
[A-II]	0.1061	0.4012	0.5464	9.550
[S]	0.07943	0.3845	0.6838	10.61

ように表したときの強度定数 D_t である。

$$\sigma_t N_f^{m_t} = (0.0008/T)^{n_t} D_t \quad (5)$$

したがって, $(0.0008/T)^{n_t} = \xi$ なる負荷持続時間依存係数 ξ を定義することにより, 繰返し衝撃引張荷重に対する疲労強度は, 一般に次式で表されることになる。

$$\sigma_t N_f^{m_t} = \xi D_t \quad (6)$$

ついで, Fig. 4, 5 にみられる以上のような衝撃引張疲労強度特性について, それぞれ, 各注形材の間で比較しながら考察をする。

同種のアルミナ粒子分散強化形の注形材 [A-I], [A-II] において強度レベル差があり, 注形材 [A-I] の方が注形材 [A-II] より明らかに高強度レベルを示すのはエポキシ樹脂の強度特性の差に起因するところが大きい。すなわち, 注形材 [A-I] の方は延性を有し常温破壊強度に優れるビスフェノール系のみの樹脂を使用しているのに対して, 注形材 [A-II] の方は熱変形強度には優れるがぜい性を有し常温破壊強度に劣るシクロアリファティック系の樹脂を混合して使用しているので, それによる常温破壊強度の差の現れであると考ええる。一方, 同一のビスフェノール系エポキシ樹脂のみを使用しているアルミナ粒子分散強化形の注形材 [A-I] とシリカ粒子分散強化形の注形材 [S] とにおいても強度レベル差があり, 注形材 [S] の方が注形材 [A-I] より高強度レベルにあり, しかも, その強度レベル差は高寿命側になるほど大きくなる傾向がある。これは粒子とエポキシ樹脂との界面における接着性に起因すると考える。すなわち, エポキシ樹脂との接着性に優れるシリカ粒子を分散強化材とした注形材 [S] の方が高強度レベルを示していると考ええる。

疲労損傷の累積による強度低下の傾きに関しては, アルミナ粒子分散強化形の両注形材 [A-I] と [A-II] はほとんど類似しているが, これらの注形材 [A-I], [A-II] とシリカ粒子分散強化形の注形材 [S] とには明りょうな差があり, 注形材 [S] の方が注形材 [A-I], [A-II] に比べて明らかに小さいようである。これは, 前述の粒子とエポキシ樹脂との接着性の差に起因した界面強度の差にあると考える。すなわち, 疲労損傷の累積による強度低下は, 分散するこれらの界面強度の低下の集積であると考ええる。したがって, 界面強度に優れるシリカ粒子分散強化形の注形材 [S] の方が小さい強度劣化指数 m_t を示すのであろうと考える。この特性の現れが, 前述の注形材 [S] と注形材 [A-I] との強度レベル差の高寿命側での増大となっている。

負荷持続時間依存性に関しては, 3種類の注形材においてほとんど差はないようである。しかしながら,

これらの注形材の n_t は軟鋼や純銅などの衝撃引張疲労における負荷持続時間依存性指数 m に比べて 4~5 倍の値を示すようである。これは負荷過程での注形材の変形が粘弾性挙動を呈するため負荷持続時間の効果が大きいのであろうと考える。なお, 前報での繊維強化形プラスチック複合材料としてのエポキシ樹脂積層材の衝撃引張疲労⁷⁾では負荷持続時間の影響が $400\mu s \leq T \leq 1200\mu s$ の範囲内で無視できた。この注形材と積層材における負荷持続時間依存性の差はエポキシ樹脂基地中の強化材が衝撃引張荷重方向に対して断続的であるか, 連続的であるかによってエポキシ樹脂の粘弾性特性の出現度が極度に異なったためであろう。

3・2 各注形材の静的引張特性と衝撃引張疲労強度との関係について

Fig. 6 は各注形材の静的引張強さ σ_B と式(6)における強度定数 D_t との関係を両対数の関係で示したもの

Fig. 6. Relation between static tensile strength σ_B and strength constant D_t .

である。前述のように常温での静的引張強さ σ_B の高い注形材ほど, それらの衝撃引張疲労強度レベルを決定する強度定数 D_t は大きな値を示すことがわかる。この両者の関係は次式で表すことができる。

$$D_t = a \sigma_B^b \quad (7)$$

前報での各積層材の場合も, σ_B と D_t との間には, 式(7)の関係があり, Fig. 6 中の直線はその関係を近似したものである。これからわかるように, 各注形材における σ_B と D_t との関係も, 各積層材の場合に含めて式(7)で表せる一つの直線で近似できるようである。Table III に式(7)における材料定数 a , b の値を示す。

Fig. 7 は, 衝撃疲労損傷の累積による強度低下の傾きを表す強度劣化指数 m_t を, 前報での積層材の場合

Table III. Experimental constants a , b in formula (7).

a	b
0.6274	1.346

Fig. 7. Relation between static tensile strength σ_B and dependent exponent m_t .

も含めて各静的引張強さ σ_B との関係で示したものである。これからわかるように m_t は σ_B の大きさに依存せず、むしろ、前述のように強化材とエポキシ樹脂との界面での接着性に優れるものが、小さな m_t の値を示すようである。

そこで、強度定数 D_t としては各注形材の静的引張強さ σ_B を基に式(7)で求め、 m_t としては注形材 [A-I], [A-II] では $m_t=0.11$ を、注形材 [S] では $m_t=0.079$ を、それぞれ用い、また、 n_t としては $n_t=0.39$ を用いることにすると、各注形材の衝撃引張疲労強度に対する式(5)の推定値は Fig. 4 中の各破線のようになり、各静的引張強さ σ_B からも比較的良好に推定できることがわかる。

3.3 各注形材の衝撃引張疲労強度のばらつき特性

Fig. 8 は各注形材の衝撃引張疲労強度のばらつき分布特性を、それぞれ示したものである。横軸は式(5)に基づく衝撃引張疲労強度の推定値に対する実験値の比を次式のように μ_t とおき、対数目盛で表している。

$$\frac{\sigma_t N_f^{m_t}}{\xi D_t} = \mu_t \quad (8)$$

一方、縦軸は各 μ_t に対応する破壊確率 P を正規確率目盛で表している。この破壊確率 P としては、各 μ_t の値に対して小さい値の方から順位付けし、その順位 i を基に次式で求めた P の値を、それぞれ対応付けている。

$$P = \frac{i - 0.5}{k} \quad (9)$$

Fig. 8. Statistical distribution of impact tensile fatigue strength for various resin castings.

ここで、 k : サンプルサイズ

いずれの注形材においても、各衝撃引張疲労強度のばらつきは対数正規分布で近似できるようである。

そこで、各衝撃引張疲労強度のばらつきに対して対数正規分布を仮定し、 μ_t の値のばらつき特性パラメータ ($\hat{\mu}_t$, S_t) を次式によって統計量として求めると、Table IV のような値を得る。

Table IV. Statistical values for impact tensile fatigue strength.

Specimen	$\hat{\mu}_t$	S_t
[A-I]	0.9997	1.110
[A-II]	0.9980	1.132
[S]	0.9897	1.109

$$\hat{\mu}_t = \exp \frac{1}{k} \sum \ln \mu \quad (10)$$

$$S_t = \exp \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum (\ln \mu_t - \ln \hat{\mu}_t)^2} \quad (11)$$

ここで、 $(\ln \mu_t - \ln \hat{\mu}_t) / \ln S_t = u$ とおくことにより、各注形材の衝撃引張疲労強度 σ_t は次式のようなばらつきを考慮した確率量として表すことができる。

$$\sigma_t N_f^{m_t} = \xi D_t \hat{\mu}_t S_t^u \quad (12)$$

u は確率パラメータであり、次式のような累積分布関数 $\Phi(u)$ の逆関数 $\Phi^{-1}(P)$ として表される。

$$P(u) = \Phi(u)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln s}} \int_{-\infty}^u \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \mu - \ln \hat{\mu}}{\ln s} \right)^2 \right\} d(\ln \mu) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right) du \end{aligned} \quad (13)$$

したがって、式(12), (13)は Fig. 9 に示すように各注形材の衝撃引張疲労における P - S - N 線図の推定並びに任意破壊寿命 N_f での疲労強度分布や任意衝撃引張負荷条件下での破壊寿命分布の予測に適用できる。

一方、各注形材の静的引張強さ σ_B のばらつき特性

必要以上の安全率をとるといふような不経済な設計を回避できる。また、例えば、破壊確率を $P < 10^{-3}$ に抑えることにして安全率を $\eta = 2$ に設定しようとする設計の絶縁構造部材では、衝撃負荷に対する最大許容ばらつきは $V_{smax} = 0.315$ となることがわかる。このように P と η とを設定した条件での V_{smax} は、その絶縁構造部に使用しようとする注形材の種類によって異なってくる。この V_{smax} の大きい注形材ほど、期待信頼度を確保できる確率が高くなる。したがって、この V_{smax} の値に着目すると、繰返し衝撃引張荷重を受ける絶縁構造部材として数種の注形材のうちから適当に選定しようとする際の評価尺度となり得ることがわかる。なお、 V_{smax} を、ばらつき特性パラメータとしての S_{smax} の値で表すには、次式を用いればよい。

$$S_{smax} = \hat{\mu}_s^{-V_{smax}} = (\hat{\mu}_R / \eta)^{-V_{smax}}$$

以上のような適用例からわかるように、本研究で究明された衝撃疲労強度特性およびそれらのデータの統計量に基づく前述の破壊確率論的アプローチは各種重電開閉機器のエポキシ樹脂注形絶縁構造部材に対する機械強度上の信頼性設計あるいは信頼度評価に非常に有益な手法となる。

4 結 言

各種エポキシ樹脂注形材に対して繰返し衝撃引張荷重による疲労強度特性の究明、並びにそれらの強度のばらつき特性の解析を行った。ついで、実機において不可欠なところのばらつきを勘案した繰返し衝撃引張荷重に対するエポキシ樹脂注形絶縁構造部材の許容応力あるいは安全率の決定などについて信頼性解析を行った。得られた結果は下記のように要約できる。

(1) 繰返し衝撃引張荷重に対する疲労強度 σ_e はいずれの注形材も、対数正規分布のばらつきを有し次式によって破壊確率論的に推定できる。

$$\sigma_e N_f^{m_e} = \xi D_i \hat{\mu}_e s_e^u$$

ここで、(m_e , D_i): 衝撃疲労強度特性パラメータ、

ξ : 負荷持続時間依存係数、($\hat{\mu}_e$, s_e): ばらつき特性パラメータの統計量。

(2) 上式における強度定数 D_i に関しては、各注形材はもちろんのこと、前報での積層材の場合も含めて各静的引張強さ σ_B と次式のような関係があり、推定できる。

$$D_i = \alpha \sigma_B^b$$

また、ばらつきパラメータ S_i に関しては、 σ_B のばらつきパラメータ $S_{\sigma B}$ の 1.06 倍の値を見込めばよい。

(3) 強度劣化指数 m_i に関しては、静的引張強さ σ_B との相関性は認められないが、充てん材がアルミナ粒子であるか、シリカ粒子であるかによって有意差がある。

(4) 繰返し衝撃引張荷重が作用する注形絶縁構造物へのエポキシ樹脂注形材の適用の場合の許容応力や安全率の破壊確率論的決定法、安全性と経済性との均衡を考慮した経済的設計、並びに信頼性を考慮した材料選定への V_{smax} の適用について明らかにできた。

(昭和55年1月29日 第21回信頼性工学部門委員会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 岡部永年, 矢野利行, 鎌田 功, 森 忠夫, 材料, **31**, 1210 (1982).
- 2) 茶谷明義, 中沢 一, 中原一郎, 日本機械学会誌, **73**, 1508 (1970).
- 3) 岡部永年, 矢野利行, 森 忠夫, 材料, **30**, 28 (1981).
- 4) 岡部永年, 矢野利行, 森 忠夫, 日本材料学会第26期学術講演会前刷, p.179 (1977).
- 5) 岡部永年, 矢野利行, 森 忠夫, 第17回材料研究連合講演会前刷集, p.141 (1974).
- 6) 岡部永年, 矢野利行, 森 忠夫, 第25回材料研究連合会講演会前刷集, p.135 (1981).
- 7) 岡部永年, 矢野利行, 鎌田 功, 森 忠夫, 第12回日科技連信頼性保全性シンポジウム, p.99 (1982).
- 8) 下河利行, 航空技研報告, TR 464 (1976).