重ね板ばねの信頼性について

On the Reliability of Leaf Springs

太 田 賢*
K. OTA

1. ま え が き

最近までは、実験データ、製造からのデータ、市場データ等はヒストグラム化しこれを正規分布や対数正規分布にあてはめて解析することが多く行われていた。しかし、今日では寿命データ、耐久性のデータを扱う時、ワイブル分布にあてはめたりワイブル確率紙で解析するようになってきている。特にばねのような機能部品で一番重要な疲労破壊、ヘタリ等は一般公式が確立されていない。この為、実験、研究をより効果的、経済的に行うには、我々は故障した機器やその他のデータより出来るだけ多くの情報を得る必要がある。

この報告は、はじめにワイブル確率紙を用いて情報をいかに解析し処理するかということを手順的に述べた後、重ね板ばねの実際のデータを基にして信頼性を研究した成果の1部について報告するものである。

2. ばねの信頼性とは

2.1 信頼性と信頼度のちがい

「抽象的な概念である信頼性を定量化し、数値化したものが信頼度である。」しかし一般的には両者同じ意味に使われている。

2.2 信頼度の定義

「信頼度とは、ある機器又はシステムがある定められた条件のもとで、定められた動作時間の間、その目的を適切に達成することが出来る確率をいう。」以上が定義である。これを客先の機能的な要求事項と比較して見ると次の表1ようになる。

表1のように客先の要求事項は、ばねの信頼度保証そのものであることがわかる。しかしばねの信頼度保証する場合、その目的をはっきりさせておかなければ、どん

表1 信頼度の定義と客先要求事項との比較

信頼度の定義	ばねの機能内容
ある機器、又はシステムが	板ばね、巻ばね、シートばね、トーションバーが
ある定められた条件のもとで	ある応力条件で、この材質で、ある荷重で、ある雰囲気中で、ある温度で
定められた動作時間の間	繰返し回数 10^7 回、 5×10^6 回、2年間、 5×10^4 KM
その目的を適切に達成出来る確率を云う	折損、ヘタリ、異音 etc. が起らない。

な品質特性をもってばねの寿命と判定するか極めて不明確になる。

2.3 ばねの寿命と諸条件

ばねの信頼度を把握するためには、その機能目的をはっきりさせておかなければならない。ばねの折損をもって寿命とするか、ヘタリをもって寿命とするかいろいろの場合がある。しかし機能目的をはっきりさせてばね寿命を定義したところで、これをとりまく多くの要因があることを忘れてはならない。例えば、使用条件、使用方法、設計応力、材質、材料強度、形状、ばね板枚数、加工精度、熱処理方法、表面状況、ニップ、板厚、硬さ、試験方法 etc. があり、これらの管理基準、管理技術によって寿命も分布型も変化するからである。我々の解析結果では、重ね板ばねの場合、設計応力（応力振巾）の寄与率は約40%で他の諸条件による寄与率は60%強である。従って、ばね寿命に対しては、製造方法がいかに大きなウエイトを持っているかという事がわかる。

3. 重ね板ばねの疲れ強さのバラツキ

2項にて、ばね寿命を左右させる条件が非常に多くあることを説明しましたが、その中で2～3調査したのでこれについて述べてみる。

3.1 ばね板枚数による影響について

信頼性に関しては、部品点数が多いと信頼度が低くな

*日本発条株式会社

るということは衆知のごとくである。理論的にも、次の式を考えれば納得がいく。

3.1.1 理論的背景

例えば、直列システム (SERIES RELIABILITY) を考えてみる。下図のように、システムが直列になっており、その各々の信頼度が R_1, R_2, R_3 とすると、全体の信頼度 $R(t)$ は、次のようになる。

$$R(t) = R_1 \times R_2 \times R_3 \cdots \text{となる。}$$

一般式では、 $R(t) = \prod_{i=1}^n R_i = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t)$ …故障率一定

$$\begin{aligned} \text{または、} R(t) &= \prod_{i=1}^n \exp(-\int_0^t \lambda_i(t) dt) \\ &= \exp(-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt) \end{aligned}$$

3.1.2 実際例

以上のように理論的にも理解は出来るが、実際的にはどうかということを重ね板ばねのばね板枚数を層別して解析をした。条件としては、応力振巾 $30 \leq \sigma_a < 40 \text{ kg/mm}^2$ について調べてみた。結果は図1に示すとおりで、大きな差は認められず、ばね板枚数4枚～10枚までは、ほとんど同一と考えてもよいと思える。(型のパラメータ m , 平均寿命 μ と) また、考え方を変えてみると、この程度のばね板枚数では、顕著な差が出ていないということも考えられる。またニップ応力の代用特性として考えた場合は、ニップ応力のバラツキは、この範囲内では、あまりないように思える。

しかし、理論と実際とは、うまく合致しない場合も多い。これには他の要因の影響も考えられるが今後は、この点について、きめ細い実験計画を立ててはっきりと

図1 ばね板枚数による影響

した結論を板ばねとして出しておく必要があるのではないか、この場合の実験計画は、精密累積法、 Ω 法がよいのではないかと考える。

3.2 重ね板ばねの折損位置について

ばね板枚数よっての疲れ強さの差は、實際上認められなかったが、もう一歩つつこんで考えてみる。まず重ね板ばねの折損位置がばね板の枚数と何らかの関係があ

るかどうか、また、折損の位置がばね板の枚数によってバラツキ、結果として疲れ強さの差が生じなかったかどうかということである。

3.2.1 条件は次の通り

- (1) ばね板枚数、4枚 ($n=22$), 5枚 ($n=44$), 6枚 ($n=31$), 7枚 ($n=19$)
- (2) 応力振巾 $17.5 \leq \sigma_a < 60 \text{ kg/mm}^2$

図2 リーフ折損位置

3.2.2 解析

図2よりわかるように、リーフセンターから 350 mm 以内に95%のものが、折損してしまうということがわかる。また分布型の方から考えると $m \leq 1.0$ で摩耗型に近い²。また、m の値については、偶数枚と奇数枚とで別れていることがたまたま今回の調査で出て来た。本調査においては次の通りである。しかしこれは結果であって、理論的なものの背景はない。

4枚, 6枚: $m=0.5 \sim 0.7$

5枚, 7枚: $m=0.8 \sim 1.0$

従って、枚数によってmの値が大きく変わり、疲れ強さに影響を与えるのではないかとすることは、4枚から10枚程度のものに対しては顕著な差は、あらわれないのではないかと考えられる。ここで影響の大きいと推察されるものはやはり2項で説明した通り、製造方法のバラツキが大きな問題となるのではないかと

3.3 製造方法のちがいについて

疲れ強さは、加工方法の改善とか変更とかで大きくバラツクものである。特に、ばねの信頼性向上という点に関しては熱処理、ショットピーニングの管理は重要工程として考えなければならない。図3は、信頼性向上の為の改善効果例としてあげたものであり、ストレスピーニング(2~3 Pass)の平均寿命は、コンベンショナル

ピーニングの平均寿命の約8倍の効果を上げることが出来るというわけである。従って設計時のストレスを検討することによって製造工程を設定してやることも品質保証上重要なことである。また、加工方法の改善による効果が計量的にはっきりと把握することが出来るわけである。その点においても信頼性データの解析は重要な意味を持っている。

3.4 平均応力のちがいについて

応力振巾一定で平均応力がかわる場合について考えてみる。図4は応力振巾 $35 \leq \sigma_a < 40 \text{ kg/mm}^2$ に限定し、平均応力を4水準に分けて解析したものである。図は、各応力水準の破壊分布型のパラメータmと平均寿命 μ とを示したものであるが、この程度のmと μ のパラツキは信頼限界の巾を示していると思われる。従って従来云われているように平均応力は、重ね板ばねの Ass'y に関しては、平均寿命 μ が余り疲れ強さに寄与しないということが立証される。また、破壊分布型mも大きな変化もなく一定と推定される。

3.5 平均応力一定で応力振巾を変えた場合

平均応力を $30 \leq \sigma_m < 80 \text{ kg/mm}^2$ にして応力振巾を4水準に分けて解析してみると図5のようになる。この解析結果からは、平均寿命と破壊分布型のパラメータ (μ

図3 製造方法のちがう場合

図4 平均応力のちがう場合

図5 平均応力一定で振巾を変えた場合

と m) は直接応力に影響されていることがわかる。2・3項にも述べましたが応力振巾が μ に与える寄与率は、約40% (相関係数 $r=0.63$) である

今までの疲労試験の目的は、ばねがどのくらいの繰返し回数で折損するかという点のみに主眼がおかれていたが、今後は繰返し回数とあわせて破壊の分布型がどのよ

3.6 破壊分布型(m)と平均寿命(μ)について

図6 R-S-N線図

図7 応力振幅 σ_a → n → m の求め方

うになっているか、また破壊現象が技術的に見たときどうであるかを調べる必要がある。

図5は、各応力水準ごとの分布型と平均寿命 μ との関係を求めたものである。この図からわかるように、破壊分布型は、正規分布から指数分布に移行していきることがわかり、一方 m の値だけについて考えると、応力振幅が40 kg/mm²以上では正規分布で急激に大となる。また40 kg/mm²以下になると指数分布に近くなり、 m は非常にゆるやかに変化する。従って応力振幅40 kg/mm²は、重ね板ばねの破壊分布型、物理的な発生現象の変曲点と推定される。以上のことより応力振幅40 kg/mm²付近での試験は、データがバラツキ信頼性のある情報が把握しにくいという危険性があると推定される。

このように疲れ強さのバラツキの原因を調査確認し、応力水準を層別、解析、整理することによってS—N線図にまとめることが出来る。しかもこの場合、従来使われていたものとことなり、確率要素を導入したS—N線図である。我が社においては、これをR—S—N線図と名付ており、Rは、RELIABILITY, RELIABLEのRをとってS—N線図につけたものである。

4. R—S—N線図

この線図は、図6に示すとおりであるが、重ね板ばねを設計する場合、過剰品質をおさえ、経済設計する場合に大いに利用出来る。また設計品質を保証する場合に対

しては極めて効果的である。一方分布型について対応させて整理すると図7のようになり、ある程度の疲れ強さを把握することが出来るわけである。図7を我が社では強制劣化試験に用いたが、一応の効果が得られたことをつけ加えておきたい。

5. 重ね板ばねの信頼度の適合性について

2・3項で寿命分布がいろいろの条件によって変化することを述べたが、過去3年間の疲労試験データを整理解析した結果は、図5に示すとおりである。この図からもわかるように、 m の値によって正規分布、指数分布と、あるデータを断定することは必要である。その為には、やはり統計的な検定が行われる。

6. 適合性の検定

今までは、応力水準によって正規分布とか、指数分布とか分布型を仮定して来たが、仮定した破壊分布がはたして実際のデータに適合しているものかどうか確かめておく必要がある。

理由としては、環境条件を変えて試験をした場合、はたして分布がどう変化したか、またこの関数を故障モデルとして使用し、さらに問題点を解析して行く時の根拠を知る必要があるからである。一般的に利用されている方法を使って検定した結果を次に述べる。

6.1 X^2 検定 (分布型に対する検定)

応力振巾 $40 \leq \sigma_a < 45 \text{ kg/mm}^2$ の間で試験数15で試験をした。この応力水準の範囲では“指数分布する”と仮定し検定する。検定結果は表2のごとく危険率0.05で棄却された。

6.2 コルモゴロフ・スミルノフ

(KOLMOGOROV-SMIRNOV) の検定

応力振巾 $15 \leq \sigma_a < 20 \text{ kg/mm}^2$ で試料数6の試験をした。この応力水準の範囲では、“指数分布する”と仮定し検定する。検定結果は図8に示したように、仮定分布の上、下部境界線に接しておらず、従ってこの仮定は危険率0.01%で指数分布していると判定してよい。また平均寿命 2.75×10^5 の母集団の一部と考えてよく、この試料をとったロットは一応機能を、満足していると考えてよい。

表2 X^2 検定

t_i	f_i	P_i	nP_i	$(f_i - nP_i)^2$	$\frac{(f_i - nP_i)^2}{nP_i}$
$0 \sim 6.5 \times 10^4$	4	0.478	7.17	10.05	1.395
$6.51 \sim 9.0 \times 10^4$	3	0.071	1.065	3.74	3.510
$9.01 \sim 13.0 \times 10^4$	4	0.133	2.00	4.00	2.00
$13.01 \sim 15.0 \times 10^4$	2	0.050	0.75	1.56	2.08
$15.01 \sim 18.0 \times 10^4$	2	0.058	0.87	1.28	1.47

(計 10.455)

平均寿命 $\theta = 10.0 \times 10^4$

$$P_i = (1 - e^{-\frac{t_i}{\theta}}) - (1 - e^{-\frac{t-1}{\theta}})$$

(但し: t_i は max)

$$X^2_{0.05,4} = 9.49 < X^2_0 = 10.455$$

即ち、 $\theta = 10.0 \times 10^4$ の指数分布の仮定は $\alpha = 0.05$ で棄却。

6.3 少数データの場合の考え方

重ね板ばねの疲れ強さを知る為の試料数は、2～4本程度の例が多い。しかし2～4本のデータで母集団の寿命を推定し、また分布型を決めつけることは問題がある。実際の問題としては行われているので、いかに少数データを生かすかということが必要である。その為には過去のデータを整理し、まとめることによって少数デー

タを検定とまではいかないまでも〔検定精度の問題として表現した〕検討は出来る。その方法は、過去のデータを整理解析し母集団がどのような分布型をしているか、平均寿命はどうかということを把握しておき、少数のデータを6・2項の方法で検定してやることである。前項は、 $n = 6$ の場合についての結果であり、試料数2～4本の結果に関しては、この方法でよいとは云ひきれない。データが少ない場合は、検定の精度が悪いことを記憶しておく必要がある。

図8 コルモゴロフ・スミルノフの検定

図9 信頼性向上のサイクル

7. まとめ

本報告は重ね板ばねの、データによる研究結果であるが、この信頼性の適用方法を他のばねにも適用し範囲を

拡げて行きたいと考える。

今後の重ね板ばねの信頼性に関する研究は次のように進めるべきと考える。即ち、各一枚一枚のリーフの疲労試験データを、応力水準別に解析し、平均寿命を把握する。そしてある基準時間に於ける破壊率を求めておき、

表 3 検定表 (d の値)

α	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
n					
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.474	0.565	0.699
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
20	0.231	0.246	0.246	0.294	0.356
25	0.210	0.22	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27
40	0.17	0.18	0.19	0.21	0.25
45	0.16	0.17	0.18	0.20	0.24
50 以上	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{n}}$

α : 危険率 d : 間隔の最大値。

n : 試料数

机上に於て Ass'y の寿命を推定出来るようにすることである。これが完成すれば、重ね板ばねの信頼性の、問題は、現状把握から信頼性向上への大きな足がかりが出来るわけである。しかし現状に於ては、やはり重ね板ばねを次のような信頼向上のサイクルに従って一步一步積上げていかなければならない。今後は各メーカーが信頼性に関する研究をし、総合的な保証基準を明らかにする必要があるのではないかと考える次第である。

参 考 文 献

- 1) 「信頼性管理便覧」日刊工業新聞社 (1964)
- 2) 日科技連「信頼性データの解析」 (1966)
- 3) オーム社「信頼性の理論と実際」 (1967)
- 4) 日発研究部資料 (資44—1003)
- 5) 日発生産技術室資料「信頼性データの解析マニュアル」 (1969)
- 6) 日発技報