金属材料疲労強度データベースに基づく 鋼の耐久限度の分布特性について†

田 中 道 七* 岩 谷 隆 史** 酒 井 達 雄*

Distribution Characteristics of Endurance Limit of Ferrous Metals by the Analysis of PN Data and ST Data in JSMS Database on Fatigue Strength of Metallic Materials

by

Tsuneshichi TANAKA*, Takashi IWAYA** and Tatsuo SAKAI*

JSMS database on fatigue strength of metallic materials was compiled as a joint project of the JSMS Committees on Fatigue and on Reliability Engineering. A large number of numerical fatigue data and the related information offered by many researchers were filed on a magnetic tape after computer processing.

The PN data (Statistical fatigue test data) and the ST data (Staircase fatigue test data) of ferrous metals were sorted from the database, and statistically analysed to find the basic nature of the distribution characteristics of endurance limits.

キー・ワード：データベース，PN データ，ST データ，耐久限度，分布特性

1 緒 言

機械構造物の安全設計や信頼性解析を行うためには、各部材の疲労強度特性値の定量的な分布特性を明らかにすることが重要である。しかし、所定の条件下で疲労強度の分布特性を調べるには、大標本を用いた統計的疲労試験を実施しなければならず、このような実験を遂行することは時間的かつ経済的制約から大きな困難を伴っている。

ところで先般、日本材料学会により疲労強度に関する組織的なデータ収集が行われ、その全データが「金属材料疲労強度データ集」(全3巻)として発刊されるとともに、そこに収録された全データが磁気テープの形式でデータベース化されている。したがってこのデータベースから疲労強度の分布特性に関するデータを検索し、統計的解析を行うことが一つの有効な方法であらう。

上記データベースには、広範囲にわたる鉄鋼、非鉄金属材料について素材の製造過程から化学成分、熱処理条件、および、各種静的強度などの詳細な基礎データとともに、以下の3種類の疲労試験結果が収録されている。

(1) SN データ：通常のS-N特性を求めるために行われた疲労試験結果

(2) PN データ：疲労寿命分布を明らかにする目的

で同一応力レベルに多数の試験片を割り当てて行われた疲労試験結果

(3) ST データ：耐久限度の平均値と標準偏差を求めるために行われたステアケース法による疲労試験結果

筆者らは先に上記データ中のPNデータを用いて、鉄鋼材料の寿命分布特性と耐久限度の分布特性を解析して報告したが、本報では鉄鋼材料の耐久限度の分布特性のみに注目し、PNデータにSTデータを加えて前報よりさらに精密な解析を行い、また、耐久限度と引張強さ σ_B との相関関係についても検討を加えた。

2 解析に用いたPNデータとSTデータの 内訳

解析に先だち鉄鋼材料の平滑材およびそれに準ずる砂時計型試験片を標準材として限定し、常温・大気中の試験環境で得られたPNデータとSTデータを検索抽出した。Table I (a), (b)は解析に用いた、PNデータとSTデータを荷重様式と材料種別により分類したものである。荷重様式および材料種別の項で熱処理に用いた記号の意味は表の欄外に説明したとおりで、荷重様式は大部分が回転曲げであり、ごく一部平板の平面曲げが含まれている。この平面曲げのデータについては後の解析において回転曲げのデータに比べて特異性を示さなかったため、回転曲げのデータと同様に

† 原稿受理 昭和61年10月2日 Received Oct.2, 1986

* 正会員 立命館大学理工学部 京都市北区等持院北町, Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Tojiinkitama-chi, Kita-ku, Kyoto

** 正会員 沼津工業高等専門学校 沼津市大岡, Numazu College of Technology, Ooka, Numazu

Table I. PN and ST data used for analysis.

(a) PN data				
Load	Material	Number of test series n_s	Number of stress levels n_e	Number of specimens n_p
RB	$\left\{ \begin{array}{l} \text{S10C} \sim \text{S45C (AC, FC, Q \& T)} \\ \text{SS41 (WC)} \end{array} \right\}$ Carbon steel	13	46	764
		2	4	89
RC	$\left\{ \begin{array}{l} \text{SCM435 (AC, Q \& T), SNCM439 (Q \& T), SCM440 (OC), SK5 (Q \& T)} \\ \text{SUS403 (Q \& T)} \end{array} \right\}$ Alloy steel ₁	10	40	656
		1	2	25
BO	$\left\{ \begin{array}{l} \text{S45C} \\ \text{SM50A} \end{array} \right\}$ Carbon steel	1	7	110
		1	4	38
Total		28	103	1 682
(b) ST data				
Load	Material	Number of test series	Number of specimens	
RB	$\left\{ \begin{array}{l} \text{SF50} \\ \text{S10C} \sim \text{S45C (AC, FC, Q \& T)} \end{array} \right\}$ Carbon steel	(1) 1	(34)	34
		(8) 17	(243)	358
	$\left\{ \begin{array}{l} \text{SCMV2 (FC), SCMV3 (FC), SCMV4 (FC)} \\ \text{SUS403B (Q \& T), SUS420J2B (Q \& T), SUH616B (AC)} \end{array} \right\}$ Alloy steel	(3) 3	(63)	63
		(3) 3	(63)	63
Total		(15) 24	(403)	518

Code: RB; uniform rotating bending, RC; cantilever rotating bending, BO; ex-plane bending of plate
AC; air cool, FC; furnace cool, Q & T; quench and temper

扱うこととした。表中、試験シリーズ (test series) とは同一試験条件下で行われた疲労試験結果の各組を意味し、応力レベル数とは寿命分布試験を実施した応力レベル数の中で今回の解析に用いた耐久限度周辺のレベル数を意味する。また、試験片数は用いられた試験片の総数である。

実際にデータベースより検索した PN データには、試験シリーズにより打ち切り繰返し数の違うものや、調質材 (Q & T) で焼もどし温度を特に低くしたものが見受けられるので、種々の要因が異なる試験結果をプールするに当たり、次に示す項に該当するものを解析の対象とした。

(1) 打ち切り繰返し数を 10^7 回に統一した上で、同一試験シリーズ中に 10^7 での破壊確率 k/n (n : 各応力レベルに用いられた試験片総数, k : 各応力レベルで繰返し数 10^7 回以前で破壊した試験片数) が二応力レベル以上について得られており、かつ一応力レベルに用いられた試験片総数 n が 8 本以上のもの。

(2) 調質材で焼もどし温度が 500°C 以上のもの。これは焼もどし温度が 450°C 以下になると焼もどし効果が十分でなく、引張強さ σ_B のみが著しく大きくなり、 σ_B で標準化すると異常値として現れるからである。Table I (a) には、上の(1)および(2)の条件を同時に満足する PN データの数が示されており、最終的に解析の対象となったのは 28 シリーズとなる。

つぎに、ST データから通常の手順に従って耐久限度の平均値とその標準偏差を求める場合、仮に試験片

本数が少なくても、平均値については比較的妥当な値が得られるが、標準偏差については信頼度が低下することが示されている。したがって ST データについては、耐久限度の平均値のみを求めるのに採用した試験シリーズ数と、標準偏差まで求めるために採用した試験シリーズ数は異なることになる。そこで次の要件を満たすものを解析の対象とした。

○耐久限度の平均値を求める場合：

- (1) 調質材については焼もどし温度が 500°C 以上のもの。
- (2) 応力階差が 0.5 kgf/mm^2 (49 MPa) より大きいもの。

○標準偏差まで求める場合：

上記(1)および(2)の他に次の項にあてはまるもの。

- (3) 応力階差を d 、標準偏差を s とするとき、 $d/s < 2$ であること。
- (4) $(nB - A^2)/n^2 > 0.3$ であること。^{*1}

なお、ST データについては打ち切り繰返し数を統一することはできないのでそのままの数値を用いた。Table I (b) は(1)~(4)の要件を満たす ST データの内訳を示したもので合計 24 シリーズについて耐久限度の平均値を求め、そのうちの () で示した合計 15 シリーズについて標準偏差まで求めた。なお、先の四つの要

*1 ただし、応力レベルを $\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_k$ とし、各応力レベルに属する観測値を $n_0, n_1, \dots, n_k$ としたとき、 i : 順位 ($0, 1, \dots, k$), $n = \sum_{i=0}^k n_i$, $A = \sum_{i=0}^k i n_i$, $B = \sum_{i=0}^k i^2 n_i$ を意味している。

Fig. 2. Relationship between endurance limit and tensile strength.

よらず、ほぼこの太い実線で表すことができ、○印と□印はこの実線の周囲に同程度に分布している。なお、図中△印はST データ中に含まれるオーステナイト系ステンレス鋼に関する $\bar{\sigma}_w$ と σ_B の関係であり、○印と□印とはその傾向を異にしていることが分かる。このことからオーステナイト系ステンレス鋼は一つのグループとして別個に取り扱う必要があるが、この鋼種のデータは8シリーズしかなく、 $\bar{\sigma}_w$ や s の分布特性を調べるには不十分である。そのため既述のように、この鋼種を本研究の対象から除外することとした。

Fig. 2 には参考のために日本機械学会編「金属材料疲労強度の設計資料(I)」による機械構造用炭素鋼 S10C～S55C の空冷材 (AC) と炉冷材 (FC)、および調質材 (Q & T) に関する引張強さ σ_B と回転曲げ疲労限度の関係のばらつき範囲を実線と破線で、また、金属材料技術研究所 (NRIM) 発行「金属材料疲れデータシート資料1」による S25C～S55C, SCR440, SCM435, SCM440 の鋼種に関して得られたばらつき

範囲を1点鎖線で示してある。とくに NRIM による実験結果は同一実験場所で集中的に得られたもので、そのばらつき範囲は非常に小さいのが特徴である。

Fig. 2 に示したように $\bar{\sigma}_w$ と σ_B の間には鋼種や熱処理を問わずほぼ比例関係にあることから耐久比 $R_w = \bar{\sigma}_w / \sigma_B$ を一つのパラメータとし、その分布を正規確率紙に示したのが Fig. 3 である。(a)図は Table I の全鋼種に対するもの、(b)図は Table I 中の炭素鋼のみをプールしたもの、(c)図は同表の合金鋼のみをプールした場合であり、各図において PN データと ST データからの区別を設けた場合と両者からの値をさらにプールした (PN+ST) の場合の分布を示してある。なお、縦軸の P は $P = \{(i-0.5)/n_s\} \times 100\%$ [i : 順位, n_s : データ数 (シリーズ数)] により求めた累積確率である。図中の直線はそれぞれの分布に対して描いた回帰直線で、図より耐久比 R_w はいずれの場合もほぼ正規分布で近似できることがわかる。この回帰直線から求まる R_w の平均値 $\bar{R}_w$ と標準偏差 $S.D.$ の値を各図の上部に示した。ここで各図を比較すると、(a)、(b)図では○印と□印の間にほとんど差がなく、これらをプールするのにほとんど問題はないと思われる。しかし、(c)図では多少の差が認められ、これらは合金鋼に対するシリーズ数 n_s が他の場合に比べて少なく、PN データと ST データのそれぞれに含まれる鋼に偏りがあるためと思われる。図(a)、(b)、(c)より平均値 $\bar{R}_w$ の値を PN+ST の場合と比較するとほぼ0.51～0.54の範囲にあり、鋼の回転曲げ耐久限度について従来言われている $\bar{R}_w \approx 0.50$ ⁹⁾ に近い値が得られている。

4・2 標準偏差 s の分布特性

PN データと ST データの各シリーズについて得られた 10^7 強度の標準偏差 s と耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ の関係を Fig. 4(a)に、また s と R_w の関係を Fig. 4(b)

に示す。記号の区別と3本の直線の意味は先の Fig. 2 と同様である。○印と□印の分布およびそれぞれの回帰直線から ST データの方が PN データよりも小さい標準偏差 s を与える傾向にあるが、この点については再度ふれる。しかし、いずれの場合も回帰直線はほとんど水平に近く、標準偏差 s は耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ や耐久比 R_w にあまり依存しないことがうかがえる。

この点を明確にするために、 s と $\bar{\sigma}_w$ の相関係数 ρ を求め、さらに相関の有無を検定した結果を Table II (a) に示す。

相関係数の検定には、一般に使用されている自由度 $n-2$ および有意水準

Fig. 3. Distribution of endurance ratio $R_w = \bar{\sigma}_w / \sigma_B$ at each group.

Fig. 4. Relationship between standard deviation and endurance limit, and endurance ratio.

α に対する $\rho=0$ の仮説検定法を用いた。紙面の都合によりその詳細については省略するが、有意水準を $\alpha=0.05$ および 0.01 の双方について検定を行った結果、相関がある場合には○印を相関がない場合には×印で示してある。表より、標準偏差 s と耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ または耐久比 R_w との間には相関はないとする方が妥当なことがわかる。¹⁰⁾

Fig. 5 は s の分布を対数正規確率紙上に図示したもので、(a)図は全鋼種を対象としたもの、(b)図は炭素鋼のみをとり出した場合、(c)図は合金鋼に対するもので、図中の記号と直線の意味は先の Fig. 3 と同様である。図より(a), (b), (c)のいずれの図においても PN, ST, PN+ST の各場合について s の分布はほぼ対数正規分布によって近似し得ることがわかる。各直線からきまる s の中央値 (median) $\tilde{s}$, 平均値 $\bar{s}$ および標準偏

Table II. Coefficient of correlation and its statistical test.

(a) $s-\bar{\sigma}_w$ and $s-R_w$				
Parameters	Data and numbers of test series	Coefficient of correlation ρ	Level of significance α	
			$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
$s-\bar{\sigma}_w$ Fig. 3 (a)	PN (28)	0.191	×	×
	ST (15)	-0.182	×	×
	PN+ST (43)	0.142	×	×
$s-R_w$ Fig. 3 (b)	PN (28)	0.115	×	×
	ST (15)	-0.275	×	×
	PN+ST (43)	0.011	×	×

(b) $v-\bar{\sigma}_w$ and $v-R_w$				
Parameters	Data and numbers of test series	Coefficient of correlation ρ	Level of significance α	
			$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
$v-\bar{\sigma}_w$ Fig. 4 (a)	PN (28)	-0.418	○	×
	ST (15)	-0.798	○	○
	PN+ST (43)	-0.440	○	○
$v-R_w$ Fig. 4 (b)	PN (28)	-0.280	○	×
	ST (15)	-0.422	×	×
	PN+ST (43)	-0.310	×	×

Note) ○: with correlation, ×: without correlation

差 $S.D.$ の値を図の上部に示してある。

ここで、PN データから求めた s の分布 (○印) と ST データから求めた s の分布 (□印) を比較すると、(b)図では途中で交差しているが、(a), (c)図から ST データの方が PN データよりも小さい標準偏差を与える傾向にあることがわかる。先にも述べたようにステアケース法は平均値に対しては精度のよい推定値を与え

*2 Fig. 1 に示したように 10^7 強度が正規分布に従うとき、その標準偏差 s の 2 乗は理論上は χ^2 -分布になるべきであるが、各シリーズの標本寸法が異なるために自由度を規定できないこと、および実用的見地からここでは s の分布を比較的よく近似できる対数正規分布を採用することとした。

Fig. 5. Distribution of standard deviation s MPa at each group.

るが、試験片数が少ない時は標準偏差の推定精度はあまりよくない。Table I からわかるように、ST データの1シリーズ当りの平均試験片数は約27本で、PN データの1シリーズ当りの平均試験片数60本に比べてかなり少ないことおよびシリーズ数(点の数)もPN データの方が多いことから、Fig. 5 の各図においてPN データによる s の分布の方がより信頼度が高いと考えられる。また、直線のこう配からPN データによる s の分布の方が実用する際に安全側にある。

このように○印と□印の分布が明らかに異なる場合、それらをプールすることにはあまり意味がないが、各図の▲印と実線は実用的な意味で両者の妥協点を与えるものと解することができる。このPN+STの場合で比較すると 10^7 強度の標準偏差 s の中央値 $\tilde{s}$ はほぼ9.4~13.2 MPa 程度であり、平均値 $\bar{s}$ は10.2~15.3 MPa 程度で、全鋼種をプールした場合はもちろんその中間の値をとる。

4.3 変動係数 v の分布特性

PN データとST データの各シリーズについて得られた耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ と標準偏差 s から変動係数 $v=s/\bar{\sigma}_w$ を求め、これと $\bar{\sigma}_w$ の関係を図示したのがFig. 6 (a)で、 v と R_w の関係を示したのがFig. 6 (b)である。記号の区別と直線の意味は先のFig. 4と同様である。(a)図の回帰直線が示すように変動係数 v は耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ が増加すると減少するが、このことはFig. 4 (a)で標準偏差 s が $\bar{\sigma}_w$ にほとんど依存しないことからの当然の帰結である。また、ST データから求めた v の値がPN データから求めた値よりも全体として低い値を示すのもFig. 4 から予測される。

この変動係数 v と耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ について求めた相関係数 ρ はTable II (b)の $v-\bar{\sigma}_w$ の欄に示すとおりで、仮説 $\rho=0$ に対する検定の結果をみると、PN データから求めた v と $\bar{\sigma}_w$ の間には $\alpha=0.01$ で相関がないという判断になるが、他はすべて相関があることを示しており、全体としては v と $\bar{\sigma}_w$ の間に負の相関があると判断される。

一方、 v と R_w の関係についてはFig. 6 (b)をみると同図(a)とほぼ同じ傾向を示すようであるが、相関係数 ρ の検定結果、Table II (b)の $v-R_w$ 欄に示したようにPN データの $\alpha=0.05$ の場合を除いて相関はないという判断になる。それ故、前項の結果と併せて標準偏差 s と変動係数 v は第1近似として耐久比 R_w とは独立に分布すると判定される。

Fig. 7 は変動係数 v の分布を、全鋼種を含む場合((a)図)、炭素鋼のみの場合((b)図)および合金鋼の場合((c)図)について対数正規確率紙上に図示したもので、記号の区別と直線の意味は先と同様である。各図における分布のあてはめ状態をみると、(b)図において

Fig. 6. Relationship between coefficient of variation and endurance limit, and endurance ratio.

対数正規分布による近似度はあまりよくないのが見受けられるが、(a), (c)図では○印、□印および▲印の分布はほぼ対数正規分布で近似し得ることがわかる。それぞれの回帰直線から得られる v の中央値 $\tilde{v}$ 、平均値 $\bar{v}$ および v の標準偏差 $S.D.$ は各図の上部に示してある。

Fig. 7 においても先のFig. 5の場合と同様PN データから求めた v の分布とST データから得られた v の分布の間には差があり、後者の v の方が前者のそれに比べて全般に小さい値を与えており、この点についてはFig. 5の場合に述べたことと同様のことが言えると思われる。それ故、PN データとST データの両者から求めた v をプールした場合の分布は先と同様、実用面を考えた妥協点としての意味をもつのみであるが、このPN+STに対する分布の回帰直線から求める v の中央値は炭素鋼で2.9%，合金鋼で3.2%であり、平均値はそれぞれ3.4%と3.8%となり、炭素鋼と合金鋼の間でその差は比較的小さい。全鋼種をプールした場合には中央値が3.0%，平均値が3.6%となる。

5 結 言

日本材料学会発行「金属材料疲労強度データ集」をもとに、鋼の標準材に関する常温大気中でのPN データおよびST データから炭素鋼と合金鋼について耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ と標準偏差 s を求め、耐久比 $R_w=\bar{\sigma}_w/\sigma_B$ 、標準偏差 s および変動係数 v の鋼種にまたがる分布特性について調べた。なお、オーステナイト系ステンレス鋼は他と強度特性が異なるため解析から除外した。得られた主な結論は次の通りである。

(1) 引張強さ σ_B と耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ の間には、オーステナイト系ステンレス鋼を除けばPN データと

Fig. 7. Distribution of coefficient of variation $v\%$ at each group.

ST データの種別によらずかなり良好な直線関係が認められる。

(2) 耐久比 $R_w = \bar{\sigma}_w / \sigma_B$ の分布は、全鋼種をプールした場合と炭素鋼のみの場合では、データ種別によらずほぼ均一の分布を示し、これらをプールすることができ、正規分布でよく近似される。しかし、合金鋼のみの場合についてはデータ種別により多少の差が認められ、これらは合金鋼に対するシリーズ数が他の場合に比べて少なく、PN データと ST データのそれぞれに含まれる鋼種に偏りがあるためと思われる。

(3) 標準偏差 s と耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ または耐久比 R_w との相関はほとんどなく、 s と $\bar{\sigma}_w$ または R_w と独立に分布すると判断される。 s の分布はほぼ対数正規分布で近似されるが、データ種別により分布に差があり、ST データから得られた s の方が PN データから得られたものよりも一般に小さい値を示す。信頼度と安全側の考慮からすると後者の PN データから得られた s の分布の方が妥当と思われるが、実用的には両者をプールした場合の s の分布を採用することが考えられる。

(4) 変動係数 v と耐久限度の平均値 $\bar{\sigma}_w$ の間には、負の相関が認められるが、 v と耐久比 R_w の間にはほとんど相関はないと判断される。 v の分布も対数正規分布ではほぼ近似できるが、標準偏差 s の場合と同様、データ種別によって分布に差が認められる。この場合も上と同様のことが考えられ、実用的には全データをプールした PN+ST の場合の v の分布で充分と考えられる。

上で求めた分布の特性値は実用上有用であると考えられるので全データをプールした場合について得られた R_w , s および v の分布の特性値を Table III にまとめておく。

本研究を遂行するにあたり、日本材料学会疲労部門

Table III. Distribution parameters of endurance ratio R_w , standard deviation s and coefficient of variation v in PN+ST data.

	Parameter	all steels	carbon steels	alloy steels
Endurance ratio R_w	$\bar{R}_w$	0.518	0.505	0.541
	S. D.	0.0485	0.0451	0.0453
Standard deviation s , MPa	$\bar{s}$	10.731	9.407	13.180
	$\bar{s}$	12.043	10.156	15.274
	S. D.	6.136	4.131	8.947
Coefficient of variation $v, \%$	$\bar{v}$	3.041	2.906	3.222
	$\bar{v}$	3.553	3.381	3.844
	S. D.	2.146	2.011	2.503

委員会データ解析作業グループの各位から多くの協力を頂き、とくに幹事の新井淳一、城野政弘、西島敏の各氏から数々の貴重な助言を得た。ここに深甚の謝意を表する。また、本研究は文部省科学研究費補助金総合研究(A)〔2002〕の援助を得て遂行したものであることを附記する。

(昭和60年12月12日 第7回設計における信頼性工学シンポジウムにて講演)

参考文献

- 1) T. Tanaka, T. Sakai and T. Iwaya, CJMR, vol. 2 (1986).
- 2) “金属材料強度設計便覧”, p. 236 (1977) 養賢堂.
- 3) 西島 敏, 材料, 29, 24 (1980).
- 4) 西島 敏, 日本機械学会論文集, 46, 1314 (1982).
- 5) H. Nakayasu, CJMR, vol. 2 (1986).
- 6) “金属材料疲労強度の設計資料(1)”, p. 13 (1982) 日本機械学会.
- 7) “金材技研疲れデータシート資料1”, p. 45 (1981) 金属材料技術研究所.
- 8) 下河利行, 航空宇宙技術研究所報告, 464 (1976).
- 9) 例えば, 中沢 一, 本間寛臣, “金属の疲労強度”, p. 23 (1982) 養賢堂.
- 10) 例えば, 守谷栄一, “数理統計”, p. 227 (1979) 日本理工出版会.