

大阪大学工学部 正員 小松 定夫
 ○中山 隆弘

1. まえがき 不規則荷重を受ける鋼材の疲労寿命は、通常、Palmgren-Minerの方法等により推定されているが、もつと基本的な2段2重繰返し荷重に対する推定値とさえ、実験値とかなり異なる場合がある。「累積損傷の線型化」が、本質的には問題になるが、全く同一な条件下における実験値にも、大きなばらつきが存在することを考えれば、このばらつきの原因は、疲労破壊の本質的な性質である、一定応力振幅下の疲労寿命の確率性状を無視している点にあると考えるを得ない。換言すれば、不規則荷重による鋼材の疲労寿命は、確率論的手法を導入することにより、より合理的に推定されるであろう。本報告は、その基礎資料を得るために、2段2重繰返し荷重下における鋼材の疲労破壊確率を計算し、さらに、破壊に対する信頼度を設定した場合の、寿命の推定方法について考察したものである。

2. 一定応力振幅下における疲労寿命の確率的特性 まず、河本・他¹⁾による、SS41試験片(圧延)の回転曲げ実験結果から、 $S=30.0$ および 26.0 kg/mm²の各応力に対する、疲労寿命 N の確率分布関数(CDF) $F_N(N)$ を求めたが、 t 分布による仮説検定も併せて行った結果、いずれの場合も、式(1)で示されるWeibull分布に適合した。

$$\left. \begin{aligned}
 S=30.0 \text{ kg/mm}^2 : F_N(N) &= 1.0 - \exp \left[- \left(\frac{N - 0.40 \times 10^5}{2.33 \times 10^5 - 0.40 \times 10^5} \right)^{4.52} \right] \\
 S=26.0 \text{ kg/mm}^2 : F_N(N) &= 1.0 - \exp \left[- \left(\frac{N - 1.40 \times 10^6}{3.27 \times 10^6 - 1.40 \times 10^6} \right)^{1.06} \right]
 \end{aligned} \right\} (1)$$

図1および図2に示した確率密度関数(PDF) $f_N(N)$ から分かるように、 N の分布は、 $S=30.0$ kg/mm²の場合は正規分布に、 $S=26.0$ kg/mm²の場合は、指数分布に近い性状を示している。両者のばらつきの大きさを比較すると、 $S=26.0$ kg/mm²におけるばらつきが、かなり大きい。これは、通常言われているように、応力がいわゆる疲労限度に近いためであると思われる。さうに、両者の確率性状の差は、図3に示した危険率関数 $\lambda(N) = f_N(N) / (1.0 - F_N(N))$ において、顕著に認められる。すなわち $S=26.0$ kg/mm²の場合における $\lambda(N)$ については、 $N=2.0 \times 10^6$ を越える領域ではば一応のみならず、 $S=30.0$ kg/mm²の場合には、もはや、その仮定が成立しないのは明らかである。

3. 2段2重繰返し荷重による疲労破壊確率 一定応力振幅下の疲労寿命 N を確率変数とみなすことは、上述の結果より十分妥当であり、したがって、式(2)で表わされる2段2重繰返し荷重を受ける鋼材の累積損傷度 D の、確率変数である。

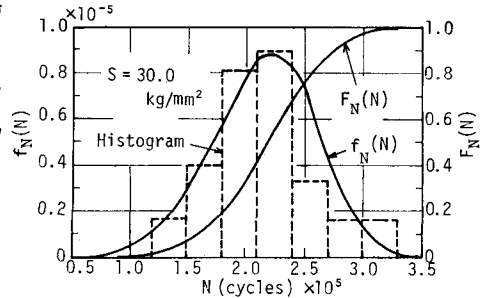


図1 疲労寿命の確率密度関数および分布関数

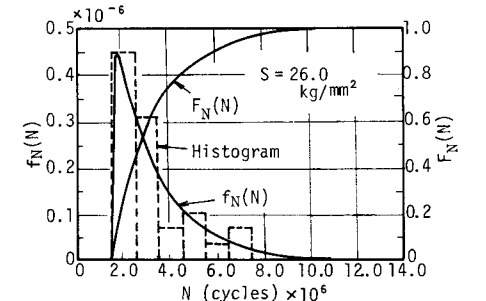


図2 疲労寿命の確率密度関数および分布関数

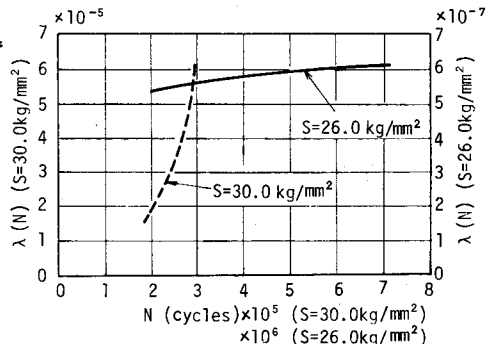


図3 繰返し数に対する危険率の変化

$$D = n_1 / N_1 + n_2 / N_2 \quad (2)$$

式中、 N_1, N_2 はそれぞれ応力レベル S_1, S_2 における疲労寿命を表わし、 n_1, n_2 は荷重回数を示す。いま N_1 と N_2 の PDF をそれぞれ $f_{N_1}(N), f_{N_2}(N)$ とすれば、 $n_1/N_1 \equiv D_1, n_2/N_2 \equiv D_2$ の PDF は、次式により計算できる。

$$f_{D_1}(D) = n_1 / D^2 f_{N_1}(n_1 / D), \quad f_{D_2}(D) = n_2 / D^2 f_{N_2}(n_2 / D) \quad (3)$$

さらに、 D_1 と D_2 が互いに独立であるとすれば、 D の PDF は、 $f_{D_1}(D)$ と $f_{D_2}(D)$ のたたみ込み積分により計算することができる。

$$f_D(D) = \int_0^\infty f_{D_1}(D-t) f_{D_2}(t) dt \quad (4)$$

いま、累積損傷度が1に達したとき破壊するものとすれば、疲労破壊の確率は、結局、次式で与えられる。

$$P_F = \int_{1.0}^\infty f_D(D) dD = \int_{1.0}^\infty \left[\int_0^\infty f_{D_1}(D-t) f_{D_2}(t) dt \right] dD \quad (5)$$

$S_1 = 30.0 \text{ kg/mm}^2, S_2 = 26.0 \text{ kg/mm}^2$ とし、前述した SS41 材の疲労破壊確率を、 n_1 と n_2 の種々の組合せに対して計算した結果が図4である。さらに、 $\sum_i (n_i / \bar{N}_i)$ (\bar{N}_i は N_i の平均値) と、疲労に対する信頼度 $R = 1 - P_F$ との関係を図5に示した。予想されたことではあるが、 $\sum_i (n_i / \bar{N}_i)$ が同一の値を示して、 n_1 と n_2 の組合せにより、 R はかなり異なった値をとることが分かる。いま $\sum_i (n_i / \bar{N}_i) = 0.7$ の場合を例にとると、 $n_1 / \bar{N}_1 = 0.65$ の場合(点A)、90% 強の信頼度を示すが、 $n_1 / \bar{N}_1 = 0.43$ の場合(点B)、70% 弱な信頼度が落ちることが理解できる。

4. 信頼度を考慮した疲労寿命の推定 上述の計算結果をよと、 n_1 / \bar{N}_1 をパラメータとして、総繰返し数と、そのときの疲労に対する信頼度の関係を探った結果を図6に示す。例えば、 $S_1 = 30.0 \text{ kg/mm}^2$ の応力をあらかじめ 0.467×10^5 回 ($n_1 / \bar{N}_1 = 0.22$)、 0.931×10^5 回 ($n_1 / \bar{N}_1 = 0.43$)、 1.40×10^5 回 ($n_1 / \bar{N}_1 = 0.65$) 繰返した場合、疲労破壊に到る総繰返し数は、信頼度を90%に設定した場合、それぞれ 1.2×10^6 回(点C)、 0.88×10^6 回(点B)、 0.37×10^6 回(点A)と推定できる。次に、表1は、 $S = 30.0 \text{ kg/mm}^2$ とあらかじめ 1.40×10^5 回 ($n_1 / \bar{N}_1 = 0.65$) 繰返した場合の、破壊に到るまでの総繰返し数を、各信頼度に対し計算したものである。ここで、準確率論的方法是、 N_i を $S-N-P$ 曲線により決定し、Minerの方法を使用する方法であるが、表より明らかなように、信頼度を例へば98%に設定した場合、30%程度の誤差が生ずる結果が得られた。

5. あとがき 以上の結果、2段2重繰返し荷重、さらには、不規則荷重を受ける鋼材の疲労に対する信頼度は、上述の確率論的手法により、より合理的に評価できるものと思われる。(参考文献) 1) 河本他, 「疲労寿命の統計的分布とこれに及ぼす熱処理の影響」, 材料試験, 9才9号, 89頁, 8335.

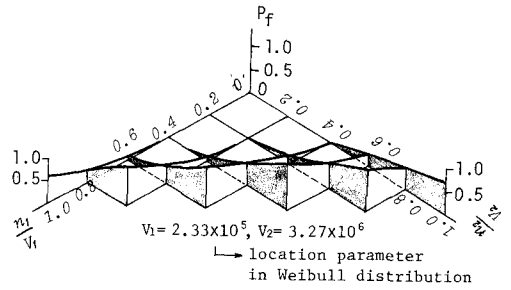


図4 2段2重繰返し荷重による疲労破壊確率

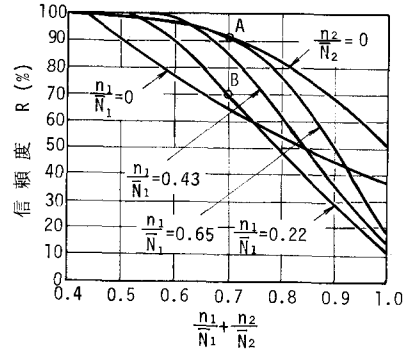


図5 損傷度と疲労破壊に対する信頼度との関係

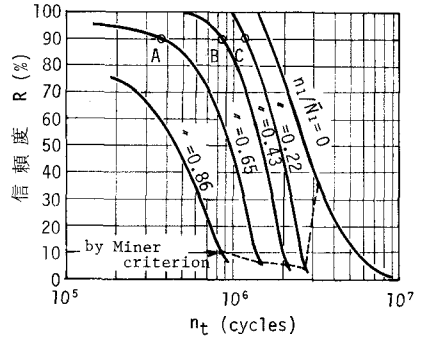


図6 総繰返し数と疲労破壊に対する信頼度との関係

表1 疲労寿命の推定値

R (%)	$n_t \times 10^6$	$n_t^* \times 10^6$	ϵ (%)
98	0.62	0.43	30.3
95	0.75	0.60	20.0
90	0.88	0.77	12.5
85	1.06	1.01	4.7
70	1.20	1.21	0.8

注) n_t = 確率論的方法による推定寿命
 n_t^* = 準確率論的方法による推定寿命
 ϵ = 誤差