(昭和 62 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

ランダム荷重下での疲労挙動に関する研究 (第 5 報)

正員 八 木 順 吉* 正員 富 田 康 光**
 正員 橋 本 聖 史** 品 川 尚 久***
 正員 坂 田 肇****

Fatigue Life under Random Loading Condition (5 th Report)

by Junkichi Yagi, *Member* Yasumitsu Tomita, *Member*
 Kiyoshi Hashimoto, *Member* Naohisa Shinagawa
 Hajime Sakata, *Member*

Summary

In the previous paper, a method for estimating fatigue strength under random loading condition was proposed, a method that combined fatigue tests with calculations. The loading condition is limited to the case where the mean stress level, or the stress ratio of the minimum stress to the maximum stress, is constant. However, in the actual service loading condition, both mean stress and stress amplitude generally vary from cycle to cycle. Therefore, a random fatigue test with a constant mean stress or stress ratio is not enough to clarify fatigue behavior under actual service loading conditions.

In this paper, a random test procedure similar to the method shown in the previous paper is proposed. However, the new-procedure both mean stress and stress ratio are able to change according to the service loading condition.

To check the applicability and accuracy of this new procedure, axial load controlled random loading tests, with an exponential distribution of the peak to peak-stress, were carried out for plane mild steel specimens. Fatigue behavior patterns are then examined.

1 緒 言

種々の構造物あるいは機器などが、生涯に受ける荷重は一般にある種の荷重分布を持つランダム荷重で、現状での疲労設計はほとんど直線被害則いわゆる Miner 則に基づいている。

Miner 則を用いる場合、設計荷重であるランダム荷重を負荷した疲労試験結果、または実稼働状態での損傷例（これもまさしく現場でのランダム疲労試験結果である）があれば、それをもとに使用すべき疲労強度線図（ $S-N$ 線図）および限界累積被害値を設定できる。しかし、これらの資料がない場合には適切な $S-N$ 線図および限界累積被害値を決める拠りどころがなく、したがってこの方法では信頼性のある疲労設計を行うことは困難である。上述の観点から、著者らはランダム荷重下の疲

労寿命の評価は基本的に、ランダム疲労試験から得られる疲労強度線図を用いることを提案した¹⁾。しかし船舶・海洋構造物を例にとると、そのランダム荷重の密度分布は普通ワイブル分布であり、生涯に対応する繰返し数は $10^7 \sim 5 \times 10^8$ で、設計に必要な疲労強度線図を求めるには、現状の 10Hz 程度のランダム疲労試験速度では数年を要する。それ故種々の構造部材について、実験で疲労強度線図を求めることは実際上不可能に近く、事実これまで求められた例はほとんどない。

そこで著者らは、ランダム疲労試験およびある仮定に基づく計算法を組み合わせ、疲労強度線図を求める方法を提案した²⁾。軟鋼平滑丸棒および切欠試験片を用いて、応力比が一定で応力振幅の密度分布が指数分布であるランダム疲労試験を行い、この方法の信頼性を確認するとともに、普通のランダム疲労試験の試験期間を $1/20 \sim 1/100$ に短縮できることを示した²⁾。そしてこの方法を用いて、軟鋼突合せおよび隅肉溶接継手の指数分布ランダム荷重下の疲労強度線図を求めた³⁾。

ところが実働荷重は平均応力、応力振幅ともにランダ

* 大阪大学名誉教授

** 大阪大学工学部

*** 本田技研工業(株)

**** 大阪大学大学院工学研究科

Fig. 1 Schematic random loading pattern

ムに変動する荷重であり、前報までの応力比が一定のランダム疲労試験では、実働荷重下の疲労挙動を明らかにするには十分とはいえない。

本研究では既報のランダム疲労試験法²⁾に基づいて、平均応力、応力振幅がともにランダムに変動する荷重を対象としたランダム疲労試験法を提案した。応力のピーク値 S_p と続く応力のピーク値 S_p との間の応力値 S_{pp} (Fig. 1 参照) の絶対値の分布が指数分布をする場合について、軟鋼平滑丸棒試験片を用いてランダム疲労試験を行い、疲労挙動を求めた。

2 ランダム疲労試験法

2.1 既報のランダム疲労試験法^{1),2)}

著者らは構造物あるいは機器の疲労寿命は、実稼働中にそれらが受ける荷重条件での疲労試験を行い、得られる疲労強度線図を基に設計寿命(生涯の累積繰返し数)に対応する応力の許容値を、安全率または非破壊確率などを考慮して定めるべきことを提唱した^{1),2)}。すなわち設計対象物がランダム荷重下で稼働すれば、それをシミュレートしたランダム疲労試験を行い、疲労強度線図を求めることになる。既報²⁾では平均応力または応力比が一定である場合につき、疲労強度線図を簡便に求める方法を示した。その概要は次の通りである。なお平均応力または応力比が一定の場合には、応力は応力振幅 S_a で表示できる。

(1) 設計荷重条件—応力振幅の密度分布、および最小応力振幅。

(2) 最大応力振幅 $S_{a,\max}(Q)$ を任意に定める。 Q は疲労試験中に $S_{a,\max}$ が負荷される確率で超過確率という。

(3) 最小応力振幅 $S_{a,\min}$ を $S_{a,\min} \leq S_{a,\max}(Q)$ のもとで大きい値から一つ定める。

(4) $S_{a,\max}(Q)$ および $S_{a,\min}$ の荷重条件でランダム疲労試験を行う。この場合負荷される応力振幅 S_a は $S_{a,\min} \leq S_a \leq S_{a,\max}$ である(文献2参照)。 $S_{a,\min}$ を順次下げて ($S_{a,i,\min}; i=1, 2, \dots, n$)、上述の疲労試験を行い寿命 N_i ($i=1, 2, \dots, n$) を求める。

(5) これらの試験結果から Fig. 2 に示す実線の $S_{a,\min}-N$ 線図を描く。

Fig. 2 $S_{a,\min}-N$ diagram

($S_{a,\min}$: minimum stress amplitude under random loading test

N : number of cycle to failure

S_{FR} : fatigue limit under random loading test

N_{FR} : number of cycle at fatigue limit)

(6) ランダム荷重下の疲労限 S_{FR} (Fig. 2 の○印, 文献2参照) を定める。同時に対応する繰返し数 N_{FR} を定める。

(7) 最小応力振幅 $S_{a,\min}$ が疲労限 S_{FR} より小さい領域での寿命 (Fig. 2 の破線部) を、疲労限 S_{FR} より小さい荷重は疲労被害を与えないという仮定から、計算で求める(文献2参照)。

(8) 設計荷重条件の最小応力振幅に対応する寿命 N を求める。

(9) 他の最大応力振幅 $S_{a,j,\max}(Q)$ に対して(2)~(8)の方法により寿命 N_j を求める。

(10) $S_{a,j,\max}(Q)$ と N_j の関係を Fig. 3 のように描く。これがランダム疲労試験による疲労強度線図 $S_{a,\max}(Q)-N$ 線図である。

この提案法によると、応力振幅の密度分布が指数分布の時、通常のランダム疲労試験時間を 1/20~1/100 に短縮でき、得られる疲労強度線図の信頼度はランダム疲労試験での寿命のばらつきを調べることにより、定荷重疲労試験での疲労強度線図と同程度である^{1),4)}。

Fig. 3 $S_{a,\max}(Q)-N$ diagram

($S_{a,\max}(Q)$: maximum stress amplitude with Q under random loading test

Q : probability of exceedance

N : number of cycle to failure)

2.2 提案するランダム疲労試験法

たとえば Fig. 1 のように、平均応力および応力振幅がランダムに変動する荷重に対する疲労試験の制御法は種々ある。本研究では既報の疲労試験法²⁾ (2.1 参照) にならって、ある値以下の応力値を負荷しないような制御法 (2.1 (4) 参照) を採るため、および疲労被害への影響の度合を考慮して応力のピーク値 S_p から続く応力のピーク値 S_p への変動量 (Peak to Peak 値と呼ぶ、Fig. 1 参照) S_{pp} の絶対値 $|S_{pp}|$ をパラメータに選んだ。すると疲労強度線図 $S(Q)-N$ 線図を得るためのランダム疲労試験法は、2.1 の (1)~(9) の手順において応力振幅 S_a を $|S_{pp}|$ に置き換えればよい。すなわち 2.1 の (2)~(9) と同様の試験法により、Fig. 2 および Fig. 3 の $S_{a,min}-N$ 線図、 $S_{a,max}(Q)-N$ に対応する $|S_{pp,min}|-N$ 線図および $|S_{pp,max}(Q)|-N$ 線図が求められる。

本研究では、船舶・海洋構造物に働く波浪荷重を対象とし、 $|S_{pp}|$ の密度分布は指数分布とした。

$|S_{pp}|$ が所定の密度分布になるように制御する方法も種々あるが、本研究では応力のピーク値 S_p で制御する方法を採った。

すなわち、ある密度分布をする S_p の集合から順次 S_p を取出した時に、 $|S_{pp}|$ の密度分布が指数分布になる S_p の密度分布を求める、この S_p の密度分布を用いて順次 S_p を与えると、その時の $|S_{pp}|$ の分布は指数分布であり、平均応力も変動するような、たとえば Fig. 4 に示す荷重パターンの疲労試験が実施できる。この制御法によれば、ある値以下の応力値 $|S_{pp}|$ を負荷しない疲労試験も容易に行うことができる。なお、実際の設計においては、応力のピーク値 S_p の最大値を規定することを考慮して、 S_p は $|S_{pp,max}|$ が A の荷重条件に対し $S_{p,max} = \pm A/2$ とし、かつ $A/2$ から $-A/2$ の間の種々の正と負の応力の出現確率は同じとした。

したがって $|S_{pp,max}| = A$ は $S_p = \pm A/2$ の次に $S_p = \mp A/2$ が現われた時に出現し、この確率 Q_{pp} が $Q_{pp} = B$ になるようにピーク値 S_p の密度分布およびその最大値

Fig. 4 Example of random wave

Fig. 5 Size and shape of plane specimen (unit : mm)

Table 1 Chemical composition

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
SM41B	0.12	0.23	0.98	0.015	0.012

Table 2 Mechanical properties

Material	Yield Point (kg/mm ²)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
SM41B	31	45	34

$S_{p,max}$ の超過確率 Q_p を定めた。なお、 $|S_{pp,min}|$ が $|S_{pp,min}| \geq a$ ($a \neq 0$) の疲労試験においても、 S_p は $0 \leq |S_p| \leq S_{p,max}$ の値が出現する。

3 実 験

3.1 試 験 片

実験に使用した試験片形状は、Fig. 5 に示すような最小断面の直径が 10mm で 20mm の平行部を持つ WES 162-2 号の平滑丸棒試験片である。供試材は公称板厚 19mm の軟鋼 SM 41 B でミルシートによる材料の化学成分、および機械的性質をそれぞれ Table 1, Table 2 に示す。

試験片は、長手方向が圧延方向に一致するように採取し、加工後の熱処理は施していない。

3.2 試 験 方 法

使用した試験機はその動的容量が $\pm 10t$ の電気一油圧式サーボ疲労試験機 2 台で、繰返し速度は 0.01 から 15Hz、荷重波形はサイン波である。

疲労試験はランダム疲労試験で、すべて軸力荷重制御である。基本的な制御パラメータは 2 章で述べたように応力の Peak to Peak 値 S_{pp} の絶対値 $|S_{pp}|$ を選び (Fig. 1 参照)、その密度分布は指数分布で最大値 $|S_{pp,max}|$ およびその超過確率 Q_{pp} 並びに最小値 $|S_{pp,min}|$ は次の通りである。

超過確率 Q_{pp} は、寿命中に平均して最大値が 1 回負荷されるように予測破断寿命 N_f の $1/N_f$ とした²⁾。

応力 $|S_{pp}|$ の最大値は 80 kg/mm²、60 kg/mm² の 2 種類を選び、それぞれの最大値に対し、最小値は 45 kg/mm² から 1 kg/mm² まで、40 kg/mm² から 2 kg/mm² までの種々の値を選んだ。最大値と最小値の中間の応力値 $|S_{pp,t}|$ は、上下限値を 1 kg/mm² ごとに分割して負荷応力を定めた。たとえば最大応力値 $|S_{pp,max}|$ を 60

kg/mm², 最小応力値 $|S_{pp,min}|$ を 30 kg/mm² とした時のランダム疲労試験は, 60 kg/mm², 59 kg/mm², 58 kg/mm², ..., 31 kg/mm², 30 kg/mm² の 31 種類の応力値が指数分布に従って負荷される試験である。

実際のランダム疲労試験では, 2章で述べたように応力のピーク値 S_p を上述の荷重条件が満足されるように制御した。なお試験速度は約 4 Hz (4章参照) である。

4 実験結果および考察

本研究では, ランダム疲労試験での繰返し数 N の計数法は, 全ピーク法と呼ばれる応力のピーク値の発生回数を計数する方法である。したがってこの計数法は, 定荷重疲労試験における普通の計数法の 2 倍となる。

疲労寿命は破断時の繰返し数 N_f とした。

4.1 定荷重疲労試験結果

平滑丸棒試験片の完全両振り定荷重疲労試験結果¹⁾ を Fig. 6 に●印で示す。縦軸は応力の Peak to Peak 値の絶対値 $|S_{pp}|$, 横軸は本研究での計数法による破断寿命 N_f で片対数表示である。

実験結果を両対数表示および片対数表示で最小自乗法を用い直線回帰すると, それぞれ次の式が得られる。

$$|S_{pp}| = 123.1 N_f^{-0.0705} \quad (1)$$

$$|S_{pp}| = -9.044 \log N_f + 100.6 \quad (2)$$

Fig. 6 の一点鎖線は (2) 式による S - N 曲線である。

4.2 ランダム疲労試験結果

Fig. 6 は平滑丸棒試験片について縦軸に最小値

Fig. 6 S_{pp} - N_f diagram for constant loading test and $S_{pp,min}$ - N_f diagram for random loading test

(S_{pp} : stress value with peak stress to peak stress

$S_{pp,min}$: minimum stress value with peak stress to peak stress

N_f : number of cycle to fracture)

$|S_{pp,min}|$, 横軸に破断寿命 N_f を片対数表示した S - N 線図である。図中の○印は最大値 $|S_{pp,max}|$ が 80 kg/mm², △印は 60 kg/mm² の実験結果のプロットである。図から実験結果は, 既報^{2),3)} の応力比一定のランダム疲労試験結果と同様に $|S_{pp,max}|$ が 80 kg/mm² に対しては $|S_{pp,min}|$ が 4 kg/mm² まで, $|S_{pp,max}|$ が 60 kg/mm² に対しては $|S_{pp,min}|$ が 6 kg/mm² までは片対数表示で直線近似できるようである。

そこで $|S_{pp,max}|$ が 80 kg/mm² および 60 kg/mm² に対し $|S_{pp,min}|$ がそれぞれ 4 kg/mm² および 6 kg/mm² までの実験結果を用い, 最小自乗法で直線回帰するとそれぞれ次の式が得られる。

$$|S_{pp,min}| = -31.8 \log N_f + 157.1, \quad |S_{pp,max}| = 80 \text{ kg/mm}^2 \quad (3)$$

$$|S_{pp,min}| = -30.7 \log N_f + 193.1, \quad |S_{pp,max}| = 60 \text{ kg/mm}^2 \quad (4)$$

(3), (4) の各式による S - N 曲線を Fig. 6 に実線で示す。

応力比が一定で, 応力振幅の密度分布が指数分布のランダム疲労試験では短寿命域 (約 10^4 回) および長寿命域 (約 10^6 回) での寿命のばらつきは, 定荷重疲労試験とはほぼ同じであるという結果が得られている¹⁾⁴⁾。

また, 同様のランダム疲労試験において疲労限が明確に表われ, Fig. 2 に示した $S_{a,min}$ - N 線図が得られている²⁾³⁾。本研究の場合, ランダム疲労試験での疲労限を $|S_{pp,FR}|$ およびその時の繰返し数を N_{FR} とすると $|S_{pp,min}|$ が $|S_{pp,FR}|$ より小さい領域の S - N 曲線は既報 (文献 2, 2.2 参照) と同様の考え方から次式が与えられる。

$$|S_{pp,min}| = \frac{(|S_{pp,FR}| - |S_{pp,max}|) \log N_f + |S_{pp,max}|}{\log N_{FR}} \quad (5)$$

$|S_{pp,max}|$ が 60 kg/mm² のランダム疲労試験では, (5) 式を用い疲労限 $|S_{pp,FR}|$ を 6 kg/mm², その時の繰返し数 N_{FR} を 1.2×10^6 回とすると, Fig. 6 に破線で示すように実験結果をよく推定できる。しかし, $|S_{pp,max}|$ が 80 kg/mm² の場合には, $|S_{pp,min}|$ が 3 kg/mm² の実験結果が大きくばらつき, かつ疲労限が明確に表われているとはいえないようである。実験結果のばらつきについては, 現在検討中であるが今のところ明らかではない。

平均応力および応力振幅が, ともにランダムに変動する荷重条件での疲労挙動-疲労寿命のばらつき, 疲労限などを明らかにするためには, 今後さらに多くの実験的考察並びに理論的考察が必要で, 現在引き続き研究を継続中である。

Fig. 7 は軟鋼 STPY 41 パイプ材 (降伏応力 35.6

Fig. 7 Comparison of fatigue strength diagrams between mild steel SM 41 B and mild steel STPY 41

(S_{pp} : stress value with peak stress to peak stress

$S_{pp,min}$: minimum stress value with peak stress to peak stress

N_f : number of cycle to fracture)

kg/mm², 引張強さ 47.4 kg/mm², 伸び 38.2%) の完全両振りの定荷重疲労試験, および応力振幅の分布が指数分布であるランダム疲労試験の結果²⁾と, 本試験結果とを比較した $S-N$ 曲線である。縦軸は $|S_{pp}|$ および最小値 $|S_{pp,min}|$, 横軸は本研究での計数法による破断寿命で片対数で表示してある。

材料が若干異なるため, 直接の比較はできないが, 定荷重試験による疲労強度は, STPY 41 材のほうが SM 41 B 材より低い, ランダム疲労試験では逆に STPY 41 材のほうが高くなっている。すなわち, ランダム疲労試験において平均応力が零の時の強度は, 平均応力が変動するときの強度に比べ高く, 平均応力の影響が現われている。したがって, 平均応力も変動するようなランダム疲労試験結果を, 応力比が一定 (または平均応力が一定) のランダム疲労試験結果から予測することは容易でないようである。

4.3 直線被害則によるランダム疲労試験結果の累積被害値

ランダム荷重下での疲労寿命は現在ほとんど直線被害則を用いて予測され, その際に必要なランダム荷重波形計数法はおよそ 20 種類あるうち, レインフロー法⁵⁾が広く用いられている。

本ランダム疲労試験結果の一部について, 限界累積被害値 f_{cr} を次のように求めた。波形計数法は平均応力の変動を考慮したレインフロー法⁵⁾ および, 比較のために平均応力の変動を無視し, 応力の Peak to Peak 値 S_{pp} のみを対象とするレンジ法⁶⁾を用いた。 $S-N$ 線図としては, (1)式および任意の平均応力がある場合の $S-N$ 線図を著者らの提案法⁷⁾を用いて求め, 修正 Miner 則により f_{cr} を計算した。最小値 $|S_{pp,min}|$ と f_{cr} の関係

Fig. 8 Relation between $|S_{pp,min}|$ and f_{cr}
($S_{pp,min}$: minimum stress value with peak stress to peak stress
 f_{cr} : usage factor at fracture)

を Fig. 8 に示す。図中の○印は, 最大値 $|S_{pp,max}|$ が 80 kg/mm², △印は $|S_{pp,max}|$ が 60 kg/mm² のレインフロー法による結果のプロットで, ●, ▲印は, $|S_{pp,max}|$ がそれぞれ 80 kg/mm², 60 kg/mm² のレンジ法による結果のプロットである。

図から両波形計数法による結果とも $|S_{pp,max}|$ が 60 kg/mm² の試験では, ある $|S_{pp,min}|$ を境にして f_{cr} は増加し始めている。この境の応力が前述の疲労限 $|S_{pp,FR}|$ であり, 疲労限以下の荷重は材料に被害を与えないにもかかわらず, 修正 Miner 則では被害値として加算するため, Fig. 8 のような表示をした時疲労限を境として増加し始める。これは応力比一定のランダム疲労試験の結果²⁾と同様である。しかし, $|S_{pp,max}|$ が 80 kg/mm² の試験では, 疲労限が明らかでないため上述のような傾向は現われていない。

また, 図からレインフロー法とレンジ法による結果を比較すると, 寿命推定に極めて大きな差があることが明らかである。さらに $|S_{pp,max}|$ および $|S_{pp,min}|$ などの荷重条件によっても, レインフロー法とレンジ法による f_{cr} のとる値の範囲が異なっている。

疲労寿命を直線被害則で予測する時は, ①どの波形計数法を用いて応力の頻度分布を求め, ②どの $S-N$ 線図を用い, ③どの累積被害則を使って累積被害値を求め, ④破壊時の限界累積被害値 f_{cr} をいくらに設定するかを定めねばならない。本試験結果および他の研究結果^{1), 2), 8)}から限界累積被害値の定量的な値は使用する $S-N$ 線図によるものの, 定性的には波形計数法, 材料, 荷重条件などにより一定値にはならないといえる。したがって直線被害則を用いるには, ランダム疲労試験結果または実構造物あるいは機器の損傷例 (これも現場でのランダム疲労試験結果といえる) がなければ, 上述の①, ②, ③, ④を定める拠りどころがない。それ故, 疲労寿命推

定の信頼性向上のため今後はますますランダム疲労試験の資料の蓄積が望まれる。

5 結 言

本研究は、ランダム荷重下の疲労寿命あるいは許容応力を直線被害則によらないで、一定荷重下の $S-N$ 線図と同じ意義を持つランダム荷重下の $S(Q)-N$ 線図から求めることを目的とする研究の一環で、第5報では平均応力および応力振幅がともに変動するランダム荷重を対象とした寿命予測法（疲労試験法）を提案した。

そして軟鋼平滑丸棒試験片を用い、応力のピーク値から続く応力のピーク値への変動量 S_{pp} の絶対値 $|S_{pp}|$ が、指数分布であるランダム疲労試験を用い、寿命予測法の有用性あるいはランダム荷重下の疲労挙動を考察した。その結果、一部の試験結果で寿命予測法の有用性を確かめることができたが、疲労寿命のばらつきなど、未だ明らかにできない点もある。

今後は、引続き寿命予測法あるいは疲労寿命のばらつきなどに関して検討を加える予定である。

参 考 文 献

- 1) 八木順吉ほか：ランダム荷重下での疲労挙動に関する研究（第1報），日本造船学会論文集，第152号（1983），pp. 361-371.
- 2) 八木順吉ほか：ランダム荷重下での疲労挙動に関する研究（第3報），日本造船学会論文集，第158号（1985），pp. 597-604.
- 3) 八木順吉ほか：ランダム荷重下での疲労挙動に関する研究（第4報），日本造船学会論文集，第160号（1986），pp. 539-544.
- 4) 富田康光ほか：指数分布ランダム荷重下の疲労寿命の統計量，関西造船協会誌，第207号（1987），発表予定.
- 5) たとえば，遠藤達雄ほか：Rain flow method の提案とその応用，九州工大研究報告（工学），No. 28（1974）.
- 6) 関 護雄：実働荷重疲労試験結果の繰返数比演算法による整理，材料，第12巻第113号（1963），pp. 13-17.
- 7) 八木順吉ほか：鋼材の低サイクル疲労に関する研究（第4報），日本造船学会論文集，第138号（1975），pp. 431-438.
- 8) たとえば，飯田國廣ほか：ランダム荷重を受ける構造部材の寿命推定システムの開発研究，昭和59年度科学研究費補助金研究（試験研究1）成果報告書，（1985）.