ピーク荷重を含むプログラム荷重の疲労寿命に及ぼす影響*

伊 吹 幸 彦** 岩 谷 隆 史**

Effect of Program Load Including Peak Load on Fatigue Life of Materials

by

Yukihiko IBUKI and Takashi IWAYA

(Numazu Technical College, Numazu)

The authors carried out some fatigue tests under a set of program load which include peak load.

The conclusions are as follows :

- (1) The effect of loading sequence on the fatigue life becomes greater, when the lowest stress level σ_1 in program load becomes larger in this research.
- (2) The value of $\sum (n/N)$ sometimes becomes considerably smaller than unity when the lowest stress level σ_1 is small.
- (3) It appears that the understress that is lower than the endurance stress can reduce the fatigue life of the specimen in a program load.
- (4) The increasing rate of horizontal deflection of the fatigue specimen is greater than that of vertical deflection, under the program load which include large stress.

(Received Feb. 12, 1976)

1 緒 言

実際の機械構造物に作用する実働荷重は、そのひん度分布から明らかなように大部分は耐久限度以下の応力レベルからなり、耐久限度を越すような応力がひん度分布の中に占める割合はきわめて小さいのが普通である。これまで多くのプログラム荷重試験によりプログラム順序やプログラム周期の影響などが、とくに耐久限度以上の過大応力の組合せによるプログラム試験による疲労寿命について多く調べられている。また最近では耐久限度以下の応力を含むプログラム荷重による実験が多数行なわれ、過小応力の疲労被害に及ぼす影響についての研究が行なわれているが、その間の強度とともに変形挙動を調べた例は少ないと思われる。

そこで筆者らは、静曲げ降伏点を超過するようなピーク荷重と耐久限度以下の過小応力を含む5段多重重複回転曲げ疲労試験を行ない、疲労寿命に及ぼすプログラム荷重の負荷順序の影響および過小応力の影響を調べた。併せて、実験中における試験片の縦方向および横方向のたわみ変形の挙動について考察した。

2 供試材料および実験方法

実験に供した材料は構造用炭素鋼 S35C で、その化学成分を Table I に、機械的性質を Table II に示す。

試験片の形状および寸法を Fig.1 に示す。使用した試験機は河本式均一モーメント型回転曲げ疲労試験機で、試験中試験片中央の縦方向および横方向のたわみを測定した。試験速度は普通の疲労試験の繰返し荷重の範囲すなわち応力が約 40 kg/mm² 以下では 1600 r. p. m とし、大荷重を負荷するときは繰返し数がきわめて少なく、また試験片に生ずるたわみが非常に大きくなるため 16 r. p. m で負荷した。まず荷重検定として行なった静的曲げ試験結果を Fig.2 に示す。つぎにプログラム試験における応力の分布は最大応力が静曲げ降伏点を超過し、最小応力が耐久限度以下になるよう $\sigma_5=3\sigma_1$, $\sigma_4=2.5\sigma_1$, $\sigma_3=2\sigma_1$, $\sigma_2=1.5\sigma_1$ にとり、繰返し数は、最大応力をピーク荷重として作用させるため実験実施上繰返し速度 16 r. p. m の最小の値とし

Table I. Chemical composition of the material (%).

Com. Mat	C	Si	Mn	P	S	Ca	Ni	Cr
S35C	0.33	0.27	0.64	0.013	0.02	0.02	0.01	0.01

Table II. Mechanical properties of the material.

Yield point	Tensile strength	Elongation	Reduction of area	H_B
kg/mm ² 38.0	kg/mm ² 57.6	30.1%	56.6%	171

* 原稿受理 昭和51年2月12日

** 正 会 員 沼津工業高等専門学校 沼津市大岡

Fig. 1. Test specimen.

Fig. 2. Static bending test results.

て10回とし、1ブロックが24時間になりかつ対数正規分布に近似した値をとるよう $n_5=10$, $n_4=24$, $n_3=210$, $n_2=8500$, $n_1=2 \times 10^6$ として5段多重繰返し試験を行なった。またマイナー則では寿命に直接被害を及ぼさないと考えられる耐久限度以下の最小応力 σ_1 を省いた4段多重繰返し試験、および最小応力 σ_1 と最大応力 σ_5 のみによる2段多重繰返し試験を行ない5段の場合との寿命を比較した。プログラム荷重負荷順序については、いずれも Fig. 3 に示すような(i)漸増漸減型 (ii)漸減急増型 (iii)漸増急減型の3種について

Fig. 3. Program loading in order.

行ないその間の関連についても検討した。

3 実験結果および考察

供試材料について行なった一定応力疲労試験における S-N 曲線を Fig. 4 に示す。この結果耐久限度を約 25 kg/mm^2 と定め、また繰返し速度の 16 r.p.m と 1600 r.p.m による寿命への影響はほとんどないと考え、以下の多段多重プログラム試験においては約 35 kg/mm^2 以上の大応力を 16 r.p.m で負荷した。

Fig. 4. S-N diagram (Constant stress tests).

Fig. 5. Variation of vertical and horizontal deflection during the constant stress tests.

つぎに一定応力試験における縦たわみおよび横たわみの変化曲線を Fig. 5 に示す。図中の数字は一定負荷応力を表わす。この図から、応力が増大するにつれて両方向のたわみは増加し、とくに高応力になるにつれて両方向のたわみの差が減少することが認められる。これは負荷に対する変形の時間遅れにより横たわみが大きくなると考えられる²⁾。

つぎにプログラム試験結果を Fig. 6 に示す。応力段階の設定は、一定応力試験における耐久限度が約 25 kg/mm^2 となり、最小応力 σ_1 のみをこれ以下にすることから $\sigma_1=17, 20, 24 \text{ kg/mm}^2$ の3段階にとりて行なった。図の右下の曲線は2段および5段多重繰返し試験の場合の破断繰返し数 N を過小応力 σ_1 について

Fig. 6. S-N diagram (Program stress tests).

表示したもので、応力負荷順序によって区別してある。

5段における $\sigma_1 = 24 \text{ kg/mm}^2$ の場合、応力負荷による寿命の差は大きく現われ、漸減急増型、漸増漸減型、漸増急減型の順に寿命が長くなる。それは漸減急増型においては、プログラム初期応力はピーク応力 σ_5 から開始することとなり、漸次低下する応力 σ_4 , σ_3 , σ_2 によって被害は蓄積され、また漸増急減型の場合は、過小応力 σ_1 による繰返し数の蓄積は寿命を強化するものと思われる。この負荷順序による寿命の差は相対的に各応力が高いところで認められる。2段の場合も同様の傾向を示すが、 $\sigma_1 = 20 \text{ kg/mm}^2$ ではその影響がほとんどなくなり、いずれの場合も約 2×10^7 回で破断した。

図の右上の曲線は先の2段および5段の場合と同様

の結果をピーク応力 σ_5 との関係で表わしたものである。図の中央上の曲線は過小応力 σ_1 を省いた4段多重重複試験の結果を示す。これを一定応力の場合と比較するために、この場合の最小応力 σ_2 について表示すると左下の曲線となる。この場合の負荷順序による影響は5段の場合と傾向は類似しているが、各応力段階においてあまり大きな差は現われない。そして応力の高いところでは一定応力とほぼ等しい寿命を呈するが、低応力すなわち $\sigma_2 = 25.5 \text{ kg/mm}^2$ では過大応力による累積被害が大きいと考えられる。つぎに過小応力 σ_1 が寿命にいかに関与するかを調べるため、5段の場合のおおのの破断繰返し数 N から σ_1 のみの繰返し数 n_1 を引いた $N - n_1$ とピーク応力との関係を棒印で示した。この $N - n_1$ の値は、5段の場合破断はほとんど最小応力段階において生じているのもっぱら周期数による。すなわち1周期の繰返し数は2017478

Fig. 7. Relation between the maximum step stress and cumulative cycle ratio

Fig. 8. Variation of deflection during the program loading tests ($\sigma_5 = 51 \text{ kg/mm}^2$).

回となり $N-n_1=17\,478$ 回となる。したがってこのようにして求められた値は3種の負荷順序の平均的な値となり、4段の場合に比べ過小応力が負荷されること

Table III. Cumulative cycle ratio in one block.

	Stress (kg/mm ²)	Cu- mulative cycle ratio $\sum n/N$	Stress (kg/mm ²)	Cu- mulative cycle ratio $\sum n/N$	Stress (kg/mm ²)	Cu- mulative cycle ratio $\sum n/N$
σ_5	51	0.0077	60	0.0161	72	0.0375
σ_4	42.5	0.0135	50	0.0336	60	0.0774
σ_3	34	0.0247	40	0.0840	48	0.2456
σ_2	25.5	0.0074	30	0.2394	36	1.5455
σ_1	17	0.0001	20	0.0020	24	0.1818
計		0.0534	計	0.3751	計	2.0878

Fig. 9. Variation of deflection during the program loading tests ($\sigma_5=60$ kg/mm²).

により幾分寿命が低下する。

つぎに小さな×印は前述の5段多重重複試験のおのの繰返し数を2倍にとったときの σ_1-N 線図で、応力の高いところでは漸増漸減型と急増漸減型とは過小応力段階に入る以前に破断したため、 N の値は著しく小さくなるが、前と同様に $N-n_1$ と σ_5 との関係を示すと大きな×印となり4段の結果とほぼ一致する。

以上の結果をもとに Figs. 4, 6 に破線で示したような一定応力試験による $S-N$ 曲線の耐久限度付近を延長した直線に基づき修正マイナー則により算出した $\sum n/N$ とピーク応力 σ_5 との関係を Fig. 7 に示し、同様にして求めた1ブロック中の各応力の繰返し数比を Table III に示した。この図から2段の場合の負荷順序の影響は応力の高いところでより大きな差を示すが、いずれの場合にも $\sum n/N=1$ よりかなり小さな値を示し、急激な応力変動のある方が寿命の低下が著しい。4段および5段の場合、各応力レベルが低いところすなわち破壊までの周期数が多いと、応力負荷順序はあまり影響なく $\sum n/N$ の値は小さくなるものと考えられる。なお本実験のいずれの場合も、破断繰返し数の中で耐久限度以上に相当する荷重の占めるひん度はただか2~3%に過ぎない。また過大・過小応力の変動により累積被害は大きくなるが、過小応力が耐久限度に近いほどコーキング効果の関係からその程度が小さくなっていると考えられる。

つぎにプログラム試験中のたわみ変化曲線の一例を Figs. 8~10 に示した。Fig. 8 は負荷応力が $\sigma_5=51$ kg/mm², Fig. 9 は $\sigma_5=60$ kg/mm², Fig. 10 は $\sigma_5=72$ kg/mm² の場合を示す。各試験とも応力が低いときはたわみも少なく途中の変化も少ないので適宜省略してある。各試験とも負荷順序によるたわみの差はほとんどなく、繰返し数の増加につれて両方向のたわみはわずかながら増加するが、その増加の程度はしだいに減少し、ほぼ一定になる傾向がみられる。縦たわみと横たわみを比較すれば、横たわみの変化は縦たわみ

Fig. 10. Variation of deflection during the program loading tests ($\sigma_5=72$ kg/mm²).

の変化よりおくれる。すなわち, Figs. 8, 9 の上図にみられるように, 最初 σ_3 を負荷しても横たわみはあまり大きくないが, σ_4 および σ_5 を負荷した後においては, 明らかに横たわみが生じている。Fig. 9 の上図に見られるように 2 周期以後では, ピーク荷重を負荷する直前で荷重を増加させても変形の減少する場合のあるのがみられた。

4 結 言

(1) 本実験においてはピーク荷重を含むプログラム荷重を受ける場合, 最下段応力 σ_1 が大きいほど負荷順序による寿命への影響は大きい。

(2) 最下段応力 σ_1 が小さいときは $\sum n/N$ の値は 1

よりかなり小さくなることがある。

(3) 耐久限度以下の過小応力でもプログラム疲労寿命を低下させるものと思われる。

(4) 一般に応力が過大になるにつれて, 横たわみの増加する割合は縦たわみの増加する割合より大きくなる。

(昭和50年11月21日 シンポジウム「疲労における最近の諸問題」にて講演)

参 考 文 献

- 1) 河本 実, 住広克己, 木田宏二, 材料, **15**, 49 (1966).
- 2) 河本 実, 伊吹幸彦, 石川 浩, 材料, **16**, 97 (1967).