衝撃プログラム荷重下における疲労強度および 疲労き裂の発生, 進展について*

中山 英明** 金山 幸雄*** 式田 昌弘***

On Fatigue Strength and Fatigue Crack Propagation Behavior under Impact Program Load Condition

by

Hideaki NAKAYAMA

(Faculty of Junior College of Automobile Industry, Osaka Industrial University, Daito)

Yukio KANAYAMA and Masahiro SHIKIDA

(Faculty of Engineering, Osaka Industrial University, Daito)

As one of the investigations to reveal the effect of impact load on the fatigue behavior, *i.e.*, fatigue life, fatigue crack initiation and propagation, a series of fatigue tests was conducted with a cantilever type rotating bending fatigue testing machine equipped with an impact loading device under two sorts of program load patterns; one is the impact program load condition in which the maximum bending stress followed by the transitional decaying vibrational load appears by an impact load at the rise time of the primary stress and another the ordinary periodical 2-step program load condition.

Here, annealed 0.23% C carbon steel specimens with a small hole on the plane of the minimum sectional area were used to observe the behavior of fatigue crack initiation and propagation during the fatigue process. The experimental results were discussed from two points of view; the equivalent number of overstressing cycles and the cumulative damage in the modified Miner's rule concept.

From the comparison of the equivalent number of overstressing cycles for crack initiation with that for fatigue failure, it was concluded that the impact program load pattern like the one in this experiment is more detrimental to propagate fatigue cracks than to initiate those. Such a fatigue behavior in the impact program condition is also recognized from the discussion based on the cumulative damage in the modified Miner's rule concept, that is, the ratio of the cumulative damage for crack initiation to that for fatigue failure takes generally a higher value than the value in non-impact fatigue load conditions. (Received May 21, 1979)

キー・ワード: 衝撃プログラム荷重, 定常プログラム荷重, 疲労き裂, 累積被害

1 緒 言

実際の機械構造物の置かれるいわゆる実働荷重状態を想定するとき, 過大応力の作用は極めて小頻度であり, またこの過大応力が衝撃的に作用する場合のあることは例えば鉄道車輛の車軸などに関して良く知られているところである¹⁾。こうしたことより, 筆者らの一人は以前より衝撃荷重下での金属材料の疲労挙動に着目し, 引張圧縮両振荷重下での系統的な衝撃疲労研究を行い, そこにおいて強度面および非弾性ひずみ挙動の側面よりなる衝撃疲労特性を明らかにしてきたが²⁾, 特に強度特性として衝撃荷重下では通常の正弦波荷重

下に比して疲労強度の低下を生じることを示した。

さて, 衝撃荷重を含む実働荷重条件下での金属材料の疲労問題を考えるに際して, 衝撃荷重が連続的に作用する場合と通常为非衝撃性荷重の中に間欠的に作用する場合の二種の条件が考えられ, 例えば機械式プリンタの印字ハンマーのように打撃機構そのものを基本的作動とする機械構造物を除外すれば, 特に工業的観点より後者の場合における疲労挙動に関する知見を有しておくことは重要と考えられる。そこで筆者らは二段多重回転曲げ荷重を基本荷重とし, これに衝撃荷重が重畳した場合の疲労挙動を調べるため一連の研究を計画し, 得られた結果のいくつかについては既に報告してきた⁴⁾⁻⁶⁾。本報告になる研究は横穴付き試験片を用いて上述した荷重条件下における疲労破壊過程, すなわ

* 原稿受理 昭和54年5月21日

** 正会員 大阪産業大学短期大学部 大東市中垣内

*** 正会員 大阪産業大学工学部 大東市中垣内

ち疲労き裂の発生進展挙動を調べたものである。

ここで、衝撃プログラム荷重条件下においては実験技術上の制約もあり、き裂発生箇所としてもうけた横穴の位置と衝撃負荷サイクルが同期していないため、横穴近傍の応力履歴はかなり複雑なものとなっている。そこで、この種の荷重条件下での結果を整理するに際してはみかけの応力変動を採用し、これより衝撃負荷の効果について検討を加えた。こうした評価法は疲労破壊箇所の応力状態を正確に表現していない意味で幾分の問題はあるが、本実験において生じる現象を巨視的な意味で評価するための一つの簡便法としてここでは用いた。

本研究の結果を上記の手法で評価した場合、通常の二段多重プログラム疲労試験結果との比較において衝撃負荷が特に疲労き裂の進展過程でこれを促進される形で顕著に作用することが明らかとなったので、以下、これについて詳述する。

2 供試材料

本実験に使用した材料は0.23%C炭素鋼であり、その化学成分を Table I に、熱処理条件および静引張試験での機械的性質を Table II に示している。材料はすべてφ20熱間圧延鋼として供給されたものであり、所定の熱処理のもの、Fig. 1 に示す試験片の形状、寸法に機械加工し実験に供した。Fig. 1 にみるように試験片最小断面部に疲労き裂発生箇所を限定するため直径0.3 mm、深さ1 mm の一つの横穴をドリル加工しているが、応力の算定にあたっては横穴による断面積減少分は考慮していない。

3 実験装置および実験方法

本実験に用いた試験機の原理を Fig. 2 に示しているが、図にみるように本装置は通常の片持回転曲げ疲

Table I. Chemical composition of the material.

Material	Chemical composition (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
S25C	0.23	0.26	0.52	0.013	0.022	0.02	0.02

Fig. 1. Shape and sizes of the specimen.

Table II. Heat treatment and mechanical properties of the material.

Heat treatment	Upper yield point $\sigma_{SO}(\text{kg/mm}^2)$	Lower yield point $\sigma_{SU}(\text{kg/mm}^2)$	Ultimate tensile strength $\sigma_B(\text{kg/mm}^2)$	Breaking strength on final area $\sigma_T(\text{kg/mm}^2)$	Elongation $\delta(\%)$	Reduction of area $\varphi(\%)$
900°C, 1 hr, F. C.	30.5	26.4	42.9	85.2	42.8	62.1

Fig. 2. Principle of the rotating bending fatigue testing machine equipped with the impact loading device.

(a) Ordinary program load pattern

(b) Impact program load pattern

Fig. 3. Schematic representation for the ordinary and the impact program load patterns.

勞試験機に衝撃負荷装置を組み合わせたものであり、既報に詳述したようにハンマー（重すいⅡ）の作動状態を適当に調節することにより、通常の二段多重プログラム荷重条件（以下、定常プログラムと呼ぶ）および1次応力への立ち上がり時に衝撃荷重による過渡振動荷重を含むプログラム荷重条件（以下、衝撃プログラム）が得られる。上記2種のプログラム荷重の様子をFig. 3に模式的に示しているが、図中に併せ示す負荷棒に貼付したひずみゲージより検出した減衰振動荷重波形の測定例より減衰期間はほぼ0.2 secであり、この期間中の荷重サイクルは10サイクルを越えないことが認められた。また減衰振動周波数 f_0 は約40 Hzとなり、試験片回転速度 $f_m=60$ Hzとの関連より減衰

Fig. 4. Stress variation on the specimen surface measured with strain gage mounted on the specimen.

過程で試験片に生じる曲げ応力変動は次式で表される。すなわち、

$$\sigma(t) = (\sigma_1' + \Sigma e^{-\alpha t} \sin 2\pi f_m t) \cos (2\pi f_m t + \varphi) \quad (1)$$

ここに、 σ_1' は一定とされる衝撃プログラム中の 1 次応力の大きさ ($=13.4 \text{ kg/mm}^2$)、 Σ は衝撃負荷による応力の増分、 φ は試験片表面上での位置に関する初期位相、また α は減衰係数であり本実験の場合には約 7.7 の値をとった。

さて、Fig. 4 は試験片表面にひずみゲージを貼付し、試作した水銀接点式スリッピングを介して測定した衝撃負荷後減衰過程での応力変動の一例をプログラム荷重変動との対応で示したものである。図にみるように、衝撃プログラム条件下における試験片表面上での応力変動は複雑な形態を示し、その様子はまた(1)式にみるように初期位相 φ により異なり、さらに試験片回転速度と衝撃負荷サイクルを同期させていないため、各衝撃負荷ごとに Fig. 3 (b) に示すような応力変動が試験片上の同一箇所には生じるとは限らず、試験片はかなりランダムな応力状態におかれているものと推察される。このような場合には試験片表面上の各箇所における応力変動によるよりもむしろ荷重条件を明示した形で Fig. 3 中にその測定例を示したようなみかけの応力変動に依拠した簡潔な応力パラメータを用いて便宜的に実験結果を評価するのも一手法と判断され、次章以下においてはそうした手法により衝撃プログラム疲労試験結果に対する考察を行っている。

本試験機においてはハンマーの落差を調節することにより種々の大きさの最大応力 $\sigma_{\max} (= \sigma_1' + \Sigma)$ をもつ衝撃プログラム荷重が得られるが、本実験では $\sigma_{\max} = 33.4, 31.0, 25.0$ および 21.0 kg/mm^2 の条件下で衝撃プログラム疲労試験を行い、一方、定常プログラム疲労試験は 1 次応力 $\sigma_1 = 25.0, 21.0, 18.0$ および 16.0 kg/mm^2 の条件下で行った。

ここで、両プログラム条件下ともに 2 次応力 σ_2 の大きさおよび 1 次応力の作用期間 m_1 は一定であり、それぞれ $\sigma_2 = 11.0 \text{ kg/mm}^2$, $m_1 = 2 \text{ sec.}$ とした。また、プログラム周期 m については $m = 4, 10, 60 \text{ sec.}$ の 3 種を採用した。なお、Fig. 3 にみたように、衝撃プログラム条件下での 1 次応力の作用期間には最大応力に

続く減衰振動応力と定常的 1 次応力 σ_1' が含まれる。

さらに、き裂長さの検出はアセチルセルロースフィルムを用いて横穴近傍のレプリカを採取し、これを光学顕微鏡で測定することにより行ったが、ここでは横穴の径を含む全長をもってき裂長さ l を定義し、き裂長さ l が 0.4 mm に達した時点をもってき裂発生とみなした。

4 実験結果および考察

0.23% C 炭素鋼焼なまし材よりなる横穴切欠き付試験片を用いて行った衝撃プログラム疲労試験における疲労破断寿命および疲労き裂の発生、進展挙動に対応するプログラムパラメータを有する定常プログラム条件下でのそれらと比較しながら、衝撃負荷の影響について以下検討を加えるが、その際には既述のように、衝撃プログラム条件下において試験片横穴切欠き部は各ブロックごとに Fig. 3 (b) に示したような最大応力 $\sigma_{\max}$ に継続する減衰荷重振動を受けるものと仮定している。

4・1 衝撃プログラム荷重下での強度特性

まず、定荷重下での疲労試験結果を示す Fig. 5 より、横穴付き試験片の疲労限度は約 15.0 kg/mm^2 であり、平滑材と記している横穴なし試験片による強度との比較より横穴による切欠き係数 β は約 1.5 の値をとる。なお、図中には既述の定義に基づき後出の Fig. 9 より求められたき裂発生に対する $S-N$ 曲線も併せ示しているが、以下これら 2 本の $S-N$ 曲線をそれぞれき裂発生および破断寿命に対する基本 $S-N$ 曲線と呼ぶ。

次いで、両プログラム条件下での実験結果を Fig. 6 に示しているが、図の横軸には過大応力繰返し数として 1 次応力繰返し数 N_{1f} および衝撃プログラム条件下についてはブロック数 Z_f をとっており、また図中に細線で示すのは基本 $S-N$ 曲線である。

図より、衝撃プログラム条件下での結果は定常プログラム条件下でそれに比してかなり低繰返し数側に位置していることが観察されるが、こうしたことはまずここで無視された減衰期間に含まれる数サイクルの過大応力の効果によるものと考えられる。そこで、1 次

Fig. 5. $S-N$ curves under constant load condition.

Fig. 6. S-N curves for overstressing under two sorts of the program load conditions.

Fig. 7. Approximation to multi-steps program load pattern.

応力と最大応力の大きさが同等である2種の応力レベルについて両プログラム条件下での強度を対応させるに衝撃プログラム条件下においてどれほどの最大応力の繰返し数が要求されるか、換言すれば最大応力の等価繰返し数を算出したが、その結果を衝撃プログラム荷重下での実験点の下に括弧をつけて示している。これらの数値の平均値として約19.0サイクルが得られるが、このことは既述の減衰挙動とはかなり隔たっており、減衰振動域をすべて最大応力作用期間とみなしてもこうした荷重条件下での疲労寿命に対しては過小な評価を与え、適正な寿命評価をなしえないことを示している。

さて、実際の減衰振動荷重を Fig. 7 にその説明図を示すような多段プログラム荷重に近似し、これに基づき3種の方法、すなわち第1ピーク近似法、マイナー則および修正マイナー則により求めた破断までの累積被害をそれぞれ D_1 , D_2 および D_3 としてプログラム周期 m に対して示したものが Fig. 8 である。なお、図において応力の大きさを1次応力 σ_1 で表示しているもの（丸印）は定常プログラム条件下での結果であり、一方、最大応力 $\sigma_{\max}$ によるもの（四角印）は衝撃プログラム条件下でのそれである。

図よりまず、 D_1 および D_2 として求められている衝撃プログラム条件下での結果より、減衰域に含まれる過大応力成分による累積被害の値は小さいことが認められ、次いで D_3 として示す修正マイナー則による整理結果より、定常プログラム条件下での結果は過小応力による弱化効果を示しながらも良く1の回りに収束する様子を示しているが、一方、衝撃プログラム条件下においては最大応力レベルの増加に伴い破断までの累

Fig. 8. Cumulative damage for failure by linear damage rule.

積量の低下する傾向が特徴的に観察される。衝撃プログラム荷重下でのこうした特異な傾向については次節においてさらに検討を加えることとする。

なおここで、本章の冒頭に記述したように、衝撃プログラム条件下での応力条件に対して一定の仮定がとられていることから本節に述べたことは厳密な意味で正確な定量的評価とはなり得ない。しかし、仮りに詳細な応力履歴を評価の基礎にすえたとするならば、より小さな累積被害の値をとり、衝撃荷重の効果がより顕著となることが予想され、また Fig. 8 に対する評価に際しても衝撃プログラム疲労試験結果の相対的關係に対して影響は及ぼさない。こうしたことは次節に述べられる疲労き裂の発生、進展挙動に対する評価に際しても同様であるのでここに付記しておく。

4・2 衝撃プログラム荷重下での疲労き裂の発生、進展について

Fig. 9 に示す各荷重条件下での疲労き裂進展曲線に基づき標記の観点より検討を加えるが、以下示す図においては疲労き裂進展過程で遅延の様子を示した衝撃プログラム条件下における一つの試験結果 ($\sigma_{\max} = 31.0 \text{ kg/mm}^2$, $m = 4 \text{ sec}$) についてはこれを一応除去しており、また、き裂発生時点に遅れを生じた様子を示す定常プログラム条件下での結果 ($\sigma_1 = 16.0 \text{ kg/mm}^2$, $m = 60 \text{ sec}$.) についてはこれを括弧付きで示している。

Fig. 9. Fatigue crack propagation curves.

Fig. 10. Crack initiation curves for overstressing.

まず、Fig. 10 に示すのは過大応力のみを考慮したき裂発生に対する $S-N$ 曲線であり、図中細線で示すのはき裂発生に対する基本 $S-N$ 曲線である。図にみられる各荷重条件下での $S-N$ 曲線の相対的位置関係は Fig. 6 におけるそれと同様であるが、前述と同様の考え方で算出された衝撃プログラム条件下での最大応力に対する等価繰返し数は Fig. 6 に示すそれらに比して幾分小さな値をとっていることが観察され、いまこれらの平均値をとれば約10.8を得る。

次いで両プログラム条件下での疲労き裂進展挙動の相違について量的検討を加えるため、き裂長さが1 mm から3 mm の区間に関して両荷重条件下での1ブロックあたりの平均き裂進展速度を求めたが、その結果を Fig. 11 に示している。図中、実験点の近傍に添えた括弧の中の数値は Fig. 6、もしくは Fig. 10 における同様の等価繰返し数であるが、Fig. 10 に示したき裂発生に対する数値に比べてより大きな値をとっており、これら両図より、本実験におけるような形態

Fig. 11. Mean crack propagation rate in one block.

Fig. 12. Value of the ratio N_e/N_f against the total number of stress cycles to failure.

の衝撃荷重は疲労き裂発生前後で影響の仕方が異なり、特に進展過程でそれを促進させる方向で顕著に作用することが認められる。

ここで、両プログラム条件下でのき裂発生時期をみるため、総応力繰返し数に基づき、破断寿命に対するき裂発生寿命の比 N_e/N_f を破断寿命に対して示したものが Fig. 12 である。図にみるように、定荷重下および定常プログラム荷重下におけるこの比の値は破断寿命の増加に伴い漸次増加する傾向を呈するのに対し、衝撃プログラム荷重下におけるそれは破断寿命に対してはば一定な値を示しているが、特に破断寿命 $N_f = 10^6$ 回付近にみられるように、衝撃プログラム条件下における方が定常荷重条件下に比して大きなき裂発生寿命比 N_e/N_f をとることは衝撃荷重下での疲労き裂発生、進展挙動を考えるうえで留意を要する点であろう。

さて、上述のことを過小応力効果を含めて考察するため、各荷重条件下におけるき裂発生までの累積被害 D_0 およびき裂発生後破断までのその値 D_p をそれぞれ修正マイナー則により求め、それらの値を両対数紙上に示したものが Fig. 13 である。ここで、同図の作成に際して定常プログラム条件下ではプログラム周期による傾向上の変化がみられたので、これにより実験点

Fig. 13. Values of the cumulative damage for crack initiation D_c and of that for propagation D_p .

記入上の分類を行い、一方、衝撃プログラム条件下では最大応力およびプログラム周期ともに一定の変化傾向を与えたので最大応力別に分類し、周期 m については実験点に添字した。なお、図中には参考のためFig. 5 に示した定荷重下におけるこれらの値 D_c および D_p を小さな白丸で併せ示している。

まず、図より定荷重下および定常プログラム条件下での結果について、Fig. 8 に示した破断までの累積被害 $D_3 (=D_c + D_p)$ に対して D_c がどの程度の割合を占めるかをみるため、算出値の上, 下限をとったばらつき帯を2本の破線で示しているが、これより定常荷重下での D_c はほぼ $(0.07 \sim 0.15)D_3$ の範囲に収まることが観察される。

次いで衝撃プログラム条件下での結果を定常荷重下でのそれとの比較においてみると、全体として大きな値の累積被害比 D_c/D_3 を要していることが観察され、上述された過大応力のみに着目した等価繰返し数によると同様の評価が過小応力を評価した形でもなされうることがわかる。

さらに、過小応力効果に対応するプログラム周期 m の影響についてみると、衝撃プログラム疲労試験結果のうち比較的最大応力値の小さい場合にのみ他の条件下での傾向とは異り、周期の大きなるほど安全側に移行する様子を示す。こうしたことは定常荷重下および比較的大きな過大応力を伴う場合の衝撃プログラム条件下と上述の場合とで過大応力作用時の疲労破壊核の生成の仕方が異り、このことが過小応力効果を規定することによると推察され、間欠的に衝撃負荷が作用する場合の過小応力効果を考えるうえで留意すべき点を示唆しているが、この種の現象については今後の研究の中で明らかにして行きたい。

5 結 言

本研究は0.23% C炭素鋼焼なまし材よりなる横穴付

き試験片を用いて定常プログラム条件下から衝撃プログラム条件下までの一連の回転曲げ疲労試験を行い、疲労寿命および疲労き裂発生、進展挙動に及ぼす衝撃荷重の影響を調べたものである。

本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

(1) 両プログラム条件下での疲労寿命を過大応力にのみ基づき評価した場合、衝撃プログラム中の減衰期間をすべて最大応力作用期間とみなしても衝撃プログラム疲労寿命に対しては過小な評価を与える。

(2) 修正マイナー則により破断までの累積被害をとった場合、定常プログラム疲労試験結果は良く1の回りに収束するが、衝撃プログラム条件下でのそれは最大応力の上昇に伴い顕著な低下傾向を示す。

(3) 定常プログラム条件下との対応より、疲労き裂発生までおよび進展過程における衝撃プログラム条件下での最大応力の等価繰返し数を算出すると、前者よりも後者に対する方が大きな値を示したが、このことより本実験にみるような衝撃荷重は特に進展過程で大きな寄与をなすことが認められた。

(4) 修正マイナー則に依拠して求めた疲労き裂発生前後における累積被害の相関性については、上の結論(3)との関連より衝撃プログラム条件下ではき裂進展に対する値 D_p が小さな値をとることから全体としての値 D_3 が減じ、このことより定常荷重条件下での結果に比してみかけ上き裂発生までに大きな累積被害比 D_c/D_3 を要する。

おわりに、本実験の遂行に際して熱心な協力を頂いた当時大阪産業大学工学部学生、阿部邦彦、五十嵐修一、坂本正実、清水俊一の諸君に記して謝意を表する。

また、本研究の一部に昭和54年度文部省科学研究費補助金(奨励研究A、課題番号475081)を使用したの付記して謝意を表する。

(昭和54年5月23日 日本材料学会第28期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば、中村 宏, 材料, **16**, 71 (1967).
- 2) 例えば、田中道七, 中山英明, 材料, **23**, 678 (1974).
- 3) Nakayama, H., and T. Tanaka, Bulletin of the Institute for Industrial Research of O.I.U., No. 2, 93 (1979).
- 4) 中山英明, 金山幸雄, 式田昌弘, 阪産大論集, No. 50, 21 (1977).
- 5) 中山英明, 金山幸雄, 式田昌弘, 材料, **28**, 112 (1979).
- 6) Nakayama, H., Y. Kanayama, and M. Shikida, 22nd Japan Congr. Mat. Res., Proc., 187 (1979).