金属材料の衝撃疲労強度について*

田中道七** 中山英明***

On the Impact Fatigue Strength of Metallic Materials

by

Tsuneshichi TANAKA and Hideaki NAKAYAMA

(Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kyoto)

1 ま え が き

金属材料の疲労破壊を防止もしくは予知するには、まず実際の構造要素を置かれている荷重状態の検出および解析、さらにそうした荷重条件下での疲労試験を行ない疲労強度についての知識を得ることが重要である。

従来行なわれている疲労試験の形態を概括、分類すると、正弦波荷重下における基礎的研究およびいわゆる実働荷重下における寿命推定へのアプローチを目的とする各種荷重条件下での疲労試験に大別され、後者に対する荷重条件としては非正弦波荷重¹⁾、重畳波荷重²⁾、プログラム荷重³⁾、ランダム荷重および衝撃荷重⁴⁾などが挙げられる。上記の荷重形態のうち衝撃荷重を除くものは一応非衝撃性の荷重として分類される。こうした非衝撃性荷重のうち、プログラム荷重についてみると毎年10報から20報の研究論文が発表されているが、衝撃荷重下に関するものはほぼ5報前後であり、その研究基盤はまだ浅いようにみうけられる。

さて、衝撃荷重は現象的に定義すれば、二物体が高速で衝突することにより誘起される荷重と考えられ、このようにして生じる衝撃荷重⁵⁾は必然的に材料内部における応力波の伝ばおよび反射を伴うため、疲労試験に際して試験片に生じる応力の検出を一般に困難なものとする。こうしたことより、衝撃疲労試験結果の整理においては応力値よりもむしろ衝撃荷重発生機構より求まるエネルギー値が採用されてきた。したがってこの場合、実験結果はE-N線図上に表示されることになり、衝撃疲労試験は材料の疲労強度に与える衝撃荷重の影響といった観点よりも、むしろ各種材料間の衝撃疲労強度の比較など、材料の相対的衝撃じん性を把握

することを主たる目的とするものであった。そしてこのことは、S-N線図上に表示される他の疲労試験結果との関連を十分に論じ得ないことを意味している。もちろん、こうした従来の衝撃疲労試験の弱点を克服すべく、衝撃試験での衝撃エネルギーと衝撃荷重の関連についての研究報告もあるが、両者の関連は用いた試験機の支持台の剛性や試験片形状さらに衝撃エネルギーの形態および大小によって相違し、一般的に使用される法則とは成り得ていない⁶⁾⁹⁾。しかし、現在ではたとえば抵抗線ひずみゲージを使用することによって容易に荷重が検出されることから、むしろこうした技術的手法によることが多いようである。

さて、数多くの機械系および機械構造要素、たとえば歯車の歯、ローラチェーン、機械式プリンタの印字ハンマ、鉄道車輛がレールの継ぎ目やポイントを通過する際および車輪にフラットが生じたときの車輪や車軸¹⁰⁾、および土木用機械の駆動系などに衝撃性の荷重が働くことはよく知られている。Fig. 1に示すのは機械式プリンタの印字ハンマに生じる衝撃荷重の実測例である。こうした現場からの要求に答え、より適格な設計基準を得るためには衝撃荷重を実働荷重の一環として把握、たとえば正弦波荷重下での疲労強度との比較検討を可能ならしめることが基本的に重要となる。以

Fig. 1. Impact stress pattern in printing hammer.

* 原稿受理 昭和49年4月10日

** 正会員 立命館大学理工学部 京都市北区等持院北町

*** 学生会員 立命館大学大学院 京都市北区等持院北町

下、いままで行なわれてきた衝撃疲労試験結果を概観し、衝撃疲労強度の一般的特性について述べる。

2 衝撃疲労試験の形態、衝撃疲労試験機および衝撃荷重について

現在まで行なわれてきた衝撃疲労試験をみると、その実験形態は二種に大別される。一つは衝突端面での塑性変形もしくは破損を取り扱うものであり、いま一つは衝突現象で誘発された荷重による最弱部での塑性変形もしくは破損を取り扱うものである。いうならば一方は直接衝撃試験、他方は間接衝撃試験と称することができ、それぞれの実験形態を模式的に示すと Fig. 2²⁾ のようになる。

Fig. 2. Two types of impact fatigue tests.

まず直接衝撃疲労試験としては、球と平面¹³⁾、平面と平面¹⁴⁾を衝突させ表面での圧痕の発生、成長を観察するもの、および転しゅう動摩擦との関連で衝撃荷重下での表面破損を調べるものなどが挙げられる。

つぎに間接衝撃疲労試験としては、各種金属材料の衝撃疲労強度を求めるもの、衝撃荷重下でのき裂の進展および履歴現象を観察するもの、残留応力変化のX線の観察、衝撃疲労破面のフラクトグラフィの観察、衝撃疲労強度に及ぼす静的強度や変形抵抗、切欠き、顕微鏡組織、結晶粒度の影響および低温ぜい性との関連、衝撃疲労き裂の進展に及ぼす結晶粒径の影響、および繰返し衝撃引張りに及ぼす緩衝効果などを調べたもの、さらに衝撃応力の大きさおよび応力持続時間の塑性変形に与える効果および衝撃疲労破壊との関連を調べたものなど多種多様な研究が行なわれている。また、上の二つの形態とは分類を異にするが、衝撃荷重を受ける実物要素に対する衝撃疲労試験も古くより行なわれている。

さて、上記両形態の衝撃疲労試験に使用される装置としては、衝撃引張荷重を与えるアムスラー形万能衝撃試験機、藤井式万能繰返し衝撃試験機、落下式繰返し衝撃引張疲労試験機、回転円板式衝撃疲労試験機、衝撃圧縮荷重を与える落錘式衝撃試験機、衝撃曲げ荷

重を与える松村式繰返し衝撃試験機、および衝撃引張圧縮両振り疲労試験機などがある。なお、ここに挙げた衝撃疲労試験機に共通していえることは、衝撃荷重を得るのに二物体の衝突によっていることである。こうした衝撃疲労試験の形態を考慮したうえで、現在まで得られた衝撃疲労に関する知見を総合的に考察するにも前述の衝撃荷重の定義は妥当性を有している。

本節の終わりに、衝撃疲労試験機とそこで得られる衝撃荷重波形についていくつかの例を挙げておく。衝

Fig. 3. Tensile impact fatigue testing machine and stress patterns.

Fig. 4. Bending impact fatigue testing machine and stress pattern.

Fig. 5. Push-pull type impact fatigue testing machine and stress patterns.

撃疲労試験においては、そこで得られる荷重波形は試験機に固有なものと考えてよく、それらは研究目的との関連で選択される。実験結果については次節で述べるが、ここでの荷重波形の紹介は幾分の参考になると思う。まずFig. 3に示すのは、茶谷らによる衝撃引張試験機とそこで得られる矩形波状荷重波形である。⁴²⁾ また、Fig. 4は田中による衝撃曲げ試験機と荷重波形であり、衝撃的負荷に続く自由減衰振動が観察される。⁵⁰⁾ Fig. 5は筆者らの使用している引張圧縮衝撃疲労試験機とそこで得られる荷重波形である。⁵⁾

3 衝撃疲労の一般的特性について

衝撃疲労の研究は既述のようにその目的に応じて多岐にわたるが、ここでは特に間接衝撃疲労試験に着目し、従来行なわれてきた衝撃疲労試験において実験繰返し数の上限がほぼ 10^5 回以下のものを低サイクル衝撃疲労、それ以上のものを高サイクル衝撃疲労として取り扱うことにする。

3・1 低サイクル衝撃疲労の一般的特性

実験繰返し数が 10^5 回の範囲内での実験データを基にして、低サイクル衝撃疲労の特性を強度的側面からみれば次のようである。まず、こうした実験範囲内で得られる衝撃荷重波形の実測例をFig. 6に、これの矩形応力波への近似をFig. 7に示しているが、Fig. 7の衝撃応力 σ と持続時間 T の残留ひずみおよび疲労破壊²⁹⁾⁴¹⁾⁴²⁾⁵¹⁾に与える効果に関する研究がいくつか行なわれている。

Fig. 8は茶谷らによる実験結果の一例であるが、図にみるように衝撃疲労寿命が応力の大きさのみならず、持続時間にも規定されることが観察される。この種の試験において応力の大きさ σ 、持続時間 T および破断繰返し数 N は一般に(1)式によって関係づけられる。

Fig. 6. Example of impact stress pattern in low cycle impact fatigue test.

Fig. 7. Approximation of impact stress pattern by rectangular stress.

Fig. 8. S-N curves with parameter T .

$$\sigma N^m T^n = C \quad (1)$$

ただし、 m 、 n 、 c は定数で $m \approx n$

こうしたことは高サイクル疲労における繰返し速度効果との関連も含めて応力持続時間の問題に帰着させ得るものと考えられる。また、こうした繰返し数範囲での衝撃疲労試験結果の中には、応力比を考慮して直線被害則が成り立つという報告もある。⁵²⁾

つぎに、低サイクル衝撃疲労における履歴エネルギーの取り扱いおよび遷移温度の問題について述べる。従来、単一衝撃試験で得られる衝撃値の大小は材料じん性の相対的大小を測る目安として一定の有用性もち、また一方で急激に吸収エネルギーが低下する温度すなわち延性ぜい性遷移温度の存在が知らされている。たとえば、シャルピ衝撃値として測定されるエネルギーはき裂発生に要するエネルギーとき裂の拡大に要するそれとの和よりなり、遷移温度の存在は低温域では後者のエネルギーが小さくなるためと考えられている。⁵³⁾ この単一衝撃試験と静的試験との関連性についても研究がなされているが、⁵⁴⁾ 単一衝撃値と衝撃疲労強度の関連についてはいまだ適格な把握はなされていない。

さて、応力繰返し数の相当に小さい衝撃疲労試験では、疲労破壊機構より衝撃破壊機構が優性であるため、単一衝撃試験の延長として遷移現象が存在しうる。Fig. 9に示すのは永井によるこの種の実験結果であるが、繰返し数 10^3 回を目安にして低温ふん囲気の衝撃疲労に与える効果の異なることがわかる。図にみるように、繰返し数が 10^3 回以上になると疲労破壊機構が優性になり、低温における疲労強度が上昇するようになる。³⁷⁾

このように単一衝撃試験での遷移現象が衝撃疲労に

Fig. 9. E-N curves for several testing temperatures.

Fig. 10. ΔW - N curves for several testing temperatures.

においてもある繰返し数範囲で存在するが、このことを履歴エネルギーの立場からみると次のようである。Fig. 10に示すのは同じく永井による実験結果であり、各実験温度における寿命比50%での履歴エネルギー ΔW の大きさを破断繰返し数に対して示している。図より、 -40°C での結果は他の実験温度でのそれに比して非常に小さな履歴エネルギーで破断していることが観察される。このことは -40°C のふん囲気中では試験片の残留ひずみがきわめて小さく、へき開破壊を生じていることに帰因しており、これに対して、他の実験温度では通常の疲労破壊を示し、実験結果は良く直線上にのることから履歴エネルギーの累積が破壊を決定していることがわかる。なお、繰返し数の増加とともに両者の差は減少する方向にあることがみとめられる。

つぎに、衝撃荷重下での疲労き裂の発生と進展、応力拡大係数との関連およびフラクトグラフィ的取り扱いについて述べる。疲労現象を総合的に評価する立場から、疲労き裂の発生および進展については古くより注意されてきたが⁵⁵⁾、この種の研究は電子顕微鏡の発達および破壊力学概念の国内での普及と相まって最近急速に行なわれるようになった。衝撃疲労き裂に対するこの種の考察例はまだ数少ないが、方法としては正弦波荷重下での結果に対する比較検討を主体とするものである。通常の疲労荷重条件下においては、き裂進展速度 da/dN とき裂長さ a および応力拡大係数の範囲 ΔK との間には、(2)および(3)式に示す関係のあることが知られている^{56,57)}。なお、(2)式における指数 l は2もしくは3の値をとり、(3)式の m については $m=0.5\sim 8.0$ ⁵⁸⁾

$$da/dN = Ba = A\sigma^l a \quad (2)$$

$$da/dN = c(\Delta K)^m \quad (3)$$

の幅広い値をもつが、 $m=4$ とした場合が広域特性によく合致する⁵⁷⁾。さて、これら二式を仲介にして衝撃荷重下でのき裂伝ばをみると、まず(2)式に対して $l=1.9$ ³⁹⁾の値が得られ、(3)式に対しては $m=1.7$ ³⁰⁾および2.2²⁹⁾の値が得られており衝撃荷重下の特異性は見当たらない。さらに -40°C までの低温ふん囲気中で行なわれた

衝撃荷重下でのき裂伝ば観察結果によると、高衝撃エネルギーレベルでは低温ふん囲気中の方がき裂発生時期は早い²²⁾が、低衝撃エネルギーレベルにおいてはこの関係の逆転することが示されている。

ついで電子顕微鏡による疲労破面観察結果によると、衝撃疲労破面に観察される striation の形成機構に対しては Laird のモデル⁶⁰⁾がそのまま適用でき、最終破断箇所ではへき開破壊面としての river pattern を呈している^{29,30,39)}。

3・2 高サイクル衝撃疲労の一般的特性

応力繰返し数 10^6 回付近までの衝撃疲労試験結果についての報告は比較的早くよりあるが、たとえば欠陥材での相対的強度を求めるなど比較試験としての性質を有しており、さほど設計資料として重宝なものではない。本節では特に設計工学への寄与という観点から高繰返し数領域での衝撃疲労強度について述べ、あわせて非弾性ひずみ挙動からみた衝撃疲労挙動および諸因子の影響について簡単にふれる。

まず強度側面から衝撃疲労特性を考察するため、Fig. 11に秋園らによる実験結果を、Fig. 12, 13に筆者らによるものをそれぞれ示している。Fig. 11は0.21% C炭素鋼での繰返し衝撃引張疲労試験結果であり、試験片のロードセル部より検出した荷重波形を図中にあわせ示している。この実験は衝撃疲労強度に及ぼす結晶粒度の影響を調べたものであり、図中の記号 A, B, Cはその相違を示すものである。また正弦波荷重下での疲労試験を行なうに、図中に示した衝撃波形の $\sigma_{l\max}$ および $\sigma_{e\max}$ の値を採り、平均荷重をもつ正弦波荷重によっており、この結果を細線で示してい

Fig. 11. S-N curves for 0.21% C carbon steel.

Fig. 12. S-N curves for 0.53% C carbon steel.

Fig. 13. S-N curves for SCM alloy.

る。Fig. 12は0.53% C炭素鋼での、Fig. 13は SCM 4鋼でのFig. 5に示した試験機による一連の実験結果である。なお、Fig. 12および13中にある $P_c=500$ kg, $P_c=800$ kg はそれぞれ正弦波荷重に対する実験条件であり、また $CL=0.02$ mm は衝撃荷重に対するそれである。

さて、これらの図より、正弦波荷重下での強度と比較しながら衝撃荷重下でのそれをみると次のことがいえる。まず、上の三つの図に共通していえることは、比較的高繰返し数領域における衝撃荷重下での強度低下である。しかし、低繰返し数領域における強度低下の仕方は0.21% Cおよび0.53% C炭素鋼の場合とSCM 4鋼の場合で様子が異なり、SCM 4鋼では実験繰返し数全域にわたる衝撃荷重下での強度低下が観察される。ところで、実際の設計に際してより重要なのは、高繰返し数領域での衝撃疲労強度とりわけ耐久限度に関する事柄であろうが、これについては上の三つの図にみられるように二つの異なる傾向がある。一つはFig. 11および13にみるように衝撃荷重下においてもいわゆる限界繰返し数が存在し、耐久限度のある場合、いま一つは図にみるように衝撃荷重下では繰返し数 10^7 回以上でも破断が生じ、S-N曲線は滑らかに降下するように引かれ、耐久限度を示さない場合である。このような高繰返し数領域での衝撃疲労強度の一般的特性をさらに明確にするにはこの種の実験結果がまだ少なく、個別的な結果しか示し得ないが、いずれにしても高繰返し数領域での強度低下さらに耐久限度の存在しない場合のあることは注意を要するところである。

さて、Fig. 5に示したように、筆者らの実験での荷重波形は一種の重畳波の様相を呈している。そこで重畳波での疲労強度を考察する際の整理方法をもってFig. 12をかき直したものがFig. 14である。なお、その場合、衝撃応力波形を周波数 $f_1=57.5$ Hzの基本波 σ_1 と二次波 σ_2 より成ると考え、特に応力波形のピーク付近を対象にして σ_2 の大きさおよびその周波数 f_2 をもとめ、最大応力振幅 $\sigma_{\max}$ と破断までの基本波の

Fig. 14. Relation between $\sigma_{\max}$ and N_1 for 0.53% C carbon steel.

繰返し数 N_1 との関係を $\sigma_2/\sigma_{\max}$ をパラメータとして示している。ここで、従来の重畳波応力による疲労の研究結果と対比させて考えると、Fig. 14に示した $\sigma_2/\sigma_{\max} \leq 0.1$ のような重畳波応力のもとでは疲労強度の低下することではなく、むしろ増加する場合さえある。したがって、二次波の周波数が約665 Hzの高繰返し速度であることを考慮したとしても、この種の衝撃疲労試験結果を従来行なわれてきた重畳波応力による疲労の立場からは説明しえないようである。

また、田中はFig. 4に示した試験機を用いて一連の衝撃疲労試験を行ない、その結果、衝撃的強制変位に続く自由減衰振動に対して直線被害則を適用し寿命推定すれば良く実験結果に一致するという結論を得ている⁵⁰⁾。しかし、推定線に対する実験点のばらつきは危険側に大きいようであり、衝撃条件によってはこの傾向が顕著になるのがみられる。

つぎに、非弾性挙動の立場からみた衝撃疲労特性について述べる。一般に材料の疲労過程としては、初期の応力繰返しにより材料内に結晶格子ひずみが蓄積され、これが疲労損傷の核になり、その後の応力繰返しによってこの核が微視き裂から巨視き裂に成長し、破断に至ると考えられる。こうした過程は試験片表面に貼付したひずみゲージにより非弾性ひずみ挙動として検出され、さらにそれより求まる非弾性ひずみ振幅 Δe および履歴エネルギー ΔW は疲労破壊を考察する上で有力なパラメータであることが知られている。筆者らはこの方法を衝撃疲労研究に取り入れ、こうした側面からの考察も行なってきた^{25)~27)}。以下、非弾性ひずみ挙動からみた衝撃疲労特性の典型的な二例について簡単に述べておく。

まずFig. 15に示すのは、0.53% C炭素鋼による両荷重条件下における非弾性ひずみ振幅と破断繰返し数の関係を両対数紙上に示したものである。図にみるように、正弦波荷重下では、それ以下の値では破断しないといみさせる耐久非弾性ひずみ振幅 Δe_{iw} ($\approx 120 \mu$ strain)⁶³⁾⁶⁴⁾が存在するが、これに対して、衝撃荷重下ではこの Δe_{iw} の約 $1/4$ の値でも破断していることがみら

Fig. 15. $\Delta\epsilon_b$ - N curve for 0.53%C carbon steel.

れる。こうした両荷重条件下での非弾性ひずみ挙動の相違に対する解釈は別報に詳述したが、そこにおいて、衝撃荷重下での非弾性ひずみの顕著な局所化およびそれを疲労破壊の核とした疲労過程の一つの推論として述べた。

さて、上述のように疲労過程を非弾性挙動より得られる諸量をもって論じ得るのは、疲労破壊核としてすべりの発生、進展が支配的な役割を果たし、供試材料が疲労過程でこのような挙動を呈する場合に限られる。しかし一方では、実験技術上検出され得ないほどの少ないすべり帯もしくは表面付近の介在物の切欠き効果に帰因して疲労破壊の生ずる場合が考えられ、たとえば SCM 4 鋼を用いた筆者らの実験によれば、同材料が正弦波荷重と衝撃荷重の両荷重下において疲労過程で弾性挙動を呈して破断に至ることが観察された。このことは、同材料においては表面層付近の介在物が応力集中箇所となり、そこから疲労き裂が発生、進展した結果であると推論される。このような、介在物が疲労破壊核形成の原因となる場合には、試料表面層付近で介在物の分布密度がある程度以上に小さい場合には疲労強度のばらつきが大きくなることも考慮する必要がある。さらに、衝撃荷重下では介在物による応力集中箇所付近の分布特性、とくに動的応力集中係数を考慮する必要がある。⁶⁵⁾ Fig. 13 にみた SCM 4 鋼の衝撃荷重下での疲労強度低下は、非弾性挙動を呈する材料に考えられた衝撃疲労特性に上述の介在物の影響が重畳したことによると考えられる。

以上、衝撃疲労の強度上の特性および非弾性挙動からみた特性について述べたが、以下、衝撃疲労挙動に

Fig. 16. Impact fatigue behavior of low and high-carbon steels on E - N diagram.

Fig. 17. Relation between the impact fatigue strength ratio and carbon content.

及ばず諸因子の影響として、含有炭素量、切欠き形状および低温ふん囲気を取り上げ簡単に述べる。

Fig. 16 は河本らによる一連の引張衝撃疲労試験より、 E - N 線図上に現われる含有炭素量の影響を、また、Fig. 17 は各繰返し数段階での衝撃耐久比 E/σ_B に与える炭素量の影響をそれぞれ示したものである。なお、Fig. 17 中にはシャルピ衝撃値の引張強度に対する比 I_c/σ_B もあわせて示しているが、これは $N=1$ での E/σ_B に相当する。両図より、次のようなことがいえる。低繰返し数領域では高いシャルピ衝撃値を示す低炭素鋼の方が高い強度を示すが、ある遷移繰返し数以上になると疲労破壊過程が優性になり高炭素鋼の方が高い強度を示すようになる。さらに Fig. 17 の耐久限度に対する衝撃耐久比の様子にみられるように、各炭素含有量を通してほぼ一定の値を示していることから、このような高繰返し数領域では通常の疲労の枠内に包含されることがわかる。一方、藤村らの行った引張衝撃疲労試験結果より、Fig. 17 に準じてその結果を整理したものを Fig. 18 に示している。図に見るように、低繰返し数領域での傾向は Fig. 17 に示した様子と異なっており、 $N=10^8$ での様子についてみると含有炭素量の大きいほど高い強度を示している。しかし、そうした相違も繰返し数の増加とともに平坦化され、 $N=10^6$ では Fig. 17 の場合と同じくほぼ一定の値に落ち着いている。また、藤村らの一連の衝撃疲労試験においては、上記の遷移繰返し数に相当する繰返し数範囲で E - N 曲線の不連続点の現われていることを併記しておく。

ついで、Fig. 19 に河本らおよび浜吉らによる引張衝撃疲労試験での形状係数 α と切欠き係数 β の関係を

Fig. 18. Relation between the impact fatigue strength ratio and carbon content.

Fig. 19. Relation between the notch factor and theoretical stress concentration factor in tensile impact fatigue test.

指定時間強度に対して示しているが、図にみる限り通常の疲労試験でのそれとそれほど異なった傾向は認められない。また、図中の耐久限度に対する β を日本機械学会分科会で提案された切欠き係数 β の実験式と比較したところほぼ一致することから、高繰返し数領域での引張衝撃疲労強度に与える切欠きの効果は通常のそれと大差ないと考えられる。

終わりに、衝撃疲労挙動に及ぼす低温ふん囲気の影響について述べる。高繰返し数領域に及ぶ低温衝撃疲労に関する報告はほとんどないので、筆者らの得た結果に基づいて述べれば大略次のようである。−50℃および−100℃の窒素ガスふん囲気中で行なった試験結果によると、低温ふん囲気中では一様に強度は増加するが、各温度レベルにおいて正弦波荷重下の強度と比較すると、前述したような衝撃荷重下での弱化傾向は必ずしも現われないようである。一方、非弾性ひずみ挙動からみると、二種の低温ふん囲気中での非弾性ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_s$ および履歴エネルギー ΔW と破断繰返し数 N の関係は、大きさを含めて室温下での同様の関係に良く一致する。またそれぞれの温度レベルにおいて、両荷重条件下での非弾性挙動を比較すると、前述した

ような非弾性ひずみ挙動の側面からみた衝撃疲労特性、すなわち衝撃荷重下では正弦波荷重下におけるより小さな $\Delta\epsilon_s$ および小さな ΔW とその累積で破断するという特性を示している。

4 む す び

現在まで行なわれてきた衝撃疲労研究の中間的なまとめを本論で試みた。衝撃荷重の定義から始めたが、本論での定義は実際例をみても、また試験機の構造をみても一応の妥当性を有していると思われるが、まだ衝撃荷重の実測例とそこでの疲労破損の形態に関するデータが少なく、この意味でまだ充分とはいえず将来補完されるべきものとする。

本論に概括したように、たとえば $E-N$ 線図上での傾向、さらに衝撃荷重下での耐久限度の有無について相対する研究報告があるなど、まだ一般的特性をまとめる段階にあるとはいえない。しかし、特に設計工学的立場からは長寿命域での強度特性が問題となるが、こうした繰返し数範囲においては衝撃荷重下で疲労強度の低下する傾向にあることはほぼ認められる。このことは、特に設計上注意を要すると思われる点であり、さらに慎重を期するには、かなりの低応力でも有限寿命設計を行なうべきであると考えられる。しかしながら、衝撃疲労試験結果は使用した試験機すなわち荷重される衝撃荷重の形態に左右される向きもあるので、実際の機械構造物に働く荷重状態の注意深い検出と、それと見合った衝撃疲労試験結果を考察することが現段階では必要と思われる。

おわりに、本論の作成について資料を提供していただいた徳島大学秋園幸一教授および村上理一氏、新潟大学井口宏先生に、また衝撃荷重波形の実測写真をご提供いただいた日本電信電話公社電気通信研究所渋谷淳氏に謝意を表する。

(昭和48年11月22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) 鯉淵興二, 山根雅己, 機論, **34**, 261 (1968).
- 2) 田中道七, 出納真平, 材料, **19**, 629 (1970).
- 3) 田中道七, 藤井 勉, 材料, **22**, 146 (1973).
- 4) 田中道七, 柴田俊忍, 材料, **17**, 72; 195; 258; 386; 443 (1968).
- 5) 田中道七, 中山英明, 機論, **39**, 1073 (1973).
- 6) 日本材料学会, “材料の疲労に関する研究の趨勢”(1960)~(1970) 参照.
- 7) 松本浩之ほか2名, 機論, **30**, 757 (1964).
- 8) 秋園幸一, 金誌, **24**, 822 (1960).
- 9) 秋園幸一, 機論, **30**, 800 (1964).
- 10) 中村 宏, 初野耕三, 機論, **33**, 1893 (1967).
- 11) Grotto, L. A., SAE Journal, **78**, 82 (1970).

- 12) 渋谷 淳, 私信.
- 13) 西山卯二郎ほか3名, 機講論, No.44-1, 44 (1968).
- 14) 西山卯二郎ほか3名, 機講論, No.704-7, 19 (1970).
- 15) 八木 明, 沖田喜代蔵, 機論, **31**, 1315 (1965).
- 16) 藤村義樹, 斉藤 葆, 材料試験, **8**, 673 (1959).
- 17) 藤村義樹, 斉藤 葆, 材料試験, **11**, 613 (1962).
- 18) 藤村義樹, 斉藤 葆, 材料, **12**, 594 (1968).
- 19) Endo, T., Proc. of the 3rd Japan Congr. on Testing Materials, 20 (1960).
- 20) Weltzen, R.D., and G. Koves, ASTM JOM., **3**, 469 (1968).
- 21) 秋園幸一, 金誌, **24**, 826 (1960).
- 22) 永井欣一, 材料試験, **10**, 532 (1961).
- 23) Kondo, S., and H. Iguchi, The 15th Japan Congr. on Material Research-Metallic Materials, 13 (1972).
- 24) 永井欣一, 材料試験, **10**, 604 (1961).
- 25) 田中道七, 中山英明, 機論, **40**, 635 (1974).
- 26) 田中道七, 中山英明, 機講論, No.730-12, 185 (1973).
- 27) 田中道七, 中山英明, 機講論, No.740-1, 39 (1974).
- 28) 村上裕則ほか2名, 材料, **12**, 889 (1963).
- 29) 有井 満ほか3名, 機講論, No.730-1, 9 (1973).
- 30) 井口 宏, 第17回材料研究連合講演会前刷集, 151 (1973).
- 31) 河本 実ほか3名, 機論, **34**, 24 (1968).
- 32) 藤村義樹ほか2名, 材料, **13**, 861 (1964).
- 33) 斉藤 葆, 相場真也, 材料, **16**, 234 (1967).
- 34) 浜吉福治, 岡井紀彦, 機講論, No.730-12, 189 (1973).
- 35) 秋園幸一, 安宅 健, 材料, **21**, 660 (1972).
- 36) 秋園幸一, 村上理一, 日本材料学会第22期学術講演会前刷, 19 (1973).
- 37) 遠藤吉郎, 永井欣一, 材料試験, **8**, 143 (1959).
- 38) 近藤誠治ほか2名, 第17回材料研究連合前刷集, 153 (1973).
- 39) 近藤誠治ほか2名, 機講論, No.730-12, 181 (1973).
- 40) 前川一郎, 樋口均一, 機講論, No.720-1, 57 (1972).
- 41) 茶谷明義ほか2名, 機論, **33**, 190 (1967).
- 42) 茶谷明義ほか3名, 材料, **17**, 408 (1968).
- 43) 河本 実ほか2名, 機誌, **54**, 79 (1951).
- 44) 河本 実ほか3名, 材料試験, **10**, 35 (1961).
- 45) 柴原正雄, 機論, **26**, 1375 (1960).
- 46) 中込昌孝, 材料, **15**, 487 (1966).
- 47) 会田俊夫, 寺内喜男, 材料試験, **5**, 553 (1956).
- 48) 上田太郎, 田中政夫, 材料, **15**, 88 (1966).
- 49) 藤村義樹ほか2名, 材料, **12**, 93 (1963).
- 50) Tanaka, S., Trans. ASME, Ser. D, 84, 535 (1963).
- 51) 田中道七, 中山英明, 材料, **23**, 230 (1973).
- 52) 有井 満ほか3名, 機講論, No.730-12, 193 (1973).
- 53) 石橋 正, 機械の研究, **7**, 233 (1955).
- 54) MacGregor, C.W., and J.C. Fisher, J. Appl. Mech., **11**, A-28 (1944).
- 55) De Frost, A.V., J. Appl. Mech., **3**, A-23 (1936).
- 56) Liu, H.W., Trans. ASME, Ser. D, 83, 23 (1961).
- 57) Paris, P., and F. Erdogan, Trans. ASME, Ser. D, 85, 528 (1963).
- 58) Liu, H.W., Trans. ASME, Ser. D, 85, 116 (1963).
- 59) Frost, N. F., and D. S. Dugdale, J. Mech. Phys. Solids, **6**, 92 (1958).
- 60) Laird, C., ASTM STP 415, 131 (1967).
- 61) 日本材料試験協会疲労部門委員会研究報告, 材料試験, **6**, 581 (1957).
- 62) 河本 実, 田中道七, 材料, **12**, 584 (1963).
- 63) Chang, C. S., W. T. Pimbley, and H.D. Conway, Exp. Mech., **8**, 133 (1968).
- 64) Feltner, C. E., and J. D. Morrow, Trans. ASME, Ser. D, **83**, 15 (1961).
- 65) 松本浩之, 中沢 一, 機誌, **69**, 1666 (1966).
- 66) 藤村義樹, 斉藤 葆, 門脇義次, 材料, **13**, 861 (1964).
- 67) 日本材料試験協会疲労部門委員会研究報告, 材料試験, **10**, 628 (1961).
- 68) 金属材料疲れ強さの資料, p.103 (1961) 日本機械学会