

鋼における過小応力の段階繰返しによる 耐久限度の予知についての一考察

追分重義

金山公夫

(昭和37年9月29日受理)

An Anticipative Increase of Endurance Limit in Steel Subjected to Sequential Repeats of Various Understresses

Shigeyoshi OIWAKE

Kimio KANAYAMA

Abstract

An experimental and analytical investigation was undertaken to study the coxing effect in a low-carbon steel specimen during and after repeated loading of various understresses in the order of their magnitude.

Based on a fatigue energy concept covering its transition and convergence, indexes were derived to calculate and predict the enhanced endurance limit of the material of which the understressed career was known. The understress ratio and the sequence of the repeated stress magnitude were taken as the parameters. The mode of fracture and the macroscopic hardness of thus fractured specimen, not only revealed that the energy model postulated at the start was of considerable probability, but also suggested that a macroscopic fatigue criterion led from this experiment could reflect some microscopic or super-microscopic behaviors of the tested specimen, above all just prior to the fracture.

While it is widely insisted that a material — steel in this case, though — cannot show a behavior around what are called fatigue phenomena, other than that, more or less influenced by the past it experienced, as heat treatment, nitriding or machining, a positive step to materialize the raise of the endurance limit characterized in this paper, may be recommendable to the up-to-date manufacture and usage of machines and structures dashing for all the more severer designing or service conditions.

1. 緒 言

一般に機械構造物などの受ける荷重は変動繰返し荷重が多く、これによるいわゆる材料の疲労現象が機械の設計や取扱い上きわめて重要であり、多くの巨視的、微視的な研究が展開されている。疲労現象が材料内部の加工硬化、割れ生成、破壊などの諸単位過程の順序的、段階的累積挙動である以上、単位過程の真実性の攻究なくしてはいわば巨視的な特性を説明することができないことはいうまでもないが、同時に近時における機械の高速化、軽量化、荷重条件の

熾烈化、環境の多様性などの諸要請に対処しつつ、設計能率の向上、機械の性能限界の認知、運転基準の設定などを容易にするための便宜的疲れ資料を準備することもまた不可欠のことである¹⁻⁴⁾。

過大応力による性能試験や特に初使用時の負荷が機械の寿命を減ずることが、わが国においても疲れ問題研究の一端緒となった経緯もあり、また $S-N$ 曲線の形状、累積被害概念の構成上の理由、技術的な緊急度が、遙かにより多く過大応力繰返しによる影響の探求にあるという理由もあって、寿命については各方面の研究でも過大応力の繰返しに、より屢々注意が向けられている趨勢にある。本研究はこれに対して低炭素鋼の処女材の耐久限度以下の応力、いわゆる過小応力を取上げ、過小応力を段階的に繰返すときに耐久限度がどのように変化または上昇するか、いいかえれば **coaxing** 効果を数量的に簡単に予知する利便とその根拠を与えんとしたものである⁵⁻¹⁰⁾。

材料の疲れに関するある時点の性質は、たとえ熱処理その他の物理的ないし化学的処理を施されても、それ自身の経験した歴史の痕跡から自由であることはできないと思われるが、本供試材のような材料においては、過小応力繰返しの影響が徹視的には不明であるにしても、耐久限度の向上のみについては一連の疲労試験を経て知見せられたのであって、いわば好ましい歴史を材料に与えたことになる。機械の初使用時の負荷漸増的取扱いを薦めたり、設計製作時に過小応力の積極的付与を行なう一基準を設定したい所以である。

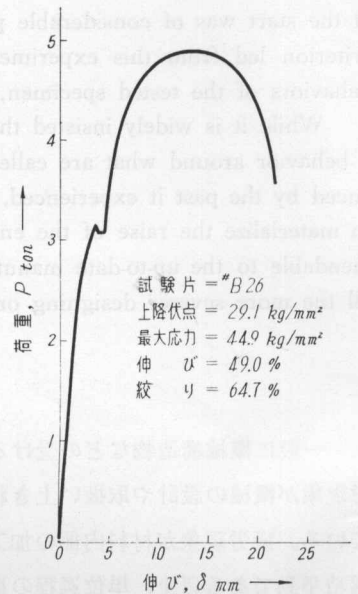
2. 実 験

2.1 供試材および試験片

供試材は一般構造用圧延棒鋼 SS 41 生材で、機械的性質は第 1 表のとおりである。したがって残留応力の存在と不均一は免れないが、試験片はすべて同一の製造、購入群から採取製作されたので、一連の疲労試験に使用して差支えないと思われる。なお副次的には本実験により未焼鈍一般構造用炭素鋼の疲労に関する性質の一部が知見されたわけである。第 1 図は供試材の引張試験線図の一例である。

第 1 表 供試材の機械的性質

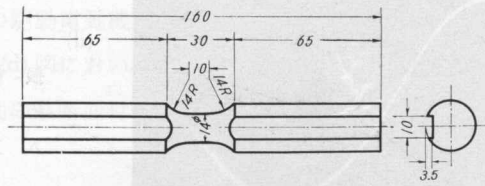
上降伏点 kg/mm ²	極限強さ kg/mm ²	伸 び %	絞 り %	衝 撃 値 I_{ch}	硬 度 H_v
28.2	44.6	48.2	63.2	20.8	128



試験片の形状寸法は第 2 図に示したが、できるだけ

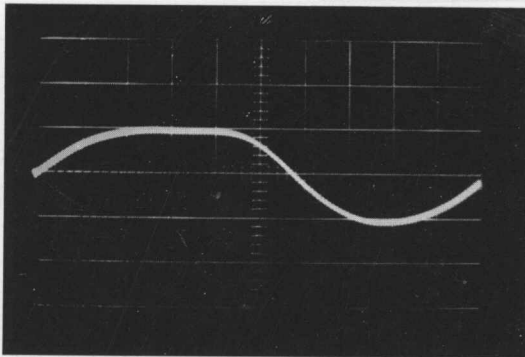
第 1 図 供試材の引張試験線図の一例

加工応力を残さないために軽切削したのち、研削について0000番の研磨紙で磨いた。寸法精度については、試験部はもちろん、取付精度に大いに影響する摺み部も入念に寸法管理した¹⁾。



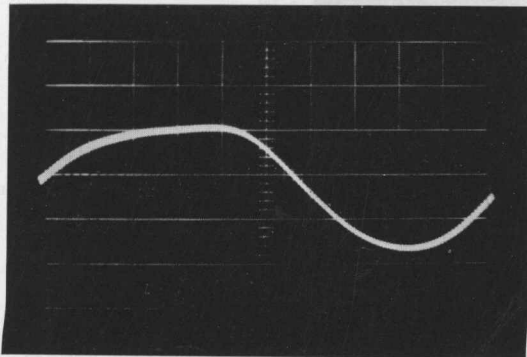
第2図 疲労試験片の形状寸法

2.2 試験機および試験方法



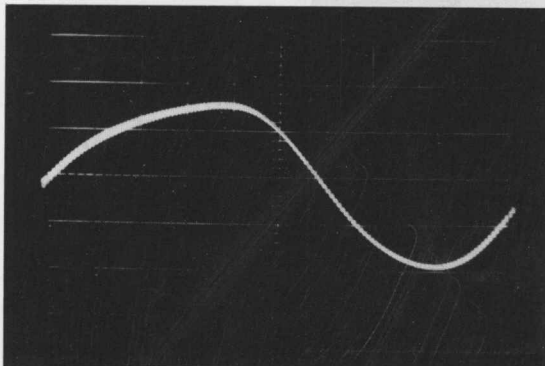
(a)

振 幅 $a = 4.5 \text{ mm}$
 応 力 $\pm \tau = 3.89 \text{ kg/mm}^2$
 入 力 $E = 404 \text{ Watt}$



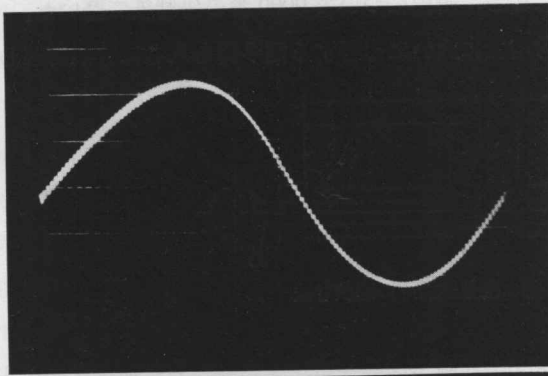
(b)

振 幅 $a = 6.7 \text{ mm}$
 応 力 $\pm \tau = 5.80 \text{ kg/mm}^2$
 入 力 $E = 416 \text{ Watt}$

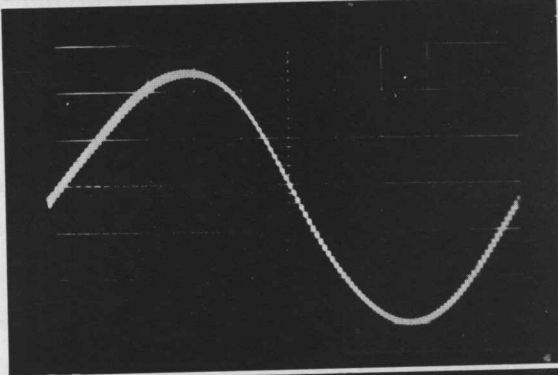


(c)

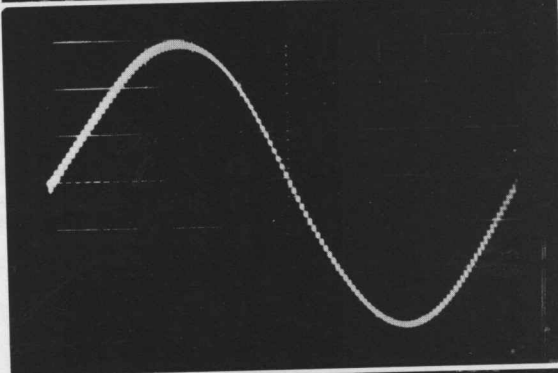
振 幅 $a = 8.5 \text{ mm}$
 応 力 $\pm \tau = 7.35 \text{ kg/mm}^2$
 入 力 $E = 420 \text{ Watt}$



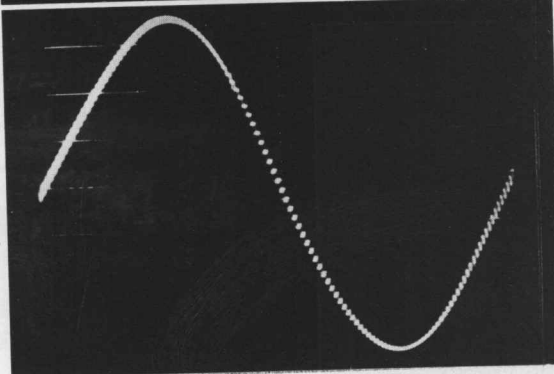
(d)

振 幅 $a = 10.3 \text{ mm}$ 応 力 $\pm \tau = 8.91 \text{ kg/mm}^2$ 入 力 $E = 428 \text{ Watt}$ 

(e)

振 幅 $a = 12.2 \text{ mm}$ 応 力 $\pm \tau = 10.6 \text{ kg/mm}^2$ 入 力 $E = 438 \text{ Watt}$ 

(f)

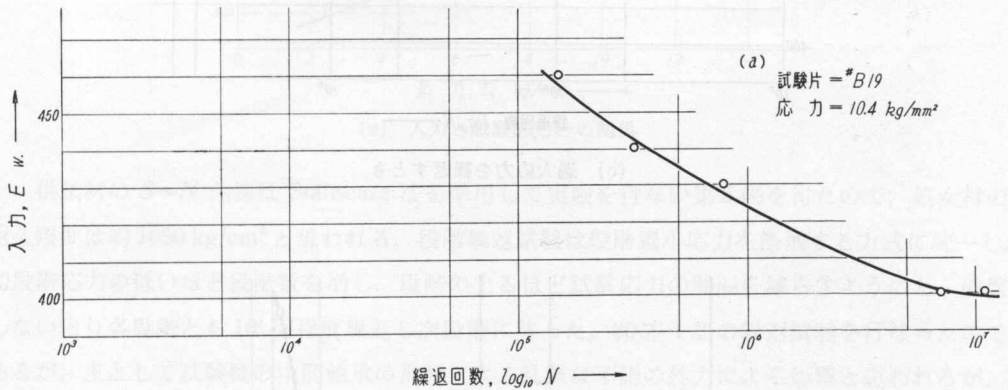
振 幅 $a = 14.0 \text{ mm}$ 応 力 $\pm \tau = 12.1 \text{ kg/mm}^2$ 入 力 $E = 452 \text{ Watt}$ 

(g)

振 幅 $a = 16.5 \text{ mm}$ 応 力 $\pm \tau = 14.3 \text{ kg/mm}^2$ 入 力 $E = 460 \text{ Watt}$

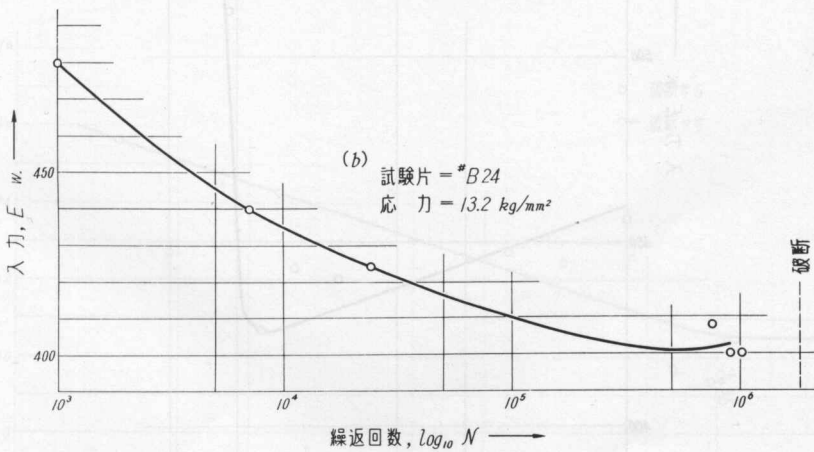
第 3 図 応力サイクル線図

試験機は準共振型クランク式曲げ振り疲労試験機で 2,300 cpm. の両振り振りを加えた。段階応力ごとの応力サイクル線図を第 3 図に示した。第 4 図 (a), (b), (c), (d) は一定段階応力の繰返し回数に対する試験機の駆動電動機の入力の変化を、(e) は試験応力の大きさと入力との関係を示したものである。(a)~(d) 図において破断時直前期に入力の著しい増大があるのは、後述の 3.5 項にあるとおり同時期の破断面付近の局所加工硬化に必要なエネルギーが急激に消費されるためと思われる。

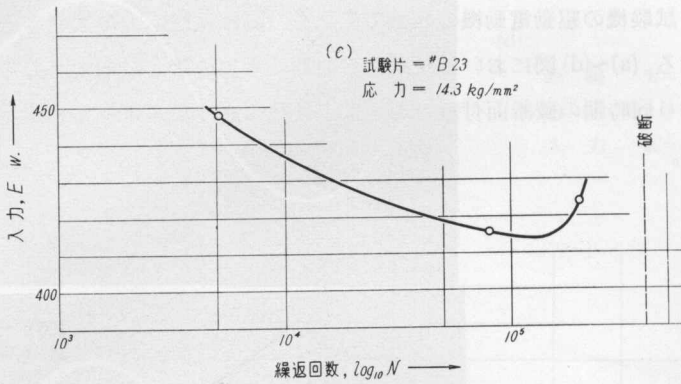


第 4 図 試験機入力と繰返し回数

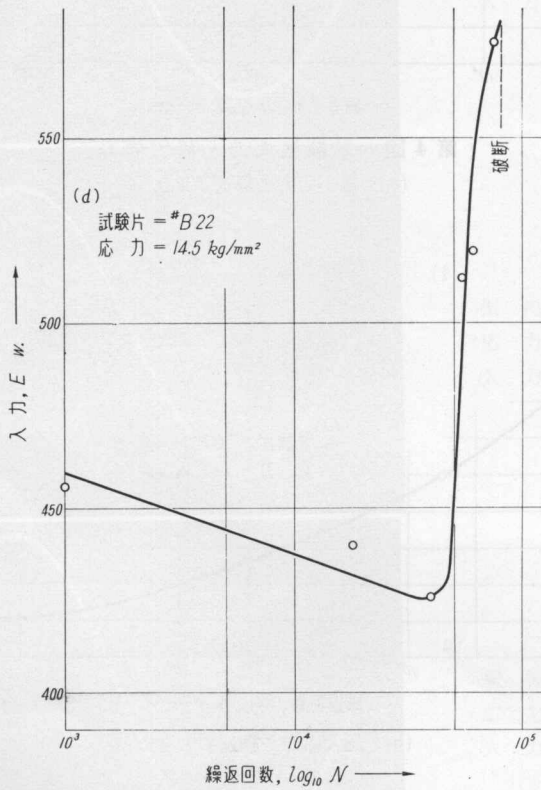
(a) 過小応力を繰返すとき



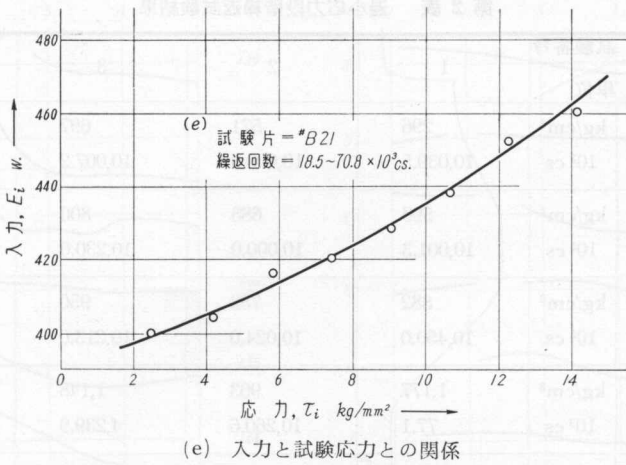
(b) 過大応力を繰返すとき



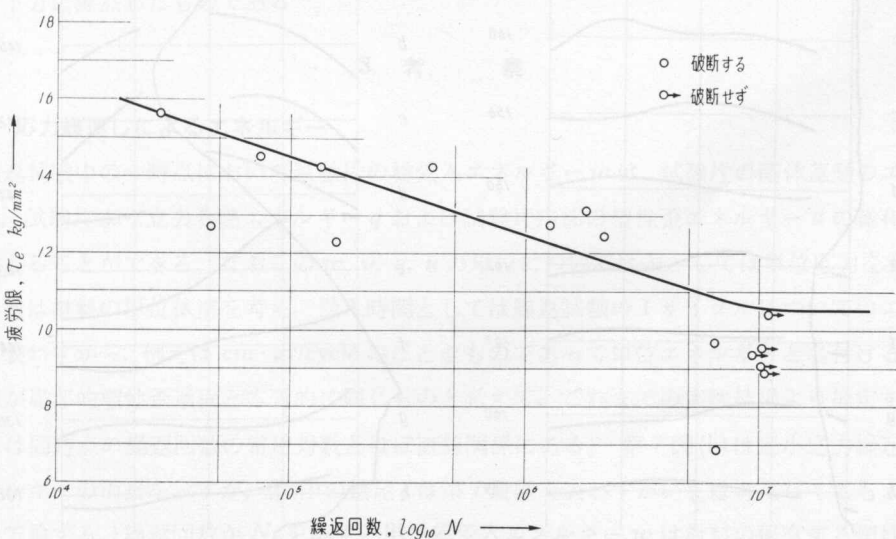
(c) 過大応力を繰返すとき



(d) 過大応力を繰返すとき



供試材の $S \sim N$ 曲線は Stair-case 法を準用して実験を行ない第5図を得たので、処女材の耐久限度は約 1050 kg/cm^2 とと思われる。段階繰返し試験は段階過小応力を漸増する方式に統一し、初段階応力の低いほど段階数を増し、段階の上るほど試験応力の間隔を減らすようにし、破壊しない限り各段階とも 10^7 回程度繰返し次段階に移った。20本1組の繰返し試験を行なったのであるが、主として試験機の間軸承の消耗による乱脈な不測の外力による影響と思われるが、供試材が生材なることも勘考して、第3段階で破壊したものも含めて3段階以上の繰返しに耐えた試験片全部を考察の対象とした。したがって対象試験片は4本になったが、これが前述の全部であるので、およその傾向は知り得ると考える。第2表に段階試験結果を示す^{12,13,14}。

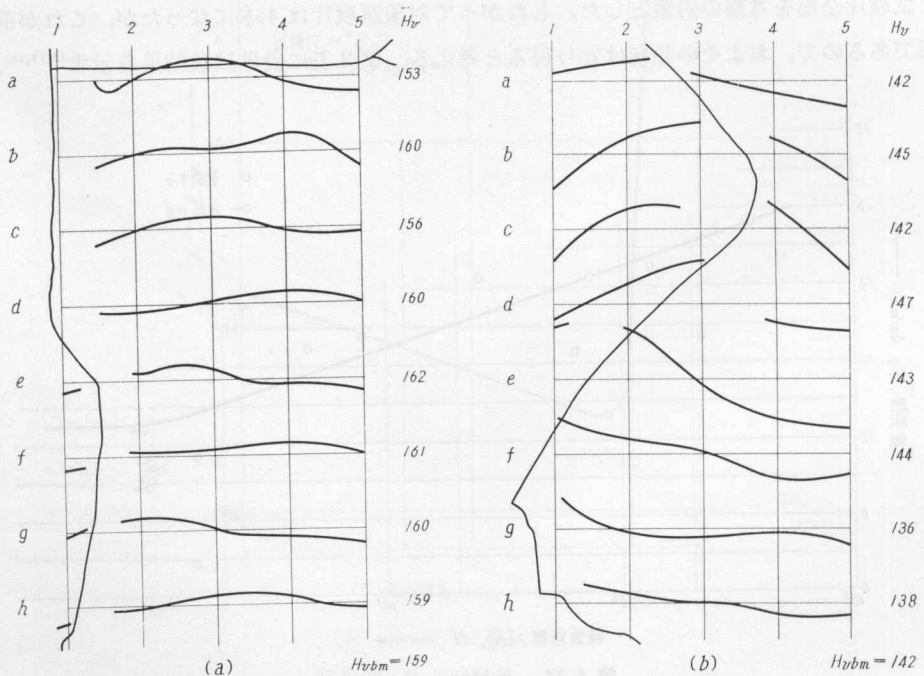


第 2 表 過小応力段階繰返試験結果

事 項	試験番号	1	2	3	4
	単位				
段階 応力 および 繰返 回数	第 1 段階	kg/cm ² 10 ³ cs 296 10,039.5	571 10,009.8	697 10,007.2	723 10,000.0
	第 2 段階	kg/cm ² 10 ³ cs 598 10,001.3	688 10,000.0	800 10,230.0	935 9,537.7
	第 3 段階	kg/cm ² 10 ³ cs 882 10,450.0	783 10,024.0	950 10,213.0	1,320 7,494.4
	第 4 段階	kg/cm ² 10 ³ cs 1,177 77.1	903 10,260.6	1,148 4,239.9	
	第 5 段階	kg/cm ² 10 ³ cs /	1,255 507.8	/	/
破 壊 様 式		破 断	破 断	破 断	破 断

2.3 硬度試験

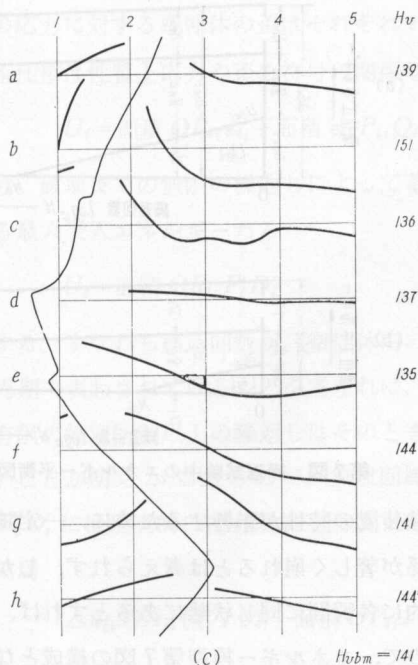
試験片は破壊後巨視的硬度を Vickers 硬度計で検したのであるが、第 6 図にその表面硬度分布を示す。この図は試験部表面を平面に展開したもので、1, 2, 3, 4, 5 方向は円周方向、a,



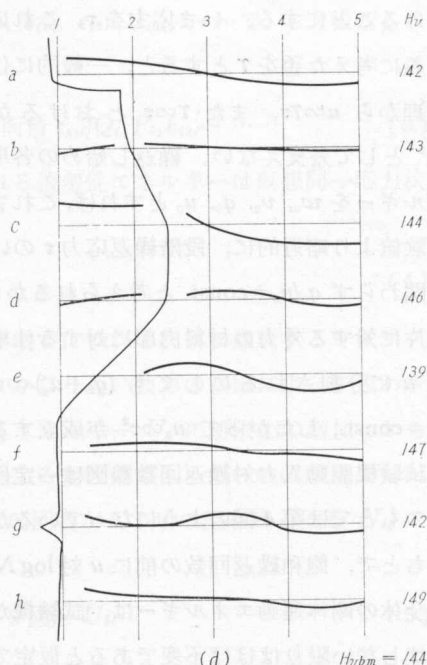
第 6 図 硬 度 分 布 図

(a) 試 験 片 1

(b) 試 験 片 2



(c) 試験片 3



(d) 試験片 4

b, c, \dots, h 方向は軸方向を示す。軸方向線は全円周を 8 等分, 円周方向線は試験片平行部の全長を 4 等分している。軸方向線の右端の数字はその線上の平均硬度を示し, これに交叉する曲線はこの線上の硬度勾配を示し, 平均硬度より硬ければその硬度差だけ線より上方に, 軟ければ下方に置点したものである¹⁵⁾。

3. 考 察

3.1 応力繰返しによるエネルギー

繰返し試験中の一時点において試験片の総受入エネルギー w は, 試験片の剛体運動のエネルギー v , 試験片より立去る熱エネルギー q および試験片内部の塑性歪エネルギー u の総和であると考えることができる。なおこの w, v, q, u の単位については力としては単位応力を考え, 受入容積は材料の単位体積を考え, 受入時間としては繰返し試験の 1 サイクルについてのエネルギーを表わすから, 例えば $\text{cm} \cdot \text{gr}/\text{cycle}$ のごときのものであって単位エネルギーと名付ける。疲労過程が局部的塑性歪過程と本質的に同じものと考えて, これまでの実験結果より推定すると q と u は同時点の繰返し数の常用対数とほぼ直線関係にある。第 7 図 (b) は過小応力繰返し中のエネルギーの消長を示すが, (図中の接尾 i は第 i 段階を表わすがいまは考えなくてもよいから省いて論ずる。) 繰返し数が N_s を越すと単位総受入エネルギー w は材料の保有する塑性歪エネルギー $U_s = \sum_{n=0}^{N_s} u_n$ になんらの蓄積ももたらずに, その全量が q として放熱されることとすることができる。繰返し数 N_s は塑性歪が飽和する時点の繰返し数で, 便宜的に飽和繰返し数と

名付けることにする。いま応力を τ 、これによる広義に考えた歪を γ とすると、一般的に仕事の原理から $u \propto \gamma \tau$ 、また $\gamma \propto \tau$ とおけるから $u \propto \tau^2$ として差支えない。繰返し始めの各单位エネルギーを w_0, v_0, q_0, u_0 とすれば、これまでの実験値より略率的に、段階繰返応力 τ のいかに関わらず $q_0/u_0 = \text{const.}$ と考えられるから、試験片に対する外力の材料内部に対する仕事が q と u に分割されるにしても $(q_0+u_0) \propto \tau^2$ 、 $q_0/u_0 = \text{const.}$ 、したがって $u_0 \propto \tau^2$ が成立する。

試験機駆動入力対繰返回数線図は一定段階応力のもとでは第4図のようになっているが、試験装置の特性が影響するために、一定試験応力のもとで、飽和繰返回数の前に u 対 $\log N$ の関係が著しく崩れるとは考えられず、しかも試験片全体の剛体運動エネルギーは、試験機が機能的に各瞬間に同じ状態にあるとすれば、自体が破壊しない限りはほぼ不変であると仮定できるので、エネルギー模型第7図の構成となったのである。

第7図エネルギー模型と一般的な $S \sim N$ 曲線の意義とより、単位塑性歪エネルギー u の N_s サイクルまでの総和 U_s は、

$$U_s = \sum_{n=0}^{N_s} u_n = \text{面積 } \Delta u_0 ON_s \tag{1}$$

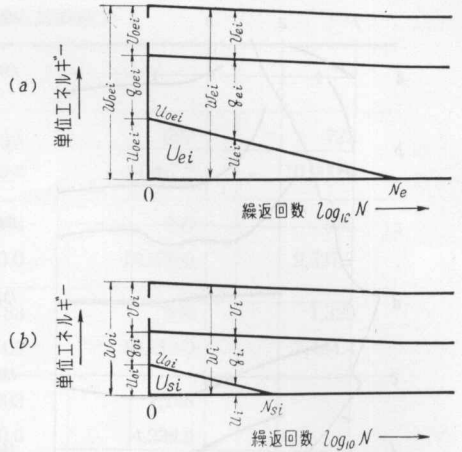
で、また段階試験応力 τ がその段階開始時の耐久限度 τ_e に等しいときの飽和繰返回数 N_s こそ供試材の限界繰返回数 N_e であり、結局供試材が破壊せずに受入れることのできる最大残留エネルギーは第7図(a)の

$$U_e = \sum_{n=0}^{N_e} u_n = \text{面積 } \Delta u_{e0} ON_e \tag{2}$$

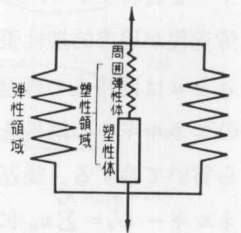
で、同状態の供試材に過大応力を繰返すときに破壊せずに材料内に保有しうる塑性歪エネルギーの最大が U_e であるといえる¹⁶⁻²¹⁾。

3.2 塑性歪エネルギーの収斂

第7図エネルギー模型はまた歪硬化に関する Orowan の理論に付会する方向を持っている。彼は弾塑性体内の塑性領域の挙動を示す模型を第8図のように考え、完全弾性体の中に仮想した均一塑性体が繰返応力を受けるときに得る歪硬化が弾塑性体の耐久限度といかなる関係を持つかを第9図のように模式的に示しているが、いま第 i 段階の繰返しに対する模式図(b)についていえば、点 $O, P_{i1}, Q_{i1}, P_{i2}, Q_{i2}$,



第7図 繰返試験中のエネルギー平衡図



第8図 弾塑性体模型

……の応力に対する塑性体の歪はそれぞれ ϵ_{iB} , ϵ_{i1P} , ϵ_{i1Q} , ϵ_{i2P} , ϵ_{i2Q} , ……で、応力繰返しにより塑性歪仕事は性質上応力や歪の符号に関係なく

$$U_i = \text{面積 } OP_{i1}\epsilon_{i1} + \text{面積 } \epsilon_{i1}P_{i1}Q_{i1}\epsilon_{i1Q} + \text{面積 } \epsilon_{i1Q}Q_{i1}P_{i2}\epsilon_{i2P} + \dots \quad (3)$$

となり、破壊までの無限の繰返しによって蓄積される歪塑性エネルギーは仮想同一応力状態に対する最大受入エネルギーたる

$$U_i = \text{面積 } OP_{i1}F'_iD'_i \quad (4)$$

に達する。すなわち繰返回数が、塑性体内の応力が増すにつれて次第に減衰するジグザク波形の1周期で表わされていることを考えれば、点Zにかなり近い波形の接尾によって表わされるある有限の繰返回数以上の繰返しはそのときの保有エネルギー U_i に無限小の増加しかもたらないことが明らかであるので、無限回繰返しによる塑性歪エネルギーの収斂量 $U_{si} = \text{面積 } OP_{i1}F'_iD'_i$ には現実的には有限繰返回数で達し、この回数が3.1項の飽和繰返回数 N_{si} であつて、結局

$$\Delta u_{0i} ON_{si} \text{ (第7図)} = \text{面積 } OP_{i1}F'_iD'_i \text{ (第9図)} = U_{si} \quad (5)$$

となる。なお試験応力が耐久限度応力のときの飽和繰返回数がその材料の限界繰返回数（供試材のような鋼では約 10^7 回）であることは、疲れ強さが時間に対して鈍感であることを考えれば、試験過小応力の大きさには無関係であると推論できる²²⁻²³⁾。

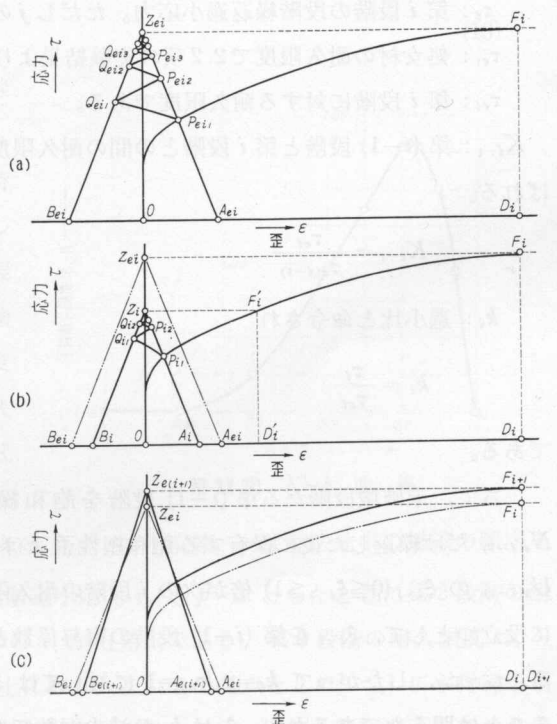
第9図で応力対塑性歪の勾配AZは同一経歴の試験片に対しては試験応力の大きいほど、それ自身に平行にかつOと反対側に移行するから、同組同経歴の疲労試験片については式(3)の右辺は試験応力の平方に比例するという相似則が成立つので、式(3)、(4)、(5)より第7図(b)について、

$$U_{si} = \Delta u_{0i} ON_{si} \propto \tau_i^2 \quad (6)$$

が導かれる。ゆえに $\Delta u_{0i} ON_{si}$ において

$$u_{0i} \propto \tau^2 \propto \log N_{si} \quad (7)$$

$u_{0i} \propto \tau^2$ は3.1項の仮定にも合致している。以上によって第7図(a)、(b)、第9図(a)、(b)が理解できる。



第9図 塑性歪エネルギーの収斂

3.3 互隣耐久限度比

塑性歪エネルギー U_i は結晶の微細化、結晶内のりなどとして結晶内に蓄えられるが、転位論的には、いまりを起すに必要な剪断応力を τ_s 、剪断弾性係数を G 、り面の単位面積あたりの転位数を n 、り面に沿って測った原子間隔を λ 、 c を定数とすると、

$$\tau_s = cG\lambda n^{1/2} \quad (8)$$

が成立し、加工度が増すほど転位数 n が増すので、上式によって τ_s が増し、結局加工硬化が行なわれるといえるし、これまでの実験からも耐久限度向上には歪硬化がその主役をなしていることも確かめられているから、 U_i のすべてが耐久限度向上に指向されないが、その一部は係数加乗的に耐久限度向上に役立つものと考えることができる²⁴⁾。

応力段階の序数に関係ある議論に入る前に使用文字の説明をしておこう。ただし2.2項で述べたように同一試験片の繰返試験は小さい過小応力より、応力漸増式に多段階試験を行なったのである。

i : 過小応力を繰返した段階序数である。したがって $i=1$ は初段階を示す。

j : 最終すなわち破壊段階を示す序数である。したがって $j-1$ は破壊直前段階を示す。例えば第5段階中に破壊した試験に対して第3段階を示す序数は $i=3=j-2$ であって、以下 j による表現も含め i によって段階を示す。

τ_i : 第 i 段階の段階繰返過小応力。ただし j の説明によって τ_j は過大応力。

τ_{ei} : 処女材の耐久限度で2.2項の実験結果より供試材のそれは概数値 1050 kg/cm^2 とする。

τ_{ei} : 第 i 段階に対する耐久限度である。

K_{i-1} : 第 $(i-1)$ 段階と第 i 段階との間の耐久限度変化を表わす係数で、互隣耐久限度比と呼ばれる。

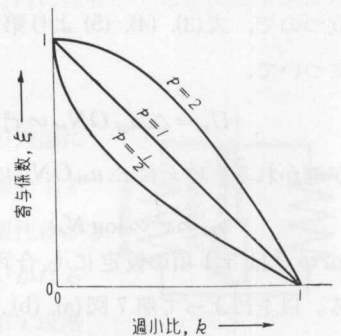
$$K_{i-1} = \frac{\tau_{ei}}{\tau_{e(i-1)}} \quad (9)$$

k_i : 過小比と命ぜられ

$$k_i = \frac{\tau_i}{\tau_{ei}} \quad (10)$$

である。

さて、未破壊段階たる第 $(i-1)$ 段階を飽和繰返回数 $N_{s(i-1)}$ だけ繰返した後に保有する飽和塑性歪エネルギー $U_{s(i-1)}$ の ξ_{i-1} ($0 \leq \xi_{i-1} \leq 1$) 倍が次の i 段階の耐久限度向上に役立つとして、 ξ_{i-1} を第 $(i-1)$ 段階の寄与係数と名付ける。 $\tau_i = \tau_{ei}$ 、したがって $k_i = \tau_i / \tau_{ei} = 1$ に対しては $\xi_i = 1$ なることは明らかであるから、 ξ_i は k_i の減少函数であると帰納される。もっとも簡単に $\xi_i = 1 - k_i^p$ と置き、簡単な p の



第10図 ξ と k との関係

値に対する $\xi_i \sim k_i$ 曲線を画けば第 10 図となる。互隣耐久限度比 K_{i-1} の算出にあたっては、一応 $p=2$ ，したがって $\xi_{i-1}=1-k_{i-1}^2$ として計算を進める。

上述より
$$U_{ei} = U_{e(i-1)} + \xi_{i-1} U_{s(i-1)} \tag{11}$$

第 7 図 (a) より
$$U_{ei} = \frac{1}{2} u_{0ei} \log N_e$$

$$U_{e(i-1)} = \frac{1}{2} u_{0e(i-1)} \log N_e$$

第 7 図 (b) より
$$U_{s(i-1)} = \frac{1}{2} u_{0s(i-1)} \log N_{s(i-1)}$$

3.1 項より
$$\frac{u_{0e(i-1)}}{u_{0e(i-1)}} = \left(\frac{\tau_{i-1}}{\tau_{e(i-1)}} \right)^2 = k_{i-1}^2$$

3.2 項より，

$$\frac{\log N_{s(i-1)}}{\log N_e} = \left(\frac{\tau_{i-1}}{\tau_{e(i-1)}} \right)^2 = k_{i-1}^2$$

さらに，

$$\xi_{i-1} = 1 - k_{i-1}^2$$

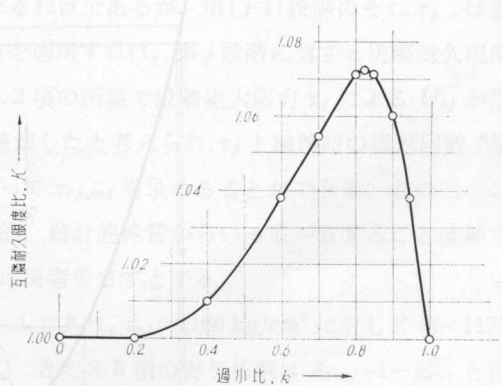
の関係を式 (11) に投入すると

$$\tau_{ei} = K_{i-1} \tau_{e(i-1)} \tag{12}$$

が得られる。ここに，

$$K_{i-1} = \sqrt{1 + k_{i-1}^4 - k_{i-1}^6} \tag{13}$$

互隣耐久限度比対過小比，すなわち $K \sim k$ 線図を第 11 図に示す。第 3 表には耐久限度 τ_{e1} の処女材より段階繰返しを始め，段階移行時の耐久限度向上を経過しつつ最終段階に対して得る耐久限度を (12), (13) 式で計算する過程をのせてある。このようにして得られた破壊段階の耐久限度は破壊段階の理論耐久限度 $\tau_{e,j,th}$ と称し，後に 3.4 項でのべる実際耐久限度 $\tau_{e,j,act}$ に対応する。第 12, 13 図は図式によって理論耐久限度を求める方法を示す。



第 11 図 $K \sim k$ 曲線

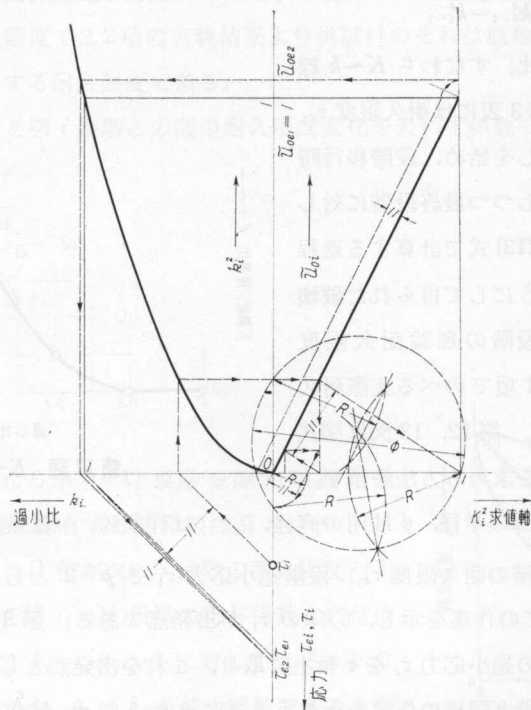
図中 // は平行， R は円弧の半径， ϕ は円の直径，

は作業線， \rightarrow は解法途中の描線の順序を表わす。

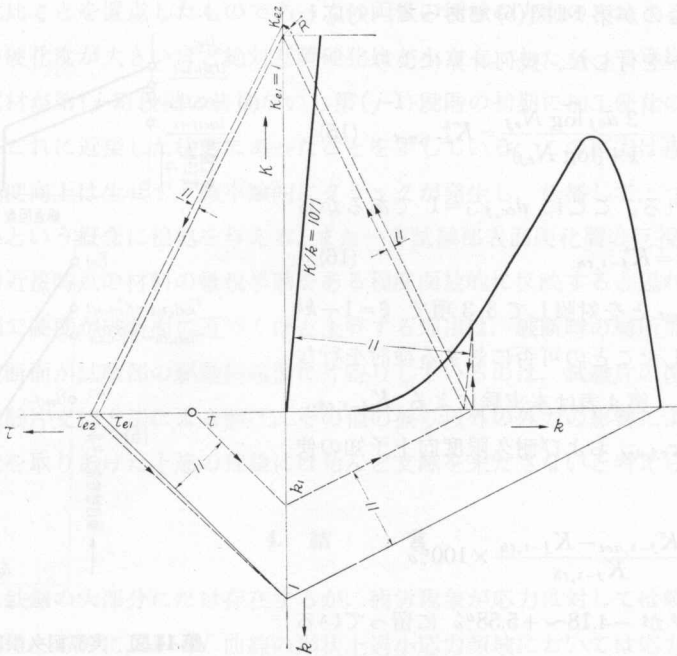
本図は第 1 段階の耐久限度 τ_{e1} ，段階過小応力 τ_1 で $p=2$ としたときに第 2 段階の耐久限度 τ_{e2} を求めるまでの作業を示し， \circ 印の τ_1 が出発点である。第 3 段階の耐久限度 τ_{e3} を求めるには，第 2 段階の過小応力 τ_2 を τ 軸上に取り，これを出発点として， $\overline{\tau_{e2}}$ に平行線を引くことより始めて，前段と同様の作業を行なうと遂に τ 軸上に τ_{e3} が求まる。以下同様の作業を続けていけば最終段階の耐久限度 $\tau_{e,j}$ が求まる。

第3表 理論耐久限度の算定

番号	事項 段階	段階耐久限度	段階過小応力	過小比	互隣耐久比	時間疲労限 τ_j (kg/cm ²)	寿命 $N_{s,j}$ (10 ³ cs)
		τ_{ei} (kg/cm ²)	τ_i (kg/cm ²)	k	限度 K		
1	1	1,050	296	0.282	1.001	1,177	77.1
	2	1,052	597.5	0.568	1.032		
	3	1,087	882	0.812	1.0715		
	4	1,166					
2	1	1,050	571	0.544	1.028	1,255	507.8
	2	1,080	688	0.637	1.044		
	3	1,128	783	0.695	1.0535		
	4	1,189	903	0.760	1.065		
	5	1,266					
3	1	1,050	697	0.664	1.048	1,148	4,239.9
	2	1,100	800	0.7275	1.0585		
	3	1,163	950	0.816	1.072		
	4	1,249					
4	1	1,050	723	0.688	1.0525	1,320	7,494.4
	2	1,107	935	0.845	1.071		
	3	1,185					



第12図 理論耐久限度の図式解法 (その1)



第13図 理論耐久限度の図式解法 (その2)

3.4 実際耐久限度

第 j 段階の試験応力 τ_j は時間疲労限にあたるわけであるが、第 $(j-1)$ 段階のそれ τ_{j-1} は過小応力なのであるから、Stair-case その他の方法を適用すれば、第 j 段階に対する実際耐久限度 $\tau_{ej,act}$ を知ることができる。あるいは 3.1 項、3.2 項の所論で段階過大応力 τ_j による U_{sj} が限界繰返し回数 N_e の手前で U_{ej} より大きくなって破壊したと考えられ、 τ_j と破壊時の繰返し回数 N_{sj} とが実験でわかっているから、つぎの理論によって $\tau_{ej,act}$ を求めることができる。この二つの実際耐久限度の数値は疲労現象特に破壊の複合的、統計的性質からいって一致することは稀であると考えられるが、本項にいう実際耐久限度は後者をさすとする。

本実験では例えば試験番号 1 については $j=4$ であり、 $\tau_{ej}=1166 \text{ kg/cm}^2$ に対して $\tau_j=1177 \text{ kg/cm}^2$ を繰返して $N_{sj}=0.1 \times 10^6$ 回で破壊した。さて 3.3 項の寄与係数は $\xi_{i-1}=1-k_{i-1}^2$ と仮定して $\tau_{ej,th}=1166 \text{ kg/cm}^2$ と計出したのであるが、この仮定は τ_j 、 N_{sj} 、 $\tau_{e(j-1)}$ に対して、第 7 図に集約されるエネルギー理論を適用して $\tau_{ej,act}$ を求め、 $\tau_{ej,th}$ と比較することによって検討することができる。すなわち過大応力による時間疲労限をエネルギー論で解すれば第 7 図の内の塑性歪エネルギーの部分だけを取上げた第 14 図 (a) において、

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{oej,act} ON_j &= \square u_{oj} ON_{sj} u'_j \\ \frac{u_{oj} u'_j}{u_{oej,act} N_e} & \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

が成立つ。計算を簡単にするために N 軸では $\log N_e=1$ 、 u 軸では $u_{oe,j-1}=1$ と $\log N$ 、 u の値

を無次元にしたものが第14図(b)であって、対応した無次元量には \sim を付した。幾何計算により

$$\tilde{u}_{0e,j,act} = \frac{2\tilde{u}_{0j}\tilde{\log} N_{sj}}{1+(\tilde{\log} N_{sj})^2} = K_{j-1,act}^2 \quad (15)$$

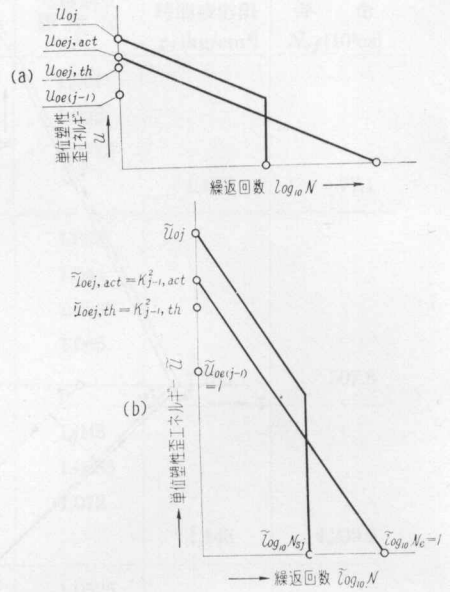
なる関係が導かれる。ここに $u_{0e,j-1}=1$ であるから

$$\tilde{u}_{0e,j,th} = K_{j-1,th}^2 \quad (16)$$

$K_{j-1,th}$ と $K_{j-1,act}$ とを対照して 3.3 項で $\xi=1-k^p$ の p を 2 と仮定したことの可否に対する検討を行なうことができる。第4表は本実験による $K_{j-1,th}$, $K_{j-1,act}$; $\tau_{e,j,th}$, $\tau_{e,j,act}$ および耐久限度向上予知の便宜的誤差率

$$\varphi = \frac{K_{j-1,act} - K_{j-1,th}}{K_{j-1,th}} \times 100\%$$

を示しており、 φ が $-4.18 \sim +5.58\%$ に留っていることがわかる。



第14図 実際耐久限度算定の模型

第4表 K, φ の算定値

No.	$K_{j-1,act}$	$K_{j-1,th}$	$\varphi \%$
1	1.053	1.072	-1.77
2	1.043	1.065	-2.06
3	0.984	1.027	-4.18
4	1.193	1.130	+5.58

第5表 $\zeta_{act}, \zeta_{th}, H_{vbm}$ の算定値

	ζ_{act}	ζ_{th}	H_{vbm}
1	1.016	1.035	144
2	0.919	0.938	142
3	0.886	0.925	141
4	1.133	1.072	159

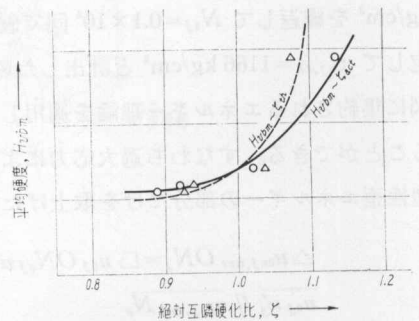
3.5 耐久限度向上と硬度

第(j-1)段階の耐久限度 $\tau_{e(j-1)}$ は処女材の耐久限度 τ_{e1} に対して累積耐久限度比 $K_{1 \rightarrow j-1} = \frac{\tau_{e(j-1)}}{\tau_{e1}}$ を有し、破壊段階たる第j段階の耐久限度 $\tau_{e,j}$ は $\tau_{e(j-1)}$ に対して互隣耐久限度比 $K_{j-1} = \frac{\tau_{e,j}}{\tau_{e(j-1)}}$ を有する、破壊直前段階の処女材に対する硬化度は $K_{1 \rightarrow j-1}$ をもって表わされると考えられるから、

$$\zeta = \frac{K_{j-1}}{K_{1 \rightarrow j-1}}$$

なる式で表わされる ζ は、破壊直前段階の単位硬化状態に対する同段階から破壊段階への硬化量を示すから、 ζ を絶対互隣硬化比と名付ける。

第15図は各試験片の破断後の平均硬度 H_{vbm}



第15図 $H_{vbm} \sim \zeta$ 曲線

と絶対互隣硬化比 ξ とを置点したものであって、両量の増減の方向の一致することがわかる。破壊直前段階の硬化度が大きいほど絶対互隣硬化比が小さく、したがって平均硬度が小さく、かかる点は供試材が第 $(j-2)$ 段階の終期ないし第 $(j-1)$ 段階の初期に加工硬化の最大量に達したか、少なくともこれに近接した状態にあったことを示している。この事実は加工硬化完了以後は顕著な耐久限度向上は生ぜず、確率論的にクラックが発生し、伝播して、ついに破壊にいたるのではないかという概念に根拠を与える。また一方試験部表面硬化層の巨視硬度が耐久限度、少なくとも破壊近接時点の材料の微視挙動をある程度函数的に反映すると思われる。

なお第7図で硬度が破断面に近づくほど上昇する理由は、破断時の局所加工硬化の故と思われる。また破断面が試験部の駆動側端部に片寄りしているのは、試験片の段付け部、キー溝の影響および試験片支持方法による曲げ、その他の振り以外の外力の影響によるものと思われるが、平均硬度を取りあげた上述の理論には殆んど支障を来たさないと考えられる^{25,26)}。

4. 結 言

耐久限度は鉄鋼の大部分にだけ存在するが、疲労現象が応力に対しては鋭敏であり、時間に対しては鈍感であるのに、 $S\sim N$ 曲線の形状上過小応力領域においては応力に対する繰返し数の対応点を求められないために、破壊にいたる過大応力の繰返し比の総和が1であると要約される被害蓄積の概念がそのままでは定性的にも適用しにくい、本研究のように繰返し試験中のエネルギー平衡論に立脚して段階応力の過小比を媒介とし、塑性歪エネルギーの加工硬化累積を定性していけば、過小応力の段階繰返しによる耐久限度の増大、いわゆる *coaxing* 効果の成行きが巨視的には理解され、またこの効果を測る尺度がいくつか求まるので機械の設計、取扱い上の一利便も与え得ると思う。なお実際の破壊状態や巨視硬度の観察が最初に設定した疲労現象のエネルギーモデルの合理性をかなり裏付け、特に破壊近接時の微視挙動が本研究で導いた加工硬化の尺度に反映することは意義深いと考える。

文 献

- 1) E. R. Parker, et al.: Internal Stresses and Fatigue in Metals, Elsevier Pub. Co., 263.
- 2) 横堀武夫: 機誌, 58 (1955) 441, 712.
- 3) H. J. Grover, et al.: Fatigue of Metals & Structures, Thames and Hudson, III.
- 4) C. E. Feltner: Trans. ASME, 83 (1961) D-1, 15.
- 5) 池田正二: 機誌, 58 (1955) 441, 711.
- 6) D. L. Henry: Trans. ASME, 77 (1955) 6 913.
- 7) J. B. Kammers: Proc. ASTM, 38 (1938), 249.
- 8) J. B. Kammers: Proc. ASTM, 45 (1945), 532-543.
- 9) S. M. Marco, et al.: Trans. ASME, 76 (1954), 627.
- 10) F. C. Lea: Engineering, 115 (1923) 217, 252.
- 11) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂, 164.
- 12) W. J. Dixon, et al.: Introduction to Statistical Analysis, Mc-Graw Hill, 1951, 278.
- 13) 吉本 勇: 機論, 26 (1960) 167, 918.

- 14) 吉本 勇: 機論, 27 (1961) 1657.
- 15) 大柴文雄: 機誌, 3 (1939) 6, 283.
- 16) 小野鑑正: ZAMM, 16 (1936), 23.
- 17) B. Welber, et al.: J. Metals, 5 (1953), 1558.
- 18) 河本実ほか: 機論, 26 (1960) 170, 1333.
- 19) 河本実ほか: 機論, 26 (1960) 167, 963.
- 20) 石橋 正: 金属と疲労と破壊の防止, 養覧堂, 178.
- 21) 河本実ほか: 日本機械学会第 39 期通常総会講演前刷, 62 (1962), 13.
- 22) E. Orowan: Proc. Roy. Soc. London, A-171 (1939) 79.
- 23) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂, 151.
- 24) M. Hempel: Academic Press, Inc., New York, 1956, 83.
- 25) 平修二ほか: 日本機械学会第 39 期通常総会講演前刷, 62 (1962), 41.
- 26) G. M. Sinclair: Proc. ASTM, 52 (1952).