鋼の回転曲げ疲労過程で発生するひずみエネルギー変化の一解析法 とその変化に及ぼす Pearlite Patch の影響について*

南 澤 力** 青 木 望**
芳 賀 武*** 石 田 有 示****

Analysis of Changes in the Strain Energy Caused during the Rotatory Bending Fatigue
Test of Carbon Steel, and the Effect of the Pearlite Patches on the Changes

by

Chikara MINAMISAWA, Nozomu AOKI

(Department of Mechanical Engineering, Defence Academy, Yokosuka)

Takeshi HAGA and Yuhji ISHI-DA

(Shibaura Institute of Technology, Tokyo)

Using the values of deflections which can be measured easily during the rotatory bending fatigue test of a specimen, and considering also the stress distribution on the cross section of the specimen, the authors have devised a method to analyze quantitatively the plastic and quasi-elastic strain energies per cycle and their accumulation.

In this paper a report is made of the devised method as applied to fatigue tests of two kinds of carbon steels including different pearlite patches.

The main results obtained from the research are as follows :

(1) The pearlite patch not only causes structural changes by fatigue but prevents propagation of cracks.

(2) The change in quasi-elastic energy accumulation with the fatigue process can be expressed in $\sum_{q=1}^q (I_{RRAD}, E)_q = Aq^K$ up to the occurrence of micro-cracks on the surface of the steel specimen including gross patches and fracture of the specimen including fine patches.

(3) If the plastic strain energy accumulation is plotted against the number of cycles on a log-log paper, four nodal points appear dividing the process of fatigue in five stages. The second nodal point in the initial fatigue appears to have relation with the yield of materials. Then, a fine slip appears in the vicinity of second nodal point, a slip band at about third nodal point and a intrusion at about fourth nodal point. The energy quantities at the third and the fourth points were a constant to the respective point, independent of the stress amplitudes and of the pearlite patches. The energy quantity required for the fracture of specimen was a constant to each stress amplitude.

(Received June 24, 1971)

1 緒 言

鋼の回転曲げ疲労過程で比較的容易に計測できるたわみ変化の実測値を用い、かつ、試験片断面内の応力分布を考慮して、疲労進行過程で生ずる塑性ひずみエネルギーと擬弾性ひずみエネルギー、さらに、それらの累積エネルギーを解析する方法を述べる。この方法を pearlite patch の形状、大きさ、分布等を異にする 2 種類の炭素鋼の疲労試験に適用して、それぞれのひ

ずみエネルギー変化および試験片表面の組織変化に及ぼす pearlite patch の形状、大きさ、分布等の影響を調査した。

疲労進行に伴うたわみ変化の調査には、河本等の研究¹⁾と筆者等によるふん囲気温度変化の影響を調査した研究²⁾がある。後者の場合において、破断直前の急激なたわみ変化の発生以前に比較的ゆるやかなたわみの増加と飽和が生じる場合と生じない場合とが確認される。この原因に対する検討を試みた。

ひずみエネルギー変化の定性的、定量的調査は、試験片断面内の応力分布を考慮する必要のない条件下³⁾と無視した場合等多くの条件下でなされているが、主とし

* 原稿受理 昭和46年6月24日

** 正 会 員 防衛大学校機械工学科 横須賀市走水

*** 正 会 員 芝浦工業大学大学院 東京都港区芝浦

**** 学生会員 芝浦工業大学 東京都港区芝浦

で定性的探求が多い．しかるに本研究では，外部から加えられる仕事のエネルギーへの変換を定量的には握せんとするために応力の断面内分布のエネルギーへの寄与を無視することができない．そこで，通常行なわれている梁内の静的残留応力計算法に基礎をおくエネルギー解析法を提案し，実際の疲労試験に適用した．

炭素鋼の組織に存在する pearlite patch の形状，大きさ，分布等の疲労諸挙動に及ぼす影響の重要なことは横堀⁵⁾により指摘され，さらに，横堀等により研究された．本研究では，ひずみエネルギー変化と試験片表面組織に現われる変化，さらに，破面における striation 模様におよぼす pearlite patch の形状，大きさ，分布等の影響を調査した．

2 ひずみエネルギー式について

Fig. 1 は試験部分中心を含む断面を示し，長手方向に x 軸，垂直方向に y 軸を，水平方向に z 軸をそれぞれ設定した． τ_{xy} , σ_y , σ_z 等のエネルギー成分への影響を無視して，点Aの σ_x と ϵ_x が回転によりいかに変化するかを調査した．その結果，任意の q th. cycle において，たわみ δ_q を生じつつ Fig. 2 に示すごとき履歴曲線を描き，Fig. 1 と 2 の A→B, B→C, C→D, D→A のそれぞれの点Aの移動に伴う過程は対応していることを見出した．

ここで，断面内のひずみ (ϵ_x) 分布が直線的であると仮定し，さらに Fig. 2 において，

Fig. 1. Stress and strain distribution.

Fig. 2. Hysteresis curves.

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon}_q &= |\epsilon'_{-(q-1)}| + |\epsilon_q|, & \bar{\epsilon}_{-q} &= |\epsilon'_q| + |\epsilon_{-q}|, \\ \bar{\bar{\epsilon}}_q &= \epsilon_q - \epsilon'_q, & \bar{\bar{\epsilon}}_{-q} &= |\epsilon_{-q}| - |\epsilon'_{-q}| \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

といて，これらを Fig. 1 の第4象限から第1象限における最大ひずみとする．(1)式のひずみを最大ひずみとする各象限のそれぞれの直線的ひずみ分布に対応する応力分布は Fig. 2 のそれを Fig. 1 の各象限に移したものととなる．

いま，Fig. 1 の各象限で中立軸から y はなれた位置のこれら応力・ひずみ関係が次式のごとく，それぞれ単項冪関係で近似できたものとする．

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{q,y} &= \alpha_q \cdot \bar{\epsilon}_{q,y}^{n_q} \cdots \cdots 0 \leq \bar{\epsilon}_{q,y} \leq \bar{\epsilon}_q \\ \sigma_{qe,y} &= \beta_q \cdot \bar{\bar{\epsilon}}_{q,y}^{m_q} \cdots \cdots 0 \leq \bar{\bar{\epsilon}}_{q,y} \leq \bar{\bar{\epsilon}}_q \\ \sigma_{-q,y} &= \alpha_{-q} \cdot \bar{\epsilon}_{-q,y}^{n_{-q}} \cdots \cdots 0 \leq \bar{\epsilon}_{-q,y} \leq \bar{\epsilon}_{-q} \\ \sigma_{-qe,y} &= \beta_{-q} \cdot \bar{\bar{\epsilon}}_{-q,y}^{m_{-q}} \cdots \cdots 0 \leq \bar{\bar{\epsilon}}_{-q,y} \leq \bar{\bar{\epsilon}}_{-q} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで，Fig. 1 に示す微小部分を各象限にとり，いずれの象限でも角度 θ は z 軸からとると，中立軸から y はなれた任意点のひずみはまた (r, θ) で表わし得る．

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon}_{q,y} &= \bar{\epsilon}_q \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin \theta, & \bar{\bar{\epsilon}}_{q,y} &= \bar{\bar{\epsilon}}_q \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin \theta \\ \cdots \cdots \cdots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3)式を(2)式に入れると，

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{q,y} &= \alpha_q \left\{ \bar{\epsilon}_q \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin \theta \right\}^{n_q}, \\ \sigma_{qe,y} &= \beta_q \left\{ \bar{\bar{\epsilon}}_q \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin \theta \right\}^{m_q} \\ \cdots \cdots \cdots \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となる．

Fig. 1 の第4象限に示された微小部分が $\theta=0$ から θ まで回転移動する過程で加えられる仕事は

$$\begin{aligned} dE_{q,4} &= \left\{ \int_0^{\bar{\epsilon}_{q,y}} \sigma_{q,y} \cdot d\bar{\epsilon}_{q,y} \right\} r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dx \\ &= \frac{\alpha_q}{n_q+1} \left\{ \bar{\epsilon}_q \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin \theta \right\}^{n_q+1} \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dx \end{aligned} \quad (5)$$

となる．

したがって，点AがAからBまで移動する過程で第4象限を構成する試験部分に加えられる全仕事は

$$E_{q,4} = \frac{\sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l \cdot \Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{2(n_q+1) \cdot (n_q+3) \cdot \Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \cdot \sigma_q \cdot \bar{\epsilon}_q \quad (6)$$

となる．ここで l は試験部分の長さである．

点AがFig. 1 のCからDまで移動する過程は圧縮仕事に加えられる過程であり， σ_{-q} , $\bar{\epsilon}_{-q}$, n_{-q} を使用すれば，その仕事は(6)式と同形となる．この仕事を $E_{-q,2}$ とする．

さらに，点AがFig. 1 の第3象限を移動する場合には，擬似弾性エネルギーの放出がある．このエネルギー成分は上と同様の計算法により

$$I_{RRAD}, E_{q,3} = \frac{\sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l \cdot \Gamma\left(\frac{m_q+2}{2}\right)}{2(m_q+1)(m_q+3)\Gamma\left(\frac{m_q+3}{2}\right)} \cdot \sigma_{q,e} \cdot \bar{\varepsilon}_q \quad (7)$$

となる。また、点Aが第1象限を移動する過程で放出する同エネルギー成分 $I_{RRAD}, E_{q,1}$ は m_{-q} , $\sigma_{-q,e}$, $\bar{\varepsilon}_{-q}$ を使用することにより(7)と同形の式となる。

以上の各エネルギーはFig. 1の第4象限のみにより計算されているが、他の象限も1 cycleで同様の仕事に加えられたり、エネルギーを放出したりすることから、試験片全体に対する擬似弾性エネルギー表現およびこのエネルギーを全仕事から除いた成分、すなわち塑性ひずみエネルギー成分に対する表現として、それぞれ次式を得る。

$$I_{RRAD}, (E)_q = 2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l \cdot \left\{ \frac{\Gamma\left(\frac{m_q+2}{2}\right)}{(m_q+1)(m_q+3) \cdot \Gamma\left(\frac{m_q+3}{2}\right)} \cdot \sigma_{q,e} \cdot \bar{\varepsilon}_q + \frac{\Gamma\left(\frac{m_{-q}+2}{2}\right)}{(m_{-q}+1)(m_{-q}+3) \cdot \Gamma\left(\frac{m_{-q}+3}{2}\right)} \cdot \sigma_{-q,e} \cdot \bar{\varepsilon}_{-q} \right\} \quad (8)$$

$$(E_{pq}) = 2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l \cdot \left\{ \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{(n_q+1)(n_q+3) \cdot \Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \cdot \sigma_q \cdot \bar{\varepsilon}_q + \frac{\Gamma\left(\frac{n_{-q}+2}{2}\right)}{(n_{-q}+1)(n_{-q}+3) \cdot \Gamma\left(\frac{n_{-q}+3}{2}\right)} \cdot \sigma_{-q} \cdot \bar{\varepsilon}_{-q} \right\} - I_{RRAD}, (E)_q \quad (9)$$

これらの式に含まれる未知応力 $\sigma_{q,e}$ と $\sigma_{-q,e}$ はモーメントの平衡条件から求まる。

$$\sigma_{q,e} = \frac{m_q+3}{n_q+3} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{m_q+3}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{m_q+2}{2}\right)} \cdot \sigma_q \quad (10)$$

(8)と(9)式は、このまま実験のエネルギー解析に利用できないので、次式でひずみとたわみ間の直線関係を表示する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\delta}_{q,y} &= P_q \cdot \bar{\varepsilon}_{q,y}, \quad \bar{\delta}_q = P_q \cdot \bar{\varepsilon}_q \\ \bar{\delta}_{q,y} &= Q_q \cdot \bar{\varepsilon}_{q,y}, \quad \bar{\delta}_q = Q_q \cdot \bar{\varepsilon}_q \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで、 P_q と Q_q はたわみのひずみ変換係数であり、静的曲げ試験によると、 $P_q = 5000 \text{ mm}$, $Q_q = 5278 \text{ mm}$ のそれぞれ一定値となった。

これらの関係と、さらに、次式で定義される動係数 D_q

$$\bar{\delta}_q = D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s}, \dots, D_q = \left(1 + \frac{\Delta \bar{\delta}_q}{\bar{\delta}_{q,s}}\right) \quad (12)$$

ここで、 $\Delta \bar{\delta}_q = \bar{\delta}_q - \bar{\delta}_{q,s}$ である。

を導入する。ただし、 $\bar{\delta}_q$ は一時休止直前の動的たわみで、 $\bar{\delta}_{q,s}$ は休止後行なわれる静的曲げ試験における最大たわみとする。この一時休止後の静的曲げ試験により得られる履歴半曲線 (Fig. 3) は、 D_q の導入により近似的に動的履歴半曲線になるものと仮定し、さらにこの曲線解析により得られる冪は n_q と m_q であり、Fig. 3の応力の負側で描かれるであろう半曲線が上の半曲線と等しいと仮定すれば $n_q = n_{-q}$, $m_q = m_{-q}$ となる。

Fig. 3. Static half hysteresis curve.

これらの関係を(8)と(9)式に代入すると、実験で利用できる、1 cycle 当たりで発生するそれぞれのエネルギー量を表わす次式が得られる。

$$I_{RRAD}, (E)_q = \frac{4 \cdot \sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l}{Q_q} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{(m_q+1)(n_q+3) \cdot \Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \cdot \sigma_q \cdot (D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s}) \quad (13)$$

$$(E_{pq}) = \frac{4 \cdot \sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l \cdot \Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{(n_q+3) \cdot \Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \cdot \left\{ \frac{\sigma_q \cdot (D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s})}{(n_q+1) \cdot P_q} - \frac{\sigma_q \cdot (D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s})}{(m_q+1) \cdot Q_q} \right\} \quad (14)$$

したがって、疲労進行にともなって累積するエネルギー量は、 $q=1, 2, 3, \dots, q$ であるから、

$$\sum_{q=1}^q I_{RRAD}, (E)_q, \sum_{q=1}^q (E_{pq}) \quad (15)$$

となる。

3 実験方法, 結果, および考察

3.1 試験片準備

試験片素材は Table I に化学成分を示した2種類の炭素鋼であり、これより通常高温回転曲げ疲労試験で用いられると同様の試験片形状寸法に機械加工し、次いで、真空炉中にて $900^\circ\text{C} \cdot 1 \text{ hr}$ の焼なまし炉冷を施した後、試験部分をエメリー研磨による平滑表面として供試材とした。供試材の機械的性質を Table I

Table I. Chemical composition and mechanical property.

Steel (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Tensile strength (kg/mm ²)	Upper yield point (kg/mm ²)	Lower yield point (kg/mm ²)	Elongation (%)
0.18-C	0.18	0.28	0.43	0.012	0.023	40.3	26.7	23.5	43.6
0.14-C	0.14	0.28	0.41	0.010	0.017	35.5	27.3	21.8	51.7

Table II. Properties of pearlite patch included in steels.

Steel (%)	Ferrite grain size	Shape	Mean area (μ^2)	Max. area (μ^2)	Existence frequency (%)			Mean distance (μ)	Mean distance between large pearlite patches (μ^2)
0.18-C	No. 7 (JIS. GO552)	Frag-mentary	106	452	200 μ^2 < 9.5	300 μ^2 < 6.3	400 μ^2 < 1.0	22.7	37.0 (300 μ^2 <)
0.14-C	(")	Nearly spherical	82.8	309	9.5	3.5	0	15.5	57.2 (200 μ^2 <)

に併記した。

2種類の供試材に含まれる pearlite patch の形状、大きさ、分布等の分類は存在頻度分布を調査して、Table II に数値的整理結果を示した。この結果、0.18% C 供試材には、粗大で碎片状の pearlite patch が存在し、分散の度合も良好でなく、かつ 300 μ^2 以上の patch 面積を有する粗大 patch 間々隔も接近していた。一方、0.14% C 材には、比較的微細な球状 patch が存在し、分散度も良好で、面積 300 μ^2 を越えるものの存在は 3.5% に過ぎない。200 μ^2 以上の比較的大きな patch 間距離も大であった。

3・2 疲労試験とたわみ測定

疲労試験は試験速度 2 800 r. p. m. の小野式回転曲げ試験機で実施した。供試材に対する近似的 S-N 曲線を Fig. 4 に示した。エネルギー解析および組織変化調査を行なった応力振幅は $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$ と $\sigma = 19 \text{ kg/mm}^2$ であった。両振幅において、炭素含有量の少ない 0.14% C 鋼の方がより疲労寿命が長かったことは pearlite patch の形状、大きさ、分布等の影響であると思われる。疲労試験中でのたわみの測定は、接触端にミニチュアベアリングをつけたダイヤルゲージ (1/1 000 mm) で行なった。この測定結果を Fig. 5 と 6 に示した。これらの図において、試験片 C では繰返し数 $q = 1.5 \times 10^4$ に至るまで手廻し駆動によるたわみ測定を、さらに q が増した場合は動的駆動一時休止を行ないつつたわみ測定を行なったので $\bar{\delta}_{q,s}$ を示し、他は $\bar{\delta}_q$ を示す。

Fig. 4. Approximate S-N curve.

(0.18% C-steel, $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 5. Deflection change.

(0.14% C-steel, $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 6. Deflection change.

3・3 静的半履歴曲線

Fig. 7 は 0.18% C 鋼の $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$ における半履歴曲線の一例である。これらに比し、0.14% C 鋼の場合は、曲線で囲まれる面積がいずれの繰返し数においても小であった。図中の動係数 D_q は試験片 C に対する別の試験片 A の値を記した。応力振幅 $\sigma = 19 \text{ kg/mm}^2$ では、 $q = 1$ 、すなわち 1 cycle から履歴現象が現われ、かつ 0.18% C 鋼の方が履歴現象が顕著に現われた。

これら曲線群における応力減少過程は、いずれの場合においても、またいずれの繰返し数においても直線

Fig. 7. Static half-hysteresis curve
 $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$.

的ではなかった。

3・4 1 cycle 当たりのエネルギー発生量解析結果

(13) と (14) 式を用いて計算した擬似弾性エネルギー・ $I_{RRAD} \cdot (E)_q$ と塑性ひずみエネルギー・ (E_{pq}) の発生量の繰返し数・ q に対する変化の解析結果の一例を Fig. 8 に示す。

図において、 (E_{pq}) の変化には 2 箇の peak が現われる。この現われ方は pearlite patch が粗大な 0.18% C 鋼の方が顕著で、かつエネルギー発生量も多い。これらのことは応力振幅にもろろ依存する。

Fig. 8. Changes of energy/cycle constant stress amplitude $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$.

3・5 累積エネルギー解析結果

1 cycle 当たりのエネルギー発生量を繰返し数に関し数値積分することにより、それらの累積量 $\sum I_{RRAD} \cdot (E)_q$ と $\sum (E_{pq})$ を解析して図示すると Fig. 9 と 10 などを得る。

$\sum I_{RRAD} \cdot (E)_q$ の変化は、0.18% C 鋼の場合、いずれの応力振幅でも 700 kg-m のエネルギー量に到達する繰返し数まで一本の直線で表わされ、それ以後急激にその直線の傾斜が変わる。また、0.14% C 鋼の場合は、いずれの応力振幅でも破断に至るまで一本の直線で示される変化をする。これらの直線の変化の過程に対して次式が成立する。

$$\sum_{q=1}^q I_{RRAD} \cdot (E)_q = A \cdot q^K \quad (17)$$

ここで、 A は近似的に通常の弾性エネルギー計算で求め得るその初期値であり、 K は試験片材料の性質や実

Fig. 9. Accumulated energy change.

Fig. 10. Accumulated energy change

験法により定まる定数である。これらの値を計算すると、0.18% C 鋼の場合、 $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$ において、 $A = 0.014 \text{ kg-m}$ 、 $K = 1.032$ 、および $\sigma = 19 \text{ kg/mm}^2$ において、 $A = 0.015 \text{ kg-m}$ 、 $K = 0.988$ であった。また、0.14% C 鋼では、 $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$ では $A = 0.014 \text{ kg-m}$ 、 $K = 1.034$ となり、 $\sigma = 19 \text{ kg/mm}^2$ では $A = 0.015 \text{ kg-m}$ 、 $K = 0.994$ となった。

もしも、micro-crack の発生を Wood の提案による、jumping mechanism に起因する intrusion の交差発生と定義すれば、比較的粗大な pearlite patch を含む 0.18% C 鋼に対して、そのとき、 $\sum_q I_{RRAD} \cdot (E)_q = 700 \text{ kg-m}$ として、(17) 式により発生繰返し数を予知できる。また、比較的微細な pearlite patch を含む 0.14% C 鋼の場合、破断に至るまで直線となることから、さらに多くの実験を行なうことにより破断繰返し数の予知が可能となると考えられる。以前に行なった繰返しねじり疲労過程に対するエネルギー解析結果においても、(16) 式が成立した。

次に、 $\sum (E_{pq})$ の q に対する変化には、Fig. 9 と 10

に示されるごとく、 $\sigma=18 \text{ kg/mm}^2$ の応力振幅では5本の折直線とそれらの交点としての4節点が両鋼共に現われ、 $\sigma=19 \text{ kg/mm}^2$ ではともに第1番目節点が消滅している。

これらのことは、河本等の指摘した疲労進行過程の5段階区分と符合するものと考えられる。疲労初期過程で現われる第1節点は非弾性応答の開始繰返し数に相当し、第2節点は材料の降伏現象に密接に関連して現われる。第3と第4節点は応力振幅と鋼種に関係なく、それぞれ $\sum(E_{pq})$ が 10 kg-m と 200 kg-m に近似的に到達すれば次々に現われた。さらに、破断時の累積塑性ひずみエネルギー量は応力振幅のみに依存して、鋼種に関係のない一定値、すなわち $\sigma=18 \text{ kg/mm}^2$ で 3250 kg-m 、 $\sigma=19 \text{ kg/mm}^2$ で 3500 kg-m

であった。

3・6 電子顕微鏡による組織変化と破面の観察

観察の目的を pearlite patch とその周辺部の疲労進行にともなう変化の調査と破面に現われる striation mode と tire track の調査においたが、前者に対して ferrite 素地に現われる変化との差異も調査した。Fig. 11 (a)と(b)は比較的大きな pearlite patch を含む $0.18\% \text{ C}$ 鋼の組織変化を示す一例である。 $\sum(E_{pq})$ の変化に現われた節点繰返し数付近で現われた組織変化を調査した結果、写真(a)は第2節点 ($q=10^3$) におけるもので、fine slip が、第3節点 (3.5×10^3) 付近で slip band が、また第4節点 (3×10^4) で intrusion (写真b) がそれぞれ発生した。さらに、 $\sum(\text{IRRAD.}(E))_q=700 \text{ kg-m}$ となる。 $q=4 \times 10^4$ 付近では intrusion の交差が確認された。Fig. 11 (c) に多数発生した tire track の一例を示す。

Fig. 11 (d)と(e)は比較的微細な patch を含む $0.14\% \text{ C}$ 鋼の鏡面研摩を施こされたままの平滑表面に疲労進行に伴って現われた変化の一例を示したものである。Fine slip, slip band, intrusion 等の発生期は上述と同様、各節点発生繰返し数と対応したが、特に、介在物や pearlite patch の近傍表面で、これら組織変化の集中的発生が確認された。Fig. 11 (f)は $0.14\% \text{ C}$ 鋼破面で通常観察される不規則な striation 模様を示す。

Pearlite patch は組織変化発生の要因となるばかりでなく、それらの伝ばに対して抑制的役割をも演じているものと考えられる。さらに、これらの変化発生には、ことごとく累積塑性ひずみエネルギーの一定値が密接に関連していることは興味深い。これらの一定値を変化発生のためのエネルギー限界値と考えれば、それら限界値からその時々熱エネルギー変換量および放散量を除くことにより、fine slip, slip band, intrusion, 等の発生および破断に要する内部エネルギー(内部エネルギーの定義は Langhaar⁸⁾ による)の限界値を知ることができよう。

4 結 論

本実験の結果および考察の範囲で次の結論を得た。

(1) Pearlite patch の形状、大きさ、分布等は疲労寿命およびたわみ変化に重大な影響を及ぼし、さらに破断以前に現われるたわみの漸増・飽和現象には応力振幅とともに影響を与える。

(2) 繰返し数に対する累積擬弾性エネルギー

(a) Fine slip, ($q=10^3$, $0.18\% \text{ C}$)
 (b) Intrusion caused in the vicinity of a patch, ($q=3 \times 10^4$, $0.18\% \text{ C}$)
 (c) A most notable type of tire tracks, ($q=2.7 \times 10^5$, $0.18\% \text{ C}$, at fracture surface)
 (d) Disturbance of No-etch surface at an inclusion surroundings, ($q=10^3$, $0.14\% \text{ C}$)
 (e) Crossing intrusions caused on the No-etch surface, (at fracture, $q=9.4 \times 10^5$, $0.14\% \text{ C}$)
 (f) A most often observed type of irregular striation mode reserved on the fracture surface of a $0.14\% \text{ C}$ -steel.

Fig. 11. Surface structural change in the vicinity of pearlite patches caused during the rotatory bending fatigue tests of the $0.18\% \text{ C}$ steels under the stress amplitude $\sigma=18 \text{ kg/mm}^2$.

ギ量変化に関して成立する式, $\sum_{q=1}^q I_{RRAD.}(E)_q = A \cdot q^K$ は, patch の性質により異なるが, intrusion の交差発生繰返し数, または寿命の予知に使用可能である.

(3) Pearlite patch の存在は fine slip, slip band, intrusion, および macro-crack 等の発生の要因となると同時にそれらの伝ばに対しては抑制的役割をも演じている.

(4) 両対数紙に図示された累積塑性ひずみエネルギーの繰返し数に対する変化において, 非弾性応答および組織変化等の発生とそれぞれ関連する 4 節点が現われ, 疲労過程を 5 段階区分する. 第 1 節点は非弾性応答開始, また第 2 節点は降伏現象に関係がある.

第 3 と第 4 節点のそれぞれのエネルギー量は材料組織, および応力振幅に依存しないそれぞれの一定値となり, 第 3 節点で slip band が, 第 4 節点で intrusion がそれぞれ発生した. 破断時の累積塑性ひずみエネルギー量はそれぞれの応力振幅に対して一定値となり, かつ鋼種によっては変わらなかった.

本研究に対しご教示ご激励賜わった, 北大・秦 謹一教授ならびに防大・山田金雄教授に対し心から感謝

申し上げます. また, ご援助ご激励賜わった, 東京工業短大・関戸教授と防大・小野教授に感謝いたします.

(昭和46年5月21日 日本材料学会第20期総会議演説にて講演)

参 考 文 献

- 1) 河本 実, 田中道七, 赤松利章, 堀川吉一, 材料試験, **8**, 837 (1959).
- 2) Aoki, N, and C. Minamisawa, Proc. 13th. Japan Congr. on Materials Research, 82 (1970).
- 3) たとえば, Morrow, J., ASTM, **STP 378**, 45 (1965).
- 4) たとえば, 横堀武夫, 機誌, **65-523**, 1076 (1962).
- 5) たとえば, 横堀武夫, 前川一郎, 是川誠一, 東北大学工学報告, **28-1**, 65 (1963).
- 6) 河本 実, 中川隆夫, 柴田俊忍, 機論, **27**, 182 (1961).
- 7) 南澤 力, 青木 望, 笹部忠雄, 材料科学, **8**, 3, 163 (1971).
- 8) Langhaar, H. L., Energy Methods in Applied Mechanics, 11 (1962) John Wiley and Sons, Inc., New York