

鋼の回転曲げ疲労過程で発生する歪エネルギー変化に及ぼす温度変化の影響*

芳 賀 武**

1. 緒 言

雰囲気温度が $+20^{\circ}\text{C}$ と -20°C 間で変化した場合、鋼の回転曲げ疲労寿命および疲労進行過程における撓みの変化にその温度変化が如何なる影響を及ぼすかについては既に報告した⁽¹⁾。本研究は、さきに提案した歪エネルギー変化の解析方法⁽²⁾⁽³⁾を用いて、鋼の疲労進行過程で発生する歪エネルギー変化に及ぼす温度変化の影響を調査し、かつ発生する試験片表面の組織変化のそれらに対する関係および温度変化の影響で破面に現われた差異等を明らかにしたのでその結果を報告する。

2. 実験方法

試験片は真空中で 890°C 、1時間保持後炉中冷却をおこなった。供試材の化学成分と主な機械的性質を Table 1 に示す。試験片の形状寸法を Fig. 1 に示す。試験部分は焼なまし後、エメリー紙上のち、バフ研磨をし、5%硝酸アルコールと5%ピクリン酸アルコール

Table 1 Chemical composition and mechanical property.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Tensile strength (kg/mm^2)	Upper yield point (kg/mm^2)	Lower yield point (kg/mm^2)	Elongation (%)
0.14	0.28	0.41	0.010	0.017	35.5	27.3	21.8	51.7

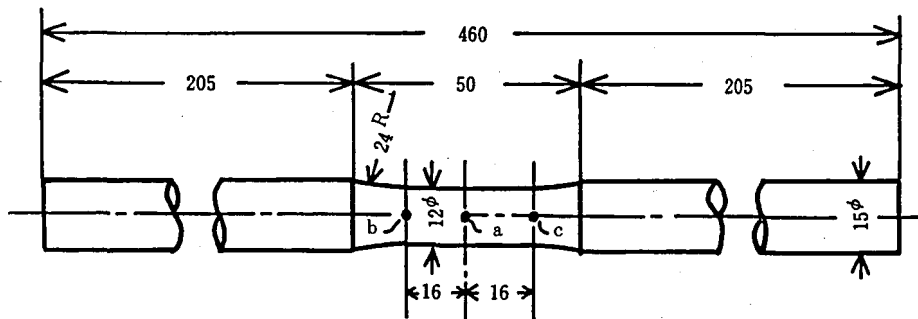


Fig. 1 Shape and size of a specimen, and the replicas are collected at the points of a, b, and c on the specimen surface.

* 第16回材料研究連合講演会発表 P.129

** 機械工学科

溶液で腐食し、結晶粒を確認し、その時の結晶粒度は7番であった。

疲労試験は小野式回転曲げ試験機を用い、応力振幅は20kg/mm²と一定にし、これを採用した。

歪エネルギーの解析は先に提案した擬似弾性歪エネルギー (U)_q および塑性歪エネルギー (E_{pq}) を表わす(1)式と繰返し数 q の増加にともなうそれらエネルギーの総和を表わす(2)式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} (U)_q &= \frac{4\sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l}{Q_q} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{(m_q+1)(n_q+3)\Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \cdot \sigma_q \cdot (D_q \cdot \bar{\delta}_{qs}) \\ (E_{pq}) &= \frac{4\sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l}{(n_q+3)} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \left\{ \frac{\sigma_q \cdot (D_q \cdot \bar{\delta}_{qs})}{(n_q+1)P_q} - \frac{\sigma_q (D_q \cdot \bar{\delta}_{qs})}{(m_q+1) \cdot Q_q} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{q=1}^q (U)_q &= 4\sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l \sum_{q=1}^q \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{(m_q+1)(n_q+3)\Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \cdot \sigma_q \cdot (D_q \cdot \bar{\delta}_{qs}) \\ \sum_{q=1}^q (E_{pq}) &= 4\sqrt{\pi} \cdot R^2 \cdot l \sum_{q=1}^q \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+2}{2}\right)}{(n_q+3)\Gamma\left(\frac{n_q+3}{2}\right)} \left\{ \frac{\sigma_q (D_q \cdot \bar{\delta}_{qs})}{(n_q+1)P_q} - \frac{\sigma_q (D_q \cdot \bar{\delta}_{qs})}{(m_q+1) \cdot Q_q} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 R は試験片部分の半径、 l は試験片平行部の長さ、 D_q は動係数、 P_q と Q_q は撓みの歪への変換係数 ($\bar{\delta}_{qy} = P_q \bar{\epsilon}_{qy}$, $\bar{\delta}_{qy} = Q_q \bar{\epsilon}_{qy}$ なる直線性より)、 n_q と m_q は復歴曲線を単項べき関数で近似したときのべき、 $\bar{\delta}_{q,s}$ と $\bar{\delta}_{q,s}$ は静的曲げ試験における最大撓みと回復撓みである。動的撓み ($D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s}$, $D_q \cdot \bar{\delta}_{q,s}$) および静的撓み ($\bar{\delta}_{q,s}$, $\bar{\delta}_{q,s}$) は先端にミニチュアベアリングをつけたダイヤルゲージ (1/100mm) により測定した。

雰囲気温度が+20°Cと-20°Cの低温装置を用い、先ず+20°Cあるいは-20°Cの各々の一定温度に保持し、各3本の試験片で疲労試験を行い、つぎに+20°Cから-20°C (15分ぐらい) および-20°Cから+20°C (10分ぐらい) への温度変化を $q=2.5 \times 10^4$ において一時休止して行ない、続いて試験を続行し行なった。

また組織変化の観察と破面観察は電子顕微鏡観察により実施した。

3. 実験結果

Fig. 2 は+20°C, Fig. 3は-20°C, Fig. 4は+20°Cから-20°Cへ、そしてFig. 5は-20°Cから+20°Cへそれぞれ一回温度変化を与えたときの、それぞれの場合における歪エネルギー総和の解析結果である (1サイクルあたりに発生する歪エネルギー解析については省略する)。 $\sum_{q=1}^q (U)_q$ の変化は Fig. 2 と Fig. 3 において破断にいたるまで直線的であり

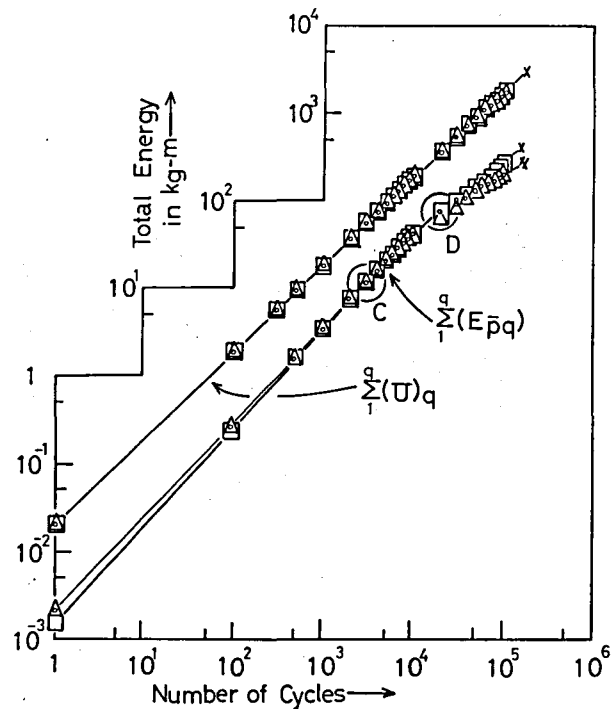


Fig. 2 The respective total energy changes caused by the fatigue test under $\sigma=20\text{kg/mm}^2$ and $T=+20\pm 2^\circ\text{C}$.

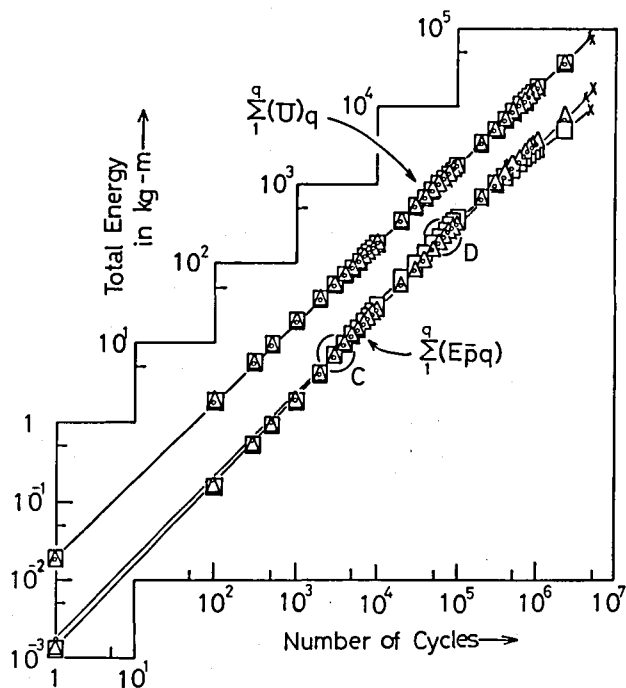


Fig. 3 The respective total energy changes produced by the fatigue test under $\sigma=20\text{kg/mm}^2$ and $T=-20\pm 2^\circ\text{C}$.

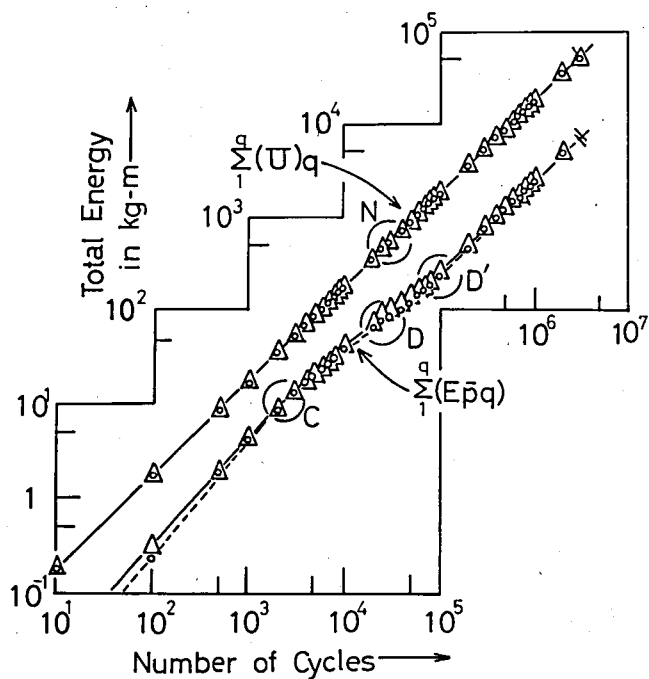


Fig. 4 The respective total energy changes caused by the fatigue test with the temperature change from $+20^{\circ}\text{C}$ to -20°C , and under $\sigma=20\text{kg/mm}^2$.

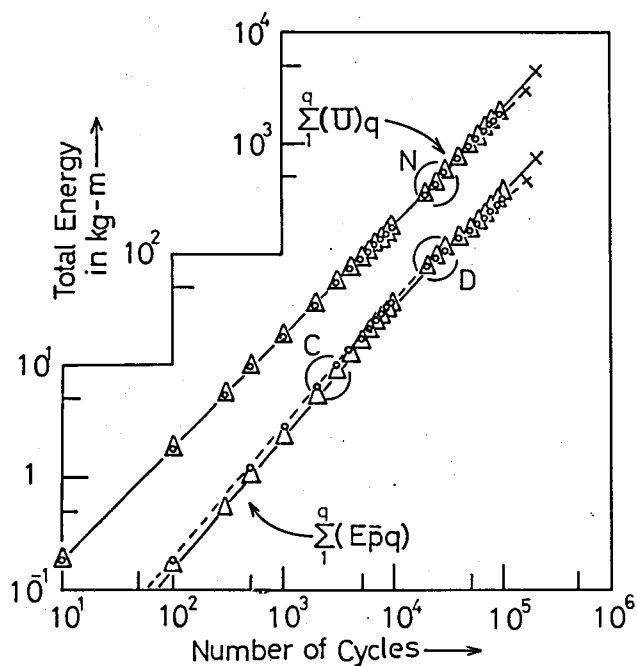


Fig. 5 The respective total energy changes caused by the fatigue test with the temperature change from -20°C to $+20^{\circ}\text{C}$, and under the same stress amplitude.

$$\sum_{q=1}^q (U)_q = Aq^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

なる式で表わすことができる。この(3)式をもとに破断の予知に低温雰囲気でも使用可能のように考えられる。また温度変化を与えた $q=2.5 \times 10^4$ 繰返し数で節点を生じている。これは温度によってエネルギーの発生量が異なるためと考える。それ以後の直線の傾斜は Fig. 4 と Fig. 5 では特徴が異なり逆である。

$\sum_{q=1}^q (E_{pq})$ の変化には、Fig. 2 と Fig. 3 に示すごとく、2 節点 (C, D) が現われる。さらに Fig. 4 と Fig. 5 にもこれら 2 節点が現われ、特に Fig. 4 には温度変化に起因したものと考えられる D' 節点が現われた。

これらすべての図において、節点 C は塑性歪エネルギー総和量が近似的に $10 \text{ kg} \cdot \text{m}$ に到達する繰返し数付近で現われていることが確認出来る。

$\sum_{q=1}^q (E_{pq})$ の各節点は組織変化と密接な関係があり、それぞれ fine slip, slip band, intrusion or extrusion および破壊の過程が観察された。つぎに破断面の様相は $+20^\circ\text{C}$ でディンプル・パターンが認められ、 -20°C では認められず、ストライエーションとタイヤトラックが認められる。また途中で温度変化を与えた 2 つの場合は両者の特徴が混在しているが、その割合は異なり、 $+20^\circ\text{C}$ から -20°C への変化の場合、ディンプルはわずかに認められるのみであった。

歪エネルギー解析において、(3)式を変形して、 $\sum_{q=1}^q (U)_q = A \cdot q^2 \cdot F(t) \dots\dots\dots (4)$ とし、 $F(20^\circ) = 1$, $F(-20^\circ) = 0.8674$, $A = 14.2 \text{ kg} \cdot \text{mm}$, $K = 1.033$ として、

$$\left. \begin{aligned} \sum_{q=1}^q (U)_q &= Aq^2 \cdot F(20) + A(N-q_1)^2 \cdot F(-20^\circ), \\ \sum_{q=1}^q (U)_q &= Aq_2^2 \cdot F(-20^\circ) + A(N-q_2)^2 \cdot F(20^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

により温度変化が与えられた場合の破断時 (N) におけるエネルギーを計算すると実験値に近い値を得た。よってこの場合も破断予知が可能となるものと考えられる。

4. 結 論

以上の実験結果から、つぎのような結論を得た。

- (1) $\sum_{q=1}^q (U)_q = A \cdot q^2 \cdot F(t) \dots\dots\dots (4)$ の式を基準として、破壊の近似的予知が可能である。
- (2) 疲労過程における $+20^\circ\text{C}$ から -20°C およびこれと逆の雰囲気による温度変化は鋼の疲労寿命を含む疲労現象に大きな影響を及ぼす。
- (3) 歪エネルギー変化と組織変化とは密接な関係があり、特に $\sum (E_{pq})$ の各節点は fine slip, slip band, intrusion および extrusion の発生と関連する。
- (4) 破面の様相においては温度変化の影響により異った破面様相を示した。

本研究は防衛大学校南沢 力助教授ならびに青木 望助手等と共同研究をおこなったもので、この研究の詳細については日本材料学会“材料”に投稿中である。またこの研究は第16回材料研究連合講演会に発表したものである。

参 考 文 献

- (1) Aoki, N., and C. Minamisawa, Proc. 13th. Japan Congr. on Materials Research, 80 (1970).
- (2) 南沢 力, 青木 望, 芳賀 武, 石田有示, 材料 21-221, 90 (1972).
- (3) C. Minamisawa, N. Aoki, T. Haga and Y. Ishi-Da, Proc. 15th. Japan Congr. on Mesearch, 86 (1972).