

繰返し曲げ疲労過程で発生する 歪エネルギー変化の一解析法*

芳 賀 武**

1. 緒 言

さきに鋼の回転曲げ，およびねじり疲労過程における歪エネルギー変化の解析法⁽¹⁾⁽²⁾を提案し，具体的な解析例と共に報告してきたが，本報告は断面形状が長方形，および円形の試験片による繰返し曲げ疲労過程における歪エネルギー式を導出し，その解析例として長方形断面を有する 18-8 ステンレス鋼によって実験を行ない，歪エネルギー変化と組織変化の関係等を調査研究したので報告する。

2. エネルギー式

(2-1) 長方形断面の場合

繰返し曲げ疲労過程の任意の qth cycle 目に Fig. 1 の hysteresis curve が現われたとし，上半分の half cycle 応力増加過程を考え，原点を $(0, \epsilon'_{-(q-1)})$ に移し，この曲線の応力一歪関係を

$$\sigma_{qx} = \alpha_q \epsilon_{qx}^{nq} \dots \dots \dots (1) \quad \text{また}$$

$$\bar{\epsilon}_q = |\epsilon'_{-(q-1)}| + |\epsilon_q| \dots \dots \dots (2) \quad \text{とおく.}$$

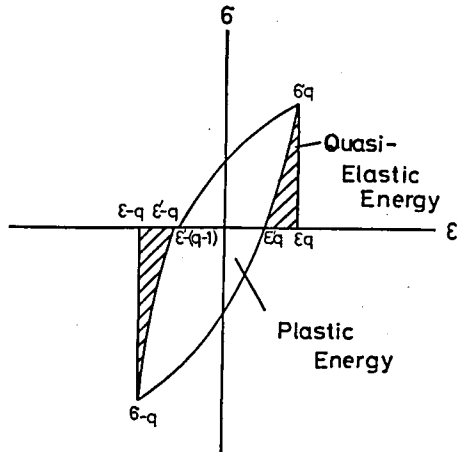


Fig. 1 Hysteresis curve

試験片の曲げに関する平衡式は $M_q = 2b\rho^2 \int_0^{\epsilon_q} \sigma_{qx} \epsilon_{qx} d\epsilon_{qx} \dots \dots \dots (3) \quad b : \text{試験片幅}$

試験片が曲げモーメントを受けて Fig. 2 のように変形したとする。

$a_1 - b_1$ は測定可能である。

$$(a_1 - b_1) / e = \theta \dots \dots \dots (4)$$

とするとこの θ と試験片に生ずる表皮歪は直線関係を有するから

$$\theta_x = C \epsilon_x \dots \dots \dots (5)$$

(3)式に(1), (5)式を代入すると，

* 第16回材料研究連合講演会発表 P. 131
 Proceeding of the 16th Japan congress on Materials Research 148 (1973)に掲載
 ** 機械工学科

$$M_q = \frac{bh^2\alpha}{2(n_q+2)C^{n_q}}\theta^{-n_q} = K\theta^{-n_q}$$

$$K = \frac{bh^2\alpha}{2(n_q+2)C^{n_q}}$$

ここで h は試験片の厚さである。

一般に $M_{qx} = K_q \theta_{qx}^{n_q}$ (6)

したがって、 $(0, \epsilon'_{-(q-1)})$ から (σ_q, ϵ_q) に至る過程で加えられる仕事量は

$$E_q = \int_0^{\theta_q} N_{qx} d\theta_{qx} = \frac{bh^2c}{2(n_q+1)(n_q+2)} \sigma_q (\epsilon'_{-(q-1)} + \epsilon_q) \text{ (7)}$$

つぎに座標 (σ_q, ϵ_q) から $(0, \epsilon'_q)$ に至る回復過程で放出される擬似弾性エネルギー U_q は $\bar{\epsilon}_q = \epsilon_q - \epsilon'_q$, $\bar{\theta}_q = \theta_q - \theta'_q$ (8) とおき、この曲線を $\sigma_{qx} = \beta \epsilon_{qx}^{m_q}$, $\sigma_{qe} = \bar{\beta} \bar{\epsilon}_q^{m_q}$... (9)

で近似すると、逆モーメントは

$$-M_q = -\frac{m_q+2}{n_q+2} \sigma_q \text{ (10)}$$

これを M と等置して、

$$\sigma_{qe} = -\frac{m_q+2}{n_q+2} \sigma_q \text{ (11)}$$

そこで応力増加過程と同様な計算でつぎの式を得る。

$$U_q = \frac{bh^2c}{2(m_q+1)(m_q+2)} \sigma_q (\epsilon_q - \epsilon'_q) \text{ (12)}$$

(7)式と(12)式の差が最初の half cycle で試験片にたくわえられる塑性歪エネルギーとなる。

つぎの half cycle では曲線を $\sigma_{-qx} = \alpha_{-q} \bar{\epsilon}_{-qx}^{n-q}$ および $\sigma_{-qx} = \beta_{-q} \bar{\epsilon}_{-qx}^{m-q}$ とおいて同様な方法で放出エネルギー、および塑性歪エネルギーが求められる。 q th cycle 全体で放出されるエネルギー (U_q) およびたくわえられる塑性歪エネルギー (E_{pq}) は

$$(U)_q = \frac{bh^2c}{2} \left[\frac{\sigma_q}{(m_q+1)(n_q+2)} (\epsilon_q - \epsilon'_q) + \frac{\sigma_{-q}}{(m_{-q}+1)(n_{-q}+2)} (\epsilon_{-q} - \epsilon'_{-q}) \right] \text{ (13)}$$

$$(E_{pq}) = \frac{bh^2c}{2} \left\{ \left[\frac{\sigma_q}{(n_q+1)(n_q+2)} (\epsilon'_{-(q-1)} + \epsilon_q) + \frac{\sigma_{-q}}{(n_{-q}+1)(n_{-q}+2)} (\epsilon'_q + \epsilon_{-q}) \right] \right\}$$

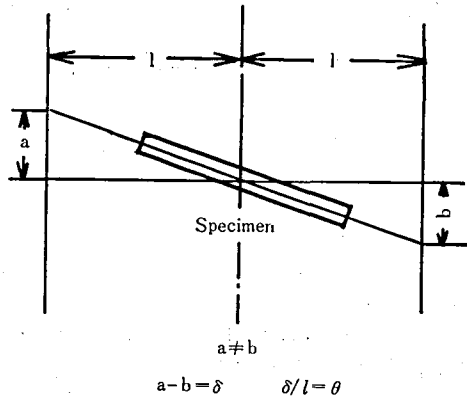


Fig. 2 Stress Distribution

$$-\left\{ \frac{\sigma_q}{(m_q+1)(n_q+2)} (\epsilon_q - \epsilon'_q) + \frac{\sigma_{-q}}{(m_{-q}+1)(n_{-q}+2)} (\epsilon_{-q} - \epsilon'_{-q}) \right\} \dots\dots\dots (14)$$

q th cycle までの総和量は

$$U = \sum_1^q (U)_q, \quad E = \sum_1^q (E_{pq}) \dots\dots\dots (15)$$

となる。

(2-2) 円形断面の場合

断面内の歪分布は直線的とし、中立軸は図心 0 を通ると仮定する。

任意の qth cycle で試験片が inelastic response をすれば明らかに Hysteresis curve が描かれる。記号は対応する応力、歪を長方形断面の場合と同じにとり、

$\sigma_{qx} = \alpha_q \epsilon_{qx}^{n_q}$ とすれば、曲げモーメントに関する平衡式は Fig. 3 より

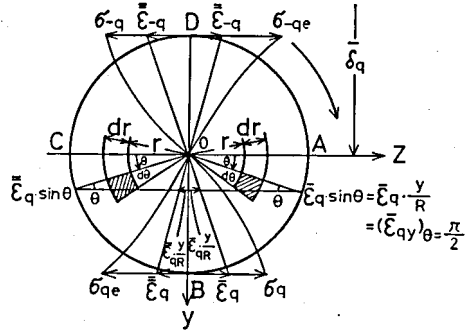


Fig. 3 Stress and Strain Distribution

$$M_q = 4\alpha_q \rho^3 \int_0^R \epsilon_{qx}^{n_q+1} \sqrt{\epsilon_q^2 - \epsilon_{qx}^2} d\epsilon_{qx} \dots\dots\dots (16)$$

したがって、長方形断面の場合と同様なことを行なって 1st. cycle から qth cycle までに放出されるエネルギー、およびたくわえられる塑性歪エネルギーが得られる。

$$\sum_1^q (U)_q = 1.77R^3 \sum_1^q C_q \left[\frac{\Gamma(\frac{n_q+2}{2})}{\Gamma(\frac{n_q+5}{2})} \cdot \frac{\sigma_q (\epsilon_q - \epsilon'_q)}{m_q+1} + \frac{\Gamma(\frac{n_{-q}+2}{2})}{\Gamma(\frac{n_{-q}+5}{2})} \cdot \frac{\sigma_{-q} (\epsilon_{-q} - \epsilon'_{-q})}{m_{-q}+1} \right] \dots\dots\dots (17)$$

$$\begin{aligned} \sum_1^q (E_{pq}) &= 1.77R^3 \sum_1^q C_q \left[\frac{\Gamma(\frac{n_q+2}{2})}{\Gamma(\frac{n_q+5}{2})} \sigma_q \left\{ \frac{(\epsilon'_q - (q-1)\epsilon_q)}{n_q+1} - \frac{(\epsilon_q - \epsilon'_q)}{m_q+1} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\Gamma(\frac{n_{-q}+2}{2})}{\Gamma(\frac{n_{-q}+5}{2})} \sigma_{-q} \left\{ \frac{(\epsilon'_q + \epsilon_{-q})}{n_{-q}+1} - \frac{(\epsilon_{-q} - \epsilon'_{-q})}{m_{-q}+1} \right\} \right] \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

3. 実験方法

繰返し速度 3000r. p. m. のシェンク型疲労試験機を用い、Table 1 に示すような化学成分、および機械的性質である 18-8 ステンレス鋼 (SUS27) についてエネルギー解析を行ない、かつ顕微鏡組織変化を調べ、これらの相関関係を検討した。

Table 1 Chemical Composition and Mechanical Property of Test Material (SUS 27) (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Tensile Strength	Elongation
0.06	0.57	1.82	0.002	0.009	8.96	18.27	0.18	0.07	57kg/mm ²	63.0%

試験片の断面形状は長方形であったので計算は(13)~(15)式を用いて行なった。

試験部分の寸法は Fig. 4 に示す長さ39mm, 幅8mm, 厚さ3mmであり, 1100°C, 1hr 保持後, 水焼入れを行なった材料である。

長方形断面の場合, 応力の検出は Fig. 5 に示すトルク棒表面に4枚の抵抗線歪ゲージを貼付する通常のトルク検出用自己温度保償ブリッジ回路を用い, 静的検出結果をもって, 実際に記録されたトルク変化を解析して, 最後に試験片に生ずる表皮剪断応力の変化を知る方法で実施した。応力に混入する誤差は±3%であった。

歪の検出は試験片の長手方向軸の中心に貼付された1枚のゲージ(標点距離3mm)で自己温度保償回路を得て実施した。剪断歪に含まれる誤差は±2.5%であった。

変位の検出は Fig. 6 に示すように, 試験片の長手方向にアルミニウム製の変位測定用棒を取り付け, この棒の一定の点にセットし測定を行なった。

表面の組織観察はその都度試験を中断し, 光学顕微鏡と二段

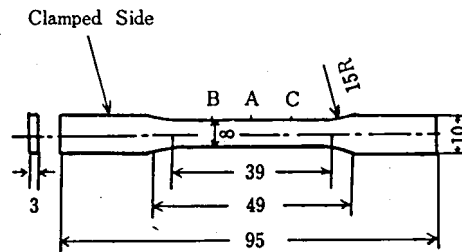


Fig. 4 Form and dimensions of fatigue test specimen.

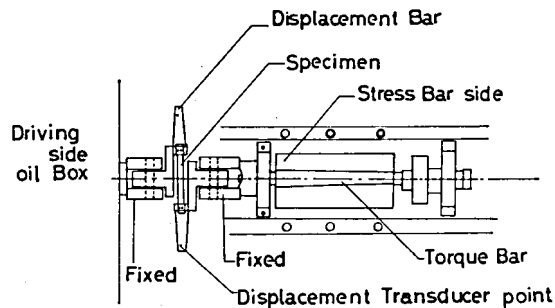


Fig. 5 Schenck-type Bending Fatigue Testing Machine

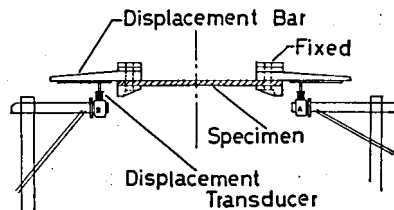


Fig. 6 Apparatus of Displacement Tester

レプリカ法による電子顕微鏡を使用した。

4. 実験結果および考察

4-1 エネルギー解析について

(4-1-1) べき (n_q, n_{-q}, m_q, m_{-q}) の決定

エネルギー式には(13)~(15)式を用い、これらの式に含まれるべき数はつぎのように求めた。記録紙上の記録曲線を応力とひずみの値に換算し、履歴曲線を書き(1)(6)および(9)式の関係から得られる。一方これらの式の両辺の常用対数をとると直線の方程式となる。したがって応力とひずみ間の任意の値、二点の両辺の常用対数を取り、対数方眼紙にプロットされた直線の傾斜から決定し、これをすべての繰返し数について求め、それぞれの繰返し数における n_q, n_{-q}, m_q および m_{-q} を決定した。

(4-1-2) 1サイクルあたりの擬似弾性エネルギーおよび塑性ひずみエネルギー発生量の疲労進行にともなう変化。

(13)および(14)式に含まれる応力およびひずみ差は記録曲線群からすべて知り得るし、またべきも上述の4-1-1で決定したので、これらの各値を上述の(13)および(14)式に入れて数値計算を行なえば、1サイクルあたりの各エネルギー発生量を知ることができる。

18-8 ステンレス鋼の通常速度による疲労試験におけるこれらエネルギー発生量の変化を Fig. 7 に示す。1サイクルあたりの塑性歪エネルギー発生量 ($E_{p,q}$) の変化と放出される擬似弾性エネルギー発生量の変化で表面組織と密接な関係があった。 $E_{p,q}$ において初期にピークが現われ、このときすべり運動^{(9)~(10)}が起り、第2のピークはすべり帯の交差によるブロック化の現象と関係があるように思われる。

(4-1-3) 累積擬似弾性エネルギーおよび累積塑性ひずみエネルギーの疲労進行にともなう変化と顕微鏡組織変化について

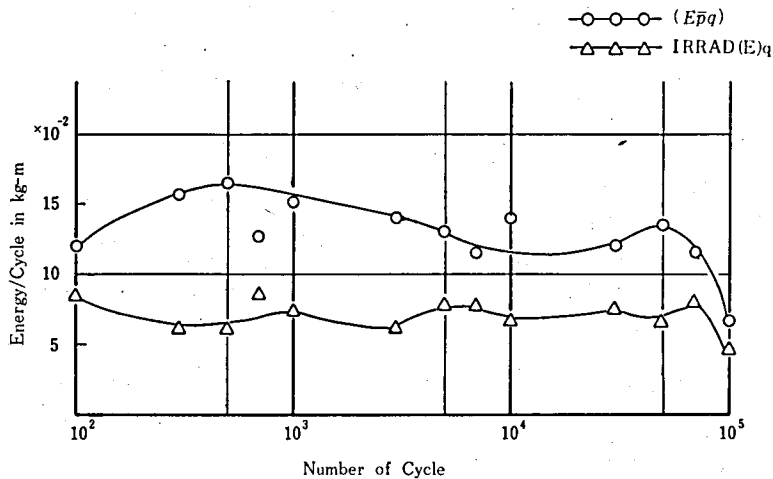


Fig. 7 Change of Energy/ Cycle Stress Amplitude $6=27\pm 2\text{kg/mm}^2$

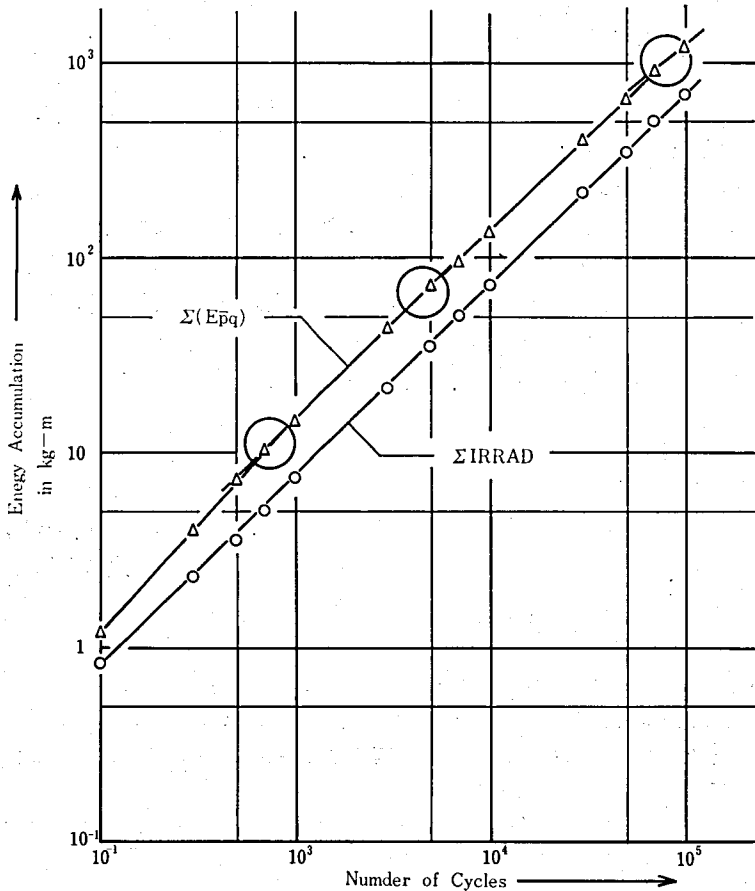


Fig. 8 Accumulated Energy Change Take Place During the Bending Fatigue Test of 18-8 Stainless Steel

(13)および(14)式に示される各累積エネルギーは(19)式で示される。1サイクルあたりの各エネルギーを繰返し数に対して数値積分することにより得られる。これらの累積エネルギーを計算し、両対数で図示すると Fig. 8 が得られた。

Photo. 1 はエネルギー解析と平行して繰返し数の増加とともに変化する組織を観察した代表的な電子顕微鏡組織である。

エネルギー解析と顕微鏡組織変化とは密接な関係があり、Fig. 9 において累積擬弾性エネルギーの疲労進行にともなう変化はマイクロ・クラックが発生する繰返し数まで直線的に増加する。累積塑性ひずみエネルギー $\Sigma(E_{pq})$ の変化には3節点が現われ、第1節点は $N=7 \times 10^2$ 付近で、節点が現われるのは静的降伏点エネルギーに密接な関係があるものと考えられる。第2節点は $N=5 \times 10^4$ 付近で試験片の表面に明瞭な均一なすべり帯が観察された。第3節点は $N=1 \times 10^5$ 付近でやはり顕微鏡で観察されたごとく、マイクロ・クラックが観察された。

この累積塑性ひずみエネルギーおよび累積擬弾性エネルギー変化は S28C および S30C

鋼材のねじりおよび回転曲げ疲労過程で求められている4段階区分と同様と考えられる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾.

5. 結 論

本研究結果からつぎのようなことが結論づけられる.

(1) 1サイクルあたりの擬似弾性エネルギーおよび塑性ひずみエネルギー発生量の疲労進行にともなう変化は表面組織変化と密接な関係がある.

(2) 繰返し数に対する累積擬似弾性エネルギー疲労進行にともなう変化に関して成立する式, すなわち $\Sigma(U)_q = A \cdot q^k$ なる式で表示できる. したがって寿命の予知に使用することが可能である.

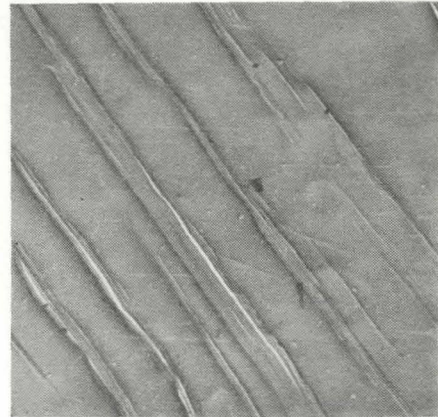
(3) 累積塑性ひずみ変化を繰返し数に対し, 両対数紙にプロットすれば各段階は折線となる. 疲労過程を4段階に区分でき, 第1節点は材料の降伏に関連があるものと考えられ, 第2節点はすべり線およびすべり帯が観察され, 第3節点付近でマイクロ・クラックが発生した.

(4) 本実験材料である18-8ステンレス鋼の特徴は疲労全域にわたって

$$\sum_1^q (U)_q < \sum_1^q (E_{p-q})$$

であって粘り材料であることがこの事実からも結論づけられる.

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第16回材料研究連合講演会前刷集 p. 131, Proceeding of the 16th Japan congress on Materials Research 148 (1973) に掲載してありますので参照下さい.



(a) $N=5 \times 10^3$ (b) $N=1 \times 10^4$ (c) $N=1 \times 10^5$

Photo. 1 Changes of electron-micrograph produced by repeated stress cycles. ($\sigma = 27 \pm 2 \text{ kg/mm}^2$, $N = 1, 55 \times 10^5$)

参 考 文 献

- (1) 南沢 力, 青木 望, 芳賀 武, 石田有示: 材料 21, 221 (1972), 90.
- (2) C. Minamisawa, N. Aoki, T. Haga and Y. Ishi-Da: Proceedings of the Fifteenth Japan congress on Materials Research, 15 (1972).
- (3) W. A. Wood: Fracture (Technology Press, Books in Science and Engineering), P400 (1959).
- (4) Bullen, F. P., A. K. Head and W. A. Wood: Royal Soc., London A, 216 (1953).
- (5) W. A. Wood: J. Inst. Metals, 91, 225 (1962~63).
- (6) W. A. Wood, S. Mck. Cousland, and K. R. Sargent: J. Inst, Metals, 91, 904 (1962~63).
- (7) 芳賀 武, 村井三郎, 平山恵一: 材料 18, 188 (1969), 409.
- (8) 芳賀 武: 材料 19, 197 (1970), 90.
- (9) 南沢 力, 青木 望, 笹部忠雄: 材料科学, 8-3, 31 (1966).
- (10) 南沢 力, 青木 望, 笹部忠雄: 材料科学, 8-4 72 (1966).