

ねじり疲れき裂の表皮および深さ方向 進展の相関について (続報)*

追 分 重 義**
道 端 久 紀**
宇 野 和 雄**

(昭和 48 年 8 月 30 日 受理)

Relation between the Torsional Fatigue Crack Propagation towards the Superficial and the Radial Direction (Continued)

by Shigeyoshi OIWAKE, Hisanori DOBA
and Kazuo UNO

In this continued report, the crack propagation for the both directions are evaluated in connection with \bar{G}/G , the change of the secant lateral elastic coefficient, $f\%$, the increase of the area covered by slip-bands within the microscope-observed field, and others. The conclusion is as follows.

1) h_g , the minimum depth of the fatigued layer is obtained numerically from \bar{G}/G , the change of the secant lateral elastic coefficient obtained experimentally. h_a , the most frequent crack depth derived from the direct measurement of the cracks on the cross-section, is less than the above h_g , it is reasonable.

2) After a certain stress cycle, there coexist both the tendency of encouraging the superficial propagation due to the increase of the crack depth, and that of interrupting it by the decrease of G_m/G_n . As the influence of the latter is stronger, the cack propagation grows dull after the cycle in question.

3) By the case of the specimens with the banded structures due to the roll-effect, the % area covered by slip-bands, the separate slip-bands being difficult to measure, can stand for the superficial fatigued area, increasing with the fatigue progress and showing a tendency just contrast to the change of \bar{G}/G which diminishes with it.

1. 緒 言

疲れき裂の進展の方向は表皮に沿う方向および深さ方向がある。炭素鋼平滑試験片のねじり疲れき裂を取扱っているが、前報¹⁾ではき裂が生じている表皮は未疲れ層に疲れ層が膜とし

* 日本機械学会北海道支部第 16 回講演会 (昭 48. 10. 7) にて発表

** 北見工業大学機械工学科

て接着した構造として両方向の進展を解析し、実験結果を考察した。本報では応力サイクルの進行に伴う供試材の割線横弾性係数の変化や表皮のすべり領域の増大などを調べ、両方向の進展を相関的に評価している。

2. 実 験

供試材の性質および試験片の形状、寸法は表1および図1に示した。試験片の供試部は旋削後、サンドペーパーで磨き、ついでバフで磨いて鏡面とした。処女状態をピクリン酸の3%アルコール溶液で腐食した。供試部の円柱の同じ母線上約0.8 mmのピッチの視野20個所の組織写真を処女状態および測定サイクルごとに顕微鏡倍率400で撮影した。フェライトおよびパーライトベツの硬さは上記視野の間の視野で測定した。硬さはヴィッカース微小硬さで試験荷重は50 gr×15 secとした。

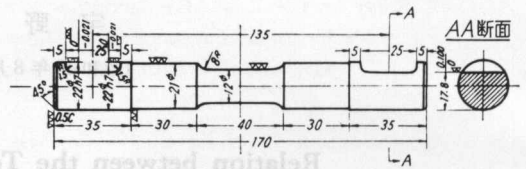


図1 疲れ試験片

Fig. 1. Fatigue test piece.

表1 供試材
Table 1. Material tested.

材 料	S35C (840°Cに30分間保持、後炉中冷却)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
化学成分 (%)	0.38	0.22	0.82	0.021	0.018	0.03	0.016	0.037
機械的性質	降伏点 (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)		延伸率 (%)	取縮率 (%)	縦弾性係数 (kg/mm ²)		横弾性係数 (kg/mm ²)
	34.7	59.9		39.1	51.7	20,700		8,074

静ねじり試験を処女状態および測定サイクルごとに行ない、図1の試験片の肩間距離4 mmに対するねじれ角 ϕ をねじりモーメント T に対して測った。測定サイクルごとに4回 $T-\phi$ 関係を測定し、初回は採用せずに、あとの3回に対して $T-\phi$ 線図を画いた。初回は試験片のチャッキングの食込みなどが ϕ に影響するので除いた。ねじりモーメント T は0から4,000 mmkg 前後までとした。供試材の耐久限度は約12.5 kg/mm²で、4,000 mmkgで供試部の表皮に発生するねじり応力がこれ以下になるようにした。

疲れ試験機は準共振曲げねじり型で、繰返速度900 r.p.m.で両振りねじりを試験片に与え、応力振幅は降伏点以下の過大応力14.5, 16.0, 17.5, 19.0 kg/mm²の4段階とした。

3. 考 察

3.1 割線横弾性係数の変化

前報¹⁾から疲れ層の平均応力 $[\tau_m]_{\text{mean}}$ は、

$$\left. \begin{aligned} [\tau_m]_{\text{mean}} &= G_m \gamma_B (k+K) \\ k &= \left\{ 1 + K(m/n) (G_m/G_n) \right\} \left\{ 1 + (m/n) (G_m/G_n) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

である。いま横弾性係数の異なる2層よりなる丸棒の断面を図2とすると、棒に作用するねじりモーメント T はつぎのように表わせる。

$$T = \int_{r_0}^{r_1} \int_0^{2\pi} \{ \tau (rd\psi dr) \} r + \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \{ \tau (rd\psi dr) \} r = \int_0^{r_2} \int_0^{2\pi} \{ \tau (rd\psi) dr \} r \quad (2)$$

$$\therefore G\theta \int_0^{r_1} \int_0^{2\pi} r^3 d\psi dr + G'\theta \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} r^3 d\psi dr = \bar{G}\theta \int_0^{r_2} \int_0^{2\pi} r^3 d\psi dr \quad (3)$$

ここに G は未疲れ層、 G' は疲れ層および \bar{G} は断面全体が一樣の横弾性係数を持つと考えたときの横弾性係数を表わすものとする。

$$(G'/G) \{ 1 - (r_1/r_2)^4 \} = (\bar{G}/G) - (r_1/r_2)^4 \quad (4)$$

$$\therefore (r_1/r_2)^4 \leq (\bar{G}/G) = i^4 \quad (5)$$

疲れ層の最小厚さを h_g とすると、

$$h_g = (1-i) r_2 \quad (6)$$

さて静ねじり試験において

$$\bar{G} = C_0 (T/\Phi) = c \tan \alpha \quad (7)$$

ここで、断面一樣丸棒のときは $C_0 = l/J$ 、 l は棒の長さ、 J は極断面2次モーメントである。本試験片では C_0 は平行

部から肩に移る断面変化の区間の影響も含む定数である。ねじりモーメント T を増しつつ対応するねじれ角 Φ を測定し $\alpha = \tan^{-1}(dT/d\Phi)$ を求めた。1測定サイクルに対して3回求めた α の平均値をもってこの測定サイクルの α とした。ただし α は任意の一定の目盛かたをした $T-\Phi$ 線図の α であって、式(7)第2式の T がトルクの単位、 Φ がラディアンであるのとは、 T 、 Φ の目盛かたは必ずしも同じではない。したがって式(7)の c は線図の T や Φ の目盛による係数と C_0 との積で一定である。

供試材の処女状態の横弾性係数 G は静ねじり試験における $T-\Phi$ 線図の傾斜角を α_0 とすると、式(7)より、

$$G = c \tan \alpha_0 \quad (8)$$

式(7)および(8)より、

$$\bar{G}/G = \tan \alpha / \tan \alpha_0 \quad (9)$$

ゆえに式(5)より

$$i = \sqrt[4]{\tan \alpha / \tan \alpha_0} \quad (10)$$

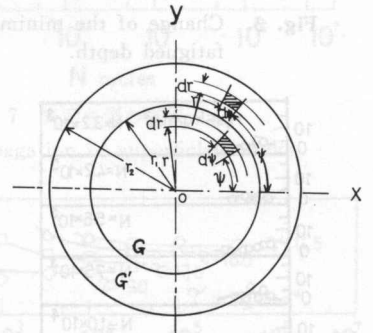


図2 供試部の断面
Fig. 2. Section of fatigued part.

3.2 き裂深さと疲れ深さ

図 3 は式 (10) より得た i を式 (6) に入れて求めた最小疲れ深さ h_g の変化を応力振幅をパラメータとして示したものである。応力振幅の大きいほど h_g は増加するが、降伏点に近づくにつれて飽和する傾向がうかがえる。

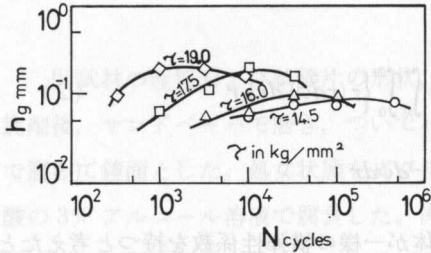


図 3 最小疲れ深さ h_g の変化

Fig. 3. Change of the minimum fatigued depth.

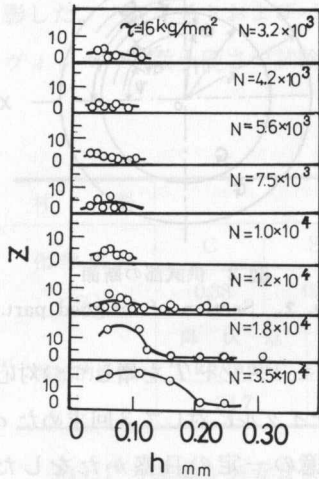


図 4 き裂深さの頻度分布

Fig. 4. Distribution of frequency of crack depths.

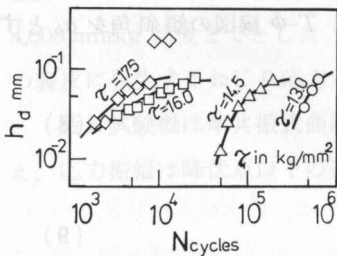


図 5 最大頻度深さの変化

Fig. 5. Change of the most frequent depth.

図 4 は応力振幅 $\tau = 16.0 \text{ kg/mm}^2$ 試験における供試部の横断面のき裂深さの頻度分布を測定サイクル毎つに示したものである。他の応力振幅についても同じような線図を描き、各応力振幅に対する最大頻度のき裂深さ h_a を求めた。 h_a を繰返回数 N に対してプロットしたのが図 5 である。 h_a は横断面におけるき裂深さの実測によったものであって、実測し得た深さよりさらに深い位置にある微視き裂、超

微視き裂、残存すべり帯などが含まれていないことが充分に考えられる。これに対して割線横弾性係数の変化より求めた h_g には疲れによって影響をうけた深さがほとんど含まれると考えられる。図 4, 図 5 で同じ応力振幅, 同じサイクルで h_a と h_g を比べると、おおむね $h_a < h_g$ であるのは上の考え方と一致しているように思われる。

3.3 m/n や G_m/G_n の変化

図 6 は平均き裂深さのサイクルの進行に伴う変化であるが、屈曲点以後増加率がそれ以前より大きくなっている。 $\tau = 16 \text{ kg/mm}^2$ のときの屈曲点は 1.8×10^4 サイクル辺であり、

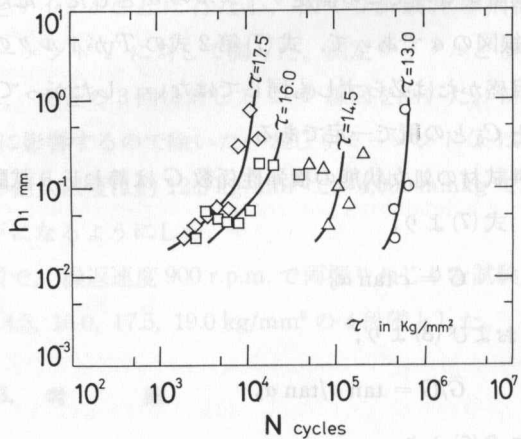


図 6 平均き裂深さの変化

Fig. 6. Change of the average crack depth.

この応力振幅に対するき裂深さの頻度分布を示す図4において、曲線 $z=f(h)$ と h 軸との間の面積が 1.8×10^4 サイクル辺から急増していることと対応している。図4からはまた屈曲点以後はき裂深さは既存のき裂でどんどん増し、き裂の発生が鈍化することがうかがえる。他の応力振幅についても同じ傾向である。き裂深さが増すことは式(1)で m が増すことであり、表皮き裂長さの進展を活ばつにするはずであるが、実際には図7で屈曲点以後き裂長さの進展が鈍化の傾向にあるのはつぎのように解される。図8は $\bar{G}/G-N$ 曲線で \bar{G}/G はサイクルの進むほど減っている。すなわち式(1)についていえば G_m/G_n はサイクルの進むほど減り、この影響が前述による m/n の影響よりも大きく作用して、式(1)の K を小さくし、き裂先端の進行を鈍化するということである。

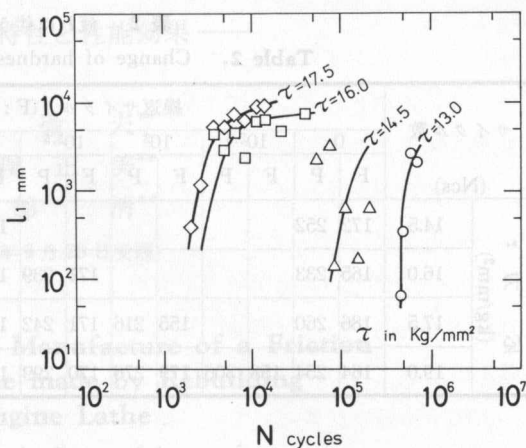


図7 表面き裂の進展

Fig. 7. Propagation of superficial cracks.

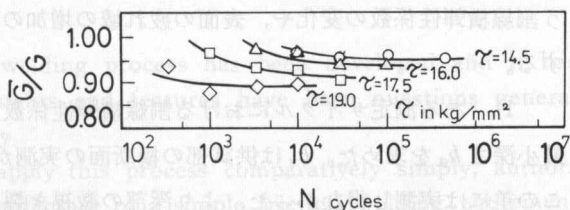


図8 $\bar{G}/G-N$ 線図

Fig. 8. $\bar{G}/G-N$ diagram.

3.4 疲れ域の変化

疲れき裂は残存すべり帯から発生することが多く、き裂長さとすべり帯の長さは同じように変化する。したがってき裂の表面方向進展を測る目安としてすべり帯の発達を調べた。焼鈍温度 $1,080^\circ\text{C}$ の S35C 鋼高温焼鈍材では圧延効果による帯状組織が解放され、フェライト粒内におけるすべり線の発生や長さの変化を観測できるが、表1に示した S35C 鋼、 840°C 焼鈍材では帯状組織が解放されず、すべり線の変化の観測が困難なのでフェライト粒内のすべり線が入り込む領域の増加を調べた。すなわちある部位の顕微鏡写真の視野における、ほぼ等ピッチ離れた円周方向直線下の

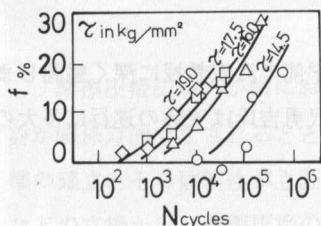


図9 すべり域の変化

Fig. 9. Change of area covered by slip-bands.

すべり域の長さが疲れサイクルの進行に伴って増すありさまを調べた。円周方向直線は4本とし、応力振幅べつに各測定サイクルに対してこの4直線下のすべり域の平均をもって、そのサイクルの疲れ域とした。図9はサイクルの進行に伴う疲れ域の変化を示したもので、縦軸の $f\%$ は疲れ域長さの円周方向直線の走査長さに対する百分率である。図8と図9とを比べると、サイクルが進むにつれて表面の疲れ域が増大し、割線横弾性係数が減少する傾向がわかる。

表2に疲れに伴う硬さの変化をフェライト粒およびパーライト粒べつに示したが、特徴ある変化はうかがえない。

表2 疲れに伴う硬さの変化
Table 2. Change of hardness with fatigue progress.

サイクル数 (Ncs)	繰返サイクル (F: フェライト, P: パーライト)																破断サイクル		
	0		10 ^{2.5}		10 ³		10 ^{3.5}		10 ⁴		10 ^{4.5}		10 ⁵		4.34×10 ⁵		F	P	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	
応力 τ (kg/mm ²)	14.5	172	252							163	291	187	322	174	280	162	263	6.27×10 ⁵	
																		166	296
	16.0	165	233					171	239	154	222	189	262	178	270			1.57×10 ⁵	
																		159	244
17.5	186	260			155	216	171	242	166	300	162	302						4.41×10 ⁴	
																		171	277
19.0	164	254	158	306	179	276	170	299	167	276								1.31×10 ⁴	
																		173	300

4. 結 言

S35C 鋼平滑丸棒試験片のねじり疲れき裂の表皮および深さ方向進展を供試部の疲れに伴う割線横弾性係数の変化や、表面の疲れ域の増加の測定などから考察した。主なる結論を下記する。

1) ある測定サイクルにおける割線横弾性係数と処女材の横弾性係数との比から疲れ層の最小深さ h_g を求めた。 h_g は供試部の横断面の実測から求めた最大頻度の深さ h_a より大きく、この差には実測し得なかった、より深部の微視き裂なども含むのではないと思われる。

2) 表面方向進展があるサイクルから急に鈍化することがどの応力振幅でも生じた。前報¹⁾でき裂の進展を解析した膜構造のモデルに対しては、このサイクルからは疲れき裂の深さが増して表面方向進展を促進する傾向と割線横弾性係数が減ってその進展を鈍化する傾向とが共存するが、後者の傾向の方がまさっていると解される。

3) 带状組織の表皮のすべり帯の観察は困難で、その代りに円周方向線にそって供試部の表面を走査し、すべり域の増すありさまを観測した。すべり域に残存すべり帯が生じ、これからき裂が生ずることが多いが、すべり域の増加傾向と割線横弾性係数の減少傾向とは逆の傾向として対応していた。

終わりに本研究に対し種々御助言を賜った北海道大学工学部半沢宏教授に深く感謝します。なお本学機械工学科技官阿部清氏は試験片等の製作、同鳴沢勇吉氏は実験の遂行に多大の協力をされたことに対して心からお礼申し上げます。

文 献

- 1) 追分・道端・宇野：北見工大研報，4-1，57 (1972)。
- 2) 追分・宇野：北見工大研報，3-2，226 (1972)。