

予みひずを持つ炭素鋼横穴材に おける疲れき裂の進展*

—— 回転曲げ疲れの場合 ——

追 分 重 義**

宇 野 和 雄**

三 浦 節 男**

(昭和53年9月30日受理)

The Propagation of Fatigue Cracks in Pre-strained Carbon-Steel Round Bars with a Transverse Circular Hole

— under the Rotating Bending Fatigue Test —

by Shigeyoshi OIWAKE, Kazuo UNO
and Setsuo MIURA

The fatigue crack propagation was examined and evaluated by the net stress amplitude after the fatigue test of the S35C steel specimen in the heading, the stress amplitude tentatively named being the macroscopic stress amplitude at the spot of the crack tip, varying with the distance along the cylindrical surface between the spot and the center of the hole, though hitherto the nominal stress amplitude for specimens of such a configuration has been either the surface stress of the corresponding plain bar or the mean maximum surface stress of the minimum cross section at the brim of the hole.

The conclusion reached is abbreviated as follows: The fatigue crack propagation rate at the early stage of the stress cycle was almost constant and that at the middle stage proportional to the crack length at the then cycle, the proportional constant, i.e. the rate coefficient being expressible as an exponential function of the net stress amplitude. Even in the early stage the proportionality is considered to exist, for the rate appears constant as the multiplicative effect by the short crack length and the large rate coefficient due to the high net stress amplitude near the hole.

1. 緒 言

疲れは微視的な現象であるからこれを解明するための実験においては現象を生じるべき原因はできるだけ精細に掌握することが必要である。原因の一である繰返応力についていえば、

* 日本機械学会北海道支部講演会にて講演 (昭和35年10月15日)

** 北見工業大学機械工学科

回転曲げ繰返しにおける円周切欠材の疲れ強さは形状係数、切欠係数等の概念を適用して疲れ強さの量的な掌握に利便を得ているが、この場合は最小断面における巨視的応力振幅は全円周にわたる切欠き底において呼称応力振幅に等しく、一定である。疲れき裂の進展は材料固有の性質のはかにそのときのき裂長さ、呼称応力振幅、繰返数等に依存する。横穴材の回転曲げ疲れにおいては無穴丸棒または穴軸を含む最小断面の最小断面係数を用いて計算された、穴縁に存在する最大応力のどちらかを呼称応力として、繰返試験を行ない、結果を整理し、評価してきたのが一般である。ところが横穴材の回転曲げ繰返試験においては疲れき裂の先端が供試片の一回転中に受ける最大応力すなわち応力振幅はき裂先端と横穴心との平行部の外円周に沿った距離に依存し、呼称応力振幅とは異なってくるので、き裂先端が受ける実際の応力振幅、以下正味応力振幅と仮称する、の概念を用いてき裂の進展を整理、評価した。なお供試片の持つ予ひずみの程度、横穴径、呼称応力振幅を種々替える実験を行ない、もって供試片の諸性質と疲れき裂の進展との相関を検討した。

2. 実 験

供試材は S 35 C 鋼で化学組成と機械的性質とを表 1 に、その形状寸法を図 1 に示した。原材は 1120℃ に 5 時間保持後炉中冷却してから 850℃ に 40 分炉中冷却する二回焼鈍を行なった。機械加工変質層を除去するために供試部の表層約 50 μ を化学研磨で落とした。万能試験機で引張予ひずみを与えた後、ドリルで穴明けし、ついで供試部の表層約 50 μ を化学研磨で落とし横穴の内面および穴縁付近の加工変質層の除去を図った。予ひずみは 0, 2, 14% の 3 通りにし、それぞれ無ひずみ、小さい塑性ひずみ、きわめて大きい塑性ひずみに該当させた。横穴径は使用したドリルで呼称し 0, 1.2, 1.8, 2.4, 3.6 mm の 5 通りにした。横穴径と予ひずみの組み合わせで 15 通りの供試片に対する SN 曲線は図 2 に示した。繰返試験機は小野式回転曲げ疲れ試験

表1 供試材の性質
Table 1. Properties of materials tested

材 料	S 35 C							
化 学 成 分 (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
	0.33	0.23	0.73	0.025	0.014	0.02	0.02	0.02
機 械 的 性 質	降 伏 点		最 大 応 力		伸 び		絞 り	
	σ_s (kg/mm ²): 31.3		σ_B kg/mm ²): 54.5		λ (%): 24.6		ϕ (%): 56.6	

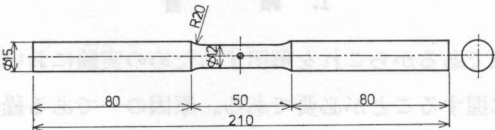


図1 供試片の形状寸法

Fig. 1. Shapes and dimensions of specimens.

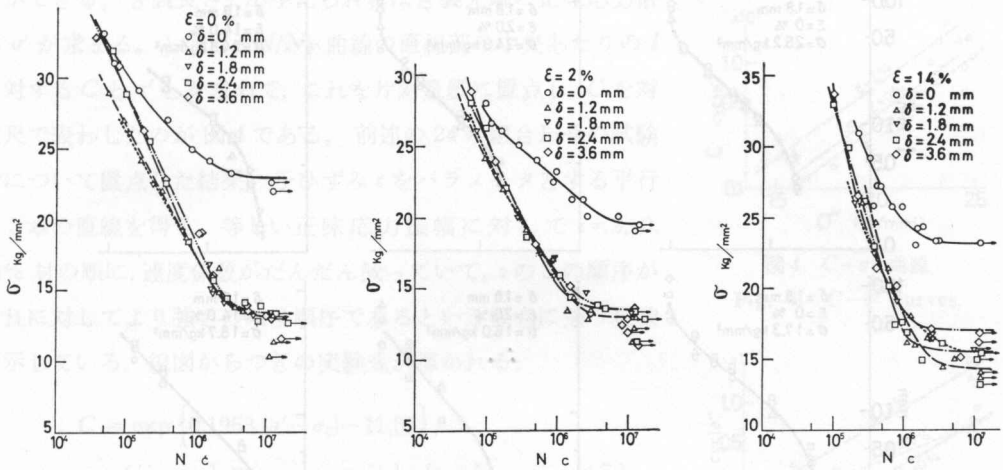


図2 S-N 曲線

Fig. 2. S-N curves.

機，容量 10 mkg，繰返速度 2,800 cpm である。疲れき裂の測定は横穴径 1.2, 1.8, 2.4, 3.6 mm，予ひずみ 0, 2, 14%，応力振幅約 25, 17 kg/mm² の組合わせ 24 通りの繰返試験における疲れき裂を観測した。き裂長さを測定しようとするサイクルで試験機から供試片を取外し，別に製作した静曲げ装置に取付け，繰返試験と同大の静曲げを掛けつつ，光学顕微鏡，倍率 400 で覗いて測定した。

3. 実験結果と考察

1.3 き裂長さの測定結果

図3はき裂を観測して得られた $l-N/N_F$ (き裂長さ—繰返数比) 曲線であって， $\delta \doteq 1.8$ mm， $\sigma \doteq 25$ kg/mm²； $\delta \doteq 1.8$ mm， $\sigma \doteq 17$ kg/mm² の場合を示した。置点の4種の印は横穴縁から発生，進展する4本のき裂に対するものである。どの曲線でも寿命の中間部ではほぼ一定傾斜の曲線になっている。直線部においては，

$$\frac{dl}{dN} = Cl, \quad C = \frac{k}{N_F}, \quad k = \frac{d \log l}{d(N/N_F)} = \kappa \tan \alpha \quad (1)$$

α は直線部の傾斜角度の読み， κ はグラフの両軸の尺度による換算係数である。

3.2 き裂先端部の正味応力振幅 (仮称)

疲れき裂の先端が回転時の試験片の頂部が底部に来たときに最大の曲げ応力を受ける。き裂先端に生ずる応力 σ' は有穴板の面外曲げによる応力 σ_1 と面内曲げによる応力 σ_2 との和である。

$$\sigma' = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2)$$

σ_k を横穴近傍の面外曲げ応力として，

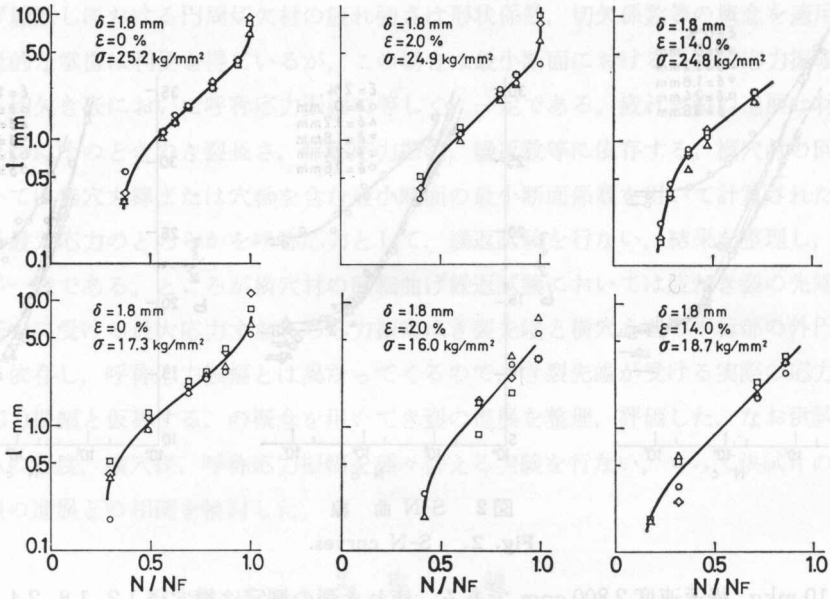


図3 $l-N/N_F$ 曲線
Fig. 3. $l-N/N_F$ curves.

$$\sigma_{1k} = \frac{192M}{\pi d^3 f_1(\alpha)} \left[2 + \left\{ \frac{\delta}{d} \right\}^2 + 3 \left\{ \frac{\delta}{d} \right\}^4 + 2(k_0 - 3) \left[2 - \left\{ \frac{\theta}{\delta/d} \right\}^2 \right] \right] \cos \theta \quad (3)$$

とした。 d は平行部径、 δ は横穴径、 M は曲げモーメント、 θ は穴心からき裂先端までの平行部軸心における中心角である。応力集中係数 k_0 は Peterson¹⁾ の値を採用した^{2)~3)}。つぎにき裂先端が横穴からかなり離れているときの面外曲げによるき裂先端部の応力は最小断面の最小断面係数による応力で、

$$\sigma_{1n} = \frac{192M}{d^3 f_1(\alpha)} \cos^2 \theta, \quad f_1(\alpha) = 6\pi - \sin 4\alpha - 8 \sin 2\alpha - 12\alpha \quad (4)$$

である。き裂長さが丸穴の半径より短いか長いかにによってそれぞれ σ_{1k} または σ_{1n} を σ_1 とした。

つぎに有穴板の面内曲げにもとづく応力は、き裂先端が横穴から近いときには、

$$\sigma_{2k} = \frac{128M}{\pi d^3 f_2(\alpha)} \left[1 + \left\{ \frac{\delta}{d} \right\}^6 \right] \theta \sin \theta, \quad f_2(\alpha) = 2\pi - 4\alpha + \sin 4\alpha \quad (5)$$

とした^{4)~5)}。き裂先端が横穴から遠いときには

$$\sigma_{2n} = \frac{64M}{d^3 f_2(\alpha)} \sin^2 \theta \quad (6)$$

である。き裂長さによって σ_{2k} または σ_{2n} を σ_2 としたのは前述と同様である。

3.3 寿命中期における C と σ' との関係

$l-N/N_F$ 曲線上の各点における曲線の傾斜からき裂長さ l に対応した速度係数 C が求められる。寿命中期の $\log l-N/N_F$ 関係が直線の区間に対しては式(1)の C は一定として扱うこ

とができる。き裂長さ l が与えられればき裂先端の正味応力振幅 σ' が求まる。いま $l-N/N_F$ 曲線の直線部の中央あたりの l に対する C と σ' とを求めて、これを片対数紙に置点し、 C を対数尺で表わしたのが図4である。前述の24の組合わせの試験片について置点した結果、予ひずみ ε をパラメータとする平行な3本の直線を得る。等しい正味応力振幅に対して $\varepsilon=2, 0, 14\%$ 材の順に、速度係数がだんだん減っていて、 ε のこの順序が疲れに対してより強さの増す順序であるという概念に適う現象を示している。線図からつぎの実験式が導かれる。

$$C = \exp \{0.1953 (\sigma' - \sigma_0) - 11.51\},$$

$$C \text{ in cycle}^{-1}, \quad \sigma, \sigma_0 \text{ in kg/mm}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_0 = 23.9 (\varepsilon = 0\%), \quad \sigma_0 = 22.2 (\varepsilon = 2\%),$$

$$\sigma_0 = 25.1 (\varepsilon = 14\%)$$

σ_0 は $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、より増している。最小断面係数を用いて計算した σ を呼称応力として、同じ l に対する C と σ の値を置点したのが図5であるが、 ε —一定の3本の C — σ 直線は必ずしも互いに平行にはなっていない。

3.4 繰返しの初期における C と σ' との関係

繰返しの初期においては dl/dN は一定になった。図6にそのありさまを示した。図7の

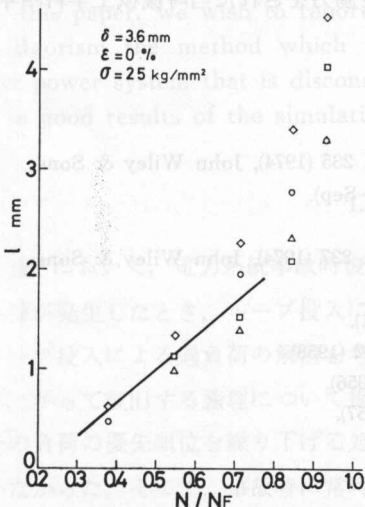


図6 繰返し初期の $l-N/N_F$ 曲線

Fig. 6. $l-N/N_F$ curve in the early stage of the repeat.

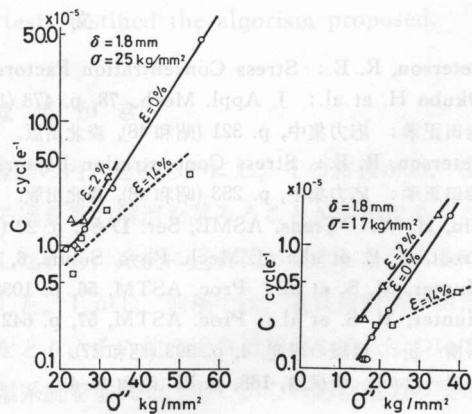


図7 繰返し初期の C — σ' 曲線

Fig. 7. C — σ' curves in the early stage of the repeat.

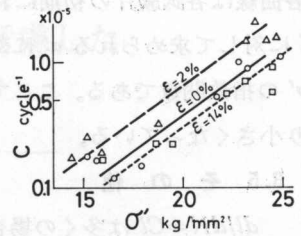


図4 C — σ' 曲線

Fig. 4. C — σ' curves.

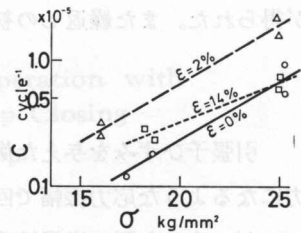


図5 C — σ 曲線

Fig. 5. C — σ curves.

各曲線は各試験片の初期におけるき裂長さ l に対する $l-N/N_F$ 曲線の傾きから C を計算し、 l に対して求められる σ' に対応して置点したものである。各供試片とも初期にあっては C は σ' の指数関数である。ここでも同じ σ' に対して C の大きさの順序は $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、より小さくなっている。

3.5 そ の 他

$dl/dN=Cl$ は多くの場合に対して求められているき裂進展の式^{6),7)}。であって、中実、中空、平滑、切欠材についても従来実験されている^{8)~11)}。横穴材については、本実験によって、回転曲げ疲れ試験の際にはき裂先端の位置に依存する正味応力振幅と速度係数との密接な関係が得られた。また繰返しの初期と中期では疲れき裂の進展式が異なることがわかった。

4. 結 言

引張予ひずみを与えた炭素鋼中実横穴材の穴縁に発生する平均応力で降伏点以下の過大応力になるような応力振幅で回転曲げ疲れ試験を行なって得られた結論を下に要約する。

i) 疲れき裂の進展速度は繰返しの初期においてはほぼ一定で、中期においてはき裂長さに比例した。速度係数は正味応力振幅の指数関数で表わすことができ、正味応力振幅が同じであれば予ひずみが $2, 0, 14\%$ の順に、より小さくなった。

ii) 繰返しの初期にはき裂長さが短いと、正味応力振幅が大きいとの相乗効果としてき裂進展速度がほぼ一定になっていると考えられ、初期も中期と同じように正味応力振幅に依存する速度係数下でき裂長さに比例してき裂が進展するといえる。

この報告を終えるにあたり、実験の遂行に多大の協力をされた当時機械工学科四年目学生相馬剛君および谷利寛君に深く感謝する。

文 献

- 1) Peterson, R. E.: Stress Concentration Factors, p. 235 (1974), John Wiley & Sons.
- 2) Ōkubo H. et al.: J. Appl. Mech., 78, p. 478 (1956-Sep).
- 3) 西田正孝: 応力集中, p. 321 (昭和48), 森北出版.
- 4) Peterson, R. E.: Stress Concentration Factors, p. 227 (1974), John Wiley & Sons.
- 5) 西田正孝: 応力集中, p. 253 (昭和48), 森北出版.
- 6) Liu, H. W.: Trans. ASME, Ser. D-83, p. 23 (1961).
- 7) Frost, N. E. et al.: J. Mech. Phys. Solids, 6, p. 92 (1958).
- 8) Hunter, M. S. et al.: Proc. ASTM, 56, p. 1038 (1956).
- 9) Hunter, M. S. et al.: Proc. ASTM, 57, p. 642 (1957).
- 10) 石橋 正: 機械の研究, 4, p. 393 (昭和27).
- 11) 中沢一ほか: 機構論, 188, p. 89 (昭和43-4).