

炭素鋼予加工材の横穴よりの疲れき裂の挙動*

——引圧疲れの場合——

追 分 重 義**

宇 野 和 雄**

三 浦 節 男**

(昭和58年4月30日受理)

The Behavior of Fatigue Cracks Rising from the Rims of a Lateral Hole in Prestrained Carbon-Steel Specimens

—under the Push-Pull Fatigue Test—

by Shigeyoshi OIWAKE, Kazuo UNO
and Setsuo MIURA

Carbon-steel specimens which had been prestrained in tension and made a lateral hole in, were tested in the cyclic push-pull load to examine the effects of the prestrain ε and the diameter d of the lateral hole upon the fatigue strength, the fatigue crack propagation, the crack top opening etc.

The main results obtained are as follows.

- 1) With $\delta = \text{const.}$ and ε varying in the order, 2, 0, 14% and with $\varepsilon = \text{const.}$ and δ varying in the order, 1.8, 2.4, 1.2, 3.6, 0 mm, the endurance limit σ_w increased from the least at the tops.
- 2) In general the harder was the specimen, the higher was the endurance limit σ_w . At the failing cycle the hardness was higher in the order, $\varepsilon = 2, 0, 14\%$, the lowest being at $\varepsilon = 2\%$.
- 3) For every $\varepsilon = \text{const.}$ specimen, σ_w reached a minimum between the stress gradient $\lambda = 1.8$ and 2.5 mm^{-1} as in the case of the rotating bending fatigue.
- 4) The crack propagation formula obtained was $dl/dN = Cl$, ie. the Frost and Dugdale type.
- 5) The crack opening can be evaluated using the non-opening ratio i as the crack top opening using the SIF ratio $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$, it was revealed.

1. 緒 言

予ひずみを持つ炭素鋼横穴材における疲れき裂の進展については、回転曲げ疲れの場合は前に報告したが¹⁾、本稿では引圧疲れの場合を報告する。

* 日本機械学会北海道支部講演会にて講演 (昭56. 9. 23)

** 北見工業大学機械工学科

回転曲げ疲れおよび引圧疲れはともに基礎的な疲れ現象であり、両場合において試片の表層においてはきわめて似た現象が生じるので、ややもすれば試験結果の資料等を互換的に使用する傾向がある^{3)~8)}。しかしながら疲れは非常に微視的、多因子的かつ統計的現象であり、等しい試片を同じ条件下で実験しても、結果にかなりのバラツキが生じるのに、まして両場合では繰返外力が異り、チガイのあることが予想されるので、引圧疲れは本論で実験、考察したのである。対象事項は疲れ強さ、疲れき裂の進展、き裂の開閉等である。供試材も、回転曲げ疲れの場合と同様に、多様性を与えるために、3レベルの引張予ひずみを持つ炭素鋼材とした^{2),3)}。

2. 実 験

供試材は S35C 鋼焼鈍材で、その化学成分、熱処理ならびに生材および焼鈍材の機械的性質を表-1に示した。図-1の形状、寸法に機械加工したのち供試部に電解研磨および化学研磨を施して表面層を約 100 μm 減らし加工変質層の除去を図った。万能試験機で予ひずみを与えてから横穴を明け、また供試部に化学研磨を施して横穴を穿ったことによる加工変質層の除去を図った。予ひずみは 0, 2, 14% の 3 通りで、それぞれ無ひずみ、小さい塑性ひずみ、大きい塑性ひずみに対応させた。横穴径は 0, 1.2, 1.8, 2.4, 3.6 mm の 5 通りとし、穴明けに使用した錐の呼称径で呼んだ。

引圧疲れ試験機は油圧サーボ式で、繰返速度を 40 cps とした。

表-1 供試材の性質

材 質			機 械 構 造 用 鋼 S 35 C							
化 学 成 分	元 素		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
	含 有 率 %		.36	.20	.72	.022	.016	.01	.03	.03
機 械 的 性 質	諸 元		降 伏 点 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$		抗 張 力 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$		伸 び %		断 面 収 縮 率 %	
	生 材	数 値	34.8		60.2		25.1		56.4	
	(2号試験片)	数 値	30.3		54.3		27.5		55.4	
供試材		熱処理	1120°C に 12 hr 保持後炉中冷却, さらに升温して 850°C に 50 min 保持後炉中冷却							

定応力疲れ試験は上記の予ひずみおよび横穴径の組合せ 15 通りに対して行った^{4)~7)}。

疲れき裂の進展や開口幅の測定は、予ひずみと無穴以外の横穴径との組合せ 12 通りに対して、応力振幅を 17 kg/mm² として行った^{8),9)}。同時に疲れの進行に伴う供試部の硬

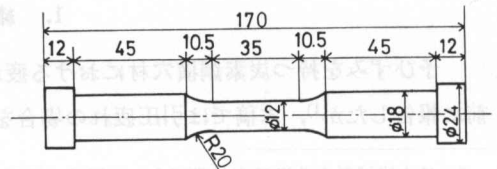


図-1 試片の形状寸法

さの変化を測定した。上記の諸量を測定しようとするサイクルで試験機を一時停止し、試片を取外して行った。各試片について4〜7回測定した。横穴心を通る円周線上、穴縁から180 μm の母線に沿って、ピッチ180 μm 、円周線振分でヴィッカース穴を4個明け、穴縁から発生する疲れき裂の開閉を測定するための穴縁最寄点とした。測定回ごとにき裂先端に同様のヴィッカース穴を明け、き裂の進展、開閉を測定するための標点、およびその測定回における供試部の硬さ測定のための圧痕とした。圧子圧力は300 gr、保持時間は15 secとした。応力振幅 σ に対して、静引圧装置を用いて軸応力を $-\sigma$ 、 $-\sigma/2$ 、0、 $\sigma/2$ 、 σ と段階的に変えたときのき裂の開き幅 c を上記各標点を用いて先端からの距離 x に対して、顕微鏡倍率400で測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 疲れ強さ

3.1.1 SN 曲線 定応力疲れ試験を行って、予ひずみ ε と横穴径 δ との組合せ15通りに対するSN曲線を求めた。図-2(a), (b), (c)にそれぞれ $\varepsilon=0, 2, 14\%$ に対する δ をパラメータとする曲線群を示した。耐久限度が $\delta=\text{const.}$ ならば、 $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、 $\varepsilon=\text{const.}$ ならば、 $\delta=1.8, 2.4, 1.2, 3.6, 0 \text{ mm}$ の順に、より高くなっているのが見られる。また $\varepsilon=0\%$ 線と2%線とのレベル差よりも2%線と14%線とレベル差がかなり大きいことが見られる。時間強度は $\delta \approx 0$ の場合は近接し、 $\delta=0$ の場合はこれよりはるかに高い。例えば前者の時間強度が17 kg/mm²辺を示すサイクルにおける後者の時間強度は3割程高い。どの $\varepsilon=\text{const.}$ においても、 $\delta \approx 0$ 曲線群内では $\delta=3.6 \text{ mm}$ 曲線が時間強度、耐久限度とも他よりも明らかに高く、 $\delta=1.2, 1.8, 2.4 \text{ mm}$ 曲線については時間強度は大差がないが、耐久限度は $\delta=3.6, 1.2, 2.4, 1.8 \text{ mm}$ の順に、より低くなり、1.8 mmで最低を示している。

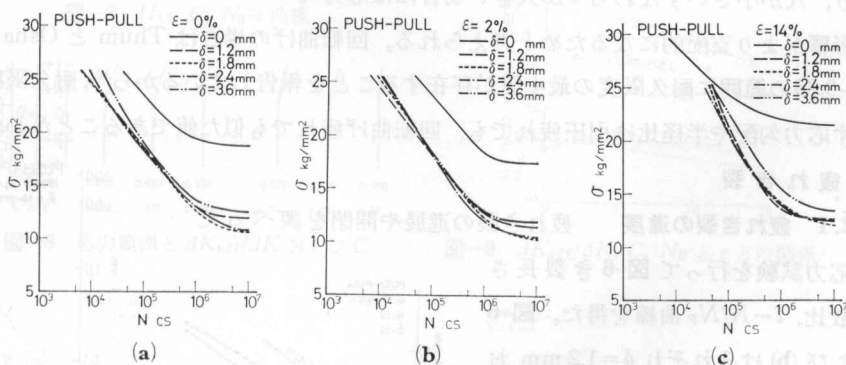


図-2 SN 曲線

3.1.2 硬さと疲れ強さ 横穴径が一定であれば応力分布、応力勾配等も同じであるから、予ひずみに依存する供試材の硬さと疲れ強さとの因果を考えてみる。図-3に供試材のヴィッカース硬さ H_{V0} と予ひずみ ε との関係、図-4に $\delta=1.8 \text{ mm}$ 材における供試部の疲れの進行

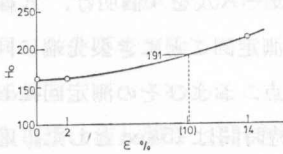
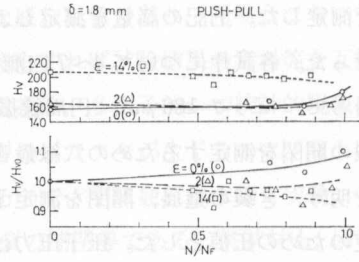
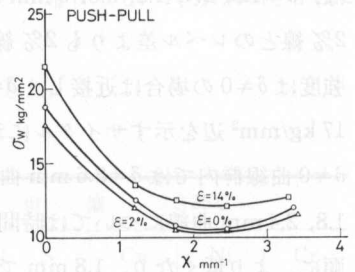
図-3 H_{v0} と ε との関係

図-4 疲れの進行に伴う硬さの変化

に伴う、硬さ H_v と硬さ比 H_v/H_{v0} との変化を示す。 H_{v0} は $\varepsilon=0\%$ 材と 2% 材とでは大差はないが、この約 3 割増が $\varepsilon=14\%$ 材の値である。このような硬さの差は加工硬化の均一や不均一、微視局所的応力集中等によって生じると考えられる。図-4 において繰返数 N が破断繰返数 N_F に近づくに伴って、 $\varepsilon=14\%$ 線はやや下向気味になるが、 $\varepsilon=0\%$ 、 2% 線では $N/N_F=0.7$ 付近で 0% 線が 2% 線を越して硬さを高め、以後は硬さの順序は $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、より高くなっていることがわかる。3.1.1 で述べた SN 曲線の傾向と考合わせると、疲れが進行しているときの供試材の強さの変化も硬さの変化と同傾向にあるように思われる。

3.1.3 応力勾配と耐久限度 横穴径 δ による穴縁

の応力勾配を λ として、耐久限度 σ_w との関係を示したのが図-5 の $\sigma_w-\lambda$ 曲線である。予ひずみ ε をパラメータとして描いてあるが、どの ε でもほぼ $\lambda=1.8 \sim 2.5 \text{ mm}^{-1}$ に σ_w の最小値が存在している。 λ のこの範囲は穴径比 $\delta/d=0.16 \sim 0.26$ に当る。 $\sigma_w-\lambda$ 曲線が最小値を示すのは、穴が大きいすなわち λ が小さい場合には応力集中の影響がより支配的であり、穴が小さいすなわち λ が大きい場合には応力勾配

図-5 $\sigma_w-\lambda$ 曲線

配 λ の影響がより支配的になるためと考えられる。回転曲げの場合は Thum と Oshatz が $\delta/d=0.15 \sim 0.25$ の範囲に耐久限度の最小値が存在することを報告しているから¹⁰⁾、耐久限度が最小値を示す応力勾配や半径比は引圧疲れでも、回転曲げ疲れでも似た値であることがわかった。

3.2 疲れき裂

3.2.1 疲れき裂の進展 疲れき裂の進展や開閉を調べるた

めの定応力試験を行って図-6 き裂長さ一繰返数比、 $l-N/N_F$ 曲線を得た。図-6 (a) および (b) はそれぞれ $\delta=1.2 \text{ mm}$ および 1.8 mm に対するものである。穴縁 4 カ所から発生するき裂の平均的な $l-N/N_F$ 関係である。曲線の傾斜部は直線に近似し、 $\varepsilon=0, 2, 14\%$ の順に l のレ

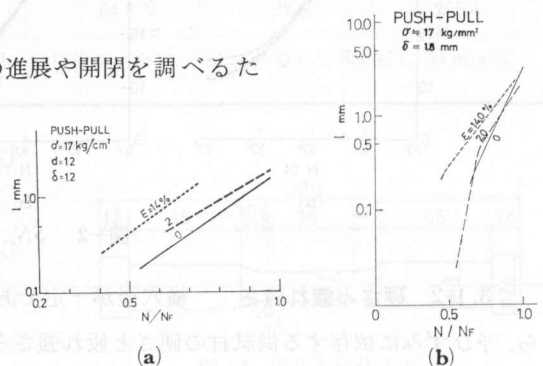


図-6 疲れき裂長さの変化曲線

ベルが、より高くなっている。これらの直線を解析して $dl/dN = Cl$ なる Frost & Dugdale 形の進展式が得られた。図-7は速度係数 C およびき裂長さ l が 1 mm になる繰返数 N_0 、供試材の予加圧による硬さ H_{V0} を予ひずみ ε に対して置点して得た曲線である。 H_{V0} は $\varepsilon = 0, 2\%$ ではほぼ同値であるが、 $\varepsilon = 14\%$ ではかなり高値になり、 ε の増すにつれて C は減っている。 H_{V0} の増大傾向と C の減少傾向とは相関する傾向と考えられ、 ε の順序は 0, 2, 14% の順である。つぎに N_0 は $\delta = 1.2$ mm でも 1.8 mm でも $\varepsilon = 2\%$ のときに最小で、 $\varepsilon = 0\%$ のときにはこれよりやや高く、しかし $\varepsilon = 14\%$ のときははるかに高いことが示され、図-3 の関係と同様であり、さらに図-2 の SN 曲線に示される時間強度の傾向とほぼ、耐久限度の傾向とまったく同じである。すなわち $\varepsilon = 2, 0, 14\%$ の順に、より早いサイクルで一定のき裂長さ (この場合 1 mm) に達し、一番早く達する $\varepsilon = 2\%$ 材の σ_w は最も低く、つぎに 0% 材、14% 材の順に σ_w は、より高くなる。

3.2.2 疲れき裂の開閉 全応力振幅に対するき裂先端の開いている応力範囲の割合は応力拡大係数範囲比 $\Delta K_{eff}/\Delta K$ であって、これを図-8のように開閉測定から求めた^{11), 12)}。図-9は応力拡大係数範囲比 $\Delta K_{eff}/\Delta K$ 、速度係数 C および破断サイクル N_F と予ひずみ ε との関係を示す線図で、 ε の増すほど $\Delta K_{eff}/\Delta K$ と C はおおむね減り、 N_F はおおむね増してい

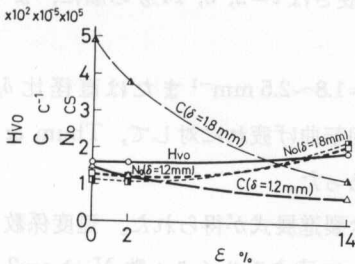


図-7 H_{V0} , C , N_0 - ε 曲線

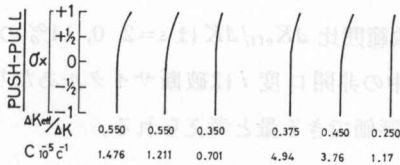


図-8 応力範囲と $\Delta K_{eff}/\Delta K$ および C

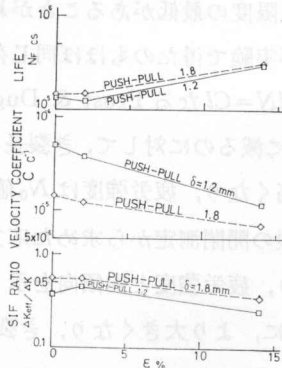
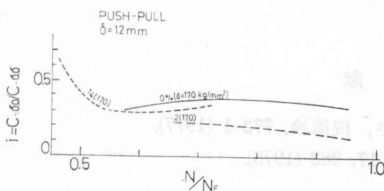
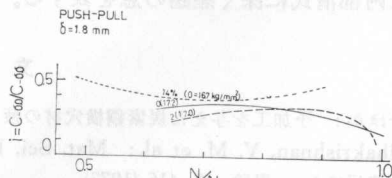


図-9 $\Delta K_{eff}/\Delta K$, C , N_F と ε との関係



(a)



(b)

図-10 疲れの進行に伴う i の変化

ることがわかる。つぎに $c_{-\sigma,\sigma}$, $c_{-\sigma,0}$ は、それぞれ σ 応力下の全き裂長さの単位長さ当りの平均開き幅および 0 応力下のそれとし、 $-\sigma$ の開きを基準とした。図-10 の曲線は $\delta=1.2$ および 1.8 mm に対する非開口比 $i=c_{-\sigma,0}/c_{-\sigma,\sigma}$ である。 $N/N_F=1$ あたりになると、ほぼ $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に i は、より大きくなり、反対に開口比 $(1-i)$ はより小さくなる。開閉の測定から求められる i なり $(1-i)$ も $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ とは意味は異なるが、き裂の開閉を評価できる量と考える。

4. 結 言

S35C 鋼平滑材に $\varepsilon=0, 2, 14\%$ の引張予ひずみを与えた後、 $\delta=0, 1.2, 1.8, 2.4, 3.6$ mm の錐で横穴を明け、定応力引圧疲れ試験を行って、疲れ強さや疲れき裂の開閉を調べて、つぎの結論を得た。

- 1) 耐久限度は $\delta=\text{const.}$ の下では $\varepsilon=2, 0, 14\%$ 材の順に、また $\varepsilon=\text{const.}$ の下では $\delta=1.8, 2.4, 1.2, 3.6, 0$ mm 材の順に、より高くなった。時間強度はどの $\delta \approx 0$ mm 材でも近接していて、 $\delta=0$ mm 材ではこれらよりもはるかに高い。 $\delta \approx 0$ mm 材の内では $\delta=3.6$ mm 材が他より明らかに高いが、 $\delta=1.8, 2.4, 1.2$ mm 材では大差がなかった。
- 2) 耐久限度は $\delta=\text{const.}$, ε をパラメータとするときは SN 曲線ま耐久限度を示すサイクルにおける供試材の硬さの高低と傾向を一にし、硬さは $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、より高くなっていた。
- 3) 引圧疲れの場合には横穴縁の応力勾配 $\chi=1.8 \sim 2.5 \text{ mm}^{-1}$ または直径比 $\delta/d=0.16 \sim 0.26$ 間に耐久限度の最低があることがわかった。回転曲げ疲れに対して、Thum & Oshatz および筆者らが実験で得たのもほぼ同じ存在範囲であった。
- 4) $dl/dN=CI$ なる Frost & Dugdale 形のき裂進展式が得られた。速度係数 C は $\varepsilon=0, 2, 14\%$ の順に減るのに対して、き裂長さ l が 1 mm に達するサイクル数 N_0 は $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、より高くなり、疲労強度は N_0 値と同傾向になった。
- 5) き裂の開閉測定から求めた応力拡大係数範囲比 $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ は $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、より小さくなり、疲労強度と同傾向を示した。文中の非開口度 i は破断サイクルあたりで $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、より大きくなり、き裂の開閉を評価できる量と考えられる。

本報告を終えるに当たり、試験機の保全、試片の加工等に尽力された本学科技官佐伯義二氏ならびに阿部清氏に深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 追分ほか：予加工を与えた炭素鋼横穴材の疲れ強さ，機構論，772-1 (1977)。
- 2) Radhakrishnan, V. M. et al.: Mat. Sci. Eng., 17, 283 (1975)。
- 3) 小林英男ほか：機構論，43, 416 (1977)。
- 4) Lessels, J. M.: Strength and Resistance of Metals, p. 213 (1954), John Wiley.
- 5) 石橋 正：金属の疲労と破壊の防止, p. 23 (1967), 養賢堂。

- 6) 林 建吉: 材料, **19**, 207, p. 1075 (1970-Dec).
- 7) 戸梶恵郎ほか: 材料, **24**, 265, p. 933 (1975-Oct.).
- 8) Peterson, R. E. & Wahl: J. Appl. Mech., **3**, A-55 (1936).
- 9) 西谷弘信ほか: 機論, **39**, 323, p. 2205 (1973-Jul.).
- 10) Thum, T. A. et Oshatz, H.: Augumentation de la limite d'endurance pour des arbres ronds p rc s d'un trou en travers, V. D. I., 6 f vrier (1932).
- 11) Liw, H. W.: Trans. ASME, **Ser. D-83**, p. 23 (1961).
- 12) Frost, N. E. et al.: J. Mech. Phys. Solids, **6**, p. 92 (1958).

A Discrete Linear Control System Configuration Following the Polynomial Response of the Model

by Akira KINOSHITA and Yasu KAWADA

In feedback control system design, it is desired that not only input-output transfer properties but also a parameter sensitivity should be able to be assigned arbitrarily. Based on these requirements, this paper proposes a new single input-output control system configuration. Adopting a digital controller, this system, which is a model-following system, is simple and flexible. It is confirmed by hybrid simulations that the proposed system is effective as a practical discrete control design technique.

1. ま え が き

デジタル方式の制御システムは、アナログ方式の制御システムに比べて種々の面で拡張されているが、作成、設置性、価格等の面で実用化に至らなかった。しかし、近年マイコン・パソコン・ビュートの性能の向上、信頼性の向上、価格低減等により、デジタルの制御システムとして各分野でデジタルが積極的に利用されている。このような現状で、操作機にマイコンを用いたデジタル方式の制御系を構成しようとする場合、連続時間形制御系の設計が容易になることは言うまでもない。ところで、制御系の設計において、入出力特性を決定すること、及び制御対象のパラメータ変動を考慮すると、パラメータ感度を任意に設計することが望ましい。文献[1]は、このような要求からデジタル制御系と名付けられた連続時間形制御系構成を示している。本論文は、文献[1]を数値化化したものであるが、マイコンの導入適応性において不足がなされており、多変数多出力の制御対象に対しても容易に拡張できる。