

123 位相差を有する組合せ荷重下での疲労き裂成長

高橋, 秀夫 / 三角, 正明 / 大川, 功 / 西田, 和隆

(出版者 / Publisher)

日本材料学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

学術講演会講演論文集 / 学術講演会講演論文集

(巻 / Volume)

45

(開始ページ / Start Page)

105

(終了ページ / End Page)

106

(発行年 / Year)

1996-05

位相差を有する組合せ荷重下での疲労き裂成長

法政大学工学部 正 大川 功
 法政大学工学部 正 高橋 秀夫
 法政大学工学部 ○学 西田 和隆
 成蹊大学工学部 正 三角 正明

1. 緒論

機械や構造部材は、一般に多軸繰返し荷重下で使用され、しかもこれらの荷重間には位相差を有する場合が多い。疲労寿命の大半は、き裂の成長に費やされることから、実機の寿命を予測するためには、多軸応力下でのき裂成長メカニズムの支配因子を見出すことが必要である。

このような観点から、本研究では、種々の応力比および位相差で、組合せ軸力-ねじり荷重下において疲労試験を行い、破壊き裂の成長過程を詳細に観察するとともに、各荷重条件下でのき裂の挙動とき裂面上に作用する応力成分の関連について検討した。

2. 試料および実験方法

供試材は機械構造用炭素鋼 S45C で、浅く、鈍い切欠きを有する薄肉円筒試験片(外径 16mm, 内径 13mm, 試験部長さ 30mm)に機械加工した後、850℃, 1時間保持後、炉冷の熱処理を施した。疲労試験には電気油圧サーボ式試験機を用い、室温において完全両振りの正弦波荷重を周波数 5Hz で負荷した。試験条件は表 1 に示すように、応力比 λ を 0 (引張圧縮), 1/2, 2 および ∞ (純ねじり), 応力間位相差を 0° および 90° とし、疲労寿命が 10^5 回および $5 \times 10^5 \sim 10^6$ 回付近となるような中、高サイクル域において試験を行った。

繰返し過程において採取したレプリカを順に逆上って観察することにより、破壊き裂の成長過程を調べた。破壊き裂は表 1 に示すように多数の微小き裂の成長、合体により形成されたが、個々のき裂につき、き裂両端を直線で結びき裂面とし、さらにその長さを、き裂長さ $2c$, その法線と試験片軸方向のなす角をき裂角度 θ_c とし、これらを測定した。また各荷重条件下でのき裂面形状およびアスペクト比についても調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊き裂の成長

破壊き裂を形成する多数のき裂のうち、代表的なき裂の成長過程を図 1 に示す。低応力レベルでは高応力レベルに比べ、相対的にき裂の発生は遅いが、両応力レベルとも応力比が大きいほどき裂の発生時期は早い。き裂進展挙動に及ぼす位相差の影響はほとんど認められない。

高応力レベルにおいて、各荷重条件ごとに代表的な 5 本のき裂を選び、そのき裂成長にともなうき裂方向の変化を示したものが図 2 である。最大せん断面 (τ_{max} 面)の

表 1 試験条件表

Stress level	Stress ratio $\lambda = \tau_0 / \sigma_0$	Axial stress σ_0 MPa	Torsional stress τ_0 MPa	Phase angle ϕ deg	Fatigue life Nf	Number of cracks
High	0	260	0		1.406×10^5	14
	1/2	210	105	0	1.025×10^5	21
		250	125	90	6.762×10^4	15
	2	90	180	0	7.481×10^4	24
		90	180	90	1.613×10^5	31
∞	0	198		8.493×10^4	67	
Low	0	210	0		9.677×10^5	9
	1/2	190	95	0	4.037×10^5	7
		210	105	90	6.010×10^5	3
	2	75	150	0	7.350×10^5	7
		80	160	90	5.107×10^5	11
	∞	0	165		5.208×10^5	17

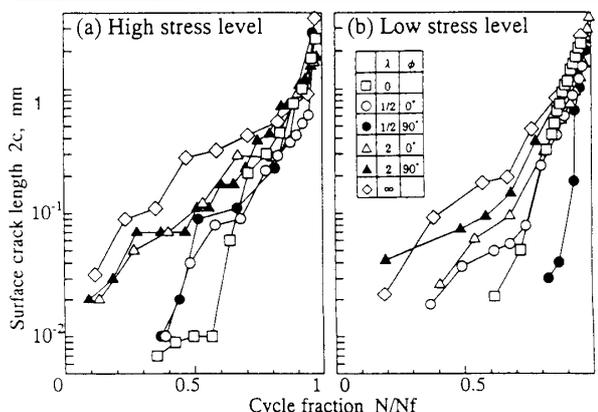


図 1 き裂進展曲線

方向が不定となる $\lambda=1/2, \phi=90^\circ$ ではき裂はさまざまな方向に発生しているが、他の荷重条件ではいずれもき裂は τ_{max} 面の近傍に発生し、最大垂直応力振幅を生ずる面 (σ_{max} 面)の方へ方向を変えながら成長して合体することにより、最終的に σ_{max} 面上での破壊き裂となる様子がわかる。 σ_{max} 面への遷移時のき裂長さは $\lambda=0$ で 0.05mm 以下、 $\lambda=1/2$ でおよそ 0.1mm, $\lambda=2$ と $\lambda=\infty$ で 0.3~0.5mm と応力比が大きくなるにつれて長くなっている。低応力レベル下でも同様な傾向が認められた。

3.2 表面き裂成長速度の評価

各荷重条件下

での表面き裂成長速度を整理するため、表面き裂長さ $2c$ の半だ円き裂がき裂面に垂直およびせん断応力を受ける場合の解に基づく等価応力拡大係数幅

$$\Delta K_{eq} = 1.12 \sqrt{(F_1 \Delta \sigma_{\theta_c})^2 + (F_2 \Delta \tau_{\theta_c})^2} \sqrt{\pi c} \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{k}{E(k)}, \quad F_2 = \frac{k(1-k^2)}{(1-k^2-\nu)E(k) + \nu k^2 K(k)}$$

を用いた。ここで k はアスペクト比、 $K(k)$, $E(k)$ は第 1 種、第 2 種の完全だ円積分、 $\Delta \sigma_{\theta_c}$, $\Delta \tau_{\theta_c}$ はき裂面上に作用する応力振幅である。電解研磨法により測定した本供

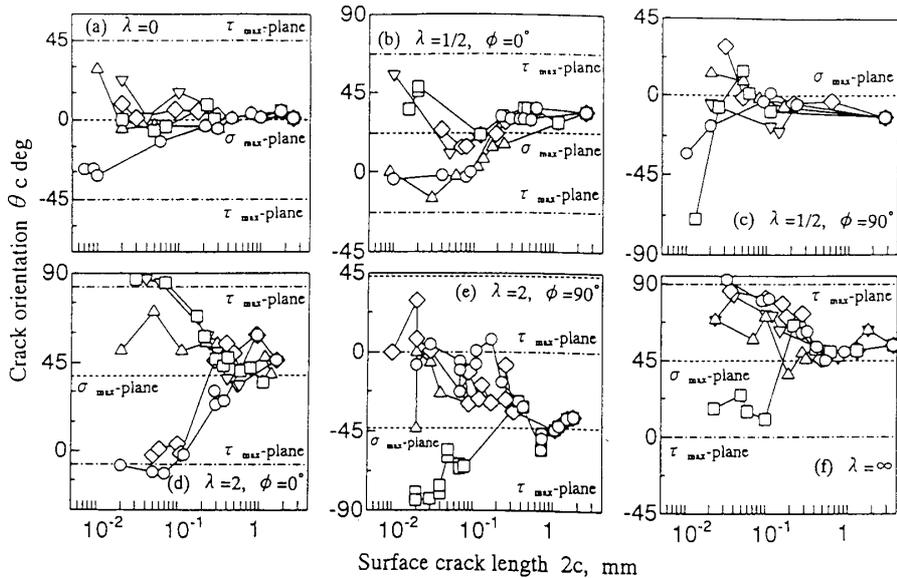


図2 繰返し過程におけるき裂方向の変化 (高応力レベル)

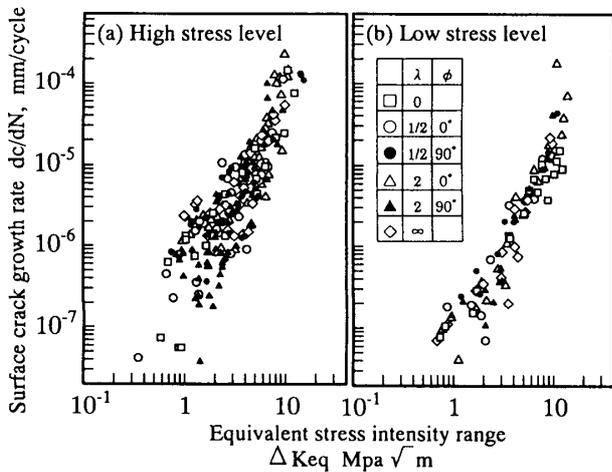


図3 表面き裂成長速度の応力拡大係数 ΔK_{eq} による評価

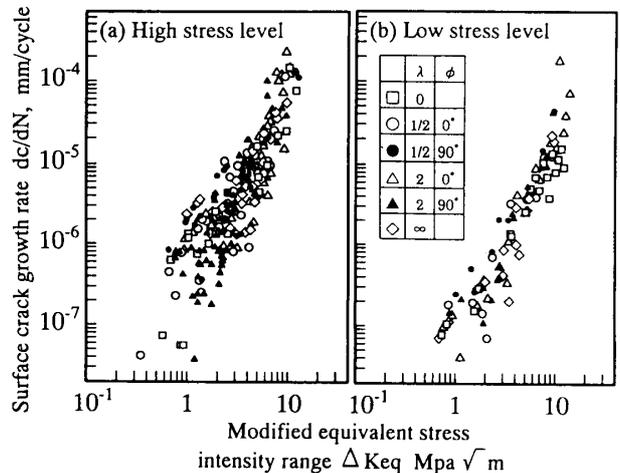


図4 表面き裂成長速度の等価応力拡大係数 ΔK_{eq}^* による評価

試材の各荷重条件でのアスペクト比は 0.42~0.64 の範囲にあり、計算にはこれらの総平均 0.56 を用いた。

図3はき裂成長速度 dc/dN と等価応力係数幅 ΔK_{eq} の関係を示したものである。高応力レベルでの結果は、き裂の成長過程において生ずる合体のためかなりばらついてはいるが、両応力レベルともき裂成長挙動は応力比、位相差によらず類似しており、式(1)の ΔK_{eq} によりすべての荷重条件下での成長挙動をある程度整理することができる。

負荷荷重間に位相差 ϕ を有する応力比 λ の組合せ荷重下においては、き裂面に作用する垂直およびせん断応力間にも相対的な位相差

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{2\lambda \sin 2\theta_c \sin \phi}{1 + \cos 2\theta_c + 2\lambda \sin 2\theta_c \cos \phi} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{2\lambda \cos 2\theta_c \sin \phi}{2\lambda \cos 2\theta_c \cos \phi - \sin 2\theta_c} \right) \quad (2)$$

を生ずる。この ψ の影響を考慮して等価応力拡大係数を求めると

$$\Delta K_{eq}^* = \frac{\Delta K_{eq}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 - 2 \left\{ \frac{(F_1 \Delta \sigma_{\theta}) (F_2 \Delta \tau_{\theta})}{(F_1 \Delta \sigma_{\theta})^2 + (F_2 \Delta \tau_{\theta})^2} \right\}^2 (1 - \cos 2\psi)}} \quad (3)$$

が得られる。この ΔK_{eq}^* によりき裂成長速度を整理した結果を図4に示す。位相差がある場合の結果のみが、図3よりも左方に移動することがわかる。移動の度合はき裂角度に依存し、応力比 $\lambda=1/2, \phi=90^\circ$ の場合最大 16%, $\lambda=2, \phi=90^\circ$ の場合最大 8%程度である。図4ではき裂成長速度にかなりのばらつきがみられるため、 ΔK_{eq}^* の ΔK_{eq} に対する優位性を確認するには至らなかった。

4. 結論

組合せ軸力-ねじり荷重下での破壊き裂は応力比、位相差によらず最大せん断面の近傍に発生し、最大垂直応力振幅に垂直な方向へとその方向を変えながら成長した。応力比が大きい場合にはき裂の発生時期は早く、き裂方向が主応力面へと遷移する際のき裂長さは応力比が小さい場合に比べて長い。また、き裂面上に作用する垂直およびせん断応力に基づく等価応力拡大係数を用いると、種々の応力比、位相差での組合せ荷重下でのき裂成長速度をある程度評価することができる。