

710 摩擦熱を伴う転がり接触による内部き裂の疲労進展特性

○学 内山 隆嗣(富山大院) 正 清水 理能(富山大) 正 五嶋 孝仁 正 石原 外美

Ryuji UCHIYAMA, Toyama University 3190, Gofuku, Toyama-shi, Toyama
 Masayoshi SHIMIZU, Toyama University
 Takahito GOSHIMA, Toyama University
 Sotomi ISIHARA, Toyama University

Key Word : Thermal Stress, Three Dimensional Fracture Mechanics, Rolling Contact Internal Planer Crack, Crack Propagation

1. 緒言

歯車、転がり軸受けの疲労き裂や圧延ローラーのスコーリングなど、繰り返し転がり接触により、内部き裂が発生、進展して疲労損傷に至る事故例が多い。そのため転がり接触を受けるき裂を有する半無限体の解析が多くなされてきたがその多くは2次元解析である。

そこで本研究では三次元内部き裂を有する半無限体が繰り返し転がり接触を受ける場合の解析を行い応力拡大係数とその変動幅、き裂進展挙動及び疲労寿命について考察を行った。

2. 理論解析

2.1 解析モデルと境界条件

解析モデルには図1のように内部に円形き裂が存在する半無限体に転がり接触として一定速度 V で移動する接触圧力 $P(x)$ と摩擦力 $fP(x)$ および摩擦熱 $q(x)$ が加わるモデルについて考える。ここでき裂面に圧力も摩擦もないものとすれば力学的および熱的境界条件は次式で与えられる。

$$\sigma_{22}(x_1, 0, x_3) = \begin{cases} -p(x) & |x| < c \\ 0 & |x| > c \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_{23}(x_1, 0, x_3) = \begin{cases} -fp(x) & |x| < c \\ 0 & |x| > c \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_{21}(x_1, 0, x_3) = 0 \quad -\infty < x_1, x_3 < +\infty \quad (3)$$

$$\sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3) = 0 \quad x_2 \rightarrow \infty \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$\left[K_i \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right]_{y=0} = \begin{cases} -q(x) & |x| < c \\ 0 & |x| > c \end{cases} \quad (5), (6)$$

$$T(x, y) = 0 \quad \text{at infinity}$$

$$\sigma_{33}'(x_1', x_2', 0) = 0 \quad x_1', x_2' \in D_{op} \quad (7)$$

$$\sigma_{3i}'(x_1', x_2', 0) = 0 \quad x_1', x_2' \in D \quad i=1, 2 \quad (8)$$

ここで K_i は熱伝導率、 f は摩擦係数、 D_{op} はき裂開口領域を示す D は平面き裂領域また σ_{33}' のプライムは (x_1', x_2', x_3') 座標を示す。ここで摩擦力による仕事がすべて熱に変換されるものとすれば接触領域において生じる摩擦熱 $q(x)$ は次式で表される。

$$q(x) = fV_0 P(x) = fVSrP(x) \quad (9)$$

ここで Sr はすべり率である。

さらに本解析における圧力分布はヘルツ分布とする。

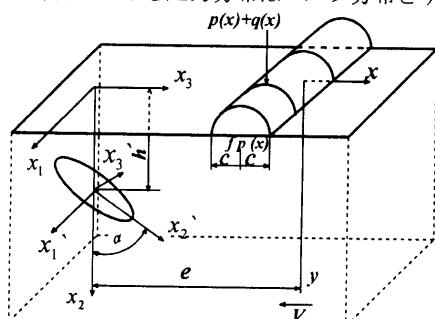


Fig.1 Geometry and Coordinate System

2.2 応力拡大係数の解析

一般に応力場はき裂のない半無限体の応力 σ_{ij}^0 にき裂による応力場のかく乱 σ_{ij}^1 を重ね合わせて求めることができる。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^1 \quad (10)$$

このとき境界条件を満足する σ_{ij}^0 は熱弾性論によって求めることができる。例えば準定常熱応力解は次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_y^0}{H\lambda} = \int_{-1}^1 F_y^C(\bar{x}, \bar{y}, t) dt \quad \bar{x} \leq -1 \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_y^0}{H\lambda} = \int_{-1}^{\bar{x}} F_y^P(\bar{x}, \bar{y}, t) dt + \int_{-1}^1 F_y^C(\bar{x}, \bar{y}, t) dt \quad -1 < \bar{x} \leq 1 \quad (12)$$

$$\frac{\sigma_y^0}{H\lambda} = \int_{-1}^1 F_y^P(\bar{x}, \bar{y}, t) dt + \int_{-1}^{\bar{x}} F_y^C(\bar{x}, \bar{y}, t) dt \quad \bar{x} > 1 \quad i, j = 2, 3 \quad (13)$$

$$F_y^P(\bar{x}, \bar{y}, t) = \frac{4\sqrt{1-t^2}}{Pe\sqrt{\pi Pe}} \Gamma_y^P(\bar{x}, \bar{y}, t) \exp\left[-\frac{Pe\bar{y}^2}{4(\bar{x}-t)}\right] \quad i, j = 2, 3 \quad (14)$$

$$F_y^C(\bar{x}, \bar{y}, t) = \frac{\sqrt{2}\sqrt{1-t^2}\bar{y}^{-3/2}}{Pe\sqrt{\pi Pe}[\gamma^2(t)+1]^{3/4}} \Gamma_y^C(\bar{x}, \bar{y}, t) + \frac{8\sqrt{1-t^2}\gamma'(t)}{\pi Pe\bar{y}[\gamma^2(t)+1]^5} \quad i, j = 2, 3 \quad (15)$$

ここで $\bar{x} = x/c$, $\bar{y} = y/c$ とした

また σ_{ij}^1 は eigen ひずみ ϵ_{mn}^* を用いて次式で表される⁽¹⁾。

$$\sigma_{ij}^1(x) = C_{jmi} \int_{\Omega} C_{apmn} \epsilon_{mn}^* \frac{\partial G_s^{(q)}(x, \xi)}{\partial x_i \partial \xi_p} d\xi \quad (16)$$

G_s は Mindlin のグリーン関数、 C_{ij} は弾性定数である。

さらに平面き裂領域 D のき裂開口変位を次式のよう置き、

$$b_m(\xi_1', \xi_2') = 2 \int_q \epsilon_{3m}^{**}(\xi_1', \xi_2', \xi_3') d\xi_3' \quad (m = 1, 2, 3) \quad (17)$$

上記の応力を重ね合わせた式(10)の応力場を境界条件式(7)(8)に代入することで次の積分方程式が得られる。

$$\sum_{m=1}^3 \int_{D_{op}} b_m(\xi_{12}') K_{mm}(x_{12}', \xi_{12}') d\xi_{12}' = -\sigma_{33}^0(x_1, x_2, 0) \quad x_{12}' \in D \quad (18)$$

さらに平面き裂領域 D を N 個の三角形要素に分割し、

$$b_i(\xi_1', \xi_2') = \sqrt{2a\varepsilon - \varepsilon^2} f_i(\xi_1', \xi_2') \quad i = 1, 2, 3 \quad (19)$$

とおいて式(18)の積分方程式を数値的に解けば各要素に対する f_m の値を用い次式のように応力拡大係数が求まる。

$$\{K_I, K_H, K_{III}\} = P_0 \sqrt{\pi a} \{f_3, f_2, f_1\} \quad (20)$$

2.3 疲労き裂進展の数値シミュレーション

本解析では混合モードの進展が考えられるので μ を横弾性係数として次式のエネルギー解放率を用いる。

$$\Delta G = ((1-\nu)K_{I\max}^2 + (1-\nu)\Delta K_H^2 + \Delta K_{III}^2)/2\mu \quad (21)$$

次式の修正パリス則を用いてシミュレーションを行う⁽²⁾。

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C_0 \left(\frac{\sqrt{\Delta G}}{\sqrt{\Delta G_{th}}} \right)^\gamma & \text{if } \Delta G \geq \Delta G_{th} \\ 0 & \text{if } \Delta G < \Delta G_{th} \end{cases} \quad (22)$$

ここで C_0 と γ は材料定数, N はサイクル数, ΔG_{th} はき裂進展に対するエネルギー開放率下限界値である。以下にき裂進展のシミュレーションの手順を以下に示す。

- (1) 応力拡大係数の数値計算例をもとに ΔG を決定する。
- (2) き裂前縁の各点での (da/dN) を計算する。
- (3) 進展速度が最大になった $(da/dN)_{\max}$ の点において、き裂進展の刻み量 $(\Delta a)_{\max}$ を決め、 $(\Delta a)_{\max} = (da/dN)_{\max} \Delta N$ より ΔN を決定する。そして $(\Delta a) = (da/dN) \Delta N$ よりき裂前縁のほかの各点より Δa を決定する。
- (4) き裂前縁の各点での Δa が求まるので、新しいき裂形状が決定される。

3.数値計算

3.1 数値計算例

計算には高炭素クロム軸受け鋼を用い初期平面き裂半径を $a = b = 40\mu\text{m}$, 接触半幅を $c = 400\mu\text{m}$, ベクレ数 $P_e = 100$, ルツ分布接触圧力 $P_{\max} = 200\text{GPa}$ とした。 $C_0 = 2.0 \times 10^{-11}$, $\gamma = 4$, $\Delta K_{th} = 3.4\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ を用いた⁽²⁾。また ΔG_{th} は次式で与えられる。

$$\Delta G_{th} = (1 - v^2)(\Delta K_{th})/E_0 \quad (23)$$

また水平き裂と垂直モデルを解析モデルとするためそれぞれ $\alpha = -90^\circ$ (以下水平き裂とする), -15° (以下垂直き裂とする) の2種類について解析を行った。

3.2 数値計算結果

き裂進展には応力拡大係数 K の変動の傾向よりも応力拡大係数の変動幅 ΔK が重要なパラメータとなる。そこで図2ではすべり率による ΔK_{II} の変動における摩擦係数の影響を示す。また図3には摩擦係数による ΔK_{II} の変動におけるすべり率の影響を示す。水平き裂においては摩擦係数、すべり率が大きくなるにつれて変動幅の増加率が大きくなっていることがわかる。垂直き裂に関して図2より摩擦係数が大きいほどすべり率の減少とともに ΔK_{II} は小さくなり、図3ではすべり率が小さいほど摩擦係数の増加とともに ΔK_{II} は小さくなっていることがわかる。また今回 ΔK_{III} は ΔK_{II} と比較して著しく小さいため省略する。次に図4にき裂進展の形状を示す。このとき各き裂進展形状のステップ数は 0, 5, 10, 15, 20 とした(1ステップはき裂が $2\mu\text{m}$ 進展した時点とする)。水平き裂はほぼ円形に進展しているがやや x_2 方向に縦長に進展していく傾向がある。垂直き裂は x_2 上方向に比べ下方向に著しく進展していく。これは無限体表面付近部と比較して下部のほうに最大応力が発生しているためと考えられる。

次に疲労寿命に対するすべり率による影響を図5に示す。水平、垂直き裂のどちらでも同じき裂長さに到達するまでのサイクル数はすべり率が大きくなるにしたがって小さくなっている。また水平き裂に比べ垂直き裂の寿命が短くなるのがわかる。

4 結言

- (1) 水平き裂の応力拡大係数変動幅 ΔK_{II} は摩擦係数、すべり率の増加とともにその増加率は大きくなる。
- (2) 垂直き裂の ΔK_{II} に関しては摩擦係数が大きく、かつすべり率が小さい時その値は小さくなる。
- (3) 水平き裂の形状には前縁と後縁での進展の差はないが垂直き裂では上方向に比べ下方向に大きく進展する。
- (4) 転がり疲労寿命はすべり率の増加とともに低下し、摩擦係数が大きいほどこの影響は著しく現れる。

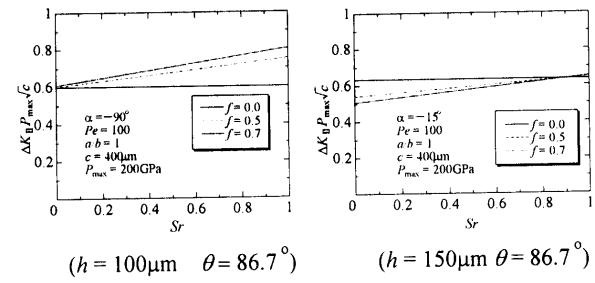


Fig.2 Relation between Fluctuation of Mode II Stress Intensity Factor K_{II} and Slide Roll Ratio

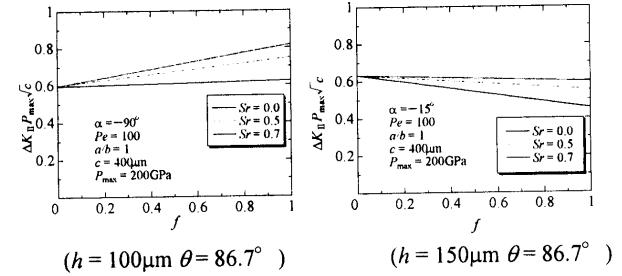
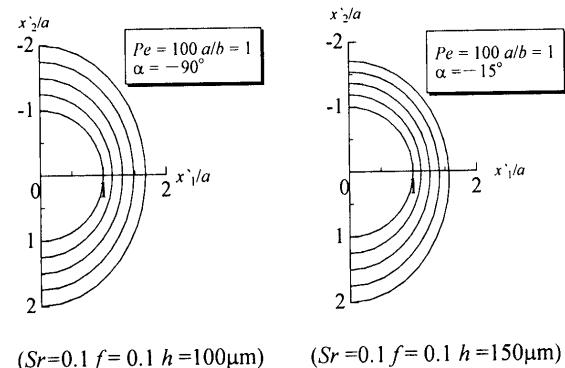


Fig.3 Relation between Fluctuation of Mode II Stress Intensity Factor K_{II} and Friction Coefficient



($Sr = 0.1, f = 0.1, h = 100\mu\text{m}$) ($Sr = 0.1, f = 0.1, h = 150\mu\text{m}$)

Fig.4 Crack Growth Contours

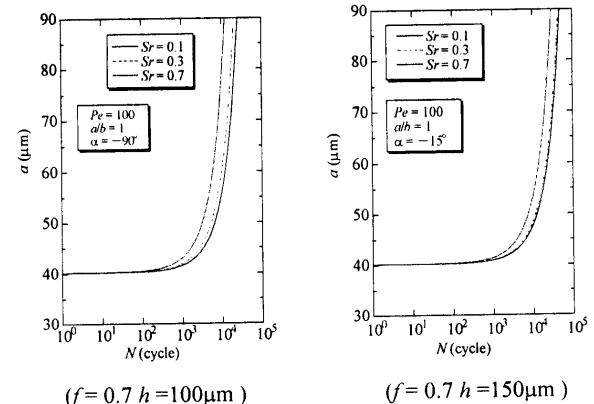


Fig.5 Predicted Crack Size vs. Cycle Number

参考文献

- (1) Toshio, M., Micromechanics of defects in solids, pp.11
- (2) Hanson, M.T., and Keer, L.M., Tribol. Trans., 35(1992), 451