

701 繰返し転がりヘルツ接触による疲労表面き裂進展経路と寿命評価 Prediction of Fatigue Crack Growth Path and Fatigue Life due to Repeated Hertzian Rolling Contact

○学 丹羽 誠 (富山大院) 正 五嶋 孝仁 (富山大) 正 石原 外美 (富山大) 正 清水 理能 (富山大)
Makoto NIWA, Takahito GOSHIMA, Sotomi ISHIHARA, Masayoshi SHIMIZU, Toyama University, Gohoku3190, Toyama-city

Key Words: Elasticity, Contact Problem, Stress Intensity Factor, Fatigue Crack Growth, Crack Path, Fatigue Life

1. 緒言

歯車や転がり軸受け、圧延ローラや鉄道のレール等では、繰返し転がり接触により、ピッチングやスポーリングなどのトライボロジー損傷が破損の原因となっている。本研究では、ヘルツ接触と摩擦力でモデル化される転がり接触を受ける半無限体の屈折表面き裂の応力拡大係数を破壊力学的に解析した。解析においては、摩擦熱の発生や潤滑油などによるき裂面内圧も考慮した。また、軸受鋼(SUJ2)を例にとり、繰返し転がりヘルツ接触による応力拡大係数の数値計算結果と、疲労試験から得られたき裂進展則を用い、傾斜初期き裂から損傷に至るまでの疲労き裂進展経路をシミュレーションし、疲労寿命の定量的評価を行った。そしてその結果に及ぼす摩擦係数やき裂面内圧の影響について検討した。さらに、ヘルツ最大接触圧力が進展経路と寿命に及ぼす影響を調べるとともに、ヘルツ最大接触圧力の大きさによる転がり疲労限度の評価を試みた。

2. 解析モデルと境界条件

Fig. 1 の様にき裂に沿った座標系 $(\tilde{\xi}_k, \tilde{\zeta}_k)$ 及びローラと共に移動する座標系 (\tilde{x}, \tilde{y}) を採用し、次の無次元変数を用いる。

$$(x, y) = (\tilde{x}/c, \tilde{y}/c), \quad (\xi_k, \zeta_k) = (\tilde{\xi}_k/c, \tilde{\zeta}_k/c)$$

$$l_k = \tilde{l}_k/c, \quad Pe = Vc/\kappa_t, \quad Sr = Vs/V, \quad p(x) = \sqrt{1-x^2}$$

$$H_0 = \frac{2\alpha_0 G_0 \kappa_t (1-\nu)}{K_t (1-\nu)}, \quad \beta_k^* = 180 - \beta_k$$

ここで、 κ_t は温度伝導率、 K_t は熱伝導率、 G_0 は横弾性係数、 ν はポアソン比、 α_0 は線膨張係数、 P_0 は接触圧力の最大値を示す。また、 Pe はペクレ数、 Sr はすべり率であり、 Vs は転がり接触中に生じるすべり速度である。

このとき摩擦熱 $q(\tilde{x})$ は次式で与えられる。

$$q(\tilde{x}) = fVsP_0P(x) = fVsR_0P(x) \quad (1)$$

ここで f は摩擦係数、 P_0 はヘルツの最大接触圧力を示す。

半無限体表面の接触領域においてはすべりによる摩擦熱が生じ、非接触領域においては断熱されているものと仮定すれば、熱的境界条件及び力学的境界条件は次のようになる。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = \begin{cases} fcVsP_0P(x)/K_t & |x| \leq 1 \\ 0 & |x| > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$(T)_{y \rightarrow \infty} = 0 \quad (3)$$

$$(\sigma_{yy})_{y=0} = \begin{cases} -P_0P(x) & |x| \leq 1 \\ 0 & |x| > 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$(\sigma_{xy})_{y=0} = \begin{cases} fP_0P(x) & |x| \leq 1 \\ 0 & |x| > 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$(\sigma_{pq})_{y \rightarrow \infty} = 0 \quad (p, q = x, y) \quad (6)$$

さらに、き裂面には摩擦が無いものと仮定し、潤滑油侵入に関連し、一般に接触領域下で内圧が働くものと仮定すれば、き裂面における力学的境界条件は次式で与えられる。

$$(\sigma_{\xi_k})_{\zeta_k=0} = 0 \quad 0 < \xi_k < l_k \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$$(\sigma_{\xi_k})_{\zeta_k=0} = \begin{cases} P_2(x, \xi_k) & |x| \leq 1 \\ 0 & |x| > 1 \end{cases} \quad \xi_k \in \xi_k^{opp} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

ここで、 ξ_k^{opp} はそれぞれのき裂の開口領域を示す。また、内圧 $P_2(x, \xi_k)$ は次式の2通りを仮定した。

$$P_2(x, \xi_k) = \begin{cases} 0 & \text{: 内圧なし} \\ P_0P(x) & \text{: 一様分布} \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

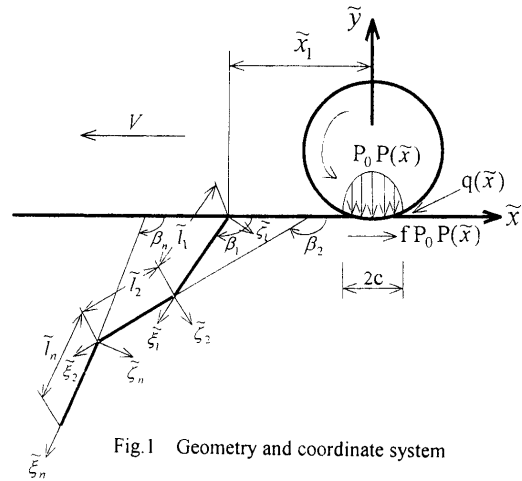


Fig.1 Geometry and coordinate system

3. 応力拡大係数の解析

一般に応力 σ_y は、き裂の無い半無限体の応力 σ_y^0 とき裂による応力場のかく乱を重ね合わせて得られる。

$$\sigma_y = \sigma_y^0 + \sigma_y^1, \quad (i, j = x, y \text{ or } \xi, \zeta) \quad (10)$$

ペクレ数が十分に大きい場合について、境界条件(2)-(6)式を満足する準定常応力解 σ_y^0 を熱弾性論により求め⁽¹⁾、屈折き裂を強さ α の転位の連続分布と見なす方法で応力 σ_y^1 を解析した⁽²⁾。そこで求められた σ_y をき裂に沿った座標系に座標変換し、き裂面での境界条件式 (7), (8) に代入すると、次の特異積分方程式を得ることができる。

$$2e^{i\beta_k} \int_0^{l_k} \frac{\alpha_k(\eta_k)}{\xi_k - \eta_k} d\eta_k + \sum_{j=1}^n \int_0^{l_j} \{\alpha_j(\eta_j) \Gamma_{kj} + \overline{\alpha_j(\eta_j)} A_{kj}\} d\eta_j = -\left\{ (\sigma_{\xi_k}^0 - i\sigma_{\zeta_k}^0)_{\zeta_k=0} + P_2(\xi_k) \right\} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

そこで、次式のようにおき、(11)式を数値的に解く⁽³⁾。

$$\hat{\xi}_k = \frac{2\xi_k}{l_k} - 1, \quad \hat{\eta}_k = \frac{2\eta_k}{l_k} - 1 \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

$$\alpha_k(\eta_k) = \frac{P_0 \hat{\alpha}_k(\hat{\eta}_k) e^{-i\beta_k}}{(1 - \hat{\eta}_k^2)^{1/2}} \quad (13)$$

このとき、応力拡大係数は次式で表すことができる。

$$K_I^* - iK_{II}^* = \frac{1}{P_0 \sqrt{c}} \{K_I - iK_{II}\} = \pi \sqrt{2l_n} \hat{\alpha}_n(1) \quad (14)$$

さらに、混合モードの屈折き裂進展が考えられるので、次式で示すエネルギー開放率 ΔG を用いることにする。

$$\Delta G = \left[(1-\nu)K_{I,max}^2 + (1-\nu)\Delta K_{II}^2 \right] / 2G_0 \quad (15)$$

き裂進展経路と疲労寿命評価については、 ΔG が最大となる方向に屈折進展するものと仮定し、き裂進展則はパリズ則をもとにして次式を採用する。

$$\frac{d\tilde{l}_n}{dN} = \begin{cases} C_0 (\Delta G / \Delta G_{th})^\tau & \text{if } \Delta G > \Delta G_{th} \\ 0 & \text{if } \Delta G < \Delta G_{th} \end{cases} \quad (16)$$

4. 傾斜初期き裂の進展と疲労寿命

高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)を例にとり数値計算を行う。SUJ2 の回転曲げ疲労試験を行い、 $\Delta G_{th}=95.576\text{Pa}\cdot\text{m}$ 、 $\tau=1.67$ 、 $C_0=3.5 \times 10^{-7}\text{m}$ が得られた。 ΔG_{th} を越える長さの初期き裂が ΔG が最大となる方向に生ずるものと仮定すれば、たとえば $f=0.1, S_r=0.0$ のときの初期き裂は $l_1=80\mu\text{m}$ 、 $\beta_1=32^\circ$ であった。図2(a),(b)は単屈折き裂($n=2, l_2=5\mu\text{m}$)の応力拡大係数のローラーの移動に伴う変動を示す。

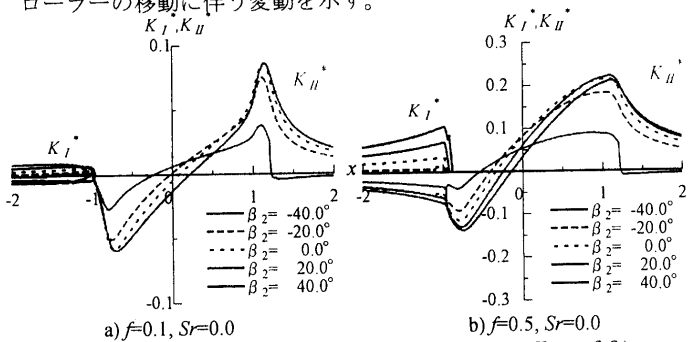


Fig.2 Stress intensity factors as a function of crack location (effects of β_2)

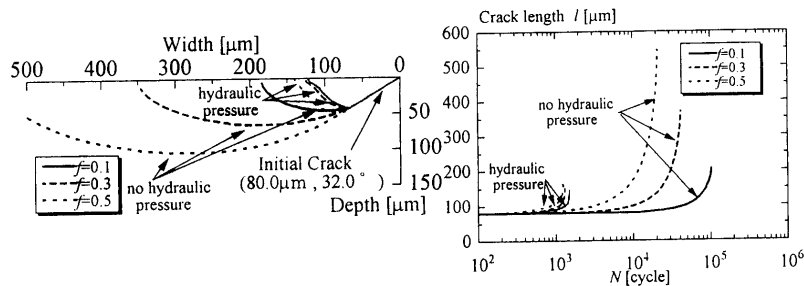


Fig.3 Crack growth path showing effects of f and hydraulic pressure

Fig.4 Crack length vs. N showing the effect of f

図3は摩擦係数を3通りに変化させた場合のき裂進展経路、図4はこのときのサイクル数とき裂長さの関係を示す。

さらに、図5,6には進展に寄与するモードIとモードIIの割合を明かにするために、モードIの最大値 $K_{I,max}$ とモードIIの変動幅 ΔK_{II} の比について、き裂長さによる変動を示す。

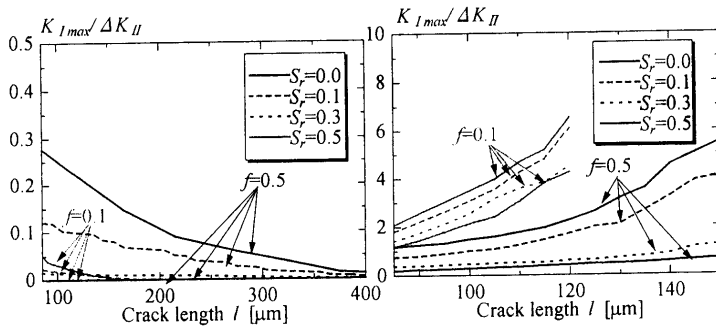


Fig.5 $K_{I,max} / \Delta K_{II}$ variation for no internal hydraulic pressure

Fig.6 $K_{I,max} / \Delta K_{II}$ variation for internal hydraulic pressure

5. ヘルツの最大接触圧力と転がり疲労限度の評価

$f=0.7, S_r=0.1$ の場合 ($l_1=34\mu\text{m}$ 、 $\beta_1=37^\circ$)、ヘルツ最大接触圧力 P_0 を4通りに変化させた場合のき裂進展経路を図7に、このときのサイクル数とき裂長さの関係を図8に示す。

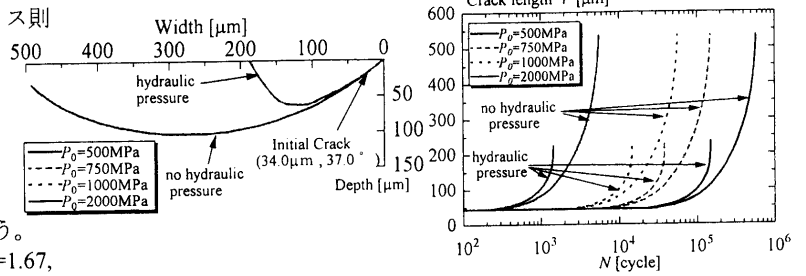


Fig.7 Crack growth path showing effect of Hertzian contact pressure

Fig.8 Crack length vs. N showing effect of Hertzian pressure

また、ヘルツ最大接触圧力に対する疲労限度を推定するために、図9には、ヘルツ最大接触圧力 P_0 と転がり疲労寿命 N_f との関係を示す。ヘルツ最大接触圧力が減少するにしたがい疲労寿命は長くなるが、 P_0 がある値に達すると初期き裂進展しなくなる。この値を疲労限度と呼ぶ事にすれば、摩擦係数が大きくなるほど疲労限度も低くなることわかる。たとえば、摩擦係数 $f=0.3, 0.5, 0.7$ に対する疲労限度はそれぞれ $P_0=1080\text{MPa}, 690\text{MPa}, 500\text{MPa}$ 程度と推定される。

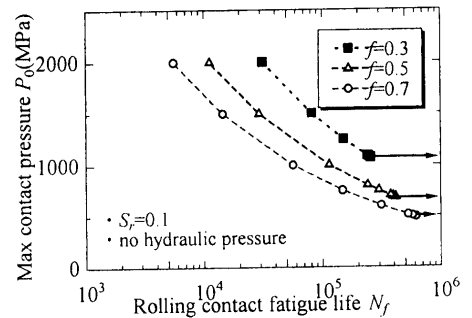


Fig.9 Hertzian contact pressure P_0-N_f curve

6. 結言

エネルギー解放率が最大となる方向に傾斜しかつ下限界値を越える長さを有する表面初期き裂が繰返し転がりヘルツ接触を受けるとき、本数値例の範囲で以下の結論を得た。

- 1) 内圧が働かない場合は、進展はモードIIが支配的となり、徐々に表面方向へ屈折進展して、摩擦係数が大きくなると、早く大きな損傷が生じやすくなり疲労寿命も短くなる。また内圧が働いた場合には、進展はモードIが支配的となり、内圧がないときに比べて急激に表面方向へ屈折進展して、より小さな損傷が生じやすくなり、疲労寿命もさらに短くなる。
- 2) き裂進展経路はヘルツ最大接触圧力の大きさによって影響を受けないが、ヘルツ最大接触圧力の大きさが減少するとともに疲労寿命は長くなり、ヘルツ最大接触圧力がある値(疲労限度)に達すると進展しなくなり、この疲労限度は摩擦係数が大きくなる程低くなる。

7. 文献

- (1) 五嶋・Keer, 機論 (A), 56巻,532号(1990),pp2567.
- (2) 五嶋・ほか4名,機論 (A), 68巻,672号(2002),pp.1198.
- (3) Gerasoulis,A.,Comput. Math. Applics.,8(1982),15.