

光洋精工(株)

○山川耕志郎

木澤克彦

小熊規泰

大阪大学

木田勝之

1 緒言

転がり接触条件下での内部き裂は、Fig. 1 に示すように介在物や空孔などの内部欠陥から発生することが多い。しかし、介在物・空孔と疲れ寿命との関係は、多くの研究が行われているにもかかわらず、十分に解明されているとはいえないのが現状である。

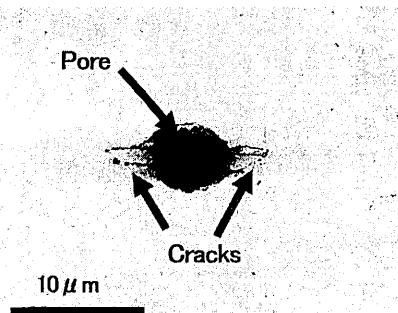


Fig. 1 SEM photograph of cracks initiated from a pore under rolling contact fatigue.

著者らは、これまでに、各種介在物の大きさ、量の情報をパラメータとする寿命推定式を導出し、従来から寿命に最も悪影響を及ぼすと考えられてきた酸化物系介在物だけでなく、硫化物系介在物も寿命に悪影響を及ぼすことを定量的に明らかにした¹⁾。しかし、その理論的根拠は明らかではないため、本研究では、破壊力学的な見地から寿命推定式や疲労限度の理論的根拠を示すことを目的としている。

基材中に介在物・空孔が存在すると、基材とのヤング率の違いなどによって応力場が変化する。この影響の範囲を明らかにすることは、内部き裂や介在物・空孔の影響を力学的に考察するために重要かつ必要不可欠である。しかし、これまでに、接触面積が小さくかつ3次元的な考察が必要となる玉軸受の内部介在物・空孔が応力場におよぼす影響を考察し、Fig. 1 のようなき裂を力学的に検討した例は見当らない。本報では、転がり接触下で、介在物・空孔が応力場に及ぼす影響を検討した結果について報告する。

2 解析方法

計算モデルの概略を Fig. 2 に示す。計算モデルは平板と玉の接触とした。平板試験片内部に介在物・空孔の存在を仮定し、その上方をヘルツ接触面圧が移動するときの応力分布を逐次解析した。介在物・空孔は、酸化物系介在物を想定して、 $\phi 10 \mu\text{m}$ 、 $\phi 20 \mu\text{m}$ 、 $\phi 40 \mu\text{m}$ の球状と仮定した。介在物の物性値は Table 1 に示す値を用いた。以下の図で、マトリックスとは介在物・空孔が無い状態、つまり基材のままであることを意味する。介在物・空孔の表面からの深さ d は、最大せん断応力が最大となる深さとした。

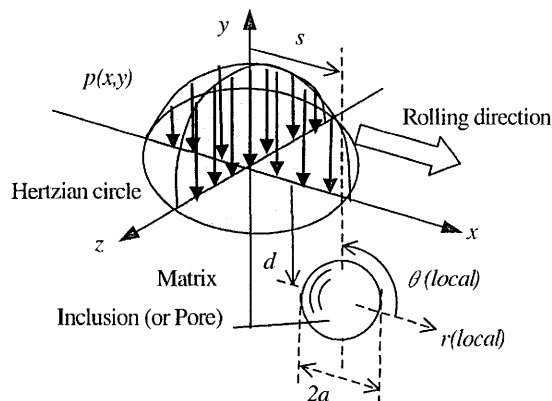


Fig. 2 Schematic illustration of rolling contact.

Table 1 Mechanical properties of inclusions.

Inclusion	Al_2O_3	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Matrix
Modulus of elasticity, GPa	390.0	100.0	207.9
Poisson's ratio	0.25	0.25	0.30

任意の三次元形状を有する連続体内部の応力分布を求める数値計算手法としては、有限要素法（以下 FEM）、境界要素法など多くの手法が存在するが、本研究では汎用コードが充実している FEM を用いた。FEM では、一般に、要素サイズを小さくするほど応力値は理論値に近づく。本研究では、予備解析で要素サイズと発生応力の関係を調べ、介在物・空孔周囲の応力値が十分収束するように要素サイズを決定した。

$\phi 20 \mu\text{m}$ 空孔の周辺に要素分割した例を Fig. 3 に示す。

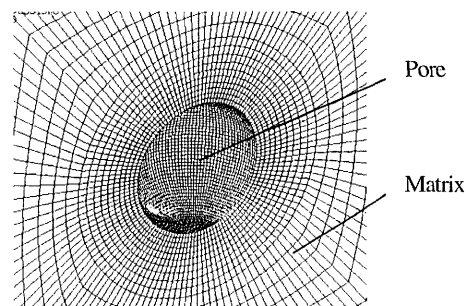


Fig. 3 FEM mesh distributions around a pore.

平板の大きさは、拘束条件の影響が小さくなるように、十分大きくとり、端面を完全拘束した。また、対称性を考慮し、 $z < 0$ の領域のみをモデル化した。荷重はヘルツ接触面圧を節点荷重に変換して入力し、平板の上を逐次移動させた。ただし、本研究では、玉と平板の摩擦、介在物とマトリックスの境界面の接触・摩擦は考慮していない。

3 解析結果および考察

転がり接触下でのき裂は、主として、モードII型（面内せん断型）で進展すると考えられる²⁾ため、以下ではモードII型き裂進展の駆動力であるせん断応力に注目した。

著者らは、これまでに、介在物の上方をヘルツ接触面圧が一回通過する際に、介在物とマトリックスの境界（以下、介在物境界）に発生するせん断応力を逐次計算し、き裂発生位置・方向などを求めた³⁾。その結果をFig.5に示す。Fig.5には、ヘルツ接触面圧が一回通過する際の最大値 $\tau_{\max}$ と、その際の振幅 $\Delta\tau_{r,\theta}$ を、介在物境界上の各節点で計算し、これらが最大値となる位置（●）と方向（↑）を示した。ここでせん断応力 $\tau_{r,\theta}$ は、Fig.5に示した球座標に対して定義した。

基材中に空孔が存在する場合には、 $\theta=0, 180^\circ$ に発生する $\tau_{\max}$ が最大となり、 Al_2O_3 が介在物として存在する場合には $\theta=0, 180^\circ$ に発生する $\Delta\tau_{r,\theta}$ が最大となることが明らかとなった。これらの中でも、特に、空孔に発生する $\tau_{\max}$ の値が大きく、その位置が、 $\theta=0, 180^\circ$ であることが明らかになったことは重要である。

以下、この結果を基に、介在物・空孔が変化させる応力分布とその範囲を考察し、特にどれほど離れると影響がなくなるのかを明らかにした。

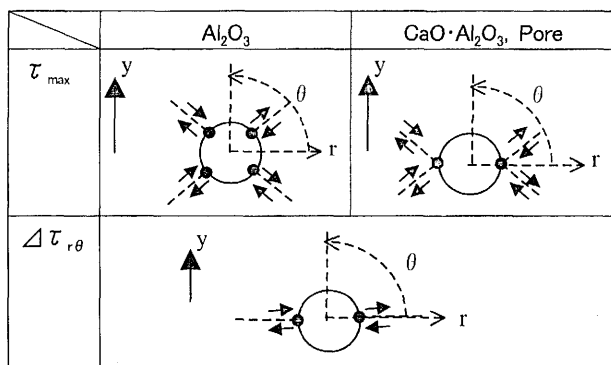


Fig.5 Relation between inclusions and shear stress directions.

Fig.6に、介在物境界からの距離と最大せん断応力 $\tau_{\max}$ の関係を示す。横軸は、介在物境界からの距離を介在物の半径 a で無次元化した。縦軸は、ヘルツ接触面圧が一回通過する際に最大となるせん断応力を最大接触面圧 $P_{\max}$ で無次元化した。

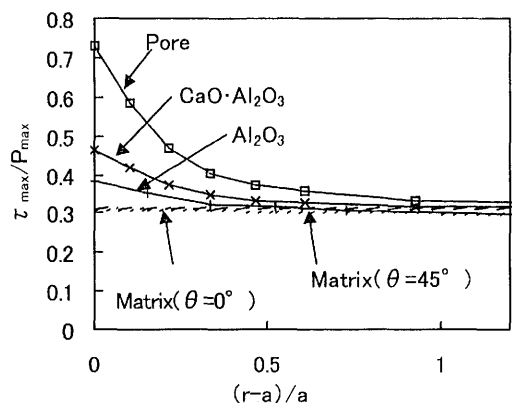


Fig.6 Maximum shear stress distributions.

介在物・空孔の種類によって、応力が変化する範囲が大きく異なることがわかる。その範囲は、大きい順に、空孔、 $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Al_2O_3 となった。最も影響が大きい空孔の場合でも、空孔から $(r-a)/a=1.3$ 以上離れると、介在物・空孔が無い場合との差が5%以下になった。

Fig.7に、介在物境界からの距離と $\Delta\tau_{r,\theta}$ との関係を示す。無次元化の方法は、Fig.5と同様である。介在物による応力範囲への影響は、それが最も大きい Al_2O_3 の場合で、 $(r-a)/a=0.3$ 以上で、介在物・空孔が無い場合との差が5%以下になった。また、空孔の場合では、 $(r-a)/a=0.6\sim0.9$ の範囲において、介在物・空孔が無い場合との差が12%程度になっているが、介在物境界周辺の応力が小さいことから、応力集中影響範囲として考慮する必要が無いと判断した。

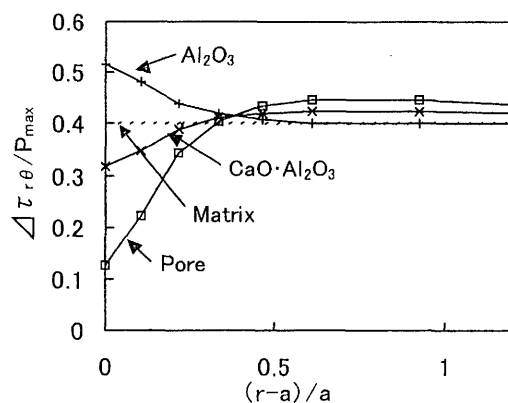


Fig.7 Shear stress distributions.

以上の結果をまとめると、基材中に空孔がある場合に、応力集中の影響が最も大きくなり、その範囲も大きい。介在物中心から $2.3a$ 離れると、その影響はほとんど無くなると見なしてよいことが明らかになった。

したがって、この範囲を越える大きさのき裂が存在した場合、介在物による応力集中の影響は小さくなると考えられる。特に、転がり疲労でも内部から発生したき裂に停留が認められているため⁴⁾、疲労限度に対しては、空孔や介在物の種類にかかわらず力学的な扱いが容易になる可能性がある。ただし、介在物・空孔近傍では、その影響が及んでいるため、初期におけるき裂発生・進展と寿命の関係にはさらなる検討が必要である。

4 結言

転がり接触下における介在物・空孔周囲の3次元応力分布を解析した結果、基材中に空孔がある場合に、応力集中の影響とその範囲が最も大きくなるが、介在物中心から介在物半径の2.3倍の距離まで離れるとその影響はほとんど無くなることが明らかになった。

参考文献

- 1) 木澤克彦ら、材料とプロセス, **14**, 1399 (2001).
- 2) 木田勝之, 材料, **51**, 867 (2002).
- 3) 山川耕志郎ら, 第47回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集, 441 (2003).
- 4) D. Nélías, ら, Trans. ASME, J. Trib., **121**, 240 (1999).