

605 永久磁石式渦電流リターダのクリープ疲労寿命予測

住友金属工業(株) ○野口泰隆 宮原光雄 今西憲治 斎藤晃 岸根申尚

1 緒言

近年、車両の減速装置として永久磁石式渦電流リターダを搭載した大型トラックやバスが増加している。これは、リターダ搭載車はブレーキ負荷時の停止距離が短く、さらに、フットブレーキの使用回数が減るために運転手の疲労が軽減されるなどの利点を有しているからである。リターダには永久磁石式、電磁石式、油圧式などの方式があるが、永久磁石式は小型・軽量であるため車両への搭載性が特に優れている。

永久磁石式渦電流リターダの構造を Fig.1 に示す。ロータは車両のプロペラシャフトに連結されて回転するのに対し、永久磁石を含むステータは車両の非回転部に固定される。制動時には、ロータに磁力が作用して渦電流が発生し、この電流と磁場の相互作用で制動トルクが発生する。同時にロータは渦電流によって発熱し、高温となる。このように、リターダの制動を繰り返すとロータの温度は変動し、長期間使用時には熱疲労き裂が発生する。

本報では耐久性に優れた永久磁石式リターダを得るため、ロータのクリープ疲労寿命予測モデルを構築した。

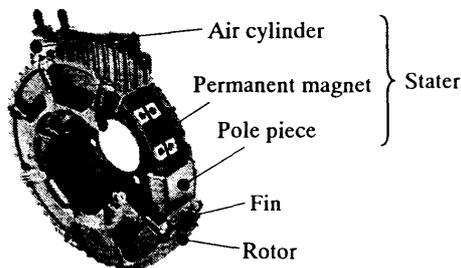


Fig.1 Permanent magnet type eddy current retarder

2 ロータ材

永久磁石式リターダのロータ材として、従来鋼の SCM415(0.15C-1Cr-0.2Mo)に比べて高温強度が高く、電気抵抗が低い鋼(0.10C-0.5Mo-Nb,V,B)を開発した。この開発鋼で作製したロータは電気抵抗が低いいため、発生する渦電流が従来鋼のロータより多く、制動力に優れる。

3 試験および寿命評価方法

3.1 試験方法 開発鋼と従来鋼で作製したロータ(内径 411mm, フィン高さ 12mm, フィン 90 枚)の耐久性を評価するため熱サイクル試験を実施した。試験はリターダの制動・非制動を繰り返し、ロータの最低温度 T_{min} が 373K, 最高温度 T_{max} が 923K, 953K, 973K, の 3 条件で行った。ロータが T_{min} から T_{max} まで加熱される時間は $T_{max}=923K$, 953K, 973K の条件でそれぞれ約 50 秒, 60 秒, 70 秒であり、冷却時間は約 170 秒であった。試験は適宜中断してロータの変形量を測定し、終了後にロータ表面のき裂を観察した。試験の繰り返し数は、 $T_{max}=923K, 953K$ の場合が約 2

万サイクル, 973K の場合が約 1 万サイクルである。

3.2 解析方法 ロータのクリープ疲労寿命を評価するため、熱サイクル試験でロータに発生する非弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{in}$ を有限要素法(FEM)解析で評価した。まず、非定常伝熱解析でロータの温度分布を求め、次に、その温度分布を与えて弾塑性クリープ熱応力解析を行い、ロータに生じる $\Delta\varepsilon_{in}$ を評価した。なお、解析では熱サイクルを 3 回与え、最後の 2 サイクルの結果を寿命評価に用いた。

3.3 寿命評価方法 ロータのクリープ疲労寿命 N_f は FEM 解析で評価した $\Delta\varepsilon_{in}$ をひずみ範囲分割法¹⁾を用いて $\Delta\varepsilon_{ij}(i,j=p,c)$ 成分に分割し、それぞれの $\Delta\varepsilon_{ij}$ に対する寿命 N_{ij} から下式で評価した。

$$\Delta\varepsilon_{in} = \Delta\varepsilon_{pp} + \Delta\varepsilon_{cc} + (\Delta\varepsilon_{pc} \text{ or } \Delta\varepsilon_{cp}) = \sum(\Delta\varepsilon_{in}) \quad (1)$$

$$\frac{1}{N_f} = \frac{1}{N_{pp}} + \frac{1}{N_{cc}} + \left(\frac{1}{N_{pc}} \text{ or } \frac{1}{N_{cp}} \right) = \sum \left(\frac{1}{N_{ij}} \right) \quad (2)$$

寿命評価に用いるロータ材のクリープ疲労特性 ($\Delta\varepsilon_{ij}$ - $N_{ij}(i,j=p,c)$ 関係)は、直径 10mm, 標点間距離 25mm の丸棒試験片のクリープ疲労試験で求めた。Fig.2 にロータ材の $\Delta\varepsilon_{ij}$ - N_{ij} 関係を示す。

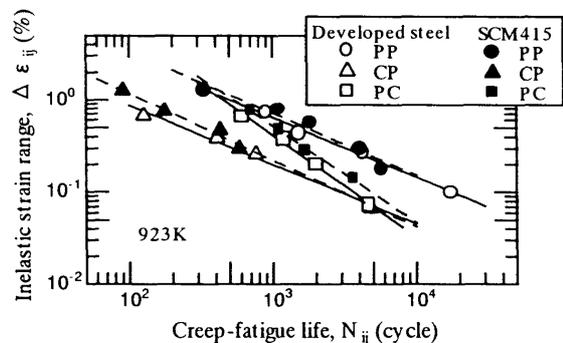


Fig.2 Creep-fatigue properties for the rotor steels

4 試験および寿命評価結果

4.1 試験結果 熱サイクル試験($T_{max}=953K$)におけるロータの内径変化量は約 3,000 サイクル後で、従来鋼のロータが 4.11mm, 開発鋼のロータが 0.03mm であった。ロータの内径が大きくなると、永久磁石との間隔が広がってロータに働く磁束密度が減少するため制動力が低下する。従って、従来鋼のロータは制動を繰り返すと徐々に制動力が低下するのに対し、開発鋼のロータは長期間使用しても制動力の低下が少なく耐久性に優れる。

試験後の開発鋼のロータには熱疲労き裂が観察された。その深さは $T_{max}=923K, 953K, 973K$ の条件でそれぞれ 1.30mm, 4.82mm, 1.12mm であった。また、従来鋼のロータ

は変形が大きいため、制動力が低下して発熱量が減少した結果、 T_{max} まで加熱することが不可能になったためき裂が発生する前に試験を中止した。

4.2 寿命評価結果 解析で評価したロータ表面の相当応力と相当非弾性ひずみのヒステリシスループの例を Fig.3 に示す。この図では相当応力、相当非弾性ひずみに、最大主応力と最大主ひずみ方向の応力、ひずみと同じ符号を付けた²⁾。解析結果をもとにひずみ範囲分割法を用いて評価したロータのクリープ疲労寿命 N_f と T_{max} の関係を Fig.4 に示す。開発鋼のロータの方が従来鋼のロータより N_f が長く、耐久性に優れる。

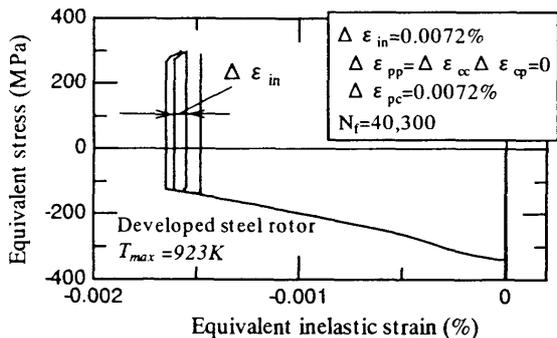


Fig.3 Hysteresis loop at the inner surface of the rotor

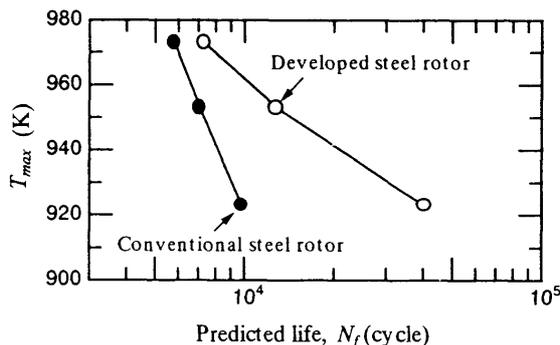


Fig.4 Relationship between T_{max} and creep-fatigue life, N_f predicted by using $\Delta\epsilon_{ij}$ - N_{ij} relationships

5 考察

Fig.2 に示したロータ材の N_{ij} は丸棒試験片のクリープ疲労寿命であるため、この値を用いて評価した Fig.4 の寿命 N_f は試験片の破損寿命に対応している。しかし、熱サイクル試験で実ロータに生じたき裂の深さは数 mm であり、試験片破損時のき裂より浅い。このため、Fig.4 の評価結果を実測値と比較するためには、き裂深さを考慮する必要がある。本報では時政、宮原が提案したひずみ範囲分割概念に基づく損傷則³⁾を用いて、熱サイクル試験で発生した深さまでき裂が進展する寿命 N_0 を予測した。この損傷則では $\Delta\epsilon_{in} = \sum \Delta\epsilon_{ij} (i,j=p,c)$ 下のき裂進展速度とき裂進展曲線は以下の式で求められる。

$$\frac{da}{dn} = \sum \left(\frac{da}{dn} \right)_{ij} = \sum \left(B_{ij}' \Delta\epsilon_{ij}^{1/m_{ij}} \right) a \quad (3)$$

$$\frac{\ln(a/a_0)_{\sum ij}}{\ln(a_c/a_0)_{\sum ij}} = \frac{n}{N_f} \quad (4)$$

ここで、 a はき裂半長、 a_0 は初期き裂半長、 a_c は N_f 時のき裂半長、 B_{ij}' 、 m_{ij} はクリープ疲労試験とクリープき裂進展試験から求まる材料定数である。

N_0 の評価手順を Fig.5 に示す。なお、評価に用いる初期き裂半長 a_0 は平均結晶粒径の半分(=0.01mm)とし、最終き裂半長 a_c は試験片直径の半分(=5mm)と仮定した。評価した N_0 を試験の繰返し数と比較して Fig.6 に示す。予測寿命 N_0 は、熱サイクル試験の繰返し数の factor of 2 の範囲内であり、ロータの寿命を精度良く予測できた。

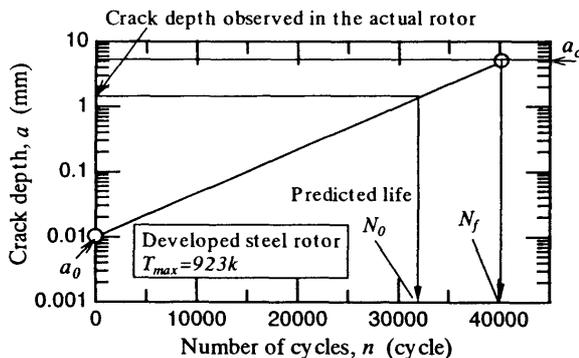


Fig.5 Procedure for the prediction of the life, N_0

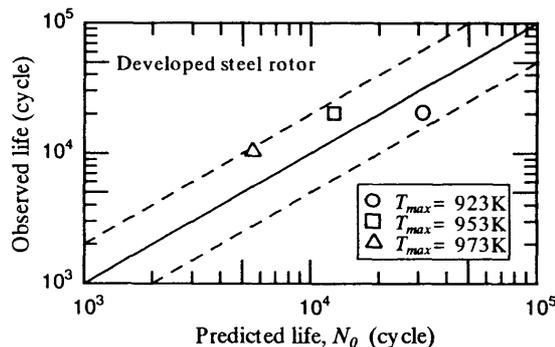


Fig.6 Comparison of predicted and observed lives of the developed steel rotor

6 結言

本報では、永久磁石式渦電流リターダのロータのクリープ疲労寿命を予測するため、FEM 解析結果とひずみ範囲分割法とその概念に基づく損傷則を用いた寿命評価モデルを構築した。このモデルで予測したロータの寿命は実体の熱サイクル試験の結果と良く一致した。また、開発した鋼からなるロータは従来鋼のロータより耐久性に優れ、更に制動力も高い。

参考文献

- 1) S.S.Manson, G.R.Halford, and M.H.Hirschberg, *Des. Elev. Temp. Env.*, (1971)
- 2) S.S.Manson and G.R.Halford, *Symp. Creep-Fatigue Int.*, 299(1976)
- 3) K.Tokimasa and M.Miyahara, *Int. J. Pre. Ves. & Piping*, 59, 107(1994)
- 4) M.Miyahara and K.Tokimasa, *Mat. Sci. Res. Int.*, 3, 49(1997)