

低応力高サイクル疲労破面の応力推定手法の開発

ストライエーション（縞模様）が形成されない疲労破面の応力推定への取り組み

Development of a Method for Estimating the Stress Experienced by Low-Stress High-Cycle Fatigue Fracture Surfaces

Efforts for Estimating the Stress Acted on Fatigue Fracture Surfaces on which No Striation (Stripe) is Formed

（電力技術研究所 材料技術G 材料T）

(Materials Technology Team, Materials Engineering Group, Electric Power Research and Development Center)

火力発電所等で使用されているポンプ等の回転軸はCr-Mo鋼等の硬い材料で製作されている。この回転軸に低応力の振動が長期間作用する「低応力高サイクル疲労」で破壊した場合、破面にストライエーションが形成されないため、応力を推定することができなかった。そこで、ストライエーションがない破面に作用した応力を推定する手法を開発した。

The rotating shafts of equipment such as pumps used in thermal power stations, etc., are produced from Cr-Mo steel or other hard materials. When those shafts are acted on by low-magnitude vibrational stress over a long period of time, and failed due to "low-stress high-cycle fatigue", no striations are formed on their fracture surfaces and so in the past, it was not possible to estimate the stress that had acted on them. Therefore, a method for estimating the stress acted on fracture surfaces with no striations has been developed.

1 背景・目的

電力設備に使用されている金属材料が破損するトラブルが発生した場合、破面を電子顕微鏡等で観察し、破損の原因を究明している。破損トラブルの大半は疲労破壊が原因であり、破壊時に作用した応力を測定できれば、設計応力との比較によりトラブルの再発防止対策が提案できるが、疲労破壊時に作用した応力を測定することは困難である。しかし、軟らかい材料の場合は、破面にストライエーションが観察されるため、既存の破壊力学により応力拡大係数範囲 ΔK （き裂の進展しやすさを示す数値）を求め、破面に作用した応力を推定している。

使用されているクロムモリブデン鋼（SCM440H）を採用した。実機では様々な応力が作用するため、応力比 R （＝最小応力／最大応力）が6種類の疲労破面を製作した。

なお、破面は、応力拡大係数範囲 ΔK が漸減するように荷重を変化させて製作した。この破面を電子顕微鏡で詳細に観察し、 ΔK が異なる位置（5箇所）を選定して、破面の表面粗さ【粗さ法】を測定した。その後、深さ方向の硬さを測定するため、試験片を中央部で切断し、深さ方向の硬さ【硬さ法】を測定した。

火力発電所等には高速で回転するポンプが多数あり、その軸はクロムモリブデン鋼という硬い材料で製作されている。回転軸は、低応力の振動が長期間作用して「低応力高サイクル疲労」により破壊することがあるが、この場合、ストライエーションが形成されないため、破面に作用した応力を推定できない。

(2) 試験片の表面粗さ測定【粗さ法】

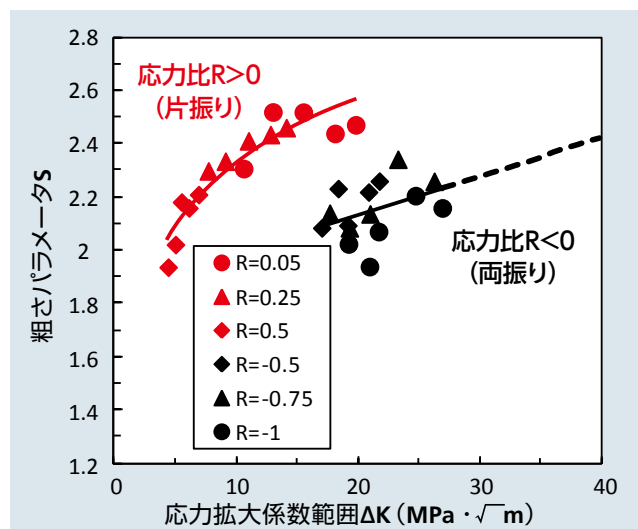
選定した応力拡大係数範囲 ΔK それぞれにおいて、試験片の破面の粗さを高精度レーザー顕微鏡で測定し、レインフロー法（粗さ計測結果を破面の凹凸の高さごとに分類し、その数をカウントしたもの）による解析結果を基に粗さパラメータ S を算出し、 ΔK との関係を求めた。その後、 S と相関のある ΔK との応力推定マスターカーブを作成した。第1図に作成した粗さ法による応力推定マスターカーブを示す。

そこで、ストライエーションが形成されない破面に作用した応力を推定する手法を文献調査*したところ、破面の凹凸の変化幅の頻度分布（粗さパラメータ）を求める方法（粗さ法）および破面近傍の硬さが変化した領域（塑性域寸法）を測定する方法（硬さ法）により、ストライエーションが観察されなくても、応力拡大係数範囲 ΔK が推定できる可能性を見出したため、両手法により破面に作用した応力をクロムモリブデン鋼で推定した。

2 疲労き裂進展試験

(1) 既知応力の破面製作

最初に、単純な引張・圧縮（両振り応力）および引張のみ（片振り応力）で荷重を制御しながら疲労き裂進展試験を行い、低応力高サイクル疲労破面を製作した。試験片の材料には、高速で回転するポンプの軸に一般的に

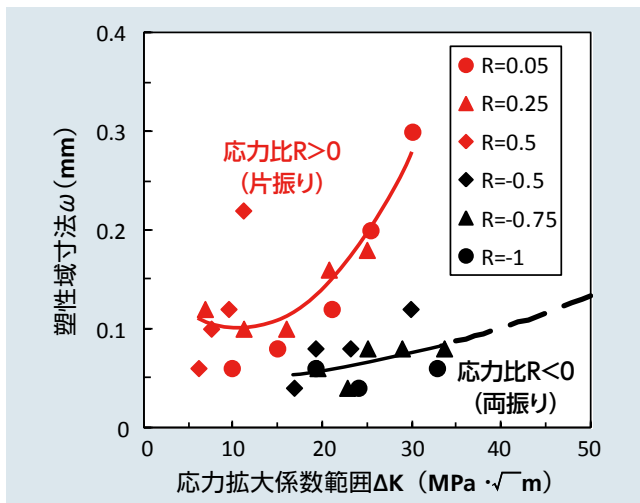


第1図 粗さ法の応力推定マスターカーブ

粗さパラメータ S が大きくなるにつれて ΔK が大きくなる傾向となった。また、同じ ΔK では応力比 $R < 0$ (両振り)と比較して、応力比 $R > 0$ (片振り)の粗さパラメータ S が大きくなっていった。

(3) 試験片の硬さ測定【硬さ法】

粗さ法と同様に選定した応力拡大係数範囲 ΔK において、深さ方向の硬さをマイクロピッカース硬さ試験機で測定し、硬さが変化した測定深さ〔軟化した領域の寸法(塑性域寸法 ω)〕を算出した。その後、塑性域寸法 ω と関連のある ΔK との応力推定マスターカーブを作成した。第2図に作成した硬さ法の応力推定マスターカーブを示す。



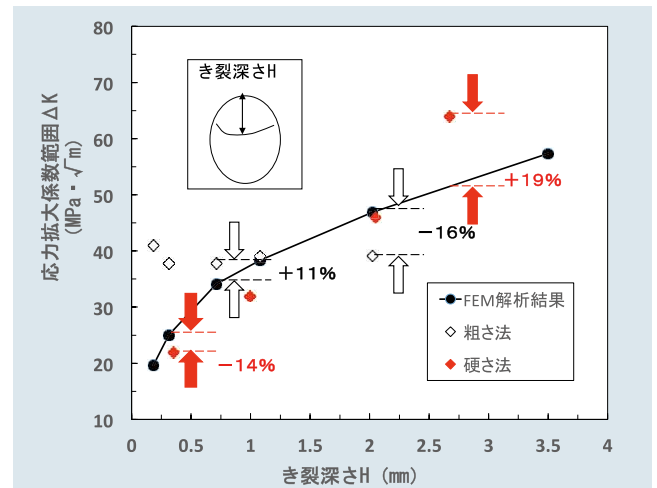
第2図 硬さ法の応力推定マスターカーブ

塑性域寸法 ω が大きくなるにつれて、 ΔK が大きくなる傾向となった。また、同じ ΔK では、応力比 $R < 0$ (両振り)と比較して、応力比 $R > 0$ (片振り)の塑性域寸法 ω が大きくなっていった。

3 曲げ疲労試験片での 応力推定マスターカーブ検証

粗さ法および硬さ法の応力推定マスターカーブを実機に適用するためには、応力推定精度を検証する必要がある。実機で使用される回転軸等には曲げ疲労が作用している場合が多いことから、その曲げ疲労を再現した試験を行い、疲労破面の試験片(応力: 550MPa)を製作した。この曲げ疲労試験片の破面について、破面の表面粗さおよび破断面近傍の硬さを測定し、粗さパラメータ S および塑性域寸法 ω を求め、第1図および第2図に示す応力推定マスターカーブを用いて、応力拡大係数範囲 ΔK を算出した。応力推定結果の信ぴょう性を確認するために、有限要素法FEMによる応力解析で求めた応力拡大係数範囲 ΔK と比較した(第3図)。

硬さ法では、FEM解析で求めた応力拡大係数範囲 ΔK と比較して、 $-14 \sim +19\%$ の範囲で破面に作用した応力を推定できることを確認した。一方、粗さ法では、き裂



第3図 ΔK 推定値とFEM解析結果との比較

長さ0.5mm以下のき裂発生初期の領域を除き、 $-16 \sim +11\%$ の範囲で応力を推定でき、既存のストライエーション間隔測定による応力推定精度と同程度(既知応力に対して $\pm 20\%$ 程度)であることが確認できた。

これまで粗さ法と硬さ法に関して論じてきたが、その使い分け方について検討した。

粗さ法はレーザー顕微鏡で簡単に計測できること、第1図に示すように片振りと両振りの区別がしやすいことから、トラブルの直後に応力推定値のオーダーを求める場合に有効である。しかし、破面が変化・消失した場合(破面が腐食等で変化した場合など)は測定不能となる。

一方、硬さ法は材料の切断検査を伴うため時間を要するが、破面が腐食等で変化した場合でも有効な手法であり、特に破面が片振りであることが明らかな場合は、第2図に示すように塑性域寸法 ω が幅広くとれるため、高精度な応力推定が可能である。

今回開発した手法にはそれぞれに特徴があり、即応性が必要な場合や応力の区別が必要な場合は粗さ法を用い、破面が消失した場合や詳細な応力推定が必要な場合は、硬さ法で応力を推定していく。

4 まとめと今後の展開

ストライエーションが観察されない疲労破面(低応力高サイクル疲労破面)においても、破面の表面粗さおよび破断面近傍の硬さを測定することで、疲労破面に作用した応力を推定できることが判明し、実用可能な応力推定手法が開発できた。

電力設備において低応力高サイクル疲労破壊のトラブルが発生した場合、今回作成した応力推定マスターカーブを活用して作用応力を推定し、トラブルの再発防止対策を提案していく。

※参考文献：藤原ら：材料Vol.40, No.453, (1991)等



執筆者／藤田明吾