

回転曲げ疲労に影響する発熱温度の検討

田 知 清 夫*・丁 洪 生**

Research on Effect of Calorific Temperature on the Fatigue Strength by Rotary Bending

Kiyoo TACHI・Hongsheng DING

On a shaft by rotary bending, the calorific phenomena is observed by factors of rotary speed and loading, and so on. As a result, the phenomena of thermal cycle by rotary is considered to be the cause of the crack, which is effect on fatigue strength. From the point of view, this study research on the relation among the calorific temperature, the fatigue strength, and the number of cycles on the fatigue phenomena by mathematical model.

1. 緒言

一般に材料の強さはエネルギーの総量だけで論ずることはできない。一回の衝撃的なエネルギーによって破壊するような材料であっても、ある大きさ以下の荷重のもとでは相当長時間にわたって作用を受けても破壊に至ることがない場合がある。

繰返し荷重によって材料が破壊する現象などはことに複雑である。この場合の疲労強度は、材料の引張強さとほぼ比例関係にあるとはいいながら、かなりのばらつきがあることが、その複雑さをものがたっている。

金属材料は、一般に微視的には均質ではなく、また、材料内部に不均一に応力が分布している。これが疲労強度に複雑な影響を与えている重要な原因の一つである。その他、疲労強度に影響を及ぼす要因としては、寸法効果や切欠効果、あるいは表面性状などがあり、これらが複合的に作用するものと考えられる。

著者らの一人はこれまでに、回転曲げ荷重の作用する場合について、その状態を強制振動として取り扱い、疲労強度に及ぼす寸法効果の原因を、振動論の立場で、材料内部のすべり抵抗や固有角振動数などから検討を加えてきた⁽¹⁾。

一般に回転曲げ荷重を受ける回転軸は、荷重や繰返し速度などの影響を受けて、材料の内部に滑り現象が生ずるが、その結果、材料自体による発熱現象が見られる⁽²⁾⁽³⁾。この回転による熱

* 機械工学科 ** 北京理工大学

サイクル的現象により、熱疲労の現象を起こし、これがき裂を誘発する一因と考えられることから一つの考察を試みた。

本報では、回転曲げにおける熱サイクル的現象の発生により、種々の応力振幅値に対応して、き裂を誘発する発熱温度及び疲労強度と応力繰返し数（以下、回転数という）の関係を数学的モデルから検討を加えた。

2. 発熱温度の解析

2. 1 時間強度に対応する発熱温度の解析

回転曲げ疲労現象において、回転軸にき裂を誘発する発熱温度 T は回転数 N の関数として、次式で表されるものとする。

$$T \propto f(N) \quad \dots\dots\dots (1)$$

いま、比例定数を k として上式を改めて次式で表す。

$$T = k \cdot f(N) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(i) $k = 1$ の場合：

式(2)において $k = 1$ の場合について検討する。すなわち

$$T = f(N) \quad \dots\dots\dots (3)$$

とする。いま、

回転数 $N \rightarrow$ 小（つまり、応力振幅 $\sigma \rightarrow$ 大）のときは、き裂を誘発する発熱温度 $T \rightarrow$ 高、

回転数 $N \rightarrow$ 大（つまり、応力振幅 $\sigma \rightarrow$ 小）のときは、き裂を誘発する発熱温度 $T \rightarrow$ 低

の傾向があるとすれば、

$$(dT/dN) < 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

と考えられる。そこで、この減少関数を

$$(dT/dN) = -h \cdot T \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表されると仮定する。ここで、 h は回転数 N の適当な範囲で一定と見なして、温度疲労係数と称することとする。

回転曲げにおける応力繰返し現象では、回転速度や荷重のかけ方により異なるが、ある繰返し数 N に達すると疲労強度がほぼ一定値の疲労限度 σ_F に近づくことは周知のとおりである。

いま、回転曲げにおける疲労破壊が、最大応力部に生ずる発熱現象の結果、熱サイクル疲労により誘発されるき裂の発生に起因するものと考え、時間強度はき裂の発生の条件を満たす発熱温度に達したときの応力振幅 σ であると推測される。

つまり、熱サイクル的現象により、き裂の生ずる発熱温度に、材質によりある一定の温度が存在するとすれば、応力振幅 σ が大きいほど、材料の内部摩擦による発熱温度が大となり、その発熱温度上昇の結果、回転数 N の小さい段階で破壊に至る。

また、逆に応力振幅 σ が小さいほど、発熱温度上昇も低く、疲労破壊に至る時間、つまり回転数 N も大となるものと考えられる。

いま、ここで改めて時間強度 σ に対応する回転軸発熱温度を、時間限界温度 T とするならば、 T に達する時間の長短は時間強度 σ によって決まるものと考えられる。

一般に、炭素鋼の温度特性は、弾性係数、弾性限度並びに、降伏点などは温度の上昇につれて減少するが、引張強さは、200 ～ 300 ℃ 位までは、温度上昇につれて増大し、その後、急激に低下する傾向がある⁽⁴⁾。

そこで、疲労限度における回転曲げ材の温度上昇の限度は、200 ～ 300 ℃ 以下と仮定し、この温度の限度を、疲労限度 σ_F に対応して疲労限界温度 T_F と呼ぶこととする。

以上のことから、式(5)は、疲労限界温度 T_F を考慮して、次式で表されるものとする。

$$(dT/dN) = -h \cdot (T - T_F) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\therefore h \cdot dN = -dT / (T - T_F) \quad \dots\dots\dots (7)$$

これを積分して

$$h \cdot \int dN = - \int dT / (T - T_F) + C$$

$$h \cdot N = -\ln (T - T_F) + C \quad \dots\dots\dots (8)$$

いま、初期条件として、回転数 $N \rightarrow 0$ （このとき、時間強度 $\sigma \rightarrow$ 引張強さ σ_t とする）のとき、時間限界温度 $T \rightarrow$ 引張強さ限界温度 T_t （回転軸上の最大応力の発生点において、き裂が生ずる発熱温度のことで、この材料の引張強さ σ_t に対応する限界温度と仮定して、これを引張強さ限界温度 T_t と呼ぶ）とすれば、積分定数 C は

$$C = \ln (T_t - T_F) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。したがって、式(8)と式(9)から

$$h \cdot N = -\ln (T - T_F) + \ln (T_t - T_F)$$

$$-h \cdot N = \ln [(T - T_F) / (T_t - T_F)]$$

$$e^{-h \cdot N} = (T - T_F) / (T_t - T_F)$$

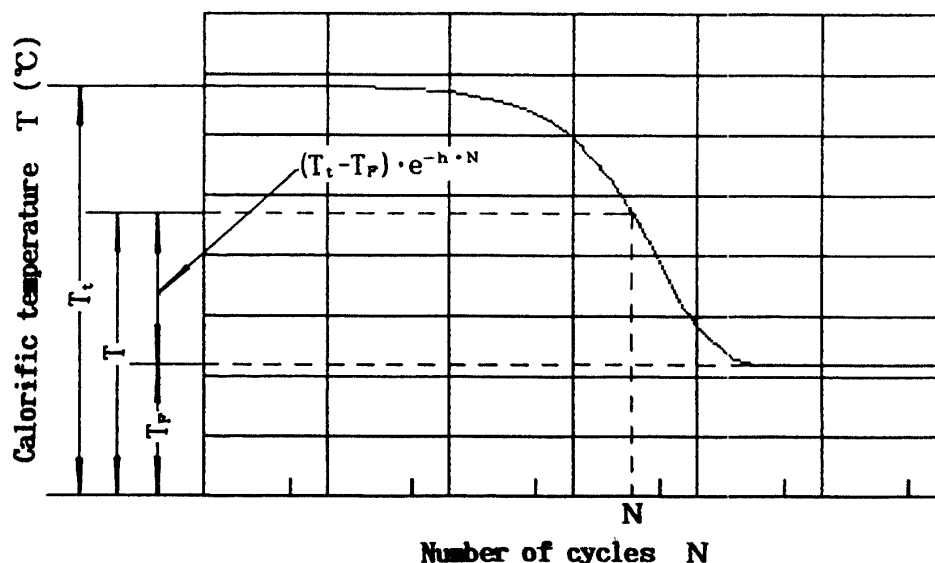


Fig.1 Fatigue Life a Function

$$\therefore T = (T_t - T_F) \cdot e^{-h \cdot N} + T_F \quad \dots\dots\dots (10)$$

Fig.1 は式(10)から求めたT-N曲線の模式図である。ただし、繰返し数Nを表す横軸は対数目盛である。

(ii) $k = a \cdot \sigma$ の場合：

この場合、式(2)におけるkの値を

$$k = a \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (11)$$

とおく。ここでaは任意の係数（修正係数とする）である。また、 σ は次式で表されるものとする⁽⁵⁾。

$$\sigma = (\sigma_t - \sigma_F) \cdot e^{-b \cdot N} + \sigma_F \quad \dots\dots\dots (12)$$

したがって、式(10)、(11)、(12)から

$$T = a \cdot [(\sigma_t - \sigma_F) \cdot e^{-b \cdot N} + \sigma_F] \cdot [(T_t - T_F) \cdot e^{-h \cdot N} + T_F] \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。ここでbは疲労係数である。

式(13)は、回転軸の発熱の結果として、き裂の発生によって生ずる回転軸の破断に至る時間強度 σ と回転数N及びそれに対応する時間限界温度Tとの関係を表すものと考えられる。

2. 2 過渡状態の発熱温度の解析

時間強度 σ と応力繰返し数Nとに対応する時間限界温度Tに達する過渡状態の発熱温度 T' は、まず、 $N=0$ の時回転軸の温度が室温 T_s に等しいと考えて、 $T_t = T_s$ とし、式(13)に準じて式(14)で表されるものとする。

$$T' = a \cdot \sigma^* \cdot [(T_s - T^*) \cdot e^{-c \cdot N} + T^*] \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 T^* 及び σ^* は式(10)及び式(12)に準じて、式(15)及び式(16)で表す。

$$T^* = (T_t - T_F) \cdot e^{-h \cdot N^*} + T_F \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\sigma^* = (\sigma_t - \sigma_F) \cdot e^{-b \cdot N^*} + \sigma_F \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし、

T_s ：室温（20℃）

T^* ：任意の荷重のもとでき裂を誘発するときの発熱限界温度

c：温度係数

σ^* ：任意の応力振幅

N^* ： σ^* に対応する回転数

である。

3. 計算結果とその検討

計算例としてS45Cにつき、式(13)～(16)を用いて、回転軸の発熱温度を計算した。ここで、引張強さ $\sigma_t = 655\text{MPa}$ 、疲労限度 $\sigma_F = 285\text{MPa}$ ⁽⁶⁾、修正係数 $a = 0.003$ 、疲労係数 $b = 2 \times 10^{-5}$ 、温度

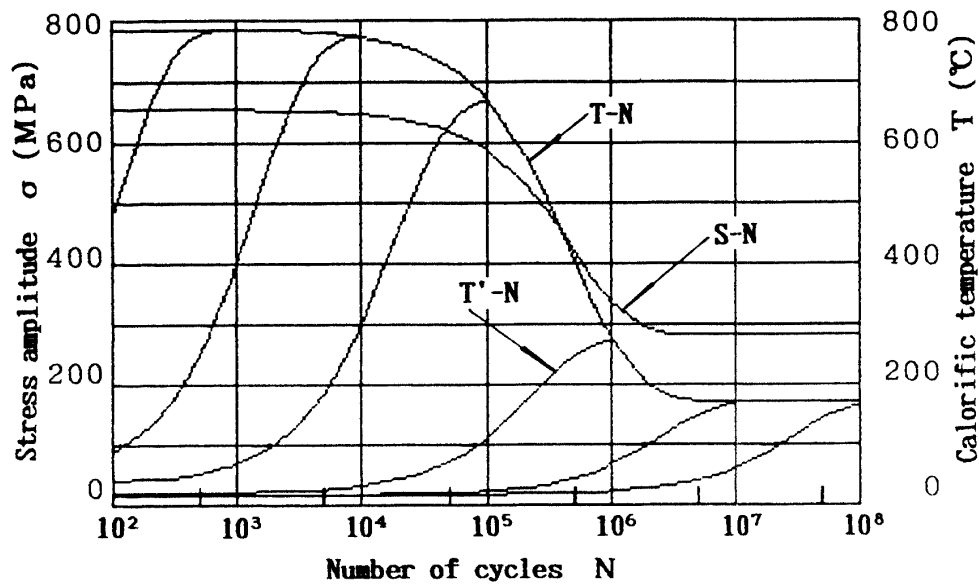


Fig. 2 S-N Curve and T-N Curve (S45C)

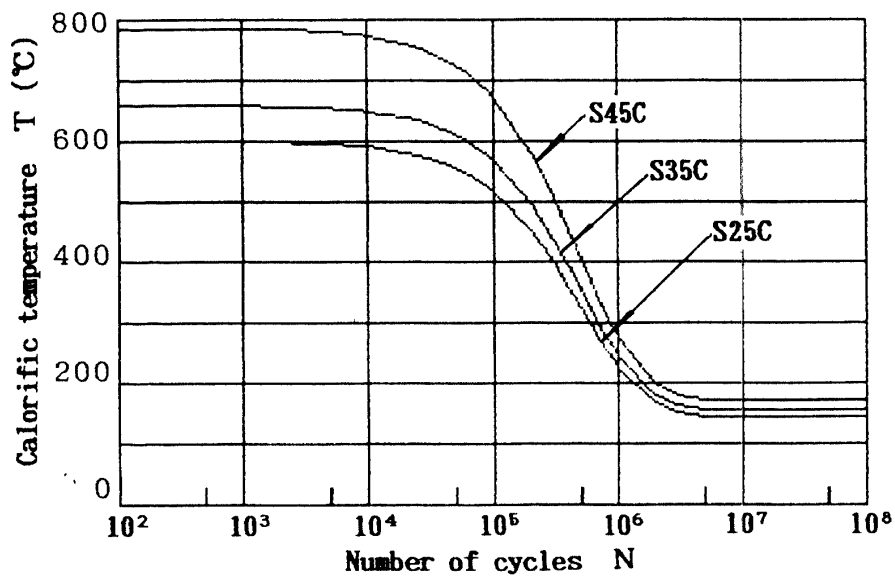


Fig. 3 T-N Curve

係数 $c = 5$, 温度疲労係数 $h = 10^{-5}$ とした. また, 室温 $T_s = 20^\circ\text{C}$, 疲労限界温度 $T_F = 200^\circ\text{C}$, 引張強さ限界温度 $T_t = 400^\circ\text{C}$ とする⁽⁴⁾.

Fig. 2 は, $S (= \sigma) - N$ 及び $T - N$ の関係を表す. 図は,

回転数 $N \rightarrow$ 小のとき, 時間強度 $\sigma \rightarrow$ 大, かつ時間限界温度 $T \rightarrow$ 高,

回転数 $N \rightarrow$ 大のとき, 時間強度 $\sigma \rightarrow$ 小, かつ時間限界温度 $T \rightarrow$ 低

となる傾向を示している. 定性的には, $T - N$ 曲線は, $S - N$ 曲線と同じ傾向を示すと考えられる.

Fig. 3 は S45C, S35C 及び S25C の計算結果を比較した $T - N$ 曲線である.

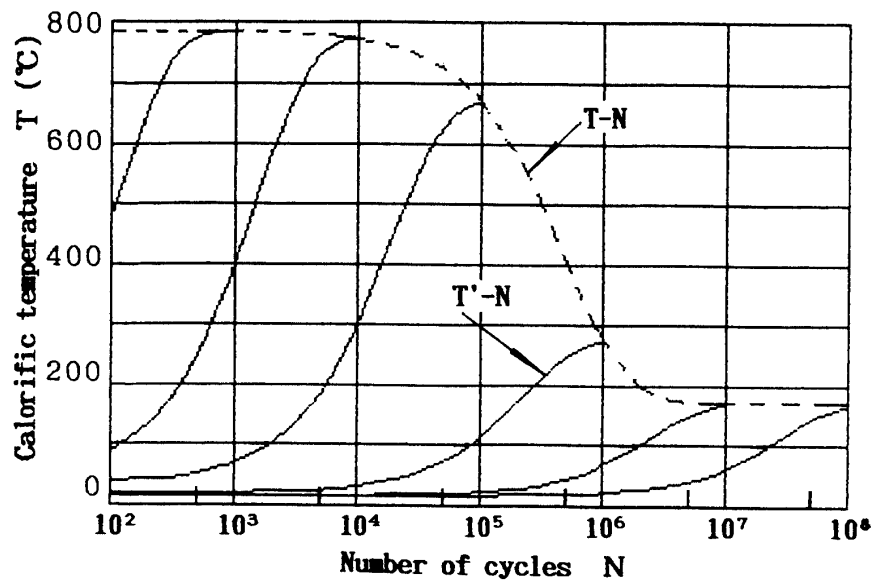


Fig.4 T'-N Curve(S45C)

Fig.4は、応力振幅 σ' と回転数 N' をパラメータとしたときの発熱温度 T' の変化を示したものである⁽⁷⁾。図から見て、

- (1) 応力振幅 σ' における T' の変化の傾向を表すものと考えられる。
- (2) 応力振幅 σ' 大きいほど、発熱温度 T' の上昇傾向も強く表れている。

4. 結言

本研究の結果を要約すると次のとおりである。

- (1) T-N曲線は、定性的にはS-N曲線と同じ傾向を示すと考えられる。
- (2) 回転曲げにおける温度上昇で、低繰返し数の領域では、過渡状態の解析をさらに厳密にする必要がある。

文献

- (1) 田知, 金属の疲労強度に関する一考察, 福井工大紀要, Vol.23(1993), 115
- (2) 堀川・ほか3名, 疲労寿命予測法の研究, 機講論, No.940-30(1994), 247.
- (3) 田知・奥村, 回転曲げ疲労過程における発熱機構, 機講論, No.95-10(1995), 268.
- (4) 日本金属学会, 金属便覧, (1982), 500, 丸善株式会社.
- (5) 田知・ほか2名, 回転曲げにおける疲労強度の応力解析, 機講論, No.95-1(1995), 336.
- (6) 日本機械学会, 金属材料疲労強度の設計資料(I), (1988), 34, 日本機械学会.
- (7) 田知・丁, 回転曲げ疲労強度に及ぼす回転軸温度の検討, 機講論, No.96-1(1996), 358.

(平成8年10月3日受理)