超音波疲労試験による強度評価 (低速負荷状態への適用性と高速負荷状態での疲労特性について)

Evaluation of Fatigue Strength by Ultrasonic Fatigue Testing.

(Application to Fatigue Strength under Low Frequency Loading, and Fatigue Properties under High Frequency Loading.)

○ 学 松尾彰敏 (名城大院) 正 江上 登 (名城大)
正 来海博央 (名城大) 若尾純平 (名城大院)

Akitoshi MATSUO, Graduate School Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

Noboru EGAMI, Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

Hirohisa KIMACHI, Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

Junpei WAKAO, Graduate School Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

1. 緒論

近年、機械構造物は高速で使用されており、高速状態での強度信頼性の確保が必須となっている。一方で構造部材の長期使用も求められており、超長寿命領域での強度確保も必須となっている。これらの疲労特性の評価法として高速疲労試験機の利用が検討され、試験法ならびに評価法が議論されている。中でも超音波疲労試験機は近年よく用いられ始めており、共振を利用した高速疲労試験機である。超音波疲労試験機は高速疲労の模擬としての利用、低速疲労への適用について検討されている。

そこで本研究はき裂進展、 $S-N$ 試験を行い、低速疲労試験 (20Hz) データとの比較を行った。そして以下の2点について検討を行った。

- ①超音波疲労試験法の低速負荷状態への適用性
- ②高速負荷状態での疲労特性

2. 試験方法

2.1 供試材及び試験片形状

供試材料として S45C を用いた。き裂進展試験片に真空焼鈍し (Material A) を施し、 $S-N$ 試験片に4パターンの熱処理 (Material A,B,C,D) を施し試験を行った。それぞれの熱処理条件ならびに機械的特性を Table 1 と Table 2 に示す。また Fig. 1 にき裂進展試験片形状、Fig. 2 に $S-N$ 試験片形状を示す。き裂進展試験片は円孔縁に予き裂を入れた。試験片形状は波動方程式から求める共振寸法を参考に実地試験により最適試験片寸法を決定した。

Table 1. Heat treatment of S35C and S45C.

Material	Heat treatment	
A	Vacuum annealed (845℃, 1hr, furnace cooled)	
B	Normalized	Tempered (600℃, 1hr, water cooled)
C	(845℃, 1hr, air cooled)	Tempered (500℃, 1hr, water cooled)
D	Quenched	Tempered (400℃, 1hr, water cooled)
	(845℃, 1hr, water cooled)	

Table 2. Mechanical properties of S35C and S45C.

	Young's modulus E GPa	Poisson's ratio ν	Yield strength σ_y MPa	Fracture stress σ_f MPa	Vickers Hardness HV
A	210	0.278	398	493	167
B	209	0.332	698	534	242
C	215	0.303	921	697	283
D	200	0.295	1196	871	414

両材とも試験片形状に機械加工後それぞれの熱処理を行い、その後エメリー紙による研磨、バフ研磨、電解研磨により鏡面仕上げを施した。

2.2 試験条件

超音波疲労試験は島津製作所超音波疲労試験装置 (USF-2000) を用いて室温大気中、応力比 $R = -1$ 、稼働周波数 20kHz の正弦波で行った。しかし超音波疲労試験機は高周波数で稼働するため共振点で発熱が確認された。そこで温度上昇を考慮して、間欠運転と圧縮空気による強制冷却を行った。間欠運転は実行期間 $t_o = 110\text{msec}$ 、停止期間 $t_p = 500\text{msec}$ で行った。この状態での正味周波数は $f_{net} = 3.6\text{kHz}$ である。なお試験に際して、き裂が試験片幅の半分まで進展すると共振状態は崩れ、共振周波数が 500Hz 変化した時点でき裂が十分に進展したとして試験終了とした。

3. 試験結果

3.1 疲労き裂進展

Fig. 3 に超音波疲労試験 (20kHz) と低速疲労試験 (20Hz) のき裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を示す。超音波疲労試験結果は多少ばらつきはあるものの低速疲労試験結果とほぼ一致しているといえる。この結果より、超音波疲労試験によるき裂進展は低速負荷状態への適用が可能であるといえる。

Fig. 1. Specimen of ultrasonic fatigue crack propagation test.

Fig. 2. Specimen of ultrasonic fatigue $S-N$ test.

3.2 S-N 試験

Material A, B の S-N 曲線を Fig. 4 に, Material C, D の S-N 曲線を Fig. 5 に示した. 図中には回転曲げ疲労試験文献値 (1), (2), (3) も付記した. Fig. 4 の $\bullet$ はき裂発生, 破断は確認されず, 共振状態が崩れた点を示している. 共振が崩れた点は従来の疲労試験結果と異なる疲労現象を示し, 文献値とも異なっている. 疲労限度は Material A が 304MPa, Material B が 486MPa である.

Fig. 5 の $\bullet$ Δ は破断した点を示しており, 従来の疲労試験結果と同様な疲労現象を示し, 文献値とも一致している. 疲労限度は Material C が 384MPa, Material D が 591MPa となっており, 文献値とほぼ一致している.

以上のことから超音波疲労試験では低強度材料と高強度材料では疲労現象が大きく異なることがわかる.

3.3 間欠運転の影響

間欠運転の影響について Material C, Material D を用いて検討を行った. Fig. 5 の $\bullet$ Δ で示す. $\bullet$ は停止期間 $t_p=500\text{msec}$, Δ は $t_p=2000\text{msec}$ となっており, 実行期間は両材とも $t_e=110\text{msec}$ となっている. 全ての点において停止期間の違いによる疲労現象の顕著な相違は認められなかった. また低速疲労試験結果と比較しても, 間欠運転が超音波疲労試験に与える影響はほとんどないものと考えられる.

3.4 表面観察

き裂が入らなかった Material A 試験片の試験後 (475MPa, 8.77×10^3 cycle) 表面の SEM 写真を Fig. 6 に示す. 試験片表面には微小損傷が確認された. Material B も同様に微小損傷が確認された.

4. まとめ

Fig. 4, 5 から明らかなように両者の疲労現象は大きく異なる. 疲労現象の異なりから低速疲労試験へ適用可能な遷移領域が存在することが推測される. 現在, 超音波疲労試験の遷移領域について降伏応力の違いが指摘されている. しかしながら, 本研究結果から降伏応力の低い材料にも試

験後表面に微小損傷が観察されることから, 本研究では適用の判別のパラメータとして, 弾性から塑性域までを網羅できる硬さに注目した. その結果, 遷移領域は $HV240 \sim 280$ となった. 以上のことより低速疲労試験への適用は硬さにより判別が可能となるものと考えられる.

5. 参考文献 省略

Fig. 4. S-N curves. (Material A and B)

Fig. 5. S-N curves. (Material C and D)

Fig. 3. Relation between crack propagation rate and stress intensity factor range.

Material A: 475MPa, 8.77×10^3 cycles

Fig. 6. Surface of test specimen after experiment.