

1. 緒言

近年、 10^7 回を越える寿命域での破壊、いわゆる超長寿命疲労破壊が注目されている。疲労強度の高い高強度材や表面硬化材において、内在欠陥を起点とする破壊形態が顕在化することにより起こる二段折れ曲がり現象が報告されており¹⁾²⁾、これらの現象に関する議論が活発になされている。しかし、これまでの研究報告は内在欠陥や、それともなう二段折れ曲がりの現象のメカニズムに関するものが大半であり、一般的な用途に用いられる材料や、切欠きを有する材料に関する議論は未だなされていないのが現状である。そこで本研究では、実機で使用されている引張強度1000MPa程度の低合金鋼(SCM435およびSCM440)を対象として、平滑材および3種類の切欠き材について超音波疲労試験機による超高サイクル疲労試験を行い、 10^7 回を越える超長寿命域での疲労特性についての検討を行った。

2. 実験方法

2・1 供試材

供試材は、回転機械の軸などに広く使われているSCM435およびSCM440とした。熱処理温度は実機での使用を考慮し、 $500\sim 650^\circ\text{C}$ とした。供試材の化学成分を表1に示す。

2・2 実験方法

本実験は超音波疲労試験機(加振周波数20kHz)により行った。本実験では20kHzという高速振動を与えるために、試験片の温度が上昇する。これを防ぐために、圧縮空気を試験片加振部の4方向から吹き付けて冷却している。試験片に疲労亀裂が生じることにより固有振動数が変化することから、この現象を利用して共振周波数が500Hz変化した時点で亀裂が十分進展したものと判断して、試験を終了した。

本実験に用いた試験片形状を図1に示す³⁾。切欠き試験片においては、切欠き底曲率半径 $r=1.0\text{mm}$ ($\alpha=2.33$)、 0.5mm ($\alpha=2.98$)、 0.25mm ($\alpha=3.87$)の3種類のものを用意した。

また、超音波疲労試験は他の試験法に比べて、ひずみ速度などの影響から疲労強度が高めに出る傾向がある。そこで、試験法の違いによる疲労強度の比較のためにSCM440の平滑材による回転曲げ試験を行った。試験片形状を図2に示す。試験には4連式片持ち回転曲げ疲労試験機(3120rpm)を用いた。

3. 実験結果および考察

SCM440平滑材の超音波疲労試験の結果と回転曲げ試験の結果を図3に示す。今回の結果では 10^6 以下の領域に差が見られない。これには、回転曲げ試験の寸法効果の影響が考えられる。回転曲げ試験は試験片内部に応力勾配があるために、試験部直径が小さいほど疲労強度が上昇する⁴⁾。今回の回転曲げ試験は最細部直

Table 1 Chemical composition of materials. (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SCM435	0.3	0.2	0.7	0.019	0.009	0.2	0.1	1	0.2
SCM440	0.4	0.2	0.8	0.015	0.016	0.2	0.2	1.1	0.2

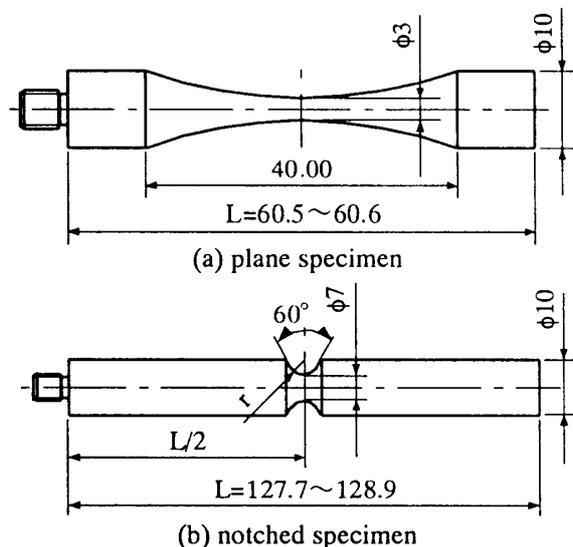


Fig.1 Shape of ultrasonic fatigue test specimens

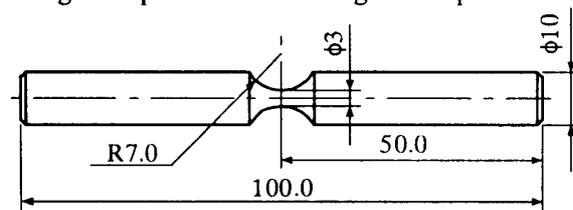


Fig.2 Shape of rotating bending fatigue test specimen.

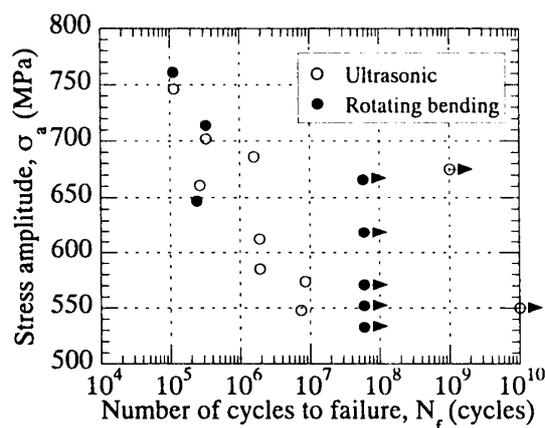


Fig.3 S-N diagrams of SCM440 by ultrasonic fatigue test and rotating bending fatigue test.

径が3mmと小さいために、寸法効果の影響を大きく受けたことが超音波疲労試験と回転曲げ試験の差をなくした原因と考えられる。

図4に、SCM440の超音波疲労試験によるS-N曲線を示す。縦軸は試験片最小断面部の公称応力値を表す。○は平滑試験片、□は $\alpha=2.33$ の試験片、◇は $\alpha=2.98$ の

試験片, Δ は $\alpha=3.87$ の試験片である. 従来の疲労試験により得られる結果と同様に, 応力集中係数が大きいほど疲労強度が低くなっている. また, 10^6 回までの繰返し数では明確な二段折れ曲がりの挙動は観察されていないが, 繰返し数 10^7 回を越える領域での疲労破壊が確認された. 10^7 以上の領域で破壊した切欠き材の破面写真を図5に示す. 繰返し数 10^7 回を越えた領域での破壊においても, 切欠き材の破壊は表面から進展しており, 内部欠陥による現象は確認できなかった. この破壊形態は他の 10^7 回を越えた繰返し数で破壊した試験片でも同様である. 従来, 切欠き試験片による疲労試験では, 表面に亀裂が発生しても, ある程度亀裂が進展したら応力集中部の影響からはずれるために, 亀裂が停留する領域がある. このため, 亀裂発生限界応力と亀裂進展限界応力は疲労限度より低い値となる⁹⁾. ただ, これらの現象は 10^7 回以下の領域で確認されていることであり, 今回, 10^7 回以上の領域で表面破壊が観察されたことから, これまで繰返し数 10^7 回では亀裂停留と考えられていた亀裂が, 実際は非常にゆっくりと進展しており, やがて $10^8 \sim 10^9$ 回の繰返し数で破断に至ったと考えられる.

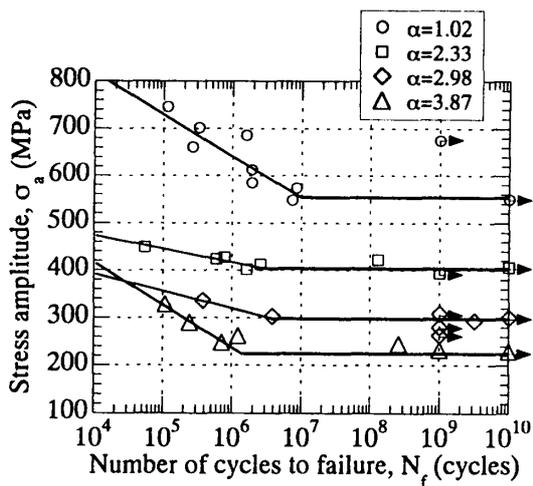


Fig.4 S-N diagrams of SCM440 by ultrasonic fatigue test.

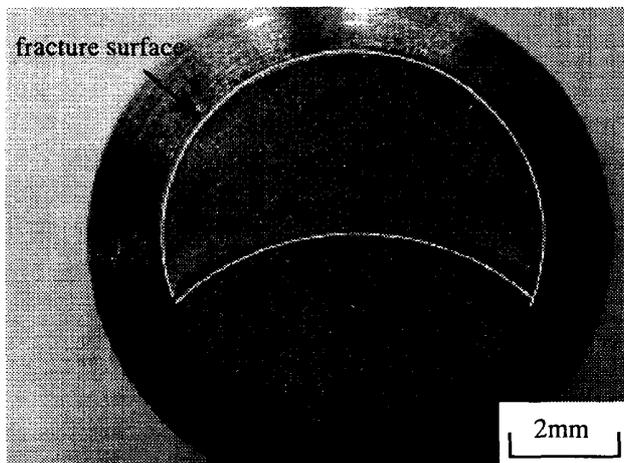


Fig.5 Fracture surface of SCM440.
($r=0.5\text{mm}$, $\sigma_a=293\text{MPa}$, $N_f=3.19 \times 10^9$)

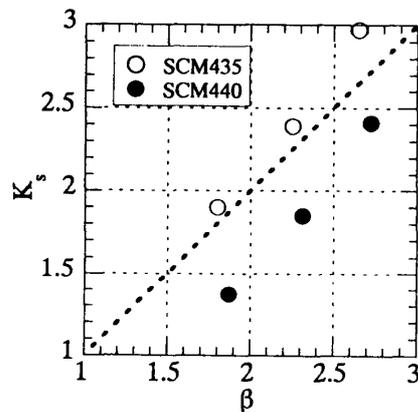


Fig.6 Relationships between β and K_s .

図6に, 文献(4)に示される図表から求めた切欠き係数 β と, 本実験結果より得られた疲労強度減少係数 K_s とを比較したものを示す. K_s は次式により表される.

$$K_s = \frac{\sigma_{w0}}{\sigma_{wk}} \quad \dots(1)$$

σ_{w0} : 平滑材の疲労限度 σ_{wk} : 切欠き材の疲労限度
図中の点線が $\beta=K_s$ であり, これより下にあると切欠き係数より疲労強度減少係数の方が小さい, 超音波疲労試験での試験結果は, 疲労強度減少係数と切欠き係数がほぼ同じか, もしくは疲労強度減少係数の方が切欠き係数より低かった. これより, 超高サイクルの疲労においても, 従来の切欠き係数による疲労強度評価法が十分に適用可能であると考えられることができる.

4. 結言

一般的な用途に広く使われている低合金鋼 SCM435 および SCM440 を対象として, 平滑材および3種類の切欠き材について繰返し数 10^7 回を越える超高サイクル疲労試験を行った. 得られた知見を以下に記す.

- (1) SCM435, SCM440について, 明確な二段折れ曲がりの挙動は見られなかった.
- (2) 切欠き材において, 繰返し数 10^7 回を越える領域でも表面亀裂による疲労破壊が起こることが確認された.
- (3) 切欠き係数と疲労強度減少係数の比較により, 超高サイクルの疲労においても, 従来の切欠き係数による疲労強度評価法が十分に適用可能であることがわかった.

参考文献

- 1) 城野政弘, 日本機械学会講演論文集, 96-1,414(1996).
- 2) 酒井達雄, 武田光弘, 塩沢和章, 越智保雄, 中島正貴, 中村孝, 小熊規泰, 材料, 49,782(2000).
- 3) K.Salma and R.K.Lamerand, Ultrasonic Fatigue, The Metallurgical Society of AIME, 109(1982).
- 4) 日本機械学会編, 金属材料 疲労強度の設計資料, I(1982).
- 5) 日本材料学会編, 材料強度学, 101(1994).