800MPa 級高張力鋼の超高サイクル疲労強度評価

細野寿弥^{*1}, 辻 裕一^{*2}, 山口 篤志^{*3}, 山際謙太^{*3}, 本田尚^{*3}, 佐々木哲也^{*3}

Ultra-high-cycle Fatigue Evaluation of 800MPa Grade High Strength Steels

Kazuya HOSONO^{*1}, Hirokazu TSUJI, Atsushi YAMAGUCHI,
Takashi HONDA, Kenta YAMAGIWA and Tetsuya SASAKI^{*1} Tokyo Denki University
Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama, 350-0394, Japan

The giga-cycle fatigue properties of high-strength steel are important to maintain and manage the equipment. In the present study, the rotating bending test and the ultrasonic loading test up to 10^8 cycles are carried out using the 800MPa grade high strength steels in order to clarify the giga-cycle fatigue of high-strength steel. One of the several specimens failed due to internal fracture over 10^7 cycles in the ultrasonic loading test. It was clarified the origin of fracture on specimen which failed over 10^7 cycles is inclusions, which has large profile area, by fractography.

Key Word: Giga-cycle Fatigue, Rotating Bending Fatigue Testing, Ultrasonic fatigue Testing, Fractography

1. 緒言

ある種の超高強度鋼において超高サイクル領域での内部破壊により二重 $S-N$ 曲線と呼ばれる特異な $S-N$ 曲線が現れることが知られている。これは超高サイクル領域での内部破壊が要因であることが知られている⁽¹⁾。超高サイクル領域における疲労破壊現象は、引張強さ $\sigma_B=1200$ MPa あるいはビッカース硬さ HV400 以上の高強度鋼でのみ出現するとの報告がある⁽²⁾。

一方、供用年数の長期化や、高速化により設備に負荷されるサイクル数も非常に大きくなり、 10^7 回以上の超高サイクル域での疲労への関心が高まっている。しかし、超高強度鋼の超高サイクル疲労に関する研究に比べ、高強度鋼の研究は少なく⁽³⁾、高強度鋼の超高サイクル疲労データを収集することは設備の保守管理にも重要な役割を担う。

本研究では、回転曲げ疲労試験と超音波疲労試験の 2 方式によって 800 MPa 級高張力鋼について超高サイクル疲労データを収集した。また、超高サイクル疲労特性を明らかにするため破面観察と疲労破面の起点部近傍の成分分析を行った。

2. 試験方法

2・1 供試材料および試験片 供試材料には 800MPa 級高張力鋼を用いた。表 1 に供試材料の化学成分、表 2 に供試材料の機械的性質を示す。図 1 に試験片の形状および寸法を示す。試験片軸方向と圧延方向が一致するよう加工し、エメリー紙で 2000 番まで仕上げた。

2・2 試験装置および試験条件 回転曲げ疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機を用い、応力比 $R = -1$ 、試験速度 50 Hz で、打ち切り限界を繰返し数 $N = 10^8$ 回として実施した。超音波疲労試験には島津製作所製の超音波疲労試験機 USF-2000 を用いた。本機は試験片を 20kHz の縦波で共振させ、応力比 $R = -1$ の単軸負荷を行う疲労試験機である。超音波疲労試験中の試験片の発熱による温度上昇を抑制するため、試験機の間欠運転と試験片への乾燥空気噴付けによる強制冷却を行い、繰返し数 $N = 10^8$ 回を打ち切り限界とした。

試験終了後の破面観察には、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用した。

Table 1 Mechanical properties of 800MPa grade steel

Testing method	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Rotating bending	812	829	26
Ultrasonic loading	867	885	23

^{*1} 東京電機大学大学院 (〒350-0394 埼玉県鳩山町比企郡大字石坂)^{*2} 正員, 東京電機大学 (〒120-8551 東京都足立区九間 5)^{*3} 正員, (独) 労働安全衛生総合研究所 (〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

E-mail: hosono.kazuya@ebara.com

Table 2 Chemical compositions (mass %)

(a) 800 MPa grade steel used for rotating bending

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	B
0.08	0.32	1.38	0.006	0.002	0.03	0.02	0.45	0.03	0.0007

(b) 800 MPa grade steel used for ultrasonic loading

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	B
0.08	0.30	1.37	0.005	0.002	0.02	0.01	0.42	0.03	0.0009

(a) Ultrasonic loading test specimen

(b) Rotating bending fatigue test specimen

Fig. 1 Fatigue specimen configurations

3. 試験結果

3-1 疲労試験結果

図2に疲労試験結果の $S-N$ 線図を示す。プロット上の×印は内部破壊を示す。内部破壊は一例のみで超音波疲労試験での超高サイクル領域 ($N_f = 6.03 \times 10^7$) で発生した。その他はすべて表面破壊であった。超音波疲労試験では、超高サイクル領域との境界といえる 10^7 回近傍で破断するデータが多く得られた。

傾斜部分の疲労寿命を比較すると、回転曲げ疲労試験より超音波疲労試験の方が長寿命寄りである。また、疲労限度は回転曲げ疲労試験が $\sigma_w = 500$ MPa、超音波疲労試験が $\sigma_w = 485$ MPa とほぼ同等である。

3-2 破面観察

破断した試験片について破面観察を行ない起点部の確認をした。図3にSEM像、図4に介在物の深さを示す。

Fig. 2 $S-N$ diagram

(a) Macrograph

(b) Inclusion

(Ultrasonic Loading, $\sigma_a = 500$ MPa, $N_f = 6.03 \times 10^7$)

Fig.3 SEM image of fatigue fracture surface

超音波疲労試験において超高サイクル領域で破断した一例のみを介在物を起点とする内部破壊であった。起点部には2つの介在物が接するように存在し、試験片表面から起点の介在物までの深さは740 μm であった。

Fig. 4 Depth of inclusion

3・3 介在物寸法 超音波疲労試験に供した材料の介在物寸法について光学顕微鏡による観察を行った。最弱リンク説によると、疲労破壊は応力方向に垂直な面で最も大きい介在物が起点となるので、顕微鏡の1視野の最大の介在物を測定した。

介在物の投影面積の平方根 $\sqrt{area}_{max}$ を小さい順に極値確率紙にプロットすると、プロット点は直線性を示し、鋼中に存在し得る最大の介在物寸法を予測することが可能である⁽⁴⁾。1視野(検査基準面積)14800 μm^2 とし、40視野について介在物の最大寸法を測定した。図8の極値確率紙に結果を示す。最大介在物分布直線の式を次式に示す。

$$\sqrt{area}_{max} = a \cdot y + b \quad (1)$$

$$y = -\ln[-\ln\{T-1\}/T] \quad (2)$$

$$T = \{(S + S_0)/S_0\} \times n \quad (3)$$

ここで a と b は図の近似直線より与えられ、 y : 基準化変数、 T : 再帰期間、 S : 予測を行う面積(= $\phi 3$)、 S_0 : 検査基準面積、 n : 試験片本数(=20本)である。最大介在物寸法の予測を行うと、極値確率紙より a (=1.26)と b (=6.32)となり予測最大介在物寸法 $\sqrt{area}_{max}$ は17.9 μm である。内部破壊の起点部に接するように存在する2つの介在物の投影面積 $\sqrt{area}$ は20 μm であり、介在物寸法検査を試験片105本に対して行なった時の予測最大介在物寸法に相当する。投影面積 $\sqrt{area}$ 20 μm は介在物の予測最大介在物寸法 $\sqrt{area}_{max}$ の17.9 μm に比べて極端に大きい介在物である。よって超高サイクル領域($N_f=6.03 \times 10^7$)で発生した内部破壊は特異な欠陥により引き起こされたと考えられる。

4. 結言

本研究では、800MPa級高張力鋼に対して回転曲げ疲労試験と超音波疲労試験を行い、超高サイクル疲労データを収集した結果は以下の通りである。

- (1) 回転曲げ疲労試験と超音波疲労試験のS-N線図を比較すると、傾斜部分では超音波疲労試験の方が長寿命寄りであるが、疲労限度はほぼ同等である。
- (2) 超音波疲労試験では、超高サイクル領域との境界といえる 10^7 回近傍で破断するデータが多く得られた。
- (3) 内部破壊は超音波疲労試験の超高サイクル領域($N_f=6.03 \times 10^7$)で発生した一例のみで、介在物を起点とした介在物起点型であった。
- (4) 起点部では、2つの介在物が接するように存在するため投影面積 $\sqrt{area}$ は20 μm となり、予測最大寸法17.9 μm に比べ極端に大きい。超高サイクル領域において疲労破壊の起点となった介在物の投影面積は極端に大きく、特異な欠陥により内部破壊が引き起こされた。

Fig.5 External distribution of inclusion in ultrasonic fatigue test specimen

参考文献

- (1) 越智保雄, 酒井達雄, 疲労の基礎と最近の話題 3. 金属材料の超長寿命域における疲労特性, 材料, Vol. 52, No. 4 (2003), pp. 433-439.
- (2) 菊川ら, 軟鋼の疲れ限度の繰返し速度依存性と高速変形特性との関係について, 機論, Vol. 32, No. 238 (1966), pp. 875-879.
- (3) 小林英男, 轟章, 大村敏一, 佐野尊, 竹花立美, 二相ステンレス鋼の超高サイクル疲労特性とき進展寿命評価, 圧力技術, Vol.43, No. 3 (2005), pp. 146-150.
- (4) 村上敬宜, 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, (1993), pp. 233-236, 養賢堂.