軸受鋼の回転曲げ疲労における FGA 形成時期の検討

關杉直矢^{*1}, 小熊規泰^{*2}, 小竹康浩^{*3}, 島田裕貴^{*3}

Examination of FGA forming Time of Bearing Steel in Rotating Bending Fatigue

Naoya SEKISUGI^{*4}, Noriyasu OGUMA,
Yasuhiro ODAKE and Yuuki SHIMADA

^{*4} Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama
Gofuku 3190, Toyama, 930-8555 Japan

In order to examine the period of fine granular area (FGA) formation of bearing steel in high cycle fatigue, rotating bending fatigue tests were carried out at the stress amplitude 1100MPa below the fatigue limit. The tests were interrupted at the cumulative damage value ranging from 0.1 to 0.5 with an increment of 0.1 to charge hydrogen. And then the fatigue tests were continuously carried out. Although FGA was observed on the fracture surface in all conditions, FGA was not formed in all specimens. The stress intensity factor range of FGA tended to increase with an increase of the cumulative damage value. Therefore, FGA is considered to be gradually formed to limit size with advance of fatigue.

Key Words : Bearing Steel, Rotating Bending, Hydrogen-Charge, Fine Granular Area

1. 緒 言

高強度鋼の回転曲げ疲労において発生する内部起点型破壊寿命は、そのほとんどの期間を破壊起点となった介在物の近傍に形成される細粒状領域 (Fine Granular Area: FGA) の形成に費やされると推察されており、FGA の形成開始時期は全寿命期間の 5～10%程度であるとの報告^{1), 2)}がある。また、水素チャージを施した試験片の回転曲げ疲労試験では、下限応力拡大係数範囲が低下するとともにき裂進展速度が上昇し、早期に内部起点型破壊を生じることが明らかになっている³⁾。そこで、疲労過程の早期に FGA が形成され始めるのであれば、疲労途中で試験を中断して水素チャージを行い、再び疲労試験に供して疲労き裂進展を加速させ、破断した試験片の起点に FGA 形成の有無とそのサイズおよび応力拡大係数範囲の値の変化を検討することは、FGA 形成開始時期の推定と成長過程解明の一助になると考えられる。

既報⁴⁾では、軸受鋼の回転曲げ疲労試験において、内部起点型破壊を生じる平均寿命に対する累積損傷値の 0.1, 0.2, 0.3 および 0.5 まで疲労試験を行い、その後水素チャージを施して再び回転曲げ疲労試験を行い、破断した試験片の破面様相を観察した。本報では、内部起点型破壊を生じる平均寿命に対する累積損傷値の 0.4 まで試験を行ったものも加えて、破壊起点近傍の詳細観察を行って FGA の寸法および応力拡大係数範囲について検

討した結果を報告する。

2. 供試材及び実験方法

2・1 供試材 本研究で使用した供試材は高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 である。回転曲げ疲労試験に供した試験片形状は、直径 10mm、試験片中央に曲率半径 7mm の切欠きを有する砂時計型である。切欠き部の最小部直径は 3mm であり、この形状における弾性応力集中係数は 1.06 である。試験片は旋削後に 835℃×40min→油冷の焼入れ、180℃×120min→空冷の焼戻しの熱処理を行った後に研削加工を行い所定の寸法に仕上げた。さらに、試験片標点部表面はエメリー紙で#2000 まで研磨後、アルミナ砥粒によるバフ研磨を施して疲労試験に供した。

2・2 水素チャージ方法 回転曲げ疲労試験中断後の水素チャージは、20mass%のチオシアン酸アンモニウム水溶液中に約 50℃にて 24h 浸漬させることによって行った。水素チャージ終了後はエメリー紙およびバフで再研磨を行って試験片標点部表面の腐食層を取り除いた。水素チャージ後は時間経過に伴って試験片表面から拡散性水素が放出していくため、水素チャージ終了後から疲労試験を開始するまでの時間は 1.5h 以内とした。

2・3 実験方法 回転曲げ疲労試験は、4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機を用い、軸回転速度 4000min⁻¹で室温・大気中の実験室雰囲気下で行った。最初の疲労過程は、本供試材の疲労限度 1275MPa 以下の応力振幅

^{*1} 学生員, 富山大学大学院 (〒930-8555 富山市五福 3190)

^{*2} 正員, 富山大学大学院理工学研究部

^{*3} (株)不二越軸受事業部,

E-mail: ml271220@ems.u-toyama.ac.jp

日本機械学会[No.13-8]M&M2013 材料力学カンファレンス CD-ROM論文集[2013.10.12-14]

1100MPa での内部起点型破壊の平均寿命 7.54×10^7 cycles に対する累積損傷値 D が 0.1 から 0.5 まで、0.1 ステップでそれぞれ回転曲げ疲労試験をいった。その後、試験を一時中断し、水素チャージを施した。水素チャージ後に再研磨を行うことにより、試験片の最小部直径は小さくなるので、同じ応力振幅となるように負荷荷重を減じて再び回転曲げ疲労試験に供した。試験片の破断後は全ての破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて破壊起点の確認と起点近傍の様相を観察した。

3. 実験結果及び考察

3・1 疲労試験結果 図 1 に本実験によって、得られた水素チャージ後の $S-N$ プロットを水素チャージ前の応力振幅 1100MPa における内部起点型破壊の平均寿命に対する累積損傷値別に示す。SEM 観察の結果、破壊起点は全て介在物であった。ただし、 $D=0.2$ において表面の介在物が起点となって破壊に至ったものが一例見られた。また、比較のために、疲労試験に供する前に水素チャージを施した試験片の平均寿命³⁾を実線で示してある。図 1 より、疲労試験途中で水素チャージしたことにより、水素チャージ後の破断寿命は最初から水素チャージを施した試験片のそれより短くなっていることが分かる。また、水素チャージ前の累積損傷値が大きいくほど水素チャージ後の疲労寿命が短い傾向を示していることも認められる。

表 1 は累積損傷値をまとめたものである。水素チャージ後の平均寿命の累積損傷値 D_h (最初から水素チャージした試験片の平均寿命に対する割合) は 0.06~0.33 の範囲であり、累積損傷値の合計 ΣD は 0.43~0.56 と 1 より小さい値となった。水素チャージ後の累積損傷値が小さくなる傾向は、高塑性ひずみを有する材料に水素チャージを行うと疲労寿命が低下する現象 (別報で報告予定) と同様であり、き裂進展速度の加速と下限界応力拡大係数範囲の低下が起因しているものと考えられる。

3・2 破面観察 図 2 および図 3 に SEM 観察によって FGA が認められた破面の一例を示す。図 2 は、水素チャージ前の累積損傷値が $D=0.1$ の場合であり、 7.54×10^6 cycles の繰返し疲労を与えた後に水素チャージを行い、 1.05×10^4 cycles で破断した試験片の破面である。また、図 3 は、水素チャージ前の累積損傷値が $D=0.5$ の場合であり、 3.77×10^7 cycles の繰返し疲労を与えた後に水素チャージを行い、 1.46×10^3 cycles で破断した試験片の破面である。破壊起点となった非金属介在物の周囲に、明瞭ではないが FGA が形成されていることが分かる。破面観察写真から読み取った FGA 寸法 $\sqrt{\text{area}_{\text{FGA}}}$ と応力勾

配を考慮した介在物点位置における応力振幅との関係を図 4 に示す。なお、図中の実線は、通常の実験曲げ疲労試験で得られたデータの回帰曲線である。

Fig.1 $S-N$ properties for hydrogen-charged SUJ2 into fatigue process.

Table1 Cumulative damage values.

D	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
D_h	0.33	0.27	0.24	0.07	0.06
ΣD	0.43	0.47	0.54	0.47	0.56

(1) Low magnification (2) High magnification
Fig.2 Example of SEM observations of the fracture surface.
(Cumulative damage value $D=0.1$, $N_f=1.05 \times 10^4$ cycles)

(1) Low magnification (2) High magnification
Fig.3 Example of SEM observations of the fracture surface.
(Cumulative damage value $D=0.5$, $N_f=1.46 \times 10^3$ cycles)

Fig.4 Relationship between size of FGA and stress amplitude at inclusion.

図4より、FGA寸法は通常の疲労試験の場合と比較して小さく、また、累積損傷値0.1において既に形成されていることが分かる。

3・3 き裂発生起点の破壊力学的考察 図5に FGA 外縁の応力拡大係数範囲と水素チャージ前の応力繰返し数の関係を示す。応力拡大係数範囲は村上らの式によって算出した。なお、図中の破線は、通常の疲労試験における FGA 外縁の応力拡大係数範囲を示してある。図5より、水素チャージ前の応力繰返し数が多いほど、FGA 外縁の応力拡大係数範囲 ΔK_{FGA} の値が大きくなる傾向が認められる。したがって、通常の回転曲げ疲労試験において、FGA は疲労寿命に対する 10%程度で形成を開始しており、応力繰返し数が増加するに伴って徐々に大きく成長し、応力拡大係数範囲 ΔK_{FGA} の値が限界値($5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)に達するまで成長するものと考えられる。

Fig.5 Relationship between stress intensity factor range of FGA and fatigue life.

4. 結言

- (1) 回転曲げ疲労過程（内部起点型破壊の平均寿命に対する累積損傷値 $D=0.1 \sim 0.5$ ）で水素チャージを施し、再び疲労試験を行った結果、 $D=0.1$ の条件で破壊起点となった内部介在物近傍に FGA が形成されていることが確認された。したがって、FGA は疲労寿命の 10%程度で形成を開始し始めているものと推定される。
- (2) 水素チャージ前の応力繰返し数が多いほど、FGA 外縁の応力拡大係数範囲 ΔK_{FGA} の値が大きくなる傾向を示した。したがって、FGA の成長は応力繰返し数が増加するに伴って限界値に達するまで徐々に大きくなっていくものと考えられる。

5. 文献

- 1) Kurosima, Y., Ikeda, T., Harada, M and Harada, S., Subsurface Crack Growth Behavior on High Cycle Fatigue of High Strength Steel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.64, No.626(1998), pp.2536-2541.
- 2) Nakajima, M. et. al., Estimation of Subsurface Crack Initiation Lives for a High Strength Steel under Variable Amplitude Loading Test, *Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineering Congress*, No.03-1(2003), pp.169-170.
- 3) Mizushima, S., Oguma, N., Odake, Y., Shimada, Y., Influence of Neglect Time after Hydrogen-charging for Fatigue Life of Bearing Steel In Rotating Bending, *Proceedings of The 31st Symposium on Fatigue*, No.30(2012), pp.134-137.
- 4) Sekisugi, N., Oguma, N., Odake, Y., Shimada, Y., Fractography of Hydrogen-charged Bearing Steel into Rotating Bending Fatigue Process, *Japan Society for Design Engineering Hokuriku Branch*, No.107(2013), pp.15-18.