放射光 μ CT を用いた高強度鋼の転動疲労下のき裂検出福田嘉之^{*1}, 塩澤大輝^{*2}, 根石 豊^{*3}, 牧野泰三^{*4}, 中井善一^{*2}**Detection of Crack under Rolling Fatigue
in High-strength Steels by using Synchrotron Radiation μ CT**Yoshiyuki FUKUDA^{*5}, Daiki SHIOZAWA, Yutaka NEISHI,
Taizo MAKINO and Yoshikazu NAKAI^{*5} Kobe Unive.

Rokkoudai-cho 1-1, Nada-ku, Kobe, 657-8501 Japan

In the present study, synchrotron radiation micro computed tomography (SR μ CT) imaging of SPring-8 was applied to the observation of delamination defects in high-strength steels under rolling contact fatigue. The rolling contact fatigue crack initiation occurs under surface and these defects propagate to the surface. The conventional technique, such as optical microscope and scanning microscope, cannot give us the crack initiation and growth behavior under the surface. Therefore, the shape of rolling contact fatigue defects was observed by SR μ CT imaging. The specimen with an artificial defect, which simulates an inclusion, was used to the contact rolling fatigue tests. The broken and non-broken specimens were observed respectively by SR μ CT. The delamination defects and cracks can be detected from the artificial defect. It is found from these results that the defect initiation and propagation behavior in the rolling contact fatigue process can be discussed from the measurements by SR μ CT imaging. The number of crack, location and size of crack obtained by the CT imaging coincide with those by polishing and SEM measurements. It is found from these results that the defect initiation and propagation behavior in the rolling contact fatigue process can be discussed from the measurements by SR μ CT imaging.

Key words : Rolling contact Fatigue, Non-destructive evaluation, Synchrotron radiation μ CT imaging

1. 緒 言

一般に転動疲労は転動直下に存在する内部介在物を起点に、転がり接触の繰返しによってその周囲に組織変化をともしないき裂が発生・進展し、はく離に至ることが知られている¹⁾。転動疲労寿命の向上には、高纯净度化による介在物寸法の低減と基地組織の高強度化が有効とされてきた²⁾。最近の報告では、組成や基地組織との密着性等の因子を意図的に変えた材料または条件にて実験し、寿命の変化を検討した内容が多いが、直接的な観察に基づいたものはほとんどない³⁾。この理由としては、転動疲労ではき裂が内部に発生すること、はく離して寿命に到達した段階ではそのはく離が転動によってつぶれ、直接的かつ詳細な観察が難しいことが挙げられる。そこで本研究では産業界に広く用いられている鉄鋼材料を対象として、SPring-8の放射光を用いた μ CTイメージングによって、いまだ不明確である転動疲労下における内部介在物からのき裂発生・進展挙動を把握・観察し、損傷発生メカニズムを明らかにして長寿命化指針を得ることを目的とする。本報告では、まず転動疲労き裂を観察するための撮影

条件などの基礎的検討を行った結果を述べる。さらに介在物を模擬した人工欠陥を導入した試験片について実験およびCT観察を行い、放射光 μ CTイメージングの転動疲労き裂の損傷発生メカニズムへの適用性について検討を行った。

2. 転動疲労試験および測定方法

供試材は炭素鋼 S55C である。転動疲労試験片形状に加工した後、高周波焼入を行い、仕上げ加工を行った。疲労試験を行った森式転動疲労試験機疲労試験の概要を Fig 1 に示す。最大ヘルツ応力は $\sigma = 5.2 \times 10^3$ (MPa)とした。破損した試験片からはく離損傷部を CT イメージング用の観察サンプルとして切り出した。

CT 撮影は SPring-8 の BL19B2 ビームラインで行った。検出器にはビームモニタ BM3(x10)および BM2(f=50)と CCD カメラ(C4880-41S)の組み合わせを用いて検出器の組合せについて検討した。ビームモニタ BM3(x10)使用時の有効ピクセルサイズは $0.74 \mu\text{m}$ 、BM2(f=50)使用時には $2.8 \mu\text{m}$ となる。その他の測定条件では、X 線エネルギーを 37keV、試料-カメラ間距離を 700mm および 350mm とし、0°から 180°まで 0.2°刻みで回転させながら透過像を得た。

^{*1} 学生員, 神戸大学大学院 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)^{*2} 正員, 神戸大学, 工学研究科^{*3} 控員, 住友金属工業(株) 総合技術研究所^{*4} 正員, 住友金属工業(株) 総合技術研究所

E-mail: 104t369t@stu.kobe-u.ac.jp

Fig.1 Rolling fatigue testing machine by Mori type

Fig. 2 Observed samples for CT imaging.

3. 実験結果

3.1 撮影条件の検討

(i) サンプル形状の影響

転動疲労試験により破損した試験片からはく離損傷部を CT イメージング用の観察サンプルとして切り出した。観察に用いた試験片の破損繰返し数は $N_f = 1.75 \times 10^5$ (cycles) であった。サンプル形状の検討のために2種類の形状を用意した。観察サンプルの形状を Fig 2 に示す。転動疲労試験片の表面を切り出した後に破損部が中央に収まるように試験片形状に加工したものを Sample A とした。Sample A では試験片の両端に引張負荷を与えるためのタブを設けている。Sample B では、破損部を中心となるように円柱状に切り抜いており、破損部が円柱の先端に位置している。

Sample A では、Feedback projection 法のプログラムがエラーにより停止して再構成できない箇所があり、再構成結果も実際の断面形状とならないなど、三次元形状に再構成することができなかった。これはサンプルの断面形状が四角形であるため、X 線の入射方向によって X 線の透過厚さが異なり、鉄に対する透過限界寸法を超えた箇所が含まれていたものと考えられる。一方、Sample B では全てのサンプルについて再構成が可能であった。

(ii) 転動き裂形状の特徴

ビームモニタ BM3(x10)を用いた場合における Sample B の再構成画像の一例を Fig 3-5 に示す。Fig 3 はサンプル全体像

Fig.3 CT imaging of sample.

Fig.4 3D image of broken part.

Fig. 5 Details of separation and internal progress crack.

を、Fig 4 は破損部およびき裂を2値化反転処理により白色で示した三次元像を上部から見た図を示したものである。また Fig 5 ははく離部の高さ分布図および断面図を示したものである。Fig 3 および Fig 4 より、試料先端の破損部では、表面に現れたはく離部の下にき裂が発生・進展している。この内部き裂は鋼球の転動方向に沿って進展していることが分かる。Fig 5 よりはく離による脱落部の他にも、損傷部から発生した内部進展き裂の分布を観察することができることが分かった。このように放射光 CT イメージングにより内部介在物からの転動疲労き裂進展を観察できる可能性があることがわかった。

3.2 人工欠陥を導入した転動疲労試験片

介在物からのき裂発生を観察することを目的として、介在物を模擬した人工欠陥を導入した試験片について CT 観察を試みた。人工欠陥として、疲労試験における鋼球の措動線上に放電加工により直径が約 $50\mu\text{m}$ 、深さが約 $250\mu\text{m}$ の微小穴を加工した。人工欠陥から破損した部分を Sample B の形状に切り出したサンプルについて CT 観察を行った。

人工欠陥を導入した試験片の破損部の CT 像の一例を Fig. 6 に示す。Fig. 6 では試験片部以外を白色で、き裂部分を抽出して赤色で表示している。Fig. 6(a)は、破損部の等高線分布を

Fig. 6 Internal progress crack from artifact defect.

示しており、(b)は鋼球の撓動方向に垂直な方向から人工欠陥を観察した図、(c)は(b)に対して 90° 回転した方向から観察した図である。Fig. 5(a)より、せん断応力が最大となる深さである 100 μm 付近において試料表面に対して水平方向に発生したき裂から最終的な破損が生じていたことが分かる。さらに Fig. 6(b)および(c)より、破損に至った主き裂より深い位置においても人工欠陥から等間隔の深さにおいてき裂が発生、進展していたことが分かる。

3.3 破壊検査による直接観察との比較

破損した人工欠陥周囲の観察結果から、人工欠陥に深さ方向に等間隔なき裂が発生・進展することが明らかとなった。そこで、転動疲労を中途止めた試験片について人工欠陥周囲の CT 観察を行った。さらに CT 観察に用いた試料に対して、研磨によりき裂形状を直接観察し CT イメージングにより検出された疲労き裂の形状との比較を行った。人工欠陥の長軸に対して平行に 5 μm ピッチでの研磨および SEM 観察を繰り返すことにより、人工欠陥周囲のき裂形状を得た。

SEM による観察結果および同じ位置の CT 観察結果の断面像を Fig. 7 に示す。Fig. 7(b)より、破損部と同様に等間隔なき裂が発生しており、せん断力が最大となる 100 μm 付近よりも上部においてもき裂が発生していることが分かる。また SEM 像においてもこれらのき裂が確認できており、SEM 画像におけるき裂の本数および発生位置は CT 画像により得られるものとほぼ一致していることが分かった。また人工欠陥において水平方向のき裂とは別に、表面から垂直方向に発生するき

Fig. 7 Comparison with SEM and CT images.

裂が観察された。これらの主き裂よりも浅い位置に発生した垂直き裂や水平き裂は、主き裂の発生および進展に影響を与えた可能性があるため、今後詳細な観察が必要である。このように放射光 CT イメージングを用いた転動疲労き裂の観察は可能であり、進展メカニズムを評価するのに十分な検出性能を有することがわかった。

参考文献

- 1) 長尾実佐樹, 平岡和彦, 雲丹亀泰和, “軸受鋼の転動疲労寿命における非金属介在物の大きさの影響”, Sanyo Technical Report, Vol.12, No.1 (2005), pp.38-45
- 2) 村上敬直, 清水真佐男, “疲労強度に及ぼす介在物, 微小欠陥, 微小き裂の影響”, 日本機械学会論文集 (A編) vol.54, No.499 (1988), pp. 413-425
- 3) 五嶋孝仁, 上田馨, 清水理能, 石原外美, “繰り返し転がりすべり接触による半無限体内部介在物からのき裂進展経路と疲労寿命の評価”, 日本機械学会論文集 (A面) vol.54, No.762 (1988), pp.190-197