

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889001

研究課題名(和文)地震荷重を受けた構造用金属材料の表面粗さ測定に基づく疲労損傷評価手法の提案

研究課題名(英文) Proposing of damage assessment method of seismic-loaded structural material based on surface roughness measurement

研究代表者

藤村 奈央 (FUJIMURA, NAO)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40732988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震荷重を受けた材料の疲労損傷量を、繰返し塑性変形によって変化する材料の表面粗さに基づいて評価する手法を提案するため、地震波に含まれるひずみ速度が疲労寿命や表面粗さの変化に及ぼす影響を調査した。ひずみ速度4%/secと0.4%/secで得たオーステナイト系ステンレス鋼の疲労寿命を比較した結果、2種類のひずみ速度での疲労寿命はよく一致した。このことから、10倍程度のひずみ速度の違いは疲労寿命に影響しないことが明らかになった。また、繰返しに伴う表面粗さの変化においてもひずみ速度の違いによる顕著な差異は確認されなかった。この結果を踏まえ、表面粗さ測定に基づく疲労損傷評価手法を検討した。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate seismic-loaded damage based on the changes in surface roughness of material due to cyclic deformation, the effects of strain rate on the fatigue life and the changes in surface roughness of austenitic stainless steel was investigated. Low cycle fatigue tests were conducted under strain rate: 4%/sec, and the fatigue lives were compared with the fatigue lives obtained under 0.4%/sec. As a result, the fatigue lives at 4%/sec and 0.4%/sec were nearly equal. This shows that the tenfold increase in strain rate do not affect low cycle fatigue life. During the fatigue tests, specimen's surface roughness was regularly measured using a laser scanning microscope. Surface roughness measurement showed that the changes in surface roughness at 4%/sec were little different from that at 0.4%/sec. Based on these results, the damage assessment method on the basis of surface roughness was discussed.

研究分野：工学

キーワード：疲労損傷評価 表面粗さ ステンレス鋼

1. 研究開始当初の背景

発電設備やプラントなどの重要施設において、機器が地震荷重を受けた場合、材料内部に損傷が蓄積されることが推測されるため、設備を安全に再稼働するためには、損傷を定量的に評価することが重要となる。しかし、過大荷重によって損傷が蓄積された材料の疲労特性を高精度に予測する方法は確立されておらず、被災後の継続使用が可能かどうか、特に繰返し荷重を受ける場合の残存寿命はどれくらいあるのか、などの現実的な問題に対する指針は存在しない。損傷が蓄積された材料における後続の疲労強度特性とそのメカニズムを明らかにし、これらを踏まえ、過大荷重を受けた機器の継続使用の可否を判断する健全性評価手法を確立することは、重要施設を安全かつ継続的に使用するにあたり極めて重要な課題である。そこで近年、地震荷重に相当する繰返し予ひずみを与えた材料の疲労強度評価に関する研究が広く行われるようになった。しかし、疲労損傷機構に基づき、構造用金属材料の健全性を精密に評価する手法は確立されていない。地震による重要施設の稼働停止は生産活動等に影響を与え、多大な経済的損失を招くため、迅速な復旧が望まれる。そして、設備を安全に再稼働させるためには高精度かつ合理的な健全性評価手法の構築が必要とされる。

従来、疲労損傷評価には材料が受けた損傷を寿命消費率で表す疲労累積係数 UF が用いられている。この手法は負荷の繰返し数で損傷を評価できるという簡便性を持つが、より精度の高い損傷評価を行うためには疲労損傷のメカニズムも考慮する必要がある。そこで申請者らは、疲労損傷過程を評価する有効なパラメータとして、繰返し塑性変形によって変化する材料の表面性状に着目した。これまでに、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG に対して一定ひずみ範囲で低サイクル疲労試験を行い、地震荷重を模擬した繰返し負荷を材料に与えた。そして、3種類の表面粗さ：算術平均粗さ R_a 、最大高さ R_{max} 、最大谷深さ R_v を測定し、負荷ひずみの大きさや繰返し数などに対する表面粗さの変化傾向を調べ、これとすべり帯や表面凹凸の形成・成長など疲労損傷過程との関係を検討した。その結果、すべり帯や表面凹凸の形成・成長によって3種類の表面粗さは繰返し数、すなわち疲労累積係数 UF の増加に伴って増加し、その増加傾向はひずみ範囲の大きさによって異なることが明らかとなった。このことから、地震による損傷の検出において、表面粗さが疲労損傷過程を考慮したパラメータとして有効であることが示された。また、任意のひずみ範囲における3種類の表面粗さと疲労累積係数の関係が既知であれば、逆問題として各表面粗さの測定値から損傷量 UF とこれを導入したひずみ範囲を判定できることを示し、表面粗さをを用いた損傷評価の基本の考えを確立した。

一方、実際に機器が受ける地震波形は振幅の大きさや周期が不規則に変化するランダム波形であり、様々なひずみ速度を持つ波が含まれる。このような地震波によって負荷を受けた材料の疲労損傷量を表面粗さに基づいて評価するためには、ひずみ範囲だけでなく、ひずみ速度が材料の疲労寿命や表面性状の変化に及ぼす影響についても検討する必要があると考え、本研究課題の発案に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地震荷重を受けた材料の疲労損傷量を、繰返し塑性変形によって変化する材料の表面粗さに基づいて評価する手法を提案することである。地震波形には様々なひずみ速度を持つ波が含まれるため、ひずみ速度が疲労寿命や表面粗さの変化に及ぼす影響を明らかにし、表面粗さに基づく損傷評価手法の確立を目指す。具体的には、SUS316NG を対象として、これまでの研究で採用したひずみ速度 $0.4\%/sec$ の10倍の条件である $4\%/sec$ で低サイクル疲労試験を実施し、疲労寿命の取得ならびに3種類の表面粗さの測定を行った。そして、各ひずみ速度で得られた結果を比較し、ひずみ速度の影響について考察した。また、得られた結果を踏まえて、3種類の表面粗さから損傷量を評価する考えを基に、地震荷重を受けた材料の表面粗さに基づく損傷評価手法について検討した。

3. 研究の方法

(1) 低サイクル疲労試験

ひずみ速度が疲労寿命に及ぼす影響を調べるため、表面を鏡面状に仕上げた SUS316NG の試験片を用いて、室温大気中においてひずみ速度 $4\%/sec$ 、全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 4.1\%$ 、 2.1% 、 1.26% の3条件で径ひずみ制御低サイクル疲労試験を行い、疲労寿命を取得した。また、ひずみ速度が表面性状の変化に及ぼす影響を調べるため、ひずみ速度 $4\%/sec$ 、全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 4.1\%$ と 2.1% の下で低サイクル疲労試験を実施し、後述の表面観察ならびに表面粗さ測定を行った。

(2) 表面観察および表面粗さ測定

上述の試験中、定期的に試験を中断し、レーザー顕微鏡を用いて試験片表面を観察した。また、同顕微鏡で表面形状測定を行い、試験片表面の3次元画像を取得した。取得した画像データから図1に示す3種類の表面粗さ：算術平均粗さ R_a 、最大高さ R_{max} 、最大谷深さ R_v を算出し、繰返しに伴う各パラメータの変化傾向を調べた。なお、各表面粗さパラメータは、JIS B0601:2001 規格（線粗さ）を面に拡張した面粗さパラメータである。

以上の方法で得たひずみ速度 $4\%/sec$ での疲労寿命と表面粗さを申請者がこれまでに得たひずみ速度 $0.4\%/sec$ での結果と比較し、ひずみ速度の違いによる影響を検討した。

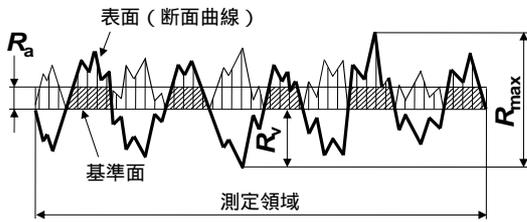


図1 表面粗さパラメータの概念図

4. 研究成果

(1) 疲労寿命に対するひずみ速度の影響

図2にひずみ速度4%/secで得た低サイクル疲労試験結果(●印)を示す。また、同図に0.4%/secで取得した疲労寿命(○印)を併せて表す。図2より、4%/secでの試験結果(●印)は0.4%/secでの疲労寿命(○印)とよく一致した。このことから、SUS316NGの室温大気中の低サイクル疲労において、10倍程度のひずみ速度の変化は疲労寿命に影響を及ぼさないことが明らかになった。

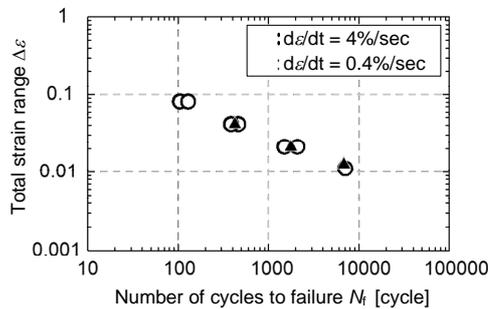
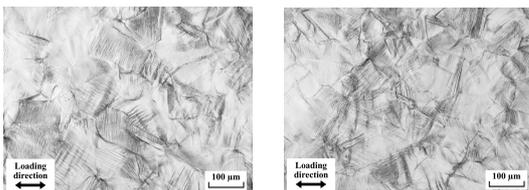


図2 低サイクル疲労試験結果

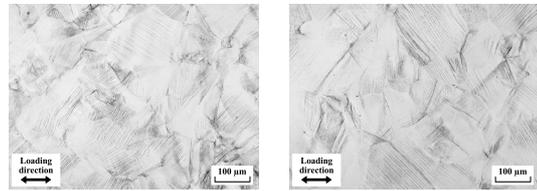
(2) 繰返しに伴う表面粗さの変化

ひずみ速度4%/secで繰返し負荷を与えた試験片の表面性状を観察した。図3と図4にひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 4.1\%$ と 2.1% で得られた表面画像の一例を示す。これらの画像は試験片の疲労累積係数 $UF (= \text{負荷の繰返し数} / \text{疲労寿命})$ が $UF = 0.4$ 付近のときに取得した。図3(b)と図4(b)に、比較のため、ひずみ速度0.4%/secで得られた表面画像も併せて表す。図3、図4から、いずれのひずみ速度・ひずみ範囲においても黒い細線のすべり帯が観察され、表面に凹凸が形成されていることが確認できる。また、ひずみ範囲によって凹凸の発達具合は異なった。一方、ひずみ速度に着目して表面性状を比較すると各図(a)、(b)はよく似ており、すべり帯や凹凸の様子にひずみ速度による違いは認められなかった。



(a) 4%/sec (b) 0.4%/sec

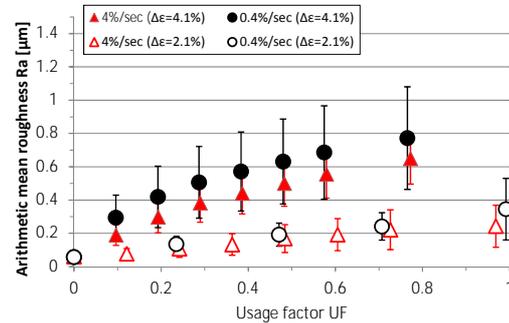
図3 $\Delta\varepsilon = 4.1\%$ での表面性状 ($UF = 0.4$)



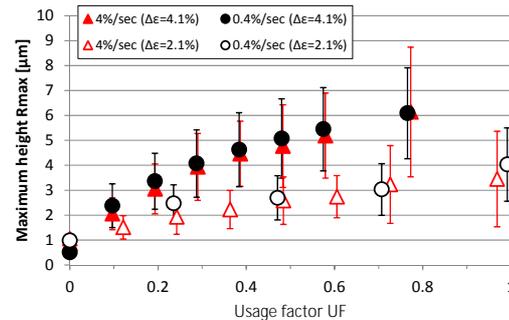
(a) 4%/sec (b) 0.4%/sec

図4 $\Delta\varepsilon = 2.1\%$ での表面性状 ($UF = 0.4$)

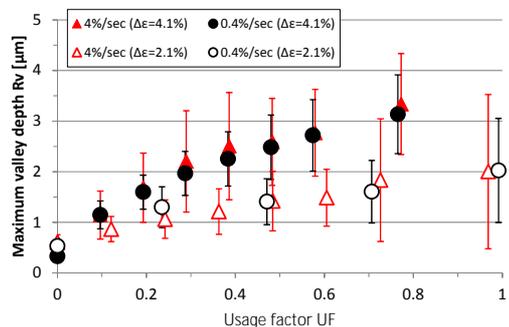
ひずみ速度4%/secと0.4%/secでの表面性状を定量的に評価するため、3種類の表面粗さを測定した。図5に各ひずみ速度・各ひずみ範囲における表面粗さの測定結果を示す。図5より、各表面粗さにおいてひずみ速度4%/sec(●印)と0.4%/sec(○印)での測定結果は概ね同程度の値を示し、ひずみ速度の違いによる顕著な差異は認められなかった。このことから、ひずみ速度が異なっても、各ひずみ範囲における表面粗さの増加傾向はほぼ同様であると考えられる。



(a) 算術平均粗さ R_a



(b) 最大高さ R_{max}



(c) 最大谷深さ R_v

図5 表面粗さ測定結果 (各印：平均値，エラーバー：標準偏差)

(3) 表面粗さ測定に基づく疲労損傷評価

ひずみ速度 4%/sec と 0.4%/sec における疲労寿命および表面粗さの変化の比較から、ひずみ速度はこれらに影響を及ぼさないことが示された。この結果を踏まえて、表面粗さ測定に基づく疲労損傷評価手法について検討した。

表面粗さに基づく疲労損傷評価の概念図を図6に示す。前述したように、申請者はこれまでの研究において、図5に示したような任意のひずみ範囲における3種類の表面粗さと疲労累積係数 UF の関係、すなわち、繰返しに伴う各表面粗さの増加傾向が既知であれば、荷を受けた材料の表面粗さを測定することで、この関係を利用して損傷量 UF を求めることができることを示した(図6)。この方法において表面粗さの測定値から損傷量 UF を求める基準となるのは、表面粗さと疲労累積係数の関係である。本研究の結果、ひずみ速度が変化しても、判定の基準となる表面粗さの増加傾向はほぼ同様であることが確認された。このことから、地震波のように材料に与えられる荷のひずみ速度が変化する場合、各ひずみ速度に対応した表面粗さの増加傾向を新たに取得せずとも、低いひずみ速度で取得した増加傾向を基準として、図6に示した考えに基づき表面粗さの測定値から損傷量 UF を評価できると考えられる。

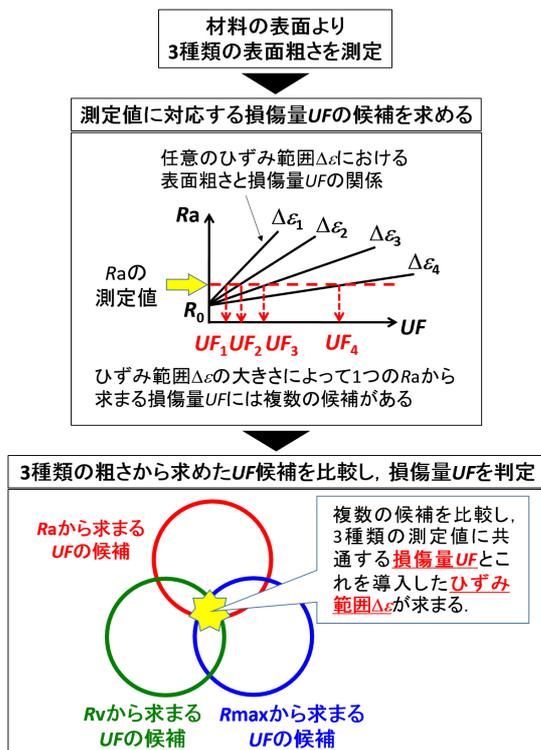


図6 表面粗さ測定に基づく疲労損傷評価(概念図)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

上遠野寛, 中村孝, 藤村奈央, 中田康敬, 西塚祐斗, SUS316NGの低サイクル疲労寿命と表面性状の変化に及ぼすひずみ速度の影響, 日本機械学会北海道学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, 2016年3月7日, 函館工業高等専門学校(函館市)

藤村奈央, 中村孝, 信耕友樹, 低サイクル疲労損傷を受けたSUS316NGにおける表面粗さの分布, 日本機械学会M&M2015材料力学カンファレンス, 2015年11月21日~11月23日, 慶応義塾大学矢上キャンパス(横浜市)

西塚祐斗, 中村孝, 藤村奈央, 信耕友樹, 中田康敬, SUS316NGの低サイクル疲労における表面凹凸の変化とその形成機構, 日本機械学会北海道学生会第44回学生員卒業研究発表講演会, 2015年3月7日, 北海道科学大学(札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤村 奈央 (FUJIMURA NAO)

北海道大学・工学部・助教

研究者番号: 40732988