HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	繰返し予ひずみを受けたオーステナイト系ステンレス鋼の表面粗さ測定に基づく非破壊損傷評価［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	藤村, 奈央
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11447号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55668
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Nao_Fujimura_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　藤村 奈央

学 位 論 文 題 名

繰返し予ひずみを受けたオーステナイト系ステンレス鋼の表面粗さ測定に基づく非破壊損傷評価
(Nondestructive Damage Assessment of Cyclically Pre-strained Austenitic Stainless Steel Based on Surface Roughness Measurement)

火力・原子力発電設備やプラントなど重要施設の耐震安全性を考える場合, 地震荷重によって損傷を受けた材料の後続疲労特性を正確に把握する必要がある. 特に, 機器が塑性変形を伴うような過大荷重を受けた場合, 材料内部に損傷が蓄積されるため, 設備の健全性を評価するためには損傷量を定量的に見積もることが不可欠である. しかし, 地震による繰返し負荷を受けた材料の後続疲労特性を高精度に予測する方法は現在確立されていない. 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*(Usage Factor) が用いられている. この手法は負荷の繰返し数のみ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のメカニズムにも着目する必要がある. また, 重要施設では地震荷重を受けた場合, 目視点検に加え現場において非破壊試験による設備の健全性評価が行われている. 地震によって材料に与えられる塑性ひずみは 1〜5% 程度であると考えられているが, 現在 2% 未満の塑性ひずみは十分に検出できていない.

一方, 材料の表面粗さは繰返し塑性変形によって変化することが知られており, 繰返し負荷による損傷を定量的に評価するパラメータとして適用できる可能性がある. しかし, 表面粗さが地震による損傷検出に有効であるかを検討するためには, 負荷ひずみの大きさや繰返し数, ひずみ履歴などに対する表面粗さの変化傾向を調べ, これとき裂の発生や進展に代表される損傷過程との関係を明らかにする必要がある. 特に, 表面粗さ測定による評価の適用可能範囲を明確にすることは実用上重要である.

そこで本研究では, 地震荷重を模擬した繰返し予ひずみを材料に与えて表面粗さの変化傾向を調べ, これと損傷機構および損傷過程との関係を明らかにすることで新たな損傷評価手法の提案を試みる. 具体的には, 原子力発電設備の配管部材として用いられるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を対象として, 種々のひずみ範囲の下, 低サイクル疲労試験を行い, 表面粗さを測定して表面粗さと *UF* との関係を明らかにした. また, レーザー顕微鏡やレプリカ法を用いて表面を観察し, すべり帯の形成や表面凹凸の変化, き裂の発生・進展などの疲労損傷過程と表面粗さとの関係を考察した. さらに, ひずみ範囲が変化する実際の負荷過程を模擬するために二段二重疲労試験を行い, ひずみ履歴が表面粗さの変化傾向に及ぼす影響についても検討した. そしてこれらの結果をもとに, 表面粗さ測定に基づいた疲労損傷評価手法の提案を目指した.

本論文は全 7 章から成り, 各章の内容および得られた結果は以下のように要約される.

第 1 章では, 発電所などの重要施設において従来用いられている健全性評価手法について述べた. また, これまでに報告された表面粗さに関する研究をまとめ, 本研究の目的を示した.

第 2 章では,SUS316NG の鏡面試験片を用いて種々のひずみ範囲の下で低サイクル疲労試験を行った. そして, 算術平均粗さ R_{a}, 最大高さ $R_{\max}$, 最大谷深さ R_{v} における変化傾向を調べた. また, 表面を観察し, すべり帯や表面凹凸の形成, き裂の発生・進展などの疲労損傷過程と表面粗さの変化との関係について考察した. その結果, 大きなひずみ範囲だけでなく, 実際の地震荷重で生じる程度のひずみ範囲 (約 5% 以下) でも表面粗さに明確な変化が現れることを明らかにした.3 種類の表面粗さは *UF* の増加に伴って寿命中頃まで線形的に増加すること,*UF* に対する表面粗さの増加率は

ひずみ範囲が小さくなるのに伴って減少することなどを示した. 表面観察の結果, ひずみ範囲が小さくなるのに伴って表面のすべり帯の数が減少し, 凹凸が発達しにくくなった. 観察結果と繰返し負荷を受けた材料表面に形成される突出し・入込みの形成機構をもとに各表面粗さの変化傾向について考察した. 各粗さパラメータは表面凹凸の高さ方向の特徴を表し,R_a は測定領域の振幅平均を示し,R_{max} と R_v は最も深い入込みに関係する. 入込みは将来的にき裂が発生する場所に対応するため,R_{max} と R_v による評価は損傷量を見積もるのに適していると考えられる. また,R_a の増加傾向と突出し・入込みを含むすべり帯の数の変化が類似することから,R_a では表面凹凸の全体的な変化を評価できる. 以上の考察より, 表面粗さが疲労損傷評価において有効な評価パラメータであることを示した.

第 3 章では, 前章で得られた SUS316NG 鏡面試験片表面の 3D 画像に対して高速フーリエ変換を行い, 表面に形成された凹凸 (表面うねり) の周波数成分を定量的に評価した. その結果,200〜500μm 程度の波長において最も大きなピークが得られた. また, このピークは *UF* の増加に伴い大きくなる傾向を示した. 表面の凹凸形状は結晶粒の変形に関係することから, ピークが得られた波長の内容について検討し, 表面うねりの形成機構を明らかにするため, 表面を腐食して結晶粒を観察できるように処理した試験片を用いてひずみ範囲一定の下疲労試験を実施した. そして結晶粒および試験片表面における変形挙動を調べた.

第 4 章では,SUS316NG の機械加工試験片を用いて 2 種類のひずみ範囲の下で疲労試験を行った.R_a,R_{max} および R_v を測定し, 鏡面試験片で得られた表面粗さと比較することで, 表面粗さの変化傾向に及ぼす表面仕上げの影響を検討した. 機械加工試験片において各表面粗さは, 鏡面試験片の場合と同様に,*UF* の増加に伴って寿命中頃まで線形的に増加した. また,R_a に関しては各試験片とも同程度の値となり, 表面仕上げの違いによる差異は認められなかった. 一方,R_{max} および R_v では, 大きなひずみ範囲において機械加工試験片の方が鏡面試験片よりも若干大きな値を示したが, これらの *UF* に対する増加傾向は表面仕上げに依らずほぼ等しかった. また, 小さなひずみ範囲では両試験片での表面粗さはほぼ同じであった. 以上のことから, 表面仕上げ方法が異なる場合でも, 表面粗さは *UF* に対して線形的に増加し, この傾向を用いることで表面粗さ測定に基づいた疲労損傷評価が可能であることを示した.

第 5 章では, 大きさの異なる 2 種類のひずみ範囲 (H,L) の下でこれらの付与履歴を H → L または L → H と変化させた二段二重疲労試験を実施し,R_a,R_{max},R_v を測定した. そして, ひずみ履歴が表面粗さの変化傾向に及ぼす影響について検討した. その結果,3 種類の表面粗さは 1 段目および 2 段目のひずみ範囲において *UF* の増加に伴い線形的に増加した. ひずみ範囲が変化すると *UF* に対する表面粗さの増加率は変化した. 各段での増加傾向は各ひずみ範囲一定試験で得られた傾向とほぼ一致した. このことから, ひずみ履歴が変化する場合の表面粗さの変化傾向は, 各ひずみ範囲条件で得られた増加傾向を付与された履歴順に重ね合わせることで記述できることが示された.

第 6 章では, これまでの結果をもとに, 表面粗さ測定を用いた疲労損傷評価方法について検討した. 各ひずみ範囲一定条件で取得した 3 種類の表面粗さパラメータと *UF* の関係を定式化した. この関係を用いて各表面粗さにおける任意の測定値から 3 つの *UF* を算出し, これらの差が最小となるときのひずみ範囲条件を求めることで, 測定値に対応する *UF* とこれを導入したひずみ範囲を判定した. すなわち, 測定した表面粗さから損傷量と負荷されたひずみを同定できることを示した.

第 7 章では, 本研究で得られた成果を総括した.