

オーステナイト系ステンレス鋼の 低サイクル疲労特性に及ぼす 繰返し予ひずみの影響と損傷評価

北海道大学[院] ○藤村奈央 北海道大学[院] 小熊博幸
北海道大学[院] 中村 孝

Damage Assessment on Low Cycle Fatigue Properties of Cyclic Pre-strained SUS316NG

Nao FUJIMURA, Hiroyuki OGUMA and Takashi NAKAMURA

1 緒 言

原子力発電設備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。しかし、このように損傷が蓄積された材料の疲労特性を高精度に予測する手法は確立されていない。そこで近年、地震荷重を模擬した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ている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。従来、地震荷重による損傷評価には、材料が受けた損傷を寿命の消費率で表す疲労累積係数 UF (線形損傷則に基づく疲労損傷値) が用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。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、疲労損傷過程にも着目する必要がある。

本研究では、原子力発電設備の配管部材として用いられているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を対象として、地震荷重を受けた部材を想定し、種々の繰返し数で予ひずみを付与した試験片に対して後続低サイクル疲労試験を行った。そして、予ひずみが材料の残存寿命に与える影響を明らかにした。また、材料に蓄積される損傷を疲労累積係数を用いて評価した。さらに、繰返し塑性変形によって変化する材料の表面粗さに着目し、予ひずみによる損傷を物理的な疲労損傷過程に基づいて評価した。

2 実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材には SUS316NG を用いた。化学成分は、C: 0.01, Si: 0.40, Mn: 1.70, P: 0.013, S: 0.001, Ni: 12.09, Cr: 16.64, Mo: 2.48, N: 0.10 (mass %) である。また機械的性質は、引張強さ: 580MPa, 0.2% 耐力: 252MPa, 伸び: 55%, 絞り: 80%, ブリネル硬さ: 149HBW である。試験片形状は、最小径 6mm, R 部 35mm の砂時計型とした。また、試験片は機械加工仕上げであり、表面粗さ (算術平均粗さ) Ra は 0.2 μ m である。

2.2 試験方法 試験は容量 100kN の油圧サーボ式試験機を用いて、径ひずみ制御で行った。試験環境は室温大気中とした。制御波形は三角波とし、ひずみ速度は 0.4%/sec とした。試験片の軸ひずみ $\varepsilon_{\text{axis}}$ ($= 0.5\Delta\varepsilon$) は試験片の直径変化から弾性ひずみを無視して $\varepsilon_{\text{axis}} = -2\ln(d/d_0)$ で換算した。ここで d_0 は試験前の直径、 d は試験中の直径である。本研究では、後続疲労寿命における繰返し予ひずみの影響を明らかにし、繰返し負荷による損傷を表

面粗さの変化で評価するため、以下の試験を実施した。

2.2.1 繰返し予ひずみ付与後の疲労試験 ひずみ比 R_e ($= \varepsilon_{\text{min}}/\varepsilon_{\text{max}}$) = -1 の下、繰返し予ひずみを一定ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_1 = 8\%$ で付与した後、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_2 = 2\%$ で疲労試験を行った。繰返し予ひずみの付与回数は $N_{\text{pre}} = 15, 28, 41, 55$ 回の 4 条件とした。これらによる損傷は $UF_{\text{pre}} = 0.2 \sim 0.8$ に相当する。疲労試験は、試験片が破断した場合、もしくは試験時の荷重が安定値の 7 割を下回った場合に終了とし、このときの回数を疲労寿命 N_f とした。

2.2.2 繰返し負荷を付与した試験片の表面粗さ測定 ひずみ比 $R_e = -1$ 、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 8\%$ の下、4 本の試験片に対して異なる繰返し負荷を付与した。繰返し数はそれぞれ $N = 14, 28, 41, 55$ 回とし、繰返し負荷による損傷量を $UF_{\text{pre}} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ とした。繰返し負荷付与後、各試験片の最小径部 4 ヶ所において表面粗さを測定した。表面粗さ測定ではカラー 3D レーザ顕微鏡 (VK-9700/9710 Generation II, KEYENCE) を用いて各測定点における 3 次元画像を取得し、専用の画像解析ソフトを用いて、各画像から算術平均粗さ Ra (JIS B0601:2001 に準拠) を求めた。

3 実験結果および考察

3.1 繰返し予ひずみ付与後の疲労試験

3.1.1 S-N 曲線 Fig.1 に疲労試験結果を示す。▲, ■, ●, ◆ はそれぞれ $N_{\text{pre}} = 15, 28, 41, 55$ 回の繰返し予ひずみ付与条件であり、△, □, ○, ◇ は各々の後続疲労試験結果を表す。また、図中の実線は $R_e = -1$ 、ひずみ範囲一定の条件で取得した予ひずみ無しでの最適曲線⁽³⁾である。後続疲労試験結果は、予ひずみ無しの場合よりも短寿命側に分布した。また、繰返し予ひずみの繰返し数が増加するのに伴って、後続疲労寿命は短くなる傾向を

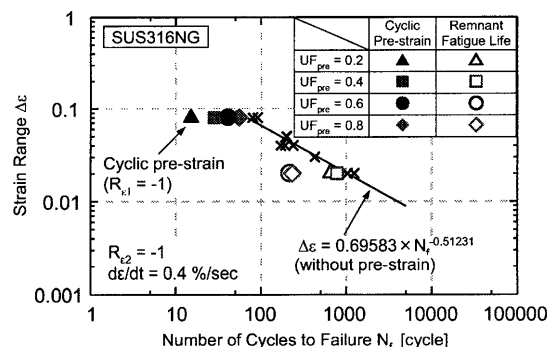


Fig. 1 $\Delta\varepsilon$ -N curves of pre-strained specimen.

示した。以上より、繰返し予ひずみは後続疲労寿命に対して影響を及ぼすことが明らかとなった。

3.1.2 疲労累積係数による損傷評価 繰返し予ひずみが後続疲労寿命に及ぼす影響を評価するために、疲労累積係数 $UF (= UF_{pre} + UF_{post} = N_{pre}/N_{f0,\Delta\epsilon_1} + N_{post}/N_{f0,\Delta\epsilon_2})$ を用いて試験結果を整理した。ここで、 N_{pre} は予ひずみの繰返し数、 N_{post} は後続疲労寿命 N_f である。また、 N_{f0} は $\Delta\epsilon_1$ および $\Delta\epsilon_2$ における予ひずみ無しでの疲労寿命であり、Fig.1 に示した最適曲線⁽³⁾を用いて求めた。繰返し予ひずみの疲労累積係数 UF_{pre} と後続疲労試験の疲労累積係数 UF_{post} の関係を Fig.2 に示す。図中の点線は $UF_{pre} + UF_{post} = 1$ の関係、すなわち線形損傷則を表している。Fig.2 において、予ひずみを付与した場合の評価結果（◆印）は線形損傷則を表す点線に対して $\pm 20\%$ の範囲に分布した。一方、予ひずみを付与しなかった場合の疲労累積係数 UF （○印）は $0.7 \sim 1.4$ 程度であり、予ひずみを付与した場合と予ひずみ無しの場合のばらつきが同程度であることから、繰返し予ひずみを付与した場合の後続疲労寿命は概ね線形損傷則で評価できることが確認された。しかし、評価結果におけるばらつきは小さいものではなく、高精度な損傷評価を行うためには、疲労損傷過程に基づいた評価手法の構築が必要である。

3.2 繰返し負荷付与過程における表面粗さの変化

3.2.1 表面観察結果 繰返し負荷付与前の試験片表面と $UF_{pre} = 0.2$ の損傷を付与した試験片表面を Fig.3 に示す。Fig.3(a)より、繰返し負荷付与前の試験片表面に顕著な凹凸は確認されなかった。一方、Fig.3(b)において、損傷が蓄積された表面には繰返し塑性変形によってすべり帯が現れ、凹凸が形成された。これは繰返し負荷を付与したことによって表面の粗さが付与前よりも増加したことを示している。この凹凸は UF_{pre} の増加、すなわち繰返し数の増加に伴って増加した。また他の試験片において、 $UF_{pre} = 0.4$ では微小き裂の発生が確認され、 $UF_{pre} = 0.6$ および 0.8 では大きく開口したき裂が認められた。

3.2.2 表面粗さ測定結果 各疲労累積係数 UF_{pre} での試験片の表面粗さを測定した。繰返し負荷の疲労累積係数と負荷付与後の表面粗さの関係を Fig.4 に示す。全ての試験片において、繰返し負荷により表面粗さが負荷前よりも増加した。また、損傷量の大きい試験片ほど粗さの

変化量は大きく、ひずみの繰返し数増加に伴い、表面粗さは線形的に増加する傾向を示した。以上のことは、繰返し負荷によって変化する表面粗さを測定することで、材料の疲労損傷を評価できる可能性を示唆している。

4 結 論

SUS316NG を対象として、異なる繰返し数で予ひずみを付与した試験片の後続低サイクル疲労試験を行い、繰返し予ひずみが材料の残存疲労寿命に及ぼす影響を検討した。その結果、後続疲労寿命は、予ひずみの繰返し数の増加に伴って、繰返し予ひずみを付与しない場合よりも短寿命となった。すなわち、繰返し予ひずみは後続疲労寿命に影響を及ぼすことが明らかとなった。また、後続寿命の傾向は従来の損傷評価手法である線形損傷則に概ね従った。繰返し予ひずみによる損傷を物理的な疲労損傷過程に基づいて高精度に評価するため、繰返し塑性変形によって変化する材料の表面粗さに着目し、損傷量と表面粗さの関係を調べた。表面粗さは、繰返し数の増加に伴って線形的に増加する傾向を示した。この結果より、表面粗さを測定することで、繰返し負荷による材料の疲労損傷を定量的に評価できる可能性がある。

参考文献

- 『材料強度及び疲労寿命に及ぼす繰返し予ひずみの影響』、原子力技術協会 「中越沖地震後の原子力機器の健全性評価委員会 (SANE 委員会)」 疲労・材料試験 WG, (2008)。
- 『地震荷重を受けた原子力機器材料の疲労強度特性評価に関する研究』、(社) 日本溶接協会 原子力研究委員会 LCF 小委員会, (2011)。
- Nao Fujimura, Hiroyuki Oguma and Takashi Nakamura, PVP2011-57832, ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference Proceeding, (2011)。

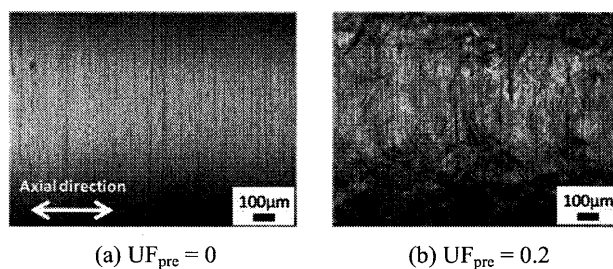


Fig. 3 Micrographs of surface of pre-strained specimens.

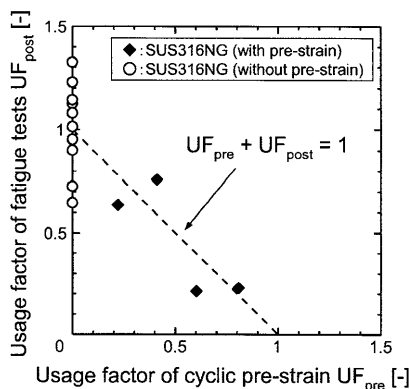


Fig. 2 Assessment results using usage factors.

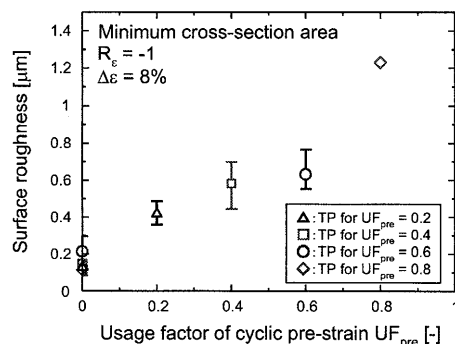


Fig. 4 Results of surface roughness measurement.