炭素鋼の疲労強度に及ぼすレーザピーニング処理条件の影響

Influence of Laser peening Condition on Fatigue Strength of Carbon Steel

○学 水上 祐 (静大院) 正 坂井田喜久 (静大)

正 吉田 始 (静大) 正 佐野 雄二 (東芝)

Yu Mizukami, Graduate School of Shizuoka University, age24

Yoshihisa Sakaida, Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Hajime Yoshida, Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Yuji Sano, Toshiba Co. Ltd.

Key Words: Surface Improvement, Water Laser Peening, Finite Element Method, Residual Stress

1. 緒言

ステンレス鋼に対するレーザピーニング加工は、加工表面に大きな圧縮残留応力^{1)~4)}を与えることができるため、原子力発電所の炉内構造部品の応力腐食割れに対する予防策として実プラントへの適用が始まっている。レーザピーニングによる残留応力発生メカニズム²⁾³⁾や表面強度に及ぼす影響は明らかにされつつあるが、ステンレス鋼以外の炭素鋼部品への影響⁵⁾⁶⁾やピーニング条件と表面強度の関係⁶⁾⁷⁾は未だ不明な点が多い。

本研究では、炭素鋼に対するレーザピーニングの効果を明らかにするため、焼鈍処理した炭素鋼に4条件でレーザピーニングを施し、表面残留応力を測定した。また、レーザ照射1パルスによる弾性波の伝播を有限要素法解析し、1パルスのレーザ照射による変形解析と残留応力との関係について検討した。さらに、回転曲げ疲労試験片にレーザピーニングを施し、疲労強度に及ぼす影響を検討した。

2. 実験および解析方法

2.1 供試材および試験片とレーザピーニング条件 供試材はS45C炭素鋼で、実験には、円板試験片と回転曲げ疲労試験片を用いた。いずれも焼準・焼鈍処理を行なった後、Nd:YAGレーザ出力光の第2高調波を用いて水中でレーザピーニングを行なった。なお、ピーニング処理は円板試験片にはTable.1に示す4条件で、回転曲げ疲労試験片には、Fig.1に示すつかみ部以外の試験片表面にLP2の処理条件で行った。

2.2 残留応力測定 残留応力は、PSPCを取り付けたX線応力測定装置(MSF-2M, 理学電機製)を用い、 $\sin^2\psi$ 法により測定した。実験は、加工面を逐次研磨除去しながら、研磨面にCr-K α 線の特性X線を照射し、Fe-211面に対して並傾法による $\sin^2\psi$ 線図の傾きから残留応力値を計算した。なお、研磨除去はエメリー紙により行い、測定面は電解研磨により仕上げた。応力定数は $K=-318\text{MPa/deg}$ である。

Table.1 Condition of laser peening

	LPI	LP2	LP3	LP4
Energy of laser(mJ)	200	200	60	10
Laser spot diameter(mm)	0.6	0.8	0.7	0.2
Irradiation time(puls/mm ²)	100	36	70	700
Plasma pressure(GPa)	4.2	3.2	2.0	2.8

2.3 レーザピーニングの有限要素法解析

2.3.1 解析対象 解析対象は、Fig.1に示すように円板を回転角1degでモデル化し、8節点六面体要素で要素分割した。解析は、照射スポットの中心に極座標原点を定義し、円板の厚み方向をz軸とした。なお、各要素にはTable.2に

示す機械的性質を与えた。なお、供試材の硬化則は引張試験により得られた応力ひずみ曲線から、次式で定義した。

$$\sigma = 740\epsilon^{0.24} + 350 \quad (1)$$

ここで、応力の単位はMPaで、n乗則の $n=0.24$ である。なお、モデル化はMentat2005により行い、衝撃波の応力伝播による応力解析は、市販ソフトMarcを用いてニューマークβ法により1ns間隔で行なった。

Fig.1 Finite element model

Table.2 Mechanical properties of S45C

Heat treatment	normalizing
Young's modulus, E (GPa)	206
Poisson's ratio, ν	0.3
Mass density, ρ (kg/m ³)	7830
Yield stress, σ_y (GPa)	0.35

2.3.2 境界条件

ピーニングの境界条件は、円板の底面をz軸方向に拘束し、z軸を対称軸、回転角方向の断面を対称面とし、Fig.2に示すようなレーザピーニング時のプラズマ圧を外力として与えた。

なお、本解析ではレーザは1パルスのみとして解析した。

2.4 回転曲げ疲労試験 疲労試験は、小野式回転曲げ疲労試験機を用い、周波数 $f=30\text{Hz}$ 、応力比 $R=-1$ の一定の曲げ応力を試験片に負荷した。なお、試験は、レーザピーニングを施していない炭素鋼に対しても行った。また、き裂の発生やその進展過程を観察するために、一定の繰返し回数ごとに、試験片表面のレプリカを採取し、破断後に、レプリカ上のき裂の長さを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 残留応力測定結果 Fig.3は、ピーニング処理面下の残留応力分布を示す。なお、レーザ光を走査する方向を $\phi=0$ 方向、それに直交する方向を $\phi=\pi/2$ 方向と定義し、図にはレーザピーニング処理前の円板表面の残留応力値を実線($=-104\text{MPa}$)で示した。4条件とも加工面から数 μm 内部に最大圧縮応力が発生している。圧縮残留応力の最大

Fig.2 Plasma pressure distribution

値については、単位面積当たりの照射回数が多い条件 4 の $\phi=0$ 方向だけは、他条件に比べやや大きな値を示したが、焼入材に認められたような処理条件による差異⁸⁾は明確には認められず、塑性応力 350MPa 程度の値となっているのが特徴である。一方、圧縮残留応力の存在域は処理条件により差異が現れた。Table 3 に実験により得られた圧縮残留応力の最大値 σ_{max} とピーニング処理により新たに得られた圧縮残留応力の最大深さ Δz_{exp} をまとめて示す。

Table.3 Experimental value

Laser condition	LP1	LP2	LP3	LP4
σ_{max} (MPa)	-349	-338	-334	-404
Δz_{exp} (mm)	0.70	0.96	0.40	0.25

3.2 FEM 解析結果と残留応力分布の関係 FEM 解析は、レーザ照射 1 パルスによる変形解析であり、X 線による残留応力測定結果と直接比較はできない。そこで、本研究では、レーザピーニングによる残留応力発生は、弾性波の伝播によって生ずる表面下の塑性変形により生ずると考え、4 条件の FEM 解析の結果から、円板試験片に発生する相当塑性ひずみに注目し、相当塑性ひずみの最大値と相当塑性ひずみが発生する最大深さを求め、Table.4 にまとめて示した。Fig.4 は、X 線応力測定により得られた圧縮残留応力の最大値 σ_{max} と FEM 解析により得られた相当塑性ひずみの最大値 ϵ^p_{max} の関係を示す。また、Fig.5 は、圧縮残留応力域の存在深さ Δz_{exp} と相当塑性ひずみの存在深さ Δz_{FEM} の関係を示す。圧縮残留応力の最大値と相当塑性ひずみの最大値は焼入材と同様⁸⁾に比例関係が得られると考えていたが、4 条件とも、圧縮残留

Fig.4 σ_{max} - ϵ^p_{max} relation

Fig.5 Δz_{exp} - Δz_{FEM} relation

応力の最大値にほとんど差がなかったため、明確な関係にはならなかった。一方、圧縮残留応力の存在深さと相当塑性ひずみの存在深さは焼入材と同様⁸⁾に比例関係を示し、相当塑性ひずみの存在域が深いほど、圧縮残留応力の存在域が深いことがわかった。

Table.4 Analytical value

Laser condition	LP1	LP2	LP3	LP4
ϵ^p_{max} (%)	7.63	4.34	1.38	3.67
Δz_{FEM} (mm)	0.87	0.87	0.69	0.30

3.3 回転曲げ疲労試験結果 4 つのレーザピーニング条件で、最も圧縮残留応力が深くまで発生しているのは LP2 条件であることがわかった。そこで、回転曲げ疲労試験片に LP2 条件でピーニング処理を行い、疲労強度や疲労き裂の進展に及ぼす影響を検討した。

Fig.6 は、レーザピーニングを施した S45C の S-N 曲線を点線で示す。図には、レーザピーニングを施す前の供試材の S-N 曲線を実線で示した。図より、レーザピーニングを施すことにより、S-N 線図の傾斜部が長寿命側にシフトしていることがわかる。実験では、同じ応力レベルで比較すると、疲労寿命が約 1.5 倍増大していることがわかった。レーザピーニングにより、試験片表面には圧縮残留応力が発生することから、疲労き裂の発生寿命や進展寿命が増加することが予想される。そこで、レーザピーニングが疲労破壊までの疲労き裂進展に及ぼす影響を検討した。Fig.7 は、応力レベル 300MPa における表面疲労き裂長さとの繰返し回数の関係を示す。図中の□印がレーザピーニング材の $\sigma_{max}=311$ MPa における疲労き裂長さ、■印が焼準・焼鈍材の $\sigma_{max}=304$ MPa における結果を示す。図より、き裂発生寿命は、焼準・焼鈍材では 8.0×10^4 回であるのに対し、レーザピーニング材では 1.1×10^5 回となり、表面の圧縮残留応力の存在により、疲労き裂が発生するまでの寿命が長くなっていることがわかる。次に、疲労き裂発生から疲労破壊時の臨界き裂長さまでの寿命を求めると、焼準・焼鈍材では 1.2×10^5 回であるのに対し、レーザピーニング材では 1.7×10^5 回となり、疲労き裂発生寿命だけでなく、疲労き裂進展寿命も長くなっていることがわかった。即ち、回転曲げ疲労試験の場合、疲労き裂は表面から進展するが、レーザピーニングによる圧縮残留応力の存在により、疲労き裂の応力拡大係数が応力遮蔽されて疲労き裂進展寿命も長くなったと考えられる。

Fig.6 S-N curve

Fig.7 Crack growth curve

結言および参考文献 (省略)