



K Takahashi



R Fueki

レーザピーニングによる溶接部の疲労強度向上とき裂の無害化

高橋 宏治^{*1}笛木 隆太郎^{*2}

1. 緒言

圧力容器や高圧配管などのエネルギー機器は、構成部品の多くが溶接により接合された溶接構造物である。溶接部では、溶接余盛の形成に伴う応力集中や溶接の熱影響による引張残留応力の発生により、疲労き裂や応力腐食割れ等の疲労強度上有害な表面欠陥が発生しやすい。

著者らは、ピーニングによって導入される圧縮残留応力が欠陥の開口を抑制する効果に着目し、表面欠陥をピーニングで無害化することにより材料の信頼性を向上させる構想を提案しており、これまでに種々の研究を実施している。たとえば、き裂状表面欠陥（半円スリット）を導入した高強度鋼の平滑試験片に対してショットピーニングを施工し、表面部に圧縮残留応力を導入することにより、深さ 0.2 mm の半円スリットが無害化されることを明らかにしている¹⁾。また、溶接部については、溶接止端部に半円スリットを導入したステンレス鋼^{2), 3)}および低炭素鋼^{4), 5)}の溶接試験片に対してニードルピーニングを施工することにより、両者ともに少なくとも深さ 1 mm 以下の半円スリットが無害化されることを明らかにしている。

近年、原子力発電プラントでは、原子炉内の溶接部における応力腐食割れ（SCC）の発生防止にレーザピーニング（LP）が高い有用性を有することが確認され、すでに実用化されている^{6), 7)}。LP は、Fig. 1 に示すように、水中で材料に短パルスレーザを照射することで材料表面に発生するプラズマの膨張を水の慣性により抑制し、エネルギーを集中させることで、衝撃波の発生を誘起するピーニング法である。衝撃波が材料内部を伝播することで、材料表面部に塑性変形が生じ、圧縮残留応力が導入される。LP は自動制御で正確な施工が可能であり、溶接部に対する局所的な施工に適している。

LP 施工の効果を調査した研究は、先述の耐 SCC 性に及ぼす効果に関する研究のほか、ステンレス鋼⁸⁾やアルミニウム合金⁹⁾の疲労強度に及ぼす効果に関する研究がある。また、低炭素鋼¹⁰⁾ならびに高張力鋼¹¹⁾の溶接部の疲労強度に及ぼす LP 施工の効果を調査した結果も報告されている。しかし、溶接部に表面欠陥が存在する溶接継手の疲労強度に及ぼす LP 施工の効果について、欠陥の無害化

の観点から議論した事例はみられない。

LP 施工により無害化可能な表面欠陥寸法が明らかにされれば、溶接部の信頼性向上に資する知見が得られる。そこで、本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼の突き合わせ溶接継手を対象として、施工条件の違いが残留応力分布の挙動に及ぼす影響を調査し、欠陥の無害化に適した施工条件を決定した上で、その施工条件下における溶接継手の疲労限度の改善効果ならびに無害化可能な欠陥寸法を疲労試験により実験的に調査した。さらに、LP 施工に伴う溶接止端部近傍の硬さ、組織、応力集中の変化を調査し、実験結果との因果関係について考察を行った。

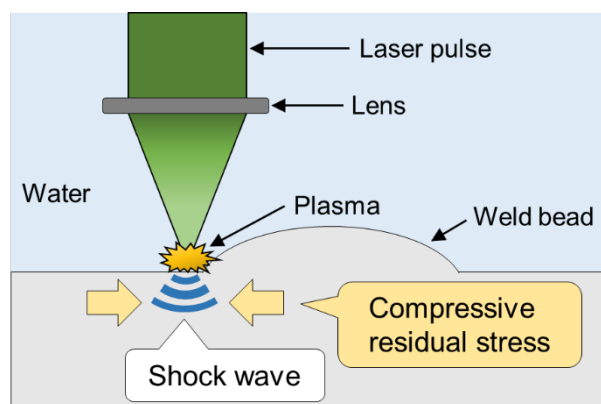


Fig. 1 溶接部への LP 施工の概要

2. 供試材および試験片作製方法

2.1 供試材

供試材はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 である。SUS316 の化学成分および機械的特性をそれぞれ Table 1 および Table 2 に示す。

Table 1 SUS316 の化学成分 (質量%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.04	1.00	0.91	0.034	0.002	10.13	16.82	2.05

^{*1} 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 ^{*2} 海上技術安全研究所

Table 2 SUS316 の機械的性質

0.2% proof stress [MPa]	306
Ultimate tensile stress [MPa]	582
Vickers hardness HV	193

2.2 試験片作製方法

Fig. 2 (a) のような縦×横×厚さ＝280 mm×220 mm×7 mm の寸法の素材板に対し、短辺の中央部に半径 1.5 mm 深さ 0.5 mm の U 字開先を加工した後、溝部に Table 3 の溶接条件にて TIG 溶接を行った。溶接部の形状のばらつきを小さくするため、溶接には自動溶接機を使用した。試験片は素材板の圧延方向が試験片の長手方向に一致するように短冊状に切り出すことにより作製した。溶接試験片の形状および寸法を Fig. 2 (b) に示す。

Table 3 溶接条件

Number of layers	1
Number of passes	1
Welding position	Flat
Diameter of welding rod [mm]	Φ 3.2
Current [A]	160
Voltage [V]	9
Welding speed [cm/min]	13

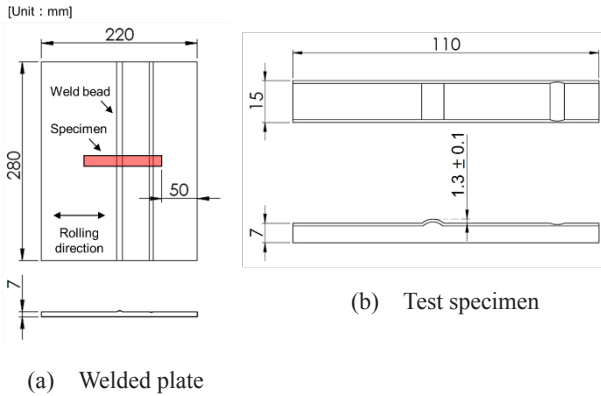


Fig. 2 試験片の形状および寸法

3. LP 施工条件の最適化

3.1 LP 施工条件ならびに施工方法

LP に使用したレーザは波長 532 nm の Nd : YAG レーザで、パルス幅 t は 6.2 ns、1 秒あたりのパルス発振数（周波数）は 10 Hz である。本研究では、単位面積あたりに投入されるエネルギーを表すパワー密度 G と単位面積あたりの照射痕の重なりを度合いを表すカバレッジ C_v に着目し、 G と C_v の違いが LP 施工後の残留応力分布に与える影

響について調査した。具体的には、Table 4 に示す 6 種類の条件について調査した。Table 4 において、 E_p はパルスエネルギー、 N_p は照射密度である。

LP の施工範囲は Fig. 3 に示すように、両側の溶接止端部より 10 mm の位置を始点および終点として溶接余盛と熱影響部をカバーする範囲とした。施工にあたっては、試験片を電動ステージの台座に固定し、始点から溶接線方向にステージを動かし、1 列分レーザを照射した後、溶接線垂直方向にステージをずらして溶接線方向へさらに 1 列照射する動きを繰り返すことにより、所定の範囲にレーザが照射されるようにした。

Table 4 LP 施工条件

	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6
E_p [mJ]	120	250	370	490	490	480
D [mm]	1.0					
N_p [1/mm ²]	38				64	127
G [GW/cm ²]	2.5	5.1	7.6	10	10	10
C_v [%]	3000				5000	10000

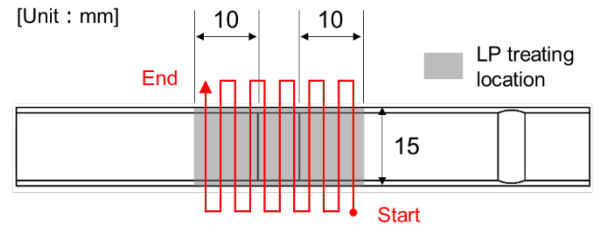


Fig. 3 LP 施工箇所

3.2 残留応力測定方法

溶接継手の疲労破壊は主に溶接止端部を起点として発生するため、溶接止端部近傍の残留応力は溶接継手の疲労強度に大きく影響する。そこで、溶接まま材と Table 4 に示した LP1～LP6 の 6 条件で LP 施工した試験片について、溶接止端部近傍の長手方向の残留応力を測定した。

残留応力測定には X 線回折応力測定装置を使用し、 $\cos\alpha$ 法により残留応力を計測した。回折面には CrK β 特性 X 線による 311 面を利用した。コリメータは $\phi 1.0$ mm (X 線照射範囲： $\phi 2.0$ mm) のものを使用した。測定にあたっては、X 線照射範囲の中心が溶接止端線より 1 mm 離れるようにし、溶接止端部に最も近い領域の残留応力が測定されるようにした。

オーステナイト系ステンレス鋼は結晶粒が大きいので、試験片を静置した状態では十分な X 線回折ピークが得られなかったが、試験片の角度を変えて揺動しながら X 線を照射することにより、残留応力の計測に十分な回折ピークを得た。深さ方向の残留応力分布は試験片表面を電解研磨で逐次除去し、露出した面に対して応力測定を行うことにより測定した。この方法では表面を除去するたびに試験片内部で残留応力分布が再配分されるため、内部の厳密な

残留応力が得られない。そこで、各測定データに対し、表面除去に伴う応力再配分を考慮した補正計算¹²⁾を行った。

3.3 残留応力測定結果

残留応力分布の測定結果を Fig. 4 から Fig. 6 に示す。Fig. 4 は溶接ままの残留応力分布である。Fig. 5 および Fig. 6 は LP 施工後の残留応力分布で、Fig. 5 はカバレッジ C_v を固定し、パワー密度 G のみを変化させた場合の結果、Fig. 6 は G を固定し、カバレッジ C_v のみを変化させた場合の結果を示している。

Fig. 5 および Fig. 6 における最表面の残留応力を Fig. 4 と比較すると、いずれの LP 施工条件でも溶接により表面部に生じた引張残留応力が LP 施工により圧縮残留応力に変化していることがわかる。

Fig. 5 より、 G の違いが残留応力分布に与える影響を見ると、最表面部に導入される圧縮残留応力は、 G が 7.6 GW/cm² までは G の増加とともに大きくなる傾向が見られるが、 G を 10 GW/cm² まで増大させるとかえって小さくなっている。これは、 G を増加させるとピーニングの強度が上がる一方、入熱量も増加するため、最表面部では熱の影響が大きくなり、圧縮残留応力が小さくなったものと考えられる。また、いずれの施工条件でも圧縮残留応力は、深さ 0.05 mm~0.1 mm で最大となっており、その絶対値は G が増加するほど増加する傾向が見られる。さらに、 G が増加するほど、同一深さに対する圧縮残留応力の絶対値が大きく、残留応力が圧縮から引張へ変化するクロッシングポイントも大きくなる傾向が見られる。

次に、Fig. 6 より、 C_v の違いが残留応力分布に与える影響を見ると、先述の G をパラメータとしたときほど残留応力分布に大きな差はないように見えるが、最表面部の残留応力については、 C_v が 10000% のように、 C_v を増加させすぎると圧縮残留応力が小さくなっている。これは先述の G の影響と同じく、熱影響の増加によるものと考えられる。

著者らの過去の研究¹³⁾において、圧縮残留応力を深くまで導入するほど、より大きな欠陥を無害化できることがわかっている。さらに、溶接部では最表面部に応力集中が生じるため、最表面の圧縮残留応力の絶対値もできる限り大きいことが望ましい。以上の観点から、 $G = 7.6$ GW/cm²、 $C_v = 3000\%$ の施工条件 (Table 4 の LP3) を最適施工条件と決定した。

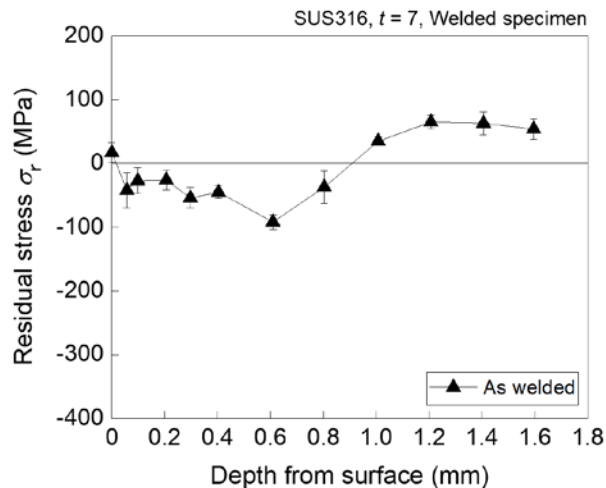


Fig. 4 溶接ままの残留応力分布

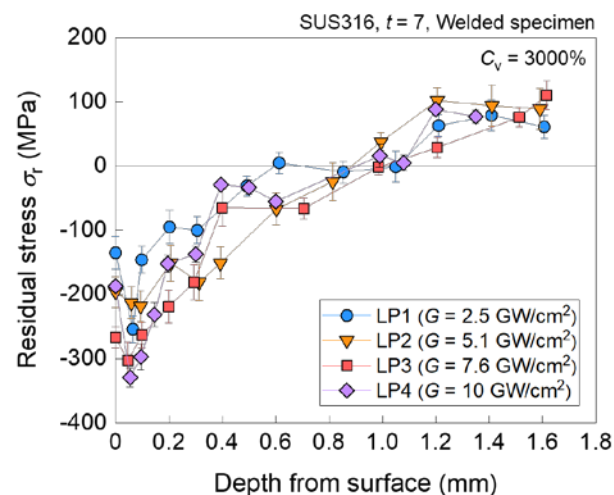


Fig. 5 パワー密度と残留応力分布の関係

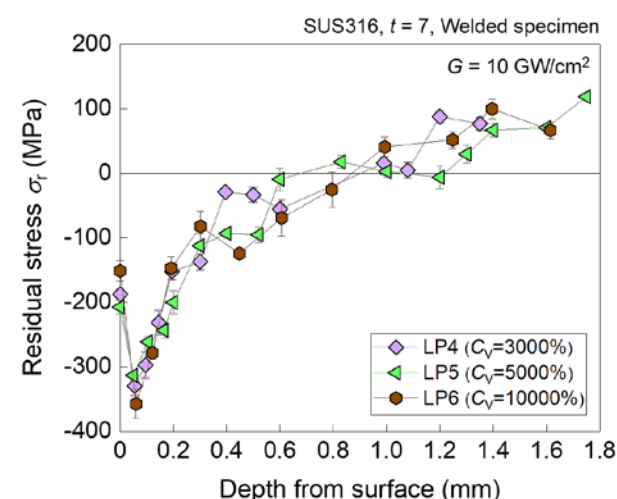


Fig. 6 カバレッジと残留応力分布の関係

4. 疲労試験方法

溶接止端部に疲労き裂等の表面欠陥が発生した場合を想定し、溶接止端部に人工表面欠陥（半円スリット）を導入した溶接試験片の疲労強度に及ぼす LP 施工の効果を疲労試験により実験的に調査した。

試験片の加工フローを Fig. 7 に示す。疲労試験に供した溶接試験片は溶接まま（W）材、LP 施工（WL）材、半円スリット導入（WS）材、LP 施工後半円スリット導入（WLS）材の 4 種類である。WL 材および WLS 材における LP 施工は 3.3 節で決定した最適施工条件（LP3）で実施した。LP を施工した全ての試験片について、3.2 節で述べた要領で溶接止端部近傍における最表面部の残留応力を測定したところ、残留応力の平均値は -242 MPa、標準偏差は 37 MPa であった。

Fig. 8 に半円スリットの形状および寸法ならびにスリット導入位置を示す。半円スリットのアスペクト比は 1 であり、その寸法は深さ a (mm) / 表面長さ $2a$ (mm) = 0.2 / 0.4, 0.5 / 1.0 の 2 種類とした。ただし、WS 材については深さ 0.2 mm の 1 種類のみ疲労試験を実施した。スリットの開口幅は 0.1 mm 程度である。スリットは溶接止端線より 0.1 mm の位置に放電加工で導入した。以後、WS 材および WLS 材については導入したスリットの深さを末尾に付記してその大きさを表すこととする。例えば、WS0.2 材は深さ 0.2 mm のスリットを導入した試験片であることを表す。油圧サーボ式疲労試験機を使用して荷重制御のもと、疲労試験を実施した。疲労試験の荷重負荷形式は三点曲げである。Fig. 8 に示すように、三点曲げのスパン長さは 80 mm で、スリット部に最大曲げ応力が作用するようになっている。応力比 R は 0.05、繰返し周波数 f は 20 Hz である。疲労試験は 1×10^7 回の繰返しをもって打ち切り、 1×10^7 回の繰返しに耐えた最大の応力振幅を疲労限度と定義した。

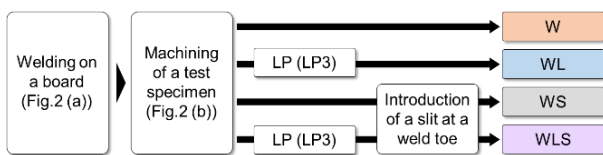


Fig. 7 試験片の加工フロー

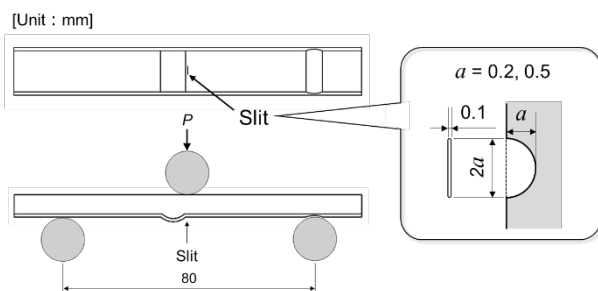


Fig. 8 スリットの形状および寸法

5. 疲労試験結果

疲労試験により得られた $S-N$ 線図を Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、WL 材の疲労限度は W 材に比べて 23% 上昇しており、LP 施工により溶接継手の疲労限度が改善されていることがわかる。ここで、欠陥の無害化の定義を以下に示す。疲労試験結果が下記の条件 1, 2 のいずれかを満たす場合、その欠陥は無害化されたと定義する。

1. WLS 材の疲労限度が WL 材の疲労限度と同等（90%以上）まで向上すること。
2. WLS 材について、欠陥部以外よりき裂が発生し、破断すること。

Fig. 10 は疲労試験結果を応力振幅とスリット深さの関係としてまとめたグラフである。Fig. 10 より、WLS0.2 材の疲労限度は WS0.2 材に比べて 64% 上昇し、WL 材と同等以上の値となっているため、欠陥の無害化の条件 1 を満たしており、LP 施工により、深さ 0.2 mm のスリットが無害化されることがわかった。WLS0.2 材の疲労限度は WL 材に比べて 13% 程度高くなっているが、これは WL 材の溶接止端部における表面残留応力が -250 MPa であったのに対し、WLS0.2 材では -300 MPa であり、WLS0.2 材の方が圧縮残留応力が大きくなっていての影響によるものと考えられる。この残留応力の差は LP 施工のばらつきに起因するものである。

WLS0.2 材について、疲労試験中に破断に至った試験片の破面を観察したところ、半円スリットとは別の位置が疲労き裂の発生起点となっていることがわかった。したがって、き裂発生起点の観点からも、LP 施工により、深さ 0.2 mm のスリットが無害化されたといえる。

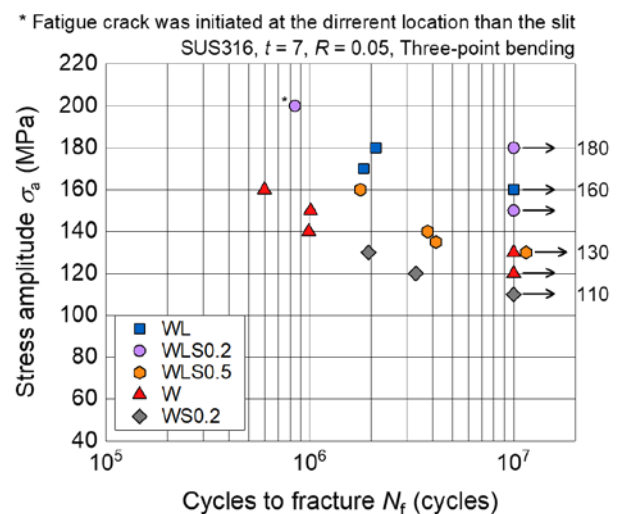


Fig. 9 $S-N$ 線図

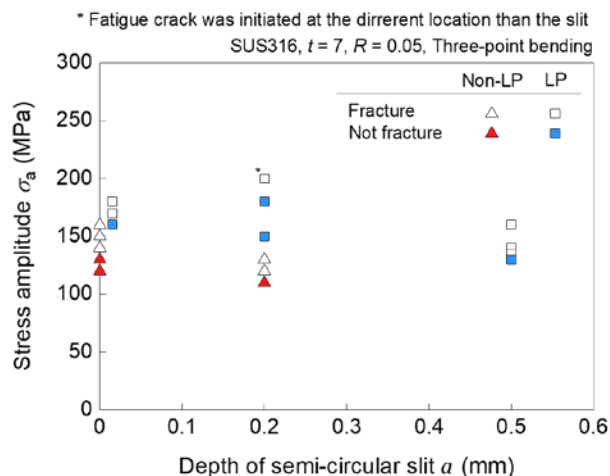


Fig. 10 疲労試験結果のまとめ

6. LP 施工による疲労限度改善要因の分析

LP 施工により疲労限度が改善された要因としては、3.3 節で述べた残留応力の改善のほか、硬さや組織、溶接止端部の応力集中が LP 施工により変化することが考えられる。そこで、LP 施工が硬さおよび組織、溶接止端部の応力集中に及ぼす影響を調査し、考察を行った。

6.1 硬さ分布の測定

W 材ならびに WL 材の溶接試験片を長手方向に切断し、マイクロビッカース硬度計で溶接止端部近傍の硬さ分布を測定した。圧子押し込み荷重は 1.961 N (0.2 kgf)，荷重保持時間は 20 s とし、硬さは同一深さに対して 3 点ずつ測定した。

硬さ分布を Fig. 11 に示す。WL 材では最表面近傍において硬さの増加が見られるが、増加量は小さい。WL 材の硬さは深さが大きくなるにつれて緩やかに低下し、深さ 0.4 mm 以降は W 材のそれとほぼ同水準となっていた。

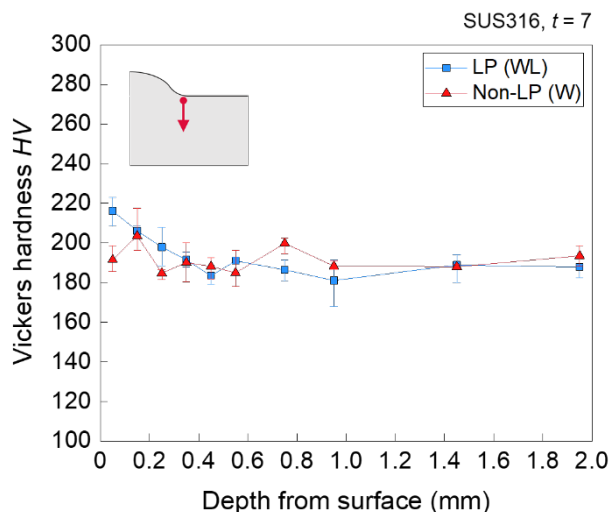


Fig. 11 ビッカース硬さの深さ方向分布

6.2 組織観察

溶接止端部近傍の試験片断面を鏡面仕上げまで研磨した後、飽和シュウ酸水溶液中にて 6.0 V の一定電圧下で 60 s 電解エッチングを行い、金属組織を露出させた。Fig. 12 および Fig. 13 はそれぞれ W 材および WL 材に対する光学顕微鏡による組織観察写真である。Fig. 12 と Fig. 13 を比較すると、両者ともにオーステナイト相を呈しており、LP を施工しても加工誘起マルテンサイト相の生成や結晶粒の微細化といった組織の変化はみられないことがわかる。したがって、6.1 節で述べた LP 施工による表層部における硬さの増加は、表層部の塑性変形に伴う転位の導入により生じた加工硬化によるものと考えられる。

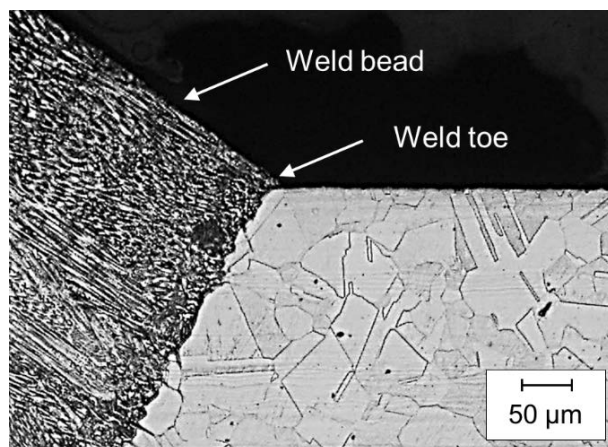


Fig. 12 W 材の光学顕微鏡観察写真

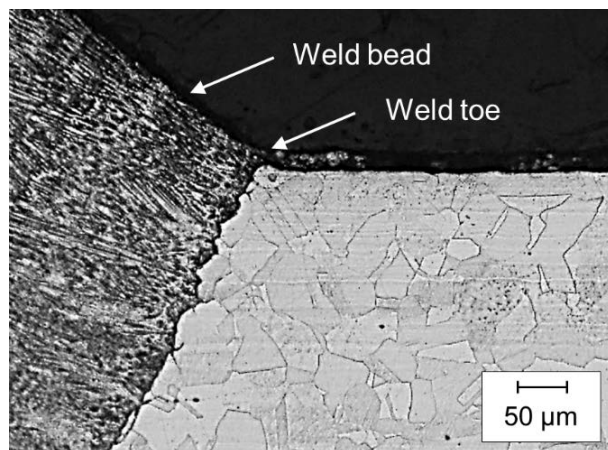


Fig. 13 WL 材の光学顕微鏡観察写真

6.3 溶接止端部における応力集中の有限要素解析供試材

溶接止端部の形状計測結果の平均値をもとに FE モデルを作成し、弾性解析を実施することにより、LP 施工の有無による溶接止端部の応力集中の違いについて調査した。FE モデルの例として、Fig. 14 に W 材の FE モデルを示す。FE モデルは 6 面体 2 次要素で構成し、ヤング率は 197 GPa、ポアソン比は 0.3 とした。溶接止端部近傍では要素分割を細かくし（最小： $X \times Y \times Z = 0.05 \times 0.05 \times 0.5$ mm），溶接止端

部において必要十分な応力集中が生じるようにした。

解析の結果、溶接止端部における応力集中係数は W 材で 2.4, WL 材で 2.5 であった。これより、LP 施工による応力集中の緩和効果はほとんどなく、LP 施工が作用応力分布に及ぼす影響は小さいといえる。

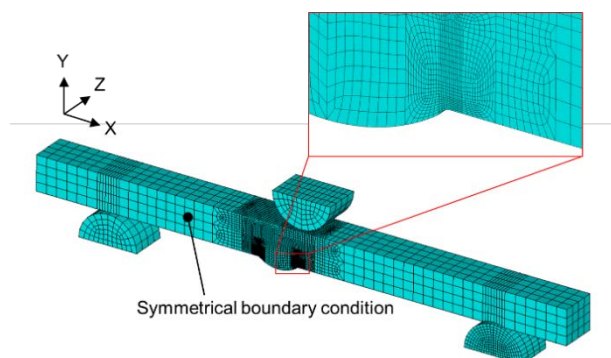


Fig. 14 溶接試験片の有限要素モデル

6.4 LP 施工による疲労限度改善要因供試材

6.1 節から 6.3 節で述べた調査結果より、LP 施工による硬さの増加は小さく、溶接止端部における応力集中の緩和効果もみられないことがわかった。したがって、LP 施工による疲労限度の改善ならびに欠陥の無害化は、LP 施工により残留応力が引張から圧縮に変化したことによってもたらされたものといえる。

7. 過去の研究結果との比較からみる LP の有用性

著者らは過去の研究において、本研究と同じオーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手に対して欠陥の無害化に及ぼすニードルピーニング (NP) の効果を調査しており、深さ 1.0 mm の半円スリットを無害化可能との結果を得ている^{4),5)}。過去の研究と本研究では試験片の寸法が異なるため、無害化可能な欠陥寸法について単純比較することはできないが、NP を施工する方が LP を施工する場合に比べて無害化可能な欠陥寸法は大きくなるようである。このような差が生じた背景には、NP は鋼製のピンを溶接止端部に直接打撃するため、塑性加工量が非常に大きくなるのに対して、LP は衝撃波を利用しており、固体間の接触を伴わないため、塑性加工量が NP に比べて大幅に小さいことが関係していると考えられる。

NP 施工を実施した溶接試験片³⁾では、硬さの大幅な増加や加工誘起マルテンサイト相の生成により、母材の降伏応力を超える大きな圧縮残留応力が導入されていた。さらに、溶接止端部の形状変化に伴い応力集中も大幅に低減された。これらの相乗効果により、NP を施工する方が LP を施工する場合に比べて無害化可能な欠陥寸法が大きくなったものと考えられる。

ただし、NP 施工に伴う硬さの大幅な増加やマルテンサイト相の生成は、SCC 等の割れに対する感受性を高める

ほか、磁性の発生といった材料特性の変化を引き起こす。このような事象を好まない場合、材料特性をほとんど変化させることなく圧縮残留応力を導入できる LP は大変有用なピーニング方法であるといえる。

8. 結言

本研究では、溶接止端部にき裂状表面欠陥を有するオーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手を対象に、欠陥の無害化に適したレーザピーニング (LP) 施工条件を決定し、その施工条件下における溶接継手の疲労限度の改善効果ならびに無害化可能な欠陥寸法を疲労試験により実験的に調査した。さらに、LP 施工に伴う溶接止端部近傍の硬さ、組織、応力集中の変化を調査し、実験結果との因果関係について考察した。本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- (1) パワー密度 G とカバレッジ C_v の組み合わせが異なる 6 種類の LP 施工条件を設定し、溶接試験片に LP 施工した後、溶接止端部近傍における深さ方向残留応力分布を測定した。最表面残留応力、残留応力最大値、クロッシングポイントの大きさの観点から $G = 7.6 \text{ GW/cm}^2$, $C_v = 3000\%$ の施工条件を最適条件と決定した。
- (2) 溶接試験片に対して最適施工条件で LP 施工し、疲労試験を実施した。LP 施工により、無欠陥の溶接継手の疲労限度は 23% 向上した。また、溶接継手の疲労限度を 15% 低下させる深さ 0.2 mm の半円スリットを LP 施工により強度上無害化できることがわかった。
- (3) 溶接止端部近傍における深さ方向の硬さ分布を測定した。LP 施工後では最表面近傍において硬さの増加が見られたが、増加量としては小さかった。LP 施工前後で金属組織に変化はみられなかったため、表層部における硬さの増加は加工硬化によるものと考えられる。
- (4) 溶接試験片の形状測定を実施したところ、LP 施工による止端半径の変化はほとんどなく、有限要素法解析の結果からも溶接止端部における応力集中の緩和効果はみられなかった。
- (5) LP 施工による疲労限度の改善ならびに欠陥の無害化は、LP 施工により残留応力が引張から圧縮に変化したことによってもたらされたものといえる。

謝 辞

本研究の一部は平成 27 年度天田財団一般研究開発助成 (課題番号: AF-2015211) の助成を受けて実施されたものです。レーザピーニング施工においては、新東工業株式会社の桑野文亮様と澁谷紀仁様にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋宏治, 天野利彦, 花折和也, 安藤柱, 高橋文雄; “き裂状表面欠陥を有する高強度鋼のショットピーニングによる疲労限度向上と表面欠陥の無害化”, 材料, Vol. 58, No. 12, p. 1030–1036 (2009).
- 2) 笛木隆太郎, 安部央矩, 高橋宏治, 安藤柱, 北條恵司, 半田充; “溶接止端部にき裂を有するステンレス鋼のピーニングによる疲労限度向上とき裂の無害化”, 圧力技術, Vol. 53, No. 3, p. 140–148 (2015).
- 3) Fueki R., Takahashi K. ; “Prediction of fatigue limit improvement in needle peened welded joints containing crack-like defects”, International Journal of Structural Integrity, Vol. 9, No. 1, p. 50–64 (2018).
- 4) 北條恵司, 高橋宏治, 安藤柱, 関口祐司; “溶接止端部にき裂を有する構造用圧延鋼のピーニングによる疲労限度向上およびき裂の無害化”, 日本機械学会論文集A編, Vol. 79, No. 797, p. 110–114 (2013).
- 5) Fueki R., Takahashi K., Houjou K. ; “Fatigue Limit Prediction and Estimation for the Crack Size Rendered Harmless by Peening for Welded Joint Containing a Surface Crack”, Materials Sciences and Applications, Vol. 06, No. 06, p. 500–510 (2015).
- 6) 佐野雄二, 小畑稔, 濱本良男, 嶋誠之; “レーザピーニング技術の開発と原子炉炉心シュラウドへの適用”, 材料, Vol. 49, No. 9, p. 1067–1068 (2000).
- 7) Sano Y., Obata M., Kubo T., Mukai N., Yoda M., Masaki K., Ochi Y. ; “Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating”, Materials Science and Engineering: A, Vol. 417, No. 1, p. 334–340 (2006).
- 8) 佐野雄二; “構造物の寿命を延ばすレーザピーニング”, 表面技術, Vol. 60, No. 11, p. 698 (2009).
- 9) 政木清孝, 辻俊哉, 小林祐次; “A7075-T651 材の片振り平面曲げ疲労特性に及ぼすピーニング処理の影響”, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 826, p. 3–15 (2015).
- 10) 崎野良比呂, 佐野雄二, 角谷利恵, 金裕哲; “レーザピーニングによる突合せ溶接継手の疲労強度向上とその主要因”, 溶接学会論文集, Vol. 29, No. 3, p. 146–153 (2011).
- 11) 崎野良比呂, 吉川健一, 佐野雄二, 角谷利恵, 金裕哲; “レーザピーニングを大型構造物に適用するための基礎的検討”, 溶接学会論文集, Vol. 31, No. 4, p. 231–237 (2013).
- 12) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明; “残留応力の X 線評価ー基礎と応用ー”, 東京, 養賢堂, (2006), 363p.
- 13) 北條恵司, 高橋宏治, 安藤柱, 笛木隆太郎, 岡田秀樹; “ショットピーニングによる表面き裂の無害化寸法に与える材料硬さの影響”, 材料, Vol. 64, No. 11, p. 859–864 (2015).