

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月11日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360214

研究課題名（和文） レーザピーニングによる鋼構造溶接部の疲労強度向上手法の実用化

研究課題名（英文） Improving Fatigue Strength of Welded Joints by Laser Peening

研究代表者

崎野 良比呂 (SAKINO YOSHIHIRO)

大阪大学・接合科学研究所・講師

研究者番号：80273712

研究成果の概要（和文）：

大型鋼構造物の溶接部に適用可能なノズル式レーザーピーニング装置を開発した。また、小型試験体での残留応力測定によりノズル式でも大きくて深い圧縮残留応力が生成されることを明らかにした。さらに、レーザーピーニングの疲労寿命向上効果を、これまで不可能であった大型試験体での疲労試験で確認した。

本成果によりレーザーピーニングによる疲労強度向上手法が実構造物にも基本的に適用可能となった。

研究成果の概要（英文）：

Nozzle-type laser peening unit, which can apply to welding joints of large steel structures, was developed in this study. Then, it was elucidated by residual stress measurement that large and deep compressive residual stress was also generated by nozzle-type laser peening. Moreover, improving fatigue strength of welded joints after laser peening was ascertained by conducting fatigue tests using large specimens.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：レーザーピーニング，溶接，疲労，残留応力，大型試験体

1. 研究開始当初の背景

橋梁、建築、発電所、プラント、エネルギー貯蔵・輸送等の産業及び社会基盤を支えている鋼構造物は、わが国の大切な社会資本ストックである。20世紀、わが国の高度成長期に建設された多くのこれら社会資本ストックが徐々に設計寿命を迎えつつあり、そのリメイクやメンテナンスがわが国の喫緊の

課題となりつつある。特に、近年の交通量/重量の増加にともない、自動車専用道路の橋梁に予想を遙かに超えた数と長さのき裂が見つかり、鋼橋の架け替えもしくは補修・補強による疲労強度強化の重要性が広く認識されてきている。

研究代表者らは、これら疲労き裂を防止するための手法として、レーザーピーニングに注

目した。レーザーピーニングを行うと高い圧縮残留応力が形成されるため、応力腐食割れの防止に有効であることが知られており、原子炉の炉心シュラウド等に実用化されている。さらに、疲労強度の向上効果についてもステンレスやチタンに対して一部研究がなされている。しかし、大型鋼構造物に最も多く用いられている構造用鋼材や、ましてやその溶接部の疲労強度に対する効果についての研究はなされていなかった。

そこで研究代表者らは、鋼橋に発生した疲労き裂の発生および進展を防止するための方法としてレーザーピーニングに注目し、平成15～16年度 科学研究費補助金 若手研究B「レーザーピーニングによる鋼橋の疲労き裂発生防止・進展防止に関する基礎的研究」において、橋梁等土木構造物への適用性を明らかにすることを目的とした研究を行った。まず、構造用鋼に4種類のピーニング条件でレーザーピーニングを施した後、残留応力をX線回折法で計測した。この実験でレーザーピーニングにより圧縮の残留応力が付与されることを確かめると共に、構造用鋼材およびその溶接部へのピーニング施工条件を選定した。さらに、平板にリブを隅肉溶接した試験体の疲労試験により、レーザーピーニングは板表面の止端からき裂が発生するタイプの疲労き裂の発生防止には非常に有効である事を定性的に確かめた。しかし、レーザーピーニングを施した試験体は、ピーニングした部分から破断しなかったため疲労強度の定量的な把握はできなかった。

さらに研究代表者らは、日本鉄鋼連盟や接合科学研究所の競争的資金を得て、研究を進めた。まず、降伏点が 100N/mm^2 から 780N/mm^2 までの4種類の建築構造用鋼材に対してレーザーピーニングを施し、板厚方向の残留応力の分布と硬さの分布を調べることで鋼材強度とレーザーピーニングの効果の関連を把握した。鋼材強度が大きいほど圧縮の残留応力が大きく、分布深さも深くなることが明らかになった。しかし、硬さの上昇は鋼材強度が大きいほど小さかった。

また、リブの隅肉溶接回し溶接部のレーザーピーニング前後の残留応力分布の変化についても研究を行った。その結果、レーザーピーニングにより溶接部の残留応力が引張りから圧縮に大きく変化すること、さらに止端部に近いほどその効果が大きいことが明らかとなった。さらにレーザーピーニングによる疲労強度向上効果を定量的に把握すると共に、そのメカニズムを明らかにすることを目的とした研究を行った。まず、突合せ溶接継手を対象とし、レーザーピーニングの有無パラメータとした疲労実験を行った。その結果、レーザーピーニングを施していない試験体の応力範囲の打ち切り限界が 175MPa であると考

えられるのに対し、レーザーピーニングを施した試験体の応力範囲の打ち切り限界は 300MPa であると考えられ、少なくとも1.7倍以上となっている。さらに、疲労強度の及ぼす応力除去焼鈍の影響についても明らかにした。これらにより、レーザーピーニングによる疲労強度向上の主要因は、圧縮残留応力の形成である事が確かめられた。

高張力鋼溶接部への適用性を明らかにすることを目的とする研究も進めている。レーザーピーニングにより高張力鋼溶接部の疲労強度を向上させることが出来れば、高張力鋼の適用範囲が大きく広がると考えられる。また、これまでの 490N/mm^2 試験体では把握できなかった 300MPa を超える高応力範囲域でのレーザーピーニングの疲労強度向上効果を明らかにする。現在、 780N/mm^2 級鋼で製作した突合せ溶接試験体とリブ溶接試験体での疲労実験を行っている。これにより、高応力振幅域でもレーザーピーニングの効果が高いことが確かめられつつある。

このように、小型試験体の結果ではあるが構造用鋼材溶接部でのレーザーピーニングの疲労強度向上効果が非常に大きいことが明らかとなってきている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、疲労強度向上効果が非常に大きいことが明らかになりつつあるレーザーピーニングを、鋼橋の疲労き裂発生防止手法および疲労寿命向上手法として実用化するため、より実用性の高いノズル型レーザーピーニング装置を開発し、その効果を大型試験体により実証することである。レーザーピーニングが疲労き裂の発生防止に適用できれば、鋼橋をはじめとした鋼構造物の長寿命化が可能になると考える。

3. 研究の方法

(1) 大型試験体用ノズル式

レーザーピーニングユニットの開発
これまでのレーザーピーニングの施工は、原子炉の炉心シュラウドに実用化された技術適用しているため、水中でレーザー照射を行ってきた。しかし、鋼構造物は大型であるため水槽内にいれることは困難である。さらに、架設現場や既設構造物への適用も不可能となる。実験室レベルでも、現在レーザーピーニングが施工できるのは研究代表者が競争的資金により購入した水槽を用いて施工可能となった長さ 500mm 、幅 50mm 程度の小型試験体のみであり、この小型試験体を用いて疲労強度の評価を行ってきた。しかし、溶接構造物の疲労強度を最終的に判断するためには、実際の残留応力分布が再現できる大型試験体での実験が必要であるが、そのような実大部材にレーザーピーニングを施工できる装

置は存在しない。そこで本研究ではノズルタイプのレーザーピーニングで大型鋼構造部材に施工できる「大型試験体用ノズル式レーザーピーニングユニット」を開発し、橋梁部材への適用性を検証する。

(2) 水中施工と気中施工の比較

小型試験体にノズルタイプのレーザーピーニング施工(気中施工と称す)を施し、これまでの水中でのレーザーピーニング施工(水中施工と称す)と生成される残留応力の板厚方向分布が異なるか否かの検討を行う。気中施工は、従来の水中施工のレーザーピーニング装置を改良して先端のみをノズルタイプとし、水槽の水を抜いて施工する。この結果を(1)の大型試験体用ノズル式レーザーピーニングユニットの開発に反映させる。

(3) レーザーピーニング施工部の

粗さと凹みの計測

レーザーピーニングを施すとその施工面の粗さが変化する。この粗さの変化は、レーザーピーニングを施したか否かの目印となるため、施工管理に役立つ。しかし、表面粗さも残留応力や硬さ同様に、疲労強度に影響を及ぼすことが知られている。そこで、鋼材強度の異なる3種の試験片にレーザーピーニングを施し、粗さと凹みの計測を行う。

(4) 大型試験体によるレーザーピーニングの

疲労寿命向上効果の確認

(1)で開発した「大型試験体用ノズル式レーザーピーニングユニット」により初めて大型の試験体にレーザーピーニングが施工可能となった。そこで、大型鋼構造物のリブ回し溶接部を模擬した大型疲労試験体でレーザーピーニングの有無による疲労寿命の違いを明らかにし、実際の構造物でもレーザーピーニングにより疲労寿命を延ばすことができるかを明らかにする。また、効果的な施工法についても検討を行う。

4. 研究成果

(1) 大型試験体用ノズル式

レーザーピーニングユニットの開発

まず、ノズル型レーザーピーニングを可能にするレーザー照射ヘッドをはじめとするユニットの設計および制作を行った。本照射ヘッ

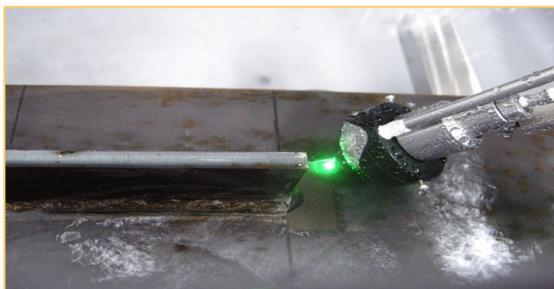


図-1 大型試験体用ノズル式レーザーピーニングユニットによるレーザーピーニングの施工

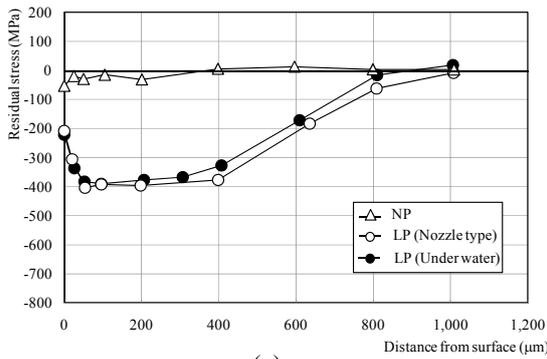
ドは大型構造物の溶接部を想定して設計したもので、ノズルから水を拭きかけながら、大型構造物の溶接止端部にレーザーを干渉することなく照射できる。また、現場での使用を考慮し、レーザー発振機からヘッドまでのレーザーの送光には光ファイバを用いた。これによって、初めて橋梁等の大型構造物へレーザーピーニングが適用可能となった。開発したユニットによる施工の様子を図-1に示す。

開発したユニットの適用性を検討するため、種々の溶接試験片で試し打ちを行った。その結果、水噴射の際水泡を巻き込み、レーザーの照射が阻害されることが判明したため、ヘッド形状の改良を行った。種々の検討の結果、水泡の巻き込みを防ぐことができ、圧縮残留応力が生成されることが明らかとなった。ただし、23年度の検討において照射角度が大きい方が生成される圧縮残留応力が大きいことが明らかとなった。現在の照射ヘッドではリブの回し溶接部を施工する際、照射角度を大きくするとリブと干渉してしまう。今後改良が必要である。

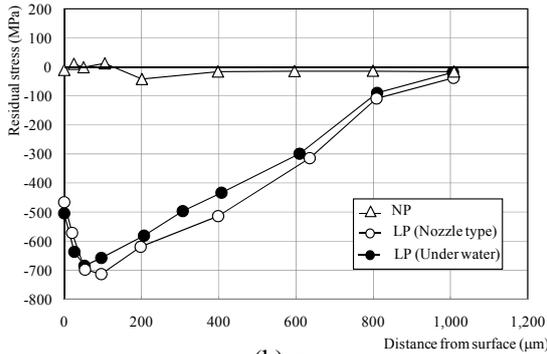
(2) 水中施工と気中施工の比較

実構造物に適用可能なノズルによる気中施工を用いた場合、生成される残留応力の板厚方向分布が水中施工と異なるか否かの検討を行った。供試材として厚さ9mmのHT780を用いた。この鋼材の表面に水中施工、気中施工それぞれ10mm×10mmの範囲でレーザーピーニングを施した。使用したレーザーはNd:YAGレーザー(波長532μm)であり、レーザーピーニングの照射条件は構造用鋼材に対する照射条件、パルスエネルギー200mJ、スポット径0.8mm、照射密度36Pulse/mm²とした。照射時には、試験体を載せたステージを溶接線方向に移動させながら1/60mmピッチでパルスレーザーを照射し、10mmを照射し終わった後に折り返して1/60mm下のラインを照射した。この条件で照射周波数60Hzとした今回の照射の場合、レーザー移動速度は10mm/secとなり、10mm×10mmの範囲を照射するために要する時間は1分である。以上のように、水中施工であるか気中施工であるか以外の条件はすべて同一である。この試験片の照射範囲の中央部と、照射部から十分離れた未照射の黒皮ままの部分の残留応力の板厚方向分布を、X線回折法(sin²φ法)による残留応力の測定(XRDと称す)と電解研磨とを繰り返すことによって測定した。本推定法では、被測定面を局所的に(φ10mm程度)電解研磨した後、研磨されて凹んだ底面で応力を測定し、それを未研磨状態の深さ位置での応力と近似的にみなしている。

測定結果を図-2に示す。NPが黒皮ままの試験片の結果で△で示している。LPがレーザーピーニングを施した試験片の結果で、水中施工の結果を●、気中施工の結果を○で示して



(a) σ_{ξ}



(b) σ_{η}

図-2 残留応力の板厚方向分布

いる。 σ_{ξ} がステージの移動方向の残留応力成分、 σ_{η} がそれと直角方向の残留応力成分である。表面残留応力、最大残留応力共に σ_{ξ} よりも σ_{η} の圧縮残留応力の方が大きい傾向にあるが、これは他の材料や溶接部でも見られており、本プロセス特有の傾向である。

NPは、 σ_{ξ} が表面から0.2mm程度までと σ_{η} の0.2mmの深さで-50MPa程度の圧縮残留応力となっているが、他はほぼ0MPaであった。これに対しLPは、水中施工、気中施工 いずれも、表面残留応力が σ_{ξ} で-200MPa程度 σ_{η} で-500MPa程度、最大残留応力が σ_{ξ} で-400MPa程度 σ_{η} で-700MPa程度となっている。気中施工でも水中施工と同様に σ_{ξ} で0.8mm程度、 σ_{η} で1mm程度まで圧縮残留応力が生成されており、これは通常のショットピーニングの0.2mm程度に比べ非常に大きな値となっている。

この様に、水中施工と気中施工で生成される残留応力の板厚方向分布はほぼ一致しており、気中施工でも大きくて深い圧縮残留応力が生成されることを確認した。よって、これまでの水中施工でのレーザーピーニングの効果は、気中施工した場合でも発揮されると考えられる。

(3) レーザピーニング施工部の

粗さと凹みの計測

表面粗さも残留応力と同様に、疲労強度に影響を及ぼすことが知られている。そこで、レーザーピーニングを施したSM400, SM490 およびHT780の表面粗さを計測した。計測には

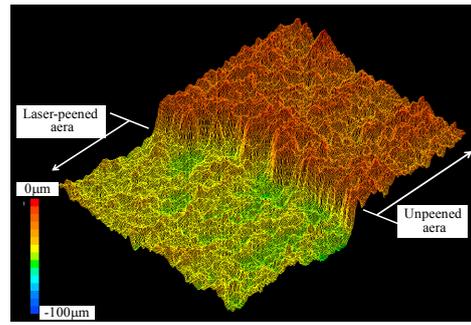


図-3 境界付近の3次元表面形状の一例 (SM490)

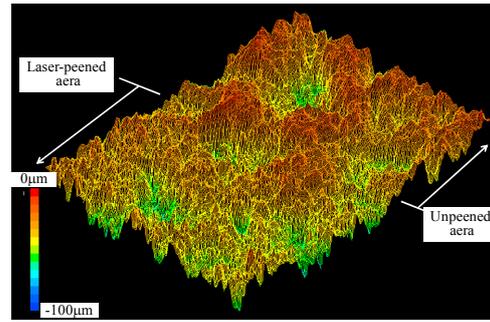


図-4 境界付近の3次元表面形状の一例 (HT780)

触針先端半径 $2\mu\text{m}$ の接触式粗さ計を用い、カットオフ値および基準長さ 2.5mm で表面粗さ(算術平均粗さ: Ra)を計測した。未施工部は黒皮ままの状態である。

SM400とSM490のレーザーピーニング範囲の表面粗さは、 $3.5\mu\text{m}$ 前後と比較的滑らかであった。これに対し、HT780の表面粗さは $13\mu\text{m}$ 程度とSM400やSM490と比較して荒かった。HT780は未施工部でも表面粗さが $10\mu\text{m}$ 程度とSM400やSM490に比べて荒かったためその影響がピーニング後の粗さに影響を及ぼした可能性がある。そこで、レーザーピーニングの境界付近の3次元表面形状をレーザーデジタル顕微鏡を用いて計測した。結果の一例を図-3, 4に示す。SM400とSM490は境界がはっきりと分かるほどレーザーピーニングを施した部分がほぼ一様に凹んでいるのに対し、HT780は部分的に細かく凹んでいる。これがHT780の表面粗さが大きくなった要因であると考えられる。

レーザーピーニングによる境界の段差量を、レーザーデジタル顕微鏡により計測された $500 \times 500\mu\text{m}$ の範囲の高さデータを、レーザーピーニングを施した部分と施していない部分でそれぞれ平均し、その差を取ることで求めた。計測カ所は3カ所である。SM400とSM490が $30\mu\text{m}$ 程度の段差であるのに対し、HT780は $10\mu\text{m}$ 程度と1/3程度であった。

この様に、400MPa級鋼と490MPa級鋼の表面形状はレーザーピーニングにより全体的に凹むことにより $30\mu\text{m}$ 程度段差が生成され、その表面粗さは $3.5\mu\text{m}$ 程度であった。しかし、780MPa級鋼の場合、段差は $10\mu\text{m}$ 程度と小さく、部分的に細かく凹むため表面粗さ

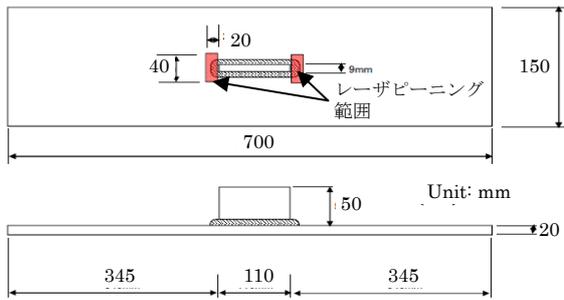


図-5 大型試験体の形状寸法

が未施工部よりも大きくなり $13\mu\text{m}$ 程度であった。

(4) 大型試験体によるレーザーピーニングの

疲労寿命向上効果の確認

21年度に開発した「大型試験体用ノズル式レーザーピーニングユニット」により初めて大型の試験体にレーザーピーニングが施工可能となったため、これまでできなかった大型鋼構造物のリブ回し溶接部を模擬した大型疲労試験体にレーザーピーニングを施し、疲労強度向上効果を検証した。

① 22年度

大型疲労試験体は、厚さ 25mm の鋼板 (SM490) に、リブ厚さ 9mm の鋼板 (SM490) を 9mm の脚長で炭酸ガスアーク溶接にて全周すみ肉溶接したものである。リブ長は 110mm である。この供試体の二つの回し溶接止端部に $40\text{mm} \times 20\text{mm}$ の範囲でレーザーピーニングを施した。試験体の形状寸法を図-5に示す。

施工時のハンドリング性を重視して開発したノズル型ユニットは直径 1mm の光ファイバを使用している。よって、これまでの 200mJ から出力を下げる必要があるため、パルスエネルギーが 70mJ、照射径 $\phi 0.7\text{mm}$ 、パルス密度が $70\text{pulse}/\text{mm}^2$ 、照射角度 45° という条件を選定した。

繰返し荷重が作用することにより、回し溶接止端部からき裂が発生すると、それに伴いひずみが徐々に減少する。そこで本研究では、回し溶接部の止端から 5mm 位置に貼付したひずみゲージのピークひずみが初期値から徐々に減少し、初期値の 80% に達したときを

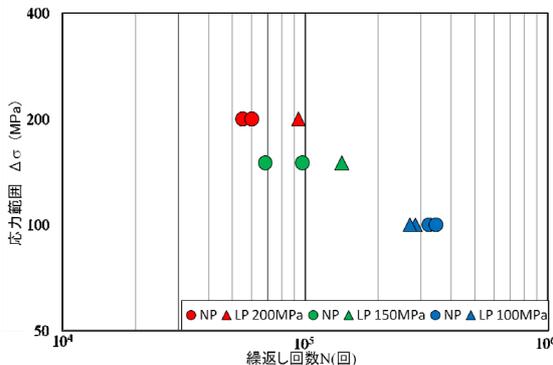


図-7 き裂発生寿命の S-N 曲線

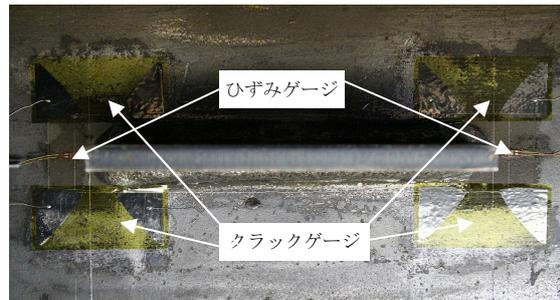


図-6 ひずみゲージとクラックゲージの貼付位置

き裂発生とみなし、そのときの荷重の繰返し回数をき裂発生寿命と定義した。また、試験体の長辺方向の中央線から 15mm の位置に一本目の素線が位置するように 4 枚のクラックゲージを貼り付けた。疲労き裂の進展に伴いクラックゲージの素線が破断し抵抗値が変化するため、この抵抗値の変化によりき裂の進展をモニタリングした。ひずみゲージとクラックゲージの貼付位置を図-6に示す

試験は 20t 容量の構造部材疲労試験機を用いた 4 点曲げ試験とした。応力範囲 ($\Delta\sigma$) は 100, 150, 200MPa で行い、振動数はそれぞれの応力範囲に合わせて 6~15Hz で疲労試験を行った。波形は Sin 波、応力比は 0.1 である。

図-7 に実験結果から得られたき裂発生寿命の S-N 曲線を示す。レーザーピーニングを施すことで、 $\Delta\sigma=150\text{MPa}$ 、 200MPa では疲労き裂の発生が遅延した。 $\Delta\sigma=150\text{MPa}$ では約 1.7 倍、 $\Delta\sigma=200\text{MPa}$ では約 1.6 倍、疲労き裂発生寿命が伸びているが、既往の研究に比べて伸びは小さい。また、 $\Delta\sigma=100\text{MPa}$ では、約 0.8 倍と縮んだ。

クラックゲージを通過する疲労き裂の進展速度も比較したが、進展速度はほとんど変わらず、ノズル型レーザーピーニングによるき裂進展の遅延効果は見られなかった。

この様に、22 年度の実験では、大型疲労試験体によるレーザーピーニングの大きな疲労寿命向上効果は確認されなかった。

② 23年度

22 年度の実験によって疲労寿命向上効果が小さかった原因を探るため大型試験体止端部の残留応力を XRD にて計測した。その結果、施工前の +457MPa から施工後には -43MPa と引張から圧縮の残留応力に変化していたものの、生成された残留応力の絶対値としてはこれまでの研究の -300MPa 以上に比べて小さかった。

そこで 23 年度は、レーザーピーニング条件と照射角度を変えて平板にレーザーピーニングを施し、残留応力を計測して大きな圧縮残留応力が入る条件の検討を行った。その結果、同じピークエネルギー 70mJ-照射径 0.7mm-照射密度 $51\text{pulse}/\text{mm}^2$ でも照射角度 (鉛直方向からの傾き) が 45° よりも 30° の方が圧縮残

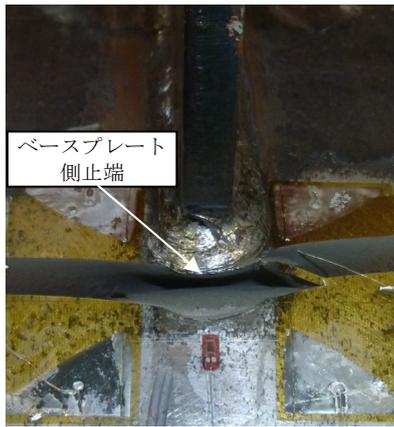


図-8 NPのき裂発生位置



図-9 LPのき裂発生位置

表-1 疲労き裂発生寿命

試験体名	止端A	止端B
NP-1	100,350	92,250
NP-2	141,000	189,000
NP-3	196,200	239,400
LP-20-1	636,600	>4,387,800
LP-20-2	>5,000,000	>5,000,000
LP-20-3	863,400	>4,494,000
LP-70-1	>5,000,000	>5,000,000
LP-70-2	>4,453,200	703,800
LP-70-3	445,800	>4,032,400

留応力は大きいことが分かった。この検討により、光ファイバを用いたノズル式レーザーピーニングの場合の条件 70mJ-0.7mm-51Pulse/mm²-30° を選んだ。また、今後の展開を考え、kHz レーザを使う場合の条件として20mJ-0.3mm-180pulse/mm²-10° でも実験を行うこととした。事前の残留応力測定により、70mJ では表面では-190MPa 程度であったが、15μm 電解研磨した位置では、-545MPa の大きな残留応力となっていた。20mJ の条件では表面で-616MPa であった。

疲労試験に用いた試験体の形状・寸法は22年度と同じとしたが、鋼材を HT780 とした。ゲージの貼付位置等も同様である。応力範囲は100MPa の1水準とし、振動数は10Hz とした。試験体数は各条件で3体とした。比較のためレーザーピーニングを施していない試験体(NP)も試験に供した。

疲労き裂発生寿命を表-1に示す。

NPは9~24万回で疲労き裂が図-8に示すベースプレート側止端発生した。これに対し、レーザーピーニングを施した試験体はいずれのピーニング条件でも、3体中1体はき裂が発生することなく500万回に達した。残りの2体は70万回前後で一方の止端からき裂が発生したものの、図-9に示す様に、レーザーピーニングを施していないリブ側止端からであり、レーザーピーニングを施したベースプレート側止端からはき裂は発生しなかった。よって、

レーザーピーニングにより疲労寿命が少なくとも17倍以上延びることが明らかとなった。

以上、本研究により初めて大型構造物へレーザーピーニングが適用可能となり、その効果も大型試験体で確認することができた。

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)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Yoshihiro SAKINO, Yuji SANO and You-Chul KIM: Application of Laser Peening without Coating on Steel Welded Joints, International Journal of Structural Integrity, 査読有り, Vol.2, No.3, 2011, 332-344
<http://www.emeraldinsight.com/1757-9864.htm>
- ② 崎野良比呂, 佐野雄二, 金裕哲: レーザピーニングの各種構造物への適用に関する基礎的検討, 鋼構造論文集, 査読有り, Vol.18, No.69, 2011, 61-70

[学会発表] (計2件)

- ① Yoshihiro SAKINO: Application of LPwC to High-Strength Structural Steel and Its Weld Zone, 3rd International Conference on Laser Peening and Related Phenomena, 2011/11/12, Osaka, Japan
- ② Yoshihiro SAKINO: Application of laser peening to fatigue of steel bridges, 2nd International Conference on Laser Peening and Related Phenomena, 2010/4/19, San Francisco, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

崎野 良比呂 (SAKINO YOSHIHIRO)
大阪大学・接合科学研究所・講師
研究者番号: 80273712