

いま求められる超音波ピーニング技術 —鋼構造物の延命策と表面改質—

Y. Kudryavtsev, J. Kleiman
Structural Integrity Technologies社

岩村 吉就
(株)Beよんど

1 はじめに

東京オリンピック以来50年が経過し、高速道路や港湾設備等は点検・補修工事の必要性が高くなってきている。さらに、船舶・タンクなどの大型構造物は長寿命化への延命策が望まれている。

これら溶接構造部の損傷の大半は疲労によるもので、しかもほとんどの損傷は溶接継手に集中している。溶接継手の疲労強度向上の方法は、グライダー仕上げによる応力集中の緩和策が一般的で、焼鈍による溶接継ぎ手部の引張残留応力除去策は限られた製品のみを採用されている。

一方、引張残留応力を圧縮残留応力に変える機械的ピーニング法にはついては、その効果への信頼性が低い。しかし近年、超音波ピーニング法により材料表面より1mm程度の深さまで圧縮残留応力に変え事ができ、かつ溶接止端部の応力集中緩和もできることから、高い信頼性が得られることが認知されてきた^{1, 2, 3)}。

さらに溶接継手の疲労寿命は、鋼材の強度を問わずに軟鋼のそれと同じであったが、超音波ピーニング処理を施すと鋼材の強度に準じて疲労強度が上がり、高張力鋼使用のメリットが活かされるようになることも注目されてきた^{4, 5)}。

超音波ピーニング装置と施工法はウクライナのパトン溶接研究所で開発され、ソビエト崩壊後、欧米に紹介された。その後、欧米で共同確認試験が実施され、2000年の国際溶接学会でその効果が確認された。日本で始めて公に超音波ピーニング(UIT)施工が行われたのは、2010年に完成した羽田空港第4滑走路への新規橋梁であった。

この超音波ピーニング装置の駆動部は、磁歪式で水冷が必要なためかなり大きな装置になっている。カナダのIntegrity Testing Laboratory Inc. (ITL社)は、この超音波ピーニング装置の振動駆動源として新たにセラミック振動子を採用し、小型なハンディタイプの装置を開発し、かつ最適施工条件選定のソフトと合わせた超音

波ピーニングシステム(UP)を開発した。そして2004年の大阪での国際溶接学会ならびに国際溶接展示会で日本に紹介した。その後Power upを図り、順調な業績向上により、2012年末にITL社はこの部門を発展的にStructural Integrity Technologies (SINTEC)社として分離独立させている。

本稿はこれまで「溶接技術」(産報出版刊)に紹介してきた論文等^{6, 7)}を基に、日本での試験研究結果も加えて⁸⁾、超音波ピーニング(UP)法による既設構造物の延命策として

①既存溶接構造の溶接継手への超音波ピーニングによる疲労寿命改善と疲労回復

②溶接継手に発生した疲労亀裂の補修溶接後の超音波ピーニング処理による疲労寿命の長寿化について実際の施工例も揃えて紹介する。

また超音波ピーニング法では、毎秒数千回以上の衝撃を加えるため、表面改質が起こる。そこで、

③材料表面の改質効果

④スパッタ除去・溶接金属表面のドレッシングへの適用についても紹介する。ただし③④への実際施工例はまだほとんど皆無なので、これから実用化が図られることが望まれるものとする。

2 超音波ピーニング(UP)システムの概要

超音波ピーニング(UP)は、溶接構造物の疲労寿命を確実に向上させる手法の一つである。UP処理の最も大きな効果は、材料表面の有害な引張残留応力を圧縮残留応力に変えることによって得られる。さらに溶接止端部の応力集中の緩和と材料表面の改質によっても効果が発揮される。

UP技術は特別な打撃子によるハイサイクルな衝撃と被処理材内での超音波振動の相乗効果を基本としている。システムは超音波発信器、駆動体ならびにUP最適条件

を算定するソフトウェアを搭載した卓上パソコンから構成される。図1に示す標準的なUPシステムは溶接止端部あるいは溶接金属や母材の広い面積の処理に使用される。

従来のハンマーピーニングでは、作動頭部に装着した打撃子により溶接継手の衝撃処理に用いられ、駆動源は圧搾空気であった。UP装置では打撃子を駆動部先端と結合せず、被処理材と駆動部との間で自由に動かせることによって衝撃処理の効果を最大限に発揮している。図2にUPの一連の作動頭部を示す。作動頭部の取替は容易である。

3 超音波ピーニング (UP) の原理、技術と装置

3.1 超音波衝撃と超音波の効果

超音波ピーニング処理中、打撃子は駆動源の端部と被処理材との微小な間隙を振動し、処理部に衝撃を加える。振動子の振動数は20～40kHzで打撃子の振動数は約5kHzである。この種のハイサイクルな動きと被処理材に誘因されるハイサイクルな振動衝撃が典型的な超音波衝撃と言われている。

金属に関する超音波の代表的活用としては、音響軟化や音響加熱等がある⁹⁾。音響塑性として知られる音響軟化は、音響照射により降伏応力が低下し、塑性変形が生じやすくなる。従って、超音波ピーニングによって金属内に超音波照射を誘発し、音響軟化により容易に塑性変形が生じる。

これまでの種々なピーニング法が冷間加工であるのに対して、超音波ピーニング法は温間加工に近い。そのため、金属表面を超音波ピーニングすると深くまで塑性変形が生じるので、圧縮残留応力もより深くまで発生し易くなる。

3.2 超音波ピーニングの技術と装置



図1 標準的な超音波ピーニングシステム (UP-600)

超音波駆動体は20～40kHzの高周波で振動する。そして駆動対は圧電式か磁歪式である。どちらの方式でも駆動先端部の振動振幅は20～40μmである。打撃子は被処理材の表面に衝撃を加える。この衝撃によって、材料の表面層に塑性変形が生じる。1秒間に何千回と繰り返される衝撃は、材料内に誘因される高周波の振動と連動して、種々の効果を発揮する。

疲労改善に対して最も大きな効果は、溶接止端部に衝撃を加えることによって表面層に塑性変形を生じさせ引張残留応力を圧縮残留応力に変えることである。さらに止端部の応力集中を緩和しかつ材料表面の機械的特性を強化することにある。また、材料内に誘因される高周波振動は溶接による残留応力を軽減する。

超音波ピーニング (UP) 処理後の溶接継手横断面の残留応力状態を図3に模式的に示す。またその利点を表1に示す。またUPによって改善された溶接止端部の形状を図4に示す。溶接継手の疲労寿命を向上するには、溶接止端部のみ処理すれば十分である。

超音波ピーニングに使用される駆動体としては、圧電式と磁歪式の2種類がある。磁歪式では、電気的エネルギーを磁力に変換し、さらに機械的エネルギーに変換するため、圧電式より効率が低くなる。また磁歪式駆動体では強制冷却が必要である。超音波ピーニング駆動体の模式図を図5に示す。

圧電式駆動体では、電気的エネルギーを圧電効果により直接機械的エネルギーに変換する。さらに最近では、より強力、高効率で安定性の高いセラミック圧電素子が使用され、消費電力も60%近く削減されている。消費電力300～500Wの圧電式駆動体による疲労寿命改善の効果は、消費電力1,000Wの磁歪式駆動体での効果と同等である。セラミック圧電素子を用いたUPシステムを図1、6に示す。図6はスカラップやブラケット周りの狭隘部へのUP装置として最近開発されたUP-500Sで



図2 交換可能な一連の作動頭部

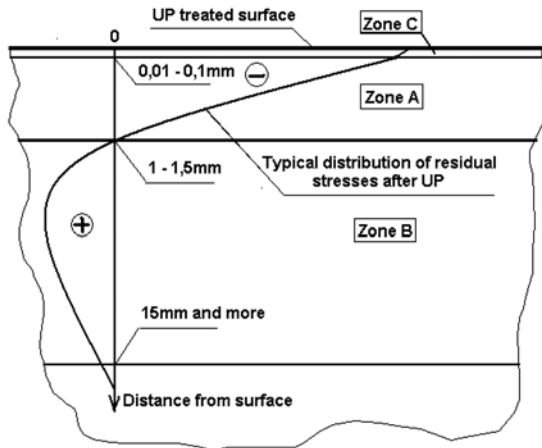


図3 超音波ピーニングによって改善された材料の横断面

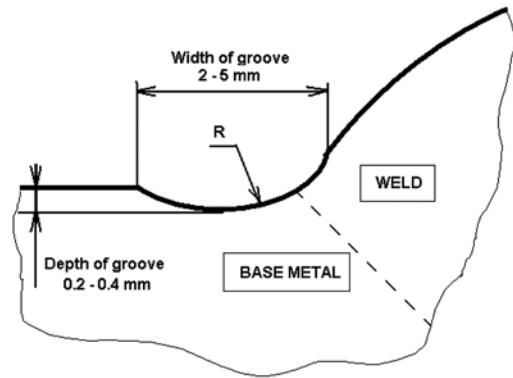


図4 超音波ピーニングによって改善された溶接止端部の形状

表1 超音波ピーニング (UP) によって改善された材料領域

Zone	Description of zone	Distance from surface, mm	Improved characteristics
A	Zone of plastic deformation and compressive residual stresses	1-1.5 mm	Fatigue, corrosion, wear, distortion
B	Zone of relaxation of welding residual stresses	15 mm and more	Distortion, crack propagation
C	Zone of nanocrystallization (produced at certain conditions)	0.01- 0.1 mm	Corrosion, wear, fatigue at elevated temperature

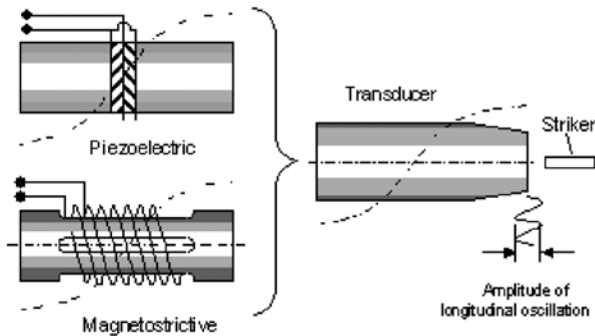


図5 超音波ピーニングの駆動体の模式図



図6 狭隘部等への小型で軽量の超音波ピーニング装置 (UP-500S)

ある。

4 延命策としての超音波ピーニング (UP) 処理

UP (超音波ピーニング) の効果的適用例の一つとして、高速道路橋や鉄道橋の溶接継手の疲労寿命改善がある。溶接構造の橋梁の疲労き裂は縦スティフナの継手端部にほとんど集中している。このような部位での疲労き裂の発生と伝播を防止する上で、UP の有効性を調査するために、図7に示す大型溶接試験体を用いて疲労試験を実施した。

その結果、UP 処理を施すと疲労き裂の発生は見られなかった。さらに溶接スティフナ継手の終端部 100mm

について UP 処理を行うだけで疲労寿命が著しく伸び、疲労き裂の発生も防止できることが実証された。この UP 処理は溶接止端部のみに施された。止端部には図4に示す溝が形成された。

溶接橋梁等における疲労き裂発生防止に UP が有効であることが実証された。しかし、とくに今までの疲労試験結果は、繰り返し荷重を受ける前に UP 処理を行ったものばかりであった。何年も実際に使用され繰り返し荷重を受けている既存橋梁への試験結果は未知であった。次章では、As weld 状態で予測疲労寿命の 50% まで繰り返し荷重を受けた後で UP 処理を施した場合の効果の評価するための疲労試験結果について記述する。

5 疲労回復による延命策

繰り返し荷重を受けた溶接構造物へのUP処理の有用性を評価するために、次の3種類の溶接継ぎ手試験片を用いて疲労試験を実施した。

- ① As weld
- ② 疲労試験前にUP処理
- ③ As weld状態で予測疲労寿命50%時にUP処理

溶接継ぎ手疲労試験片の形状を図8に示す。すべての試験は応力比 = 0 で試験された。

荷重非伝達型十字すみ肉継手の疲労試験結果を図9に示す。UP処理を施した2, 3共に疲労強度が著しく向上した。溶接直後（疲労試験前）にUP処理をした場合、疲労限 ($N = 2 \times 10^6$) での応力は53% (118MPa

から180MPa) 向上した。As weld状態で予測疲労寿命50%の繰り返し荷重後にUP処理をした場合には67% (118MPaから197%) 向上した。またすべての応力レベルにおいて疲労寿命は4~6倍伸びた。

この疲労回復効果を再確認するため、当て板溶接部を有する橋桁の大型溶接試験体を用いて曲げ疲労試験を実施した⁸⁾。疲労試験体はH形鋼 (H250 × 250 × 9 × 14 × 2200) のフランジにSS400の鋼板 (200 × 150 × 9) を回し溶接により脚長6mmのすみ肉溶接を施し、作成した。図10に試験体の形状/寸法を示す。溶接の始末端は試験体の長手方向中央部付近にくるようにした。上記と同じ3種類の大型溶接試験体を用いて疲労試験を実施した。UP処理は試験体溶接止端部と溶接止端部中心に±10mm範囲に施した。すべての試験は応力比 = 0

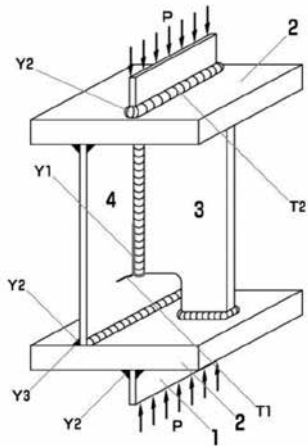


図7 ウェブに縦スティフナをつけた疲労試験用溶接構造物 (T1: 疲労き裂発生域, Y1: UP施工域, 3: スティフナ, 4: ウェブ)

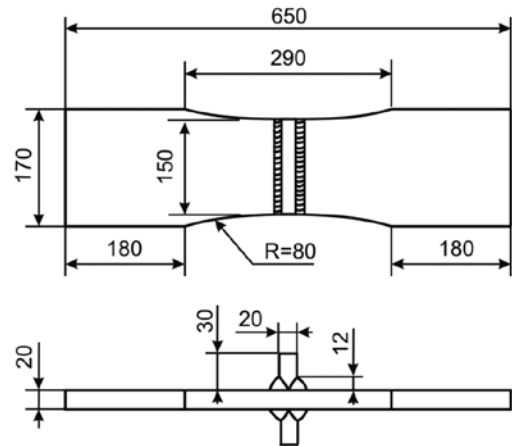


図8 溶接継ぎ手の疲労試験片形状

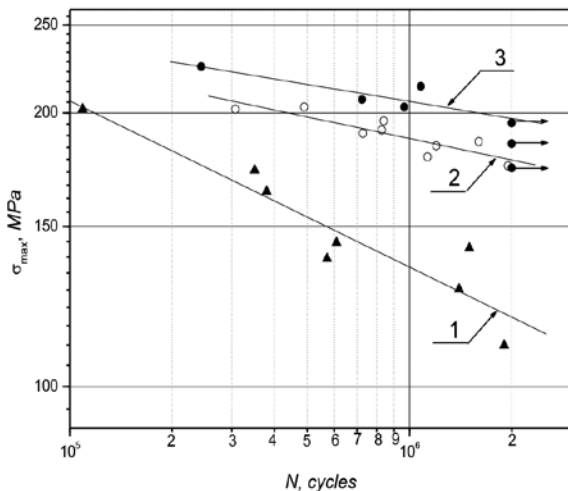


図9 荷重非伝達型十字すみ肉溶接継ぎ手のS-N曲線 (1: As weld, 2: 疲労試験前にUP処理, 3: As weld状態で予測疲労寿命の50%まで繰り返し荷重を与えた後にUP処理)

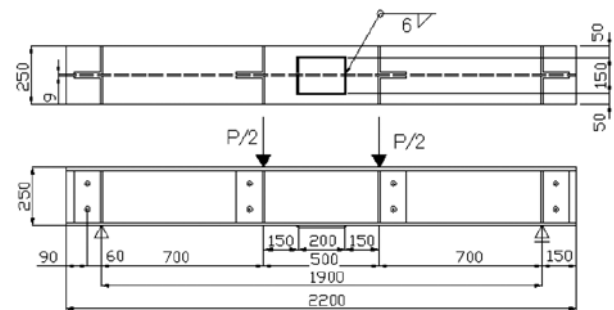


図10 当て板を溶接した鋼桁の曲げ疲労試験片⁸⁾

で試験された。試験結果を図 11 に示す。

現行の疲労設計指針¹⁰⁾では、本試験に用いた溶接止端非仕上げ試験体の疲労強度等級は F 等級である。UP 処理により、疲労強度の等級は C 等級レベルまで改善される（溶接後のグラインダー処理でも同じく C 等級に改善される¹⁴⁾）。既存の溶接構造物の疲労寿命改善に対する UP 処理の適応性を検討するために、As weld 試験体に予測疲労寿命 50% の繰り返し荷重を加えた後、溶接止端部に UP 処理を施し、さらに疲労試験を実施した。

その結果、試験体数は少ないが溶接直後に UP 処理を施した試験体と同等程度以上の疲労寿命の向上が期待出来ることが再確認された。

図 9 と 11 の両試験結果ともに、既存の溶接構造物の溶接継手に UP 処理を施すことに依り、建造時の UP 処理の効果と同等の効果が生じ、疲労寿命は As weld 状態時より 4～6 倍程度伸び、かつ疲労強度は 50% 程度向上することを示した。

6 補修溶接後の延命策

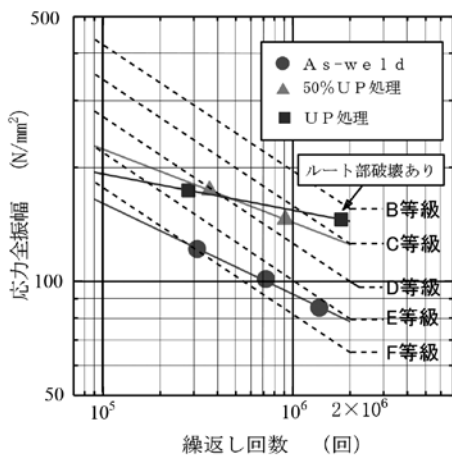


図 11 当て板を溶接した鋼桁の曲げ疲労試験結果 (S-N線図)⁸⁾

本稿では実際に供用されている溶接構造物の疲労き裂発生防止を疲労回復としている。さらに UP は疲労き裂の補修溶接時にも使用される。

As weld 状態、補修溶接状態と補修溶接後に UP 処理を施した状態でそれぞれ疲労試験を行った。用いた大型疲労試験片は荷重非伝達型で長さ方向の板がすみ肉溶接されたもので、その形状を図 12 に示す。疲労試験は完全片振 (R = 0) の引張り条件で行った。疲労試験では、材料表面の疲労き裂長さが 20mm に達した時点で一端中断して繰り返し回数を記録し、ガウジングでき裂を除去後補修溶接を施し疲労試験を続行した。あるものは補修溶接後新しい溶接止端部に UP 処理を施した。試験結果を図 13 に示す。

疲労き裂の補修溶接により疲労寿命は初期 As weld 状態の強度まで回復している。さらに 2 度あるいは 3 度疲労き裂を補修しても、ほぼ初期 As weld 状態の強度まで回復している。

疲労き裂の補修溶接後に UP 処理を施すと疲労寿命は 3～4 倍伸びている。同様の効果が 2 回、3 回の疲労き

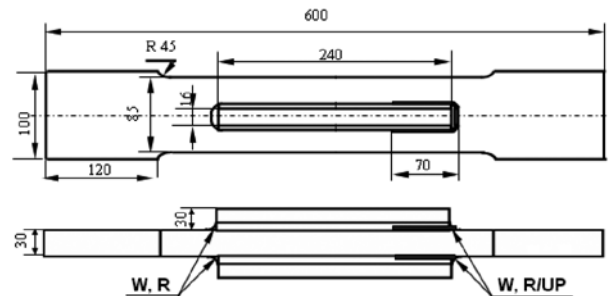


図 12 種々の状態で疲労試験を行った溶接継ぎ手試験片形状 (W—As weld, R—ガウジング後の補修溶接, R/UP—ガウジングと補修溶接後の UP 処理)

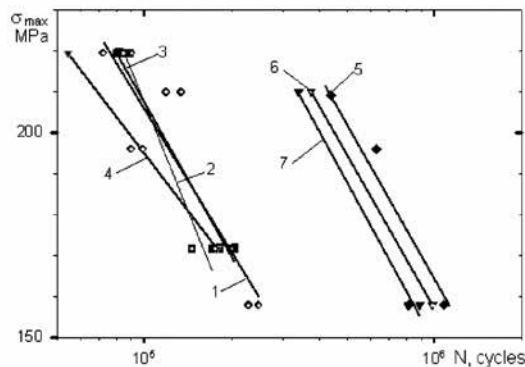


図 13 溶接継ぎ手の疲労試験結果 (1—As weld 状態, 2,3,4—1 回, 2 回, 3 回の補修溶接, 5,6,7—1 回, 2 回, 3 回の補修溶接後それぞれ UP 処理)

裂補修溶接後にUP処理を施すことによっても得られている。

7 高張力鋼ならびにアルミニウム合金溶接継手への超音波ピーニング (UP)

さらに降伏応力 960MPa 鋼溶接継手の疲労強度向上にUP処理がいかにも有効であるかを評価するために大型溶接継手について疲労試験を行った¹²⁾。

疲労試験片は板厚 6mm, 幅 50mm で長さ方向に荷重非伝達の板をすみ肉溶接したものであり, 形状を図 14 に示す。疲労試験は完全両振り $R = -1$ で行われた。As weld ではすべての試験片は長手方向のステイフナ端部の溶接止端部で破損した。一方, 疲労寿命向上処理を施した試験片では他のいろいろな破損形態であった。試験結果を図 15 に示す。

同図から明らかなように, 960MPa 鋼溶接継手の疲労強度向上にUP/UIT処理とも著しい効果を発揮している。繰り返し数 106 回での耐久応力は As weld のそれ

に比較して約 4 倍に上がっている。

またアルミニウム合金の突合せ継手の疲労試験結果でも良い結果が得られている (図 16)¹⁾

8 超音波ピーニングによる表面改質

超音波駆動体は 20 ~ 40kHz の高周波で振動する。振動子と打撃子の周波数と振動の一例を図 17 に示す。打撃子の振動数は毎秒約 5,000 回になっている。

従来の機械式やエア駆動式に比べて数百倍の速さで打撃を材料表面に与える。打撃時に材料表面が発熱するため, 被打撃部は高速な繰り返し熱衝撃を受ける。その結果, 被打撃部の材料表面層では結晶粒が微細化される。図 18 に種々の材料のUP処理後の結晶構造を示す。

結晶粒のナノ化は表面層近くではさらに顕著であり, 表面から約 65 μm 近くまで結晶粒は微細になっている (図 19 参照)。結晶粒のナノ化と繰り返し加熱と打撃により, 表面層では材料の硬化も進む。図 20 に 3 種類のステンレス鋼についてUP処理を施した後の深さ方向の硬さ分布を調べた結果を示す。

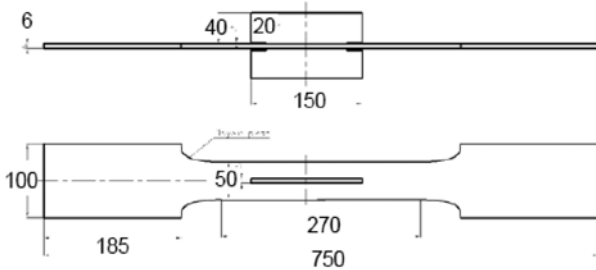
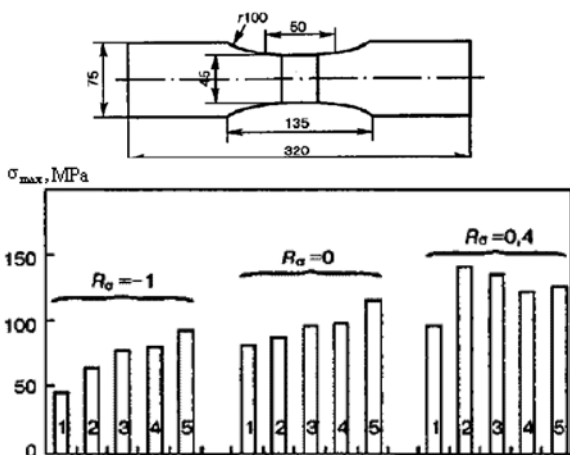


図14 降伏応力960Mpa鋼の溶接継手疲労試験片形状¹²⁾



1-溶接のまま, 2-グラインダー処理, 4-UIT処理, 3,5-UP処理

図16 アルミニウム合金突合せ継手の疲労試験結果 (繰返数106での最大応力 σ_{max} の比較)

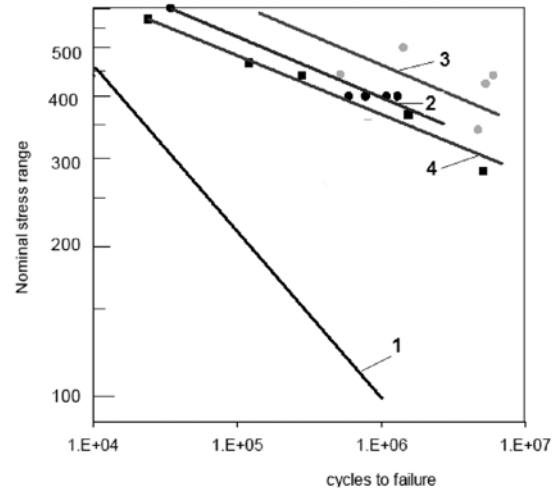


図15 降伏応力960MPa鋼溶接継手の疲労試験結果¹²⁾ (1-As weld, 2-UIT処理, 3-UP処理, 4-低温変態溶接材の使用)

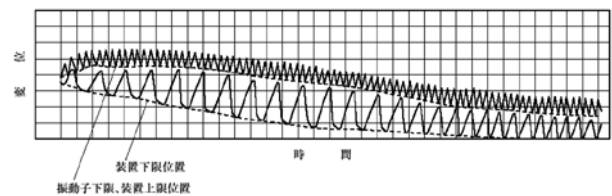


図17 振動子と打撃子の周波数と振動

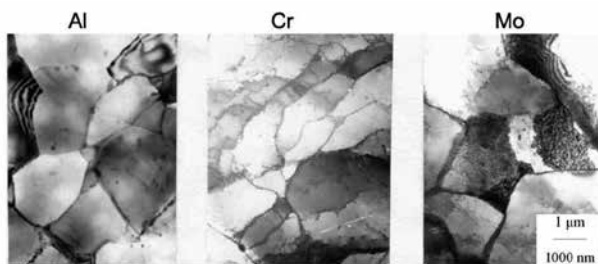


図18 UP処理後の結晶構造 (材料表面から50μmの深さ)

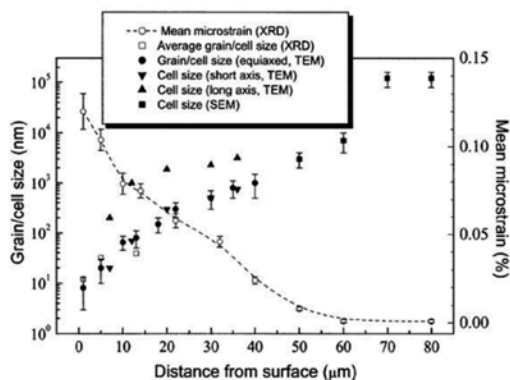


図19 UP処理による結晶粒の微細化

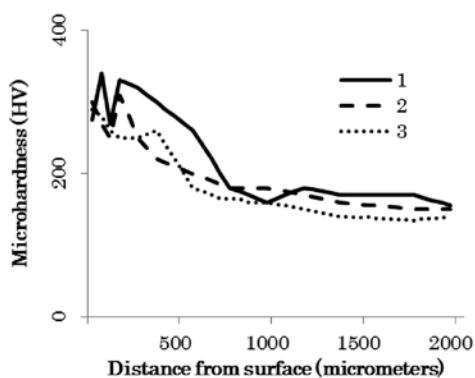


図20 UP処理後の硬度分布



図21 スパッタ除去専用ピンとホルダー

3種類のステンレス鋼とも材料表面近くでは著しく硬度が高くなっており、表面から約1mmの深さまで硬化が進んでいる。

これらのことから、UP処理で材料表面層(0.01~0.1mm)では著しい改質が行われることが明らかになった。この表面改質により、耐腐食性、耐摩耗性、耐高温疲労強度性が増加することが容易に推定される。

実験的には肉盛溶接部や鍛造品の硬度向上に効果があることが確認されている。さらに鍛造製自動車ばねにUP処理を施した結果、表面の硬度向上と平滑さ向上等により、疲労寿命が1.5倍伸びることが確認されている。

今後、表面改質を図る上で超音波ピーニング(UP処理)は有望な施工法であると確信されるので、本技術の実用化が望まれる。

9 超音波ピーニング装置の他への用途

超音波ピーニング装置の最大出力は500Wとかなり大きくかつ高周波衝撃力を有している。その特性を生かした新たな用途も開発中である。その代表例を紹介する。

9.1 スパッタ除去

Ni系鋼材やステンレス鋼の溶接時に発生するスパッタを滑らかに除去することはかなり困難な作業とされている。このようなスパッタを除去するために開発したものが図21に示す。UP-500Sに取り付け可能なスパッタ

除去専用ピンとそのホルダーである。これを用いるとスパッタ除去が非常に容易にでき、鋼材表面を傷つけることも皆無であった。

9.2 溶接ビードのドレッシング

高温の熱サイクルを受ける構造物の溶接継手では高い熱応力が発生するので、その破損を避けるため、溶接ビードにドレッシングを施すのが一般的である。使用材料としてはインコネルやハステロイなど耐高温用材料が用いられる。その溶接金属は非常に硬く粘いため、従来の機械的装置でのドレッシングではかなり時間が掛りかつ高い熟練が要求される。UP-500Sでドレッシングを試験的に実施した結果、作業が容易・迅速になりかつ作業者の熟練が要求されないことが判明した。

超音波ピーニング装置は、スパッタ除去や溶接ビードのドレッシングに役立だけでなく他の用途にも役立つ可能性を有していると思われる。

10 超音波ピーニング(UP)の工業界への応用

製造時の溶接継手の疲労強度向上や既使用中の溶接構造物の疲労回復による延命、疲労き裂補修溶接後の延命に、超音波ピーニング(UP)処理法は極めて有効である。UP技術はいろいろな工業分野で成果を上げ始めている。主な分野は、鉄道橋、高速道路橋、造船、鉱業、



図22 溶接橋の縦スティフナ溶接端部へのUP処理状況

自動車や航空機などがある。

アメリカのオハヨー河に架かっている橋梁溶接部の延命策として、スティフナ溶接部へのUP処理状況を図22に示す。

ほぼ同じ時期に同じ設計で建造されたもう一つの橋梁で一カ所のスパンに疲労き裂が発生し損傷したことが疲労寿命の延命策としてUP処理を施す契機になった。疲労き裂発生危険性がある2,500カ所の溶接部にUP処理が施された。この施工工事は、リフト車で作業準備をし、その上でハンディなUP装置で作業を行うだけだったため、足場組立等は不要で、重要な溶接部のみの全長500mについてUP処理が施された。※この工法は簡素で費用も少なく済む(部分破損や疲労き裂発生後の補修は大規模になり、膨大な費用が必要になる)。

11 おわりに

「溶接技術」2013年2月号で紹介した論文⁷⁾を骨子とし、超音波ピーニング(UP)による表面改質および他への用途についても紹介させていただいた。主な結論は、①既設溶接構造物の重要溶接継手の止端部へのUP処理により、疲労回復が生じ大きな延命効果が発揮される。その効果は建造時のUP処理と同等あるいはそれ以上であり、疲労寿命はAs weld状態時より4~6倍程度伸び、かつ疲労強度は50%強向上する。

②疲労き裂の補修溶接後にその溶接止端部にUP処理を施すと、疲労寿命は3~4倍伸びる。2回、3回の疲労き裂の補修溶接後にUP処理を施すことに依っても同様な効果が得られる。

③超音波ピーニング(UP)装置は100V仕様最大容量500Wかつ小型・軽量なため、既設溶接構造物の延命策としてUP処理を施す場合、リフト車上の作業が可能(大掛かりな工事は不要)、施工費用は合理的なもので済む。

④降伏応力960MPa鋼溶接継手の疲労強度向上にUP処理は著しい効果を発揮する。

⑤アルミニウム合金の溶接継ぎ手に対してもUP処理は優れた効果を発揮する。

⑥UP処理により材料表面層では結晶粒の微細(ナノ)化が起こり、かつ硬度も著しく高くなるので、表面改質を図る上で超音波ピーニング法は有望な施工法であると確信される。

⑦UP装置はスパッタ除去や溶接ビードのドレッシングにも非常に有効である。などである。

参考文献

- 1) Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, L. Lobanov et al. Fatigue Life Improvement of Welded Elements by Ultrasonic Peening. International Institute of Welding, IIW Document XIII-2010-04. 2004. 20 p.
- 2) 野瀬哲朗, 島貫広志, 中島清孝: 溶接構造物の疲労特性に及ぼす超音波衝撃処理の効果, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第5E号 論文番号2007E-G24
- 3) 原純哉, 下田太一郎, 出口貴則, 毛利雅志, 福岡哲二, 小汐啓介, 加野大地: 船体構造における超音波ピーニングを用いた疲労強度改善に関する研究 第1報, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第10号 論文番号2010S-G124
- 4) 岩村吉就: 超音波ピーニング(UP)システムの提案—溶接継手の疲れ強の向上—, 溶接技術 2005年3月号
- 5) G. Hamby, G. Clinton, R. Nimis, M. Lwin: High Performance Steel Designers Guide, Second Edition April 2002, U.S. Department of Transportation
- 6) 岩村吉就: 超音波ピーニング法による溶接構造物の延命策と補修, 溶接技術 2009年1月号
- 7) Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, 岩村吉就: 鋼構造物の疲労回復による延命と補修溶接後の延命—超音波ピーニング(UP)法—, 溶接技術 2013年2月号
- 8) 村中昭典, 皆田理, 岩村吉就, 梶本勝也: 当て板溶接部を有する鋼桁の曲げ疲労寿命改善について, 第61回平成21年度土木学会中国支部研究発表会概要集
- 9) B. Langenecker. Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. Vol. SU-13, No. 1, March 1966, pp. 1-8.
- 10) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説(第1版), 技報堂出版, 1993年4月25日
- 11) 村中昭典, 皆田理, 岩村吉就, 梶本勝也: 重ねすみ肉溶接継手の疲労寿命改善について, 第60回平成20年度土木学会中国支部研究発表会概要集
- 12) G. Marquis and T. Björk. Variable Amplitude Fatigue Strength of Improved HSS Welds. International Institute of Welding. IIW Document XIII-2224-08. 2008.