

鋼構造物の延命策

超音波ピーニングによる疲労回復・補修溶接部処理

—— UPシステム ——

既設構造物の主要溶接継手へのUP処理により 疲労寿命が2倍以上に!!

本資料は“溶接技術”2013年2月号に紹介寄稿したものです。同誌2009年1月号と2010年2月号に紹介した論文と本邦での試験研究を集大成しました。

2012年12月笹子トンネル事故以来、インフラの見直しと補強対策が急務に成っています。首都高速道路は満50年を迎えおり、コンテナ埠頭のクレーンも30年を過ぎています。船舶・タンク等の大型構造物では長寿命化への延命策が望まれています。

既設構造物の疲労回復による延命策と補修溶接部の長寿命策として、超音波ピーニング（UP）法は有効かつ安易な手法です。UP施工は短期間の工事でかつクレーン上の作業で済み（足場不用）、費用も合理的で安価になることが見込めます。本技術の検証と実用化を望みます。

—— SINTEC社 ——

カナダITL社から分離独立し、超音波ピーニング装置等の製造・販売と実用化への研究開発を行っているStructural Integrity Technologies Inc.です。

CEO : Jacob Kleiman, Ph.D.

President : Yuri Kudryavtsev, Ph.D.

—— (株) Beよんど ——

岩村 吉就 : 元 溶接技術者

製造元 : Structural Integrity Technologies (SINTEC) Inc. Canada
日本総代理店 (株) Beよんど SINTEC Japan部

〒658-0072 神戸市東灘区岡本5丁目2-6 Tel : 078-413-8303, Fax : 078-452-5330
URL : <http://go-beyond.jp> E-mail : office@go-beyond.jp

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—

ユーリー・クデュラテフ・ヤコブ・クレイマン

Integrity Testing Laboratory 社

岩村 吉就

(株) Be よんど

1 はじめに

1995年1月の神戸大震災時の高速道路崩壊以降、専門家による点検・補修工事・設計見直しが行われている。2007年8月には米国の橋梁が突然崩壊し大事故になった。2011年3月の東日本大震災では巨大な津波により壊滅的な被害を受けた。

さらに2012年12月には笹子トンネル崩落事故により、インフラの見直しと補強対策が急務になってきた。

昨年末には首都高速道路開通満50年を迎えている。また、コンテナ埠頭のほとんどのクレーンは建造後30年を過ぎており、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で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高い応力が作用する溶接継手に集中している。溶接継手の疲労強度向上としては応力集中の緩和策としてのグライダー仕上げが一般的であったが、引張残留応力を圧縮残留応力に変え、かつ、応力集中もある程度緩和できる超音波ピーニング法がもっとも効果的であることが専門家の中で認知されてきた^{1)~3)}。さらに、溶接継手の疲労寿命は、鋼材の強度を問わず、軟鋼のそれと同じであるが、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)}。

わが国で始めて公に超音波ピーニング (UIT) 施工が行われたのは、羽田空港第4滑走路への新規橋梁であった。その後、新規橋梁へ頻繁に適用されてきている。

超音波ピーニング装置並びに施工法はウクライナのバトン溶接研究所で開発され、ソビエト連邦崩壊後、欧米に紹介された。そして既設橋梁や他の溶接継手における

補修溶接後の処理法として大きな成果を出している。

カナダのIntegrity Testing Laboratory Inc.では、従来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。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) を開発している。

本稿は従来「溶接技術」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き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。

本稿はインフラや他の溶接構造物に対する有効、かつ、安価な延命策である超音波ピーニング法を提案するものである。本技術の検証と実用化を図られることが望まれる。

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



写真1 標準的な超音波ピーニングシステム「UP-600」

向上させる確実な手法の一つである。UP処理のもっとも大きな効果は、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並びに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、駆動体並びに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。写真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中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させている。写真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20～30kHz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の速度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、音響硬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。したがって、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。

このことは、従来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類似している。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ため圧縮残留応力もより深くまで発生しやすくなる。

3.2 超音波ピーニングの技術と装置

超音波駆動体は20～30kHz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秒間に何百回から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。

疲労改善に対してもっとも大きな効果は、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換させることにある。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の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1に模式的に示す。また、その利点を



写真2 交換可能な一連の作動頭部

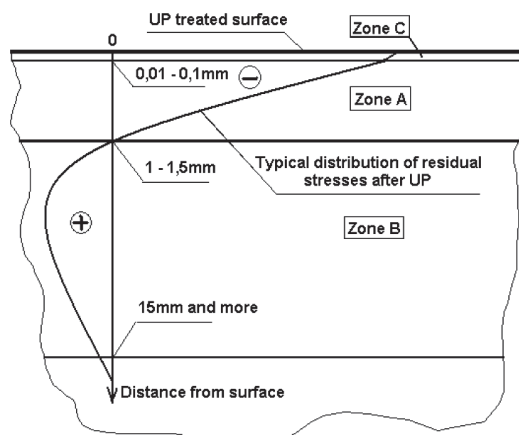


図1 超音波ピーニングによって改善された材料の横断面

表 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	1-1.5mm	Fatigue, corrosion, wear, distortion
B	Zone of relaxation of welding residual stresses	15mm and more	Distortion, crack propagation
C	Zone of nanocrystallization (produced at certain conditions)	0.01-0.1mm	Corrosion, wear, fatigue at elevated temperature

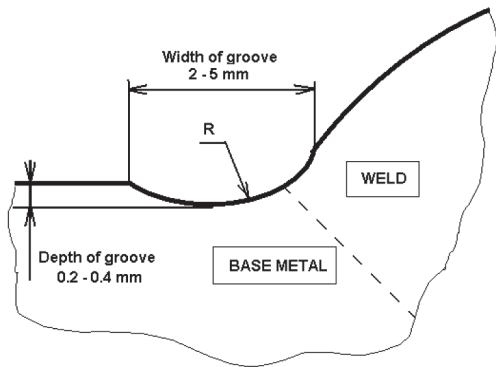


図2 超音波ピーニングによって改善された溶接止端部の形状

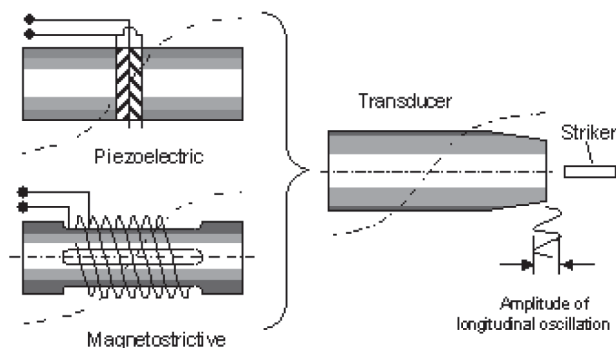


図3 超音波ピーニングの駆動体の模式図

表1に示す。さらに、UPによって改善された溶接止端部の形状を図2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3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、より強力で、高効率で安定性の高いセラミック圧電素子が高温や高応力でも使用され、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じである。セラミック圧電素子を用いたUPシステムを写真3に示す。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



写真3 狭隘部等への小型で軽量の超音波ピーニング装置「UP-500S」

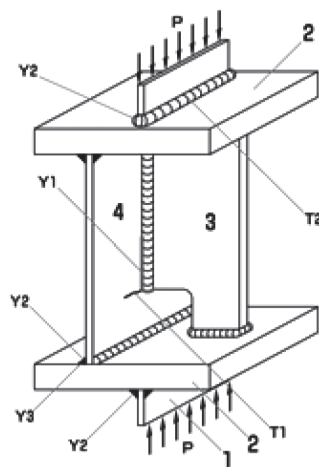


図4 ウェブに縦スティフナをつけた疲労試験用溶接構造物(T1：疲労き裂発生域、Y1：UP施工域、3：スティフナ、4：ウェブ)

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4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2に示した溝が形成された。

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を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

溶接継手疲労試験片の形状を図5に示す。すべての試験は応力比 = 0 で試験された。疲労試験結果を図6に示す。

荷重非伝達型十字すみ肉継手の疲労試験結果を図7に示す。UP処理を施した写真2，図1とも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

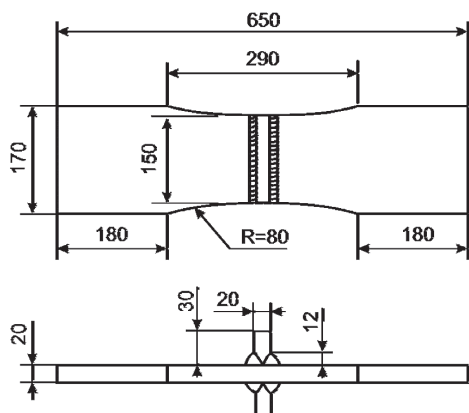


図5 溶接継手の疲労試験片形状

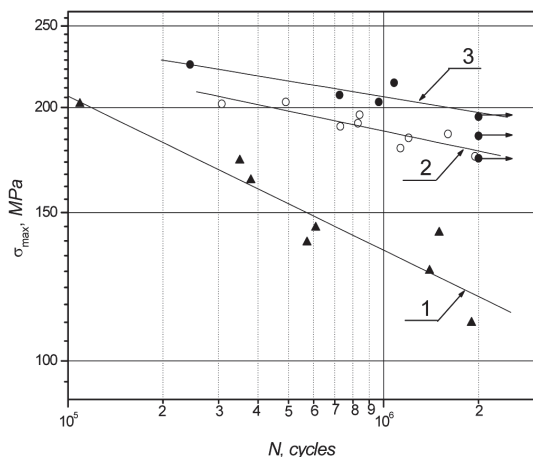


図6 荷重比伝達型十字すみ肉溶接継手のS-N曲線（1：As Weld, 2：疲労試験前にUP処理, 3：As Weld状態で予測疲労寿命の50%まで繰り返し荷重を与えた後にUP処理）

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。

同じような結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7に試験体の形状/寸法を示す。溶接の始終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 で試験された。試験結果を図8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⁾）。既存の鋼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、

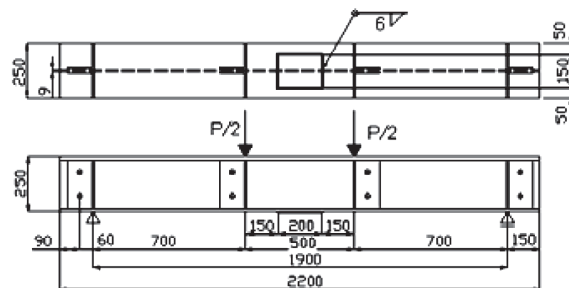


図7 当て板を溶接した鋼桁の曲げ疲労試験片⁸⁾

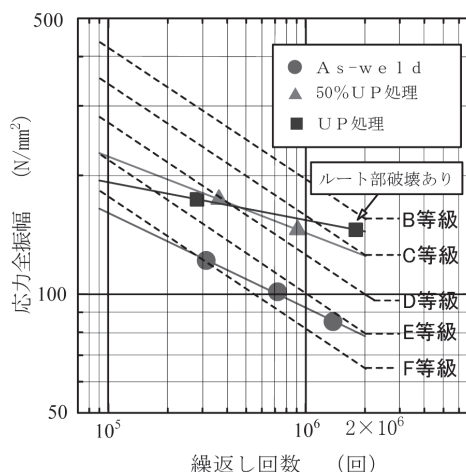


図8 当て板を溶接した鋼桁の曲げ疲労試験結果（S-N線図）⁸⁾

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できることが再確認された。

図6と8の両試験結果ともに、既存の鋼構造物の溶接継手にUP処理を施すことにより、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

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。

疲労き裂を有する溶接構造物の疲労寿命改善の従来か

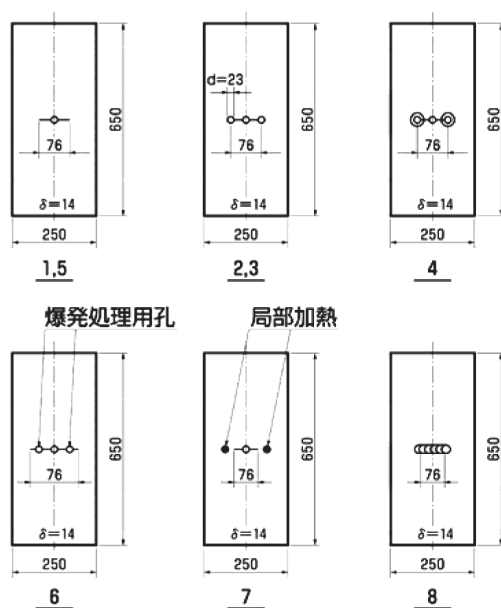


図9 疲労き裂に下記の各種処理を施した試験片形状（1：き裂発生状態のまま、2と3：き裂先端部穿孔加工（冷間加工の有無）、4：き裂先端穿孔部への高張力鋼ボルト挿入、5：過負荷荷重、6：局部爆発処理、7：局部加熱処理、8：補修溶接（溶接止端部へのUP処理の有無））

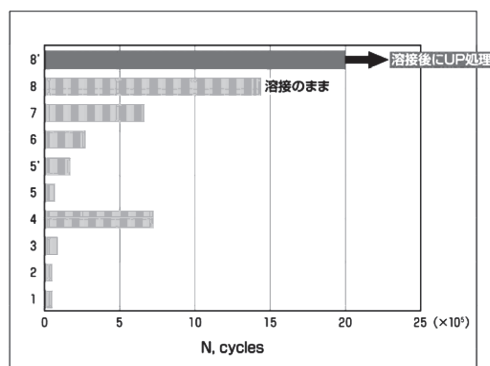


図10 疲労き裂の拘束や補修など各種処理の効果比較（縦軸の番号は図9と同じ処理、5：降伏応力、5'：0.7降伏応力）

らの技術と新しい技術の有効性について検討するために、疲労き裂を有する大型試験片で疲労試験を実施した。過負荷荷重、き裂先端部穿孔、穿孔部への高張力鋼ボルト挿入、局部爆発処理、局部加熱処理、補修溶接並びに補修溶接止端部へのUP処理などについて。

図9に示す疲労き裂を有する数多くの疲労試験について、応力比 $R = 0$ の方振りで最大応力155MPaの条件下で試験を実施した。疲労試験の結果、図10に示すように、補修溶接止端部をUP処理したものがもっとも疲労寿命が伸びることが立証された。

次に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11に示す。疲労試験は完全方振（ $R = 0$ ）の引張条件で行った。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12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

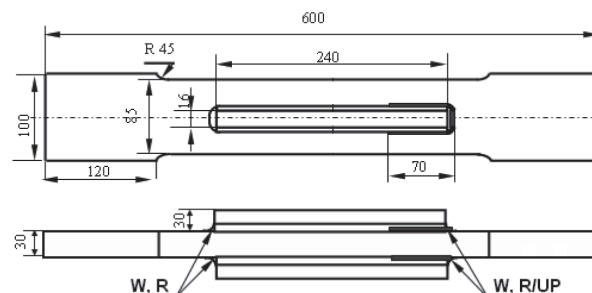


図11 種々の状態で疲労試験を行った溶接継手試験片形状（W-As Weld, R-ガウジング後の補修溶接, R/UP-ガウジングと補修溶接後のUP処理）

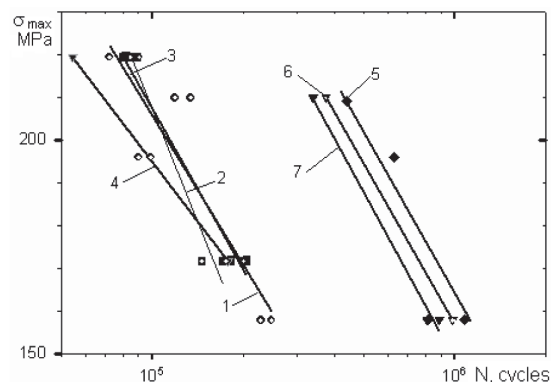


図12 溶接継手の疲労試験結果（1-As Weld状態、2, 3, 4-1回、2回、3回の補修溶接、5, 6, 7-1回、2回、3回の補修溶接後それぞれUP処理）

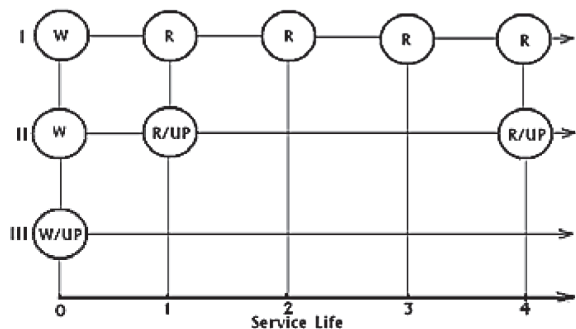


図13 溶接継手の耐久性の模式図 (I-ガウジングと溶接による疲労き裂の補修, II-疲労き裂補修後のUP処理, III-疲労試験前あるいは初期段階でのUP処理, W-As Weld状態, R-ガウジングと溶接による補修, R/UP-補修溶接後のUP処理, W/UP-溶接後直ちにUP)

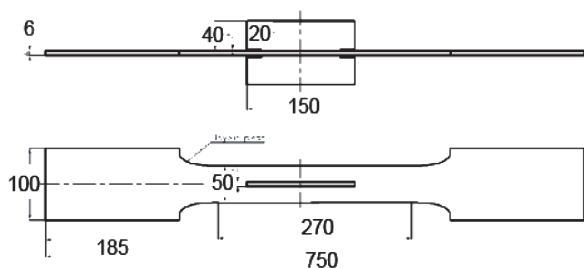


図14 降伏応力960MPa鋼の溶接継手疲労試験片形状¹²⁾

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。

図13は疲労き裂の補修溶接後のUP処理効果についての模式図である。(I)はUP処理をしない場合、(II)は補修溶接後にUP処理を行った場合、(III)は溶接直後あるいは疲労き裂発生までの途中でUP処理を行った場合に区分している。耐用年数1とはUP処理をしない場合で疲労き裂発生までの荷重の繰返し回数である。

図13の○中のRあるいはR/UPとあるのは耐用年数1からスタートし、疲労き裂が生じ補修溶接を繰り返していることを示している。UP処理効果は著しく大きいことをこの図は示している。

7 高張力鋼の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

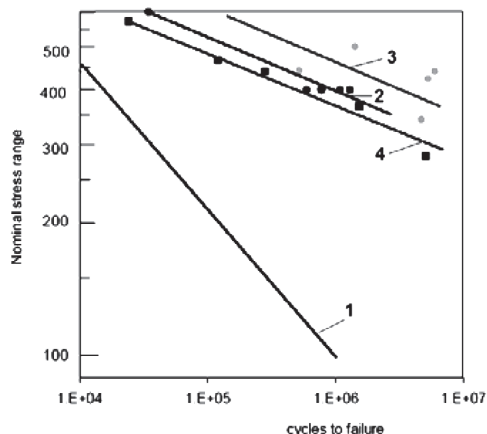


図15 降伏応力960MPa鋼溶接継手の疲労試験結果¹²⁾ (1-As Weld, 2-UIT処理, 3-UP処理, 4-低温変態溶接材の使用)



写真4 破砕機の溶接継手の疲労回復と補修溶接部へのUP適用状況

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ィ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。繰返し数百万回での耐久応力はAs weldのそれに比較して約4倍に上がっている。

8 超音波ピーニング (UP) の工業界への応用

溶接構造物の製造時の疲労強度向上や供用時における疲労回復による延命並びに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技術と装置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、自動車や航空機などがある。

実際、鋼構造物での補修溶接部の疲労寿命の向上並び



写真5 溶接橋梁へのUP処理準備状況（2つのUPシステムとリフト）

に疲労回復へのUP应用の実例の一つである大型破碎機へのUP適用状況を写真4に示す。疲労の観点から疲労き裂の発生が懸念される溶接長300m並びに補修溶接部についてUP処理が施された。

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UP処理を施した時の準備状況とスティフナ溶接部へのUP処理状況を写真5と6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。疲労き裂発生の危険性がある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（写真5）、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、足場組立て等が不要で、かつ、重要な溶接部のみの全長500mについてUP作業が施された。

*上記2例は、定期検査で疲労き裂が発見された場合、その箇所の補修溶接後のUP処理と他の箇所のUP処理での疲労回復に依って延命を図ることができることを示唆している

*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）。

9 おわりに

2009年1月号と2010年2月号の「溶接技術」に紹介した論文を骨子に、日本での試験研究結果も加えて、超音波ピーニング（UP）法による既設鋼構造物の延命策としての有効性を検証した結果、

- ① 既設鋼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期待される。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



写真6 溶接橋の縦スティフナ溶接単部へのUP処理状況

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処理を施すことによって同様な効果が得られる。
- ③ 既設橋梁の延命策としての主要部溶接継手へのUP処理実施（施工以来8年以上経過後も疲労き裂発生せず）および既設大型破碎機溶接継手への疲労回復と補修溶接部の延命策としてのUP処理実施は、定期検査で、例えば疲労き裂が発生していなくても、主要部溶接継手止端部へのUP処理により疲労回復を図り延命が可能なこと並びに疲労き裂が発見された場合には補修溶接の止端部へのUP処理により延命が可能であることを示唆している。
- ④ 超音波ピーニング（UP）装置は100V使用で500W、かつ、小型・軽量なため、既設鋼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のため（大掛かりな工事は不要）、施工費用は合理的なもので済む。
- ⑤ 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。

という結論を得た。

一方、インフラの見直しと補強対策が急務になってきており、かつ、船舶・タンク等の大型構造物では長寿命化への延命策が望まれている。したがって、既設鋼構造物の延命策としてのUP処理の実用化が早急に望まれる。

なお、UP処理による溶接継手の疲労強度向上はグライнда処理の効果とほぼ同等とされており^{3),8)}、UP処理の作業性の良さ（作業時間の大幅な短縮並びに粉塵・騒音など作業環境の改善）等から米国の船級協会（AB）ではその使用を認めている。

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. IW Document XIII2010-04. 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5 E号 論文番号2007E-G2-4
- 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-G12-4
- 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: 超音波ピーニングによる高調力鋼溶接継手の疲労強度の改善, 溶接技術, 2010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. 18.
- 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. Bjork. Variable Amplitude Fatigue Strength of Improved HSS Welds. International Institute of Welding. IIW Document XIII-2224-08. 2008. I I - r s -

