

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560996

研究課題名(和文)疲労強度改善処理における最適施工手法の開発

研究課題名(英文)Development of optimum treatment method in the fatigue strength improvement

研究代表者

穴井 陽祐 (Anai, Yosuke)

独立行政法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：60470051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：溶接構造物をより合理的かつ経済的に設計・製作するため、溶接止端部への二次加工処理による疲労強度改善効果を明確にする動きが活発化している。

本研究では新たな二次加工処理手法である高周波処理法のひとつとして超音波ピーニングを対象とし、当該手法による溶接止端処理を施した隅肉T字継手の4点曲げ疲労試験を行った。疲労試験の結果、繰り返し曲げ荷重が作用する部位に対しても超音波ピーニングによる疲労強度改善効果が得られることを示し、板厚効果への影響に対する考察を行った。

研究成果の概要(英文)：For more rational and economical design and building of the welded structures, it is important to clarify the effect of improving the fatigue strength by the post weld treatment at the weld toe.

In this study, we aimed at the ultrasonic peening which is one of the High Frequency Mechanical Impact treatments. And we carried out 4-point bending fatigue tests of fillet T-joint whose weld toes were peened by the Ultrasonic Peening. From results of the fatigue test, we evaluated the improvement effect of the fatigue strength by Ultrasonic peening and examined the influence for the thickness effect under cyclic bending load.

研究分野：工学

キーワード：疲労 溶接継手 強度改善 板厚効果 超音波ピーニング

### 1. 研究開始当初の背景

溶接構造物をより合理的かつ経済的に設計・製作するため、溶接止端部への二次加工処理による疲労強度改善効果を明確にする動きが活発化している。その中で、既存の技術であるグラインダー、ショットピーニング、ハンマーピーニング等による二次加工処理手法に加え、新たな手法として超音波ピーニング等の高周波処理法が注目されており、実構造物レベルでの適用実績も増えてきている。一方で、板厚が厚くなるほど疲労強度が低下することは板厚効果として知られており、近年の溶接構造物の大型化・厚板化を考慮すると、二次加工処理による改善効果に加え、その板厚効果による疲労強度低下も考慮した評価を行うことが重要である。

### 2. 研究の目的

申請時における当初の目的は、溶接継手として角回し溶接継手を対象とし、高周波処理法の施工範囲（箇所）や施工順序の影響を明らかにし、合理的な施工方法を考案するというものであった。しかしながら、研究開始後に高周波処理を含む二次加工処理に関するヒアリングを行った結果、申請時に想定していた内容についての各業界での調査・研究が進んでいることが判明したため、研究目的の変更を行った。

すなわち、疲労強度改善効果および板厚効果への影響については、上述の通り現在も多くの研究が行われているが、引張荷重条件下を対象としたものが中心である。そこで、本研究では施工箇所の載荷状態に着目し、曲げ荷重が載荷するような部位への施工による疲労強度改善効果を明らかにするため、隅肉 T 字継手を対象とした曲げ荷重下における超音波ピーニングによる疲労強度改善効果を検証し、板厚効果を明らかにすることとした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 隅肉 T 字継手試験片の製作

繰り返し曲げ荷重下での疲労試験を行うにあたり、隅肉 T 字継手試験片を製作した。供試材は 22mm 厚ならびに 40mm 厚の SM490A 鋼である。試験片の製作にあたっては、溶接時の熱変形を小さくするため、2 段階に分けて製作した。最初に、約 1000mm×600mm 四方の隅肉溶接継手を各板厚で製作した。溶接方法は半自動 CO<sub>2</sub> 溶接で、指定溶接脚長は鋼船規則 CSR-B 編 F2 を採用した。次に、製作した溶接継手から短冊状に切り出しを行い、その後試験片の形状に加工した。

#### (2) 溶接止端への高周波処理

溶接止端への高周波処理による曲げ疲労強度改善効果を検証するため、製作した溶接まま試験片の半数に対し、後述のとおり溶接止端部への超音波ピーニングの施工を実施した。また、施工の前後において溶接止端の

状態の変化を検討するため、溶接止端形状、残留応力測定を行った。併せて、有限要素法による応力分布の変化推定、ならびに固有応力法による残留応力分布の推定を行った。

#### (3) 疲労試験と評価方法

製作した試験片を繰り返し 4 点曲げ荷重を作用させた疲労試験に供し、各板厚における S-N データを取得した。得られたデータを基に、超音波ピーニングによる疲労強度の改善度および板厚効果に対する考察を行い、曲げ荷重下における溶接止端への超音波ピーニングの効果について検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 超音波ピーニングによる溶接止端の変化

図 1 に、本研究で製作した隅肉 T 字継手の寸法を示す。

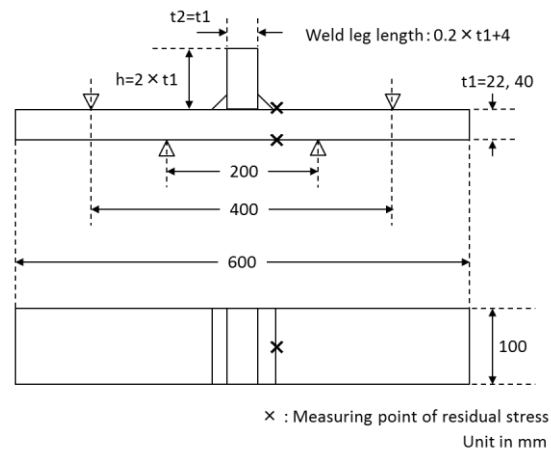


図 1 隅肉 T 字継手試験片

製作した試験片のうち半数に対して、溶接止端に超音波ピーニングを施した。超音波ピーニングは高周波処理法のひとつであり、当該手法においては、超音波によって打撃子が駆動源の端部と被処理材の間を 20~30kHz の高周波数で振動し、被処理部に衝撃を加える。これにより、以下のような効果が得られ、疲労強度が向上するとされている（引用文献①）。

- ・溶接止端形状の改善（応力集中の緩和）
- ・打撃による塑性変形（圧縮残留応力付与）
- ・材料表面の改質（金属組織の微細化）

本研究では、超音波ピーニングを施工する装置として UP-500S システム（SINTEC 社製）を使用した。当該装置の外観を図 2 に、性能を表 1 に示す。併せて超音波ピーニング施工中の様子を図 3 に、超音波ピーニング施工後の溶接止端部の様子を図 4 に示す。UP-500S を用いた超音波ピーニングは、その標準的な施工速度が約 300mm/min とされており、例えば IIW の溶接後改善処理の指針におけるバグラインダによる溶接止端切削の標準的な施工速度 50mm~100mm と比べた場合、3 倍以上の速度で施工可能という点が大きな特長

といえる。



図2 UP-500S システムの外観

表 1 UP-500S システムの仕様

ハンドツール質量 [kg]	2.7
発振器質量 [kg]	6.8
電圧 [V]	110-120 or 220-240
最大出力 [W]	500
振動周波数 [kHz]	20-30
冷却用圧縮空気圧 [MPa]	0.25-0.35



図3 ピーニングの施工中の様子

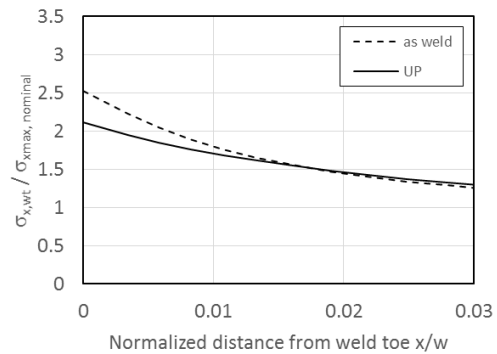


図4 ピーニング施工後の溶接止端の様子

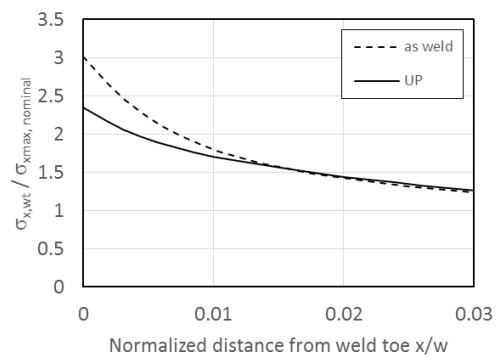
### ① 応力集中の緩和

応力集中に対する超音波ピーニング（以下、UP）施工の効果を検討するため、溶接まま試験片ならびに UP を施工した試験片（以下、UP 施工試験片）に対し、歯科印象材を用いた溶接止端半径の計測を実施した。その結果、溶接止端半径は平均で約 0.5mm から約 2mm へと変化しており、溶接止端半径増大による応力集中の緩和が見込まれた。そこで、測定された溶接止端半径をモデル化した有限要素法を用いた弾性解析を行い、施工前後の溶接止端部における応力集中度の変化に関して検討した。比較した結果を図 5 に示す。図 5 より、各板厚で UP により応力集中が低減さ

れていることがわかる。また、図 6 より、板厚が大きいほど応力集中の低減率が大きくなっていることもわかる。



a) 板厚: 22mm



b) 板厚: 40mm

図5 溶接止端近傍の応力分布

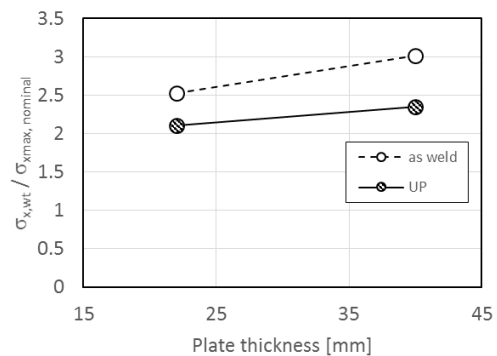
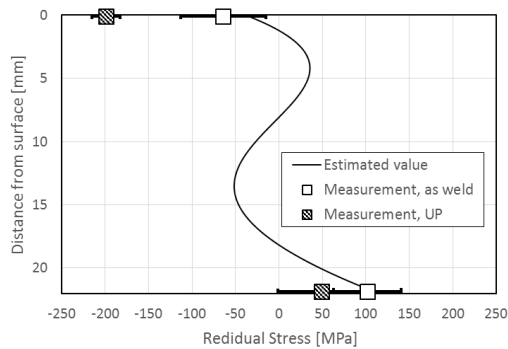


図6 応力集中度の比較

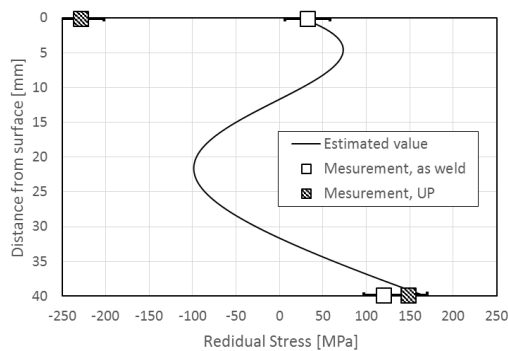
### ② 圧縮残留応力の付与

次に、施工による圧縮残留応力の付与効果を検討するため、X 線残留応力測定装置（パルステック工業社製  $\mu$ -x360）を用いて、試験片の幅方向中央における材料表面の残留応力測定を実施した（図 1 中×印位置）。溶接まま試験片については溶接止端近傍を、UP 施工試験片については施工の溝端部近傍を測定点とし、溶接線に垂直な方向の残留応力を測定した。なお、測定箇所においては電解研磨を行い、材料表面から深さ約 0.1mm の位置とした。各試験片の測定結果ならびに固有応力法により推定した溶接まま試験片の残

留応力の板厚方向分布を図7に示す。図7より、UPによって、試験片表面に大きな圧縮残留応力が付与されていることがわかる。



a) 板厚: 22mm



b) 板厚: 40mm

図7 UP施工による残留応力の変化

## (2) 疲労試験結果と考察

### ① 曲げ疲労強度の改善効果

疲労試験で得られた結果を図8に示す。縦軸は公称曲げ応力範囲を示し、横軸は破断寿命  $N_f$  である。図8より、超音波ピーニングを施工したことによって、疲労強度の大幅な改善が見られた。更に、 $t=40\text{mm}$ の結果をみると、S-N線図の傾きがやや緩やかになっていることがわかる。

本試験においては、許容応力法による降伏強度評価において、各供試材の降伏応力に対して安全率 0.8 が設定された場合を想定し、各試験における曲げにより生じる最大公称応力が許容応力を上回らない範囲で実施した。ここでは、約  $5 \times 10^6$  回でランアウトと見なしているが、 $t=22\text{mm}$ のUP施工試験片については、最大公称応力が許容応力に近い公称応力範囲 276MPa の载荷条件においても、 $2.5 \times 10^6$  回以上の疲労寿命となっている。

また、各板厚の溶接まま試験片ならびにUP施工試験片の  $2 \times 10^6$  回強度を算出した。ただし、現時点の試験点数が少ないことから、溶接まま試験片の  $2 \times 10^6$  回強度の算出にあたっては、 $m=3$  の傾きを使用した。また、UP施工試験片の  $t=22\text{mm}$  の  $2 \times 10^6$  回強度の算出にあたっては、 $t=40\text{mm}$  の傾きを採用した。得られた結果を表2にまとめる。表2より、それ

ぞれの板厚で  $2 \times 10^6$  回強度が2倍以上となっていることがわかる。

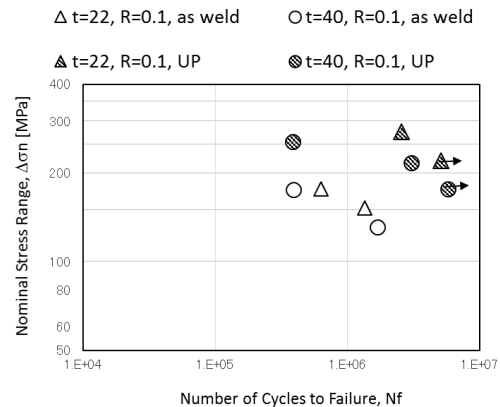


図8 溶接まま試験片とUP施工試験片のS-Nデータ

表2  $2 \times 10^6$  回強度の比較

止端処理	板厚 [mm]	$2 \times 10^6$ 回強度 [MPa]
溶接まま	22	124.8
	40	107.7
UP	22	280.6
	40	222.3

### ② 引張荷重下の疲労強度との比較

図9にて、前節に示した繰り返し曲げ荷重下で得られた結果（図中網掛け記号）と、溶接止端部に超音波ピーニングを施工した荷重非伝達型十字継手試験片の繰り返し引張荷重下で得られた結果（図中黒抜記号）を比較した。

原らの研究（引用文献②）で供された試験片は、供試材がKA36、主板厚と付加物厚が等しいという点において、本研究で供した試験片と類似している。更に、用いられた超音波ピーニング装置はSINTEC社の超音波ピーニング装置UP-500であり、こちらも本研究で使用した装置と同等の効果が得られるものである。

図9において、同じ板厚である22mmの結果を比較すると、引張载荷時と曲げ载荷時の結果はほぼ同じ線上に位置しており、同等の疲労強度が得られている。しかしながら、両者の試験条件では応力比が異なり、また、原らの行った疲労試験の結果によれば、超音波ピーニングを施工した場合、応力比が大きくなるにしたがって疲労試験結果は短寿命、低応力範囲に移行していくという結果が得られている。したがって、超音波ピーニング施工時においても、曲げ荷重条件下では引張荷重条件下と同等以上の疲労強度が期待される。

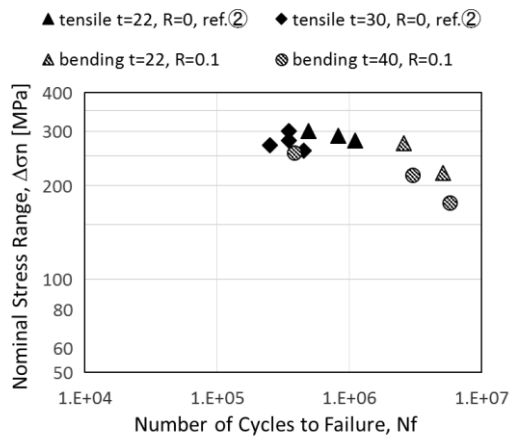


図9 引張荷重下と曲げ荷重下におけるUP施工試験片のS-Nデータの比較

### ③板厚効果への影響

疲労試験で得られたS-Nデータを基に、 $2 \times 10^6$ 回強度と板厚の関係から、板厚効果を検討した(図10参照)。なお、図中の溶接まま試験片の板厚効果指数については、隅肉T字継手の3点曲げ試験結果から得られた八木らの値 $n=-1/3$ (引用文献③)を用いている。図10より、現時点での結果から算出されたUP施工試験片の板厚効果指数は $n=-1/2.6$ となり、溶接まま試験片の板厚効果指数 $n=-1/3$ よりわずかに厳しいものとなった。しかしながら、疲労強度の改善効果として、2倍以上の $2 \times 10^6$ 回強度が得られていることを考慮すると、繰り返し曲げ荷重を受ける厚板へも十分有効であるといえる。

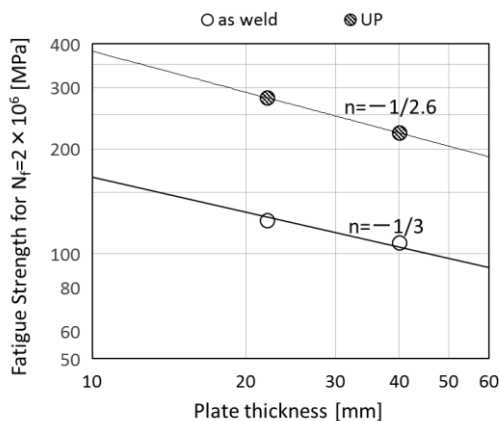


図10 溶接まま試験片とUP施工試験片の板厚効果の比較

### <引用文献>

①岩村吉就：超音波ピーニング(UP)システムの提案 - 溶接継手の疲れ強さを向上 -, 溶接技術, 2005年3月号, pp.128-133

②原純哉他：船体構造における超音波ピーニングによる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, 2010, pp.599-602

③八木順吉他：溶接継手の疲労強度に関する板厚効果評価基準の検討, 日本造船学会論文集, 第169号, 1991, pp.301-309

### 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0件)

[学会発表] (計1件)

穴井陽祐, 田中義久, 岩田知明, 丹羽敏男：超音波ピーニングによる曲げ疲労強度改善効果, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第20号, 2015, 査読無し, pp.497-500

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

穴井陽祐 (ANAI, Yosuke)  
独立行政法人海上技術安全研究所・構造安全評価系・主任研究員  
研究者番号：60470051

#### (2) 研究分担者

丹羽敏男 (NIWA, Toshio)  
独立行政法人海上技術安全研究所・構造盤技術系・グループ長  
研究者番号：10208267

岩田知明 (IWATA, Toshiaki)

独立行政法人海上技術安全研究所・構造基  
盤技術系・グループ長  
研究者番号：50358397

田中義久 (TANAKA, Yoshihisa)  
独立行政法人海上技術安全研究所・構造基  
盤技術系・主任研究員  
研究者番号：70399517

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：