

超音波振動による局所的な塑性変形を利用した 溶接残留応力の低減法

東京都立工業高等専門学校 機械工学科
教授 青木 繁
(平成15年度研究開発助成 AF-2003017)

キ - ワ - ド : 超音波振動, 溶接, 残留応力

1. 研究の目的と背景

溶接は多くの構造体に用いられている接合法である。溶接は局部的に熱を加える加工法であるために、溶接部付近に残留応力が発生する。表面の引張残留応力は部材の疲労強度などに悪影響を及ぼす¹⁾ために、これを簡便に、効率的に低減するための方法を開発することが産業界から求められている。残留応力の低減法としては熱処理、ショットピーニングなどが用いられている²⁾。これらの方法では、特殊な装置を必要とする、時間がかかるなどの問題がある。また、溶接終了後に振動を加えることによって残留応力を低減する方法も提案されているが、その有効性については疑問視されている³⁾。

上記のことを考慮して、これまでに溶接中に振動を加えることによって、溶接部付近に生じる引張残留応力を低減する手法を提案し、その有効性を確認してきた。振動としては、溶接試験片の1次の固有溶接中に近い、比較的低い振動数の振動⁴⁾、不規則な振動⁵⁾を用いた。溶接直後には、溶接部付近は高温であるために降伏力が低く、比較的小さい振動で局部的に塑性変形を生じさせることができると考えられる。このことによって残留応力を低減することができると考えられる。

一方、超音波は難削材の加工、深絞りなど多くの加工法に用いられている⁶⁾。超音波は振動の中でも固体中の伝達効率が良いことが知られている。したがって、曲線部をもつ複雑な形状の構造物を溶接する際の残留応力の低減に有効であることが期待される。

本研究では、これらのことを考慮して、超音波振動を加えることによって残留応力を低減する手法を提案し、その有効性を検討することを目的としている。まず、基礎的なデータを得るために、平板の突合せ溶接によってこの方法の有効性を確認した。次に、曲線部をもつ複雑な形状の構造物にこの方法を応用した。このような構造物として、ホイールを対象とした。さらに、この方法の有効性を理論解析によって検証した。

2. 平板の突合せ溶接

本手法の基礎的なデータを得るために、平板の突合せ溶接の際に超音波振動を加えた。図1に示す薄板を対象とするため、厚さ方向の残留応力は一定となる。2枚の

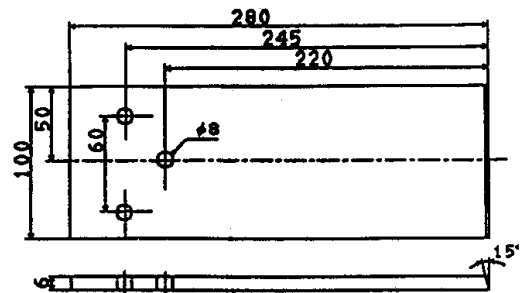


Fig.1 Size and shape of specimen

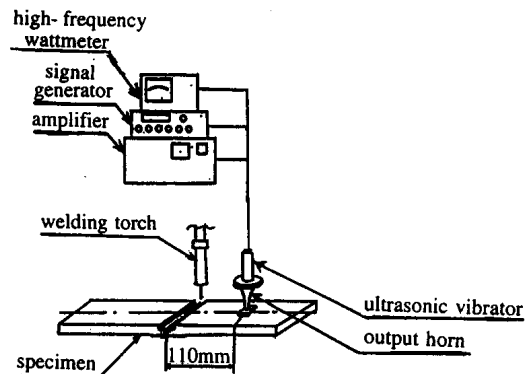


Fig.2 Experimental setup

試験片を支持装置に固定し、自動炭酸ガスアーク溶接機で溶接した。図2に実験装置を示す。開先形状はV型、ルート間隔は1mm、開先角度は30度である。溶接は1層溶接とした。試験片の材質は一般構造用圧延鋼材(SS400)とした。圧延における残留応力を除去するために、試験片を真空焼鈍炉で800°Cで1時間保持し、その後200°Cになるまで炉冷した。ワイヤ径は1.2mm、電圧は25V、電流は200Aとした。溶接速度は30cm/minである。溶接部の中心から110mmの点に超音波振動を加えた。超音波振動の振動数は17.8kHzである。広帯域増幅器でセンササイズからの信号を増幅し、超音波振動はエクスポネンシャル型のホーンを用いて加えた。

残留応力は6mol/lの塩酸を用いて酸化被膜を除去し、市販の化学研磨液を用いて平滑化した後、X線残留応力測定装置で測定した。X線残留応力測定の条件を表1に

Table 1 Conditions of measuring of residual stress

Characteristic X-rays	Cr-K α
Diffraction plane	α -Fe(211)
Filter	Vanadium foil
Stress determination	$\sin^2\psi$ method
Psi angle	0°, 15°, 30°, 45°
Irradiated area	2x4mm ²
Tube voltage and current	30kV, 8mA
Scan condition	1.0°
Peak determination	Half value width method
Direction of measurement	Direction of bead
X-ray optics	Parallel beam

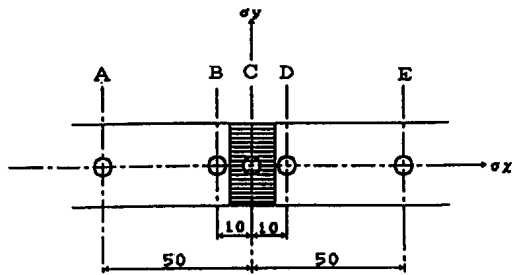


Fig.3 Measuring locations of residual stress

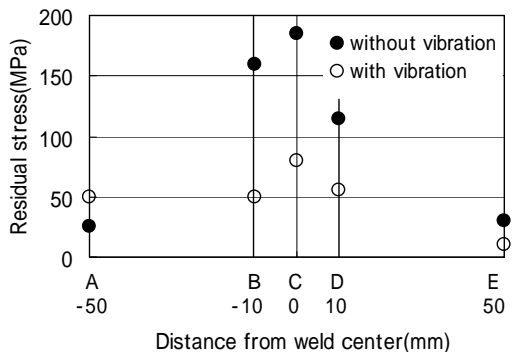


Fig.4 Residual stress on thin plate

示す．図 3 に残留応力の測定点を示す．試験片の長手方向の中心線上で 5 点を選び，ビード方向の残留応力を測定した．点 C はビード上，点 B および点 D はビードの中心から 10mm，点 A および点 E は 50mm 離れた点である．

図 4 に残留応力の測定結果を示す．は超音波振動を加えないで溶接した試験片の結果，は超音波振動を加えながら溶接した試験片の結果である．ビード上の点 C では超音波振動を加えると引張残留応力が大幅に低減されている．点 B および点 D でも超音波振動を加えながら溶接すると引張残留応力が低減されている．点 A および点 E では引張残留応力はあまり変わらない．

3. ホイールの溶接のための超音波振動伝達装置

曲線部をもつ複雑な形状の構造物にこの方法を応用した．このような構造物として，ホイールを対象とした．ホイールの溶接時にも残留応力が発生することが知られている．ホイールは曲線構造であるために，超音波振動を効率的に伝達する必要がある．まず，超音波振動の伝達機構の開発およびその効果について述べる．次に装置を改良して溶接した場合の結果について述べる．

3.1 伝達機構

図 5 にホイールの形状および寸法を示す．ホイールはリムにディスクを 2000N で圧入する構造で，4 箇所を溶接することによって接合している．図 6 に示すように，ホイールを回転台上に固定した．ホイールを回転させながら裏側から溶接し，表側から超音波振動を加えた．

図 7 に超音波振動伝達装置の概念図を示す．超音波振動は超音波振動子の振動をホーンによって与えた．ホー

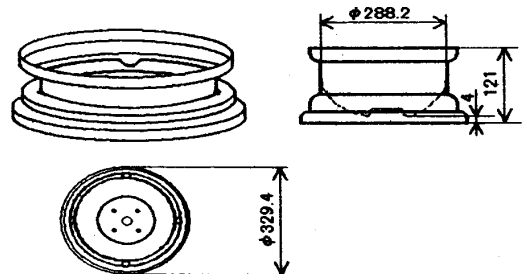


Fig.5 Size and shape of wheel (mm)

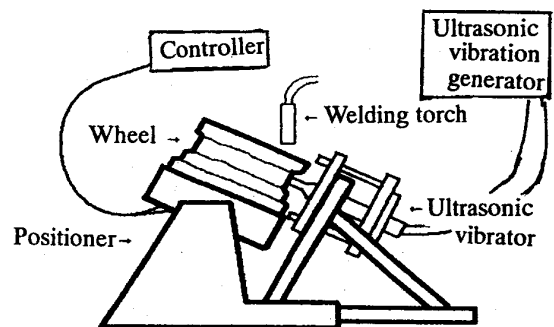


Fig.6 Experimental setup

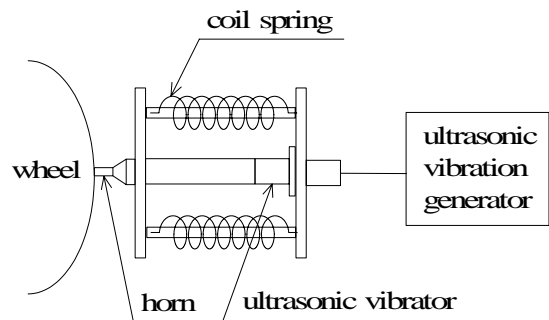


Fig.7 Vibration transmission device

ンの先端は平面であり，ホイールに線で接するようにした．この状態で回転中もホーンがホイールに接するように伝達装置を製作した．ホーンは図7に示すように，2本の棒にコイルばねを用いてホイールとの隙間が生じないようにした．超音波振動の振動数は38kHzであり，出力は100Wである．

溶接には自動炭酸ガスアーク溶接装置を用いた．ワイヤの径は1.2mm，電圧は25V，電流は200Aとし，溶接速度は5mm/sとなるようにホイールを回転させた．ビードの長さは約80mmである．

残留応力は平板の場合と同様の処理をして，X線残留応力測定装置を用いて測定した．残留応力の測定条件は表1と同様である．図8に示すそれぞれの溶接箇所a,b,c,dのビードの中央で，ビード方向の残留応力を測定した．それぞれの点で4回測定し，平均値を求めた．それぞれのビードの長さは80mmである．溶接箇所aおよびbでは超音波振動を加えないで溶接し，溶接箇所cおよびdでは超音波振動を加えて溶接した．

3.2 実験結果

表2に溶接箇所aで測定した残留応力の測定値の例を示す．表の右端の列には積分幅を示す．表3には68.3%信頼限界を示す．

表4にはそれぞれの溶接箇所での4回測定した残留応力の平均値を示す．aおよびbは超音波振動を加えない場合，cおよびdは超音波振動を加えた場合の結果である．表の右端の列には積分幅を示す．超音波振動を加えない場合には引張残留応力が発生しているが，超音波振動を加えた場合には圧縮残留応力となる傾向がみられる．また，超音波振動を加えた場合には，積分幅がやや増加する傾向がみられる．

このことから，この伝達装置で超音波振動が比較的良く伝達されていたと考えられる．また，超音波振動を加えながら溶接すると，引張残留応力が低減されることが明らかになった．

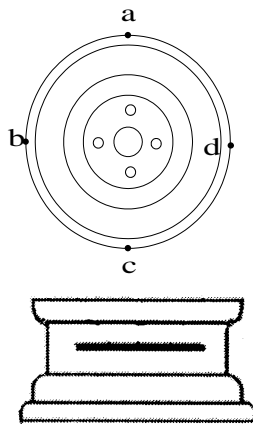


Fig.8 Measuring locations of residual stress on wheel

Table 2 residual stress at a

	Residual stress (MPa)	Integral width
1	45.25	2.13
2	23.75	2.12
3	-18.00	2.21
4	-17.00	2.20

Table 3 Confidential limit of residual stress at a

	68.3% confidence limit (MPa)
1	8.00
2	6.25
3	10.50
4	16.00

Table 4 Average residual stress

Position	Residual stress (MPa)	Integral width
A	45.25	2.13
B	23.75	2.12
C	-18.00	2.21
D	-17.00	2.20

4. 改良された装置によるホイールの溶接

ばねを用いた超音波振動伝達装置を用いた実験について述べた．さらに，この伝達機構に改良を加え，残留応力がより確実に低減する方法を開発し，その効果について述べる．

4.1 改良装置

ホイールと溶接箇所および超音波振動の周波数と出力は3.と同様にした．ホイールを回転させながら裏側から溶接し，表側から超音波振動を加えた．

図9に改良した超音波振動伝達装置の概念図を示す．超音波振動は超音波振動子の振動をホーンによって与えた．ホーン先端は球面とし，ホイールに点で接するように改良した．この状態で回転中もホーンがホイールに接するように伝達装置を製作した．ホーンは図9に示すように，エアシリンダを用いてホイールとの隙間が生じ

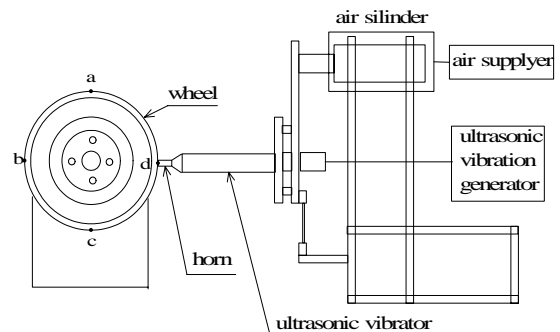


Fig.9 Improved experimental setup

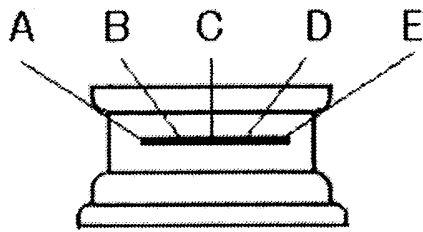


Fig.10 Measuring locations of residual stress on each bead

ないようにした。エアシリンダは気圧が 0.1MPa で押付力は 80N である。

溶接には自動炭酸ガスアーク溶接装置を用いた。ワイヤの径は 1.2mm, 電圧は 24V, 電流は 210A とし, 溶接速度は 12.5mm/s とするようにホイールを回転させた。ビードの長さは約 80mm である。

残留応力は平板および 3 の場合と同様の処理をして, X 線残留応力測定装置を用いて測定した。測定条件は表 1 と同様である。図 9 に示すそれぞれの溶接箇所 a, b, c, d のビード上で, ビード方向の残留応力を測定した。それぞれの溶接箇所図 10 に示すように, 20mm 間隔で 5 箇所測定した。溶接箇所 a および c では超音波振動を加えないで溶接し, 溶接箇所 b および d では超音波振動を加えて溶接した。

4.2 実験結果

表 5 に残留応力の測定値を示す。表の最下段には 5 箇所での測定値の平均値を示す。68.3% 信頼限界は全ての測定箇所でも 2MPa または 3MPa であった。超音波振動を加えるとほぼ全ての測定点で引張残留応力が低減されている。全体に, 超音波振動を加えながら溶接すると, 引張残留応力が 20~30% 低減されることが明らかである。平均値からもそのことが明らかである。

超音波振動荷重を加えながら溶接すると, 引張残留応力が低減されていることから, 改良した伝達装置で超音波振動が良好に伝達されていたと考えられる。

5. 理論解析

溶融直後の金属の降伏力は非常に低く, 小さな外力で塑性変形を生じさせることができると考えられる。こ

Table 5 Residual stress (MPa)

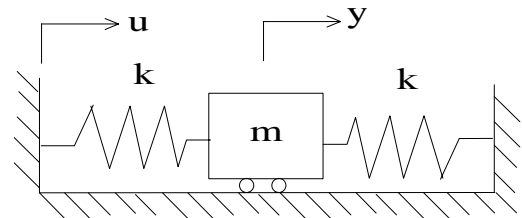
Position	Without vibration		With vibration	
	a	c	b	d
A	150	120	150	120
B	120	110	100	90
C	110	100	100	30
D	140	90	80	70
E	50	100	50	50
Average	114	104	96	72

では, このことを考慮した力学モデルを用いたシミュレーションによって, 実験結果を検討した。主に平板のビード上の残留応力に注目した。

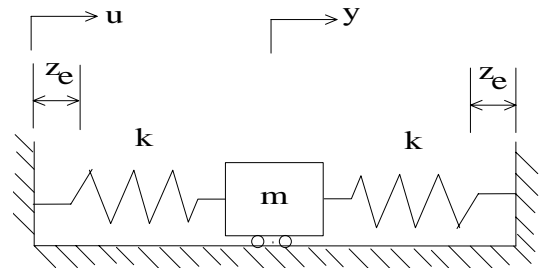
5.1 解析モデル⁷⁾

上記のことを考慮し, 図 11 に示す 1 自由度系力学モデルを用いた。振動方向がビード方向である。図 11 (b) に示すように, ばねを釣合位置から Z_e だけ引張った状態を考える。この場合, kZ_e が初期の残留応力 (振動を加えない場合に生じる残留応力) となる。塑性変形を考慮するために, 図 12 に示す完全弾塑性復元力特性を考慮した。 Z_r は速度の符号が変わったときの変位を表す。応答の振幅が比較的小さく, 引張力を受けたときのみ塑性変形すると仮定すると, 運動方程式は,

$$m\ddot{y} + k(y - u - Z_e - Z_p^-) + k(y - u + Z_e - Z_p^+) = 0 \quad (1)$$



(a) without preload



(b) with preload

Fig.11 Analytical model

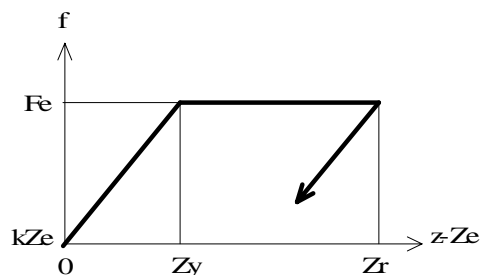


Fig.12 Perfectly-elasto-plastic force-deformation relation

ここで、 Z_p^+ および Z_p^- はそれぞれ左側および右側のばねの永久変形量を表す。入力に対する相対変位 $z=(y-u)$ に関する運動方程式は、

$$\ddot{z} + \frac{\omega_n^2}{2}(z - Z_e - Z_p^-) + \frac{\omega_n^2}{2}(z + Z_e - Z_p^+) = -\ddot{u} \quad (2)$$

左側のばねが降伏した場合、すなわち $z + Z_e - Z_p^+ > Z_y$ および $\dot{z} > 0$ のときに、運動方程式は、

$$\ddot{z} + \frac{\omega_n^2}{2}(z - Z_e - Z_p^-) + \frac{F_e}{m} = -\ddot{u} \quad (3)$$

ここで、 $\omega_n = \sqrt{2k_x/m}$ は弾性範囲内の固有円振動数、 F_e は降伏力を表す。 \dot{z} が負になる前に、 $\dot{z}=0$ となったときの変位を $Z_r + Z_e$ とすると、 Z_p^+ は次式で与えられる。

$$Z_p^+ = Z_r + Z_e - Z_y \quad (4)$$

その後は弾性範囲内の式(1)を用いる。右側のばねが降伏した場合、すなわち $z - Z_e - Z_p^- < -Z_y$ および $\dot{z} < 0$ のときに、運動方程式は、

$$\ddot{z} - \frac{F_e}{m} + \frac{\omega_n^2}{2}(z + Z_e - Z_p^+) = -\ddot{u} \quad (5)$$

\dot{z} が正になる前に、 $\dot{z}=0$ となったときの変位を $Z_r - Z_e$ とすると、 Z_p^- は次式で与えられる。

$$Z_p^- = Z_r - Z_e + Z_y \quad (6)$$

その後は弾性範囲内の式(1)を用いる。

kZ_p^+ および kZ_p^- はそれぞれ左側および右側で開放された残留応力である。 kZ_p^+ が kZ_p^- と等しくないとき、両者は静的に釣合うものとする。振動を加えた後の残留応力は次式で与えられる。

$$F_{yf} = 0.5 \left\{ k(Z_e - z_p^+) + k(Z_e + z_p^-) \right\} \quad (7)$$

式(7)は力の単位をもつが、単位面積当たりの力とすると応力になる。

3.2 解析結果

入力項 \ddot{u} は

$$\ddot{u} = U \sin \omega t \quad (8)$$

で与えられる。平板での実験結果との対応を考え、入力の振動数 $f = \omega/2\pi$ は 17.8kHz、固有振動数 $f_n = \omega_n/2\pi$ は 60Hz とした。いくつかの Fe/mY (入力の振幅と降伏力の比) および kZe/Fe (初期の残留応力と降伏力の比) に対する σ_f/σ_i (超音波振動を加えた場合と加えない場合の残留応力の比) の値を表 6 に示す。この表の値は試験片の固有周期 ($2\pi/\omega_n$) の 10 周期後の値を示す。この時間以上の計

算をしても σ_f/σ_i の値は変わらない。この表は、いくつかの kZe/Fe (振動を加えない場合の残留応力と降伏力の比) の値に対する結果も示している。

この表から、すべての条件で σ_f/σ_i の値は 1 以下である。このことは、超音波振動を加えながら溶接をすると残留応力が低減されることを示している。また、 Fe/mY が小さいほど、すなわち入力振幅が大きいほど残留応力が低減されている。このことはこれまでの著者らの実験結果⁴⁾と一致する。また、 kZe/Fe が小さいほど σ_f/σ_i がやや小さくなる傾向がある。ここでは kZe/Fe が 1 に近い条件を選んだ。すなわち初期の残留応力が降伏力に近い条件を選んだ。凝固直後の降伏力は小さいことから、この条件が満たされていると考えられる。

6. 結言

超音波振動を加えることによって残留応力を低減する手法を提案し、その有効性を検討した。

まず、基礎的なデータを得るために、平板の突合せ溶接によってこの方法の有効性を検討した。その結果、超音波振動を加えるとビード上で引張残留応力が大幅に低減されることが明らかになった。

次に、曲線部をもつ複雑な形状の構造物にこの方法を応用した。このような構造物として、ホイールを対象とした。ホーンがホイールの回転中にも接して超音波振動荷重を有効に伝達できるように、コイルばねを用いた伝達装置を製作した。超音波振動を加えない場合には引張残留応力が発生するが、超音波振動を加えながら溶接すると引張残留応力が圧縮残留応力となる傾向がみられた。

さらに、エアシリンダを用いて伝達装置を改良した。超音波振動を加えない場合には引張残留応力が発生するが、超音波振動を加えながら溶接すると引張残留応力が 20~30% 低減されることが明らかになった。

これらのことから、ホイールのような曲線部をもつ構造物に対しても、超音波振動を加えながら溶接すると引張残留応力が低減されることが明らかになった。

溶融直後の金属の降伏力は非常に低く、小さな外力で塑性変形を生じさせることができると考えられる。以上のことを理論的に検討するために、塑性変形を考慮した力学モデルを用いて振動解析を行った。その結果、超音波振動を加えながら溶接すると、引張残留応力を低減することができることを検証することができた。

Table 6 Ratio of residual stress of specimen with vibration to that without vibration

kZe/Fe	Fe/mY			
	0.01	0.008	0.005	0.003
0.9	0.970	0.953	0.881	0.670
0.8	0.966	0.948	0.866	0.632
0.7	0.961	0.940	0.847	0.575

7. 謝辞

本研究を遂行するにあたり，財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成 15 年度研究開発助成金の交付を受けたことを記し，ここに深く感謝の意を表します．

文 献

- 1)須藤一，残留応力とゆがみ，内田老鶴，1994，pp.156-161
- 2)溶接学会，溶接便覧，丸善，1977，pp.1322-1329
- 3)Gnirss,G. Vibration and vibratory stress relief. Historical development, theory and practical application. *Welding in the World*，1988，26-11/12，pp.4-8

4)青木繁・西村惟之・廣井徹磨・天野豊，振動を利用した溶接残留応力の低減（残留応力に及ぼす振動の影響および残留応力低減機構のモデル化），日本機械学会論文集C編，61巻592号，1995，pp.4800 - 4804

5)青木繁・西村惟之・廣井徹磨，不規則振動を用いた溶接残留応力の低減法，日本機械学会論文集C編，69巻686号，2003，pp.2783 - 2787

6)日本電子機械工業編，超音波工学，(1993)，コロナ社

7) 青木繁・西村惟之・廣井徹磨，振動を利用した溶接残留応力低減に対する解析モデル，平成 16 年度塑性加工春季講演会講演論文集，2004，pp.51-52