

# 振動を利用した溶接残留応力の低減法 (種々の振動数による検討)

青木 繁<sup>1)</sup>, 西村 惟之<sup>1)</sup>  
廣井 徹磨<sup>1)</sup>, 平井 聖児<sup>2)</sup>

## REDUCTION OF RESIDUAL STRESS OF WELDED JOINT USING VIBRATION (EXAMINATION USING VARIOUS FREQUENCIES)

Shigeru AOKI, Tadashi NISHIMURA,  
Tetsumaro HIROI and Seiji HIRAI

Welding is widely used for construction of many structures. It is well known that residual stress is generated in welding. Tensile residual stress degrades fatigue strength. Then, some methods for reduction of residual stress are developed and practically used. In this paper, a new method for reduction of residual stress using vibration during welding is proposed. Authors tried to use vibration with various frequencies. First, vibration with relatively low frequency is used. Second, ultrasonic vibration is used. Finally, random vibration is used. Tensile residual stress is reduced in all cases. Then, it is found that vibration with various frequencies is effective to reduction of residual stress.

Key Words : Welding, Residual Stress, Vibration, Ultrasonic Vibration, Random Vibration

### 1. 緒 言

溶接は多くの構造物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、溶接部近傍に残留応力が発生する<sup>①</sup>。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ために、その低減法が検討されている<sup>②</sup>。残留応力の低減法としては、熱処理やピーニングなどが用いられている<sup>③</sup>。これらの方法は、特殊な装置を必要とする、時間がかかる、傷をつける可能性があるなどの問題がある。溶接後に振動を用いて残留応力を低減する方法も提案されているが、実用性が疑問視されている<sup>④</sup>。著者らは新しい溶接残留応力の低減法として、溶接中に振動荷重を加える方法を提案し、その有効性について検討してきた。

これまでに、溶接する部材の固有振動数に近い、比較的低い振動数の振動を用いて溶接部付近の引張残留応力が低減されることを明らかにした<sup>⑤,⑥</sup>。また、超音波振動を用いた場合にも同様に引張残留応力が低減されることを明らかにした<sup>⑦</sup>。これらは規則的な振動であるが、実機に適用する場合には、入力とする振動荷重に何らかのノイズが入ることが予測される。そのために、振動にノイズが入った場合にもこの方法が有効であることを確認することは、実用性を検討する上で重要なことであると考えられる。その

ために、不規則性の強い白色雑音を用いた場合にも残留応力が低減されることを明らかにした<sup>⑧</sup>。

本報告は、これらの研究成果をまとめたものである。

### 2. 比較的低い振動数の振動を加えた場合<sup>⑤,⑥</sup>

溶接する部材の固有振動数に近い、比較的振動数の低い振動を加えながら溶接する実験によって、引張残留応力の低減を検討した。

#### 2.1 実験装置

図1に実験に用いた薄板試験片の寸法を示す。材質は

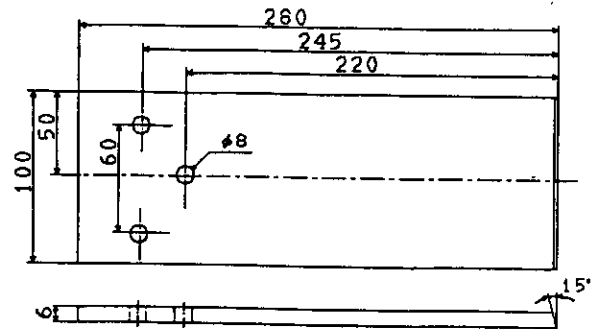


Fig.1 Size and shape of specimen (mm)

一般構造用圧延鋼材(SS400)とした。圧延時に生じる残留応力を除去するために、加熱炉で 800°Cで1時間保持し、その後 200°Cになるまで炉冷した。試験片 2枚を図2のように支持装置に取り付け、突合せ溶接した。開先形状はV型、開先角度は 30° とした。ルート間隔は 1.0mm とした。図2に示すように、試験片の左右とも溶接部から 205mm のところまでを支持装置で固定し、溶接部の中心から 75mm 離れたところを正弦波で加振した。加振機からの振動の伝達をよくするために、溶接部の両側にそれぞれ幅 45mm の板を 2枚用いて試験片を挟み、これらの板に加振機からのアームを接続した。このアームをとおして試験片に振動を伝達した。この装置を用いて振動荷重を加えながら突合せ溶接した。溶接には自動炭酸ガスアーク溶接機を用いた。溶接は1層溶接とした。溶接速度は 30cm/min とした。ワイヤ径は 1.2mm、電圧は 25V、電流は 200A とした。

加振振動数は図3のように試験片を設置したときの1次の固有振動数である 60Hz とした。また、固有振動数以外の振動数による残留応力の低減について検討するために、100Hz での加振も行った。振動の大きさは、それぞれの振動数に対して3とおり選んだ。溶接前の試験片先端の加速度振幅を測定し、変位振幅を計算により求めた。

残留応力は 6mol/l の塩酸で酸化覆膜を除去し、市販の化学研磨液 (CPL) を用いて溶接面を平滑化して測定した。残留応力の測定にはX線応力測定装置を用いた。

図4に残留応力の測定点を示す。図のように、ビードの

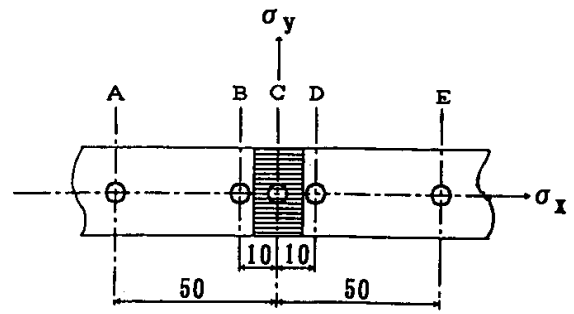


Fig.4 Measuring locations of residual stress (mm)

中心である点 C、ビードの中心から 10mm離れた点 B、点 D およびビードから 50mm離れた点 A、点 E で、いずれもビード方向の残留応力を測定した。

## 2.2 実験結果

図5および図6にそれぞれ 60Hz および 100Hz で加振し、加振振幅を変えて溶接した場合の残留応力の測定結果を示す。●は振動を加えずに溶接した場合についての結果であり、3回の実験を行い、それぞれの結果を示した。振動を加えずに溶接した場合には、ビード部付近に大きな引張残留応力が発生している。ビードの中心から離れた A 点および E 点では圧縮残留応力が発生している。一方、振動を加えながら溶接した場合にはビードの中心で引張残留応力が大幅に低減されている。ビードの中心から 10mm離れた B 点および D 点においても引張残留応力が低減されている。ビード部から離れた A 点および E 点では圧縮残留応力が引張方向に移る傾向がある。振動数が 60Hz の場合

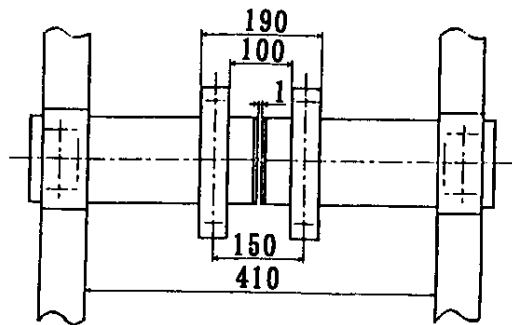


Fig.2 Set of specimen (mm)

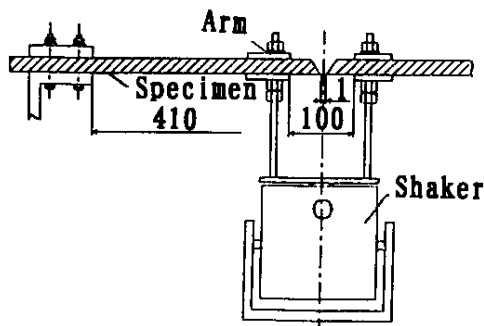


Fig.3 Supporting device of specimens (mm)

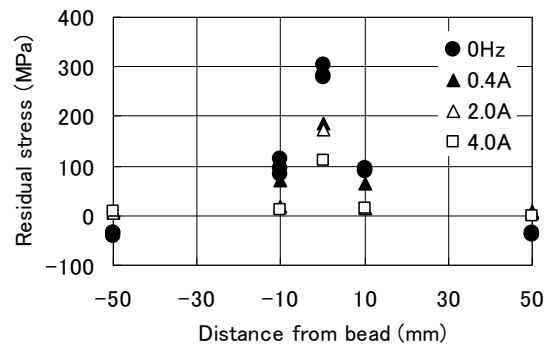


Fig.5 Residual stress (60Hz)

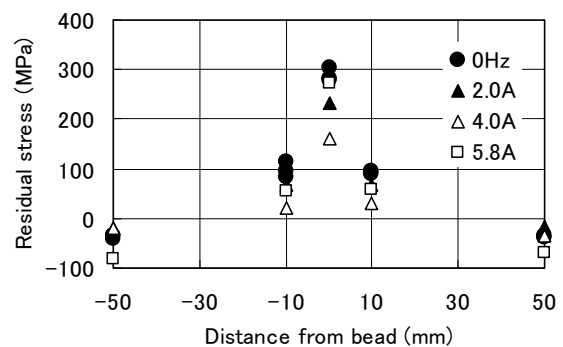


Fig.6 Residual stress (100Hz)

には加振振幅が大きいほど残留応力が低減されるが、100Hz の場合には必ずしもそのようにはならなかった。これは100Hz で大きい振幅で加振した場合には装置の支持部などで振動エネルギーの一部が失われたためであると考えられる。しかしながら、残留応力を低減するために必ずしも固有振動数で加振する必要はなく、試験片の振幅が小さくなる固有振動数から離れた振動数で加振しても残留応力が低減されることが明らかになった。

### 3. 超音波振動を加えた場合<sup>(7)</sup>

超音波振動を加えながら溶接する実験によって、引張残留応力の低減を検討した。超音波振動は固体中での伝達率がよく、振動数が高いために小さい振幅で大きな力を与えることができる。

#### 3.1 実験装置

図1に示した試験片と同じ寸法の試験片を用いて実験を行った。材質は一般構造用圧延鋼材(SS400)とした。圧延時に生じる残留応力を除去するために、2. と同じ条件で焼鈍した。試験片2枚を図2のように支持装置に取付け、突合せ溶接した。開先形状はV型、開先角度は30°とした。ルート間隔は1.0mmとした。超音波振動は図7に示すように開先の中心から110mmの点に超音波振動を加えながら溶接した。超音波振動子の振幅は拡大率を大きくとることができ、振動伝達率がよいとされているエクスポネンシャル型のホーンを通して増幅され、ホーン先端の両振幅は約15 $\mu$ mであった。溶接には自動炭酸ガスアーク溶接機を用いた。溶接は1層溶接とした。

超音波振動の振動数は17.8kHzである。溶接速度は30cm/minとした。ワイヤ径は1.2mm、電圧は20V、電流は150Aとした。

残留応力は2.と同様の条件で測定した。測定点は図4と同様である。

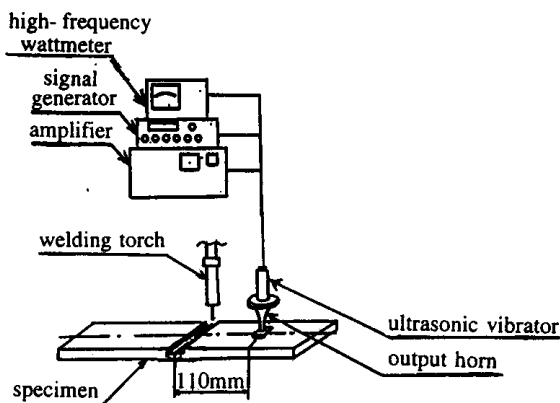


Fig.7 Experimental setup

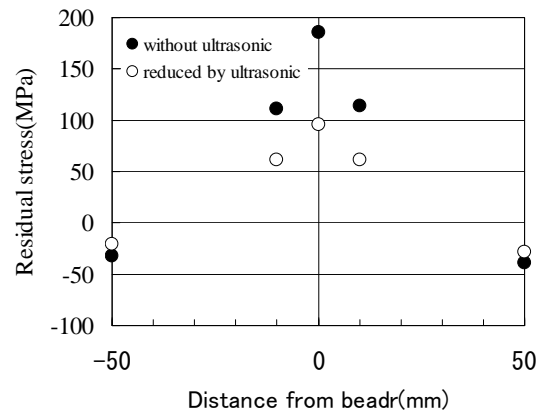


Fig.8 Residual stress

### 3.2 実験結果

図8に残留応力の測定結果を示す。●は振動を加えずに溶接した場合についての結果であり、○は超音波振動を加えながら溶接した結果である。超音波振動を加えながら溶接した場合にはビードの中心では引張残留応力が大幅に低減されている。ビードの中心から10mm離れたB点およびD点でも引張残留応力が低減されている。ビードから離れたA点およびE点では超音波振動を加えない場合に低い圧縮残留応力が生じているが、超音波振動を加えた場合もほぼ同様である。

### 4. 不規則振動を加えた場合<sup>(8)</sup>

2. および3. では規則的な振動を加えながら溶接したが、実機に応用する場合には、入力とする振動荷重に何らかのノイズが入ることが予測される。そのために、振動にノイズが入った場合にもこの方法が有効であることを確認することは、実用性を検討する上で重要なことであると考えられる。ここでは、不規則性の強い白色雑音を用いて、残留応力の低減について検討した。とくに、2. および3. と開先形状などが異なる試験片を用いて、より広い範囲の残留応力を測定した。

#### 4.1 実験装置

図9に実験に用いた薄板試験片の寸法を示す。材質は一般構造用圧延鋼材(SS400)とした。圧延時に生じる残留応力を除去するために、加熱炉で800°Cで1時間保持し、その後200°Cになるまで炉冷した。試験片2枚を図2のように支持装置に取付け、突合せ溶接した。開先形状はX型、開先角度は90°とした。ルート間隔は0.2mmとした。図10に示すように、溶接部の中心から52mm離れた位置の両側に幅38mmの板を固定し、加振機からのアームを接続した。このアームをとおして試験片に振動を伝達した。こ

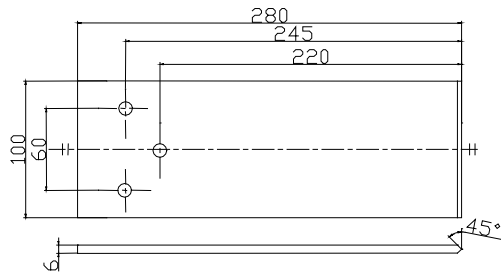


Fig.9 Size and shape of specimen (mm)

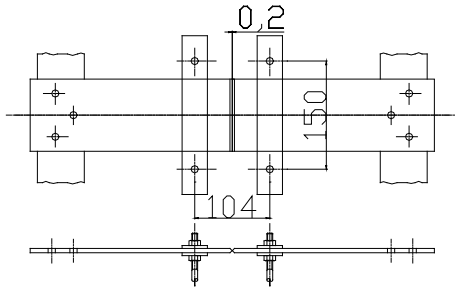


Fig.10 Set of specimens (mm)

の装置を用いて振動を加えながら突合せ溶接した。溶接には自動炭酸ガスアーク溶接機を用いた。溶接は表1層，裏1層とした。

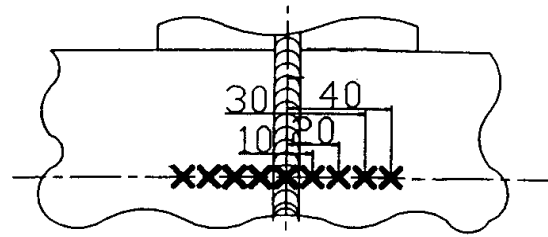
振動としては不規則性の強い白色雑音を用いた。図10のように試験片を取付けた状態での固有振動数を測定した結果，約36Hzであった。このことを考慮して，0-500Hzまで平坦なパワースペクトルをもつ白色雑音を用いた。振動の大きさは，溶接前における試験片の先端部の加速度応答の標準偏差で定めた。溶接速度は30cm/minとした。ワイヤ径は1.2mm，電圧は20V，電流は150Aとした。

残留応力の測定条件は2. および3. と同様である。図11に残留応力の測定点を示す。図11(a)のように，ビード直角方向（長手方向）9点，図11(b)のようにビード上9点でいずれの場合もビード方向の残留応力を測定した。

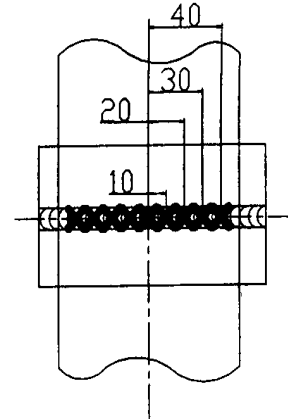
#### 4.2 実験結果

図12および図13にそれぞれ長手方向およびビード上の表側（最初に溶接した側）で測定した残留応力を示す。

図12の長手方向に対して，○は振動を加えない場合の残留応力である。ビード部付近に引張残留応力が発生している。●は溶接前の試験片の先端の応答の自乗平均値0.9Gで加振しながら溶接した場合の結果である。ビード部付近で引張残留応力が大幅に低減されている。それ以外の点でも加振しながら溶接した方が引張残留応力が低減される傾向がある。▲は溶接前の試験片の先端の自乗平均値1.5Gで加振しながら溶接した場合の結果である。加振しない場合と比較して，ビード部付近の残留応力が大幅に低減されている。それ以外の点でも加振しながら溶接した方が引張



(a) longitudinal direction



(b) on the bead

Fig.11 Measuring locations of residual stress (mm)

残留応力が低減される傾向がある。また，ビード部付近では振動が大きいほど引張残留応力が低減されている。

図13のビード上に対しては，振動を加えない場合に全体的に引張残留応力が発生し，とくにビード部の中心付近

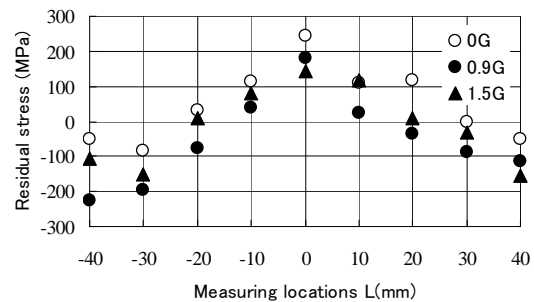


Fig.12 Residual stress in longitudinal direction

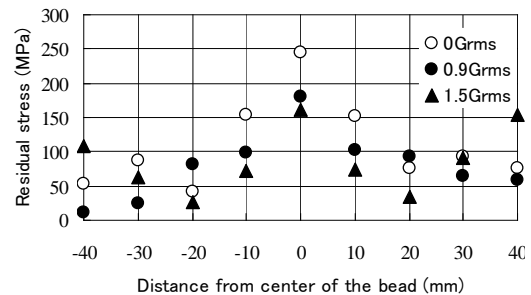


Fig.13 Residual stress on the bead

に大きい引張残留応力が発生している。この場合にも、加振しながら溶接するとビード部の中心付近で引張応力が大幅に低減されている。それ以外の点でも加振しながら溶接した方が引張残留応力が低減される傾向がある。また、ビード部中心付近では振動が大きいほど引張残留応力が低減されている。

なお、長手方向ではビード部付近、ビード上ではビード部中心付近以外では必ずしも振動が大きいほど引張残留応力が低減されているとは限らない。この原因は十分には明確ではないが、振動の伝わり方の問題などがあると考えられる。

図12および図13の実験結果から、不規則振動（白色雑音）を加えながら溶接すると、長手方向についてはビード部付近、ビード上では中心部付近の引張残留応力を大幅に低減できることが明らかになった。

## 5. 結言

振動を利用して溶接による残留応力を低減する方法について検討した。振動として部材の固有振動数またはそれに近い比較的低い振動数の振動、超音波振動および不規則振動を用いた。

薄板2枚を振動を加えながら溶接し、残留応力を測定した。振動を加えない場合には溶接部の中心付近で大きな引張残留応力が発生するが、振動を加えながら溶接すると、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。また、振動が大きいほど残留応力が低減される傾向があることが明らかになった。また、振動を加えながら溶接する

と振動の周波数によらずに引張残留応力が低減され、振動数を部材の固有振動数に合わせる必要がないことが明らかになった。今後は、材料や溶接条件などを変えた場合への応用を検討する。

## 文 献

- (1) 須藤一, 残留応力とゆがみ, 内田老鶴, (1994), 156-161
- (2) 日本機械学会, 機械工学便覧「加工学・加工機器」, (1987), 42-45
- (3) 溶接学会, 溶接便覧, 丸善, (1977), 1322-1329
- (4) Gnirss, G. Vibration and vibratory stress relief. Historical development, theory and practical application. *Welding in the World*, (1988), 26-11/12:4-8.
- (5) 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, 61-592, C(2000), 4800-4804
- (6) 青木繁・西村惟之・廣井徹磨, 振動荷重を利用した溶接残留応力の低減法（一定の溶接条件下における検討）, 日本機械学会論文集, 66-641, C(2000), 314-319
- (7) 青木繁・西村惟之・廣井徹磨・平井聖児, 超音波振動を利用した溶接残留応力の低減法, 日本機械学会論文集, 67-657, C(2001), 1613-1618
- (8) 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, 69-686, C(2003), 2783-2787