振動を利用した溶接残留応力低減の評価 (低減確率および分散分析による評価)

Evaluation of Reduction of Residual Stress in Welded Joint Using Vibration (Evaluation by Probability of Reduction and Analysis of Variance)

○正 青木 繁 (都立産技高専) 正 栗田 勝実 (都立産技高専)
正 越水 重臣 (産技大学院大)

Shigeru AOKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo
Katsumi KURITA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo
Shigeomi KOSHIMIZU, Advanced Institute of Industrial Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo

Key Words: Ultrasonic Vibration, Residual Stress, Probability, Analysis of Variance

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、溶接部付近に残留応力が発生する。表面に生じる引張残留応力は部材の疲労強度などに悪影響を及ぼす。著者らは溶接中に振動を加えることによって残留応力を低減させる方法を提案し、その有効性について明らかにしてきた⁽¹⁾。本報告では、低周波振動を加えながら溶接する場合について検討した。その際に、加振周波数を一定とした条件で加振振幅の変化が溶接時の残留応力に及ぼす影響を検討した。この実験において溶接条件と寸法を同一にした多数の試験片を用いた実験データから、残留応力低減の確率および分散分析によって、提案した手法の有効性について検討した。

2. 実験方法

図1に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。圧延時に生じた残留応力を除去するために、加熱炉で900℃で1時間保持し、200℃以下になるまで炉冷した。図に示すように、中心線に沿って長さ150mmに渡って溶接した。溶接は一層溶接とした。図2に実験装置を示す。溶接には自動アーク溶接機を用いた。溶接速度2mm/s、ワイヤ径1.2mm、電圧21V、電流180Aとした。シールドガスは炭酸ガスとアルゴンガスの混合気体を用いた。試験片を溶接台に載せ、振動は低周波振動発生装置に取付けた連結棒により試験片中心に溶接台の下方から加えた。試験片の加速度振幅は、溶接部にあたる試験片中央部に取付けた加速度ピックアップで測定した加速度波形の実効値とした。なお、加振周波数を50Hzとし、振幅を0m/s²から5m/s²ごとに増加させ、最大25m/s²まで測定した。振動は溶接開始前から溶接終了後30秒間当て続けた。

溶接後塩酸でビード表面の酸化被覆を除去し、化学研磨液を用いて溶接面を平滑化した後、表面が錆びやすいため錆止めを塗布した。

Fig.1 Size of specimen

Fig.2 Experimental setup

残留応力はX線応力測定装置を用いて測定した。測定点はビード上で溶接開始地点から5mmの箇所から溶接方向に10mm間隔で15点を取り、ビード方向およびビード直角方向の残留応力を測定した。

3. 実験結果

図3に5m/s²で加振しながら溶接した場合のビード方向及びビード直角方向の残留応力をそれぞれ実線および破線で示す。図は同一条件で3回測定した残留応力を示した。横軸は溶接開始地点からの測定点を表している。溶接により発生する残留応力は、ビード方向が支配的であり、測定値のばらつきは比較的小さいといえる。

表1および表2の左から2番目の列に、それぞれの加速度振幅で測定したビード方向およびビード直角方向の残留応力の測定値を平均化した値を示す。振動を加えずに溶接した場合と比較して、低周波振動を加えながら溶接した場合には残留応力が低減されている。

Fig.3 Residual stress (5m/s²)

Table 1 Statistical values of residual stress
(Direction of the bead)

	μ [MPa]	σ [MPa]	P_r [%]
without vibration	265.8	29.8	-
5m/s ²	232.6	21.2	81.7
10m/s ²	225.5	18.6	87.3
15m/s ²	226.2	20.1	86.4
20m/s ²	217.7	17.1	91.8
25m/s ²	224.9	17.7	88.0

Table 2 Statistical values of residual stress
(Direction perpendicular to the bead)

	μ [MPa]	σ [MPa]	P_r [%]
without vibration	32.0	41.5	-
5m/s ²	-57.6	27.3	96.4
10m/s ²	-21.4	38.2	82.8
15m/s ²	-16.0	40.1	79.7
20m/s ²	-26.0	33.4	86.2
25m/s ²	-47.5	47.9	89.5

4. 残留応力低減効果の評価

溶接時にビード上に発生する残留応力は同じ条件で溶接してもばらつきがあることが知られている。そのため、平均値による比較だけでなく、残留応力の低減効果がどの程度の確率で発生するかを考えた。このとき残留応力の平均値が似た条件でもデータのばらつきが小さい方の条件が残留応力の低減効果を期待出来ると考え、残留応力の低減確率として次のようなモデルを提案する。振動を加えずに溶接した場合のビード上の残留応力のデータと振動を加えながら溶接した場合のデータがそれぞれ図3の右側および左側のように分布しているとすると、ビード上に発生する残留応力が振動を加えない場合と比べて低減される確率はグラフの黒塗りの領域となる。

振動を加えずに溶接した場合の平均残留応力を μ_w 、標準偏差を σ_w 、振動を加えながら溶接した場合の平均残留応力を μ_v 、標準偏差を σ_v 、 Φ を標準正規分布関数とすると残留応力の低減確率 P_r は次式で表わされる。

$$P_r = \Phi \left(\frac{\mu_w - \mu_v}{\sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_v^2}} \right) \quad (1)$$

残留応力の標準偏差を表1および表2の右から2番目の列に示す。それぞれの表の右から1番目の列には式(1)から求めた残留応力の低減確率を示す。とくに低周波振動を加えながら溶接した場合のビード方向の残留応力の平均値は

Fig.3 Probability distribution of residual stress

Table 3 Analysis of variance result of the
5% significance level

	Direction of the bead		Direction perpendicular to the bead	
	F	Dispersion	F	Dispersion
without vibration	1.50	No	5.70	Yes
5m/s ²	2.64	No	2.82	No
10m/s ²	2.26	No	8.61	Yes
15m/s ²	0.29	No	4.52	Yes
20m/s ²	1.12	No	3.87	Yes
25m/s ²	0.06	No	14.70	Yes

Table 4 t-test result of the 5% significance level

	Direction of the bead		Direction perpendicular to the bead	
	t	Dispersion	t	Dispersion
5m/s ²	6.12	Yes	16.12	Yes
10m/s ²	6.92	Yes	9.93	Yes
15m/s ²	6.45	Yes	8.59	Yes
20m/s ²	5.22	Yes	5.08	Yes
25m/s ²	6.00	Yes	12.44	Yes

加加速度の実効値によらずにはほぼ一定であるが、標準偏差が小さい方が低減確率が大きくなる傾向がある。

次に、溶接時にビード上に発生する残留応力のばらつきを評価するために分散分析を行った。表3に、5%有意水準で評価した場合の分散分析結果を示す。この場合の限界値は3.23となる⁽²⁾。分散分析の結果より、ビード方向では差が無く、ビード直角方向の一部以外では差があり、ビード直角方向はビード方向に比べて測定データのばらつきが大きいことが明らかになった。

さらに、振動を加えずに溶接した場合の残留応力と、低周波振動を加えながら溶接した場合の残留応力の差の有意差を調べ、低減効果を評価するために t 検定を行った。表2に、5%有意水準で評価した場合の t 検定の結果を示す。この場合の限界値は2.15となる⁽²⁾。 t 検定の結果より、ビード方向およびビード直角方向ともに残留応力の低減に有意差があることが確認され、振動を加えることによって残留応力が低減されたことが明らかになった。

5. 結言

低周波振動を利用した溶接残留応力低減法において、振幅の変化が溶接残留応力に及ぼす影響について検証した。その結果、振動を加えると残留応力が低減され、加振する加加速度の実効値の大きさによって低減効果が異なることが確認された。同一条件および銅一寸法の多数の試験片を用いて得られたデータを用いて残留応力の低減確率を求めた。その結果残留応力の平均値が同じでも標準偏差が小さい方が低減確率が大きくなる傾向がみられた。また、分散分析によって、ビード直角方向はビード方向に比べて測定データのばらつきが大きいことが明らかになった。さらに、 t 検定による低減効果の評価を行った結果、振動を加えることによって残留応力が低減されたことが明らかになった。

参考文献

- (1)青木繁・西村惟之・平井聖児・嶺木邦彦, リアルタイム超音波振動で溶接残留応力を低減, 溶接技術, 55-11(2007), 69-73.
- (2)小尾恵一郎・尾崎巖, 統計学, 筑摩書房, (1992).