21310 配管突合せ溶接過程の内外面水冷による残留応力改善

Residual Stress Mitigation of Pipe Butt Joint by Using Water-Shower Cooling on Both Inner And Outer Surface of Pipe During Welding Process

○正 柳田信義 (日立材料研)

小出宏夫 (日立 GE ニュクリア・エンジニア)

川上三雄 (日立エンジニアリング・アンド・サービス)

Nobuyoshi YANAGIDA, Materials Res. Lab., Hitachi, Ltd., 3-1-1, Saiwai-cho, Hitachi, Ibaraki
 Hiroo KOIDE, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.
 Mitsuo KAWAKAMI, Hitachi Engineering & Services Co., Ltd.

Abstract

To mitigate axial tensile stress at the inner surface of a pipe butt joint, heat sink welding is widely used to fabricate the joint. The inner surface of the pipe is cooled by water during the welding operation. To mitigate the axial tensile stress more effectively, we developed a new welding method in which a water-shower cooling process is applied behind the welding torch on the outer surface of the pipe subjected to the heat sink welding. When this method is applied in the fabrication of pipe butt joints, both heat input quantity and the distance between the torch and the water-shower cooling area mainly determine to what degree the axial tensile stress can be mitigated. To determine these conditions for mitigating tensile stress, we first used the finite element method (FEM) to evaluate the effects of these conditions on residual stress. The FEM results indicated that residual stress decreases to compressive stress when the heat input quantity is 15 kJ/cm and the distance between the torch and the water-shower cooling area is less than 15 mm. To verify the validity of the FEM-obtained conditions, a pipe butt joint was fabricated using the new method. Residual stresses on the inner surface of the joint were then experimentally measured. These measurement results agreed well with the results of FEM analyses. It can therefore be concluded from these analytical and experimental results that applying water-shower cooling during welding effectively mitigates axial tensile residual stress.

Key Words : Pipe butt joint, Residual stress mitigation, Heat sink welding, FEM

1. 緒言

オーステナイト系ステンレス鋼配管の突合せ継手において、溶接部の応力腐食割れの発生を抑制する手段の一つとして、配管内面の溶接部近傍における引張応力の低減が挙げられる。引張応力を低減する方法として配管内面水冷溶接がある⁽¹⁾。配管内面水冷溶接では、溶接中に配管内に水を流して内面を水冷する。溶接中の内面水冷により、温度分布は、内面側が低温、外面側が高温となり、内面側では引張の降伏が起き、引張の塑性ひずみが発生する。この塑性ひずみにより、溶接が終了して配管全体が一樣な温度になった時点で、内面の引張応力が低減される。

ところで、配管が厚い場合には、水冷を受ける内面と溶接入熱を受ける外面側との距離が大きくなるため、内外面間の温度勾配は相対的に小さくなり、内面水冷による引張応力低減効果は小さくなる。一方、溶接による配管の径方向の収縮変形に起因して、配管内面では軸方向応力が引張応力になる場合がある。配管構造の健全性を確保する上で、引張応力の低減は重要な課題となっている。

2. 配管内外面水冷による引張残留応力低減

著者らは、溶接中にトーチが通過した直後の高温領域の表面を水冷して溶接部表面の引張応力を低減する溶接直後急冷法の開発を行ってきた⁽²⁾。これまでに、ビードオン溶接、多層溶接、補修溶接を対象に溶接部表面の引張応力

を低減できることを確認した。また、溶接変形の低減にも効果があることを確認した。

配管内外面水冷と並行して外面側に溶接直後急冷法を用いる方法である配管内外面水冷を適用すると、配管の径方向の収縮変形が抑制され、収縮変形に起因する引張応力を低減できると考えられる。図1に配管内外面水冷による溶接方法を模式的に示す。なお、本溶接方法では、トーチと水冷領域の間隔 D および溶接の入熱量 Q が残留応力に影響を及ぼす因子となる。

Fig. 1 New welding method

3. 有限要素法による残留応力解析

3.1 解析条件

配管内外面水冷による残留応力低減効果を検討するために、有限要素法による解析を行った。解析対象は、外径 406 mm、厚さ 37 mm の配管とした。配管の材質は SUS316L とした。最初に溶接入熱および内外面の冷却条件を模擬し

た非定常熱伝導解析により溶接過程の温度分布の履歴を求めた。その温度分布を用いた熱弾塑性解析により残留応力を求めた。

表 1 に解析条件を示す。配管内外面の冷却条件、トーチと冷却領域との間隔 D および溶接の入熱量 Q をパラメータとした。Case A は水冷なしの場合、Case B は配管内面のみ水冷の場合である。Case C から E が配管内外面水冷の場合であり、Case C を標準的な条件とし、Case D はトーチと冷却領域の間隔が短い場合、Case E はトーチと冷却領域の間隔が短く、同時に入熱量を大きくした場合である。

Table 1 Analytical conditions

Case	Cooling conditions		D (mm)	Q (kJ/cm)
	IS*	OS**		
A	Air	Air	---	10
B	Shower	Air	---	10
C	Shower	Shower	20	10
D	Shower	Shower	15	10
E	Shower	Shower	15	15

(*: Inner Surface, **: Outer Surface)

3.2 解析結果および考察

解析により得られた配管内面の軸方向応力の分布を図 2 に示す。溶接過程において水冷なしの Case A では、溶接金属中央の残留応力は 400 MPa の引張応力である。配管内面のみを水冷した Case B では 100 MPa に低減された。また、配管内外面を水冷した Case C, D, E では、それぞれ 50, 20, -20 MPa に低減された。以上より、配管内外面水冷により、配管内面の軸方向応力は低減され、トーチと冷却距離との間隔が短いほど、また、溶接の入熱量が大きいほど引張応力の低減効果が大きいことがわかった。

Fig. 2 Analytical results of axial stress distributions on the inner surface of the pipe subjected to various cooling

4. 実験による検証

4.1 実験条件

解析結果を検証するために溶接過程で配管内外面水冷を適用して製作した配管突合せ継手の残留応力を測定した。試験体の形状および材質は、残留応力解析を行った配管突合せ継手と同一である。

溶接は、自動 TIG 溶接装置による配管の全姿勢溶接とした。溶接機器の形状・寸法から、実験における入熱領域と冷却領域の間隔は 25 mm とした。解析で得られた内面の軸方向応力を圧縮にするのに必要な間隔である 15 mm よりも長い条件となった。また、入熱は 15 kJ/cm とした。

試験体の残留応力はひずみ解放法により測定した。配管の周上で溶接姿勢が異なるため、90° 間隔で 4 位置について測定した。

4.2 実験結果および考察

配管内面の溶接金属中央における軸方向応力の測定値を図 3 に示す。45, 135, 225° 位置では 33~55 MPa の引張応力であり、入熱量を 10 kJ/cm とし、トーチと冷却領域との間隔を 20 または 15 mm とし、配管内外面水冷を適用した場合の解析結果に近い値になった。実験では、入熱量を 15 kJ/cm としたが、トーチと冷却領域との間隔が広がったため、引張応力は低減されたが、圧縮応力には至らなかったと考えられる。しかしながら、測定結果は解析におけるトーチの 20 mm 後方から冷却を開始した条件の解析結果をほぼ再現したと考えられる。

315° 位置の測定結果は 104 MPa であり、他の位置よりも比較的高い結果となった。315° 位置付近はトーチが下から上に向かって移動した領域である。実験に用いた溶接装置では、既存のトーチの移動台車に、外面水冷機構を増設したため、トーチの移動台車の重量が増加し、315° 位置付近では移動速度が遅くなる傾向がみられた。そのため、トーチの通過後に水冷領域が到達するまでの時間間隔が長くなったことに起因していると考えられる。

Fig. 3 Axial stresses at the center of weld on the inner surface of the pipe

5. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ継手において、配管内面の溶接部の引張応力を低減するために溶接過程で内外面を水冷する方法について解析により検討し、その効果を実験により確認した。

参考文献

- (1) 上田, 中長, 清水, 大久保, 溶接学会誌, 52-2, (1983), 90-97.
- (2) 柳田, 小出, 機論, 72-723, A(2006), 1631-1638.