低合金鋼平板の溶接残留応力解析結果に及ぼす各種影響因子の評価

Parametric Study on Effects of Weld and Post Weld Heat Treatment Conditions
on Residual Stress Profiles in Low Alloy Steel Plate

柳田信義・日立日立研

松本健太・京大院

斎藤高一・日立 GE ニュークリア・エナジー

Nobuyoshi YANAGIDA, Hitachi, Ltd.

Kenta MATSUMOTO, Univ. of Kyoto

Koichi SAITO, Hitachi-GE Nuclear Energy

Key Words: Weld, Residual Stress, Finite Element Method, Phase Transformation, Creep

Residual stress profiles of a low alloy steel JIS SQV2A were predicted by thermal elastic plastic analysis taking the phase transformation strain into consideration. Stress relaxation during post weld heat treatment (PWHT) was also predicted by thermal elastic plastic creep analysis. Effects of welding and PWHT conditions, such as heat input efficiency, preheating temperature, PWHT holding temperature, and holding time, on residual stress profiles were studied. The analysis results showed that the amount of longitudinal stress at the center of the weld decreased as the heat input efficiency or the preheating temperature rose, and that the amount of stress relaxation increased as the PWHT holding temperature rose. The effect of the PWHT holding time at 625 °C on stress relaxation was small.

1. 緒言

溶接構造物に対する健全性評価のひとつとして、溶接残留応力の高精度な予測が必要になっている。溶接残留応力の予測手段のひとつに計算機を用いたシミュレーションがある。溶接残留応力のシミュレーションでは、最初に非定常熱伝導解析により溶接過程の温度分布を求め、その後に熱弾塑性解析により残留応力を求める。さらに溶接後熱処理(以後PWHTと略す)が施工される場合には熱弾塑性クリープ解析により応力緩和を求める。これまでに、平板や配管の突合せ継手などの形状が比較的単純な機器から原子炉压力容器のように形状が複雑な機器に至るまで、多岐に渡る解析が行われてきた。

溶接残留応力のシミュレーションによる予測において、目的に応じた解析方法をガイドラインとして策定する試みが多くなされてきている。たとえば、原子力発電プラントの安全性、信頼性の検討に必要な解析手法の高度化を目的として、有限要素法による溶接残留応力解析において設けられる様々な仮定、近似およびモデル化の妥当性を検証し、評価手法の標準化、体系化を図る研究が行なわれた⁽¹⁾。原子力発電プラントの溶接部の残留応力評価におけるモックアップ試験体の溶接残留応力測定と試験体を模擬した溶接残留応力解析結果の比較から、解析で設けた仮定が残留応力に及ぼす影響が検討された。原子力発電プラントの压力容器貫通部、シュラウドサポート、およびノズルセーフエンドなどを対象とした解析が実施され、残留応力の解析による予測および得られた解析結果の実験による検証が行われ、モデル化の考え方、要素分割、境界条件および荷重条件を示しており、解析者が精度良い解を得るために必要な知見を提供している。

解析で設けた仮定を明らかにし、それらの仮定が解析結果に及ぼす影響を検討し、ケーススタディとして示すことは、評価手法の標準化、体系化に資する。本研究では溶接過程で相変態が起きる材料である低合金鋼 SQV2A を対象に、解析条件である入熱効率および予熱温度が残留応力分布に及ぼす影響を検討した。また、低合金鋼の溶接構造物では、一般に溶接後に PWHT が施工される。そこで、PWHT 保持温度と保持時間が残留応力に及ぼす影響を検討した。さらに、標準的な溶接条件および PWHT 条件を対象に試験体を製作し、ひずみゲージ解放法により残留応力を測定した。実験結果と解析結果との比較から解析手法の妥当性を検証した。

2. 解析条件

低合金鋼 SQV2A の平板にビードオン溶接を行った試験体および溶接後に PWHT を行った試験体の溶接残留応力を検討対象とした。図 1 に試験体の形状を示す。幅 168 mm×長さ 120 mm×厚さ 10 mm の平板である。ビードオン溶接では、溶接方法として溶加材を用いない TIG 溶接を適用した。表 1 に溶接条件および PWHT 条件をまとめて示す。また、図 1 に示すように、ビードオン溶接時には溶接中心から 15 mm 離れた位置で温度を測定した。また、ひずみゲージ解放法により残留応力を測定した。

Fig. 1 Geometry of a bead on plate specimen [unit: mm]

Table 1 Welding conditions

Parameters	Conditions
Current	140 A
Voltage	10.8 V
Travel speed	60 mm/min
Heat input quantity	15.1 kJ/cm
PWHT holding temp.	625 °C
PWHT holding time	1 h

低合金鋼 SQV2A は、溶接入熱による加熱・冷却過程で固相内の変態態が起きる。したがって、溶接残留応力を精度良く評価するためには相変態ひずみを考慮する必要がある。図2に变形拘束を受けない SQV2A の棒状試験体に溶接の加熱・冷却過程に相当する温度変化を加えたときに発生する熱ひずみの履歴を示す。加熱過程では 775 °C から 850 °C にかけて収縮ひずみが発生する。一方、冷却過程では 500 °C から 380 °C にかけて膨張ひずみが発生する。本研究の解析では、図2に示した加熱過程と冷却過程で異なる熱ひずみの履歴を考慮した。

Fig. 2 Thermal strain history during heating and cooling process

PWHT では、クリープが顕著になる温度まで溶接構造物を均一に加熱し、一定時間保持した後に冷却する。クリープひずみの発生により応力緩和が起きる。図3に 625 °C において一定応力を負荷したときに SQV2A に発生するクリープひずみを示す。PWHT 過程の応力緩和の予測では、クリープひずみを考慮した熱弾塑性クリープ解析を行った。

Fig. 3 Creep strain history of SQV2A at 625 °C

3. 解析結果および考察

3-1 溶接条件が残留応力分布に及ぼす影響

本研究では、自動溶接機を用いて電流、電圧および溶接速度を管理して試験体を製作した。溶接では電源から供給されるすべてのエネルギーが溶接構造物に投入されることはなく、一部は周囲の空气中に放出される。実際に溶接構造物に投入されたエネルギーと電源から供給されたすべてのエネルギーとの比が入熱効率である。入熱効率は、温度測定結果と解析結果との比較から決定できる。本研究では、入熱効率が温度分布および残留応力分布に及ぼす影響を検討した。

低合金鋼の溶接では一般に予熱が行われる。SQV2A では板厚が 10 mm の場合には、150 °C 前後に加熱された後に溶

接を開始する。予熱温度の影響を検討するため、標準的な 155 °C、予熱なしの 30 °C、および高温側の 300 °C としたときの残留応力を解析により明らかにする。仮定したそれぞれの条件を表2にまとめて示す。

Table 2 Sensitivity analysis conditions on welding process

	Case 1	Case 2
Heat input efficiency	0.6, 0.7, 0.74, 0.8	0.74
Pre heat temp	155 °C	30, 155, 300 °C

3-1-1 入熱効率の影響

図1に示した温度測定位置における温度の測定結果と入熱効率を 0.6 から 0.8 まで変化させたときの解析結果の比較を図4に示す。入熱効率を 0.74 としたときの解析結果が測定結果と最も良く一致した。したがって、試験体の製作では溶接の入熱効率は 0.74 と考えて良い。

入熱効率を 0.6 から 0.8 まで変化させたときの温度分布を用いた溶接線平行方向応力の解析結果を図5に示す。図5にはひずみゲージ解放法で測定した試験体の残留応力分布も示した。入熱効率を 0.74 とした温度解析結果に基づいた残留応力解析結果が測定結果を良好に一致した。図5に示した溶接面のビード中央における溶接線平行方向応力では、入熱効率が 0.70 以上では圧縮応力となる。一方、入熱効率が 0.60 では引張応力となる。入熱効率は最高到達温度に影響し、入熱効率が高いほど溶接部は高温になり、相変態ひずみが発生する領域が広くなることに起因している。

Fig. 4 Effect of heat input efficiency on temperature history

Fig. 5 Effect of heat input efficiency on as-welded longitudinal stress profiles

3-1-2 予熱温度の影響

予熱温度を 30 °C, 155 °C および 300 °C としたときの残留応力分布の比較を図 6 に示す。溶接の入熱条件は同じであるため、予熱温度が高いほど最高到達温度が高くなる。実験では予熱温度は 155 °C であった。そのため、予熱温度を 155 °C とした解析結果が最も良く実験結果と一致する。予熱温度を 30 °C とした場合が最高到達温度は最も低くなる。溶接線平行方向応力は、図 6 に示すように溶接部中央では引張になる。一方、予熱温度を 300 °C とした場合は、溶接部中央の圧縮応力の絶対値が大きく、また、圧縮応力が分布する領域は広い。これは、加熱過程の相変態開始温度に到達する領域が広くなり、その結果、冷却過程で膨張の相変態ひずみが発生する領域も広くなることによる。

Fig. 6 Effect of preheat temperature on as-welded longitudinal stress profiles

3-2 PWHT 条件が残留応力分布に及ぼす影響

実機溶接構造物の PWHT では、保持温度および保持時間が指定される。そこで、PWHT 保持温度と PWHT 保持時間が残留応力分布に及ぼす影響を検討する。PWHT 条件は製作した試験体では、表 1 に示したように保持温度が 625 °C、保持時間が 1 時間である。本研究では、保持温度として 625 °C のほかに 500 °C および 550 °C のケースを検討した。保持時間として 1 時間のほかに 0 時間および 10 時間のケースを検討した。保持時間が 0 時間の条件は 625 °C に到達した後にただちに降温することを意味している。なお、解析における溶接条件は表 1 に示した値とし入熱効率は 0.74 とした。仮定した条件を表 3 にまとめて示す。

Table 3 Sensitivity analysis conditions on PWHT process

	Case 3	Case 4
Heat input efficiency	0.74	0.74
Pre heat temp	155 °C	155 °C
PWHT holding temp.	500, 550, 625 °C	625 °C
PWHT holding time	1 h	0, 1, 10 h

3-2-1 PWHT 保持温度の影響

PWHT 保持温度を 500 °C, 550 °C および 625 °C とし、1 時間保持し、その後、室温に到達したときの応力分布を図 7 に示す。温度が高くなるほどクリープひずみの発生が顕著になるため、応力緩和も顕著になる。図 7 では、保持温度が 625 °C では応力の絶対値は 50 MPa 以下であり、応力緩和量が多い。一方、保持温度が 500 °C および 550 °C であっても応力緩和は起きるが、その値は 625 °C の場合ほど顕著ではない。

Fig. 7 Effect of PWHT holding temperature on PWHT longitudinal stress profiles

3-2-2 PWHT 保持時間の影響

PWHT 保持温度を 625 °C とし、保持温度で 0 時間、1 時間および 10 時間保持し、その後、室温に到達したときの応力分布を図 8 に示す。保持時間が最も長い 10 時間の場合が応力緩和による残留応力の低減が大きいが、保持時間が 0 時間との差は 20 MPa である。この解析結果から保持温度が 625 °C の場合では 625 °C に到達した時点までに PWHT で発生する応力緩和のほとんどが発生していることを示唆している。

Fig. 8 Effect of PWHT holding time on PWHT longitudinal stress profiles

4. 結 言

低合金鋼 SQV2A を対象にビードオン溶接された試験体およびその後 PWHT を施工した試験体の残留応力を実験および解析により明らかにした。また、入熱効率、予熱温度、PWHT 条件である保持温度および保持時間が残留応力分布に及ぼす影響を解析により明らかにした。結論を以下に示す。
(a) 入熱効率および予熱温度は、残留応力分布に影響を及ぼす。入熱効率が高い場合または予熱温度が高い場合には、相変態ひずみが発生する領域が広くなるため、溶接部中央の溶接線平行方向の引張応力は小さくなる。
(b) PWHT による応力緩和は保持温度が高いほど大きく 625 °C では残留応力は顕著に緩和する。保持時間が応力緩和に及ぼす影響は小さく、625 °C では保持時間が 0 時間と 10 時間のケースで応力緩和量に発生する差は 20 MPa である。

文 献

(1) Yanagida, N., Ogawa, K., Saito, K., Kingston, E., 2009 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Prague, PVP2009-77408 (2009).