低合金鋼平板の溶接残留応力に及ぼす 溶接条件および溶接後熱処理条件の影響*

柳田 信義^{*1}, 斎藤 高一^{*2}

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

Nobuyoshi YANAGIDA^{*1} and Koichi SAITO

^{*1} Hitachi, Ltd., Hitachi Research Laboratory, Dept. of Materials Research for Power Plants
3-1-1, Saiwai-cho, Hitachi, Ibaraki, 317-8511 Japan

Welding residual stress profiles of low alloy steel JIS SQV2A could be predicted by thermal elastic plastic analysis taking account of the phase transformation strain. Residual stress relaxation during post-weld heat treatment (PWHT) could be also predicted by creep analysis. Effects of welding and PWHT conditions were examined, such as heat input efficiency, preheating temperature and PWHT holding temperature and time on residual stress profiles. The effects of heat input efficiency and preheating temperature in welding conditions were found to be remarkable on the stress distribution for the thermal elastic plastic analysis taking account of the phase transformation strain. The effect of temperature in PWHT conditions was also found to be remarkable on the stress distribution for the creep analysis. However, the effect of holding time was not found. Since the creep rate was fast for large residual stress, creep strain was suggested to saturate during rising temperature period. The accuracy of these analytical results was validated by temperature measurement during on bead welding and residual stress measurement using strain release method after welding and PWHT.

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

1. 結 言

原子炉圧力容器には低合金鋼(JIS SQV2A)が用いられている。原子炉圧力容器内面のように高温水に接する部位に低合金鋼が用いられる場合には、耐食性の観点からオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金によるクラッド溶接が行われる。溶接後は低合金鋼の靱性回復や組織改善等のために溶接後熱処理(PWHT と略す)が施工されることから、溶接の残留応力を評価するには、溶接入熱の影響と PWHT による応力緩和の影響を考慮する必要がある⁽¹⁾。低合金鋼では溶接入熱による加熱、冷却過程で固相内の相変態が起きる。加熱過程の相変態では体積収縮、冷却過程の相変態では体積膨張が発生する。これらのうち冷却過程で発生する体積膨張は、残留応力分布に及ぼす影響が大きく、その影響を明らかにすることは溶接残留応力を予測する上で重要である⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。さらに、PWHT ではクリープにより応力緩和が起きるが、保持温度および保持時間などの条件が応力緩和に及ぼす影響を明らかにすることも溶接残留応力を予測する上で重要である⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

本研究では原子炉圧力容器の材料である低合金鋼 SQV2A を対象に、ビードオン溶接および PWHT を施工した平板の溶接残留応力解析に及ぼす種々の因子の影響を明らかにする。特に、低合金鋼を溶接したときの加熱、冷却過程の相変態に伴って発生する体積収縮、体積膨張を、応力解析において熱ひずみとして考慮する方法の有効

* 原稿受付 2012 年 10 月 3 日

^{*1} 正員, (株)日立製作所 日立研究所 (〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1)

^{*2} 正員, 日立 GE ニュークリア・エナジー(株) (〒319-1221 茨城県日立市大みか町 5-2-2)

E-mail: nobuyoshi.yanagida.fw@hitachi.com

性について検討する。また、PWHTの応力緩和の予測における熱弾塑性クリープ解析の有効性について検討する。さらに、解析および溶接施工において種々の条件を仮定したときに、それらの条件が残留応力分布に及ぼす影響について検討する。具体的には、温度解析における入熱効率、溶接施工における予熱温度、PWHT施工における保持温度と保持時間を条件として選定し、これらの条件が残留応力解析結果に及ぼす影響を感度解析により明らかにする。

解析による溶接残留応力の評価では、最初に温度解析により溶接過程の温度分布を求め、次に応力解析により残留応力を求める。これまでに、平板や配管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など、多岐に渡る溶接構造物の解析が行われてきた^{(9),(10)}。これらの解析では、二次元モデルに基づいたものおよび二次元モデルによる近似が困難となる複雑な形状を対象とした三次元モデルに基づいたものなど、評価の対象により種々のモデルが使い分けられている。また、解析では種々の仮定が設定されている。

解析による溶接残留応力の評価において、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た。例えば、原子力発電プラントの安全性、信頼性の確認、高度化に資することを目的として、溶接残留応力解析に用いられる様々な仮定、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われた^{(11)~(14)}。この研究では、原子力発電プラントの容器貫通部、ノズルセーフエンドおよびシュラウドサポートのニッケル基合金溶接部を対象として、解析の例、模擬試験体の残留応力測定結果、および解析結果と測定結果の比較を示している。また、類似形状の溶接残留応力解析を実施する際に参考にできるように特定の解析プログラムの機能を前提とした解析モデルおよび解析条件を示している。近年、英国では溶接構造物の健全性評価に必要な残留応力分布を精度良く求めることを目的としたガイドラインの策定が検討されている。このガイドラインは英国 British Energy 社が開発したき裂欠陥を持つ構造物の健全性評価を定めた R6 法の一部として採用される予定である。これまでにガイドラインの骨子および開先溶接の残留応力評価に適用したケーススタディーが開示されている^{(15),(16)}。この R6 法ガイドラインでは、溶接構造物の健全性評価に必要な残留応力分布を精度良く求めることを目的として、解析の実施にあたって収集すべき情報、解析モデルの設定手順、温度、応力解析の実施手順および解析結果の評価手順を具体的に示している点に特徴がある。

本研究では、解析手法の有効性の検討および感度解析による種々の因子の影響評価を行う。解析を実施するにあたって、十分に検証された手順を適用することにより、解析結果の信頼性を高めることができると考えられる。そこで、本研究では、これまでに公開文献により開示されている R6 法ガイドラインの手順に準じて解析を実施した。

2. 解析対象

2・1 ビードオン溶接試験体

本研究では、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その後に PWHT を行った試験体を解析対象とした。図 1 に試験体の寸法および形状を示す。幅 168 mm×長さ 120 mm×厚さ 10 mm の平板である。片面を中央ラインに沿ってビードオン溶接した。溶接条件および PWHT 条件を表 1 に示す。溶接では入熱量を 15.1 kJ/cm とした。PWHT では 630 °C に 1 時間保持する条件とした。溶接過程では、溶接部中央から 15 mm 離れた位置の温度履歴を熱電対により測定した。また、図 1 に示した残留応力測定ラインに沿ってひずみ解放法により溶接残留応力を測定した。

試験体のビードオン溶接では、溶加材を用いない TIG 溶接を適用した。一般に溶接では、部材に設けられた開先に溶融した溶加材が溶着することにより部材が接合される。溶着した溶加材の材料特性は接合する部材の材料特性と異なり、その強度は接合する部材よりも高い傾向を示す。溶加材を用いないことにより溶接残留応力の発生プロセスにおいて、接合する部材と溶着した金属との異材の影響を取り除くことができる。

2・2 解析条件

加熱、冷却過程で発生する固相内の相変態は、昇温速度および降温速度の影響を受ける。ビードオン溶接試験体の製作に適用した溶接条件において発生する相変態ひずみを求めるために、本研究では最初に試験体の平板にビードオン溶接したときの温度解析を実施して平板の温度変化を求めた。次に変形を拘束していない直径が 3 mm、

長さ 10 mm の棒状試験片にその温度変化を与えたときの膨張，収縮量の測定を実施した．図 2 に棒状試験片に発生した熱ひずみの履歴を示す．加熱過程では，775 °C から 850 °C において相変態により収縮する．一方，冷却過程では，500 °C から 380 °C において相変態により膨張する．図 2 に示した熱ひずみ履歴を応力解析で定義するサブプログラムを作製し，それを解析に組込んで相変態ひずみを考慮した．一方，相変態ひずみを考慮しない場合は，熱ひずみは加熱過程の勾配のみで定義した．相変態ひずみを考慮する場合としない場合のそれぞれについて応力解析を実施して溶接残留応力を求めた．

Fig. 1 Geometry of a bead on plate specimen (Unit of length: mm)

Table 1 Welding and PWHT conditions

Process	Parameters	Conditions
Weld	Current	140 A
	Voltage	10.8 V
	Torch travel speed	60 mm/min
	Heat input quantity	15.1 kJ/cm
PWHT	Holding temperature	630 °C
	Holding time	1 hr

Fig. 2 Thermal strain history during heating and cooling process

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

PWHT を行った試験体では、解析手法の検証としてクリープひずみを考慮する場合としない場合について検討した。図 3 に 625 °C において一定応力を負荷したときに試験片に発生するひずみを示す。クリープ則としてクリープひずみ速度が応力のべき乗と時間のべき乗に比例するとした指数則を用いた熱弾塑性クリープ解析により求めた。なお、製作したビードオン溶接を行った試験体およびその後に PWHT を行った試験体のそれぞれについて、残留応力をひずみ解放法により測定した。解析結果と測定結果との比較から、解析結果の妥当性を検証した。

また、温度解析条件である入熱効率の影響、溶接施工条件である予熱温度の影響、PWHT 施工条件である保持温度および保持時間の影響を検討した。R6 法ガイドラインでは、その評価過程に感度解析を設けており、本検討は感度解析の一環として実施した。温度、応力解析および感度解析の詳細な条件は、3 章の R6 法ガイドラインに基づいた溶接残留応力解析の中で述べる。

3. R6 法ガイドラインに基づいた低合金鋼ビード溶接試験体の溶接残留応力解析

低合金鋼 SQV2A の溶接過程の相変態を考慮した残留応力解析および PWHT による応力緩和の解析を R6 法ガイドラインの手順に準じて実施した。R6 法ガイドラインでは、解析を 9 ステップに分けて実施することになっている。ステップごとに R6 法ガイドラインで要求している検討事項と本研究における検討結果を述べる。

3・1 ステップ 1：目的の設定

最初に残留応力解析を実施する目的、解析結果の適用先および必要とする精度について明らかにする。本研究における解析の目的は以下に示す 5 項目である。

- ・ 溶接の加熱、冷却過程で相変態ひずみが発生する材料の残留応力の解析手法および解析結果の妥当性検証
- ・ PWHT による応力緩和の解析手法および解析結果の妥当性検証
- ・ 温度解析で仮定した入熱効率が残留応力分布に及ぼす影響評価
- ・ 溶接条件である予熱温度が残留応力分布に及ぼす影響評価
- ・ 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評価

解析結果は、解析手法の妥当性の検証および種々の因子が溶接残留応力分布に及ぼす影響評価に適用する。そのため、必要とする精度は、試験体表面の溶接部から母材に至る範囲の残留応力分布で良いと考えられる。解析結果の妥当性検証は試験体の残留応力を測定し、実験結果と比較して行った。試験体の製作に際して溶接過程の溶接部近傍の温度測定を行い、実験結果と温度解析結果との比較から温度解析結果の妥当性を検証した。また、モックアップ試験片の残留応力をひずみ解放法により測定し、実験結果と応力解析結果の比較から応力解析結果の妥当性を検証した。なお、残留応力分布に及ぼす溶接条件および PWHT 条件の影響評価は 3・9 節で述べる感度解析において検討した。

3・2 ステップ 2：解析に必要なデータ収集

溶接残留応力解析の入力データの作成に必要な種々のデータを収集する。R6 法ガイドラインでは、解析対象の形状、溶接条件、温度解析および応力解析に必要な材料物性、温度解析結果および応力解析結果の検証に必要なデータの収集を求めている。本研究の解析において収集したデータを以下に示す。

3・2・1 解析対象の形状

試験体の形状：試験体の形状を図 1 に示した。

試験体の材料：低合金鋼 SQV2A

3・2・2 溶接条件

溶着金属：溶加材は用いない(ノンフィラー)

溶接パス数：片面に 1 パス

予熱温度：155°C

ウィービング：行わない

溶接方法：自動 TIG 溶接。溶接条件を表 1 に示した。

PWHT：630℃で 1 時間保持。PWHT 条件を表 1 に示した。

3・2・3 温度解析および応力解析に必要な材料物性

a. 温度解析

溶接過程の温度分布を求める温度解析では、材料の室温から高温までの温度に依存した物性が必要となる。材料物性は高精度な解析および基本的な解析により必要とする温度範囲が異なる。高精度な解析では室温から熔融温度までの材料物性を用いることを推奨している。一方、基本的な解析では室温から熔融温度 T_m (K) の 60 % にあたる範囲まで (~700℃) の材料物性を要求している。温度解析に用いた材料物性を図 4 に示す。本解析では、熱伝導率および比熱は、室温から 1300℃ までの材料試験から測定したものをを用いた。また、潜熱は、溶接による熱量と比較すると小さいため本研究の解析では無視した。

b. 応力解析

応力-ひずみ関係に関する物性は、残留応力分布に及ぼす影響が大きい。高精度な解析には熔融温度に至るまでの材料物性が必要である。材料物性のうち室温における降伏応力が残留応力に及ぼす影響が大きい。それゆえ、解析では室温の降伏応力は信頼性の高いものを用いることが重要としている。残留応力解析では応力-ひずみ関係として、基本的な解析では等方硬化則で良いとしている。一方、溶接部に入熱が複数回加えられる多パス溶接では、繰返し負荷を精度良く解析するために非線形複合硬化則の適用を推奨している。非線形複合硬化則は、線形移動硬化則および線形等方硬化則と比較すると材料特性の数が増加する。本研究の解析対象は 1 パスのビードオン溶接試験体であり、パス数が少ないことから等方硬化則を適用した。応力-塑性ひずみ関係を図 5 に示す。室温における初期降伏応力は 480 MPa である。

線膨張係数は相変態ひずみの影響を考慮するために昇温過程と降温過程で区別して定義する必要がある。本研究の解析では、図 2 に示したように昇温および降温過程の伸びを材料試験で測定した。測定結果を模擬できるようにサブプログラムを作成し、それを解析コードにリンクして熱ひずみを定義した。プログラムで定義した昇温および降温過程の熱ひずみの履歴は図 2 に示した通りである。図 2 より本サブプログラムにより熱ひずみの履歴が模擬できることがわかる。

PWHT による応力緩和を熱弾塑性クリープ解析で模擬するためには、クリープ則が必要である。本研究では、式(1)に示す指数則を用いた。ここで、 $\dot{\epsilon}^{cr}$ はクリープひずみ速度(1/s)、 σ は応力(MPa)、 t は時間(s)である。

$$\dot{\epsilon}^{cr} = A\sigma^n t^n \quad (1)$$

解析に必要なクリープの材料物性を表 2 に示す。これらの材料物性は、それぞれの温度で引張試験片に一定応力を負荷したときのクリープひずみを測定することにより求めた。解析では、500℃以上でクリープを定義した。物性のうち n と m は測定した温度以外は線形補間とした。 A は自然対数にした値を介して温度補間を行った。

Fig. 4 Physical properties of SQV2A

Fig. 5 Stress-plastic strain relations of SQV2A

Table 2 Creep properties for power law

Temperature (°C)	A	n	m
500	3.432×10^{-23}	7.039	-4.988×10^{-1}
550	4.413×10^{-13}	3.232	-4.812×10^{-1}
625	1.792×10^{-9}	2.163	-5.159×10^{-1}

3・2・4 解析結果の検証に必要なデータ

温度解析結果の検証では、熱電対により測定した溶接過程の温度履歴を用いた。図1に熱電対取り付け位置を示した。応力解析結果の検証では、ひずみ解放法により測定した残留応力を用いた。図1に残留応力測定位置を示した。

3・3 ステップ3：計算機のリソースの考慮

R6 法ガイドラインではハードウェアに関する制限を設けていない。ソフトウェアに関しては、二次元または三次元モデルを用いた温度解析および応力解析が行えることを要求している。一般的な有限要素法の解析コードは標準的に温度および応力解析機能を備えている。汎用解析コードの ABAQUS⁽¹⁷⁾ (Ver. 6.6.4)は、これらの条件を満たしており、本研究ではそれを用いた。

3・4 ステップ4：解析に用いるモデルの選定

解析に用いるモデルの選定では、二次元モデルおよび三次元モデルのどちらを用いるかを決定する。三次元モデルを用いる場合には有限要素としてシェル要素またはソリッド要素の選定および熱源の移動を考慮するか否かを選定する。この選定は、解析対象の形状および残留応力を評価すべき寸法に依存する。例えば補修溶接部の終端近傍における残留応力分布の評価では三次元モデルによる移動熱源モデルが必要となる。一方、比較的長い溶接線の溶接長の中央付近の断面における応力分布が必要な場合には熱源の移動を考慮しないモデルが良い。解析対象のモデル化では、二次元または三次元モデルおよび熱源の移動考慮ありまたは移動考慮なしにより以下の組合せからの選定を推奨している。

モデル1：二次元断面、	熱源の移動考慮なし
モデル2：三次元シェル、	熱源の移動考慮なし
モデル3：三次元シェル、	熱源の移動考慮あり
モデル4：三次元ソリッド、	熱源の移動考慮なし
モデル5：三次元ソリッド、	熱源の移動考慮あり

R6 法ガイドラインではこれらの解析モデルおよび熱源の組合せから適用すべきケースの選定をフローチャートで示している。本研究は、相変態ひずみを考慮した残留応力の予測およびクリープひずみの考慮による PWHT の応力緩和の予測および残留応力分布に及ぼす種々の溶接条件、PWHT 施工条件の影響を明らかにすることを目的としており、溶接長の中央の応力分布でその検証が出来れば良いとしているため、上記のモデル1,4,5のいずれかを用いれば良いが、本研究では特に熱源の移動を考慮したモデル5を用いた。

3・5 ステップ5：有限要素モデルの作製

ステップ4で選定した条件に基づいて有限要素解析で用いるメッシュを作製する。溶接残留応力解析では、発生する塑性ひずみの高精度な予測が必要である。そのため体積拘束によるロッキングを回避する低減積分を用いた六面体二次要素の適用を推奨している。本解析では、六面体二次要素を用いることとし、温度解析では ABAQUS (Ver. 6.6.4) における要素タイプ DC3D20、応力解析では低減積分を用いた要素タイプ C3D20R を用いた。三次元ソリッド要素による分割を行った。作製した有限要素モデルを図6に示す。構造の幾何学的な対称性を考慮して1/2の部分モデル化した。解析モデルの節点数は6925であり要素数は1344である。

Fig. 6 Mesh subdivision of specimen

3・6 ステップ6：温度解析

溶接過程の温度履歴を非定常熱伝導解析により予測するためには溶接入熱を精度良く模擬する必要がある。溶接入熱は溶接記録では入熱量で記載されていることが多い。本研究ではステップ2に示したように、電流、電圧および溶接速度が記録されているので入熱量は容易に求めることができる。ところで、実際の溶接ではすべての熱量が試験体に移動するわけではない。試験体に移動する熱量の割合は入熱効率で定義される。R6法ガイドラインでは溶接方法ごとに入熱効率の参考値が示されており、TIG溶接の溶接効率の参考値は0.60である。解析の手順では、最初に参考値で解析を実施し、実験結果と比較しながら試行を繰り返して入熱効率を決定することを推奨している。なお、境界条件として熱伝達境界を定義した。熱伝達係数を $2.0 \times 10^{-5} \text{ J}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 、環境温度を 30°C とした。

温度解析により得られた温度分布が熱弾塑性解析の熱荷重条件となる。そのため、温度分布が残留応力解析結果の精度に及ぼす影響は大きく、温度解析結果を十分に検証する必要がある。温度解析結果の検証には、ステップ2で準備した熱電対による温度履歴の測定結果や溶接部断面の組織観察結果を用いることが推奨されている。本解析では、熱電対による温度履歴の測定結果を用いた。

図7に温度解析結果と測定結果との比較を示す。解析結果は入熱効率が0.60, 0.70, 0.74, 0.80の場合を示している。入熱効率が0.74のときに温度解析結果と測定結果が良好に一致した。そこで、応力解析では入熱効率が0.74の温度解析結果を用いることにした。ステップ2の解析に必要なデータ収集において解析では潜熱を無視としたが、潜熱の影響は入熱効率の調整で近似的に考慮されていると考えて良い。図8に温度解析により得られた温度分布の等高線図を示す。熱源の移動を模擬できていることを確認した。

3・7 ステップ7：応力解析

応力解析はステップ6で求めた温度分布の履歴を用いて実施する。応力解析の実施にあたって、以下の項目について意図した解析が実施されていることを確認した。

- ・要素:要素のアスペクト比、塑性拘束によるロッキングの回避するために、著しく細長い要素の生成は抑えた。また、ロッキングを回避するために低減積分要素を用いた。
- ・変位拘束:溶接では変位拘束を行わなかったので自由に变形できる条件とした。
- ・温度分布:応力解析のポストデータに保存された温度データと温度解析のポストデータに保存された温度データを比較し、同一であることを確認した。
- ・材料特性:応力-ひずみ関係は多直線近似の等方硬化則を用いて近似した。ステップ2で収集した材料データが適正にデータ入力されていることを確認した。
- ・非線形解析:解析結果に保存されている収束判定結果を確認して全ての計算ステップにおいて計算が収束したことを確認した。

- ・ 解析結果：残留応力をひずみ解放法により測定した．その実験結果と解析結果の比較を行った．また，残留応力に影響を及ぼす因子を抽出してその感度解析を行った．実験結果との比較はステップ 8 の解析結果の検証に記す．感度解析の結果はステップ 9 の感度解析に記す．

3・8 ステップ 8：解析結果の検証

解析により得られた応力分布がステップ 1 において設定した目的に対応しているかどうかの検証がある．この検証は以下に述べる解析結果と実験結果の比較により実施した．

3・8・1 温度解析

R6 法ガイドラインでは溶接部近傍に設けた熱電対による温度履歴の測定結果と解析結果との比較をパスごとに実施し，入熱開始直後の温度から最高到達温度までの温度履歴の比較による検証を求めている．本解析は 1 パスのビードオン溶接であるので，温度の比較は 1 パスのみである．図 7 に温度解析結果を示した．入熱効率が 0.74 のとき実験結果と解析結果は良好に一致した．図 8 に熱源が溶接長の 1/2 位置および終端に到達したときの温度分布を等高線図で示す．

Fig. 7 Comparison of temperature history between experiment and analysis data

Fig. 8 Contour lines of temperature during the welding process ($\eta = 0.74$)

3・8・2 応力解析

a. 溶接残留応力

溶接残留応力の等高線図を図 9 および図 10 に示す．相変態ひずみを考慮した場合と考慮しない場合について，溶接線平行方向応力と溶接線直交方向応力を示した．溶接線平行方向応力では，相変態ひずみを考慮しない場合には溶接部に高い引張応力が発生する．これに対して，相変態ひずみを考慮すると溶接部の応力は低くなる．一方，溶接線直交方向応力では，相変態ひずみを考慮した方が溶接部に高い引張応力が発生する．

Fig. 9 Contour lines of longitudinal residual stress

Fig. 10 Contour lines of transverse residual stress

ひずみ解放法により測定した残留応力の実験結果と解析結果の比較を図 11 に示す. 溶接面における溶接線平行方向応力および溶接線直交方向応力の分布を示した. 図 11(a)に示した溶接面における溶接線平行方向応力の解析結果では, 溶接部中央の応力は相変態ひずみを考慮しないと 510 MPa であり, 室温の初期降伏応力である 480 MPa よりも若干高い. 一方, 相変態ひずみを考慮すると -80 MPa である. 実験結果は 0 MPa であり, 相変態ひずみを考慮した解析結果と実験結果は良く一致した. 相変態を考慮した解析結果および実験結果の残留応力は, 室温の降伏応力と比較すると低い.

図 11(b)に示した溶接面における溶接線直交方向応力の解析結果では, 相変態ひずみを考慮しないと 110 MPa である. 一方, 相変態ひずみを考慮すると 170 MPa である. 実験結果は溶接部中央で 210 MPa であり, 溶接線直交方向応力も, 溶接線平行方向応力と同様に相変態ひずみを考慮すると解析結果は実験結果と良く一致した. また, 実験結果は, 溶接部中央から離れると圧縮応力になり, さらに離れると引張応力になる. 相変態ひずみを考慮すると実験結果で得られた応力分布と一致した.

相変態ひずみを考慮した場合としない場合で残留応力に差が発生したメカニズムを溶接過程の熱ひずみ, 応力および塑性ひずみの履歴から考察する. 図 12 に溶接入熱した表面の溶接部中央位置における温度, 熱ひずみおよび溶接線平行方向応力の履歴を示す. 図 12(a)に温度と熱ひずみの履歴を示した. すでに, 図 2 で示した冷却過程の熱ひずみの履歴は, 加熱過程の熱ひずみの履歴と異なり, その勾配が大きいことがわかる. そのため, 図 12(a)において, 相変態ひずみを考慮した場合は, 最高温度到達後の熱ひずみの減少は相変態を考慮しない場合よりも大きい. また, 温度が 500 °C に到達するとひずみが増加に転じ, 380 °C に到達すると相変態ひずみを考慮しない場合と同一の熱ひずみの経路に戻る.

応力の履歴から考察を加える. 図 12(b)に温度と溶接線平行方向応力の履歴を示した. 加熱過程では圧縮応力が発生する. 最高温度に到達した後の冷却過程では引張応力が増加する. 相変態ひずみを考慮しない場合には, 応力が単調に増加して引張側で再降伏が起き, 温度が室温に到達した時点では初期降伏応力よりも高い引張応力になる. 一方, 相変態ひずみを考慮した場合には, 500 °C に到達すると応力は減少に転じ 380 °C では圧縮応力にな

っている。相変態ひずみにより除荷の状態となり再降伏は起きない。したがって、本研究の解析対象のように冷却過程で体積膨張する相変態ひずみが発生する場合には、溶接部の残留応力は降伏応力に到達しないため等方硬化則で精度良い解析結果が得られたと考えられる。

(a) Longitudinal stress

(b) Transverse stress

Fig. 11 Residual stress distributions in as-welded specimen (P.T.: Phases transformation)

(a) Temperature and thermal strain history

(b) Temperature and longitudinal stress history

Fig. 12 Temperature, thermal strain, and stress history during the welding process at the weld center on the welded surface (P.T.: Phase transformation)

塑性ひずみの履歴から考察を加える。図 13 に熱ひずみと塑性ひずみの履歴を示す。熱ひずみは等方性を仮定したため、溶接線平行方向、溶接線直交方向および板厚方向でそれぞれ等しい値をとる。塑性ひずみは溶接線平行方向、溶接線直交方向および板厚方向のそれぞれを示した。図 13(a)に相変態ひずみを考慮した場合の履歴を示した。入熱領域の温度上昇による体積膨張が周囲の領域から拘束されるため、溶接線平行方向および溶接線直交方向に圧縮の塑性ひずみが発生する。板厚方向は自由に膨張できることおよび塑性変形の体積拘束から引張の塑性ひずみが発生する。溶接線直交方向の塑性ひずみの方が、溶接線平行方向の塑性ひずみよりも絶対値が大きい。溶接線平行方向の塑性ひずみの履歴において、図 13(a)の区間 AB では、塑性ひずみは変化しない。これは図 12(b)の冷却過程で応力が増加している経路に対応している。図 13(a)の区間 BC では、塑性ひずみが発生する。区間 CD では相変態ひずみにより熱ひずみは増加に転じる。この区間では塑性ひずみは変化しない。これは図 12(b)の冷却過程で応力が減少している経路に対応している。図 12(b)において温度が 380 °C 以下になった時点で圧縮応力になっており、それ以降で応力は緩やかに増加するが引張応力には至らない。

図 13(b)に相変態ひずみを考慮しない場合の履歴を示した。区間 AB では、塑性ひずみは変化しない。これは図 12(b)の応力が増加している経路に対応している。B 以降では塑性ひずみの増加を伴いながら応力も増加し、高い

引張応力になる。なお、図 13 において、溶接線直交方向の塑性ひずみは、相変態ひずみを考慮した場合およびしない場合のいずれも圧縮である。この圧縮の塑性ひずみにより溶接線直交方向応力は引張となる。

(a) With considering phase transformation strain (b) Without considering phase transformation strain
Fig. 13 Thermal strain and plastic strain history during the welding process at the weld center on the welded surface

b. PWHT による応力緩和

PWHT 後の残留応力分布について検証する。クリープひずみの発生を考慮した熱弾塑性クリープ解析による結果およびクリープひずみの発生を考慮しない熱弾塑性解析による結果を実験結果と比較する。図 14 に溶接面における溶接線平行方向応力および溶接線直交方向応力の分布を示す。図 14 に示した熱弾塑性解析による PWHT 後の応力分布は、図 11 に示した溶接後の応力分布(相変態ひずみ考慮)と一致しており、応力の緩和は見られない。解析では全節点の温度を一律に昇温、降温させているため熱応力が生じないこと、変形の拘束を行っておらず自由に膨張、収縮できるため変形の拘束による応力の発生およびそれに伴う塑性変形の発生がないことによる。一方、熱弾塑性クリープ解析では、PWHT 後の残留応力は 50 MPa 以下に顕著に緩和した。実験結果の残留応力は 30 MPa 以下であり、熱弾塑性クリープ解析の結果と良好に一致した。以上より、低合金鋼の PWHT ではクリープひずみの発生を考慮することにより応力緩和を精度良く予測できる。

溶接施工した表面の溶接部中央における PWHT 過程の温度、応力およびクリープひずみの履歴を図 15 に示す。500 °C 未満では熱弾塑性解析、500 °C 以上で熱弾塑性クリープ解析を行った。図 15(a)は溶接線直交方向および溶接線平行方向応力の履歴を示した。昇温過程において応力の絶対値が減少する。500 °C まではヤング率の低下によるものである。500 °C 以上の応力の減少はヤング率の低下およびクリープひずみの発生によるものである。図 15(b)は温度が 500 °C 以上のときのクリープひずみの履歴を示した。保持温度の 630 °C に到達した時点で PWHT の全過程におけるクリープひずみの約 80 %が発生していることがわかった。

3・9 ステップ9：感度解析

解析では、例えば温度解析における入熱効率のようにその値を試行から決定する場合がある。本研究の解析では、温度測定結果との比較からその値を決定することができた。一方、実機構造物を製作する際の溶接では一般に温度測定は行われなため、その値を仮定する必要がある。解析において仮定を設ける場合には、仮定した値が解析結果に及ぼす影響の度合いを把握した方が良い。また、溶接の施工条件に範囲の幅がある場合には、その条件の範囲における相異を明らかにした方が良い。そこで本研究では、解析で仮定した入熱効率、溶接条件である予熱温度、PWHT 条件である保持温度および PWHT 保持時間の条件が残留応力分布に及ぼす影響を検討した。感度解析条件を表 3 に示す。なお、表 3 に示した条件は、それぞれの因子の影響を明らかにするため、実機の施工の幅よりも大きい値を設定した。

(a) Longitudinal stress

(b) Transverse stress

Fig. 14 Residual stress distributions in PWHT specimen

(a) Temperature and stress history

(b) Temperature and creep strain history

Fig. 15 Temperature, stress, and creep strain history during the welding process at the weld center on the welded surface
(TEP: Thermal elastic plastic analysis, TEPC: Thermal elastic plastic creep analysis)

Table 3 Sensitivity analysis conditions

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Heat input efficiency	0.6, 0.7, 0.74, 0.8	0.74	0.74	0.74
Pre heat temp. (°C)	155	30, 155, 300	155	155
PWHT holding temp. (°C)	Not applied	Not applied	500, 550, 630	630
PWHT holding time (h)	Not applied	Not applied	1	0, 1, 10

3・9・1 入熱効率

入熱効率を0.6から0.8まで変化させたときの溶接施工した表面における溶接線平行方向応力および溶接線直交方向応力の比較を図16に示す。溶接面の溶接線平行方向応力および溶接線直交方向応力は入熱効率の影響を受ける。図7に示したように、入熱効率を0.74としたときの温度解析結果が測定結果と最も良く一致した。また、応力解析結果も入熱効率を0.74とした結果が最も実験結果と良く一致した。図16(a)に溶接線平行方向応力を示した。溶接部中央位置では、入熱効率が0.70以上では圧縮応力になった。一方、入熱効率が0.60では引張応力になった。図16(b)に溶接線平行方向応力を示した。溶接部中央位置では、入熱効率が大きくなるとともに発生する引張応力が大きくなった。

Fig. 16 Effect of heat input efficiency on as-welded residual stress profiles

図 17 に溶接面の溶接部中央における入熱効率が 0.80 および 0.60 のときの熱ひずみおよび塑性ひずみの履歴を示す。入熱効率は最高到達温度に影響する。入熱効率が高いほど溶接部は高温になる。そのため、図 17(a) に示した入熱効率が 0.80 のときの熱ひずみ、塑性ひずみの方が、図 17(b) に示した入熱効率が 0.60 のときのそれらよりも絶対値が大きい。溶接線平行方向の塑性ひずみは、入熱効率が 0.80 の場合は相変態ひずみの発生により 0 になった。一方、入熱効率が 0.60 の場合は相変態ひずみが発生した後も圧縮である。図 16(a) に示した入熱効率が 0.60 の条件における溶接部中央位置の引張応力は、圧縮の塑性ひずみによる変形が拘束されることにより発生した。図 17 に示した溶接線直交方向の塑性ひずみは、入熱効率が高い 0.80 の方が絶対値が大きい。そのため、図 16(b) に示した溶接線直交方向応力は、入熱効率が高い方が引張応力は大きくなる。

Fig. 17 Thermal strain and plastic strain history during the welding process at the weld center on the welded surface

3・9・2 予熱温度

予熱温度を 30 °C、155 °C および 300 °C としたときの応力分布の比較を図 18 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。実施した解析ケースの中では、予熱温度を初期温度と同じ 30 °C とした場合が最高到達温度は最も低くなる。そのため、図 18(a) に示すように、溶接線平行方向応力は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。図 18(b) に示したように溶接線直交方向応力は予熱温度が高くなるとともに溶接部の引張応力も高くなる。これは、3・9・1 項で考察したように最高到達温度が高くなるとともに溶接線直交方向の圧縮の塑性ひずみの絶対値が大きくなることによる。

(a) Longitudinal stress

(b) Transverse stress

Fig. 18 Effect of preheat temperature on as-welded residual stress profiles

3・9・3 PWHT 保持温度

PWHT 保持温度を 500 °C, 550 °C および 630 °C として 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 19 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, 温度が高いほど応力緩和が顕著になる. 図 19 では, 保持温度が 630 °C では応力の絶対値は 50 MPa 以下であり, 応力緩和量が大きい. 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, 630 °C の場合ほど応力緩和量は大きくない.

(a) Longitudinal stress

(b) Transverse stress

Fig. 19 Effect of PWHT holding temperature on PWHT residual stress profiles

3・9・4 PWHT 保持時間

PWHT 保持温度を 630 °C とし, 保持温度において 0 時間, 1 時間および 10 時間保持し, その後の降温を経て室温に到達したときの応力分布を図 20 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, その差は図 16(b)に示した裏面の溶接線平行方向応力で 20 MPa であり, PWHT 保持温度による影響と比較すると感度は低い. 図 20 の残留応力解析結果と図 15(b)に示した PWHT 過程のクリープひずみの履歴より, PWHT による応力緩和は, 保持温度である 630 °C までに到達するまでに発生するクリープひずみの影響が支配的である. 応力緩和の観点からは, 保持時間を長く取るよりも保持温度を高くすることによりその効果を高くできることを示唆している. なお, PWHT の目的は残留応力緩和のみではなく組織改善もある. 組織改善の目的を達成するためには所定の保持時間を確保する必要がある.

Fig. 20 Effect of holding time on PWHT residual stress profiles

4. 結 言

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、ビードオン溶接および PWHT を施工した試験体を対象に、解析結果に及ぼす相変態ひずみの影響、PWHT 過程のクリープの影響を検討した。相変態ひずみは、相変態に伴う体積変化を熱ひずみとして定義することにより解析に組込んだ。また、温度解析条件である入熱効率、溶接条件である予熱温度、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検討した。解析では、英国 British Energy 社が開発した構造健全性評価に関する手法である R6 法ガイドラインにおいて検討されている溶接残留応力解析手順のうち、公開文献に開示されている情報に準じて実施した。結論を以下に示す。

- (1) 低合金鋼 SQV2A のビードオン溶接では、残留応力に及ぼす相変態ひずみの影響が大きい。応力解析では、溶接線平行方向応力は相変態ひずみを考慮しない場合には 510 MPa の引張応力であるが、考慮した場合には -80 MPa の圧縮応力となった。実験結果は 0 MPa であり、解析において相変態ひずみを考慮する必要がある。
- (2) 相変態ひずみを考慮した解析では、溶接入熱後の冷却過程における体積膨張が溶接線平行方向応力に及ぼす影響が大きい。冷却過程の相変態ひずみの発生以降は応力が減少し、残留応力は圧縮応力になる。
- (3) 溶接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。予熱温度が高い場合または溶接入熱効率が高い場合に溶接部中央の溶接線平行方向の引張応力は小さくなる。一方、溶接線直交方向の引張応力は大きくなる。これは、温度が高くなるとともに溶接部の溶接線直交方向の圧縮の塑性ひずみの絶対値が大きくなることに起因する。
- (4) PWHT による応力緩和は保持温度が高いほど大きい。保持温度を 630 °C で一定とした場合に応力緩和に及ぼす保持時間の影響は小さい。残留応力の緩和は、保持時間よりも保持温度の影響が大きい。
- (5) R6 法ガイドラインにおいて検討されている溶接残留応力解析手法では、解析の実施手順およびチェック項目が示されており、それに準じて解析を進めることにより、精度良く残留応力分布を評価できる。

最後に、本研究の解析の一部を実施いただいた松本健太氏(研究時 京都大学大学院工学研究科)に深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) 柳田信義, 斎藤高一, 小川和夫, “Ni 基合金溶接金属をクラッド溶接した低合金鋼異材部の残留応力解析”, 溶接学会全国大会講演概要, No. 87 (2010), pp. 56-57.
- (2) Yanagida, N. and Saito, K., “Residual Stress Analysis of Bead Welded Low Alloy Steel Plate Specimens Subjected to Post Weld Heat Treatment”, *Proceedings of ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference*, (2011), PVP2011-57054.

- (3) Yanagida, N. and Saito, K., “Residual Stress Analysis of Welded Low Alloy Steel Plates by Considering Phase Transformation”, *Proceedings of The 13th International Conference on Pressure Vessel Technology*, (2012), S1-MF1-P2.
- (4) 西川聡, 水野亮二, 大北茂, 小川和夫, “残留応力解析用材料物性値の取得”, 溶接学会全国大会講演概要, No. 87 (2010), pp. 58-59.
- (5) 水野亮二, 西川聡, 小川和夫, “低合金鋼の相変態が溶接残留応力に及ぼす影響についての感度解析”, 溶接学会全国大会講演概要, No. 87 (2010), pp. 60-61.
- (6) 柳田信義, 高澤秀一, 斎藤高一, “熱弾塑性クリープ解析による低合金鋼溶接部の溶接後熱処理による応力緩和シミュレーション”, 溶接学会 溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集, (2009), pp. 421-424.
- (7) 柳田信義, 斎藤高一, “溶接後熱処理の応力緩和シミュレーションに必要なクリープ特性に関する研究”, 溶接学会 溶接構造シンポジウム 2011 講演論文集, (2011), pp. 337-340.
- (8) 柳田信義, 斎藤高一, “溶接後熱処理の応力緩和シミュレーションに必要なクリープ特性の評価”, 日本機械学会 関東支部第 17 期総会講演会講演論文集, No. 110-1 (2011), pp. 145-146.
- (9) 小川和夫, 中田志津雄, 西川聡, 長谷川忠之, 村川英一, “円筒突合せ継手の溶接残留応に及ぼす入熱モデルおよび物性値の影響”, 日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス講演論文集, No. 05-9 (2005), pp. 317-318.
- (10) Ogawa, K., Chidwick, L. O., Ficquet X., Yanagida, N., Dennis, R. and Bray D., “The Measurement and Modelling of Residual Stresses in a Stainless Steel Pipe Girth Weld”, *Proceedings of The 12th International Conference on Pressure Vessel Technology*, (2009), p. 208.
- (11) Ogawa, K., Yanagida, N. and Saito, K., “Residual Stress Prediction for Non-Axisymmetric Vessel Penetration Welds”, *Proceedings of ASME 2008 Pressure Vessels & Piping Conference*, (2008), PVP2008-61321.
- (12) Yanagida, N., Ogawa, K., Saito, K. and Ed Kingston, “Study on Residual-Stress Redistributions during The Process of Manufacture of A Vessel Penetration Set-on Joint”, *Proceedings of ASME 2009 Pressure Vessels & Piping Conference*, (2009), PVP2009-77408.
- (13) 小川直輝, 室屋格, 岩本洋一, 太田高裕, 中長啓治, 小川和夫, “JNES IAF プロジェクトでの PWR 異材継手部に対する残留応力計測技術と解析評価技術の成果”, 溶接学会 溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集, (2009), pp. 397-404.
- (14) 奥田幸彦, 齋藤利之, 林貴広, 小川和夫, “BWR シュラウドサポートの溶接残留応力分布に及ぼすレグ部三次元性の影響”, 溶接学会 溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集, (2009), pp. 405-412.
- (15) Hurrell P., Watson C., Bouchard J., Smith M., Dennis R., Leggatt N., Bate S. and Warren A., “Development of Weld Modelling Guidelines in The UK”, *Proceedings of ASME 2009 Pressure Vessels & Piping Conference*, (2009), PVP2009-77540.
- (16) Dennis R., Leggatt N., Smith M. C. and Bouchard P. J., “R6 Weld Modelling Guidelines - Application to Groove Weld Worked Example”, *Proceedings of ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Conference*, (2010), PVP2010-25775.
- (17) ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.4 (2003), ABAQUS Inc.