

低合金鋼 SQV2A の多パスビードオン溶接の相変態を考慮した残留応力解析

Residual Stress Analysis of Multi Pass Bead on Plate Specimen of Low Alloy Steel SQV2A by Considering Phase Transformation in Welding Process

日立製作所 柳田 信義 Nobuyoshi YANAGIDA Non-member
日立 GE ニュークリア・エナジー 斎藤 高一 Koichi SAITO Non-member

Abstract

Weld sequence generally affects residual stress profiles. In this study, the profiles of a multi pass bead on plate specimen were experimentally and analytically examined. Material used in this study was the low alloy steel SQV2A (JIS G 3120). Phase transformation usually occurs around welded area in SQV2A and also affects the profiles. Five pass bead on plate specimen was fabricated. Residual stress profiles of the specimen were measured by using the strain relief method. Longitudinal residual stress around the last pass area of the specimen was lower than that around the previously welded pass area. The longitudinal residual stress profile in the previous welded area, where passes from the 1st to the 4th were welded, was higher than that of the last pass area. Residual stress analysis with considering phase transformation strain was carried out. The analysis results show good agreement with the experimentally measured results. These findings show that residual stress occurred around the welded area and that residual stress around the last pass area was lower than that of the previous pass area due to phase transformation strain.

Keywords: Weld, Residual Stress, Low Alloy Steel, Phase Transformation, Multi Pass, FEM

1. 緒言

低合金鋼の溶接では、溶接入熱に伴う昇温過程およびその後の降温過程において相変態が起きる。著者らは溶接過程の相変態に伴い発生するひずみ（以下、相変態ひずみ）を考慮可能な熱弾塑性解析手法を構築し、溶接過程で相変態が起きる材料である低合金鋼 SQV2A (JIS G3120) を対象に、残留応力に及ぼす相変態ひずみの影響を検討してきた。これまでに相変態ひずみを考慮した解析手法および考慮しない解析手法のそれぞれを用いて厚さ 10 mm の平板に 1 パスのビード溶接を行った試験体の残留応力解析を行い、残留応力測定の実験結果との比較から、ビード溶接の残留応力を精度良く予測するには、相変態ひずみの考慮が必要であることを示した[1]。ビード溶接により相変態が起きた溶接施工面の引張応力は、相変態が起きなかった反対面の引張応力よりも低くなった。相変態ひずみを考慮した解析から残留応力生成メカニズムを検討した結果、溶接施工面では溶接の昇温過程において相変態が起きる温度に到達し、降温過程の相変態で発

生する膨張の相変態ひずみにより引張応力が減少することを明らかにした。

実機では一般に多層多パス溶接が適用されている。多層多パス溶接では、先行パスに隣接して後続パスが置かれる。先行パス領域は、後続パスの入熱により引張応力が発生する。一方、相変態が起きる温度には到達しないため引張応力は減少しない。さらに、後続パス領域の相変態ひずみによる引張応力の減少は、先行パス領域には及ばないと考えられる。この考察の検証を目的として、本研究では 5 パスのビードオン溶接を行った試験体を対象に残留応力分布を実験および解析により検討した。

2. 低合金鋼 SQV2A の相変態ひずみ

著者らは、変形を拘束していない直径 3 mm、長さ 10 mm の低合金鋼 SQV2A の試験片を対象に、昇温過程および降温過程のひずみを測定した。測定結果を Fig. 1 に示す。昇温過程では 775°C から 850°C の範囲で勾配が変化した。また、降温過程では 500°C から 380°C において勾配が変化した。これらの変化は相変態に起因する。降温過程では 0.4% の膨張の相変態ひずみが発生する。降温過程の相変態ひずみは残留応力に影響を及ぼす。

連絡先: 柳田信義、〒319-1292 茨城県日立市大みか町 7-1-1、(株)日立製作所 研究開発グループ、
E-mail: nobuyoshi.yanagida.fw@hitachi.com

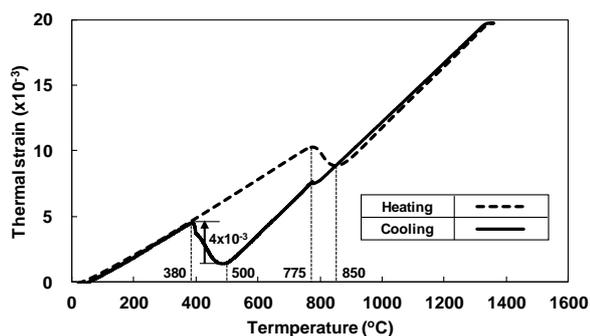


Fig.1 Thermal strain history in heating and cooling process

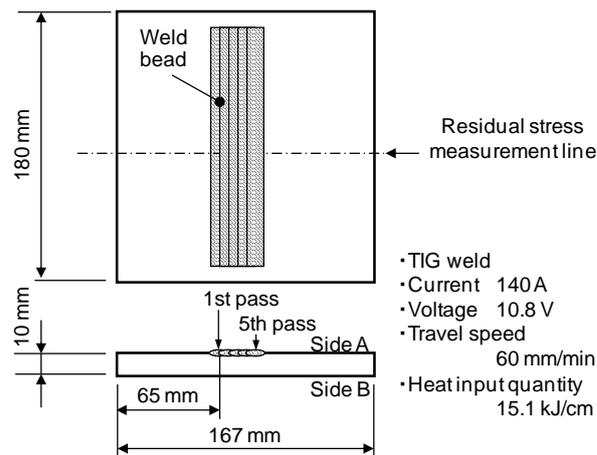
3. 実験方法

低合金鋼 SQV2A の平板にビード溶接を行なった試験体を製作した。Fig. 2(a) に試験体の形状およびビード溶接の位置を示す。試験体は厚さ 10 mm × 幅 167 mm × 長さ 180 mm の平板である。ビード溶接のパス数は 5 パスとした。1 パス目の溶接は、電極が素材の端部から 65 mm の位置となるように設定した。2 パス目以降の溶接は、電極が直前に行った溶接のビード端部となるように設定した。溶接方法は自動 TIG 溶接であり、電流は 140 A、電圧は 10.8 V、溶接速度は 60 mm/min であり、入熱量は 15.1 kJ/cm である。また、予熱およびパス間温度は 155 °C とした。変形の拘束は行わず試験体を台に置いた状態で溶接した。1 パス目の溶接において熱電対を用いて溶接部周囲の温度履歴を測定した。Fig. 2(b) に熱電対の取り付け位置を示した。溶接施工面においてビード端部から 5 mm、10 mm および反対面において溶接施工面のビード中央に相当する位置に取り付けた。

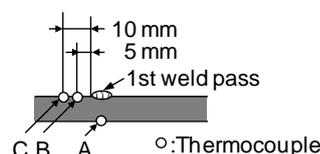
製作した試験体の残留応力をひずみ解放法により測定した。残留応力測定位置を Fig. 2(a) に示した。溶接パスの長手方向の中央を横切る位置とした。溶接後の試験体に 2 軸のひずみゲージを取り付けて初期値を測定し、次にひずみゲージの周囲を放電ワイヤ加工により切断して細片にした状態で最終値を測定し、初期値と最終値の差から解放ひずみを求め、平面応力の応力ひずみ関係式から残留応力を計算した。

4. 解析方法

非定常熱伝導解析により溶接過程の温度分布を求め、さらにその結果を用いた熱弾塑性解析により残留応力を求めた。Fig. 3 に解析に用いた要素分割を示す。Fig. 2 (a) に示した形状を 8 節点 6 面体要素を用いて離散化した。要素数は 17,280 であり、節点数は 21,426 である。



(a) Geometry of a specimen



(b) Temperature history measurement positions

Fig.2 Low alloy steel bead on plate specimen

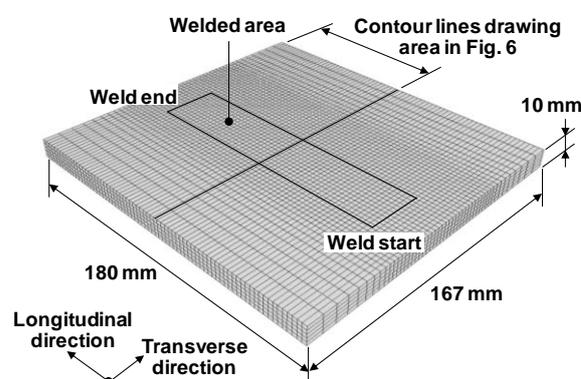


Fig.3 Mesh subdivision of the bead on plate specimen

4.1 非定常熱伝導解析

解析モデルの初期温度を 20 °C とし、155 °C の予熱、第 1 パスの溶接開始から第 5 パスの溶接終了および全体が初期温度に到達するまでの温度分布を解析した。熱源の移動は、1 パスのビード幅を直径とする円内に一様分布の表面熱流束を与え、それを溶接速度で溶接パス上を移動する移動熱源モデルを用いた。本研究の 1 パスのビード幅は 10 mm である。そこで、サブルーチンプログラムを作製して、直径 10 mm の円内の領域に電流、電圧および入熱効率の積から計算される表面熱流束を与える条件を定義し、その領域が溶接施工面の溶接パスに相当するラインに沿って移動するように設定した。

4.2 熱弾塑性解析

熱弾塑性解析により溶接過程の応力分布を求めた。解析では、Fig. 1 に示した熱ひずみの特性を与えるように設定したサブルーチンプログラムを作製して用いた。最高温度が 775 °C に到達した領域では、降温過程の熱ひずみの経路は昇温過程と異なる経路となる。一方、775 °C に到達しない領域では、降温過程の熱ひずみの経路は昇温過程と同一の経路となる。

5. 結果および考察

5.1 温度履歴

熱源が 1 パスの中間位置に到達したときの温度分布を等高線図で Fig. 4 に示す。入熱領域中心の最高到達温度は 1800 °C である。熱電対により温度を測定した位置に相当する節点の温度履歴と実験結果の比較を Fig. 5 に示す。入熱効率は、Fig. 2(b) に示した A 点の最高到達温度の実験結果が解析結果と一致するように調整した。入熱効率は 73% であった。このとき、他の B 点および C 点の実験結果と解析結果は良好に一致した。この結果より、4.1 節に述べた移動熱源モデルの適用と、実験結果との比較による入熱効率の適切な設定により、溶接部周囲の温度履歴は精度良く予測できることを確認した。

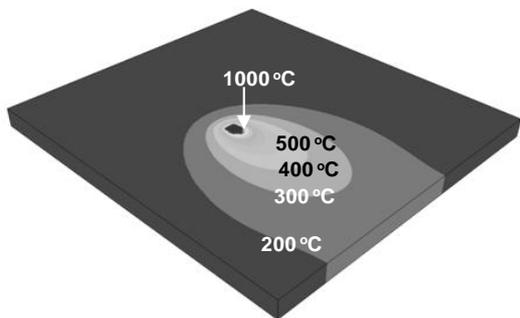


Fig.4 Contour lines of temperature in the 1st pass welding

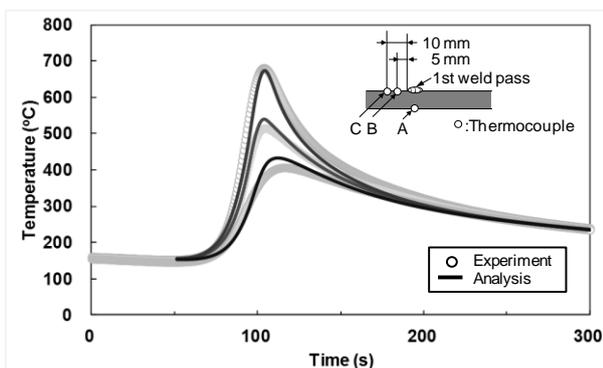


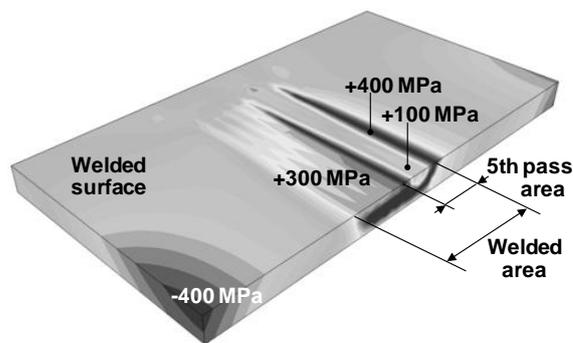
Fig.5 Temperature histories at the measurement positions

Fig. 5 に示した結果より、温度を測定した A 点から C 点では、昇温過程の相変態温度である 775 °C に到達しないことがわかった。すなわち、Fig. 2(b) に示したこれらの点の位置からわかるように、溶接施工面では溶接パスの端から 5 mm 以上離れた領域では相変態は起きない。また、反対面では全面にわたって相変態は起きない。

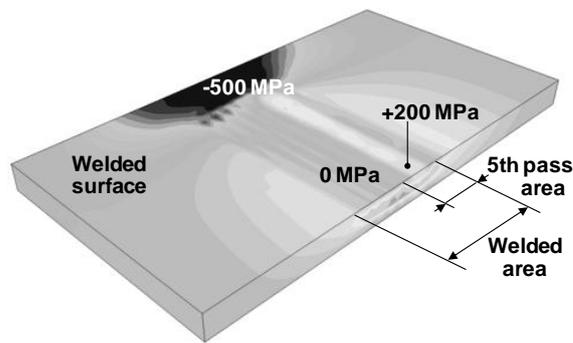
5.2 残留応力

解析により得られた残留応力分布を等高線図で Fig. 6 に示す。Fig. 6(a) は溶接線平行方向応力の分布である。溶接パスの長さ方向の中央を通る面を切断面としたときのパス終端側の 1/2 領域を示した。溶接部には引張応力が発生し、それと平衡する圧縮応力が試験体の端部に発生している。切断面における第 5 パス付近の引張応力は、パスの中央部では低い。解析では最高温度が 775 °C 以上に到達すると相変態ひずみが発生する設定とした。第 5 パス中央部の引張応力が減少した領域では、第 5 パス溶接時の最高温度が 775 °C 以上に到達した。

Fig. 6(b) に溶接線直交方向応力の分布を示す。溶接線直交方向応力では第 5 パスの中央部の引張応力は周囲よりも高くなる傾向が見られる。溶接パスの終端側の板端部では溶接部に発生した引張応力と平衡する圧縮応力が発生している。

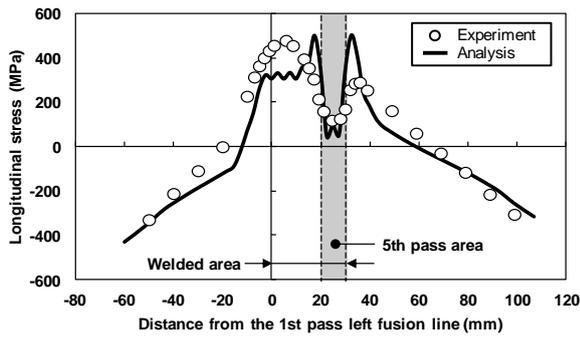


(a) Longitudinal stress

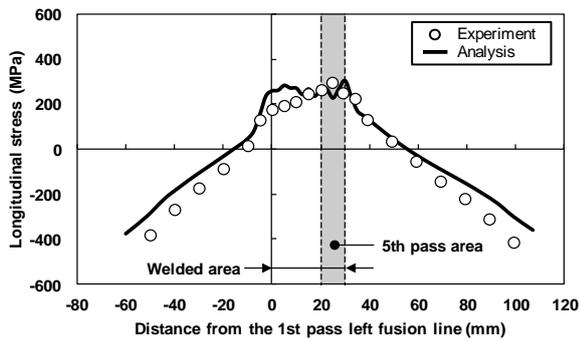


(b) Transverse stress

Fig.6 Contour lines of residual stress

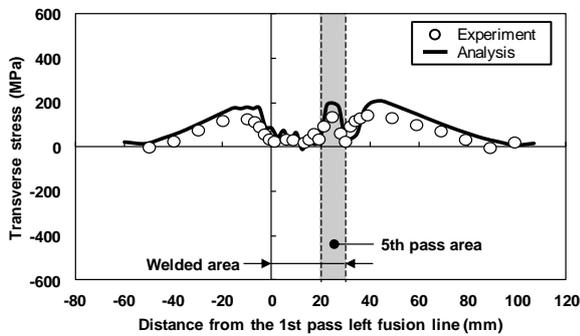


(a) Welded surface

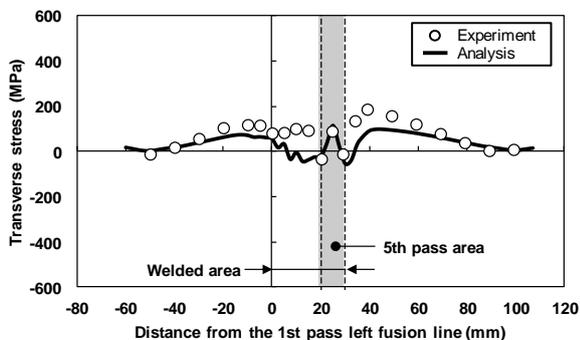


(b) Opposite surface

Fig.7 Longitudinal residual stress profiles



(a) Welded surface



(b) Opposite surface

Fig.8 Transverse residual stress profiles

試験体表面の溶接線平行方向応力の実験結果と解析結果の比較を Fig. 7 に示す。溶接施工面における分布を Fig. 7(a) に示した。実験結果と解析結果は良好に一致しており、最終パスである第 5 パス領域では、溶接パス中央の引張応力は周囲よりも低くなった。一方、第 1 パスから第 4 パスまでの先行パスの領域では、第 5 パス領域のような引張応力の減少は見られない。これは先行パス領域の温度は後続パスの溶接により上昇するが、相変態が起きる温度に到達しないため、降温過程の膨張の相変態ひずみは発生しないことによる。反対面における溶接線平行方向応力の分布を Fig. 7(b) に示した。反対面においも各パスの溶接過程において相変態が起きる温度に到達しておらず相変態ひずみは発生しないため、溶接面の溶接部に相当する領域では引張応力の減少は見られない。

試験体表面の溶接線直交方向応力の実験結果と解析結果の比較を Fig. 8 に示す。溶接施工面における分布を Fig. 8(a) に示した。実験結果と解析結果は良好に一致した。第 5 パス領域で引張応力が周囲よりも高くなる傾向が見られる。反対面における分布を Fig. 8(b) に示した。全領域にわたって解析結果の方が実験結果よりも引張応力が低くなっており、実験結果と解析結果に乖離が見られる。解析の高精度化として相変態ひずみによる変形とそれを介した残留応力の影響などについて検討が必要と考える。

6. 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、5 パスのビード溶接を行った試験体を製作し、溶接部の残留応力をひずみ解放法により測定した。また、溶接過程の温度分布を非定常熱伝導解析により求め、その結果を用いて残留応力分布を熱弾塑性解析により求めた。解析結果は実験結果と良好に一致しており、最終パスである第 5 パスの溶接中に最高到達温度が 775 °C に到達する領域では、降温過程の相変態ひずみにより溶接線平行方向応力が減少した。先行パスの領域では相変態ひずみの影響は小さく、第 5 パスの領域よりも高い引張応力が発生することを明らかにした。

参考文献

- [1] N.Yanagida and K.Saito: Effects of Weld and Post Weld Heat Treatment Conditions on Welding Residual Stress in Low Alloy Steel Plate, Transactions of the JSME, Series (A), Vol.79, No.802 (2013), 847-862. (in Japanese).