2 パス溶接で生じる溶接変形の特徴*

寺崎 俊夫**, 藤川 貴陽***, 北村 貴典**, 秋山 哲也**

Welding Deformation produced by Two Pass Welding*

by TERASAKI Toshio**, FUJIKAWA Takaharu***, KITAMURA Takanori** and AKIYAMA Tetsuya**

The multilayer welding is considered as accumulation of two pass welding, and it was clarified that the basic factors of welding deformation produced by two pass welding. From the comparison between the experimental results and numerical analysis, it was found that the numerical analysis method used in this research was very accurate to predict the welding deformation. Also, the influences of the welding heat input and the distance between two passes on the welding deformation were examined by using the numerical analyses. As a result, it was found that the longitudinal shrinkage made from each pass was decided by the inherent strain distribution parallel to the weld line. The inherent strain distribution parallel to the weld line after two pass welding was larger value at one pass or two pass welding. On the other hand, it was revealed that transverse shrinkage made from each pass was decided by the integration of inherent strain distribution perpendicular to the weld line. In the case of the inherent strain distribution perpendicular to the weld line after two pass welding, it was clarified that the inherent strain was almost same as the sum of inherent strain distribution perpendicular to the weld line made from each pass.

Key Words: Two pass weld, FEM, Longitudinal shrinkage, Transverse shrinkage, Residual stress, Inherent strain

1. 緒 言

多層溶接の溶接変形に関する研究報告は少なく、著者の一人¹⁾が、多層溶接の溶接変形に及ぼす溶接材料、溶接継手の諸元、溶接条件といった溶接諸条件の影響を実験により検討した報告、羅ら²⁻⁴⁾は多層溶接の変形を固有ひずみを用いた弾性計算により推定した報告などがある。

多層溶接で発生する溶接変形を考える場合に、基本となる現象はすでに置かれた1パスビードで発生した溶接変形と2パス目に置かれた溶接による溶接変形の関係をどのように考えるかである。すなわち、多層溶接は2パス溶接の現象が蓄積した結果と考えられる。

最近では、溶接変形を予測する手法として、有限要素法を用いた数値解析手法が使用されている。著者ら⁵⁾も有限要素法ソフトABAQUSを使用した熱弾塑性解析において、高精度に実験値を予測できる解析手法を確立している。

本報告では2パス溶接に絞って、溶接変形を実験と数値解析で検討した。始めに、2パス溶接で生じる溶接変形の実験結果と数値解析結果を比較することにより、用いた数値解析手法が精度良く解析できるか否か検討した。次に、2パス溶接で生じる溶接変形に影響を及ぼす因子を溶接変形

の発生原因である固有ひずみ分布に注目して検討し、溶接変形の基本的な考え方を明らかにした。

2. 数値解析手法の妥当性の検討

2.1 実験方法

Fig. 1 に示す板長さ 501 mm、板幅 100 mm、板厚 4.4 mm の溶接構造用鋼 SM400A の板幅中央を YAG レーザ溶接で、板厚方向の入熱が一様になるように貫通させた入熱条件（レーザーパワー 1230 W、溶接速度 650 mm/min）でビードオンプレート溶接を2回行った。試験片は溶接前に 600℃ で1時間の応力除去焼鈍を行った。

Fig. 1 に示すようにコンタクトボールを試験片の表裏面に取り付けて、プフェンダーひずみ計で 1/1000 mm まで収縮量を溶接前後で測定し、表面と裏面の収縮量の平均値より横収縮を求めた。縦収縮は溶接前後の板長さ端面の収縮量を 1/1000 mm まで測定できるレーザー変位計で測定した⁶⁾。レーザー溶接で板に与えられた溶接入熱は小さな試験片を溶接して計測した温度上昇より 72.4 J/mm となった。

Fig. 1 Specimen

*受付日 平成19年10月25日 受理日 平成20年2月12日 平成19年度秋季全国大会で発表

**正 員 九州工業大学 Member, Kyushu Institute of Technology

*** 九州工業大学大学院（現 東プレ株） Graduate student, Kyushu Institute of Technology (Present Address Topre Co.)

2.2 数値解析方法

有限要素法を使用した熱弾塑性解析において、重要な材料因子は降伏応力の温度依存性である。鋼においては200℃以下での降伏応力が重要であるので、室温(23℃)、100℃、200℃での高温引張試験を行った結果、0.2%耐力で示す降伏応力 σ_y は270 MPa, 245 MPa, 215 MPaとなった。数値計算に使用した材料定数の温度依存性をFig. 2に示す。ヤング率 E 、線膨張係数 α および高温での降伏応力の温度依存性はこれまでの研究成果で用いている値である⁹⁾。降伏後の加工硬化は考慮していない。熱伝導の材料定数もこれまでの研究成果と同様、比熱0.473 J/g・K、熱伝導率0.0369 J/mm・K・s、密度0.0078 g/mm³と一定値を使用した。

数値解析で重要な要素分割図をFig. 3に示す。2.1節で述べたように完全溶込み溶接となっていることから、解析は2次元モデルで計算した。図には溶接線(x)方向24mmの要素分割図を示す。この要素分割図は溶接長3mm当たりの分割図を8個繰り返したものである。板長さ501mmでは167個を組み合わせる計算している。溶接長3mm当たりの分割図は溶融領域、固有ひずみ発生領域に注意して要素分割している⁹⁾。熱源モデルも数値解析では重要であるが、本

Fig. 2 Temperature dependence of material properties

Fig. 3 Mesh division

研究ではこれまでの研究成果⁹⁾と同様、高精度に実験値を予測可能な熱源モデルを使用している。なお、使用したソフトは市販のABAQUSである。

2.3 実験値と数値解析値の比較検討

Fig. 4に1パス溶接後の縦収縮の実験値と数値解析値を示す。実験値は1mm間隔で得られて、データ数が多いので実線で示している。○印のプロット点が有限要素法による数値解析値(FEM)である。実験値と数値解析値はほぼ一致している。なお、実験値がときどき大きく変化しているが、縦収縮の変化とは物理現象として考え難いため、これらのデータは無視している。

Fig. 5は横収縮の実験値(●印)と数値解析値(○印)である。数値解析値の平均値は約0.064mmであり、実験値の平均値は約0.055mmである。従って、数値解析値は約15%の誤差で実験値を予測している。

以上で、使用している数値解析手法は溶接変形の実験値

Fig. 4 Longitudinal shrinkage after 1 pass weld

Fig. 5 Transverse shrinkage after 1 pass weld

を推定できていると考え、2パス溶接での溶接変形の特徴を数値解析で主に検討する。

3. 基本因子の影響

3.1 同一箇所を溶接する場合

3.1.1 1パス目と2パス目の溶接入熱が同じ場合

(1) 縦収縮

1パス溶接で完全冷却させた後で、2パス溶接を同じ場所に同一入熱で溶接した場合を取り扱う。溶接入熱は72.4 J/mmである。

Fig. 6に示す実験値の太い実線と数値解析値の△印は2パス溶接後の縦収縮分布である。細い実線は数値解析で得られた1パス溶接後の縦収縮分布 (Fig. 4) である。数値解析結果である△印と細い実線が完全に一致していることより、2パス溶接を行っても縦収縮は変化なしとなる。一方、実験値である太い実線は数値解析値より約0.04 mm大きくなっている。Fig. 4において、実験値と数値解析値がほぼ一致していることより、実験値では2パス溶接を行うと縦収縮分布は0.04 mmの増加を示している。この原因の一つは2パス溶接後に生じた座屈により試験片のxy面と垂直な面での曲り変形すなわち縦曲り変形が生じた。試験片の溶接線上(x軸上裏面)のたわみ分布を測定し、板長端部での傾き角度を求めると 6.7×10^{-3} radianであり、縦曲り変形による縦収縮の増加量を計算すると0.058 mmとなった。この値は概ね0.04 mmに近い値である。

縦収縮の発生原因は溶接線(x)方向の固有ひずみ g_x である⁶⁾。Fig. 7は数値解析で得られた板長さ中央断面($x=250.5$ mm)における固有ひずみ分布 g_x である。溶接線に対して対称であるので、y正の部分のみ示している。図中の●印は1パス溶接後の固有ひずみ g_x であり、実線は2パス溶接後の固有ひずみ g_x である。1パス後と2パス後の固有ひずみ分布が完全に一致していることより、 g_x の固有

Fig. 6 Longitudinal shrinkage after 2 pass welds

ひずみ分布の積分値で決まる縦収縮も同じになる。また、 g_x により溶接線方向の残留応力分布が主として決まるから、残留応力分布も1パスと2パスで同じとなる。

Fig. 8に固有ひずみの発生機構を考える場合に使用される両端固定棒モデルを示す。図では温度上昇を T として、最高温度上昇を T_{max} で表している。そして、溶接線近傍のある点が温度上昇する過程($0 \rightarrow T_{max}$)と温度冷却する過程($T_{max} \rightarrow 0$)での、溶接中の温度分布により発生する内的拘束状態を表している。溶接線(x)方向および溶接線に直角な板幅(y)方向の温度上昇過程では両端固定棒、冷却過程では溶接線(x)方向は両端固定棒、溶接線に直角な板幅(y)方向は自由棒となっている。このモデルを使用して、最高温度上昇 T_{max} になる点の熱膨張ひずみのマイナス $-aT$ 、弾性ひずみ、塑性ひずみの温度上昇に対する変化をFig. 9に示す。

両端固定棒モデルでは完全弾塑性体で、降伏ひずみ ε_y (降伏応力)、線膨張係数、ヤング率の温度依存性はなく、パウシンガー効果もないと仮定して、1次元の応力-ひずみ状態で検討している。両端固定棒では見かけのひずみが零であるから、熱膨張ひずみ aT 、弾性ひずみ ε_e および塑性ひずみ ε_p の和は零となる。すなわち、次式が常に成立する。

$$aT + \varepsilon_e + \varepsilon_p = 0 \quad \therefore -aT = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

Fig. 9の図中に示す温度上昇 T_p は熱膨張ひずみ aT が降伏ひずみ ε_y になる条件 $T_p = \varepsilon_y/a$ から得られる。Fig. 9は最高温度上昇 T_{max} が $2T_p$ 以上になる場合の例であり、熱膨張ひず

Fig. 7 Inherent strain distribution at $x=250.5$

	x direction g_x	y direction g_y
$0 \rightarrow T_{max}$		
$T_{max} \rightarrow 0$		

Fig. 8 Internal constraint

みの最大値 $\alpha T_{\max}$ は $2\varepsilon_Y$ 以上であるのが特徴である。

Fig. 9 (a) の1パス溶接の場合のひずみ履歴を説明する。温度上昇過程では熱膨張ひずみのマイナス $-\alpha T$ を最初に弾性ひずみが受け持ち (OA 間), 圧縮ひずみになった後 (AB 間) は, 塑性ひずみが受け持つ (EF 間)。温度冷却過程では弾性ひずみが圧縮降伏ひずみから引張降伏ひずみまで受け持ち (BC 間), 引張降伏ひずみ後 (CD 間) は塑性ひずみが受け持つ (GH 間)。Fig. 9 (b) の2パス溶接の場合には, 温度上昇過程において, 弾性ひずみが引張降伏ひずみから出発する (D 点) 事と塑性ひずみが圧縮降伏ひずみ (I 点) から出発する事が異なるだけで, 後は1パス溶接と同じになり, 冷却後の弾性ひずみと塑性ひずみは1パス溶接後と同じである。したがって, $T_{\max} \geq 2T_p$ の場合には, 残留塑性ひずみ (固有ひずみ) は同じになる。一方, $T_{\max} < 2T_p$ の場合には, 2パス溶接により塑性ひずみは新たに生じないから, 1パス溶接の残留塑性ひずみは変化しない。以上より, 溶接線方向の固有ひずみ分布は同じ所を同一入熱で溶接する限りは固有ひずみ値は同じとなる。したがって, 材料物

性値の温度依存性を考慮した数値解析においても, Fig. 7 に示したように1パス溶接後と2パス溶接後の固有ひずみ分布が同じとなり, 縦収縮も1パスと2パスで同じ値になったと考えられる。

(2) 横収縮

Fig. 10 に実験と計算で得られた横収縮分布を示す。Fig. 5 で考察したように, 数値解析値と実験値は1パス溶接で約15%の相違であった。Fig. 10 の2パス溶接後の実験値 (▲印) と数値解析値 (△印) も約20%ずれており, 実験値と数値解析値のずれは同程度である。そこで, 実験値のみに注目して横収縮値を比較すると, 1パス溶接後の横収縮値0.055 mm, 2パス溶接後の横収縮値0.11 mm となり, 2倍異なっている。一方, 数値解析値のみで比較すると, 1パス溶接後の横収縮値は0.064 mm となり, 2パス溶接後の横収縮値は0.135 mm であるから, 約2倍となっている。

以上より2パス後の横収縮は各パスで発生する横収縮値の和になっている。

Fig. 11 に数値解析で得られた板長さ中央断面 ($x=250.5$ mm)

Fig. 9 Transient plastic strain and elastic strain in x direction

Fig. 10 Transverse shrinkage after 1 pass and 2 pass welds

Fig. 11 Inherent strain distribution at $x=250.5$

における板幅 (y) 方向の固有ひずみ g_y の分布を示す。●印が1パス溶接後の結果であり、▲印が2パス溶接後の結果である。図中の実線は1パス溶接の●印の近似曲線である。破線は1パス溶接後の固有ひずみの近似曲線を使用し、固有ひずみの絶対値のみを2倍にした結果である。2パスの近似曲線である実線と破線と比較すると、ほぼ一致しており、固有ひずみ値の絶対値が2倍になっている。また、図より固有ひずみ発生領域は1パスも2パスも同じになっている。横収縮は板幅 (y) 方向の固有ひずみ g_y の積分値で得られるから、2パス溶接後の横収縮は1パス溶接後の横収縮の2倍になる。

Fig. 8 に示す y 方向の固有ひずみ g_y に関する内的拘束モデルでは、温度上昇過程は両端固定棒であり、冷却過程は自由棒であるから、固有ひずみはパス毎の熱膨張ひずみが両端固定棒で吸収された値となり、Fig. 11 の結果を支持している。

Fig. 12 Longitudinal shrinkage after 2 pass welds made by different heat inputs

Fig. 13 Inherent strain distribution at $x=506.3$ after 2 pass welds made by different heat inputs

3.1.2 1パス目と2パス目の入熱が異なる場合

多層溶接では各パス数での溶接入熱が異なる場合が多い。そこで、溶接位置が同じで1パスと2パスの溶接入熱が異なる場合の縦収縮と横収縮を数値解析で検討した。

対象にした試験片は Fig. 1 と同様な形状で、板幅が 300 mm、板長が 1035 mm、板厚が 4.4 mm で、板幅の中央を板長さ方向にビードオンプレート溶接した。溶接入熱は 133 J/mm と 200 J/mm の2種類である。

Fig. 12 に縦収縮の計算結果を示す。破線と実線は1パスのみで溶接したときの結果であり、破線の溶接入熱 133 J/mm、実線の溶接入熱は 200 J/mm である。●印と▲印は2パス溶接後の結果であり、●印は1パス目が 133 J/mm、2パス目が 200 J/mm で溶接したときの縦収縮であり、▲印は1パス目が 200 J/mm、2パス目が 133 J/mm で溶接したときの縦収縮である。図より縦収縮は2パスの中での最大溶接入熱で決まっている。これは溶接線方向の固有ひずみ g_x がパス中の最大温度上昇（この例では最大溶接入熱）で決まること、および縦収縮が g_x で決まることを考えれば、理解できる。

Fig. 13 に各パス条件における溶接線方向の固有ひずみ g_x の分布を示す。破線と実線および記号の説明は Fig. 12 と同じである。予想したように、固有ひずみ分布はパス中の最大溶接入熱で決まっている。

次に、2パス溶接後の横収縮の計算結果を Fig. 14 に示す。破線と実線および記号の説明は Fig. 12 と同じである。太い実線と●印、▲印の結果がほぼ一致していることより、溶接入熱が変化する場合でも、溶接線方向に直角方向の固有ひずみ g_y の分布で決まる横収縮は加算則で求められている。

3.2 入熱一定で溶接箇所が異なる場合

溶接入熱 133 J/mm で溶接したときの固有ひずみ分布 g_x は Fig. 13 に示す破線であり、溶接線から 20 mm 離れた位置まで存在している。そこで、各パスの溶接入熱を 133 J/mm

Fig. 14 Transverse shrinkage at $y=40$ after 2 pass welds made by different heat inputs

として、1パス目の溶接位置を $y = 13 \text{ mm}$ 、2パス目の溶接位置を $y = -13 \text{ mm}$ として、各パスの固有ひずみが干渉する場合の縦収縮、横収縮を数値解析で検討した。

Fig. 15 に破線で1パス溶接後の横収縮、細い実線で2パス溶接後の横収縮、太い実線で Fig. 14 の破線で示す1パス溶接後の横収縮を2倍にした横収縮を示す。図より細い実線で示す2パス溶接後の横収縮は1パス溶接の横収縮を基本にして2倍した太い実線に近い値になっており、横収縮は各パスの加算で推定できている。

2パス溶接後の縦収縮を Fig. 16 に示す。●印は $y = 13$ の位置に溶接入熱 $Q_{net} = 133 \text{ J/mm}$ で溶接したときの縦収縮分布であり、実線はさらに $y = -13$ の位置に2パス目の溶接を溶接入熱 $Q_{net} = 133 \text{ J/mm}$ で行ったときの2パス溶接後の縦収縮分布である。2パス溶接後の縦収縮は同一入熱で得られた Fig. 6 と異なった分布をしている。この原因は溶接線方向の固有ひずみ g_x の分布にある。

Fig. 17 に実線で2パス溶接後の固有ひずみ分布および1

Fig. 15 Transverse shrinkage of joint welded at different positions

Fig. 16 Longitudinal shrinkage of joint welded at different positions

パス溶接後の固有ひずみ分布を $y = 13$ の位置と $y = -13$ に配置し、各位置において固有ひずみ値の絶対値が大きい固有ひずみを採用して、2パス溶接後の固有ひずみ分布を破線で予測した。実線と破線がほぼ一致していることより、2パス溶接後の固有ひずみ分布は各位置において、過去に受けた最大の温度上昇で決定されると考えたと説明できる。したがって、固有ひずみ分布 g_x から導かれる縦収縮も説明できることになる。

Fig. 17 において、実線で示す2パス溶接後の固有ひずみと破線で示す1パス溶接の固有ひずみを比較すると

- ① 最初に溶接した溶接部では、2パス溶接後の固有ひずみの絶対値が1パス溶接の固有ひずみの絶対値より小さくなっていること
- ② 2回目に溶接した溶接部の固有ひずみの絶対値が1パス溶接の固有ひずみの絶対値より大きくなっていることに特徴がある。

最初の①の原因は1パス溶接後に引張りの降伏応力状態になっていることである。この状態から、 $y = -13 \text{ mm}$ の位置での2パス目の溶接による溶接部の温度上昇により、 $y = 13 \text{ mm}$ 位置は引張りの降伏状態がしばらく続き、この状態で引張塑性ひずみを受けるために、圧縮の残留塑性ひずみが小さくなったのである。

次に、②の原因を Fig. 18 の両端固定棒モデルで説明する。図は2パス溶接位置である ($x = 517.5, y = -13$) での塑性ひずみと弾性ひずみの過渡変形である。Fig. 19 に $y = 13$ の位置に1パス溶接した後の残留応力分布を示す。1パス溶接により、位置 ($x = 517.5, y = -13$) には圧縮の残留応力が生じている。このために、塑性ひずみは圧縮残留応力がない零の状態よりは小さな温度上昇で降伏しており、温度上昇過程での圧縮塑性ひずみの絶対値が大きくなっているため、冷却後の残留塑性ひずみの絶対値は圧縮降伏ひずみの絶対値より大きくなる。

Fig. 17 Inherent strain distributions at middle section ($x = 506.3$) after 2 pass welds

Fig. 18 Transient elastic strain and plastic strain in x direction during 2 pass welds at point ($x=517.5, y=-13$)

Fig. 19 Residual stress distribution at middle section ($x=517.5$) after 1 pass weld

以上、溶接位置が異なる場合には①、②の要因があるが、大きく見ると各位置での最高温度上昇から固有ひずみ g_x を両端固定棒で計算し、計算された固有ひずみ分布から縦収縮を計算すればよい。

4. 結 論

2パス溶接での基本因子は各パスでの溶接入熱、各パスの溶接間距離である。これらの因子を変化させて溶接変形を検討した結果、次の結論が得られた。

- (1) 溶接線方向の収縮である縦収縮は各パスで作られる溶接線方向の残留塑性ひずみ（固有ひずみと呼ぶ）分布で決まる。
- (2) 2パス後の溶接線方向の固有ひずみ分布は各パス単独で作られる固有ひずみ分布を図に書いて、各点で得ら

れる固有ひずみ値の大きな値が残留する。従って、

- ①同じ位置を同一入熱で溶接したときの固有ひずみ分布は変化しないから、2パス溶接後の縦収縮は1パス溶接後の縦収縮と同じである。
 - ②同じ位置を異なる溶接入熱で溶接した場合、固有ひずみ分布は大きい溶接入熱で決定されるから、2パス溶接後の縦収縮は2パス溶接の中で大きな溶接入熱単独のときに得られる縦収縮と同じになる。
 - ③溶接位置が異なるときは、それぞれ単独の溶接入熱で得られる固有ひずみ分布を作り、各点で絶対値が大きい固有ひずみ分布が残留するとして求めた固有ひずみ分布が作る縦収縮と2パス溶接後の縦収縮はほぼ同じとなる。
- (3) 溶接線直角方向の収縮である横収縮は各パスで作られた溶接線直角方向の残留塑性ひずみ（固有ひずみ）分布の積分値で決まる。
- (4) 2パス溶接後の溶接線直角方向の固有ひずみ分布は各パス単独で作られる固有ひずみ分布の和で与えられる。従って、
- ①同じ位置を同一入熱で溶接した場合における2パス溶接後の横収縮は1パス溶接後の横収縮の2倍となる。
 - ②同じ位置を異なる溶接入熱で溶接した場合における2パス溶接後の横収縮は各パス溶接で得られる横収縮の和でほぼ与えられる。
 - ③溶接位置が異なる場合の横収縮も各パス溶接で得られる横収縮の和でほぼ与えられる。

謝 辞

実験にご協力いただいた九州工業大学学士 安藤光氏に感謝いたします。また、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費の基盤研究(B)の補助金で行われた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. Satoh, T. Terasaki: Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Multipass Welded Butt Joint, Journal of the Japan Welding Society, 45-6 (1976), 50-56. (in Japanese)
- 2) H. Murakawa, Luo Yu, Y. Ueda: Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain: (First Report) Mechanism of Inherent Strain Production, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 180 (1996), 739-751. (in Japanese)
- 3) Luo Yu, H. Murakawa, Y. Ueda: Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain: (Second Report) Deformation and Residual Stress under Multiple Thermal Cycles, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 182 (1997), 783-793. (in Japanese)
- 4) Luo Yu, H. Murakawa, Y. Ueda: Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain: (Third Report) Deformation and Residual Stress in

- Narrow Gap Welding, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 183 (1998), 323-333. (in Japanese)
- 5) T. Terasaki, D. Yamakawa, S. Tounai: Study on Accurate Numerical Analysis of Welding Residual Stress and Welding Deformation Generated in Bead-On-Plate, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 191 (2002), 249-255. (in Japanese)
- 6) T. Terasaki, T. Ishimura, K. Matsuishi, T. Akiyama: Study on Longitudinal Shrinkage of Bead-On-Plate, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 20 (2002), 136-142. (in Japanese)
- 7) M. Watanabe, K. Satoh: 溶接力学とその応用, Asakurashoten (1965), 304. (in Japanese)
-