重ねすみ肉溶接継手における残留応力特性への影響因子評価*

永井 卓也**, 河西 龍**, 鈴木 励一***, 望月 正人****, 菅 哲男*****

An Estimation of Factors Influencing Residual Stress Characteristics of Fillet Welded Lap Joints*

by NAGAI Takuya**, KASAI Ryu **, SUZUKI Reiichi***, MOCHIZUKI Masahito**** and SUGA Tetsuo*****

The residual stress behaviors in fillet welded lap joints of sheet metal have been researched in the systematic testing procedure with varied steel types, steel thicknesses, and welding wires having different transformation points. Consequently, under the simulated fabrication welding conditions (with a constant amount of deposited metal), the transverse residual stress at the weld toe, which is deemed critical in fatigue strength, has been found almost invariable to a change in steel type and thickness, but it has been clarified to become compressive to a greater extent as the wire's transformation point is lower. Moreover, as for the residual stress inside the weld metal, the compressive residual stress area has been found to expand as the welding wire's transformation point reduces, from the results of the thermo-elastic-plastic analysis.

Key Words: thin steel plate, low temperature transformation weld material, residual stress, X-ray diffraction method, finite element method

1. 緒 言

自動車業界で多用される薄鋼板の重ねすみ肉溶接継手は、疲労強度の向上に対するニーズが高い、疲労強度の低下を招く主要因としては、溶接金属止端部の形状によって生じる応力集中¹⁾と溶接金属止端部周辺に生じる引張残留応力²⁾が挙げられる。引張残留応力を低減させる手段としては、ピーニング法³⁾や溶接後熱処理など溶接の後工程で行う方法もあるが、溶接材料自体の成分制御による方法も考案されている。この溶接材料は低変態温度溶接材料と呼ばれ、通常よりも低い温度で溶接金属をマルテンサイト変態させ、その際の膨張を利用して溶接金属止端部近傍に圧縮残留応力を導入する効果をもつ⁴⁾。低変態温度溶接材料を用いた実験はいろいろと行われており、重ねすみ肉溶接継手についても検討が行われている^{5, 6)}。しかし、一般的な溶接材料との比較実験や母材の鋼種を変更した場合の影響調査等について個別の研究報告はあるものの、溶接条件や板厚といった基礎条件が揃っておらず、残留応力へ影響を与える種々の因子がそれぞれの程度残留応力へ寄与するか比較することは難しい。そこで、本研究では、重ねすみ肉溶接継手における残留応力特性について、溶接条件や板厚といった基

礎条件を管理した系統的調査を行うこととした。鋼種、板厚、溶接ワイヤを変化させた場合の残留応力への影響度合いについて報告する。

2. 試 験 方 法

2.1 供試材

供試鋼板は、Mild steel, 590 MPa 級鋼, 780 MPa 級鋼で、それぞれ板厚 2.9 mm (590 MPa 級鋼のみ 2.3 mm と 3.6 mm も準備)、幅 85 mm, 長さ 100 mm の平板を用いた。マグ溶接用のワイヤは、薄板のすみ肉溶接に一般的に使用される軟鋼ソリッドワイヤ (JIS Z 3312 G49 A2 M16), C 量を増加して変態点を調整したメタル系フラックス入りワイヤ、低変態温度溶接材料の 10Cr-10Ni ソリッドワイヤの 3 種を用いた。それぞれの溶接金属についての化学成分を、Table 1 に示す。

2.2 溶接方法

溶接は、板厚 2.3~3.6 mm, 幅 85 mm, 長さ 300 mm の鋼板による重ね継手に対し、マグ溶接で行った。試験板形状を、Fig. 1 に示す。試験板の拘束は、Fig. 1 に示すとおり板状の拘束板を上から 3 箇所のカランプで押さえる方法とした。この拘束は溶接開始から 3 分後に外した。

溶接条件は、各溶接材料について Table 2 に示す条件とし、

Table 1 Welding conditions

Weld Material	Chemical compositions (mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
JIS Z 3312 G49 A2 M16	0.05	0.33	1.29	0.013	0.003	0.008	0.031
C control (FCW)	0.31	0.52	1.42	0.013	0.006	0.005	0.021
10Cr-10Ni	0.04	0.01	0.74	0.012	0.003	4.95	4.83

*受付日 平成27年 3 月26日 受理日 平成27年 5 月10日 平成25年度秋季全国大会で発表

**正 員 神鋼溶接サービス株式会社 Member, Shinko Welding Service Co., Ltd.

***正 員 株式会社神戸製鋼所 Member, Kobe Steel, Ltd.

****正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

*****正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Fig. 1 Shape and dimensions of testing plate and temperature measuring points

Table 2 Chemical compositions of Weld metal

Test No.	Steel Grade	Thickness mm	Weld Material	Welding Current A	Arc Voltage V	Welding Speed cm/min	Wire feeding rate m/min
1 (standard)	HT590	2.9	JIS Z 3312 G49 A2 M16	270	25	80	8.8
2	Mild Steel	2.9	JIS Z 3312 G49 A2 M16	265	25	80	8.8
3	HT780	2.9	JIS Z 3312 G49 A2 M16	270	25	80	8.8
4	HT590	2.3	JIS Z 3312 G49 A2 M16	200	21	80	5.8
5	HT590	3.6	JIS Z 3312 G49 A2 M16	300	25	80	10.0
6	HT590	2.9	C control (FCW)	215	25	80	8.8
7	HT590	2.9	10Cr-10Ni	220	28	80	8.8

*No. 1, 2, 3, 6, 7 ... Deposition Rate is constant.
 *No. 1, 4, 5 ... Rate of Penetration is constant.
 *Shielding gas ... Ar+20 %CO₂ (25 l/min)

繰返し数を2として実施した。Test No. 1, 2, 3, 6, 7は、実施工を想定し溶着量一定の溶接条件とした。Test No. 4, 5についても実施工を想定し溶込み割合をTest No. 1と一致させる溶接条件とした。シールドガスは、すべてAr-20 %CO₂とした。

2.3 温度の測定方法

有限要素法解析における入熱条件の基準とするべく、溶接時の鋼板表面温度測定を行った。測定位置はFig. 1に示すとおり、上板は板端部から4mm、下板は上板端部から6, 8mmの計3か所とした。測定は、メモリハイコーダおよび素線径0.32mmのK熱電対（ガラス繊維被覆）を用い、全ての溶接試験体に対し実施した。熱電対の先端は供試材の温度測定箇所に抵抗溶接機で固定し、メモリハイコーダまでをK熱電対用補償導線を用いて配線した。測定間隔は10プロット/秒とした。また、溶接時の電源ノイズおよび周囲からのノイズを軽減するため、メモリハイコーダ内蔵のローパスフィルタ5Hzを入れた。

Fig. 2 Locations and directions of residual stress measurement

2.4 残留応力の測定方法

残留応力の測定は、溶接金属止端部近傍のごく表面の残留応力を知りたかったことから、X線回折法で実施した。測定位置は、Fig. 2に示すようにビード止端部から0.5～

Table 3 X-ray stress measurement conditions

Measuring method	Ω -Diffractometer method
Characteristic X-ray	Cr-K α
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Diffractive plane	(211)
Diffractive angle, 2θ	156.4 °
Angle of ϕ	11 angles between 0~45 °
Oscillation angle of ϕ	± 3 °
Stress constant	-318 MPa/deg
X-ray exposure time	120 s/ ϕ
X-ray exposure area	1 mm ϕ

Fig. 3 Analytical model**Table 4** Analysis conditions

Boundary condition	Atmosphere (Vacuum)	Radiant heat transfer at an emissivity of 0.8
	Restraint	Restrained at the same location for the same time as taken in the welding test
Heat source	Internal calorific type	Heat source is input into the penetration area defined with cross-sectional macrograph
Efficiency of heat input		70~80 %
Number of elements		Approx. 15,000

Fig. 4 Example of physical properties (Weld metal : JIS Z 3312 G49 A2 M16)

4.5 mm までを 1.0 mm 間隔で計 5 点とした。測定径は 1.0 mm ϕ である。測定方向は、溶接線直角方向 (σ_T) と溶接線方向 (σ_L) の 2 方向とした。また、測定面には電解研磨処理 (深さ約 200 μ m) を行い、表面の加工ひずみの影響を除去している。電解研磨は、試料を陽極とし、研磨しようとする面に対向して陰極を設け、その間に電解液を満たして金属溶出する方法である。残留応力を精度よく測定するには、電解研磨面が凹凸しておらず、平滑でなければならない。各鋼種について、電解研磨の適正条件を確立し、測定面に凹凸のないことを確認している。残留応力の測定方法は、日本材料学会の X 線応力測定法標準に準拠している⁷⁻⁹⁾。X 線の入射角を数回変えながら試料に照射し、試料からの回折 X 線の回折角度 (2θ) を求め、応力による格子面間隔の変化を見ている。測定条件は、Table 3 に示すとおりである。

なお、 ψ 角度は試料面法線と回折面法線のなす角度であり、X 線の試料への入射角に対応している。 ψ 角度毎の回

折角度は半価幅中点法で求め、残留応力は $2\theta - \sin^2\psi$ 線図の傾きに応力定数をかけて算出している。

2.5 有限要素法解析

残留応力の検証のため、有限要素法解析を行った。解析モデルは、Fig. 3 に示すように、実験で使用した試験体と同じ形状の 3 次元モデルとした。モデル上での拘束は実験と同じ位置を角変形方向に完全拘束し、拘束時間は実験と同じ 3 分とした。その他解析条件は、Table 4 のとおりである。物性値は、Fig. 4 に溶接金属の代表例を示すが、温度依存性を考慮した参照値¹⁰⁾および実測値を用いた。ただし、密度およびポアソン比は温度依存性を無視し、一定値とした。溶接条件は、実際の溶接と同じ Table 2 に示す条件としている。

2.6 変態点測定

有限要素法解析に用いる物性値の一つである線膨張係数は、実測値を用いた。溶接金属部の線膨張係数測定は、実

際に溶接した試験体から $3\text{ mm}\phi \times 10\text{ mm}$ 長さの試験片を採取し、試験に供した。試験片を測定装置内にセットし、加熱による試験片の伸びを検出棒（石英ガラス）で測定した。冷却速度は、Rosenthal の移動熱源の温度分布の解（ 540°C ）から 40°C/s を設定した。薄板の移動潜熱源の場合、次式で表される¹¹⁾。

$$CR = 2\pi\lambda C\rho \left(\frac{h}{Q}\right)^2 (540 - T_0)^3$$

CR : 540°C における冷却速度 ($^\circ\text{C/s}$)

λ : 熱伝導率 ($\text{J/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$)

C : 比熱 ($\text{J/g}\cdot^\circ\text{C}$)

ρ : 密度 (g/cm^3)

h : 板厚 (cm)

Q : 溶接入熱 (J/cm)

T_0 : 初期温度 ($^\circ\text{C}$)

また、変態点は、線膨張－温度曲線において線膨張曲線が直線関係から離れる点および直線関係に戻る点として決定した。

3. 結果および考察

3.1 実験値と解析値の比較

溶接部の断面マクロ写真を、Fig. 5 に示す。ワイヤ・鋼種の影響を確認するための試験については溶着量一定、板厚の影響を確認するための試験については溶込み割合を一定とした条件で溶接を実施している。いずれの条件でも良好なビードが得られた。これらのマクロ写真を元に、条件ごとに形状を変えて解析モデルを作成した。溶接時の温度測定結果と解析結果の代表例を、Fig. 6 に示す。3 か所の温度測定位置において、実測値と解析値は良い一致を示している。その他条件においても、入熱効率を 70～80% の間で調整し測定結果と解析結果で良い一致を示した。

Fig. 7 に溶接線直角方向の残留応力 (σ_T) を、Fig. 8 に溶接線方向の残留応力 (σ_L) を、それぞれ示す。溶接線直角方向の残留応力は、止端部から離れた点から止端部へ近づくにつれて圧縮となる傾向が実験と解析で一致している。ただし、止端部から 4 mm 以上離れた点に関しては、実験と解析値で差がある。溶接線方向の残留応力は、測定点全てで引張となる点が実験と解析で一致している。また、一般的に溶接金属近傍では、耐力レベルの引張残留応力が生じていると言われているが¹²⁾、本実験では耐力の大小関係と止端部の大小関係が一致している。なお、本実験の供試材における耐力は、Mild Steel が 290 MPa、HT590 が 470 MPa、HT780 が 760 MPa となっている。ただし、溶接線方向においても止端部から 4 mm 以上離れた点に関しては、実験と解析値で差がある。止端部から 4 mm 以上離れた点の残留応力が、実験と解析で差があることについては、初期残留応力が影響していると考えることが出来る。供試鋼板が完全な平面とはなっておらず、拘束時にわずかではあるが変形し、応力が分布した可能性がある。止端近傍については、溶接による熱の影響で初期残留応力がキャンセルされ、実験と解析が近い結果となっていると推察される。したがって、疲労強度に影響のある止端近傍の残留応力評価には十分なデータが得られていると考える。ここで、Fig. 9 に示す実験値と解析値の相関図を見てみる。この相関図には、本研究で用いた全ての測定点についてプロットしている。溶接線直角方向、溶接線方向ともに若干ばらついている点はあるものの、まともにはあるように見える。相関係数で見ると、99% 信頼区間とした場合の棄却域が 0.430 であるのに対し、 σ_T では 0.765、 σ_L では 0.637 となるため、相関はあるものと評価できる。一方、解析値と実験値の絶対値は性質が異なるものであることも事実である。解析での応力値は、その場所を点で見た値であるのに対し、実験の値は、X 線照射範囲 $1\text{ mm}\phi$ の平均値を見ている。応力勾配の大きい箇所であれば差は大きいものとなり、点での比較はあまり意

Fig. 5 Cross-sectional macrographs of welds

Fig. 6 Comparison of temperature transitions between measurement and analysis (No.7 (10Cr-10Ni))

Fig. 7 Transverse residual stress (σ_T)

(a) Effect of Steel grade

(b) Effect of thickness

(c) Effect of weld material

Fig. 8 Longitudinal residual stress (σ_L) (a) Transverse direction (σ_T)(b) Longitudinal direction (σ_L)**Fig. 9** Correlation diagram of residual stresses by measurement and analysis

味を持たない。

以上のことより、以降は溶接金属止端部近傍の残留応力について、点での値比較が可能である解析結果で考察することとする。

3.2 鋼種と残留応力の関係

溶接線直角方向の止端部残留応力は、鋼板強度によらず -20~-50 MPa 程度で大きな差はない。板厚 2 mm について同様の実験が行われた例では⁶⁾、高強度鋼板ほど止端部は圧縮残留応力が大きいと報告されている。具体的な値で言うと、HT540 と HT780 で 150 MPa 程度の差がある。今回の結果においては、HT780 が HT590 に比べ圧縮側に来ているものの、その差は 30 MPa 程度であった。過去の実験と異なった原因は、溶接条件の管理によるものと思われる。過去の実験における断面マクロ写真を見ると、HT540 と HT780 で下板への溶込み深さが異なっている。本実験においては、溶接条件を管理しており、溶接金属は鋼板強度によらず同様の形状を示している。溶着金属量の異なる過去の実験例では、止端部の残留応力に影響を与える溶接金属の収縮量や温度履歴が HT540 と HT780 で異なり、鋼種以外の影響も加わっていた可能性があり、今回の結果と異なると推察する。板厚 2.9 mm で実施を想定した溶着量一定の場合は、鋼板強度によって止端部の残留応力は大きく変わらないということが言える。

溶接線方向の止端部残留応力は、各鋼種とも降伏応力程度の引張残留応力となっている。一般的なアーク溶接では、溶接部近傍について、全長に渡って大きく加熱・冷却されるため力学的拘束条件が厳しくなり、溶接金属およびその周辺の熱影響部に降伏応力程度の引張残留応力が生じることが知られているが¹³⁾、今回の結果もそれに従ったものになっている。

3.3 板厚と残留応力の関係

板厚 2.3~3.6 mm の範囲では、溶接線直角方向の止端部残留応力は -25~-45 MPa 程度と同程度の値となっている。また、溶接線方向の止端部残留応力についても、全て 400 MPa 程度の引張残留応力となっており差は見られない。一般的に板厚が厚くなるほど溶接時の拘束は強くなり、残留応力は高くなるが、板厚 2.3~3.6 mm という狭い範囲において、溶込みの割合が一定という条件では、板厚の影響はほぼ無いということが分かった。

3.4 溶接ワイヤと残留応力の関係

溶接線直角方向の止端部残留応力は、溶接ワイヤによって明確な差が生じた。10Cr-10Ni, C control (FCW), JIS Z 3312 G49 A2 M16 で変態点および変態による膨張量は異なり、その差によるものと判断できる。溶接金属の変態点測定の結果を、Fig. 10 に示す。一般溶接材料 (JIS Z 3312 G49 A2 M16) でも、変態による膨張で引張応力を緩和することに

(a) JIS Z 3312 G49 A2 M16

(b) C control (FCW)

(c) 10Cr-10Ni

Fig. 10 Temperature-Dilatation curve

なるが、変態点が高いため再び収縮しはじめる温度も高く、変態による膨張効果が室温付近で効果的ではない。低変態温度溶接材料であれば、変態温度が低いため膨張による引張応力の緩和および圧縮応力の付与の効果が室温付近まで継続する。10Cr-10Ni は 388°C, C control (FCW) は 403°C と変態開始温度に大きな差はないが、変態終了温度が大きく異なる。変態膨張の効果は、変態終了温度が室温付近となる 10Cr-10Niの方が大きい。今回の結果は、変態点が低く、また室温付近まで変態膨張効果のあるワイヤほど、止端部近傍の残留応力は圧縮となっており、過去の低変態温度溶材に関する研究報告と一致している⁵⁾。Fig. 11 は、板厚内部の残留応力分布である。変態点が低く、室温まで膨張が継続する材料となるにつれ、溶接金属内部および止端部近傍に圧縮領域が現れ、広がっていく傾向が確認できる。低変態温

Fig. 11 Cross-sectional distributions of transverse stresses (σ_T)

度溶接材料を用いたビードオンプレート溶接に関する解析では、溶接金属内部に圧縮残留応力が広く分布しているとの報告があり¹⁴⁾、今回の結果と一致している。本試験においては、変態点を3段階で変えた試験を行い、溶接金属内部の圧縮残留応力分布の範囲が、変態開始点および変態終了点が低くなるほど広がっていくことを示した。

以上のことから、薄板のマグ溶接継手において、疲労強度に関する溶接線直角方向の残留応力は、鋼種と板厚の影響はあまりなく、溶接ワイヤの種類が大きく影響を与えることが分かった。

4. 結 言

薄板のマグ溶接における残留応力特性について、実験で妥当性を確認した解析結果から、鋼種・板厚・溶接ワイヤによる影響を系統的に整理し、以下の結果を得た。なお、検討した条件範囲は、鋼種「Mild Steel, HT590, HT780」、板厚「2.3~3.6 mm」、溶接ワイヤ「一般的な軟鋼ソリッドワイヤ、C量を増加して変態点を調整したメタル系フラック

ス入りワイヤ、低変態温度溶接材料の10Cr-10Niソリッドワイヤ」である。

- (1) 薄板の重ねすみ肉溶接継手において、疲労強度で重要視される溶接線直角方向止端部の残留応力は、実施工を想定した本テスト（溶着量一定）においては、鋼種と板厚の影響はあまりなく、変態点が低く、変態膨張量の大きいワイヤほど圧縮応力となることを把握した。
- (2) 鋼種の影響については、溶接線方向止端部において高強度鋼板ほど引張残留応力であることを確認した。溶接線直角方向においては、わずかであるが高強度鋼板ほど圧縮残留応力となっているものの明確な差は見られなかった。
- (3) 溶接ワイヤの影響については、溶接金属内部の圧縮残留応力分布の範囲が、変態点が低く、変態膨張量の大きい材料ほど広がっていくことが分かった。

参 考 文 献

- 1) T. Terasaki, T. Akiyama, N. Yokoshima, T. Isoya and K. Katada: Effect of Factors in Weld Reinforcement on Stress Concentration

- Factor: Study of Stress Concentration Factor and Stress Intensity Factor in Welded Joint (Part 1) (<special issue>Present Situation of Arc Welding Robot), Journal of the Japan Welding Society, 51-9 (1982), 790-796. (in Japanese)
- 2) A. Ohta, E. Sasaki, M. Kamakura, M.N. Ihei, M. Kosuge, M. Kanao and M. Inagaki: Effect of Residual Tensile Stresses on Threshold Level for Fatigue Crack Propagation in Welded Joints of SM50B Steel, Journal of the Japan Welding Society, 50-2 (1980), 161-168. (in Japanese)
 - 3) M. Hasegawa, K. Ohta and H. Suzuki: Improvement of Fatigue Strength of SM490A Welded Joint by High Hardness and Large Specific Gravity Shot Peening, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 21-1 (2003), 73-80. (in Japanese)
 - 4) A. Ohta, O. Watanabe, K. Matsuoka, C. Siga, S. Nishijima, Y. Maeda, N. Suzuki and T. Kubo: Fatigue Strength Improvement of Box Welded Joints by Using Low Transformation Temperature Welding Material, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 18-1 (2000), 141-145. (in Japanese)
 - 5) A. Ohta, K. Matsuoka, N. T. Nguyen, Y. Maeda and N. Suzuki: Fatigue Strength Improvement of Lap Joints of Thin Steel Plates for Automobile Use by Using Low Transformation Temperature Welding Material (Special Issue on Fatigue), Journal of the Society of Materials Science, Japan, 50-10 (2001), 1086-1090. (in Japanese)
 - 6) A. Ohta, N. Suzuki and Y. Maeda: Fatigue Strength of Lap Welded Joints of Thin Steel Plates by Low Transformation Temperature Welding Wire: Variation with Steel Strength, Preprints of the National Meeting of the Japan Welding Society, 70 (2002), 250-251. (in Japanese)
 - 7) D. Radaj: Welding Residual Stresses and Distortion, DVSVerlag, (2003), 332.
 - 8) J. Lu: Handbook of Measurement of Residual Stresses, The Fairmont Press, Inc. (1996), 49.
 - 9) The Society of Materials Science, Japan: Standard Method for X-Ray Stress Measurement, (2005), 5-18. (in Japanese)
 - 10) The Japan Society of Mechanical Engineers: JSME Data Book-Heat Transfer (4th Edition), (1986), 317-319. (in Japanese)
 - 11) F. Matsuda: Influence of an alloy element of the low alloy structural steel exerted on hot cracking of a weld metal, Report of the National Research Institute for Metals, 10 (1967), 335-353. (in Japanese)
 - 12) M. Ohata: Strength of Welded Joint, Journal of the Japan Welding Society, 77-7 (2008), 678-684. (in Japanese)
 - 13) K. Satoh and T. Terasaki: Effect of Transformation Expansion on Welding Residual Stresses Distributions and Welding Deformations, Journal of the Japan Welding Society, 45-7 (1976), 560-566. (in Japanese)
 - 14) T. Kubo, Y. Morikage, K. Amano, A. Ohta, M. Mohri and F. Machida: Fatigue Strength Improvement of Welded Joint by Using Low-temperature Transformation Welding Consumables, Current Advances in Materials and Processes, 13-3 (2000), 423-426. (in Japanese)