

(論文)

薄板の電子ビーム溶接継手における残留応力特性

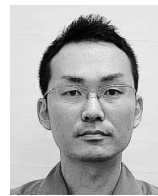
Property of Residual Stress in Electron Beam Weld Joint with Thin Steel Plate



菅 哲男*1
Tetsuo SUGA



河西 龍*1
Ryu KASAI



永井卓也*1
Takuya NAGAI



上野邦香*2
Kunika UENO



進藤 稔*2
Minoru SHINDO



望月正人*3
Masahito MOCHIZUKI

A study has been done on the effects of welding conditions on the residual stress behaviors of the full and partial-penetration weld joints for thin steel plates joined by the electron beam welding process. Residual stresses were measured, and the experimental results were verified with the aid of a thermal elastic-plastic analysis by the finite element method. The experimental results for residual stress were found to be similar to the results of the analysis. It was confirmed that the residual stresses (σ_T and σ_L) in the transverse and longitudinal directions with respect to the weld line shifted to the compression side in the vicinity of the weld toe when the beam power was higher and the beam diameter was smaller. The magnitude of residual stresses at the weld toe was found to correlate with the penetration depth.

まえがき＝溶接部の残留応力は、継手の疲労強度や応力腐食割れなどに大きな影響を及ぼすため、これまで数多くの研究がなされている。電子ビーム溶接の残留応力についても例外ではなく、種々の検討がなされてきている^{1)~5)}。

これまでの電子ビーム溶接の適用は、厚板の貫通溶接に加え、加工費用よりも高品質な溶接が要求される原子力あるいは宇宙関連の部品が対象であった。このため、これまでの電子ビームに関する研究報告は、厚板の完全溶込み溶接で、鋼種もCr-Mo鋼などの特殊鋼に関する事例が多い。

ところが近年の電子ビーム溶接の適用事例を見渡すと、極厚板だけでなく3~15mm程度の部材に適用することも多くなってきている。具体的には、自動車や航空機部品などの重ね継手やインロー形状の突合せ、あるいは部分溶込みなどの溶接に適用されている。一方で、電子ビーム溶接に関しては厚板の残留応力・変形挙動に関する報告はこれまでであるものの^{6), 7)}、薄板の突合せや部分溶込み溶接時の挙動に関してはいまだによく分かっていない。また、ビーム出力、ビーム径を系統立てて研究した事例は見当たらない。

そこで神鋼溶接サービス(株)は、実際には近年適用が増えているものの、いまだに研究事例の少ない「電子ビーム溶接による薄鋼板の突合せならびに部分溶込み溶接」の溶接部における残留応力について調査した。具体的には、ビーム出力・ビーム径といった溶接条件を変えて複数の溶接を行い、温度測定・残留応力測定を行うことによってその温度分布特性・応力特性を調査した。また、測定結果の整理とその妥当性を確認するために、有限要素法解析を実施して両者を比較・検討した。

1. 試験方法

1.1 供試材

板厚9.5×幅50×長さ100mmの軟鋼材(SS400材)を供試材として用いた(図1)。その材料特性は表1のとおりである。供試材の表面状態は黒皮のままであるが、溶接時の不純物混入を避け健全な溶接部を得るために、突合せ開先近傍の表面に対しては金属光沢が出るまで軽度の研磨を行った。また、後述する残留応力測定では電解研磨を実施するため、絶縁物である黒皮を除去する意味で測定位置の研磨もあらかじめ行った。

1.2 溶接方法

三菱電機(株)製6kW電子ビーム溶接機(図2)を用いて突合せ溶接を行った。溶接条件は、ビーム出力、ビーム径に着目し、表2に示す5条件とした。No.1~No.3はビーム出力による差を、No.2, 4, 5はビーム径による差

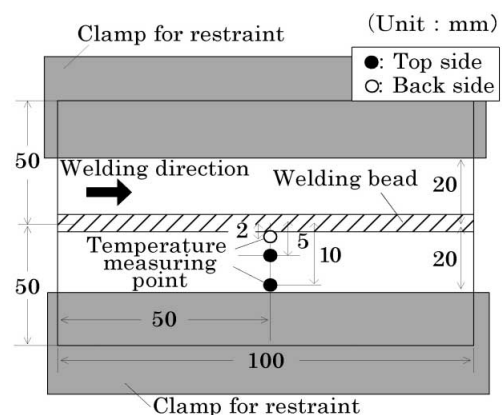


図1 供試材形状および温度測定位置
Fig. 1 Size of test piece and measuring point of temperature

*1 神鋼溶接サービス(株) 技術調査部 *2 東成エレクトロビーム(株) *3 大阪大学 大学院工学研究科

表1 供試材の材料特性

Table 1 Material characteristics of test piece

Chemical component (mass%)				
C	Si	Mn	P	S
0.09	0.23	0.75	0.017	0.007
Mechanical property				
Yield stress (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio (-)		
302	219	0.28		



図2 電子ビーム溶接機

Fig. 2 Device of electron beam welding

表2 溶接条件
Table 2 Welding condition

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Beam power (W)	600	1200	1800	1200	1200
Beam diameter (mm)	0.49	0.49	0.49	1.04	1.53
Welding speed (mm/min)	500				

を検討するための試験である。ここで示したビーム径は理論値であり、 $1/e$ 強度（ピーク値の約37%）までの幅をビーム径とした。また、No.2では焦点を鋼板表面に合わせているが、No.4, 5では焦点距離を鋼板表面からそれぞれ20mm, 40mm鋼板内部側にずらすことでビーム径を変化させた。

また溶接試験は、いずれの条件に対しても2回繰返して実施した。試験板の拘束は板状の拘束板を左右6箇所のクランプで押える方法とし、溶接開始から3分程度後に外した。

1.3 温度の測定方法

溶接時の温度分布を把握するとともに、後述する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を測定した。測定位置は、表面は開先端部から5mmおよび10mmの位置、裏面は開先端部から2mmの位置とした(図1)。測定は、全ての溶接試験体に対して日置電機(株)製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、測定間隔は10プロット/秒とした。

1.4 残留応力の測定方法

残留応力の測定方法としては、応力弛緩法、中性子回折法、磁気ひずみ法、バルクハウゼン法、音弾性法⁸⁾など多種多様に存在する^{9), 10)}。今回はビード止端近傍のごく表面近傍の残留応力を知りたかったことから、X線回折法を選択し、測定器には(株)リガク社製X線応力測定器

(図3)を用いた。

測定方向は、それぞれ溶接線方向(σ_L)および溶接線直角方向(σ_T)の2方向とした。測定位置は、溶接部ビード止端部から0.5~6.5mmまでを1.0mm間隔で計7点とした(図4)。測定径は1.0mmである。また、測定面には全て電解研磨処理(深さ約100 μ m)を行い、表面研磨時の加工ひずみの影響を除去している。残留応力の測定方法は、基本的に日本材料学会のX線応力測定法標準に準拠している^{11), 12)}。

1.5 有限要素法解析

残留応力の検証として、(株)計算力学研究センター製有限要素法溶接熱解析シミュレーションプログラム「Quick Welder」を使用し¹³⁾、一般的な熱弾塑性理論¹⁴⁾に基づいた溶接残留応力解析を行った。解析モデルは、計算時間短縮のため長手方向20mm、左右1/2対称の3次元モデルとした(図5)。ここで、実際の試験体と同じ長手方向100mmのモデルでも解析を行ったが、温度や残留応力などに長手方向20mmのモデルと大きな差がないことを確認している。解析条件は表3ならびに図6に示したとおりとした。拘束条件は、実際の溶接と同じ位置に対して溶接後3分間Z方向(角変形方向)を完全拘束とした。解析時には溶接金属部の面積(体積)を定義する必要があるので、ここでは実試験体の断面マクロ写真を基に決定した。

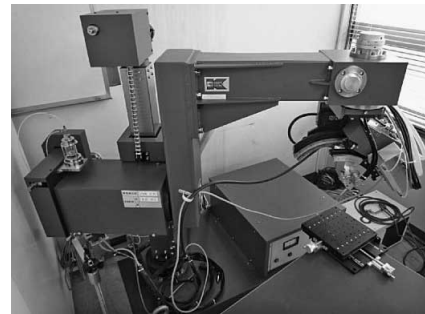


図3 X線残留応力測定装置

Fig. 3 X-ray residual stress analyzer

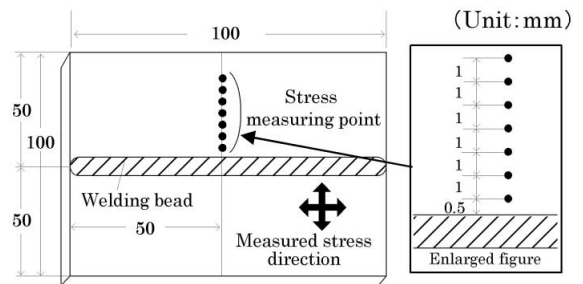


図4 残留応力測定位置

Fig. 4 Measuring point of residual stress

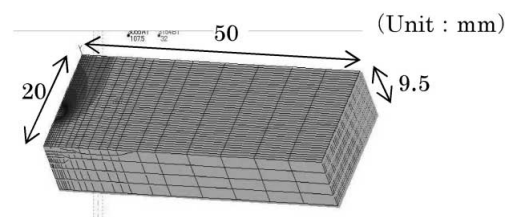


図5 解析モデル

Fig. 5 Analysis model

表3 解析条件
Table 3 Analysis condition

Material data	Density (kg/m ³)	7,800
	Specific heat (J/(kg·K))	468.9 at 0°C, 594.5 at 400°C, 954.6 at 800°C, 644.8 at 900°C, 686.6 at 1,300°C
	Conductivity (W/(m·K))	34.9 at 20°C, 34.9 at 1,500°C, 116.3 at 2000 °C
	Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /°C)	12.2 at 100°C, 13.1 at 300°C, 13.9 at 500°C, 14.9 at 700°C
	Young's modulus (GPa)	205.9 at 0°C, 166.7 at 600°C, 98.1 at 1,000°C 9.807 at 1500°C
	Yield stress (MPa)	294 at 0°C, 294 at 300°C, 98.1 at 600°C, 19.6 at 800°C, 9.8 at 1,500°C
	Poisson's ratio	0.28
	Room temperature (°C)	30
Boundary condition	Atmosphere	Emissivity 0.2 as radiant heat transfer
	Metal touch (W/(m ² ·K))	3,489 as heat transfer coefficient
	Restraint at symmetrical face	Horizontal direction only penetration area
	Restraint	Full restraint in Z direction at same position with welding test until 3 minutes after welding.
Heat source		Heat source is inputted into penetration area which is defined by cross sectional photo.
Efficiency of heat input (%)		70~88
Number of element		About 15,000

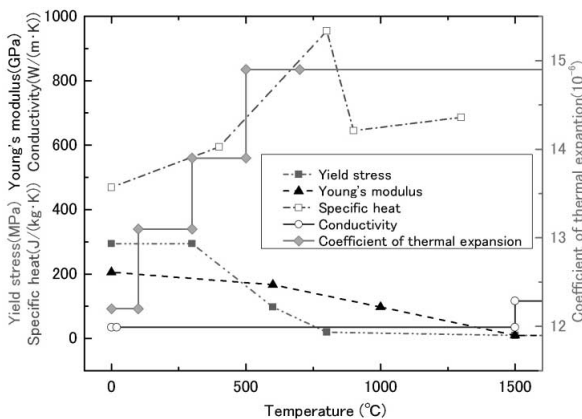


図6 材料定数の温度依存性
Fig. 6 Temperature dependence of material property

2. 結果および考察

2.1 温度測定結果と有限要素法解析結果の比較

実際に電子ビーム溶接を行った溶接部の断面マクロ写真を図7, これらの写真から計測した溶込み深さと表面ビード幅を表4に示す。また, 代表例として溶接条件No.2での温度測定結果を図8(a)に示す。2回の溶接試験に対する温度測定結果は比較的ばらつきも少なく, 良い結果を得ることができたが, 表例5mm位置は最高到達温度に差が生じることがあった。これは, 他の点に比べてビード止端に近いことから温度勾配の急な領域であり, わずかな熱電対の取付け位置の違いで大きな差が生

じたためと考えられる。実際, 溶接後の試験体の熱電対取付け位置を確認すると, ビード止端からの距離のばらつきは最大で0.2mm程度であった。

熱電対で温度を測定した位置に対応する箇所の温度履歴の解析結果例を図8(b)に示す。また, 長手方向中央(10mm)断面における最高到達温度の温度分布図を図9に示す。解析条件(入熱効率や熱源形状)を適宜調整して解析を実行したところ, 実際に測定した3点の温度測定値と解析値が比較的良好一致を示した。

2.2 残留応力測定結果と有限要素法解析結果の比較

溶接線方向中央における残留応力の測定結果および解析結果の比較の一例を図10に, 解析精度を確認するために測定値と解析値の相関をプロットしたものを図11に示す。また, 残留応力の解析結果に及ぼすビーム出力お

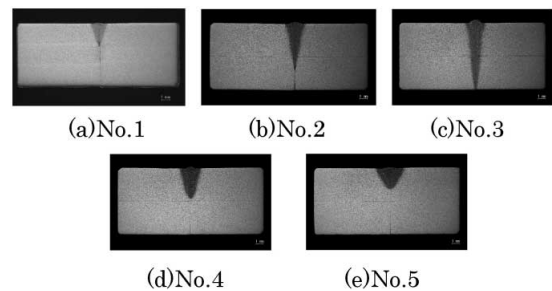


図7 断面マクロ写真(板厚9.5mm)
Fig. 7 Photograph of cross section bead (Thickness 9.5mm)

表4 断面マクロ形状
Table 4 Size of cross section bead (mm)

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Penetration	3.34	7.25	10.0	4.84	3.32
Bead width	1.30	1.62	1.73	2.01	2.77

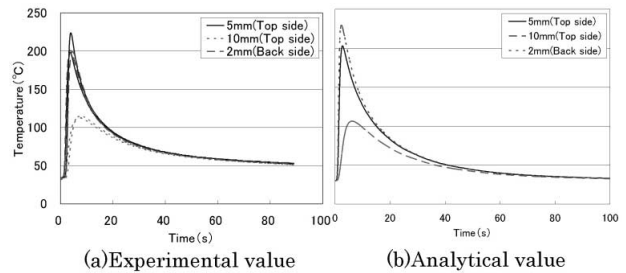


図8 温度の測定と解析例 (No.2)
Fig. 8 Example of experiment and analysis of temperature (No.2)

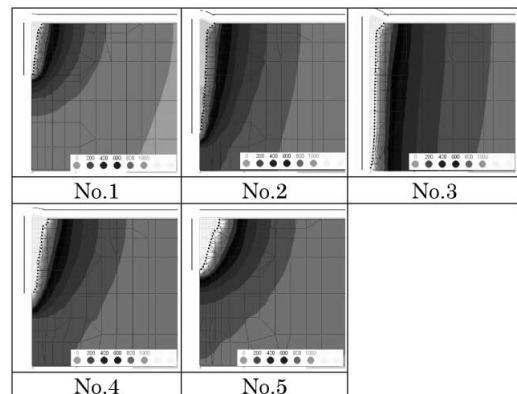


図9 断面の温度分布解析
Fig. 9 Cross sectional distribution of temperature

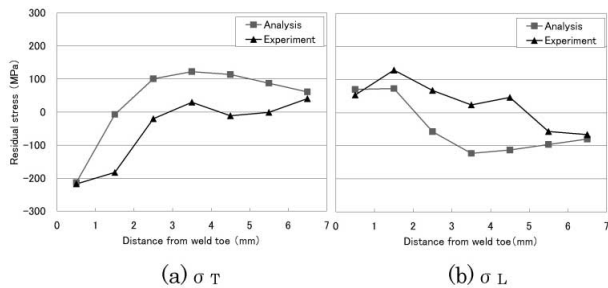


図10 残留応力の測定と解析例 (No.2)

Fig.10 Example of experiment and analysis of residual stress (No.2)

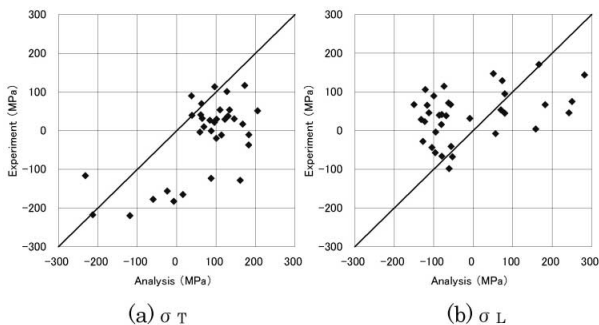


図11 残留応力の測定値と解析値の相関

Fig.11 Interrelationship of experiment and analysis of residual stress

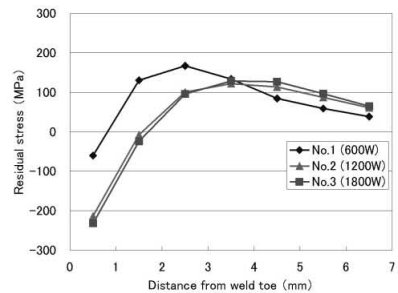
よびビーム径の影響について整理した (図12)。さらに、長手方向中央断面の残留応力分布図をそれぞれ図13、図14に示す。

2.2.1 測定値と解析値の相関

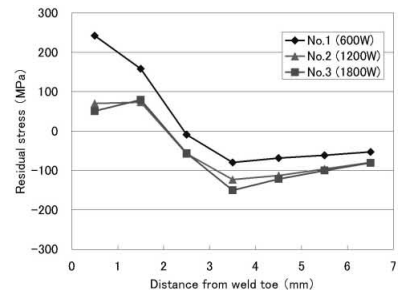
図10によると、測定結果と解析結果では値そのものには差が見られる点はあるものの、その傾向はおおむね良い一致を示している。図11の相関図を見ると、測定値と解析値はばらつきがあるものの大まかな相関は見取れる。また、元々溶接部近傍の X 線応力測定は値がばらつくことが確認されていることから¹²⁾、本解析結果は十分有効であると考えられる。したがって、以降の考察は解析値に対して行う。

2.2.2 溶接線直角方向残留応力

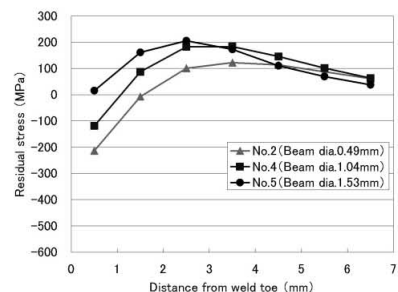
図12 (a), (c) によると、板表面における溶接線直角方向応力 (σ_T) は、いずれの試験体もビード止端近傍では応力は0～圧縮応力である。止端部から離れるほど引張応力側へとシフトし、引張応力の領域で極大値をとる。また、図13を見ると、ビード表面および溶接金属部の溶込み深さ先端部付近には圧縮応力、溶接金属部の溶込み深さ方向の中央付近には最大引張応力が生じる結果となった。これは、厚板の完全溶込み溶接に関する過去の研究、つまり板表裏面に圧縮応力、板厚中央部に引張応力が生じるという知見とよく一致している^{1), 2), 6)}。この応力分布状態は、電子ビーム溶接継手に特有なものである。すなわち、一般的なアークによる多層溶接と異なり、極めてエネルギー密度の高い電子ビームによってごく狭い領域に瞬間的に溶接部を形成するため、そのビード表面は急熱急冷の度合いが激しい。そのため、高温部が力学的溶融温度程度まで冷却した時点では、溶接部の溶込み深さ中央付近に最高温度領域が存在することになる。したがって、溶込み深さ中央付近はビード表面に比



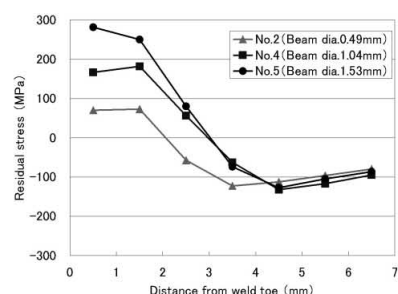
(a) Difference of σ_T between beam power



(b) Difference of σ_L between beam power



(c) Difference of σ_T between beam diameter



(d) Difference of σ_L between beam diameter

図12 残留応力解析結果

Fig.12 Results of residual stress analysis

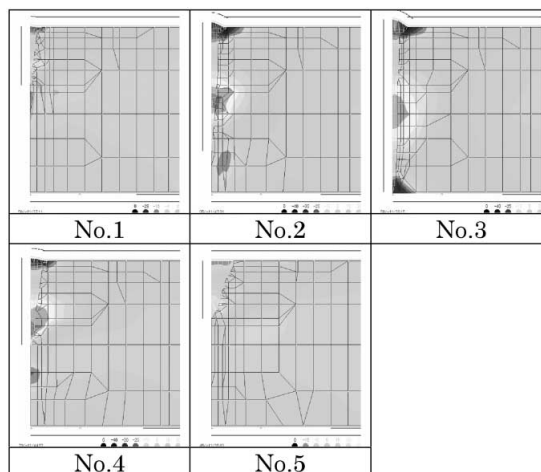


図13 残留応力 σ_T の断面分布

Fig.13 Cross sectional distribution of residual stress σ_T

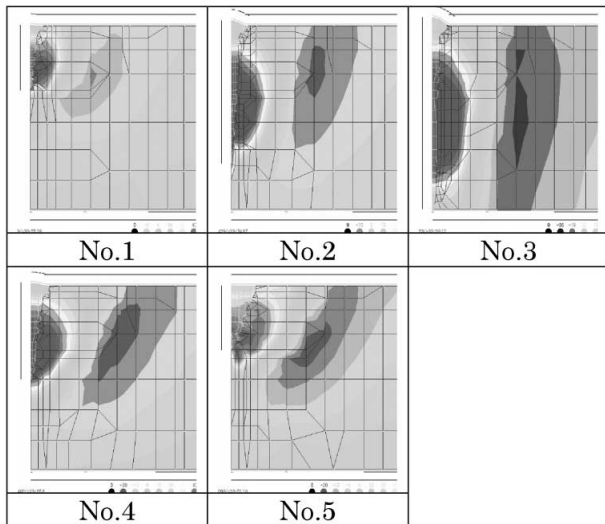


図14 残留応力 σ_L の断面分布

Fig.14 Cross sectional distribution of residual stress σ_L

べて冷却が遅く、収縮が遅れることで引張応力が生じると推察される。また、ビード表面にはその釣合いとして圧縮応力が生じる。過去の研究は厚板の完全溶込み溶接に関するものであることから、板厚方向での温度分布の影響が大きいと、ビード表面の凝固が一番遅くなるような板厚方向の入熱量とその時間依存性を持たせるような計算を行っている⁶⁾。それに対し、今回の薄板の突合せならびに部分溶込み溶接においても厚板の完全溶込み溶接と同様の挙動を示していた。これは、今回は9.5tであったために極厚板と同様の挙動を示すのか、さらに薄い板厚でも同様の挙動を示すのかは今後さらなる実験と検討が必要である。ただ、板厚内部と板表面の温度差がキープポイントであることを考えると、板厚が薄くなるにつれ、板厚内部の冷却速度が遅くなる挙動は薄れていくのではないかと推察する。

つぎに、溶接条件による残留応力の差について考察する。図12 (a), (c) によると、 σ_T は①ビーム出力が大きいほど、②ビーム径が小さいほどその極大値が止端部から離れる傾向にあることが分かる。力の釣合いからいえば、同一直線状の σ_T の総和は0であることから、ビード付近が圧縮応力であれば必ず引張応力の領域も存在する。図13に示した残留応力分布を見ると、ビーム出力が大きくビーム径が小さいほど板厚内部の引張応力の範囲は広くなるのと同様に、ビード表面近傍の圧縮応力も強くその範囲も広がっている。これにより、ビードからある程度距離が離れた箇所では引張応力となる、つまり極大値が止端部から離れる傾向になると考える。

2.2.3 止端部での溶接線直角方向残留応力

ここで、疲労強度に大きく影響を及ぼすビード止端部の σ_T に注目する。電子ビーム溶接部の疲労強度は元々、アーク溶接部よりも高く、必ずしも溶接止端部からき裂が発生するとは限らないことが知られている¹⁵⁾。それは、アーク溶接部に比べて余盛高さが低くてビード幅が狭いため応力集中係数が低いこと、および冷却速度が速いため高硬度になることが要因といわれている。しかし実際の溶接継手においては、溶接条件・継手形状に

よって残留応力の分布や応力集中係数はかなり変化することも考えられ、決して楽観視できない。

図13の解析結果に見られるように、ビーム出力が大きいほど、またビーム径が小さいほど止端部圧縮応力が強くなっている。すなわち、溶込み深さと止端部の σ_T に相関があると推察できる。そこで、解析結果における溶込み深さの板厚比と止端部の σ_T の相関を調べた(図15)。図15によると、溶込み深さが深くなるほど圧縮応力が高くなっていることが分かる。ビーム出力が大きいほど、またビーム径が小さいほど圧縮応力が高くなる理由は、既述の力学的溶融温度時の最高温度領域の存在によって、板厚内部の最大引張残留応力の領域が大きくなり、その反力としてビード表面に強い圧縮残留応力が生じるためであると考えられることができる。

2.2.4 溶接線方向残留応力

図12 (b), (d) によると、板表面における溶接線方向応力(σ_L)はいずれも、ビード止端近傍では引張応力であり、止端部から離れるほど応力が緩やかに下がり、圧縮応力側にシフトする。これは、電子ビーム溶接ではアーク溶接に比べて入熱量が小さく溶融領域が狭いが、溶接線方向に対する溶接金属部の力学的拘束条件はアーク溶接と同様に厳しく、溶接金属およびその周囲の熱影響部には強い引張応力が生じるためである。この測定結果は σ_T と同様に過去の知見とよく一致している^{2), 8)}。解析結果においてもこの傾向を比較的よく再現できているが、図14を見ると、ビード止端近傍には局所的に圧縮応力が生じている。これは、ビードの余盛形状の効果と、電子ビーム溶接継手特有の板厚内部に引張応力のピーク値が存在し、表面側に近づくにつれて応力が緩やかに下がるという残留応力特性を有することから、条件によっては圧縮応力になるためと考えられる。また、最大引張応力が溶込み深さ中央付近にある点は σ_T と同様であり、前述の最高温度領域の移動で説明できる。

つぎに、溶接条件による残留応力の差について考察する。図12 (b), (d) によると、 σ_L は①ビーム出力が大きいほど、②ビーム径が小さいほど全体的に圧縮応力側にシフトしているが、この傾向はいずれの図についても溶込み深さを考えることによって整理できる。すなわち、溶込み深さが深いほど溶接金属部の引張応力の範囲が広

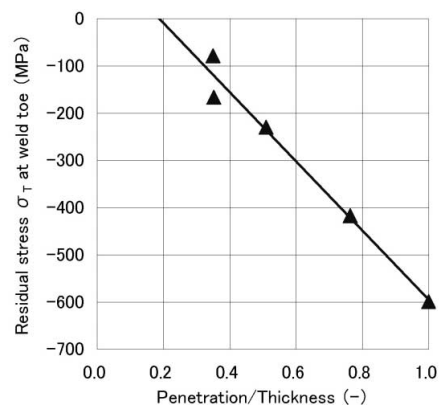


図15 止端部における σ_T と溶込み深さの相関

Fig.15 Correlation between residual stress σ_T and penetration at weld toe

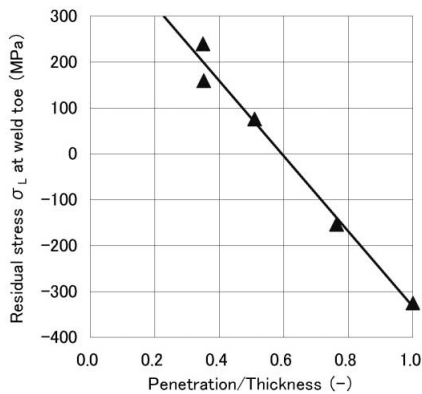


図16 止端部における σ_L と溶込み深さの相関

Fig.16 Correlation between residual stress σ_L and penetration at weld toe

く分散しており、局所的な引張応力のピーク値が抑えられるために止端近傍の引張応力値が低減することになる。図16に溶込み深さの板厚比と止端部の σ_L の相関を示すが、溶込み深さに比例して止端部の応力が低減しているのが分かる。

むすび＝電子ビームによる薄鋼板の突合せならびに部分溶込み溶接を行い、ビーム出力およびビーム径を変化させたときの溶接部近傍の温度および残留応力を測定した。さらに、有限要素法解析による検証を行うことによって以下の結果を得た。

- (1) 有限要素法による温度の解析値は、測定値と同程度の温度になるように入熱効率や熱源形状を調整することによって測定値と良い一致を示した。
- (2) 溶接線直角方向の残留応力 (σ_T) は、ビード止端近傍は圧縮であり、止端部から離れると引張へシフトして極大値をとって圧縮側へ下がるという従来知見と同様の測定結果であり、解析値も良い一致を示した。また、ビード表裏面に圧縮応力、溶込み深さ中心付近に最大の引張応力が生じており、従来厚板の貫通溶接で研究されてきた現象と同様の傾向であった。溶接条件による σ_T の差は、①ビーム出力が大きいほど、また②ビーム径が小さいほどその極大値が止端部から離れる傾向にあることが分かった。これは、板厚内部の引張残留

応力の領域によってビード表面の圧縮応力分布状態が変わるためである。

- (3) 疲労強度に大きく影響を及ぼすビード止端部の σ_T は、ビーム出力が増加するほど、またビーム径が小さいほど圧縮側にシフトすることが把握された。この現象は、溶込み深さの大小に関係することを示した。
- (4) 溶接線方向の残留応力 (σ_L) は、ビード止端近傍では引張応力であり、止端部から離れるほど応力が緩やかに下がり、圧縮応力側にシフトする。溶接条件による σ_L の差は、①ビーム出力が小さいほど、②ビーム径が大きいほど全体的に引張応力側にシフトする。

本稿を作成するにあたり、貴重なご意見・ご助言を頂きました(株)計算力学研究センターの清島 祥一様に心よりお礼を申し上げます。

(本論文は「溶接学会論文集、2012、第30巻、第3号、p.262-273」の抜粋である)

参考文献

- 1) 小木曾克彦. X線材料強度に関する討論会講演論文集. 2004, Vol.41, p.12-16.
- 2) 上田幸雄ほか. 溶接学会論文集. 1986, Vol.4, No.1, p.138-142.
- 3) M. Belassel et al. ASME PVP. 2001, Vol.429, p.9-14.
- 4) Y. Arai et al. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1995, Vol.63, No.3, p.237-248.
- 5) 山本 智ほか. 圧力技術. 1993, Vol.31, No.2, p.74-81.
- 6) 中長啓治ほか. 熱源センターだより. 1998, Vol.14, p.34-35.
- 7) 益本 功ほか. 溶接学会論文集. 1983, Vol.1, No.2, p.165-169.
- 8) Tsung-Tsong Wu et al. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. 1993, Vol.14, No.2, p.113-119.
- 9) D. Radaj DVS-Verlag. 2003, 332p.
- 10) J. Lu. Handbook of Measurement of Residual Stresses. The Fairmont Press, Inc., 1996, 238p.
- 11) The Society of Materials Science, Japan. Standard Method for X-Ray Stress Measurement. 2005, 19p.
- 12) M. Mochizuki et al. Round Robin Tests of Weld Residual Stress using X-Ray Diffraction and Computational Simulation, IHW Doc.X-1661-09. 2009.
- 13) 奥本泰久ほか. 近畿大学工学部研究報告. 2003, Vol.37, p.145-150.
- 14) 望月正人. 京都大学博士論文. 1997.
- 15) 寺崎俊夫ほか. 溶接学会論文集. 1985, Vol.3, No.4, p.851-856.