裏当てを有する突合せ溶接継手における溶接パラメータと溶接変形の統計的性質*

—溶接変形の統計学的取り扱い (第2報)—

吹田 義一**, 猪熊 力也***, 松本 一輝****, 香川 清和*****, 鰐坂 剛毅*****,
中柄 清行*****, 尾崎 静人*****, 山下 雅弘*****, 石原 弘一****

Statistical Properties of Welding Parameters and Deformations in Butt Welding Joint with Backing Plate*

—Statistical Treatment of Welding Deformations (Report 2)—

by SUITA Yoshikazu**, INOKUMA Rikiya***, MATSUMOTO Kazuteru****, KAGAWA Kiyokazu*****,
AJISAKSA Gouki*****, NAKAGARA Kiyoyuki*****, OZAKI Shizuhito*****,
YAMASHITA Masahiro***** and ISHIHARA Hirokazu****

Welding deformation is complexly affected by different factors, and that is predicted to depend on the skills of welding operatives, being affected by welding parameters such as the welding current, arc voltage and welding speed. It is therefore desirable to treat welding deformations statically. This paper describes an investigation into the statistical properties of the welding parameters, transverse shrinkage and angular distortion when welding operatives having specified skills are engaged in semi-automatic MAG welding of butt welding joint with backing plate. The results obtained may be summarized as follows.

- (1) The distribution characteristics of the welding heat input, product of welding current and voltage, and the reciprocal of welding speed are clarified, besides and they conform to a normal distribution.
- (2) The distribution characteristics of the transverse shrinkage and angular distortion have been made clear. And they conform to a normal distribution are clarified.
- (3) 95% confidential interval of mean value and standard deviation of population in the transverse shrinkage and angular distortion when welding operatives obtaining license SN-2F in JIS Z 3841 are engaged in semi-automatic MAG welding of butt welding joint with backing plate are estimated.

Key Words: butt welding joint, backing plate, welding deformation, transverse shrinkage, angular distortion, MAG, statistical treatment

1. 結 論

溶接を行うと加熱中の膨張による塑性変形および冷却中の収縮による塑性変形によって溶接後に変形を生じる。この溶接変形は製品の外観を損なうばかりでなく、構造物の性能にも悪影響を与える。そのために、溶接変形の矯正が

必要になるが、その矯正には多大な時間と労力を必要とするので溶接変形の効果的な抑制・防止対策¹⁾が必要になる。

溶接構造要素の溶接変形は、溶接法、溶接入熱、開先寸法形状など溶接熱に関係する要因、母材寸法、外的拘束、溶接順序など拘束に関係する要因及び材質(材料定数)、降伏応力など材料に関係する要因²⁾などの影響を複雑に受ける。したがって、材質や寸法また溶接法が異なれば溶接変形も当然異なるが、材質や寸法が同じものを同じ溶接法で溶接しても交流アーク溶接や半自動アーク溶接のように人手による溶接では溶接作業者が異なると溶接電流、アーク電圧、溶接速度などの溶接パラメータが異なるので溶接変形も変動すると予想される。そのために、効果的な溶接変形防止対策を行うには溶接パラメータと溶接変形の統計的な性質を理解しておくことが必要である。前報³⁾ではT型すみ肉溶接継手フランジの横曲り変形、横収縮の統計的性質を調査した。

本報では、基本的な溶接継手である裏当てを有する軟鋼

*原稿受付 平成12年12月25日 平成12年3月第5回国地区材料関連学会支部・研究会連合講演会で発表

**正 員 高松工業高等専門学校 Member, Takamatsu National College of Technology

***学 生 員 高松工業高等専門学校 Student Member, Takamatsu National College of Technology

**** 高松工業高等専門学校 Takamatsu National College of Technology

*****正 員 ㈱タダノ Member, TADANO Ltd.

***** ㈱タダノ TADANO Ltd.

*****正 員 香川県産業技術センター Member, KAGAWA Prefectural Industrial Technology Center

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of material used.

h (mm)	Chemical composition (mass %)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	EL. (%)
6	0.12	0.02	1.08	0.016	0.002	296	436	33
9	0.13	0.20	0.90	0.013	0.003	327	454	28
12	0.13	0.20	0.90	0.013	0.003	306	433	30

h : Plate thickness, Y. S. : Yield stress, T. S. : Tensile strength,
EL. : Elongation (GL.=50mm)

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of deposited metal.

Chemical composition (mass %)					Mechanical properties		
C	Si	Mn	P	S	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	EL. (%)
0.05	0.35	0.85	0.011	0.005	480	540	33

Y. S. : Yield stress, T. S. : Tensile strength, EL. : Elongation (GL.=50mm)

unit : mm

Fig. 1 Configuration of butt joint and tack welding locations.

の平板突合せ継手を半自動 MAG 溶接したときの溶接パラメータと溶接変形の統計的性質を対象にして調査を行った。溶接パラメータは溶接入熱量、溶接速度などを、また溶接変形は面内変形の横収縮及び面外変形の横曲り変形について調査した。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材には市販の SS 400 鋼の板厚 6, 9 及び 12 mm の 3 種類を用いた。各板厚とも、開先角度 60° の V 型開先 (機械加工)、ルート間隔 3 mm の裏当て材を有する突合せ溶接継手とした。Table 1 に供試材の化学成分・機械的性質を示した。また、溶接ワイヤは YGW-15 (JIS Z 3312) の 490 MPa 級、 $\phi 1.2$ のものを使用した。Table 2 に溶接ワイヤの化学成分・機械的性質を示した。シールドガスには

Ar 80%+CO₂ 20% の混合ガスを使用した。Fig. 1 に試験材の寸法形状、開先形状及び仮付け溶接位置を示した。裏当て材と母材は母材裏面で 6 カ所、始末端で 4 カ所を仮付け溶接した。

2.2 実験方法

溶接実験は JIS Z 3841 半自動溶接技術検定の中板下向き試験 (SN-2 F) 合格者から溶接作業者を無作為に 15 名選出し、半自動 MAG 溶接法で突合せ溶接した。次に述べる溶接作業条件で溶接実験を実施した。各作業者は同じ溶接機 (インバータ溶接機) を使用し、溶接電流、アーク電圧、溶接速度は各自の実作業を基に設定するように指示した。また、ガス流量は 20 l/min 一定とした。各作業者は板厚 h=6, 9 及び 12 mm の 3 種類の試験材について溶接を行い、h=6 mm を 1 層 1 パス、h=9 mm を 2 層 2 パス、h=12 mm を 3 層 3 パスで溶接を行うように指示した。溶接に際しては、外的拘束は行わず前進溶接とし、溶接開始

点、終了点は開先内で処理し、多層溶接においては試験材の表面温度が250℃以下で次のパスの溶接を行うこととした。また、溶接終了位置ではクレータ処理を行った。

各試験材について各パスの溶接電流 A (A), アーク電圧 V (V) を専用の計測器で測定し、溶接時間をストップウォッチで計測した。溶接後、試験材が完全に室温になった後、横収縮 S (mm) と横曲り変形 δ (rad.) を測定した。Fig. 2 に横収縮 S , 横曲り変形 δ の測定位置を示す。横収縮 S は Fig. 2 (a) に示した測定位置 (溶接線中央の表裏面) で標点間距離 100 mm をとり、溶接前と溶接後の表裏面の変化量を遊動顕微鏡で測定し、その平均値をとった。横曲り変形 δ は、Fig. 2 (b) に示した測定位置 I, II, III の3カ所の変化量 H をそれぞれダイヤルゲージで測定して図中の式で算出した。

Fig. 2 Measuring points of transverse shrinkage and angular distortion.
(a) Transverse shrinkage S .
(b) Angular distortion δ .

3. 実験結果と考察

3.1 溶接パラメータの統計的性質

3.1.1 溶接入熱量の分布特性

半自動溶接では、溶接作業者が異なれば同じ材質、板厚のものを溶接しても溶接電流、アーク電圧、溶接速度が異なり、それによっても溶接入熱量も異なる。従って、溶接入熱量が異なれば溶接変形も変動すると当然考えられる。そのため、溶接入熱量及び溶接電流、アーク電圧、溶接速度などの溶接パラメータの分布特性を理解しておく必要がある。

Fig. 3 は、板厚 6, 9 及び 12 mm の各板厚ごとに各作業者による単位溶接長あたりの溶接入熱量 Q を正規確率紙に累積確率率を $F_i = (i - 0.5)/n$ で評価⁴⁾し、プロットしたものである。ここで、 i はデータを値の小さい順に並べたときの順位数、 n はデータの総数 (標本数) である。また、下添え字の μ は平均値 (標本平均値)、 σ は標準偏差 (標本標準偏差)、 CV は変動係数 (標本変動係数) を示している。溶接入熱量 Q は、単位溶接長あたりの溶接入熱量 $Q = A \cdot V/v$ (kJ/cm) で算出した。ここで、 A は溶接電流 (A), V はアーク電圧 (V), v は溶接速度 (cm/s) である。なお、溶接速度 v は計測した溶接時間 T (sec) より算出した。また、実際の熱効率⁵⁾は、溶接条件によって複雑に変化するために本論文では便宜的に熱効率 $\eta = 1$ とした。Fig. 3 の結果によると、各板厚に対する溶接入熱量の分布が直線で近似できることから溶接入熱量の分布は正規分布していることが分かる。前報³⁾と同様に溶接経験年数と溶接入熱量の関係を調査したが、どの板厚においても溶接経験年数による差は認められなかった。また、Fig. 4 は板厚 h と溶接

Fig. 3 Distributions of welding heat input for each plate thickness (normal probability paper).

Fig. 4 Relations between plate thickness and average welding heat input and its standard deviation.

Fig. 5 Distributions of welding heat input for each layer with plate thickness 12 mm (normal probability paper).

入熱量の平均値 Q_μ とその標準偏差 Q_σ の関係を示したものである。Fig. 3, Fig. 4 によると、溶接入熱量の平均値 Q_μ と標準偏差 Q_σ は板厚 h の増加とともに増大し、板厚 h との関係は二次曲線で近似できる。これは、開先を埋めるのに必要な溶接金属質量が板厚 h のほぼ二乗に依存するためと考えられる。溶接入熱量の変動係数 Q_{cv} は板厚 $h=6$ mm で 16.8%, $h=9, 12$ mm で 9.5%, 7.7% であり、板厚が大きくなるに従い溶接入熱量の変動係数は減少している。このことは板厚が大きくなり溶接入熱量が増大するほど溶接入熱量のバラツキは相対的に少なくなることを示している。

板厚 12 mm は 3 層 3 パス溶接であるが、各層ごとの溶接入熱量の分布特性を調べた。Fig. 5 にその結果を示したが、各層の溶接入熱量の分布は正規分布に従っており、溶接入熱量の平均値 Q_μ は高次の層ほど増大していることが

Fig. 6 Distributions of product of welding current and arc voltage for each plate thickness (normal probability paper).

Fig. 7 Distributions of product of welding current and arc voltage for each layer with plate thickness 12 mm (normal probability paper).

分かる。すなわち、3 層程度の V 開先多層溶接では溶接作業者は高次の層ほど溶接入熱量を増す傾向のあることが分かる。また、溶接入熱量の標準偏差 Q_σ 及び変動係数 Q_{cv} は高次の層ほど減少している。

3.1.2 溶接電流とアーク電圧の積及び溶接速度の逆数の分布特性

次に、溶接電流とアーク電圧の積 ($A \times V$) 値と溶接速度の逆数 ($1/v$) 値の分布特性を調べた。Fig. 6 は板厚 6, 9 及び 12 mm の各層平均の ($A \times V$) 値、Fig. 7 は板厚 12 mm における各層での ($A \times V$) 値の分布特性をそれぞれ示した。溶接電流とアーク電圧の積 ($A \times V$) 値の分布は Fig. 6, 7 から分かるように、いずれの場合も直線で近似できほぼ同じ正規分布に従っている。すなわち、溶接電流とアーク電圧の積 ($A \times V$) 値は平均値 $(A \times V)_\mu$ 、標準偏差 $(A \times V)_\sigma$

Fig. 8 Distributions of reciprocal of welding speed (normal probability paper).

Fig. 10 Relations between plate thickness and average transverse shrinkage, its standard deviation.

Fig. 9 Distributions of transverse shrinkage for each plate thickness (normal probability paper).

及び変動係数 $(A \times V)_{cv}$ とともに板厚、層に関係なくほとんど同じ値を示している。一方、Fig. 8 は板厚 12 mm の各層での溶接速度の逆数 $(1/v)$ 値の分布特性である。Fig. 8 から分かるように溶接速度の逆数 $(1/v)$ 値の分布も正規分布に従い、高次の層の溶接ほど溶接速度の逆数の平均値 $(1/v)_\mu$ は増加している。Fig. 6, 7 及び Fig. 8 の結果から、溶接作業者は平板の突合せ溶接においては溶接電流とアーク電圧はほとんど変化させずに溶接速度を変化させて必要な溶接入熱量及び溶接金属量を確保しようとする傾向のあることが分かる。

3.2 溶接変形の統計的性質

3.2.1 横収縮の分布特性

横収縮の測定値を板厚 6, 9 及び 12 mm ごとに正規確率紙にプロットしたものを Fig. 9 に示す。横収縮の分布は直

線で近似できることから正規分布に従っていることが分かる。Fig. 10 は板厚 h と横収縮の平均値 S_μ とその標準偏差 S_σ の関係である。Fig. 9, 10 から分かるように、板厚 6~12 mm の裏当てを有する V 開先突合せ溶接継手では、板厚 h の増加とともに横収縮の平均値 S_μ は比例して増大するが、標準偏差 S_σ はほぼ一定値を示す。Fig. 10 を使用することによって、板厚 h の与えられたルート間隔 3 mm で裏当てを有する V 開先突合せ溶接継手の横収縮の平均値、標準偏差及び累積確率を推定することができる。

Fig. 9 の横収縮の平均値及び標準偏差は JIS Z 3841 半自動溶接技術検定の中板下向き試験 (SN-2 F) 合格者から無作為に 15 名選出して求めた標本数 15 の標本平均値、標本標準偏差であり、全国の JIS Z 3841 の SN-2 F 合格者全員による平均値及び標準偏差が同じ値になるとは限らない。そこで、以下に述べるようにして全国の SN-2 F 合格者が溶接した場合の横収縮の統計的性質を推定した。全国の JIS Z 3841 の SN-2 F 合格者が各作業者とも同じ溶接機を使用し、2 節で述べたような溶接作業条件で Fig. 1 の裏当てを有する V 開先突合せ溶接を行った場合の横収縮を母集団とし、その母平均値及び母標準偏差の推定を試みた。Fig. 9 の結果より、母集団は正規分布に従っているとみなせるので、実験で得られた標本数 15 の標本平均値、標本標準偏差から各板厚の横収縮の母平均値及び母標準偏差の 95% 信頼区間を推定⁵⁾した。Table 3 は各板厚における横収縮の母平均値及び母標準偏差の推定結果である。JIS Z 3841 の SN-2 F 合格者が 2 節で述べたような溶接作業条件で Fig. 1 の裏当てを有する V 開先突合せ溶接を行うと 95% の信頼度で Table 3 の横収縮を生じると推定できる。

3.2.2 横曲り変形の分布特性

板厚 6, 9 及び 12 mm の横曲り変形を測定位置 I, II, III の 3 カ所について測定したところ各板厚とも 3 カ所の横曲

Table 3 Interval estimation of transverse shrinkage (95% confidential interval).

h (mm)	Mean value (mm)	Standard deviation (mm)
6	-0.21 ± 0.14	$0.18 < \sigma_0 < 0.38$
9	-0.70 ± 0.11	$0.14 < \sigma_0 < 0.30$
12	-1.28 ± 0.13	$0.16 < \sigma_0 < 0.35$

 σ_0 : Standard deviation of population

Fig. 11 Distribution of angular distortion for each plate thickness (normal probability paper).

Fig. 12 Relations between plate thickness and average angular distortion, its standard deviation.

Table 4 Internal estimation of angular distortion (95% confidential interval).

h (mm)	Mean value ($\times 10^{-2} \text{rad.}$)	Standard deviation ($\times 10^{-2} \text{rad.}$)
6	5.65 ± 0.43	$0.55 < \sigma_0 < 1.18$
9	6.68 ± 0.25	$0.31 < \sigma_0 < 0.68$
12	7.80 ± 0.22	$0.29 < \sigma_0 < 0.61$

 σ_0 : Standard deviation of population

り変形の平均値 δ_μ 、標準偏差 δ_σ 、変動係数 δ_{cv} ともにほぼ同じ値を示した。この結果から、以下の横曲り変形の値は各板厚とも 3 カ所の測定位置で求められた測定値の平均値とする。Fig. 11 は、横曲り変形の分布を板厚 6, 9 及び 12 mm ごとに正規確率紙にプロットしたものである。横曲り変形の分布もほとんど直線であり、正規分布で近似できることが分かる。板厚 h と横曲り変形の平均値 δ_μ 及びその標準偏差 δ_σ の関係を Fig. 12 に示した。Fig. 11 から分かるように、横曲り変形の平均値 δ_μ は板厚 h の増加に従い比例的に増大し、標準偏差 δ_σ は板厚 h が増加するとともに減少していることが理解できる。従って、横曲り変形のバラツキは板厚が大きくなるほど相対的に減少していることが分かる。Fig. 12 を使用すれば、板厚 h のときの横曲り変形の平均値、標準偏差及び累積確率を推定できる。

横収縮の場合と同様な考えで横曲り変形の母平均値及び母標準偏差の推定を行った。Fig. 11 に示した結果から、横曲り変形の母集団も正規分布に従っているとみなせるので、横曲り変形の母平均値及び母標準偏差の信頼度 95% の区間推定を行った結果を Table 4 に示す。Fig. 1 の裏当てを有する V 開先突合せ継手を JIS Z 3841 の SN-2 F 合格者が 2 節における溶接作業条件で溶接を行うと 95% の信頼度で Table 4 の横曲り変形を生じると推定できる。

4. 結 論

裏当てを有する軟鋼の平板突合せ継手を所定の溶接技量を持つ溶接作業者が、半自動 MAG 溶接で溶接したときの溶接パラメータ及び溶接変形の統計的性質を調査し、次の

ことを明らかにした。

- 1) 溶接入熱量及び溶接電流とアーク電圧の積、溶接速度の逆数の分布特性とそれらが正規分布に従うことを明らかにした。
- 2) 横収縮、横曲り変形は正規分布に従うことを明らかにした。また、横収縮及び横曲り変形の統計的分布特性を明らかにした。
- 3) JIS Z 3841 の SN-2 F 合格者が溶接を行ったときの横収縮及び横曲り変形の母平均値、母標準偏差の 95%信頼区間を明らかにした。

謝 辞

溶接パラメータと溶接変形の統計的性質を調査する予備

実験を実施する際に御協力を頂いた高松工業高等専門学校
佃芳行技術専門職員のご厚意に対して御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 上田, 藤本: 溶接変形・残留応力〈溶接全書〉3, 産報出版株式会社 (1979).
- 2) 溶接学会編: 溶接・接合工学の基礎, 丸善株式会社 (1993).
- 3) 香川, 中柄, 山本, 赤沢, 吹田, 岡田, 楠城: すみ肉溶接継手フランジの溶接変形の統計的性質—溶接変形の統計的取り扱い (第1報)—, 溶接学会論文集, 第17巻, 第1号, p.86-93 (1999).
- 4) 材料強度確率モデル研究会 (代表者 酒井): 材料強度の統計的性質, 養賢堂 (1992).
- 5) 添田, 太田, 大松: 数理統計の基礎と応用, 日新出版 (1980).