裏当てを有する突合せ溶接継手における溶接ビードの統計的性質*

吹田 義一**, 猪熊 力也***, 香川 清和****, 鯨坂 剛毅*****, 中柄 清行****, 尾崎 静人****,
山下 雅弘*****

Statistical Properties of Welding Bead in Butt Welding Joint with Backing Plate*

by SUITA Yoshikazu**, INOKUMA Rikiya***, KAGAWA Kiyokazu****, AJISAKA Gouki*****,
NAKAGARA Kiyoyuki****, OZAKI Shizuhito**** and YAMASHITA Masahiro*****

The sizes of bead and weld bead appearance of weldments are expected to depend on the skills of welder operating such as semi-automatic welding machine. The visual examination is probably the one most widely used to evaluate the skills of welding operatives. The visual examination can appropriately judge the weld bead appearance, but this examination has the problems such as objectivity and unevenness of evaluate by differences among individuals. It is therefore desirable to understand the statistical properties of bead sizes such as bead width, bead height and bead appearance. This paper describes the statistical properties of sizes of bead width and bead height in butt welding joints with backing plates which are welded by welding operators having the specified welding skills using the semi-automatic MAG welding machine. The results obtained may be summarized as follows:

- (1) The distribution properties of mean bead width, maximum bead width and maximum difference in bead width are clarified, and they conform to a normal distribution.
- (2) The distributions of mean bead height, maximum bead height and maximum difference in bead height are made clear and also they adjust to a normal distribution.
- (3) 95% confidential intervals of mean value of populations such as mean bead width, and mean bead height in butt welding joints with backing plate welded by welding operatives having the license SN-2F (JIS Z3841) using MAG welding machine.

Key Words: Butt welding joint, Weld bead appearance, Bead width, Bead height, MAG, Statistical treatment, Normal distribution

1. 緒 論

溶接構造物において溶接部の形状不良やビード外観の不良などは構造物の性能・品質に悪影響を及ぼす溶接欠陥である。アングカット、オーバーラップ、溶け込み不足及び余盛の過不足などの溶接部の形状不良は強度などに影響を与える。ビード幅の不揃い、ビードの波の不揃いなどのビード外観の不良は溶接部の強さにはあまり影響しないが、品質を低下させ、また美観を損なうため溶接欠陥とみなされる。これらの溶接部の形状やビード外観は溶接作業者の技量と大きく関係するので溶接作業者の技量評価には外観試

験も行われている。外観試験ではビード幅、ビード高さなど多くの項目について種々の評価¹⁾が行われている。溶接部の外観試験は目視感覚(目測)でもある程度までの妥当な判断が可能であるが客観性や個人差による評価のバラツキ等の問題点もある。したがって、客観性をもたせある程度定量的に評価するには先に述べたような溶接部の形状及びビード外観の統計的な性質を理解しておくことも重要になる。

そこで、本研究では所定の技量を持つ溶接作業者が基本的な溶接継手である裏当てを有する軟鋼平板の突合せ溶接継手を溶接したときのビード幅、ビード高さなど溶接ビードの統計的な性質を調査することを目的とした。また、アングカット、オーバーラップ、溶け込み不足などの溶接部の形状不良はほとんど見当たらなかったため今回は取り扱わないことにした。

2. 実験方法

2.1 試験体及び溶接材料

溶接実験には市販のSS4000鋼板の板厚6, 9及び12

*原稿受付 平成13年4月23日 平成13年3月第6回四国地区材料関連学協会支部・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

****正 員 (株)タダノ Member, TADANO Ltd.

***** (株)タダノ Non Member, TADANO Ltd.

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

unit : mm

Fig. 1 Configuration of butt joint with backing plate and tack welding locations.

mm の 3 種類を供試材として使用した。試験体は、各板厚とも開先角度 60° の V 型開先 (機械加工) でルート面 2 mm, 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。Fig. 1 に試験体の寸法形状, 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 Fig. 1 に示すように母材裏面で 6 ケ所, 始末端で 4 ケ所を仮付け溶接した。また, 溶接ワイヤは JIS Z 3312 に規定する YGW-15 に適合する $\phi 1.2$ のものを使用し, シールドガスには Ar 80% + CO₂ 20% の混合ガスを使用した。

2.2 溶接実験方法

一定以上の技量を持つ技能者の基本技量の統計的性質を調査するために溶接作業者は JIS Z 3841 半自動溶接技術検定の中板下向き試験 (SN-2F) 合格者から無作為に 15 名選出した。溶接実験は各作業者とも同じ溶接機を使用し, 半自動 MAG 溶接法で突合せ溶接を行った。また, 次に述べる溶接作業条件で実施した。

- ① 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。また, ガス流量は 20 l/min 一定とする。
- ② 各作業者は板厚 $h=6, 9$ 及び 12 mm の 3 種類の試験体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。
- ③ 溶接は前進溶接とし, 溶接開始点, 終了点は開先内で処理する。また, 溶接部終端ではクレータの処理を行う。

2.3 測定方法

溶接後, 試験体表面のビード幅 (余盛幅), ビード高さ (余盛高さ) について測定を行った。ビード幅は板厚 6, 9 及び 12 mm の各試験体について, ①試験体の中央の位置 I と始端部・終端部から 30 mm の位置 II, III の 3 ケ所のビード幅を測定して平均した平均ビード幅 W_{mean} , ②始端部・終端部の両端 15 mm を除く中間部 170 mm の範囲における

unit: mm

(a) In case of partially wide bead.

unit: mm

(b) In case of winding bead.

Fig. 2 Measuring points of bead width.

最大ビード幅 $W_{\max}$, ③始端部・終端部の両端15 mm を除く中間部170 mm の範囲における最大ビード幅 $W_{\max}$ と最小ビード幅 $W_{\min}$ の差であるビード幅最大差 ΔW の3項目の測定を行った。それぞれの測定位置及び定義を Fig. 2 に示した。最大ビード幅 $W_{\max}$ は最終層を形成する最大ビード幅のことで局部的な幅広ビード Fig. 2(a) や曲がり及び蛇行 Fig. 2(b) 等も含む。ビード幅の測定は各測定箇所ともノギスで行った。

ビード高さも板厚 6, 9 及び 12 mm の各試験体について、①試験体の中央の位置 I と始端部・終端部から 30 mm の位置 II, III の3ヶ所のビード高さを測定し、平均した平均ビード高さ H_{mean} , ②始端部・終端部の両端15 mm を除く中間部170 mm の範囲における最大ビード高さ $H_{\max}$, ③始端部・終端部の両端15 mm を除く中間部170 mm の範囲における最大ビード高さ $H_{\max}$ と最小ビード高さ $H_{\min}$ の差であるビード高さ最大差 ΔH の3項目の測定を行った。Fig. 3 にビード高さの測定位置及び定義を示した。ビード高さは各測定箇所とも試験体表面からの高さを溶接ゲージで測定した。

Fig. 3 Measuring points of bead height.

3. 実験結果と考察

3.1 ルート間隔の分布特性

実験に使用した試験体は板厚 6, 9 及び 12 mm の SS400 鋼板を各板厚ともルート間隔を 3 mm で仮付けした Fig. 1 の V 型開先の裏当て材を有する突合せ溶接継手である。実際に仮付けした試験体のルート間隔は多少のバラツキがあり、溶接ビードにはそのバラツキによる誤差が含まれることが予想される。そこで、溶接ビード寸法の統計的性質を調査するに先立ち、仮付けした各板厚の試験体におけるルート間隔の測定を行い、その分布特性を調べた。

Fig. 4 は各板厚における試験体のルート間隔を累積確率 $F_i = (i - 0.5) / n$ で評価²⁾して正規確率紙に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 はデータの総数である。また、ルート間隔の値は Fig. 1 に示した試験体の始端・終端及び中央の3ヶ所の測定値の平均とした。正規確率紙においてデータが直線にのれば母集団は正規分布に従っていると判断される。Fig. 4 より、ルート間隔の分布は各板厚ともにほぼ直線上に並ぶので正規分布にしたがっていることが分かる。また、図中の下添え字の μ は平均値、 σ は標準偏差、CV は変動係数 ($CV = \sigma / \mu$) を示しており、実験範囲の板厚ではこれらの値に大きな違いは認められない。すなわち仮付け精度はこの板厚範囲ではほぼ同じであることを示している。後ほど論じるビード幅、ビード高さ及び溶接金属質量の分布にはルート間隔のバラツキによる誤差が図に示した程度含まれることになる。

3.2 ビード幅の分布特性

溶接ビードの統計的な性質として、まずビード幅の統計

Fig. 4 Distributions of root gap (normal probability paper).

的性質について述べる。Fig. 5は平均ビード幅 W_{mean} を各板厚ごとに正規確率紙にプロットしたものである。平均ビード幅 W_{mean} は正規確率紙において各板厚とも直線上に分布していることから正規分布に従っていることが分かる。図中に示すように平均ビード幅 W_{mean} の標準偏差は板厚 $h=6\text{ mm}$ で1.11 mm, $h=9\text{ mm}$ で1.33 mm, $h=12\text{ mm}$ で0.81 mmであり、また相対的なバラツキを表す変動係数は板厚 $h=6\text{ mm}$ で8.5%, $h=9, 12\text{ mm}$ で8.5%, 4.3%と各板厚とも小さく各溶接作業業者によるバラツキは少ないことが理解できる。

次に、最大ビード幅 W_{max} を各板厚ごとに正規確率紙にプロットしたものを Fig. 6に示す。最大ビード幅 W_{max} は2.3節で定義したように最終層を形成する最大ビード幅のことで局部的な幅広ビードや曲がり及び蛇行等も含む。また、溶接ビード始端部や終端部は溶接を開先内で処理する

Fig. 5 Distributions of mean bead width for each plate thickness (normal probability paper).

Fig. 6 Distributions of maximum bead width for each plate thickness (normal probability paper).

ことやクレータ処理を行うように指示したことなどからビード幅のバラツキが大きいので両端15 mmを除く中間部170 mmの範囲における最大ビード幅 W_{max} を対象にした。最大ビード幅 W_{max} の分布も各板厚とも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。当然のことながら、最大ビード幅 W_{max} の平均値は平均ビード幅 W_{mean} の平均値より各板厚とも大きい値を示した。また標準偏差、変動係数も最大ビード幅 W_{max} の分布の方が平均ビード幅 W_{mean} の分布よりわずかに大きい値を示した。

また、ビード幅の不均一性（ビード幅の不揃い）を調べるため、溶接ビードの始端部・終端部の両端15 mmを除く中間部170 mmの範囲におけるビード幅最大差 ΔW ($=W_{\text{max}}-W_{\text{min}}$)を測定し、その分布を正規確率紙にプロットした。Fig. 7に各板厚におけるビード幅最大差 ΔW の分布を示す。Fig. 7より、 ΔW の分布も各板厚とも直線で近似でき正規分布に近似できることが分かる。また、 ΔW の分布は板厚6, 9及び12 mmともほぼ同じ直線上に従っており、各板厚の平均値 ΔW_{μ} 及び標準偏差 ΔW_{σ} もほとんど同じ値を示している。つまり、 ΔW の分布は板厚6~12 mmの範囲ではほとんど変わらず同じ程度であることが理解できる。しかしながら、変動係数は各板厚とも非常に大きく、個々の作業業者によるバラツキは大きいことが理解できる。

ここで、溶接実験で得られた結果を用いて全国の JIS Z 3841 半自動溶接技術検定の中板下向き試験 (SN-2F) 合格者の平均ビード幅 W_{mean} 、最大ビード幅 W_{max} 及びビード幅最大差 ΔW の母平均値の推定を行った。推定は各作業業者とも同じ溶接機を使用し、2.2節で述べたような溶接作業条件で Fig. 1 のような裏当てを有する突合せ溶接継手を半自動 MAG 溶接法で溶接を行った場合の溶接ビードのビード幅を母集団として行った。Fig. 5~7の結果より、平均ビード幅 W_{mean} 、最大ビード幅 W_{max} 及びビード幅最大差 ΔW の母集団はそれぞれ正規分布に従っているとみな

Fig. 7 Distributions of maximum difference in bead width for each plate thickness (normal probability paper).

Table 1 Interval estimation of bead width (95% confidential interval).

h (mm)	W_{mean} (mm)	W_{max} (mm)	ΔW (mm)
6	13.11 ± 0.64	14.63 ± 0.87	2.32 ± 0.36
9	15.58 ± 0.76	17.39 ± 0.92	2.39 ± 0.49
12	18.79 ± 0.46	19.89 ± 0.57	1.96 ± 0.41

h : Plate thickness, W_{mean} : Mean bead width, W_{max} : Maximum bead width,
 ΔW : Maximum difference in bead width

せるので、図中に示した標本数15の標本平均値、標本標準偏差から各板厚における平均ビード幅 W_{mean} 、最大ビード幅 W_{max} 及びビード幅最大差 ΔW の母平均値の95%信頼区間を推定³⁾した結果を Table 1 に示した。

3.3 ビード高さの分布特性

次にビード高さの統計的性質について述べる。平均ビード高さ H_{mean} を各板厚ごとに正規確率紙にプロットしたものを Fig. 8 に示した。Fig. 8 より、各板厚における平均ビード高さ H_{mean} の分布も直線上に分布していることから正規分布に従っていることが分かる。また、各板厚において平均ビード高さ H_{mean} の分布の変動係数は先に述べた平均ビード幅 W_{mean} の分布に比べて大きいことが分かる。

Fig. 9 は各板厚ごとの最大ビード高さ H_{max} を正規確率紙にプロットしたものである。最大ビード高さ H_{max} の測定も最大ビード幅 W_{max} の測定と同じ理由により、溶接ビードの両端15 mm を除く中間部170 mm の範囲を対象にした。最大ビード高さ H_{max} の分布も各板厚とも直線に従うことから正規分布に従うことが分かる。また、最大ビード高さ H_{max} の平均値及び標準偏差は各板厚とも平均ビード高さ H_{mean} の平均値及び標準偏差より大きいことが分

かる。

Fig. 10 はビード高さの不均一性（ビード高さの凹凸）を調べるため、各試験体の中間部170 mm の範囲におけるビード高さ最大差 ΔH ($=H_{\text{max}} - H_{\text{min}}$) の分布を正規確率紙にプロットしたものである。 ΔH の分布も各板厚とも正

Fig. 9 Distributions of maximum bead height for each plate thickness (normal probability paper).

Fig. 8 Distributions of mean bead height for each plate thickness (normal probability paper).

Fig. 10 Distributions of maximum difference in bead height for each plate thickness (normal probability paper).

Table 2 Interval estimation of bead height (95% confidential interval).

h (mm)	H_{mean} (mm)	H_{max} (mm)	ΔH (mm)
6	1.04 ± 0.23	1.47 ± 0.30	0.81 ± 0.15
9	1.88 ± 0.19	2.26 ± 0.20	0.79 ± 0.17
12	2.55 ± 0.29	2.86 ± 0.33	0.63 ± 0.14

h : Plate thickness, H_{mean} : Mean bead height, H_{max} : Maximum bead height,

ΔH : Maximum difference in bead height

規分布に近似でき、板厚 6, 9 及び 12 mm とほとんど同じ直線上に従っていることが分かる。各板厚の平均値 ΔH_{μ} 及び標準偏差 ΔH_{σ} もほとんど同じ値を示し、 ΔH の分布も ΔW の分布と同様に板厚 6~12 mm の範囲では同じ程度であることが理解できる。また、変動係数も ΔW の分布と同様に各板厚とも非常に大きく、個々の作業によってバラツキが大きい。

ビード幅と同様に溶接実験で得られた結果を用いて全国の JIS Z 3841 半自動溶接技術検定の中板下向き試験 (SN-2F) 合格者の平均ビード高さ H_{mean} 、最大ビード高さ H_{max} 及びビード高さ最大差 ΔH の母平均値の推定を行った。平均ビード高さ H_{mean} 、最大ビード高さ H_{max} 及びビード高さ最大差 ΔH の母集団も Fig. 8~10 よりそれぞれ正規分布に従っているので、図中に示した標本数 15 の標本平均値、標本標準偏差から各板厚における母平均値の 95% 信頼区間を推定した。Table 2 に各板厚におけるビード高さの母平均値の推定結果を示した。

3.4 溶接金属質量の分布特性

溶接において溶接金属質量も当然のことながら溶接部の形状やビード外観に影響し、溶接作業者の技量にも関係してくる。溶接時の溶接金属質量は過多であっても、少な過ぎても溶接欠陥の原因となる。したがって、溶接金属質量の分布特性も理解しておく必要がある。板厚 6, 9 及び 12 mm の突合せ溶接継手の溶接金属質量を正規確率紙にプロットしたものを Fig. 11 に示す。なお、本論文で述べる溶接金属質量は、溶接前後の試験材の質量差から求めた。Fig. 11 に示すように、単位溶接長あたりの溶接金属質量の分布は直線で近似でき、正規分布に従っていることが分かる。Fig. 12 は溶接金属質量 M (g/cm) と溶接入熱量 Q (kJ/cm) の関係を求めて示したものである。ここでの溶接入熱量 Q は、熱効率が種々変化するために便宜的に熱効率 $\eta=1$ とし、 $Q=A \cdot V/v$ [A : 溶接電流 (A), V : アーク電圧 (V), v : 溶接速度 (cm/s)] で算出して求めた各溶接作業による平均溶接入熱量⁴⁾である。Fig. 11, 12 より、溶接金属質量は板厚の増加とともに増加し、溶接入熱量に比例していることが分かる。ここで、単位質量あたりの溶接入熱量で表わされる比溶着熱 E (kJ/g) を Fig. 12 から求めると直線の傾きの逆数で表わされ、 $E=5.90$ (kJ/g) とな

Fig. 11 Distributions of mass of deposited metal for each plate thickness (normal probability paper).

Fig. 12 Relation between welding heat input and mass of deposited metal.

る。比溶着熱は単位質量の溶接金属を得るために母材に与えられる熱量であるから、この値の小さい溶接法は溶接変形が小さい。本 MAG 溶接実験で得られた比溶着熱 5.90 (kJ/g) は被覆アーク溶接法の一般的な比溶着熱に比べて小さい。

4. 結 論

裏当てを有する板厚6, 9及び12 mmの軟鋼平板突合せ継手を一定以上の技量を持つ技能者が半自動MAG溶接法で突合せ溶接したときのビード幅, ビード高さなど溶接ビードの統計的な性質を調査し, 次のことを明らかにした.

- 1) 仮付け溶接されたルート間隔寸法の分布特性を明らかにし, 仮付け精度の特徴を示した.
- 2) ビード幅の測定から平均ビード幅, 最大ビード幅及びビード幅最大差の分布特性とそれらの特徴を明らかにした. また, 母集団のそれらの95%信頼区間の推定をした.
- 3) ビード高さの測定から平均ビード高さ, 最大ビード高さ及びビード高さ最大差の分布特性とそれらの特徴を明らかにし, また母集団のそれらの95%信頼区間の推定を行った.

- 4) 溶接金属質量の分布特性を明らかにし, また溶接金属質量は溶接入熱量と比例関係にあることを示した.

参 考 文 献

- 1) 日本溶接協会溶接技能者認証委員会: 溶接技能者資格認証のための評価試験における外観試験の合否判定指針, Sanpo Publications, Inc. (1998). (in Japanese)
- 2) 材料強度確率モデル研究会: 材料強度の統計的性質, Yokendo (1992). (in Japanese)
- 3) T. Soeda, M. Ohta, S. Ohmatu: 数理統計の基礎と応用, Nis-sin (1980). (in Japanese)
- 4) Y. Suita, R. Inokuma, K. Matsumoto, K. kagawa, G. Ajisaka, K. Nakagara, S. Ozaki, M. Yamashita, H. Ishihara: Statistical Properties of Welding Parameters and Deformations in Butt Welding Joint with Backing Plate —Statistical Treatment of Welding Deformations (Report 2)—, Quar. J. JWS, 19-4 (2001), 702-708 (in Japanese)