溶接中の同時裏面加熱によるすみ肉溶接 T 継手の角変形防止法の検討*

小谷 祐樹**, 岡野 成威***, 小林 真治****, 津山 忠久**, 望月 正人***

Study on Prevention of Angular Distortion in Fillet welded T-joint by Welding with a Trailing Reverse-side Gas Heating*

by KOTANI Yuki**, OKANO Shigetaka***, KOBAYASHI Shinji****, TSUYAMA Tadahisa** and MOCHIZUKI Masahito***

Reduction or control of angular distortion without additional processes is demanded because it takes great time and effort to correct the angular distortion of fillet welded T-joint. In this study, the reduction or control of angular distortion of both sides fillet welded T-joint by welding with a trailing reverse-side gas heating was investigated through the welding experiment and its numerical simulation. First, the effect of gas heating position and intensity on the reduction of angular distortion was experimentally investigated using gas burner. As the results, angular distortion became the smallest when the reverse-side heating using gas burner was located at backward 50mm of the welding torch. Also, the concentrated gas flame with increased propane and oxygen gas flow was effective for reducing angular distortion. It was clarified that the angular distortion could be controlled completely with an appropriate reverse-side gas heating condition. Next, the numerical simulation model of welding and gas heating was constructed based on comparison with the measured temperature histories and angular distortion. Through the numerical simulation of welding with a trailing reverse-side gas, more detailed understanding on the effect of gas heating condition on reduction of angular distortion was developed. In addition, it was confirmed that the gas heating position for the smallest angular distortion is dependent on the temperature distribution along thickness of flange plate.

Key Words: reverse-side heating, angular distortion, gas heating, fillet welded T-joint, distance between two heat sources

1. 緒 言

橋梁の部材製作におけるすみ肉溶接施工では、角変形が生じやすいため、溶接の前後に様々な変形対策がとられている¹⁻³⁾。例えば、前処理としては、クランプや拘束治具による外的拘束や、予め変形量を見込んで逆方向の変形を与えておく逆ひずみ法などが適用されている。後処理としては、ローラーやプレス機を用いた冷間塑性加工による機械的矯正法や、ガスバーナーを用いた線状加熱等の熱的矯正法が適用されており、これらは一般的にひずみ矯正と呼ばれている。しかし、このような溶接後のひずみ矯正作業は、自動化が困難であるため、熟練作業者の技量や経験に依存するところが多い。また、熱的矯正法では、加熱や冷却によって鋼材のじん性劣化や強度低下をもたらす恐れがあるため、加熱矯正における鋼材表面温度や冷却方法が

道路橋示方書に規定されている⁴⁾。

生産工程の高効率化のためには、溶接変形の発生量を低減し、上述した溶接前後に行っている変形対策のための工程を削減もしくは省略することが有効である。変形の抑制手段としては、溶接継手数の低減、溶接入熱の低減および溶接順序の適正化⁵⁾に加えて、近年では、溶接中に溶接熱源とは別の冷却源^{6, 7)}や加熱源⁸⁻¹⁰⁾を用いて、インプロセスに変形を低減または制御できる方法の検討がなされている。これらのインプロセス変形低減法では、冷却源および加熱源の位置や吸熱量および加熱量によって変形の低減量が異なることが数値シミュレーションによって示されている。例えば、岡野らは、板厚 9 mm の T 型すみ肉溶接継手において、裏面加熱を用いた温度場制御による角変形の低減効果について報告している⁹⁾。その中で、溶接熱源よりやや後方で裏面加熱源を与えることが角変形の低減に最も有効であり、溶接熱源と裏面加熱源との距離（以下、熱源間距離と称す）を適切に選定することで、角変形の発生要因である板厚方向の温度分布すなわち表裏面の温度差を小さくして角変形量を低減できることを示している。しかし、これらの効果は数値シミュレーションでのみ検討されているため、実施工への適用を図る上では、実験的な検証と、より板厚の大きい構造部材への展開が必要である。

そこで本報では、より板厚の大きい T 型のすみ肉溶接継手を対象として、すみ肉溶接中に裏面をガスバーナーで同時に加熱したときの角変形低減効果に対する熱源間距離と

*受付日	平成26年 4月16日	受理日	平成26年 7月16日
	平成25年度春季全国大会で発表、平成25年11月溶接法研究委員会で発表		
**正 員	川 田 工 業 株 式 会 社	Member,	KAWADA INDUSTRIES, INC.
***正 員	大阪大学 大学院工学研究科	Member,	Graduate School of Engineering, Osaka University
****学生員	大阪大学 大学院工学研究科	Student Member,	Graduate School of Engineering, Osaka University

ガス流量の影響について実験的に検討した。また、温度履歴と角変形量の実測値との比較を基に構築したすみ肉溶接とガス加熱の熱源モデルを組み合わせ、さまざまな加熱条件ですみ肉溶接中に同時裏面加熱を行った場合に生じる溶接変形の数値シミュレーションを行い、熱源間距離やガス流量などの加熱条件が角変形低減効果に及ぼす影響について、より詳細に考察を加えた。

2. すみ肉溶接中の同時裏面加熱による角変形低減効果に関する実験的検討

2.1 同時裏面加熱による角変形防止法の概要

すみ肉溶接中に同時裏面加熱を行う角変形防止法の模式図を Fig. 1 に示す。裏面加熱源にはガスバーナーを使用し、ガスバーナーを溶接トーチに対して後方の位置に配置させ、ウェブ直下のフランジ裏面を加熱しながら溶接トーチと同速度で追従させた。

2.2 実験条件

本実験では、鋼板に板厚 16 mm の JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材 SM400A を、溶接材料に直径 1.4 mm のフラックス入りワイヤ JIS Z 3313 T49J0T1-0CA-UH5 を使用した。これらの化学組成を Table 1 に、試験体形状を Fig. 2 に示す。試験体は、フランジ幅 400 mm、ウェブ高さ 150 mm および長さ 500 mm の T 継手とした。溶接法は CO_2 溶接とし、6 mm 脚長のすみ肉溶接を、ウェブ両側同時の 1 パスで行った。溶接条件を Table 2 に示す。

裏面加熱条件を Table 3 に示す。裏面加熱条件は LPG および酸素流量をそれぞれ変化させて、ガス炎の入熱量と集中性を変化させた全 4 条件とした。LPG 流量は 4.6 L/min および 11.3 L/min の 2 条件とし、これらの LPG 流量に対して青白いガス炎が形成される酸素量に調整した条件を A および C、酸素を過剰に流した条件を B および D とした。ガスバーナーは溶接トーチに対して後方位置に配置させ、その

Fig. 1 Schematic illustration of reverse-side heating method during fillet weld.

熱源間距離は 25, 50, 75, 100 mm とした。

2.3 すみ肉溶接で生じる角変形量の計測方法

すみ肉溶接および同時裏面加熱後の角変形量 δ は、試験体が室温に冷却された後、試験体の長さ方向 50, 250 および 450 mm の位置においてテーパゲージを用いて計測し、その 3 点の平均値で評価した。なお、角変形量 δ はフランジがウェブ側へ折れ曲がったものをプラス (+)、その反対に曲がったものをマイナス (-) とし、それぞれの算出方法を Fig. 3 に示す。角変形量 δ が + の場合はフランジ両端の反り量の合計値とし、- の場合はフランジ裏面の両端に直尺を当てウェブ直下との距離を $\delta/2$ とした。

Table 1 Chemical composition of steel plate and wire. (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
Steel plate	0.11	0.23	1.23	0.015	0.006	0.01	0.01	0.02
Wire	0.06	0.66	1.67	0.023	0.015	0.24	-	-

Fig. 2 Configuration of fillet welded T-joint.

Table 2 Welding conditions.

Welding current (A)	250
Arc voltage (V)	30
Welding speed (mm / min)	270
Weld heat input* (J / mm)	1700
Leg length (mm)	6

* It shows one side heat input

Table 3 Heat conditions.

Heat condition	A	B	C	D
LPG flow (L/min)	11.3	11.3	4.6	4.6
Oxygen gas flow (L/min)	32.5	47.0	12.2	28.1
Appearance

(a) In the case of plus direction.

(b) In the case of minus direction.

Fig. 3 Definition of angular distortion.

2.4 すみ肉溶接およびガス加熱における温度履歴の計測方法

すみ肉溶接およびガス加熱それぞれ単独の温度上昇量を確認するため、温度履歴を熱電対により計測した。熱電対の取り付け位置はいずれも試験体長さ方向中央部とし、板厚断面内におけるそれぞれの計測位置を Fig. 4 に示す。すみ肉溶接では、溶接トーチ通過後のフランジ裏面 3 箇所の温度履歴を計測し、ガス加熱では、板厚 9 mm、幅 150 mm および長さ 500 mm の SM400A の平板を使用して、加熱条件 A、B、C および D のガスバーナーを溶接速度と同速度 (270 mm/min) で進行させたときの、ガスバーナー通過後の加熱面と反対の面 3 箇所の温度履歴を計測した。

(a) Fillet weld. (b) Gas heating.

Fig. 4 Locations for measuring temperature history.

2.5 鋼板の機械的性質に及ぼすガス加熱の影響

LPG 流量および酸素流量が最も多く、熱量が最も大きいガス加熱条件である加熱条件 B が鋼材の機械的性質に与える影響を調査するため、板厚 9 mm、幅 300 mm および長さ 500 mm の SM400A の試験体中央部に線状加熱を行った。機械試験はガス加熱部の全厚引張試験 (JIS Z 2241 5 号) およびシャルピー衝撃試験 (JIS Z 2242, 5 mm サブサイズ) とし、ガス加熱の有無による機械的性質への影響を評価した。試験片採取位置を Fig. 5 に示す。

3. 角変形低減効果に対する裏面加熱条件の影響に関する実験結果と考察

3.1 熱源間距離の影響

裏面加熱条件を A に固定し熱源間距離を変化させて同時裏面加熱を行った場合の角変形量 δ の計測結果を Fig. 6 に示す。比較のため、裏面加熱を行わないすみ肉溶接単独の

Fig. 5 Location for specimens of tensile test and Charpy impact test.

Fig. 6 Effect of distance between two heat sources on angular distortion.

Fig. 7 Temperature histories in fillet weld.

結果も併記した。すみ肉溶接での角変形量 δ は 5.7 mm であったが、熱源間距離を 25~100 mm の範囲で変化させた同時裏面加熱を行ったところ、いずれの熱源間距離の条件においても角変形量 δ が低減し、熱源間距離 50 mm のとき 1.6 mm (73% 減) で最大の低減量となった。すみ肉溶接のフランジ裏面温度履歴計測結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、温度計測位置である試験体の長手方向中央部を溶接トーチが通過し、溶接トーチと温度計測位置の距離が 50 mm となった時、フランジ裏面温度がピーク近傍に達していることが確認できる。この 50 mm の位置は、裏面加熱によって角変形量 δ が最も低減した熱源間距離であり、溶接熱の予熱効果によって裏面温度が上昇し、フランジ表裏面の温度差を小さくできる条件であったと考えられる。またこの 50 mm の位置は、溶接熱源によって生じた温度場の冷却過程において、フランジの機械的特性が十分に回復していない力学的溶融温度よりもやや低温になる位置と推測され、この温度領域でフランジ裏面から加熱することでフランジ表面側に引張りの塑性ひずみを生じさせることができたため、角変形量 δ が最も低減したと考えられる。

3.2 ガス流量 (ガス加熱量) の影響

ガス流量の影響を検討するため、熱源間距離を 50 mm に固定し、加熱条件 A, B, C および D で同時裏面加熱した時の角変形低減量を確認した。なお、加熱条件 A および B と C および D の比較から LPG 流量の影響を、加熱条件 A と B の比較および C と D の比較から酸素流量の影響を評価した。各加熱条件による同時裏面加熱の角変形量 δ を、すみ肉溶接の場合と併せて Fig. 8 に示す。LPG 流量が 11.3 L/min の加熱条件 A および B と LPG 流量が 4.6 L/min の加熱条件 C および D を比較した場合、LPG 流量の多い A および B の角変形量 δ はそれぞれ 1.6 mm (73% 減) および -0.2 mm (103% 減) となり、C の 3.9 mm (33% 減) および D の 2.2 mm (62% 減) に比べ角変形量 δ が小さいことが確認された。ガス加熱の温度履歴の計測結果を Fig. 9 に示

Fig. 8 Effect of gas heating conditions on angular distortion.

Fig. 9 Temperature histories in gas heating.

す。Fig. 9 より、LPG 流量が 4.6 L/min の加熱条件 C および D に対して、LPG 流量が 11.3 L/min の加熱条件 A および B の方が、より高いピーク温度を示した。すなわち、LPG 流量の増加に伴いフランジ裏面温度が上昇し、フランジ表裏面の温度差が軽減されるといえる。また、LPG 流量が 11.3 L/min で酸素流量の異なる加熱条件 A と B を比較した場合、酸素流量の大きい B の方が角変形の低減量が大きく、これは LPG 流量の少ない加熱条件 C と D の比較でも同様の傾向を示した。Fig. 9 より、LPG 流量が 11.3 L/min の加熱条件 A と B では、酸素流量の多い B の方が約 120°C 高いピーク温度を示し、LPG 流量が 4.6 L/min の加熱条件 C と D の比較では、酸素流量の多い条件 D の方が約 100°C 高いピーク温度を示した。すなわち、酸素流量の増加に伴うガス炎の集中性と入熱量の増加は、フランジ裏面温度を上昇させ、表裏面の温度差を軽減できるといえる。

以上の結果から、裏面加熱における熱源間距離とガス流量が角変形の低減効果に大きく影響することが実験的に示された。また、それらの条件を適切に選定することによって、角変形をほぼ完全に防止できる場合もあることが分かった。

3.3 鋼板の機械的性質に及ぼすガス加熱の影響

ガス加熱条件 B による鋼板の機械的性質への影響について検討した結果を Table 4 に示す。引張試験結果は試験片 2 本の平均値、シャルピー衝撃試験結果は試験片 3 本の平均値を示す。ガス加熱を行うことによる降伏点、引張強さ、伸びおよびシャルピー吸収エネルギーの低下はほとんどないことが確認された。すなわち、本実験で適用した加熱条件範囲のガス加熱においては、機械的性質への影響がないといえる。

Table 4 Results of tensile test and charpy impact test.

	Yield point (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Charpy absorbed energy at 0°C (J)
Without gas heating	300	453	38	67
With gas heating	293	467	37	59

4. 数値シミュレーションを活用した同時裏面加熱による角変形低減効果に関する検討

すみ肉溶接およびガス加熱を模擬した数値シミュレーションのための熱源モデルを構築し、それらを組み合わせることで、同時裏面加熱による角変形低減効果について、より詳細に検討を加えた。

4.1 すみ肉溶接およびガス加熱の熱源モデルと解析条件

数値解析は、解析ソフト JWRIAN¹¹⁾を用いた有限要素法 (FEM) によって行った。本数値解析に用いたすみ肉溶接 T 継手とガス加熱平板の解析モデルを Fig. 10 に示す。その形状および寸法ともに実験に用いたものと同様である。また、

(a) Fillet weld

(b) Gas heating.

Fig. 10 Finite element model used in numerical analysis.

溶接線近傍においては要素分割を細かくしており、SM400A 鋼を想定した温度依存性を有する物性値を用いた⁹⁾。本数値解析で対象とするすみ肉溶接条件は Table 2 とし、ガス加熱の条件は Table 3 に示す 4 条件のうち、より顕著な角変形低減効果が実験的に確認できた加熱条件 A および B とした。

4.2 すみ肉溶接およびガス加熱熱源モデルの妥当性の検討

すみ肉溶接およびガス加熱それぞれの入熱範囲を Fig. 10 に示す。すみ肉溶接による入熱は、溶着金属部に相当する要素に入熱を与えることによって模擬し、ガス加熱の入熱は、ガス加熱面 (フランジ裏面) の表面要素 (厚さ 1.8 mm) に入熱を与えることによって模擬した。実験における温度履歴の計測結果との比較に基づいて入熱範囲ならびに入熱量を適切に設定することでそれぞれの熱源モデルを決定した。溶接熱源に関するパラメータを Table 5 に、ガス加熱熱源に関するパラメータを Table 6 に示す。これらのパラメータを用いた熱伝導解析によって得られたすみ肉溶接およびガス加熱 (加熱条件 A と B) の温度履歴の解析結果を実験結果と併せて Fig. 11 に示す。すみ肉溶接およびガス加熱ともに、最高到達温度や冷却曲線は解析結果と実験結果で良好に一致していることが確認できる。また、この温度履歴を用いて実施した熱弾塑性解析によって得られた角変形量 δ の比較においても、すみ肉溶接では実験値 5.7 mm に対し解析値 5.6 mm と概ね一致し、ガス加熱では解析結果および実験結果ともにほとんど生じていないことで良く一致した。以上より、すみ肉溶接およびガス加熱による変形を精度良くシミュレーションできる熱源モデルが構築できたと考えられる。

4.3 角変形低減効果に対する加熱条件の影響に関する解析結果

構築したすみ肉溶接およびガス加熱の熱源モデルを種々の熱源間距離で組み合わせた熱弾塑性解析を行い、加熱条件 A および B における熱源間距離と角変形量 δ の関係を求めた。解析結果を実験結果と併せて Fig. 12 に示す。実験結果を示すプロットは数値シミュレーションによって得られ

Table 5 Parameter for heat source model of fillet weld.

Arc efficiency (%)	Heat source length (mm)
75	15

Table 6 Parameter for heat source model of gas heating.

Heat condition	Heat input (kW)	Heat source width (mm)	Heat source length (mm)
A	7.5	100	100
B	12	90	90

(a) Fillet weld.

(b) Gas heating (condition A).

(c) Gas heating (condition B).

Fig. 11 Comparison of temperature histories between analysis result and experimental result.

た熱源間距離に対する角変形量 δ の変化傾向を示す曲線上にほぼあり、両者は概ね良く一致していることが分かる。さらには、最も大きな低減効果の得られる熱源間距離がともに 50 mm であることや、加熱条件 B において熱源間距離 50 mm での同時裏面加熱による角変形量 δ はほぼ 0 となっておりほぼ完全に角変形を防止できていることも良く一致した。

ここで、すみ肉溶接中の同時裏面加熱による角変形低減効果に対する熱源間距離の影響について、加熱条件 A の場合のフランジ板厚断面における最高到達温度分布に着目して考察する。数値シミュレーションによって得られた熱源間距離 0, 50 および 100 mm での板厚断面における最高到達温度分布を Fig. 13 に示す。いずれの熱源間距離の条件にお

Fig. 12 Comparison of angular distortion between analysis result and experimental result. **Fig. 13** Difference in the highest temperature distribution due to distance between two heat sources.

いても、裏面ガス加熱によってフランジ裏面側の温度上昇が大きくなり、板厚方向の温度勾配が軽減されている。しかし、熱源間距離が少し変化するだけでその様相は異なっており、フランジ裏面側の温度上昇が最も大きくなる熱源間距離は50mmであることが分かる。これは、Fig.7で示したすみ肉溶接に伴うフランジ裏面での温度履歴からも分かるように、熱源間距離0mmの場合では溶接熱が裏面に十分に達する前に裏面加熱を行うため、また、熱源間距離100mmの場合では裏面加熱を行う前に裏面に達した溶接熱が冷却されてしまうため、ともに裏面の温度は上昇しにくくなるといえる。一方で、熱源間距離50mmの場合には、3.1で述べたように、溶接熱の予熱効果を最も得やすい状態となることに加え、フランジが力学的溶融温度よりもやや低温となる位置で裏面から加熱源を与えることで、フランジ表面側に引張りの塑性ひずみを生じさせることができる⁹⁾条件であったため、角変形を大きく低減できると考えられる。また、この作用は裏面加熱の加熱量が大いほど顕著に働くため、加熱量がより大きい条件Bでの同時裏面加熱によって角変形をほぼ0に抑えることができたと考えられる。

以上の結果から、適切な熱源モデルを用いた本数値シミュレーションによって、すみ肉溶接中の同時裏面加熱による角変形低減効果を十分な精度で推定し得ることが示された。すなわち、すみ肉溶接および裏面加熱の入熱条件に対応した熱源モデルを今後構築していくことによって、フランジ板厚等の諸条件を変更した場合においても、同時裏面加熱における角変形低減に有効な熱源間距離および加熱量の条件を、本数値シミュレーションによってより合理的な手順で推定可能になることも期待される。

5. 結 言

本報では、ガス加熱を用いた溶接中の同時裏面加熱によるすみ肉溶接T継手における角変形防止法を構築するために、角変形低減効果に対する加熱条件の影響について実験と数値シミュレーションによって検討を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 角変形低減効果に及ぼす裏面加熱条件の影響について実験的に検討した結果、角変形低減に対して適正な熱源間距離が存在すること、ならびに、本実験で適用した裏面加熱条件範囲においては、より大きな温度上昇を得られるLPG流量や酸素流量を選定することで、より大きな角変形低減効果が得られることを示した。
- (2) 本検討で対象とした板厚16mmのすみ肉溶接T継手では、溶接トーチに対して後方50mmの位置を加熱することで最も大きな角変形低減効果が得られ、LPGおよび酸素の流量を増加させて集中性を高めたガス炎

を用いることで、角変形量 δ をほぼ完全に防止できることを示した。

- (3) すみ肉溶接およびガス加熱における温度履歴の計測結果を基に構築した熱源モデルを組み合わせたすみ肉溶接中の同時裏面加熱の数値シミュレーションの結果、最も大きな角変形低減効果が得られる熱源間距離の条件や角変形をほぼ完全に防止できるガス加熱の条件は、実験結果と精度良く一致したことから、今後フランジ板厚等が異なる場合などに対して本手法を適用したい場合においても、数値シミュレーションを活用したより合理的な条件設定が可能となることが期待できる。

謝 辞

本研究に用いた数値解析ソフトJWRIANの使用にあたっては、大阪大学接合科学研究所の村川英一教授、大阪府立大学の柴原正和准教授にご高配を賜りました。紙面を借りて深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. Natsume: Weld Distortion Control on Steel Bridges and Steel Structures, Journal of JWS, 52-8 (1983), 648-658. (in Japanese)
- 2) T. Yamakawa: Prevention and Control of Welding Deformation, Journal of JWS, 67-2 (1998), 121-125. (in Japanese)
- 3) T. Terasaki: Weld Distortion and Residual Stress, Journal of JWS, 78-2 (2009), 139-146. (in Japanese)
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.
- 5) Y. C. Kim, K. H. Chang, K. Horikawa: Effects of Welding Conditions on Out-of-Plane Deformation and Residual Stress in Fillet Welding, Journal of Japan Steel Construction Engineering, 6-21 (1999), 77-82. (in Japanese)
- 6) S. Okano, M. Mochizuki, M. Toyoda: Weld Residual Distortion Produced due to Locally Cooled Temperature Distortion and Its Reduction Effect, Quarterly Journal of JWS, 28-1 (2010), 72-79. (in Japanese)
- 7) S. Okano, M. Mochizuki, M. Toyoda, T. Ueyama: Effect of Weld Heat Input Conditions on Reduction of Angular Distortion by Heat-Sink Welding, Quarterly Journal of JWS, 29-1 (2011), 55-60. (in Japanese)
- 8) Y. C. Kim, K. H. Chang, K. Horikawa: Prevention of Out-of-Plane Deformation Generated by Fillet Welding, Journal of Japan Steel Construction Engineering, 6-22 (1999), 11-16. (in Japanese)
- 9) S. Okano, M. Mochizuki, M. Toyoda: Study on Angular Distortion Reduction by Temperature Distribution Control Using Back Heating Source -Studies on Welding Distortion Control by Temperature Distribution Control Using Multiple Heat Sources (Report 2), Quarterly Journal of JWS, 25-1 (2007), 95-105. (in Japanese)
- 10) S. Okano, M. Mochizuki, M. Toyoda: Effect of Welding Conditions on Reduction of Angular Distortion by In-Process Control Welding using Back Heating Source, Quarterly Journal of JWS, 27-2 (2009), 231s-234s.
- 11) H. Murakawa: 匠の技に挑戦する溶接シミュレーション，生産と技術，63-1 (2011), 25-28. (in Japanese)