

すみ肉溶接の角変形量に与える裏面加熱の効果 (第2報)

～サブマージアーク溶接への適用～

Effect of Backside Heating on Angular Distortion of Fillet Weld (2nd Report)

小谷 祐樹 *1
Yuki KOTANI

津山 忠久*2
Tadahisa TSUYAMA

すみ肉溶接時に生じやすい角変形を防止するために、溶接中の同時裏面加熱による角変形低減法を開発した。第1報では、MAG溶接に対する効果を確認したが、本論文では、サブマージアーク溶接における種々のフランジ板厚での角変形低減効果を実験および数値シミュレーションで確認し、溶接トーチの先行極とガスバーナーの距離(熱源間距離)を150mmとしたとき、いずれのフランジ板厚でも角変形量はほぼ完全に抑制され、その結果は実験と解析で概ね一致した。すなわち、数値シミュレーションによって裏面加熱条件の選定と角変形量の評価が可能であることが分かった。また、I桁を模擬した大型試験体を使用した検討では、適正な裏面加熱条件を選定することによって、その他の溶接変形への影響を小さく抑えながら、角変形をほぼ完全に抑制できることが分かった。

キーワード：サブマージアーク溶接、角変形、熱源間距離、裏面加熱、ガス加熱

1. はじめに

鋼橋製作の溶接施工では、面外変形(角変形、縦曲がり変形)や面内変形(縦収縮、横収縮)など様々な溶接変形が生じる(図1)。その中でも、すみ肉溶接継手において生じやすい角変形は、部材精度を確保する上で問題となりやすいため、外的拘束や逆ひずみ法などの変形対策をとるとともに、溶接後に油圧ローラー等による冷間塑性加工や、ガス炎加熱法による線状加熱等のひずみ矯正が行われている^{1,2)}。しかし、ひずみ矯正は熟練工の技量や経験に依存する部分が大きいため自動化が難しく時間と労力を要する工程であるため、変形を低減または制御し溶接後の矯正工程を減らすことが製作の高効率化

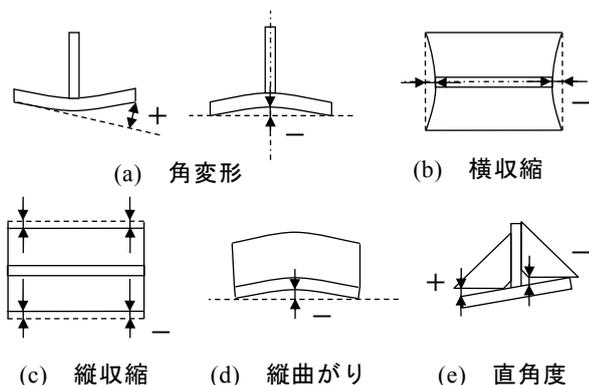


図1 溶接変形

につながると思われる。変形を低減できる方法として、近年では加熱源³⁻⁸⁾を利用してインプロセスに溶接変形を制御できる方法に関して種々の検討が報告されている。第1報⁹⁾では、ガスバーナーを利用したMAG溶接中の同時裏面加熱による角変形低減効果を実験および数値シミュレーションで検討し、溶接熱源と裏面加熱源との距離(以下、熱源間距離と称す)およびガス加熱量を適切に選定することで、溶接側の面(以下、表面と称す)近傍に引張りの塑性ひずみを生じさせて角変形を低減できることを示した。また、最も大きな角変形低減効果の得られる加熱条件が実験結果と解析結果で精度よく一致したことから、数値シミュレーションを利用した条件設定が可能であることを示した。

そこで本報では、鋼製橋梁I桁製作におけるサブマージアーク溶接(以下、SAWと称す)を対象に、種々のフランジ板厚で同時裏面加熱の角変形低減効果を溶接実験と数値シミュレーションで確認した結果¹⁰⁾と、大型試験体を用いて裏面加熱がその他の溶接変形に及ぼす影響を確認した結果について報告する。

2. 同時裏面加熱を用いた角変形低減法について

本工法の模式図を図2に示す。熱源間距離は、溶接トーチ先行極とガスバーナー間の距離とし、ウェブとフラン

*1 川田工業㈱鋼構造事業部生産部四国工場生産技術課

*2 川田工業㈱鋼構造事業部生産部四国工場生産開発課 課長

ジで構成される T 型のすみ肉試験体を 45° 傾斜させた下向き姿勢の SAW を片側 1 パスずつ行くと同時に、一定の熱源間距離を保持しながら溶接トーチ後方の溶接部直下裏面を溶接トーチと同速度で進行するガスバーナーで裏面加熱を行う方法である。このとき、溶接熱による予熱効果を利用したガスによる裏面加熱によって裏面の温度を上昇させて、裏面側の広範囲に圧縮塑性ひずみを生じさせる。また、溶接熱によって生じた温度場の冷却過程において、表面が力学的溶融温度 (約 800°C) よりもやや低温となる時に裏面から加熱源を与えることで、表面側に引張りの塑性ひずみを生じさせる。すなわち、同時裏面加熱は、これら 2 つの作用によって角変形の発生を抑制する⁶⁾。

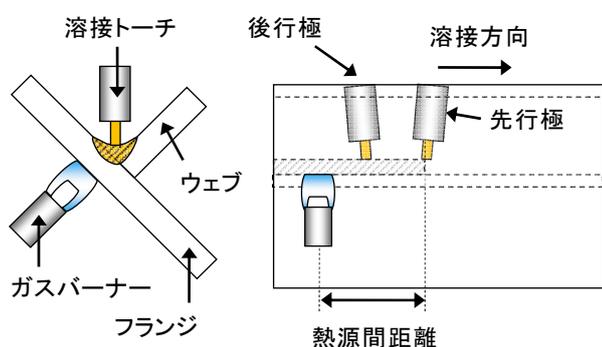


図2 同時裏面加熱による角変形低減法の模式図

3. 実験

(1) 実験方法

鋼板には、JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材 SM490A を、溶接材料には、直径 4.8 mm のワイヤ JIS Z 3351 YS-S6 およびフラックス JIS Z 3352 SFMS1 を使用した。試験体は、長さ 500 mm、高さ 150 mm および板厚 12 mm のウェブと、長さ 500 mm、幅 400 mm および板厚 16 mm のフランジで構成される T 継手とした。溶接は、下向きのタンデム SAW を片側 1 パスずつ計 2 パス行い、2 パス目は試

験体が室温まで冷却された後に行った。溶接条件を表 1 に示す。

裏面加熱条件として、ガスバーナーの移動速度 (以下、加熱速度と称す) は溶接速度と同速の 900 mm/min とし、ガス流量は LPG 24 ℓ/min および酸素 100 ℓ/min とした。また、ガスバーナー先端と加熱面の距離は 20 mm、熱源間距離は 150 および 200 mm とした。

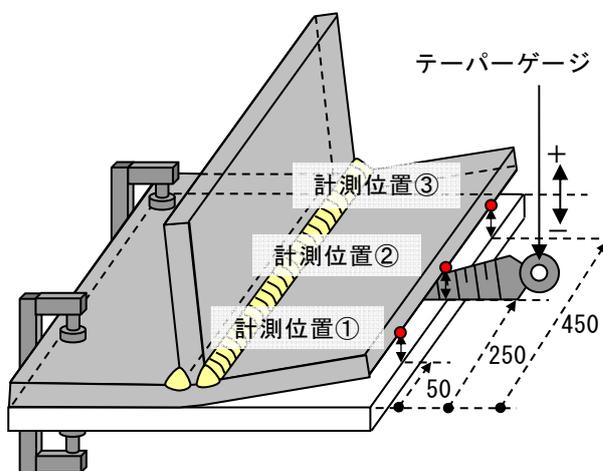
角変形量はフランジがウェブ側へ折れ曲がったものをプラス (+)、その反対へ曲がったものをマイナス (-) として定義し、溶接が 1 パス終了するごとに試験体が室温に冷却された後、図 3(a) に示す 3 点をテーパゲージで計測し、平均値で評価した。溶接温度履歴は、長手方向中央部の図 3(b) に示す位置に熱電対を取り付けて計測した。

(2) 実験結果

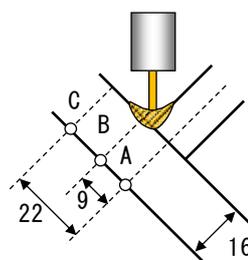
同時裏面加熱の有無によるパス毎の角変形量を図 4 に示す。図 4 より、同時裏面加熱を行うことで、いずれの熱源間距離およびパスでも角変形量は大きく低減されており、その角変形量はほぼ 0 にまで抑制された。特に、熱源間距離が 200 mm よりも 150 mm の時の角変形低減量が大きく、これは同時裏面加熱によって生じる表面側への引張り塑性ひずみと裏面側への圧縮塑性ひずみ⁶⁾が関係していると考えられる。ここで実測した溶接の温度履歴を図 5 に示す。グラフの横軸は、温度計測点 (長手方向中央部) と溶接トーチ間の距離を示し、計測点直上を

表 1 溶接条件

	先行極	後行極
電流 (A)	650	650
電圧 (V)	33	38
溶接速度 (mm/min)	900	
入熱量 (J/mm)	3100	
脚長 (mm)	8	



(a) 角変形量



[単位 : mm]

(b) 溶接温度履歴

図3 計測位置

溶接トーチが通過する位置を0とした。図5より、裏面では、溶接熱の裏面への熱伝達により温度が上昇し、最も温度が高くなる溶接部直下(計測点B)において、熱

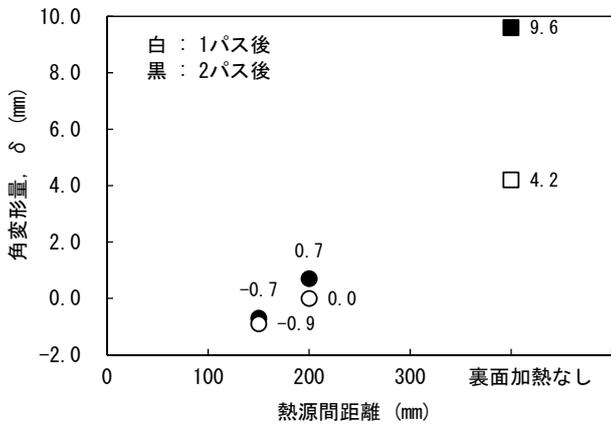


図4 同時裏面加熱有無の角変形量の実験結果

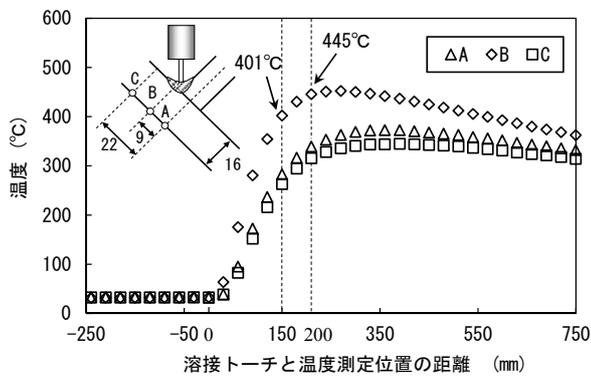


図5 温度履歴

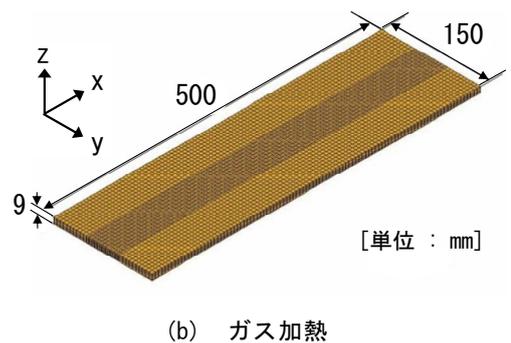
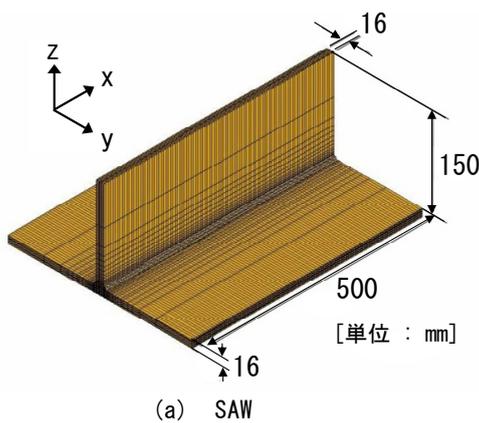
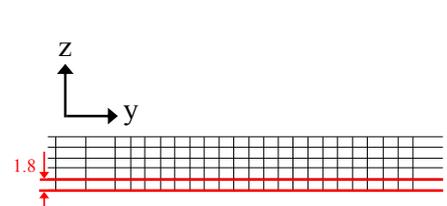
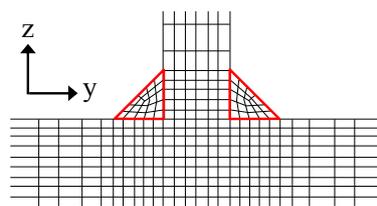
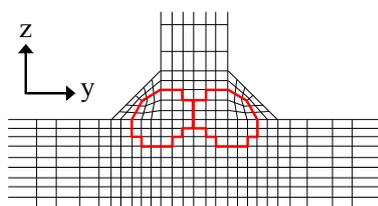


図6 熱源モデル



(a) 先行極による入熱範囲

(b) 後行極とフラックスによる入熱範囲

(c) ガス加熱による入熱範囲

図7 入熱範囲

源間距離 150 mm よりも 200 mm の時に約 40 °C 高い温度を示した。つまり、裏面温度が高いほど同時裏面加熱によって裏面側の最高到達温度が上昇し、より広範囲で圧縮の塑性ひずみを生じさせることができる⁶⁾ため、裏面側の圧縮の塑性ひずみは熱源間距離 200 mm の時に、より大きく生じると考えられる。一方、表面は、熔融温度からの冷却過程であり、母材の降伏強度は力学的熔融温度を境界に冷却される程回復するため、熱源間距離が長い程表面側の温度低下によって母材の降伏強度が高くなり、拘束力が大きくなる。つまり、熱源間距離が 200 mm の時に比べ降伏強度の回復が十分でない熱源間距離 150 mm の時に裏面加熱を与えることで表面側に引張り塑性ひずみが生じると考えられる⁶⁾。以上をふまえ、図4より、熱源間距離が 200 mm よりも 150 mm の方が角変形低減量は大きくなったことから、同時裏面加熱による角変形低減効果は、裏面側の圧縮塑性ひずみの発生よりも、表面側への引張り塑性ひずみの発生が支配的な因子であったと考えられる。

4. 数値シミュレーション

(1) 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図6に、入熱範囲を図7に示す。本数値解析で対象とする溶接条件および加熱条件は実験と同一とし、溶接線近傍では要素分割を細かくし、温度依存性を有するSM490Aを想定した物性値(熱膨張係数、降伏強度、ヤング率、ポアソン比)を用

いた。また、ガス加熱の入熱は、板裏面の1要素(厚さ1.8 mm)に対して内部発熱を与えることで模擬した。SAWでは、先行極、後行極およびフラックスからの入熱を考慮した熱伝導解析を行い、溶け込み形状の実験結果と解析結果は概ね一致することが確認された(図8)。次に、SAWとガス加熱の温度履歴を図9に示す。図9(a)より、図中に示す温度の計測点BおよびCでは解析結果と実験結果が概ね一致しているが、計測点Aでは、実験結果と比較して解析結果の方が明らかに高い最高到達温度を示した。そのため、今回のような簡易的にSAWの入熱を与える手法では、実験を反映できていない部分があると考えられる。しかし、溶け込み形状および最も温度が高くなる溶接部直下(計測点B)の温度履歴が概ね一致している点から、塑性ひずみの発生に影響する高温領域もおおよそ一致していると考えられる。したがって、角変形の予測の観点からは十分な熱源モデルを構築できたと考えられる。続いて構築したSAWの熱源モデルを用いて熱弾塑性解析を行った。2パス後の角変形量の解析結果が9.2mmであったのに対して、実験結果が9.6mmであり、角変形量の解析結果と実験結果も概ね一致することが確認された。つまり、実測した溶け込み形状および裏面の温度履歴を再現した熱源モデルを構築することで、角変形量を精度良く評価できることが示された。また図9(b)より、ガス加熱においても、図中に示すすべての計測位置で温度履歴の最高到達温度および冷却過程ともに解析

結果と実験結果が概ね一致していることから、ガス加熱を模擬した熱源モデルが構築できたと考えられる。

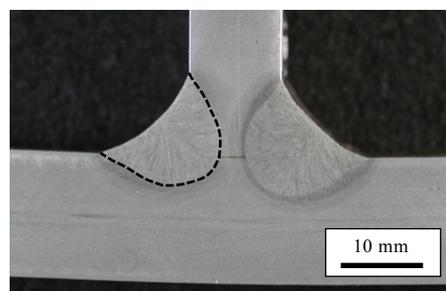
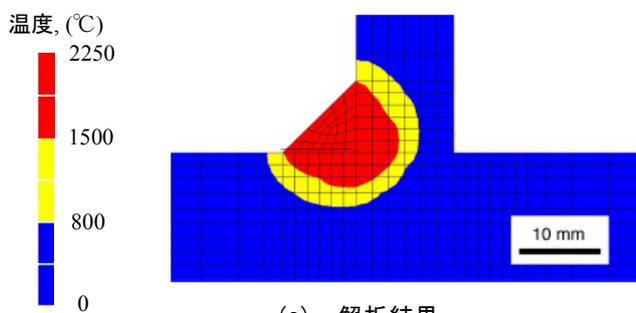
(2) 解析結果

構築したSAWおよびガス加熱の熱源モデルを組み合わせて同時裏面加熱を模擬した。熱源間距離を種々に変化させて、熱伝導解析および熱弾塑性解析を行い、熱源間距離と角変形量の関係性を評価した。実験結果と解析結果を図10に示す。図10より、角変形量の解析結果は、熱源間距離150mmで極小値をとっており、その時の角変形量の解析結果と実験結果がいずれのパスでも概ね一致していることが確認された。よって、第1報⁹⁾の知見と同様に、SAWにおいても実測した温度履歴を概ね再現できる適切な熱源モデルを構築しそれらを組み合わせることで、大きな角変形低減効果の得られる熱源間距離の選定と、同時裏面加熱による角変形量の評価が可能であることが示された。

5. フランジ板厚の影響

(1) 実験および解析条件

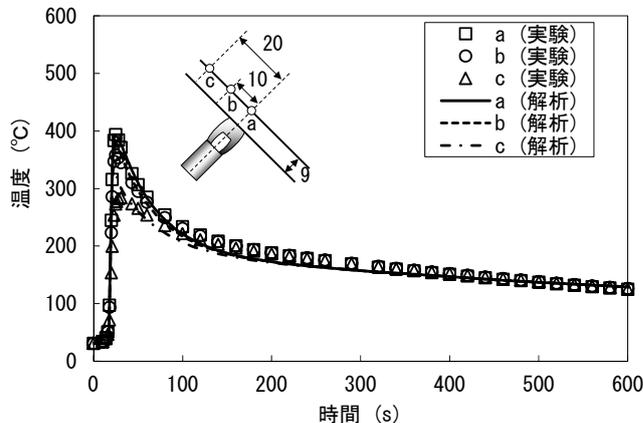
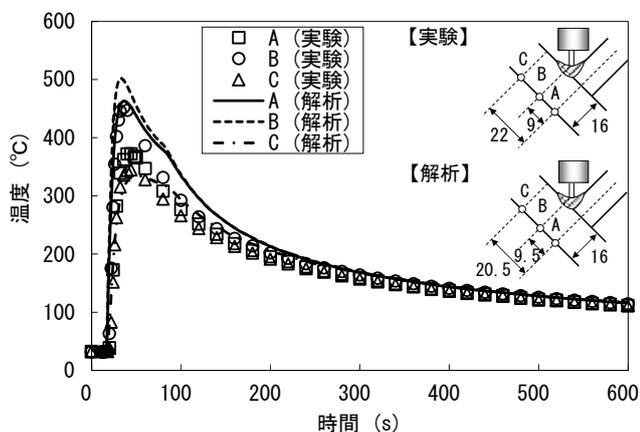
フランジ板厚が角変形低減効果に及ぼす影響について確認するため、T形試験体のフランジ板厚のみ22および28mmを追加し、3パターンで効果の比較を行った。溶接条件および加熱条件は3項で示したものと同一条件とし、熱源間距離は、3項にて大きな角変形低減効果が確認された150mmとした。数値シミュレーションでは4項で示したものと同一の熱源モデルを適用した。



(a) 解析結果

(b) 実験結果

図8 溶け込み形状の比較



(a) SAW

(b) ガス加熱

図9 温度履歴の比較

(2) 実験および解析結果

フランジ板厚が異なる場合の同時裏面加熱による角変形量の実験結果および解析結果を図 11 に示す。なお、グラフ上のプロットはすべて 2 パス後の角変形量とした。図 11 より、同時裏面加熱無しの場合、フランジ板厚が大きくなるにつれて角変形量は小さくなる傾向を示した。これは、フランジ板厚が大きいほど鋼板の剛性が大きく、表面の収縮によって生じるフランジを曲げる力が剛性に比べて不足することが要因の一つとして考えられる²⁾。

一方、同時裏面加熱有りの場合では、いずれのフランジ板厚においても角変形量は大きく低減されており、角変形量はほぼ完全に抑制できることが確認された。ここで、図 3(b) に示す最も高い裏面温度となる計測点 B の各フランジ板厚の溶接温度履歴測定結果を図 12 に示す。図 12 に示す横軸が 150 mm すなわち熱源間距離 150 mm のときの各フランジ板厚の裏面温度を比較すると、フランジ板厚が大きくなるにつれて裏面温度は低下していることが確認されることから、これはフランジ板厚が大きいほど溶接熱による裏面への予熱効果が小さくなることで、同時裏面加熱によって裏面温度が上昇する範囲を小さくし、裏面側に生じる圧縮の塑性ひずみを小さくしてしまうためだと考えられる⁶⁾。また、いずれのフランジ板厚

でも溶接入熱量は同じであるため、表面近傍の温度はほぼ等しいと考えられるが、フランジ板厚が大きい程表面側の力学的溶融温度近傍の高温度領域と裏面加熱によって生じる裏面側の高温度領域との距離が離れているため、表面側にガス加熱による熱が伝わりにくく、同時裏面加熱によって生じる表面側の引張り塑性ひずみもまた小さくなると考えられる。以上をふまえ、同時裏面加熱による角変形低減効果の要因である、裏面側の圧縮塑性ひずみと表面側の引張り塑性ひずみの発生は、フランジ板厚の増加に伴っていずれも抑制されるため、角変形低減効果は小さくなると考えられる。しかし、上述したようにフランジ板厚の増加に伴い溶接熱によって生じる角変形量も小さくなるため、本実験の全てのフランジ板厚においては、低減効果が小さくても同時裏面加熱によって角変形量をほぼ完全に抑制できたといえる。つまり、溶接中の同時裏面加熱はフランジ板厚が異なる場合でも角変形の低減に有効で、溶接後のひずみ矯正工程の省力化が期待できる方法であるといえる。また、図 10 より、同時裏面加熱の有無に関わらず、すべてのフランジ板厚における角変形量の実験結果は、解析結果と概ね一致することが確認された。つまり、溶接およびガス加熱の入熱条件に対応した熱源モデルを構築することで、フランジ板厚を変更した場合においても数値シミュレーションによって、同時裏面加熱における適正な加熱条件の選定と、その際に生じる角変形量の評価が可能であることを示した。

6. 大型試験体の検討

(1) 実験方法

実大の鋼製橋梁 I 桁を模擬した大型試験体を用いて、SAW 中の同時裏面加熱による角変形低減効果と部材精度に及ぼす裏面加熱の影響について検討した。試験体は、長さ 3400 mm、高さ 1500 mm、板厚 12 mm のウェブと、幅 500 mm、板厚 22 mm のフランジで構成される I 形形状とした。溶接条件および加熱条件は 3 項で示したものと同一条件とし、同時裏面加熱の有無で溶接後の部材寸法を

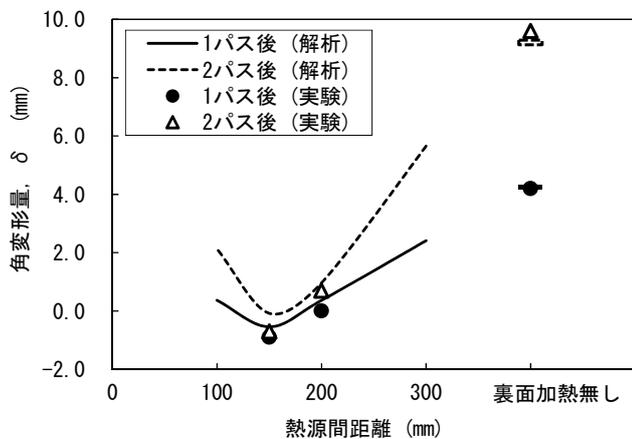


図 10 角変形量の比較

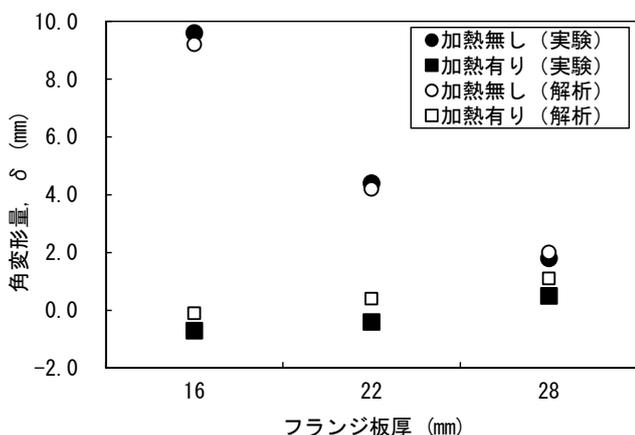


図 11 各種フランジ板厚の角変形量

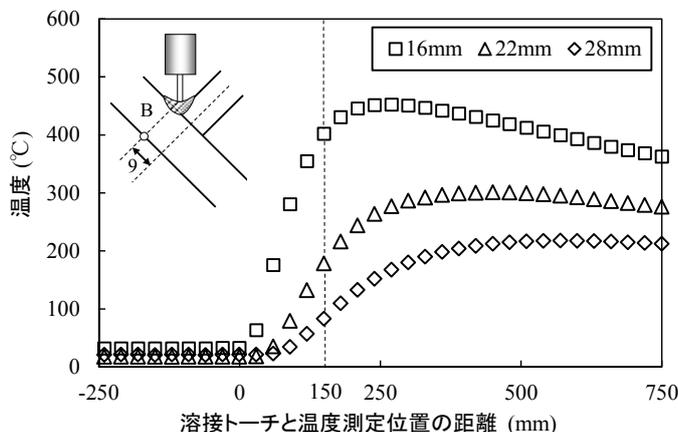


図 12 各種フランジ板厚の溶接温度履歴

比較した。施工状況を写真1に示し、測定した溶接変形は図1に示す5種類とし、角変形量はフランジ幅を400mmとして換算した値とした。



写真1 SAW中の同時裏面加熱状況

(2) 実験結果

同時裏面加熱の有無の溶接変形量を表2に示す。表2より、大型試験体においても、同時裏面加熱によって角変形量はほぼ完全に抑制されており、これは、前項で示した小型(長さ500mm、幅400mm、高さ150mmのT形)試験体での実験結果と概ね一致した。また、角変形を除くその他の溶接変形(横収縮、縦収縮、縦曲がり)は裏面加熱の有無に関わらず許容値よりも小さいことから、同時裏面加熱は縦曲がり等の溶接変形に対して影響が小さいことが分かった。また、溶接が片側1パスずつ行われるため溶接順序の影響によりフランジ直角度はウェブに対してフランジの両側で差が生じ、裏面加熱無しの場合、角変形量が大きく生じることも影響してフランジの両側が共にウェブ方向に変形しており、2ndパス側で許容値¹²⁾を越えているため、角変形と直角度両方のひずみ矯正が必要となる。一方で、裏面加熱有りの場合、角変形が抑えられることで、フランジの両側いずれも直角度は許容値¹²⁾を満たした。よって、実大構造物においても同時裏面加熱は縦曲がり等の溶接変形への影響を小さく抑えながら角変形を大きく低減でき、それに伴い溶接後のひずみ矯正が省略可能になり得る有用な方法であることを示した。

表2 溶接変形量 単位: mm

	裏面加熱 無し	裏面加熱 有り	許容 値
角変形量	+4.5	-0.1	—
横収縮量	0.0	0.0	±2.0
縦収縮量	-1.0	-1.5	±3.0
縦曲がり変形	0.0	0.0	±3.4
フランジ直角度	-0.6, -4.3	+1.8, -1.2	±2.5

7. まとめ

SAWにおける同時裏面加熱の角変形低減効果について、

溶接実験と数値シミュレーションで検討し、フランジ板厚が大きくなった場合でも、適正な加熱条件を選定することで角変形はほぼ完全に抑制できることが確認され、数値シミュレーションによって角変形量を評価できることを示した。また、大型試験体を用いた検討により、同時裏面加熱は縦曲がり変形等の溶接変形への影響を小さく抑えながら角変形量を大きく低減し、溶接後のひずみ矯正が省略可能になり得る有用な方法であることを示した。

8. おわりに

本研究にあたり、数値シミュレーションによる検討に際して多大な御協力を頂きました大阪大学の岡野成助教授、望月正人教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 芝田:溶接変形の予測と対策(2)厚板構造物(橋梁), 溶接学会誌, 第60巻, 第6号, pp.472-477, 1991.
- 2) 寺崎:溶接変形と残留応力, 溶接学会誌, 第78巻, 第2号, pp.139-146, 2009.
- 3) 金, 張, 堀川:すみ肉溶接で生じる面外変形の防止, 鋼構造論文集, 第6巻, 第22号, pp.11-16, 1999.
- 4) 大畑, 戸田, 豊田, 竹野:アルミニウム合金薄板の溶接変形制御に関する基礎的検討, 溶接学会論文集, 第17巻, 第2号, pp.301-309, 1999.
- 5) H. J. Zhang, G. J. Zhang, L. Wu: Effects of arc distance on angular distortion by asymmetrical double sided arc welding, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.12, No.6, pp.564-571, 2007.
- 6) 岡野, 望月, 豊田:裏面加熱源を用いた温度場制御による角変形低減効果に関する検討, 溶接学会論文集, 第25巻, 第1号, pp.95-105, 2007.
- 7) S. Okano, M. Mochizuki, M. Toyoda: Effect of Welding Conditions on Reduction of Angular Distortion by In-Process Control Welding using Back Heating Source, 溶接学会論文集, 第27巻, 第2号, pp.231s-234s, 2009.
- 8) 小谷, 岡野, 小林, 津山, 望月: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, 溶接学会論文集, 第32巻, 第3号, pp.148-155, 2014.
- 9) 小谷, 津山, 湯田:すみ肉溶接の角変形量に与える裏面加熱の効果, 川田技報, Vol.33, 2014.
- 10) 小谷, 岡野, 津山, 望月:溶接中の同時裏面加熱による角変形防止法における板厚の影響, 溶接学会論文集, 投稿中.
- 11) 村川:匠の技に挑戦する溶接シミュレーション, 生産と技術, 第63巻, 第1号, pp.25-28, 2011.
- 12) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説, 2012.