水冷法による角変形低減効果に及ぼす溶接入熱条件の影響*

岡野 成威**, 望月 正人**, 豊田 政男**, 上山 智之***

Effect of Weld Heat Input Conditions on Reduction of Angular Distortion by Heat-Sink Welding*

by OKANO Shigetaka**, MOCHIZUKI Masahito**, TOYODA Masao** and UEYAMA Tomoyuki***

In recent years, in-process control welding for reducing weld distortion and residual stress is much more required from a view point of improving manufacturing efficiency. In-process control welding by additional cooling has been proposed as one of techniques for reducing weld distortion and residual stress. It has already been partially applied for thin-plate structure in industry. In order to extend the range of application of in-process control welding by additional cooling in the future, further studies are required. Firstly in this study, reduction of angular distortion by heat-sink welding is experimentally discussed. Based on the experimental results, effect of welding conditions on reduction of angular distortion by heat-sink welding is investigated by thermal elastic-plastic analysis. It is concluded that angular distortion is reduced by additional cooling with the appropriate cooling position, and the effect of welding conditions on reduction of angular distortion are clarified by associated with heat input parameter.

Key Words: in-process control welding, heat-sink welding, water cooling, angular distortion, welding conditions

1. 緒 言

溶接に伴って生じる変形は、継手強度の確保などの観点から、外的拘束による防止や機械的・熱的な矯正などによって、適切に低減・制御されているのが現状である¹⁾。しかしながら、近年の生産効率の改善に向けた種々の取り組みの中で、溶接構造物の製作工程における工作精度管理の厳格化が果たす役割は極めて大きいとの認識が高まっている。すなわち、いかに工程数や労力を増やすことなく、効率良く溶接変形を低減・制御できるかが重要な課題となっている。このような観点から、溶接変形²⁻⁵⁾あるいは残留応力⁴⁻⁷⁾の低減・制御に向けた方策の一つとして水冷法に関する検討がなされてきた。近年、著者らは溶接熱源とは別の加熱源⁸⁻⁹⁾や冷却源¹⁰⁾を用いた温度場制御によるインプロセス溶接変形制御法に注目して検討を行っている。既報¹⁰⁾では、溶接熱源とは別に何らかの冷却源を追従させる「後方冷却法」を取り上げ、溶接残留変形の低減に対する有用性について、そのための適正な冷却位置の選定指針および変形低減メカニズムに関して数値解析による検討を行った。それによると、後方冷却法による変形低減効果は大別して、温度上昇範囲の縮小によって固有ひずみ発生領域を縮小させることと、冷却時の温度場制御に伴う内的拘束状態

の変化を利用して積極的に塑性ひずみの発生挙動を制御すること、の二つによって得られる。特に角変形に対しては、後者のメカニズムを利用することで、単に低入熱化した場合よりも効率的に低減効果を得られ易く、そのための適正な冷却位置は熱源後方の力学的溶融長さに関連して決めることができる。

そこで本報ではまず、既報¹⁰⁾で得られた知見に基づいて、水冷法を用いた後方冷却による角変形の低減効果に関して実験的に検討を行う。続いて、実験結果との対応を踏まえて水冷法を模擬した熱弾塑性数値解析を実施し、より広範囲の溶接条件における角変形の低減に対する本水冷法の有用性に関して考察を加える。

2. 水冷法による角変形低減効果に関する溶接実験

2.1 実験条件

本実験に供した鋼材は一般溶接構造用鋼 SM490Y であり、溶接材料には YGW 12 を用いる。これらの化学組成・機械的性質は Table 1 に示す通りである。また、実験には、Fig. 1 に示す板長 500 mm、板幅 400 mm、板厚 6 mm の平板を使用し、板中央にビードオンプレート溶接を施す。なお、溶接中のビード直下の板裏面における熱的境界条件を考慮して、板厚 19 mm の台板によって被溶接試験体を定盤から浮かした状態で溶接を実施する。

2.2 溶接条件・水冷条件

本実験における溶接条件・水冷条件を纏めて Table 2 に示す。溶接は、平均溶接電流 250 A のパルス MAG 溶接とし、溶接速度を 40 cm/min に設定した。溶接時の平均アー

*受付日 平成22年7月16日 受理日 平成23年2月16日 平成18年11月溶接構造シンポジウム2006で発表

**正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

***正 員 ㈱ダイヘン Member, DAIHEN Corporation

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of base metal and welding wire.

	Chemical compositions (mass%)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Tensile strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Elongation (%)
Base metal	0.15	0.25	1.42	0.020	0.004	590	500	22
Welding wire	0.08	0.50	1.16	0.012	0.011	580	480	30

Fig. 1 Configuration of bead-on-plate weld joint.**Table 2** Conditions of welding and additional cooling in experiment.

WELDING CONDITION (Pulse-MAG)		
welding current, I (A)	250	
welding speed, v (cm/min)	40	
arc voltage, V (V)	22.5	
ADDITIONAL COOLING CONDITION		
water flow rate, w (ml/min)	380	
Distance between weld torch and cooling torch, X_c (mm)	50	100

Fig. 2 Appearance of cooling torch for heat-sink welding.

ク電圧はおよそ 22.5 V であった。本実験で用いた水冷用トーチの外観を Fig. 2 に示す。図に示すように、水冷用トーチは溶接トーチに固定されており、これらのトーチ間の距離を数段階に設定できる。本トーチによる水冷は、定期的に供給する水を浸したスチールウールを被溶接試験体に押し付けるようにして行った。本実験における水冷条件として、溶接トーチと水冷トーチの間の“トーチ間距離”に注目し、冷却の強さに影響すると思われる水の流量に関して

Fig. 3 Locations for measuring temperature history and vertical displacement.

は、アーク・プラズマや溶接ビードに影響が出ない範囲で、380 ml/min の 1 条件のみとした。一方、トーチ間距離に関しては、既報¹⁰⁾から角変形低減に対しては熱源後方の力学的溶融域のすぐ外側での冷却が効果的であることを踏まえて、角変形低減に有効と予想される 50 mm とそうでない 100 mm の 2 条件を設定した。これは、今回の溶接条件における熱源後方の力学的溶融長さが事前の溶接実験を基に行った熱伝導解析の結果、およそ 40 mm 程度であると推定されたことに基づいて決定した。

2.3 計測対象・要領

本実験における計測対象は、溶接中の溶融部近傍の温度履歴と溶接後室温まで十分に冷却された後の撓み量である。これらの計測位置に関して Fig. 3 に示す。溶接中の溶融部近傍の温度履歴は、試験体中央において融合線を囲む様に取り付けた 5 つの K 型熱電対によって計測した。溶接後室温まで十分に冷却された後の撓み量は、溶接始端、中央、終端の計 3 点で接触型変位計によって計測した。これらの撓み量と溶接線から計測点までの板幅方向距離との比から、従来の定義に従って角変形量を算出した。その際、角変形量の算出に影響を及ぼすような溶接線直下の撓みは生じていないことを確認している。

3. 水冷法による角変形低減効果

3.1 溶接部の温度履歴に及ぼす水冷法の影響

まず初めに、溶接中の温度分布に対する水冷法の効果に

(a) Conventional welding (without additional cooling)

(b) Additional cooling ($X_c = 50$ mm) (c) Additional cooling ($X_c = 100$ mm)

Fig. 4 Effect of additional cooling on temperature histories in welds.

について考察するために、水冷法を用いない通常溶接の場合と2つの異なるトーチ間距離で水冷法を用いた場合の計3条件での溶接部の温度履歴を Fig. 4 (a), (b), (c) に示す。これらの図から、冷却に伴う温度履歴の違いを比較してみると、水冷を行った場合にはいずれの計測点についても、昇温後間もなく低温まで冷却されている。溶接終了時点 ($t = 75$ s 程度) において、水冷を行わない場合には溶接部の温度はおよそ 400°C であるのに対して、水冷を行った場合に

Fig. 5 Effect of additional cooling on angular distortion.

はどちらのトーチ間距離に関しても溶接部の温度はおよそ 100°C である。また、トーチ間距離が 50 mm の場合には、板表面に近い計測点 T5 において、水冷却に伴って温度が低下した後一時的に温度が上昇する復熱現象が見られ、冷却位置近傍のみが局部的に冷却されていることが推察される結果となっている。

3.2 角変形量に及ぼす水冷法の影響

次に、溶接後室温まで冷却された後に測定した撓み量から算出した角変形量と水冷条件の関係について Fig. 5 に示す。ここで示す角変形量は、溶接線方向中央部での値であり、各条件に対して2回行った実験結果をプロットしている。これを見ると、変形低減に有効と予想されたトーチ間距離 50 mm で水冷を行った場合には、水冷を行わない通常溶接の場合と比較して、およそ4割程度の変形量の低減が認められる。一方で、トーチ間距離 100 mm の場合にはそれほど低減効果が得られていない。これらのことから、水冷法を用いる際に適切な冷却位置を選定することで、より効果的に角変形を低減できることが実験的にも示されたといえる。

4. 水冷法を模擬した溶接変形の数値解析

より広範囲の溶接条件に対する検討に際しては、数値解析を活用した検討が有効であるので、本章では、先に示した実験と同じ継手を対象として、本実験で行った水冷法を模擬した数値解析に関する検討を行う。

4.1 有限要素モデルと数値解析条件

本章で行う数値解析に用いる有限要素モデルを Fig. 6 に示す。先の実験と同じ寸法の平板継手とし、対称性を考慮して溶接線 ($y=0$) を対称面とした1/2モデルを用いている。また、一般構造用鋼を想定した材料特性として、既報¹⁰⁾と同じものを用いており、温度依存性も考慮している。なお、熔融温度を 1500°C 、力学的熔融温度を 800°C とし、

Fig. 6 Finite element model used in numerical analysis.

Welding conditions		
	Experiment	Numerical analysis
Weld heat input, Q (or IV/v) [kJ/mm]	0.84	0.72
Welding current, I [A]	250	
Arc voltage, V [V]	22.5	
Welding speed, v [cm/min]	40	40
Weld penetration

Fig. 7 Comparison of weld heat input and penetration between experiment and numerical analysis.

Fig. 8 Comparison of angular distortion between experiment and numerical analysis.

これらは降伏応力およびヤング率を極めて小さい値とすることで模擬している。大気中への熱放散としては、空気との熱伝達とステファン-ボルツマンの法則に従った熱放射を考慮している。

4.2 実験結果との比較による解析モデルの検討

数値解析における溶接入熱¹⁾および水冷に伴う吸熱は、先に示した角変形量や温度履歴の測定値、さらには断面マ

(a) Conventional welding (without additional cooling)

(b) Additional cooling ($X_c = 50$ mm)

Fig. 9 Comparison of temperature histories between experiment and numerical analysis.

クロ観察によって測定した溶込み形状・寸法との対応に基づいて決定した。溶接による入熱は、母材溶融部および余盛部に対応する要素に内部発熱を与えることで模擬した。水冷による吸熱の設定に際しては、静止している空気との熱伝達率に対して流れている水とのそれがおよそ50倍から1000倍程度であることを考慮して、冷却位置近傍の板表面における熱伝達率を変化させることで模擬した。溶込み形状・寸法、角変形量、溶接部の温度履歴の比較結果をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 に示す。Fig. 7 に示す溶込み形状・寸法は良い一致を示している。Fig. 8 に示す角変形量に関しては、全体的に数値解析結果が実験結果よりもやや小さいものの、トーチ間距離に対する傾向などの観点から比較的良く一致しているといえる。また、角変形低減に有効なトーチ間距離 50 mm の条件に注目して、冷却の有無による溶接部の温度履歴の違いを比較した Fig. 9 から、冷却による一時的な温度低下とその後の復熱現象が見られる点において、数値解析結果と実験計測結果は比較的良く一致

している．このように，溶接に伴う溶込み形状・寸法，温度履歴を再現することによって変形量を再現することが可能である．結果として，本実験におけるアークの熱効率はおおよそ85%となった．また，水冷によって得られた吸熱量は溶接入熱の30%程度である．

以上のことから，本数値解析においては水冷に伴う吸熱現象を厳密に再現しているわけではないが，角変形の低減効果に関して，より広範囲の溶接入熱条件について検討を行う上で十分な精度を有していると考えられる．

5. 水冷法による角変形低減効果に関する考察

前章で，数値解析によって今回の水冷法の実験を比較的精度良く模擬できることが示されたので，より広範囲の溶接条件における水冷法による角変形低減効果に関して，本数値解析を用いて検討を加える．

5.1 有限要素モデルと数値解析条件

本章で行う数値解析では，これまでの実験・数値解析で用いたものではなく，Fig. 10に示す板長200 mm，板幅600 mmの平板を対象として検討を行う．対称性を考慮した1/2モデルとなっていることや，材料特性，境界条件などはこれまでと同じである．また，継手板厚は，6，9，12，15，18 (mm)の5種類を用いており，これは溶接入熱条件として入熱パラメータ Q_{net}/h^2 の値を様々に変化させるためである．

5.2 溶接条件・冷却条件

本章での検討における溶接条件は，先に示した5種類の板厚に対して，5種類の溶接入熱400，600，800，1200，1600

Fig. 10 Finite element model used in numerical analysis.

Table 3 Welding conditions in numerical analysis.

		Weld heat input, Q_{net} (J/mm)				
		400	600	800	1200	1600
Plate thickness, h (mm)	6	○	○	○	○	○
	9	○	○	○	○	○
	12	○	○	○	○	○
	15	○	○	○	○	○
	18	○	○	○	○	○

(J/mm)を適当に組み合わせたものであり，Table 3に示す計21条件である．冷却条件に関しては，前章の冷却モデルをそのまま用いており，冷却位置に関しては，各々の溶接入熱条件における熱源後方の力学的溶融長さから10 mm程度大きい条件とした．

5.3 水冷法による角変形低減効果に及ぼす溶接入熱条件の影響

数値解析結果として得られた溶接線方向中央部における角変形量を，入熱パラメータ Q_{net}/h^2 によって整理したものをFig. 11 (a)に示す．図には，冷却を伴わない通常溶接の場合（図中：conventional welding）と，冷却を行った場合（図中：additional cooling）を併せて示している．また，各々の溶接入熱条件において冷却によって得られた角変形の低減量を，入熱パラメータ Q_{net}/h^2 によって整理したものをFig. 11 (b)に示す．図から，冷却によって得られる角変形の低減量は，入熱パラメータ Q_{net}/h^2 の大きさに対して単調に大きくなる傾向を示し，入熱パラメータ Q_{net}/h^2 が大き

(a) Arrangement of angular distortion by heat input parameter

(b) Arrangement of reduction of angular distortion by heat input parameter

Fig. 11 Effect of additional cooling on angular distortion and its reduction.

い条件範囲において、冷却による角変形の低減効果が得られ易いといえる。

以上から、水冷などを用いた冷却による溶接変形低減手法は、板厚が2, 3mm程度までの薄板の溶接時に生じる大きな撓みを軽減する方法として既に一部で実用化がなされているが、角変形の低減を目的とする場合には、溶接入熱にも影響されるものの、例えば、板厚6mm程度よりも大きい中厚板に対しても適用できる可能性が示された。

6. 結 論

本報では、既報で示した変形低減に有効な後方冷却位置に関する指針に従って、実際に水冷法を用いて溶接実験を行い、角変形の低減効果に関する検討を行った。また、数値解析を用いて、より広範囲での溶接入熱条件における本水冷法の角変形低減に対する有用性に関して検討を加えた。以下に得られた結論を示す。

- (1) 水冷法を用いて後方冷却による角変形の低減効果に関して検討を行った結果、冷却位置を熱源後方の力学的溶融域の少し外側まで近づけることで、より効果的に変形量を低減できた。本実験の条件においては、冷却によって4割程度の変形量の低減が可能であった。
- (2) より広範囲での溶接入熱条件において、水冷法によって得られる角変形低減効果に関して検討した結果、冷却による低減量は入熱パラメータ Q_{net} / h^2 が大きくなるに従って単調増加する傾向を示すことが分かった。

参 考 文 献

- 1) K. Satoh, Y. Ueda and T. Fujimoto: Welding Distortion and Residual Stress, SANPO PUBLICATIONS (1979). (in Japanese)

- 2) K. Satoh, S. Matsui, K. Terai and Y. Iwamura: Water-cooling Effect on Angular Distortion caused by the Process of Line Heating in Steel Plates, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 126 (1969), 445-458. (in Japanese)
- 3) Q. Guan, C. X. Zhang and C. Q. Li: Dynamic Control of Welding Distortion by Moving Spot Heat Sink, Welding in the World, 33-4 (1994), 308-312.
- 4) Q. Guan: A Survey of Development in Welding Stress and Distortion Controlling in Aerospace Manufacturing Engineering in China: IIW Doc. X-1413-98, (1998).
- 5) E. M. Van Der Aa, M. J. Hermens and I. M. Rechardson: Conceptual Model for Stress and Strain Development during Welding with Trailing Heat Sink, Science and Technology of Welding and Joining, 11-4 (2006), 488-495.
- 6) S. Kirihaara, K. Imai, I. Masaoka and R. Sasaki: Mitigation of Residual Stress and Sensitization of SUS304 Pipe Weldment with Inside Water Cooling Method, Journal of the Japan Welding Society, 48-10 (1979), 756-762. (in Japanese)
- 7) Y. Ueda, K. Nakacho, T. Shimizu and K. Okubo: Residual Stresses and Their Mechanisms of Production at Circumferential Weld by Heat-Sink Welding, Journal of the Japan Welding Society, 52-2 (1983), 90-97. (in Japanese)
- 8) S. Okano, M. Mochizuki and M. Toyoda: Study on Angular Distortion Reduction by Temperature Distribution Control Using Back Heating Source, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 25-1 (2007), 95-105. (in Japanese)
- 9) S. Okano, M. Mochizuki and M. Toyoda: Effect of Welding Conditions on Reduction of Angular Distortion by In-Process Control Welding using Back Heating Source, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 27-2, (2009) 231s-234s.
- 10) S. Okano, M. Mochizuki and M. Toyoda: Weld Residual Distortion Produced due to Locally Cooled Temperature Distribution and Its Reduction Effect, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 28-1, (2010) 72-79. (in Japanese)
- 11) J. Goldak, M. Bibby, J. Moore, R. House and B. Panel: Computer Modeling of Heat Flow in Welds, Metallurgical Transactions B, 17B (1986) 587-600.