

レーザー溶接におけるプロセス内追従冷却の溶接変形低減に関する研究

日大生産工(非常勤) ○長谷川 利之 日大生産工 大久保 通則
 菊川工業株式会社 高松 良平 川上 十伍

1 緒言

溶接加工の過程で発生する溶接変形とその低減は工業的に最も重要な技術課題の1つであり、建築構造物やそれに関連する建築物向エクステリア・インテリア金属製品の溶接施工においても、近年増大しつつある高意匠性要求や平坦度・寸法・形状などの製品品質の高度化と相まって、その技術進歩への期待はますます高まってきている。

従来から工業的な溶接加工の主流であるアーク溶接(例えばティグ溶接)では、その低い作業効率や比較的高入熱での溶接により発生した変形を修正するために、生産の最終段階で追加仕上げ工程(例えばプレス機器を使用した溶接変形の機械的な矯正作業)が余儀なくされる等の様々な問題があり、その結果として製品の生産性や製造コスト面での経済的課題を抱えていた。

これらの課題に対応するため、従来溶接法における最適溶接条件に関する数々の研究と並行して新しい溶接法に関する研究もなされてきた。すなわち、アーク溶接に比較しより低入熱での溶接と高速溶接が可能なレーザー溶接の適用が各方面で研究されてきたが、近年のレーザー機器やその技術の進歩に伴い、自動車や造船などの産業分野の一部では既に工業的に実用化に至った例も報告されてきている。さらにレーザー溶接の中でもとりわけ高いエネルギー密度と大きな焦点深度を有し、より狭いビード幅とより大きな溶込み深さの獲得が可能なシングルモードファイバーレーザー溶接も注目されてきているが、まだ実用化の段階に至ったという報告例はない。

溶接変形の低減の方策としては、上述した溶接条件や溶接法の最適化研究以外にも、溶接プロセス内での積極的な変形制御に関する試みとして、溶接熱源以外の複数熱源の使用や溶接に追従した冷却(吸熱)などによる溶接変形低減に関する研究も報告されている^{1)~4)}。しかし、こうした溶接プロセス内の変形制御に関する研究は少なく、特にレーザー溶接に関わるものはほとんどなされていない^{5)~9)}。

本研究では、薄板を主体とした客先仕様の厳しい建築構造物の最適生産を想定し、溶接変形発生の中で現在最も有利な溶接法と考えられるシングルモードファイバーレーザー溶接を使用し、さらに重畳した変形低減効果が期待できる溶接プロセス内での温度制御技術にも注目し、溶接後の追従冷却を主体とした一連の温度制御試験を実施した。

本稿ではレーザー溶接後の追従冷却による溶接変形低減の効果とその低減メカニズムについて報告する。

2 供試材および実験方法

2-1 供試材

本研究では市販のオーステナイト系ステンレス圧延薄鋼板(JIS G4304 SUS304)で板厚 1, 1.5, 3mm のものを使用し、幅 150mm で長さ 1000mm の寸法に切断し供試材とした。

2-2 実験方法

3kW シングルモードファイバーレーザー溶接機を使用し、出力範囲 0.5 から 1kW、溶接速度 1.2 から 5m/min(計算溶接入熱 0.8 から 3.35kJ/mm)で突合せ溶接し、シールドガスにはアルゴンを使用した。

プロセス内追従冷却試験の概念図を Fig.1 に示す。冷却トーチを溶接トーチに同期運動させて、その後方に配置し、それぞれ上面冷却と下面冷却の2通りの方法で実施した。冷却トーチ位置は、下面冷却については溶融池を避けるため溶接点から 10mm 後方とし、上面冷却についてはレーザートーチとシールドガスへの冷却材の干渉を避けるため溶接点から 20mm 後方とした。

冷却トーチの先端ノズルは本レーザー溶接で得られるビード幅の実績を考慮して 10mm 径のものを使用し、冷却材には不活性の Ar ガス、CO₂ ガス、水と圧縮空気の混合物であるミスト水を使用した。

溶接ならびに追従冷却中の試験材の温度と長手方向ひずみを溶接線の長手方向の中央位置で測定した。温度測定は溶接部近傍の 4 点(溶接部から 1, 3, 5, 10mm 位置)に K 型熱電対を、ひずみ測定は 1 点(溶接部から 3mm 位置)にストレインゲージを供試材の表面に貼付けて行った。

溶接ならびに冷却後の試験材の形状変化は非接触式レーザーセンサーを用いて、いずれも 40mm 格子にて、長手方向 25 点、横方向 8 点の合計 200 点測定した。

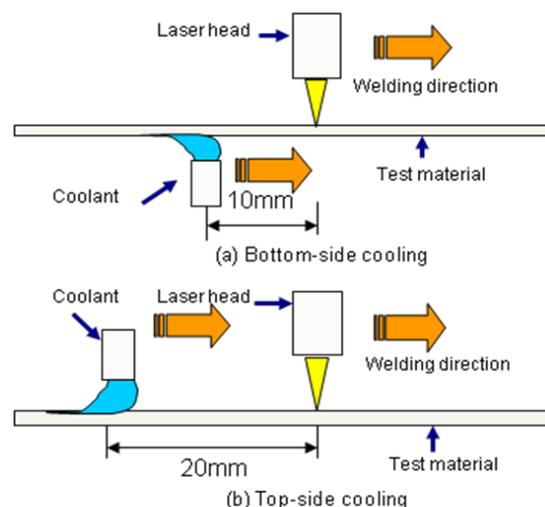


Fig.1 Schematic illustrations of cooling method.

Studies on Welding Deformation Reduction by In-process Additional Cooling in Laser Welding

Toshiyuki HASEGAWA, Michinori OKUBO, Ryouhei Takamatsu and Tohgo Kawakami

3 実験結果および考察

3-1 溶接変形結果

本研究で最も厚い板厚 3mm の試験材では、いずれの溶接入熱条件でもその溶接変形量は比較的小さく、追従冷却による低減効果もいずれの冷却方法によっても比較的小さかった。板厚が薄くなるに伴い、また入熱が大きくなるに従い、溶接変形とその低減効果も大きくなり、本研究で最も薄い板厚 1mm の試験材ではこの傾向が最も顕著に観察された。

Fig.2 は数々の入熱での溶接および数々の冷却材での冷却による板厚 1mm の試験材における溶接後の形状変化の例を示す。図に示す通り、冷却なしの試験材ではより大きな溶接変形が観察され、入熱の増加に伴いねじれと 2 山型の座屈変形を伴った大きな溶接変形が観察された。追従冷却を施すと溶接変形は減少し、特にミスト水での冷却により座屈現象が消失した。さらに下面冷却と上面冷却を比較すると、溶接変形の軽減効果は上面冷却の方がいずれの入熱条件、冷却材でも大きかった。

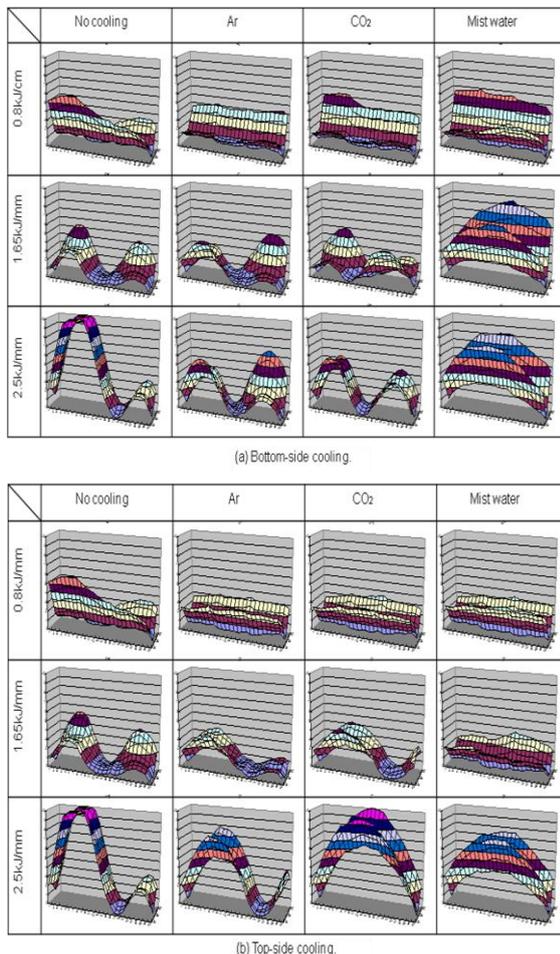


Fig.2 3-dimensional configurations of test specimens after welding (1mm-thickness, One scale of vertical axis shows 1mm displacement.)

Fig.3 は板厚 1mm の試験材におけるミスト水による上面冷却での変位計測結果の例であり横方向の角変形と長手方向の縦曲りおよびその両者の合計値を示す。ここで、角変形は長手方向 25 点で計測した変

位のうちの最大値を、縦曲りは溶接線位置でのたわみ量の最大値をその試験水準での代表値としてデータ処理したものであり、複数の変曲点を有する場合はそれぞれの合計値とした。図から追従冷却による縦曲りの低減効果が明瞭に観察され、角変形との合計値からも低減効果は観察されるが、角変形については必ずしもその効果は明瞭ではない。

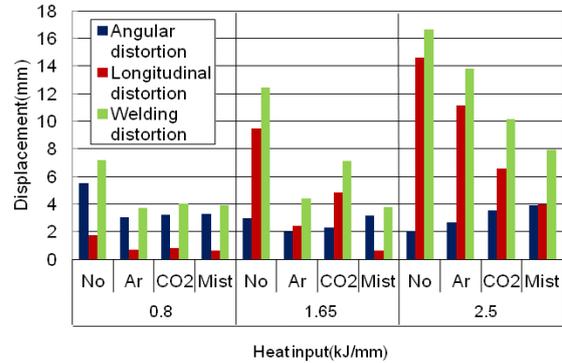


Fig.3 Displacement measurement results (1mm thick, Top-side cooling).

3-2 温度測定結果

各種試験材で実施した温度測定結果の代表例を Fig.4 に示す。図は板厚 1mm の試験材の上面冷却における溶接部から 3mm 位置での最高到達温度の測定結果を示すが、最高到達温度は入熱の増大に伴い上昇し、いずれの冷却条件においても明瞭な冷却効果が観察され、その効果の程度はミスト水の場合が最も顕著であった。

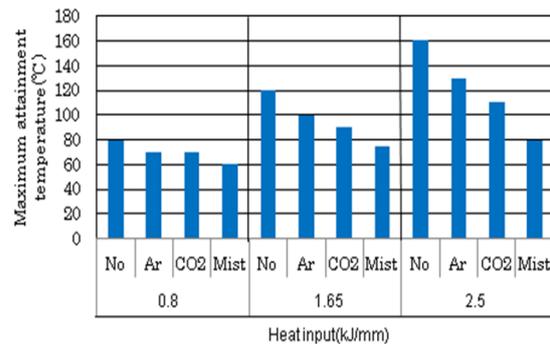


Fig.4 Temperature measurement results (1mm thick, Top-side cooling).

追従冷却による試験材の冷却効果は、溶接により加熱された試験材と冷却材との間での熱伝達による熱交換の現象と捉えることができるが、この熱伝達の度合いは冷却材の比熱が大きい程大きくなると考えられるので、Ar, CO₂, 水の定圧比熱(常圧, 室温)がそれぞれ 0.523, 0.819, 4.182 kJ/kg·Kであることを考慮するとこの結果は極めて妥当なものといえる。

Fig.3 と Fig.4 の 2 つの計測結果を比較してみると、溶接変形低減の程度と最高到達温度低下の程度は良く対応したものになっている。そこで最高到達温度と溶接変形との関係を Fig.5 のようにプロットしてみると、縦曲りは温度上昇に比例して増加することから、溶接変形の低減効果は最高到達温度の低下

によるものであると示唆されるが、角変形個別では明瞭な相関関係は見いだせなかった。

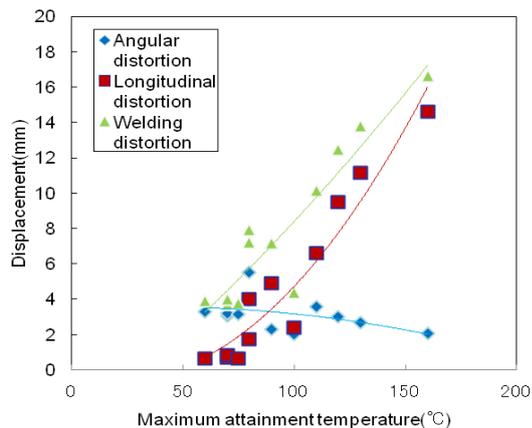


Fig.5 Relations between temperature and displacement(1mm thick, Top-side cooling).

3-3 考察

追従冷却による溶接変形の低減効果を考察するため、追従冷却による明瞭な溶接変形低減効果が観察された上面冷却における3種類の板厚における全て計測結果に対し、従来から試験材の板厚を考慮に入れた溶接入熱指標として提案されている入熱パラメーター(Q/h^2 , Q : 入熱, h : 板厚)を使用して縦曲がりおよび角変形との関係をそれぞれ個別に整理した。その結果、Fig.3とFig.4と同様に、入熱パラメーターと縦曲がりの明瞭な関係が観察されたが、角変形については、明瞭な相関関係は見いだせなかった。

そこで、上述した溶接変形の計測値の整理だけでなく、変形の形態、特に座屈変形の発生挙動に注目して考察した。

すなわち、一般的に薄板溶接の場合には、溶接線方向に大きな引張残留応力が発生しその大きさは材料の降伏応力と同等もしくはそれ以上となるが、溶接線に垂直な方向の圧縮残留応力と釣合いを保っている。またより板厚が薄い場合には剛性が小さいことから、上の釣合いが崩れることで波うちを伴う座屈変形が発生しやすくなる。

本研究においても、最も薄い板厚1mmの試験材の高入熱条件下では、溶接ままおよびガスによる冷却ではFig.6に示すような溶接長手方向のほぼ中間地点に変位変曲を有する座屈現象が観察されたが、ミスト水冷却では上面下面のいずれの冷却条件下でも座屈現象は観察されなかった。また、座屈の観察された試験材のストレインゲージ法による溶接線方向の引張ひずみは1100から1500 μ の高い計測値を示したが、この値はフックの法則から応力換算(ヤング率:200GPa)すると220から300MPaであることから、座屈変形の発生は供試材が降伏応力(265MPa)を超え、塑性ひずみが残留した結果と考えられる。またこの変曲域近傍では角変形の形状は下に凸から上に凸に変化したことから、いったん座屈変形が発生すると同時に溶接線に直角方向の圧縮応力が逆に引張応力に転じ、その絶対値は結果としてより小さい値に変化したものと思われる。

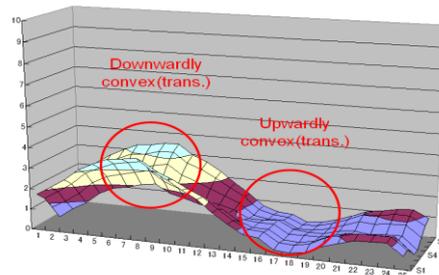


Fig.6 Close-up example of 3-dimensional configuration with buckling deformation.

それゆえ、座屈変形が発生した試験材では完全に冷却された後に計測された最終的な見掛けの角変形量は、却って追従冷却により座屈の発生を抑制した試験材のそれより小さな値を示したものと思われる。

追従冷却による溶接変形の低減効果をさらに考察するため、試験材溶接部の断面マクロ組織試験も実施しビード溶込形状の変化を観察した。Fig.7は追従冷却による溶接変形低減効果が最も顕著だった板厚1mmの上面冷却試験材の代表例を溶接まま試験材と対比して示した。図から、冷却を施した面である追従冷却材の表ビード幅は溶接まま材に比べ減少しており、板厚方向の中立軸を境とする表面側および裏面側の溶込み面積の比率に注目してみると、その比率の差の減少も観察される。Fig.8には本断面マクロ試験から得られた結果から算出した上面側溶込面積の全溶込面積に対する比の変化を示した。溶接まま材ではその指標は約6割程度の数値であり上面側への入熱が主体となっているが、上面冷却材では特に高入熱条件下では上面側と裏面側の入熱がほぼ等しくなる5割に近い数値となっている。

一般的に溶融溶接により得られる溶接ビードは溶接トーチ側である上面側の入熱が裏面側の入熱より大きいとため上面側溶込みがより大きなビード形状となるが、本試験で観察されたこれらの傾向は追従冷却による表面側および裏面側の入熱バランスの改善効果を示しており、角変形量低減に対し有利に作用したことを示唆している。

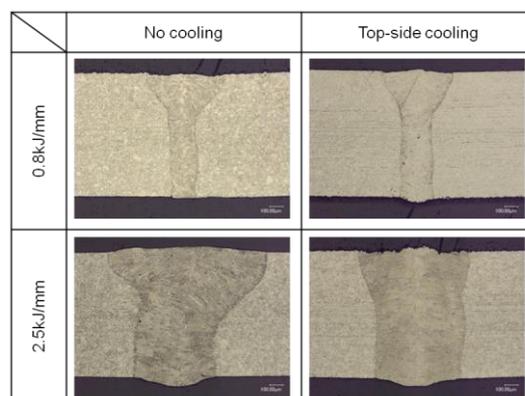


Fig.7 Cross-sectional configurations of welds (1mm thick, Mist-water cooling).

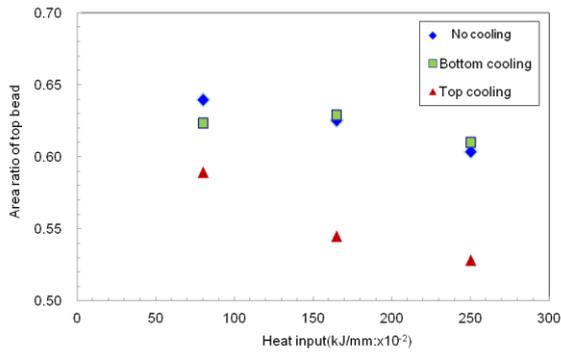


Fig.8 Bead configuration changes by additional cooling (1mm thick, Mist-water cooling).

4 結論

薄板を主体とする建築構造物の施工における溶接変形を低減するため、極低入熱を特徴とするシングルモードファイバーレーザー溶接を使用して数々の溶接プロセス内での追従冷却試験を実施し以下に示す知見を得た。

- 1) 溶接プロセス内での追従冷却は溶接変形低減に対し大きな効果を有し、その効果の程度はミスト水による溶接後方での上面冷却が最も顕著であった。
- 2) この溶接変形低減効果の基本は溶接直後の追従冷却による試験材の最高到達温度の低下によるものであり、その効果の程度は溶接入熱が高い条件下でより大きな効果が観察された。
- 3) この溶接変形低減効果は、溶接変形量計測結果の範囲では縦曲り変形で顕著に観察され、角変形では明瞭には観察されなかったが、溶接部断面溶込形状のマクロ観察結果からは上面冷却による試験材板厚方向の入熱バランスの均等化の傾向が観察されたことにより、角変形における有効性も示唆された。
- 4) 高入熱条件下では溶接ままおよび一部ガスによる追従冷却材では座屈変形が観察されたが、ミスト水による追従冷却材では上面冷却および下面冷却のいずれの条件下でも座屈変形は発生しなかった。座屈変形の発生は降伏応力を超える高い引張応力による塑性ひずみの残留によるものであり、この座屈現象の発生により角変形量が変化すること、座屈の発生を抑制した冷却材の角変形量が溶接まま材より大きな数値を示す場合があることもわかった。

「参考文献」

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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)

- 4) S. Okano, M. Mochizuki and M. Toyoda: Weld Residual Distortion Produced due to Locally Cooled Temperature Distribution and Its Reduction Effect, *Journal of the Japan Welding Society*, 28-1(2010), 72-79. (in Japanese)
- 5) R. Takamatsu, T. Kawakami, M. Okubo and T. Hasegawa. Preprints of the national meeting of Japan Welding Society, 88 (2011), 107. (in Japanese)
- 6) R. Takamatsu, T. Kawakami, M. Okubo and T. Hasegawa. Preprints of the national meeting of the Japan Welding Society, 89 (2011), 394. (in Japanese)
- 7) R. Takamatsu, T. Kawakami, M. Mochizuki, M. Okubo and T. Hasegawa. Preprints of the national meeting of the Japan Welding Society, 90 (2012), 407. (in Japanese)
- 8) T. Hasegawa, M. Okubo, R. Takamatsu, T. Kawakami and Y. Utsuno: Application of Single Mode Fiber Laser Welding and Temperature Control Technology to Architectural Structures and Metal Products of Thin Sheets, *IIW Doc. IV-1127-13* (2013).
- 9) 長谷川, 大久保, 高松, 川上, 宇津野: 薄板建築構造物および金属製品における極低歪レーザー溶接技術の開発, 溶接学会第103回軽構造接合加工研究員会, (2013), MP-547-2013. (in Japanese)