レーザを用いたすみ肉溶接で生じる溶接変形・残留応力の特徴と 高精度予測の一般性の検証*

猪瀬 幸太郎**, 李 在翼***, 中西 保正**, 金 裕哲***

Characteristics of welding distortion/residual stress generated by fillet welding
with laser beam and verification of generality of its high accurate prediction *

by INOSE Koutarou**, LEE Jae Yik***, NAKANISHI Yasumasa** and KIM You-Chul***

It was found that the characteristics of welding distortion and residual stress generated by laser beam welding had the same tendency as ones by arc welding but that the absolute value was totally small. Moreover, nevertheless the process of laser beam welding is quite different from that of arc welding, the validity and generality of the dominant factors to predict high accuracy welding distortion and residual stress generated by welding could be verified by the high accurate prediction of welding distortion and residual stress which had been proposed base on arc welding. Inherent force was proposed as a parameter which could indicate the magnitude of compressive residual stress, which might influence the load-carrying capacity. Although inherent forces with laser beam welding was 40% that of arc welding, it was found that control of welding heat input was important so as to improve the load-carrying capacity.

Key Words: Laser welding, Welding distortion, Residual stress, Digital photogrammetry, Production mechanism, Inherent force

1. 緒 言

鋼構造物の製作に際し、溶接が多用されるが、その理由として継手が単純であることや継手効率が低いなどの、様々な利点と共に、設計の自由度が高いことが考えられる。その一方、設計者は溶接変形や残留応力に起因する様々な問題への対応も求められる。溶接変形は予測と制御が難しいことから溶接部材の精度が低下し、場合によっては作業効率が悪化する。また、溶接残留応力は継手部の応力集中とともに、溶接継手の疲労強度を損なう主要因子とも考えられている。さらに、溶接構造部材の圧縮耐力は初期たわみ（初期変形）と溶接残留応力によって低下することが懸念され、設計上の耐力は理論値よりも低く規定されている¹⁾。このような背景のもと、溶接入熱が低いレーザ溶接は変形や残留応力が低減できる溶接技術として大いに期待されている。しかし、レーザ溶接を用いることによって得られる効果を設計に反映するためには、変形や残留応力が小さくなることを確認すると共に、その特徴を明確にしておく必要がある。

本研究では、レーザを用いた溶接施工（LBW）を行い、アーク溶接（GMAW）で生じる変形や残留応力との比較を行う。また、レーザ溶接を対象とした数値シミュレシ

ンを実施し、著者らがこれまで提案してきた溶接面外変形高精度予測における正当性と一般性を検証する²⁾。さらに、残留応力成分のなかで圧縮部材の耐荷力低下の主要因子である溶接線方向の圧縮残留応力³⁾に着目し、レーザ溶接の適用によってこれがどの程度低減されるかを考察する。

2. 実験および実験のシミュレーション

2.1 溶接施工実験

本実験で用いた供試体形状を Fig. 1 に、寸法諸元を Table 1 に示す。実験では正方形のスキンプレートにリブを溶接し、溶接施工中の温度測定と、溶接によって生じた溶接変形、

Fig. 1 Coordinate system and model size.

*受付日 平成19年10月30日 受理日 平成19年1月7日

**正 員 ㈱IHI Member, IHI Corporation

***正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Table 1 Size of experimental model

	Skin plate			Rib plate			Welding	
	Width [mm]	Length [mm]	Thickness [mm]	Width [mm]	Length [mm]	Thickness [mm]	Process	Heat input [J/mm]
Model A	600	600	12	140	600	12	LBW	480
Model B	600	600	12	140	600	12	GMAW	1400

Fig. 2 Preparation for Laser beam welding work

Fig. 3 (a) Macrograph of welded joints (LBW)

Fig. 3 (b) Macrograph of welded joints (GMAW)

Fig. 4 Temperature history of LBW and GMAW

残留応力を計測する。溶接施工はLD励起YAGレーザ（出力5.5kW）を熱源とするレーザ溶接と、その比較としてのアーク溶接の2種類とを行っている。実験状況をFig. 2に示す。溶接角変形は溶込み形状の影響を強く受けることから、本実験では溶接条件や溶接姿勢を数値化して管理し、さらに溶接作業はロボットを用いることで溶込み形状の再現性を確保した。さらに実験完了後には継手のマクロ観察を行い、実際の溶け込み形状と実験前に予測したねらい形状との整合状況を確認した。継手のマクロ写真をFig. 3に示す。レーザ溶接はアーク溶接と比べ入熱範囲が狭く、溶接変形や残留応力の低減が期待できることが見て取れる。温度計測結果の例としてスキンプレート裏面リブ直下の温度

Fig. 5(a) Deformation by LBW.

Fig. 5(b) Deformation by GMAW

履歴をFig. 4に示す。レーザ溶接における冷却速度は速く、スキンプレート裏面ではアーク溶接の約2倍であることも特徴として見て取れる。また裏面におけるレーザ溶接供試体の最高到達温度はアーク溶接のそれよりも低い。

供試体の形状はデジタル写真計測を用いて計測した³⁾。本計測はFig. 1に示す供試体の計測点にターゲットを設置し、デジタルカメラによって撮影した画像を解析して計測点の3次元座標を算出する。本実験では①仮組後、②溶接施工前、③溶接完了後、の各施工段階において形状計測を行った。一例として、レーザ溶接供試体とアーク溶接供試体の溶接完了後の形状をFig. 5に示す。レーザ溶接供試体、アーク溶接供試体とも溶接変形は角変形が大きく、これと比較すると縦曲りやねじりが小さいなど定性的には同じ形状に変形することが分かる。残留応力は供試体表面と裏面の値を応力弛緩法によって測定した。本実験では供試体を2分する溶接線直角方向ラインに着目し、供試体の表裏あわせて20点測定した。

2.2 熱弾塑性解析による実験のシミュレーション

本研究では実験と平行し、熱弾塑性解析により実験を忠実にシミュレーションした。解析モデルをFig. 6に示す。用いた要素は3次元アイソパラメトリック要素であり、溶接金属部はFig. 7に示すように継手マクロ観察で得た溶込み形状を忠実にモデル化した³⁾。熱伝導解析では、この溶接金属部に相当する要素に移動熱源を定義し、施工中の供試体における温度履歴を算出している。レーザ溶接を対象とした温度履歴の解析値と実験値との比較をFig. 8に示す。

熱効率を74.3%とし、解析した温度履歴は実験値とよく一致した。よって溶接変形と残留応力の算出のための熱弾塑性応力解析はここで得た温度履歴を用いて行った。熱伝導解析および熱弾塑性解析で用いたプログラムは文献[2]においてその妥当性が確認されている。また温度に依存する物理定数や機械的諸性質の定義、および降伏応力と相当応力の整合確認に代表される解析上の留意点など、全てこの文献に準拠した。

Fig. 6 FEM grid (GMAW)

Fig. 7 Macrograph and FEM grid (LBW)

Fig. 8(a) Temperature due to 1st pass welding (LBW)

Fig. 8(b) Temperature due to 2nd pass welding (LBW)

3. レーザ溶接で生じる溶接変形の特徴

3.1 レーザ溶接およびアーク溶接で生じる溶接変形の比較

溶接変形は複雑な3次元曲面であるため、レーザ溶接とアーク溶接の比較は、角変形、縦曲りなど変形要素毎に定義した局部座標系を用いて行った⁴⁾。角変形比較をFig. 9に示す。角変形は供試体の左端を原点とし、原点と供試体の右端とを結ぶ直線を横軸とする局部座標系を用いて表現した。溶接始末端間の5箇所を計測した結果、それらの値には有意差がなかったため、供試体の中央の値を代表値として評価を行った。図からはレーザ溶接の角変形はアーク溶接の半分程度であることが見て取れる。またレーザ溶接を対象とした溶接角変形の解析結果は、アーク溶接の場合と同様、実験値と良く一致していることも分かる。これは前述した解析方法、すなわち継手の溶込み形状を忠実にモデル化し、溶接金属部に相当する領域に入熱するFEM解析によってレーザ溶接で生じる角変形を精度よく予測できることを示している。さらにレーザ溶接を対象とした解析においてもアーク溶接の場合と同様、降伏応力と相当応力の整合確認は必須条件であることも明らかである。以上の知見は、著者らがアーク溶接において提案した溶接面外変形の高精度予測の正当性と一般性が確認された事を示している。

今回の実験結果と著者らがこれまで実施した溶接変形実験との比較をFig. 10に示す⁴⁾。比較に用いた供試体の外形寸法は本実験の供試体と同一であるが、板厚と溶接脚長が異なることから、それぞれの角変形を入熱パラメータによって整理した⁵⁾。アーク溶接を用いた施工においても、入熱

Fig. 9 Angular distortion

Fig. 10 Relation between heat input parameter and angular distortion

を制限することで、角変形を低減することは可能であると言える。しかし、アーク溶接では、入熱量の低下と共に脚長が減少することから、レーザ溶接と同レベルまで入熱を制限すると、設計脚長 ($\sqrt{2t}$) を満たすことが出来なくなる可能性がある。一方、レーザ溶接は小入熱でありながら完全溶込み相当の継手を施工できるため、強度上の優位性は明らかである。溶接縦曲り変形の比較を Fig. 11 に示す。縦曲り変形の場合も角変形と同様、供試体の端部を規準とした局部座標系によって表現した。レーザ溶接、アーク溶接共に縦曲り変形は極めて小さく、変形の特徴や大きさの差異は明確ではない。

Fig. 11 Longitudinal bending distortion

Fig. 12(a) Transition of displacement and temperature history in fillet welding (LBW)

Fig. 12(b) Transition of displacement and temperature history in fillet welding (GMAW)

3.2 レーザ溶接で生じる角変形の生成機構

レーザ溶接、アーク溶接それぞれで生じる溶接角変形の生成過程を Fig. 12 に示す。角変形が生じる過程は、着目位置に溶接金属が置かれてスキンプレート裏面の温度が上昇を開始してから最高温度に到達するまでと（第1段階、図中 (1)）、②スキンプレート裏面が温度降下を開始してから表裏の温度差がなくなるまで（第2段階、図中 (2)）の2段階に分けること出来る。第1段階では溶接金属部の温度は概ね 700°C 以上を示しており、強度を有しない力学的熔融状態にあるため、角変形の生成要因は溶接金属の収縮よりもスキンプレート裏面の熱膨張によって生成されと考えられる。一方、第2段階ではスキンプレート表裏面とも冷却過程にあるものの、表面（溶接金属部）の温度は裏面よりも高いことから、その熱収縮量の違いによって角変形が生成される。これら角変形の生成機構はレーザ溶接、アーク溶接ともに共通した現象であった。しかしレーザ溶接では、スキンプレート裏面の最高到達温度が低く、かつ第1段階（スキンプレート裏面側の熱膨張）で発生する角変形の割合も小さいことが見て取れる（図中 (a), (b)）。後者は投入される熱量の絶対量が少ない事と共に、角変形がアーク溶接よりも小さくなる要因として考えることが出来る。

4. レーザ溶接で生じる残留応力の性状

4.1 レーザ溶接とアーク溶接の残留応力の比較

溶接線方向の残留応力成分 σ_x の板幅方向分布を Fig. 13 に示す。実験値と解析値とを比較すると、レーザ溶接供試体の端部付近では解析値は実験値よりも小さい値を示している。しかしその差異は最大でも降伏応力の 10% ($0.1\sigma_Y$) 以下であり、応力弛緩法を用いた実験としては解析と概ね一致したと見なすことができる。溶接方法の比較からはレーザ溶接、アーク溶接ともに溶接線近傍には引張残留応力が、その外側にはこれと自己平衡する圧縮残留応力が分布する事が見て取れる。これはレーザ溶接とアーク溶接の残留応力生成機構が基本的に同じであることを示唆している。ただしレーザ溶接で生ずる残留応力はアーク溶接よりも引張残留応力の生成領域幅が狭く、圧縮残留応力の値が小さい。溶接線方向の圧縮残留応力は初期たわみと共に、溶接構造部材の座屈強度を決定する主要因子であるため、設計基準では、その大きさを母材降伏応力の 30% ($0.3\sigma_Y$) と想定し、設計耐力が規定されている⁹⁾。しかし、ここに示すようにレーザ溶接で生じた圧縮残留応力はこの想定値よりも小さい。溶接線直角方向の残留応力成分 σ_y の板幅方向分布を Fig. 14 に示す。この図より、溶接線直角方向の残留応力成分については実験値と解析値とは一致していることが認められる。またレーザ溶接とアーク溶接の残留応力は同じ分布状態を示し、その値は溶接金属部を除くとレーザ溶接で生ずる残

Fig. 13(a) Distribution of residual stress component in longitudinal direction on obverse side of specimen

Fig. 13(b) Distribution of residual stress component in longitudinal direction on reverse side of specimen

Fig. 14(a) Distribution of residual stress component in transverse direction on obverse side of specimen

Fig. 14(b) Distribution of residual stress component in transverse direction on reverse side of specimen

留応力のほうがアーク溶接のそれよりも小さいことが読み取れる。溶接線近傍の局所的な溶接線直角方向の残留応力成分は、溶接継手の疲労き裂発生に及ぼす影響が大きいことから、レーザ溶接の適用によって継手の疲労強度はなんらかの影響を受けるものと考えられる。

4.2 レーザ溶接を適用する際の留意点

圧縮残留応力の部材軸方向成分（溶接方向成分）を低減すると、構造部材の圧縮耐力が向上することは数値解析を用いた研究で既に示されている¹⁾。またレーザ溶接を適用した部材では圧縮残留応力が小さくなること、圧縮耐力が向上することが実験的に確認されている⁷⁾。ここではレーザ溶接を適用する際の留意点を圧縮残留応力の溶接線方向成分の大きさを基本として考察する。

アーク溶接を対象とした研究では、予め求めた固有ひずみを用いた弾性解析によって溶接残留応力を高い精度で予測できることが示されている⁸⁾。

$$\{\hat{\epsilon}\} = [H^*] \{\hat{\epsilon}^*\} \quad \dots \quad (1)$$

$$\{\hat{\sigma}\} = [D] \{\hat{\epsilon}\} \quad \dots \quad (2)$$

ここに、

$\{\hat{\epsilon}\}$ ；弾性ひずみの最確値、 $\{\hat{\epsilon}^*\}$ ；固有ひずみの最確値

$[H^*]$ ；弾性応答マトリックス

$[D]$ ；応力-ひずみマトリックス

$\{\hat{\sigma}\}$ ；残留応力の最確値

銅種および供試体の寸法形状が同じ場合、弾性応答マトリックスと応力-ひずみマトリックスは変わらないため、残留応力の生成源である固有ひずみの分布や大きさは入熱量や溶込みの範囲など溶接施工の違いによってのみ変化する。一方、溶接線方向残留応力成分 σ_x の溶接線直角方向における力の釣合に着目すると残留応力の生成源（以下、固有力と呼ぶ）は溶接部近傍にのみ存在する固有ひずみに因る。そして弾性応答マトリックスと応力-ひずみマトリックスが既知であるならば、この固有ひずみに起因する引張残留応力とこれに平衡する圧縮残留応力の生成域と大きさは一意に決定される。さらに溶接部は固有ひずみに因る引張応力場であるため、固有力（ F^* ）の大きさは圧縮力（圧縮残留応力と圧縮残留応力が生成されている要素の溶接線直角方向の断面積との積）に等しくなる。

$$F^* = \sum_{i=1}^m [D]_i \{\hat{\epsilon}_x\}_i A_{xi} \quad \dots \quad (3)$$

$$= \int \sigma_{RC} dA$$

ここに、

F^* ；固有力

A_{xi} ；圧縮残留応力が生成されている要素の溶接線直角

Fig. 15 Effect of heat input on inherent force due to laser beam welding and arc welding

方向断面積

m ；溶接線直角方向に圧縮残留応力（溶接線方向成分）が生成されている要素の総数

σ_{RC} ；圧縮残留応力

dA ；圧縮残留応力域の微小面積

本研究で対象とするレーザ溶接施工，アーク溶接施工それぞれにおける固有力を算出し，その値を比較する．また，これらの施工とは異なる溶接条件で生じる固有力を FEM 解析によって算出した．解析で用いた溶込み形状と溶接条件は文献 [9] を引用した．結果を Fig. 15 に示す．

本研究で対象とするレーザ溶接では固有力 (F^*) はアーク溶接の約 40% である．また，図からは固有力が溶接入熱とともに大きくなることも見て取れる．従ってレーザ溶接を用いた施工においても，入熱が大きい場合は固有力が大きくなり，相応の残留応力が生じることが容易に推察される．これは，レーザ溶接を適用することで圧縮残留応力を低減し，部材の耐荷力の向上させる施工では，溶接入熱の管理が必要であることを示唆している．

5. 結 言

本研究ではスキンプレートにリブを溶接するすみ肉溶接を対象に溶接実験と実験を模擬した熱弾塑性解析を実施した．レーザ溶接で生じる溶接変形と残留応力の性状を明らかにすると共に，それらをアーク溶接と比較した．得られた知見を以下にまとめる．

- 1) 今回対象とした供試体において，レーザ溶接により生成される溶接変形は角変形が卓越し，これと比較すると縦曲りとねじり変形は小さいなど，アーク溶接の場合と同じ傾向を示していた．また，アーク溶接と比較すると，レーザ溶接は角変形が小さいことや，供試体裏面の最高到達温度が低いことなどが確認された．
- 2) レーザ溶接においても，溶込み形状を正確にモデル化し，降伏条件 ($\sigma_{Mises} \leq \sigma_Y$) を厳守した熱弾塑性解析により，溶接変形を高精度に予測することができることが明

らかとなった．すなわち，レーザ溶接はアーク溶接とは全く異なるプロセスであるにもかかわらず，実験を精度よく再現しており，溶接面外変形の高精度予測における正当性と一般性が検証できた．

- 3) レーザ溶接を用いたすみ肉溶接において，角変形の生成機構はアーク溶接のそれと同じである．ただし，裏面側の最高到達温度が低いことから，角変形生成の初期段階（裏面側の熱膨張）における生成量は相対的に小さい．これは投入される熱量の絶対量が少ない事と共に，角変形がアーク溶接よりも小さくなる要因であると言える．
- 4) レーザ溶接によって生成される残留応力は，溶接金属部を除くと，溶接線方向および溶接線直角方向成分ともに，アーク溶接より小さいことが明らかになった．また，前述した熱弾塑性解析により，レーザ溶接で生じる残留応力を高精度に予測できることを確認した．
- 5) 座屈耐力に影響を及ぼす部材軸方向の圧縮残留応力の大きさを示す指標として固有力 (F^*) を提案し，その計算方法を示した．本研究においては，レーザ溶接の固有力はアーク溶接の約 40% であった．
- 6) 固有力 (F^*) は溶接入熱と共に大きくなる．よって，レーザ溶接の適用によって圧縮残留応力を低減し，耐荷力の向上を図る場合，溶接入熱の管理が重要となる．

参 考 文 献

- 1) Yuhshi FUKUMOTO, Guidelines for Stability Design of Steel Structure, October 1987.
- 2) KIM You-Chul, LEE Jae-Yik, INOSE Koutarou, The High Accurate Prediction of Welding Distortion Generated by Fillet Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.23 No.3 pp431-435, (2005).
- 3) INOSE Koutarou, IMOTO Harutaka, NAKANISHI Yasumasa, KIM You-Chul, Study for measurements of welding distortion using 3D Digital photogrammetry, Preprints of the national meeting of J.W.S. No.75 spring, (2004).
- 4) INOSE Koutarou, YAMAOKA Hiroto, NAKANISHI Yasumasa, Experimental study on minimizing welding distortion using low-transformation temperature welding wire, IIW Doc. XV-1194-05, July 2005.
- 5) TERASAKI Toshio, Domination Factors and Quantification of Welding Deformation, Journal of the Japan welding society Vol.72, No.4, (2003).
- 6) Japan Road Association Specifications for Highway Bridges, MARUZEN Co., LTD, (2002. 3).
- 7) INOSE Koutarou, NAKANISHI Yasumasa, KIM You-Chul, HIROHATA Mikihiro, Study for compressive strength of laser welded non stiffed structural member, Japan Society of Civil Engineers 2007 Annual Meeting, (2007. 9).
- 8) UEDA Yukio, KIM You-Chul, Yuan Min Gang, A prediction method of welding residual stress using source of residual stress, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.6 No.1 pp59-64, (1988).
- 9) INOSE Koutarou, NAKANISHI Yasumasa, KIM You-Chul, Effect of shape of penetration on angular distortion generated by fillet welding, Preprints of the national meeting of J.W.S. No.76 spring, (2005).