レーザを用いて製作した無補剛溶接構造部材の終局強度

Ultimate strength of non-stiffened welded structural member assembled by using laser beam

猪瀬幸太郎*, 廣畑幹人**, 中西保正***, 金 裕哲**** INOSE Koutarou, HIROHATA Mikihito, NAKANISHI Yasumasa and KIM You-Chul

*工修,IHI 主任研究員,生産技術開発部(〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番)
** 工修,大阪大学大学院,工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
***工博,IHI 理事,技術開発本部(〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番)
****工博,大阪大学 教授,接合科学研究所(〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 11-1)

Rectangular columns without stiffened rib plate were fabricated by using laser beam welding and conventional arc welding. In the case of the specimen assembled by laser beam welding, geometrical imperfection and compressive residual stress were smaller than those of the specimen assembled by arc welding. Ultimate strength of the specimen assembled by laser beam welding was larger than that assembled by arc welding. Residual compressive force (F*) was proposed as the parameter expressing the effect of the residual stress for the ultimate strength. Using the parameter, reduction of ultimate strength due to welding residual stress could be illustrated.

Key Words: Laser beam welding, Non-stiffened structural member, Load-carrying capacity, Ultimate strength キーワード: レーザ溶接, 無補剛構造部材, 耐荷力, 終局強度

1. 緒言

鋼構造物と総称される橋梁,鉄構,運搬機械および船 舶などにおいては,長大化,空間の確保,耐震性,容積 の増量など,それぞれの使用目的に応じた性能の向上や 製作・建設コストの縮減が常に求められている.このた め,材料,施工,設計などに関する数多くの研究が実施 されてきた¹⁾.なかでも溶接施工を取り扱う研究では, 溶接変形や残留応力が構造部材の精度や性能を決定す る主要因子であることを示したうえで,その低減の必要 性を指摘するものが多い.

レーザ溶接(LBW)は溶接変形が小さいため、その 適用によって部品精度の向上を図ることができる.また、 残留応力の生成機構²⁾を踏まえて考察すると、入熱量が 低く、かつその影響範囲が狭いこともその低減に有利で あると考えられる.このような理由から、鋼構造分野に おけるレーザ溶接に対する期待は大きく、造船分野では 2次部材を対象とした施工ではあるが、実機への適用が 報告されている³⁾ただし、鋼構造物の安全性に直結す る強度部材への適用については、レーザ溶接部材の性能 確証が完了しない限り、試験的なものに留まるというの が一般的な見方である.

従来のアーク溶接を用いた溶接構造物では、規格・規 準が確立されており、これに準拠して設計や施工が行わ れる限り、構造部材としての所要性能を満たしていると 見なされる 4 5. 従って既存の規格・規準を援用するこ とで、レーザ溶接を用いた部材の設計・施工の妥当性を 示すことはある程度は可能と思われる.しかし、アーク 溶接を前提として確立された規格・規準の単純適用では、 レーザ溶接の特質を活かした設計施工は望めない.特に、 初期たわみと残留応力の影響を強くうける耐荷力につ いては、その性能評価が合理性を欠くことも懸念される.

アーク溶接部材の耐荷力に関しては膨大な研究が実施されており、その成果は座屈設計ガイドラインとして 集約されている^の.

本研究では、アーク溶接を対象として得られている知 見を参考に、レーザを用いて無補剛の柱部材を設計製作 し、部材寸法精度、残留応力を検証したうえで、耐荷力 実験の結果を整理する.また弾塑性大変形解析を行い、 初期たわみが耐荷力に及ぼす影響を検証する.

2. レーザを用いた溶接供試体の製作

2.1 供試体の諸元と製作方法

本実験で用いた供試体寸法を図1に,諸元を表1に示 す. 表中の供試体寸法および各パラメータを表す記号は 文献[6]に準拠した. 用いた鋼板は板厚 6mm と 9mm の SM400 材である. フランジおよび腹板の板幅は降伏応 力を規格値(σy=240[MPa])として算出した幅厚比パ ラメータが R=1.0 となるように決定した. また供試体の 長さ(a) は板幅の2倍としている($\alpha=2$). この2種類 の板厚の供試体を、レーザ溶接、アーク溶接、それぞれ を用いた施工によって3体ずつ製作し、うち2体を耐荷 力実験に、残り1体を残留応力の測定に使用した.なお、 供試体の製作においてアーク溶接供試体の全ての工程 とレーザ溶接供試体の仮組み工程までを同じ溶接技能 者が担当した. レーザ溶接は多関節ロボットを用いて施 工した. これらは作業内容の僅かな違いによる影響を最 小限とするための配慮である.

溶接条件と継手の開先形状を表2に示す.水平下向き すみ肉溶接が基本となるアーク溶接に対し、横向き溶接 が容易に施工できるレーザ溶接では、反転作業を省略す ることができた. さらに、レーザ溶接は開先加工が不要 となり、アーク溶接と比べて、少ないパス数で製作を完 了することも可能となった.以上のように、今回製作し た供試体においては、アーク溶接よりもレーザ溶接が作 業効率の点で優れていた.

継手のマクロ写真を図2に示す. 今回の施工ではレー ザ溶接は溶加材を使用していないため, 溶接金属は極め て少ない、しかしその継手は完全溶込み溶接となってい る. 一方, アーク溶接では溶接金属の溶着量が多いばか りでなく、熱影響範囲も広い. これは板厚の薄い継手で 顕著であり、板厚 6mm の供試体では、母材板厚の半分 以上に入熱したことが見て取れる.



(a) 板厚 6mm 供試体



(b) 板厚 9mm 供試体

レーザ溶接構造供試体 図1



(a) LBW t=6mm



(d) LBW t=6mm



(b) GMAW t=6mm (1)



(e) GMAW t=9mm ①

図2 溶接継手マクロ写真



(c) GMAW t=6mm (2)



(f) GMAW t=9mm (2)

2.2 供試体の出来形精度

供試体の出来形は、鋼板の製鋼精度、材片の切断精度、 組立て精度,溶接変形などが累積することから,複雑と なる. そこで形状計測にはデジタル写真を用いた3次元 計測を利用した.この計測では、計測点(ターゲット) を貼り付けた供試体をデジタルカメラによって 20~30 枚程度撮影し、その画像データを解析することで計測点 の位置座標を取得する ".供試体の製作精度はこうして 得られた形状データを図3に示す縦方向と横方向の局部 座標に変換し評価した.

図4に縦方向の局部座標を用いた出来形を例示する. 供試体の4面の縦方向形状は正弦半波~2波が重畳した 形状となっていた. 図5に横方向の局部座標を用いて表 した出来形を示す. レーザ溶接供試体, アーク溶接供試 体共に、道路橋示方書の面外変形許容値 hw/250 (hw;

腹板), w/150 (w; リブ間隔) と比較して十分小さいこ とが見て取れる.

今回、レーザ溶接、アーク溶接では、製作精度上の顕 著な差は認められなかった. これは、今回の供試体が製 作し易い構造であったためと推察される. ただし, 残留 応力が構造強度に及ぼす影響を検証するには適してい ると言える. また、初期たわみの影響については、後述 する.

左側面

b

а



図5 供試体形状(横方向)

2.3 供試体の残留応力

図 6, 図 7 に応力弛緩法によって測定した供試体正面 と右側面の残留応力分布を示す.残留応力が引張りから 圧縮へ転じる領域を除くと,引張域(溶接線近傍),圧 縮域(板の中央部)それぞれにおいて,レーザ溶接で生 じる残留応力はアーク溶接で生じる残留応力に比べ,小 さいことが見て取れる.

図8に供試体の4側面それぞれの中央位置における圧 縮残留応力を示す.ここでは仮組み作業で発生する僅か な板曲げの影響を除くため、板表裏面の残留応力を平均 した.本供試体の角溶接は4溶接線の同時施工ではなく、 1溶接線毎の溶接であるため、4面それぞれの板の中央 位置での残留応力は異なっている.しかしこうした点を 考慮しても、レーザ溶接で生じた圧縮残留応力はアーク 溶接のそれよりも小さい.

これまで行われた溶接変形や溶接残留応力に関する 研究では、溶接入熱を下げることで変形や残留応力を低 減できることが示されている^{8~12)}.よって、レーザ溶接 の残留応力がアーク溶接よりも小さくなったのは、溶接 入熱が低いためと考えられる.従って理屈のうえでは、 アーク溶接であっても溶接入熱を低減することで、残留 応力を小さくすることは可能である.しかし、アーク溶 接では標準的な施工条件より溶接入熱を下げると、溶込 みが不足して継手強度が低下する.一方、レーザ溶接は 入熱範囲が狭く深いため、アーク溶接よりも低い溶接入 熱で十分な溶込みを得る事ができる.これは適切な入熱 の管理が前提とはなるが、レーザ溶接の適用によって、 圧縮残留応力を低減し、座屈強度を改善させる可能性を 示唆している.

圧縮残留応力の座屈強度への影響を扱った既往の研 究では、圧縮耐荷力の低下の度合いを整理する指標とし て、圧縮残留応力の最大値が用いられてきた⁶.しかし、 溶接残留応力の耐荷力への影響を論ずる場合、残留応力 の最大値のみならず、その分布も重要である.また耐荷 力への影響を論ずる指標としては応力よりも荷重、すな わち、力を用いる方がより直接的である.そこで筆者ら は後述するが、分布を考慮するため、圧縮残留応力の積 分値(以下、残留圧縮力とする)を用いることを提案す る.以下、今回提案する残留圧縮力と、これまで用いら れてきた圧縮残留応力の値との相関を検証する.

図9に供試体の正面および右側面それぞれにおける残 留圧縮力と圧縮残留応力値(板の中央位置)の相関を示 す.両者は線形関係にあり、少なくとも本研究で用いた 供試体では、耐荷力を整理する指標として、残留圧縮力、 あるいは、圧縮残留応力のどちらを用いても極端な違い は生じない.



3. 耐荷力実験

図 10 に耐荷力実験状況を示す. 実験は 10.000kN 試 験機を用い、変位制御によって圧縮荷重を載荷した 13. 実験後の供試体を図 11 に示す.供試体の座屈形状は正 弦1波が卓越したモードとなっていた.荷重-変位曲線 を図 12 に示す. 板厚 6mm の供試体においては、レー ザ溶接供試体の最高耐荷力はアーク溶接供試体より 30%程度高いことが分かる. また板厚 6mm のレーザ溶 接供試体では、耐荷力が最大値に到達した後に激減し、 最終的にはアーク溶接供試体とほぼ同じとなった。しか し、板厚9mmの供試体では、荷重-変位曲線上の有意 差はあまりない. これは残留応力の影響によるものと考 えられる. そこで図 13 に示すように供試体の最高耐荷 力を圧縮残留応力(供試体を構成する4面中央の圧縮残 留応力度の平均) によって整理した。またここでは既存 の研究結果も合わせて示している 14,15,16). 圧縮残留応力 が小さい供試体ほど最高耐荷力は高くなる傾向が認め られる.特に降伏応力で正規化した圧縮残留応力がσ Rd σy=-0.1 程度まで小さくなった板厚 6mm のレーザ溶接 供試体では、最高耐荷力は宇佐美ら、福本らが示す残留 応力が無い無補剛板と同じレベルにまで改善されてい ることが明らかになった. さらに前述した残留圧縮力に 着目した整理も行った. 文献[8]では残留応力を有する平 板の座屈荷重の最低値を以下のように示している.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 D}{b^2} k - R_c \tag{1}$$

ここに,

- P_{cr}; 平板が座屈に至るときの線荷重
- D ; 板の曲げ剛性,
- **b** ; 平板の幅
- *k* ; 座屈係数(*k* = 4)
- R。; 平板の圧縮残留応力に相当する線荷重

これを無補剛矩形断面部材に適用を拡大する.

ここで(1)式の第 1 項はオイラーの座屈強度であるため部材の局部座屈耐力は幅厚比パラメータと降伏断面力を用いて示すことができる.(1)式の第2項(R_c)に相当する断面力は、前述した残留圧縮力(F^*)となることから、局部座屈によって崩壊する無補剛断面の部材最高耐荷力は以下のように表すことができる.

$$F_{\max} \rightleftharpoons F_{cr} = F_E - F^* \tag{2}$$

$$F_E = \frac{1}{R^2} F_Y \tag{3}$$

$$F^* = \int \sigma_{RC} \cdot da \tag{4}$$

$$F_Y = \sigma_Y \cdot A \tag{5}$$

- Fmax;部材の最高耐荷力
- F*;残留圧縮力
- σ_{Rc}; E縮残留応力
- F_E;部材の局部座屈荷重 (オイラーの座屈荷重)
- F_{Y} ;降伏断面力
- σ_Y ;降伏応力
- A ;断面積
- R ;幅厚比パラメータ

式(4)を降伏断面力で正規化し、これを横軸に整理した 部材の最高耐荷力を図 14 に示す.併せて降伏断面力で 正規化した式(2)を図中に示す.本実験で用いた供試体は 板厚6mmと9mmでは降伏耐力が僅かに異なることから、 式(2)のオイラー座屈荷重はそれぞれの幅厚比パラメー タを用いて算出し、図示している(実線および破線). 実験で生じたバラツキのため定量的な一致は確認でき てはいないが、少なくとも式(2)は残留応力による最高耐 荷力の低下の度合いを良く示していると言える.また、 このバラツキの原因は、式(2)では考慮されていない初期 たわみの大きさと形状に依存するものと考えられる.



図10 圧縮耐荷力実験状況



図11 圧縮耐荷力実験後の供試体



図14 残留圧縮力が最高耐荷力に及ぼす影響

4. 初期たわみが耐荷力に及ぼす影響

耐荷力が低下する要因として,残留応力以外に初期た わみの存在がある.現実の部材製作では,初期たわみは 不可避であり,本研究における耐荷力実験においてもそ の影響が実験のバラツキとして現れている.そこで,本 実験で用いた供試体の初期たわみが面外変形および耐 荷力に及ぼす影響を検討した. 初期たわみが耐荷力に及ぼす影響を取り扱った既往 の研究では、幅厚比パラメータ R=0.7~0.9 においてそ の影響が最も大きくなることが報告されている¹⁷⁾.本研 究で用いた供試体の幅厚比は約1.1 であり、初期たわみ の影響は大きいと考えられ、わずかな形状の差異が最高 耐荷力に影響を及ぼすと推察される.

そこで、弾塑性大変形解析により、初期たわみの感度 解析を実施した.数値解析には文献[18]において精度が 確認された有限要素解析プログラムを使用した.使用要 素はシェル要素である.

解析モデルを図 15 に示す. 初期たわみ形状は実験供 試体においては正弦半波と正弦1波の重ね合わせで近似 した. なお,残留応力は考慮していない.従って解析結 果の妥当性は残留応力の影響が最も小さい板厚 6mm の レーザ溶接供試体を用いて行った.

解析値と実験値の比較を図 16 に示す. 最高耐荷力に 着目すれば解析値は実験をよく再現していると言える.



図16 解析結果と実験との比較

解析に用いた初期たわみ形状を図 17 に示す. ここで は形状を正弦半波と正弦1波の2種類とし、最大面外変 形量を板幅の1/150,1/300,1/450とした.これは鋼橋 箱桁の面外変形許容値がリブ間の1/150であること、ト ラス部材の腹板では腹板高の1/250であること、さらに 実験供試体の面外変形量が、1/384 (No.1 供試体)であ ったことを考慮したことによる. 初期たわみ量が板幅の 1/150 の場合に対し,所期たわ みが最高耐荷力に及ぼす影響を図 18 に示す.初期たわ みを正弦半波としたときの解析では正弦1波形状のとき よりも最高耐荷力が高いこと,また耐荷力が最大となる 付近において形状モードが変化していることが見て取 れる.これとは対照的に,初期たわみを正弦1波とした 解析では荷重-面外変形曲線は緩やかであり,形状モー ドも変化しない.理由としては,解析モデルのパネルの アスペクト比がα=a/b=2 であり,座屈モードが正弦 1 波のときに弾性座屈荷重が小さくなること。正弦半波モ ードから形状モードが変化する過程で余分なエネルギ が消費されることから,結果として,供試体の反力が上 昇することなど考えられる.

図 19 に初期たわみ量と最高耐荷力との関係を示す. 図中に、宇佐美らが実施した同様の解析結果も示している¹⁶.著者らの解析値と宇佐美らの解析値は概ね一致していること、板幅の 1/384 の初期たわみを有し、かつ残留応力が最も小さかった供試体(板厚 6mm、レーザ溶接施工)の実験値と解析値とがよく対応していることなど見て取れる.また、初期たわみが小さくなるに連れ最高耐荷力は正弦1波と比較して大きいことなどが見て取れる.従って、圧縮耐荷力の改善にはレーザ溶接による残留応力の低減と共に、初期たわみ形状を適切に制御することも必要と言える.



図17 解析に用いた初期たわみ形状



図18 初期たわみ形状が最高耐荷力に及ぼす影響



図19 最高耐荷力に及ぼす初期たわみの影響

5. 耐荷力評価

レーザ溶接,アーク溶接それぞれを用いて製作した無 補剛構造部材の最高耐荷力を図 20 に示す.また,溶接 技能者が同じ機材を使用して製作し,実験も同一の試験 機を用いて行ったアーク溶接構造体の最高耐荷力をも 合わせて示す¹⁹.

本報の実験供試体と同じ幅厚比パラメータ(R≒1.0) であっても、リブで補剛された構造は実験値の再現性が 極めて高い(◇および×印).また同じ無補剛の構造体 であっても、幅厚比パラメータが大きい(R≒1.4)場合 は実験再現性が高いと言える(+印).従って、今回の 実験で生じた最高耐荷力のバラツキの原因は、供試体の 製作や実験方法ではなく、前述した初期たわみ形状の違 いによる影響を強く受けたためであることがこの図か らも判断できる.また、補剛構造も含めて、レーザ溶接 を用いて製作した部材の最高耐荷力はアーク溶接を用 いた場合よりも高く、少なくとも、道路橋示方書で規定 された耐荷力曲線を設計に用いることが可能と考えら れる.さらに、初期たわみ形状の制御方法や施工管理方 法の整備が前提となるが、既存の耐荷力曲線よりも高い 強度の設計曲線を設定できる可能性を示唆している.



6. 結言

本研究で実施した実験および解析で得られた主な結 果を以下にまとめる.

- (1) レーザ溶接とアーク溶接を用いて実験供試体を製 作した.それぞれの出来形精度は高く,道路橋示方 書の変形許容値を十分満足した.
- (2) レーザ溶接を用いて製作した供試体の残留応力は 引張領域, 圧縮領域ともアーク溶接を用いた供試体 より小さい.
- (3) 残留応力が圧縮耐荷力に及ぼす影響を整理するパラメータとして残留圧縮力(圧縮残留応力の積分値)を提案した.ただし両者は相関関係が認められる.
- (4) 降伏応力で正規化した圧縮残留応力が σ k/ σ y=0.1 程度まで低減したレーザ溶接供試体では、最高耐荷 力は残留応力が無い無補剛板と同じレベルにまで 改善された.
- (5) レーザ溶接を用いることで,圧縮耐荷力の向上を図 る場合には、初期たわみの形状管理も必要である事 を確認した.
- (6) レーザ溶接を用いて製作した部材の圧縮耐荷力は 既存の設計耐荷力曲線を用いることで少なくとも 安全側の設計が可能となる.

以上のように、溶接時の入熱制限や初期たわみ形状管 理の実施が必要となるが、レーザ溶接を適用した部材で は既存の設計耐荷力曲線よりも高い強度の設計曲線を 設定できる可能性が示唆されている.

参考文献

- 1) 例えば, INOSE Koutarou, NAKANISHI Yasumasa, IMOTO Izumi: Study on Design for Extra High Strength Steels Structure, Welding in the World, Vol.47, No.3/4-2003
- 2) 猪瀬幸太郎:溶接変形と残留応力評価 応用編,溶接連合 講演会テキスト,2007,4
- Frank Roland: Latest Trends of Laser Welding in European Shipbuilding, 7th Workshop on the Ultra-Steel, 2003, 6
- 4) 船体構造強度評価のための技術指針:(財)日本海事協会,1999,12

- 5) 道路橋示方書·同解説:(社)日本道路協会,2002,3
- 6) 土木学会鋼構造委員会,座屈設計ガイドライン,丸善, 2005,10
- 7) 猪瀬幸太郎, 井本治考, 中西保正, 金 裕哲: 溶接変形の
 3 次元写真計測とその適用性, 溶接学会全国大会講演概 要, 第 75 集, 2004,9
- 渡辺正紀, 佐藤邦彦: 溶接力学とその応用,朝倉書店, 1965,12
- 9) 上田幸雄,金 裕哲,袁 敏剛,溶接残留応力の生成源を 用いた残留応力推定法,溶接学会論文集,第6巻,第1
 号, pp.59-64, 1988
- 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 構造用材料の溶接残留応力・溶 接変形におよぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌, 45-1(1976), 150-156.
- 11) (社) 溶接学会: 溶接接合便覧, 丸善株式会社, 1990.
- 12)金 裕哲,張 景皓,堀川浩甫: すみ肉溶接で生じる面 外変形・残留応力に及ぼす溶接諸条件の影響,鋼構造論 文集, 6-21(1999),77-82.
- 13) 猪瀬幸太郎,山岡弘人,中西保正,金裕哲:構造強度 部材接合におけるレーザ溶接の適用性,溶接構造シン ポジウム 2006 講演論文集,2006,11
- 14) 奈良 敬, 小島治雄, 津田 真, 小松定夫: 面内曲げと圧 縮を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究, 土木学 会論文集,第 386 号/I-8,1987,10
- Yuhshi FUKUMOTO, Yoshito ITOH: Basic compressive strength of steel plates form test data, Proc. of JSCE No.344/I-1, 1984, 4
- 16) 宇佐美 勉, 天雲宏樹: 圧縮と曲げを受ける板要素の 極限強度と有効幅公式, 土木学会論文集, No441/I-18, 1992,1
- 17) 奈良 敬, 小松定夫: 補剛された圧縮板の極限強度曲線に関する統計学的研究, 土木学会論文集, 第 392 号/I-9,1988,4
- 18)金裕哲,廣畑幹人,河津英幸:加熱矯正された十字柱 突出板の圧縮挙動,鋼構造論文集,第13巻,第49号, pp.37-42,2006,3
- 19) 猪瀬幸太郎, 中西保正, 金 裕哲, 廣畑幹人: 圧縮部材 を模擬した構造体へのレーザ溶接の適用, 溶接学会全 国大会講演概要, 第79集, 2006, 9

(2007年9月18日受付)