レーザ・アークハイブリッド溶接を用いた荷重非伝達 HT780 T 継手疲労強度の支配因子と施工管理*

猪瀬幸太郎**, 神林 順子**, 阿部 大輔**, 松本 直幸**, 野々村将一**

Dominant factor of HT780 non-road carry T joint fatigue strength using laser arc hybrid welding and quality control*

by INOSE Koutarou**, KANBAYASHI Junko**, ABE Daisuke**, MATSUMOTO Naoyuki** and NONOMURA Shoichi**

The study intended for clarify that dominant factors of fatigue strength of T joint which welded by laser arc hybrid welding. Fatigue test has been conducted using 5 types of HT780 T joints fabricated under different welding conditions respectively. Dominant factors for fatigue strength of T joint are Frank angle and curvature at toe of T joint fillet. The fatigue strength is increasing inverse proportional to Frank angle and proportional to curvature at toe. Heat-filler feeding ratio affects Frank angle and curvature at toe. The former would be decreased and later should be increased by heat-filler feeding ratio increasing. In the study, fatigue strength of the one type of joint shall be recognized as JSSC fatigue strength class D. All types of joint in the study can be deal as at least JSSC fatigue strength class E. Frank angle of these joints are smaller than 47 degree and curvature of toe are larger than 1.3mm. These quantitative results of the study are very useful for quality control of practical fabrication. That secures the fatigue strength of Non-load carry T joint welded by laser arc hybrid welding.

Key Words: Laser arc hybrid welding, T joint, Fatigue strength, Heat-filler feeding ratio, Frank angle, Curvature at toe of fillet weld

1. 緒 言

これまで大型鋼構造物は用いる鋼材の高強度化とそれを活かす接合技術の発展によって構造物としての機能を高めてきた^{1, 2)}。現在においても高強度鋼材を用いる事への期待は大きく、その有効性を示す様々な検討が報告されている³⁾。一方、高強度鋼を効果的に用いるには課題もあり、特に溶接継手強度の確保とその合理的評価の必要性が指摘されている。例えば構造物の耐久性能において重要となる溶接継手の疲労設計であるが、日本鋼構造協会による鋼構造物の疲労設計指針・同解説（以下、JSSC 疲労設計指針とする）では溶接継手の疲労強度等級は母材の強度区分に関係なく規定されている⁴⁾。このため強度区分に関係なく動的荷重によって変動する応力範囲が制限され、軽量化や長大化といった高強度鋼材の適用効果が十分に達成できない場合がある⁵⁾。また 800 MPa 級鋼を用いた構造物の建設実績が現在ほど無い頃の設計規準のなかには疲労設計曲線を用いるのではなく、応力範囲を頻度に関係なく一律に制限する許容応力度設計もある。そこでは高強度鋼の溶接継手の許容応力範囲がより強度区分の低い鋼材より低く抑えられている⁶⁾。このように高強度鋼の性能を十分に活用するにはまず継手の疲労強度改善が重要であるが、それを合理的に評価した

設計も必要となる。さらに設計上の疲労強度を保証するための施工管理の整備も求められる。

筆者らは高強度鋼材に用いる溶接プロセスとしてレーザ・アークハイブリッド溶接に着目した。レーザ・アークハイブリッド溶接はアーク溶接と比較すると入熱が低いため、溶接変形、残留応力といった溶接施工の影響を低減し、継手性能を改善する事が期待できる。またアーク電流の他にレーザ光を独立した熱源として併用するため溶接熱源の制御における設定自由度も高い⁷⁾。実構造物への使用実績もあり、その時実施した施工試験では少なくともアーク溶接継手と同等以上の疲労強度を有する事が報告されている⁸⁾。ただし実工事としては施工対象が限られていたため母材は 500 MPa 級鋼材であり、継手も施工部位の板厚に対応した特定の条件範囲に限られている。

そこで本研究ではレーザ・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 鋼の溶接継手の疲労強度を検討する。継手形式は構造物の継手に占める割合の大きい荷重非伝達型 T 継手である。この継手において疲労き裂は溶接金属の止端から発生し母材を進展する。JSSC 疲労設計指針はアーク溶接継手を前提としているが、そこでは溶接ままの継手を疲労強度 E 等級に分類している。レーザ・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 鋼の継手も同じ E 等級として扱いその疲労設計曲線を用いて設計出来れば前述した許容応力による設計より有効に高強度鋼を使う事ができる。一方、アーク溶接を用いた荷重非伝達 T 継手の疲労強度を改善するには止端を仕上げる必要があり、この場合継手は疲労強度 D 等

*受付日 平成28年 2 月12日 受理日 平成28年 4 月27日

**正 員 株式会社 IHI Member, IHI Corporation

級となる。レーザ・アークハイブリッド溶接の溶接条件を適正化する事で、溶接ままの継手の疲労強度を D 等級相当まで改善できれば高強度鋼を用いる構造物の合理化にさらに貢献できる。

本研究ではまず HT780 鋼を対象に溶接条件、溶接材料を変えて荷重非伝達型 T 継手を製作し、それぞれの継手性状を検証する。また溶接条件が継手性状および疲労強度に与える影響を明らかにし、溶接条件の適正化によって疲労強度が向上する事を示す。併せて必要となる施工管理方法も検討する。

2. 施工実験

2.1 実験方法および実験供試体

レーザ・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 鋼の荷重非伝達型 T 継手の施工状況を Fig. 1 に示す。レーザ光源はファイバーレーザであり、アークトーチと一体化した T

継手施工専用の溶接トーチを用いている。溶接施工要領と疲労試験片の採取位置を Fig. 2 に示す。全長 450 mm、全幅 400 mm のスキンプレートにリブを溶接し、この部材 1 枚毎に幅 80 mm の試験片を 4 本採取して疲労試験に供している。母材と施工に用いた溶接ワイヤの化学成分を Table 1、Table 2 に示す。すべての試験において母材は同じとしたが溶接ワイヤは強度区分の異なる 3 種類を用いている。施工条件は Table 3 に示すように溶接ワイヤとレーザ出力、アーク電流などの溶接条件を変えた 5 ケースを実施した。一方トーチ角度、狙い位置などの基本的な機器の構成条件はすべての施工において同じとした。

2.2 継手性状

Fig. 3 に継手マクロ写真の一例を示す。荷重非伝達 T 継手ではあるが、リブの接合部には未溶着がなく、完全溶込みに相当する継手が施工されている。本研究では溶接金属の形成状態を示す指標として止端半径 (Rt) とフランク角

Fig. 1 Overview of laser arc hybrid welding for fatigue test specimen

Fig. 2 Fatigue test specimens cutting from Laser arc welded panel

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

	Chemical compositions						Tensile test		Remarks
	C	Si	Mn	P	S	Others	Y.P	T.S	
	%						N/mm ²		
Base metal	0.09	0.21	0.95	0.006	0.002	Cu-Ni-Cr-Mo-Nb-B	813	825	HT780

Table 2 Chemical compositions of welding wire

	Chemical compositions						Tensile test	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Y.P	T.S
	%						N/mm ²	
a	0.05	0.65	1.14	0.013	0.017	0.25	404	496
b	0.10	0.72	1.36	0.010	0.012	0.24	480	568
c	0.06	0.47	1.61	0.006	0.003	0.19	717	869

Table 3 Welding condition

Welding procedure	Welding wire	Laser Power kW	Arc current	Heat input J/mm
Case 1	a	6.0	80	558
Case 2	b	6.7	160	917
Case 3	b	6.0	80	558
Case 4	c	6.0	80	558
Case 5	c	6.0	113	632

(θ)に着目した。同図にその定義を示す。Fig. 4に本研究において疲労試験に供した継手の止端半径とフランク角を示す。これらはトーチ角度や狙い位置によって変化するが、それらが同一であっても溶接条件や溶接ワイヤによって変化する事が分かる。傾向としてはフランク角が小さくなると止端半径が大きい。フランク角が最も大きい継手の止端半径は他と比較して最も小さい事を確認した。Fig. 5に溶接ワイヤの母材に対する全溶接金属強度と施工後の継手溶接金属の母材に対する硬さ比との関係を示す。炭素鋼をレーザー溶接すると母材よりも溶接金属部が硬化し強度も上がる事が知られている⁹⁾。本研究で用いた溶接ワイヤは(a)超軟質、(b)軟質、(c)共金であるが、溶接金属のビッカース硬さは鋼板母材よりも高く軟質継手ではないと判断できる。

3. 疲労試験

3.1 疲労試験および評価方法

疲労試験要領をFig. 6に示す。疲労試験の荷重条件は4点曲げであり、疲労裂発生監視、公称応力範囲の管理それぞれのための歪ゲージを貼付する。き裂の発生状況を監視するのは溶接止端から5mm位置のゲージであり、Fig. 7

Fig. 3 Macrograph of Laser arc welded joint and shape factor

Fig. 4 Correlation of Flank angle and curvature at toe

にその一例を示す。変動荷重によるひずみ変動範囲はき裂が発生すると減少する。本試験ではひずみ範囲が初期値より15%減少した時点を疲労寿命の評価指標の一つとして扱

Fig. 5 Correlation of all deposit metal strength and Vickers hardness

Fig. 6 Four points bending fatigue test method of Laser arc hybrid fillet welded joint

Fig. 7 Criteria of fatigue life (15% decreasing of strain range)

う。また本研究では荷重載荷点の変位が初期値より 1.5 mm 増加した時点で試験を停止するがこれも疲労寿命の評価指標とする。後者の方が疲労寿命を長く評価するが疲労設計曲線のような対数軸を用いた作画では極端な差異は生じない。Fig. 8 に試験完了時、すなわち荷重載荷点変位が 1.5 mm 増加した時点のき裂深さを例示する。止端から発生した疲労き裂の進展量は母材板厚の半分程度あり、この状態までを疲労寿命としても寿命を過大に評価するものではない。ただし本研究ではより厳しい評価指標である溶接止端から 5 mm 離れた位置の変動ひずみ範囲が 15% 減じた時点点を疲労寿命とした。

疲労試験における載荷重は試験片中心から 25 mm 離れた位置にあるひずみゲージから得る公称応力によって管理する。ここでは外力による応力比が 0.1 となるように載荷重を設定した。溶接止端部は引張側の変動応力状態となるため、疲労試験では残留応力の大きさに関係なく継手の疲労強度を安全側に評価できる。

試験片の残留応力を Fig. 9 に例示する。計測は応力弛緩法であるため、その精度を考慮すると、ここに示したケース 4 とケース 5 の溶接入熱の違いによる影響は確認できない。

さらに同図には比較として既報のアーク溶接による T 継手の残留応力も併せて示す¹⁰⁾。ここで比較するアーク溶接の入熱量は 1400 J/mm であるうえ、試験片形状も異なるため精緻な比較検討は出来ない。しかし残留応力の分布傾向

Fig. 8 Location of crack initiation and crack propagation

Fig. 9 Residual stress comparison at obverse side of specimen

としてはアーク溶接もレーザ・アークハイブリッド溶接も同じ事は分かる。

3.2 疲労強度の支配因子とその影響

同一溶接条件毎の継手の疲労強度を評価する指標として、荷重を 200 万回載荷したときに継手が疲労破壊する応力範囲、すなわち 200 万回疲労強度を用いる。Fig. 10 にその定義方法を例示する。応力範囲を変えて得た平均 SN 曲線より 200 万回で破断するときの応力範囲を求める。ここに示すケース 4 の場合、200 万回疲労強度は 216 MPa を得る。Fig. 11 に溶接入熱と継手の 200 万回疲労強度との関係を示す。入熱が低いと疲労強度は高い。ただし同図に示すように同じ入熱量であっても差が生じる事も見て取れる。溶接継手においては形状不連続に起因する応力集中の疲労強度への影響が大きく、その低減にはフランク角が小さく、止端半径が大きい事が望ましい。Fig. 12 にフランク角と 200 万回疲労強度との関係を示す。フランク角が小さいと疲労強度が高い傾向が認められる。Fig. 13 に溶接止端半径と

Fig. 10 Definition of fatigue strength at 2×10^6 point

Fig. 11 Effect of heat input for fatigue strength at 2×10^6 point

200万回疲労強度との関係を示す。今回試験した継手を止端半径の大きさ(平均値)で分類すると2~3mmと8mmとに分ける事ができる。止端半径の大きい後者の疲労強度は高く、前者においてはバラツキが大きい。

疲労強度への影響が高いと考えられる因子について多変

Fig. 12 Effect of Flank angle for fatigue Strength at 2×10^6 point

Fig. 13 Effect of curvature at toe of fillet weld for fatigue Strength at 2×10^6 point

量解析を実施した。そのうち精度の高い回帰式を得る事ができた独立変数の組合せと解析結果を Table 4 に例示する。前述したように止端半径とフランク角は独立ではないため、ここでは止端形状の指標としては止端半径のみを用いている。analysis-1 では止端半径、全入熱量に対するアーク入熱の比率(アーク入熱比: $Q_{arc}/\Sigma Q$)、母材と溶接金属の硬さの比(HV_{WM}/HV_{BM})を独立変数とした。ここで溶接金属の硬さは Fig. 5 で示した測定した硬さの平均値を用いている。analysis-2 のそれは止端半径とアーク入熱比である。 R^2 (自由度調整済重相関の2乗)より、ここで示した解析では疲労強度をよく表現できている事が分かる。また、両者を比較すると硬さの比を独立変数として用いなくとも R^2 の値としては極端な差異は生じていない。これは止端半径とアーク入熱比は硬さの比よりも疲労強度への影響因子として支配的であると事を示唆している。また、analysis-1 において止端半径やアーク入熱比の P 値は硬さ比のそれより小さく、t 値は大きい事もそれを裏付ける。特にアーク入熱比の t 値は 2 を超えており、独立変数のなかでも有意と言える。Fig. 14 に解析で得た回帰式による200万回疲労強度と、実験値のそれとの比較を示す。両者はよく一致している事が見て取れる。

Fig. 14 Comparison of measured fatigue strength and estimated one

Table 4 Result of multiple regression analysis

			analysis-1	analysis-2
P-Value of Free variables	Curvature at toe	Rt	0.309	0.219
	Heat input ratio	$Q_{arc}/\Sigma Q$	0.229	0.118
	Hardness ratio	HV_{WM}/HV_{BM}	0.450	-
t-Value of Free variables	Curvature at toe	Rt	1.899	1.766
	Heat input ratio	$Q_{arc}/\Sigma Q$	2.664	2.640
	Hardness ratio	HV_{WM}/HV_{BM}	1.171	-
Variance inflation Factor of	Curvature at toe	Rt	1.100	1.100
Free variables	Heat input ratio	$Q_{arc}/\Sigma Q$	1.120	1.100
	Hardness ratio	HV_{WM}/HV_{BM}	1.020	-
Squared multiple correlation coefficient adjust for degrees of freedom			R^2	0.754

以上から、疲労強度への影響因子としては止端半径（これと相関するフランク角も含む）と、アーク入熱比が支配的である事、これらを管理する事により設計要求に応じた疲労強度は確保できると言える。

4. 止端形状の成形方法

Fig. 15 に入熱量がすみ肉溶接金属のフランク角 (θ) に及ぼす影響を示す。ここでは指標として入熱量と単位溶接長さへ供給される溶接材料の体積の比（入熱・ワイヤ送給比とする）を用いて示す。傾向として溶着金属量に対して十分な熱量を与えるとフランク角が小さくなる事が見て取れるが、これは文献 [11] の結果と併せるとより顕著と言える。ワイヤ送給量を保持したまま、入熱量を増やした場合、余盛りが形成されにくくなるためと推察される。アーク溶接の場合、適正なアーク電流値が溶接ワイヤの送給量と連動しているのに対し、レーザ・アークハイブリッド溶接で

Fig. 15 Effect of Heat-filler feeding ratio and Flank angle

Fig. 16 Effect of Heat-filler feeding ratio and curvature at toe of fillet weld

は独立したレーザを熱源として併用するため入熱・ワイヤ送給比の設定自由度が高い。Fig. 16 に止端半径の場合も示す。入熱・ワイヤ送給比とともに止端半径も大きくなる傾向が認められる。以上のことはレーザ・アークハイブリッド溶接ではフランク角、止端半径の形状制御がアーク溶接よりも容易である事、ワイヤ送給量と連動するアーク入熱を相対的に小さくすることで、フランク角は小さく、止端半径は大きく溶接金属を成形できる事を示している。

継手強度の観点では、アーク溶接では T 継手の強度はどの厚によって確保されており、フランク角が小さくなることで静的強度は低下する。これに対して完全溶込継手相当まで溶込みを確保したレーザ・アークハイブリッド溶接では溶け込みが深く、どの厚の減少による強度への影響は少ない。文献 [8] では試験結果として脚長と溶込み量を管理したレーザ・アークハイブリッド溶接による T 継手ではどの厚がアーク溶接の 1/3 のであっても継手強度は完全溶込み溶接相当となる事が報告されている。

5. HT780 鋼荷重非伝達型 T 継手疲労強度と施工管理

本研究において得た全 38 体の疲労試験結果を Fig. 17 に示す。JSSC 疲労設計指針では止端仕上げをしていない荷重非伝達 T 継手は疲労強度 E 等級とされている。一方、施工ケース 4 の継手では、疲労試験結果の平均曲線は応力範囲 $\Delta\sigma = 250$ MPa 以下の領域において、疲労強度 D 等級の平均曲線を上まわる。よって実用的な応力範囲と言え $\Delta\sigma = 250$ MPa 以下ではその疲労強度を少なくとも疲労強度 D 等級として扱う事ができる。また本継手は、応力範囲 $\Delta\sigma = 250$ MPa 以上の疲労試験も含め、供試体 8 体すべてが疲労強度 D 等級設計曲線を満たしている。これらの実験事実により施工ケース 4 の継手は高い確度で疲労強度 D 等級であると判断できる。文献 [12] では、疲労強度 D 等級の継手の止端仕上げは止端半径 3 mm 以上と定められている。施工

Fig. 17 Fatigue Strength of laser arc hybrid welded fillet joint

ケース4の継手の止端半径は平均値($R_{t_{ave}}$)が8.3mm, 最小値($R_{t_{min}}$)は5.5mmであり, この基準を満たしている. 一方, フランク角であるが, 平均値(D_{ave})は 21° , 最大値(D_{max})は 28° であった.

同図より, 施工ケース4と比較するとその他の継手の疲労強度は低い事が分かる. ただし, すべての疲労試験結果は疲労強度D等級設計曲線より高く, それぞれの平均値は疲労強度E等級の平均曲線を満たしている. 従ってここに示す継手の疲労強度は少なくとも疲労強度E等級と同等以上であると言える. 図示した継手のフランク角の最大値(D_{max})は 47° であり, 止端半径の最小値($R_{t_{min}}$)は1.3mmであった. これらは今回試験した応力範囲において疲労強度E等級を保証するための施工管理値として用いる事ができる. また施工ケース4を除くとフランク角平均値(D_{ave})は 35° , 止端半径($R_{t_{ave}}$)のそれは2.4mmである. これらの値も施工を行う上での目安となる.

6. 結 言

レーザ・アークハイブリッド溶接を用いてHT780鋼の荷重非伝達型T継手を製作し, 疲労強度の支配因子と施工管理について検証した. 本研究において得た知見の範囲ではあるが, その結果を以下に総括する.

- ・レーザ・アークハイブリッド溶接を用いHT780鋼の荷重非伝達型T継手を製作し, 疲労強度の検証とその支配因子の検証を行った.
- ・レーザ出力, アーク電流, 溶接材料を変えた5ケースの施工条件において継手を製作した. 軟質溶接ワイヤを用いた場合でも溶接金属の硬さは母材のそれよりも硬く, 軟質継手ではない. またフランク角が小さくなると, 止端半径は大きく成形されることを確認した.
- ・200万回疲労強度を評価指標として用い, 疲労強度の支配因子を検討した. レーザ・アークハイブリッド溶接においてもフランク角と止端半径が荷重非伝達型T継手の疲労強度に及ぼす影響は大きい. 前者が小さく, 後者が大きくなるほど疲労強度は向上する. また, 総入熱に対するアーク溶接入熱比も疲労強度への影響を及ぼす.
- ・T継手を製作する溶接施工において, トーチ角度やねらい位置が同一であっても入熱量と単位溶接長さに供給される溶接材料の体積の比(入熱・ワイヤ送給比とする)を大きくすると溶接金属のフランク角を小さく, 止端半径を大きく制御する事ができる.
- ・今回製作した継手のなかには荷重非伝達型T継手として疲労強度がD等級と同等と評価できる継手もあった(施工ケース4). この継手のフランク角の最大値は 28° , 止端半径の最小値は5.5mmである.
- ・5種類の継手からなる38の供試体の疲労強度は $\Delta\sigma \leq 400\text{MPa}$ の範囲ではD等級設計曲線より高く, それぞれの平均値は疲労強度E等級の平均曲線を満たしている.

これらの継手のフランク角の最大値は 47° , 止端半径の最小値は1.3mmである.

- ・フランク角と止端半径はレーザ・アークハイブリッド溶接を用いた荷重非伝達型T継手においても疲労強度保証のための施工管理指標として用いる事ができる.

謝 辞

本研究には, PJ研究:鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発研究体(JRCM: (財)金属系材料研究開発センター)の成果の一部が含まれる. 記して謝意を表す.

参 考 文 献

- 1) KIJ I Noboru, Development of welding technology for ship building using high strength steel, national meeting workshop of J.W.S, pp25-47 (2013)
- 2) INOSE Koutarou, Development of welding technology for bridge construction using high strength steel, national meeting workshop of J.W.S, pp49-57 (2013)
- 3) For example, Kansai chapter of JSCE WG, Study on Development of Steel Bridges Effectively Using High Performance Steel, Japan Society Civil Engineers, (1996)
- 4) Japan Society of Steel Construction: Fatigue Design Recommendations for Welded Structures, GIHODO SHUPPAN, pp5-12 (1993)
- 5) For example, INOSE Koutarou, NAKANISHI Yasumasa, IMOTO Izumi: Study on design for Extra High Strength steel structure, Welding in the World Volume 47, NO.3/4, (2003)
- 6) NAKANISHI Yasumasa, YAMAOKA Hiroto, INOSE Koutarou, YASUDA Kouichi, SUMI Hiroyuki, Project of Fundamental Technology for Steel Materials with enhanced Strength and Functionality, Development of Laser arch hybrid welding for High strength steel, Welding technology, vol.60, SANPO PUBLICATIONS, INC, pp75-85 (2012)
- 7) INOSE Koutarou, ABE Daisuke, MATSUMOTO Naoyuki, OOWAKI Katsura: Effect of laser arc hybrid welding condition for welded joint properties, Preprint of the national meeting of J. W.S Vol.88, pp18-19 (2011)
- 8) For example, Koutarou INOSE, Katsura OOWAKI, Junko KANBAYASHI and Yasumasa NAKANISHI, Functional assessment of laser arc hybrid welded joint and their application for bridge construction, Welding in the World, Vol.56, No.7/8, pp118-124, (2012)
- 9) For example, Koutarou INOSE, Junko KANBAYASHI, Yasumasa NAKANISHI, Tsunehisa HANDA, Mitsuru OHATA, Fumiyoshi MINAMI: Fracture behavior of HT780 Laser beam butt joint, Welded structural symposium of J.W.S, pp557-563 (2009)
- 10) INOSE Koutarou, LEE Jae Yik, NAKANISHI Yasumasa and KIM You-chul: Characteristics of welding distortion/residual stress generated by fillet welding with laser beam and verification of generality of its high accurate prediction, Quar. J of J.W.S 26-1, pp61-66 (2008)
- 11) INOSE Koutarou, KANBAYASHI Junko, ABE Daisuke, MATSUMOTO Naoyuki: Effect of fillet joint properties welded by laser hot wire welding for fatigue strength, Preprint of the national meeting of J.W.S vol.92, pp158-159 (2013)
- 12) Japan Road Association: Specifications for High way Bridges, MARUZEN Publishing, pp200-213 (2012)