

1180MPa リサイクル鋼板のレーザ溶接継手の疲労強度特性

NIMS ○長島伸夫 早川正夫
東京製鐵 (株) 中西宣文 岩崎勝 林和幸 中西栄三郎

Fatigue strength properties of laser welded joints in 1180MPa class recycled steel

by

Nagashima Nobuo, Hayakawa Masao,
Nakanishi Noriyuki, Iwasaki Masaru, Kazuyuki Hayashi, Nakanishi Eizaburo

A laser welded butt joint was fabricated using 1180MPa recycled steel plate and a tensile test was performed. Two types of fatigue tests using different loading methods were also performed. The tensile properties of this test material were 1218 MPa tensile strength and 23.8% elongation, which were almost the same strength and ductility as the base material. There were no abnormalities in the welded parts, and the joints were properly joined. The unbreakable stress at 10^7 cycles of the base material (as pickled) was 450 MPa for both axial and bending loads at a stress ratio $R=-1$. In addition, the unbreakable stress at 10^7 cycles of the bending fatigue test at $R=0$ was 340 MPa, which overlapped with the modified Goodman line on the fatigue limit diagram. The fatigue strength of the laser welded butt joint was constant under axial and bending loads in the low life range of $R=-1$, but varied in the high life range. The fatigue fracture surface under bending load was present only on one side and was caused by a defect located approximately 100 μm away from the surface. For $R=0$, the fatigue properties were in good agreement under axial and bending loads. The fatigue limit was 250 MPa for both $R=-1$ and $R=0$ conditions. When the laser input side was set to the maximum stress side and the stress ratio was set to $R=0$ on the plane bending fatigue testing machine, the fatigue limit was dramatically improved to 340 MPa, and the same fatigue strength as that of the base material after pickling was obtained.

KEY WORDS: fatigue, 10^7 cycles fatigue limit, stress ratio, fatigue limit diagram, laser welded joint

1 緒 言

地球温暖化問題から、自動車に対する CO_2 削減つまり車両重量の軽量化による燃費向上が強く求められている。重量軽減や高剛性を実現する手法として、素材を溶接した後にプレス成形するテーラードブランク (TB) が、自動車車体部品に実用化された^{1),2),3) 4)}。TB は強度特性の異なる 2 次元の平板同士を突き合わせ溶接し、一体でプレス成形する工法であり、TB は主に内板に適用されてきたが、近年、常時見える外板部品にも適用されている。今後、軽量化実現のため、さらに高強度ハイテン材の TB が使用されることが想定される。

著者らは素材創製における CO_2 削減実現の一つである老廃スクラップから創製した 1180MPa 級ハイテン鋼について母材疲労強度を評価した⁵⁾。その結果、鏡面仕上げを施した試験片の疲労破壊は表面起点型であり、 10^7 回疲労強度は引張強度の 1/2 であることを明らかにした。そこで本研究では、工学上重要とされる溶接継手の強度特性解明を目的として、TB で接合される平板同士の突き合わせレーザ溶接継手の模擬として、母材疲労

強度を明らかにした 1180MPa スクラップ鋼板同士の突き合わせレーザ溶接継手の疲労試験を実施した。

2 実験方法

供試材は老廃スクラップから創製した 1180MPa 級のリサイクル鋼板である。Table 1 に化学成分を示す。老廃スクラップを 1533°C で溶解し、高さ 210mm×幅 1219mm×長さ 10.2m のスラブに連続鋳造後、大気放置した。そのスラブを 1230°C で 180mm 加熱し、 960°C から 1050°C の温度範囲で粗圧延し、板厚 30.6mm の鋼板に延ばした。鋼板は、 1050°C の中間炉内を通し均熱化し、 1020°C から 620°C の温度範囲で、6 段仕上げ圧延機によって厚さ 2.3mm の薄鋼板に成型し、ランアウトテーブルで水冷後、コイラーで巻き取った。素材の受け入れ状態は酸洗ままの表面である。

レーザ溶接はファイバーレーザ加工機 (YLS600/600-AC, 定格出力 600W, ピーク出力 6kW) を用いて実施した。あらかじめ用意した板材にメルトランを実施し、レーザ溶融が板裏側に到達した状態をレーザ接合の適

Table 1 Chemical compositions of 1180MPa class recycled steel.

	Element (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
1180MPa	0.20	1.48	0.39	0.02	0.003	0.30	0.10	1.31	0.30
	V	Nb	Ti	Al	Sn	Pb	B	O	N
	0.006	0.005	0.004	0.031	0.017	0.002	0.0001	0.0053	0.0024

正条件とした。レーザ溶接継手の形状確認のため、レーザ顕微鏡で突き合わせレーザ溶接継手の表裏を観察した。溶接継手表側の溶接部には平均 50 μ m のくぼみが観察され、溶接継手裏側には平均 140 μ m の突起部が存在した。表裏の形状の違いは、表側は溶融によりくぼみとなり、裏側は溶融した金属が重力により突き出したと考えられた。

引張試験は試験機容量 100kN の島津製作所オートグラフ AG-10 を用い、試験速度 0.5mm/sec、破断まで一定速度で実施した。疲労試験は室温 23 $^{\circ}$ C に空調した室温大気中で実施した。軸力負荷試験は、試験機容量 100kN のサーボ式油圧疲労試験機（島津製作所製）を使用し、周波数 1Hz、応力比 $R=-1$ で行った。平面曲げ負荷試験は、試験機容量 25 kN のモータ起動による疲労試験機（東京衡機製、PBF60 型）を使用し、周波数 25Hz で行った。応力比は $R=-1$ と 0 の 2 条件である。

軸力負荷用疲労試験片は、全長 150mm、幅 20mm、R40mm、最小幅 10mm、平面曲げ負荷用疲労試験片は、全長 90mm、幅 30mm、R45mm、最小幅 20mm である。いずれの試験片も溶接部が中央となるように試験片加工し、レーザ入力側に試験片の刻印を打痕した。平面曲げ負荷試験では試験片の取り付けは、刻印がある溶接継手表側（レーザ入力側）を上向きにして取り付けた。平面曲げ疲労の試験機の構造上、平均応力が高い $R=0$ の試験では、溶接継手裏側の最表面が最大応力となる。また、溶接継手は表側と裏側で形状が異なるので、溶接継手表側（レーザ入力側）を下向きにして取り付けた $R=0$ の平面曲げ疲労試験も実施した。

3. 実験結果と考察

3. 1. 引張試験結果

レーザ溶接継手から採取した 3 本の引張試験は強度延性にバラツキもなく引張強度の平均値は 1218MPa、伸び 23.8% で、母材の引張強度 1220MPa、伸び 18% とほぼ同程度強度と延性であり、破断位置は母材部であった。強度・延性も母材と同等であり、破断位置が母材部であることから、今回の突き合わせレーザ溶接継手は適正に接合されている。

3. 2. 母材（酸洗まま）の疲労試験結果

前報では主に 1180MPa スクラップ鋼板の鏡面研磨した試験片を用いて疲労試験を行い、 10^7 回疲労強度が他の鉄鋼材料の強度と同様に、母材の引張強度の約 1/2 であることを示した。本研究では母材を受け入れ状態の酸洗ままの表面をレーザ溶接することから、酸洗ままの母材の疲労強度特性を評価した。平面曲げ疲労試験データは材料の弾塑性特性から推定した応力値で整理すると軸荷重試験と一致する。Koe ら [6] はこの方法で必要となる材料の弾塑性特性、すなわち繰返し変形における応力-ひずみ関係のパラメータを多くの材料を対象として評価し、種々の疲労強度が統一的に整理できることを示した。Fig.1 に Koe らの手法で応力補正した SN 特性を示す。 $R=-1$ の疲労限は 450MPa、 $R=0$ の疲労限は 340MPa であった。Fig.2 に鏡面研磨試験片と酸洗ままの試験片の疲労限度線図を示す。酸洗ままの $R=0$ の試験結果は修正 Goodman 線近傍となる結果が得られている。以降、本研究の平面曲げ疲労試験結果は、Koe らの手法で補正した応力値を用いる。

3. 3. レーザ溶接継手の疲労試験結果

3. 3. 1. 応力比 $R=-1$

Fig.3 にレーザ溶接継手の応力比 $R=-1$ 疲労試験の実験結果を示す。図中の○、△、□は 3 つの異なる継手板から採取した試験片による平面曲げ疲労試験結果を示

し、■は軸疲労試験結果である。軸疲労試験は試験速度が 1Hz のためプロットは 3 点と少ないが、高応力側の破断寿命は平面曲げ疲労試験の破断寿命と良く一致した。一方、長寿命領域では軸疲労試験では $\sigma_a=300$ MPa で 10^7 回未破断であるのに対して、曲げ負荷はバラツキが大きくなり、 10^7 回未破断は、246.6MPa で未破断 3、破断が 2 本あった。Fig.4 に L0304 試験片 ($\sigma_a=246.6$ MPa、 $M=9.1 \times 10^5$) の SEM による破面観察結果を示す。SEM 像は全体像の上側が溶接継手表側（レーザ入力側）に相当する。通常平面曲げ疲労試験の $R=-1$ の応力条件では、両側の最表面で最大応力となるた

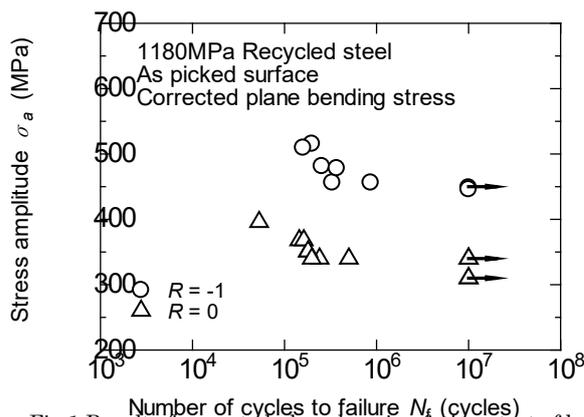


Fig.1 Result of corrected plane bending fatigue test of base material of 11801MP recycled steel.

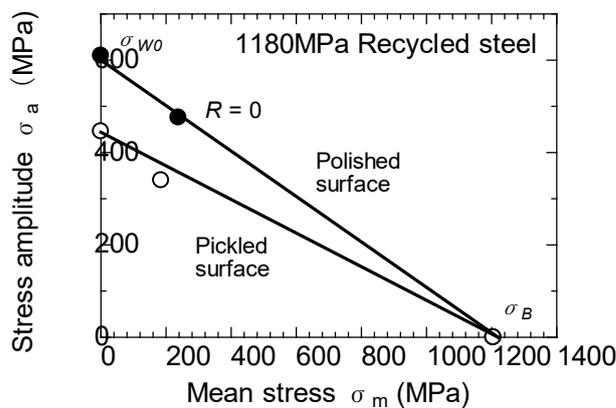


Fig.2 Fatigue limit diagram.

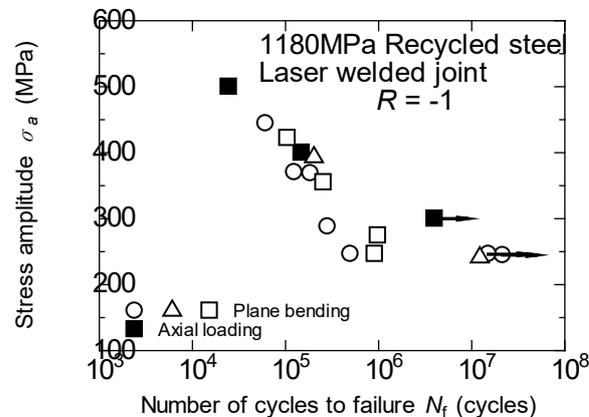


Fig.3 $R=-1$ fatigue test results for 1180 recycled steel plate laser welded

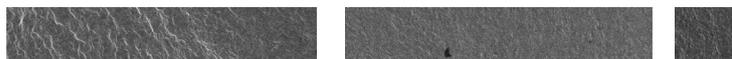
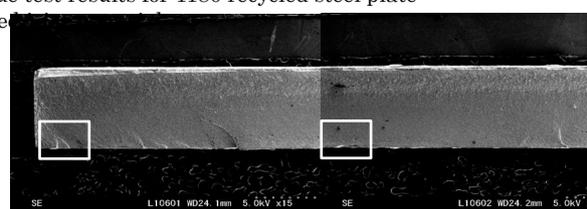




Fig.4 SEM observation results of fatigue fracture surface($R=-1$, $\sigma_a=246\text{MPa}$, $Mf=9.1 \times 10^5$ cycles).Maximum defect size $\sqrt{\text{area}}=282 \mu\text{m}$.

め、両側の表面から疲労き裂が発生し、疲労き裂は中央で合体する。しかし、レーザ溶接継手の破面は、Fig.4の全体像の下側に位置する溶接継手裏側の大きな欠陥から発生し、全体像の上側すなわち溶接継手表側（レーザ入力側）に相当する最表面近傍で疲労き裂が合体していた。同様に疲労破壊した他の試験片破面も継手裏側の欠陥を起点として継手表面に相当する最表面近傍で合体していた。

レーザ溶接継手のレーザ頭微鏡断面観察では、刻印がある溶接継手表側（レーザ入力側）に $50\mu\text{m}$ 程度のくぼみが観察され、溶接継手裏側には $140\mu\text{m}$ の突起が観察されたが、疲労破面の観察結果(Fig.4)から、溶接継手裏側にはレーザ頭微鏡では検出できない深さ $100\mu\text{m}$ の欠陥がスリット状に存在している部位もあると考えられる。したがって、 $R=-1$ の平面曲げ疲労試験で疲労き裂の合体が中央ではなく、溶接継手裏側が疲労起点となった理由として、突起に沿って存在する $100\mu\text{m}$ のくぼみが応力集中源になったと考えられる。

3. 3. 2. 応力比 $R=0$

Fig.5 に $R=0$ の疲労試験結果を示す。図中の○, △, □は溶接継手表側（レーザ入力側）を上向きに取り付けた平面曲げ疲労試験結果を示し、■は軸疲労試験結果である。軸疲労試験は試験速度が 1Hz のためプロットは6点と少ないが曲げ疲労試験結果とよく一致した。平面曲げ疲労試験結果は3つの異なる継手板から採取した試験片(○, △, □)で、破断寿命にばらつきがほとんど無い。通常、溶接継手の疲労強度は溶接欠陥(ポイドや未溶融部)や溶接余盛り、溶接止端部の応力集中や残留応力の個体差などの影響により、破断寿命にばらつきが生じる場合がある。一方、本結果は疲労寿命のばらつきが比較的少なく、残留応力の影響は小さいものと考えられる。破断した疲労起点はレーザ溶接継手裏側の深さ $100\mu\text{m}$ の欠陥であった。これまでレーザ溶接継手の疲労特性については、寿命の大部分がき裂進展過程で占められていることが報告されている^{7), 8), 9)}。平面曲げ疲労試験でばらつきが小さい要因として、レーザ入力裏側に存在する深さ $100\mu\text{m}$ の比較的大きな欠陥が疲労起点となるため、き裂発生寿命が短く、疲労き裂進展寿命が支配的であると考えられる。

破面観察の結果の通り、レーザ入力面とその裏面では溶接欠陥の様態に差異のあることが分かった。そこで、平面曲げ疲労機への試験片の取り付けとして、溶接継手表側（レーザ入力側）を下向きに取り付け、溶接継手表

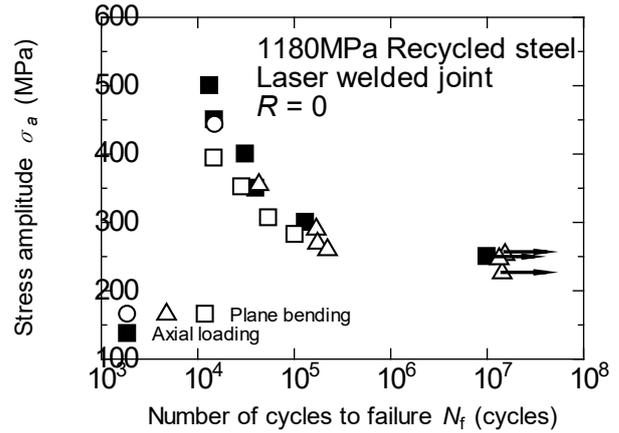


Fig.5 $R=0$ fatigue test results for 1180 recycled steel plate laser welded joint material

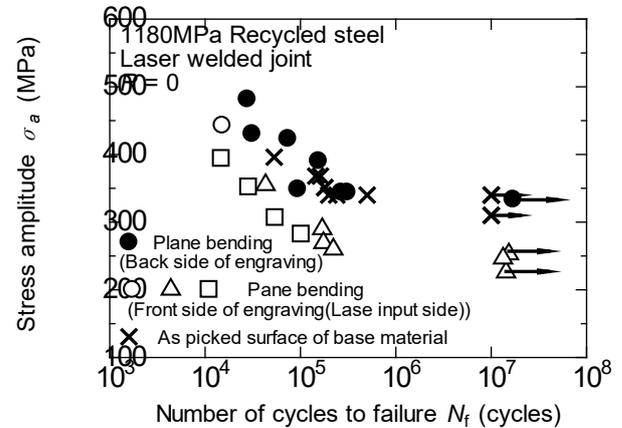


Fig.6 $R=0$ fatigue test results for 1180 recycled steel plate laser welded joint material. For open marks, the specimen was mounted with the engraved side facing up. For solid marks, the specimen was mounted with the engraved side facing down.

側（レーザ入力側）で最大曲げ応力が付与される疲労試験を実施した。Fig.6にレーザ入力面を最大応力とする疲労試験結果を●で示す。全体的に疲労特性は改善し、疲労限度 (10^7 回未破断応力とする)は 250MPa から 340MPa に高くなった。さらに、図中に酸洗ままの母材の疲労強度(×)を示す。レーザ入力側で最大曲げ応力が付与される試験条件では母材の疲労強度とほぼ同じであり、レーザ溶接継手は母材の強度を損ねない優れた溶接施工法であることを示している。

緒言で述べた通り、TBは主に内板に適用され、近年、外板にも一部使用されているが、今後ますます外

板への適用が増加すると考えられる。外板に適用される場合、軸応力より曲げ応力が負荷される場合が多いと考えられる。レーザー接合部のレーザー入力側を車体外側（最大曲げ応力側）にすることにより、優れる耐疲労特性を発現できる。近年の車体製造において、車体のルーフ（屋根材）をレーザー接合している車両もあり、外側から照射してレーザー接合すれば、優れる曲げ疲労特性を示すことが期待される。-

4. 結言

1180MPa 級リサイクル鋼板の突き合わせレーザー溶接継手を作製し、引張試験を実施した。また、荷重方式の異なる 2 種類の疲労試験を実施した。これらの結果から、1180MPa 級鋼リサイクル鋼の突き合わせレーザー溶接継手の強度特性が明らかになった。

(1) 本供試材の引張特性は、引張強度 1218MPa、伸び 23.8%で、母材とほぼ同程度の強度延性であり、溶接部に異常はなく適正に接合されている。

(2) 母材（酸洗まま）の 10^7 回未破断応力は、応力比 $R=-1$ は軸負荷、曲げ負荷ともに 450MPa であった。また、曲げ疲労試験の $R=0$ の 10^7 回未破断応力は 370MPa であり、疲労限度線図において修正 Goodman 線と重なったことから、本供試材の酸洗材の疲労強度も疲労限度線図で評価できる。

(3) 突き合わせレーザー溶接継手の $R=-1$ の疲労強度は低寿命では軸負荷、曲げ負荷で一致するが、長寿命域ではばらついた。曲げ負荷の疲労破壊破面は、レーザー入力裏側の約 100 μm の欠陥を起点として継手表面に相当する最表面近傍で合体していた。疲労限は 250MPa である。

(4) 突き合わせレーザー溶接継手の $R=0$ の疲労強度は軸負荷、曲げ負荷で良く一致し、疲労限は 250MPa である。

(5) レーザー入力側を最大応力側にして平面曲げ疲労試験機に取り付けた応力比 $R=0$ では疲労限は 340MPa と飛躍的に改善され、酸洗ままの母材と同じ疲労強度が得られる。

- 3) 宮崎康信, 巽雄二郎, 泰山正則, 「自動車産業におけるレーザー加工技術の進歩」, レーザ加工学会誌 26(2019), 13-22
- 4) 中尾敬一郎「サイドパネルアウターへのテーラードブランクの適用」. 第 81 回レーザー加工学会講演論文集 (2014), 75-78
- 5) 長島伸夫, 早川正夫, 長井寿, 升田博之, 中西栄三郎, 中西宣文, 岩崎勝, 「1180MPa 級のリサイクル鋼板の疲労強度に及ぼす荷重様式の影響」, 自動車技術会論文集, 53 (2022), 815-820
- 6) S.Koe, H.Nakamura, T.Tamenari and T.Okada, J. Soc.Mater.Sci.,Jpn, 32(1983), 522
- 7) 戸梶恵郎, 塩田裕久, 皆木亜由美, 宮田尚志, 「レーザー突き合わせ溶接継手の疲労強度」, 鉄と鋼, 85(1999), 66-70
- 8) 皆木亜由美, 戸梶恵郎, 「レーザー突き合わせ溶接継手の疲労き裂進展特性」, 鉄と鋼, 86(2000), 51-56
- 9) J.R.Hwng, J.L.Doong and C.C.Chen, Mater. Trans., JIM, 37(1996),1443

参考文献

- 1) (1) 森清和, 「自動車ボディへのレーザー溶接適用」, 溶接学会誌 72 (2003), 40-43
- 2) 樽井大志, 「自動車におけるレーザー加工技術の活用」, 精密工学会誌 84 (2018) 404-407