レーザー溶接継手の十字引張疲労試験における疲労特性 および内部疲労き裂進展挙動の三次元的観察

林田幸大^{*1}, 種子島亮太^{*1}, 曙紘之^{*2}, 加藤昌彦^{*2}, 菅田淳^{*2},

Fatigue Properties and 3D Observations of Interior Crack Propagation Behavior of the Laser Welded Joints on Fatigue Tests in Cross Tension Type

Kodai HAYASHIDA^{*3}, Ryota TANEGASHIMA, Hiroyuki AKEBONO
Masahiko KATO and Atsushi SUGETA

^{*3} Hiroshima University, Department of Mechanical Science and Engineering
Kagamiyama 1-4-1, Higashihiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

The laser welding of which is next-generation joining technology is expected in automobile industry for alternative technology to the spot welding. However, it is not applied widely because there are few studies about fatigue properties of its welding joint. In this study, in order to acquire the knowledge about the fatigue properties and fracture mechanism of the laser welded joints of thin steel sheets, fatigue tests were conducted using the laser welded joints which have general automotive steel as base metal under the tensile loading condition. The test results showed that the fatigue life of the laser welded joints was slightly shorter than that of the spot welded joints. Then, the interior fatigue crack propagation around the welded area was observed in detail. As a result of three-dimensional observations of each welded joints, it is found that the difference of the fatigue life is caused by the difference of the crack initiation life. Although there are some differences, they are very slightly. Therefore, there is a possibility to apply the laser welding to automobile as the alternative technology to the spot welding.

1. 緒 言

近年の自動車産業分野において、高強度鋼板の適用による自動車車体軽量化が検討されているが、母材の静的強度の向上に反しスポット溶接継手の疲労強度が期待したほど改善されない⁽¹⁾ことから車体全体への適用に至っておらず、車体重量の大幅な軽量化が達成されていないのが現状である。また、一般的な乗用車には約 4,000~5,000 点のスポット溶接が施工されているが、製造現場における生産性および省エネルギー化の要求から強度信頼性を有し、かつ溶接施工数の大幅な削減を実現する溶接構造体の技術開発が望まれている。このような背景において、近年スポット溶接に取って代わる技術としてレーザー溶接が注目されている。レーザー溶接技術は非接触溶接、制御が容易、溶接継手形状の自由度が高い⁽²⁾⁽³⁾といった種々の利点を有していることから、前述の問題点を解決することが期待される。しかしながら、薄板レーザー溶接継手の疲労特性

に関する知見が乏しく、汎用化に至っていないのが現状であるため、本研究では一般的自動車用鋼として採用されている薄板の SPCC 材を母材とするレーザー溶接継手を試験体とし、主に継手内部に生じる疲労き裂を詳細に観察することによって本試験体の疲労特性について実験的検討を行った。また、比較対象としてスポット溶接継手に対しても同様の検討を行い、疲労特性の観点からレーザー溶接継手の優位性に関して考察を行った。

2. 実験方法

本研究では一般的自動車用鋼として採用されている SPCC(冷間圧延鋼)を供試材料とし、レーザーおよびスポット溶接試験片を作製した。同材の機械的特性の基準値を表 1 に、試験片形状を図 1 に示す。また、図 1 に示すようにスポット溶接は溶接部径 $d = 5\sqrt{t}$ (t : 板厚) を満たす条件で、レーザー溶接はビード幅中心間距離が $d = 5\sqrt{t}$ となる条件でそれぞれ施工した。なお、レーザー溶接に関しては溶接始点および終点部における入熱の重畳を避けるために、中心角 60° の未接合領域を設けた。静的引張試験および疲労試験は島津製作

^{*1} 学生員, 広島大学大学院 工学研究科(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

^{*2} 正員, 広島大学 工学研究院

E-mail: m112313@hiroshima-u.ac.jp

所製油圧サーボバルサを用いた。なお、疲労試験に関しては応力比 $R=0.05$ 、周波数 $f=1\sim 30\text{Hz}$ で試験を実施した。その際、未破断時の試験打ち切り回数は $N=10^7$ cycles とした。

Table1 Mechanical properties of SPCC.

0.2%proof stress [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
230~250	340~360	49~53

Fig.1 Shape and dimensions of cross-tension specimen.

3. 実験結果および考察

3-1 疲労試験 疲労試験結果を図2に示す。なお、本研究では JIS Z3138 に基づき、目視にてき裂長さが溶着部径 d と同程度になった繰返し数を破断寿命と定義し評価を行った。同図縦軸は負荷荷重を各溶着部面積で除した公称垂直応力である。同図よりスポット溶接継手に比べ、レーザー溶接継手の方が若干短寿命側の結果を示すことがわかった。また、両溶接継手疲労強度は母材および同溶接継手静的強度（レーザー：390MPa、スポット：273MPa）に比べ、非常に低い値を示した。

Fig.2 S-N curves.

3-2 破壊形態観察 各溶接継手の巨視的破壊形態を観察した結果を図3,4にそれぞれ示す。いずれの溶接継手に関しても、高応力レベルにおいては試験片表面に貫通したき裂は溶接部周方向に進展し、溶接部径 d と同程度になると同時に図3(a)や図4(a)に示すように溶接部が抜け落ちる破壊形態を呈した。一方、低応力レベルにおいては図3(b)や図4(b)に示すようなき裂が板幅方向へ進展し、破壊に至る様相を呈した。

(a) High stress level ($\sigma_a=30\text{MPa}$) (b) Low stress level ($\sigma_a=5\text{MPa}$)

Fig.3 Fracture morphologies of the laser welded joints.

(a) High stress level ($\sigma_a=30\text{MPa}$) (b) Low stress level ($\sigma_a=5\text{MPa}$)

Fig.4 Fracture morphologies of the spot welded joints.

3-3 疲労き裂三次元的観察 両溶接継手内部における疲労き裂進展挙動の三次元的観察領域を図5に、観察結果を図6,7にそれぞれ示す。本研究では、各応力の疲労試験結果における最大破断寿命を N_f として採用し、それに対する繰返し数比 N/N_f における内部疲労き裂進展挙動の観察を行った。同図より、両継手において発生した疲労き裂は板厚および溶接部周方向へ同時に進展することがわかった。また、レーザー溶接継手に関しては、高低応力レベルにおいて破断寿命の50%程度の繰返し数でき裂の十分な進展が確認でき、それ以前の繰返し数において疲労き裂が発生していると考えられる。一方、スポット溶接継手に関しては、高応力レベルでは破断寿命の50%程度の繰返し数で疲労き裂の発生が確認できたが、低応力レベルでは破断寿命の80%程度の繰返し数においても疲労き裂は確認できず、疲労き裂発生寿命に応力依存性があることがわかった。今後、より早期の繰返し数比 N/N_f において同様の観察を行う必要があるが、レーザー溶接継手の疲労き裂が、スポット溶接継手のそれに比べて比較的早期に発生する傾向にあることが、先に示した疲労試験結果の若干の差を導いているものと考えられる。さらに、図8に示すように、レーザー溶接継手における疲労き裂は応力レベルによらず全て溶着部端から発生し、

溶融部と HAZ の境界付近を通り板厚方向へ進展していくことが確認できた。同様にスポット溶接継手においても、疲労き裂はスリット先端付近から発生し、板厚方向へ進展していくことが確認できた。しかし、図 9 に示すように、高応力レベルにおいてはスリット端よりも母材側から発生することが確認でき、発生した疲労き裂は母材を進展していくため、高応力レベル下での疲労き裂は、前述の場合と異なる組織間を進展していくことがわかった。疲労試験結果における両継手高応力レベルでの大きな差異はこれに起因すると考えられる。

Fig.5 Observed area.

Fig.6 3D observations of fatigue crack propagation of laser welded joints.

Fig.7 3D observations of fatigue crack propagation of spot welded joints.

(a) High stress level ($\sigma_a=30\text{MPa}$) (b) Low stress level ($\sigma_a=5\text{MPa}$)

Fig.8 Fatigue crack propagation of laser welded joints at the cross section.

(a) High stress level ($\sigma_a=30\text{MPa}$) (b) Low stress level ($\sigma_a=5\text{MPa}$)

Fig.9 Fatigue crack propagation of spot welded joints at the cross section.

4. 結 言

(1) レーザー溶接継手の疲労寿命曲線は、スポット溶接継手のそれに比べ、若干短寿命側の結果を示した。また、両溶接継手疲労強度は母材および同溶接継手静的強度に比べ、非常に低く、繰返し負荷に対する耐久性が著しく低いことが明らかとなった。

(2) 両溶接継手の巨視的破壊形態には明らかな応力依存性が確認された。すなわち、高応力レベルでは試験片表面に貫通したき裂が溶接部周方向に進展し、溶接部が抜け落ちる破壊形態であるのに対し、低応力レベルにおいてはき裂が板幅方向へ進展し破壊に至る様相を呈する。

(3) 継手内部に発生・進展する疲労き裂を詳細に観察した結果、レーザー溶接継手の疲労き裂は、スポット溶接継手のそれに比べて比較的早期に発生する傾向にあることが明らかとなった。しかしながら、広範囲の応力レベルにおいて同様なき裂進展挙動を示すことから、疲労強度および巨視的破壊形態に顕著な差異は確認されず、レーザー溶接の将来的な実用化の可能性が期待できる。

文 献

- (1) T.Keiichiro, Y.Ryo, A.Hiroyasu, S.Kazuhiro, T.Hidetoshi, U.Shigeru, S.Shigenobu, "Influence of Strength Level of Steels on Fatigue Strength and Fatigue Fracture Mechanism of Spot Welded Joints", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.12, pp.1095-1101(2006).
- (2) K.Tokujiro, "Welding and Joining of Car Body", Japan Welding Society, Vol.74, No.8, pp.512-515(2005).
- (3) M.Kiyokazu, "Application of Laser Processing for Automotive Body", Japan Welding Society, Vol.72, No.1, pp.40-43(2003).