

レーザー突き合せ溶接継手の疲労強度

戸梶 恵郎*・塩田 祐久*・皆木 亜由美*²・宮田 尚志*³

Fatigue Strength of Laser Butt welded Joints

Keiro TOKAJI, Hirohisa SHIOTA, Ayumi MINAGI and Masashi MIYATA

Synopsis : Tensile tests and fatigue tests have been conducted for laser butt welded joints obtained from the combination of two steels and two plate thicknesses. Tensile and fatigue strengths were evaluated and the effects of type of steels and plate thickness on those strengths were studied on the basis of changes in microstructure, hardness and residual stress. Tensile strength of the joints with the same thickness was lower than that of the joints with different thicknesses and the joints of the same steel showed lower tensile strength than the joints of different steels. All joints were fractured at the location away from the center of the weld zone. Fatigue strength of the joints decreased compared with that of the base metal. The type of steels had no influence on the fatigue strength, while the fatigue strength of the joints were slightly affected by plate thickness. In the joints with the same thickness, fatigue fracture took place at the location 4 mm to 5 mm away from the center of the weld zone, but in the joints with different thicknesses, at the shoulder between thin and thick plates, i.e. at the weld zone.

Key words : laser welding; butt joint; tensile strength; fatigue strength; microstructure; hardness; residual stress.

1. 緒言

近年、自動車車体をはじめとする薄鋼板溶接構造物に対して、軽量化および高剛性を目的として、素材を溶接した後プレス成形するテイラードブランク法が適用されつつある^{1,2)}。この手法に用いられる溶接法として、複雑な組立構造・不規則な形状の部材などを高速に溶接することができ、溶接部の外観も良好であるレーザー溶接法の実用化が進んでいる¹⁻⁵⁾。

従来、このような一体成形技術として、スポット溶接法による重ね継手が用いられてきた。レーザー溶接法はスポット溶接法やアーク溶接法などに比べていくつかの優れた特徴を有している。例えば、連続溶接であるためスポット溶接法よりも溶接部材の剛性が高いことや溶接代が狭いなどの理由から、構造物の軽量化が可能であること⁶⁾、アーク溶接法よりも溶接熱源径が微小でエネルギー密度が高く、同等の熱容量に対して低入熱量が可能であり、その結果溶接変形やひずみがきわめて小さい⁹⁾ことなどである。これらの利点から、レーザー溶接法は、今後種々の溶接構造物に対してさらに広範な適用が期待される。

ところで、溶接部材は構造部材として用いられることが多いので、溶接継手はもとより、溶接部そのものの疲労特性も把握しておくことが必要である。しかし、レーザー溶接継手の疲労特性に関する研究は少なく、重ね継手についてはいくつかの報告⁶⁻⁹⁾が見られるが、テイラードブランク

法に用いられる突き合せ継手の疲労特性は詳細に検討されていないのが実状である^{10,11)}。また、実際の部材では、異なる板厚や鋼種間の溶接が行われることも多いので、これらが継手の疲労特性に及ぼす影響についても明らかにしておくかなければならない。

そこで本研究では、2種類の板厚および2種類の鋼板の組合せでレーザー突き合せ溶接された継手試験片の引張試験および疲労試験を実施し、引張強さおよび疲労強度を評価するとともに、溶接により生じる材質変化に基づいて疲労強度に及ぼす板厚および鋼種の影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材および溶接条件

試験には、板厚2.0 mmおよび3.2 mmのJIS規格に対応した冷間圧延鋼板 (SPCC, 以後SP材) および高張力鋼板 (APFC390およびAPFH490, 以後HT材) を、Table 1に示すような組合せで炭酸ガスレーザー溶接した4種類の継手を使用した。表に示すように、これらの溶接継手を板厚および鋼種の組合せに応じて、SP2.0L, SP3.2L, HT2.0L, HT3.2L

Table 1. Combinations of steel and plate thickness.

SP2.0L	2.0mm(SPCC) + 2.0mm(SPCC)
SP3.2L	3.2mm(SPCC) + 2.0mm(SPCC)
HT2.0L	2.0mm(APFC390) + 2.0mm(SPCC)
HT3.2L	3.2mm(APFH490) + 2.0mm(SPCC)

平成10年7月13日受付 平成10年9月26日受理 (Received on July 13, 1998; Accepted on Sep. 26, 1998)

* 岐阜大学工学部 (Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido Gifu 507-1193)

*² 岐阜大学大学院生 (Graduate Student, Gifu University)

*³ (株)丸順養老開発センター (Yoro Development Centre, Marujun Co., Ltd.)

Table 2. Welding conditions.

Laser power (kW)	5
Welding speed (m/s)	0.42
Focus	Surface
Shielding gas (m ³ /s)	5×10 ⁻⁴

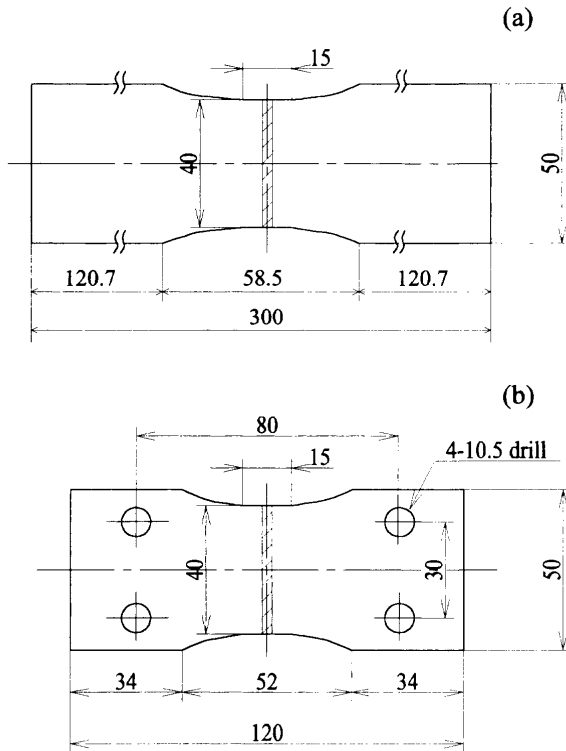


Fig. 1. Specimen configurations: (a) tensile specimen and (b) fatigue specimen.

と呼ぶ。これらの継手の溶接条件を Table 2 に示す。

2.2 試験片

試験片の形状寸法を Fig. 1 に示す。(a)および(b)はそれぞれ引張試験片および疲労試験片である。これらの試験片は、溶接した板から試験片軸に対して直角方向の溶接線(図中、斜線)を平行部中央に有するように採取されており、研磨や面取りは施されていない。また、溶接継手試験片との比較のため、板厚 2.0 mm の SP 材から Fig. 1(b) の形状寸法に切出された母材疲労試験片(SP2.0base)も準備した。

Fig. 2 に SP2.0L と SP3.2L の溶接部外観を示す。写真の上側が溶接時の上側面である。溶接は板厚を貫通しており、溶接部の幅は 0.6~2 mm できわめて狭いことがわかる。このような溶接部外観は、SP と HT の組合せの継手(HT2.0L, HT3.2L)についても同様である。

2.3 試験方法

引張試験には万能試験機を用いた。引張速度は制御しなかった。疲労試験には曲げ-ねじり疲労試験機を用い、約 33 Hz の繰返し速度で両振り面外曲げ疲労試験を行った。薄板試験片の使用から生じる試験機の荷重精度の問題を避

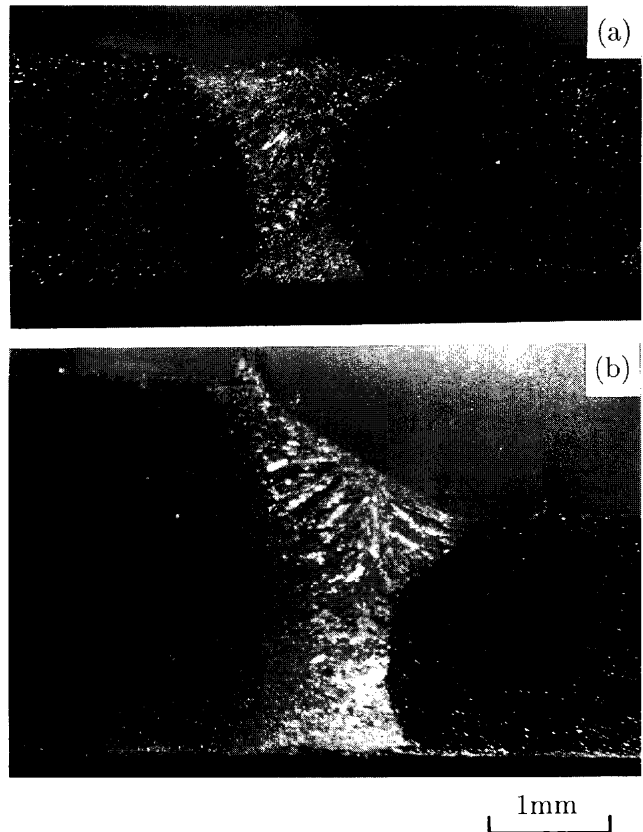


Fig. 2. Macroscopic views of weld zone: (a) SP2.0L and (b) SP3.2L.

けるために、個々の試験片の平行部(破壊箇所近傍)にゲージ長さ 2.0 mm のひずみゲージを貼付し応力を検定した。なお、異厚継手試験片(SP3.2L, HT3.2L)については、板厚 3.2 mm 側を固定し、板厚 2.0 mm 側にモーメントを負荷した。この場合、試験機シャフトの回転中心が 2.0 mm 側の板厚の中心線に一致するように試験片を取付けた。

3. 実験結果

3.1 溶接による組織および材質の変化

一般に、溶接継手においては溶接部およびその周辺では、組織、硬さ、残留応力の変化などが生じる。そこで、4 種類の溶接継手について組織、硬さおよび残留応力を調べた。得られた結果の中から、SP2.0L および HT2.0L の溶接部およびその周辺におけるそれらの変化をそれぞれ Fig. 3 および Fig. 4 に示す。いずれも、(a)は溶接部周辺の試験片長手方向の縦断面における代表的な組織写真、(b)は縦断面上における長手方向のビッカース硬さの分布、および(c)は試験片表面における長手方向の残留応力の分布を示している。なお図の横軸は、溶接部中央を原点とした試験片長手方向の距離である。

3.1.1 組織

SP2.0L の場合(Fig. 3(a))、溶接部において組織の柱状化が見られるが、溶接部からわずかに離れた母材側ではほぼ

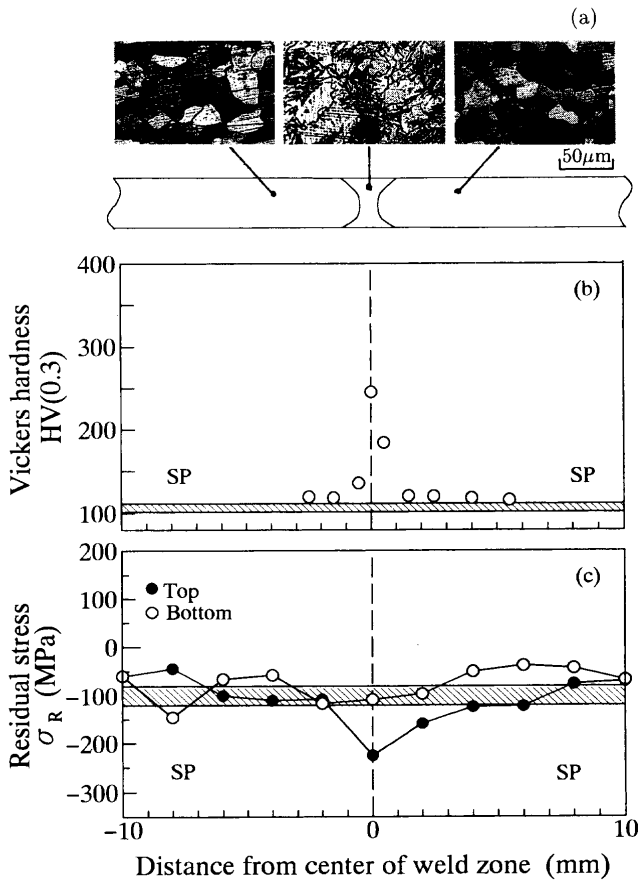


Fig. 3. Changes in (a) microstructure, (b) hardness and (c) residual stress for laser butt welded joint, SP2.0L.

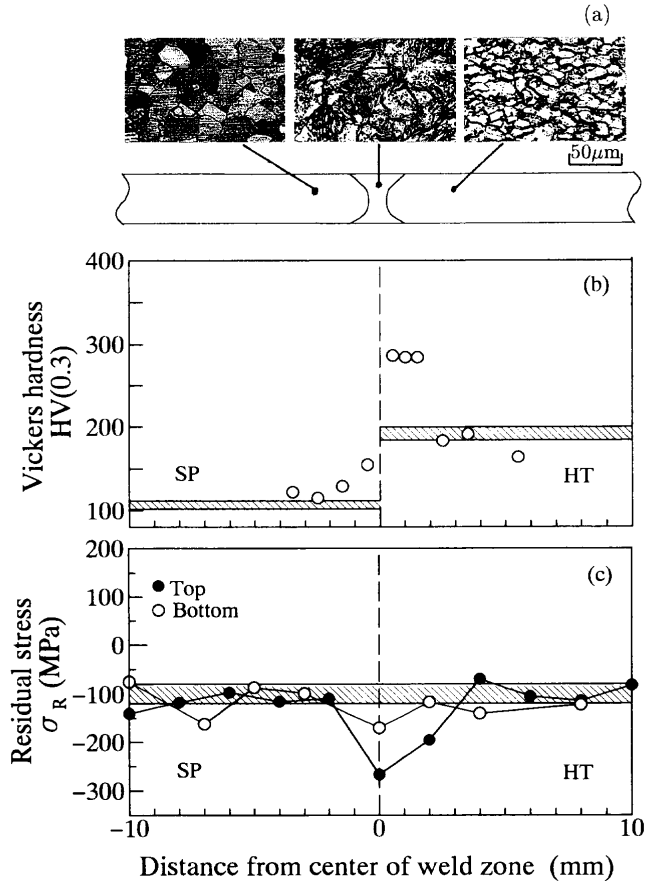


Fig. 4. Changes in (a) microstructure, (b) hardness and (c) residual stress for laser butt welded joint, HT2.0L.

母材と同様の組織となっている。また、HT2.0Lの場合 (Fig. 4(a)) も、溶接部においてのみ組織の柱状化が見られる。こうした傾向は異厚継手(SP3.2L, HT3.2L)においても同様であった。このように、レーザ溶接によって生じる組織変化はきわめて狭い範囲にとどまり、事実上溶接部のみと言える。なお、いずれの溶接継手においても、上下面における試験片長手方向の組織変化の様相は、図に示した断面と同様であった。

3・1・2 硬さ

継手の縦断面上で板厚方向に7点の硬さを測定した。それらの間に有為な差は認められなかったため、平均値を測定箇所における硬さとした。なお、測定荷重は0.3Nである。図中の斜線部は母材における硬さのばらつきの範囲を表している。SP2.0Lの硬さは溶接部においてのみ大きく上昇し、母材の最大2.5倍程度の硬さとなる (Fig. 3(b))。またSP3.2Lでも同様の傾向を示し、溶接部で母材の最大3倍程度の硬さを示した。一方、HT2.0Lの硬さは溶接部のHT材側で上昇を示す (Fig. 4(b))。また、HT3.2Lでも同様の傾向を示したが、HT2.0Lと比較すると硬さの上昇は大きかった。さらに、いずれの継手試験片においても、溶接部の硬さのばらつきは母材と比較して大きくなる傾向があった。なお、継手表面における硬さ変化は断面とほぼ同様であった。

Table 3. Conditions of X-ray stress measurement.

Characteristic X-ray	Cr-Kα
Diffraction	2 1 1
Tube voltage (kV)	30
Tube current (mA)	20
Filter	V
Irradiated area (mm ²)	4 × 2

3・1・3 残留応力

X線回折法を用いて継手試験片表面の残留応力を測定した。測定条件を Table 3 に示す。測定は、溶接時の上側の面(top)と下側の面(bottom)の両面について行った。斜線を施した範囲は母材試験片における残留応力のばらつきの範囲を示している。図から明らかなように、SP2.0LおよびHT2.0Lのいずれの継手試験片においても溶接部およびその近傍で圧縮残留応力を生じており、その大きさは母材と同程度か若干大きい。この傾向は異厚継手においても同様であり、溶接継手の疲労強度を低下させる主因である引張残留応力は検出されていない。溶接部近傍では引張残留応力も生じていると考えられるが、X線残留応力測定における照射面積が溶接部に比べて広いために検出されなかったと考えられる。なお、SP材およびHT材の母材部においても80~120 MPa程度の圧縮残留応力が存在しているが、これは冷間圧延に起因するものと考えられる。

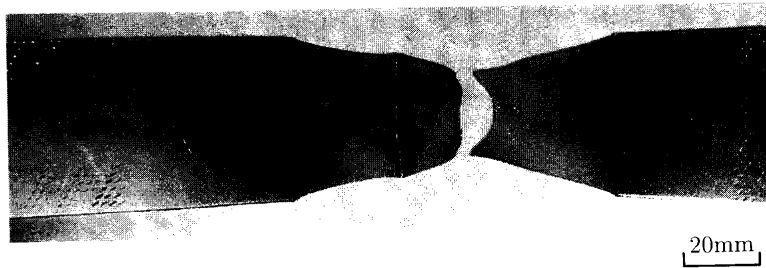


Fig. 5. A typical example of macroscopic appearance of tensile fractured welded joint (SP2.0L).

Table 4. Tensile test results.

Specimen code	Tensile strength σ_B (MPa)	Thickness t (mm)
SP2.0L	295	2.0 + 2.0
SP3.2L	310	3.2 + 2.0
HT2.0L	308	2.0 + 2.0
HT3.2L	312	3.2 + 2.0

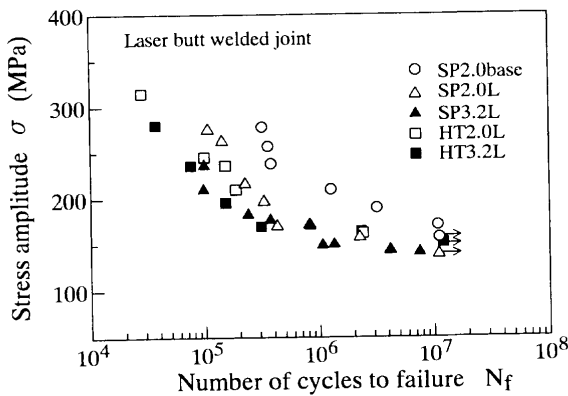


Fig. 6. S-N diagram for laser butt welded joints and base metal.

3.2 引張強さ

溶接継手試験片の引張試験結果を Table 4 に示す。表から明らかなように、異種材継手試験片のほうが同種材継手試験片より、また異厚継手試験片のほうが同厚継手試験片よりやや高い引張強さを示す。

破壊した試験片の様相の一例を Fig. 5 に示す。これは SP2.0L の結果であるが、いずれの継手試験片においても大きな伸びを呈し、溶接部から離れた板厚 2.0mm の SP 材側で破断した。なお、溶接部または止端での破断は全く観察されなかった。

3.3 疲労強度

Fig. 6 に継手試験片および比較材の母材試験片の S-N 曲線を示す。まず、4 種類の継手試験片の疲労強度は母材 (SP2.0base) より低く、レーザ溶接により疲労強度は低下することがわかる。SP2.0L と SP3.2L を比較すると、 $\sigma > 170$ MPa では SP3.2L のほうがやや低い疲労強度を示すが、それ以下の応力では疲労強度はほぼ同程度である。同様に、HT3.2L の疲労強度は HT2.0L よりも低く、鋼種の組合せにかかわらず板厚の影響が認められる。一方、SP2.0L

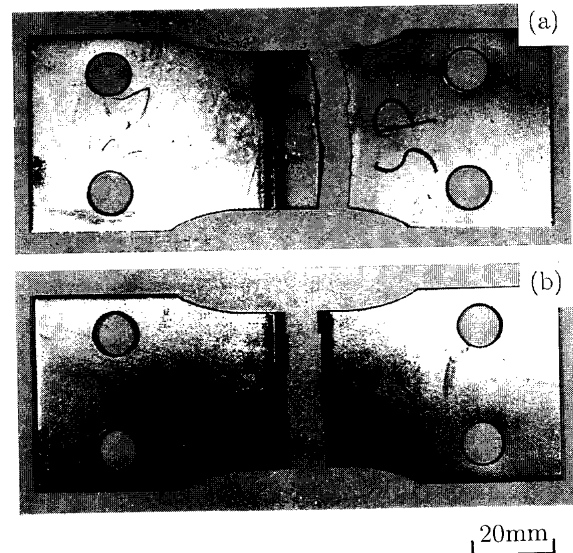


Fig. 7. Macroscopic appearance of fatigue failed welded joints: (a) SP2.0L and (b) SP3.2L.

と HT2.0L および SP3.2L と HT3.2L を比較すると、疲労強度はほぼ同程度であり、疲労強度に及ぼす鋼種の影響は見られない。

Fig. 7 に疲労破壊した試験片の例を示す。同厚継手試験片 (SP2.0L および HT2.0L) の場合、例外なく溶接部中央から約 4~5 mm 離れた箇所で、また異厚継手試験片 (SP3.2L および HT3.2L) の場合、例外なく段付部において破壊した。

4. 考察

4.1 変形の拘束による引張強さの上昇

Table 4 に示したように、レーザ突き合せ溶接された異厚継手試験片の引張強さは、同厚継手試験片より高かった。同様の結果が Guglielmino ら¹⁰⁾によっても得られている。また、異種材継手試験片は同種材継手試験片より高い引張強さを示した。

継手の変形は、組合せた板厚と溶接による継手部の顕著な硬さ上昇によって拘束される。すなわち、異厚継手試験片の場合、溶接部の硬さ上昇による拘束に加えて、厚板側が薄板側の変形を拘束することにより、また異種材継手試験片の場合、高強度の HT 材側が低強度の SP 材側の変形を

拘束することにより、引張強さが上昇したものである。

継手試験片の引張破壊はいずれも溶接部から離れた箇所
で生じた。このことは継手部の健全性を示している。同厚
継手試験片の場合、Fig. 2に見られるようにビード厚さが
板厚よりやや減少する。ビード形状の適正さを判断する基
準として $t/t_0 \geq 0.7$ (t : ビード厚さ, t_0 : 板厚) が提案されて
おり、 $t/t_0 < 0.7$ では溶接部で、 $t/t_0 \geq 0.7$ では母材部で破壊す
ることが指摘されている³⁾。また、真保ら¹²⁾も継手性能を
確保するために、この比を0.7以上にすることがあること
を指摘している。本研究の同厚継手試験片の場合、 t/t_0 は
約0.93であり、これらの指摘を満足している。

4.2 疲労強度に及ぼす板厚および材質の影響

Fig. 6に示したように、レーザー突き合せ溶接継手の疲労
強度は母材よりも低下した。Guglielminoら¹⁰⁾は、レーザ
突き合せ溶接された同種材の同厚および異厚継手試験片の
疲労限度が母材よりも低下することを示している。一方窪
田³⁾や内原ら¹³⁾は、同厚継手試験片の疲労強度がほぼ母材
と同程度であることを報告している。試験方法や溶接条件
など継手の疲労強度に及ぼす要因は多いので、こうした異
なる結果の原因を明らかにすることは容易ではない。

溶接部では組織、硬さおよび残留応力などの変化に加え
て、前述したとおり同厚継手試験片においてはビード厚さ
が板厚より小さくなる形状変化を生じる。これは切欠きと
して作用し、応力集中を引起こして疲労強度を低下させる
一因となると考えられる。当然、異厚継手試験片におい
ても段付部(溶接部)で応力集中を生じる。そこで、応力集
中の程度を調べるために、溶接部形状に対して有限要素法
により弾性解析を行った。その結果、同厚および異厚継手
試験片に対して応力集中係数はそれぞれ約2.7および3.1で
あった。

同厚継手試験片の場合、破壊は溶接部中央から約
4~5mm離れた箇所が生じた。このことは明らかに溶接部
における材質変化や形状変化は疲労強度低下の直接の原因
とはならないことを示している。溶接部では比較的大きい
圧縮残留応力を生じており、同時に顕著な硬さ上昇を示す
ので、溶接部の強度はむしろ母材より上昇している。また、
溶接部近傍で生じていると思われる引張残留応力も結果的
に強度低下を招く大きさではなかったと考えられる。すな
わち、溶接部およびその近傍は変形の拘束をもたらす、疲
労変形、すなわち損傷が溶接部から離れた強度、硬さの低
い部分に集中する結果、同厚継手試験片の疲労強度は母材
より低くなる。結果的に、この集中の程度は溶接部の形状
変化に起因する応力集中よりも大きかったことを示してい
る。一方異厚継手試験片の場合、例外なく段付部において
破壊が生じた。この場合も同様に溶接部の強度は上昇する
ので、疲労変形が強度や硬さの低い薄板側の母材部に集中
することになるが、溶接部、すなわち段付部の大きな応力
集中により破壊が生じたものと思われる。また、このこと

が同厚継手試験片に比べて低い異厚継手試験片の疲労強度
の原因と考えられる。

最後に、鋼種の相違は疲労強度に影響を及ぼさなかった。
これは、同厚継手試験片の場合破壊はSP材側で生じ、ま
た異厚継手試験片の場合段付部の応力集中に起因して破壊
が生じることに基づいている。

5. 結言

レーザー溶接継手の強度特性を明らかにすることを目的と
して、異なる板厚および鋼種の組合せでレーザー突き合せ溶
接された4種類の継手試験片の引張試験および疲労試験を
行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 溶接による顕著な組織変化は溶接部で生じた。硬
さも溶接部において上昇し、母材の2.5~3倍程度の硬さ
を示した。また、溶接部およびその周辺では母材よりやや
大きい圧縮残留応力を生じ、溶接継手で問題となる引張残
留応力は検出されなかった。

(2) 同厚継手試験片より異厚継手試験片のほうが、ま
た同種材継手試験片よりも異種材継手試験片のほうが高い
引張強さを示した。

(3) 引張破壊は、いずれの継手試験片においても溶接
部中央から離れた低強度材側で生じ、溶接部における破壊
は観察されなかった。

(4) 板厚および鋼種の組合せにかかわらず、溶接継手
試験片の疲労強度は母材より低下した。鋼種の相違は疲労
強度に影響を及ぼさなかったが、異厚継手試験片は同厚継
手試験片よりもやや低い疲労強度を示した。

(5) 同厚継手試験片の場合、溶接部中央から約4~
5mm離れた低強度材側で疲労破壊が生じるのに対して、
異厚継手試験片の場合、段付部(溶接部)で生じた。

文 献

- 1) F.Natsumi: *Press Working*, **34** (1996), 18.
- 2) Y.Sasaki, K.Kumashiro, R.Kageyama and K.Sakamoto: *Press Work-
ing*, **34** (1996), 34.
- 3) K.Kubota: *J. Soc. Auto. Engrs. Jpn.*, **50** (1996), 17.
- 4) Y.Miyazaki and M.Ohara: *Press Working*, **34** (1996), 30.
- 5) T.Hirosaki: *J. Jpn. Weld. Soc.*, **63** (1994), 289.
- 6) M.Ono, M.Kabasawa and M.Ohmura: *Q. J. Jpn. Weld. Soc.*, **14**
(1996), 586.
- 7) C.Hsu and C.E.Albright: *Eng Fract. Mech.*, **39** (1991), 575.
- 8) J.-F. Flavenot, J.-P. Deville, A.Diboine, M.Cantello and S.-L.Gobbi:
Weld. World, **31** (1993), 358.
- 9) P.C.Wang: *Int. J. Fatigue*, **17** (1995), 25.
- 10) E. Guglielmino, G.La Rosa, S.M.Oliveri and A.Pasta: Proc. Int.
Sympo. Auto. Tech. Automa, Automa. Automa. Ltd., vol. 26
(1993), 57.
- 11) Y.C.Lam and G.K.Cole: *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **16**
(1993), 983.
- 12) 真保幸雄, 小野守章, 海津亨, 山崎雄司, 由田征史, 樺沢真
事: 溶接学会全国大会講演概要, **53** (1993), 88.
- 13) 内原正人, 栗田真人, 広瀬洋三, 福井清之, 福岡弘: 日本機
械学会第4回機械材料・材料加工技術講演会 講演論文集 (No.
96-39), (1996), 85.