自動車用鋼板レーザー突合せ溶接継手の衝撃引張変形強度[†]

津田 紘^{*} 臺丸谷 政志^{**} 小林 秀敏^{***}

Impact Tensile Strength of Laser Welded Butt Joint of Steel Sheets for Vehicles

by

Hiroshi TSUDA^{*}, Masashi DAIMARUYA^{**} and Hidetoshi KOBAYASHI^{***}

The present study is concerned with the static and dynamic characteristics of laser welded joints related to the tailored blanks technique for vehicles. Three kinds of laser welded butt joints made of different steel sheets for vehicles, a mild steel HR270, high tensile strength steels HR590 and HR780, were used in the static and impact tensile tests. In the static test, all welded butt joint specimens showed that the tensile strength was similar to that of the base metal specimens corresponding to them, but the strain at fracture decreased. The measurement of the impact tensile strength of laser welded butt joints was performed by means of the modified split Hopkinson bar method for impact tensile test. The impact tensile strength of the laser welded butt joint of mild steel HR270 tended to increase comparing with the static one due to the effect of strain rate. On the other hand, regarding the high tensile strength steels of HR590 and HR780, the effect of strain rate was not recognized at about 320s^{-1} . Thus the impact tensile strength and the fracture strain were almost same as the results in the static tests.

Key words : Impact test, Impact tensile strength, Split Hopkinson bar, Laser welded butt joint, High tensile strength steel, Vehicles

1 緒 言

近年、自動車の衝突安全性の向上を図るため、構造強度設計において車体重量が増加する傾向にある。一方、地球環境保護の観点から温暖化の原因となるCO₂を削減するために車体を軽量化し燃費を向上させることが課題となっている。これらの相反する要求を満足させるため、すなわち軽量化を図りながら強度信頼性の向上も図る技術として、高張力鋼を使用したテーラード・ブランク技術が注目されている。^{1)~4)} 素材寸法や変形強度の異なる鋼板を溶接・接合しそれをプレス成形するテーラード・ブランク技術においては、溶接部材の機械的特性やプレス成形性の研究の必要性は云うまでもなく、さらに、高張力鋼板の溶接部材に関する衝撃引張変形強度や衝撃疲労強度などの力学的特性を明らかにすることも重要である。しかし、一般に溶接継手の静的強度および疲労強度に関する研究は数多く報告されているが、衝撃荷重下における溶接継手の変形強度に関しては、高張力鋼板に限らずシャルピー衝撃試験以外はほとんどなされていない。^{5)~7)}

ここでは、落錘式の試作ホプキンソン棒法装置を用いて高張力鋼板のレーザー突合せ溶接継手の衝撃引張変形強度試験を行った。機械・構造物の強度設計の基礎資料となる各種材料の動的応力-ひずみ関係を決定する衝撃試験法は未だ標準化されていないが、衝撃圧縮変形に関するホプキンソン棒法は最も信頼性の高い衝撃試験法の一つとして広く用いられている。^{8), 9)} しかし、衝撃圧縮試

験とは異なり、衝撃引張試験においては、特に薄板状の試験片の場合は、試験片装着方法や測定応力波形の変形初期ピーク発生等の問題がある。前報では薄板試験片のねじ締結部を含むホプキンソン入・出力棒中の応力波伝播を調べ、動的応力-ひずみ曲線の見掛け上の降伏応力の上昇現象の要因を探り、板状試験片の衝撃引張変形強度の測定法について検討を行った。¹⁰⁾ また、それらの知見に基づき、自動車用軟鋼および高張力鋼薄板の重ねおよび突合せマグ溶接継手の衝撃引張変形強度を調べた。¹¹⁾

本研究では、高張力鋼薄板のレーザー突合せ溶接継手の衝撃引張変形強度を調べることを目的としている。前報に引き続き270MPa級軟鋼と590MPa級および780MPa級高張力鋼板のレーザー突合せ溶接継手に関して衝撃引張変形強度試験を実施した。まず、各試験母材およびレーザー溶接継手の静的な機械的性質を調べるため、硬度分布測定や万能材料試験機を用いた静的引張試験等を行った。次に、衝撃引張試験用に設計・試作した落錘式スプリット・ホプキンソン棒実験装置を用いて衝撃引張変形強度試験を行った。衝撃引張試験において比較的再現性のよい測定結果が得られ、レーザー溶接試験片の衝撃引張強度はひずみ速度効果によって静的引張強度と同等以上の値を示した。静的および衝撃破断伸びに関しても、レーザー溶接試験片はマグ溶接試験片に比べ優位な結果が得られた。

[†] 原稿受理 平成16年11月10日 Received Nov. 10, 2004

^{*} 正 会 員 スズキ(株) 〒432-8611 浜松市高塚町, Suzuki Motor Co., Takatsuka-cho, Hamamatsu, 432-8611

^{**} 正 会 員 室蘭工業大学工学部機械システム工学科 〒050-8585 室蘭市水元町, Dept. of Mech. Sys., Muroran Inst. of Tech., Mizumoto-cho, Muroran, 050-8585

^{***} 正 会 員 大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻 〒560-8531 豊中市待兼山町, Dept. of Mech. Sci. and Bioengineering, Graduate School of Eng. Sci., Machikaneyama-cho, Toyonaka, 560-8531

2 試 験 材 料

2・1 レーザー溶接継手

本研究では, 270MPa 級自動車用軟鋼 (HR270), 590MPa 級高張力鋼 (HR59) および 780MPa 級高張力鋼 (HR780) の 3 鋼種の試験材料について, それぞれ母材平滑試験片とレーザー溶接による突合せ溶接試験片の計 6 種類の薄板試験片を用いた。

供試材の化学成分を Table I に示す。また, レーザー溶接条件を Table II に示す。なお, 溶接継手の予熱および後熱処理は施していない。

Fig. 1 にレーザー突合せ溶接継手の形状と寸法を示す。試験片はすべて板厚 2.3mm, 平行部長さ 20mm, 板幅 7mm である。

2・2 溶接部幅と硬度分布

Fig. 2 に高張力鋼 HR590 と HR780 試験片のレーザー溶接部の断面写真を示す。溶融部および熱影響部の幅は

Fig. 2. Transverse cross section of laser welded butt joint.

2mm 程度と, 一般的にアーク溶接に比べ溶接部の幅は相当量狭くなっているが, 完全溶け込みの状態であることがわかる。

Fig. 3 にレーザー溶接試験片の表裏それぞれ 0.5mm 位置におけるマイクロビカース硬度分布を示す。HR270 母材は結晶粒度の比較的粗いフェライト組織で, 溶接によってフェライトとマルテンサイトの混合組織になっており溶接部で硬度が高くなっている。また, HR590 は, Table I に示すように高 C, Mn, Si であり, 母材の微細結晶粒のフェライト組織が溶接によりマルテンサイト組織に変態して硬度が大きく増加している。一方, HR780 では, HR590 に比べ低 C, Mn, Si で, 微細フェライト組織の母材は溶接によってマルテンサイト組織に変態しているが硬度に大きな変化は認められずむしろ若干低下している。

2・3 静的応力-ひずみ曲線

母材およびレーザー溶接継手の静的変形強度を調べるため, 万能材料試験機 (INSTRON5586) を用いて静的引張試験 (クロスヘッド速度 0.5mm/min., ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 4.2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$) を行った。溶接試験片の場合, 平行部は一樣な応力・ひずみ状態にはないと考えられるが, 平

Table I. Welding condition.

Material	Chemical composition, wt (%)				
	C	Si	Mn	P	S
HR270	0.05	0.00	0.23	0.01	0.011
HR590	0.09	0.42	1.53	0.01	0.002
HR780	0.05	0.20	1.30	0.01	0.001

Table II. Chemical composition of base materials.

Laser type	YAG Laser
Laser power	3kW
Shield gas	Ar (flow rate 14 l/min)
Welding speed	1.8 m/min
Spot diameter	0.6 mm
Wave length	1.06 μm

Fig. 1. Picture and geometry of laser welded butt joint.

Fig. 3. Vickers hardness distributions across weld interface in laser welded butt joint.

滑試験片の場合と同様に、便宜上、引張荷重を平行部断面積で除した値を引張応力とし、また、伸びを平行部長さで除した値をひずみとした。

Fig. 4 (a)–(c) に静的引張試験結果の静的引張応力–ひずみ曲線を銅種ごとに示す。図中の B. Metal は Base metal (母材), W. Joint は Laser welded butt joint (レーザー突合せ溶接継手) を意味する。溶接継手 (a) HR270 と (b) HR590 の引張強度はともに母材強度をわずかに超えるか同等であり、破断ひずみは母材試験片のその 70 ~ 80% 程度で、破断はいずれも母材部で生じた。(c) HR780 では、母材に比べ溶接継手の破断ひずみは半分以下になっており、溶接部で破断し母材強度にわずかに達していない。

3 衝撃引張試験

3・1 衝撃引張ホプキンソン棒試験装置

本研究では、衝撃引張試験用に設計試作した落錘式スプリット・ホプキンソン棒実験装置を用いて衝撃引張変形強度試験を行った。衝撃試験装置の基本的構成を Fig. 5 に示す。

Fig. 4. Tensile stress-strain curves of base metal and laser welded joint specimen in static tests.

Fig. 5. Schematic diagram of Hopkinson bar setup for impact tensile test.

自由落下させた衝撃円管（高圧配管用炭素鋼鋼管：外径 42.7mm，内径 35.5mm，長さ 2000mm）を入力棒の下端に固定されているフランジに衝突させることによって衝撃負荷を加え，入力棒を伝達する入射引張応力波により試験片を引張り破断させる。入力棒および出力棒には，直径 25mm，長さ 4000mm のステンレス棒 (SUS304) を使用した（詳細は文献 12）。入・出力棒の縦弾性係数は $E = 198\text{GPa}$ ，密度 $\rho = 7.9 \times 10^3\text{kg/m}^3$ で，縦弾性波の伝播速度 C は，計算および波動伝播実験ともに， $C = 5.0 \times 10^3\text{m/s}$ と求められた。なお，フランジを含む応力棒の自重の影響は十分に小さく無視される。入・出力棒には試験片締結端からそれぞれ 600mm の位置に Gage 1 と Gage 2 の半導体ひずみゲージ (KYOWA, KSP-2-120-E4) がそれぞれ 2 枚軸に対称に貼付されている。また，入射する応力波形を調べるため入力棒の衝撃端から 1000mm の位置に Gage 0 が貼付されている。Gage 1 では入射応力波 σ_i および反射応力波 σ_r が測定され，Gage 2 では透過応力波 σ_t が測定される。測定された応力波より，次式に基づいて，応力 σ ，ひずみ ε ，ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ が算定される。⁸⁾

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \frac{2}{\rho C l_0} \int \left\{ \sigma_i \left(t - \frac{l_1}{C} \right) - \sigma_r \left(t + \frac{l_2}{C} \right) \right\} dt \\ \dot{\varepsilon}(t) &= \frac{2}{\rho C l_0} \left\{ \sigma_i \left(t - \frac{l_1}{C} \right) - \sigma_r \left(t + \frac{l_2}{C} \right) \right\} \\ \sigma(t) &= \frac{A}{A_0} \sigma_i \left(t + \frac{l_2}{C} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

ここで， t は時間， A_0 ， l_0 はそれぞれ試験片の断面積，平行部の長さであり， A ， C ， ρ はそれぞれ入・出力棒の断面積，縦弾性波伝播速度，質量密度である。また， l_1 ， l_2

は、それぞれ入力棒上のひずみゲージから試験片端面までの距離と出力棒上のひずみゲージから試験片端面までの距離である。

3・2 試験片装着方法

薄板状試験片を入・出力棒に取り付けるために、短い丸棒にスリットを入れ、アタッチメントとして試験片と接着接合した。接着剤はエポキシ樹脂系の構造接着剤 GM-5520（プレニー技研）を用い、接着後 50℃ で 2 時間熱処理を行った。丸棒アタッチメントを雄ねじ加工し、試験片体を雌ねじが切られている入・出力棒端にねじ込む装着方法を採用した。板状試験片と丸棒アタッチメントの接着方法と、それらの入・出力棒とのねじ締結の概略図を Fig. 6 に示す。

3・3 ホプキンソン棒の応力波形

衝撃引張試験も静的引張試験と同様に、3 鋼種、それぞれ平滑母材試験片およびレーザー突合せ溶接継手試験片、計 6 種類の試験片について、衝撃円管を高さ 4m から自由落下（衝撃速度 $V = 8.85\text{m/s}$ ）させて衝撃引張試験を行った。それぞれ 3～4 試験片について試験を行い比較的再現性のよい結果が得られた。

一例として、Fig. 7 に高張力鋼板 HR590 の溶接継手試験片の場合に関してホプキンソン棒で計測された応力波の時間的変動曲線を示す。他の試験片の場合についても同様な応力波形が測定されている。前報で議論したように、出力棒で計測される透過応力波には、ねじ締結部の影響等で波動に若干の変形初期ピークが見られる。溶接継手試験片に比べ各平滑母材試験片については比較的大きな初期ピークが観察されたが、ここでは主として溶接継手の衝撃引張変形強度を調べることを目的としており、透過応力波の初期ピークに起因する動的応力-ひずみ曲線の見掛け上の降伏応力の上昇についての議論は前報にゆずる。¹⁰⁾

Fig. 6. Steel sheet specimen with threaded grips, which is screwed into Hopkinson bars.

Fig. 7. Variation of stresses with time on stress bars at strain gages for HR590 laser welded butt joint.

4 衝撃変形強度

4・1 動的引張応力-ひずみ曲線

各試験片についてホプキンソン棒法によって計測された応力波形より、式 (1) を用いて、応力、ひずみ、ひずみ速度の関係を算出し、静的な場合と同様に動的引張応力-ひずみ曲線を求めた。

Fig. 8 に高張力鋼板 HR590 のレーザー溶接継手試験片の衝撃試験で得られたひずみ速度-ひずみ関係の例を示す。他の試験片についても同様な結果が得られており、平均的なひずみ速度は $\dot{\epsilon} = 320 \sim 340\text{s}^{-1}$ の範囲である。

Fig. 9 (a)～(c) に、自動車用軟鋼 HR270、高張力鋼 HR590 および HR780 のそれぞれ平滑母材試験片の動的引張応力-ひずみ曲線を静的試験結果と共に示す。HR270 については、ひずみ速度効果によって静的試験に比べ動的引張強度は大きくなるのがわかる。HR590 および HR780 については、ひずみ速度効果は余り認められず動的引張強度は静的引張強度とほぼ同じである。ここで、HR270 および HR590 の動的破断ひずみが 25% ほどで終わっているが、これは破断を示すものではなく時間的な測定限界による。

Fig. 10 (a)～(c) に、HR270、HR590 および HR780 鋼薄板のレーザー溶接突合せ継手試験片の動的引張応力-ひずみ曲線を静的試験結果と共に示す。Fig. 9 (a)～(c) の平滑母材試験結果と同様な傾向を示しており、特に高張力鋼板 HR590 および HR780 に関しては動的引張変形挙動と静的引張変形挙動の間の差異は認められない。な

Fig. 8. Relation between strain-rate and strain for impact tensile test of HR590 laser welded butt joint.

お、ホプキンソン棒法による測定時間中に破断した試験片に関しては、試験後の破断試験片の突き合わせによる破断ひずみ値と測定結果とはほぼ一致することを確認している。また、Fig. 9, 10 に示す通り、高張力鋼板に関しては平滑試験片およびレーザー溶接継手試験片ともに比較的初期応力ピークが抑えられた動的引張応力-ひずみ曲線が得られている。

Fig. 11 に衝撃引張試験後の破断レーザー溶接継手試験片の写真を示す。破断位置は静的引張試験の場合と同様に、HR780 はすべて溶接部の中心近傍で破断し、HR270 および HR590 は溶融部・熱影響部と試験片肩部の中間点付近の母材部で破断した。

4・2 溶接継手の衝撃引張強度と破断ひずみ

Fig. 12 にレーザー溶接継手の衝撃引張強度と破断ひずみの関係を静的試験におけるそれらと共に示す。なお、ホプキンソン棒法による測定時間中に破断に至らなかった試験片については、試験後の破断試験片の突き合わせによって計測した破断ひずみを用いた。Fig. 12 (a) に示す自動車用鋼板 HR270 に関しては、ひずみ速度効果に

Fig. 9. Tensile stress-strain curves for impact and static tests on steel sheet specimens of (a) HR270, (b) HR590 and (c) HR780.

Fig. 10. Tensile stress-strain curves for impact and static tests on laser welded butt joint specimens of (a) HR270, (b) HR590 and (c) HR780.

Fig. 11. Picture of fractured laser welded butt joint specimens after impact tensile testing.

よって平滑母材試験片および溶接継手試験片のすべてで静的引張強度に比べ衝撃引張強度は大きくなるが、破断ひずみは減少する傾向を示した。なお、図中に示すように、○は平滑母材試験片、□はレーザー溶接継手試験片、また、塗りつぶしマークは衝撃試験結果、白抜きマークは静的試験結果である。一方、Fig. 12 (b), (c) に示す高

張力鋼板 HR590 および HR780 に関しては、衝撃試験結果と静的試験結果の間には衝撃引張強度および破断ひずみ共に大きな相違がないことがわかる。

以上の溶接継手試験片の引張強度と破断ひずみの関係より、本実験に用いたレーザー溶接継手試験片の衝撃引張強度は静的引張強度に比べて大きくなるか同等である。また溶接継手試験片の破断ひずみに関しては衝撃負荷（ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 320\text{s}^{-1}$ ）を受ける場合と静的負荷（ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 4.2 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ）を受ける場合との間に大きな差異は認められない。

5 結 言

本研究では、テーラード・ブランク技術に関連して、レーザー溶接継手の衝撃引張変形強度特性を調べる目的で、自動車用軟鋼板 HR270、高張力鋼板 HR590 および HR780 のレーザー突合せ溶接継手について衝撃引張試験

を落錘式のホプキンソン棒法を用いて行い、次の結果を得た。

(1) 供試レーザー溶接継手の静的引張試験に関して、HR270 および HR590 の引張強度は母材強度よりわずかに大きいとか同等であり HR780 ではわずかに小さくなった。また、破断ひずみに関しては共通して母材に比べ溶接継手のそれは減少した。なお、HR780 については材料選定を含めさらに適正な溶接条件等の検討の余地を残す。

(2) 丸棒アタッチメントを介して板状のレーザー溶接継手試験片をホプキンソン入出力棒にねじ込む装着方法を採用することによって、特に高張力鋼に関しては衝撃引張変形強度試験における初期ピークの比較的小さい、すなわち動的引張応力-ひずみ曲線における見掛け上の降伏応力上昇がある程度抑えられた良好な測定結果が得られた。

(3) 自動車用軟鋼板 HR270 はひずみ速度依存性が大きく、レーザー溶接継手試験片および母材平滑試験片の総てで静的強度に比べ衝撃引張強度は大きくなるが、破断ひずみは減少する傾向を示した。一方、高張力鋼板 HR590 および HR780 に関しては、平均ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 320\text{s}^{-1}$ ではひずみ速度効果はほとんど認められず、レーザー溶接継手試験片の衝撃引張強度および破断ひずみは静的試験の結果とほぼ同じ値を示した。

なお、本論文は平成 16 年度民間等との共同研究プロジェクトとして室蘭工業大学と大阪大学およびスズキ株式会社で進められた共同研究成果の一部であり、協力頂いた関係各位に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) A. Kuroda, S. Ishizuka and H. Tsuda, Proc. Int. Body Eng. Conf., Oct. 2003, Makuhari, Japan, 35 (2003).
- 2) 石塚 哲, 津田 紘, 日本材料学会北海道支部特別講演会 講演資料, 1 (2003).
- 3) 于 強, 塑性と加工, **44**, 725 (2003).
- 4) 福井清之, 溶接学会全国大会講演概要第 74 集, 27 (2004).
- 5) 佐藤邦彦, 向井慶彦, 豊田政男, “溶接工学”, p.172 (1979) 理工学社.
- 6) 溶接学会編, “溶接・接合便覧 (第 2 版)”, p.326 (2003) 丸善.
- 7) 横山 隆, 小川恒一, 溶接学会論文集, **19**, 513 (2001).
- 8) 小川欽也, 実験力学, **2**, 86 (2002).
- 9) 横山 隆, 非破壊検査, **48**, 388 (1999).
- 10) 臺丸谷政志, 小林秀敏, 津田 紘, 材料, **53**, 1240 (2004).
- 11) 津田 紘, 臺丸谷政志, 小林秀敏, 材料, **53**, 1247 (2004).
- 12) 津田 紘, 臺丸谷政志, 小林秀敏, 材料, **54**, 734 (2005).

Fig. 12. Relation between tensile strength and fracture strain for laser welded butt joint and base metal specimens.