日本機械学会論文集（A 編）
73 巻 732 号（2007-8）

論文 No. 07-0156

異種鋼板を用いた自動車用溶接継手の衝撃引張変形強度の評価*

高 橋 保 行*1，臺丸谷 政志*2，小 林 秀 敏*3
津 田 紘*4，藤 木 裕 行*5

Evaluation of Impact Tensile Strength of Welded Joints Made of Different Steel Sheets for Automobiles

Yasuyuki TAKAHASHI*6, Masashi DAIMARUYA, Hidetoshi KOBAYASHI,
Hiroshi TSUDA and Hiroyuki FUJIKI

*6 Tomakomai Industrial Technology Center,
32-6 Kashiwabara, Tomakomai-shi, Hokkaido, 059-1362 Japan

This paper is concerned with the impact tensile strength of laser welded butt joints made by combining different steel sheets. Three classes of steel sheets for automobiles, mild steel (HR 270), high tensile strength steels (HR 590 and HR 780), were used in this study. Two kinds of CO_2 laser welded butt joints specimens made of their different steel sheets, abbreviated as HR 270 & HR 590 joint and HR 270 & HR 780 joint, were investigated in static and impact tests, together with the three kinds of laser welded joints made of the same steel sheets, that is, HR 270 & HR 270, HR 590 & HR 590 and HR 780 & HR 780 joint. The measurement of the impact tensile strength was performed by the apparatus of split Hopkinson tension bar. The static tensile strength of HR 270 & HR 590 joint and HR 270 & HR 780 joint were similar to that of HR 270 & HR 270 joint, but their impact tensile strengths significantly incresed in comparison with the static ones due to the effect of strain rate, especially in part of HR 270 base metal.

Key Words: Impact Strength, Impact Tensile Properties, Laser Welded Joint, Split Hopkinson Bar, High Tensile Strength Steel

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 CO_2 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求められている．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衝突安全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)~(3)．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，高張力鋼板の溶接継手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変形強度に関する報告例は，高張力鋼板に限らず少ない(4)~(5)．

著者らは，二，三の自動車用鋼板に関して，同種の鋼板による突合せ溶接継手に関する衝撃引張変形強度について検討してきた(6)~(8)．本研究では，270MPa 級軟鋼板，590MPa 級および 780MPa 級高張力鋼板を供試材として，異種鋼板の CO_2 レーザ溶接継手の引張変形強度へのひずみ速度の影響について，改良型ホプキンソン棒法装置を用いて実験的検討を行った．

2. 試験材料

2・1 溶接継手試験片　供試材として 270MPa 級自動車用普通鋼（HR270），590MPa 級高張力鋼(HR590)および 780MPa 級高張力鋼（HR780）を用いた．異種鋼板突合せ CO_2 レーザ溶接継手試験片として HR270 と HR590 の組み合わせ（以下 HR270&HR590），HR270 と HR780 の組み合わせ（以下 HR270&HR780）による 2 種類の試験片を作製した．比較のため母材平滑試験片 3 種（HR270B，HR590B，HR780B と記述する）および同種鋼板突合せ CO_2 レーザ溶接継手試験片 3 種（以下，母材平滑試験片と同順に HR270J，HR590J，HR780J）も作製し試験に供し

* 原稿受付　2007 年 2 月 22 日．
*1 正員，苫小牧市テクノセンター（〒059-1362 苫小牧市柏原 32-6）．
*2 正員，フェロー，室蘭工業大学機械システム工学科（〒050-8585 室蘭市水元町 27-1）．
*3 正員，大阪大学大学院基礎工学研究科（〒560-0043 豊中市待兼山町 1-3）．
*4 正員，スズキ（株）（〒432-8611 浜松市高塚町 300）．
*5 正員，室蘭工業大学機械システム工学科．
E-mail：taka@tomatech.jp

た．供試材の化学成分を表 1 に，また CO_2 レーザ溶接条件を表 2 に示す．

図 1 に衝撃試験用 CO_2 レーザ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 2.0mm，平行部長さ 20mm，板幅 7mm である．

Table 1 Chemical composition of base materials.

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr
HR270	0.006	0.04	0.17	0.02	0.007	0.02
HR590	0.09	0.37	1.30	0.02	0.003	0.04
HR780	0.04	0.04	1.30	0.01	0.000	0.05

(unit: mass%)

Table 2 Welding conditions.

Laser type	CO_2 Laser
Laser power	5.5kW
Shield gas	Ar (flow rate 30 ℓ /min)
Welding speed	5m/min

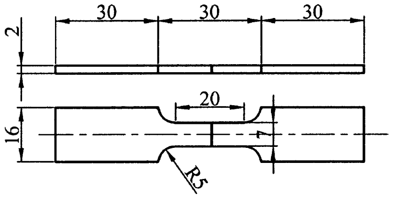


Fig. 1 Configuration of tensile specimen with CO_2 laser welded butt joint.

2・2 溶接部と硬度分布 図 2 に異種鋼板突合せ溶接試験片 HR270&HR590 と HR270&HR780 の溶接部の横断面写真を示す．いずれの試験片においても，溶接部および熱影響部の幅は 2mm 程度であり，また溶接部も完全溶け込みの状態であることがわかる．

図 3 に同種鋼板および異種鋼板 CO_2 レーザ溶接継手試験片の溶接部近傍におけるマイクロビッカース硬度分布を示す．測定位置は，試験片の表面・裏面からそれぞれ 0.5mm の 2 直線上とし，0.25mm 間隔，測定荷重 1.96N，荷重保持時間 15s で測定した．図 3 のビッカース硬度は 2 直線上の測定値の平均値を示した．

図 3(a)より HR270J の母材部におけるビッカース硬度は 100 であったが，溶接部の硬度はレーザ溶接後の急冷によって 220 に上昇した．HR590J のビッカース硬度も母材部の 220 に対し 440 と大幅に上昇した．一方，図 3(b)より HR780J の溶接部のビッカース硬度は母材部に対して，大幅な増加は生じていない．熱影響部の硬度は HR780J のみ母材部に対してビッカース硬度で 30 ほど低下したが，そのほかの試験片についでは硬度低下は見られない．

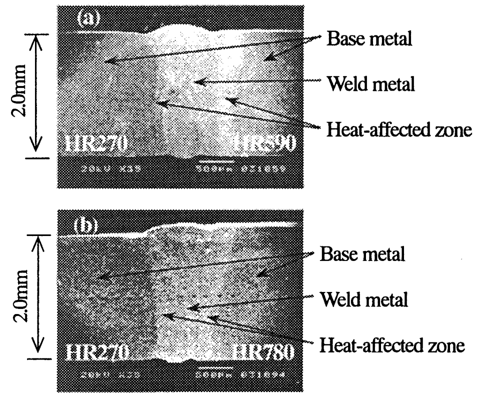


Fig.2 Transverse cross section of CO_2 laser welded butt joints, (a)HR270&HR590 and (b)HR270&HR780.

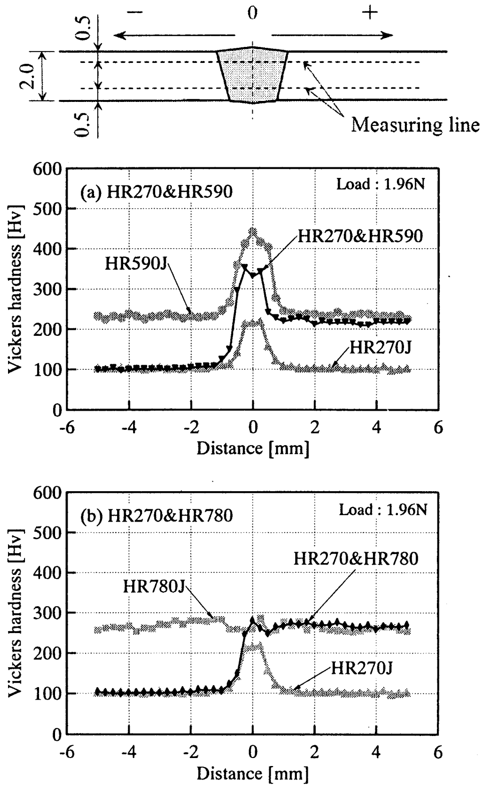


Fig.3 Average Vickers hardness distributions along measuring line of welded joint specimens, (a) HR270&HR590 and (b) HR270&HR780.

HR270&HR590 の溶接部のビッカース硬度は 330 であり，HR270J 溶接部および HR590J 溶接部のほぼ中

間的な値であった．また，HR270&HR780 の溶接部のビッカース硬度は HR270 側から HR780 側に向かって滑らかな上昇が見られたが，HR780 側熱影響部で HR780J と同程度の硬度低下が認められた．

3. 静的引張試験

異種鋼板溶接継手の静的引張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をひずみ速度 4.2×10^{-4} s^{-1}（クロスヘッド速度 0.5mm/min）で行った．静的引張試験は 1 試験片種につき 2 本ずつ実施した．

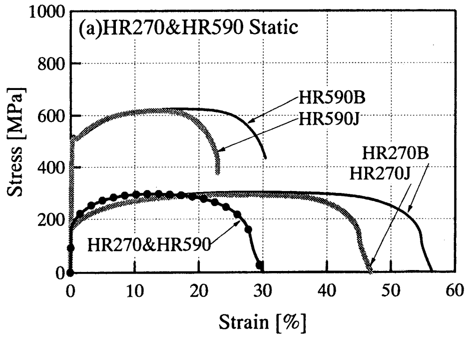
図 4(a)に，HR270&HR590 溶接継手および HR270 と HR590 鋼種の母材平滑試験片と同種鋼板溶接継手試験片の静的引張応力–ひずみの関係を，図 4(b)に，HR270&HR780 溶接継手と母材および同種溶接継手の応力ーひずみ関係を示す．また，表 3 に母材平滑試験片における鋼種ごとの静的降伏強度σ_Y，静的引張強度σ_T，および試験後に試験片をつき合わせて求めた静的引張試験での破断ひずみε_Fの実測値を示す．なお，溶接部近傍での応力状態やひずみ状態は必ずしも均一とは考えられないが，ここでは簡単のため，荷重を平行部断面積で除した値を応力値とし，また伸びを平行部長さで除した値をひずみとした．

同種鋼板溶接継手試験片である HR270J，HR590J および HR780J の引張強度については，それぞれの母材平滑試験片と同等の値を示していることより，同種鋼板溶接部の材料強度は母材部の強度と同等以上であると考えられる．

異種鋼板溶接継手試験片である HR270&HR590，および HR270&HR780 の引張強度は，低強度材である HR270B とほぼ同程度の値を示していることより，これらの溶接部は，HR270 の母材部と同等以上の静的引張強度を持ち溶接状態は良好であると考えられる．

同種鋼板溶接継手試験片の破断ひずみについては，HR270J が母材平滑試験片に対して 10 数%，HR590J が 20 数%，HR780J が 10%強減少している．これらは溶接時の熱影響によって溶接部が硬化し，延性が低下したことにより，同種鋼板溶接継手試験片の破断ひずみがそれぞれ減少したためと考えられる．

異種鋼板溶接継手試験片の破断ひずみは，HR270&HR590 および HR270&HR780 ともに，低強度材である HR270B と比較して 50%弱減少した．破断ひずみがほぼ半分になった原因は，低強度材の引張強度が高強度材の降伏強度以下であったために，伸びの大部分を試験片平行部長さの半分を占める低強度材側だけで受け持つ状態で破断したためと考えられる．



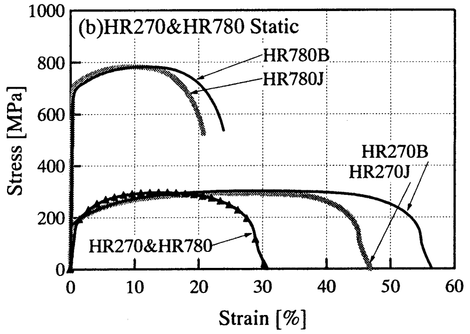


Fig.4　Tensile stress-strain curves in static test.

Table 3　Mechanical properties of base metals.

Test pieces	σ_Y [MPa]	σ_T [MPa]	ε_F [%]
HR270B	165	305	57
HR590B	525	625	30
HR780B	680	785	24

4. 衝撃引張試験

4・1 衝撃引張ホプキンソン棒試験装置　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図 5 に示す．

入出力棒には直径 25.0mm，長さ 4000mm の SUS304 棒を使用した．入出力棒の縦弾性係数 E は 194GPa，密度ρは 7.76×10^3kg/m^3 で，縦弾性波の伝ぱ速度 C は計算および波動伝ぱ実験ともに 5.02×10^3 m/s と求められた．衝撃円管には外径 42.7mm，内径 35.5mm，長さ 2000mm，質量 6.90kg の高圧配管用炭素鋼鋼管を用い，高さ 4m（衝撃速度 V=8.85m/s）から自由落下させて衝撃引張試験を行った．入・出力棒には試験片締結端からそれぞれ 600mm の位置に半導体ひずみゲージ（KYOWA, KSP-2-120-E4）を 2 枚軸対称に貼付し，入力棒側，出力棒側をそれぞれ Gage1, Gage2 とした．また入射する応力波形を調べるために

入力棒の衝撃端から 1000mm の位置に Gage0 を貼付した．Gage1 で入射応力波σ_iおよび反射応力波σ_rを測定し，Gage2 で透過応力波σ_tを測定した．測定波はブリッジボックス，動ひずみ計（KYOWA CDV-700A）を通して，分解能 12bit，サンプリング周波数 500kHz のデジタルオシロスコープ（東洋テクニカ Nicolet INTEGRA10）に記録した．この試験装置によって測定された応力波から，式(1)に基づいて各試験片の応力－ひずみ曲線，およびひずみ速度-ひずみ曲線を求めた．

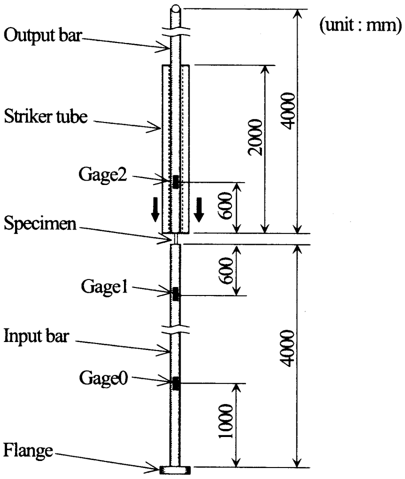


Fig.5 Schematic diagram of Hopkinson bar setup for impact tensile test.

$$\varepsilon(t)=\frac{2}{\rho C l_0}\int\left\{\sigma_i\left(t-\frac{l_1}{C}\right)-\sigma_t\left(t+\frac{l_2}{C}\right)\right\}dt$$

$$\dot{\varepsilon}(t)=\frac{2}{\rho C l_0}\left\{\sigma_i\left(t-\frac{l_1}{C}\right)-\sigma_t\left(t+\frac{l_2}{C}\right)\right\} \qquad (1)$$

$$\sigma(t)=\frac{A}{A_0}\sigma_t\left(t+\frac{l_2}{C}\right)$$

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，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．

4・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，図 6 に示すように外径 16mm，長さ 50mm の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(ブレニー技研)を用い，接着後 50℃で 2h 熱処理を行った．その後，丸棒アタッチメント全体をピッチ 1mm にて雄ねじ加工し，それら全体を雌ねじが切られている入・出力棒にねじ込む装着方法を採用した．[(6)~(8)]

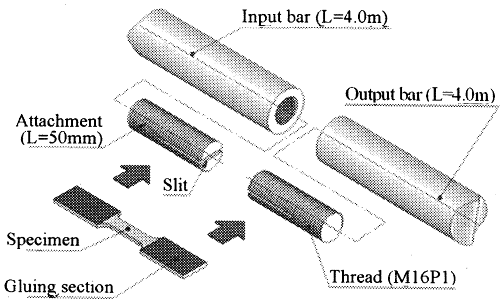


Fig.6 Steel sheet specimen with threaded attachments screwed into Hopkinson bars.

5. 衝撃変形強度

5・1 衝撃引張応力－ひずみ曲線 衝撃引張試験も静的引張試験と同様に，母材平滑試験片 3 種，同種鋼板突合せ溶接試験片 3 種，HR270&HR590 および HR270&HR780 の異種鋼板突合せ試験片 2 種の計 8 種の試験片について行った．衝撃引張試験は 1 試験片種ごとに 3～6 本実施し，再現性の良い結果が得られた．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より，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．

図 7 に各母材平滑試験片の衝撃試験で得られたひずみ速度-ひずみ関係を示す．HR270B と HR590B の結果が，ひずみ 25%近傍で終了しているが，これは試験機の時間的な測定限界によるもので破断を示すものではない．ひずみ速度は変形初期を除きほぼ一定であり，平均的な値は 320～360 s^{-1} 程度で，他の試験においても同様な結果であった．

図 8 に衝撃応力－ひずみ曲線を示す．図中，HR270B と HR270J，および HR590B の結果がひずみ 25%近傍で終了しているが，これは図 7 と同様に時間的な測定限界によるもので，他の試験片は全て測定時間内に破断に至っている．また，全ての曲線において応力の変形初期ピークがみられる．これは一つに，bcc 金属の特徴として試験片自体が高いひずみ速度で変形する場合に，変形初期に十分な初期可動転位を生

成できないために降伏応力が高くなることなどが考えられる．他方，衝撃引張試験特有の問題として，試験片装着部のねじ部における応力波の反射・干渉の影響等も存在するため[6]，本研究では応力の初期ピークについては特に言及せず，衝撃引張強度は変形初期ピーク部を除いた値とした．また，試験装置の構造上，全ての衝撃試験片には入力棒等の自重により 10MPa 程度の静的な予応力が生じているが，この値については計測した衝撃応力値に加算した．

図 8(a)より同種鋼板溶接継手試験片である HR270J および HR590J の衝撃引張強度は，それぞれの母材平滑試験片とほぼ同様の値であることがわかる．特に HR270J に関しては母材平滑試験片との差異はほとんど認められなかった．

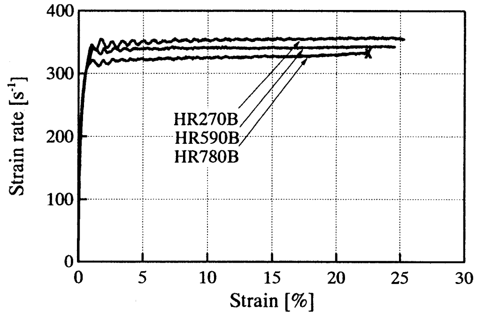


Fig.7 Relations between strain rate and strain in impact tests.

異種鋼板溶接継手試験片である HR270&HR590 の衝撃引張強度は 405MPa であり，低強度材である HR270B の衝撃引張強度の 380MPa と比較してわずかに上昇した．

図 8(b)より同種鋼板溶接継手試験片である HR780J の衝撃引張強度は，HR780B と比較して若干減少した．これは溶接時に熱影響を受けた部位の材料強度が母材部より低下したためと考えられる．

異種鋼板溶接継手試験片である HR270&HR780 の衝撃引張強度は 400MPa であり，低強度材である HR270B の衝撃引張強度の 380MPa と比較してわずかに上昇した．

異種鋼板溶接継手試験片の衝撃引張強度が低強度材である HR270B の衝撃引張強度と比較して上昇した原因は，以下のように考えられる．すなわち，変形の大部分を長さが半分となった低強度材側である HR270 部のみで受け持ったことにより，異種鋼板溶接継手試験片の HR270 部のひずみ速度が 2 倍程度に上昇していると考えられる．一方，図4との比較から分かるように HR270 材はひずみ速度依存性が大きい．このため，ひずみ速度効果が HR270 の母材平滑試験片と比較してより強く現れたものと考えられる．

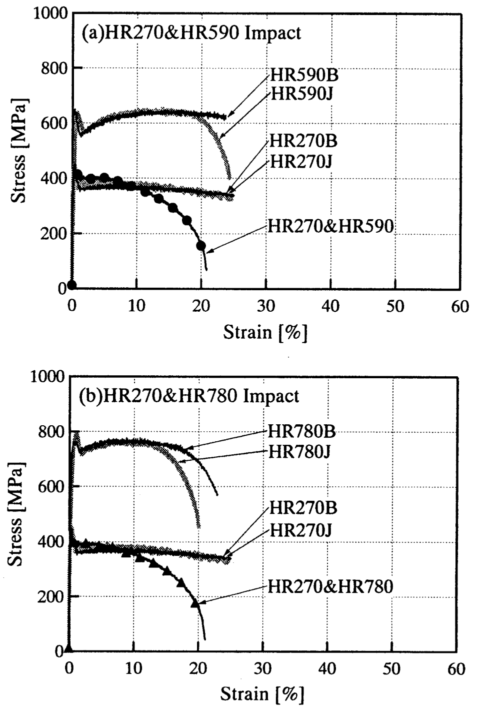


Fig.8 Tensile stress-strain curves in impact tests for (a)HR270&HR590 and (b)HR270&HR780.

5・2 溶接継手の衝撃引張強度と破断ひずみ

図 9 に本研究で得られた全ての衝撃引張強度と破断ひずみの関係を，静的試験における関係と共に示す．図中の塗りつぶされたプロットが衝撃試験結果，白抜きのプロットが静的試験結果である．引張強度は衝撃試験時の変形初期ピーク部を除いた最大値であり，破断ひずみは全てホプキンソン棒法による試験後に試験片を突き合わせた実測値である．

HR270 の母材平滑試験片および同種鋼板溶接継手試験片の衝撃引張強度は，ひずみ速度効果により静的引張強度に比較して 30%程度上昇した．この場合の衝撃破断ひずみは静的破断ひずみに比較して 5～20%程度減少した．

HR590B および HR590J の衝撃引張強度は，ひずみ速度効果によりわずかに上昇した．この場合の衝撃破断ひずみは，静的破断ひずみと比較して 5～10%程度上昇した．

HR780B および HR780J の衝撃引張強度では，ひずみ速度効果は全く認められなかった．この場合の衝撃

破断ひずみは，HR780B の場合は静的破断ひずみと比較して 10 数%程度上昇した．HR780J の場合は，4 本実施した試験のうち 3 本が溶接熱影響部で破断した．母材で破断した試験片の破断ひずみは，静的試験の結果と比較して明確な差異は認められなかったが，熱影響部で破断した試験片の衝撃破断ひずみは最大で 10 数%程度低下した．一般に硬度が低くなると延性は増加する．HR780J は硬度が低下した熱影響部で集中的に塑性変形が発生し，その部分に引張応力が集中することによって，逆に試験片全体としての破断ひずみが低下したものと考えられる．

異種鋼板溶接継手試験片の衝撃引張強度は，HR270&HR590，HR270&HR780 の場合ともに，静的引張強度に比較して 30%以上上昇し，今回試験を実施した試験片中で最も大きい上昇率であった．これは，衝撃強度の上昇が，主として HR270 部のひずみ速度依存性によるものであり，異材継手の HR270 部のひずみ速度が，HR270J 試験片の約 2 倍になっていることに起因すると考えられる．一方，衝撃破断ひずみは，静的破断ひずみ比較して 30%程度減少した．

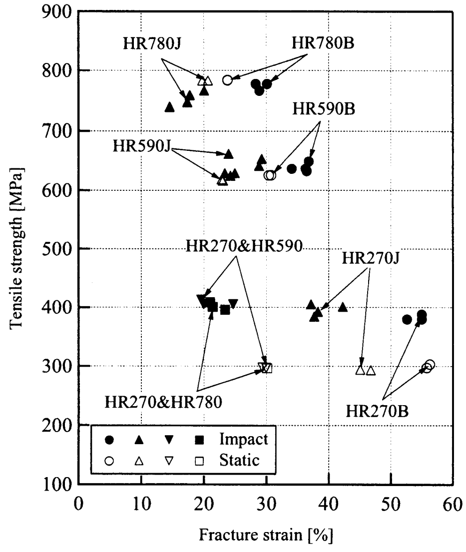


Fig.9 Relations between tensile strength and fracture strain obtained from static tests and impact tests.

6. 結 言

本研究では，テーラード・ブランク技術に関連して，異種鋼レーザ溶接継手の衝撃引張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 CO_2 レーザ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) 異種鋼板突合せ溶接継手の静的引張試験に関して，試験片は全て低強度材側の母材部で破断し，引張強度は低強度材の HR270 母材平滑試験片の静的引張強度とほぼ同程度となる結果を得た．

(2) 異種鋼板突合せ溶接継手の衝撃引張試験に関して，静的引張試験の結果と同様に，試験片は全て低強度材側の母材部で破断し，衝撃引張強度は低強度材の HR270 母材平滑試験片の衝撃引張強度よりも上回る結果を得た．これは，変形の大部分を平行部長さが半分の低強度材側である HR270 部のみで受け持ったため，その部分のひずみ速度が 2 倍程度に上昇したためと考えられる．

(3) 異種鋼板突合せ溶接継手の破断ひずみに関して，静的引張試験，衝撃引張試験ともに，組合せ異種材の降伏応力比の関係により，長さが半分の低強度材部のみがほぼ全ての変形を受け持つ結果となった．そのため，試験片全体としての破断ひずみは，ほぼ共通して低強度材の HR270 母材平滑試験片の半分程度に減少した．

なお，本研究は平成 17 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，協力いただいた関係各位に感謝の意を表す．

文 献

(1) Ishizuka, S. et al., *Development Technologies of Lightweight Materials for Automobiles*, (2006), p.116, CMC Publishing.
(2) Qiang, Y., Lightweight Structure Design for Automobile, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol.44, No.510 (2003), pp.725-731.
(3) Uchihara, M. and Fukui, K., The Hybrid Welding of High Strength Steels for Automotive, *Proceedings of the national meeting 2004 autumn of Japan Welding Society*, Vol.75-330, (2004-9), pp.204-205.
(4) Japan Welding Society ed., *Welding and Joining Handbook (Second edition)*, (2003), p.326, Maruzen.
(5) Yokoyama, T. and Ogawa, K., Stress-Strain Characteristics of S15C Carbon Steel Friction Welded Butt Joints under Impact Tensile Loading, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol.19, No.3 (2001), pp.513-529.
(6) Daimaruya, M. et al., Discussions on Method of Impact Tension Test for Strip Specimen, *Journal of the Society of Materials Science JAPAN*, Vol.53, No.11(2004), pp.1240-1246.
(7) Tsuda, H. et al., Impact Tensile Strength of Welded Structural Members for Vehicles, *Journal of the Society of Materials Science JAPAN*, Vol.53, No.11(2004), pp.1247-1252.
(8) Tsuda, H. et al., Impact Tensile Strength of Laser Welded Butt Joint of Steel Sheets for Vehicles, *Journal of the Society of Materials Science JAPAN*, Vol.54, No.9 (2005), pp.921-926.