

# 自動車用高張力鋼板の溶接継手の衝撃引張り特性に 及ぼす予疲労の影響

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 社団法人日本材料学会
	公開日: 2007-12-14
	キーワード (Ja):
	キーワード (En): impact tensile strength, pre-fatigue,
	split hopkinson bar, welded butt joint, sheet specimen
	作成者: 津田, 紘, 臺丸谷, 政志, 小林, 秀敏
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/294

## 自動車用溶接継手の衝撃引張り特性に及ぼす予疲労の影響

津田 紘\* 臺丸谷政志\*\*小林秀敏\*\*\*

## Effect of Pre-Fatigue on Impact Tensile Properties of Welded Butt Joint for Vehicles

by

## Hiroshi TSUDA\*, Masashi DAIMARUYA\*\* and Hidetoshi KOBAYASHI\*\*\*

In recent vehicle manufacturer, the tailored blanking technique using high tensile strength steels begins to be adopted to reduce the weight of automotive bodies without any decreases of their stiffness. Therefore, it is important to storage of the fundamental data concerning the technique. In this research, the effect of pre-fatigue on the impact tensile properties of the welded butt joint of high strength steel plates was investigated by means of the split Hopkinson bar method for tensile test. It was found that the effect of pre-fatigue on the tensile strength of welded joints is quite small if the applied stress in pre-fatigue is less than the apparent yield stress of joints. However, the joint specimens of high strength steel subjected to high cycle pre-fatigue showed lager elongation than the virgin specimens. This may be caused by the increase of hardness due to pre-fatigue observed in the weld zone of the joints.

Key Ward: Impact tensile strength, Pre-fatigue, Split Hopkinson bar, Welded joint, Sheet specimen, Vehicles.

## 1 緒 言

最近,自動車産業では、車体を軽量化し燃費を向上さ せるために、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 が注目されている<sup>1)-3)</sup>.この技術においては、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、高速変形時の力学的特性の研究も、自動車衝突 時の耐衝撃性の向上の観点から極めて重要である.溶接 部材に関しては、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<sup>4)-7)</sup>、高張力鋼薄板の溶接構 造部材の衝撃変形強度に関する研究はほとんどなされて いない.

各種材料の動的応力-ひずみ関係を決定する衝撃試験 法としては、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<sup>80.90</sup>.著者らは、 落錘式のホプキンソン棒法衝撃引張試験装置を用いて、 動的応力-ひずみ関係における不安定ひずみに関する研 究<sup>100</sup>や測定応力波形に発生する初期ピークの発生要因 に関する研究<sup>110</sup>、マグ溶接により製作された高張力鋼板 の突合せおよび重ね継手を用いた衝撃引張り特性に関す る研究<sup>120</sup>を行っている.最近、板橋らは、低サイクル 疲労を与えた建築構造用圧延鋼材の衝撃引張り試験を室 温と0℃の2つの温度環境で実施し、予疲労を与えられ た材料は、引張り強度の変化は小さいが、伸びは小さく なり、特に0℃の結果では引張り強さに対する降伏応力 の比が大きくなると報告<sup>130</sup>している.

本研究では,前報<sup>12)</sup>と同様に,自動車用軟鋼板と高 張力鋼板の突合せ溶接継手に,低サイクルと高サイクル の予疲労を与え,試作した落錘式スプリット・ホプキン ソン棒試験装置を用いて衝撃引張り試験を行い,高張力 鋼板の突合せ溶接継手の衝撃引張り特性に及ぼす予疲労 の影響について検討した.

## **2 実 験** 2・1 母材および溶接継手試験片

本研究では 270MPa 級自動車用軟鋼板 (HR270) と 590 MPa 級および 780MPa 級の高張力鋼板 (それぞれ HR590, HR780) の 3 鋼種の, それぞれ母材平滑試験片および突 合せマグ溶接継手試験片の計 6 種類の薄板状試験片を用 いた.供試材の化学成分を Table I に, 溶接条件を Table II に示す.自動車部品においては, 780MPa 級高張力鋼 用のマグ溶接ワイヤーはほとんど使用されないので,実 用性を考慮して JIS Z3312 YGW23 相当の溶接ワイヤーを HR590 および HR780 に用いた.また, 溶接材に関して

Table I	Chemical	composition	of specimen	materials
I dole I	Chemieur	composition	or speennen	materiano.

余熱や溶接後の熱処理は施していない.

		Chemical composition, wt(%)				
	С	Si	Mn	Р	S	
HR 270	0.05	0.00	0.23	0.01	0.011	
HR 590	0.09	0.42	1.53	0.01	0.002	
HR 780	0.05	0.20	1.30	0.01	0.001	

#### Table II Welding conditions

Material	HR 270	HR 590	HR 780
Welding wire	YGW15	YGW23	YGW23
Welding current		120 A	
Arc voltage		20 V	
Welding speed		45 cm/min.	
Shield gas	Ar	80 % + CO <sub>2</sub> 20	) %
U		2	

試験片はすべて板厚 2.3 mm で,平行部は長さ 20 mm, 幅 7 mm であり,溶接試験片においては,溶接部が平行 部 の 中央になるように 製作した.疲労試験には, Fig.1(a) に示すような 掴み部の長さが 60 mm,幅が 25 mm の試験片を用い,溶接材の側面および母材の全面は, #3000 のエメリー紙で並仕上げを施した.衝撃引張り試 験には,衝撃試験装置の取り付けサイズの制約から,掴 み部を波線で示すサイズに縮小した Fig.1(b) に示す小型 試験片を用いる必要が有り,予疲労付与にもこの小型試 験片を用いた.



Fig.1 Specimens used (a) for fatigue test and (b) for impact tension tests.

#### 2・2 静的引張り試験

母材および溶接試験片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 験をひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-2} \sec^{-1}$ で行った.得られた母 材および溶接継手の降伏応力  $\sigma_{Y}$ ,引張り強さ  $\sigma_{B}$ ,標点 距離 20 mm の伸び率  $\delta_{20}$ を Table III に示す.但し,溶接 継手に関しては,溶接部と母材部で断面積が異なるため, 一様な応力・ひずみ状態にはないと考えられるが,母材 平滑試験片の場合と同様に,便宜上,引張荷重を母材部 断面積で除した値を引張応力とし,伸びを平行部長さで 除した値をひずみとした.さらに,予疲労を付与した試 験片についても,衝撃引張強度との比較のために,上記 と同じ条件で引張試験を実施した.なお,試験片の本数 は,各条件につき2本とした.

Fable III Tens	sile properties	and fatigue	limit
----------------	-----------------	-------------	-------

Materials		σ <sub>Y</sub> (MPa)	σ <sub>B</sub> (MPa)	$\delta_{20}\ \%$	σ <sub>Fat</sub> (M Pa)
HR270	B. Metal	234	321	51.7	210
	W. Joint*	264	350	26.4	180
HR 590	B. Metal	530	640	28.1	380
	W. Joint*	567	654	18.2	210
HR 780	B. Metal	720	799	20.4	530
	W. Joint*	677	760	8.8	150

\* Stresses were obtained by deviding by corss-sectional area of smooth part.

#### 2・3 疲労試験及び予疲労の付与

疲労試験及び予疲労の付与は、油圧式疲労試験機(島 津 SERVO PET, 50kN)を用いて、20Hzの正弦波状の片振 り引張り負荷(応力比 *R* = 0)を与えて実施した.得られ た*S-N*曲線をFig.2に示す.但し、継手試験片の応力値 は、Table III と同様に母材部の断面積で便宜的に除した 値を用いている.母材試験片はすべて平行部の中央付近 で、溶接試験片は、HR270の2~3のケースを除き、い ずれも余盛と母材の境界付近の熱影響部から破断した. 母材の疲労限度 *o*Fat (Table II 参照)は、材料の引張り強 度の大きさに応じて高くなっているが、溶接継手の疲労 限度は、溶接部における応力集中が大きいためか、いず れの材料も200 MPa 前後の値を示た.

予疲労を負荷する最大応力  $\sigma_{max}$  (応力振幅の2倍)は, 低サイクルでは継手材の降伏応力を,高サイクルでは疲 労限度 (Table III)を目安として,Table IV に示す応力値



Fig.2 Results of fatigue tests for three base metals and butt welded joints.

を採用した. また,予疲労の繰り返し数 n は,予疲労の 各応力レベルにおける破断繰り返し数 N を基準として, n/N = 30,60% (それぞれ n<sub>30</sub>, n<sub>60</sub> と記載) となるように設 定した. これらの条件も,応力レベルを短い水平線で, 繰返し数を▽,▼印で Fig.2 に併せて示した.

				-			
Materials		Low cycle			High cycle		
		$\sigma_{\rm max}$	$n_{30}$	$n_{60}$	$\sigma_{ m max}$	$n_{30}$	$n_{60}$
		(MPa)	$\times 10^3$	$\times 10^3$	(MPa)	$\times 10^3$	$\times 10^3$
HR270	B. Metal	270	40	80	220	450	900
	W. Joint*	270	36	72	220	75	150
HR 590	B. Metal	550	14	28	400	420	840
	W. Joint*	550	6.9	13.8	230	187.5	375
HR780	B. Metal	670	8	16	550	18.5	37
	W. Joint*	670	1.1	2.2	180	120	240

Table IV Pre-fatigue conditions

\* Stresses were obtained by deviding by corss-sectional area of smooth part.

#### 2・4 衝撃引張り試験

衝撃引張り試験には、スプリット・ホプキンソン棒法 を用いた落錘式衝撃試験装置(Fig.3)を設計・試作し利 用した. 試験では, 衝撃円管(鋼管:外径42.7 mm, 内 径 35.5 mm, 長さ 2000 mm) を自由落下させ,入力棒の 下端に固定されているフランジに衝突させる. この衝撃 負荷により発生した引張り応力波は、入力棒を伝播して 試験片に達し、試験片を引張り破断させる.入・出力棒 (直径 25 mm, 長さ 4000 mm の SUS 304 ステンレス棒) の縦弾性係数はE=200 GPa,密度 $\rho=7.7\times10^{3}$ kg/m<sup>3</sup>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=5.0×10<sup>3</sup> m/sec と求められた.入・出力棒には, 入力棒の衝撃端から1000 mmの位置と、試験片締結端 からそれぞれ 600 mm の位置に半導体ひずみゲージ (KYOWA, KSP-2-120-E4) がそれぞれ2 枚軸対称に貼付さ れ、これらのゲージから測定される入射波 $\sigma_i$ 、反射波  $\sigma_r$ および透過波 $\sigma_t$ より次式に基づいて、試験片の公称 応力 σ, 公称ひずみ ε, ひずみ速度 ¿を算定した<sup>8)</sup>.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2}{\rho C l_0} (\sigma_i - \sigma_t)$$

$$\varepsilon = \frac{2}{\rho C l_0} \int (\sigma_i - \sigma_t) dt \qquad (1)$$

$$\sigma = \frac{A}{A_0} \sigma_t$$

ここで, *t* は時間, *A*<sub>0</sub>, *l*<sub>0</sub> はそれぞれ試験片の断面積, 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.

試験片の入・出力棒への取り付けには、前報<sup>12)</sup>と同様に、スリットを入れた短い丸棒をアタッチメントとして用い、これを試験片の掴み部に接着接合した後、雄ねじ加工して実験に供した.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2時間保持した.詳細は前報<sup>12)</sup>を参照されたい.

実験はすべて室温で行い、衝撃円管を4mの高さから 自由落下させ、衝撃速度 $V_0 = 8.85$  m/s でフランジに衝突 させた.また、再現性の確認のため、各条件において2 本の試験片を用いた.

## 3 実験結果および考察

## 3・1 母材および溶接継手の硬さ分布

母材および溶接継手試験片の側面の硬さ分布に及ぼす 予疲労の影響について調べるために、マイクロビッカー ス硬さ試験を, Fig.4に示すように、試験片表面から0.5 mmの直線状に0.5 mm間隔,荷重1.98 N,保持時間20



Fig.3 Schematic diagram of Hopkinson bar setup for impact tensile test.



Fig.4 Comparison of Vicker's hardness measured on side of virgin and pre-fatigued welded joints.

sec. で実施した。Fig.4は、予疲労を付与していない継 手試験片と高サイクル/n<sub>30</sub>(いずれの材料も10<sup>5</sup>回程度) の予疲労を与えた試験片の硬さ分布を、各材料について 示している. 先に述べたように、HR780材については、 実用性を考慮してHR590と同じ溶接材料ワイヤーを用 いたために、溶接部の硬度は母材部より低い. 予疲労を 付与することにより、HR780とHR270材の溶接部およ びHR590の母材部に硬さの上昇が見られる. 低サイク ル予疲労ではほぼ同様の傾向を示したが、硬度の上昇は 全般に小さかった.

#### 3・2 静的引張り試験結果

母材の静的引張り試験より得られた応力-ひずみ曲線



Fig.5 Stress-strain curves obtained from static tension tests for three base metals with pre-fatigue.

をFig.5に,溶接継手のそれらをFig.6に示す.ただし, 溶接材の応力とひずみは,先にも述べたように母材部の 断面積と平行部の長さを基に計算し,予疲労材の断面積 および平行部長さは,予疲労後の値を用いた.図では, 予疲労無しの処女材を実線で,高サイクル予疲労を付与 した試験片を破線で,低サイクル予疲労の場合を二点鎖 線で示している.

Fig.5 の母材の結果からは,HR270 の低サイクル予疲労材が,他と大きく異なる曲線を示している.これは,予疲労の際に負荷した最大応力  $\sigma_{max} = 270$  MPa が母材の降伏応力  $\sigma_{Y} = 234$  MPa よりかなり大きく,このため試験片に大きな残留ひずみを生じたこと,応力とひずみの算



Fig.6 Stress-strain curves obtained from static tension tests for butt welded joints with pre-fatigue.

出に、塑性変形を受けて減少した予疲労後の断面積と増 大した平行部長さを用いたことに起因していると考えら れるが、引張強度への予疲労の影響は小さい.両高張力 鋼においては、強度および伸びへの予疲労の影響はほと んど認められない.

一方, Fig.6の継手試験片結果からは, HR270の低サ イクル予疲労の場合を除けば, 引張強度への予疲労の影 響は殆ど認められない. 伸びに関しては, 予疲労付与に より, HR270材では減少, HR590材ではほとんど影響 なし, HR780材では, 予疲労無しの試験片より2~3% 程度,率にして2割ほど大きくなるケースが, 予疲労材 の一部に見られる.



Fig.7 Stress-strain curves obtained from impact tension tests for three base metals with pre-fatigue.

#### 3・3 衝撃引張り試験結果

母材の衝撃引張り試験より得られた応力-ひずみ曲線 をFig.7に、溶接継手のそれらをFig.8にそれぞれ示す. 表記は静的試験結果と同じである.また、Fig.7(a)、(b) で、応力-ひずみ曲線が、約25%のひずみ付近で終わっ ているのは、衝撃試験の測定範囲の制約のためで、破断 を意味しているのではない.

Fig.7の母材の衝撃引張試験結果から,HR270材は負荷速度依存性が大きく、引張強度は静的結果に比べ約2~3割上昇するが,両高張力鋼には,強度の負荷速度依存性は殆ど無い.さらに,予疲労の衝撃引張強度への影響はいずれの材料においても殆ど認められず,先に板橋・



Fig.8 Stress-strain curves obtained from impact tension tests for butt welded joint with pre-fatigue.

福田の建築構造用圧延鋼材に関する研究<sup>13)</sup>で得られた 結果と同様の結果となっている.

Fig.8 の継手材の衝撃引張試験結果では,静的試験結 果と同様に,いずれの材料においても予疲労による引張 強度への影響は殆ど認められないが,予疲労を受けた HR270 材の伸びは,処女材のそれより小さくなる傾向を 示し,HR590 材では余り影響を受けない結果となってい る.しかしながら,HR780 材では,予疲労有りの試験片 の伸びが,処女材より3~4%程度,率にして3割ほど 大きくなる場合もあることがわかる.

Fig.9は、衝撃引張試験で観察された破断位置を示し



Fig.9 Fracture location observed in (a) all base metal specimens, (b) HR270, (c) HR590 and (d) HR780 welded joint specimens tested at dynamic rate.



Fig.10 Effect of pre-fatigue on static tensile strength, (a) & (b),and fracture strain, (c) & (d), of three base metals and butt welded joints.

ている.母材試験片は、すべての材料について平行部の ほぼ中央で、継手試験片は、HR270材は肩部付近の母材 部、HR590材は母材部の中央付近、HR780材は予盛り 端の熱影響部で破断した.また、静的試験における破断 位置も、ここに示した衝撃試験結果と全く同じであった.

#### 3・4 引張り強度,破断ひずみと予疲労

Fig.5 ~ 8 の引張り試験結果から得られた引張強度 σ<sub>B</sub> および破断ひずみ ε<sub>F</sub>に及ぼす予疲労の影響をより明確に するために、予疲労の繰り返し数比 n/N を横軸にとって、 静的引張り試験結果を Fig.10 に、衝撃引張り試験結果を Fig.11 にそれぞれ示す.ここに示したデータは同じ条件 で試験した 2本の試験片の平均値であり、低サイクル予 疲労の結果を○で、高サイクル予疲労の結果を□で示し ている.また、破断ひずみを応力-ひずみ曲線からは読 み 取 れなかった HR270 と HR590 の 母材 の 衝撃試験 (Fig.10(c)) については、破断ひずみの代りに試験後に測 定した平行部の伸び率を示している.

Fig.10(a), (b) や Fig.11(a), (b) に見られるように,各条件における引張強度のデータは,HR270の低サイクル予疲労の場合を除けば,ほぼ水平に並び,いずれの材料においても,また,衝撃試験および静的試験結果のいずれにおいても,予疲労の引張強度への影響は殆ど認められない.



Fig.11 Effect of pre-fatigue on impact tensile strength, (a) & (b), and fracture strain, (c) & (d), of three base metals and butt welded joints.

破断ひずみ (Fig.10(c), (d), Fig.11(c), (d)) に関しては, HR590 材の母材と継手, HR780 材の母材では予疲労の 影響は小さい. HR270 材では,予疲労における負荷応力 が母材の降伏応力より大きい低サイクル予疲労の結果に, ヴァージン材に比べて2~3割の大きな低下が見られる. 高サイクルの場合は,予疲労の伸びに及ぼす影響は総じ て小さいと考えられるが,明確な結論を得るためには, さらなるデータ追加が必要と考えられる.

一方,HR780材の継手で高サイクル予疲労を受けた試 験片は、静的・衝撃どちらの試験においても、処女材よ り2~3割程度大きい破断ひずみを示しており、予疲労 を受けた場合の方が大きい伸びを示している. この, 予 疲労材の伸びが大きくなる現象は、Fig.4の継手部の硬 さ測定の結果(HR780の溶接部は、母材部より硬度が低 く平行部長さの半分程度の領域があり、予疲労付与によ り硬度は上昇する)を考慮すると、以下のように説明で きる. 即ち,処女材は,溶接部が母材部より硬度が低い (変形しやすい)ために、引張試験において主に溶接部 が変形し、溶接部で破断したが、予疲労試験片は、溶接 部が予疲労により強化される(硬さの上昇)ため、母材 部の応力も処女材より僅かだが上昇する. ところで, HR780 材は, Fig.5(c)やFig.7(c)から明らかなように, 加工硬化が小さく僅かな応力の上昇でも比較的大きなひ ずみを生じる. それゆえ, この母材部の変形分が試験片 全体の伸びの増加となって現れたとと考えられる. HR590 材も、母材部と溶接部の硬さが異なり、硬度の低 い部分(母材部)の硬度が予疲労により上昇しているが, おそらく溶接部分の加工硬化が大きく、また溶接部の平 行部に占める割合も小さいために、顕著に現れなかった のではないかと推察される.

#### 4 結 言

本研究では,自動車用鋼板 HR270, HR590, HR780 の 突合せ継手の静的及び衝撃引張り変形強度に及ぼす予疲 労の影響について実験的検討を行った.得られた主な結 果は以下の通りである.

(1)実験した3種類の鋼板について、母材および溶接 継手の引張強度に及ぼす低サイクル・高サイクル予疲労 の影響は、静的引張試験結果・衝撃引張試験結果いずれ においても殆ど認められない. (2) HR780 材の母材の伸びは、予疲労の影響はほとん ど受けないが、HR780 継手試験片では、高サイクル予疲 労を受けた試験片は、静的試験・衝撃試験いずれにおい ても、処女材より2~3割ほど大きい伸びを示す. HR590 材では、母材・溶接継手いずれにおいても予疲労

の伸びに及ぼす影響は小さい. HR270 材では、予疲労に おける負荷応力が母材の降伏応力より大きい低サイクル 予疲労の場合、伸びは大きく減少する傾向を示す.

(3)溶接継手の硬さ分布に及ぼす高サイクル予疲労の 影響は、高張力鋼では硬度の低い部分に現れ、HR780材 では溶接部の、HR590材では母材部の硬度を上昇さる. 高サイクル負荷を受けたHR780材の継手では、この僅 かな硬度上昇が、伸びの増加を招いた原因の一つと推察 できる.

最後に、本研究はスズキ株式会社、室蘭工業大学、大 阪大学とで進められた共同研究の成果の一部であり、関 係各位並びに実験に協力頂いた丹内君、井端君に感謝の 意を表します.

#### 参考文献

- Akihiro Kuroda, Satoshi Ishizuka, Hiroshi 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,(2003).
- 3) 于 強, 塑性と加工, 44, 725-731 (2003).
- 4) 佐藤邦彦,向井慶彦,豊田政男,溶接工学,(1979), 理工学社.
- 5)皆木亜由美,戸梶恵郎,鉄と鋼,86,51 (2000).
- 6)太田昭彦, 松岡一祥, NinhT.Nguyen, 材料, 50, 1086 (2001).
- 7 ) Oh, T.Y.; Kwon, Y.K.; Lee, C.J.; Kwak, D.S., Key Eng. Mater., 183, 1321 (2000).
- 8) 小川欣也, 実験力学, 2, 86 (2002).
- 9) 横山隆, 非破壊検査, 48, 388 (1999).
- H. Kobayashi, M. Daimaruya, T.Nojima and T. Kajino, Journal de Physique IV, **10**, 433 (2000).
- 11) 臺丸谷政志,小林秀敏,津田紘,材料,53,(2004).
- 12) 津田紘, 臺丸谷政志, 小林秀敏, 材料, 53, (2004).
- 13) 板橋正章, 福田博, 材料, 53, 260 (2004).