



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: jpn 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^{1)~3)}。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々までもなく、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^{4)~7)}、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^{8),9)}。著者らは、落錘式のホプキンソン棒法衝撃引張り試験装置を用いて、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¹⁰⁾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¹¹⁾、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¹²⁾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¹³⁾している。

本研究では、前報¹²⁾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590MPa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、溶接材に関して余熱や溶接後の熱処理は施していない。

Table I Chemical composition of specimen materials.

	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 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 ₂ 20 %	

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あり、予疲労付与にもこの小型試験片を用いた。

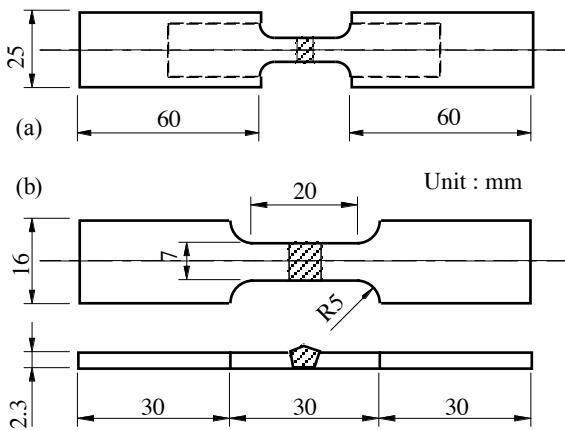


Fig.1 Specimens used (a) for fatigue test and (b) for impact tension tests.

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 $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ で行った。得られた母材および溶接継手の降伏応力 σ_Y 、引張り強さ σ_B 、標点距離 20 mm の伸び率 ϵ_{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。

Table III Tensile properties and fatigue limit

Materials		σ_Y (MPa)	σ_B (MPa)	ϵ_{20} %	σ_{Fat} (MPa)
HR 270	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 σ_{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 前後の値を示した。

予疲労を負荷する最大応力 σ_{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

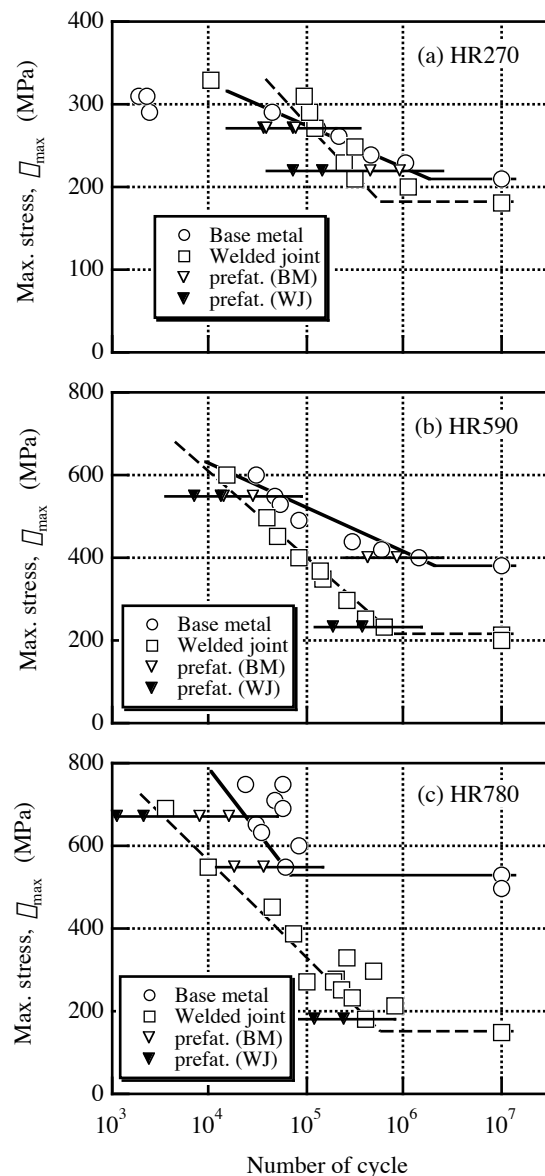


Fig.2 Results of fatigue tests for three base metals and butt welded joints.

を採用した。また、予疲労の繰返し数 n は、予疲労の各応力レベルにおける破断繰返し数 N を基準として、 $n/N = 30, 60\%$ (それぞれ n_{30}, n_{60} 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 $\nabla, \blacktriangledown$ 印で Fig.2 に併せて示した。

Table IV Pre-fatigue conditions

Materials		Low cycle			High cycle		
		$\bar{\sigma}_{\max}$	n_{30}	n_{60}	$\bar{\sigma}_{\max}$	n_{30}	n_{60}
		(MPa)	$\square 10^3$	$\square 10^3$	(MPa)	$\square 10^3$	$\square 10^3$
HR270	B. Metal	270	40	80	220	450	900
	W. Joint*	270	36	72	220	75	150
HR590	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

* 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 SUS304 ステンレス棒) の縦弾性係数は $E=200$ GPa, 密度 $\rho=7.7 \times 10^3$ kg/m³ 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、 $C=5.0 \times 10^3$ 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 $\bar{\sigma}_i$, 反射波 $\bar{\sigma}_r$ および透過波 $\bar{\sigma}_t$ より次式に基づいて、試験片の公称応力 $\bar{\sigma}$, 公称ひずみ $\bar{\epsilon}$ ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ を算定した⁸⁾。

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{2}{\bar{C}l_0} (\bar{\sigma}_i \bar{\sigma}_t) \\ \bar{\epsilon} &= \frac{2}{\bar{C}l_0} \int (\bar{\sigma}_i \bar{\sigma}_t) dt \\ \dot{\bar{\epsilon}} &= \frac{A}{A_0} \dot{\bar{\sigma}}_t \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 A_0, l_0 はそれぞれ試験片の断面積、長さであり、 $A, C, \bar{\sigma}$ 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¹²⁾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使い、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) を使い、接着後 50°C で 2 時間保持した。詳細は前報¹²⁾ を参照されたい。

実験はすべて室温で行い、衝撃円管を 4 m 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

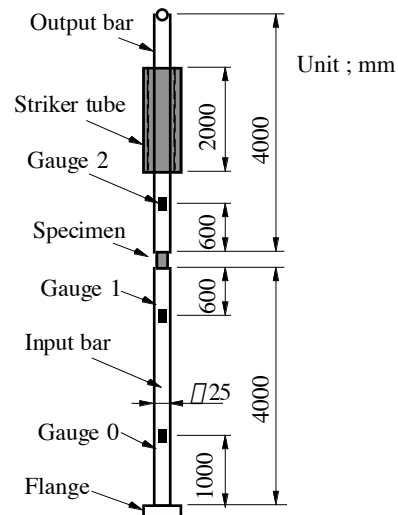


Fig.3 Schematic diagram of Hopkinson bar setup for impact tensile test.

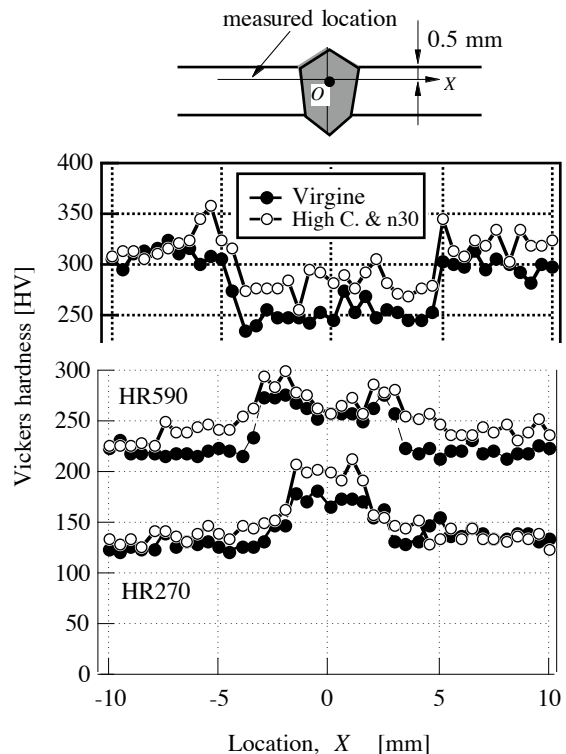


Fig.4 Comparison of Vicker's hardness measured on side of virgin and pre-fatigued welded joints.

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_{30} (いずれの材料も 10^5 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

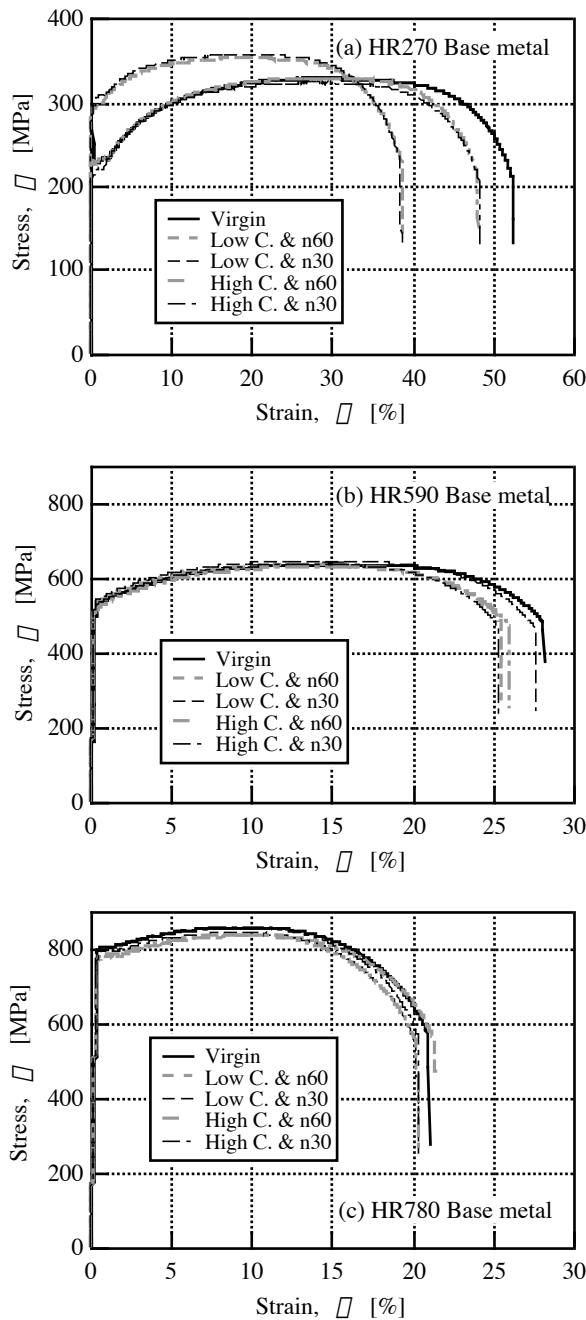


Fig.5 Stress-strain curves obtained from static tension tests for three base metals with pre-fatigue.

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

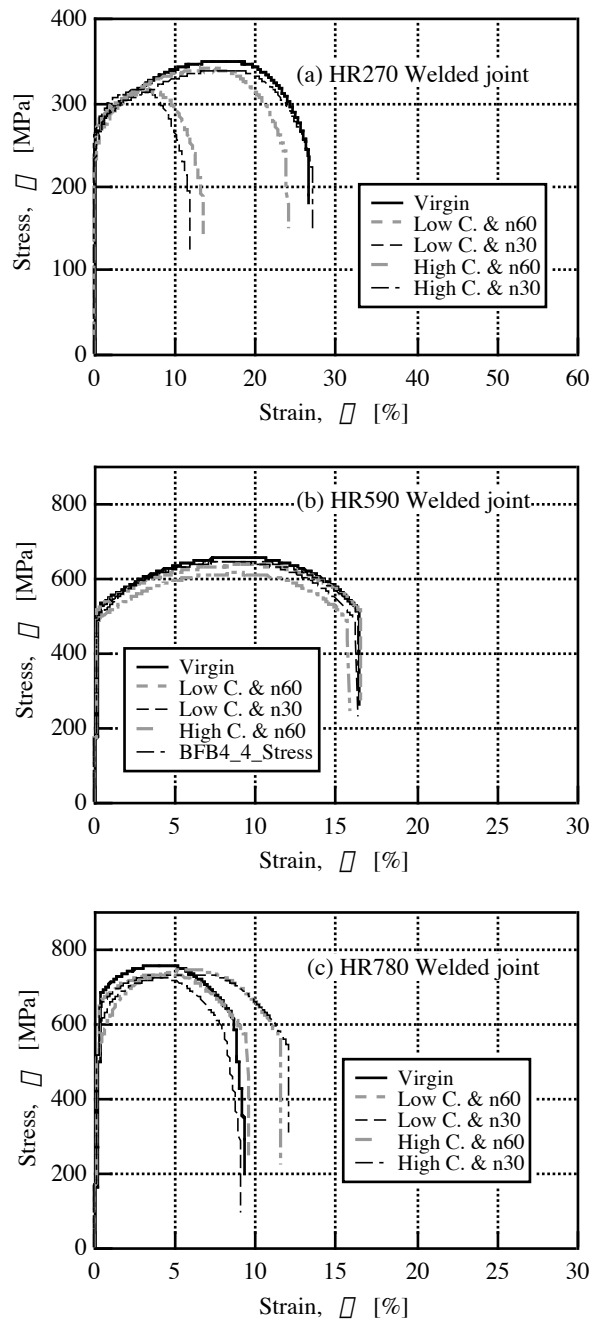


Fig.6 Stress-strain curves obtained from static tension tests for butt welded joints with pre-fatigue.

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。

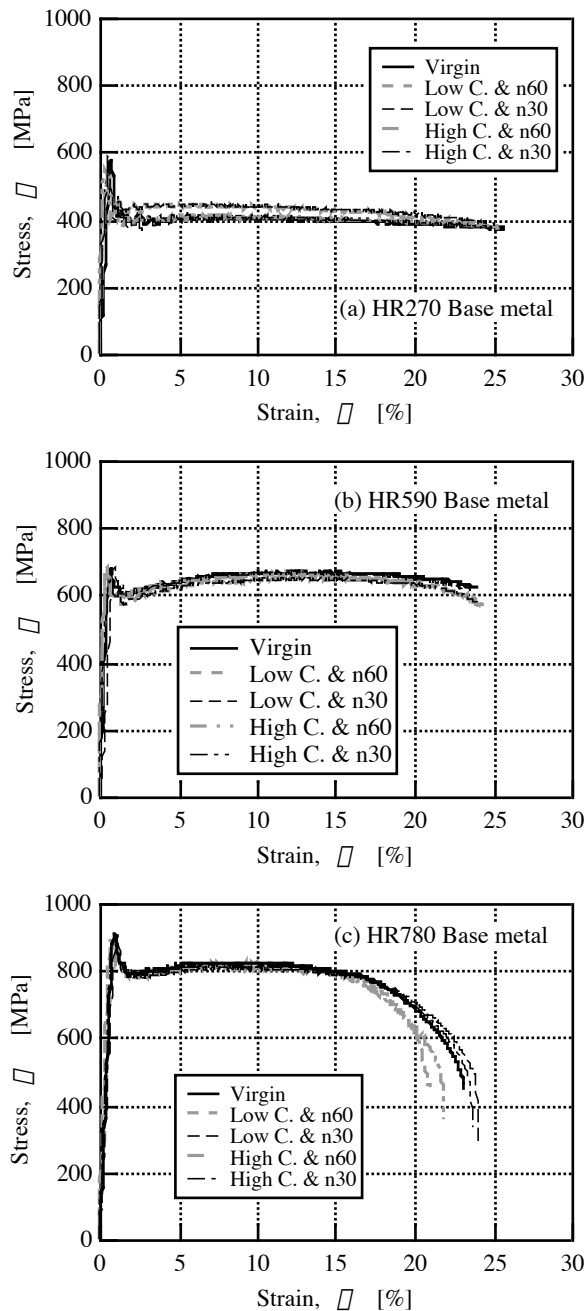


Fig.7 Stress-strain curves obtained from impact tension tests for three base metals with pre-fatigue.

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の母材の衝撃引張り試験結果から、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、予疲労の衝撃引張り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・

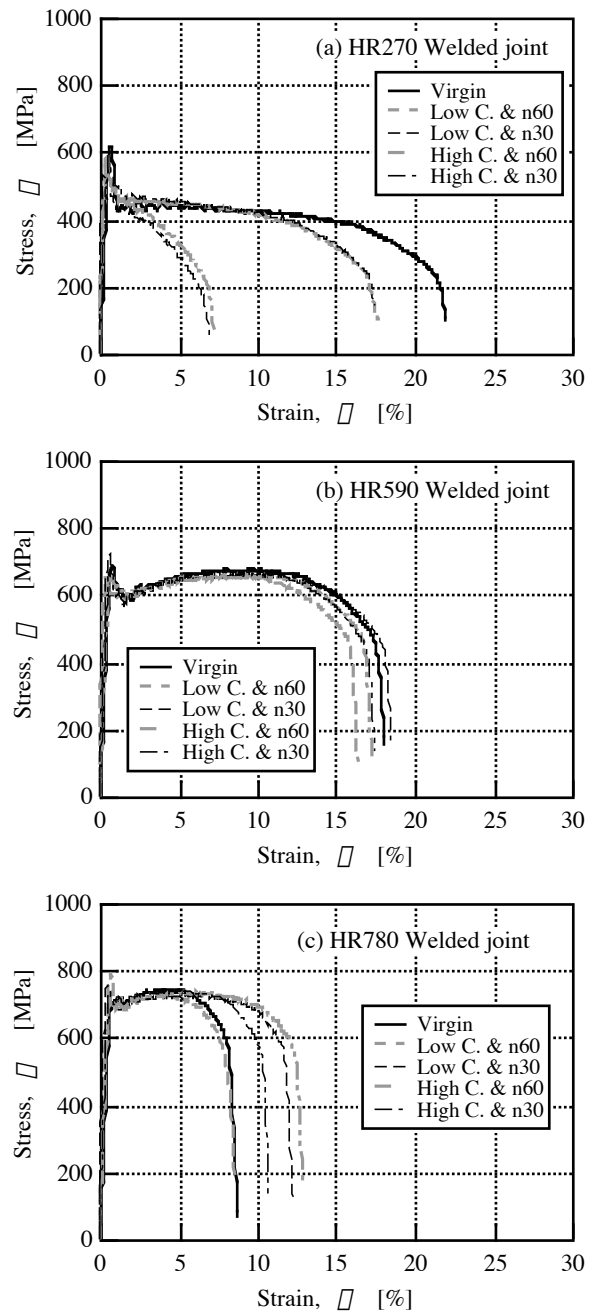


Fig.8 Stress-strain curves obtained from impact tension tests for butt welded joint with pre-fatigue.

福田の建築構造用圧延鋼材に関する研究¹³⁾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

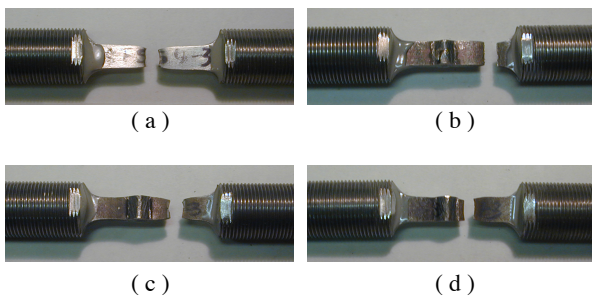


Fig.9 Fracture location observed in (a) all base metal specimens, (b) HR270, (c) HR590 and (d) HR780 welded joint specimens tested at dynamic rate.

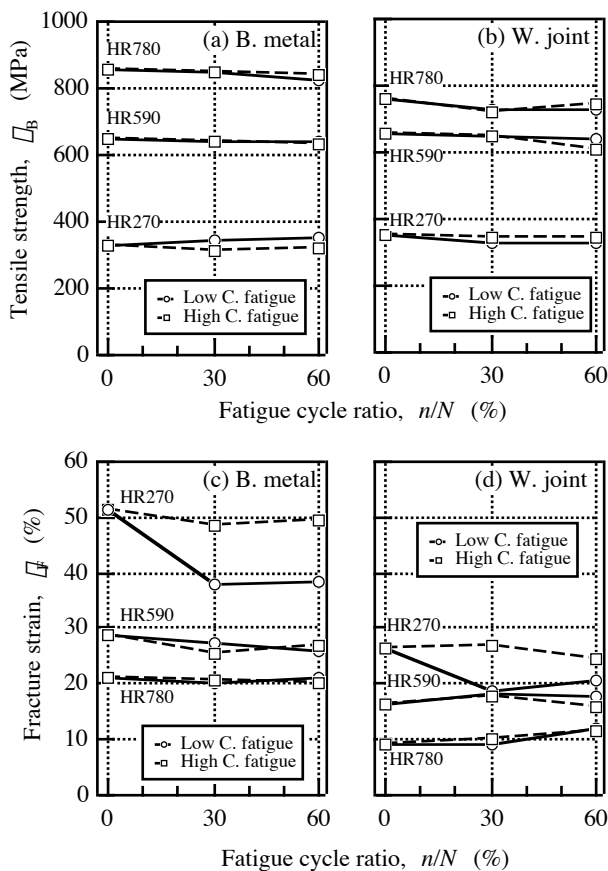


Fig.10 Effect of pre-fatigue on static tensile strength, (a) & (b), and fracture strain, (c) & (d), of three base metals and butt welded joints.

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_B および破断ひずみ ϵ_f 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。

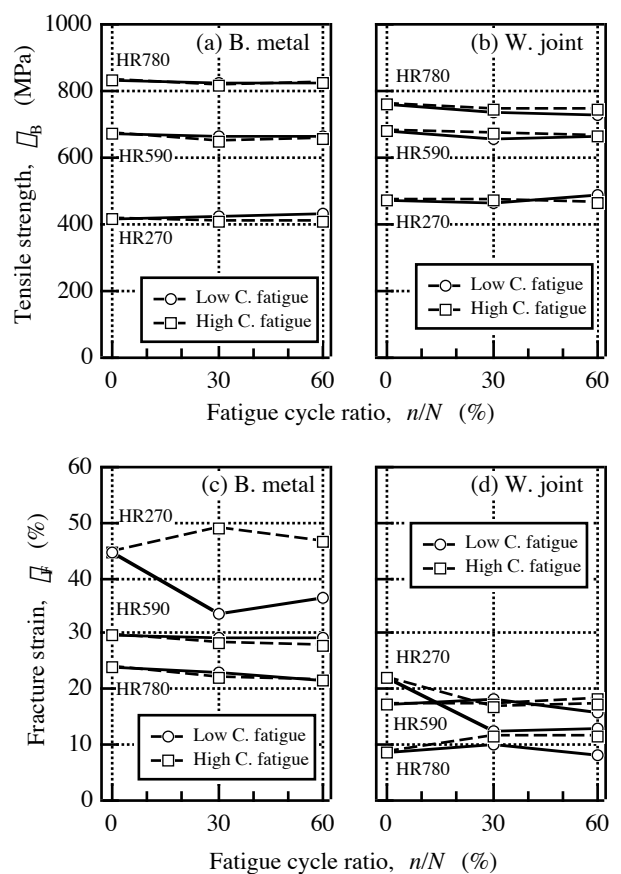


Fig.11 Effect of pre-fatigue on impact tensile strength, (a) & (b), and fracture strain, (c) & (d), of three base metals and butt welded joints.

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せる. 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

- 1) 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, Ninh T. 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).
- 10) 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).