

高炭素鋼の溶接継手に関する基礎的研究 (第3報)

—レール溶接熱影響部の衝撃特性について—

佐藤輝顯* 友本清一*

(昭和52年4月26日受理)

Fundamental Researches on the Welded joint of High Carbon steel (Report 3)

—On the Impact Properties in Weld Heat-affected Zone of Rail—

Teruaki SATO and Kiyokazu TOMOMOTO

(Received April 26, 1977)

The authors previously reported the impact properties and the fatigue properties of simulated welded-heat affected zone of the welded joint of high carbon steel in Report 1 and Report 2. The correlations among the heat treatment temperature, the sorbitic and pearlitic micro-structure, the grain size, the testing temperature and the notch toughness were reported by using high carbon rail steel.

In the present report, the impact properties of the heat affected zone of as-rolled rail which was welded by means of enclosed arc welding in the same way as in field welding were investigated. It was clarified that the impact properties become better as the structure becomes finer and that the fractured surface of Charpy impact test specimen shows the brittle fracture at the testing temperatures below the normal temperature.

1. 緒 言

筆者らは先に高炭素鋼の溶接継手に関する基礎的研究の第1報¹⁾および第2報²⁾において、高炭素鋼として、レール相当材を用い、熱処理を施してソルバイトとした後、溶接熱影響部の再現熱処理を施し、それぞれの衝撃特性および疲れ特性を調べた結果を報告した。その結果、同一組織で、結晶粒が同程度であれば、かたさの低い方が衝撃特性は優れている。また同じパーライト組織では結晶粒の細かいもの程衝撃特性は優れている。1000°C以上の高温に再現熱処理したものは、結晶粒が粗大化して衝撃ならびに疲れ強さも劣ることが判った。

本報では現在、実用化されている圧延のままの普通レール溶接部の熱影響部を研究した。第1報緒言において既述したように近年、鉄道が世界的に見直され、その高速化、乗心地、安全性、経済性より、レールの溶接が重要視されてきた³⁾。熱処理レール(硬頭レール)は寿命は普通レールの数倍といわれているが⁴⁾、溶接性に問題があり未だ実

用化に至っていない。よって筆者らはまず現在ロングレールとして実用化されている普通レール⁵⁾の溶接、しかも敷設現場でもっぱら施行されているエンクローズアーク溶接法により溶接したものの熱影響部について、まずその衝撃特性を研究した。今後は硬頭レールの溶接、溶接熱影響部のストレスリーフ、レール成分などの影響を研究する予定である。冬季寒冷下で、レール事故が起きていることもある。

本報によると圧延放しの普通レールの溶接熱影響部では全域にわたって常温(20°C)で既にぜい性破面率は100%となっている。しかし第1報に報告したごとく、普通レールを熱処理してソルバイト組織にしたものは0°Cでも大体において良好な延性破面を示し、-10°C、-30°Cでもなお延性破面が残留している。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材料としてJISおよびJRSレール規格を満足する50kg鉄道用レール素材を溶接継手として用いた。この試料の化学成分および機械的性質をTable 1に示した。

*金属工学科

Table 1 Chemical Compositions and Mechanical Properties of the test material

Chemical Compositions (%) Mechanical Properties ※								
Items	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
Rail (As Recieved)	0.68	0.14	0.83	0.012	0.036	0.16	0.03	0.04
JIS. JRS 50kg, 60kg Rail standard	0.60 ~ 0.75	0.10 ~ 0.30	0.70 ~ 1.10	≤0.035	≤0.040	—	—	—
	Proof sress $\sigma=0.2\%$ (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)		Elongation (%)		Reduction of Area (%)		Hardness (H _{RC})
	46.3	86.2		16.3		22.2		23.8
	46.0	85.9		14.8		23.1		23.5
	—	≥80		≥ 8		—		—

※ JIS 4 Type 14^{mm}φ × GI 50^{mm}

2.2 溶接材料

溶接継手は長さ 250mm に切断したレール素材を用い、
I型開先部を **Table 2** に示すような条件にて溶接した。こ

れに用いた溶接棒の化学成分および機械的性質は **Table 3**
に示した。(神戸製鋼所カタログより抜粋)

Table 2 Summary of welding Condition

Process		Comments					
1	Setting up	Setting up of rail material on a base for rail fixing.					
2	Adjustment of root opening	Adjusting root opening from 15mm to 17mm by a scale					
3	Preparation of Groove	Groove is cleaned by using a wire brush and a portion of butt is straightened					
4	Drying of Welding rods	Welding rods are preheated in a furnace for 1 hour at 400°C and dried in a air bath for 5 hours at 100°C. sort of welding rod: LB116 φ4, φ5×400 LB80E φ5×450					
5	Preparation of welding machine	Using 115 amp.					
6	Preheating	Rails are preheated by using an electric furnace and a gas burner Temperature of a furnace : 600°C Holding time time : 20minutes Temperature of rail surface : 570-580°C					
7	Flange welding	At a rail surface temperature of 400 to 500°C first layer is welded by a welding rod of LB116 φ4. After the slag is taken away, the flange portion is welded at a current of 190 Amp. by using LB116 φ5.					
8	Taking away of slag	The slag is taken away carefully after welding of the flange portion.					
9	Preparation of enclosed welding	As shown in photo 1, a strapped cooling equipment of copper is set to the side of a rail. welding current; 220A					
10	Enclosed welding	Rails are welded at a single heat to a part of head by using welding rods LB80E φ5. Welding rods are changed quickly in order to exclude the slag. and the slag is take away from a space between the rail and strap.					
11	Removal of strapped equipment	After enclosed welding strapped equipment is removed quickly					
12	Post-heating	An electric furnace is placed on rails and gas burners are ignited and the rails are kept for 30 minutes at 600°C like preheating					
13	Cooling	Cooled until 400°C in a furnace and then air cooled					
14	Welding heat input	Condition	Current	Voltage	Time	Section area	Heat input
		Flange welding	185 A	30 V	825 sec	24.5cm ²	1.9×10 ⁵ J/cm ²
		Enclosed welding	220 A	35 V	1015 sec	32.0cm ²	2.4×10 ⁵ J/cm ²

Table 3 Chemical Composition and Mechanical Properties of Welding rods

Chemical Composition (%)									
Mechanical Properties of Welding rods									
Items	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	
LB116	0.07	0.63	1.45	0.009	0.006	1.81	0.26	0.44	
LB80E	0.06	0.46	1.40	0.008	0.007	1.78	0.53	0.36	
Yield Point (kg/mm ²)	Tensile Strength (kg/mm ²)			Elongation (%)	Charpy Impact Vale (kg-m)				
74	85			24	12				
—	88			21	—				

* -5°C, 2mm Vnotch

2.3 溶接継手の温度分布測定

レール開先から 3 mm, 4 mm, 5 mm, 10 mm ~ 40 mm まで 5 mm 間隔, 50 mm ~ 60 mm までは 10 mm 間隔に合計 13 箇所レール頭部長さ方向の中心部に 2 mm φ, 深さ表面から 20 mm の孔をドリルであけ, その中に熱電対を挿入して, 石綿を詰めて十分に固定した。温度測定器は横河電機製作所製 3025 型フラットベットレコーダー放電記録式 2 ペンのものを使用した。また予熱から溶接, 後熱に至るまでのレール頭部の温度変化を記録測定した。

2.4 溶接後レール表面の外観状況

溶接後のレール継手表面の溶接状況を肉眼で丁寧に観察して, いずれの溶接継手についてもフランジ部からレール頭部に至る全周にわたって連続して溶接されているかどうかの肉眼的検査を行なった。

2.5 溶接部縦断面のマクロ組織

溶接部レール頭部長さ方向縦断面を丁寧に研削仕上げ後, エメリー紙で研磨仕上げ後腐食して断面のマクロ組織を観察した。

2.6 ボンド部の母材側溶込み状況

溶接継手の温度分布を測定した試料について, 長さ方向に中央断面より試料を切断して, 切削, 研磨仕上げ後, 丁寧にエメリー紙で研磨, バフ仕上げ後, 腐食してボンド部の母材側への溶込み状況を観察した。

2.7 断面のかたさ分布

レール頭部中央長さ方向縦断面, かたさ分布をビッカースかたさ計を用いて溶接熱影響部のかたさ変化を測定した。

2.8 顕微鏡組織

かたさ分布を測定した試料を用いて, 丁寧に研磨仕上げ後, バフ研磨して, 3%硝酸アルコール溶液で腐食して, 溶接部近傍の顕微鏡組織を観察した。

2.9 衝撃特性

試験片は J I S, 4号 2 mm V ノッチ付シャルピー衝撃試験片を使用した。ノッチの位置は素材のまま, 溶接金属の中央部, ボンド部, ボンドからそれぞれ 3 mm, 5 mm, 5 mm ~ 30 mm 間は 5 mm 間隔 10 箇所である。また試験片は 1 本毎に腐食してボンドの位置を確認の上ノッチの位置を決めた。

試験温度は -30°C ~ 250°C の範囲に 8 種類の温度で衝撃試験を行なった。試験温度の -30°C は, アルコール中にドライアイスの細片を混合攪拌して冷却槽中に保持した。高温側のものは菜種油を加熱して所定の温度に保持した。保持時間は各温度とも 20 分間保持後すみやかにシャルピー衝撃試験機にセットして試験を行なった。なお, 試験片を恒温槽から取り出して, 破断するまでに要した時間は, 5 秒以内のものを採用した。

試験後, 試験片は直ちにアルコールに浸漬後, エーテルで洗滌して, 熱風乾燥したのち, デシケーター中に保存して, 破面率の測定試料とした。

2.10 透過電子顕微鏡による破面状況

破面率を測定した試料を丁寧に洗滌し, 熱風乾燥して, 二段レプリカ法による破面状況を電子顕微鏡で観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 溶接継手の温度分布

2.3 で述べたように, レール継手の熱影響部の各位置での温度分布を測定した。その結果は Fig. 1 に示されている。溶接継手の施行作業方法は Table 2 に示すようにした。

予熱終了後, フランジの溶接終了までの時間は約 46 分間であり, その間レール頭部の測温位置で約 230°C 程度まで温度降下しているのが観察される。続いてエンクローズ溶接により温度は上昇をたどり, 溶接終了時の最高到達温度は開先から 3 mm の位置で, 1440°C 4 mm の位置で, 1300°C, 5 mm の位置で, 1250°C, 10 mm の位置では 1000°C と低くなり, 15 mm ~ 60 mm の位置での温度は 870°C ~ 450°C の範囲となっており, 開先より離れるに従って溶接による最高到達温度は順次低下していくのが認められた。溶接終了後の後熱は予熱と同様に炉温が 600°C に保持出来るように調節して, 約 30 分間保持した後, 炉冷約 20 分間の 400°C より, 空中放冷の処理を行なった。

また, この図中で開先から 50 mm, 60 mm 位置の最高到達温度 500°C ~ 450°C のものは, 後熱において, 600°C の炉温で加熱しても昇温することなく 500°C ~ 450°C の温度を維持しているのが認められた。これは炉の加熱幅が約 150 mm 程度の短いものであるため, レール継手の長さ方向に放熱冷却されて行くものと思われる。また, この溶接に要した入熱は 4.3×10^5 J/Cm² である。

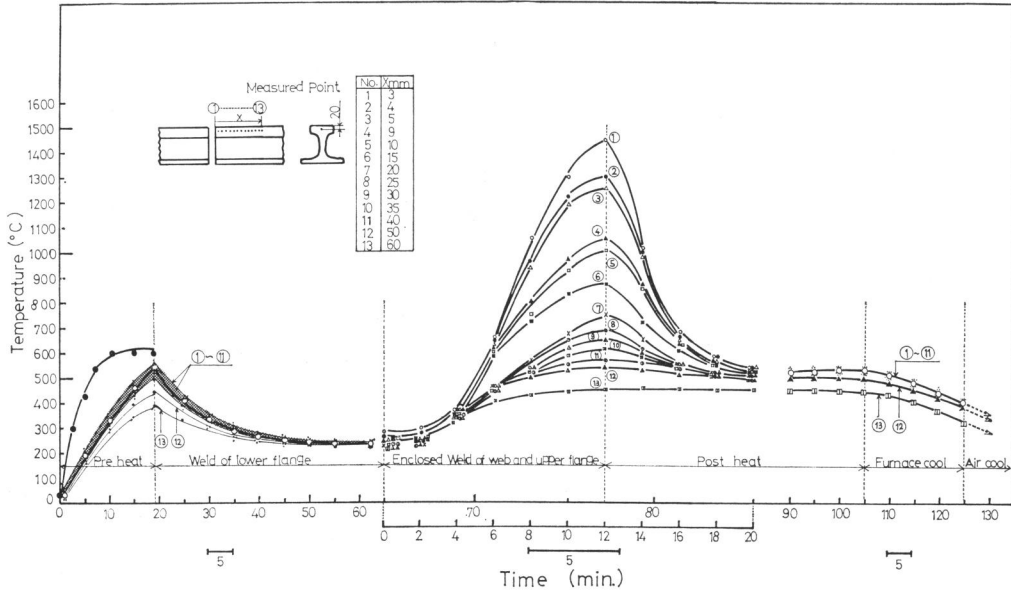


Fig. 1 Temperature distribution of the each part of rail top through the preheat-weld post heat

3. 2 溶接後のレール表面の外観状況

エンクローズ溶接時の治具および溶接終了後のレール表面の外観状況を Photo 1 に示した。溶接によりレール開先部の融合状態は良好であり、フランジ部よりレール頭部に至るまでの全域にわたって十分溶接されており、肉眼的な欠陥は全く認められなかった。

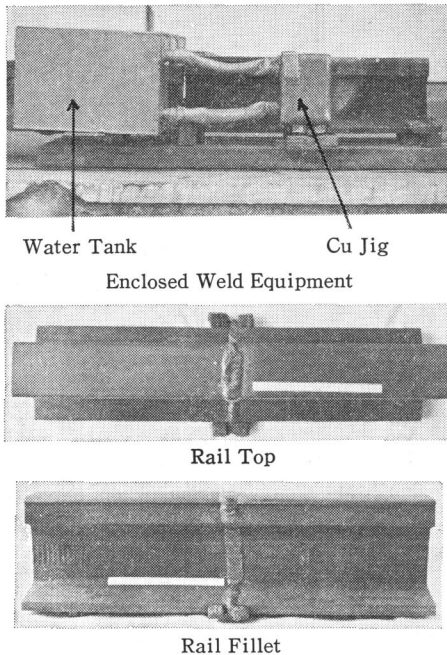


Photo 1 Enclosed Weld Equipment and Appearance of welded joint

3. 3 レール頭部縦断面のマクロ組織

レール溶接継手中央縦断面を研磨後、5%硝酸水溶液で腐食してボンド融合部の状態を調べた。Photo 2 はそのマクロ組織写真である。写真からよくわかるように溶接金属層と母材の融合部には欠陥は全く認められず良好な溶接状態であるのが観察された。

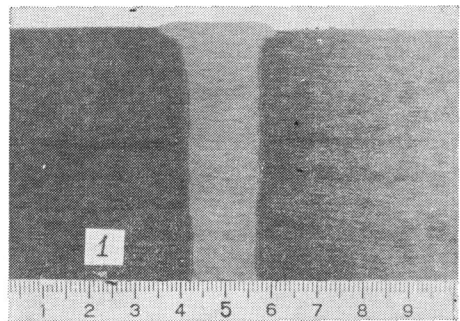


Photo 2 Macrostructure of Weld Zone

3. 4 溶融ボンド部の母材側溶込み状況

溶接継手の温度分布を測定した試料を用いてバフ研磨後、3%硝酸アルコール溶液で腐食してボンド部の溶込み幅を測定した。測定位置は先に温度分布測定の際、ドリルで穿孔した孔の中心位置からボンドまでの距離を測定した。5箇の試料の平均値で、母材側への溶込みは0.5mm程度であった。これを基にして、先に述べた開先から3mm~60mm範囲の最高到達温度とボンドからの距離との関係を Fig. 2 に示すような曲線が得られた。

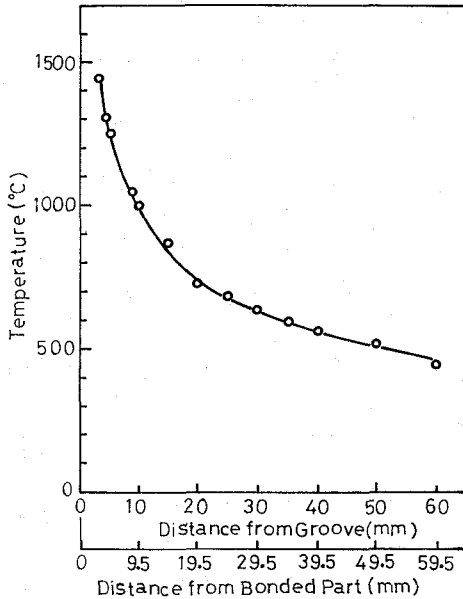


Fig. 2 Maximum heating temperature for each Location of welding joint

3.5 断面のかたさ分布

レール溶接部長さ方向、頭部中央縦断面の表面から20mmと25mmの位置についてピッカースかたさ計を使用して溶接熱影響部のかたさ分布を測定した。Fig. 3に示されているように、溶接金属部はHv260~270、ボンド部はHv280~315程度と高くなっておりボンドから離れるに従ってかたさは低下して、ボンドから3mm母材側はHv285~290の範囲となり5mm位置ではHv280~288となり12mm位置ではHv250前後の基地かたさとなっているのが認められた。

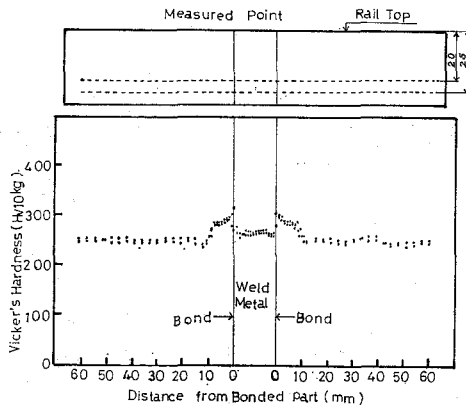


Fig. 3 Hardness distribution of welding joint

3.6 顕微鏡組織

かたさ測定した試料について、溶接部近傍の顕微鏡組織

を光学金属顕微鏡で100倍、800倍で撮影した。その結果はPhoto 3に顕微鏡組織を示した。溶接金属は低炭素のベイナイト組織、ボンド部は初析フェライトの析出したトルスタイトとパーライトの混在した異常組織を示している。また、ボンドから5mm離れた位置ではパーライト組織の粗大化が観察される。さらにボンドから10mm~15mmと離れるに従って粗大組織から微細なパーライト組織に連続して変わっていくのが認められた。またボンド部から22mm位置ではAc1付近の温度に加熱、冷却を受けたパーライトが細かく分散した組織を呈しているのが観察される。

3.7 衝撃特性

シャルピー衝撃試験片はFig. 4に示す位置より採取して、JIS, 4号2mmVノッチ付き試験片である。

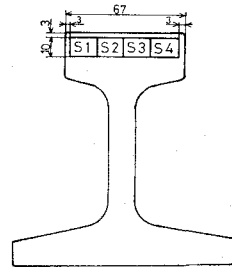


Fig. 4 Cutting location of Charpy impact specimen

シャルピー衝撃試験の結果、得られた試験温度とシャルピー衝撃値の関係はTable 4, Fig. 5に示されている。これらの表および図より、-30°Cでの衝撃値は、素材のまま、溶接金属、ボンド部、ボンドから3mm~30mm離れた母材側各位とも1.1kg·m/cm²~0.8kg·m/cm²の範囲内で一定している。この温度域では、破面は100%ぜい性破面を呈している。(Fig. 6) 衝撃試験温度が高くなるに従い、一般構造用鋼で多く知られている通り衝撃値は次第に増加して、変曲点を経て最大衝撃値を示す延性破壊の領域に達して行くのが観察される。(Fig. 5)より明らかなように溶接金属、ボンドからそれぞれ10mm, 15mm, 離れた母材側の衝撃値は他の位置のものより良好であり、変曲点が低温側にあるのが認められる。またボンド部の衝撃値は最低値を示し、他の位置のものと較べて、曲線の形態が異なっているのが認められる。Fig. 5の曲線より吸収エネルギーが10ft-lb(1.73kg·m/cm²)⁶⁾を示す遷移温度を求めた。

さらにぜい性破面率を測定して、破面遷移温度を求めた結果はTable 5, Fig. 6に示されている。これらの図を基にして破面遷移温度(50%破面率)を求めて10ft-lb遷移温度との関係はTable 6, Fig. 7に示した。この結果を比較してみると、破面遷移温度では溶接金属が112°Cの最良

Table 4 Summary of Charpy Impact Test Results (kg-m/cm²)

Location of Notch / Testing Temp. (°C)	As Received	Weld Metal	Bond	3mm from Bonded Part	5mm from Bonded Part	10mm from Bonded Part	15mm from Bonded Part	20mm from Bonded Part	25mm from Bonded Part	30mm from Bonded Part
-30	1.0 (1.0)	1.0 (1.1)	0.8 (0.8)	0.9 (0.8)	0.9 (0.9)	1.0 (1.0)	0.9 (1.1)	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)
0	0.9 (1.0)	1.4 (1.5)	0.7 (0.8)	0.7 (0.8)	0.9 (0.9)	1.1 (1.1)	1.1 (1.1)	0.7 (0.9)	0.9 (0.9)	1.1 (1.2)
20	1.0 (1.1)	1.8 (1.9)	0.7 (0.8)	0.8 (0.8)	0.7 (1.0)	1.0 (1.4)	1.4 (1.3)	1.0 (0.9)	1.0 (1.0)	1.0 (1.1)
50	1.1 (1.2)	2.7 (2.2)	0.9 (0.9)	0.9 (0.9)	1.3 (1.3)	1.5 (1.5)	1.9 (1.9)	0.7 (0.9)	1.0 (0.9)	1.4 (1.3)
100	1.2 (1.4)	2.7 (3.3)	1.4 (1.4)	1.2 (1.4)	2.2 (1.9)	3.5 (3.2)	4.2 (3.9)	1.5 (1.3)	1.4 (1.5)	1.5 (1.5)
130	2.4 (2.2)	5.1 (5.2)	2.4 (2.1)	2.7 (2.7)	3.8 (3.5)	5.0 (5.0)	5.0 (4.9)	2.9 (2.7)	2.4 (2.4)	2.4 (2.4)
150	3.6 (3.4)	5.5 (5.7)	2.3 (2.2)	3.5 (4.0)	5.5 (5.5)	5.1 (5.2)	5.5 (5.5)	3.8 (4.0)	4.1 (3.1)	3.6 (3.4)
200	5.1 (5.1)	7.2 (6.9)	1.9 (2.1)	5.0 (4.9)	6.1 (6.0)	6.9 (6.9)	6.6 (6.5)	5.9 (5.5)	4.5 (4.7)	4.8 (4.7)
250	4.5 (4.5)	5.9 (6.1)	2.2 (2.1)	4.2 (4.3)	5.9 (6.0)	5.6 (6.0)	5.8 (5.7)	4.5 (5.3)	4.4 (4.7)	4.8 (4.8)

(): Mean

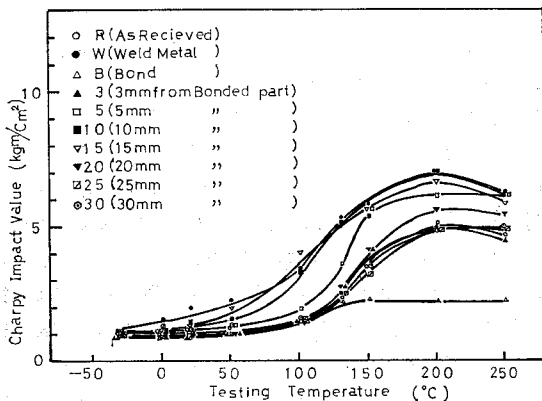


Fig. 5 Ductile to Brittle Transition Curves for Charpy Impact Test

を示し、次にボンドから10mm離れた位置は122°C、15mm位置は128°C、次に5mm位置は130°Cを示している。他の位置、3mm、20mm~30mmおよび素材のままのものは何れも135°Cを示し、ボンドから20mm以遠の位置では素材のままのものと同程度の破面遷移温度であるのが認められた。10ft-lbにおける遷移温度について、各位置で比較してみると、溶接金属が20°Cと最良を示し、次にボンドから15mm位置は43°C、次に10mm位置は57°C、5mm位置は90°Cとなりボンドから20mm~30mmおよび3mm位置

とも110°C程度を示している。素材のままのものは114°Cでボンド部は最低の116°Cを示しているのが認められた。

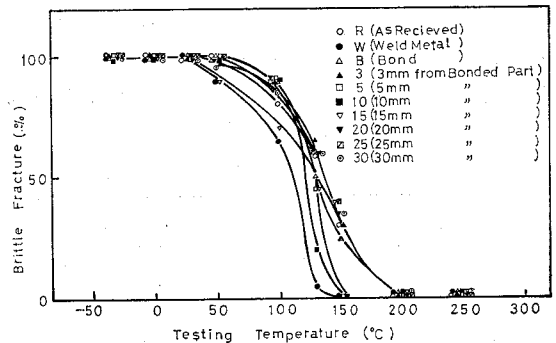


Fig. 6 Brittle Fracture Percentage on Impact Testing Temperature

また、最高衝撃値と最低衝撃値と各位置の関係をみると Fig. 8 に示されている。この図のように同一継手内での衝撃値は溶接熱の高いボンド部近傍が顕微鏡組織で述べたように粗大パーライト組織を示す位置のボンド部が最低値(7) 8) を示し、ボンド部から10mm~15mm離れた微細パーライト組織を呈する位置は最高値を示しており、次に5mm、20mm位置の順に低くなり、Ac1以下の熱影響を受けた20mm~30mm位置では素材のままと同程度の衝撃値を示し

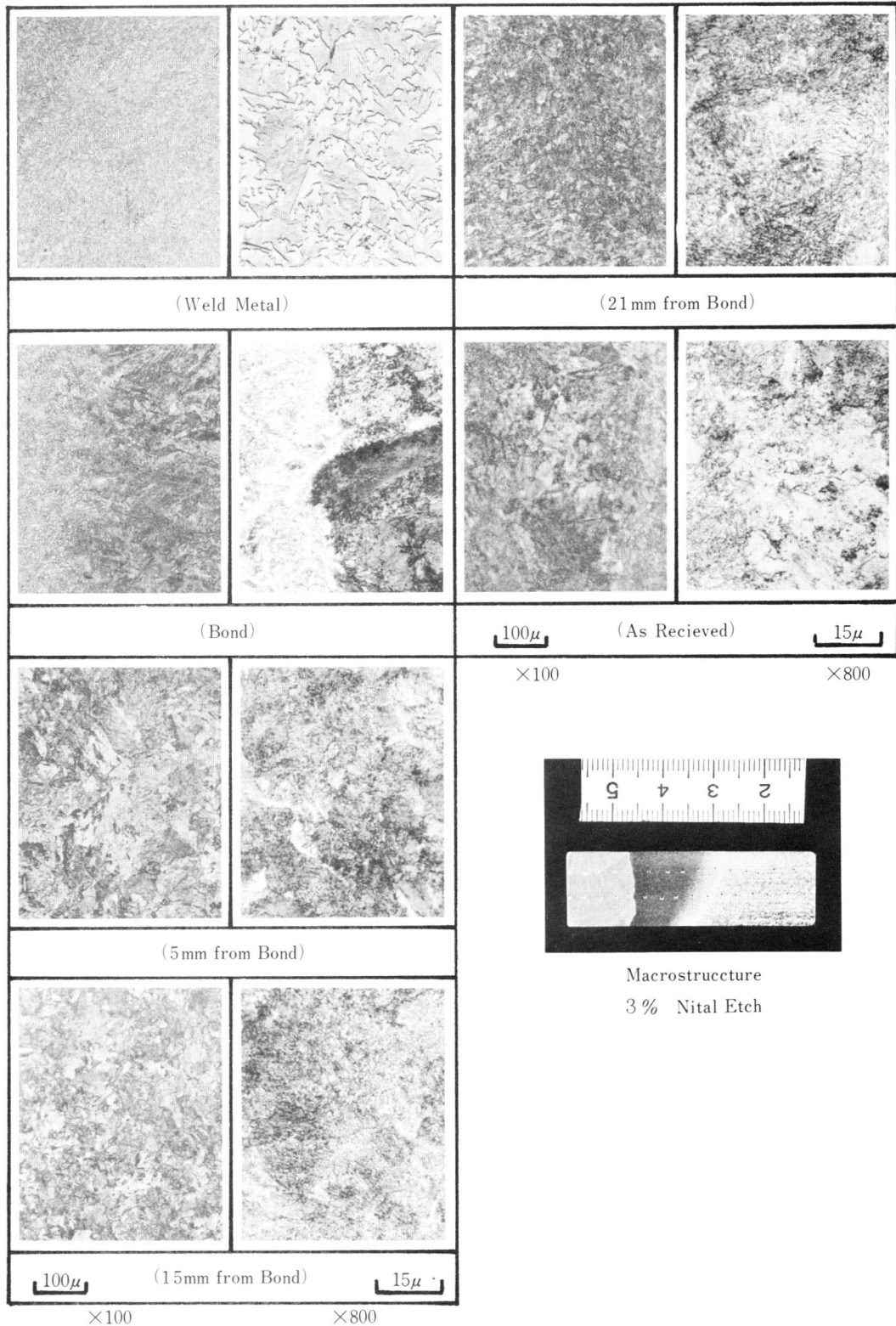


Photo 3 Microstructure of welded joint

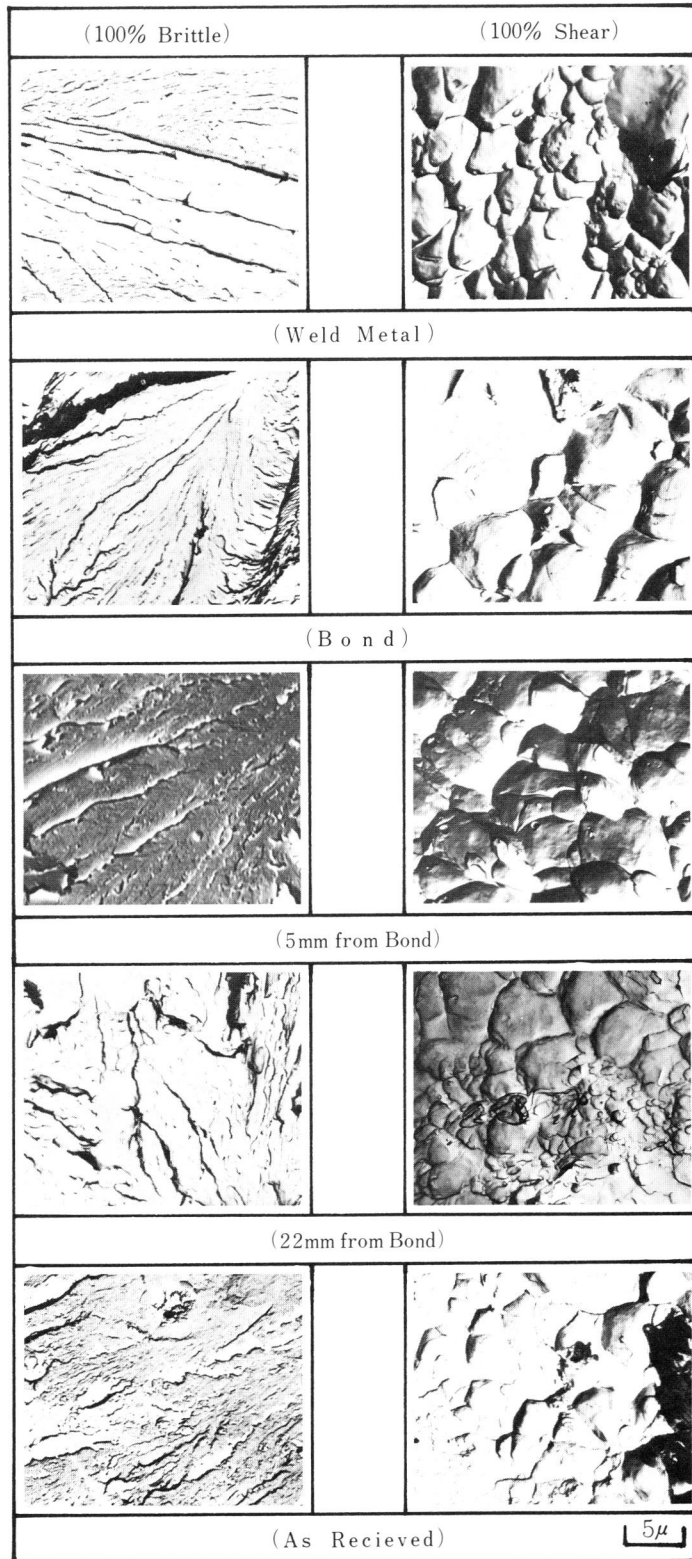


Photo 4 Fractography of charpy impact specimen

Table 5 Brittle Fracture (%)

Location of Notch Testing Temp. (°C)	As Received	Weld Metal	Bond	3mm from Bonded Part	5mm from Bonded Part	10mm from Bonded Part	15mm from Bonded Part	20mm from Bonded Part	25mm from Bonded Part	30mm from Bonded Part
-30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	90	100	100	100	100	90	100	100	95
100	80	65	90	90	90	90	70	90	90	85
130	60	5	50	65	45	20	45	60	60	65
150	30	0	25	30	0	0	40	35	40	35
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 6 Summary of Results on Charpy Impact

Items	Transition Temperature			
	Max, Impact Value (kgm/cm ²)	Min, Impact Value (kgm/cm ²)	vTr10 (°C)	vTrs (°C)
As Received	5.0	1.0	114	135
Weld Metal	6.9	1.1	20	112
Bond	2.2	0.8	116	135
3mm from Bonded Part	4.9	0.8	110	135
5mm from Bonded Part	6.0	0.9	90	130
10mm from Bonded Part	6.9	1.0	57	122
15mm from Bonded Part	6.5	1.1	43	128
20mm from Bonded Part	5.5	0.9	110	135
25mm from Bonded Part	4.7	0.9	111	135
30mm from Bonded Part	4.8	0.9	110	135

ているのが認められた。さらに最低衝撃値で比較してみるといずれの位置でも素材のままと同程度の値を示すボンド部および3mm位置が僅か低い傾向を示している。

3.8 フラクトグラフィ

シャルピー衝撃試験後の破面を丁寧に洗滌して、ぜい性100%のものと延性100%の2種類について、二段レプリカ法を用いて、透過式電子顕微鏡で破面の観察を行なった。その結果は Photo 4 に示されているように、延性100%のものは破面全域にデインプルパターンが、ぜい性100%のものは破面全域にリバーパターンが認められる。衝撃値の低いボンド近傍はデインプルが大きく、またリバーパ

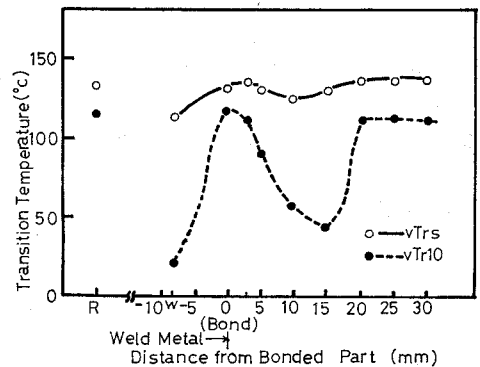


Fig. 7 The relation between Transition Temperature and Distance from Weld Bond

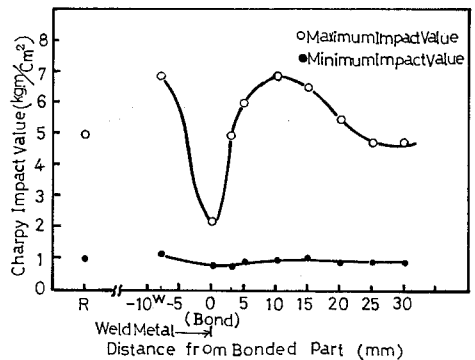


Fig. 8 The relation between Charpy Impact Value and Distance from Weld Bond

ーンが広がっているのが観察された。衝撃値の良好な位置、顕微鏡組織で微細なパーライト組織を示すものはデイ

プルの大きさも小さく数も多くなり、リバーパターンの縞の幅も狭くなりその数も多くなっていく傾向が顕著に観察される。

4. 結 言

鉄道用ロングレール溶接熱影響部の溶接熱による温度測定ならびに組織変化による切欠靱性の低下問題について、熱影響部よりシャルピー衝撃試験を行ない検討してきた。

1) 同一組織の場合(パーライト組織)は溶接熱によりAc3以上に加熱、冷却処理を受けた場合、結晶粒の粗大化する温度以上の熱影響部は靱性の低下が認められ、組織の微細なものを、靱性は良好な成績を示すのが認められた。

2) 同一かたさにおいても組織の微細なものは靱性は優れており、組織の粗大なものはかたさも高く、靱性は低い傾向を示している。

3) 遷移温度についてもシャルピー衝撃値と同様にパーライト組織の微細なものを、低温側で良好な成績を示すのが認められた。

4) レール素材の遷移温度は100℃以上であり、衝撃値は可成り低い。すなわち、ぜい性破面率で常温(20℃)以下で継手各位置とも100%を呈している。

5) 以上のことから溶接熱影響部の靱性の低下の要因は溶接熱によりAc3点以上の高温にさらされて結晶粒の粗大化する温度領域の熱影響を受けたボンド部付近が顕著に

靱性の低下する傾向が認められた。

謝 辞

本研究に関し、御懇篤な御教示を賜った大阪大学名誉教授元同大学学長岡田実先生に、なお御援助を頂いた住友金属工業株式会社中央技術研究所次長邦武立郎博士に、同社製鋼所田村英二郎試験課長に衷心より感謝する。

また使用鋼材、溶接に御高配、御助力を賜った阪急電鉄株式会社宝塚線保線課長白石連三技術士、清原特殊軌條溶接工業所代表者清原量夫氏に深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 友本; 津山工業高等専門学校紀要 No. 14 (1976) P.37~47
- 2) 佐藤, 友本; 津山工業高等専門学校紀要 No. 14 (1976) P.49~55
- 3) 伊地知; ロングレール作業 鉄道現業社(1968)
- 4) たとえば鉄鋼製造法; 日本鉄鋼協会編 丸善
- 5) 栗原; 日本熱処理技術協会(1967) P.350~356
- 6) たとえば溶接冶金 岡田実, 鈴木春義共著 産報
- 7) 浅田; 金属学会報(1967)第6巻 第3号
- 8) L. Kigawa, R. Isomura, Y. Taaaka K. Tokisasa; The Fifth International Wheel-set Congress Tokyo, Oct, 1975