アーク熔接法によるレール継目の接合に関する研究 (第 2 報)*

— 焼入レールの場合について —

守田 貞義** 伊藤 悌二** 米井 澁**

Welding of Rail Joints by Manual Arc Method (Report 2)*

— On the Case of Heat Treated Rail —

By S. Morita**, T. Itô** and T. Yonei**

Abstract

This is to report about a welding experiment performed in joining heat treated rails with the hardness of 308-390 Hv and high abraision resitance.

The following are the results summarized with some comments : -

1) In joining heat treated rails by manual arc welding, satisfactory joint strength can be obtained, when the bottom and web are welded with low hydrogen type electrodes, following 90% of the top part welding by means of the same type electrodes, and then the head surface is built up about 10 mm deep with the intention of hardfacing. The joining strength does not change by hard surfacing.

2) For padding the employment of Mn Austenite type or Martensite type electrodes cannot be recommended, because of the cracks occurring at the fusion line between padding and base metals. We advise the use of low Cr steel type electrodes whose welding hardness is compatible with that of rail head and the welded metal is difficult to cause cracking.

3) By welding, the surface hardness of rail head is softened over the range of about 10 mm from the fusion line. Rails post heated for 30 min. at 600°C immediately after welding tend to be softened down to about 250-280 Hv. over the heating zone, but the micro-structure of the point 50mm apart from the fusion line is not remarkably changed, compared with the base metal structure.

4) As the result of passing trains for 80 days, it is recognized that the hardness of welding metal and softening zone of wheel side is inclined to increase by the cold working (train pass load ; 38,000 ton/day) up to 2 mm depth under the head surface.

5) The abraision loss of the base metal, the post heated softening zone and the deposit metal are almost equivalent 2½ years after construction (train pass load 8,200,000 ton/year, gradient ; 15/1000, straight track of 348 m), and the local abraision can't be observed.

It is therefore considered that this welding procedure can be used practically.

1 序 言

著者らは、先の第 1 報¹⁾で主として普通レールの熔接継目に関し破断試験の曲り強度に及ぼす熔接棒と施工法、予熱および後熱の効果について検討した。その結果、低水素系熔接棒を用い熔接の諸条件を適当に選り、熔接の直後に 600°C 30 分間の短時間焼鈍を行えば 50 kg P.S レールで荷重 90 ton を越え、撓みは 45 mm 以上 (破断エネルギー 3000 kg-m 以上) を常に出しうる可能性があることを明らかにした。最近、各鉄道では Curve など特に耐磨耗を要求される箇所に焼入レール (頭部に焼入・焼戻しを行い頭面硬さ 308~390 Hv とした熱処理レール) を用いることに観心を寄せているが、焼入レールでは熔接継目部が頭

面硬度の低下により局部磨耗する懸念がある。

八幡製鉄所では昭和 30 年 11 月に構内幹線の一部に熔接した焼入レール (長さ 36 m) を 4 本敷設した。著者らはこの敷設に先立ち 50 kg/m P.S 焼入レールについて熔接継目の破断試験や頭面硬化および敷設試験によるタイヤ踏面の変化などについて実用化を目的とする諸実験で一応の成果を得たので、ここに報告する。

2 供試レール材と熔接方法および後熱

供試レールは Table 1 に示す成分の八幡製 50 kg P.S 高周波焼入レールで、頭部は Photo. 1 のマクロ腐蝕組織ならびに顕微鏡組織に示すように頭面からかなりの範囲は熱処理による硬化層を有している。焼入深度は Fig. 1 の断面略図 C および R 位置で測定した硬度分布に示すように頭面より 15 mm 厚さである。

熔接方法は、先の第 1 報で述べた普通レール継目の熔接と全く同じ条件で行った。ただしレールの底・腹の全部と

* 原稿受付 昭和 33 年 2 月 26 日 (昭和 33 年度熔接学会春季学術講演会において発表)

** 正員、八幡製鉄所技術研究所 Member, Technical Research Institute, of Yawata Steel Works.

macro structure

micro structure

×300

Photo. 1 Macro and micro structure of heat treated rail

Table 1 Chemical Composition (%) of Heat Treated Rails

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.66~ 0.69	0.09~ 0.13	0.70~ 0.78	0.010~ 0.025	0.022~ 0.028	0.17~ 0.20

頭部の大部分を高張力鋼用の低水素系棒で地盛り熔接して頭面の約 10 mm 厚だけ Table. 2 に行ず熔着鋼成分と硬度が得られる各種の熔接棒を用い、Photo. 2 に示すように頭面硬化のための肉盛熔接を行った。

後熱は第 1 報で説明したように熔接の直後に 600 °C で 30 分間保定する短時間焼鈍法を採用した。

3 実験結果および考察

1) 破断試験と頭面硬化メタルの欠陥

前述のようにして 20 本 (熔接のまま 7 本, 後熱 13 本)

Table 2 Chemical Composition (%) and Hardness of Hard Surfacing Deposit Metal

Metal type	C	Mn	Si	Cr	Mo	Hardness (Hv)
Low Cr steel	0.21	0.99	0.48~0.51	1.22~1.35	—	265~345
Mn Austenite steel	1.10	11.0	0.6	—	—	450~550
Martensite steel	1.00	0.80	0.8	4.0	0.7	550~600
Median Mn steel	0.17	1.70	0.8	—	—	250~280

Fig. 1 Hardness curve of rail head section

Fig. 2 Breaking strength of hard surfacing welded rail

Photo. 2 An example of hard surfacing zone in welded rail head

の熔接レールを製作し熔接部はレール原形に仕上げた。この熔接レールの継目熔着鋼の頭面には Table 2 に示した 4 種類の硬化メタルを 2~4 本あて肉盛熔接した。破断試験は 1 m 支点で頭押しする方法で行い、その平均値を求めて Fig. 2 に示した。また、頭部の破断面の範例を Photo. 3 に示した。

破断試験の結果をみると、熔接ままのものが 89,200 t~93,800 t で、後熱したものは 83 t~88,400 t である。撓みは熔接ままが 36~42 mm。後熱すると 48~55 mm になっており、この値はアーク熔接継目の強度として良好な成績であると思う。頭面の硬化メタルは熔着量も少量であるためと思われるが破断強度にあまり影響を及ぼすことなく低水素系棒による地盛り熔接を良好に施工すれば 4 種類の中のいずれを用いても、破断強度に極端な優劣はないようであり、充分に実用できる値である。

しかし強度は充分であっても Photo. 3 に見られるように Mn オーステナイト鋼やマルテンサイト鋼などでは硬化メタルと地盛り熔着鋼との境界に亀裂を生じ剥離を起した。このような亀裂の原因を考察すると、Mn オーステナイト鋼 (Photo. 4 a) は 260 °C 以上の加熱によって粒界および粒内に Mn 鉄炭化物を析出し、特に 540~870 °C では短時間で脆化する²⁾傾向がある。このためにその特性である靱性を低下する。また、母材との境界部は Mn が稀釈されて融合部の近傍のオーステナイトは不安定になり Photo. 4 (b) に示すマルテンサイトなどを生ずる。この組織は脆弱なために母材と熔着鋼の熱膨脹係数の相異により生ずる収縮応力によって亀裂を生じ、ことに

Fig. 3 Distribution of hardness in head surfaces of heat treated rails by manual arc welding

Photo. 3 Examples of breaking surface on fracture test of each hard surfacing rails

外力が作用するときには剥離現象を起すことになる。またマルテンサイト鋼の場合はマルテンサイト+残留オーステナイト組織 (Photo. 4 c) であるが多層盛りの場合、下層の熔着鋼は加熱されて焼戻しされマルテンサイト (Photo. 4 d) を形成する。かかるマルテンサイトは脆弱であるうえに低温で急激な膨脹を起すために熔融線に亀裂を生じ剥離の原因となるようである。

以上により、破断強度は低水素系熔接棒で地盛り熔接を行えば満足できる値のものが得られるので、頭面硬化メタ

ルの欠陥がない熔接継目を得るにはレール頭面の硬度 (308~390 Hv) と同程度が、やや低い硬度を有する低 Cr 鋼を用いればよい。なお中 Mn 鋼では硬度が低く適当でない。

2) レール頭部の硬度と組織におよぼす熔接と後熱の影響

硬度試験は熔接のままと後熱をした熔接レール材 (低 Cr 鋼で頭面硬化) について、頭面の中央線上の硬度変化をピッカース硬度計で測定し、それぞれの硬度曲線として Fig. 3 に示した。

測定の結果では、熔接ままのときは熔融線から 10 mm 範囲のレール頭面は硬度の低下が著しいが、熔融線よりの距離が 20 mm 以上ではほとんど熔接の熱影響はないと見なされる。これは Fig. 4 に示すような熔接時における頭部の温度状況を熔融線から 5 mm おきに測定して求めた最高温度曲線との関係を見れば、熔融線から 10 mm 範囲は A₁ 変態以上の温度になるが、20 mm 位置では 550°C であって、レール頭部の熱処理時の焼戻し温度には近い。

Fig. 4 Relation between max. temperature and hardness in as welded rail head

Photo. 4 Micro structures of hard surfacing metal

Photo. 5 Micro structures of each zone in welded rail

程度の状態である。この試料を顕微鏡で観察した結果、熱影響部 (250 Hv) は結晶粒の小さなパーライト組織に変化しており、熔融線より 20 mm 位置では Photo. 1 のソルバイト組織と大差ないものであった。

熔融線から 100 mm 範囲を後熱処理した熔接レールの場合、Fig. 3 の硬度曲線の傾向では後熱範囲が一様に軟化して 270~280 Hv になっている。熔融線から 50 mm 離れた位置のレール材組織を Photo. 5~① に示したが、軟化部は全般にこれと類似の組織で、カーバイトがかなり粒状化したソルバイト組織である。この組織は先の Photo. 1 に掲げたレール頭部の組織と比較して、それほど変化しているようには見えないが、レール頭部の熱処理時は約 500 °C の焼戻しであり、後熱温度がそれよりも約 100 °C 高いので、Photo. 1 の標準組織よりさらに焼戻しされた組織であることは間違いないが、普通レールの頭部がパーライト組織で硬度も 250~270 Hv 程度であるのと比較して、焼入レールの後熱軟化部は硬度が 270 Hv 程度まで低くなっているにもかかわらず耐磨耗性はそれほど変わっていないことが伺われる。

なおレールの熔接部近傍の母材頭部および熔着鋼の顕微鏡組織の観察を Fig. 5 に示す②~⑤の位置について行い Photo. 5②~⑤ にそれぞれ示した。すなわち、熱影響部のレール材組織②はパーライト組織になっており結晶粒も比較的小さく、レールの標準組織に近い状態まで焼戻しさ

れている。低 Cr 鋼 (頭面硬化メタル) とレール材との融合部③は熔融線が明瞭に現われていてレール材側の結晶粒界にセメントイトが析出しており少々好ましくない融合状態ではあるが、亀裂その他の欠陥の発生は見られない。硬化メタルと低水素系熔着鋼の融合状態④は極めて良好であり、硬化メタル⑤は微小な粒状カーバイトの析出が見られた。

以上のことから、継目を熔接した場合、熔接ままのものは熔融線より 10 mm 範囲のレール頭面が熱影響により軟化してパーライト組織 (250 Hv 程度) になるが、その他に問題点はなく、後熱したものはその範囲全体が軟化して 270~280 Hv となるが、ソルバイト組織であって焼入レール頭面の標準組織に比して極端な変化はなく、耐磨耗性もあまりそこなわれていないだろうと考えた。

3) タイヤ路面における熔着鋼の加工硬化とレールの後熱軟化部の再硬化

敷設試験用として長さ 12 m で中央に熔接継目を有する 50 kg 焼入レール (新品) を 1 本製作した。この熔接レールを直線水平区間に敷設し通過荷重 35,000 ton/day 速度 20 km/hr の条件で 80 日間に亘って列車を通した。この間ショアー硬度計により硬化メタル (低 Cr 鋼) とレールの後熱軟化部についてタイヤ路面の硬度変化を測定した結果 Fig. 6 の硬度曲線を得た。この曲線の傾向を見ると硬化

Fig. 5 Positions of micro-scopical examination in rail head

Fig. 6 Hardness changes of head surface in post-heated weld and base metal with the construction test. (load of train passes ; 35,000 ton/day)

Fig. 7 Hardness of head section in weld and base metal after 80 day constructed

メタルおよびレール材とも敷設後の数日に急激に硬化が進み、以後は僅かづつ硬化して80日を経たときは両者とも44Hs (310 Hv) 以上にまで冷間加工をうけて硬度が上っている。

80日間の敷設試験を終った後、レールを取りはづして熔着鋼の中心と熔融線より 50 mm 離れた位置のレール材について、それぞれの頭部の横断面における硬度を Fig. 7 に示す要領で a～e 線の位置を定め、図解した箇所を測定した。

その結果は Fig. 7 に示すように、横断面の硬度は頭面からの距離が浅いほど、タイヤ踏面側の硬化が著しく、また、同じ深さの位置ではタイヤ接触点の下が最も硬化する傾向がある。なお、熔着鋼部は頭面より 8 mm 深さの C 位置までは、かなり加工硬化の影響を受けているがレール材の場合はレールの硬度そのものが熔着鋼よりも高いためか、それほど著しい影響はなく加工硬化は頭面より 2 mm 位である。

本実験は後熱した熔接継目のレール材軟化部や熔着鋼が実際に列車を通した場合、短期間でどのくらい硬度変化を生ずるかを確かめたのであるが、通過荷重や速度は本実験の条件が必ずしも他の場合に当てはまらないので常にこのような硬化の傾向になると断定できないが、敷設したレールでは冷間加工による硬化の程度に大小はあっても実用しているうちに熔着鋼や後熱軟化部の硬度が増してくることを考慮すれば後熱で軟化部を生ずることもそれほど、問題視しなくてよいと思われる。

4) 長期の敷設試験における熔接レールの磨耗量

前述の実験でおおむね焼入レールの熔接継目が実用に耐える見透しを得たので、36 m の熔接レールを 4 本製作して構内幹線 (年間に 820 万 ton の通過量で速度 15～20 km/h) の 350 m 直線区間、15/1000 の上り勾配に敷設して実用試験を続けているが、2年3ヶ月を経た後のレール母材と後熱軟化部 (熔融線より 50 mm の位置) および熔

Table 3 Abrasion Length of Welded Rail after Construction Test of 2 1/2 Years

	Rail		Welded zone (Hard surfacing metal)
	Base metal	Post heated zone	
Abrasion length	1.6 mm	1.7 mm	2.0 mm

着鋼部 (硬化メタル) のタイヤ踏面側の磨耗量を Fig. 8 に示す要領で測定した結果は Table 3 の値であった。

この結果からみると、レール母材と後熱軟化部は特に磨耗量に差異はなく、熔着鋼の頭面硬化メタルの部分はややレール材に比して磨耗していると思われるが、局部磨耗といえるほどのものではない。

硬化メタル部がこのような結果になったのは、使用した低 Cr 鋼が Table 2 に示した中の Cr 1.22% 程度の成分であったので、その硬度は加工硬化しても 300 Hv 以上にはならなかったためで、これよりも Cr% の高いものを用いれば充分に防止できるものである。直線区間と曲線区間とではレール全体のタイヤ踏面の磨耗量には違いを生ずるであろうが、たとえ曲線区間であっても、熔接継目の局部磨耗は起らないだろうと云うことを本実験の結果から推定できる。

なお敷設試験は今後も継続するのであるが現在の磨耗量 (年間 0.8～1 mm 程度) からみて、磨耗量 8 mm に達するまでは、これから長年月は、このまま実用できる見透しである。

4 結 論

以上の実験の結果を要約すれば、

1) アーク熔接法で焼入レールの継目熔接を行うときは、高張力鋼用の低水素系熔接棒で底・腹の全部と頭部の大部分を地盛り熔接して頭面約 10 mm 厚さだけ頭面硬化の肉盛熔接をすれば接合強度の良好なものが得られる。

2) 頭面硬化メタルに硬度の高い Mn オーステナイト系またはマルテンサイト系熔接棒を用いて肉盛熔接をした場合には、母材や地盛り熔接鋼との熔融線にそって亀裂を生じ剝離するので、これらの特殊棒を用いるのはよくない。

頭面硬化の熔接棒としては熔着鋼の硬度がレール頭面の

Fig. 8 Measuring method of abrasion loss

硬度 (308~390 Hv) と同程度で亀裂を生じない低 Cr 鋼がよい。

3) 継目を熔接したレール材の頭面硬度は、熔接ままだでは熔融線から 10 mm 範囲だけ A_1 変態温度を越える熱影響をうけて軟化 (250 Hv) し、パーライト組織を生ずるが、熔融線から 20 mm 以上の位置になれば頭面硬度は変化がない。

600 °C 30 分の後熱をしたものは、その範囲全体が 270 ~280 Hv 程度まで軟化する傾向があるが、組織はソルバイトであって母材の標準組織に比して、それほど変化はないようである。

4) 80 日間の敷設試験 (通荷荷重 38,000 ton/day) の結果では、熔着鋼および後熱によるレール軟化部のタイヤ踏面の硬度は、冷間加工で 310 Hv 以上に増した。また両者の頭部横断面の硬度は車輪側、特にタイヤ接触点の下が頭面より 2 mm 深さまで著しく冷間加工の影響をうけている。

5) 2 ケ年以上に亘って列車通過量 820 万 ton/year, 速

度 15~20 km/h で 15/1000 の上り勾配の 350 m 直線区間に敷設した熔接レールの磨耗量はレール母材が 1.6 mm, 後熱軟化部が 1.7 mm であって、とくに形状磨耗に変化はなく、熔着鋼 (硬化メタル) の箇所では 2.0 mm であり熔接継目の局部磨耗は見られない。このレールは今後も長年にわたって実用できる見通しである。

従って、継目を熔接した焼入レールは、熔接のままで用いる場合には頭面の磨耗で、ことさらに問題とする点はないが、接手強度とくに撓みは、後熱したものよりも劣るので安全性を考慮すれば後熱を行ったほうがよく、そのための局部磨耗は起らないことは確かである。

文 献

- 1) 守田, 伊藤, 米井, 藤本「アーク熔接法によるレール継目の接合に関する研究」(第 1 報) 熔接学会誌 27 巻 2 号 (1958) 49
- 2) A. W. S., "Welding Handbook" p. 672 (Third edition).

投 稿 規 定 抜 萃

1. 原稿の種類 熔接工学または技術に関する下記のもの、④論文および報告 ⑤掲載論文に対する討論 ⑥技術資料, 講義および解説
3. 論文および報告はすべて寄稿者の創意にもとづき、いまだ他の学協会誌に掲載されたことのないものに限る。
5. 文体は和文 (国語体) とし、なるべく内閣制定の当用漢字, 現代仮名づかいによること。また仮名は平仮名, 数字はアラビア数字, 適当な邦語がない外国語は片仮名または原語で記すこと。
6. 論文および報告には必ず欧訳題目を附し、また欧文摘要 (タイプ書とする) をも附すること。ただし摘要は 800 語以内および 100 語以内の 2 種類を添附のこと。
7. 論文および報告は図表を加えて会誌 6 頁を超えないこと。やむをえず超過する場合は印刷費の一部として 1 頁につき 2000 円を著者が負担するものとする。ただし 10 頁を超えないこと。
8. 図, 写真, 表はなるべく少しく同一事項を図表両方にて表わすことをさけ、次の要領に従うこと。
 - i) 挿図はなるべく会誌 8 面以内 (幅最大 140 mm) に縮少し得るよう、文字および線の太さに注意し挿入の箇所をあらかじめ原稿に指定のこと。
 - ii) 図表には必ずその内容を表示する簡単な見出しをつけ、欧文とすること。
 - iii) 挿図はそのまゝ、縮尺しうようなるべくトレーシングペーパー, オイルペーパー, トレーシングクロス等に墨色で記入し図中文字も墨書すること。またインキ類あるいは彩色を施さないこと。
 - iv) 方眼紙は青緑のものをを用い縦横線を必要とする部分にはあらかじめ罫線でこれを記入のこと。
17. 原稿の送附は大阪市都島区東野田町九丁目大阪大学工学部熔接工学教室内熔接学会編集幹事会宛のこと。